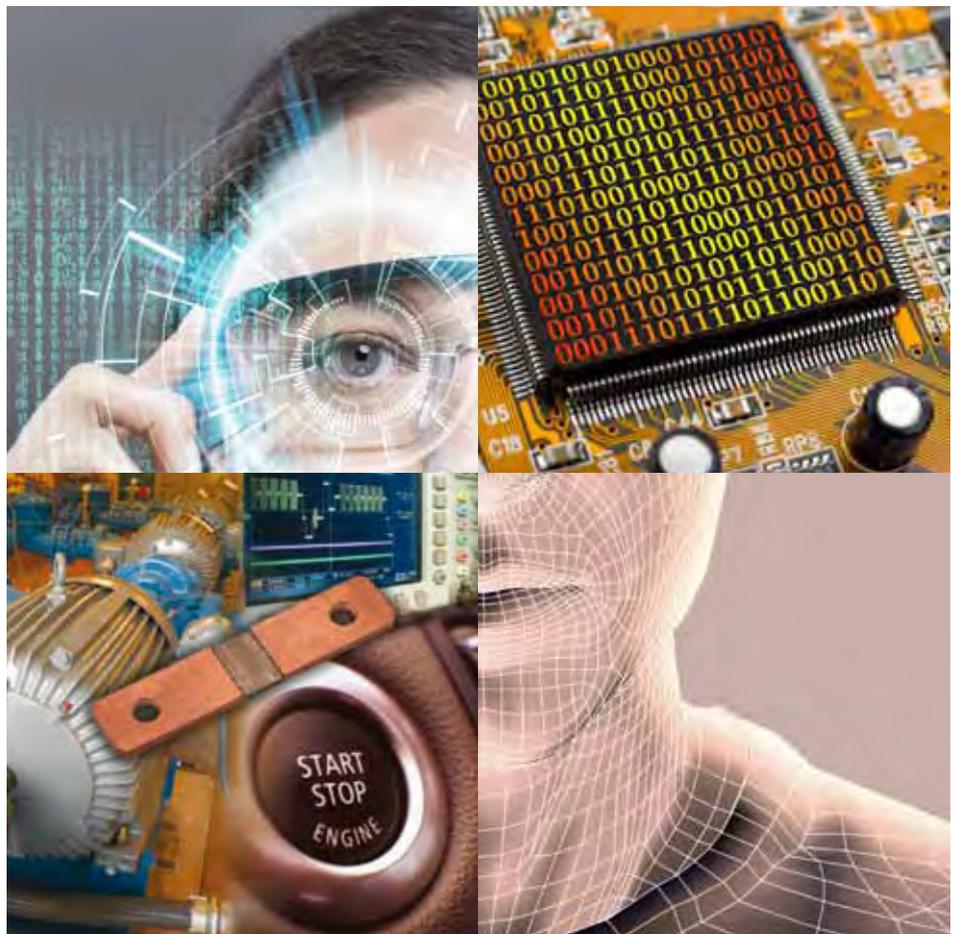


Technologie-Roadmap „Next Generation“

Elektronische Komponenten und Systeme





Die Elektroindustrie

Technologie-Roadmap „Next Generation“

Herausgeber:

ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-
und Elektronikindustrie e. V.

Fachverband Electronic Components and Systems

Fachverband PCB and Electronic Systems

Lyoner Straße 9

60528 Frankfurt am Main

Verantwortlich: Volker Kaiser

Telefon: +49 69 6302-280

E-Mail: kaiser@zvei.org

www.zvei.org

August 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt.

Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Herausgebers unzulässig.

Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzung, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Inhalt

Vorwort	4
1 Megatrends	8
2 Regulatorische Einflussfaktoren und ihre Auswirkung auf die Elektroindustrie	12
3 Software	22
4 Mikroelektronik/Halbleiter	26
5 Mikrosystemtechnik (MST) – Sensoren/Aktuatoren	58
6 Passive Bauelemente	82
7 Elektromechanische Bauelemente	112
8 Leiterplatten	150
9 Integrierte Schichtschaltungen (ISS)	172
10 Elektronische Baugruppen	198
11 Materialtrends	232
12 Applikationsfelder/Anwendungsfelder	252
13 Produktentwicklung/Produktentstehung	296
14 Geschäftsmodell – Innovationsfeld der Zukunft	314
15 Fördermittel für Innovationen – Forschung, Entwicklung und Markteinführung	322
16 Forschung und Bildung – Investitionen in Köpfe und Zukunft	330
17 Schlusswort	331
18 Redaktionsteams	332
19 Literaturverzeichnis	334



Quelle: sashkin / Fotolia.com

Im Zeitalter von „X-4.0“ und „Internet der Dinge“ mag es schwierig erscheinen, Meilensteine der Technologie chronologisch aufzuzeigen. Eher das Gegenteil ist der Fall – vieles scheint an einem vorüberzufliegen oder irgendwann einfach da zu sein, ohne vorherige Anzeichen einer Entstehung oder einer evolutionären Vorgeschichte. Es ist natürlich auch der Blickwinkel, der mitunter wesentlich die Position zu all dem beeinflusst und somit dazu beiträgt, welches Bewusstsein der eine oder andere entwickelt.

Klar ist jedoch, dass man sich dem Fortschritt und allem, was damit verbunden ist, nicht verschließen soll oder kann. Das gilt insbesondere für die Industrie; sie ist sowohl Antreiber als auch Nutznießer des Ganzen. Betriebswirtschaftlich betrachtet, ist es absolut unabdingbar, bei Neuerungen rechtzeitig auf den richtigen Zug aufzuspringen, um damit den zukünftigen Erfolg eines Unternehmens oder einer Branche zu sichern. Der Leitsatz „Stillstand ist Rückschritt“ formuliert es hier treffend, denn wer auch nur einen Zyklus verpasst, wird es schwer haben wieder aufzuholen.

Genau hier setzt diese „Roadmap“ an – Schlagworte wie „Früherkennung“, „Megatrends“ und „Technologietrends“ bezeichnen die Rahmenbedingungen, die erkannt und begriffen sein müssen, um den bereits erwähnten „Zug“ nicht zu verpassen, sondern sogar „Erster Klasse“ zu reisen.

Nachhaltigkeit ist ebenfalls nicht nur gefordert, sondern ein existenzielles MUSS. Denn was hilft die beste Technologie, wenn ihr morgen schon die Ressourcen ausgehen oder wenn der demografische Wandel sie nicht zur entsprechenden Akzeptanz reifen lässt.

Damit kommen wir zu einem weiteren Begriff, der „Volkswirtschaft“. In diesem Zusammenhang stehen unweigerlich Themen wie „Urbanisierung“, „Energie & Klima“, aber auch das ihr eigene Streben nach dem Gleichgewicht in verschiedener Hinsicht im Vordergrund.

Verlassen wir nun die Makrobetrachtung und wenden uns dem eigentlichen Kontext der „Technologie-Roadmap“ zu. Hauptaufgabe und Ausrichtung ist die Früherkennung unternehmerischer Chancen und Risiken unter Einbindung neuer Geschäftsfelder und Märkte. Hierfür braucht es nicht nur das richtige Fingerspitzengefühl, sondern vor allem Werkzeuge, mit denen sich auf Basis von Fakten Trends herausarbeiten, Handlungsoptionen aufzeigen und Prioritäten definieren lassen. Ausgehend von einem „Stand der Technik“ können Prognosen über Art, Geschwindigkeit und Richtung möglicher Technologieentwicklungen getätigt und somit die Grundlage für die richtigen Entscheidungen gelegt werden.

Es sei nun aber auch die Frage erlaubt, warum sich gerade der ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. diesem Thema so ausführlich widmet und mit dieser Schrift bereits zum vierten Mal Aussagen zu technologischen Trends macht. Um dieses zu beantworten, sei zunächst ohne Zweifel formuliert, dass elektronische Bauelemente und Baugruppen einen großen und wesentlichen Beitrag zum technischen Fortschritt leisten. Es gibt nur noch wenige technische Produkte, die nicht in irgendeiner Weise durch Elektronik gesteuert werden, wenn sie nicht schon sogar komplett eingebettet sind in die sogenannte „Connected World“. Die Verbindung zwischen Makro- und Mikrowelt trägt hier entscheidend zur Komfortverbesserung bei.

rung unseres täglichen Lebens bei. Eine immer wichtigere Rolle spielt hier auch Software, die als neues Hauptthema mitaufgenommen wurde.

Die Autoren der beiden Fachverbände „Electronic Components und Systems“ sowie „PCB und Electronic Systems“ tragen in dieser Ausgabe aber auch weiteren Herausforderungen Rechnung. So werden systematisch die Märkte und die damit verbundenen Faktoren auch mit nicht technologischen, aber nicht minder wichtigen Themen verbunden. Politische Wegbereitung durch zum Beispiel die Gewährung von Fördergeldern, aber auch unvermeidbare Trends der „Urbanisierung“, gepaart mit einer sich verändernden „demografischen Entwicklung“, werden ebenso dargestellt wie auch die Notwendigkeit eines angepassten Bildungssystems, um die zukünftigen Fachkräfte bestmöglich auf die „Welt von morgen“ vorzubereiten. Es galt und gilt also weiterhin der Grundsatz eines „umfassenden und ganzheitlichen“ Ansatzes, aber nach wie vor mit der Prämisse des erforderlichen Detaillierungsgrads.

Unter Betrachtung dieser Wechselwirkungen und unter Einbeziehung einer Vielzahl von Faktoren veranschaulicht diese 4. Ausgabe einmal mehr, wie komplexe Themen, trotz der hohen Fortschrittsgeschwindigkeit, doch verständlich dargestellt werden können. Der Inhalt stellt das Ergebnis einer über zwei Jahre andauernden Arbeit auf Basis des Engagements einer Vielzahl von Experten dar. Der Verband, aber auch der Vorsitz des Gremiums der „Technischen Kommission“ möchte sich an dieser Stelle insbesondere bei allen aktiven Autoren bedanken.

Welt-Elektromarkt: Ausblick elektronische Bauelemente

Im Jahr 2017 erreichte der Weltmarkt für elektronische Bauelemente – nach vorläufigen Berechnungen – ein Volumen von 989,9 Milliarden Euro. Dies sind 9 Prozent mehr als im Jahr 2016. Für das laufende und das kommende Jahr erwartet der ZVEI Zuwächse von +6 bzw. +4 Prozent (Prognosen zu konstanten Wechselkursen des Jahres 2010). Getragen wird das Wachstum – wie schon in den Vorjahren – wohl insbesondere von China, das 2017 mit 549,8 Milliarden Euro für 55,5 Prozent des Weltmarkts stand. Für die Volksrepublik könnte sich eine Zunahme des heimischen Markts von +9 Prozent 2018 und +6 Prozent 2019 ergeben. Deutlich verhalten sind dagegen die Erwartungen für die Entwicklung in Japan, dem mittlerweile zweitgrößten Einzelmarkt (Markt 2017: 90,0 Milliarden Euro, 9,1 Prozent Weltmarktanteil), mit +3 Prozent in diesem Jahr und +2 Prozent im kommenden Jahr. Der südkoreanische Markt für elektronische Bauelemente – 2017 mit 87,2 Milliarden Euro und einem Anteil von 8,8 Prozent der drittgrößte weltweit – dürfte 2018 und 2019 jeweils um 1 Prozent abnehmen. In Deutschland könnte der Markt, der mit 19,3 Milliarden Euro und einem Weltmarktanteil von 1,9 Prozent die siebte Position – hinter den USA, Taiwan und Malaysia – im Länderranking einnahm, mit +5 Prozent in diesem und +2 Prozent im kommenden Jahr weiter wachsen.

Tab. 0.1: Märkte nach Regionen

Märkte	2016 in Mrd. €	2017 in %	2018 in %	2019 in %
Welt	910,7	9	6	4
Industrieländer	338,5	4	2	1
Schwellenländer	572,2	12	9	6
Europa	72,9	6	4	2
davon EU	64,6	6	4	2
Amerika	86,6	5	4	3
Asien	738,2	10	7	5

Quelle: ZVEI, eigene Darstellung

Abb. 0.1: Entwicklung Weltmarkt elektronische Bauelemente



Veränderungsraten bis 2016 zu laufenden, Hochrechnung 2017 und Prognosen ab 2018 zu konstanten Wechselkursen

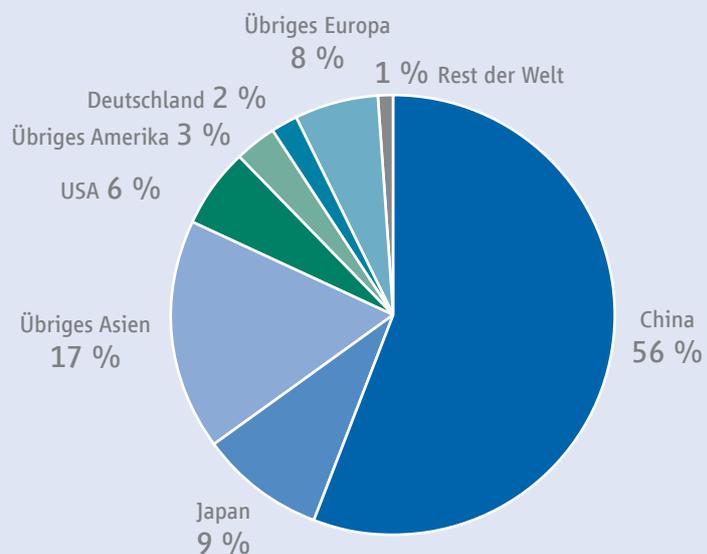
Quelle: Nationale Statistische Ämter und ZVEI-eigene Berechnungen

Mehr als vier Fünftel des Weltmarkts für elektronische Bauelemente entfallen mittlerweile auf Asien, das in diesem Jahr mit einem Zuwachs von +7 Prozent und im kommenden Jahr von +5 Prozent mit den höchsten Zuwachsraten aller Kontinente rechnen kann, während Europa insgesamt +4 bzw. +2 Prozent verhaltener wachsen dürften. Auch Amerika mit +4 Prozent 2018 und +3 Prozent 2019 könnte in beiden Jahren geringere Wachstumsraten verzeichnen. Die EU-Länder bleiben ebenfalls mit +4 bzw. +2 Prozent in ihrer Dynamik erneut weit hinter Asien zurück.

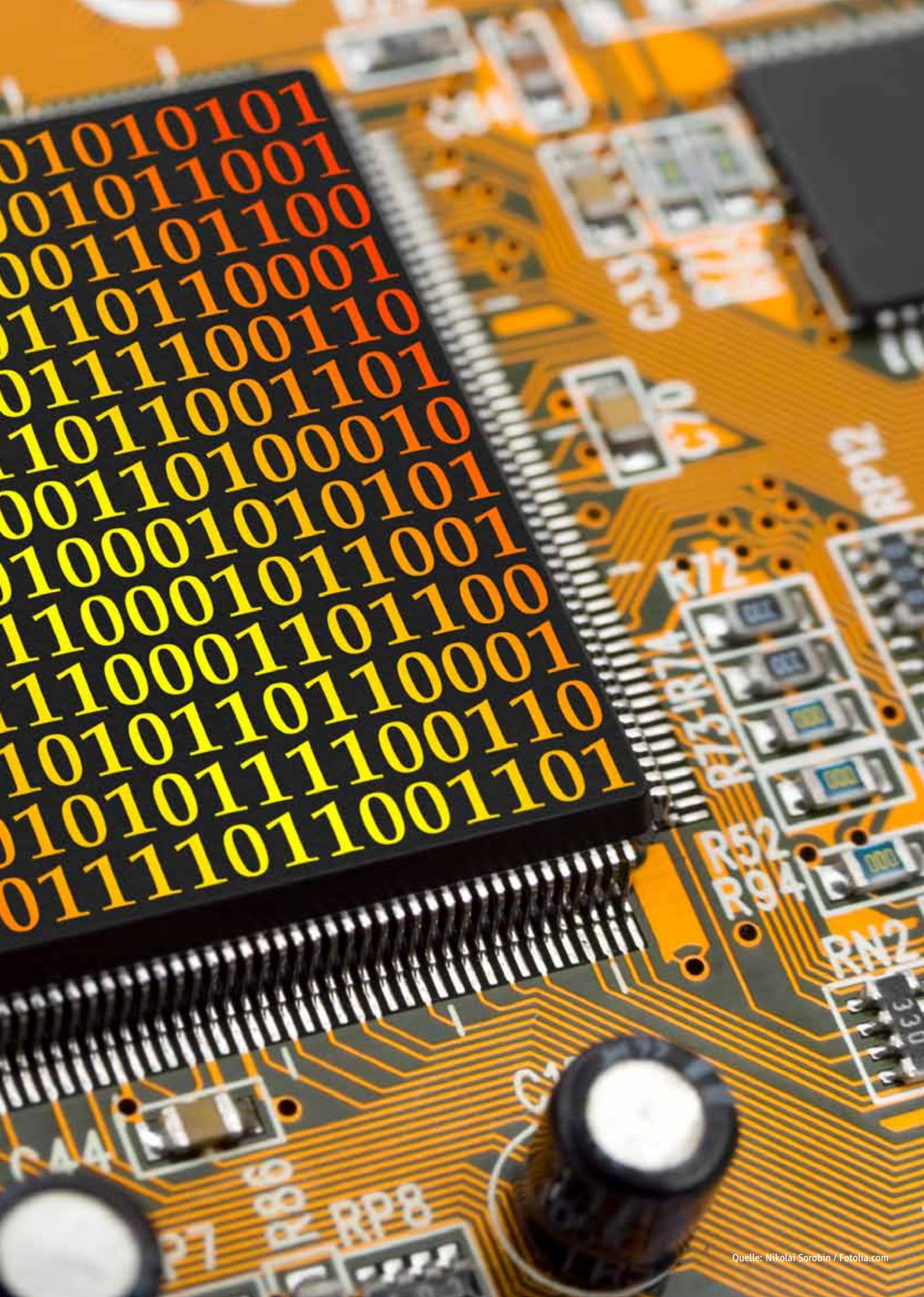
Der Markt für elektronische Bauelemente in den Schwellenländern (nach IWF-Abgrenzung) erreichte 2017 ein Volumen von 639,1 Milliarden Euro (+12 Prozent gegenüber 2016) und war damit deutlich größer als der in den Industrieländern mit 350,8 Milliarden Euro (+4 %). Für die Schwellenländer erwartet der ZVEI in diesem Jahr ein Marktwachstum von +9 Prozent und im kommenden Jahr von +6 Prozent. Deutlich verhaltener könnte der Zuwachs in den Industrieländern mit +2 Prozent 2018 und +1 Prozent 2019 ausfallen.

Abb. 0.2: Weltmarkt elektronische Bauelemente

Anteile nach Ländern/Regionen 2017



Quelle: Nationale Statistische Ämter und ZVEI-eigene Berechnungen



01010101
001011001
001101100
0110110001
0111100110
1011001101
00110100010
10001010101
110001011001
110001101100
1010110110001
01010111100110
01111011001101

1 Megatrends



Quelle: Michael Lisi / Fotolia.com

Die Wissenschaft nennt maßgeblich vier Megatrends, die unser Miteinander bestimmen und die erhebliche Wirkungen auf Innovationen und deren Geschwindigkeiten aufweisen. Megatrends sind jene Trends, die einen großen und epochalen Charakter haben und über einen Zeitraum von Jahrzehnten beobachtbar sind. Diese Trends bewirken – anders als Schätzungen oder Prognosen – tiefgreifende Veränderungen der Welt, stetig und unwiderruflich. Sie verändern nicht einzelne Segmente unseres politischen oder sozialen Lebens und Wirtschaftens, sondern ganze Gesellschaften. Ihre spezifischen Ausprägungen unterscheiden sich dabei von Region zu Region.

Der Megatrend **Globalisierung** ist ein seit vielen Jahren beobachtbarer Megatrend, der untrennbar mit dem Subtrend **Mobilität** und der zunehmenden Nutzung des Internets einhergeht. Der Kapital-, Waren- und Personenverkehr in Verbindung mit extrem schneller Kommunikation erreicht nie zuvor da gewesene Größenordnungen.

Der wirtschaftliche Aufstieg von Schwellenländern bietet neue, große Absatzmärkte und zugleich weitere Wettbewerber. Die weltweite Markterschließung ist begleitet von Innovationsprozessen, vom Zwang der nationalen Betriebe, sich international orientieren zu müssen, und von Arbeitskräften, die auf internationale Märkte strömen. Internet, Vernetzung und moderne Kommunikationsmittel tragen dazu bei, dass nationale Strukturen an Bedeutung verlieren und in internationalen aufgehen. Wissen konzentriert sich in unterschiedlichen Regionen, Produktlebenszyklen werden kürzer, der Zwang zur schnelleren ständigen Innovation wird zur Herausforderung – auch für die Bauelemente und Systeme der Elektrotechnik und Elektronik.

Der Megatrend **Demografischer Wandel** wird in vier Subtrends unterteilt:

- Alterung der Gesellschaft,
- wachsende Weltbevölkerung,
- Gesundheit und
- zunehmende Verstädterung („Urbanisierung“).

Altern und Schrumpfen der Bevölkerung in Industrieländern stehen insgesamt kräftiges Wachstum, höhere Migration innerhalb der Weltbevölkerung und sich verschiebende Konsumnachfrage gegenüber.

Prognosen sagen, dass die Weltbevölkerung bis 2030 von heute 7,5 Milliarden auf etwa 8,8 Milliarden Menschen wächst, die um fünf Jahre älter werden und zu 60 Prozent in Städten leben.

Der Subtrend **Gesundheit** ist gekennzeichnet durch eine weltweit steigende Lebenserwartung der Menschen sowie ein erweitertes Gesundheitsbewusstsein und zunehmende Selbstverantwortung. Das Gesundheitswesen, das mittlerweile schon einen Anteil von 10 Prozent am globalen Sozialprodukt hat, steht unter hohem Kostendruck und vor einem weiteren Wandel angesichts der demografischen Entwicklung. Dies führt zu wachsenden Märkten für die Elektrotechnik/Elektronik sowohl in Medizintechnik und Diagnostik durch Fortschritte in der Miniaturisierung, Energieeffizienz und Konnektivität als auch im Gesundheitsmanagement mit dem Ziel einer gesünderen Lebensweise.

Subtrend **Urbanisierung**: Die Zahl der Städte und ihre Größe wachsen weltweit wegen der rasanten Urbanisierung in Schwellenländern, aber auch der fortschreitenden Urbanisierung in den entwickelten Regionen dieser Welt.

Es leben schon heute ca. 55 Prozent der Weltbevölkerung in Städten, und diese Zahl wird auf bis zu 70 Prozent im Jahr 2050 anwachsen. Daraus ergeben sich für die Elektrotechnik/Elektronik unter anderem Chancen beim effizienten Management der Infrastrukturen und den Gebäuden („Smart Citys“) sowie bei multimodalen Mobilitätskonzepten und emissionsfreien Antrieben für die Mobilität in Megacitys.

Der Megatrend **Nachhaltigkeit** umfasst die Subtrends:

- Ressourceneffizienz,
- Umweltschutz und
- soziale Standards.

Die Endlichkeit fossiler Brennstoffe und die hohe Umweltbelastung, die mit ihrer Nutzung verbunden ist, fordern klimagerechte Energieerzeugung und nachhaltige Umwelttechnologien. Gleiches gilt für endliche Vorräte einzelner Rohstoffe, wie zum Beispiel Lithium und Seltene Erden. Gleichzeitig wird Nachhaltigkeit durch das Setzen sozialer Standards für die menschliche Arbeitskraft erzielt.

Eine Konsequenz ist unter anderem die weitere Elektri- und Elektronifizierung unserer Technik und Technologien. Perspektiven für die Elektronik sind: neue Materialien für Umwelteffizienz, neue Antriebskonzepte sowie neue Technologien zur Kraftstoffreduzierung und optimalen Energiespeicherung. Dafür sind Investitionen in Umwelttechniken, Mikrosystemtechniken und elektronische Bedarfssteuerungen in beispielsweise Automobile, Maschinenbau und Elektrotechnik erforderlich. „Smart Home“, „Smart Grid“, „Smart Cars“ lauten hier die aktuellen Stichworte, die Herausforderungen an elektronische Komponenten, an sehr hohe Übertragungsraten oder auch für höchste Ströme („Leistungselektronik“) stellen.

Der Megatrend **Digitalisierung** geht mit den Subtrends:

- Miniaturisierung,
- neue Technologien,
- Internet der Dinge,
- Big Data und
- branchenübergreifende Kooperationen einher.

Die Erhöhung der Prozesseffizienz durch Digitalisierung, neue Materialien für leistungsfähigere Prozessoren und Speicherelemente sowie die Vernetzung und Steuerung verschiedener Produkte durch weiterentwickelte Mikrosystem- und Internettechnologien führen zu immer kleineren, komplexeren und intelligenteren elektronischen Systemen. Die Mikrosystemtechnik ist auch der

Schlüssel zur Nutzung der Entwicklungen im Bereich der Nanotechnologien. Voraussetzung dafür sind standardisierte Schnittstellen, die ein Miteinander der Systeme erst ermöglichen. Das Internet der Dinge wird zu einer dramatischen Zunahme an Daten führen, die mittels „Big Data“-Methoden in verwertbare Informationen transformiert werden. Dies wiederum führt zu einer Vielzahl an neuen Geschäftsmodellen vor allem im Bereich der (Daten-)Services und zu zunehmender Kooperation von Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette.

1.1 Urbanisierung und demografische Entwicklung

In den großen Städten konzentrieren sich Personal und Kapital. Sie sind daher oft Innovationstreiber, Wachstumsmotoren und Zentren der Produktivität und wirken als Magnet für weiteren Zuzug. Die Urbanisierung schreitet daher seit Jahren ungebremst voran. Zur Jahresmitte 2018 lebten 4,2 der insgesamt 7,6 Milliarden Menschen weltweit in Städten.

GlobalData meldete Anfang 2018, dass etwa 8,2 Prozent der Weltbevölkerung in 35 Städten mit mehr als zehn Millionen Einwohnern leben, die etwa 14 Prozent des weltweiten Bruttoinlandsprodukts repräsentieren. 1990 gab es erst zehn dieser Megacitys. Besonders schnell wächst die Stadtbevölkerung bis 2025 in Zentralasien und Afrika mit Schwerpunkt China, Indien und Nigeria, sodass dort bis dahin eine ganze Reihe Städte die Zehn-Millionen-Grenze überschreiten werden. Viele dieser Städte werden voraussichtlich von Menschen bewohnt werden, die mit sehr niedrigem Einkommen auskommen müssen.

Bis zum Jahr 2030 werden laut Statistischem Bundesamt mit 5,2 Milliarden rund eine Milliarde Menschen zusätzlich in Städten wohnen. Der Anteil der Stadtbewohner soll dann bei 60 Prozent (2018: 55 %) der Weltbevölkerung liegen. Die höchsten Wachstumsraten werden in den Regionen Afrika, Asien (Indien wächst schneller als China) und im Mittleren Osten erwartet, aber auch Lateinamerika verstädert schnell weiter.

Die ländliche Bevölkerung wächst nach UN-Prognosen bis etwa 2025 auch noch etwas weiter und soll dann bis 2050 auf 3,1 Milliarden Menschen sinken.

Die Konzentration der Bevölkerung in Megastädten bietet die Chance, Infrastruktur sowie Güter und Dienstleistungen mit vergleichsweise geringem Aufwand pro Kopf bereitzustellen. Gleich-

zeitig kämpfen diese Ballungszentren häufig mit drängenden Problemen, die eine nachhaltige und ressourcenschonende Entwicklung erschweren. Dazu gehören die Versorgung mit sauberem Trinkwasser, die umweltfreundliche Entsorgung von Abwasser und Abfällen, steigende Kriminalitätsraten und Wohnungsmangel, eine nicht sichergestellte Wasserver- und Abwasserentsorgung und nicht zuletzt Energieversorgungsengpässe, Smog und überlastete Verkehrswege.



Quelle: lassedesignen / Fotolia.com

1.2 Bevölkerungswachstum und alternde Gesellschaft

Nach der US-Statistikbehörde lag 2015 der Anteil der über 65-Jährigen an der Weltbevölkerung bei 8,5 Prozent, bis 2050 soll er auf 20 Prozent steigen. Bereits 2020 soll es mehr Personen im Alter von über 65 Jahren geben als im Alter von unter fünf Jahren. Experten erwarten, dass diese Umschichtung der Gesellschaft weitergehen und insbesondere in Ländern Asiens und Lateinamerikas beschleunigt voranschreiten wird.

Anfang 2018 lebten über 7,5 Milliarden Menschen auf der Erde. Besonders stark wächst dabei die Bevölkerung in Afrika, Indien und China. Hochrechnungen gehen davon aus, dass sich die afrikanische Bevölkerung zwischen 2018 und 2050 auf 3,53 Milliarden Menschen verdoppelt und schon 2028 in Indien mehr Menschen leben werden als in China.

Die UN rechnen mit einem weiteren Wachstum der Weltbevölkerung und erwarten in einer Prognose aus dem Jahr 2017 für 2020 7,8 Milliarden und für 2030 8,88 Milliarden Menschen auf der Erde.

Auch die Bevölkerung in Deutschland wird nach einer Prognose des Instituts der deutschen Wirtschaft aus dem Jahr 2016 in den Jahren nach 2018 zunehmen. Das Institut rechnet bis 2035 mit 83,1 Millionen Einwohnern, wobei der Osten weiter Einwohner verlieren soll.

1.3 Klimawandel

Ende 2015 wurde das Paris-Protokoll als Nachfolger des Kyoto-Protokolls beschlossen, das erstmals auch von China und den USA ratifiziert wurde. Im Zuge dessen hat die EU versprochen, bis 2030 den Ausstoß von Treibhausgasen gegenüber 1990 um mindestens 40 Prozent zu reduzieren. Forderung der Pariser Vereinbarung ist es, die Erderwärmung, die durch menschlich verursachte (anthropogene) Treibhausgase verursacht wird, auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen, Wunschziel sind 1,5 °C. Der Zwei-Grad-Celsius-Wert ist aus Sicht vieler Wissenschaftler der maximale Temperaturanstieg, bei dem die Veränderungen durch den Klimawandel noch steuerbar sind, ein höherer Wert wiederum würde zu enormen und unumkehrbaren Umweltveränderungen führen.

Mit dem Klimawandel verbunden sind langsam steigende Durchschnittstemperaturen sowie stärkere Klimaschwankungen und häufigere Extremwetter-Ereignisse wie Stürme, Dürren oder Hitzesommer. Infolge der Erderwärmung dürfte das Abschmelzen der Polkappen mit dem dadurch bedingten Ansteigen des Meeresspiegels das bekannteste Problem sein. Und auch wenn dieses Problem Deutschland nur bedingt betrifft, werden auch hier enorme Auswirkungen durch den Klimawandel befürchtet. So hat die Erderwärmung in hiesigen Gefilden beispielsweise eine Veränderung der Niederschlagsmenge und -verteilung zur Folge, was sich direkt auf die Land-, Wald- und Forstwirtschaft auswirkt. Aber auch negative Folgen für die Gesundheit, die Verfügbarkeit von Wasser und Auswirkungen auf die Energiewirtschaft (Kühlwassermangel) werden erwartet.

Die Hauptursache für den Klimawandel ist eine Erhöhung der natürlich vorkommenden Treibhausgase in der Atmosphäre, wodurch der Treibhauseffekt verstärkt wird und die Temperatur steigt. Zu den Treibhausgasen zählen insbesondere Kohlendioxid (CO₂), Methan, Distickstoffoxid und fluorierte Gase. Laut EU-Kommission ist CO₂ das am stärksten durch die Menschheit verursachte Treibhausgas, auf das 63 Prozent der Klimaerwärmung zurückgeführt wird. Die CO₂-Konzentration ist laut EU in der Atmosphäre heute um 40 Prozent höher als zu Beginn der Industrialisierung. Die anderen Treibhausgase werden zwar in deutlich geringeren Mengen emittiert, gelten aber trotzdem als besonders klimaschädlich, denn sie halten die von der Erde in den Weltraum abgegebene Wärmestrahlung

deutlich stärker zurück als CO₂. Laut EU entfallen auf Methan rund 19 Prozent der vom Menschen verursachten Klimaerwärmung, auf Distickstoffoxid 6 Prozent.

Für die Zunahme der anthropogenen Treibhausgase gibt es diverse Ursachen. So entstehen bei der Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas Kohlendioxid (CO₂) und Stickoxide (NO_x). Aber auch die Abholzung von Wäldern trägt zur einer CO₂-Erhöhung bei. Der Anstieg von Methan ist auf die Zunahme von Viehzucht, aber wohl auch auf Fracking zurückzuführen. Für Stickoxide sind einerseits stickstoffhaltige Dünger verantwortlich, andererseits aber auch Verbrennungsmotoren und Feuerungsanlagen für Kohle, Öl, Gas, Holz und Abfall.

Um die Erderwärmung zu begrenzen, werden mehrere Maßnahmen empfohlen. Zum Beispiel spielen eine effiziente Energieerzeugung und -verteilung sowie eine Senkung des Energieverbrauchs eine wichtige Rolle. In diesem Zusammenhang geht es hinsichtlich der Energieerzeugung beispielsweise um den Ausbau erneuerbarer Energien wie Sonnen-, Wasser- und Windenergie, aber auch um Kraft-Wärme-Kopplung, Blockheizkraftwerke und Ähnliches. Hinsichtlich einer effizienten Verteilung spielen intelligente Stromnetze, aber auch Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungssysteme eine entscheidende Rolle. Die Energieeffizienz lässt sich unter anderem durch die Nutzung einer energieeffizienten Beleuchtung und energieeffizienter Geräte (z. B. Energieeffizienzklasse A+++ bei Haushaltsgeräten) mit niedrigem Stand-by-Strom erhöhen. Smart-Home-Systeme, die eine intelligente Bedarfssteuerung von Strom und Heizung ermöglichen, helfen ebenfalls, den Energieverbrauch zu senken.

Darüber hinaus sind die produzierende Industrie, die Automobilhersteller sowie jeder Privathaushalt aufgefordert, seinen Beitrag zu leisten. In diesem Zusammenhang können energieeffiziente elektrische Antriebe, Nutzung von Prozesswärme, Reduzierung des CO₂-Ausstoßes pro Fahrzeug, Nutzung alternativer Technologien wie Wasserstoff oder synthetische Treibstoffe, neue Mobilitätskonzepte und Senkung des Energieverbrauchs pro Haushalt helfen, der Erderwärmung Herr zu werden.

1.4 Digitalisierung/Big Data

Laut des Ericsson-Mobility-Reports vom November 2017 gab es in diesem Jahr (2017) weltweit rund 7,8 Milliarden Handy-Anschlüsse. Bis 2023

soll diese Anzahl auf 9,1 Milliarden ansteigen. Weltweit belief sich der monatliche mobile Datenverkehr auf 14 Exabyte. Darüber hinaus wird prognostiziert, dass die Anzahl der vernetzten Geräte (Internet of Things, IoT) bis 2023 mit einem durchschnittlichen Jahreswachstum von 19 Prozent zulegen wird, sodass 2023 rund 20 Milliarden verbundene IoT-Geräte – Maschinen, Fahrzeuge, Sensoren, PoS-Terminals (PoS = Point of Sale), Zähler und Consumer-Geräte – erwartet werden. 1,8 Milliarden dieser Geräte sollen über eine Mobilfunkverbindung kommunizieren. In diesem Jahr erwartet Ericsson außerdem, dass über 20 Prozent der weltweiten Bevölkerung Zugriff auf 5G haben.

Die Digitalisierung betrifft mehr oder minder alle Lebens- und Arbeitsbereiche, nicht nur wie wir kommunizieren, sondern auch wie wir einkaufen, wie wir arbeiten, wie wir Auto fahren, wie wir lernen oder wie wir unsere Gesundheit erhalten bzw. verbessern. Wohnungen werden zu intelligenten Behausungen (Smart Homes) umgerüstet: So lässt sich die Heizung einfach vom Handy aus regeln, der Garten dank Feuchtesensoren automatisch bewässern. Vor allem aber profitieren diese Systeme von den Vorteilen, die Big Data und KI (künstliche Intelligenz) mit sich bringen: Sie sind lernfähig, sodass beispielsweise ein Haus über die Zeit den Energieverbrauch immer besser an die Wetterbedingungen und die Lebensweise seiner Bewohner anpassen kann. Das Auto kann dank Fahrerassistenzsysteme gefährliche Situationen zumindest entschärfen oder sogar ganz verhindern, einen Stau dank Kommunikation mit anderen Fahrzeugen bzw. der Infrastruktur problemlos umfahren oder einfach nur die Sitz- und Spiegeleinstellung automatisch auf den Fahrer einstellen – und sich immer wieder an neue Bedingungen anpassen. Und mit Industrie 4.0 ändert sich die komplette Produktionskette, sodass die Produktion schneller, flexibler und effizienter vonstattengeht. Auch dort wird KI wieder die entscheidende Rolle spielen.

Bei all den Vorteilen der Digitalisierung darf ein Punkt aber auf keinen Fall vergessen werden: die Datensicherheit. Egal ob es sich um ein Fahrzeug, eine Maschine oder die Türsteuerung eines Privathaushalts handelt, in allen Fällen muss größte Vorsicht geboten sein, dass kein Unbefugter Zugriff auf das Gerät oder die Daten bekommen kann. Das würde nicht nur die Akzeptanz gegenüber diesen Technologien zunichtemachen, sondern könnte auch enorme wirtschaftliche Schäden verursachen.

2 Regulatorische Einflussfaktoren und ihre Auswirkung auf die Elektroindustrie



Quelle: jorisvo / Fotolia.com

2.1 Heutige und zukünftige (europäische) Politik

Der ZVEI und die deutsche Elektroindustrie sind von vielen EU-Politiken betroffen. Mehr als 90 Prozent der Regulierung, die für die Unternehmen der Elektroindustrie gilt, geht auf eine europäische Initiative oder Gesetzgebung zurück.

Betroffenheit besteht traditionell bei allen technischen Regulierungen, die im Rahmen der Harmonisierung im Binnenmarkt entstehen. Diese europäischen Lösungen nutzen der Elektroindustrie, da sie zum Ziel haben, unterschiedliche Regeln in den EU-Mitgliedstaaten in Einklang zu bringen und einheitliche Rahmenbedingungen für die Unternehmen in Europa zu schaffen.

Seit etwa 20 Jahren kommt die EU-Umweltpolitik hinzu, vor allem durch die WEEE-, RoHS und REACH-Regulierung sowie die Ökodesign-Rahmenrichtlinie und die Umsetzungsbestimmungen für einzelne Sektoren. In den letzten Jahren hat sich die EU-Umweltgesetzgebung hin zu einem „life cycle approach“ verändert – im Mittelpunkt der Gesetzgebung steht nun die Lebenszyklusbetrachtung eines bereits in den Markt gebrachten oder noch zu bringenden Produkts – jüngstes Beispiel ist die aktuelle Kreislaufwirtschaftspolitik (Circular Economy) der EU sowie die Schnittstellendefinition zwischen Abfall-, Stoff- und Produktpolitik.

Vor etwa zehn Jahren kam die EU-Energiepolitik auf die Agenda – mit der Schaffung der Energieunion, des Energiebinnenmarkts, des Emissionshandels und seiner Instrumente, der Definition von CO₂-Minderungs-, Energieeffizienz- und Erneuerbaren-Zielen sowie zuletzt mit konkreten Vorschlägen im Rahmen des EU-Clean-Energy-Pakets.

EU-Industriepolitik zur Unterstützung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit Europas und europäischer Firmen ist ein weiteres wichtiges Feld. Hier geht es weniger um Regulierung – bestenfalls den Abbau von Regeln und Better Regulation –, aber mehr um industriepolitische Initiativen und die Verzahnung verschiedener sonst eigenständig agierender Politikbereiche vor dem Hintergrund eines Wettbewerbs- oder Wachstumsziels. Die europäische Elektroindustrie hat im Rahmen der industriepolitischen Aktivitäten der EU seit 2008 ihre Anliegen zunächst in Form einer High-Level-Group und dann mit zwei Berichten unter dem Slogan „Electra“ dar-gelegt. Die beiden Dokumente „20 Electra Recommendations for 2020 and beyond“, und „Electra: The Smart World“ haben nach wie vor ihre Gültigkeit und gelten als Masterplan für die heutige Smartifizierung und Digitalisierung aller Bereiche.

Mit der Digitalen Transformation und der Entwicklung von Industrie 4.0 haben sich neue Themen auf EU-Ebene ergeben: internationale Standards, der Umgang mit Industriedaten vs. personenbezogenen Daten, Cybersicherheit und technische Referenzarchitektur. Der ZVEI sieht die Digitalisierung als das wichtigste Zukunftsprojekt Europas und setzt sich für eine Entwicklung „von der Montanunion hin zur Digitalunion“ ein.

International sind vor allem die EU-Handelsstrategie und die jeweils aktuellen Verhandlungen zwischen der EU und anderen Märkten relevant, wie in den letzten Jahren mit den USA (TTIP), Kanada (CETA), Japan und den Mercosur-Staaten. Wir setzen uns für freie Märkte und Multilateralismus auf Basis der WTO-Regeln ein und sind entschieden gegen Protektionismus und einen zuletzt von den USA initiierten „Handelskrieg“. Ein weiterer Fokus des ZVEI liegt auf China, wo wir seit über zehn Jahren mit unserem Europ-Electro-Büro vertreten sind und mittlerweile über unser Netzwerk in China (z. B. Deutsche Botschaft Beijing, GIZ, BMWI, EUCCC, Vertretung der EU-Delegation u. a.) die gesamte Bandbreite der für unsere global aufgestellten Mitglieder relevanten Themen angehen. Die ZVEI-China-Agenda hat sich in den letzten Jahren von einer reinen Betrachtung von technischer Regulierung und Standardisierung zu einem breiteren, industriepolitischen Ansatz entwickelt.

2.1.1 Europa braucht eine neue industriepolitische Strategie

Europäische Unternehmen sind mit ihren Produkten und Technologien in vielen Bereichen Weltmarktführer. Unser europäischer Dachverband Orgalime nennt dies „Technology for the World – Manufactured in Europe“. Um dies auch zukünftig sein zu können, brauchen wir einen industriepolitischen und regulatorischen Rahmen, der die Firmen in ihrer internationalen Wettbewerbsfähigkeit stärkt und der den Standort Europa für Investitionen attraktiv macht. Darüber hinaus brauchen wir ein gemeinsames Verständnis in Europa – keine einzelstaatlichen Lösungen – sowie eine moderne industriepolitische Strategie für die Zukunft der EU – auch mit Blick auf andere Teile der Welt wie zum Beispiel China mit seinem Top-down-Ansatz „Made in China 2025“ und mit Blick auf die USA und der „America first“-Programmatik von US-Präsident Trump.

Die Industriepolitik sollte die Chancen und Stärke der Unternehmen nutzen, die sich aus der Digitalisierung und beim Internet der Dinge / Industrie 4.0 ergeben, ohne die industriepolitischen Auswirkungen anderer Politikfelder und Aktivitäten (Binnenmarkt, Energie, Umwelt, Handel, F&E, Innovation) zu vernachlässigen.

Der ZVEI begrüßt grundsätzlich die Beschlüsse der europäischen Staats- und Regierungschefs vom 23. Juni 2017 zur Industriepolitik sowie die Mitteilung der EU-Kommission vom 13. September 2017 und arbeitet gemeinsam mit der Europäischen Kommission und dem Europäischen Parlament an deren Umsetzung.

2.1.2 Industrie braucht den digitalen Binnenmarkt

Die EU will Wachstum und Wohlstand stärken und strebt hierzu die Schaffung eines starken digitalen Binnenmarkts an. Der ZVEI unterstützt die „Digitising European Industry“-Strategie der EU-Kommission. Die Digitalunion kann zum entscheidenden Vorteil im Wettbewerb mit den USA und Asien werden.

Der ZVEI unterstützt auch die neu geschaffene „Europäische Plattform der nationalen Initiativen“. Derzeit gibt es in 15 EU-Ländern Digitalisierungsinitiativen. In Deutschland sind es:

- Die Plattform Industrie 4.0 – hier arbeiten unter anderem die Verbände Bitkom, VDMA und ZVEI mit.
- Das „Standardization Council Industrie 4.0“. Ziel ist, Industrie-4.0-Standards zu initiieren und diese national sowie international zu koordinieren.
- Das Labs Network Industrie 4.0 als Testplattform insbesondere für KMU.

Darüber hinaus arbeitet der ZVEI seit vielen Jahren eng mit seinem französischen Partnerverband FIEEC zusammen. So haben wir eine gemeinsame „Digitale Agenda“ verabschiedet und eine deutsch-französische Roadmap zur Cybersicherheit erarbeitet und auf einer Veranstaltung im Europäischen Parlament im November 2017 in Brüssel vorgestellt. Warum? Weil sich diese Themen nicht national bearbeiten lassen! Wir brauchen mehr Europa, den digitalen Binnenmarkt und auch mehr Gemeinsinn auf Basis gleicher Werte.

Ein gleiches Projekt besteht zwischen dem ZVEI und seinem polnischen Elektro-Partnerverband KiGEIT – wo wir im Nachgang zu der ersten deutsch-polnischen Industrie-4.0-Konferenz im März 2018 nun eine deutsch-polnische Roadmap für die Digitale Transformation erarbeiten.

2.1.3 Digitalisierung braucht Cybersicherheit

Das Schadprogramm WannaCry verschlüsselte im Mai 2017 weltweit über 230.000 Computer in 150 Ländern mit dem Ziel der Lösegelderpresung. Der Schaden war unermesslich. Verteidigungsministerin von der Leyen berichtete im April von 4.500 Cyberangriffen gegen die Bundeswehr an nur einem Tag. Jedes zweite mittelständische Unternehmen in Frankreich wurde bereits Opfer einer Cyberattacke. Das sind nur drei Beispiele, die zeigen, dass wir die Cybersicherheit stärken müssen. Digitalisierung und Vernetzung werden nur dann Nutzen stiften und breite Akzeptanz finden, wenn Cybersicherheit

in einem hohen Ausmaß gewährleistet werden kann. Hierzu bedarf es Aufklärung, Zusammenarbeit und intelligente Technologien, die Schutz bieten.

Mittelfristig sollten die Cybersicherheit als fester Bestandteil des Qualitätsmanagements und eine offene Austauschkultur zur Cybersicherheit etabliert werden. Deshalb muss Cybersicherheit in der vernetzten Welt auf europäischer und internationaler Ebene geregelt werden. Mehr als bisher müssen Lösungen für Cybersicherheit europäisch gedacht und entwickelt werden. In diesem Zusammenhang begrüßt der ZVEI das von der EU-Kommission im September 2017 vorgestellte Cybersicherheitspaket – mit dem Cybersecurity Act und Vorschlägen für das neue Mandat der europäischen Sicherheitsagentur ENISA. Es braucht gemeinsame Überlegungen zur Stärkung einer Mindest-Security vor allem für vernetzbare Konsumgüter, die jedoch lösungs- und technologieoffen bestimmt werden sollten. Das New Legislative Framework der EU-Kommission sollte als Basis für Gesetzgebung im Sicherheitsbereich genutzt werden. Kundeninformation und Vertrauen werden nicht durch statische und aussagefreie Gütesiegel für IT-Sicherheit erhöht, sondern durch eine Differenzierung über Normen, Standards, Risikobewertung, Verwendungszweck und Anforderungen. Doppelzertifizierung muss vermieden werden – soweit möglich sollten internationale Security-Standards angewandt werden.

2.1.4 Digitalisierung braucht mehr „digital skills“

Fehlendes digitales Know-how erweist sich bereits heute als Digitalisierungshemmnis Nummer 1, so die ZVEI-Innovationsstudie von Ende 2016. Der digitale Wandel muss zu einem großen Teil mit dem heutigen Personal gestemmt werden. In den kommenden fünf bis sieben Jahren werden die entscheidenden Innovationen für den digitalen Wandel umgesetzt. Die Unternehmen müssen sich darauf mit umfassenden Weiterbildungsangeboten einstellen. Die Arbeitnehmer müssen bereit sein, sich weiterzubilden. Hier befinden sich die Gewerkschaften und Betriebsräte in einer Schlüsselfunktion: Industrie und Arbeitnehmervertreter müssen Hand in Hand arbeiten.

2.1.5 Digitalisierung braucht Vertrauen – Technologie allein reicht nicht

Voraussetzung für Vertrauen ist gesellschaftlicher Dialog. Die Elektroindustrie ist hierfür bereit. Im Bündnis „Zukunft der Industrie“ in Deutschland genauso wie im Branchendialog zwischen Bundeswirtschaftsministerium, ZVEI, IG Metall und Gesamtmetall; europäisch im Rahmen von Orgalime, DigitalEurope, IndustrieAll und mit unseren Partnern aus ganz Europa. Diesen Dialog müssen wir auf allen Ebenen führen. Am Ende wird auch hier eine internationale Debatte notwendig sein.

Die Digitalisierung ist kein Schicksal, das über uns hereinbricht, sondern eine Gestaltungsaufgabe, der wir uns gemeinsam stellen müssen. Gemeinsam mit weiteren Partnern (wie z. B. Google, Siemens und der Konrad-Adenauer Stiftung) fördert der ZVEI mit der Brüsseler Veranstaltungsreihe „Think Digital!“ deshalb den europapolitischen Dialog und gibt Antworten auf die wichtigsten Fragen.

2.2 Umweltgesetzgebung

Kreislaufwirtschaft, Nachhaltigkeit, Transparenz, Corporate Social Responsibility – das sind nur einige Stichworte, die verdeutlichen, dass umweltrelevante Themen immer mehr im Fokus bei Unternehmen und Gesetzgebern stehen. Hierfür existiert heute bereits eine Reihe von unterschiedlichen europäischen und außereuropäischen Regelungen.

Vor diesem Hintergrund ist ein nachhaltiges Informationsmanagement innerhalb der Wertschöpfungsketten wichtiger denn je. Vor allem die Einhaltung spezifischer chemikalienrechtlicher Anforderungen an Produkte der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie stellt die beteiligten Marktakteure vor große Herausforderungen. So sind Unternehmen in der Europäischen Union dazu verpflichtet, bestimmte Informationen innerhalb der Lieferkette weiterzugeben. Zudem sind sie gefordert, wenn es darum geht, auch in ihrer vorgelagerten Lieferkette dafür zu sorgen, dass die stoffliche Zusammensetzung von Materialien, Bauteilen und Baugruppen festgelegte Konzentrationsgrenzen nicht überschreitet. Insbesondere die Dynamik der allgemeinen europarechtlichen Anforderungen durch die REACH-Verordnung und die produktspezifischen Stoffbeschränkungen der RoHS-Richtlinie, die darauf aufbauenden unternehmensindividuellen Vorgaben sowie die global verzweigten Wertschöpfungsketten sind Gründe dafür, dass nur ein effektives Informationsmanagement inner-

halb der Wertschöpfungsketten zur Einhaltung von Produktanforderungen führen kann.

Der ZVEI-Arbeitskreis Stoffpolitik hat aus diesem Grund eine Broschüre erstellt und will damit gezielt über Aspekte zu „Materialdeklarationen innerhalb der Lieferkette“ in Bezug auf den Austausch von produktspezifischen Material- und Stoffinformationen zur Sicherstellung der Product-Compliance informieren. Insbesondere wird der internationale Standard IEC 62474 zur Materialdeklaration für Produkte aus der elektrotechnischen Industrie und für die elektrotechnische Industrie erläutert.

2.2.1 Stoffverbote

Mit den Vorgaben der europäischen Richtlinien WEEE, RoHS und ELV sind die betroffenen Industrien gefordert, Beiträge zur Verbesserung und zum Erhalt der Umwelt zu leisten.

Die WEEE regelt das Recycling- und Rücknahmesystem von Elektro(nik)-Schrott. Die RoHS schränkt das Inverkehrbringen bestimmter Substanzen seitens der Endgerätehersteller ein. Die ELV regelt das Recycling- und Rücknahmesystem sowie die Stoffverbote im Automobilsektor.

Generell müssen alle Produkte, die in den Geltungsbereich dieser Richtlinien fallen, frei von bestimmten Substanzen (Blei, Cadmium, Quecksilber, Chrom sowie polybromierte Biphenyle und polybromierte Diphenylether) sein, sofern keine Ausnahmen definiert sind. Der Terminus „frei“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der Gehalt des jeweils homogenen Werkstoffs kleiner sein muss als 0,1 Masseprozent (Ausnahme Cadmium mit 0,01 %).

Darüber hinaus existiert die sogenannte REACH-Verordnung der Europäischen Union. Sie wurde ins Leben gerufen, um in erster Linie den Schutz der menschlichen Gesundheit und der Umwelt vor den Risiken, die durch Chemikalien entstehen können, zu gewährleisten und den Einsatz besonders besorgniserregender Stoffe durch Einsatz von alternativen Stoffen zu fördern. Betroffen von der Verordnung sind Hersteller, Importeure (Inverkehrbringer) und nachgeschaltete Anwender.

Da in der Elektronikproduktion chemische Stoffe zum Einsatz kommen, sind demzufolge auch die Komponentenhersteller im Sinne nachgeschalteter Anwender an die Einhaltung der Verordnung gebunden.

Neben den direkten Auswirkungen der Richtlinien, wie zum Beispiel Einhaltung der Stoffverbote oder Registrierung von Chemikalien, ergeben sich aus der technischen Umsetzung der Richtlinien für den Bauelementehersteller und den Verarbeiter von Bauelementen ebenfalls Konsequenzen, wie beispielsweise höhere Löttemperaturen bei der Verarbeitung und damit verbunden eine höhere Lötwärmebeständigkeit. Zu beachten ist auch, dass neben den europäischen Regelungen auch verstärkt weitere Länder wie China, Indien usw. Gesetze zum Schutz von Mensch und Umwelt erlassen haben. Auch wenn sich diese Gesetze zum Teil an die europäische Vorgehensweise etwa hinsichtlich der beschränkten Stoffe anlehnen, gibt es Unterschiede, die betrachtet werden müssen (Gültigkeitsbereich, Inkrafttreten usw.). Bei Entwicklungen für den außereuropäischen Raum sind die Anforderungen daher im Einzelfall zu prüfen und entsprechend zu berücksichtigen.

2.2.2 Verfügbarkeit von Rohstoffen

In Zukunft wird der Rohstoffbedarf weiter stark ansteigen. Zwar sind die Rohstoffe auf absehbare Sicht nicht geologisch knapp, in der arbeitsteiligen, stark vernetzten Weltwirtschaft steigen aber die kurz- und mittelfristigen Versorgungsrisiken. Zu diesen neueren Risiken gehören Liefer- und Preisrisiken durch die Konzentration der Förderung auf nur wenige Unternehmen oder Länder. Die Rohstoffversorgung kann damit zum Engpass für die wirtschaftliche Entwicklung werden und so als Faktor für die internationale Wettbewerbsfähigkeit an Bedeutung gewinnen. Dies gilt insbesondere für rohstoffintensive Produktionssektoren oder solche, die auf strategische Rohstoffe angewiesen sind. Die Gewährleistung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung wird daher zunehmend zu einer zentralen Herausforderung und wichtigen Aufgabe für Wirtschaft und Politik.

Interessierten sich noch bis vor Kurzem nur wenige für Technologiemetalle, so wird die Versorgung mit diesen zunehmend wichtig. Die Probleme werden hauptsächlich durch fehlende Bergbaukapazitäten und eine wachsende Zahl von Handelshemmnissen hervorgerufen. Hinzu kommt, dass wichtige rohstoffliefernde und -verbrauchende Schwellenländer ihre Rohstoffpolitik strategisch ausrichten, um ihre eigenen rohstoffwirtschaftlichen Interessen zu verfolgen. Angesichts dieses geostrategischen Bedeutungszuwachses nehmen die Sorgen in den Industriestaaten um eine Verknappung bei wichtigen Rohstoffen zu.

Lieferengpässe bei Technologiemetallen können die Entwicklung und industrielle Nutzung von Zukunftstechnologien hemmen. Technologiemetalle sind daher generell von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Ihr Vorkommen ist meist auf wenige Länder beschränkt und diese befinden sich zum Teil in politisch instabilen Regionen. Die Verletzbarkeit der Industrie in rohstoffarmen Ländern wie Deutschland wird noch dadurch erhöht, dass bestimmte metallische Rohstoffe häufig nur über vergesellschaftete Vorkommen in Erzen erschlossen werden können. Steigt der Bedarf nach einem Metall stark an, so ändert sich das gesamte Wertschöpfungs- und Preisgefüge von Haupt-, Kuppel- und Nebenprodukten. Die Rohstoffverfügbarkeit kann dort besonders kritisch werden, wo die Möglichkeit fehlt, knappe und teure Rohstoffe zu substituieren.

2.2.3 Recycling/Elektronikschrott

Recycling ist bereits ein etablierter Markt, dessen Bedeutung zukünftig angesichts der Verknappung von Rohstoffen deutlich zunehmen wird. Aufgrund der Zunahme der Weltbevölkerung und des Wirtschaftswachstums vor allem der Schwellenländer wird sich der Rohstoffbedarf gegenüber heute vervielfachen. Noch schneller wächst der Bedarf an Technologiemetallen, die für Zukunftstechnologien benötigt werden. Die Rohstoffversorgung wird deshalb zu einer zentralen Zukunftsfrage für Wirtschaft, Politik und Gesellschaft. Durch die Nutzung von Sekundärrohstoffen kann ein entscheidender Beitrag zur Rohstoffsicherheit geleistet werden. Das Recycling von Abfällen entwickelt sich weltweit immer mehr zu einer wichtigen Rohstoffquelle.

Wichtige Impulse gehen von der Abfall- und Umweltpolitik aus. Aktivitäten, die das Recycling vorantreiben, sind in vielen Industrieländern zu beobachten. In Deutschland wurde zuletzt 2012 das Kreislaufwirtschaftsgesetz novelliert. Auf EU-Ebene sind in den letzten Jahren umfangreiche rechtliche Rahmenbedingungen zum Ausbau der Sekundärrohstoffwirtschaft geschaffen und fortentwickelt worden, darunter die Deponierichtlinie, die Verpackungsrichtlinie, die WEEE-Direktive und die Abfallrahmenrichtlinie. Bis 2020 müssen 50 Prozent der im Hausmüll enthaltenen Papier-, Metall- und Glasfraktionen verwertet werden, zukünftig sind 70 Prozent der nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfälle zu recyceln. Für gebrauchte Verpackungen sind Rücknahme-, Erfassungs- und Verwertungssysteme auf- und auszubauen.

Während die Technologien zur Verwertung von Massenwertstoffen wie Glas, Papier, Kunststoffe und Metalle (Stahl, Kupfer oder Aluminium etc.)

sowie Edelmetallen und einigen Sondermetallen relativ weit entwickelt sind, besteht mit Blick auf viele Technologiemetalle noch erheblicher Entwicklungsbedarf. Für die Rückgewinnung von Tantal, Lithium, Seltenen Erden, Gallium oder Germanium existieren noch keine kommerziellen Recyclingverfahren. In neuerer Zeit werden hier zahlreiche Forschungsanstrengungen unternommen und in Pilotanlagen übersetzt (z. B. zum Recycling von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien). Im Fokus von Förderprogrammen stehen Rohstoffe, die für Zukunftstechnologien verfügbar sein müssen und eine große Hebelwirkung für die Wirtschaft haben.

Im Bereich der Industrierohstoffe ist das Recycling von Metallen (Kupfer, Aluminium, Blei, Zinn oder Nickel) weit entwickelt und es lassen sich mit modernen metallurgischen Verfahren in der Regel hohe Rückgewinnungsraten erzielen. Elektro- und Elektronikaltgeräte, Altfahrzeuge und Batterien sind hierbei wichtige Quellen für das Recycling.

Trotz allem sind die Recyclingraten vieler Technologiemetalle bis dato niedrig. Die Erfassung und Sammlung von technologiemetallhaltigen Abfällen sowie die Einsteuerung dieser Abfälle in die dafür am besten geeigneten Recyclingketten ist unzureichend. Nach der neuen WEEE-Richtlinie sollen in Zukunft Elektro- und Elektronikaltgeräte einen höheren Beitrag zur Rohstoffversorgung leisten. Bislang liegt in der EU das Rücknahmeziel für Elektrogeräte bei vier Kilogramm je Verbraucher oder insgesamt etwa zwei Millionen Tonnen pro Jahr. Durch die neue Richtlinie sollen im Jahr 2020 je Verbraucher rund 20 Kilogramm und insgesamt zehn Millionen Tonnen gesammelt werden. Über massebasierte Quoten hinaus wird neuerdings geprüft, ob zukünftig zusätzlich für Technologiemetalle eigene Verwertungsquoten machbar und zielführend sind.

2.2.4 Nachhaltigkeit in der Elektronik

Der Begriff Nachhaltigkeit geht bis auf das Jahr 1713, auf Hanns Carl von Carlowitz zurück, der die Bedeutung einer „nachhaltenden“ Forstwirtschaft¹⁾ dokumentierte, und wird heute am häufigsten über den Term der „Nachhaltigen Entwicklung“ aus dem Brundtland Bericht (1987) definiert: „Nachhaltige Entwicklung ist eine Entwicklung, die den Bedürfnissen heutiger Generationen Rechnung trägt, ohne die Möglichkeiten zukünftiger Generationen zu gefährden, ihren eigenen Bedürfnissen nachzukommen.“²⁾ Da das Konzept der Nachhaltigkeit einen dauerhaften Erhalt von sozialen, ökologischen und wirt-

schaftlichen Systemen³⁾ anstrebt, ist es auch für Unternehmen von grundlegender Bedeutung. Eine langfristig stabile Fortführung einer jeden Geschäftstätigkeit basiert auf einem wachsenden Wirtschaftssystem, das wiederum auf einer prosperierenden Gesellschaft fußt, deren unabdingbare Lebensgrundlage eine möglichst intakte Umwelt ist.

Der wirtschaftliche Erfolg der Elektronikindustrie ist nur durch eine Vielzahl an natürlichen Ressourcen (z. B. Rohstoffe wie Silizium, Metalle, Energieträger usw.) und nicht zuletzt mithilfe vieler mitwirkender Menschen möglich. Die Erwartungen verschiedener Stakeholder-Gruppen und Individuen an die Elektronikindustrie umfassen viele verschiedenen Bereiche, von der Rohstoffextraktion bis zum Recycling, vom Recruiting neuer bis zur Altersversorgung ehe-

maliger Mitarbeiter und von neuen Gesetzen bis hin zur freiwilligen Einhaltung von Standards.

Die gesellschaftliche Verantwortung wird von der Elektroindustrie ernst genommen. Mit dem ZVEI-Code of Conduct⁴⁾ bekennen sich mehr als 550 Unternehmen unter anderem zur Einhaltung von Gesetzen, Integrität, Achtung der Menschenrechte, Verbot von Kinderarbeit und Zwangsarbeit sowie von Standards im Umweltschutz. Gesellschaftliche Verantwortung ist das Engagement von Unternehmen über gesetzliche Verpflichtungen hinaus. In den letzten Jahrzehnten hat sich mit zunehmender Globalisierung die gesellschaftliche Verantwortung gewandelt und es beschäftigen sich nun auch internationale Regierungs- und Nichtregierungsorganisationen mit diesem Thema. Dies zeigen die unterschiedlichen internationalen Regelwerke und Stan-

Abb. 2.1: Beispiel für ein CSR-Konzept



Quelle: Infineon Technologies

1) Carlowitz, Hans Carl von, 1713, Leipzig, Sylvicultura Oeconomica, oder Haußwirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung Zur Wilden Baumzucht
 2) Brundtland Commission, 1987, Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future
 3) Vgl. Brundtland Commission, 1987, Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future
 4) ZVEI Code of Conduct – Unternehmen bekennen sich zu gesellschaftlicher Verantwortung <https://www.zvei.org/themen/gesellschaft-umwelt/zvei-code-of-conduct-unternehmen-bekennen-sich-zu-gesellschaftlicher-verantwortung/> am 14.05.2018

dards, die zu einer starken Formalisierung und zu neuen Darstellungsformen der gesellschaftlichen Verantwortung von Unternehmen geführt haben.

Der Global Compact der Vereinten Nationen⁵⁾, dem viele Unternehmen auch der Elektronikindustrie beigetreten sind, legt mit seinen zehn Prinzipien wesentliche Grundlagen zu Menschenrechten, Arbeit, Umwelt und Antikorruption.

Zusätzlich haben die Vereinten Nationen die Sustainable Development Goals⁶⁾ ins Leben gerufen, die 17 globale Ziele aus dem sozialen, ökologischen und gesellschaftlichen Bereich umfassen.

Im Zuge dieser Entwicklung ist „Corporate Social Responsibility“ (CSR) auch in der deutschen Sprache zu einem gängigen Begriff geworden. Auch wenn er in der deutschen Übersetzung als gesellschaftliche Verantwortung von Unternehmen dieselbe Bedeutung hat, steht er doch für eine neue, formalisierte Form der gesellschaftlichen Verantwortung von Unternehmen. Diese zielt auf viele verschiedene Handlungsfelder: Einhaltung der Menschenrechte, Arbeitsbedingungen, Umweltschutz, Antikorruption und -bestechung, Verbraucherinteressen, saubere Geschäftspraktiken und fairer Wettbewerb.

2.3 Energiepolitik (Energiewende und Energieeffizienz)

Die erneuerbaren Energien sind mittlerweile ein Grundpfeiler unseres Energiesystems. Um die energiepolitischen Ziele zu erreichen, ist ein Ordnungsrahmen unerlässlich, der langfristig verlässliche Rahmenbedingungen für Investitionen schafft und die effiziente Markt- und Systemintegration der erneuerbaren Energien zum Ziel hat. Dazu gehört auch eine Synchronisation mit dem Netz- und Speicherausbau.

Bei der Umsetzung der Energiewende und somit auch für wirksamen Klimaschutz gehören Energieeffizienz und erneuerbare Energien untrennbar zusammen. Die Energiewende ist ohne Steigerung der Energieeffizienz nicht machbar. Energieeffizienz ist durchgehend als sektorenübergreifendes Querschnittsthema zu begreifen. In einem System, das zunehmend von Stromerzeugung auf der Grundlage erneuerbarer Energien geprägt sein wird, ist elektrische Energie immer häufiger auch im Wärme- und Verkehrs-

bereich zu finden. Die dafür notwendigen Technologien sind bereits vorhanden und sollten mehr als bisher eingesetzt werden.

Zentral bei der Gestaltung des zukünftigen Energieversorgungssystems ist die Tatsache, dass Investitionsentscheidungen nicht mehr nur innerhalb eines Sektors, sondern über Sektoren und Anwendungen hinweg getroffen werden. Riesige Einsparpotenziale entlang der gesamten energiewirtschaftlichen Wertschöpfungskette lassen sich so noch erzielen – bei der Energieerzeugung und -verteilung genauso wie beim Energieverbrauch. Erneuerbare Energien sind zwar theoretisch unbegrenzt verfügbar; da die entsprechenden Technologien zur Erzeugung von Strom und Wärme jedoch auch kapitalintensiv und ressourcenverbrauchend sind, müssen auch sie sparsam und effizient eingesetzt werden. Jede Kilowattstunde, die nicht verbraucht wird, muss nicht erzeugt werden. Eine Effizienzsteigerung auf der Verbrauchsseite bedeutet somit auch immer eine Verringerung der notwendigen Investitionen und des Materialeinsatzes aufseiten der Energieerzeugung.

Durch Digitalisierung können noch mehr als bisher Energieeffizienzpotenziale gehoben werden. Eine noch stärkere Verzahnung von Digitalisierung und Energieeffizienz kann deren gegenseitige Treiberwirkung, vor allem über Industrie 4.0, optimieren. Ebenso wird das Speichern fluktuierend zur Verfügung stehender erneuerbarer Energien ein wesentlicher Baustein der Energiewende, der als solcher behandelt und in den Energiemarkt integriert werden muss.

2.3.1 Leistungsfähige Netze – Baustein der Energiewende

Die Energiewende ist für alle beteiligten Akteure eine Herausforderung. Besonders das bestehende Versorgungssystem befindet sich im Wandel. Gab es früher vor allem Großkraftwerke, die in ein weites Netz von Verbrauchsorten einspeisten (zentrale Stromerzeugung), sind nun viele kleinere Anlagen dazugekommen, die ihren „grünen“ Strom weit verteilt an unterschiedlichen Orten erzeugen (dezentrale Stromerzeugung).

In der Praxis entstehen dadurch einige Probleme. Es werden einige konventionelle Kraftwerke als Reserve für Engpässe vorgehalten – wenn zum Beispiel der Wind aufhört zu wehen oder Wolken aufziehen. Ebenso muss der Betreiber eingreifen und Anlagen herunterregeln, wenn

⁵⁾ The Ten Principles of the UN Global Compact <https://www.unglobalcompact.org/what-is-gc/mission/principles> am 14.05.2018

⁶⁾ Sustainable Development Goals <https://sustainabledevelopment.un.org/sdgs> am 14.05.2018

Windräder bei starkem Wind und Solarzellen bei Sonnenschein maximale Leistung erzeugen. Die jeweiligen Kosten werden an den Stromkunden weitergereicht und führen zu insgesamt höheren Stromrechnungen.

Um die große Menge Strom aus den erneuerbaren Quellen aufzunehmen und zu verteilen, braucht es dringend ein größeres und leistungsfähigeres Energienetz. Die Anzahl der Regelingriffe könnte erheblich reduziert werden, wenn die Netze ausgebaut und modernisiert werden würden. Derzeit bleibt der Leitungsbau in Deutschland jedoch hinter dem Ausbautempo der erneuerbaren Energien zurück.

Mit intelligenter Steuerung und vorhandenen robusten Netzen erreicht Deutschland trotzdem eine sehr hohe Versorgungssicherheit. Wir verfügen heute über eine Energieinfrastruktur, die dem Anspruch einer führenden Industrienation gerecht wird. Diesen Zustand gilt es auch unter den sich verändernden Rahmenbedingungen der Energiewende in Zukunft zu erhalten, wobei die Kosten für den Endverbraucher in einem vertraglichen Rahmen bleiben müssen.

2.4 Normung und Standardisierung

Normen und Standards bilden eine verlässliche Basis, auf der sich Innovation und Wettbewerb entfalten können, und schaffen damit Märkte. Aber auch in den „klassischen“ Anwendungsfeldern wie zum Beispiel Produktsicherheit, elektromagnetische Verträglichkeit oder Ökodesignanforderungen sind Normen ein zentrales Element.

Ebenso legen Normen die technischen Zulassungsvoraussetzungen auf internationalen Märkten fest. In manchen Ländern beruhen jedoch die erforderlichen Zertifizierungen häufig noch auf nationalen anstatt international verabschiedeten Normen. Dadurch müssen die Unternehmen länderspezifische Produktvarianten entwickeln, wodurch Kostensenkungspotenziale verloren gehen.

Digitalisierung, Industrie 4.0, Smart Grids, Smart Buildings, intelligente Mobilität und innovative Gesundheitswirtschaft erfordern in Zukunft intelligente Standards, um reibungslos und sicher zusammenzuwirken. Die dafür notwendigen technischen Normen brauchen den Schulterchluss mit der wissenschaftlichen Forschung.

Durch die Digitalisierung überschneiden sich immer mehr bislang voneinander getrennte Normungs- und Standardisierungsbereiche. Fragestellungen, Anforderungen und Arbeitsweisen, die bisher nur für andere Branchen relevant waren, betreffen nun die Elektroindustrie. Normung und Standardisierung sowie ihre Organisationen stehen durch diese Entwicklungen zukünftig immer mehr im Wettbewerb und neue Kooperationsmodelle werden gebraucht. Unter der strategischen Führung der Industrie muss verstärkt der Weg zu unternehmens-, branchen- und länderübergreifender Zusammenarbeit eingeschlagen werden. Politische Flankierung, insbesondere in der internationalen Zusammenarbeit, ist unerlässlich. Sie muss jedoch stets unterstützend sein und nur dort regulierend, wo es substantiell begründet ist.

2.5 Handelbeziehungen und Zölle

Durch die Aktivitäten von US-Präsident Trump im Zollbereich hat sich eine Dynamik entwickelt, die von vielen als drohender oder beginnender Handelskrieg beschrieben wird. Begriffe wie „Strafzölle“ und „Schutzzölle“ sind selbst in den Medien mittlerweile allgegenwärtig. Allerdings werden diese Begriffe meist wahllos durcheinandergeworfen und in den seltensten Fällen sind die rechtlichen Hintergründe und konkreten Auswirkungen der verschiedenen Zollarten bekannt.

Schutzzölle der USA gegen alle Stahl- und Aluminiumimporte in Höhe von 25 Prozent bzw. 10 Prozent im März 2018 waren anfangs der Auslöser, treffen aber die deutsche Elektroindustrie zunächst nicht direkt. US-Präsident Trump hatte sich zwar auf WTO-Recht berufen, als Rechtsgrundlage wurde überraschenderweise jedoch nicht Artikel XIX des GATT-Abkommens („Schutzmaßnahmen für gefährdete Branchen“), sondern Artikel XXI („Nationale Sicherheit“) gewählt. Hintergrund für diese Entscheidung war, dass ein früherer US-Präsident (George W. Bush) Stahlschutzzölle nach Artikel XIX erhoben hatte und damit in einem WTO-Streitschlichtungsverfahren sehr schnell gescheitert war. Vermutet wird deshalb, dass der jetzige US-Präsident einfach einen anderen GATT-Artikel „ausprobiert“. Formal ist dies zwar legal, inhaltlich jedoch äußerst zweifelhaft, da keineswegs sämtliche Stahl- und Aluminiumprodukte rüstungs- oder sicherheitsrelevant sind.

Die Antwort der EU und vieler anderer Staaten auf diese US-Aktion war – wie zu erwarten – eine Klageeinreichung bei der WTO, was nach

Durchlaufen eines etwa einjährigen Verfahrens zur Erhebung von Strafzöllen gegen die USA führen würde. Da der US-Präsident jedoch direkt mit weiteren Schutzzöllen (insbesondere auf Pkw-Importe) drohte, sah sich die EU gezwungen, schneller und härter zu reagieren. Aus diesem Grund wurden sogenannte Ausgleichszölle (z. B. auf Motorräder, Jeans, Erdnussbutter und Whiskey) direkt in Kraft gesetzt sowie umfangreiche Strafzölle angekündigt. Außerdem hat die EU selbst Schutzzölle in Kraft gesetzt, um eine Umlenkung von Warenströmen bei Stahl in die EU zu verhindern. Diese Schutzzölle treffen die Elektroindustrie direkt im Bereich Elektrostahl als Vorprodukt für Generatoren, Motoren und Transformatoren. So verständlich diese spontane Aktion der EU ist, bestehen jedoch erhebliche Zweifel an der formalen Legalität der Ausgleichszölle, da diese nur gegen Schutzzölle nach Artikel XIX GATT erhoben werden dürfen, nicht jedoch als Antwort auf Artikel XXI GATT (wie von Trump gewählt).

Parallel hierzu überziehen sich die USA und China gegenseitig mit immer neuen Strafzöllen, die allerdings jeglicher Rechtsgrundlage entbehren, da zwischen WTO-Mitgliedern nur dann Strafzölle erhoben werden dürfen, wenn ein WTO-Streitschlichtungspanel dies ausdrücklich erlaubt hat. Außerdem legt die WTO stets einen Maximalbetrag der Strafzölle fest, sodass es zu keiner sich ständig weiter aufschaukelnden Eskalation kommen kann. Da die WTO jedoch kein eigenes Initiativrecht hat, kann sie nicht einschreiten, sondern nur tatenlos zuschauen, wie international vereinbartes WTO- und Zollrecht von zahlreichen Staaten gedehnt oder gänzlich missachtet wird. Diese Strafzölle treffen die deutsche Elektroindustrie indirekt über die Produktionsstätten in USA und China, die sich teilweise wechselseitig nur noch unter Zahlung erheblicher Zollaufschläge beliefern können. Der Streit zwischen den USA und China hat sich am angeblichen Diebstahl geistigen Eigentums im Bereich Hochtechnologie entzündet und erstreckt sich deshalb auf zahlreiche elektrotechnische und elektronische Produkte.



3 Software



Quelle: Elektrobot

Dem Thema Software kommt seit Jahren eine immer größer werdende Bedeutung zu. Mehrere Faktoren haben zu dieser Verschiebung beigetragen: Mikroelektronik und vor allem alle Arten von Prozessoren sowie Speicher werden über viele Jahre hinweg immer leistungsfähiger und billiger („Moore’sches Gesetz“). Dabei ist zu beobachten, dass zunehmend fest verdrahtete Logik durch frei programmierbare Logik ersetzt wird. Das hat zur Folge, dass immer mehr und umfangreichere bzw. komplexere Funktionen implementiert werden können, das heißt, dass Innovation seit Jahren auf dem Gebiet der Software stattfindet und diese somit ein wesentlicher Faktor zur Wettbewerbsfähigkeit von Produkten geworden ist. Die Entwicklung des Internets mit gleichzeitig gesteigener Verfügbarkeit von Konnektivität ermöglicht nun eine Flexibilität, wie sie vor Jahren noch nicht denkbar gewesen ist. So können heute Personal Computer, Mobiltelefone, viele elektronische Geräte, aber auch Automobile nachträglich auf den neuesten Funktions- bzw. Sicherheitsstand gebracht werden. Hinter all diesem steht Software. Erst der massive Einsatz von Software hat viele innovative Entwicklungen ermöglicht. Dabei werden die unterschiedlichen Ausprägungen von Software wie „embedded software“, „mobile software“ und „cloud“ bzw. „enterprise software“ zunehmend miteinander vernetzt. Damit ist auch klar, dass der Bedarf an Software weiterhin ungebrochen und massiv zunehmen wird und damit auch die Nachfrage an gut ausgebildeten Softwareentwicklern anhalten bzw. steigen wird – und dass teilweise wegen deren eingeschränkter Verfügbarkeit das Wachstumspotenzial nicht voll ausgeschöpft werden kann. Um dieser Bedeutung von Software Rechnung zu tragen, haben wir ein eigenes Kapitel zu Software aufgenommen, wohl wissend, dass hier nicht alle Aspekte ausreichend abgebildet werden können.

3.1 Vernetzte Systeme erfordern vernetztes Denken

Wer sich auf Jobportalen umsieht, kommt um einen Schluss kaum herum – für Softwareentwickler lacht gerade die Sonne. Jede Menge Arbeit, aber die Qual der Wahl. Vom autonomen Fahren über die künstliche Intelligenz bis zum Internet der Dinge, für so gut wie jeden aktuellen Technologietrend werden dringend Softwareingenieure benötigt. Ganz gleich welche Branche, der Softwareanteil steigt überall. In welche Richtung aber geht es mit der Softwareentwicklung? Und wenn sie immer wichtiger wird, welche Folgen hat das für die Entwicklung neuer Produkte und die Wettbewerbsfähigkeit unserer Unternehmen?

Der vielleicht wichtigste Faktor für die immer höhere Bedeutung von Software ist die zunehmende Vernetzung. Von Wearables über Smart-Home-Geräte und das autonome Fahren bis zu Geschäfts- und Fertigungsprozessen, wir werden uns bald in einer Welt bewegen, in der fast alle Dinge um uns herum ständig miteinander kommunizieren. Für jedes dieser Utensilien und jeden dieser Prozesse, von der smarten Jacke über den intelligenten Shop bis zum automatischen Bezahlvorgang, brauchen wir Software. Zudem fallen bei all diesen Geräten und Kommunikationsvorgängen laufend Daten an. Das aber bedeutet, die Komplexität nimmt stetig zu, der Entwicklungs- und Testaufwand, um Interoperabilität, schnelle und reibungslose Abläufe sowie Zugriffs- und Ausfallsicherheit zu gewährleisten, wächst enorm.

Ein zweiter wichtiger Schlüssel-trend ist die künstliche Intelligenz (KI). Künstliche Intelligenz ist bereits viel präsenter in unserem Alltag, als wir glauben – das Spektrum der Anwendungen reicht von sprachaktivierten Heimassistenten bis zu

Big-Data-Analysen für Unternehmen und Behörden. Und der Anteil der Lösungen, die mit Unterstützung von künstlicher Intelligenz arbeiten, wird stetig wachsen. Zahlreiche Unternehmen setzen bereits künstliche Intelligenz bei der Automatisierung ihrer Prozesse ein und integrieren KI-Lösungen, um mithilfe von Big-Data-Analysen Informationen zu vernetzen und ihre Märkte und Kunden besser zu verstehen. So können sie fundiertere Entscheidungen treffen, Wettbewerbsvorteile erzielen oder ihren Kunden ein besseres Serviceerlebnis bieten.

Ein dritter Trend, der zur zunehmenden Bedeutung von Software beiträgt, ist die Blockchain-Technologie. Noch sind konkrete Anwendungen rar, aber man kann davon ausgehen, dass die Blockchain bald in fast jeder Branche zum Einsatz kommt, da sie praktisch absolute Daten- und Manipulationsicherheit gewährleistet. Allen voran im Bereich Finanzdienstleistungen, wo sie den Weg für bargeldlose Transaktionen ohne kostspielige Zwischenhändler ebnet. Aber auch in vielen anderen Gebieten wie Verwaltung, Gesundheitswesen oder Logistik wird die Blockchain-Technologie sehr bald eine sichere und auch automatisierbare Abbildung von Geschäftsprozessen ermöglichen. So lassen sich viele neue Anwendungen realisieren, wie beispielsweise in der Automatisierung, wo Produktionssysteme zukünftig automatisch Bauteile nachbestellen könnten.



Quelle: Elektrobit

Während all diese Trends dafür sprechen, dass der Softwareanteil in unseren Produkten weiterhin dramatisch zunehmen wird, stoßen gleichzeitig viele bewährte mechanische Produkte an Grenzen, die eine radikale Umorientierung bei ihrer Entwicklung erfordern. Das prominenteste Beispiel ist sicher das Auto, das seit Generationen primär als klassisches Hardwareprodukt mit einzelnen Elektronikkomponenten in Form von Steuergeräten entworfen wurde. Diese arbeiten bisher im Fahrzeug weitgehend unabhängig von

einander. Zuständig für ihre Entwicklung waren bislang die Fachabteilungen der Automobilhersteller sowie die Zulieferer der Steuergeräte. Das führte aufgrund der vielen unterschiedlichen Hersteller, Abteilungen und Zulieferer, die jeweils spezielle Konfigurationen, Anforderungen, Schnittstellen und Konstruktionsprinzipien bevorzugen, zu einer enormen Anzahl an Varianten. Mit der Anzahl dieser Varianten wuchs parallel auch der Testaufwand. Mit jeder neuen Fahrzeuggeneration fließen daher mehr und mehr Zeit und Kosten in die Aktualisierung und Pflege bestehender Funktionen, in Integration und Tests. Das Prinzip, bei der Entwicklung eines Produkts fast ausschließlich von den Hardwareanforderungen auszugehen, lässt sich daher in Zukunft angesichts der stetig zunehmenden Komplexität und der hohen Kosten kaum noch aufrechterhalten – sonst steigen Entwicklungs- und Testaufwand bald ins Unermessliche.

Ein möglicher Lösungsweg führt über eine Verringerung der Komplexität in der Softwarearchitektur – im Automobilbereich über eine serviceorientierte Architektur. Diese ersetzt die zahlreichen Steuergeräte mit Embedded Software und steuert die Funktionen im Fahrzeug mithilfe von zentralen Hochleistungsrechnern, die über ein breitbandiges Netzwerk wie Ethernet vernetzt sind – flexibel und unabhängig von der Hardware. Sie basiert auf einer konsequenten Trennung und Modularisierung von Hardware und Software. So lassen sich Sensoren unabhängig von ihrer Position im Fahrzeug nutzen und neue Funktionen per Softwareupdate sowie ohne Änderungen an der Hardware ergänzen. Die Funktionsmodule der Software können unterschiedlich kombiniert, in verschiedenen Modelllinien eingesetzt sowie individuell aktualisiert werden. Ansätze dieser neuen Architektur sind bereits in den Baukastenstrategien einiger Automobilhersteller zu sehen.

Mit Automotive Ethernet als Netzwerkprotokoll und einem oder mehreren zentralen Rechnern als Netzwerkmanagern übernimmt das Auto bewährte Technologien aus dem IT-Umfeld. Das bringt zahlreiche Vorteile. Zunächst einmal spart es dem Fahrzeug Gewicht, denn eine Vielzahl von Hardwarekomponenten und Kabelverbindungen kann jetzt entfallen. Die Datenraten sind höher, sodass große Datenmengen in hoher Geschwindigkeit ausgetauscht und verarbeitet werden können. Das Netzwerk lässt sich beliebig skalieren und es sind keine Schnittstellenkomponenten zwischen verschiedenen Netzwerkkomponenten mehr erforderlich. Die neue Architektur schafft zudem die Grundlage für schnelle und sichere Over-the-Air-Softwareupdates, sodass

neue Funktionen und Sicherheitsupdates auch ohne Werkstattbesuch implementiert werden können. Die Rechner dienen gleichzeitig als Basis für Applikationssoftware oder Services von Drittanbietern. Vor allem aber bringen sie die notwendige Rechenleistung mit, die hochautomatisierte oder autonom fahrende Autos benötigen, um sich ein verlässliches Bild von ihrer Umwelt zu machen und die Daten ihrer Sensoren in Echtzeit zu verarbeiten und zu interpretieren. Zudem arbeitet man auf bekannten Pfaden, es stehen also fertige Entwicklungswerkzeuge zur Verfügung und es sind bereits Entwickler mit Know-how vorhanden. Durch die Vernetzung im Fahrzeug und die Vernetzung des Fahrzeugs mit der Umgebung wird auch das Fahrzeug ein Teil des Internet of Things (IoT). Fahrzeuge werden genauso wie Sensoren in der Produktion Daten generieren, die letztlich zur Verbesserung des Produkts oder des Produktionsprozesses beitragen. Mit der zunehmenden Vernetzung steigt aber auch das Risiko von Angriffen durch Hacker. Das bedeutet, dass wir in alle vernetzten Systeme, also auch das Fahrzeug, umfassende Sicherheitsmechanismen, wie zum Beispiel Intrusion-Detection-Systems, implementieren müssen. Diese Systeme müssen jederzeit in der Lage sein, mögliche Angriffe umfassend zu erkennen und zu verhindern. Sicherheit im Sinne von Security ist damit eine Fragestellung, die nicht nur während der Entwicklung eines Systems, sondern über seine ganze Lebenszeit zu betrachten ist.

Mit den neuen leistungsstarken und skalierbaren Entwicklungs- und Computing-Plattformen hält auch künstliche Intelligenz bzw. Machine-Learning Einzug ins Fahrzeug. Das zeigt sich zunächst vor allem bei der Bedienung. Auch

hier übernimmt Software Funktionen, die zuvor mechanische und elektronische Komponenten innehatten. Sprachassistenten, die nicht nur vorgegebene Kommandos, sondern auch natürliche Sprache verstehen, ersetzen Knöpfe, Schalter und Displays. Neue Multimediastysteme in modernen Fahrzeugen verfügen aber nicht nur über eine intelligente Sprachsteuerung, sie sind zudem auch lernfähig und passen sich an den jeweiligen Nutzer an.

Voraussetzung für solche Services sowie für die zunehmende Vernetzung mit der Umwelt oder der Infrastruktur für das autonome Fahren ist natürlich der Zugriff auf das Internet und die Cloud. Diese stellt zusätzliche Rechenkapazitäten und Daten zur Verfügung und bindet das Fahrzeug an die IT-Infrastruktur der Hersteller an. So können Autofahrer Bezahlsysteme, Updates oder speziell auf ihre Bedürfnisse zugeschnittene Unterhaltungs- und Informationsangebote in Anspruch nehmen.

Die Rolle, die Software für unser tägliches Leben spielt, wächst also stetig. Nicht nur ihr Anteil am Entwicklungsaufwand eines Produkts nimmt zu, sie übernimmt auch in immer höherem Maße zentrale und unentbehrliche Funktionen. Gleichzeitig wird sie aber immer komplexer und damit auch fehleranfälliger. Um beim Auto zu bleiben: Aus vergleichsweise einfacher Regelsoftware, die in vereinzelt elektronischen Bauteilen des Fahrzeugs zum Einsatz kam, sind unzählige hochkomplexe Softwarepakete geworden. Inzwischen ist Software nicht nur für viele Funktionen des Fahrzeugs unerlässlich, sondern Softwareregelalgorithmen werden sogar bald die Steuerung des gesamten Fahrzeugs übernehmen.





Quelle: Elektrobit

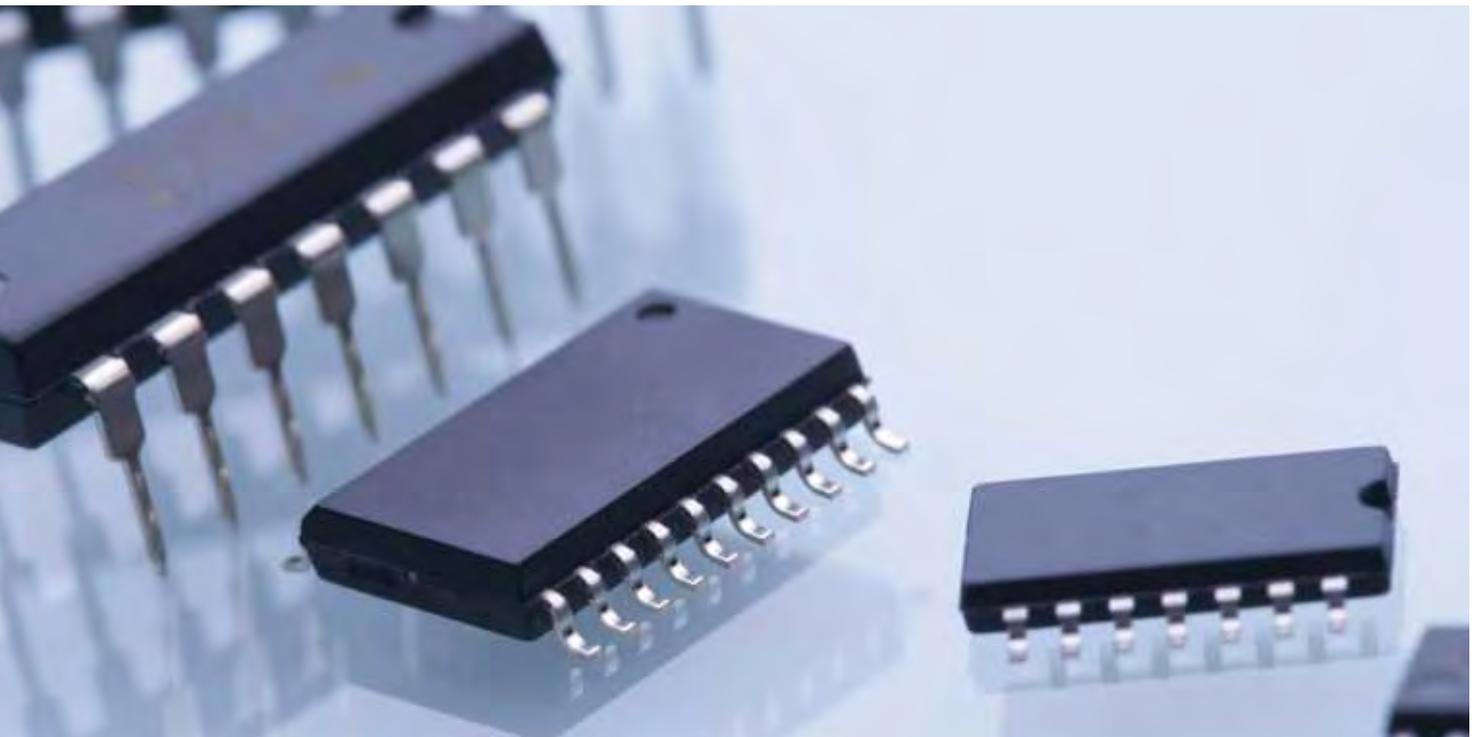
Da Software aber so zentral für all unsere Innovationen ist, ist es höchste Zeit, daraus auch Konsequenzen für die zukünftige Entwicklung neuer Produkte zu ziehen. Mit der zunehmenden Vernetzung wird das Silodenken einzelner Unternehmen, Abteilungen oder Fachdisziplinen obsolet. Wenn im Internet der Dinge mehr und mehr Produkte und Gegenstände Informationen miteinander austauschen, muss die Funktion des Gesamtsystems im Vordergrund stehen. Wir sollten die Konzeption neuer Produkte daher nicht mehr einseitig von der Hardware aus angehen. Um die stetig zunehmende Komplexität und die damit verbundenen Kostensteigerungen und Qualitätsprobleme in den Griff zu bekommen, müssen wir zunächst das Gesamtsystem betrachten – und das heißt, wir sollten zunächst von der Softwareseite aus denken und entwickeln.

Auch die Softwareentwickler können dazu beitragen, die Probleme, die aus der wachsenden Komplexität resultieren, in den Griff zu bekommen: insbesondere durch den Einsatz von Entwicklungsmethoden, die sich bereits in der IT bewährt haben, wie etwa Scrum oder Kanban. agile Entwicklungsmethoden stellen Flexibilität und Kundennutzen in den Vordergrund. Das bedeutet unter anderem, dass sich die Anforderungen im Laufe eines Projekts ändern können – was den hochkomplexen Rahmenbedingungen in der Softwareentwicklung oft besser entgegenkommt als die weitgehend starren Vorgaben des bei Embedded-Entwicklern noch immer vorherrschenden V-Modells. Die Entwickler können eigenverantwortlicher und zielgerichteter

arbeiten, sind gleichzeitig aber auch stärker auf direkte Rückmeldungen und aktive Mitarbeit der Kundenseite angewiesen. Viele Unternehmen wie zum Beispiel BMW stellen daher ihre Softwareentwicklung vollständig auf agile Methoden um. Die inhärente Komplexität von Software können solche Methoden aber nicht reduzieren, sie führen lediglich zu einem effizienteren Vorgehen in der Entwicklung.

Das alles zeigt, dass den Softwareentwicklern in Deutschland so schnell die Arbeit nicht ausgehen wird. Das gilt noch mehr für diejenigen, die mit den in der IT bewährten Entwicklungs- und Programmiermethoden vertraut sind. Softwareexperten, die über das entsprechende Know-how verfügen, werden zu einer immer selteneren, wertvolleren und begehrteren Ressource. Da die deutschen Universitäten nur relativ wenige Softwareingenieure ausbilden, spielen Entwickler schon jetzt eine entscheidende Rolle im Wettbewerb – sowohl zwischen den verschiedenen Branchen als auch innerhalb wichtiger Schlüsselindustrien wie etwa der Automobilbranche. Schon jetzt haben Unternehmen, denen es gelingt, größere Entwicklerkapazitäten an sich zu binden, große Wettbewerbsvorteile im Vergleich zu ihren Konkurrenten im Markt. Im Laufe dieser Entwicklung werden auf die Dauer voraussichtlich kleinere und finanzschwächere Unternehmen und Branchen das Nachsehen haben. Der Mangel an qualifizierten Softwareexperten kann sich daher leider schon bald zu einem entscheidenden Faktor für die Wettbewerbsfähigkeit des Standorts Deutschland entwickeln.

4 Mikroelektronik / Halbleiter



Quelle: Paylessimages – stock.adobe.com

Seit 2009 zählt die Mikro-/Nanoelektronik in Europa zu den sechs wichtigen Schlüsseltechnologien (KET = Key Enabling Technologie), die die Europäische Kommission für entscheidend hält, wenn es um die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit von Europa geht. 2014 trug die Mikroelektronik gut 10 Prozent zum europäischen Bruttoinlandsprodukt bei.

Sie stellt darüber hinaus in vielen Branchen aber auch die grundlegende Basis für Innovationen dar. So beruhen mittlerweile rund 80 Prozent aller Innovationen in der Automobilindustrie auf der Halbleitertechnik. Industrie 4.0 wäre ohne die Mikroelektronik nicht denkbar, eine nachhaltige Energieversorgung ebenfalls nicht.

Die Mikroelektronik hat aber auch einen gesellschaftsrelevanten Charakter, denn sie bietet Möglichkeiten, die Herausforderungen zu meistern, denen die heutige Gesellschaft weltweit aufgrund umfassender Veränderungen gegenübersteht.

4.1 Mikroelektronik: die Basis vieler Innovationen

Der weltweite Halbleitermarkt hat 2017 ein Volumen von 412 Milliarden Dollar erreicht, das in fünf verschiedenen Zielmärkten erwirtschaftet wurde: Consumer, Computer, Kommunikation, Automotive und Industrie. Prognosen besagen, dass der weltweite Umsatz bis 2022 auf einen Wert von 501 Milliarden Dollar steigen soll.

Die Halbleitertechnik stellt seit vielen Jahren in diversen Absatzmärkten den Innovationsmotor dar. Dank enormer Fortschritte in der Wafer-Prozessierung, im Design, bei den Gehäuse-technologien und den verwendeten Materialien gelang es der Halbleiterindustrie, immer neue Applikationen zu ermöglichen, sodass Halbleiter mittlerweile in nahezu jedem Lebensbereich zu finden sind.

So werden zum Beispiel Systeme erforscht, mit denen sich Brust-, Gebärmutter-, Prostata- und Lungenkrebs mittels Halbleiter-Sensorchips und immunologischer, genetischer und zellenbasierter biotechnologischer Verfahren früher erkennen lassen. Ein weiteres Beispiel ist das Lab-on-a-Chip (LOC), bei dem verschiedene labordiagnostische Verfahren auf einem Chip integriert werden. Darüber hinaus forschen diverse Firmen, inwieweit sich die Halbleitertechnologie zur DNA-Sequenzierung nutzen lässt. 2011 wurde mit der sogenannten Ion-Torrent-Technologie

ein DNA-Sequenzierungsverfahren auf einem Halbleiterchip vorgestellt. Eine kostengünstige und schnelle DNA-Sequenzierung würde beispielsweise eine auf den Patienten zugeschnittene Therapie ermöglichen. Mithilfe von MEMS-Technologien wiederum können Systeme für die Liquid-Biopsie realisiert werden, mit denen sich Informationen über eine Krebserkrankung anhand einer Blutprobe gewinnen lassen, was eine aufwendige invasive Biopsie ersetzt. Wearables, die eine problemlose und kontinuierliche Überwachung des Blutzuckerwerts ermöglichen, können den Patienten beispielsweise vor einer drohenden Unterzuckerung warnen und somit zu einer höheren Sicherheit beitragen.

Die Mikroelektronik ermöglicht es aber auch, dass ältere Menschen länger ein eigenständiges Leben in ihren eigenen vier Wänden führen können, was nicht nur die Lebensqualität dieser Menschen erhöht, sondern auch die erwartete Kostensteigerung begrenzt. Denn mit Ambient Assisted Living (AAL) stehen intelligente Systeme zur Verfügung, die ältere Menschen bei alltäglichen Aufgaben unterstützen, aber auch medizinische Aspekte umfassen. Mithilfe von Sensoren kann ermittelt werden, ob ein Mensch hingefallen ist, und, wenn notwendig, ein automatischer Alarm ausgelöst werden. Es können die Vitalparameter ständig überwacht, aber auch einfache Dinge wie Licht- oder Herdausschalten automatisch durchgeführt werden. Aber auch das automatisierte Fahren trägt nicht nur zu mehr Sicherheit im Straßenverkehr bei, es steigert auch die Lebensqualität älterer Menschen, denn so können sie mobil bleiben.

Die Mikrosystemtechnik kann dazu beitragen, die Luftverschmutzung in den Städten deutlich zu senken. Denn mit ihr werden Verbrennungsmotoren effizienter und Elektrofahrzeuge jedweder Art erst möglich. Mit ihr lassen sich aber auch intelligente Verkehrskonzepte realisieren, mit denen die Parkplatzsuche deutlich verkürzt und ein bequemes Umsteigen vom Privatfahrzeug auf ÖPNV ermöglicht wird, aber auch Staus umfahren werden können.

Gemäß dem Mooreschen Gesetz und den damit verbundenen, ständig kleiner werdenden Prozessstrukturen in der Fertigung konnten über Jahrzehnte hinweg einerseits die Geschwindigkeit gesteigert und andererseits die Kosten und die Leistungsaufnahme gesenkt werden. Kam der schnellste Rechner 1992 auf eine Rechenleistung von 15 GFLOPS (Giga Floating Point Operations per Second, 10^9), lag eine typische Spielekonsole im Jahr 2017 schon bei 5 bis 6 TFLOPs (Tera FLOPs, 10^{12}), also um Größenordnungen mehr. Und die Entwicklung geht weiter: Heute wird bereits vielfach an Exascale-Computern (10^{15}) geforscht.

Die Steigerung der Rechenleistung kommt aber natürlich nicht nur Computern zugute. Mittlerweile entpuppt sich speziell die Automotive-Industrie als Treiber, wenn es um mehr Rechenleistung geht. Bereits heute nutzen Fahrzeuge immer mehr Sensoren wie Radar, Lidar, Ultraschallsensoren und Kameras, um einen Rundumblick um das Fahrzeug zu erlauben, Objekte zu identifizieren und zu klassifizieren. Diese riesigen Datenmengen der Sensoren müssen in Echtzeit verarbeitet und Entscheidungen dynamisch getroffen werden. Geht es um das autonome



Quelle: Sensitec

Fahren, setzen viele Automobilhersteller auf künstliche Intelligenz, denn sie gilt als Schlüsseltechnologie, um ein exaktes Bild der Umgebung zu erfassen. Diverse Tier-Ones und OEMs haben Forschungsprojekte aufgesetzt, um die Möglichkeiten neuronaler Netze auszuloten.

Dazu kommen aber auch andere Bereiche, die dank künstlicher Intelligenz selbstständig lernen können, was beispielsweise heute schon deutliche Fortschritte beim maschinellen Sehen oder der Verarbeitung menschlicher Sprache (NLP = Natural Language Processing) mit sich bringt. Bisher werden die genutzten neuronalen Netze in der Cloud trainiert, weil sie enorm viel Rechenleistung benötigen. Google als großer Cloud-Anbieter hat darauf reagiert und letztes Jahr bereits die zweite Generation seiner eigenentwickelten TPU (Tensor Processing Unit) vorgestellt, die eine Rechenleistung von bis zu 180 TFLOPs (10 hoch 12) erreicht sowie über 64 GByte Speicher mit hoher Bandbreite verfügt. Die TPUs können über ein Hochgeschwindigkeitsnetz zu einem Pod verbunden werden, sodass 11,5 PFLOPs Rechenleistung zur Verfügung stehen. Jetzt wurde die dritte TPU-Generation vorgestellt, mit der die Pods laut Google-Angaben im Vergleich zur Vorgängerversion um den Faktor 8 leistungstärker sind, also auf über 100 PFLOPs (10 hoch 15) kommen.

Doch die Erhöhung der Rechenleistung reicht nicht aus, denn viele Anwendungen sind extrem empfindlich gegenüber zu hohem Stromverbrauch. Bei batteriebetriebenen Geräten ist das leicht nachvollziehbar, aber auch in der Automobilindustrie spielt die Leistungsaufnahme eine kritische Rolle. Ein weiteres viel diskutiertes Beispiel sind Datenzentren. Bereits 2007 hatte der Spiegel berichtet, dass Computer zum Klimakiller mutieren: „Allein in den USA laufen fünf Kraftwerke der 1.000-Megawatt-Klasse ausschließlich, um Rechenzentren mit Strom zu versorgen. Weltweit sollen es sogar 14 sein“, so der Spiegel damals.

Neben der Erhöhung der Geschwindigkeit und der verringerten Leistungsaufnahme ist auch die Senkung der Kosten von entscheidender Bedeutung. Denn nur damit war es möglich, dass ICs heute quasi überall zu finden sind. Hatte sich ihr Einsatz aufgrund der Kosten früher auf ein paar wenige Dinge beschränkt, gibt es heute kein Elektronikgerät mehr, das nicht mit Halbleitern ausgestattet ist.

Skalierung der kritischen Halbleiterstrukturen ist aber nur eine Richtung, in der Innovationen vorangetrieben werden. Unter dem Begriff More than Moore – ein Bereich, in dem Europa besonders stark ist – werden alle Entwicklungen zusammengefasst, die jenseits der digitalen Welt der Prozessoren oder Speicherbausteine liegen. Dabei geht es um die Integration unterschiedlicher Technologien wie Hochfrequenz- und Analogtechnik, passive Komponenten, Biotechnologie, Sensoren, Aktoren, Hochvolt oder mikroelektromechanische Systeme (MEMS).

Hochvolt-Transistoren zeichnen sich im Vergleich zu Standardtransistoren durch einen deutlich geringeren Platzbedarf aus und finden beispielsweise in Stromversorgungen Einsatz. CMOS-Kameras sind mittlerweile ein fester Bestandteil von Fahrerassistenzsystemen. Auch MEMS-Sensoren, die Beschleunigung, Druck, Drehbewegungen etc. messen, sind mittlerweile in allen Fahrzeugen zu finden. Und der Bedarf an Analogtechnik – die die Verbindung mit der realen Welt ermöglicht – ist trotz der Digitalisierung enorm. So soll der Umsatz mit Analog-ICs laut einer Analyse von IC Insights zwischen 2017 und 2022 stärker als der gesamte Halbleitermarkt und die meisten anderen Halbleiterkategorien wachsen.

Abb. 4.1: Kompaktes, einfach zu bedienendes eigenständiges GNSS-Modul (Global Navigation Satellite System) für Applikationen wie zum Beispiel Tracking, Drohnen, Mautsysteme, Diebstahlschutz, Personen- und Tierortung, Fahrzeugortung, Notrufe, Flottenmanagement, Car-Sharing und Diagnostik



Quelle: STMicroelectronics

4.2 More Moore

Über Jahrzehnte hinweg hat die Halbleiterindustrie die Strukturgrößen – zum Beispiel Kanal­länge, Kanalweite, Gate-Länge, Substratdo­tierung – der Transistoren reduziert. Bei jedem aufeinanderfolgenden CMOS-Knoten wurden die lateralen Strukturabmessungen um den Faktor 0,7 verringert, was einer Halbierung der Fläche entsprach.

Diese Gesetzmäßigkeit wurde als das Mooresche Gesetz bekannt, das Gordon Moore, Mitbegründer von Intel, 1965 formulierte. Darin heißt es: „Die Anzahl der Transistoren verdoppelt sich etwa alle zwei Jahre.“ Wobei dieses Gesetz oft auch etwas flexibler ausgelegt wird, in dem es einfach beschreibt, dass sich die Rechenleistung von Mikroprozessoren in einem festen Zeitraum verdoppelt, ohne dass der Preis dafür steigt.

Klar ist, dass die Skalierung eine enorme Kosteneinsparung pro Funktion oder Siliziumfläche ermöglicht, was der Halbleitertechnik schlussendlich den Weg in mehr oder minder alle Lebensbereiche öffnete. Die Skalierung hatte auch zur Folge, dass alle von außen angelegten Spannungen um denselben Faktor reduziert wurden, sodass trotz Verkleinerung der Strukturen alle elektrischen Felder konstant blieben und damit auch das Verhalten des Transistors. Mit der Skalierung um den Faktor X sank darüber hinaus die Gatterlaufzeit um X , die Verlustleistung sank sogar um X^2 .

Das Mooresche Gesetz besitzt auch heute noch seine Gültigkeit – auch wenn mittlerweile oft aufgrund ökonomischer Faktoren über sein Ende diskutiert wird. Um der Gesetzmäßigkeit zu folgen, musste sich die Halbleiterindustrie oft diverse Neuerungen einfallen lassen. Denn der Sprung auf eine kleinere Prozesstechnologie ist alles andere als trivial. Auch wenn in manchen Fällen eines Technologiesprungs keine revolutionären Schritte notwendig waren, in anderen mussten sich die Hersteller von jahrelang bewährten Methoden abwenden, um neu auftretende Probleme lösen zu können.

Eines der neu aufgetretenen Probleme war die Elektromigration, bei der Atome in den Leiterbahnen aufgrund zu hoher Stromdichten abgebaut werden, was bis zu einer Unterbrechung der Leiterbahn führen kann. Eine Lösung dieses Problems bestand darin, dass man das früher genutzte Aluminium für die Metallisierung durch Kupfer ersetzte, das eine deutlich höhere Stromdichte als Aluminium verträgt. Darüber hinaus zeichnet sich Kupfer auch noch durch eine deut-

lich höhere Signalgeschwindigkeit aus. Dass man nicht von Anfang an auf Kupfer als Material für die Metallisierung setzte, liegt an der Tatsache, dass Kupfer lange als Kontaminierungsquelle für Silizium galt, und nur eine neue Prozesstechnik – Damascene Prozess – die Nutzung von Kupfer ermöglichte, ohne dass das Kupfer sich im Silizium-Wafer verteilt. Darüber hinaus entwickelte die Halbleiterindustrie aber auch Methodiken, um die Transistoren selbst schneller zu machen. So hat Halbleiterhersteller Intel als Erster mit seinem 90-nm-Prozess die Streckung des Silizium-Kristallgitters (Strained Silicon) eingeführt, wodurch die Mobilität von Elektronen und Löchern erhöht werden konnte.

Ein direkt mit der Skalierung zusammenhängendes Problem ist die Leistungsaufnahme. Früher stand bei den ICs lediglich die dynamische Leistungsaufnahme im Mittelpunkt, sprich die Energie, die notwendig war, um den Transistor zu schalten, plus die dynamische Verlustleistung durch Querströme (bei steilen Schaltflanken vernachlässigbar). Mit dem 90-nm-Prozess änderte sich das, denn auf einmal spielte auch die durch Leckströme – vor allem Leckstrom durch das Gate-Oxid (Tunnelströme durch dünnes Gate-Oxid) und Subthreshold-Leckstrom (Diffusion von Ladungsträgern zwischen Drain und Source) – verursachte statische Leistungsaufnahme eine entscheidende Rolle. Also mussten Wege gefunden werden, die statische Verlustleistung in den Griff zu bekommen. Deshalb setzte Intel als Erster auf einen HKMG-Fertigungsprozess (High- k + Metal Gate), mit dem die Leckströme durch das Gate-Oxid reduziert werden konnten. Bei HKMG wird das Gate mit neuen Materialien aufgebaut: Das bisherige Dielektrikum SiO_2 (Isolator) wurde durch ein Material mit einem höheren k -Wert (zum Beispiel Hafniumoxid) ersetzt und für die Gate-Elektrode statt Polysilizium ein Metall genutzt. Eine weitere Möglichkeit, Kurzkanaleffekte (zum Beispiel Punch-Through: Berühren sich die Raumladungszonen von Source und Drain, fließt ein Strom, der nicht vom Gate kontrolliert wird) und Leckströme zu verringern, stellt die SOI-Technik (SOI = Silicon on Insulator) dar. Bei ihr werden die Transistoren auf einer dünnen Siliziumschicht gefertigt, die durch eine vergrabene Schicht aus Siliziumdioxid vom Silizium isoliert ist. Die Kurzkanaleffekte führten auch dazu, dass die sogenannten Multi-Gate-Transistoren entwickelt wurden, wodurch nicht mehr das Dotierprofil allein für die Kontrolle der Kurzkanaleffekte genutzt werden musste, sondern die Struktur des Transistors diese Rolle übernahm. In diesem Fall wird der leitfähige Kanal in Form einer dünnen horizontalen Silizium-Finne realisiert, der auf beiden Seiten einen Gate-Anschluss hat.

Es gibt aber auch Triple-Gate-Transistoren, bei denen das Gate an drei Seiten des dünnen Stegs aus Silizium aufgebracht wird. Diese nicht planaren Transistoren zeichnen sich durch einen vergrößerten Kanalbereich und durch verbesserte elektrische Eigenschaften wie kurze Schaltzeiten oder eben kleine Leckströme aus. Außerdem sind sie dank der vertikalen Ausrichtung der Finne platzsparend, sodass die Packungsdichte erhöht werden kann. Intel nutzt seitdem 22-nm-Prozess FinFETs für seine Prozessoren. Mittlerweile bieten auch diverse Foundries Multi-Gate-Prozesse an.

Während FinFETs auf rechenintensive Anwendungen mit höchster Taktfrequenz und Treiberleistung zielen, wurde noch in eine zweite Richtung entwickelt, um auch die Anforderungen von Systemen zu erfüllen, die weniger auf höchste Rechenleistung ausgelegt sind, sondern vielmehr auf die richtige Balance zwischen Rechenleistung, Leistungsaufnahme und Kosten. Heraus kam die FD-SOI-Technik, die dank einfacherer Prozesse (weniger Prozessschritte) deutlich günstiger als eine FinFET-Technologie mit den gleichen Strukturgrößen ist – und das trotz höherer Kosten für den SOI-Wafer. Globalfoundries bietet beispielsweise einen 22-nm-FD-SOI-Prozess an, der laut Unternehmensangabe günstiger ist als ein 16-nm-FinFET-Prozess. Der wichtigste Vorteil ist allerdings die niedrigere Leistungsaufnahme im Vergleich zu einem planaren CMOS- oder einem FinFET-Prozess. Auch ist es gelungen, einen Prozessor auf Basis der Ultra-Low-Power-Library des 22-nm-FD-SOI-Prozesses zu realisieren, der mit einer Spannung von 0,4 V auskommt. Ergo: Gegenüber der 14-nm-FinFET-Technik sinkt die Leistungsaufnahme um 90 Prozent.

Es existieren mehrere Ansätze, um die Leistungsaufnahme zu reduzieren, wie beispielsweise Clock Gating, bei dem ganze Taktzweige von nicht benötigten Einheiten abgeschaltet werden. Die Einführung diverser Energiesparmodi hilft, die Leistungsaufnahme zu senken, indem immer nur die Einheiten aktiv sind, die wirklich gebraucht werden, der Rest befindet sich im Schlafmodus und verbraucht keine Energie. Dynamic Voltage Scaling (DVS) geht in dieselbe Richtung, indem die Spannung und die Frequenz an die Last angepasst werden und damit der Energieverbrauch pro Operation optimiert wird. Weitere Low-Power-Techniken sind Adaptive Voltage and Frequency Scaling (hier wird die Spannung unabhängig zur Frequenz skaliert) und Multi-Vt-Implementierungen, wobei Letztere beispielsweise höhere Maskenkosten zur Folge haben.

Abb. 4.2: Low-Dropout-Spannungsregler mit sehr niedrigem Ruhestrom für Applikationen mit langen Stand-by-Zeiten



Quelle: STMicroelectronics

Dass viel in Richtung Senkung des Energieverbrauchs unternommen wird, liegt an der Tatsache, dass der Energieverbrauch das größte Problem für die Halbleiter darstellt. Die Energieeffizienz muss um Größenordnungen verbessert werden, um die IoT-Revolution Wirklichkeit werden zu lassen. Eine weitere Gesetzmäßigkeit, die in der Halbleiterindustrie lange ihre Gültigkeit besaß, war das Koomey-Gesetz. Darin heißt es, dass sich die Energieeffizienz alle 18 Monate (1,57 Jahre) verdoppelt. Bis 2009 hat dieses Gesetz die Entwicklungen auch gut abgebildet, doch mittlerweile dauert es fast drei Jahre, um die Energieeffizienz zu verdoppeln. Historisch betrachtet wurde in zehn Jahren die Effizienz um den Faktor 100 verbessert. Mittlerweile dauert es rund 20 Jahre, um solche Verbesserung zu erreichen. Es müssen Technologien gefunden werden, die eine um Größenordnungen höhere Rechenleistung ermöglichen, während die Leistungsaufnahme auf dem gleichen Niveau wie heute bleibt. Anders ausgedrückt: Die Energieeffizienz von ICT-Anwendungen oder die Rechenleistung pro Watt muss um den Faktor von rund 1.000 verbessert werden.

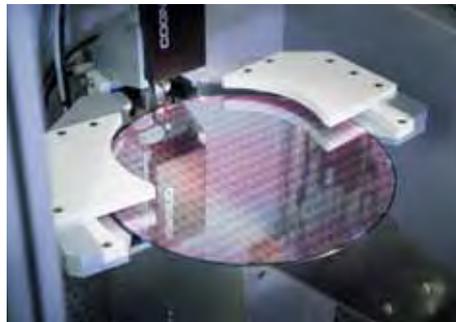
Die Spannung der Transistoren wurde bis 0,8 V abgesenkt und hier steht sie seit Jahren fest. Deshalb sind neue Schaltelemente mit steiler Schaltcharakteristik (Steep-Slope-Device) notwendig, wie TFETS (Tunnel-FETs), NEM-Relais (NEM = Nano-Electro-Mechanical), NCFETs (FET mit negativer Kapazität) oder Phase-Change-Schalter. Mit diesen Alternativen wäre es möglich, V_{dd} (Versorgungsspannung) auf unter 0,3 V und V_{th} (Schwellspannung) auf 0,1 V zu reduzieren.

Einige sind überzeugt, dass die TFETs derzeit der vielversprechendste Ansatz sind. Diese Transistoren könnten in heterogenen Multi-Core-Prozessor-Designs mit CMOS und TFETs zum Einsatz kommen und den Energieverbrauch um bis zu 50 Prozent reduzieren. Dem kann jedoch nicht vollkommen zugestimmt werden, denn die Nutzung von TFETs beschränkt sich auf Low-Power-Anwendungen, für High-Performance-Applikationen ist die Treiberleistung nicht groß genug.

4.2.1 Wafer-Durchmesser

Kosten sind ein entscheidender Faktor in der Halbleiterindustrie, deshalb sind die Hersteller dazu übergegangen, größere Wafer-Scheiben zu nutzen, denn auch damit ließen sich die Kosten pro Funktion oder Siliziumfläche reduzieren. Waren in den 70er-Jahren 3-Zoll-Wafer (76 mm) üblich, sind wir heute bei 8-Zoll-Wafern (300 mm Durchmesser) angekommen. Der Übergang auf größere Wafer ermöglichte einerseits einen größeren Durchsatz, andererseits wurde man damit auch der Entwicklung gerecht, dass die Chips größer wurden.

Abb. 4.3: Einlesen einer Wafer-ID in einem 300-mm-Wafer-Umhorder



Quelle: Robert Bosch

Mit dem Wechsel von 6 (200 mm) auf 8 Zoll (300 mm) steigt der Durchmesser um einen Faktor von rund 1,3, die verfügbare Wafer-Fläche um den Faktor 2,25. Mit diesem Schritt ließen sich die Kosten pro Siliziumfläche ungefähr um 30 Prozent reduzieren. Diese Kostenreduktion lässt sich einfach erklären: Viele Prozessschritte wie beispielsweise Ätzprozesse brauchen auch bei größeren Durchmessern zeitlich nicht länger, wodurch die bestehenden Kosten folglich einfach auf mehr Chips verteilt werden, also pro Chip sinken.

Weltweit wurden im letzten Jahr laut dem Branchenverband SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International) Silizium-Wafer mit einer Gesamtfläche von gut 7,6 Millionen m² zu Halbleitern in mehr als 1.100 Fabs verarbeitet. SEMI gibt außerdem an, dass derzeit noch über 80 zusätzliche Fabriken in der Planung bzw. im Aufbau sind. Auf 300-mm-Wafer entfällt heute ein Anteil von gut 55 Prozent der gesamten Wafer-Fläche, 200-mm-Wafer kommen noch auf rund 25 Prozent. 150-mm-Wafer und kleinere verlieren an Bedeutung und bewegen sich nur noch um die 10 Prozent.

Abb. 4.4: Makroskopische Inspektion einer Siliziumscheibe

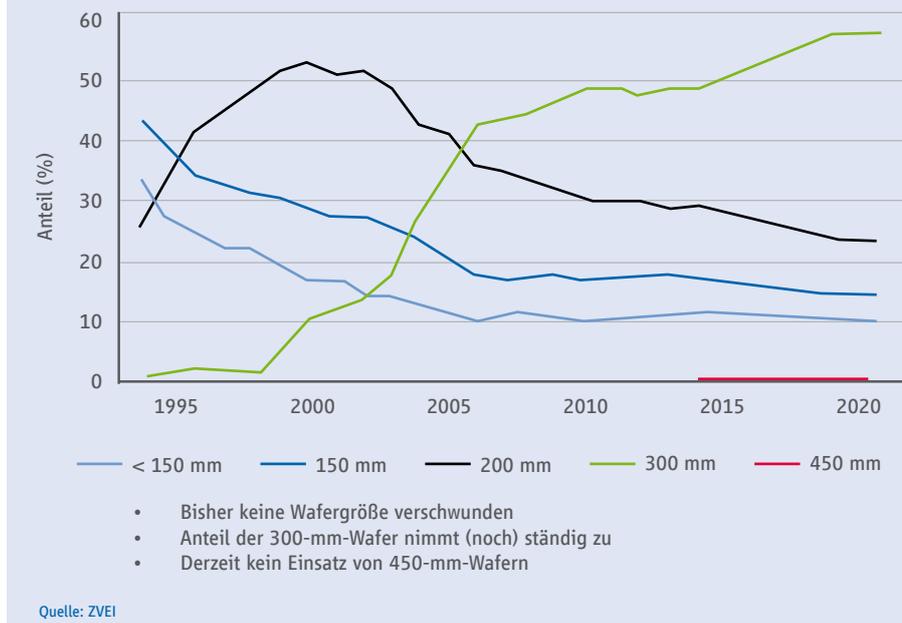


Quelle: X-Fab Semiconductor Foundries

Bereits 2008 hatten die weltweit größten Halbleiterunternehmen geplant, auf 450-mm-Wafer umzusteigen, um die Kosten weiter senken zu können. Auch seitens der ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) hieß es, dass der Übergang von 300- auf 450-mm-Wafer spätestens 2012 passieren müsste, damit die Industrie Moore's Law weiterfolgen könnte.

Das Thema der 450-mm-Wafer ist jedoch vom Tisch. Es zeigte sich bereits 2015/2016, dass das Interesse an 450-mm-Wafer verflogen war. Damals wurden wirtschaftliche Gründe dafür verantwortlich gemacht, denn der Übergang hätte nicht die Kostenvorteile erbracht, die die Entwicklung der nächstgrößeren Wafer-Generation gerechtfertigt hätten.

Abb. 4.5: Verteilung nach Waferdurchmesser



Was war passiert? Es gibt in der Wafer-Verarbeitung diverse Verarbeitungsschritte, die von einem größeren Wafer-Durchmesser profitieren, ein Prozessschritt skaliert aber nicht die Lithografie, mit der die Strukturen auf den Wafer aufgebracht werden. Und auf diesen Prozess entfällt heute ein Großteil der Kosten; damit wird der Umstieg nicht mehr rentabel, weil die Gesamtkosten für die Chip-Herstellung nur noch minimal sinken würden. Hinzu kam noch, dass vollkommen unklar war, wer die Entwicklung des dazugehörigen Equipments bezahlen sollte. Die Bereitschaft der Equipment-Industrie fiel gering aus, denn sie hatten schon die 300-mm-Entwicklungen gestemmt und lange darauf warten müssen, bis sich die geleisteten Investitionen bezahlt gemacht hatten.

4.2.2 Wo stehen wir heute?

Mittlerweile wird zwar viel über das Ende von Moore's Law diskutiert, aber dennoch schreitet die Halbleiterindustrie immer weiter den Skalierungspfad nach unten. Wie weit die Halbleiterindustrie heute schon ist, zeigen Vorträge, die auf den wichtigsten Halbleiterkonferenzen, IEDM und ISSCC, gehalten werden. So haben beispielsweise einige Unternehmen auf der letzten IEDM (Dezember 2017) Details über ihre neuesten FinFET-Prozesse preisgegeben und präsentierten ihre 10-nm-Technologie und ihre 7-nm-Plattform. Im Gegensatz zu früher bezeichnen die Knoten heute nicht mehr die physikalischen Dimensionen der Transistoren, sodass die unterschiedlichen Prozesse trotz unterschiedlicher Prozessnamen (7 versus 10 nm)

durchaus vergleichbar sind. Die Entwicklung des 7-nm-Prozesses ist bei vielen Unternehmen abgeschlossen und die Produktion ist gestartet bzw. in Vorbereitung.

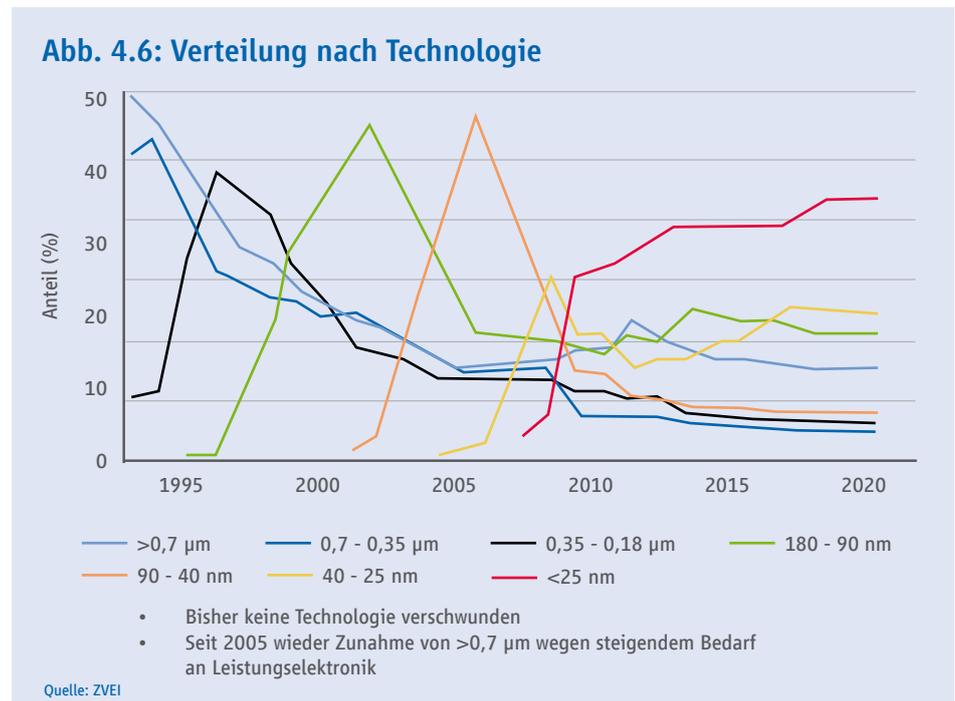
Auf der letztjährigen ISSCC (Februar 2018) wiederum haben diverse Unternehmen ihre neuesten Prozessorentwicklungen dargelegt. So wurde beispielsweise ein neuer Xeon-Prozessor mit bis zu 28 Prozessorkernen präsentiert, der mithilfe eines 14-nm-FinFET-Prozesses gefertigt wird. Ein anderes Unternehmen wiederum sprach über einen Mikroprozessor im z14-System, das bis zu 24 CPs (Central Processor) und 4 SCs (System Controller) umfasst. Die einzelnen CPs verfügen über 10 Prozessorkerne, diverse Schnittstellen, 128 MB L3-Cache und belegen mit 6,1 Milliarden Transistoren eine Fläche von 696 mm². Die SCs wiederum arbeiten mit 2,6 GHz, verfügen über 672 MB L4-Cache (eDRAM) sowie diverse Schnittstellen und kommen auf dieselbe Fläche wie die CPs, umfassen aber 9,7 Milliarden Transistoren. Beide Chips werden mithilfe einer 14-HP-Technologie, einem Prozess mit FinFETs auf einem SOI-Substrat gefertigt. Der bislang fortschrittlichste KI-Grafikprozessor kommt auf 21 Milliarden Transistoren und belegt eine Fläche von 815 mm². Vergleicht man dies mit den Motorola-Prozessoren 68020 aus dem Jahr 1984, zeigen sich die enormen Fortschritte, die seitdem erzielt wurden: Der Prozessor umfasste lediglich 190.000 Transistoren.

Wissenschaftliche Konferenzen sind das eine, die Realität kann manchmal aber etwas anders aussehen. Typischerweise genießen die Unternehmen einen sehr guten Ruf hinsichtlich ihrer Prozessentwicklung und Fertigung. Und trotzdem wurde mehrmals angekündigt, dass geplante Zeiträume für die Einführung neuer Prozesstechnologie nicht eingehalten werden könnten und verschoben werden müssten. Die Begründung: Die Fertigungsausbeute ist noch nicht gut genug, sodass sich die Zeitpläne für den Serienstart einer neuen Prozessgeneration ändern.

Dabei sei noch darauf hingewiesen, dass die Leistungssteigerungen bei Prozessoren nicht ausschließlich auf die Skalierung der Prozesstechnik zurückzuführen sind. Zwar leistete die Prozesstechnik in den letzten zehn Jahren einen wichtigen Beitrag zu den Verbesserungen, aber schlussendlich sind nur rund 40 Prozent der erreichten Performance-Gewinne auf die Prozesstechnik zurückzuführen. Die restlichen 60 Prozent wurden über Integration von Systemkomponenten, Verbesserung der Mikroarchitektur, Verbesserung des Power-Managements und über Software erreicht.

Auf die modernsten Prozesstechnologien, wie sie für die neuesten Mikroprozessoren zum Einsatz kommen, entfallen laut der aktuellen Marktstudie Mikroelektronik – Trendanalyse bis 2022 vom ZVEI (April 2018) knapp 35 Prozent (hier sind alle Prozessstrukturen unter 25 nm zusammengefasst), allerdings steigend. Den zweitgrößten Anteil (rund 20 Prozent) verbuchen Prozesstechnologien mit Strukturen zwischen 40 und 25 nm und an dritter Stelle folgen Prozesse mit 180 bis 90 nm, die immer noch auf knapp 20 Prozent kommen.

Abb. 4.6: Verteilung nach Technologie



4.2.3 Designkosten explodieren

Bei allen Fortschritten, die mit kleineren Fertigungsprozessen erreicht wurden, muss eines ganz klar sein: Die Kosten für ein Design steigen mit kleineren Strukturgrößen und zwar deutlich. Bereits vor Jahren hieß es seitens des Marktforschungsunternehmens Gartner, dass der Entwurf eines 7-nm-SoC (System on Chip) das Neunfache eines 28-nm-Designs kostet – von gut 270 Millionen Dollar ist hier die Rede. Die durchschnittlichen IC-Entwicklungskosten für einen 14-nm-Chip wurden auf etwa 80 Millionen Dollar geschätzt. Damit wird sehr schnell deutlich, dass sich nur wenige Halbleiterunternehmen ein solches Design leisten können, denn es gibt nicht viele Anwendungen, die einen Umsatz versprechen, der die Designkosten wieder hereinholt. Bislang wird davon ausgegangen, dass der 28-nm-Knoten hinsichtlich Kosten/Transistor der billigste Prozess ist, weil mit kleineren Strukturgrößen die Kosten pro Transistor nicht mehr sinken.

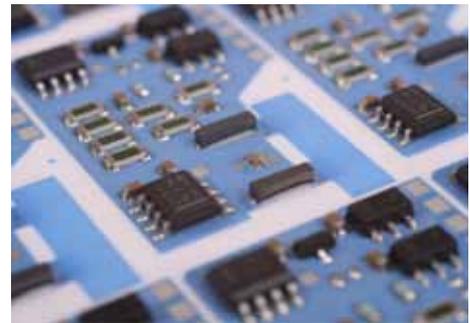
Neben den Kostenexplosionen auf der Entwicklungsseite, die kleinere Strukturen mit sich bringen, steigen auch die Investitionen, die notwendig sind, um neue Wafer-Fabs für modernste Prozesstechnologien zu bauen.

4.2.4 Wo geht die Reise hin?

Nachdem auch in Zukunft der Bedarf an Rechenleistung steigen wird, stellt sich die Frage, wie die Skalierung weiter vorangetrieben werden kann? Heutiger Stand: Die Skalierung der FinFET-Technologie soll mit dem 7-nm-Knoten enden.

Und dann? In den Forschungszentren der Welt werden in Zusammenarbeit mit den Halbleiterunternehmen diverse Richtungen verfolgt, um auch in Zukunft skalieren zu können. Eine Möglichkeit besteht beispielsweise darin, bei 5 nm auf laterale Nanowires (NW) zu wechseln. Dabei wird statt der Finne ein NW genutzt, sodass das Gate den Nanodraht komplett (360 Grad) umschließen kann. Diese sogenannten GAA-MOSFETs (Gate-all-around MOSFETs) benötigen laut dem belgischen Forschungszentrum Imec bei einem NW-Durchmesser von 10 nm nur noch eine Versorgungsspannung von 0,7 V, bei einem Durchmesser von 7 nm sind sogar nur noch 0,5 V notwendig. Allerdings geht das Forschungszentrum davon aus, dass mehrere NWs übereinander gesetzt werden müssen, um die kleinere Fläche gegenüber FinFETs ausgleichen zu können. Deshalb hat das Forschungszentrum die sogenannten Nanosheets (NS) entwickelt, die aus drei übereinanderliegenden NWs bestehen.

Abb. 4.7: Sensoren auf bestückter Leiterplatte



Quelle: Sensitec

Eine weitere Forschungsrichtung basiert auf neuen Materialien, die eine höhere Ladungsträgermobilität (Löcher und Elektronen) als Silizium aufweisen. Zum Beispiel wird erwartet, dass FinFETs deutlich schneller werden, wenn die Finne in Zukunft nicht mehr mit Silizium, sondern mit SiGe realisiert wird. Der Vorteil von SiGe wäre, dass die bisherigen Prozessschritte zur Erzeugung der Finnen zum Großteil weiterverwendet werden können.

Wenn es in Richtung Sub-5-nm-Knoten geht, sind noch diverse andere Materialien wie GaAs, InP, Ge, InSb oder InAs im Gespräch. Alle haben den Vorteil einer höheren Ladungsträgermobilität. So kommt Germanium bzw. auf eine Elektronenmobilität von $3.900 \text{ cm}^2/(\text{V} \times \text{s})$ und auf eine Lochmobilität von $1.900 \text{ cm}^2/(\text{V} \times \text{s})$. Silizium liegt bei 1.400 bzw. $450 \text{ cm}^2/(\text{V} \times \text{s})$. Germanium hat nicht nur den Vorteil der höheren Mobilität, sondern aus der Sicht der Imec-Wissenschaftler könnte ein Großteil des NS-Prozess-Flows weiterverwendet werden, allerdings sinkt mit Germanium das Temperaturbudget und viele der bisherigen Prozessschritte müssen neu entwickelt werden.

Darüber hinaus stellen auch 2D-Materialien, allen voran Graphen, eine Zukunftsoption dar. Das Material ist aus einer einzigen Schicht gebundener Kohlenstoffatome aufgebaut und zeichnet sich durch sehr gute thermische wie elektrische Eigenschaften (dazu ist eine Modifikation des Materials notwendig) aus. Hier besteht das Problem allerdings immer noch darin, dass es schwierig ist, größere Mengen kristalliner 2D-Materialien zu züchten. Aus der Sicht der Imec-Wissenschaftler eignen sich 2D-Materialien besonders für Low-Power-Anwendungen, weil ihr Energieverbrauch deutlich geringer ausfällt.

4.2.5 Speicher

Speicherbausteine sind neben den Prozessoren der zweite Treiber für eine stetige Miniaturisierung der Halbleiterstrukturen. Heute werden DRAMs mit 21-/20-nm-Prozesstechnologien gefertigt. Die fortschrittlichsten NAND-Speicher sind 3D-NAND-Speicher mit 48 bzw. 64 Lagen. Im nächsten Schritt erwarten die Forscher vom Imec, dass DRAMs mit 18-/12-nm-Prozessen gefertigt werden, und bei den 3D-NANDs die Anzahl der Lagen auf bis zu 512 erhöht wird. Geht es allerdings um IoT-Anwendungen, so sollen verstärkt neue nichtflüchtige Speichertechnologien wie ReRAM und MRAM zum Einsatz kommen.

Auch bei den SRAM-Speichern gibt es noch Fortschritte zu verzeichnen. So wurde auf der ISSCC 2018 ein 23,6 MBit/mm² großes SRAM in 10-nm-FinFET-Technologie vorgestellt, das sich durch die derzeit kleinste SRAM-Zelle auszeichnet. Ebenfalls wurde ein 7-nm-FinFET-SRAM auf Basis eines 7-nm-Prozesses und EUV-Lithografie präsentiert.

Abb. 4.8: Zukunftsmarkt Halbleiter



Quelle: Robert Bosch

Interessanter sind allerdings die vielen zukünftigen Technologien, an denen zum Teil schon seit Langem gearbeitet wird. Als man früher noch glaubte, dass PCM (Phasenwechselfpeicher) die NOR-Flash-Technologie ersetzen könnte und RRAM (resistive RAM) auf NAND-Flash folgt, galt die STT-MRAM (Magnetspeicher mit Spin-Transfer) als die Technologie, die die DRAMs ersetzen könnte; heute weiß man, dass für die meisten dieser Technologien der Weg über den embedded Bereich erfolgt. Das zeigt sich beispielsweise daran, dass sich die eMRAM-Technik für 22-nm-FD-SOI-Technik anbot und bereits seit geraumer Zeit MRAM-Speicher in Mikrocontroller integriert werden. Darüber hinaus gibt es aber noch diverse andere Speicher wie OxRAM, CBRAM (Conductive Bridging Random Access Memories) und VRAMs (Vertical Resistive Memories), die alle als vielversprechend gelten. Auf der ISSCC 2018

wurde erklärt, dass all diese Speicher sich durch Merkmale wie niedrige Spannungen (von 1 bis zu 3 V), schnelle Programmier- und Lesezeiten (unter 1 ns), langen Datenerhalt, die Möglichkeit, einzelne Bits zu verändern, hohe Dichte und eine einfache Integration in die Back-End-Of-Line-Prozesse fortgeschrittener CMOS-Techniken auszeichnen. Derzeit wird ReRAM für Anwendungen wie Mikrocontroller, Server und Hochleistungsrechner entwickelt. Aufgrund des geringen Stromverbrauchs und der Nichtflüchtigkeit sind ReRAM-Speicher auch für die Implementierung von energieeffizienten bio-inspirierten Synapsen in komplexen neuronalen Netzen geeignet.

4.2.6 Die Zukunft hält viele Optionen offen

Geht es um höchste Rechenleistung, stellen Quanten-Computer eine interessante Variante dar. Auch wenn sie nicht alle Rechenprobleme besser als bisherige Superrechner lösen können, für spezielle Probleme kann die Nutzung von quantenmechanischen Effekten schneller zum Ergebnis führen. Dazu zählen beispielsweise Simulationsaufgaben, die Wettervorhersage, die Entwicklung neuer Medikamente oder auch die Gentechnik.

An dieser Technik wird seit mehreren Jahrzehnten gearbeitet. Aber jetzt scheint richtig Bewegung in die Technik zu kommen. Bei Quanten-Computern gilt die Zahl 50 als magisch. Denn Experten sind der Überzeugung, dass mit 50 Qubits eine Rechenleistung möglich ist, die klassische Supercomputer in den Schatten stellt. Bislang waren nur kleinere Anordnungen von 4 oder 6 Qubits möglich, doch jetzt mehren sich die Meldungen, die besagen, dass man dem Ziel schon ziemlich nah gekommen ist. So wurde auf der CES 2018 ein 49-Qubit-Superconducting-Quanten-Test-Chip (Code-Name: Tangle Lake) vorgestellt. Ebenfalls 2018 wurde der bislang größte Quanten-Computer vorgestellt. Der sogenannte Bristlecone besitzt ein supraleitendes Array von 72 Qubits.

Auch wenn die Unternehmen mittlerweile mehr als 50 Qubits realisieren können, ist ein breiter Einsatz der Quanten-Computer immer noch nicht möglich. Denn Quantencomputer benötigen eine aufwendige Fehlerkorrektur und dafür ist ein Vielfaches von Qubits notwendig. Aber wie die Entwicklungen zeigen, das Interesse an diesen Computern ist groß. Auch Forschungszentren arbeiten an der Technologie und verfolgen zwei Ansätze: supraleitende Qubits und halbleitende Qubits.

Neuromorphe ICs sind ebenfalls eine Entwicklung, die derzeit von vielen Unternehmen, akademischen Instituten und Forschungseinrichtungen vorangetrieben werden. Neuromorphe ICs gelten als einer der vielversprechendsten Ansätze, wenn es darum geht, die Rechenleistung deutlich zu erhöhen und gleichzeitig die Leistungsaufnahme stark zu reduzieren. Neuromorphe ICs imitieren das menschliche Gehirn, das dadurch lernfähig ist, indem es Verbindungen zwischen Neuronen verstärkt oder abschwächt – und genauso macht es ein neuromorpher IC.

Im Jahr 2017 wiederum wurde ein in 65 nm gefertigter Technologie-Demonstrator gezeigt, der auf einer OxRAM-Speichertechnologie basierte. Um die Lernfähigkeit des Demonstrators zu beweisen, wurde der Chip zunächst mit rund 40 Menuetten trainiert. Dabei lernte er nicht nur die unterschiedlichen Notenlängen, Sequenzen von Tonintervallen, sondern auch, welche Notenfolgen wahrscheinlich sind, welche unwahrscheinlich. Diese Übergänge zwischen den Noten legte der Chip gewichtet im OxRAM ab: eine starke Verbindung für zwei Noten, die sehr wahrscheinlich aufeinander folgen, eine schwache Verbindung, wenn die Reihenfolge unwahrscheinlich ist. Im zweiten Schritt hat er seine Speicherinhalte ausgelesen und selbstständig ein Musikstück komponiert. Auch hier werden unterschiedlichste Ansätze verfolgt, um neuromorphe ICs zu realisieren, OxRAM ist nur eine Variante.

Auch wenn die Nutzung von nichtflüchtigen Speichern, wie OxRAM, allgemein als sehr vielversprechend angesehen wird, existieren weitere Bemühungen. TrueNorth (ein rein digitales Design) ist dank der lokalen Nähe zwischen Synapsen (SRAM) und Neuronen zwar sehr energieeffizient, aber die Realisierung der Synapsen mithilfe der SRAM-Technik hat die Nachteile, dass sie volatil ist und viel Platz verbraucht. Für die Implementierung der Synapsen sollte also eine Technologie gewählt werden, die in Hinblick auf Leistungsaufnahme, Geschwindigkeit, Größe/Dichte und Verdrahtung günstiger ist als die SRAM-Technik. Und damit kommen die neuen nichtflüchtigen Speichertechniken wie RRAM, PCM, CBRAM und FeRAM ins Spiel, weil sie genau die Charakteristiken aufweisen, die für elektronische Synapsen wünschenswert sind.

4.3 More than Moore

Die Skalierung der Transistoren, also alle Aktivitäten, die unter More Moore zusammengefasst werden, stellt in der Halbleiterindustrie zwar eine wichtige Entwicklungsrichtung dar, aber nicht die einzige. Denn neben der Skalierung gibt es noch eine zweite Richtung, die mit More than Moore bezeichnet wird. Unter diese Kategorie fallen Analog-/HF-Technologien, MEMS, Sensoren, Hochvolttechnik, Optoelektronik und biotechnologische ICs.

Vielleicht ist es einfacher, die stetigen Weiterentwicklungen bei More Moore mithilfe der verschiedenen Prozessknoten darzustellen, aber auch im Bereich More than Moore sind beachtliche Fortschritte zu verzeichnen, die allerdings nichts mit kleinsten Prozesstechnologien zu tun haben.

Ganz im Gegenteil, bei More-than-Moore-Technologien kommen typischerweise ältere CMOS-Prozesstechniken oder ganz andere Ansätze zum Tragen. Ein wichtiges Beispiel aus den More-than-Moore-Technologien sind die Leistungshalbleiter. Hier geht es definitiv nicht um kleinste Fertigungstechnologien, sondern vielmehr um Gehäuse- und Chip-Integrationstechniken sowie Materialien. Das zeigen auch Zahlen des ZVEI: Der Anteil der Fertigungsprozesse mit Strukturgrößen von über 0,7 μm ist seit 2005 aufgrund der verstärkten Nachfrage nach Leistungselektronik wieder gestiegen. Nichtsdestoweniger müssen auch die Hersteller von Leistungshalbleitern Skalierungseffekte nutzen, um Kosten senken zu können.

4.3.1 Leistungselektronik

Energieeffizienz ist in aller Munde. Dabei kommt einer energieeffizienten Umwandlung ein besonders hoher Wert zu, denn laut einem Bericht des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) aus dem Jahr 2017 entfallen knapp 22 Prozent des Primärenergieverbrauchs in Deutschland auf Umwandlungsverluste.

Mit der Leistungselektronik können diese Verluste deutlich gesenkt werden und zwar entlang der gesamten Energiewertschöpfungskette, von der Stromerzeugung über die Übertragung im Netz bis hin zu den Endgeräten. Die Leistungselektronik hilft aber auch, Motorsteuerungen und die Beleuchtung energieeffizienter zu gestalten. Darüber hinaus ist Elektromobilität sowie Photovoltaik (PV) ohne Leistungselektronik überhaupt nicht denkbar bzw. machbar.

Der absolute Großteil der Leistungselektronik von heute basiert auf Silizium (Si). Allerdings bieten mittlerweile viele Hersteller auch Komponenten auf Basis der sogenannten Wide-Band-gap-Materialien (WBG-Materialien), namentlich Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN).

Diesen Materialien werden mittlerweile enorme Wachstumsraten zugesprochen. IHS Markit prognostiziert, dass der SiC- und GaN-Leistungshalbleitermarkt 2020 ein Volumen von fast eine Milliarde Dollar erreichen wird. Der wichtigste Wachstumstreiber ist der steigende Bedarf an diesen Komponenten in Hybrid- und Elektrofahrzeugen, aber auch Stromversorgungen und PV-Inverter nutzen zunehmend WBG-Komponenten. Allein der Einsatz von SiC- und GaN-Leistungshalbleitern im Hauptumrichter von Hybrid- und E-Fahrzeugen soll zwischen 2017 und 2027 zu einer durchschnittlichen Wachstumsrate von über 35 Prozent pro Jahr führen, was einem Volumen von 10 Milliarden Dollar im Jahr 2027 entsprechen würde. Die Analysten gehen außerdem davon aus, dass GaN-on-Si-Transistoren im Jahr 2020 die Preisparität mit MOSFETs und IGBTs erreicht haben. Sobald dieser Punkt erreicht ist, soll der GaN-Leistungshalbleitermarkt bis 2024 auf 600 Millionen Dollar steigen, bis 2027 sogar auf über 1,7 Milliarden Dollar.

Geht es um SiC-Komponenten, so erfahren sie dank der steigenden Anzahl von Hybrid- und Elektrofahrzeugen ebenfalls einen deutlichen Wachstumsschub. Gleichzeitig soll die Marktdurchdringung insbesondere in China zulegen, wo bereits Schottky-Barriere-Dioden, MOSFETs, JFETs und andere SiC-Komponenten in DC/DC-Wandlern und On-board-Batterieladegeräten in Serienfahrzeugen eingesetzt werden. Die Experten halten es für immer wahrscheinlicher, dass in drei bis fünf Jahren Hauptwechselrichter mit SiC-MOSFETs anstelle von IGBTs auf den Markt kommen werden. Da in Hauptwechselrichtern viel mehr Komponenten eingesetzt werden als in DC/DC-Wandlern und On-board-Ladegeräten, steigen auch die Stückzahlen stark an. IHS Markit hält es sogar für möglich, dass Hersteller von Wechselrichtern irgendwann auf vollständig kundenspezifische SiC-Leistungsmodule anstatt auf SiC-Diskrete setzen werden.

Nicht nur die Anzahl der SiC-Komponenten pro Fahrzeug soll steigen, sondern auch die Anzahl der weltweit zugelassenen batterieelektrischen Fahrzeuge (BEVs) und Plug-in-Hybride (PHEVs). Sie soll sich zwischen 2017 und 2027 verzehnfachen, angetrieben durch regulatorische Bestimmungen, um die Luftverschmutzung einzudämmen, und durch den Wunsch, die Abhängigkeit

von Fahrzeugen, die fossile Brennstoffe verbrennen, zu verringern. Länder wie China, Indien, Frankreich, Großbritannien und Norwegen haben bereits angekündigt, Autos mit Verbrennungsmotoren in den kommenden Jahrzehnten zu verbieten und durch sauberere Fahrzeuge ersetzen zu wollen. Daher halten die Analysten die Aussichten für elektrifizierte Fahrzeuge im Allgemeinen und für WBG-Halbleiter im Besonderen für sehr gut.

Abb. 4.9: Schlüsseltechnologie – ohne Halbleiter fährt schon lange kein Fahrzeug mehr



Quelle: Robert Bosch

Als größtes Wachstumshindernis im Automotive-Markt für SiC könnte sich ihrer Meinung nach GaN erweisen. Zum einen wurde der erste AEC-Q101-qualifizierte GaN-Transistor bereits 2017 auf den Markt gebracht, zum anderen weisen GaN-Bauelemente, die auf GaN-on-Si-Epiwafern hergestellt werden, deutlich niedrigere Kosten auf. Außerdem sind sie einfacher herzustellen als alles, was auf SiC-Wafern hergestellt wird. Aus diesen Gründen könnten GaN-Transistoren in den späten 2020er-Jahren die bevorzugte Wahl für Wechselrichter werden und die teureren SiC-MOSFETs verdrängen.

Übrigens: Trotz dieser hohen Wachstumsraten, die für GaN und SiC prognostiziert werden, soll auch der Umsatz mit Leistungselektronik auf Basis von Si in den nächsten Jahren weiter zulegen.

Die Prognose geht also davon aus, dass alle drei Materialien ihre eigenen Anwendungsbereiche adressieren und so schnell keine Verdrängung der einen oder anderen Technologie stattfinden wird. Allgemein heißt es, dass SiC auch weiterhin in Anwendungen mit hohen Spannungen (über 1 kV) und hohen Strömen seine Vorteile ausspielen kann. GaN-on-Si wiederum findet seinen Platz in Applikationen, in denen es auf hohe Schaltfrequenzen (bis hin zu einigen GHz)

ankommt und eher niedrige Spannungen (einige 100 V) benötigt werden. Und Si wird in Zukunft weiterhin in Anwendungen mit Ausgangsleistungen von bis zu 500 W und Schaltfrequenzen von 100 kHz die bevorzugte Technologie bleiben, einfach aufgrund der Kostenvorteile. Diese Erwartungshaltung wird wohl von vielen Unternehmen geteilt, denn diverse etablierte Hersteller von Leistungselektronik setzen mittlerweile auf alle drei Materialien (Si, SiC und GaN), wobei es natürlich auch Spezialisten gibt, die ausschließlich SiC- oder GaN-Komponenten anbieten.

4.3.1.1 Wide-Bandgap-Materialien

Die Bezeichnung Wide-Bandgap bezieht sich darauf, dass diese Materialien im Vergleich zu Silizium (1,1 eV) eine größere Bandlücke aufweisen (SiC: 2,4–3,3 eV, GaN: 3,3 eV). SiC und GaN weisen gegenüber Si diverse Vorteile auf. So zeichnen sie sich durch eine höhere elektrische Durchbruchspannung aus und vertragen höhere Temperaturen. Sie können schneller und größere Spannungen schalten, benötigen kleinere Induktivitäten, ermöglichen kompaktere Designs mit höheren Leistungsdichten, verursachen geringere Schaltverluste und ermöglichen einen höheren Wirkungsgrad.

Bei all den genannten Vorteilen haben GaN und SiC aber auch einen entscheidenden Nachteil gegenüber Si: Einkristalline Wafer sind deutlich schwieriger zu züchten. Während Hersteller für Si-basierte Leistungselektronik auf 12 Zoll setzen, müssen sich die SiC-Anbieter im besten Fall mit 6-Zoll-Wafern – viele Hersteller nutzen noch 4-Zoll-Wafer, wobei derzeit ein Übergang zu 6 Zoll stattfindet – begnügen. Leistungshalbleiter auf Basis von Bulk-GaN-Wafer gibt es noch gar nicht.

a. GaN

Die PCIM 2018 kann als Zeichen dafür gewertet werden, dass die Halbleiterhersteller an das Potenzial von GaN glauben. So haben viele Unternehmen die Messe genutzt, um auf ihre GaN-Aktivitäten aufmerksam zu machen und das gegen GaN angeführte Kostenargument für obsolet zu erklären. Laut Angaben konnte bei GaN-Leistungshalbleitern mit der 5. Generation die Preisparität zu herkömmlichen MOSFETs erreicht werden. Für 2020 wird geplant, die 6. Generation auf den Markt zu bringen, die sich einerseits durch einen Einschaltwiderstand von 11 mΩ auszeichnet, andererseits aber auch noch hochintegriert ist, denn dann sollen auch Treiber, Strommessung und PWM-Einheit (PWM = Pulsweitenmodulation) mit auf die Chips wandern. Außerdem soll diese Generation auf 8-Zoll-Wafern gefertigt werden.

Nobelpreisträger spricht sich ganz klar für GaN aus: Ein klarer Befürworter der GaN-Technik ist Hiroshi Amano von der Nagoya University. Er hat 2014 zusammen mit Isamu Akasaki und Shuji Nakamura den Nobelpreis in Physik erhalten und zwar für die Entwicklung der blauen LEDs, eben auf Basis von GaN, wodurch es erstmals möglich wurde, energiesparende LEDs herzustellen, die weißes Licht emittieren. Amano ist aber auch in anderer Hinsicht ein absoluter Befürworter der GaN-Technik. Er ist überzeugt, dass der gesamte weltweite Elektrizitätsverbrauch um knapp 10 Prozent reduziert werden könnte, wenn Si-basierte Transistoren durch GaN-basierte Transistoren ersetzt werden.

b. GaN-on-Si und GaN-on-SiC

Nachdem einkristalline, qualitativ hochwertige GaN-Bulk-Wafer extrem schwierig zu züchten sind und dementsprechend hochpreisig ausfallen, gehen die Hersteller den Weg, Wafer zu nutzen, bei denen GaN auf anderen Substraten aufgebracht wird. Während im Optobereich Saphir als Substrat zum Einsatz kommt, wurde in der Leistungselektronik zunächst auf GaN-on-SiC und jetzt zunehmend auf GaN-on-Si gesetzt.

Das belgische Forschungszentrum Imec hat 2015 eine CMOS-kompatible 200-mm-GaN-on-Si-Technologieplattform für 200-V- und 650-V-Leistungshalbleiter entwickelt und bietet diese anderen Herstellern zum Transfer an, aber auch die Möglichkeit, dort kleinere Volumina zu fertigen. Andere Hersteller wiederum bieten 200-mm-GaN-Si- und 150-mm-GaN/SiC-Wafer an. Ebenso werden Hochspannungs-Leistungsbaulemente auf 200-mm-GaN-on-Si-Wafern unter Verwendung von Standard-CMOS-Produktionsanlagen in hohen Volumina gefertigt. In diesem Fall kommt die sogenannte G-Stack-Technologie zum Tragen, die es ermöglicht, viele Probleme bei GaN-on-Si-Wafer zu lösen. Denn GaN und Si haben unterschiedliche Kristallgitterparameter und thermische Ausdehnungskoeffizienten, was die Kombination beider Materialien deutlich schwieriger macht. Typischerweise werden die GaN-Schichten bei 1.000 bis 1.100 °C auf dem Silizium abgeschieden, sodass es beim Abkühlen zu einer bi-axialen Verspannung kommt. Bei dicken Schichten kommt es während der Abkühlung deshalb häufig zu Rissen in der Schicht, im schlimmsten Fall kann sogar das Substrat brechen. Diese Problematik kann umgangen werden, indem verschiedene GaN-Materialien aufeinander gestapelt werden, die als Puffer dienen: eine Isolationsschicht, anschließend eine Strain-Management-Schicht und dann erst eine GaN-Schicht, sodass die Verspannungen vermieden und die Rissbildung verhindert wird.

Derzeit heißt es, dass die erste (650 V) und zweite (1.200 V) Generation an G-FETs produziert wird.

In Deutschland stellt GaN auch ein Forschungsthema dar. So haben diverse Fraunhofer-Institute in Zusammenarbeit mit der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland 2017 das VERTIGO-Projekt gestartet (läuft bis 2020), bei dem vertikale GaN-Transistoren für effiziente Leistungselektronik im Niederspannungsbereich entwickelt werden sollen und zwar auf Basis einer günstigen 8-Zoll-CMOS-Fertigung. Bislang basieren alle verfügbaren GaN-Transistoren auf einer lateralen Struktur, was deutliche Nachteile hinsichtlich der Wärmeableitung mit sich bringt.

An vertikalen GaN-Transistoren arbeiten auch andere Forschungsinstitute. Das MIT (Massachusetts Institute of Technology) hat auf der IEDM 2017 den ersten selbstperrenden vertikalen GaN-Transistor gezeigt. Er ist mit einem finnenförmigen Kanal ausgestattet, benötigt nur n-GaN-Layer, sodass die Hersteller die p-GaN-Layer nicht mehr epitaktisch aufwachsen lassen müssen. Die Forscher haben für den Transistor eine Durchbruchspannung von über 1.200 V und einen Ron von $0,2 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ spezifiziert. Darüber hinaus konnten Transistoren mit über 10 A Strom und einer Durchbruchspannung von über 800 V gezeigt werden.

Abb. 4.10: Positionserkennung bei extrem geringem Stromverbrauch



Quelle: Robert Bosch

Daneben gibt es noch diverse andere Forschungsansätze für vertikale Transistorstrukturen, wie CAVET-on-Sapphire (Current Aperture Vertical Electron Transistor), CAVET-on-Bulk-GaN oder GaN-OG-FETs mit einer Durchbruchspannung von über 1,4 kV (Off-state) und einem spezifischen On-Widerstand von $2,2 \text{ m}\Omega / \text{cm}^2$.

Auch wenn bislang die Kosten bei GaN immer noch gegen das Material sprechen, gibt es ein entscheidendes Argument dafür, weiter an dieser Technik festzuhalten. Die laterale Heterostruktur-Feldeffekt-GaN-Technologie ermöglicht eine deutlich erhöhte Funktionalität, da mehrere GaN-Schaltungskomponenten nebeneinander angeordnet werden können. Das heißt, es können komplette Topologien oder ganze Schaltungsteile auf einem Leistungs-Chip integriert werden. Solch hochintegrierte Ein-Chip-Lösungen erreichen ein besseres Schaltverhalten durch eine verlustarme Verbindung und einen reduzierten Aufwand für Verdrahtungstechnologien. Erste Unternehmen haben bereits GaN-Schalter vorgestellt, bei dem die Treiber- und die Schutzschaltung monolithisch in GaN-on-Si integriert sind.

Jüngste Entwicklungen: Darüber hinaus gibt es Anstrengungen, Galliumoxid als Material für Leistungshalbleiter zu nutzen. Man ist überzeugt, dass dieser Ansatz geeignet ist, die Vorteile der großen Bandlücke mit geringen Kosten zu verbinden. Es wurden bereits MOSFET aus Galliumoxid (Ga_2O_3) entwickelt. Diese Komponenten sollen deutlich geringere Verluste als Si zulassen und gleichzeitig höhere Durchbruchspannungen, höhere Schaltleistungen und geringere Verluste im Vergleich zu herkömmlichen Verbundhalbleitern aufweisen. Die Technologie soll 2018 zur Marktreife gebracht werden.

Eine weitere Entwicklung setzt auf GaAs, das vergleichbare Eigenschaften wie SiC und GaN besitzt, aber erheblich kostengünstiger hergestellt werden kann als andere Varianten. Mittlerweile existieren erste Fertigungsanlagen, die anfänglich GaAs-Leistungshalbleiter-Dioden und später auch Transistoren und IGBT produzieren.

Anfang 2018 wurde zum ersten Mal eine GaN-on-SOI-Technologie mit Grabenisololation vorgestellt, mit der eine monolithische Integration von GaN-Bauelementen, zum Beispiel GaN-HEMTs, auf einem Baustein einfach möglich sein soll. Heutzutage werden für GaN-Power-Systeme typischerweise Multi-Chip-Lösungen verwendet, bei denen die GaN-Komponenten als diskrete Bauelemente auf eine gemeinsame Leiterplatte montiert werden. Eine monolithische Integration ist nicht nur kostengünstiger, sondern ermöglicht einen höheren Wirkungsgrad bei der Leistungsumwandlung.

c. SiC

SiC kann in verschiedenen Polytypen (unterschiedliche Kristallstrukturen) hergestellt werden, die unterschiedliche physikalische Eigenschaften aufweisen. 4H-SiC wird in der Praxis wegen seiner hohen Elektronenmobilität, seiner hohen Betriebssicherheit, der geringeren Dotierungsenergie und der Tatsache, dass viele bekannte Prozessschritte aus der Si-Technologie übernommen werden, bevorzugt.

Tab. 4.1: Ein Vergleich zwischen 4H-SiC und Si zeigt die Vorteile von SiC

	Si	4H-SiC
Bandlücke (eV)	1,12	3,26
Durchbruchfeldstärke (V/dm)	$2,5 \times 10^5$	$2,2 \times 10^6$
Thermische Leitfähigkeit (W/(m * K))	150	490
Sättigungsdriftgeschwindigkeit (cm/s)	$1,0 \times 10^7$	$2,1 \times 10^7$

Quelle: ZVEI

Die höhere Durchbruchfeldstärke verleiht den SiC-Komponenten typischerweise einen geringen spezifischen On-Widerstand. Die mit SiC möglichen, höheren Schaltgeschwindigkeiten sind wiederum auf die größere Durchbruchspannung und die größere Sättigungsdriftgeschwindigkeit zurückzuführen. Der größere Bandabstand erlaubt höhere Betriebstemperaturen, wobei gleichzeitig die Verlustwärme bei SiC dank deutlich besserer Wärmeleitfähigkeit auch noch einfacher abgeführt werden kann. Die erhöhte thermische Leitfähigkeit hat aber auch eine höhere thermische Robustheit der Bausteine zur Folge, sodass Spitzenleistungen (z. B. bei Kurzschluss) selbst mit kleineren Chipflächen besser verkraftet werden können. Mit dem größeren Bandabstand geht aber auch eine höhere Sperrspannung einher. Der Vorteil von SiC gegenüber GaN besteht darin, dass viele Herstellungsschritte mit denen von Silizium kompatibel sind und gleichzeitig keine Probleme mit der Verunreinigung durch Ga entsteht.

2018 sind bereits SiC-MOSFETs mit einer Nennspannung von bis zu 1.200 V und mit Strömen von circa 85 A verfügbar. Nicht nur, dass das Angebot an SiC-Komponenten das von GaN deutlich übersteigt, Experten sind auch überzeugt, dass diese Technik Vorteile bei induktiven Lasten bietet. SiC hat außerdem den Vorteil, dass diese Bausteine in Standardgehäusen zur Verfügung stehen, sodass sie als Ersatz für MOSFETs in bestehenden Designs verwendet werden können, ohne dass die Anwender ein Redesign ihres Systems durchführen müssen. Bei GaN werden typi-

scherweise proprietäre Gehäuse verwendet, was sich noch als zusätzlicher Kostentreiber erweist.

In Deutschland wird die SiC-Technologie nicht nur von Unternehmen und Forschungseinrichtungen als wichtige Technik angesehen, auch das BMBF hat sich eingeschaltet. Derzeit läuft ein Förderprogramm (Laufzeit bis 2020), das zum Ziel hat, mithilfe von SiC-Halbleitern und einem hochtemperaturtauglichen Aufbau deutlich höhere Schaltfrequenzen und Leistungsdichten zu erreichen, inklusive verringerter Störanfälligkeit. Im Zentrum des Forschungsvorhabens steht eine skalierbare modulare Leistungselektronik (Antriebsumrichter) für Elektrofahrzeuge, die Temperaturen bis 200 °C aushält, wodurch der Umrichter unmittelbar am Motor platziert werden kann.

Fast alle etablierten Leistungshalbleiterhersteller betreiben SiC-Aktivitäten. Auf der PCIM 2018 haben diverse Hersteller angekündigt, ihre Produktion auf 6-Zoll-Wafer umzustellen. Darüber hinaus wurden aber auch diverse Neuankündigungen gemacht. So wird geplant, einen 1.200-V-SiC-MOSFET mit einem Einschaltwiderstand von 80 mΩ auf den Markt zu bringen, eine 20-mΩ-Version soll zeitnah folgen. Um das Produktspektrum zu komplettieren, sind auch 900-V-SiC-MOSFETs und 650-V-Versionen geplant. Ebenfalls wurden die ersten, für den Automotive-Einsatz qualifizierten SiC-Schottky-Dioden vorgestellt, die auf einer Dünn-Wafer-Technologie basieren.

Es gibt aber auch Ansätze, SiC auf Si aufwachsen zu lassen, um schneller auf größere Wafer-Durchmesser wechseln zu können und damit die Kosten für SiC zu senken.

SiC könnte aber auch über einen anderen Ansatz eine deutlich schnellere Verbreitung erfahren. Die North California State University hat auf der ICSCRM 2017 einen Herstellungsprozess für SiC-Leistungshalbleiter vorgestellt, der speziell Neueinsteigern Zugang zu dieser Technologie verschaffen soll. Das Verfahren – PRESiCETM genannt – wurde mit Unterstützung des vom Department of Energy geförderten PowerAmerica Institute entwickelt, um Unternehmen den Einstieg in den SiC-Markt und die Entwicklung neuer Produkte zu erleichtern.

4.3.2 MEMS/Sensoren

Die Abkürzung MEMS steht für Micro Electro Mechanical System und bezeichnet Systeme, bei denen elektrische Schaltungen und mikromechanische Strukturen kombiniert werden. MEMS eignen sich zur Messung von mechanischen,

thermischen, biologischen, chemischen, optischen und magnetischen Größen und basieren auf unterschiedlichen Fertigungstechnologien, Wirkprinzipien und Materialien. MEMS gibt es in unzähligen Varianten für die unterschiedlichsten Anwendungen, kategorisiert in MEMS-Sensoren (z. B. Druck- oder Beschleunigungssensoren), MEMS-Aktuatoren (z. B. Mikrofone, Mikrospiegel, Mikromotoren), HF-Filter (z. B. SAW, BAW) und Taktgeber, die in vielen Fällen auch noch in einem System kombiniert werden.

Abb. 4.11: Beispiele für MEMS



Quelle: Robert Bosch

Auch wenn das erste MEMS bereits in den frühen 1960er-Jahren entwickelt wurde, Berühmtheit erlangten diese Komponenten erst 2006, als Nintendo die Controller für seine Spielekonsole Wii mit MEMS für die Bewegungserkennung ausstattete und somit ein vollkommen neues Benutzer-Interface realisierte.

Mittlerweile sind MEMS allgegenwärtig. Die bekannteste und größte Anwendung für MEMS sind Smartphones. In modernen Systemen sind typischerweise Kameras und Mikrofone, Licht-, Näherungs- und Touchsensoren sowie mehrachsige Inertial- (Beschleunigung, Drehrate) und Magnetfeldsensoren (Kompass) zu finden.

In der Automobilindustrie werden ebenfalls unzählige MEMS eingesetzt. Bosch hatte bereits 2014 von 50 MEMS-Sensoren in modernen Fahrzeugen gesprochen. Sie übernehmen die verschiedensten Aufgaben, überwachen beispielsweise den Reifendruck, sitzen als Auslöser in Airbag-Systemen, liefern wichtige Informationen für das ESP-System oder optimieren das Luft-Kraftstoff-Gemisch im Motor.

Darüber hinaus werden MEMS-Sensoren aber auch in der Industrie eingesetzt, wo sie beispielsweise in Form von hochintegrierten Mehrachsen-Sensoren in der Robotik genutzt werden. In der Consumer-Welt haben sich die MEMS beispielsweise bei den Tintenstrahl Druckern durchgesetzt, und, wie oben bereits erwähnt, vollkommen

neue Benutzerschnittstellen ermöglicht. Neuere Anwendungen sind in der Umweltüberwachung, in der Medizintechnik, im IoT und bei den Wearables zu finden. Es wird zum Beispiel erwartet, dass Smartphones in Zukunft die Umwelt des Nutzers überwachen, also Feuchtigkeit, Temperatur oder Qualität der Luft messen können.

2016 entfiel der Großteil des MEMS-Umsatzes auf Drucksensoren, gefolgt von Beschleunigungssensoren. Danach kamen HF-MEMS, Gyroskope, MEMS-Mikrofone, Kombo- (Inertial) sowie optische MEMS. Oszillatoren, Umgebungssensoren und Microfluidic-MEMS hingegen spielten eine untergeordnete Rolle.

4.3.2.1 Gute Wachstumsprognosen

Obwohl der Markt zum Teil unter einem enormen Kostendruck steht, das betrifft speziell viele MEMS, die in Smartphones wandern, sind die Zukunftsprognosen für die MEMS-Lieferanten nicht schlecht. Das Marktforschungsunternehmen Yole Développement prognostiziert in einer Marktanalyse vom Mai 2018, dass der MEMS-Markt zwischen 2018 und 2023 ein durchschnittliches Jahreswachstum (CAGR) von 17,5 Prozent erreichen wird. Der größte Umsatzanteil mit mehr als 50 Prozent wird im Consumer-Markt erzielt, wobei in diesem Fall fast alle MEMS-Komponenten zum Wachstum beitragen sollen.

Yole Développement prognostiziert, dass HF-MEMS eine Schlüsselrolle für das künftige Wachstum spielen werden. Ohne HF würde der MEMS-Markt zwischen 2018 und 2023 nämlich nur um 9 Prozent wachsen. Treiber im HF-Bereich ist der Umstieg auf den Mobilfunkstandard 5G, denn damit steigt der Bedarf an HF-Filtern, sodass HF-MEMS (hauptsächlich BAW-Filter) am stärksten wachsen sollen.

Ein ebenfalls wichtiges Marktsegment sind die Tinten-Druckköpfe. Auch hier sollen die Anbieter deutliche Umsatzzuwächse erzielen können. Und vielleicht etwas überraschend: Auch die Drucksensoren sollen in Zukunft zum Wachstum beitragen, obwohl es sich dabei um eine der ältesten MEMS-Technologien überhaupt handelt. Und hier muss noch angefügt werden: Yole Développement hat selbst darauf hingewiesen, dass derzeit 51 Prozent des Geschäfts mit Drucksensoren im Automotive-Segment auf den Antrieb bzw. den Verbrennungsmotor entfallen. Fällt der Verbrennungsmotor weg, erobern also Batterie-Fahrzeuge oder Wasserstoff-Fahrzeuge wirklich den Markt, dann fällt für die Anbieter von MEMS-Drucksensoren ein wichtiges Anwendungsgebiet weg. Die Analysten sind aber überzeugt, dass bis

dahin noch mindestens ein Jahrzehnt vergehen wird. Für den Consumer-Markt prognostizieren die Analysten, dass die Anbieter von MEMS-Drucksensoren in Zukunft rund 90 Prozent ihres Umsatzes mit Herstellern von Handys und Smartphones erzielen werden, das heißt: Hier ist der Preisdruck am größten.

Ein ebenfalls hervorragendes Wachstum sollen die MEMS-Mikrofone aufweisen und das, obwohl diese Komponenten schon in den letzten fünf Jahren eine der höchsten CAGRs aller MEMS-Technologien überhaupt erreicht hatten. 2008 wurden mit MEMS-Mikrofonen rund 402 Millionen Dollar umgesetzt, 2016 wurde bereits die 1-Milliarde-Dollar-Schwelle erreicht. Derzeit werden jährlich fast 4,5 Milliarden Einheiten ausgeliefert, hauptsächlich in Mobiltelefone, auf die 85 Prozent des Volumens entfallen.

Und auch wenn die Marktspezialisten von Yole Développement keine neuen Killer-Applikationen für MEMS sehen, neue Anwendungsmöglichkeiten gibt es dennoch, wie zum Beispiel Smart Homes, elektronische Zigaretten, Drohnen und Wearables.

Nachdem der Markt seit Jahren trotz enormen Preisdrucks wächst, hat sich auch die Anzahl der Anbieter erhöht. Zu den etablierten IDMs gesellen sich immer mehr Fabless-Unternehmen, die nicht über eine eigene Fertigung verfügen. Das heißt natürlich auch, dass es immer mehr Foundries gibt, die MEMS-Technologien anbieten. Dazu zählen unter anderem TSMC, X-Fab oder Global Foundries, oder SilTerra – allerdings ist STMicroelectronics derzeit nach Umsatz die größte MEMS-Foundry.

2017 war Broadcom dank seiner HF-Filter laut Yole das erste Mal der größte MEMS-Anbieter weltweit, gefolgt von Bosch (bislang größter Anbieter). Auf Platz drei steht Texas Instruments mit seiner DLP-Technik (Digital Light Processing) und dann kommen Qorvo (HF-MEMS) sowie Hewlett Packard.

4.3.2.2 Fertigung

Grundsätzlich gibt es zwei Ansätze, MEMS zu fertigen:

- Einen hybriden Ansatz, bei dem die MEMS-Komponente und das IC getrennt voneinander gefertigt werden. Vorteilhaft daran ist, dass damit sowohl für das IC als auch die MEMS-Komponente die optimale Technologie genutzt werden kann.
- Eine monolithische Integration von MEMS und IC, wobei es hier drei Möglichkeiten gibt: Pre-CMOS-MEMS, Inter-CMOS-MEMS und Post-CMOS-MEMS, je nachdem, wann die MEMS-Strukturen gefertigt werden: vor, zwischen oder nach den CMOS- oder BiCMOS-Schaltungen.

Viele IDMs (Integrated Devices Manufacturers) setzen auf ihre eigenen, proprietären CMOS-Prozesse. Beispielsweise wurde Anfang der 1990er-Jahre eine MEMS-Technologie auf Basis eines BiCMOS-Prozesses entwickelt, der später auch mit SOI-Wafern eingesetzt wurde. Ebenfalls im gleichen Zeitraum wurde der DRIE-Prozess (Deep Reactive Ion Etch) vorgestellt, der kontinuierlich weiterentwickelt wurde. Inzwischen bieten auch Foundries die MEMS-Fertigung als Service auf Basis des reaktiven Ionentiefenätzens an.

Abb. 4.12: Intelligente Sensordysteme für Industrie 4.0



Quelle: Robert Bosch

Auch diverse Fraunhofer-Institute sind in der MEMS-Welt aktiv. Dazu gehört beispielsweise das Fraunhofer IPMS (Institut für Photonische Mikrosysteme), das komplette Technologien zur Herstellung von MEMS-Komponenten, einschließlich Prototyping und Pilotfertigung in kleinen und mittleren Volumen, anbietet. Zusätzlich bietet das Institut die Durchführung von Einzelprozessschritten und Technologiemodulen auf einer 150-mm-Prozesslinie sowohl auf Kundenwafern als auch auf vom Fraunhofer IPMS bereitgestellten Wafern an. Das Fraunhofer ENAS (Institut für Elektronische Nanosysteme) wiederum ist gemeinsam mit weiteren Instituten des VµE (Fraunhofer-Verbund Mikroelektronik, das IMP)

gehört auch dazu) Mitglied in der HTA (Heterogeneous Technology Alliance), die mit den europäischen Forschungspartnern CEA-Leti, CSEM und VTT Mikrotechnologien, Nanoelektronik und intelligente Systeme entwickelt.

4.3.2.3 Interessante Entwicklungen

Nachdem der Markt sehr diversifiziert ist, gibt es keine einheitlichen Trends, die alle Anbieter, Produkte oder Märkte betreffen. Aber es gibt ein paar interessante Entwicklungen, die aus unterschiedlichen Gründen bemerkenswert sind. So wurde 2018 ein Sensor-Hub vorgestellt, der als gutes Beispiel für die inzwischen erreichte Integrationsdichte gelten kann: Das Modul verfügt über einen 32-Bit-Fließkomma-Prozessor, 256 kByte SRAM, 16-Bit-MEMS-Sensoren, eine 6-Achsen-IMU (Inertial Measurement Unit) bzw. einen 3-Achsen-Beschleunigungssensor sowie bis zu 25 GPIOs, zwei SPI- und zwei IC2-Schnittstellen. Außerdem ist es gelungen, für einen MEMS-Beschleuniger den CES 2018 Innovation Award zu ergattern, und zwar aufgrund der sehr geringen Leistungsaufnahme. Der Beschleunigungssensor kann Neigung, Ausrichtung und einen Tap/Double-Tap messen, während ein Plug-and-Play-Schrittzähler mit Aktivitätserkennung mit einer Stromzufuhr von 4 μ A auskommt. Bei kontinuierlicher Messung nimmt er 14 μ A auf, und das bei maximaler Messgenauigkeit und einer Rauschdichte von 220 μ g/ \sqrt Hz.

2017 wurden bereits MEMS-Mikrofone (im Gehäuse) vorgestellt, die sich durch ein Signal-Rausch-Verhältnis von 70 dB auszeichnen. Diese MEMS-Mikrofone ziehen lediglich 6 μ A Strom in einem Always-Listening-Modus.

4.3.2.4 Kostendruck reduzieren

Wie bereits gesagt, stehen die MEMS-Hersteller zum Teil unter einem enormen Kostendruck. Inertial-Sensoren, wie Gyroskope oder Beschleunigungssensoren, werden zwar in hohen Stückzahlen verkauft, aber der Preisverfall für diese Produktkategorien ist enorm. Yole Développement hatte bereits 2015 prognostiziert, dass die großen MEMS-Anbieter in den nächsten Jahren auf 300-mm-Wafer umsteigen könnten, um ihre Kosten zu senken und der Konkurrenz einen Schritt voraus zu sein.

Einen weiteren, wenn auch gewagter Ansatz wiederum verfolgt die Fertigung von nanoelektromechanischen Systemen (NEMS) auf Trägheitssensoren – ein Commodity-Produkt, bei dem Kosten der einzig ausschlaggebende Faktor sind. Man glaubt dennoch, dass sich die Technik durchsetzen kann, da diese die Haftreibung bei Beschleunigungssensoren verringert. Zum

anderen werden Standard-CMOS-Prozesse und -Maskentechniken genutzt, plus ein sehr einfacher und kostengünstiger Post-CMOS-Prozess – wodurch die Voraussetzung geschaffen ist, auch in diesem hart umkämpften Markt erfolgreich zu sein.

In eine andere Richtung geht die Vorstellung von einem piezoelektrischen Ultraschallwandler (PMUT) auf Basis einer CMOS-Plattform für Fingerabdrucksensorik und medizinische Bildgebung. Nach Angaben ermöglicht diese Prozessplattform eine monolithische Lösung und integriert das PMUT auf dem CMOS zu einer Single-Chip-Lösung. Weitere Entwicklungen aus diesem Bereich sind neben den Ultraschallsensoren, die sehr genau messen und nur sehr wenig Leistung – im μ W-Bereich – aufnehmen, auch eine Gestenklassifikationsbibliothek (GCL), die auf maschinellem Lernen und neuronalen Netzwerkalgorithmen basiert. Zusammen mit der Ultraschall-Sensor-Plattform ermöglicht die Software-Bibliothek intuitive, natürliche und gestenbasierte Benutzeroberflächen.

Ultraschallwandler können darüber hinaus auch in der Medizintechnik oder zur zerstörungsfreien Material- und Strukturprüfungen eingesetzt werden. Dementsprechend sieht auch die Prognose von Yole Développement für diese Komponenten aus. Das Marktforschungsunternehmen hat den Markt für Ultraschall-MEMS – PMUTs und CMUTs – auf 2,1 Milliarden Dollar 2017 beziffert. Bis 2023 wird ein durchschnittliches Wachstum von 18 Prozent prognostiziert, was dann einem Volumen von 5,7 Milliarden Dollar entsprechen würde.

Ein sicherlich ebenfalls interessanter Markt für MEMS ist die Medizintechnik. Yole Développement hatte dem Markt mit BioMEMS und Mikrosystemen (Drucksensoren, Mikrofone, Beschleunigungssensoren, Gyroskope, optische MEMS und Bildsensoren, Mikrofluidik-Chips, Mikrodispenser für Arzneimittelabgabe, Durchflussmesser, IR-Temperatursensoren etc.) bereits vor Jahren eine Verdreifachung des Umsatzes prognostiziert: von 1,9 Milliarden Dollar im Jahr 2012 auf 6,6 Milliarden Dollar in diesem Jahr. Eine neuere Analyse von Statistics MRC wiederum besagt, dass der Umsatz mit MEMS in medizinischen Anwendungen von 3,12 Milliarden Dollar im Jahr 2015 auf 10,41 Milliarden Dollar bis 2022 ansteigen soll. Das entspricht einem durchschnittlichen Jahreswachstum von 18,7 Prozent.

Warum sich MEMS besonders für medizinische Anwendungen eignen, machen MEMS-Lautsprecher für Hörgeräte deutlich. Hier konnten die

Fraunhofer-Institute für Digitale Medientechnologie (IDMT) und Siliziumtechnologie (ISIT) 2018 einen Durchbruch erreichen: Die MEMS-Lautsprecher decken bei einer Fläche von 4 x 4 mm den Frequenzbereich von 20 Hz bis 20 kHz ab und erzielen bei der In-Ohr-Anwendung einen Schalldruckpegel von 110 dB. Mit einer Reduzierung der Bandbreite sind sogar bis zu 135 dB möglich – wobei diese MEMS-Module sich nicht nur für Hörgeräte, sondern auch für Kopfhörer oder mobile Kommunikationsgeräte eignen.

2010 wurden bereits Kontaktlinsen mit MEMS-Sensoren (Drucksensor) auf den Markt gebracht, um den Innendruck des Auges zu messen. Herzschrittmacher mit Beschleunigungssensoren wiederum erkennen die physische Aktivität des Patienten und passen den Herzschlag entsprechend an.

Ein weiteres Beispiel sind Mikrofluidik-MEMS. Sie werden dazu genutzt, um PoC-Systeme (Point of Care) zu realisieren, mit denen anhand einer Analyse von Körperflüssigkeiten wie Blut, Urin oder Speichel die Überwachung, Vorsorge, Früherkennung und Therapieoptimierung von Patienten auch in Gegenden möglich wird, in denen es keine Krankenhäuser gibt. Mikrofluidik wird aber auch in der Medikamentendosierung verwendet. MEMS-basierte mikrochirurgische Werkzeuge eignen sich für Endoskopie, Laparoskopie und Neurochirurgie etc., MEMS-Technologien werden auch für die Entwicklung von Lab-on-Chips sowie Organ-on-Chips eingesetzt.

4.3.3 Photonik

Photonik befasst sich mit physikalischen und biologischen Technologien zur Erzeugung, Verwendung, Formung oder Übertragung von Licht. Laut dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sind deutsche Unternehmen Weltmarktführer in zahlreichen Bereichen der Photonik wie Lasertechnik, Beleuchtung, Mikroskopie oder Bildgebung. Im Januar 2012 startete das BMBF das Förderprogramm „Photonik Forschung Deutschland – Licht mit Zukunft“ zur Unterstützung der Photonik für die folgenden zehn Jahre. Die Bundesregierung stellte darüber der Photonik-Branche in den ersten vier Jahren jährlich ca. 100 Millionen Euro für Forschung und Entwicklung zur Verfügung.

Licht zeichnet sich durch folgende wichtige Eigenschaften (BMBF) aus:

- Fokussierbarkeit: bis auf den millionsten Teil eines Millimeters (Nanometer)
- Lichtgeschwindigkeit: die höchste erreichbare Geschwindigkeit im Universum
- Kürzeste Pulse: bis zu einem milliardsten Teil einer milliardstel Sekunde (Attosekunde)
- Höchste Leistungen: bis zu Milliarden von Megawatt (Petawatt)
- Ungestörte Überlagerungsfähigkeit: bis zu Millionen von Megabit pro Sekunde (Terabit pro Sekunde)

In Kombination mit anderen Schlüsseltechnologien liefert die Photonik laut BMBF entscheidende Impulse für Energieeffizienz in der Produktion, für umweltgerechte Beleuchtung oder für eine bessere medizinische Diagnose. Darüber hinaus spielen photonische Materialien und Komponenten eine wichtige Rolle in der Telekommunikation, in der Informationsverarbeitung und -speicherung, bei chemischen Sensoren, Solarzellen, Leuchtdioden, magnetooptischen Speichern, Videosystemen etc.

In der Photonik wird eine Vielzahl von Materialien und Technologien genutzt, darunter Halbleiter mit großem Bandabstand (Wideband Gap), Materialien für die magnetische Datenspeicherung, Diamantmaterialien für Bildschirme, Mikromaterialien für Displays und Halbleiterlasermaterialien.

In der Marktforschungsstudie Photonics 2017 vom BMBF belief sich der weltweite Markt für Photonik-Produkte im Jahr 2016 auf 447 Milliarden Euro, die durchschnittliche Wachstumsrate (CAGR) zwischen 2011 und 2015 wird mit 6,2 Prozent beziffert.

Das Produktionsvolumen der europäischen Photonik-Industrie, einschließlich Photovoltaik (PV), betrug 2015 69,2 Milliarden Euro, was einem weltweiten Marktanteil von 15,5 Prozent entspricht. Ohne PV belief sich der Umsatz auf 66,6 Milliarden Euro, was dann einem Marktanteil von 17 Prozent (Weltmarkt: 391 Mrd. Euro) entspricht und eine durchschnittliche Wachstumsrate von 3,9 Prozent bedeutet. Auch wenn das CAGR niedrig erscheint, sind sie im Vergleich zur industriellen Produktion in Europa deutlich höher, denn hier liegt der CAGR nur bei 0,1 Prozent.

Die Marktstudie teilt Photonik in zehn Segmente auf:

- Produktionstechnik – hier sind sowohl Anlagen zur Lasermaterialbearbeitung als auch lithografische Fertigungsverfahren enthalten, Bereiche, in denen Europa besonders stark vertreten ist. Die Studie besagt, dass 50 Prozent aller Produkte in diesem Bereich aus Europa stammen.
- Optische Messtechnik & Bildverarbeitung – dieses Equipment wird hauptsächlich in der industriellen Fertigung eingesetzt. Und auch hier spielt Europa eine wichtige Rolle, denn laut Studie kommen in diesem Segment 35 Prozent aller Produkte weltweit aus Europa. Beide Segmente (Produktion und Messtechnik, Bildverarbeitung) zusammen repräsentierten 2015 ein Produktionsvolumen von rund 25 Milliarden Euro in Europa, was 36 Prozent der europäischen Photonik-Produktion entsprach.
- Photonik-basierte Medizintechnik & Life Science – darauf entfiel ein europäisches Produktionsvolumen von 9,6 Milliarden Euro, oder 14 Prozent der gesamten europäischen Photonics-Produktion. 28 Prozent aller Produkte weltweit stammen aus Europa.
- Das Segment der optischen Kommunikation bzw. optischen Vernetzung umfasst ein europäisches Produktionsvolumen von 4,1 Milliarden Euro oder 6 Prozent der europäischen Photonik. Der Weltmarktanteil der europäischen Produktion beträgt 18 Prozent.
- Das Segment der Photonik-basierten Informationstechnologie, das hauptsächlich Produkte der Unterhaltungselektronik und Büroautomation umfasst, hat ein europäisches Produktionsvolumen von 2,4 Milliarden Euro, was etwa 3,5 Prozent des europäischen Photonik-Markts und 3 Prozent des Weltmarkts entspricht.
- Das Segment der Displays und Display-Materialien steht für ein europäisches Produktionsvolumen von 1,7 Milliarden Euro oder rund 2,5 Prozent der europäischen Photonik. Der Anteil am Weltmarkt liegt bei etwa 1,5 Prozent. Insgesamt machen die letzten drei Segmente rund 12 Prozent der europäischen Photonik-Produktion aus.
- Auf die Beleuchtung entfällt ein europäisches Produktionsvolumen von 8,3 Milliarden Euro oder 12 Prozent der europäischen Photonik. Der Anteil der europäischen Produktion am Weltmarkt beträgt 25 Prozent.
- Defence & Security Photonics steht für ein Produktionsvolumen von 7,9 Milliarden Euro oder 11 Prozent der europäischen Photonik, was einem Anteil am Weltmarkt von 26 Prozent entspricht.

- Auf optische Komponenten & Systeme entfällt in Europa ein Produktionsvolumen von 7,8 Milliarden Euro oder 11 Prozent der europäischen Photonik sowie ein Anteil von 32 Prozent am Weltmarkt.
- Auf die Photovoltaik entfallen noch 4 Prozent der europäischen Photonik, nachdem sie von 8,5 Milliarden Euro im Jahr 2011 auf nur noch 2,6 Milliarden Euro im Jahr 2015 geschrumpft war. Das heißt, dass auf Europa damals schon nur noch 5 Prozent der Weltproduktion entfallen sind, 17 Prozent waren es im Jahr 2011.

Europäische Unternehmen sind zum Teil mit Marktanteilen zwischen 25 und 50 Prozent auf dem Weltmarkt vertreten. Allerdings bilden die datenbezogenen Segmente (Information, Kommunikation, Display) eine Ausnahme, hier hält die europäische Photonik-Industrie nur einen Anteil von 4 Prozent am Weltmarkt. Dies wiederum wird in der Studie darauf zurückgeführt, dass europäische Hersteller in den großen Segmenten mit Flachbildschirmen, Unterhaltungselektronik und Büroautomation nur eine untergeordnete Rolle spielen. Die optische Kommunikation ist das einzige datenbezogene Segment, in dem die europäische Industrie mit einem weltweiten Anteil von 18 Prozent eine große Präsenz zeigt.

Nach Ländern aufgeteilt, ist Deutschland mit einem Anteil von 41,3 Prozent der größte Photonik-Hersteller in Europa und zwar in fast allen Photonics-Segmenten, mit Ausnahme der Produktionstechnik. Deutschland konnte die starken Verluste in der Photovoltaik durch Zuwächse in anderen Segmenten ausgleichen, sodass Deutschland mittlerweile in den Wachstumssegmenten Produktionstechnik, Messtechnik & Bildverarbeitung sowie Medizintechnik & Life Science stark vertreten ist.

Abb. 4.13: Ein integrierter Mini-Controller macht die RGB-LED erstmals „digital“



Quelle: Inova Semiconductors

4.3.3.1 LEDs

LEDs emittieren Licht mit Wellenlängen zwischen 200 nm bis ungefähr 1,5 µm, also von Ultraviolett (200-400 nm; UV-A, UV-B, UV-C) über sichtbares Licht (400-800 nm) bis hin zu Infrarot-LEDs (800 nm bis 1,5 µm). Das Halbleitermaterial und die Dotierungsstoffe (Zink, Stickstoff etc.) bestimmen die Wellenlänge und damit die Farbe des emittierten Lichts. Mittlerweile gibt es LEDs in den verschiedensten Farben, wobei Weiß nicht von der LED selbst erzeugt wird, sondern weißes Licht wird emittiert, indem entweder eine blaue LED mit einer Phosphorschicht versehen wird oder durch eine additive Farbmischung von einer roten, grünen und blauen LED.

Für die Fertigung von LEDs werden verschiedene Materialkombinationen verwendet, dazu zählen III-V-Halbleiter wie GaAs, GaAsP, SiC InGaN, AlInGaP oder AlGaAs, aber auch II-V-Materialien wie ZnSe. Das Anwendungsgebiet für LEDs ist äußerst vielfältig. Sie werden nicht nur in der Beleuchtung eingesetzt, sondern auch in Fahrzeugen (Innen- und Außenbeleuchtung), als Hintergrundbeleuchtung von Bildschirmen, in Fernbedienungen, für die Aushärtung von Lacken/Farben, in der Medizintechnik, beim Pflanzenwachstum, in Kameras oder bei der Luft- und Wasseraufbereitung.

a. Fortschritte

Ende 2016 wurde die erste breitbandige Infrarot-LED vorgestellt, die in diesem Jahr auch den Innovationspreis CES 2018 in der Kategorie Embedded Technologies erhielt. Die LED emittiert infrarotes Licht im Wellenlängenbereich von 650 bis 1.050 nm. Hauptanwendung ist die Nahinfrarotspektroskopie unter anderem zur Bestimmung der Qualität von Lebensmitteln.

Darüber hinaus wurde auf der Light + Building 2018 ein Prototyp der LED Oscon Pure 1010 präsentiert, die derzeit die höchste Leuchtdichte aufweist, die am Markt verfügbar ist. Die LED ist nur 1 mm x 1 mm x 0,25 mm groß, der Lichtstrom ist mit 100 lm (typ.) bei 350 mA und einer Farbtemperatur von 3.000 K spezifiziert und kommt mit 1 mA auf eine Leuchtdichte von 237 lm/mm². Die LED kommt ohne Primärlinse aus und sitzt in einem Chip-Scale-Package.

Ebenfalls ein Novum sind die weißen Optisolis-LEDs (im Februar 2018 vorgestellt), die zu den Top-20-Innovationen auf der light + building 2018 gehörten. Die LEDs zeichnen sich durch einen extrem hohen CRI-Wert (Farbwiedergabeindex) von fast 100 (die Sonne hat einen CRI-Wert von 100) aus, sodass Farben nahezu wirklichkeitsgetreu wiedergegeben werden. Die

LEDs basieren auf der proprietären Blue-Chip- und Phosphor-Technologie und adressieren den allgemeinen Beleuchtungsmarkt, speziell natürlich Anwendungen, die einen möglichst hohen CRI-Wert benötigen. Dazu zählt beispielsweise die Beleuchtung von Museen und Kunstgalerien, wo der höchste CRI-Wert bevorzugt wird, UV-Strahlung jedoch schädlich sein kann. Weitere Anwendungen sind zum Beispiel Color Evaluation (Malerei, Druck), Commercial Lighting (z. B. Einzelhandel) etc.

Infrarot-LEDs (IR-LEDs mit 810 nm) wiederum erfahren gerade derzeit eine deutliche Nachfragesteigerung. Diese IR-LEDs werden mittlerweile zur Iris- bzw. Gesichtserkennung in Mobiltelefonen eingesetzt, um so einen zuverlässigen Schutz der Geräte zu gewährleisten. Denn die Iriserkennung hat einen entscheidenden Vorteil: Die Iris ist stabil, die Muster bleiben ein Leben lang erhalten. Neben den Smartphones sollen in Zukunft auch Tablets oder Wearables mit einer biometrischen Authentifizierung ausgestattet werden. So ist in dem Marktbericht 2018 Infrared Sensing Application Market Report von LEDinside zu lesen, dass der Umsatz mit IR-LEDs für Iris-Scanning und Gesichtserkennung bis 2021 auf 300 Millionen Dollar steigen soll.

Aus der Sicht von LEDinside gibt es allerdings noch technische Einschränkungen bei der Iriserkennung. Dazu zählen beispielsweise Schwierigkeiten bei der Bildaufnahme, der Bedarf an empfindlichen Aufnahmegeräten und geeigneten Lichtquellen sowie negative Einflüsse durch Artefakte (z. B. Wimpern, Pupillenerweiterung, Reflexion).

Neben der Iris- und Gesichtserkennung spielen IR-LEDs aber auch eine wichtige Rolle in Sicherheitskameras oder im Fahrzeug. In Sicherheitskameras lassen IR-LEDs Tag- und Nachtaufnahmen zu. Im Fahrzeug werden IR-LEDs beispielsweise für die Müdigkeitserkennung, aber auch im Fußgängerschutz eingesetzt.

Im April 2018 beispielsweise wurden neue IR-LEDs vorgestellt, mit denen Automotive-Applikationen adressiert werden. Die 850-nm-Typen eignen sich für Außenanwendungen in den Bereichen Nachtsicht, Fußgängerschutz, Vorfeldererkennung oder auch Spurerkennung. Die 940-nm-Varianten wiederum eignen sich vor allem für Anwendungen im Innenbereich wie zum Beispiel zur Fahrerüberwachung, Sitzbelegungs- oder Gestenerkennung. Die IR-LEDs können mit bis zu 5 A gepulst betrieben werden. Die IR-LEDs emittieren bis zu 2 W optische Leistung im Dauerbetrieb. Durch die Verwendung eines

hochbrechenden Silikons für die Linse ist diese besonders flach, wodurch seitlich nur wenig Licht verlorengeht. Infrarote Lichtquellen werden in einem Wellenlängenbereich unter 900 nm vom menschlichen Auge als rotes Glimmen wahrgenommen. Dieser Roteindruck wird bei 940 nm weitestgehend unterdrückt.

UV-LEDs gibt es als UV-A emittierende LEDs (365–400 nm) mit hoher Effizienz am Markt. Geht es um UV-B bzw. UV-C emittierende LEDs, werden die Entwicklungen weltweit vorangetrieben. Allerdings gelten hier die Lebensdauer und die Verkapselung noch als Problem. Aber es gibt auch schon Produktbeispiele, bei denen Single-Chip-LEDs 19 mW bei 200 mA und die Vier-Chip-LEDs 50 mW bei 600 mA liefern. Geht es um Endprodukte, so haben die Partner bereits eine Reihe von Produkten für die Sterilisation, Reinigung und Desodorierung (Verdecken von unerwünschten Gerüchen) eingeführt. Darüber hinaus ist geplant, UV-LEDs mit 15 mW auf den Markt zu bringen, mit denen Wasserreinigung vorgenommen werden kann.

Abb. 4.14: Dynamisches LED-Licht (z. B. im Fahrzeug) – mit unzähligen Design- und Gestaltungsmöglichkeiten



Quelle: Inova Semiconductors

4.3.3.2 Laserdioden

Laserdioden basieren auf Materialkombinationen wie InGaN, GaN, AlGaInP, GaAlAs, GaInAsSb oder GaAs. Abhängig von der Wellenlänge gibt es IR-Laserdioden, rote, grüne, blaue und UV-Laserdioden, die in nahezu allen Märkten zum Einsatz kommen, vom Industriemarkt über die Consumer Electronic und Healthcare bis hin zum Automotive-Markt sowie im militärischen Bereich. Je nach Technologie bzw. Struktur werden diverse Lasertypen unterschieden, wie Doppel-Heterostruktur-Laserdiode, Quantumwell-Laser, Quantum-Kaskaden-Laser, SCH-Laser (Separate Confinement Hetero Structure), VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser) oder VECSEL-Dioden (VECSEL = Vertical External Cavity Surface Emitting Laser).

Eine Marktstudie von TechNavio besagt, dass der weltweite Markt mit Laserdioden bis 2021 auf

797 Millionen Dollar ansteigen wird. Vor allem soll der Markt mit grünen Laserdioden steigen. Grüne Laserdioden zeichnen sich typischerweise durch geringe Größe und Gewicht, niedrigen Spannungs-, Strom- und Leistungsbedarf, hohen elektrischen Wirkungsgrad (oft ist keine Kühlung notwendig) und geringen Wartungsaufwand aus. Grüne Laserdioden werden in Head-up-Displays (HUD), Head-mounted-Displays (HMD), Pico-Projektoren und Smartphones eingesetzt, da sie ein breites Spektrum an hochgesättigten Farben und einen fokusfreien Betrieb ermöglichen. Grüne Laserdioden werden aber auch zunehmend in Anwendungen in der Medizintechnik, der Halbleiterindustrie, der Instrumentierung und im Militärbereich eingesetzt.

Auch die Anbieter von blauen Laserdioden (405–483 nm) können auf Wachstum hoffen. Diese Art der Laserdioden kommt in biologisch-medizinischen Anwendungen, in Laserprojektoren und Scannern, in Blu-Ray-Geräten etc. zum Einsatz. In einem Bericht von Market Research Hub belief sich der Markt mit blauen Laserdioden im Jahr 2017 auf 200 Millionen Dollar, Ende 2025 sollen es 310 Millionen Dollar sein.

Zu den bemerkenswerten aktuellen Entwicklungen gehört eine Laserdiode, die grünes Licht (520 nm) ohne fluoreszierendes Material emittiert. Es ist die erste Grünlicht-Laserdiode mit einer Leistung von mehr als 100 mW. Es handelt sich dabei um ein Single-Mode-Produkt (dessen Strahl eine runde Form hat), das zu diesem Zeitpunkt die industrieweit höchste Leistung hat. Schwellenstrom, Betriebsstrom und Betriebsspannung der neuen Laserdiode betragen 100 mA, 300 mA (Standardwert) bzw. 6,8 V (Standardwert). Der Wirkungsgrad der Umwandlung von Eingangsleistung in Licht beträgt 6,37 Prozent. Der Divergenzwinkel beträgt sieben Grad (Standardwert) in horizontaler Richtung und 22,5 Grad (Standardwert) in vertikaler Richtung.

Des Weiteren wurde eine gelbe Laserdiode vorgestellt, die bei 599 bis 605 nm emittiert. Dieser Bereich galt bis vor Kurzem noch als spektrale Lücke, doch Forscher haben eine Laserdiode entwickelt, die im gelb-orangen Spektralbereich bei Raumtemperatur in einer Laborumgebung emittiert. Die Diode sendet einen schmalen Strahl in vertikaler Richtung (schnelle Achse) mit einer Halbwertsbreite (FWHM) von maximal 24 Grad aus. Im gepulsten Betrieb (40 kHz) wurde eine Durchschnittsleistung von 1 mW erreicht. Zielanwendungen sind medizinische Applikationen, industrielle Spektroskopie und hochpräzise optische Atomuhren.

Das mit dem iPhone X eingeführte Face-ID-Verfahren hat den VCSEL-Lasern einen enormen Nachfrageschub eingebracht. VCSELS sind Laserdioden mit einem monolithischen Laserresonator, der das Licht senkrecht zur Oberfläche des Halbleiterchips abstrahlt, im Gegensatz zu kantennemittierenden Laserdioden, bei denen das Licht am Rand des Chips austritt. Die Vorteile der Oberflächenemitter sind folgendermaßen beschrieben: geringe Produktionskosten und eine verbesserte Strahlqualität. Hinzu kommt noch, dass die Kopplungseffizienz bei Lichtwellenleitern aufgrund der geringen Aufstellfläche, der guten Strahlqualität und der guten Fokussierbarkeit hoch ausfällt.

Man geht davon aus, dass VCSELS auch zur Gestenerkennung und Abstandsmessung genutzt werden können und zwar in diversen Anwendungsgebieten, von der Medizin über die Industrie bis hin zum Automobilbereich. Weitere Anwendungsgebiete sind Robotik, Sicherheits- und Überwachungskameras, IR-Heizung oder Machine-Vision für industrielle Anwendungen.

4.3.3.3 Forschung in Deutschland

Nachdem Photonik in Deutschland als Schlüsseltechnologie angesehen wird, gibt es entsprechend auch zahlreiche Forschungsprojekte, die vom BMBF unterstützt bzw. initiiert werden/wurden. Dazu zählt beispielsweise das Projekt InteGreat, das im Februar dieses Jahres abgeschlossen wurde. Ziel dieses Forschungsprojekts war die deutliche Kostensenkung in der LED-Fertigung. Dazu erprobten sieben Partner aus Forschung und Industrie photonische Prozessketten, um neue Ansätze für die Herstellung von sehr kleinen oberflächenemittierenden LED-Chips, Packaging-Technologien und Anschließtechniken zu finden. Ein wichtiges Ergebnis dieses Forschungsprojekts ist die Planar-Interconnect-Technik, bei der Bonddrähte durch flache Metallanschlüsse ersetzt werden, wodurch das Licht direkter genutzt werden kann, was die Verluste verringert.

Ein ebenfalls sehr erfolgreiches Verbundprojekt war FluoTOM, das die frühzeitige Erkennung von schwarzem Hautkrebs ermöglicht und zwar schmerzfrei und nicht invasiv. 2007 wurde ein Patent für die Dermatofluoroskopie angemeldet. Im November 2017 erfolgte die CE-Zertifizierung als Medizinprodukt und, damit verbunden, Anfang 2018 der Markteinstieg. Für 2019 ist der Start der Serienproduktion geplant.

Im Bereich der Automobilbeleuchtung haben Partner aus Forschung und Industrie zusammen einen intelligenten LED-Fahrzeugscheinwerfer

mit hoher Auflösung entwickelt, der an jeden denkbaren Kurvenverlauf angepasst und somit für ein adaptives Fahrlicht genutzt werden kann.

Im Mai 2014 wurde das ViDaP-Konsortium gegründet, um eine europaweite Lieferkette für die Massenproduktion von VCSELS für Infrarot-Beleuchtung, Datenkommunikation, Gestenerkennung und industrielle Heizanwendungen aufzubauen. Im September 2017 wurde der erfolgreiche Abschluss bekanntgegeben. Dazu wurde erklärt, dass vor dem Projekt VCSELS nur in kleinen Stückzahlen mit weitgehend automatisierten Prozessen hergestellt wurden. Jetzt wiederum hätten die Partner bewiesen, dass sie VCSELS nach den gleichen Standards wie andere hochvolumige Halbleiterbauelemente herstellen können.

Zu den noch laufenden Forschungsprojekten gehört beispielsweise das BMBF-Verbundprojekt IBELIVE. Seit Oktober 2017 befassen sich die Partner mit der Entwicklung kompakter bzw. flacher optischer Bauteile zur Datenvisualisierung oder zur Beleuchtung, wobei es bei diesem Forschungsprojekt speziell um die Miniaturisierung der Optik geht.

4.3.3.4 Siliziumphotonik (Silicon Photonics)

Das Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn definiert Siliziumphotonik folgendermaßen: die Realisierung optischer Komponenten und Systeme, die Silizium für die Verarbeitung und Übertragung von optischen Signalen auf einem Chip verwenden. Das Silizium wird strukturiert, um optische Wellenleiter, optische Filter, Modulatoren, Detektoren und andere optische Bauelemente zu realisieren.

Aufgrund des zunehmenden Datenverkehrs durch soziale Netzwerke, Video- und Spieleinhalte wird eine stetig steigende Bandbreite für die Kommunikation zwischen und innerhalb des Rechenzentrums benötigt. Dementsprechend entwickeln in den USA und Europa Unternehmen wie Facebook, Google und Amazon ihre eigenen optischen Rechenzentrumstechnologien in Partnerschaft mit Halbleiterfirmen. Denn Siliziumphotonik hat nicht nur den Vorteil, dass aufgrund der möglichen Skaleneffekte in der Halbleitertechnik kostengünstige Lösungen möglich sind, sondern dass diese Technik auch eine höhere Integration, eine größere Funktionalität und höhere Verbindungsdichte sowie einen geringeren Stromverbrauch und eine höhere Zuverlässigkeit im Vergleich zu herkömmlichen Optiken wie VCSELS ermöglicht.

Als Basismaterial für Siliziumphotonik kommen derzeit SOI-Wafer zum Einsatz, wobei für die erforderlichen Laser häufig III-V-Halbleiter integriert werden, da dem Silizium ein entscheidender Effekt fehlt: Silizium ist ein indirekter Halbleiter, der kein Licht emittieren kann.

Das Marktforschungsunternehmen Yole Développement hat den Umsatz im Siliziumphotonik-Markt 2016 auf 30 Millionen Dollar (Die-Ebene) beziffert und es gibt immer mehr Akteure, die im Markt aktiv sind. Für 2025 prognostiziert das Unternehmen einen Umsatz von 560 Millionen Dollar auf Chip-Ebene und fast 4 Milliarden Dollar auf Transceiver-Ebene. Das heißt, dass die Siliziumphotonik von wenigen Prozenten des gesamten Marktwerts für optische Transceiver im Jahr 2016 auf 35 Prozent des Markts im Jahr 2025 wachsen wird, hauptsächlich getrieben durch die Kommunikation innerhalb von Rechenzentren. Die größte Nachfrage besteht nach 400G. 200G könnte nur ein Zwischenschritt zwischen 100G und 400G sein. Yole Développement erwartet, dass im nächsten Schritt ein optischer 400G-Port entwickelt wird, der eine Übertragung von 1 Gbit für weniger als 1 Dollar über eine einzige Glasfaser und eine Distanz von 500 m ermöglicht und das bei einer Leistungsaufnahme von weniger als 5 mW/Gbit. Danach soll 1 TBit/s folgen.

Die Analysten betonen, dass die Siliziumphotonik erst am Anfang steht. Sie sehen in den Aktivitäten von großen Foundries gute Anzeichen dafür, dass diese Technik viel Potenzial hat. So wurde im Frühjahr 2018 erklärt, dass der 90-nm-Fertigungsprozess mit 300-nm-Wafern qualifiziert ist und dass gleichzeitig an einer 45-nm-Technologie gearbeitet wird. Wiederum wurde auf der IEDM 2017 eine Siliziumphotonik-Plattform vorgestellt, die Datenraten von 50 Gb/s und mehr über einen Kanal ermöglicht. Zusätzliche Prozessoptionen umfassen elektrooptische GeSi-Modulatoren (50 GHz), hocheffiziente thermooptische und andere Phasenverschieber, die Mach-Zehnder- und Mikroring-Modulatoren unterstützen. Die Herstellungsprozesse basieren im Wesentlichen auf den gleichen Tools wie für den 130-nm-CMOS-Knoten, allerdings werden sie durch folgende Prozessschritte ergänzt: 193-nm-Lithografie, selektives epitaktisches Aufwachsen von Germanium- und MEMS-ähnlichen Tiefenätzverfahren.

Die Analysten glauben, dass die derzeitigen Entwicklungen von Zero-Change-Verfahren zur Herstellung optischer Komponenten, also ohne Änderung des CMOS-Prozesses, zukünftig ein enormes Marktvolumen abbilden könnten. Heute

befände sich die Siliziumphotonik, was ihren Reifegrad anbelangt, auf dem Stand der Elektronikindustrie in den 80er-Jahren: Es gäbe immer noch diverse Probleme zu bewältigen. Dazu zählen die Analysten beispielsweise kleinere Modulatoren, Photonics-Software oder Laserquellen für niedrigere Datenraten (unter 50 Gb/s), eine stabile Lieferkette und die Etablierung von Zero-Change-Prozessen.

4.3.3.5 Beispiele

Mit dem optischen Modul LUX42604 QSFP28 wurden steckbare optische Transceiver auf den Markt gebracht, die den technischen Spezifikationen des 100G-PSM4 MSA entsprechen. Die optischen Module enthalten vier parallele Glasfaser-Transceiver mit Vollduplexbetrieb, die jeweils mit Datenraten von 1 Gbit/s bis 25,78 Gbit/s arbeiten und eine Reichweite von bis zu 2.000 m über Standard-Single-Mode-Faser unterstützen. Man nutzt zur Realisierung der Module einen hybriden Ansatz: Der Photonics-Die ist die Basis des Transceiver-Chipsatzes, auf dem ein weiterer Die aufgesetzt wird, auf dem die Lichtquelle und die Elektronik integriert sind, wodurch das Unternehmen jeweils die optimale Technologie für die Dies nutzen kann.

2017 wurde mit dem 100G CWDMA QSFP28 ein optischer Transceiver vorgestellt, der mit der CWDMA4-MSA-Spezifikation kompatibel ist und je nach Ausführung eine Reichweite von 500 m, 2 km oder 10 km überbrücken kann. Die Leistungsaufnahme ist mit 3,5 (maximal) angegeben.

Ebenfalls 2017 wurde ein 896-Gb/s-Silizium-Photonik-Transceiver von nur wenigen mm² entwickelt, der auf der iSiPP50G-Silicon-Photonics-Plattform basiert. In den Transceiver werden 16 elektrooptische 56 Gb/s-GeSi-Modulatoren (EAMs) und 16 GeSi-Wellenleiter-Photodetektoren (PDs) mit einer mehradrigen Glasfaser-Schnittstelle kombiniert. Sowohl die EAMs als auch die PDs wurden mithilfe eines einzigen GeSi-Epitaxieschritts realisiert, was ein einfaches Herstellungsschema ermöglicht. Auf dem Chip ist ein optischer Splitter integriert, sodass mit einer einzigen Laserquelle alle Kanäle versorgt werden können.

4.3.4 2.5D/3D-Integration

In der Mikrosystemtechnik kommt den Aufbau- und Verbindungstechniken eine immer wichtigere Rolle zu. Galt früher die monolithische Integration als die einzig wahre Möglichkeit, um eine hohe Integration zu erreichen, werden mittlerweile auch häufig 3D- bzw. 2.5D-Technologien genutzt, um die Integrationsdichte zu erhöhen und SiPs (System in Package) zu realisieren.

Man kann SiPs in drei Kategorien grob zusammenfassen:

- Planare Konfiguration (2.5D-Integration), bei der zwei oder mehrere Dies (ungehäuste Chips) oder ICs (gehäuste Chips) nebeneinandergesetzt und über laterale Verbindungen in einem Multilayer-Substrat miteinander verbunden werden.
- Gestapelte Konfiguration (3D-Integration), bei der zwei oder mehrere Dies oder ICs übereinandergestapelt und über eine Kombination aus lateralen und vertikalen Interconnects miteinander verbunden werden.
- Hybride Konfiguration, bei der planare und gestapelte Varianten miteinander kombiniert werden.

Abb. 4.15: Plasma-Ätzanlage



Quelle: Robert Bosch

Es gibt mittlerweile diverse Ansätze, um SiPs planar oder gestapelt aufzubauen. Zu den bekannten zählen sicherlich Multi-Chip-Module (MCMs), Multi-Package-Module (MPM), Package-on-Package-Module (PoP), SiPs auf Basis von Interposern (2.5D-Integration), Module mit TSV-basierten (Through Silicon Vias, Durchkontaktierungen) Verbindungen oder Module mit Drahtbond- und Flip-Chip-Verbindungen.

4.3.4.1 Vorteile liegen auf der Hand

Eine 2.5D/3D-Integration bietet viele Vorteile. So hilft sie den Halbleiterherstellern beispielsweise, weiterhin die Integrationsdichte gemäß Moore's Law zu erhöhen, obwohl die Skalierung der Transistoren mittlerweile deutlich länger braucht. So nimmt mit jedem Sprung auf den nächsten Technologieknoten die Komplexität zu – und damit steigen die Kosten pro mm² in modernen Technologien kontinuierlich; zusätzlich ist es so, dass die Fertigungsausbeute für sehr große Die-Flächen eher schlecht ausfällt. Dementsprechend setzen einige Hersteller nicht mehr auf eine monolithische Integration, sondern auf eine sogenannte Chiplet-Architektur, wie sie beispielsweise in den EPYC-Server-ICs zum Einsatz kommt. In einem 32-Core-Server-IC sind vier diskrete Chiplets in einem Multi-Chip-Modul mit einer Gesamtfläche von 852 mm² integriert, eine Fläche, die mit herkömmlichen Belichtungsverfahren nicht möglich wäre. Im Vergleich zu einem monolithischen Ansatz war es damit möglich, nicht nur die Funktionalität zu erhöhen, sondern auch die Fertigungsausbeute. Man ist überzeugt, dass dank der kleineren Die-Flächen und der damit erhöhten Fertigungsausbeute die Fertigungskosten reduziert werden konnten, und das trotz eines ungefähr 10-prozentigen Overheads, der für die Verbindung der Dies notwendig ist.

Außerdem ist es mit einer 3D-Integration möglich, heterogene Systeme aufzubauen. Das heißt, es können Chips von unterschiedlichen Herstellern, die mit unterschiedlichen Fertigungsverfahren oder auf unterschiedlichen Materialien basieren, miteinander kombiniert werden.

Darüber hinaus ermöglicht das Stapeln von ICs deutlich kürzere Verbindungsleitungen, was besonders in Hinblick auf die Tatsache, dass ein immer größerer Anteil der Leistungsaufnahme eines ICs auf die internen Verbindungsleitungen zurückzuführen ist, ein ebenfalls wichtiger Vorteil ist. Die kürzeren Verbindungsleitungen ermöglichen zusätzlich höhere Geschwindigkeiten.

Die 2.5D-Integration weist ähnliche Vorteile wie die 3D-Integration auf, nur eben nicht so ausgeprägt. Die Komponenten sind kleiner als bei einem diskreten Ansatz, aber eben nicht so klein wie eine gestapelte Variante; die Geschwindigkeit einer Lösung mit Interposer ist höher im Vergleich zu einem Ansatz, bei dem die gehäusten Chips nebeneinander auf der Leiterplatte sitzen, im Vergleich zu einer 3D-Komponente allerdings etwas langsamer usw. Die 2.5D-Integration hat aber im Vergleich zu einer 3D-Integration einen entscheidenden Vorteil: Sie lässt sich deutlich leichter realisieren.

Für die Assemblierung der 3D-Stacks (Stapel) stehen drei Ansätze zur Verfügung:

- W2W (Wafer-to-Wafer Attach) – dieses Verfahren hat den Vorteil, dass beide Bonding-Oberflächen extrem eben sind, sodass die Ausrichtungsgenauigkeit zwischen den Wafern sehr hoch ist (unter 3 µm), was sehr kleine Interconnect-Abstände ermöglicht.
- D2W (Die-to-Wafer Attach) – dieses Verfahren weist eine ähnlich hohe Ausrichtungsgenauigkeit wie der W2W-Ansatz auf, kann aber bei der ausschließlichen Verwendung von Know-good-Dies zu einer höheren Ausbeute führen; allerdings ist der Durchsatz deutlich geringer als bei W2W.
- D2D (Die-to-Die Attach) – dieses Verfahren hat die beste Chance unter allen drei Ansätzen, dass Know-Good-Stapel generiert werden, weil das untere Die vollständig getestet wird, bevor es mit dem oberen verbunden wird. Allerdings kann es aufgrund einer CTE-Fehlanpassung (Coefficient of Thermal Expansion) zwischen Substrat und unterem Die zu Verbiegungen kommen.

4.3.4.2 Beispiele

Grundsätzlich unterscheidet man bei Multi-Chip-Modulen (MCMs) zwischen drei Varianten: MCM-L, MCM-C, MCM-D, je nachdem, welches Substrat (Laminat, Keramik und Dünnschicht-Polyimidsubstrat) zum Einsatz kommt. Diese Technik wird bereits seit Jahrzehnten benutzt. So hat IBM beispielsweise 1998 einen Server-Prozessor auf den Markt gebracht, der aus 29 CMOS-Chips auf einem 127,5 mm großen Keramiksubstrat bestand.

Ein bekanntes Beispiel für eine 3D-Integration mithilfe von TSVs (Through Hole Vias = Durchkontaktierungen) ist ein Hybrid-Memory-Cube (HMC). Bei der Entwicklung dieses Speichers ging es darum, die immer größer werdende Lücke zwischen CPU-Rechenleistung und DRAM-Geschwindigkeit zu schließen. Hatten die CPU-Hersteller die Fortschritte aufseiten der Herstellungsprozesse genutzt, um die Taktfrequenz und später die Anzahl der Prozessorkerne zu erhöhen, nutzten die DRAM-Hersteller die Fortschritte, um die Speicherkapazität zu erhöhen. Das führte dazu, dass der Speicherzugriff zum Flaschenhals wurde. Beim HMC wird ein Logik-Layer als Fundament genutzt, auf das vertikale Stapel von DRAM-Dies gesetzt werden, die durch TSVs verbunden sind. Der Logik-Layer im HMC übernimmt Funktionen wie die DRAM-Sequenzierung, den Speicher-Refresh, das Routing, die Fehlerkorrektur und den High-Speed-Interconnect. Das Ergebnis dieses Aufbaus von damals: Das HMC erreichte eine Bandbreite von 160 GB/s,

was im Vergleich zu einem DDR3-Modul (1333 MHz) einer Verbesserung um den Faktor 15 entspricht. Die Energieeffizienz wurde mit ungefähr 20 pJ/b angegeben, was im Vergleich zu den DDR3-1333-Modulen, die mit etwa 60 pJ/b arbeiten, einer Effizienzsteigerung von 70 Prozent entspricht. Darüber hinaus konnte auch die Anzahl der Anschlüsse und der Flächenbedarf auf der Leiterplatte deutlich reduziert werden.

Aufgrund kommerzieller Überlegungen werden sich die Unternehmen in Zukunft verstärkt auf HBM (High-Bandwidth-Memory) konzentrieren, denn ein HMC ist zwar schneller als ein HBM, aber auch deutlich teurer. Auch die prognostizierten Wachstumsraten sprechen für HBM. Die Analysten von ReportLinker gehen davon aus, dass der Umsatz mit HMC und HBM von 922,70 Millionen Dollar im Jahr 2018 auf 3.842,50 Millionen Dollar im Jahr 2023 ansteigen wird, was einem durchschnittlichen Jahreswachstum von 33 Prozent entspricht, wobei HBM pro Jahr stärker wachsen soll als HMC.

Eines der ersten Beispiele für die Integration mittels eines Silizium-Interposers ist das Xilinx-FPGA Virtex-7 2000, das 2012 auf den Markt kam. Damals wurden vier gleiche ungehäute FPGAs in ein Gehäuse gesetzt und dieserart ein FPGA realisiert, das zwei Millionen Logikzellen enthielt. Im gleichen Jahr kamen auch noch heterogene Kombinationen auf den Markt, bei dem FPGA- und Transceiver-Dies in einem Gehäuse kombiniert wurden. 2015 wurden sehr große Interposer (größer als 32 mm x 26 mm) entwickelt und qualifiziert. Damit konnten mehrere große Chips auf einem einzigen CoWoS-Modul (Chip on Wafer on Substrate) integriert werden, ein entsprechendes Produkt ging im ersten Halbjahr 2016 in Serie. Zu den ersten mit diesem Prozess hergestellten Bauelementen gehörten abermals ein FPGA (20 nm) in einer Multi-Chip-Konfiguration sowie Super-High-Performance-Computer-ICs, bei denen ein 16/12-nm-SoC mit einem HBM2-DRAM der nächsten Generation kombiniert wurde. Seinerzeit wurde bereits eine 7-nm-CoWoS-Technologie entwickelt.

Ebenfalls wurde die sogenannte EMIB-Technik (Embedded Multi-Die Interconnect Bridge) eingesetzt, um Stratix-10-FPGAs mit Transceiver-Dies zu verbinden. Die EMIB-Technik nutzt keinen großen Interposer, auf dem die Dies verbunden werden, sondern nur kleine Brücken-Dies, die unter die zu verbindenden Dies gesetzt werden.

Galt früher die 2.5D-Integration mithilfe eines Interposers eher als Zwischenlösung, bis die

3D-Integration ausgereift ist, hat sie heute einen festen Platz in der Halbleiterindustrie. Neue Interposer-Materialien wie Glas oder organische Interposer gelten als Möglichkeit, die Kosten gegenüber Silizium-basierten Interposern zu reduzieren, was die Akzeptanz der Technologie weiter erhöhen dürfte.

4.3.4.3 Thermische Probleme

2015 wurde ein Grafikkprozessor (GPU) auf den Markt gebracht, bei dem im selben Gehäuse die GPU und ein HBM über einen Interposer miteinander verbunden waren. Damit stellt sich die Frage, warum die Speicher-Dies nicht direkt auf den Prozessor gesetzt werden, denn dieser Ansatz würde noch kürzere Latenzzeiten aufweisen und auch eine erhöhte Leistungseffizienz im Interconnect ermöglichen. Berechnungen haben ergeben, dass die Leistungseffizienz (mW/Gbps) bei einem Aufbau mit TSVs um den Faktor 28 besser ausfällt als bei einem diskreten Aufbau, bei dem der Prozessor neben dem DRAM-Speicher sitzt.

Doch das Stapeln von Prozessor- und Speicher-Dies kann als Beispiel für eines der Hauptprobleme von TSVs genommen werden. Prozessorhersteller geben für ihre Prozessoren einen TDP-Wert (Thermal-Design-Power) an, der der maximal abgegebenen Wärmeleistung entspricht, die durch das Kühlsystem eines Prozessors abgeführt werden muss. Bei einem gestapelten Aufbau verschlechtert sich der TDP-Wert im Vergleich zu einer 2D-Integration, was auf die thermischen Widerstände in einem 3D-Stapel zurückzuführen ist, die in Serie und damit additiv sind. Das heißt auch, dass der thermische Widerstand mit zunehmender Stapelhöhe steigt.

Dennoch wurde auf der IEDM 2017 genau solch ein Ansatz propagiert, bei dem der HBM-Speicher direkt auf das Logik-IC aufgesetzt wird. Aus der Sicht der Foundry lassen sich mit dem reinen 3D-Ansatz (ohne Interposer) folgende Vorteile erreichen:

- Die gesamten Gehäusekosten sinken um rund 20 Prozent.
- Die Bandbreite kann von 2 Gb/s auf über 2,7 Gb/s erhöht werden.
- Die Leistungsaufnahme, die aufgrund der Kapazitäten in der Anbindung des HBMs über einen Interposer entsteht, kann um 97 Prozent reduziert werden, wenn die langen Verbindungen im Interposer durch kurze TSV-Verbindungen ersetzt werden.

Außerdem sind mit dieser Technik auch komplett neue Architekturen möglich. So könnte beispielsweise der L2/L3-Cache aus dem Logik-IC entfernt und stattdessen auf ihn aufgesetzt werden. Damit würde der Logik-Die kleiner, was sich positiv auf die Fertigungsausbeute auswirkt. Und dennoch wären kurze Verbindungswege zwischen Logik-IC und SRAM möglich. Der Ansatz wurde an einem großen Networking-Die ausprobiert und es wurde festgestellt, dass sich dadurch die Ausbeute deutlich erhöht, während gleichzeitig die Kosten sinken. Unter der Annahme, dass die L2/L3-Caches etwa 50 Prozent der Gesamtfläche eines 625 mm² großen ASIC-Dies belegen, würde die Aufteilung in zwei gleich große, etwa 312 mm² große Dies (ein Die für die Logik, einer für den L2/L3-Cache) zu einer um mehr als 20 Prozent gesteigerten Fertigungsausbeute führen. Werden diese beiden Dies mithilfe von TSVs vertikal gestapelt und nur Known-Good-Dies, also vorher ausgiebig getestete Dies, verwendet, sinken die Kosten für das vollkommen funktionsfähige ASIC um mehr als die Hälfte im Vergleich zu einem monolithischen ASIC. Um das Problem mit der Wärmeabfuhr für die leistungsstarken Logik-ICs in den Griff zu bekommen, wird auf zwei Technologien gesetzt: eine spezielle Gehäuse-Settechnik, um den direkten Kontakt zwischen der Gehäuseoberfläche und dem darunterliegenden Die zu ermöglichen, damit die Wärme abgeführt werden kann; ein D2W-Ansatz mit thermischen Through Mold Vias (TMV) für eine direkte Wärmeabfuhr.

4.3.4.4 Mechanischer Stress

Eine 3D-Integration mithilfe von TSVs bringt aber noch ein weiteres Problem mit sich. So erhöhen TSVs den Stress im Silizium. Typischerweise wird Cu, W oder PolySi als Material für die TSVs genutzt, die mithilfe einer elektrochemischen Abscheidung (ECD) bei Temperaturen über 200 °C gefüllt werden. Diese Temperaturen sind deutlich höher als die Betriebstemperatur eines Prozessors oder eines Speichers. Bei der Abscheidungstemperatur befindet sich das TSV im Gleichgewichtszustand (d. h. spannungsfrei) mit dem umgebenden Silizium, bei Betriebstemperaturen induzieren die TSVs allerdings Spannungen im umgebenden Silizium. Diese Spannungen wirken sich auf die Elektronen- und Löchermobilität des Transistors aus und beeinflussen dementsprechend die Leistung und Zuverlässigkeit des Transistors. Um dieses Problem zu lösen, werden sogenannte Keep-out-Zonen eingeführt, in denen keine Transistoren sitzen dürfen. Damit erhöht sich aber die benötigte Siliziumfläche, die sowieso schon größer ausfällt, weil die TSVs an sich schon zusätzlich Fläche benötigen.

4.3.4.5 Sequenzielle 3D-Integration

Neben dem Stapeln von bereits gefertigten Dies arbeiten diverse Forschungsinstitute und Unternehmen seit einigen Jahren auch an einer monolithischen oder sequenziellen 3D-Integration (S3D), bei der Schichten von zum Teil unterschiedlichen Schaltungen nacheinander auf einem einzigen Ursprungs-Wafer aufgebaut werden. Auch wenn in diesem Bereich viel geforscht wird, gibt es bislang noch keine kommerziell verfügbaren Produkte, die auf dieser Technologie basieren.

Es werden je nach Granularität drei verschiedene S3D-Varianten unterschieden:

- T-S3D (S3D-Integration auf Transistorebene) – dabei wird das CMOS-Gate in zwei Lagen von pMOS und nMOS aufgeteilt.
- C-S3D (S3D-Integration auf Ebene von Standardzellen) – dabei werden konventionelle 2D-Standardzellen auf unterschiedliche Lagen verteilt.
- H-S3D (Heterogene S3D) – diese Art der 3D-Integration kann dazu benutzt werden, um verschiedene Technologien auf IP-Block-Ebene zu integrieren.

Die größte Herausforderung bei der S3D-Integration besteht darin, eine Halbleiterschicht auf eine bereits prozessierte, untere aktive Schicht bzw. auf einer Interconnect-Lage zu erzeugen, ohne diese durch hohe Temperaturbelastungen zu beschädigen bzw. ihre Leistungsfähigkeit negativ zu beeinflussen.

Dafür gibt es mehrere Ansätze, die entweder auf der Abscheidung polykristalliner Materialien und einer Rekristallisation basieren oder auf einem selektiven, epitaktischen Aufwachsen. Beide Ansätze haben aus Imecs Sicht Nachteile, dementsprechend halten die Forscher einen Lagentransfer, basierend auf einem Wafer-zu-Wafer-Bonden, für einen guten Ansatz, der bei einer Temperatur von nur 400 °C durchgeführt werden kann und dementsprechend wenig Defekte verursacht, der zusätzlich eine sehr gute Kontrolle über die Gleichmäßigkeit der Dicke zulässt.

Damit die untere aktive Schicht, die metallischen Verbindungen oder das Bonding-Interface durch das nachfolgende Aufbringen einer oberen aktiven Schicht nicht beschädigt werden, müssen die dafür notwendigen Prozessschritte bei niedrigen Temperaturen ablaufen bzw. die verwendeten Materialien müssen eine gute thermische Stabilität aufweisen. So wird beispielsweise empfohlen, für das Routing in der unteren Schicht Kobalt zum Einsatz kommen zu lassen. Denn Kobalt weist eine ähnlich hohe thermische Stabilität

wie Wolfram (650 °C) auf, kann aber gleichzeitig mit einem um den Faktor 2 bis 3 geringeren Widerstand punkten und weist auch gute Fülligenschaften auf.

Entscheidend für den Erfolg dieser Technik sind die Kosten, die damit verbunden sind, und die damit möglichen Vorteile. Bei einem Sprung von einem zum nächsten Knoten lässt sich typischerweise die Fläche um 50 Prozent reduzieren, das gilt sowohl für die Logik als auch für die SRAM-Zellen. Mit einem T-S3D-Ansatz lässt sich der Flächenbedarf nicht so stark reduzieren, aber mit C-S3D ist es möglich, die Fläche um 50 Prozent zu reduzieren. Bei einem H-S3D-Ansatz hängt die mögliche Flächeneinsparung von der Fläche des größten Dies ab. Geht es um die Leistungsaufnahme, erlaubt ein C-S3D-Ansatz selbst unter schlechtesten Bedingungen eine Senkung der Leistungsaufnahme um 15 Prozent. In Hinblick auf die Kosten wurde herausgefunden, dass auf Die-Ebene die Kosten mit einem H-S3D-Ansatz trotz 80 Prozent höherer Wafer-Kosten um 33 Prozent reduziert werden können. Dementsprechend ist die monolithische 3D-Integration mithilfe eines H-S3D-Ansatzes in der Summe der beste Ansatz.

4.3.4.6 Fan-out-Gehäusetechnik

Mit der eWLB-Technik (embedded Wafer Level Ball Grid Array) wurden bereits 2007 die Anfänge der Fan-out-Technologie gelegt. Damals entwickelte man Halbleitergehäuse mit höherer Integrationsdichte, frei wählbarer Gehäusegröße sowie nahezu unbegrenzter Anzahl von Kontaktstellen. Der Durchbruch der Technik erfolgte aber erst 2016/2017, als für den Applikationsprozessor im iPhone genau diese Technologie genutzt wurde. Die Fan-out-Technik ermöglicht beste Ergebnisse hinsichtlich Größe, Strahlenschutz, Kosten und Leistung. Mit dieser Technik ist eine hochflexible Integration für aktive und passive Chipkomponenten möglich. Die InFO-Technik eignet sich besonders für die Integration von drahtlosen Systemen, die einen geringen Stromverbrauch, eine gute Wärmeableitung, kompakte Abmessungen und hohe Bandbreiten erfordern. Die InFO-Packaging-Technologie wird bereits für 16-nm-SoCs und DRAMs für fortschrittliche mobile Anwendungen genutzt. Derzeit entwickeln Unternehmen die InFO-Packaging-Technologie für die 10-nm- und 7-nm-Knoten, sie soll aber auch für noch kleinere Prozessstrukturen verfügbar gemacht werden.

In Deutschland wird ebenfalls an der Technik gearbeitet. Das Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM) hält das Fan-out-Wafer-Level-Packaging (FOWLP) für

einen Ansatz, der ein hohes Miniaturisierungspotenzial sowohl im Package-Volumen als auch in der Package-Dicke bietet. Beim IZM ist die technologische Basis für FOWLP ein rekonfigurierter, gemoldeter Wafer mit eingebetteten Chips und einer Dünnschicht-Umverdrahtungslage, die zusammen ein SMD-kompatibles Package ergeben. Die Hauptvorteile des FOWLP sind ein sehr dünnes, weil substratloses Package, der geringe thermische Widerstand, gute HF-Eigenschaften aufgrund kurzer und planarer elektrischer Verbindungen zusammen mit einer Bumplosen Chipverbindung anstelle von zum Beispiel Drahtbonds oder Lötkontakten. Insbesondere die Induktivitäten sind mit der FOWLP-Technologie deutlich geringer als bei FC-BGA-Gehäusen. Darüber hinaus können in die Umverdrahtungslage funktionale Komponenten wie Kapazitäten, Widerstände, Spulen und Antennenstrukturen integriert werden. Damit eignet sich die Technologie auch für den Aufbau von Multi-Chip-Gehäusen und SiPs (System-in-Package).

4.3.5 Ein kleiner Ausblick in die Zukunft

4.3.5.1 Neuromorphe ICs

Bislang basieren die meisten Rechner auf einer Von-Neumann-Architektur, die im einfachsten Fall aus drei Komponenten besteht: CPU, Hauptspeicher für Daten und Programm und einem Bus. Geht es aber um Bild- oder Spracherkennung, dann erweist sich die Von-Neumann-Architektur aufgrund des Datentransfers zwischen CPU und Speicher als ineffizient.

Abb. 4.16: Moderne Prozesssteuerung mittels Dash Board zur Visualisierung der Prozessparameter



Quelle: Robert Bosch

Bild- oder Spracherkennung stellt für den Menschen hingegen kein Problem dar. Das Gehirn braucht im Gegensatz zu einem Computer keine programmierten Algorithmen, sondern

kann dank stetigem Lernen problemlos Objekte erkennen. Also liegt es nahe, diesen Ansatz in Hardware – sogenannte neuromorphe Systeme – umzusetzen, um auch in Bereichen wie Objekterkennung auf gute Ergebnisse zu kommen. Wobei neuromorphe Ansätze auch noch andere Vorteile gegenüber dem Von-Neumann-Ansatz aufweisen: Der Energieverbrauch ist sehr niedrig, sie gelten als fehlertolerant und sie sind lernfähig.

Die wichtigsten Bausteine des Gehirns sind die Neuronen und die Synapsen, wobei die Kommunikation zwischen den Neuronen mithilfe von elektrischen Pulsen erfolgt. Also wird versucht, genau diese zwei Bausteine in Hardware nachzubilden. Wobei klar sein sollte, dass es mit der Halbleitertechnik derzeit nicht möglich ist, ein komplettes menschliches Gehirn zu realisieren. Denn das Gehirn verfügt schätzungsweise über mehr als 10^{12} Nervenzellen (Neuronen) und mehr als 10^{15} Synapsen.

Wie muss also eine Hardware ausschauen, die zumindest einen Teil der Leistungsfähigkeit des menschlichen Gehirns erreicht? Das Fraunhofer-Institut für integrierte Schaltungen (IIS) erklärt bezüglich neuromorpher Hardware Folgendes:

Leistungsfähige neuromorphe Hardware-Architekturen für die Berechnung neuronaler Netze setzen auf massive Parallelverarbeitung und verteilte gekoppelte Speicherung und Verarbeitung. Mit diesen Konzepten können die für komplexe neuronale Netze notwendigen Berechnungen schneller und energiesparender durchgeführt werden als mit Von-Neumann-Architekturen. Da neuronale Netze sehr regelmäßige Strukturen aufweisen, ist eine massive Parallelverarbeitung möglich, indem die gleiche Art von Recheneinheiten/Zellen parallel verwendet wird. Daher eignen sich Architekturkonzepte, wie sie aus Architekturen mit parallelen Rechnern bekannt sind:

- Single-Instruction-Multiple-Data (SIMD): Mehrere parallele Prozessoren (z. B. MAC-Einheiten) führen eine bestimmte Rechenoperation für verschiedene Elemente eines verteilten Datensatzes gleichzeitig durch (Parallelisierung auf Datenebene).
- Very Long Instruction-Word (VLIW): Mehrere nicht notwendigerweise gleiche Befehle werden parallel abgearbeitet (Parallelisierung auf Befehlsebene).
- Systolische Arrays: Datenflussarchitekturen, die auf einem Netzwerk eng gekoppelter, gleichartiger Verarbeitungselemente basieren. Berechnungen erfolgen pipelineartig, indem die Daten durch den systolischen Array geleitet werden.

Mit einer entsprechend optimierten Hardware lassen sich beispielsweise CNNs (Convolutional Neural Network) einfach berechnen, die besonders häufig in der Muster- und Bilderkennung genutzt werden. In einem CNN sind künstliche Neuronen miteinander verbunden, die Nachrichten untereinander austauschen. Die Verbindungen haben eine numerische Gewichtung, die während des eigentlichen Trainings des CNNs verändert bzw. angepasst wird, sodass das trainierte Netzwerk bei einem zu erkennenden Bild oder Muster richtig reagiert. Hierin liegt ein wesentlicher Vorteil gegenüber konventionellen Ansätzen: Die Gewichtung der Faltungsschichten wird erst während des Trainingsprozesses festgelegt und muss nicht programmiert werden. Das führt nicht nur dazu, dass ein CNN lernfähig ist, sondern dass auch die Speicheranforderungen geringer ausfallen.

4.3.5.2 Beispiele

Als bekanntes Beispiel für eine neuromorphe Hardware gilt das TrueNorth-IC, das im August 2014 vorgestellt wurde. Der Chip verfügt in der 2. Generation über 5,4 Milliarden Transistoren, die für die Realisierung von über 1 Million Neuronen, 256 Millionen programmierbare Synapsen und ein On-Chip-Netz mit 4.096 neurosynaptischen Cores genutzt werden. Die Leistungsaufnahme beträgt 70 mW im Echtzeitbetrieb.

Neben dem TrueNorth-IC gibt es aber auch andere Komponenten, die für neuronale Netze optimiert wurden. Dazu zählt beispielsweise ein Neural-Compute-Stick, der auf Anwendungen wie Deep-Learning und maschinelle Bilderkennung zugeschnitten ist. Der USB-Stick ist mit einem Myriad-2-SoC ausgestattet, das wiederum mit 12 VLIW-128-Bit-Vektorprozessoren ausgestattet ist, die Leistungsaufnahme ist mit 1 W spezifiziert. Aber auch die Anbieter von Soft-IPs zur Integration in SoCs bieten mittlerweile diverse IP-Cores an, die für neuronale Netze optimiert sind. Ein Beispiel ist der Vision Q6 DSP-Core. Der 2018 vorgestellte IP-Core kommt im Vergleich zur Vorversion auf eine um den Faktor 1,6 höhere Verarbeitungsleistung bei KI- und Vision-Applikationen. Darüber hinaus lässt sich eine maximale Taktfrequenz von 1,5 GHz erreichen (16 nm) und er ist hinsichtlich der Leistungseffizienz im Vergleich um den Faktor 1,25 besser als der Vorgänger.

Grafikprozessorhersteller tummelt sich ebenfalls im KI-Bereich (KI = künstliche Intelligenz). Beispielsweise basieren Module auf der Pascal-Architektur. Für Deep Learning erreicht ein System mit Pascal-Architektur einen zwölfwachen Anstieg beim Trainieren neuronaler Netze,

wodurch die Trainingszeit von mehreren Wochen auf wenige Stunden gesenkt und ein siebenfacher Anstieg des Deep-Learning-Durchsatzes im Vergleich zur aktuellen Generation von Grafikprozessorarchitekturen möglich wird.

4.3.5.3 Alternative Speichertechnologien sind gefragt

Der TrueNorth-IC ist aus der Sicht von Experten nur bedingt optimal gelöst. Er ist zwar dank der lokalen Nähe zwischen Synapsen (SRAM) und Neuronen energieeffizient, aber der genutzte SRAM-Speicher verbraucht viel Platz und weist Grenzen in der Skalierung auf. Andere Speichertechnologien sind besser geeignet, um die Synapsen zu realisieren. Dazu zählen unter anderem RRAM, Phasenwechspeicher (PCM), CBRAM (Conductive Bridge Memory) und FeRAM (ferroelektrische Speicher).

Alternativ wurde ein neuromorphes System für SNNs (Spiking Neural Networks) entwickelt, das mit einer 64-K-PCM-Zelle (Phase-Change-Material) als Synapsen-Array ausgestattet war. Darüber hinaus wurde 2017 ein in 65 nm gefertigter Technologie-Demonstrator gezeigt, der nicht nur für anspruchsvolle Aufgaben wie Maschinenlernen geeignet, sondern auch sehr klein ist und darüber hinaus sehr wenig Leistung aufnimmt. Dieser selbstlernende neuromorphe Chip basiert auf einer OxRAM-Speichertechnologie. Welche Speichertechnologie schließlich das Rennen machen wird, ist derzeit noch nicht absehbar.

Bislang eignen sich alle ICs, die für neuronale Netze optimiert sind, lediglich für Inferenzen. Das eigentliche Training der neuronalen Netze findet immer noch in großen Rechenzentren statt, schon allein deshalb, weil für das Training typischerweise sehr große Datenmengen notwendig sind. Selbst für inkrementelle Lernprozesse ist ein Prozessor notwendig, der im Vergleich zu gängiger Hardware von heute eine um den Faktor 1.000 höhere notwendige Rechenleistung aufweisen müsste.

Abb. 4.17: Digitale Zukunftswelt



Quelle: Robert Bosch

Auch wenn neuromorphe Hardware noch am Anfang steht, die Aktivitäten im Forschungsbereich sind enorm. Auf der ISSCC 2018 war eine eigene Session ausschließlich Hardware-ÄDort wurde beispielsweise ein Multi-Purpose-DNN-Inferenz-Beschleuniger vorgestellt, der auf eine Rechenleistung von 7,49 TOPS (1 Bit Auflösung) kommt. Dafür wurde eine DNN-Inferenz-Engine auf acht übereinandergestapelte SRAM-Dies (96 MByte) gesetzt und die Kommunikation erfolgt drahtlos und zwar mithilfe einer induktiv-gekoppelten Kommunikationstechnik (TCI = ThruChip Interface). Außerdem wurde ein DNN-Beschleuniger mit variabler Genauigkeit präsentiert, der CNN- (Convolutional-Neural-Network) und RNN-Ansätze (Recurrent-Neural-Network) mit einer einzigen programmierbaren Architektur unterstützt.

4.3.5.4 Quantencomputer

Seit vielen Jahren wird an Quantencomputern gearbeitet, weil sie Spezialanwendungen durchführen können, die herkömmliche Computer niemals schaffen würden. Mögliche Anwendungsbereiche sind beispielsweise die Simulation von chemischen Eigenschaften von Molekülen, um einen neuen medizinischen Wirkstoff zu finden. Aber auch die Faktorisierung von großen Zahlen ist mit Quantencomputern durchführbar, eine absolute Unmöglichkeit für die heutige IT-Infrastruktur.

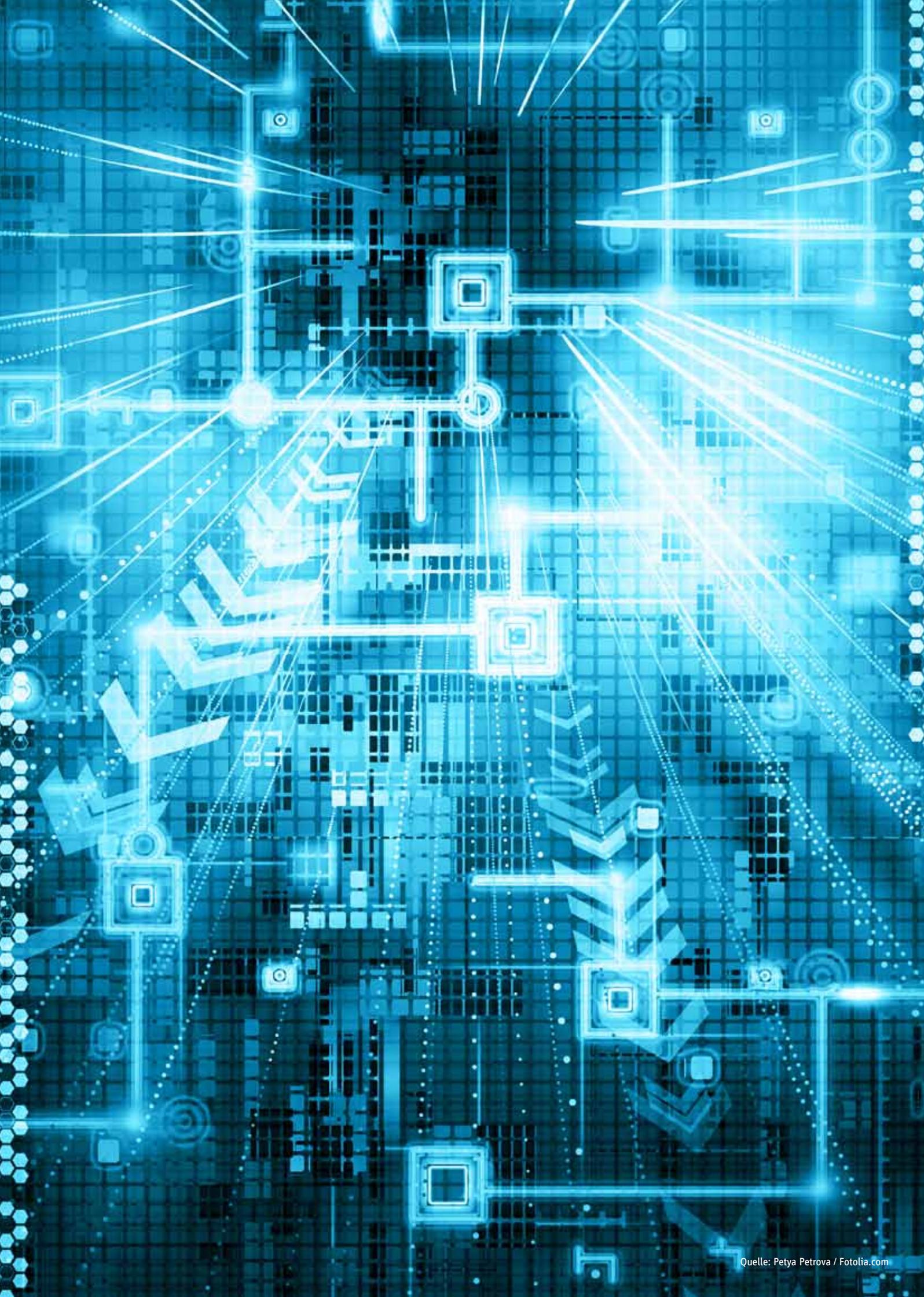
Warum eignen sich Quantencomputer für solche Aufgaben besser als herkömmliche Computer? Herkömmliche Computer arbeiten mit Bits, die genau zwei Zustände einnehmen können: Null oder Eins. Ein Quantencomputer hingegen kann auch mit Zwischenzuständen, sogenannten Superpositionen, arbeiten. Der Informationsträger in Quantencomputern ist das Quantenbit, kurz Qubit. Außerdem können die Qubits in einem Register verschränkt werden, sodass eine Änderung von einem Qubit auch Änderungen bei allen anderen, mit diesem Qubit verschränkten

Quantenbits hervorruft. Beide Effekte führen zu der sehr hohen Rechenleistung von Quantencomputern.

Einer, der schon seit 1981 an Quantencomputern forscht, ist IBM. Das Unternehmen hat 2016 weltweit den ersten Quantencomputer in der Cloud für die Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Das System verfügt über 16 Qubits. 2018 hat das Unternehmen dann einen funktionierenden 50-Qubit-Prozessor-Prototyp gefertigt und getestet. Der derzeit leistungsfähigste Quantencomputer kommt aber aus dem Hause Google: Der Bristlecone mit 72 Qubits wurde ebenfalls 2018 auf den Markt gebracht.

Damit ist die geltende Schallgrenze von 45 Qubits überschritten. Bis zu dieser Qubit-Anzahl ist ein Quantencomputer einem Supercomputer noch nicht überlegen, sprich beide Rechner können die Berechnungen durchführen. Steigt die Anzahl über 45 Qubits, dann soll es möglich sein, die Überlegenheit von Quantencomputern zu zeigen. Ob es mit dem Bristlecone oder dem IBM-Prototyp bereits soweit ist, muss sich noch zeigen. Unter Experten wird bereits darüber diskutiert, dass nicht alle 72 Qubits gleich gut funktionieren oder es wird beim IBM-Prototyp die hohe Fehlerrate als Makel angemerkt.

Und ein Problem ist bei beiden Quantenrechnern auch noch nicht gelöst: Bisher arbeiten die Quantencomputer nahe dem absoluten Nullpunkt, dementsprechend gehen viele davon aus, dass Quantencomputer auch in den nächsten Jahren sicherlich nicht zur Mainstream-Technik werden.



5 Mikrosystemtechnik (MST) – Sensoren/Aktoren



Quelle: TimeStopper – stock.adobe.com

Die Sensorik/Aktorik stellt das Bindeglied zwischen der realen Welt und der Digitalwelt dar. Sie hat daher enorme Bedeutung bei der zunehmenden Durchdringung unserer Lebenswelten mit Elektronik.

Maschinen, Anlagen, Fahrzeugen und aus der Umwelt. Die fortschreitende Digitalisierung wird Daten immer wertvoller machen.

Wo kommen all diese Daten her, wie werden sie erzeugt? Wo ist die Quelle für diesen Rohstoff?

Abb. 5.1: Bindeglied Sensorik/Aktorik



Quelle: ZVEI

Diese Fragestellung erklärt sehr anschaulich, welche Bedeutung die Sensorik in der digitalen Welt haben wird, denn die Sensoren stellen als „Sinnesorgane der Technik“ eine der wichtigsten Quellen zur Datengenerierung dar. Einfach ausgedrückt: Mithilfe der Sensoren kommt die reale Welt in den Computer.

5.1 Einleitung und Definition MST

Begriffe wie Digitalisierung, Industrie 4.0, autonomes Fahren, Internet der Dinge (IoT), Smart Home, Smart Health, Smart Energy, Ambient Assisted Living (AAL) stehen für die großen Trends der Zukunft.

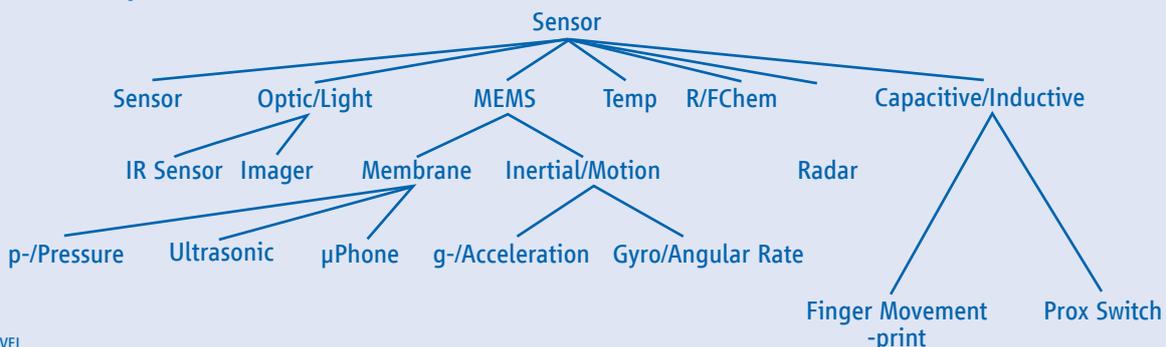
Ohne die Sensoren als elektrische Bauelemente wäre keiner der oben genannten Megatrends zu realisieren. So sind in vielen Anwendungsfällen die durch Sensoren generierten Daten die Grundlage der Digitalisierung.

Ein Sensor besteht meist aus dem eigentlichen Sensor-Element, einer Elektronik, einer mechanischen Hülle und dem elektrischen Stecker.

War im vergangenen Jahrhundert Öl der Treibstoff der Wirtschaft, so werden es im 21. Jahrhundert Daten sein. Daten von Personen,

Das Sensor-Element hat die Aufgabe, die zu messende Größe in ein elektrisches Signal zu wandeln. Diese Wandlung beruht auf unterschiedlichen physikalischen Prinzipien.

Abb. 5.2: Beispiele verschiedener Sensor-Elemente



Quelle: ZVEI

Abb. 5.3: Der Sensor als Bindeglied



Die weitere Elektronik innerhalb eines Sensors dient dazu, das Sensor-Element mit elektrischer Energie zu versorgen, aber auch dazu, das Signal des Sensor-Elements zu verstärken, bestimmte nicht gewollte Effekte zu kompensieren oder ein analoges Signal in ein digitales zu wandeln. Daneben beinhaltet die Elektronik auch die Kommunikations-Schnittstelle, um das Sensor-Signal an andere elektronische Einheiten weiterzugeben.

Sensor-Element und Elektronik müssen selbstverständlich vor ungewollten Umwelteinflüssen geschützt werden. Diese Aufgabe übernimmt die mechanische Hülle des Sensors. Hierin können aber auch weitere Sensor-Funktionselemente eingebaut sein, wie beispielsweise optische Linsen, Magnete oder Ähnliches. Somit kann das Sensor-Gehäuse funktionaler Bestandteil des Sensors sein. In der Sensorik wird daher dem Gehäuse eine hohe Bedeutung beigemessen.

Daneben haben Sensoren vielfach einen Stecker, der die Anschlüsse zur elektrischen Energieversorgung wie auch zur Kommunikation aufnimmt.

Die Integration von Sensorik, Auswerteelektronik und Aktorik auf engstem Raum wird als Mikrosystemtechnik bezeichnet. Durch die damit einhergehende Miniaturisierung und die Einbindung von Software schafft die Mikrosystemtechnik eine wesentliche Voraussetzung für innovative Systemlösungen in vielen Anwendungsbereichen. Sie ist eine Schlüsseltechnologie zur Umsetzung der Megatrends.

Deutschland verfügt sowohl bei den Sensor-Elementen als auch bei den Sensoren selbst über eine herausragende internationale Stellung. Dies trifft sowohl für die Großindustrie als auch für die mitteständige Industrie zu.

Abb. 5.4: Anwendungsmärkte für Sensorik



Quelle: ZVEI / Infineon Technologies / mirpic, Sasa, Pixel_B, Wavebreak Media, Kadmy, phonlamaiphoto, chiradech, Minerva Studio, Dan Race, Sergey Nivens, Thaut Images/Fotolia.com

5.2 Branchenbeispiele

An einigen Beispielen soll der Einsatz der Mikrosystemtechnik in verschiedenen Branchen dargestellt werden.

Am Smartphone lässt sich sehr schnell erkennen, wie die Umgebung mithilfe von Sensoren in den Computer kommt. Smartphones sind heute mit einer Vielzahl von mikrosystemtechnisch realisierten Sensoren ausgestattet: Mikrofone, Beschleunigungssensoren, Drehratensensoren, Luftdrucksensoren sowie Magnetfeld-, kapazitive als auch optische Sensoren.

All diese Sensoren dienen der Erfassung der Umgebung des Smartphones und der einfachen Bedienung durch den Nutzer.

Mikrofone nehmen die Stimme beim Telefonieren auf. Sie dienen aber auch dazu, die Umgebungsgeräusche möglichst gut zu unterdrücken. Moderne Smartphones nutzen sie aber auch zur Steuerung des Geräts mittels Sprache.

Bewegungssensoren helfen, die Bedienung des Geräts zu vereinfachen, aber auch, um Vitaldaten des Nutzers aufzunehmen.

Smartphone-Kameras verfügen über bildgebende Sensoren, die sowohl klassisch zur Erzeugung elektronischer Fotos, aber auch zur Erkennung der Umgebung genutzt werden.

Künftig werden weitere Sensoren hinzukommen, um die Umgebung noch besser zu erfassen.

Damit wird das Smartphone für seinen Nutzer zu einem unentbehrlichen Assistenten.

In großen Industrieanlagen werden mithilfe der Sensoren alle Prozesse zur Produktherstellung gesteuert. Sie werden aber auch zur Qualitätskontrolle eingesetzt.

Egal ob es sich um Anlagen der chemischen und der biotechnologischen Prozessindustrie, der Produktionsgüter- oder Konsumgüterindustrie handelt: Sensoren tragen dazu bei, die Herstellungsprozesse im hochkompetitiven globalen Umfeld effizient und ressourcenschonend dazustellen und so die Wettbewerbsfähigkeit des Standorts Deutschland zu sichern.

Im Kraftfahrzeug wird durch das hochautomatisierte oder das autonome Fahren die Zahl der notwendigen Sensoren deutlich zunehmen, da zur automatisierten Steuerung des Fahrzeugs die dafür notwendige Elektronik eine genaue Kenntnis der Fahrzeugumgebung, aber auch über den

Fahrzeugzustand selbst (z. B. Lenkwinkel) haben muss. Hierzu sind sowohl Umfeldsensoren wie Kamera, Radar und Lidar, aber auch viele weitere Sensoren im Fahrzeug selbst notwendig.

Abb. 5.5: Hochautomatisiertes Fahren erfordert eine Vielzahl von Sensoren



Quelle: folienfeuer – stock.adobe.com

5.3 Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) als Schlüsselparameter

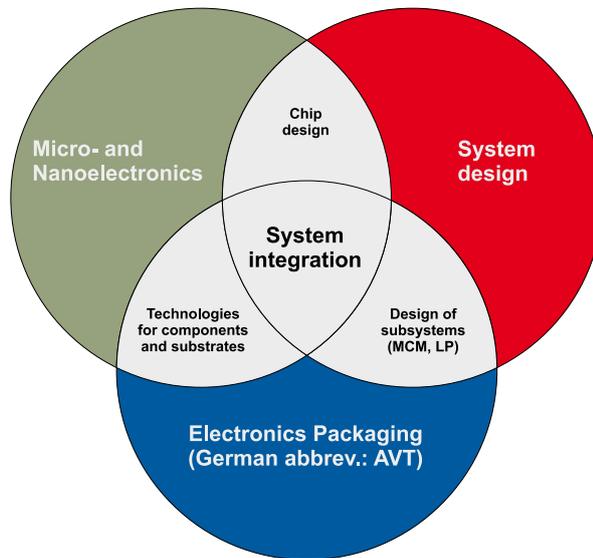
5.3.1 Darstellung der Komplexität und Diversität, allgemeine Definitionen

Ein sehr gute Beschreibung der Thematik in ihrer Komplexität und Diversität findet man im Jahresbericht 2012 des Instituts für Aufbau und Verbindungstechnik der Elektronik (IAVT) und des Zentrums für mikrotechnische Produktion (ZmP) an der Technischen Universität Dresden, die auch heute noch aktuell ist, und deshalb hier zitiert wird:

„Zusammenfassung der technologischen Verfahren für die Fertigung elektronischer Baugruppen bei wachsenden Anforderungen an die Packungsdichte, Verdrahtungsdichte und Zuverlässigkeit (...) mit den Schwerpunkten:

- (...) Aufbau und Verbindungstechnik
- Dickschichttechnik
- Mikrostrukturcharakterisierung
- Mikroverbindungstechniken
- Modellierung, Simulation, Optimierung von Prozessen
- Montagetechnologien
- Optische Verbindungstechnik
- Qualitätssicherung in der Fertigung
- Sensoren (...)
- Zerstörungsfreie Prüfverfahren
- Zuverlässigkeit auf Baugruppenebene“

Abb. 5.6: Einordnung der AVT in der Systemintegration



Quelle: Technische Universität Dresden

Bei den meisten Halbleiterprodukten dient die AVT weitgehend zum Schutz des Halbleiters, der Wärmeableitung und der elektrischen Kontaktierung (Stromversorgung und Ein- und Auskopp- lung von Datensignalen).

Im vorhergehenden Kapitel 5.1. ist diese immaterielle Datenwelt zu Recht als „Treibstoff der Wirtschaft im 21. Jahrhundert“ eingestuft worden. Im Gegensatz zu klassischen Halbleiter- Bauelementen und -Systemen erweitern die Aktuatoren und Sensoren diese Datenwelt um materielle Daten physikalischer oder chemischer Art. Die Aufbau- und Verbindungstechnik ist für MST-Produkte deshalb oft wesentlich komplexer als für andere Bauelemente. Es muss die

zu messende oder zu stimulierende Größe bzw. das Medium selbst (fest, gasförmig oder flüssig) an den Chip des MST-Elements heran- oder von ihm herausgeführt werden. Dieser Chip muss aber gleichzeitig auch vor den Umwelteinflüssen geschützt werden, welche die Qualität oder die Langzeitstabilität negativ beeinflussen.

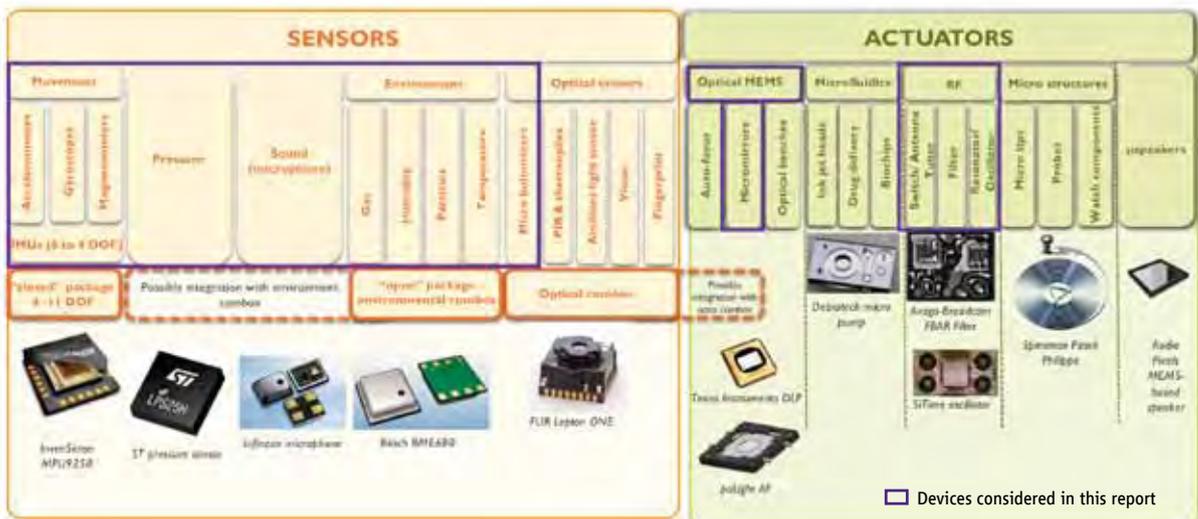
In einer Arbeit des Marktforschungsunternehmens Yole Développement ist eine gute Zusammenfassung der Mikrosystemtechnik strukturiert wiedergegeben, siehe Abbildung 5.7. Ohne auf die vielen Details einzugehen, beschreibt dies doch die enorm hohe Vielfalt dieses Gebiets und die damit verbundenen diversifizierten Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik.

Selbstverständlich ist in einer so komprimierten Form keine vollständige Auflistung möglich. Die Liste könnte noch erweitert werden, zum Beispiel um Ultraschall-Transducer für medizinische Anwendungen, Messung von Puls und Sauerstoff-Sättigung, Gasmassenflusssensoren, dreidimensionale Bild-Sensoren, hyperspektrale optische Sensoren, Mikrospektrometer und viele andere Möglichkeiten.

5.3.1.1 Aktoren

Für viele Anwendungen kann ein Aktuator nicht in Mikrosystemtechnik realisiert werden. Notwendige mechanische Kräfte, große mechanische Wege oder hohe elektrische Leistungen können oft nur durch makroskopische Bauelemente generiert werden. Als Beispiel dürfen hier die elektromechanische Steuerung von Ventilen durch Stapel aus mehreren Piezo-Elementen oder auch motorische Antriebe genannt werden. Für andere Bauelemente ist aber eine MST-Realisierung möglich, siehe Tabelle 5.1.

Abb. 5.7: MEMS-Sensoren



Quelle: Yole Développement

Tab. 5.1: Aktuatoren in der Mikrosystemtechnik

Aktuortyp/ Stellgröße	Anwendungs- beispiele	Anzukoppeln- des Medium	Besondere Anforderungen	Bemerkungen	Verkapselung möglich
Mikroventile	Fluidik Dosierungen	Gase oder Flüssigkeiten			Nein
Mikropumpen	Dosierungen	Flüssigkeiten			Nein
Mechanische Bewegung	Mikrowerkzeuge	Partikel	Durch Piezoelemente oder auch durch elek- troaktive Polymere		Nein
Laser	Daten- übertragung		Schnelligkeit		Ja, aber strahlungs- durchlässig
LEDs	Pointer, Leuchtmittel		Vielfältige Anwendungen		Ja, aber strahlungs- durchlässig
Lichtsteuerung durch Spiegel	Ablenkung eines Laserstrahls	Strahlung	Schnelligkeit	Zur Steuerung der Strahlungsrichtung oder zur On-off-Schaltung bei Einspeisung in eine Glasfaser	Ja, aber strahlungs- durchlässig
Bilderzeugung durch Spiegel	Beamer	Strahlung	Sehr viele Spiegel integriert		Ja, aber strahlungs- durchlässig

Quelle: Dr. Günter Kowalski

5.3.1.2 Sensoren

Die Anwendungen der Mikrosystemtechnik in der Sensorik sind so vielfältig, dass im Rahmen dieser Publikation auf Vollständigkeit leider verzichtet werden muss. Insofern sind in der folgenden Tabelle 5.2 nur Beispiele von sehr bekannten Sensorapplikationen aufgelistet.

Die wesentliche Besonderheit von Sensoren gegenüber anderen Halbleiterbauelementen besteht in der funktionsbedingten Notwendigkeit, ein Medium anzukoppeln. Werden bei klassischen Halbleiter-Bauelementen oft nur elektrische Signale übertragen und dient das Gehäuse der mechanischen Montage, aber auch insbesondere bei Leistungsbauelementen der Wärmeabfuhr, so müssen bei den Sensoren andere physikalische und chemische Beeinflussungen bereitgestellt werden. In der letzten Spalte der Tabelle 8.2 wird deutlich, dass nur ganz wenige Sensortypen, wie zum Beispiel Temperatursensoren, ohne eine spezielle Aufbau- und Verbindungstechnik auskommen.

Für jeden Sensortyp muss eine spezielle AVT entwickelt werden.

5.3.1.3 Kopplung von Sensoren und Aktuatoren

Eine Besonderheit stellen darüber hinaus solche Sensoren dar, die für ihre Funktion einen integrierten Aktuator benötigen. Anhand der ausgewählten Beispiele lassen sich die Komplexität

und Vielfalt der AVT-Technik gut darstellen. Es soll noch einmal betont werden, dass auch hier kein Versuch auf Vollständigkeit unternommen werden kann. Beispielhaft seien hier vier Sensoren beschrieben:

- Chemischer Sensor auf Metalloxidbasis
- Strömungssensor basierend auf Anemometer-Prinzip
- Viskositätssensor (Messung der Dämpfung einer schwingender Zunge)
- Drehratensensor

Chemischer Sensor auf Metalloxidbasis: Bei chemischen Gassensoren braucht man direkten Medienzugang. Bei Metalloxid-Sensoren (MOX) findet eine chemische Reaktion statt, für die eine hohe Temperatur notwendig ist. Für Sensoren zum Beispiel mit Zinnoxid als sensitive Schicht muss diese auf einige 100 °C erhitzt werden. Um dafür nicht zu hohe Energie zu benötigen, wird das eigentliche Heiz-/Sensor-Element auf einer sehr dünnen Membrane aufgebracht.

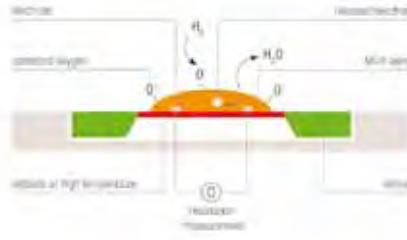
In der Abbildung 5.8a ist deutlich die dünne Membrane zu sehen. Um die Wärmeableitung noch weiter zu reduzieren, kann diese Membrane mit Schlitzen soweit strukturiert werden, dass das eigentliche beheizte Element nur noch an dünnen „Fäden“ hängt. Damit werden die Leistungsaufnahme des Sensors sowie die Kräfte, die durch Verformungen des Rahmens entstehen können, signifikant reduziert.

Tab. 5.2: Sensoren in der Mikrosystemtechnik

Sensortyp/ Messgröße	Anwendungs- beispiele	Anzukoppeln- des Medium	Besondere Anforderungen	Bemerkungen	Verkapselung möglich
Temperatur	Sehr vielfältig	Gase, Flüssigkeiten, Festkörper	Je nach Anwendung, speziell bezüglich des Temperaturbe- reichs, sehr unterschiedlich		Ja
Feuchte	Klimaregelung	Gase (Luft)			Nein
Druck	Sehr vielfältig	Gase, Flüssigkeiten	Je nach Anwendung, speziell bezüglich des Druckbereichs, sehr unterschiedlich	Sowohl Differenz- druck als auch Absolutdruck	nein
Dichte	Prozesskontrolle	Gase, Flüssigkeiten	Temperatureinfluss auf Dichte muss kompensiert werden		Nein
Viskosität	Sehr vielfältig	Gase, Flüssigkeiten		Durch Druckdifferenz an einer Stauscheibe, durch mechanische Stimulation (Schall, Vibration)	Nein
Strömungsge- schwindigkeit	Prozesskontrolle	Gase, Flüssigkeiten	Strömungsverhalten im Messkanal kritisch	Durch Druckdifferenz an einer Stauscheibe oder durch mechani- sche Stimulation (Schall, Vibration)	Nein
Infrarot	Näherungssensor	Elektromagnetische Strahlung			Ja, aber strah- lungsdurchlässig
Sichtbares Licht	Automatische Steuerung von Beleuchtung	Elektromagnetische Strahlung			Ja, aber strahlungs- durchlässig
Laufzeiten von Licht	LIDAR Light detection and ranging	Elektromagnetische Strahlung	Genauere Laufzeitmessung	Sehr vielfältige Anwendungen	Ja, aber strahlungs- durchlässig
Bildsensoren	Kameras	Elektromagnetische Strahlung	Meist sichtbares Licht, aber auch Infrarot	Mit Detektion der Polrichtung sehr hohe Anzahl von Bildelementen	Ja, aber strahlungs- durchlässig
Kapazitive Sensoren	Tastenfunktion, Fingerprintsensor, Näherungsschalter	Statisches Feld		Als Fingerprintsensor meist als lineare Zeile	Bedingt
Magnetfeld	Winkelsensor, Encoder zur Längenmessung, Kompass, Strommessung	Magnetfeld	Oft 3D-Vektor gefragt		Ja
Mikrofone	Mobilphone	Luftschall			Nein
Beschleunigung	Stabilitäts- steuerung in Automobilen	Mechanisch	Oft 3D-Vektor gefragt	Oft kurz als „Accel“ bezeichnet, sowohl Translation als auch Rotation	Ja
Drehgeschwin- digkeit	Stabilitäts- steuerung in Automobilen	Mechanisch		Oft kurz als „Gyro“ bezeichnet	Ja
(Bio)chemische Stoffe	Raumüberwachung	Meist Gas-Luft- Gemisch	Direkte Medienexposition, Kompatibilität mit sensitiven Materialien, Herstellungspro- zessen, Betriebsbedingungen	Oft indirekt durch reversible Reaktionen Graphene (große Reaktions- oberfläche!)	Nein

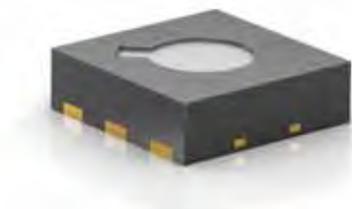
Quelle: Dr. Günter Kowalski

Abb. 5.8a: Schematischer Querschnitt durch einen MOX-Gassensor



Quelle: Sensirion

Abb. 5.8b: Modernes SMT-Gehäuse mit Gaseintrittsöffnung



Quelle: Sensirion

Die Reduktion der Wärmeableitung ist nicht nur wichtig für einen möglichst geringen Leistungsverbrauch des Sensors, sondern auch, wenn das Bauelement in einer explosionsgefährdeten Umgebung eingesetzt werden soll. Je geringer die Leistungsaufnahme eines Sensors ist, desto einfacher lassen sich zusätzliche Maßnahmen, wie zum Beispiel engmaschige Gitter vor der Gaseintrittsöffnung, realisieren.

Bei diesen Konzepten der Chips wird der Si-Rahmen extrem fragil. Schon beim Vereinzeln des Wafers in einzelne Chips muss besonders darauf geachtet werden, keine Kräfte einzuleiten. Ein geeignetes Verfahren wird im Kapitel 5.3.3 „Aufbautechniken, Verbindungstechniken“ beschrieben.

Das Pick-up der Kristalle bedarf spezieller Saugnadeln. Auch die folgende Montagetechnik muss auf einem dauerelastischen Kleber aufbauen mit minimalen Verspannungen.

Strömungssensor basierend auf Anemometer-Prinzip: Bei diesem Messprinzip wird neben einem Heizer in und entgegen der Strömungsrichtung jeweils ein Temperatursensor platziert. Mit steigender Strömung werden die gemessenen Temperaturunterschiede zwischen diesen beiden Temperatursensoren immer größer. In

Abbildung 5.9 wird demonstriert, welche Miniaturisierung dadurch erreichbar ist. Bei der Realisierung musste nicht nur darauf geachtet werden, dass das Medium einfach an dem Sensor vorbeigeführt wird, sondern es musste durch die Formgebung des Messkanals auch gewährleistet werden, dass sich eine laminare Strömung über den ganzen Messbereich ausbildet. Turbulenzen würden eine Messung stark verfälschen. Weiterhin müssen gegebenenfalls Vorkehrungen getroffen werden, die eine Verschmutzung der Oberfläche durch Ablagerungen und Partikel verhindern.

Abb. 5.9: Strömungssensor



Quelle: 2E Mechatronic

Rechts in Abbildung 5.9 ist ein Aufbau in konventioneller Technik dargestellt. Links ein neues Modul. Die Deckplatte mit dem Gaseinlass und Auslassstutzen ist abgenommen, um einen Blick auf das eigentliche Messmodul zu ermöglichen. Hervorzuheben ist die MID-Technik, die im nächsten Kapitel behandelt wird, bei der das Gehäuse neben der Chipmontage Formgebungselemente hat, die eine geplante Anwendung einfach und kostengünstig ermöglichen.

Viskositätssensor (Messung der Dämpfung einer schwingenden Zunge): Bei diesem Messprinzip wird eine freitragende Zunge durch eine elektrische Anregung in Schwingung versetzt. Abhängig von der Viskosität des umgebenden Mediums wird die Resonanzfrequenz verschoben und auch die Dämpfung verändert. Daraus lässt sich direkt die Viskosität des Mediums ermitteln. Das Gehäuse muss so gestaltet werden, dass das Medium ungehindert die schwingenden Zungen umspült. Im Grundsatz ist dieses Verfahren sowohl für gasförmige als auch für flüssige Medien geeignet. In der Veröffentlichung von Martin Kucera et al.: „Design-Dependent Performance of Self-actuated and Self-sensing Piezoelectric-AlN Cantilevers in Liquid Media Oscillating in the Fundamental in-plane Bending Mode“, September 2014, ist ein solcher Sensor beschrieben. Das Sensorelement, ein 9 x

9 mm² großer Chip, wurde in ein konventionelles 24-Pin-Dual-In-Line-Gehäuse montiert. Insofern bestehen noch weitere Möglichkeiten einer Miniaturisierung.

Drehratensensor: Diese Sensoren werden vielfach in Automobilen eingesetzt, um die Bewegungsdynamik der Fahrzeuge zu messen und durch Eingriffe zu stabilisieren.

Abb. 5.10a/b: Schematische Skizze eines Drehratensensors
a. Schema, b. Chipfoto



Quelle: Fraunhofer-Institut ISIT

Ein zu Schwingungen angeregtes Kammsystem, siehe Abbildung 5.10, wird proportional zur applizierten Drehrate beeinflusst. Zur Funktion ist es notwendig, dass die Messkammer zwar einen sehr geringen Druck hat, jedoch kein zu niedriges Vakuum aufweist, denn das Füllgas bedämpft wohl dosiert die Schwingungen. Ohne diese Dämpfung käme es zum Überschwingen der angeregten Masse. Wird die Dämpfung durch einen zu hohen Restdruck zu stark, sinkt die Messempfindlichkeit ab. Das bedeutet für die hermetische Montage eine große Herausforderung, denn ein geringfügiges Eindiffundieren von Fremdgas hat einen Funktionsverlust zur Folge. Im Kapitel 5.3.4 über die Reliability wird dargestellt, wie mit sorgfältigen Maßnahmen die Konstanz des Restdrucks über eine lange Lebensdauer sichergestellt werden kann.

5.3.2 Spezielle Funktionen und Ankopplung an die Umwelt

Neben der Ankopplung der Medien und der elektrischen Kontaktierung übernimmt die AVT auch zusätzliche Aufgaben.

Dazu gehört die Ausbildung einer speziellen mechanischen Form oder Ausprägung der Oberflächen, die durch eine kostengünstige Verwendung in einer gegebenen Applikation notwendig wird:

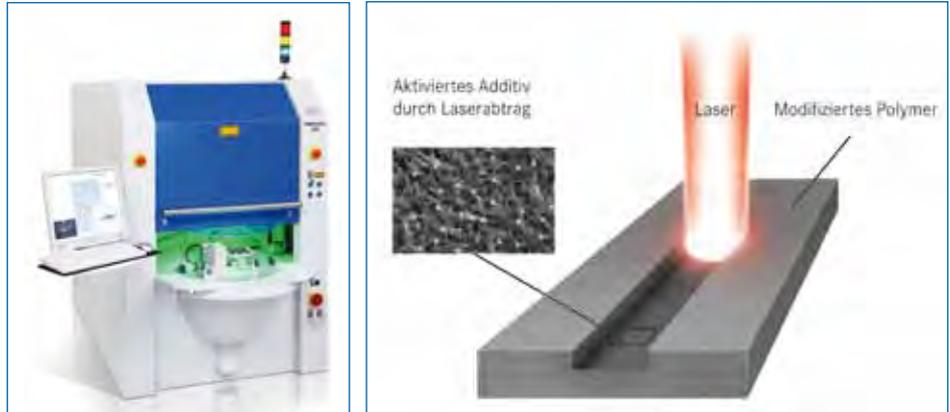
- Moulded Interconnect Devices
- 3D-Inkjet-Druck
- Flexible Träger und Montagetechniken
- Kontaktlose Datenübertragung und Energieversorgung
- Ankopplung elektrischer Signale an biologische Gewebe
- Biokompatibilität des Gehäuses und des Materials (auch um eine Verkapselung durch Gewebe zu vermeiden)

5.3.2.1 Moulded Interconnect Devices (MID)

Diese Technik erlaubt eine weitgehend frei gestaltbare Gehäuseform, die bereits die notwendigen elektrischen Verbindungen enthält. Es gibt zwei grundsätzliche Verfahren. Das erste Verfahren erstellt in einem komplexen Spritzgusswerkzeug den Bauteilträger aus zwei verschiedenen Materialien. Das heißt, eine Komponente kann in einem Nachfolgeprozess metallisiert werden und die zweite Komponente bleibt ohne Metallisierung.

In einem abgewandelten Verfahren wird nur ein Material verspritzt, dieses jedoch in einem zweiten Schritt durch selektive Bestrahlung durch einen Laser aktiviert, das heißt so umgewandelt, dass eine teilweise Metallisierung der Oberfläche möglich wird (LDS = Laser Direkt Strukturierung). Dabei wird das Leiterbahnlayout geschrieben (siehe Abb. 5.11 auf der rechten Seite). Beim Abfahren des gewünschten Layouts wird die Oberfläche des Kunststoffkörpers aufgeraut und die Metallatome werden freigelegt. Während des anschließenden Metallisierungsprozesses, der stromlos ist, bilden sich dann geschlossene Leiterbahnstrukturen.

Abb. 5.11: Typische Produktionsanlage eines LDS-Lasers und Funktionsskizze



Quelle: LPKF

Abbildung 5.12 zeigt einige Beispiele, die mit einer LDS-Laser-Produktionsanlage hergestellt wurden. Links im Bild zu sehen ist ein MID-basiertes LED-Leuchtelement, das in der Dentaltechnik zum Einsatz kommt. Das mittlere Element ist ein thermischer Strömungssensor für Luft, der in der Klimatechnik bei Volumenstromreglern zum Einsatz kommt und im vorigen Absatz schon beschrieben wurde. Das rechte Teil ist ein MID-Demonstrator, der beispielhaft die Möglichkeiten und Vorteile der MID-Technologie aufzeigt:

- Direktes Aufbringen feiner Leiterbahnstrukturen (hier 150 μm) auf ein Kunststoffspritzteil
- Miniaturisierung
- 3D-Fähigkeit
- Integration mechanischer sowie elektrischer Funktionen wie Steckverbinder und Batterieclips

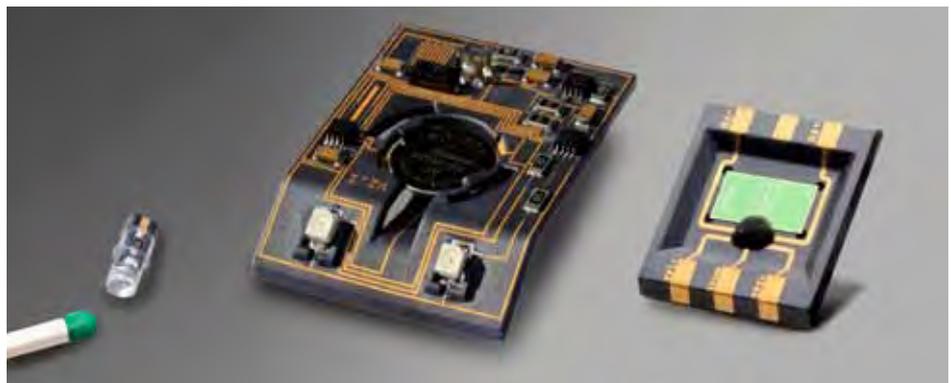
In Abbildung 5.13 ist ein MID-Beispiel gezeigt, bei dem die Technik erst eine sinnvolle Funktion ermöglicht. Es handelt sich um einen dreidimensionalen Magnetfeldsensor mit magnetoresistiven Schichten. Um alle drei Koordinaten abzutasten, müssen zwei Sensorelemente um jeweils 90 Grad gedreht werden und außerdem ein drittes Sensorelement (ganz rechts) aus der Ebene herausgekippt montiert werden.

Abb. 5.13: Dreidimensionaler Magnetfeldsensor in MID-Technik



Quelle: GMM/ZVEI

Abb. 5.12: Beispiele von Bauelementträgern, die mit MID-Technik hergestellt werden können

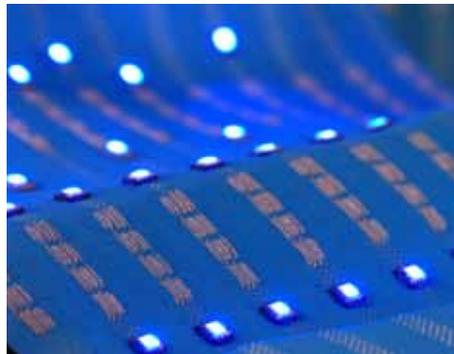


Quelle: 2E Mechatronik

5.3.2.2 Flexible Träger und Montagetechniken

In immer mehr Applikationen wird eine flexible Aufbautechnik benötigt. Als Beispiele seien hier alle Applikationen, die in Wearables integriert werden, genannt, sei es zu sportlichen Zwecken oder auch zur Gesundheitsüberwachung. Diese Sensoren müssen sich den beweglichen Formen des Trägers anpassen. Im medizinischen Bereich kommt oft die Forderung hinzu, dass diese Elemente auch sterilisierbar sein müssen. Ebenso müssen auch Entsorgungsaspekte berücksichtigt werden (kompostierbare Elektronik). Als Beispiel ist in Abbildung 5.14 eine frei verformbare Anordnung aus LEDs gezeigt.

Abb. 5.14: Freiformbares System mit LEDs



Quelle: Fraunhofer-Institut IZM

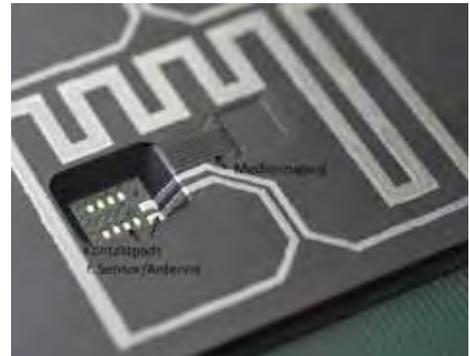
5.3.2.3 3D-Inkjet-Druck

Für kleinere Serien, welche die hohen Investitionen nicht amortisieren würden, bietet sich in Zukunft der 3D-Druck an. Hierfür müssen aber noch erhebliche Untersuchungen gemacht werden, um passende Inkjet-Materialien (Tinten) zu definieren:

- Isolierende Klebstoffe
- Leitfähige Kunststoffe
- Hochtemperaturbeständigkeit
- Materialien für MID-Prototypen (laserstrukturierbar)
- Biokompatible Kunststoffe

Ein Beispiel für den Einsatz der Ink-Jet-Technologie mit Inkjet-Silbertinten (ANP Silverjet DGP 40LT-15C bzw. PV Nanocell IC 30 EG-1) wurde im BMBF-Verbundprojekt im Rahmen des Spitzenclusters der Partner: Bosch, IMS Chips, Micropelt, Würth Elektronik, Binder Elektronik realisiert. Es wurden Antennenstrukturen direkt strukturiert auf ein isolierendes Trägermaterial aufgebracht (Abb. 5.15).

Abb. 5.15: Aufbau hochintegrierter Sensorsysteme mittels Inkjet-Druck und Film Assisted Molding



Quelle: Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung

5.3.2.4 Kontaktlose Daten- und Energieversorgung

Für viele Anwendungen sind funktional schon die elektrischen Verbindungen für die Signalübertragung und Energieversorgung störend oder nicht möglich und können durch die AVT nicht realisiert werden. Für die kontaktlose Datenübertragung gibt es viele Möglichkeiten. Eine der bekanntesten ist Bluetooth, das in sehr vielen Anwendungen realisiert wird. Dafür muss in das Package eine Antennenanordnung integriert werden, zum Beispiel mit dem oben beschriebenen Verfahren.

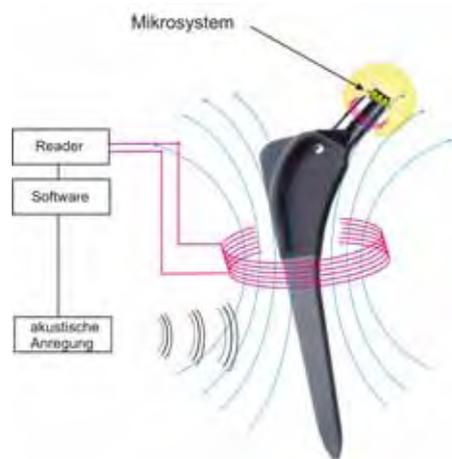
Für eine autarke Stromversorgung kann ein Energy-Harvesting integriert werden. Dabei werden äußere Stimulationen, wie zum Beispiel Vibrationen, über eine seismische Masse in eine Relativbewegung umgewandelt. Diese Bewegung kann durch piezoelektrische Elemente in elektrische Energie umgeformt werden. Es können aber auch Temperaturunterschiede und elektrische Felder genutzt werden. Oft ist dann aber ein integrierter Energiespeicher notwendig, um eine Funktion auch ohne externe Anregung zu gewährleisten. Zwingend ist die Verwendung von Elementen mit geringem Energiebedarf – sogenannte Low-Power-ASICS und bei Magnetsensoren hochohmige TMR-Brücken (TMR = Tunnelling Magnetic Resistivity) – anstelle einfacher AMR-Messbrücken (Anisotropic Magnet Resistivity).

Oft ist es auch möglich, im Stand-by einen Teil des Systems zu deaktivieren und nur zu aktivieren, wenn eine Wake-up-Funktion einen Start verlangt (z. B. Fahrradcomputer, Autoschlüssel). Auch ein intermittierender Betrieb senkt den Energiebedarf erheblich, zum Beispiel bei MOX-Gassensoren.

Eine andere Möglichkeit bietet sich an, wenn die Sensorelemente nur zeitweise in Funktion sein müssen, wie bei den viel verwendeten NFC-Chips (Near Field Communication), die sehr häufig zur Produktidentifikation eingesetzt werden. In der AVT-Technik muss dann sinnvoll eine hinreichend große Antenne integriert werden. Langfristig wird es auch möglich sein, in diese Bauelemente (passive) Sensoren zu integrieren, um zum Beispiel die Unterbrechung einer Tiefkühlkette zu überwachen.

Eine medizinische Applikation (Abb. 5.16) nutzt drahtlose Datenkommunikation und Energieeinspeisung, um Hüftimplantate zu überwachen.

Abb. 5.16: Intelligentes Hüftimplantat



Quelle: Fraunhofer-Institut IPMS

Nach einer mechanischen Stimulation wird die Reaktion auf die Impulsanregung durch Beschleunigungssensoren ausgemessen. Daraus kann sicher ermittelt werden, ob die Verankerung des Implantats im Knochengewebe noch stabil ist. Durch diese sichere Methode kann entschieden werden, ob eine Nachoperation notwendig ist. Durch Vermeidung von Operationen, die eigentlich nicht notwendig gewesen wären, können hohe Kosten und vermeidbare Belastungen des Patienten vermieden werden.

5.3.2.5 Ankopplung elektrischer Signale an biologische Gewebe

Werden bei vielen Applikationen galvanische elektrische Verbindungen hinreichend sein, so kommt im biomedizinischen Bereich die Notwendigkeit hinzu, Signale aus menschlichem Gewebe aufzunehmen und auch zu stimulieren. Hier wird sehr intensive Forschung durchgeführt und auch notwendig, um von der AVT-Technik optimale Oberflächen herzustellen.

Als Anwendungsbereiche kommen infrage:

- Gehörimplantate
- Herzschrittmacher und Herzüberwachung
- Prothesensteuerung
- Retinaimplantate
- Gehirnimplantate
- Glukoseregulation
- Viele andere Anwendungen

Naturgemäß ist in diesem Anwendungsbereich die Zeit zur Einführung lang, aber es wird in Zukunft hier noch ganz wesentliche Fortschritte geben.

5.3.3 Aufbautechniken, Verbindungstechniken

In der AVT-Technik kann man deutliche Trends formulieren:

- SiP (System in Package) und SoC (System on Chip)
- Multisensoren
- Embedding
- Stacking und Bumping
- Stressfreie Montage
- Miniaturisierung

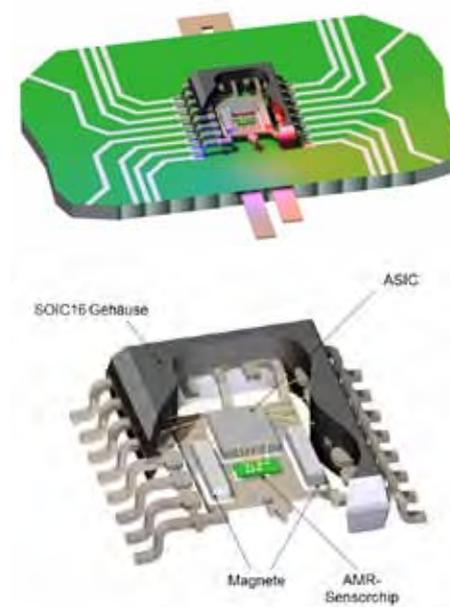
5.3.3.1 SiP (System in Package) und SoC (System on Chip)

Mit System in Package meint man die Integration von mehreren Chips oder Funktionen in ein Gehäuse. Die Einbeziehung der Datenverarbeitung (inklusive eventueller Kalibrierdaten) ist heute schon der Standard. Man spricht dann oft von Smart Sensors, da die Anwendung und Ankopplung erheblich vereinfacht wird.

Als Beispiel kann hier ein Stromsensor genannt werden, der neben dem eigentlichen Sensor (AMR) auch noch Magnete (Stützfeld) und einen Auswerte-ASIC enthält. Die eigentliche Stromschleife ist in einem Second-Level-Packaging realisiert, in Abbildung 5.17 als PCB (Printed Circuit Board) dargestellt.

In Zukunft lassen sich voraussichtlich immer mehr Funktionen auf dem Chip integrieren (SoC), aber mit steigender Funktionalität werden neue Anforderungen auf die AVT-Technik zukommen, die sich nur durch SiP-Technologie erfüllen lassen.

Abb. 5.17a/b: Stromsensor mit integrierten Stützmagneten und Auswerte-ASIC



Quelle: Sensitec

Als Sonderform des SoC muss auch ein Wafer-Level-Packaging bezeichnet werden. Dabei werden zum Beispiel optische und hermetische Verkapselung schon auf dem Wafer durchgeführt.

5.3.3.2 Multisensoren

Um wertvollen Platz und auch Kosten zu sparen, werden auch mehrere Sensoren in einem Gehäuse integriert. Man spricht dann oft von Combo-Sensoren. Als Beispiel darf hier ein Sensor von Bosch genannt werden, der drei Achsen sowohl der Beschleunigung als auch der Drehraten misst. Der Sensor basiert auf Erfahrungen der Consumer wie auch der Automobiltechnik. Dies ist ein Beispiel eines vielfältig programmierbaren Elements mit weitreichenden Anwendungsmöglichkeiten.

Abb. 5.18: Kombi-Intertialsensor SMI130 von Bosch für Automobil-Anwendungen, der sowohl die Beschleunigungen in allen drei räumlichen Dimensionen als auch die Drehraten um alle drei Raumachsen misst



Quelle: Robert Bosch

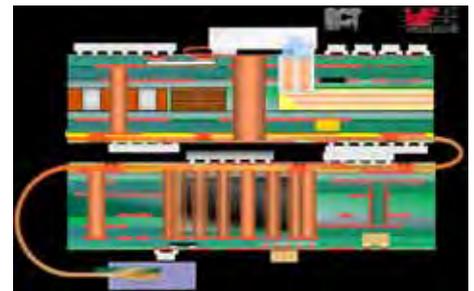
In einem noch kleineren Bauelement eines weiteren Herstellers mit den Maßen $1 \times 3 \times 3.5 \text{ mm}^3$ konnten sogar drei Magnetfeldsensoren zusätzlich integriert werden. Auch ein Ausgang zur Temperaturmessung ist vorgesehen.

Weit verbreitet ist auch die Kombination aus drei Magnetsensoren für das magnetische Erdfeld mit drei Beschleunigungssensoren zur Bestimmung der Richtung der Erdgravitation. Nur wenn beides dreidimensional bestimmt ist, lässt sich die magnetische Nordrichtung ermitteln.

5.3.3.3 Embedding

Für viele Applikationen wird heute schon ein Packaging verwendet, bei dem dreidimensional die Elemente in eine PCB oder in Zukunft auch in eine LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic) eingebettet werden.

Abb. 5.19: Möglichkeiten einer Embedding-Technologie



Quelle: Würth Elektronik

Mit dieser Technologie lässt sich viel Raum sparen und es ergeben sich wesentlich neue Möglichkeiten einer Verknüpfung von Bauelementen.

5.3.3.4 Stacking und Bumping

Als Stacking bezeichnet man die Montagetechnik, bei der mehrere Chips, zum Teil durch sogenannte Interposer getrennt, aufeinander montiert werden. Um komplizierte Bondtechniken zu vermeiden, wird die Kontaktierung durch galvanische Verbindungen durch die Silizium-Chips ermöglicht (TSV = Through Silicon Vias). Auch diese Technik ist schon weitgehend in Anwendung, wird aber in Zukunft noch mehr Bedeutung gewinnen. Auch wird die Verbindungstechnik immer mehr auf Bumping umgestellt, um Platz zu sparen. Dabei geht es nicht nur um die Montage von fertigen Gehäusen auf eine Printplatte, sondern auch um die Verbindung verschiedener Chips aufeinander durch sogenannte Mikro-Bumps.

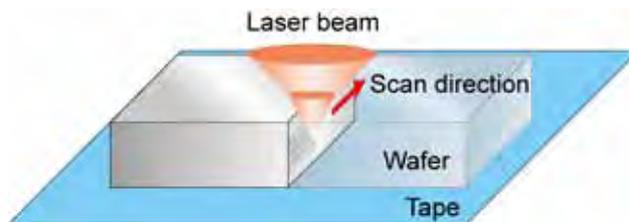
5.3.3.5 Stressfreie Montage

Wie schon in den vorherigen Abschnitten angedeutet, gewinnt die Montage mit möglichst geringer mechanischer Beanspruchung immer

mehr an Bedeutung. Man muss dabei unterscheiden zwischen einer einmaligen Belastung während der Montage und einer Chipfixierung, die auf Dauer elastisch bleibt.

Die mechanische Belastung ist schon bei der klassischen Vereinzelnung einer fertig prozessierten Scheibe durch Sägen der einzelnen Sensorchips häufig zu groß, da die MST-Systeme oft sehr fragil sind. Hier kann durch den Einsatz eines sogenannten „Stealth Dicing“ die mechanische Belastung entscheidend reduziert werden. Bei diesem Verfahren wird ein Laserstrahl so fokussiert, dass der Fokus innerhalb der Siliziumscheibe liegt. Dadurch wird eine punktuelle Zerstörung der Kristallstruktur erreicht. Durch eine mäanderförmige Bewegung wird in einer ganzen Trennschicht die kristalline Struktur gezielt zerstört (amorphisiert) und die Chips können fast kraftfrei vereinzelt werden.

Abb. 5.20: Prinzipskizze der Laserbestrahlung beim Stealth-Laser-Dicing

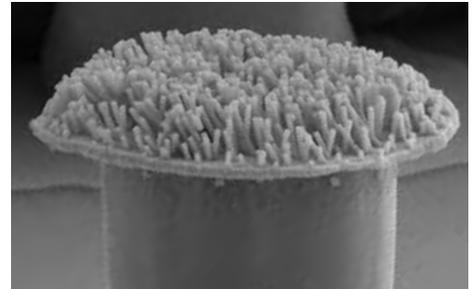


Quelle: Hamamatsu Photonics

Neben einer grundsätzlichen Notwendigkeit wegen der hohen Fragilität der Chips ist eine Dauerelastizität für eine lange Lebensdauer hilfreich, da thermische Ausdehnungen abgefangen werden. Weil im Allgemeinen eine gute Wärmeableitung nicht gefordert ist, bieten sich Klebertechniken an.

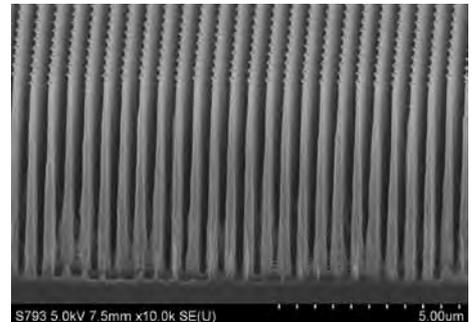
Es könnten aber auch Techniken zum Einsatz kommen, bei der die Oberflächen des Siliziums stark strukturiert oder beschichtet werden (sogenanntes Si-Gras oder schwarzes Silizium). Bei einem fast druckfreien Kontakt wird ohne Temperaturbelastung eine feste Verbindung hergestellt.

Abb. 5.21: Aufbringen einer grasartigen Oberfläche durch Verwendung von Fremdmaterial, die kraftfrei für eine dauerhafte Verbindung verwendet werden kann



Quelle: Nanowired

Abb. 5.22: Strukturätzen einer Silizium-Oberfläche



Quelle: Technische Universität Ilmenau

5.3.3.6 Miniaturisierung

Die Möglichkeiten einer Miniaturisierung sind durch die MST stark angewachsen. In einer Publikation (D. Ernst und T. Zerna; Ultradünne Magnetfeldsensoren mit Silizium- und Polyimidinterposern; Elektronische Baugruppen und Leiterplatten; EBL 2018 9. DVS/GMM-Fachtagung, veröffentlicht in DVS-Berichte Band 340) wird zum Beispiel eine Technik beschrieben, um Magnetsensoren mit einer Gesamtdicke von $<100 \mu$ herzustellen. Dies ist wegen der angestrebten Integration in magnetische Lager sehr vorteilhaft. Je kleiner der Spalt gemacht wird, desto besser wird seine Funktion.

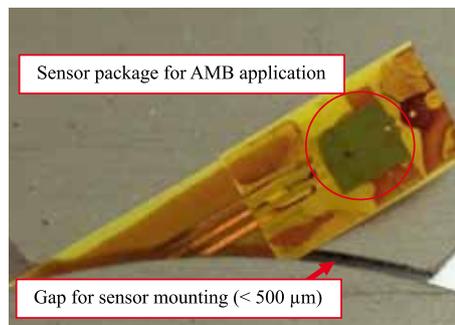
Durch die geringe Gesamtdicke kann der Luftspalt zwischen Stator und Rotor weiter verkleinert werden. Je geringer dieser Spalt ist, desto höher ist die Steifigkeit des Lagers selbst und desto schneller ist die Reaktionsgeschwindigkeit der Lageregelung.

Tab. 5.3: Belastungs- und Ausfallarten und ihre Modelle (nach: S. Kraft [II.8.]

Belastungs- bzw. Ausfallarten	Modelle
Materialermüdung	Coffin-Manson model, Rudra model
Chemische Reaktion unter Temperaturbelastung	Arrhenius
Kombinierte Belastungsarten	Eyring models
Elektromigration	Black's model
Korrosion	Peck's model, Lawson (RH2) model, Reziprokes Exponentialmodell, Exponentialmodell
Kriechen	Weertman's model
Schädigung durch akkumulierte Ermüdung	Miner's rule

Quelle: GMM/ZVEI

Abb. 5.23: Statorpol eines aktiven Magnetlagers (AMB) mit einem integrierten Hallensensor



Quelle: Technische Universität Dresden

5.3.4 Reliability, Ausfallraten, Condition Monitoring

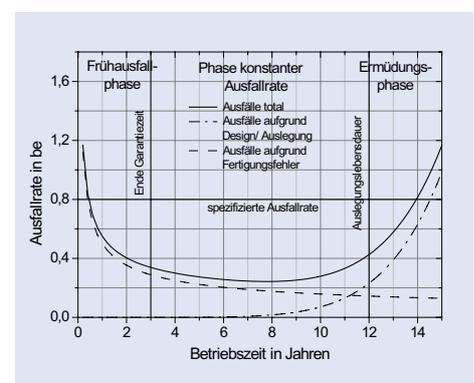
Die Notwendigkeit einer hohen Lebensdauer ist ein ganz wesentliches Element für die Entwicklung von MST-Systemen. Oft übersteigt die geforderte Lebensdauer den Zeitrahmen eines Innovationszyklus. Da immer neue Technologien angestrebt werden, kann man durch zeitraffende Tests bei hoher Last-Beaufschlagung nur eingeschränkt Schlüsse auf die Lebensdauer ziehen. Es gibt für viele Bereiche Modelle, die Alterung nachbilden.

Ein Beispiel einer genaueren, theoretischen Analyse eines Ausfallmechanismus kann genannt werden: R. Schaller, V. Strutz, H. Theuss, R. Dudek, S. Rzepka, Lifetime modeling based on anodic oxidation failure for packages with internal galvanic isolation; 18th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE); Dresden 2017; IEEE Xplore INSPEC Accession Number: 16881497; DOI: 10.1109/EuroSimE.2017.7926272.

Eine solche Untersuchung muss für ein Element für viele Ausfallmechanismen durchgeführt werden. Dafür wäre es sinnvoll, wenn die Schnittstellen der Datenkommunikation standardisiert wären, um den Entwicklern eine schnelle Möglichkeit zu geben, verschiedene Modelle gleichzeitig anzuwenden.

Neben der Vorhersage, der endgültigen Ermüdung und der stark anwachsenden Ausfallrate ist es aber ebenso wichtig, die Frühausfälle und spontanen Ausfälle während der üblichen Lebensdauer zu minimieren, sozusagen am Boden der Badewannenkurve (Abb. 5.24). Leider sind dafür heute nur eingeschränkt Modelle und Theorien verfügbar. Hier wäre eine intensive Forschung von großer Bedeutung.

Abb. 5.24: Schematische Darstellung der Ausfallrate von Bauelementen über der Zeit („Badewannenkurve“, Weibull-Modell)

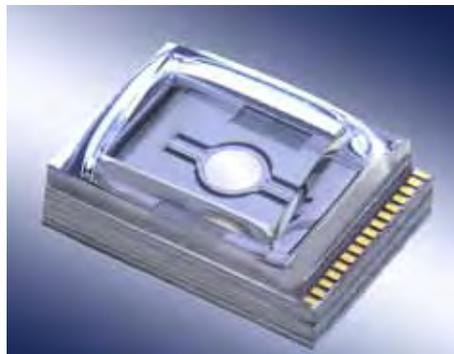


Quelle: GMM/ZVEI

Auch durch sehr geschickte Tests können Langzeitfehler reduziert werden. Zur Sicherstellung eines geringen, aber wohldefinierten Drucks in der Kammer eines eigentlich hermetisch verpackten Sensors wird dieser während des Tests des

Bauelementes mit Neon umspült. Durch Ausmessung der Anregungsantwort des mechanischen Elements kann die sehr geringe Leckrate für Neon bestimmt und auf eine Leckrate für Luft umgerechnet werden. Daraus ergibt sich die zu erwartende Lebensdauer des Einzelements (F. Lofink, D. Kähler, W. Reinert; Hermeticity Tests; Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies, Chapter 40; ELSEVIER, 2015; ISBN 978-0-323-29965-7).

Abb. 5.25: Gehäuse eines Mikrospiegels für Laserprojektionen. Foto eines hermetisch verkapselten optischen Elements, das einen geringen, aber definierten Innendruck haben muss



Quelle: Fraunhofer-Institut ISIT

5.3.5 Selbsttestende Bauelemente und Systeme mit Redundanz

Da heute noch nicht alle Ausfälle und das individuelle Ausfallverhalten vorhersagbar sind, sind Selbsttests der Bauelemente von großer Bedeutung, um eventuelle Folgeschäden zu vermeiden.

Es werden leistungsfähigere Prozessorfamilien integriert, die komplexe Algorithmen für einen Selbsttest ermöglichen. Auch Sensoren und Aktoren für ein Feedback oder ersatzweise eine Stimulation werden zunehmend möglich:

- Selbsttestende Systeme (BIST = Built In Self Test)
- Selbstkorrigierende Systeme
- Redundante Systeme

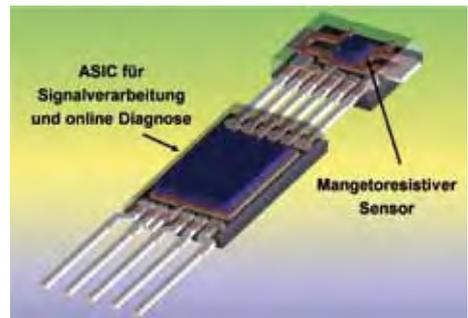
Dabei ist die Realisierung eines verlässlichen Selbsttestes die grundlegende Voraussetzung für eine Korrektur als auch für die Aktivierung einer Redundanz. Je nach den konzipierten Möglichkeiten eines Systems kann es bei Analyse einer Fehlfunktion verschiedene Reaktionen geben, zum Beispiel:

- Anzeige einer Fehlfunktion
- Abschaltung von ganzen Geräten/Maschinen
- Umschaltung auf ein Minimal-/Notbetrieb bei Vorliegen eines Fehlers

- Selbstkorrektur (häufig wird eine automatische Neukalibrierung eines Offsets möglich sein)
- Aktivierung einer Redundanz

Ein gutes Beispiel einer schon existierenden Komponente mit Selbsttest zeigt die Abbildung 5.26.

Abb. 5.26: Magneto-resistiver Magnetfeldsensor mit Selbstdiagnose



Quelle: GMM/ZVEI

Dieses Bauteil testet:

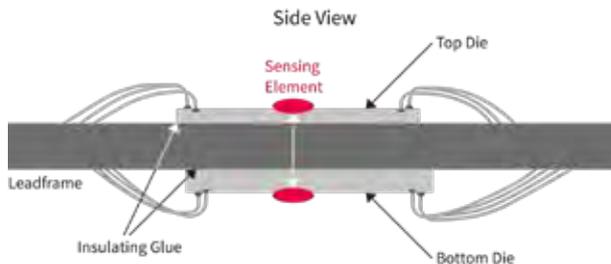
- Lose Bondverbindung am Sensorchip oder an der Eingangsstufe des Signals, Konditionierungselektronik
- Kurzschluss von Messleitungen gegeneinander oder gegen Versorgungsspannung oder Masse
- Gebrochenen Sensorversorgungsanschluss
- Gebrochene Sensor-Masseverbindung
- Ausfall einer oder beider Wheatstone Brücken
- Ausfall einer oder beider Vorverstärker-Eingangsstufen
- Ausfall eines oder beider ADCs in der Eingangsstufe
- Fehler in der Recheneinheit bei der Berechnung von CORDIC

Bei der Verbesserung der Betriebssicherheit durch Redundanz müssen sinnvolle Entscheidungskriterien definiert werden. Sind beide Sensorwerte im Prinzip plausibel, so ist es in manchen Applikationen möglich, stets den Sensorwert zu verwenden, der eine kritischere Situation abbildet. Sind beide Sensoren in der gleichen Technologie hergestellt, so ist ein Totalausfall durchaus in kurzer Zeit möglich, denn beide Sensoren haben die gleiche Belastung erlebt.

Um Totalausfälle zu vermeiden, werden in einigen Sensoren zum Beispiel zur Magnetfeldmessung zwei verschiedene Technologien in ein Gehäuse montiert, nämlich ein TMR, kombiniert mit einem AMR-Magnetsensor. Die beiden Sensoren sind elektrisch völlig entkoppelt, auch bezüglich der Spannungsversorgung und der Ground-Anschlüsse. Die Chips sind auf zwei

gegenüberliegende Seiten eines Lead-Frames montiert, da funktional die Sensoren axial ausgerichtet sein müssen.

Abb. 5.27: Schematischer Querschnitt durch ein Sensorsystem mit zwei völlig entkoppelten Sensoren unterschiedlicher Technologie



Quelle: Infineon Technologies

Abb. 5.28: Transparente Darstellung eines Doppelsensors mit zwei entkoppelten Einzelsensoren



Quelle: Infineon Technologies

Da man davon ausgehen kann, dass sich die Ausfallmechanismen stark unterscheiden, hat man damit auch eine technologische Redundanz (dissimilarity redundancy) mitintegriert. Diese kann genutzt werden, um das Auftreten eines spontanen Ausfalls früh zu erkennen.

Eine andere Methode, die untersucht wird, ist die bewusste Integration eines besonders empfindlichen Elements in das Gehäuse. Man kann dafür ein Element mit größeren Längen wählen, das thermisch stärker arbeitet und größere mechanische Spannungen induziert. Fällt dieses Element (Kanarienvogel) aus, so ist ein präventives Auswechseln des Sensors notwendig (Quelle: Fraunhofer-Institut IZM).

Denkbar sind auch andere Prüfelemente im Gehäuse für Feuchteintritt oder Chips zur Überwachung der mechanischen Spannungen (BMBF-Verbundvorhaben „Entwicklung eines integrierten Stressmesssystems zur Quantifizierung der 3D-Verformung von Sensorbauelementen in Abhängigkeit des Verpackungsprozesses“; VDE/VDI-Reihe Innovation in der Mikrosystemtechnik; BMBF Bibliothek Bonn oder auch Dr. Thomas Schreier-Alt und Dr. Frank Ansorge; Fraunhofer-IZM Oberpfaffenhofen; „Stressmessung auf Chip-Ebene – ein Fahrtenschreiber für die Elektronikverarbeitung“; PLUS Juni 2013; pp. 1295 bis 1304).

5.3.6 Zusammenfassung

Das Thema der Aufbau- und Verbindungstechnik für Mikrosystem-Bauelemente ist sehr komplex und diversifiziert. Deshalb konnten in dieser Abhandlung nur einige wenige Aspekte behandelt werden.

Aber es zeichnen sich doch einige Trends und Ziele ab:

- Miniaturisierung (auch Stacking und Embedding)
- Steigende Komplexität (Mehrfachsensoren)
- Easy to use (Smart Devices, voll kalibriert)
- Kostenersparnis
- Steigende Anforderungen an die Betriebslebensdauer und Ausfallraten
- Verbesserung der Softwaretools für Simulationen
- Kleinster Energiebedarf (u. a. zum Betrieb mit Energy Harvesting)
- Flexible Verbindungstechnik
- Neuronale Ankopplung
- Drahtlose Datenkommunikation
- Gehäuse für platzsparende Montage auf Leiterplatten (SMD)

5.4 Anwendungstrends

5.4.1 Multi-Sensor-Systeme

Zunehmend werden mehrere Einzelsensoren zu Multi-Sensor-Systemen zusammengefasst. Als eine der ersten Varianten erschienen am Markt sogenannte Inertia-Measurement-Units (IMU), die mehrere Intertial-Sensoren(-Elemente) wie Beschleunigungs- und Gierratensensoren für verschiedene Orientierungen im Raum (diese werden auch Achsen genannt) zu einer Einheit integrieren. Dabei werden die translatorischen und rotatorischen Bewegungen entlang der senkrecht aufeinanderstehenden Hauptachsen erfasst. Die IMU besteht dabei aus monolithisch integrierten wie auch diskreten Sensorelementen und einer Sensorsignal-Auswerteeinheit, die die gemessenen Werte der Einzelsensoren gemeinsam auswertet. Hinzu kommt noch eine Kommunikationseinheit.

In einem weiteren Schritt wurden dann Magnetometer hinzugefügt. Entsprechend der Anzahl der zu messenden Achsen (x, y, z) wie auch der Anzahl der verschiedenen Messgrößen (Beschleunigung, Gierrate, Magnetfeld), die dabei zu einer Einheit zusammengefasst werden, spricht man von einem x Degree of Freedom Device.

Eingesetzt werden solche Systeme im Bereich der Avionik, der Robotik, im Automobil, aber auch bei Smartphones und Fitnessarmbändern.

Denkt man an die Landwirtschaft, werden künftig Systeme genutzt, die Boden- und Luftfeuchte wie auch Temperatur messen und damit als Schwarmintelligenz (Smart Grain) dazu beitragen, den Zustand einer landwirtschaftlichen Nutzfläche bestimmen zu können. Dies kann dann auch sehr kleinteilig erfolgen.

Neben Multi-Sensor-Systemen, die örtlich integriert sind, sind auch virtuelle Multi-Sensor-Systeme denkbar. Hierbei ist nicht die örtliche Integration, sondern die logische Integration das Maßgebliche. Beispiele hierfür sind sogenannte Domain-Controller im Automobil oder auch Systeme, bei den sich die Auswerteeinheit in der Cloud befindet. Hierbei sind neben den eigentlichen Sensoreigenschaften auch die Kommunikationsschnittstelle mit ausreichender Bandbreite und auch Sicherheitsaspekte (Datenintegrität und Authentizität) von großer Bedeutung und müssen entsprechend im Sensor Berücksichtigung finden.

5.4.2 Umweltsensoren

Neben Temperatur, Feuchte und Druck sind bei Umweltsensoren auch die Analyse der chemischen Zusammensetzung von Luft, Abwasser oder Ähnlichem von hoher Wichtigkeit. Hierbei sind Sensorelemente für die drei erstgenannten Größen seit Langem bekannt.

Daneben finden seit vielen Jahren Gassensoren Einsatz in ganz unterschiedlichen Anwendungen, oft als makroskopische, spezialisierte Systeme in eher geringeren Stückzahlen, wie zum Beispiel für zahlreiche Gase in industriellen Anwendungen oder in der Emissionsüberwachung. Viele Anwendungen gehen auf regulatorische Vorgaben zurück und haben ein begrenztes Wachstumspotenzial. Klassische Beispiele dafür sind Überwachung von CO in Tiefgaragen und Parkhäusern, Dreifachsensoren mit elektrochemischer Zelle für CO für Brandmeldeanlagen oder Überwachung von CO₂ bei Schankanlagen.

Gassensoren für die Messung der CO₂-Konzentration als Luftgüteindikator sind seit vielen Jahren bekannt aus der Gebäudetechnik. Ursprünglich wurden diese nur eingesetzt in sehr großen Räumen wie Hörsälen oder Theatern zur Regelung des Luftaustauschs. Zusammen mit aktiven Lüftungssystemen finden die Sensoren mittlerweile auch weite Verbreitung im Wohngebäudebereich und werden von vielen Herstellern angeboten. Nahezu alle Sensoren basieren auf Infrarotabsorption bei einer oder zwei festen Wellenlängen (NDIR). Für eine optische Absorption wird ein ausreichend langer Lichtweg in der Größenordnung von mehreren Zentimetern benötigt. Das schränkt Miniaturisierungsmöglichkeiten für das Gesamtsystem stark ein.

Für Kraftfahrzeuge wurden ab den späten 90er-Jahren Gassensoren auf Metalloxidbasis mit MEMS-basierten Träger- und Heizerstrukturen entwickelt und nachfolgend von mehreren Firmen als System für die automatische Umluftklappensteuerung auf den Markt gebracht (z. B. MiCS/e2v, heute SGX-Sensortech/Amphenol und Sensata/AppliedSensor, heute ams). Basierend auf diesen Sensoren, wurden nun auch Systeme für die Luftqualitätsbeurteilung in Gebäudeinnerräumen entwickelt. Statt auf CO₂ reagieren diese auf Konzentrationsänderungen von volatile organic compounds, also gasförmigen organischen Komponenten, sowie auf einige weitere Gase, wie zum Beispiel CO, H₂, Methan, und errechnen daraus einen Wert für die Luftqualität, oft als CO₂-Äquivalentwert bezeichnet. Die breite Empfindlichkeit der Sensoren ermöglicht eine Detektion von ungleich mehr Ereignissen als mit einem CO₂-Sensor, zum Beispiel bei Einsatz in Küche, Badezimmer oder Toilette. Der Äquivalentwert wird mit vergleichsweise einfachen Algorithmen berechnet, im Gegensatz zu den infrarotbasierten CO₂-Sensoren lässt sich aber mit den metalloxidbasierten Sensoren keine absolute Konzentration bestimmen.

Die resistiven Metalloxidsensoren bieten ein hohes Potenzial für die Massenfertigung. Die weitere Entwicklung zielt daher auch seit einigen Jahren stark in Richtung Consumer-Elektronik. Hier sind einige Firmen aktiv, beispielsweise ams, Bosch Sensortec, Figaro, Sensirion. Es sind aber keine Produkte wie zum Beispiel Mobiltelefone mit Gassensoren in Großserie auf dem Markt. In deutlich kleineren Stückzahlen sind hingegen etliche Systeme für das Internet of Things realisiert, die auch Luftqualität messen können, prominente Beispiele kommen hier von Netatmo, Withings oder Foobot.

Nicht nur für Metalloxidsensoren, sondern auch für andere Gassensorprinzipien wurden Miniaturisierungsansätze beschritten. Hier sind zum Beispiel elektrochemische Zellen mit der Größe einer Knopfzelle zu nennen. Weitere Entwicklungen zielen auf Miniaturisierung optischer Gassensorkonzepte ab. So wurden die weltkleinsten NDIR-Gassensoren für CO₂ hergestellt. Darüber hinaus laufen am Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik Entwicklungen für einen miniaturisierten photoakustischen Sensor. Viele weitere Entwicklungen im Bereich Gassensorik finden sich im Bereich von Start-ups. Heterogene Gassensorarrays, UV-Licht regenerierbare oder Sensoren mit ultrakleinem Leistungsbedarf sind hier beispielhaft zu nennen.

Als weiteres Beispiel werden künftig Sensoren den Reifegrad von Obst und Gemüse bestimmen können. Damit lässt sich schnell sagen, ob Obst oder Gemüse noch genießbar oder bereits verdorben ist. Angedacht ist, solche Sensoren in Smartphones einzubauen.

Alkoholsensoren können dazu dienen, Menschen vom Autofahren abzuhalten, wenn sie zu viel Alkohol getrunken haben, indem das Fahrzeug dann erst gar nicht gestartet werden kann.

5.4.3 Optische Sensoren – Entfernungsmesser, Imager, Lidar

Der einfachste optische Sensor besteht aus einem Lichtsender (beispielsweise LED) und einem Empfänger (Fotodiode). Hiermit lassen sich Lichtschranken und Entfernungsmesser realisieren. Letztere messen hierfür die Laufzeit des Lichts zwischen der Quelle (LED) und dem reflektierenden Gegenstand.

Das prominenteste Beispiel für optische Sensoren ist in der Fotografie zu finden. Wurde bis in die 1990er-Jahre noch die analoge Fototechnik benutzt, so hat heute die Digitalfotografie diese gänzlich verdrängt. Die Ursprünge der Digitalfotografie gehen in 1970er-Jahre zurück. Als Sensor wurden zunächst sogenannte CCDs (Charge-coupled Devices) verwendet. Wenngleich sich CCD noch in der High-End-Fotografie bzw. im professionellen Kamerabereich finden, sind sie heutzutage in hochvolumigen Anwendungen durch Sensoren in CMOS-Technologie weitgehend abgelöst worden. Erst durch die im Vergleich zur CCD-Technik deutlich niedrigere Stromaufnahme und die Integrierbarkeit weiterer Funktionen war es möglich, die (CMOS-)Bildsensoren in Smartphones zu verwenden.

Allen Bildsensoren gemeinsam ist, dass die Bildinformation durch viele kleine lichtempfindliche Elemente, sogenannte Pixels, im Sensor abgebildet wird. Tausende oder auch Millionen von Pixeln ergeben dann das Bild. Die im Pixel vorhandene elektronische Bildinformation wird dann digitalisiert und anschließend mithilfe spezieller Mikroprozessoren nachbearbeitet, bevor das Bild digital gespeichert wird.

Entwicklungstrend ist dabei, die Pixelgröße kleiner und gleichzeitig lichtempfindlicher zu machen. Ein weiterer Trend besteht darin, ein 3D-Bild zu erhalten. Hierfür ist neben dem Kamerabild eine Tiefeninformation notwendig. Dies kann, wie beim Menschen, entweder mit zwei Bildsensoren und anschließender Triangulation oder aber mit sogenannten Time-of-Flight-Sensoren erreicht werden. Bei Letzterem

wird neben der eigentlichen Bildinformation für jedes Pixel die zugehörige Laufzeit des Lichts gemessen.

Für andere Spektralbereiche werden ebenfalls halbleiterbasierte Sensoren benutzt. Als Beispiel sei hier das Microbolometer zur Detektion von Licht im Infrarotbereich, beispielsweise für Wärmebildkameras, zu nennen.

In den Bereich der optischen Abstands- und Geschwindigkeitsmessung fallen LIDAR-Sensoren. LIDAR (Light Detection and Ranging) ist dem Radar (Radio Detection and Ranging) ähnlich, nutzt aber statt Radiowellen Laserlicht. Der erzeugte Laserstrahl wird mithilfe eines rotierenden Spiegels in verschiedene Richtungen gelenkt. Das vom Objekt reflektierte Signal wird dann mithilfe von Multi-Spektralkameras aufgenommen. So entsteht ein Abbild der Umgebung, das Informationen zu Abstand und Geschwindigkeit der Objekte in der Umgebung enthält. Heutzutage sind Lidar-Sensoren noch makroskopisch aufgebaut und entsprechend teuer. Um sie aber in Massenmärkten, wie beispielsweise dem Automobil im Bereich des automatisierten und autonomen Fahrens, breit einsetzen zu können, müssen sie erheblich miniaturisiert und gleichzeitig kostengünstiger werden. Um dies zu realisieren, werden verschiedene Wege beschritten. Neben optischen phased arrays und VCEL/SPAD arrays werden auch miniaturisierte Lidar-Sensoren mit MEMS-Spiegeln aufgebaut.

5.4.4 Medizin- und Biosensoren

Der Bereich der Medizin- und Biosensorik gliedert sich eine große Zahl unterschiedlicher Messprinzipien und Anwendungsbereiche. Hierbei gibt es seit Jahren etablierte Bereiche wie die invasive Blutdruckmessung, aber auch Bereiche mit intensiver Forschung.

Es werden dabei ganz unterschiedliche Sensoren eingesetzt, wobei folgende Kategorien unterschieden werden können.

Sensorik, die als Ersatz für Sinnesorgane des Menschen erforscht und entwickelt wird, und Sensorik, die zur Überwachung von Menschen und Patienten eingesetzt wird. Auch muss zwischen Sensoren unterschieden werden, die eine Zulassung nach dem Medizinproduktegesetz, insbesondere für den sogenannten ersten Gesundheitsmarkt, benötigen und solchen, deren Entwicklungsziel eher in Anwendungen der Konsumelektronik liegen.

Ein prominentes Beispiel der ersten Gruppe ist der Retina-Ersatz. Aber auch andere implantierbare Sensorik wird erforscht. Wichtig ist es hier, die Kompatibilität des Sensors mit dem menschlichen Organismus herzustellen und so eine Einkapselung des Sensors durch Körpergewebe und damit eine schleichende Unbrauchmachung zu verhindern.

In die zweite Gruppe fallen die heute gebräuchlichen Fitnessarmbänder, die ja auch eine Art Medizin- bzw. Biosensor darstellen. Sie messen mithilfe von Druck-, Beschleunigungs- und Temperatursensoren die Körperaktivität. Sie können aber auch Hinweise auf Vitalfunktionen (z. B. Herzfrequenz) geben. Dies kann insbesondere bei älteren, alleinlebenden Menschen von großer Bedeutung sein, indem beispielsweise bei Stürzen automatisch ein Notruf abgesetzt wird.

Es wird daran gearbeitet, mithilfe zusätzlicher Sensorelemente mit diesen Sensoren die Sauerstoffsättigung oder auch andere chemische Veränderungen im Blut festzustellen.

Daneben gibt es aber auch noch andere Sensoren, die beispielsweise den Metabolismus von Zellen messen können. Diese Art von Sensoren kann vielfältig zum Einsatz kommen. Beispielsweise zur Verbesserung der Medikamentierung von Patienten, auch bei der Krebstherapie.

Die DNA-Analyse wird ebenfalls mit speziellen Sensoren drastisch vereinfacht. Dies kann insbesondere bei der Diagnostik wertvolle Dienste leisten.

Auch wird an der Verbesserung sogenannter taktiler Sensorik gearbeitet. Ziel ist es dabei, beispielsweise die Greiffunktion einer Prothese zu verbessern oder auch die Unterstützung bei Lähmungen zu verbessern.

Auf der Aktorik-Seite wird an implantierbaren Medikamentenpumpen gearbeitet.

5.4.5 Allgemeine/ Gemeinsame Trends

Low-Power: Viele der beschriebenen Sensoren werden so entwickelt, dass sehr geringe Energiemengen zum Betrieb des Sensors ausreichen. Hierzu muss nicht nur das eigentliche Sensorelement, sondern auch die nachfolgende Auswerteeinheit und auch die Kommunikationseinheit auf ultra-low-power hin optimiert werden. Damit soll eine für die Versorgung des Sensors notwendige Batterie möglichst lange ausreichend Energie zur Verfügung stellen bzw. durch die Sensorfunktion nicht stark belastet werden (Smartphone).

Um dies zu gewährleisten, werden bei Sensoren mit einer RF-Schnittstelle spezielle, zum Teil dedizierte Übertragungsprotokolle gewählt, die nicht standardisiert sind. Derzeit ergibt sich ein Trend hin zu Bluetooth Low Energy (BLE), was den Vorteil hat, dass hier ein standardisiertes Kommunikationsprotokoll eine Kompatibilität der Datenübertragung zwischen verschiedenen Sensoren gewährleisten könnte.

Miniaturisierung: Viele Sensoranwendungen, allen voran Anwendungen im Smartphone, sind erst durch die fortschreitende Miniaturisierung der Sensoren erschlossen worden. Die immer besser werdenden Möglichkeiten der Mikrosystemtechnik haben dazu ganz erheblich beigetragen. Weitere Anwendungen wie Smart Grain oder Ähnliches werden erst durch die Miniaturisierung ermöglicht. Daneben wird das Thema Autarkie hierbei ebenfalls eine wesentliche Rolle spielen.

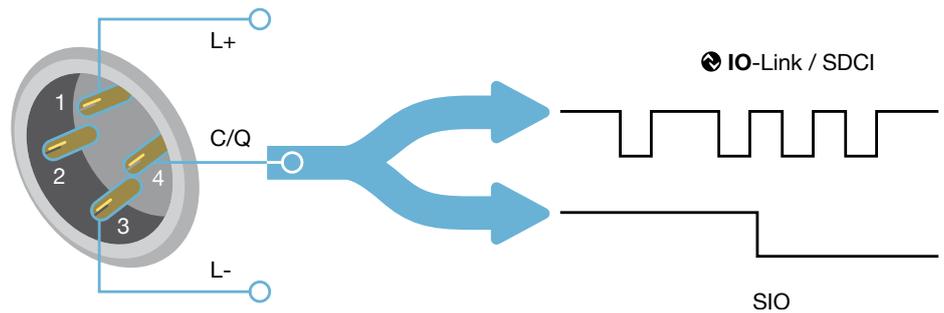
Autarkie: Bei einigen Anwendungen ist die Größe des Sensors durch die Größe der Batterie bestimmt.

Es wird daran gearbeitet, Energie aus der Umwelt einzusammeln, um damit die Batterie deutlich zu verkleinern bzw. ganz auf sie verzichten zu können. Als Energiequelle werden meist Sonnenlicht, Wärme oder Bewegung genutzt. Dazu werden Minisolarzellen, Thermoelemente, Piezo und MEMS-basierte Generatoren eingesetzt. Bis auf wenige Ausnahmen ist hierbei bisher jedoch noch kein ökonomisch sinnvoller Ersatz für Batterien im breiten Einsatz.

Security: Das Thema Security wird bei Sensoren durch Vernetzung und Cloud-Computing immer wichtiger. Zum einen ist die Authentisierung (gehört der Sensor zu meinem Schwarm?) und zum anderen die gesicherte Datenübertragung (keine Fake-Daten) in die Entwicklung von künftigen Sensoren miteinzubeziehen.

Software: Software wird beim einzelnen Sensor immer wichtiger. Hochperformante Mikrocontroller erlauben bereits in der Sensorelektronik eine Auswertung der Sensorsignale. Daneben gibt es aber auch Ansätze, durch Vernetzung der Sensoren einzelne Sensoren in einem System einzusparen. Künstliche Intelligenz wird hier noch viele weitere Möglichkeiten schaffen.

Abb. 5.29: IO-Link-Anschluss



Quelle: IO-Link

5.5 Die IO-Link-Physik und -Kompatibilität zum klassischen Digital Input (DI)

IO-Link ist ein weltweiter, offener, hersteller- und bussystemunabhängiger Standard, der in der IEC 61131-9 verankert ist. In der IEC 61131-9 ist IO-Link als SDCI (Single Drop Communication Interface) beschrieben.

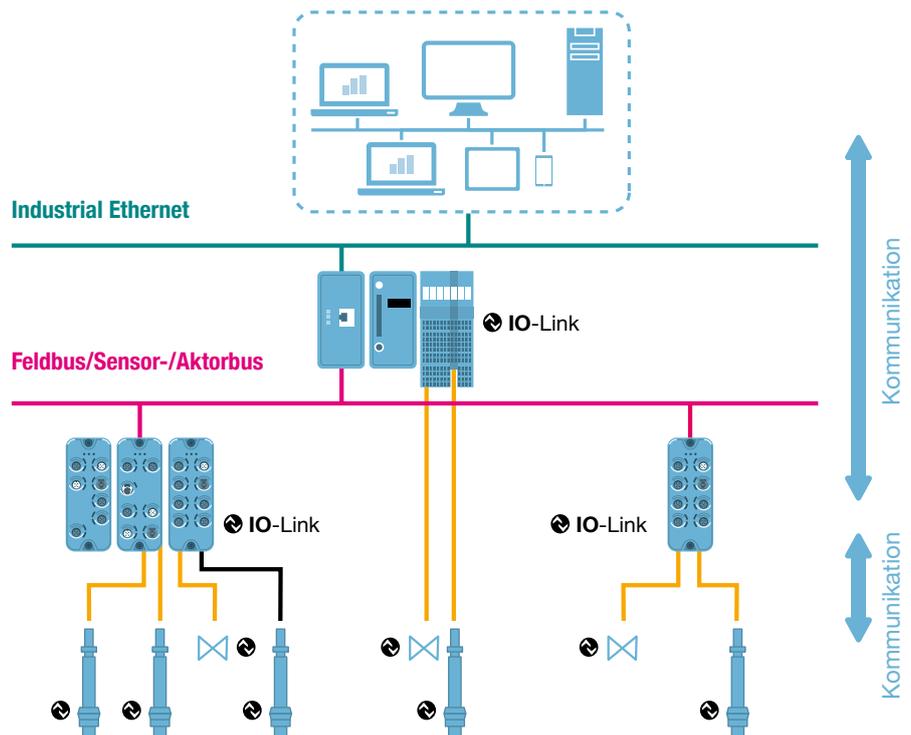
Das System IO-Link ermöglicht den Anschluss einfacher und komplexer (intelligenter) Sensoren und Aktoren sowie Kombinationen aus beiden. IO-Link spricht aus diesem Grund von Devices.

Wesentlicher Aspekt von IO-Link ist die Kompatibilität zum bestehenden 3-Draht-System mit schaltenden Sensoren in heutigen Maschinen

und Anlagen, sodass die IO-Link-Devices auch diesen Applikationsteil abdecken bzw. ohne Neuverdrahtung ein Retrofit der Maschine realisierbar ist.

Dabei nutzt das System zur Informationsübertragung den bisher für die digitale Information genutzten Draht. Bei der Standard-M12-Verbindung ist dies der Pin 4. In der Abbildung 5.29 ist das Funktionsprinzip dargestellt. Das Standard-Schaltersignal (SIO = Standard Input Output) und die IO-Link-Kommunikation sind physikalisch auf derselben Übertragungsstrecke zu finden, wobei in der Regel IO-Link-Devices immer im SIO-Mode starten und vom IO-Link-Master in die Kommunikation überführt werden.

Abb. 5.30: Systemübersicht IO-Link



Quelle: IO-Link

5.5.1 Die IO-Link-Kommunikation und -Datenkanäle

Durch die IO-Link-Kommunikation entsteht ein einfaches, einheitlich verdrahtetes und deutlich an der Schnittstellenvielfalt reduziertes System für Sensoren und Aktoren sowie gemischte Aktor-Sensor-Devices. Es ergibt sich der in Abbildung 5.30 gezeigte Systemaufbau.

Die IO-Link-Kommunikation lässt damit zu, dass über das Schaltsignal hinaus ein oder mehrere Mess- bzw. Analogwerte übertragen werden können. Additiv können ein oder mehrere Schaltpunkte oder auch ein Mix aus analogen und digitalen Daten übermittelt werden. Dabei reduziert sich die Typenvielfalt und die Inbetriebnahme wird beschleunigt.

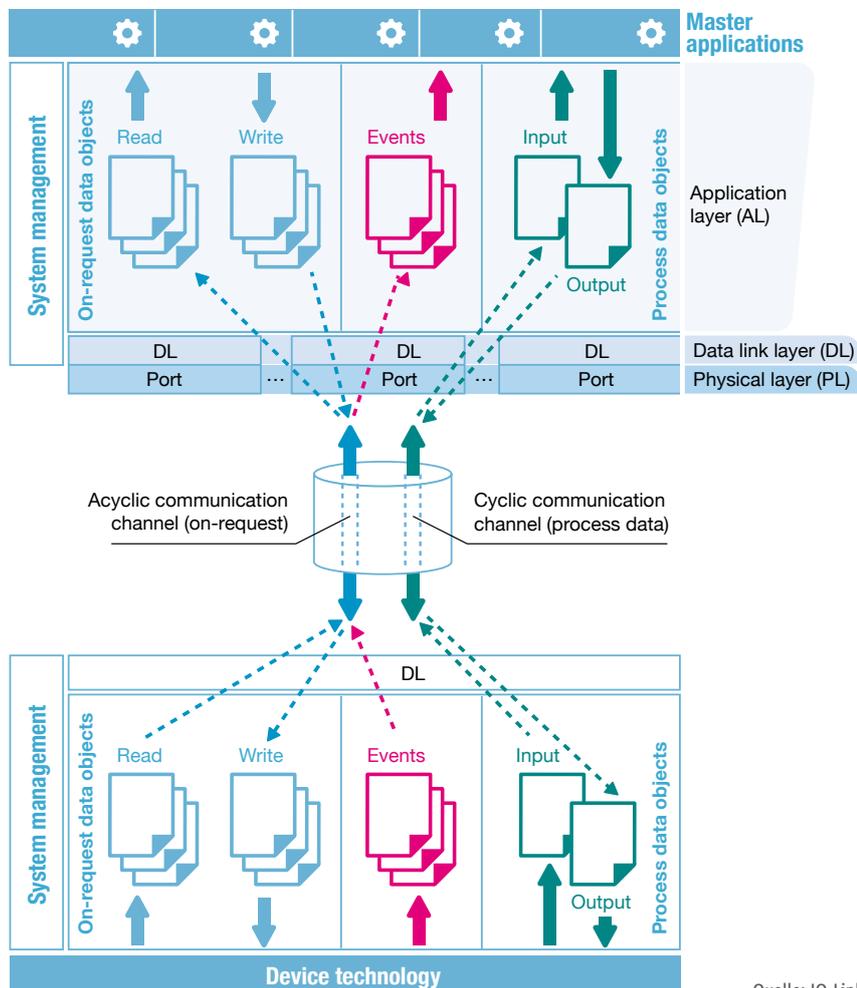
Die Inbetriebnahme vereinfacht sich zudem, da IO-Link mittlerweile auf allen gängigen Feldbus-Systemen abgebildet ist und somit die Möglichkeit besteht, IO-Link in die üblichen Automatisierungssysteme zu integrieren. Eine entsprechende Toolunterstützung steht für die Parametrierung und zentrale Datenhaltung der IO-Link-Devices zur Verfügung. Die zugehörigen Beschreibungs-

dateien der IO-Link-Devices (IODD = Input Output Device Description) sind zentral auf dem sogenannten IODDfinder (siehe <https://ioddfinder.io-link.com/#/>) abgelegt. Die meisten Tools laden sich die entsprechend benötigten IODDs automatisch vom IODDfinder herunter. Ein manuelles Suchen und Herunterladen ist jedoch ebenfalls möglich. In Verbindung mit vereinheitlichtem Tooling und den Beschreibungsdateien ist eine schnelle Projektierung, Inbetriebnahme und eine einfache Erstellung der Anlagendokumentation möglich.

IO-Link verfügt über zwei logische Datenkanäle, die zyklische von azyklischen Daten trennen (siehe Abb. 5.31).

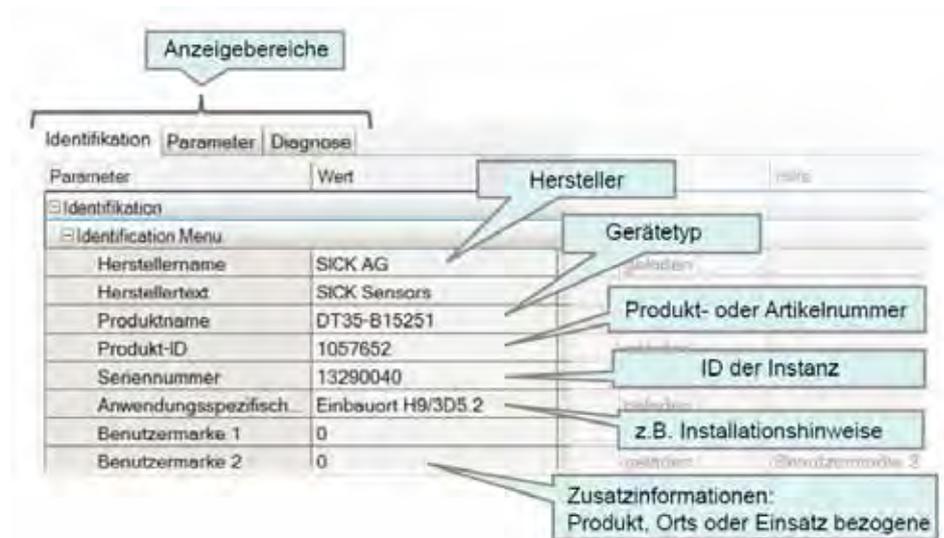
Die IO-Link-Kommunikation ist durchgängig zwischen Steuerung und IO-Link-Devices und lässt Zugriffe auf alle Prozessdaten, Diagnosedaten und Geräteinformationen zu. Ebenso können gerätespezifische Daten erreicht werden. Damit ist es erstmals möglich, auch auf die Aktuatorik und Sensorik einer Anlage, unabhängig vom Standort, zuzugreifen und eine Ferndiagnose durchzuführen.

Abb. 5.31: IO-Link-Datenkanäle



Quelle: IO-Link

Abb. 5.32: IO-Link-Identifikation



Quelle: IO-Link-Community, PNO Karlsruhe

5.5.2 IO-Link-Diagnose und -Identifikation

IO-Link ermöglicht, neben der einfachsten Diagnose (Kabelbruch), weitaus komplexere Diagnosen, die direkt aus dem IO-Link-Device kommen. Dies reduziert den Aufwand bei der Fehlersuche, und im Rahmen vorbeugender Wartung können die Ausfallrisiken minimiert werden. Es ergibt sich ebenfalls eine Optimierung der Wartungs- und Instandhaltungsplanungen, was wiederum die Stillstandzeit in der Wartung reduziert.

Ebenfalls beherrscht IO-Link die Möglichkeiten einer dynamischen Änderung der Parameter in IO-Link-Devices. Die sogenannte Rezeptumschaltung ermöglicht die Erhöhung der Produktvielfalt auf Maschinen und damit eine Reduzierung von Stillstandzeiten.

IO-Link ist in der Lage, eine Nachparametrierung vorzunehmen, ohne einen Tooleinsatz zu erzwingen und geschultes Personal vorhalten zu müssen. Das heißt: Kommt es zum Ausfall eines IO-Link-Devices, kann das betreffende Gerät durch ungeschultes Personal mechanisch ausgetauscht werden. Das System ist in der Lage zu erkennen, dass ein Ersatzgerät eingebaut wurde, und dieses wieder mit den richtigen Parametern in Betrieb zu setzen. Damit lassen sich ebenfalls Stillstandzeiten reduzieren.

Um diese Mechanismen zu ermöglichen, ist in IO-Link eine durchgängige Identifikation umgesetzt. Diese ermöglicht sowohl die eindeutige Identifikation der verbauten IO-Link-Devices nach Hersteller, Artikel und optionalen Seriennummern als auch, sofern dies vom IO-Link-Device-Hersteller zur Verfügung gestellt wird, eine Zuordnung nach Anlagenkennzeichnung, örtlicher und funktionaler Identifikation der IO-Link-Devices.

Die Abbildung 5.32 zeigt die in IO-Link als Standard zwingend hinterlegte Identifikation eines IO-Link-Devices.

5.5.3 IO-Link-Profil und -Vereinheitlichung

IO-Link definiert Profile, die es ermöglichen, systemunabhängig die Firmware eines IO-Link-Devices zu aktualisieren wie auch normierte Prozesswerte zu übertragen. Als Erweiterung sind zusätzlich standardisierte Identifikationsdaten verfügbar. Für Sensoren definiert das SmartSensorProfil Ed 2 (SSP) zum Beispiel einen einheitlichen Analogmesswert mit Zusatzinformationen bezüglich der Gültigkeit des Werts.

Die folgende Abbildung 5.33 zeigt den möglichen Wertebereich der Prozessdaten. Dieser besteht aus dem Bereich mit garantierter Genauigkeit (grün), dem erweiterten Bereich (gelb) und spezifischen Werten für besondere Zustände (rot).

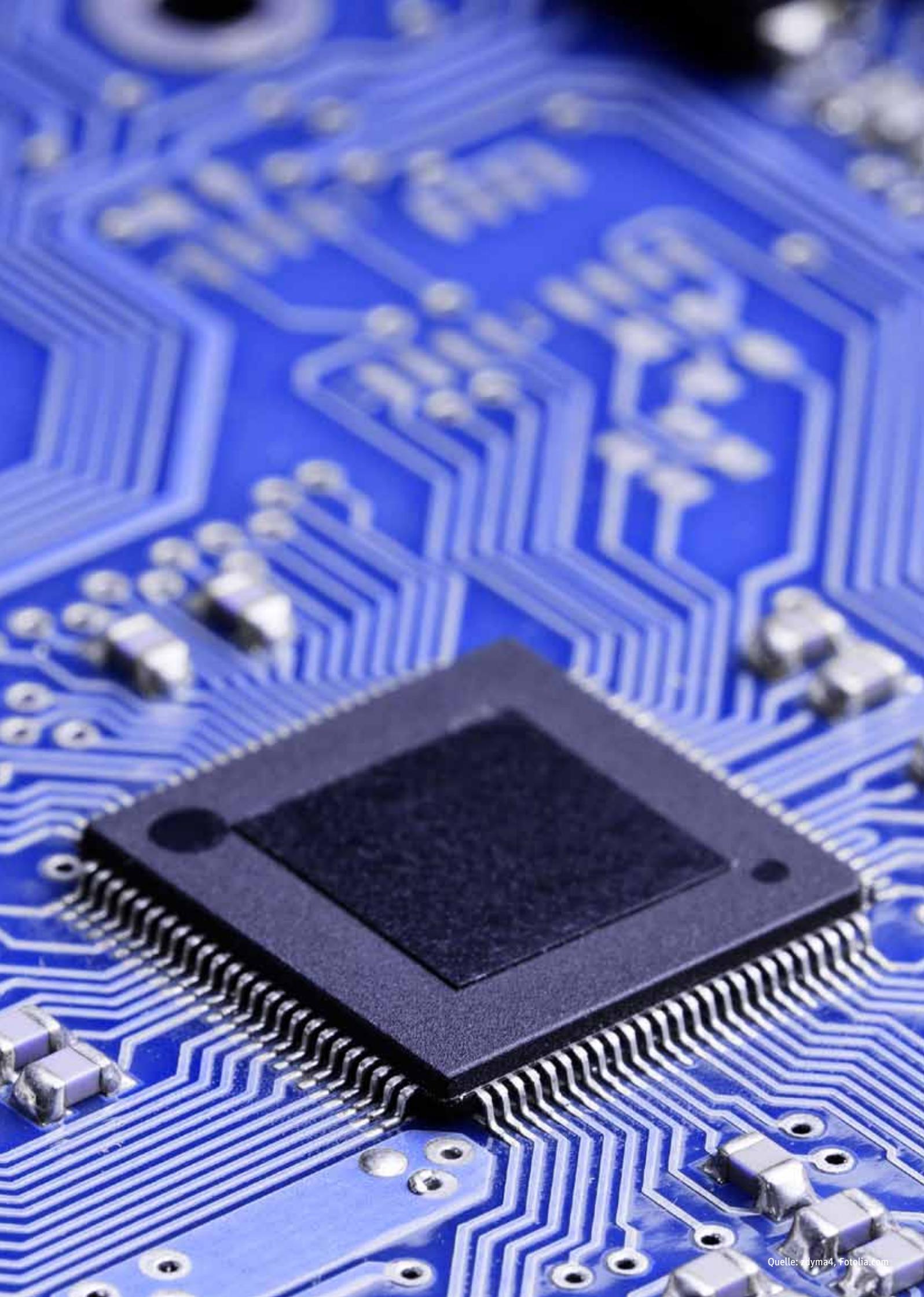
Abb. 5.33: Prozessdatendefinition im Wertebereich des SmartSensorProfils



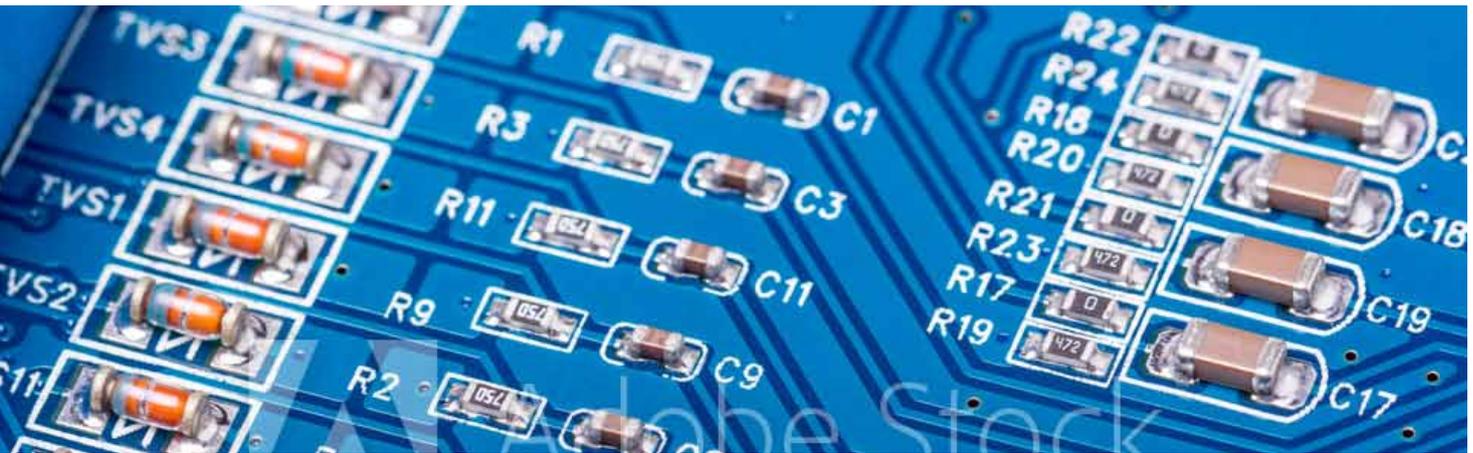
Quelle: IO-Link-Community, PNO Karlsruhe

Ziel der Profile ist es, den Anwender bei der Anwendung unterschiedlicher Device-Hersteller innerhalb der gleichen Applikation von der nötigen Anpassung des Steuerungsprogramms zu entbinden. Die IO-Link-Profile standardisieren die übertragenen Prozesswerte. Eine Anpassung der Umrechnung der Prozesswerte entfällt somit. Die Identifikation der Devices in der Konfiguration der IO-Link-Master ist jedoch weiterhin notwendig, damit die Anlage erkennen kann, ob die für sie richtigen Devices genutzt werden.

Alle IO-Link-Community-Mitglieder sind unter <http://io-link.com/de/WirUeberUns/Hersteller.php?thisID=25> einsehbar.



6 Passive Bauelemente



Quelle: Denis Dryashkin – stock.adobe.com

Zur Gruppe der passiven Bauelemente gehören vielfältige elektronische Komponenten wie zum Beispiel Kondensatoren, Induktivitäten, EMV-Filter, Hochfrequenz-Bauelemente, Piezo-Keramiken und Widerstände, die in nahezu jedem elektronischen Gerät verbaut sind. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie zur Erfüllung ihrer Funktion – im Gegensatz zu den Halbleiter-Bauelementen – keine eigene Stromversorgung benötigen und dass sie keine Steuerungsfunktion besitzen.

Passive Bauelemente können lineare oder nicht lineare elektrische Eigenschaften aufweisen und nehmen bereits heute einen signifikanten Anteil des Volumens und Gewichts leistungselektronischer Systeme ein. Aufgrund der Entwicklung der Halbleiter und der damit verbundenen Reduktion der Schaltverluste wird in den passiven Bauelementen der dominierende Anteil von Systemverlusten erzeugt. Wenngleich passive Bauelemente häufig als nachgeordneter Kostenfaktor einer Baugruppe oder eines Geräts betrachtet werden, gibt es immer mehr Applikationen, in denen moderne passive Bauelemente nach den Halbleiterbausteinen die zweitgrößte Position innerhalb der „Bill of Material“ (BoM) ausmachen. Die Weiterentwicklung der passiven Bauelemente gewinnt demzufolge zunehmend an Bedeutung.

6.1 Kondensatoren

Kondensatoren dienen in elektronischen Schaltungen einerseits als Energiespeicher und andererseits beeinflussen sie Phase und Amplitude in Wechselstromkreisen. Aufgrund der sich daraus ergebenden verschiedensten Applikationen gibt es Kondensatoren in unterschiedlichen Technologien und mit sehr großen Unterschieden in der Bauform.

6.1.1 Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren

Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren gehören zu den traditionellen Ausführungsformen von Kondensatoren. Das Ur-Patent des „Elko“ ist schon über hundert Jahre alt, aber aufgrund der ständigen Weiterentwicklung bei den Dielektrika und Betriebselektrolyten ist es trotzdem ein Hightechbauelement mit dem günstigsten Kapazitäts-/Volumen-/Kosten-Faktor aller bekannten Kondensator-technologien. Das Hauptanwendungsgebiet der Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren ist die Speicherung und Glättung von Spannungen und Strömen. Sie sind daher unverzichtbar für alle Arten von Stromversorgungen und Umrichtern, wie sie in der Industrie-, Kommunikations- und zunehmend auch der Haushaltselektronik zu finden sind.

Ein jeweils zukunftssträchtiges und ständig wachsendes Anwendungsgebiet dieser Kondensatoren sind Applikationen im Bereich von Automobilelektronik und der Leistungselektronik. Dazu zählen besonders die Umrichter für Photovoltaik- und Windenergieanlagen, bidirektionale Wandler für große Batteriespeichersysteme sowie Energiespeichersysteme.

6.1.1.1 Entwicklungstrends und -ziele

Kompakte Abmessungen: Der Fokus der Weiterentwicklung von Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren liegt darauf, sie noch kompakter zu realisieren als bisher. Hierbei steht neben der allgemeinen Designoptimierung die Entwicklung verbesserter Anodenfolien im Vordergrund. Je größer die aktive Oberfläche dieser Folien ist, desto größer wird die Kapazität des Kondensators bei gleicher Baugröße.

Hohe Stromtragfähigkeit: Gleichzeitig gilt es, die Stromtragfähigkeit von Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren noch weiter zu verbessern, um bei hohen Lasten möglichst wenig Kondensatoren parallel schalten zu müssen. Um dieses Ziel zu erreichen, werden die Elektrolyte ständig weiterentwickelt. Dabei ist das Hauptentwicklungsziel, einen möglichst geringen spezifischen Widerstand zu erzielen. Neben der höheren Stromtragfähigkeit werden gleichzeitig die durch den Kondensator verursachten Verluste deutlich reduziert. Damit einhergehend ergibt sich eine reduzierte Eigenerwärmung, was sich positiv auf die Lebensdauer auswirkt.

Abb. 6.1: Aluminium-Elektrolyt-Kondensator in Snap-in-Ausführung für die Leiterplattenmontage



Quelle: TDK Electronics

Hohe Betriebstemperatur: Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der Erhöhung der zulässigen Betriebstemperatur bei gleichzeitig hoher Brauchbarkeitsdauer der Kondensatoren. Diese Forderung gilt es besonders bei Automotive-Anwendungen zu erfüllen. Auch hier liegt der Fokus der Entwicklung bei den Elektrolyten, denn sie bestimmen maßgeblich die Alterung der Bauelemente. Die Zielmarke liegt bei einer möglichst geringen Diffusion bei Temperaturen von 150 °C und darüber.

Hohe Nennspannung >600 V: Daneben wird an der Erhöhung der Nennspannung gearbeitet, um in Kondensatorbänken die Anzahl der in Serie geschalteten Kondensatoren zu verringern, was den Bauelemente- und Platzbedarf reduziert und gleichzeitig die Zuverlässigkeit der Zielapplikation steigert.

Hohe Vibrationsfestigkeit: Besonders bei Automotive-Anwendungen müssen Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren neben hoher Temperaturverträglichkeit eine große mechanische Stabilität aufweisen. Eine Vibrationsfestigkeit von 60 g ist heute bereits erreicht. Künftig soll diese auf noch höhere Werte gesteigert werden.

Abb. 6.2: Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren für Automotive-Anwendungen unter harschen Einsatzbedingungen



Quelle: TDK Electronics

Systemintegration: In vielen DC-Link-Applikationen im Industrie-, aber auch im Automotive-Bereich können in der Zukunft neue Halbleiter wie zum Beispiel SiC eingesetzt werden, die minimale parasitäre Induktivitäten, maximale Zuverlässigkeit und höchste Leistungsdichte bei den Elko-Konstruktionen erfordern.

Neben den physikalischen Eigenschaften des Elkos an sich werden daher die Schnittstellen-Anbindungen an Busbar, Kühlung, Leistungshalbleiter und die Überwachung von Eigenschaften des Bauelements immer mehr an Bedeutung gewinnen.

Systemintegration ist daher eine klare Maßnahme zur Kostenreduktion, Volumenreduzierung und zur Zuverlässigkeitserhöhung.

Abb. 6.3a: SMARTCAP



Quelle: FTCAP

Im Zuge der Digitalisierung von Bauteilen wird auch eine eigenschaftsmessende Elektronik, die die komplexen Systeme überwacht, eingesetzt werden, die dann mit ihrer Umgebung kommuniziert, um die geforderten Ziele zu erreichen.

Abb. 6.3b: Multi-Pin-Kondensator für Automotive-Anwendungen



Quelle: FTCAP

Design- und Simulationssoftware: Immer mehr Bedeutung werden künftig auch Software-Tools zur optimalen Dimensionierung von Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren einnehmen. Sie helfen Entwicklern bei der Auswahl der richtigen Kondensatoren, dienen zur Lebensdauerberechnung und zur Bestimmung, ob und welche zusätzlichen Maßnahmen zur Entwärmung erforderlich sind. Mit zusätzlicher Simulations-Software können sehr gute Aussagen über den realisierten Einsatz von Kondensatoren gemacht werden.

6.1.2 Folienkondensatoren

Folienkondensatoren für sehr hohe Leistungen werden in drei zukunftsträchtigen Anwendungsfeldern eingesetzt:

Das wichtigste davon ist die **Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ)**. Diese Technologie ermöglicht Energieübertragung auch über sehr große Strecken mit sehr geringen Verlusten. Dabei werden in den Umrichterstationen

am Anfang und Ende der Strecke Leistungskondensatoren zum Stabilisieren und Glätten des Stroms benötigt.

Abb. 6.4a: Kondensator für HGÜ-Anwendungen



Quelle: TDK Electronics

Das zweite Anwendungsfeld sind große **Traktionsumrichter**, wie sie zum Beispiel für Bahnantriebe benötigt werden. Hier werden die Leistungskondensatoren zur Stabilisierung des DC-Zwischenkreises eingesetzt.

Das dritte Einsatzgebiet schließlich ist die **Blindleistungskompensation**, die bei der effizienten Energieerzeugung und -verteilung eine große Rolle spielt. Hier sind ganz spezielle Kondensatoren erforderlich, um die Phasenverschiebung von Strom und Spannung zu kompensieren.

Für Kondensatoren mittlerer Leistung sind die Elektromobilität sowie die Umrichter in Industrieanwendungen die wichtigsten Einsatzgebiete. Im DC-Zwischenkreis von Ladestationen und Umrichtern dienen sie als Energiezwischenspeicher und ermöglichen so einen stabilen Betrieb der Applikation.

Abb. 6.4b: DC-Zwischenkreis-kondensator in kleinen Umrichtern



Quelle: TDK Electronics

6.1.2.1 Entwicklungstrends und -ziele

Höhere Temperaturfestigkeit: In den meisten Anwendungen steigt aufgrund der zunehmenden Miniaturisierung und Leistungsdichte die Anforderung in puncto Temperaturfestigkeit von bisher 105 °C auf Werte von bis zu 150 °C. Nur so ist es möglich, die Kondensatoren sehr nahe an die Leistungshalbleiter anzubinden und trotzdem sicher zu betreiben.

Um dies zu erreichen, gilt es, die bereits begonnene Entwicklung von Hochtemperatur-Polypropylen-Folien fortzusetzen. Die beteiligten Unternehmen aus Chemie, Verarbeitungsindustrie für Folienmaterial bis hin zum Hersteller bzw. Entwickler des Kondensators werden die bereits laufenden Aktivitäten fortsetzen, um eine für die industrielle Massenfertigung notwendige Anhebung der Basisparameter auszuarbeiten.

Abb. 6.5: Snubber-Kondensator zur Direktmontage an das Halbleitermodul

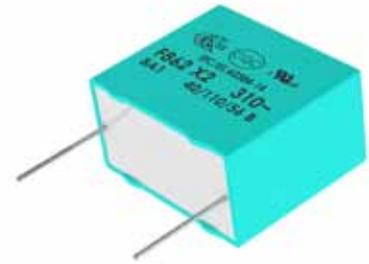


Quelle: TDK Electronics

Höhere Lebensdauer und Langzeitstabilität:

Da Kondensatoren in Investitionsgütern häufig mehrere Jahrzehnte fehlerfrei funktionieren müssen, ist weitere Entwicklungsarbeit erforderlich, um den zuverlässigen Einsatz zu ermöglichen. Hauptziel ist die weitere Verbesserung des Folienmaterials, um frühzeitige Materialdegradationen zu verhindern. Insbesondere bei den Kunststoff-Entstörkondensatoren (Supressors) werden erweiterte Industriestandards die verschiedenen Anforderungsprofile abdecken.

Abb. 6.6: Entstörkondensator / Harsh Environment



Quelle: Kemet

Stromtragfähigkeit und Kompaktheit steigern:

Eine höhere Systemintegration beim Kunden erfordert auch eine gesteigerte Stromtragfähigkeit der eingesetzten Kondensatoren bei gleichzeitig weiter reduzierten Abmessungen. Hier bieten sich neue Wickeltechnologien wie zum Beispiel die Schichtwickeltechnik an, die Füllfaktoren von fast eins erlauben.

Parasitäre Beiwerte reduzieren: Durch die neuen Wide-Bandgap-Halbleiter auf Basis von SiC und GaN werden immer höhere Schaltfrequenzen bei Umrichtern möglich. Deshalb müssen parasitäre Beiwerte von Zwischenkreiskondensatoren – besonders der ESL (Seriensatzinduktivität) – deutlich gesenkt werden. Nur so ist es möglich, gefährliche Spannungsüberhöhungen und Schwingungen beim Schalten der Halbleiter zu vermeiden. Angestrebt werden hier Werte im unteren nH-Bereich. Erreicht werden kann dies durch entsprechende kurze Bauelemente-Terminals. Voraussetzung ist natürlich auch hier eine Temperaturbeständigkeit von bis zu 150 °C an den Terminals. Gleichzeitig gilt es, den ESR (Seriensatzwiderstand) zu senken, um die Verluste und damit auch die Eigenerwärmung der Kondensatoren zu senken.

Abb. 6.7: DC-Link-Kondensator / High Temperature



Quelle: Kemet

Das Anheben der Applikationsspannung auf das zukünftige Niveau von bis zu 1.200 Vdc lässt sich durch konstruktive Maßnahmen im Kondensator (interne Reihenschaltung) bzw. die Verwendung geeigneter Folienmaterialien beherrschen. Hier bietet Polypropylen (PP) als Folienbasismaterial die besten Eigenschaften im Hinblick auf die elektrische Feldstärke in Relation zur Folienstärke.

Anwendungen mit hohen DC-Strömen bzw. AC-Power-Kondensatoren werden nahezu ausschließlich mit PP-Folienbasismaterial aufgebaut. Die Alternative auf Basis von Polytetraethylen-Folienbasismaterial (PET) weist zwar einen erweiterten Temperaturbereich auf, dieses allerdings zulasten von Verlustfaktor, Linearität und Durchbruchspannung.

6.1.2.2 Elektromobilität als Treiber für neue Kondensatortechnologien

Elektroautos werden zukünftig eine immer größere Rolle spielen und die Palette der verfügbaren Fahrzeugmodelle mit rein elektrischem Antrieb (BEV) bzw. Hybridantrieb (HEV) wird täglich erweitert. Damit einhergehend erfolgt der Ausbau der Ladeeinrichtungen im öffentlichen Straßenraum.

Entwicklungstrends und -ziele

- In neuen Generationen von Fahrzeuginvertoren kommen zunehmend Wide-Bandgap-Halbleiter-Materialien (SiC und GaN) mit Schaltfrequenzen von bis zu 50 kHz zum Einsatz. Vielfach erhöht sich auch die Batteriespannung bis auf 900 Vdc. Daraus resultieren neue Anforderungen an den (DC-Link-)Kondensator in Hinblick auf Verringerung der Serieninduktivität um ca. 50 Prozent auf <5 nH und ESR auf <0,25 mΩ.

- On-board-Ladeeinrichtungen in Elektrofahrzeugen erfordern miniaturisierte Entstörkondensatoren mit erhöhten Anforderungen an Feuchteschutz und Langzeitstabilität bis zu 100.000 h.
- Bauteile gemäß den Anforderungen der Automobilindustrie (AEC-Q200). Hierzu gibt es seitens des ZVEI Aktivitäten, die Liefervorschriften für den Bereich Automotive bauteilspezifisch zu definieren.

Abb. 6.8a/b: Brick-Kondensator für Automobilanwendungen (oben) und PCC-Low-Power-Kondensator zur direkten Verschaltung mit dem Leistungshalbleitermodul (unten)



Quelle: Kemet



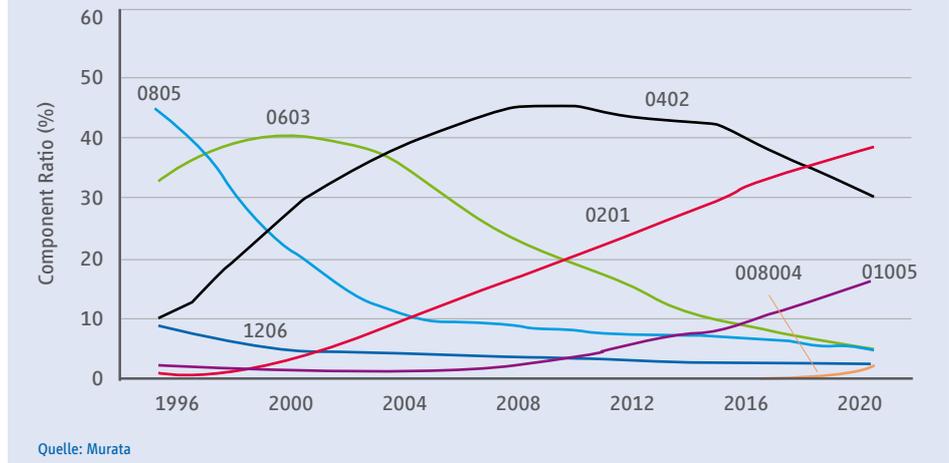
Quelle: TDK Electronics

6.1.3 Keramikkondensatoren

Seit vielen Jahren finden keramische Kondensatoren in einer Vielzahl von Applikationen Verwendung wie zum Beispiel in IT-Ausrüstung und Netzwerk-Infrastrukturen, in Smartphones, im Automobil, in tragbaren Geräten und in Haushaltsgeräten.

Die MLCCs (Multi Layer Ceramic Chip) unterstützen fast jedes produzierte elektronische Produkt, das heute in der Gesellschaft genutzt wird. Diese hochzuverlässigen Kondensatoren sind natürlich auch im Kfz und in der Raumfahrt im Einsatz. Die in den Geräten vielfach verwendeten Schaltnetzwerke bzw. Leistungswandler arbeiten auf immer höheren Frequenzen und Temperaturen. Diese Anwendungen können mit den hierfür besonders geeigneten Keramikkondensatoren gut abgedeckt werden.

Abb. 6.9: Baugrößen-Trend, Abmessung in Zoll



6.1.3.1 Entwicklungstrends und -ziele

Neue Applikationen erfordern eine immer höhere Integrationsdichte bzw. Energieeffizienz. Deshalb werden MLCCs in kleineren Gehäusegrößen und mit zunehmend höherem Kapazitätswolumen entwickelt.

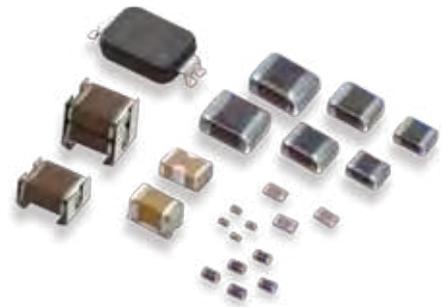
Die mehrschichtigen Keramikcondensatoren haben bei hohen Frequenzen gute Impedanzcharakteristika.

Man kann daher sicher annehmen, dass sich die rasche Akzeptanz der kleineren MLCC-Abmessungen weiter fortsetzen wird. Die Abmessung 0201 (in Zoll) wird die dominante Größe im Jahr 2018 auf dem Weltmarkt sein (siehe Abb. 6.9). Um solche kleinen Bauelemente herstellen zu können, spielt die Dünnschichttechnologie der dielektrischen Schicht-/Metallinnenelektrode eine entscheidende Rolle. Waren vor zehn bis 15 Jahren die Schichtdicken um 15 μm Stand der Technik, so wird heute mit Dicken um die 0,5 μm gearbeitet. Es wird daher eine Verarbeitungstechnologie benötigt, die Größe und Form der Körner des keramischen Pulvers und des Elektrodenpulvers extrem genau kontrolliert, um gleichmäßig mit hoher Genauigkeit und Dichte hochkapazitive MLCCs in großen Mengen bei zugleich höchster Qualität herstellen zu können.

Der Fortschritt dieser Technik scheint unaufhaltsam. So werden am Markt bereits MLCCs in der Größe 008004 (0,25 \times 0,125 mm) angeboten. Solche Produkte sind in erster Linie für den Einsatz in mobilen Geräten und drahtlosen Kommunikationsmodulen vorgesehen. Diese Größenreduzierung und höhere Montagedichte werden in drahtlosen Kommunikationsgeräten/IoT benötigt, um Multi-Band/Multimode und erhöhte Diversität der Funktionen zu unterstützen. Daher sind solche Produkte auch Grundlage

für Schaltungsentwürfe mit höherer Dichte – im Vergleich zu der früher kleinsten Größe 01005 (0,4 \times 0,2 mm).

Abb. 6.10: MLCCs verschiedener Baugrößen



Quelle: Murata

6.1.4 Tantalkondensatoren

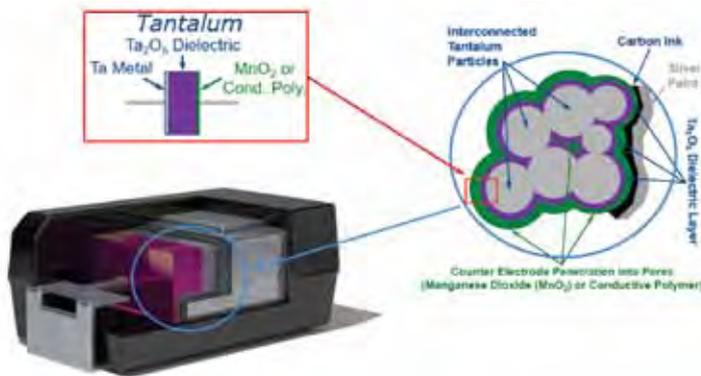
Tantal-Elektrolyt-Kondensatoren (kurz Tantal-kondensatoren) zeichnen sich durch eine hohe Energiedichte aus und stellen somit – bezogen auf die geometrische Größe – die energieeffizienteste Kondensatortechnologie dar.

Die heute auf dem Markt eingesetzten Tantal-kondensatoren unterscheiden sich grundsätzlich durch das verwendete Kathodenmaterial. Während man bereits seit Mitte der 1950er-Jahre bedrahtete axiale und radiale Mangandioxid-Kondensatoren (MnO_2) herstellen konnte, wurden erst Mitte der 1980er-Jahre die ersten für die Oberflächenmontage (SMD) geeigneten Bauelemente eingeführt. In den Jahren vor 2000 wurden dann von verschiedenen Herstellern Kondensatoren mit einem leitfähigen Polymer als Kathodenmaterial entwickelt (Polymer-Kondensatoren). Hierbei wurde das bislang verwendete Mangandioxid (MnO_2) durch ein leitfähiges Kunststoffmaterial substituiert.

6.1.4.1 Entwicklungstrends und -ziele

Konkurrierende Kondensatortechnologien wie Vielschicht-Keramikkondensatoren (MLCC) und Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren konnten durch technische Verbesserungen sowie damit einhergehende Erweiterungen des Spektrums große Teile des Tantal-MnO₂-Kondensatormarkts für sich gewinnen. Die extrem zyklischen Marktentwicklungen mit entsprechenden Preis- und Verfügbarkeitsthemen sowie ethische Bedenken hinsichtlich des Konfliktmaterials Tantal haben seit ca. 2007 zu einer stetigen Abnahme des globalen Tantal-MnO₂-Kondensatorbedarfs geführt.

Abb. 6.11: Aufbau eines Tantal-kondensators mit unterschiedlichen Kathodenmaterialien



Quelle: Kemet

Abb. 6.12: Polymerkondensator



Quelle: Kemet

Auf der anderen Seite ersetzen Polymerkondensatoren in zunehmendem Maße Tantal-MnO₂- und andere Kondensatortechnologien. Hohe Volumeneffizienz bei niedrigen ESR-Werten und verbessertem Spannungs-Derating, Piece-Count-, Bauhöhen- und Footprint-Reduzierungen sowie keinerlei Entflammbarkeit sind die positiven Unterscheidungsmerkmale gegenüber den Tantal-MnO₂-Kondensatoren. Zudem muss im Vergleich zu MLCC-Kondensatoren nicht mit Kapazitätsverlusten bei angelegter Spannung („DC Bias Effect“) sowie Biegebrüchen aufgrund mechanischer Beanspruchung gerechnet werden. Gegenüber Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren ist neben der kompakteren Bauform die minimale Kapazitätsabnahme über Zeit und/oder Temperatur als wesentlicher Vorteil zu nennen.

Es ist absehbar, dass Tantal-MnO₂-Kondensatoren auch künftig in Applikationen mit Anforderungen nach niedrigen Leckströmen ($DCL \leq 0.01 \times CV$) und/oder hohen Temperaturen ($\geq 175^\circ C$) eingesetzt werden. Ebenfalls wird man sie weiterhin in Segmenten mit langen Designzyklen sowie hohem Qualifizierungsaufwand für Designänderungen wie beispielsweise in der kommerziellen und militärischen Luft- und Raumfahrt, in Medizinanwendungen sowie in Teilbereichen der Industrieelektronik finden.

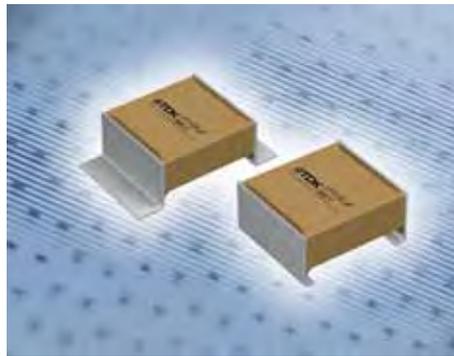
Polymerkondensatoren werden aufgrund von Produktverbesserungen im Hinblick auf Einsatztemperatur (von heute 125 °C auf 150/175 °C), Nennspannung (von heute 75 V auf 100/125 V) sowie erweiterte Automotive-Anforderungen jenseits der AEC-Q200 (Load-Dump, ISO-Pulse, veränderte Temperaturprofile für selbstfahrende Fahrzeuge etc.) an Bedeutung gewinnen. Neben voranschreitender Miniaturisierung hin zu Baugrößen von 0805 bzw. 0603 für verschiedene Segmente werden im Aerospace-Segment Polymerprodukte mit „Established Reliability“ MnO₂-Kondensatoren ablösen, ähnlich wie dies in der kommerziellen Luftfahrt mit Automotive-Grade-Polymerprodukten der Fall sein wird. Für batteriebetriebene Anwendungen wird es zudem Produkte mit reduzierten Leckstrom-Spezifikationen geben.

6.1.5 CeraLink-Kondensatoren

Durch Materialforschung – besonders auf dem Gebiet der Keramiken – ist es möglich, neue Kondensatortechnologien zu entwickeln. Dazu zählt zum Beispiel die CeraLink®-Technologie, die auf PLZT-Keramik (Lead Lanthanum Zirconate Titanate) basiert. Im Gegensatz zu den bisher üblichen Keramiken für Kondensatoren bietet das neue Material eine ganze Reihe von Vorteilen: So findet hier keine Reduzierung der Kapazität bei hoher Beaufschlagung mit Gleichspannung statt. Auch die starke Kapazitätsdrift in Abhängigkeit von der Temperatur ist hier nicht gegeben. Gleichzeitig bestechen Kondensatoren auf PLZT-Basis durch sehr geringe parasitäre Beiwerte bei hohen Temperaturen und hohen Frequenzen. Als eines der wenigen passiven Bauelemente sind sie für Dauertemperaturen von 150 °C geeignet. Außerdem weisen sie ein sehr hohes Kapazitäts-Spannungsfestigkeitsprodukt bezogen auf das Volumen auf.

Mit diesen herausragenden Eigenschaften eignen sich PLZT-Kondensatoren besonders gut für die Kombination mit den neuen Halbleitern auf GaN- und SiC-Basis, die bezüglich Frequenzverhalten und Temperatur sehr hohe Anforderungen an die passiven Bauelemente stellen.

Abb. 6.13: Ceralink®-Kondensatoren zum Einsatz bei extrem hohen Betriebstemperaturen



Quelle: TDK Electronics

6.1.5.1 Entwicklungstrends und -ziele

Dank der hohen Temperaturfestigkeit und der hohen spezifischen Kapazität dieser neuen Kondensatoren ist es erstmals möglich, sie direkt in Leistungshalbleitermodule zu integrieren, was mit konventionellen Technologien nicht möglich ist. Damit ist ein wesentlicher Meilenstein beim „Passive Embedding“ erreicht. Es ist bereits jetzt möglich, die Snubber-Funktion in IGBT-Module zu integrieren, was der Forderung nach Systemintegration und hoher Leistungsdichte entgegenkommt. Künftige Entwicklungen zielen darauf ab, auch die Zwischenkreisfunktion mit PLTZ-Kondensatoren zu integrieren.

6.1.6 Doppelschichtkondensatoren

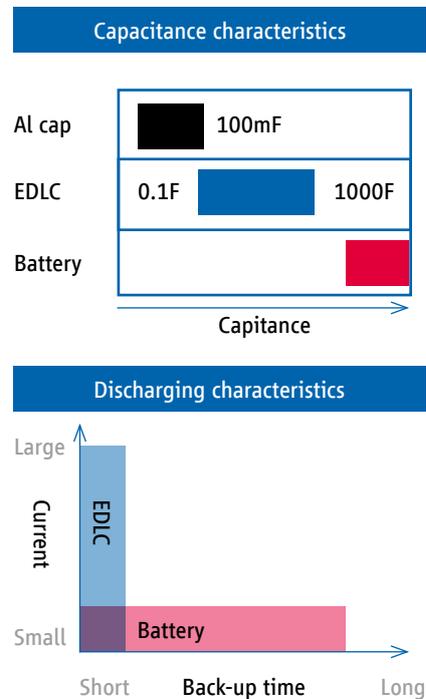
Die Nutzung erneuerbarer Energiequellen ist mit Schwierigkeiten behaftet, da die Versorgung mit Strom aus Photovoltaik und Windkraft aufgrund der Wetterabhängigkeit nicht in der geforderten Zuverlässigkeit gewährleistet ist. Um Angebot und Nachfrage auszugleichen, sind derzeit vor allem Netz- und Speichermöglichkeiten gefragt, die einerseits eine Pufferung des periodischen Stromnetzes für Wind- und Solarkraftwerk bieten, andererseits die Stromversorgung von tragbaren elektronischen Geräten bis hin zum Elektrofahrzeug sicherstellen sollen.

Die klassischen Stromspeicher wie Akkumulatoren besitzen zwar eine hohe Energiedichte, können aber nur eine begrenzte Ladung in kurzer Zeit abgeben. Bei vielen Einsätzen werden aber kurze Leistungsspitzen benötigt, was große Batterien erfordert, die auch nur unter dem Aufwand von viel Energie den gewünschten Spitzenwert liefern können. Derzeit verfügbare Technologien sind noch nicht in der Lage, Batterien schnell wieder aufzuladen, was gerade in der Automobilindustrie zu technischen Herausforderungen führt. Für die Bremsenergiespeicherung bei Hybrid- und Elektroautos, wo in kurzer Zeit

viel Energie aufgenommen werden müsste, sind Batterien bis jetzt nur sehr bedingt einsetzbar.

Ein möglicher Kandidat für diese schnell wieder aufladbaren Energiespeicher sind Doppelschichtkondensatoren (DSK), auch Superkondensatoren, GoldCaps, SuperCaps, UltraCaps, BoostCaps etc. genannt. Superkondensatoren verbinden eine hohe Leistung mit ausreichend hohen Energiedichten und sind daher als Energiespeicher vielseitig einsetzbar. Dabei ist zu beachten, dass Superkondensatoren mit bis zu mehreren 1.000 F und einer Betriebsspannung von rund 2,3 bis 5,5 V keine Filterelemente wie klassische Kondensatoren darstellen – sie sind primär Energiespeicher.

Abb. 6.14: Kapazitäts- und Entladecharakteristik



Quelle: Panasonic

Dabei erfolgt die Energiespeicherung in Form von elektrochemischen Prozessen in der Grenzschicht zwischen Elektrode und Elektrolyt und beruht vorwiegend auf der Nutzung elektrostatischer Kräfte. So wird die elektrische Energie im statischen elektrischen Feld zwischen den Elektroden und den Ionen im Elektrolyt gespeichert. Während des Ladens und Entladens bewegen sich die Ionen von einer Elektrode zur anderen. Da solche Redoxreaktionen normalerweise an Metalloxiden ablaufen, deren Metallionen mehrere Valenzzustände aufweisen, werden vorwiegend Materialien wie NiO, MnO₂ und RuO₂ eingesetzt, die die Vorteile beider Mechanismen vereinigen. Der Fortschritt bei den Doppel-

schichtkondensatoren profitiert sehr stark vom Wechsel von herkömmlichen zu nanostrukturierten Elektroden. Diese nanostrukturierten Elektroden haben eine größere Oberfläche, was die Nutzung des Elektrodenmaterials effizienter macht und die Leistungsfähigkeit erhöht.

Abb. 6.15a/b: Doppelschichtkondensator (oben) und Aufbau eines Doppelschichtkondensators (unten)



Quelle: Panasonic

6.1.6.1 Entwicklungstrends und -ziele

Neue Trends innerhalb der Unterhaltungselektronik setzen auf Leistungssteigerung und Miniaturisierung. Der Einsatz von Superkondensatoren verspricht hier eine effizientere Nutzung von Batterien und folglich eine effektive Reduzierung von Größe und Gewicht sowie eine verbesserte Leistungsfähigkeit der Endgeräte. Mit diesem Potenzial prognostiziert der Markt einen erheblichen Aufwärtstrend für das Doppelschichtkondensatoren-Geschäft bis 2024.

6.2 Induktive Bauelemente und weichmagnetische Werkstoffe

Ähnlich wie Kondensatoren dienen auch induktive Bauelemente in elektrischen Schaltungen sowohl als Energiespeicher als auch als Filterelement. Sie speichern die Energie allerdings nicht im elektrischen, sondern in einem magnetischen Feld. Insofern hat die Weiterentwicklung von magnetischen Materialien auch eine große Bedeutung für die Zukunft von induktiven Bauelementen.

6.2.1 Weichmagnetische Werkstoffe

6.2.1.1 Ferrite

Weichmagnetische Ferrite, MnZn und NiZn, gehören zu den keramischen Werkstoffen und machen ihre Existenz bereits seit über 80 Jahren in der Elektroindustrie geltend. Kerngrößen und -formen in Verbindung mit spezifischen Ferritmaterialien legen für MnZn die Kernleistung fest und definieren im Fall von NiZn die Filtercharakteristiken und deren entsprechende Verwendung für magnetische Komponenten.

Künftige Trends für MnZn-Ferrite sind stark mit den Begriffen „IoT“ (Internet of Things), „5G“ (5. Mobilfunkgeneration) und „xEV“ (Elektromobilität) verknüpft. Die neuen Halbleitertechnologien „SiC“ und „GaN“ sind die treibende Kraft in Bezug auf Downsizing und Miniaturisierung. Für Hochfrequenzanwendungen sind Ferrite die kostengünstigste Lösung für die Leistungsumwandlung, die einen hohen Wirkungsgrad bei sehr geringen Verlusten bietet.

Der Einsatz der neuen Halbleitertechnologien „SiC“ und „GaN“ erlaubt höhere Arbeitsfrequenzen; folglich wird die Entwicklung von MnZn-Ferriten mit geringen Kernverlusten in höheren Frequenzbereichen einen wesentlichen Entwicklungsschwerpunkt darstellen.

Aktuelle Neuentwicklungen von MnZn-Materialien bereichern den Markt bereits mit einem Frequenzmaximum von 5,0 MHz. Der Vorteil von höheren Schaltfrequenzen liegt in der Möglichkeit des Downsizings bei gleicher Leistungsübertragung und einer höheren Effizienz durch geringere Schaltverluste im Halbleiter.

Eine weitere Marktforderung an Ferrite speziell für Automotive-Applikationen sind Materialien für den Einsatz bei höheren Betriebstemperaturen (>150 °C) und gleichzeitig geringen Verlusten. Materialentwicklungen gehen dahin, das Verlustminimum bei entsprechenden anwendungsspezifischen Temperaturen zu platzieren.

Viele industrielle Anwendungen erfordern hohe Spannungen und Ströme. Hohe Spannungen und Ströme bedeuten aber für MnZn-Ferrite eine frühzeitige magnetische Sättigung und eine dadurch bedingte Leistungsgrenze. Um diese Grenze auszudehnen und so höhere Spannungen und Ströme zu ermöglichen, sind die Entwickler dabei, die maximale Flussdichte B_s über den gesamten Temperaturbereich zu erhöhen. Aktuelle Materialien weisen eine maximale Flussdichte von über 465 mT bei 100 °C auf, künftige Entwicklungen erreichen Werte von bis zu 480 mT bei 100 °C.

Im Automobilbereich haben sowohl elektrische als auch hybride Antriebstechnologien eine größere Anzahl an EMV-Rauschquellen als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. NiZn-Ferrite zeigen in ihrer Anwendung exzellente Filtereigenschaften zur Rauschunterdrückung über den gesamten Frequenzbereich (LW-Band, AM-Band, SW-Band und FM-Band). Mit ihrem ohmschen Widerstand (ca. 105 Ω m) ist der negative Effekt von Wirbelströmen vernachlässigbar. Die Verwendung von NiZn-Ferriten ermöglicht auch bei Frequenzen weit über 100 MHz relativ hohe Impedanzwerte. Der Trend der Elektromobilität führt zu höheren Mengen an NiZn-Ferriten, woraus sich neue Entwicklungen ergeben.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass alle neuen Entwicklungen von Ferritmaterialien und -kernen sich auf ein Downsizing und höhere Effizienz bei höheren Frequenzen und/oder höheren Temperaturen konzentrieren.

6.2.1.2 Metallische Werkstoffe (amorph, nanokristallin)

Metallische Werkstoffe aus amorphen und nanokristallinen Materialien eignen sich für den Einsatz in weiten Gebieten der Elektrotechnik und der Elektronik. Sei es als Bandmaterial (Abb. 6.16), Ringbandkern oder als induktive Komponente: Sie eröffnen jedem Entwickler die Möglichkeit, technische Lösungen für eine gestellte Aufgabe zu finden.

Bandkerne aus metallischen amorphen und nanokristallinen Werkstoffen zeichnen sich durch sehr hohe Sättigungsflussdichte B_s , sehr hohe Anfangspermeabilität μ_i , kleine Ummagnetisierungsverluste p_{Fe} und extrem geringe Magnetostraktion λ_s aus. Durch einen angepassten Herstellungsprozess sind flache (F)

(Abb. 6.17), runde (R) und rechteckige (Z) Hystereseschleifen einstellbar. Darüber hinaus weisen nanokristalline Materialien eine nur sehr geringe Änderung der Eigenschaften auch bei Betriebstemperaturen zwischen 150 und 200 °C, wie sie zum Beispiel in Automotive-Applikationen vorkommen, auf. Die „Änderung der Eigenschaften“ ist dabei sowohl im Sinne von Alterung als auch im Sinne von stabilen Eigenschaften über einen weiten Temperaturbereich zu verstehen.

Abb. 6.16: Ausführungsbeispiele für nanokristalline Bandmaterialien in verschiedenen Breiten

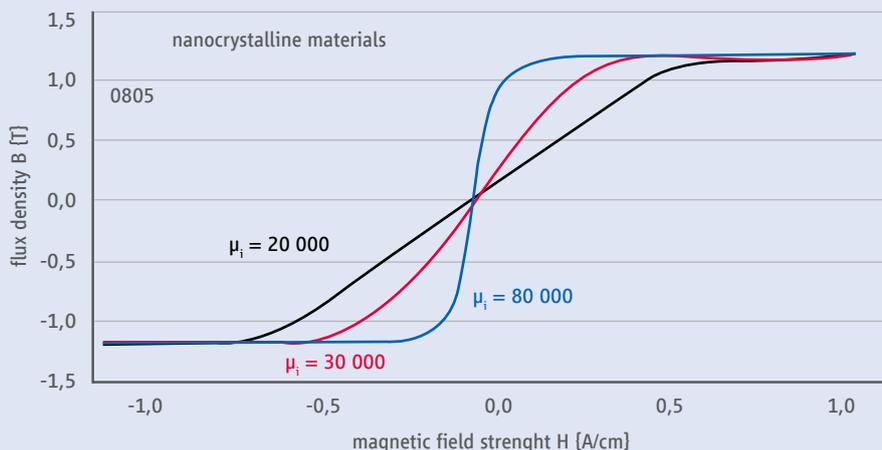


Quelle: Vacuumschmelze

Im Wesentlichen finden sich die Materialeigenschaften in Form kompakter Baugröße oder hoher Performance in den Komponenten wieder.

Der typische Betriebsfrequenzbereich, in dem die technischen Vorteile von metallischen amorphen und nanokristallinen Werkstoffen zum Tragen kommen, liegt für Übertrager zwischen 10 und 100 kHz. Für Gleichaktrosseln zum Beispiel in EMV-Anwendungen reicht er bis 100 MHz und höher.

Abb. 6.17: Typische Hystereseschleifen von nanokristallinen Materialien (verschiedene μ_i -Niveaus)



Quelle: Vacuumschmelze

Ein aktueller Trend bei nanokristallinen Materialien besteht in dem Bestreben, die Banddicke von derzeit etwa 20 μm auf Werte unter 15 μm zu reduzieren. Hierdurch werden sich weitere Möglichkeiten eröffnen, um zum Beispiel das Frequenzverhalten von Gleichaktrosseln zu verbessern oder die Verlustleistung von Leistungsübertragern zu reduzieren und so für diese den Betriebsfrequenzbereich in den Bereich 150 bis 200 kHz zu erweitern. Alternativ kann man im Fall von Gleichaktrosseln kompaktere Kerne mit vergleichbaren HF-Eigenschaften realisieren.

Ein weiterer Schritt in Richtung technologische Optimierung stellt die Entwicklung von speziellen Legierungsvarianten mit mittleren und kleinen Permeabilitäten im Bereich 2.000 bis 12.000 dar. Hiermit soll den zunehmenden Anforderungen nach höherer Sättigungsfestigkeit zum Beispiel von Gleichaktrosseln Rechnung getragen werden.

Für den Einsatz in DC-festen Anwendungen (z. B. Speicher- und Glättungsrosseln), die künftig verstärkt an Bedeutung insbesondere im Automotive-Bereich gewinnen, werden sättigungsfeste niederpermeable Kerne benötigt, deren Permeabilitätswerte typischerweise in der Größenordnung 100 bis einige 1.000 liegen. Bei gewöhnlich hochpermeablen nanokristallinen Kernen kann dies beispielsweise durch das Teilen bzw. Schneiden von Kernen (Schnittbandkerne) und Einfügen eines Luftspalts erreicht werden. Schwerpunktmäßig werden Schnittbandkerne, auch „Cut cores“ genannt, eher im mittleren und oberen Leistungsbereich eingesetzt.

Alternativ kommt im unteren Leistungsbereich künftig verstärkt die Verwendung von speziellen nanokristallinen Bandmaterialien in Betracht, deren Herstellungsprozess auf einem neuartigen, zugspannungsinduzierten Fertigungsverfahren bei hohen Temperaturen beruht. Als besonders vorteilhaft erweist sich hierbei die sehr niedrige Verlustcharakteristik bei gleichzeitig hoher Gleichstrom-Vormagnetisierung (hohes B_s). Beide Eigenschaften wirken sich wiederum äußerst positiv auf die Baugröße bei Applikationen mit höherer Frequenz und höheren Wechselstromanteilen aus.

Weiterführende Literatur zu metallischen Werkstoffen aus amorphen und nanokristallinen Materialien: R. Hilzinger, W. Rodewald; Magnetic Materials, Publicis Publishing Erlangen, 2013, ISBN 978-3-89578-352-4.

6.2.2 Induktive Bauelemente

6.2.2.1 Drosseln

a. Gleichaktrosseln (EMV)

Gleichaktrosseln (Common Mode Chokes (CMC), stromkompensierte Drosseln) wurden in der Vergangenheit vor allem zur Entstörung von Schaltnetzteilen, von Frequenzumrichtern für Antriebe (Drives) im industriellen Umfeld und von unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USV) verwendet. In den letzten Jahren sind aus den Bereichen Erneuerbare Energien (Solarenergie, Windenergie) und Automotive zusätzliche Anwendungsfelder entstanden, die auch künftig wachsen werden. Das Erstere im Zuge des Ausbaus der erneuerbaren Energien, das Zweitgenannte im Zusammenhang mit dem Wachstum, das für die Elektromobilität erwartet wird.

Ein großes Einsatzgebiet für Gleichaktrosseln sind Datennetze im Automobil. Über Netzwerke wie CAN, FlexRay und Automotive Ethernet findet der Daten-/Informationsaustausch zwischen den einzelnen Steuergeräten statt. Da die Bordelektronik im Auto von sehr vielen und unterschiedlichen Störungen beeinflusst wird, müssen die Datenleitungen über entsprechend geeignete Drosseln entstört werden.

Ein weiteres Anwendungsfeld, das zu wachsen beginnt, sind Frequenzumrichter für elektrische Schiffsantriebe als Ersatz für „schmutzige“ Schiffsdiesel.

Wegen der hohen Permeabilität sind nanokristalline Materialien besonders gut für geschlossene Kerne (Ringbandkern, Ovale etc.) in Gleichaktrosseln einsetzbar. Hier ist eine hohe Dämpfung bis jenseits 100 MHz erzielbar (kapazitätsarmer Aufbau vorausgesetzt). Da der Dämpfungsmechanismus bereits ab dem 100-kHz-Bereich auf Absorption beruht, hat man wenig Probleme mit auf Reflexion und parasitären Pfaden beruhenden Verkopplungen zwischen Filtereingang und Filterausgang.

Die folgenden Trends lassen sich erkennen:

Schaltnetzteile (kleine Leistung): Zunehmend höhere Schaltfrequenz (100 kHz bis >1 MHz) und höhere Betriebstemperatur, daher wachsender Bedarf an kompakten CMCs mit guter Performance bei hohen Frequenzen und hohen Temperaturen.

Frequenzumrichter (Drives): Zu erwartende Trends sind größere Leistungen und größere Schaltfrequenzen (Halbleiter aus SiC oder GaN), im Fall von SiC auch höhere Spannungen. Dafür sind geeignete Produkte für die Entstörung mit

guter HF-Performance erforderlich. Solange man nicht bei einer Einleiterlösung ist, erfordern die notwendigen HF-Eigenschaften Wickeltechnologien für massive Starkdrähte anstelle von Litzenbewicklungen.

Die gleichen Trends sind bei Frequenzumrichtern für Schiffsantriebe und bei Wandlern für Schiffsbordnetze sowie auch für Flugzeugbordnetze zu erwarten, hier ist jedoch die Leistung kleiner.

Solar/Wind: Für PV-Wechselrichter im Leistungsbereich 100 kW bis einige MW ist von zunehmend größeren Lastströmen (einige 100 A bis über 1.000 A) auszugehen und, um diese in Grenzen zu halten, unter Einsatz von SiC-Schaltungstopologien von DC-Spannungen von 1.500 bis 2.000 V auf der Panel-Seite (bisher eher 1.000 V). Bei sehr hohen Leistungen/Strömen werden zunehmend Einleiter-CMCs in Form von Kernstapeln verwendet. Wegen der bei diesen Leistungen großen Panelflächen und des über deren Kapazität abfließenden Ableitstroms (50 Hz im CM) sind sättigungsfeste Lösungen notwendig (s. o: Kerne mit mittlerer/niedriger Permeabilität).

Das gilt grundsätzlich ebenso für die Wandler in Windgeneratoren. Hier liegen die CM-Ströme aber eher in Form von kurzen hohen Impulsen vor (ähnlich wie bei Lagerströmen).

Automotive:

- In konventionellen Fahrzeugen (Verbrennungsmotor) werden für zahlreiche Anwendungen im Bereich von Steuerelektronik und Servomotoren CMCs zur Entstörung benötigt. Anforderungen: hohe Betriebstemperatur, Dämpfung bis in den 100-MHz-Bereich, mechanisch stabil, Stromstärke <50 A (mit 2- bis 5-facher Überlast im Sekundenbereich), niedrige Spannung (<50 V). Vor allem wegen der potenziell hohen Betriebstemperatur sind die Ansprüche an das Kernmaterial hier besonders hoch; die Anzahl dieser Anwendungen wird in den nächsten Jahren weiter zunehmen.
- Mit zunehmender Verbreitung von Hybrid- und erst recht von vollelektrischen Fahrzeugen verschieben sich diese Anforderungen in Richtung deutlich höherer Ströme (100 – 1.000 A) und höherer Spannungen (1.000 V und mehr); Betriebstemperatur- und Frequenzbereich bleiben unverändert. Auch hier bieten sich – wie auch schon bei Solar/Wind – Einleiter-CMCs an; diese müssen aus heutiger Sicht sättigungsfest gegen CM-Störimpulse im Bereich >10 A / <1 µs sein.

- Für die zugehörige Ladeinfrastruktur sind die gleichen Trends zu erwarten wie für Frequenzumrichter (Drives) (siehe oben).
- Aufgrund der Anforderungen bezüglich des Volumens und des Gewichts im Fahrzeug werden zukünftig integrierte Gleichtakt- und Gegentaktdrosseln an Bedeutung gewinnen. Hierbei wird es möglich sein, mehrere klassische Bauelemente durch ein Bauteil zu ersetzen. Entscheidend für Bauteilkonzepte mit integrierten Funktionen sind flexible Formen der magnetischen Materialien und die Möglichkeit der Optimierung mittels Simulation.
- Neue High-End-Anwendungen im Fahrzeug, wie zum Beispiel kamerabasierte Fahrerassistenzsysteme, erfordern Datennetzwerke mit immer höheren Übertragungsraten. So geht die Entwicklung vom etablierten CAN-Bus mit 1 Mbits in Richtung Multi-Gigabit-Automotive-Ethernet. Neben der anspruchsvollen elektrischen Performance werden hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit und mechanische Stabilität der Drosseln gestellt. Verlangt werden miniaturisierte Bauformen mit einer Grundfläche von nur 3,2 mm × 2,5 mm und Temperatureinsatzbereiche bis 150 °C.

Abb. 6.18a–d: Ausführungsbeispiele für Gleichtaktdrosseln (CMC) mit nanokristallinen Werkstoffen: 3-phasige CMC liegend/stehend, CMC-Kerne rund/oval



Quelle: Vacuumschmelze

Weiterführende Literatur zu Gleichtaktdrosseln (CMC) mit nanokristallinen Kernen: H. Schwenk, J. Beichler, W. Loges, C. Scharwitz; Actual and Future Developments of Nanocrystalline Magnetic Materials for Common Mode Chokes and Transformers, PCIM Europe, 2015, p. 209–216.

Abb. 6.19: Gleichtaktdrosseln mit Ferritkern



Quelle: Schaffner

Abb. 6.20a–g: Ausführungsbeispiele für Gleichtaktrosseln (CMC) auf Ferritkernbasis mit Ring- und Rahmenkernen



Quelle: TDK Electronics

Abb. 6.21a/b: Ausführungsbeispiele für Gleichtaktrosseln (CMC) auf Ferritkernbasis mit Ring- und Stabkern für Automotive-Datennetzwerke



Quelle: TDK Electronics

b. Speicher- und Glättungsrosseln

Speicher- und Glättungsrosseln finden ihre Anwendung hauptsächlich in DC-festen Anwendungen, in denen zum Beispiel elektrische Energie zwischengespeichert, der Ausgangsstrom geglättet oder Differential-Mode-Störungen (Gegentaktstörungen) gedämpft werden sollen.

Gegenwärtig haben getaktete Netzteile herkömmliche, auf 50-Hz-Transformatoren basierende Netzteile abgelöst. Gründe hierfür sind neben der höheren Effizienz die Baugröße und das geringere Gewicht. Mit dazu beigetragen haben die Halbleiterhersteller, die eine Vielfalt an integrierten Schaltkreisen anbieten und somit das Design von getakteten Schaltungen vereinfacht haben. Schaltnetzteile und Schaltregler sind die Hauptanwendungen für Speicherdrosseln. Zweck der Speicherdrossel ist es, die elektrische Energie zu speichern, indem die Spule geladen und später wieder entladen wird. In Schaltnetzteilen, wo Schaltspannungen höherer Frequenzen mit Gleichspannung überlagert sind, speichern sie die magnetische Energie in einer spaltenförmigen Unterbrechung des Magnetkerns, bis sie wieder abgegeben wird. Dieser Zyklus kommt dadurch zustande, dass die angelegte Spannung über die Induktivität verändert wird. Es muss sich also mindestens die Spannung an einer Seite der Induktivität ändern, um den Zyklus zu erhalten. Dabei ist zu beachten, dass der Anschluss „start of winding“ der Speicherdrossel an den Schaltknoten angeschlossen ist. Dieser „unruhige“ Knoten ist dann

mit den inneren Windungen der Speicherdrossel verbunden. Die äußeren Windungen sind folglich mit der „ruhigen“ Ausgangsspannung verbunden und schirmen so die kapazitiven Koppelungen der inneren Windungen weitestgehend ab. Viele Speicherdrosseln haben Markierungen auf dem Gehäuse, die die Anschlüsse kennzeichnen.

Anwendungen mit hoher Gleichspannung benötigen Glättungsdrosseln – auch „Ripple-Filter“ oder „Smoothing Chokes“ genannt. Sie werden in erster Linie in Stromrichterschaltungen zur Glättung des Gleichstroms verwendet. Glättung bedeutet hierbei, dass die steilen Anstiege und Abstiege der Gleichströme gleitend erfolgen (gemäß der physikalischen Bedingung, dass sich Ströme in Induktivitäten nur stetig und nicht sprunghaft ändern) und damit Stromlücken verhindert werden. Glättungsdrosseln dienen als Energiespeicher in den stromlosen Pausen, die zum Beispiel bei einpulsiger Gleichrichtung entstehen. Auch bei zwei- und dreipulsigen Schaltungen ist die Stromwelligkeit oft so hoch, dass eine Glättung des Stromes erforderlich ist. Die Steilheit und der Maximalwert des Kurzschlusses reduzieren sich abhängig von der Induktivität, deren Höhe wiederum systemabhängig ist. Bei langen Übertragungsleitungen liegen die Werte typischerweise im Bereich 100 bis 300 mH, während sie für Kurzkupplungen von 30 bis 80 mH verortet werden können.

Weiterhin werden Glättungsdrosseln zur Filterung von Oberschwingungen und für die Begrenzung des Fehlerstroms im Falle eines Kurzschlusses verwendet. In der Regel haben sie einen Luftspalt im Blechpaket und behalten dadurch bei verschiedenen Belastungen eine nahezu gleichbleibende Induktivität.

Der Einsatz von Werkstoffen mit sehr niedrigen Verlustcharakteristiken – bei gleichzeitig hoher Gleichstrom-Vormagnetisierung – ermöglicht den Aufbau von besonders kompakten Schaltkreisen mit exzellentem Wirkungsgrad.

Weitere Optimierungen der Produkte im Bereich Drosseln werden in den nächsten Jahren wohl stark durch die Forcierung der Elektrifizierung des Antriebs im Bereich Kfz getrieben. Dabei geht es um die rein elektrische Leistung (inkl. Größe) der Drosseln, die von den verwendeten Materialien geprägt ist. Hier können je nach Anwendungsfall Schnittbandkerne, Pulverkerne basierend auf Eisenlegierungen oder neue, sättigungsfeste Ferritmaterialien von Vorteil sein. Daneben werden aber auch Zuverlässigkeit und Verarbeitbarkeit (SMD) dieser Bauelemente weiterentwickelt.

c. Vielschicht-Induktivitäten

Der Einsatz elektronischer Schaltungen in den unterschiedlichsten Applikationen wird auch in der Zukunft stark zunehmen. Daraus ergibt sich ebenfalls ein steigender Bedarf an DC/DC-power supplies.

Weiterhin werden vermehrt RF-Funktionalitäten (Radio Frequency) in Consumer-, Automotive- und Industrieanwendungen verbaut. Eine Vielzahl verschiedener Bänder benötigt ebenfalls umfangreichere Lösungen zur Impedanzanpassung der Antennen.

Aufgrund der erhöhten Funktionalität in all diesen Anwendungen und der stetig wachsenden Integrationsdichte entsteht ein Bedarf an kleineren und gleichzeitig kostengünstigeren Induktivitäten, die eine ausreichende Zuverlässigkeit für die jeweilige Applikation besitzen.

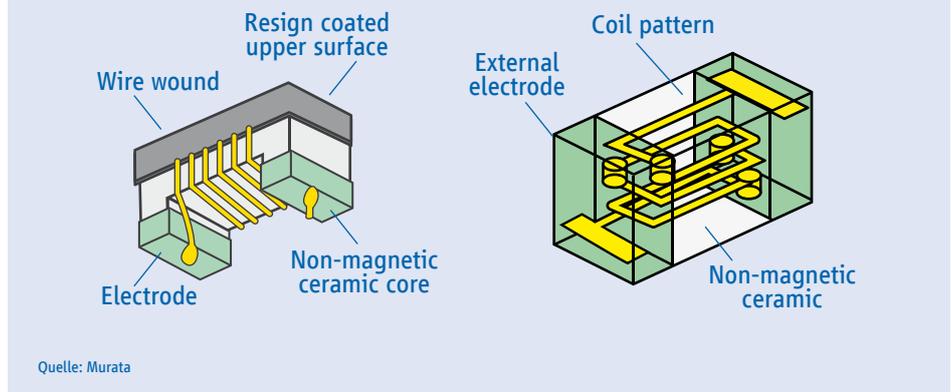
Die Multilayer-Technologie ist eine kostengünstige Option, Induktivitäten entweder auf Ferrit-Basis oder aber mit magnetisch neutralem Kernmaterial zu fertigen. Die feineren Keramikstrukturen der Kerne erhöhen die Zuverlässigkeit und ermöglichen einen breiten Einsatz auf verschiedenen Zielmärkten. Weiterhin werden die möglichen Einsatztemperaturen nach oben ausgeweitet. Im Vergleich zu herkömmlicher drahtgewickelter Technologie ist diese Aufbauart billiger und resultiert in kleineren Bauformen.

Vielschicht-Power-Inductor: Seit einigen Jahren werden vermehrt höhere Schaltfrequenzen bei den DC/DC-Controllern verwendet, was zur Folge hat, dass niedrigere Induktivitätswerte eingesetzt werden können.

Ein besonderes Merkmal der Multilayer-Technologie stellt die kleine Baugröße, gepaart mit niedriger Bauhöhe, dar. So wird zum Beispiel die Bauform 0805 (2012) bei einer Höhe von 0,6 mm realisiert. In der Regel können so Induktivitätswerte unterhalb von 10 μH erreicht werden, die für moderne DC/DC-Controller mit Schaltfrequenz in MHz-Größenordnung vor allem für niedrigere Leistungen hervorragend geeignet sind.

Natürlich werden diese Funktionen hauptsächlich bei kleineren tragbaren Anwendungen wie z. B. Smartphones benötigt, jedoch findet diese Technologie mittlerweile auch vermehrt Einzug in den Bereich Automotive und Medizintechnik.

Abb. 6.22: Vergleich des Aufbaus von drahtgewickelten und Vielschicht-Induktivitäten



Vielschicht-RF-Inductor: Erhöhte Vernetzung innerhalb verschiedener Applikationen über Funkstrecken erhöht ebenfalls den Bedarf an Anpassungsbauteilen.

So sind zum Beispiel bei einem typischen E-Call-System (mittlerweile verpflichtend) in neuen Fahrzeugen bis zu 60 solcher Induktivitäten verbaut.

Hier müssen sowohl vonseiten der Zuverlässigkeit als auch der Baugröße und nicht zuletzt der Kosten neue Anforderungen für solche Induktivitäten berücksichtigt werden.

Auch hierfür ist die Multilayer-Technologie bestens geeignet. Es können bei geeignetem Design einer 0402-Bauserie durchaus Güterwerte erreicht werden, die einer drahtgewickelten Spule ähneln. Dies eröffnet Möglichkeiten, kleinere Bauteile einzusetzen bzw. Kosten einzusparen.

Vermeint bewegt sich der Trend dieser Funktionalität (Power wie auch RF) weg von einem diskreten Aufbau hin zu einem Modulansatz bzw. zu einer Integration in der Platine selbst. Auch so kann die Bauteildichte erhöht und somit eine Flächenreduzierung auf dem PCB erreicht werden. Hier bleibt zu berücksichtigen, dass andere mechanische Anforderungen beim Verbau herrschen, die auch später im Einsatz die Lebensdauer des Bauteils beeinflussen.

d. Integrierte Induktivitäten

Für die Miniaturisierung in der Elektronik wird schon seit vielen Jahren der Ansatz verfolgt, einzelne diskrete Bauteile in die Platinen zu integrieren. Untersuchungen hierzu betrafen unter anderem auch magnetische Bauteile wie Drosseln, Übertrager oder andere Induktivitäten.

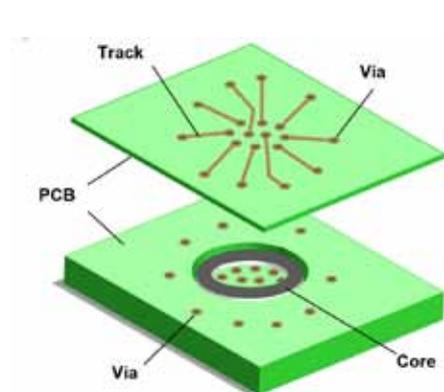
Dabei spielt einerseits die Annäherung an die üblichen Werkstoffeigenschaften wie Permeabilität, Verluste und Ähnliches eine Rolle, andererseits die Anpassung der Werkstoffe an die geometrischen und technologischen Erfordernisse, also die „dünne“ Wandstärke oder auch die Verpressbarkeit zum Beispiel bei der Herstellung von Leiterplatten.

Die in der Platine einfach zu realisierenden planaren Spulen und darüber bzw. darunter angeordnete weichmagnetische Schichten lassen keine verkettete Durchdringung zu, sodass es zwangsläufig Kompromisse bei der Performance gibt. Etwas aufwendiger sind Ansätze, magnetische Folien mit einem Loch (geschlossene Magnetkreise) zu integrieren und die „Wicklungen“ als Kombinationen aus Leiterbahnen („tracks“) und Durchkontaktierungen („vias“) darzustellen (Abb. 6.23).

Hier hat sich unter anderem gezeigt, dass die technologisch unkompliziert zu verarbeitenden Ferrit-Polymer-Compound-Materialien (FPC) eher zu niedrige Permeabilitäten aufweisen, während andere Werkstoffe mit deutlich höheren Werten für Permeabilität und Sättigungsflussdichte durch ihre Magnetostriktion teils empfindlich auf die Verarbeitungsprozesse reagieren und die üblichen Eigenschaften somit nicht immer erreicht werden.

Die Einbindung von magnetischen Bauteilen in Platinen wird immer wieder an den Fortschritten bei der Entwicklung und Aufbereitung von neuen Werkstoffen zu spiegeln sein. Durch die Zunahme der Elektronik zum Beispiel im Automobil, aber auch aufgrund der anhaltenden Forderungen nach Miniaturisierung ist eine rege Entwicklung von neuen Produkten zu erwarten.

Abb. 6.23: In eine Platine integrierte Ringkern-Induktivität (schematische Darstellung)



Quelle: Vacuumschmelze

6.2.2.2 Übertrager und Transformatoren a. Leistungsübertrager

Leistungsübertrager bis 10 kW: Je nach Anwendungsfall werden verschiedene Topologien von DC/DC-Konvertern eingesetzt (z. B. step down, single ended flyback, single ended forward, push pull). Die Leistungsinduktivität (Übertrager oder Drossel) stellt das zentrale Bauelement zur Energiewandlung und in Bezug auf Sicherheitsanforderungen (sichere galvanische Trennung) dar.

Über alle Applikationen hinweg ist der Trend zu höheren Frequenzen und damit auch zur Miniaturisierung erkennbar. Dies setzt zum einen verlustarme Hochfrequenzmaterialien voraus, zum anderen wird aber auch die Wickel- und Terminierungstechnologie wichtiger. Ein reproduzierbarer Aufbau der Wicklung und sehr geringe Übergangswiderstände können hier einer Verbesserung der Eigenschaften dienen.

Speziell im Bereich der Übertrager gibt es wenig Standardisierung und viele kundenspezifische und damit zum Teil sehr lohnintensive Lösungen. Aufgrund weltweit steigender Lohnkosten wird sich der Trend zur Automatisierung und damit auch der Standardisierung weiter durchsetzen.

Abb. 6.24a/b: Leistungsübertrager für Schaltnetzteile: SMD-Transformatoren für 50 W (oben) und für 3 kW (unten)



Quelle: TDK Electronics

Leistungsübertrager >10 kW – Erhöhung der Leistungsdichte: Leistungsübertrager, die im Bereich von 10 bis 120 kW arbeiten, finden ihre Anwendung überwiegend in elektrischen Antrieben zum Beispiel für Elektrofahrzeuge und Industriemrichter, aber auch in der zukünftigen flächendeckenden Ladeinfrastruktur und in sogenannten Smart Grids. Getrieben vom technischen Fortschritt bei modernen Leistungshalbleitern werden sich die Betriebsfrequenzen von derzeit etwa 50 kHz in Richtung 100 kHz bewegen.

Der damit verbundene Wunsch nach Erhöhung der Leistungsdichte bei Leistungsübertragern (größere Lastströme) führt zu der Notwendigkeit, Werkstoffe mit hoher Sättigungsflussdichte bei gleichzeitig reduzierter Verlustleistung zu entwickeln. In Verbindung mit hochwärmeleitfähigen Konstruktionsmaterialien und verbesserten Kühlkonzepten kann eine deutliche Steigerung der Leistungsdichte erzielt werden (Abb. 6.25). Die für die jeweilige Anwendung erforderliche rechnerische Optimierung der Entwärmung wird in Zukunft vermehrt durch FEM-Simulationen unterstützt.

**Abb. 6.25: Leistungsübertrager
40 kW/50 kHz (~ 2 dm³)**



Quelle: Vacuumschmelze

Weiterführende Literatur zu Leistungsübertragern mit nanokristallinen Kernen: H. Schwenk, J. Beichler, W. Loges, C. Scharwitz; Actual and Future Developments of Nanocrystalline Magnetic Materials for Common Mode Chokes and Transformers, PCIM Europe 2015, p. 209–216.

Bei Leistungen oberhalb 120 kW liegen die typischen Schaltfrequenzen zurzeit bei ca. 20 kHz. Auch hier besteht die Tendenz, den Wirkungsgrad durch die Erhöhung der Arbeitsfrequenzen zu steigern, was durch technische Innovationen in der SiC-Halbleitertechnologie fortlaufend unterstützt wird.

Im Hinblick auf den erforderlichen weichmagnetischen Kern für den Leistungsübertrager ist der Einsatz von teilbaren Kernformen unumgänglich. Die Verwendung zum Beispiel von Schnittbandkernen (Cut cores) (Abb. 6.26) erweist sich hierbei als außerordentlich vorteilhaft. Bei hoher Sättigungsflussdichte des verwendeten Werkstoffs können die Transformatorwicklungen mit relativ kleinen Windungszahlen ausgeführt und somit niedrige Kupferverluste, insbesondere bei höheren Strömen, eingestellt werden. Niedrige Ummagnetisierungsverluste bei höheren Frequenzen tragen gegebenenfalls zusätzlich zur technischen Optimierung bei.

**Abb. 6.26: Schnittbandkern (Cut core)
150 kW/20 kHz (~ 6 kg)**



Quelle: Vacuumschmelze

b. Gate-Drive-Übertrager

Erneuerbare Energien, Automobilelektronik und elektrische Antriebe sind die typischen Einsatzgebiete für Ansteuerübertrager, die in Fachkreisen auch „Gate-Drive-Übertrager“ genannt werden. Sie werden benötigt, um die galvanische Trennung von Primär- und Sekundärkreisen beispielsweise in Photovoltaik-Anlagen, Steuergeräten und Industrieumrichtern sicherzustellen.

Während die reine Signalübermittlung hierbei mehr und mehr in den Hintergrund rückt, spielt die potenzialgetrennte Übertragung der Ansteuerenergie für Si-, SiC- und GaN-Leistungshalbleiter (einige Watt) bei zunehmend höheren Temperaturen eine immer wichtiger werdende Rolle. Gleichzeitig geht der Trend hin zu höheren Betriebsspannungen und -frequenzen. Hinzu kommt der Wunsch nach weiterer Miniaturisierung von bereits bestehenden Designs, die heute meist in SMT am Markt erhältlich sind.

Neben den normativen Vorgaben und den verwendeten mechanischen Konstruktionsstoffen wird die Größe in erheblichem Maße von dem magnetischen Kernmaterial bestimmt. Hierbei kommt es auf hohe Flussdichte und möglichst geringe Kernverluste an. Minimale Alterungseffekte im gesamten Temperaturbereich sind wünschenswert. Die Verwendung zum Beispiel von nanokristallinen Materialien ermöglicht das Design von sehr kompakten und temperaturstabilen Übertragern mit relativ kleinen Windungszahlen, woraus wiederum niedrige Koppelkapazitäten und somit hohe Werte für die Übersprechdämpfung resultieren (Abb. 6.27).

Abb. 6.27: Gate-Drive-Übertrager
6 W / 100 kHz ($U_{PD,eff} = 1,5$ kV)



Quelle: Vacuumschmelze

Abb. 6.28a/b: Gate-Drive-Übertrager:
Standard (oben) und mit erhöhten
Luft- und Kriechstrecken (unten)



Quelle: TDK Electronics

c. Stromtransformatoren

Jeder Haushalt hat mindestens einen Energiezähler, der die verbrauchte elektrische Energie in kWh misst. In Deutschland ist dies meist ein Ferraris-Zähler – ein elektromechanischer Zähler mit einer Aluminiumdreh Scheibe und einem Rollenzählwerk. Um den künftigen Anforderungen sowohl einer dezentralen Energieversorgung (u. a. Photovoltaik, Wind, Smart Grid etc.) als auch eines zeitnahen Datenaustauschs zwischen Energieversorgern, Netzbetreibern und Verbrauchern gerecht zu werden, sollen künftig multifunktionale elektronische Energiezähler, sogenannte intelligente Zähler, zum Einsatz kommen. Weit verbreitet ist hierfür auch der Begriff „Smart Meter“.

Das ideale Prinzip für die präzise Erfassung von Strömen über den gesamten Messbereich basiert auf dem Einsatz von Stromtransformatoren mit speziell an die technischen Bedürfnisse angepassten weichmagnetischen Kernen aus amorphen bzw. nanokristallinen Werkstoffen. Optimale Stromwandler zeichnen sich aus durch hohe Linearität, enge Toleranzen, temperaturstabile Eigenschaften, hohe magnetische Sättigungsfestigkeit und Unempfindlichkeit gegenüber Störströmen. Hierdurch wird der Aufbau von kompakten und robusten Energiezählern mit sehr hoher Messgenauigkeit ermöglicht. Die sichere galvanische Trennung vom Netzpotenzial wird durch konstruktive Maßnahmen in der Designphase sowie durch ein innovatives Moulding-Verfahren des Stromtransformators sichergestellt.

Internationale Vorschriften wie zum Beispiel IEC 62053 oder ANSI C12.xx erfordern den Einsatz von Stromtransformatoren mit unterschiedlicher Gleichstromfestigkeit, was die Verwendung von weichmagnetischen Werkstoffen mit unterschiedlichen Permeabilitätsniveaus bedingt. Auf Basis des weitgehend einheitlichen Herstellungsprozesses von nanokristallinen Materialien lassen sich mithilfe von speziellen Wärmebehandlungsmethoden je nach finalem Anforderungsprofil die erforderlichen unterschiedlichen Permeabilitäten einstellen. Die Beibehaltung der hohen Linearität stellt hierbei eine besondere Herausforderung dar.

Je nach Einsatz in ein- oder mehrphasigen Systemen ist die Zusammenfassung von mehreren Komponenten zu sogenannten Modulen oder Assemblies möglich (Abb. 6.29).

In den USA, Asien und auch in einigen EU-Ländern ist die Substitution von Ferraris-Zählern durch Smart Meter bereits weit vorangeschritten. In Deutschland wird mit der flächendeckenden Einführung der intelligenten Energiezähler in den nächsten Jahren gerechnet.

Abb. 6.29a–c: Verschiedene Ausführungen von Stromtransformatoren für elektronische Energiezähler



Quelle: Vacuumschmelze

6.2.2.3 Stromsensoren

In der Leistungselektronik wird die Messung von Gleich- und Wechselströmen von einigen Ampere bis jenseits einiger 100 A immer wichtiger. Für die Erfassung zum Beispiel von DC- und AC-Strömen in Photovoltaik-Wechselrichtern oder von Motorströmen in Frequenzumrichtern gewinnt der Einsatz von Stromsensoren immer mehr an Bedeutung. Die Genauigkeit der Stromerfassung spielt hierbei eine große Rolle, um zum Beispiel Einspeiseströme in das öffentliche Netz oder Motordrehmomente in Antrieben präzise bestimmen zu können. Auch der Einsatzbereich von Leistungshalbleitern lässt sich mithilfe einer exakten Stromerfassung besser ausnutzen.

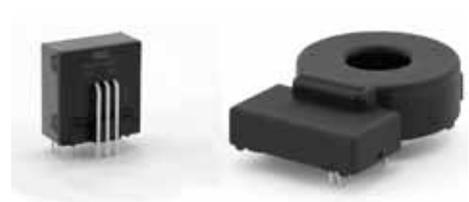
Besonders präzise Messergebnisse liefern Stromsensoren nach dem Kompensationsprinzip (closed loop) mit magnetischer Sonde und integrierter Auswertelektronik. Sie messen praktisch alle Stromformen von Gleichstrom bis zu Wechselströmen im Bereich bis zu 200 kHz, und das quasi verlustfrei. Sie bieten außerdem eine inhärente galvanische Trennung zwischen Last- und Signalstromkreis und erfüllen dabei einschlägige Normen wie beispielsweise EN 61800 oder UL 508. Typische Messbereiche reichen von einigen Ampere bis zu 2.500 A. Ihr Gesamtfehler liegt unter 0,4 Prozent, der Linearitätsfehler unter 0,1 Prozent. Die Temperatur- und die Langzeitstabilität der Offsetgrößen liegen im Bereich einiger 100 ppm. Diese Genauigkeiten werden von konkurrierenden Messprinzipien wie Hall-Effekt-Sensoren oder Shunts mit galvanischer Trennung nicht erreicht.

Der Kern der Magnetsonde, auch „Fluxgate-Sonde“ genannt, besteht aus einem etwa 20 µm dünnen Streifen aus einem amorphen Werkstoff mit Z-förmiger Hystereseschleife, der eine für die Anwendung optimale Kombination aus har-

tem Sättigungsverhalten, hoher Permeabilität im nicht gesättigten Zustand und niedrigen Verlusten bietet. Der Hauptmagnetkern des Sensors besteht aus einer Nickel-Eisen-Legierung mit einer sehr geringen Koerzitivfeldstärke, wodurch Offset und Hysterese des Sensors niedrig gehalten werden können.

In bestimmten Konfigurationen von Photovoltaik-Anlagen und auch in der künftigen Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge kommt der Überwachung von Ableitströmen bzw. der Erfassung von Fehlerströmen eine besondere Bedeutung zu. Zur Sicherstellung von Überwachungs- und Schutzfunktionen (Personen- und Anlagenschutz) kommen sogenannte allstromsensitive Differenzstromsensoren (AC/DC-DI-Sensoren) zum Einsatz, an die besonders hohe Anforderungen bezüglich Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit gestellt werden. Diese werden erreicht durch eine spezielle Auswertelektronik in Verbindung mit den magnetischen Eigenschaften der eingesetzten Materialien.

Abb. 6.30a/b: Ausführungsbeispiele für Stromsensoren: Kompensationsstromsensor (100 A), allstromsensitiver Differenzstromsensor (AC/DC DI-Sensor, 6 mA)

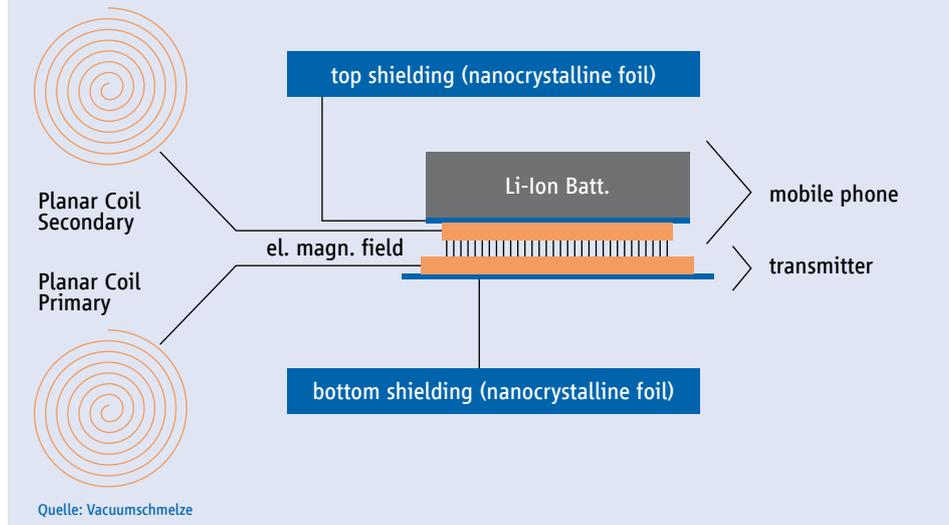


Quelle: Vacuumschmelze

6.2.3 Komponenten für Wireless Charging

Mit einer Patenterteilung über drahtlose Energieübertragung wurde bereits gegen Ende des 19. Jahrhunderts die technische Grundlage für das induktive Laden gelegt. Im Bereich der Smartphones erlebt das Prinzip nun ein echtes Revival. Eine wesentliche Komponente hierbei ist der Einsatz eines weichmagnetischen Materials für die magnetische Schirmung. Diese dient dazu, das Magnetfeld auf einen vorgegebenen Raum zwischen Sender (Transmitter) und Empfänger zu begrenzen und damit die Umgebung vor einem ungewollten Energieeintrag in andere Komponenten wie ICs oder Akkus sowie Mensch und Tier zu schützen.

Abb. 6.31: Prinzipielle Darstellung der Schirmwirkung beim Laden eines Mobiltelefons



Es gibt verschiedene Materialien, die für eine magnetische Schirmung verwendet werden können. Die optimale Schirmwirkung bei gleichzeitig minimaler Materialdicke lässt sich zum Beispiel mit nanokristallinen Werkstoffen (Abb. 6.32) erzielen – ein Aspekt, der insbesondere den Trends zu zunehmend dünneren Mobiltelefonen und der erweiterten Einsetzbarkeit in mehreren Frequenzbändern Rechnung trägt.

Abb. 6.32: Mehrlagig laminiertes nanokristallines Material



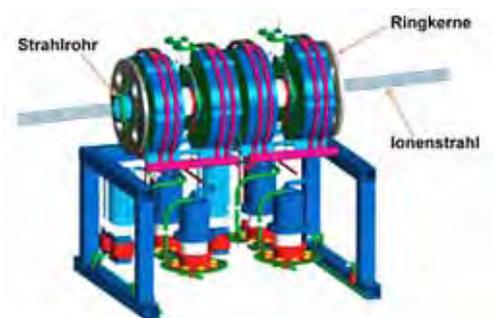
Quelle: Vacuumschmelze

Neben den Einsatzmöglichkeiten in elektronischen Mobilgeräten wie Smartphones, Tablets und Wearables gibt es eine Reihe weiterer Anwendungspotenziale. So existieren bereits interessante Ansatzpunkte in den Bereichen der Medizintechnik, der Industrieelektronik und der Automobilindustrie, wo die kabellose Energieübertragung beispielsweise in Implantaten, in gekapselten Messgeräten und Werkzeugen und beim Laden von elektrischen Fahrzeugen eine zukunftsweisende Rolle spielen kann.

6.2.4 Kerne für Teilchenbeschleuniger

Für die wissenschaftliche Erforschung zum Beispiel der inneren Strukturen von atomaren Kernteilchen und der Synthese von schweren Elementen kommen in Teilchenbeschleunigern weichmagnetische Ringkerne zum Einsatz. In Beschleunigerkavitäten sind sie Teile eines Resonators, der die Hochspannung für die Beschleunigung unter anderem von schweren Ionen liefert. Dabei bilden mehrere Ringkerne mit einem Einzelgewicht von mehr als 20 kg die Induktivität innerhalb einer Kavität. Ein Strahlrohr, das als Primärwicklung durch das Innenloch der Ringkerne geführt wird, bestimmt den Innendurchmesser der Kerne (Abb. 6.33).

Abb. 6.33: Aufbau einer Beschleunigerkavität (schematisch)

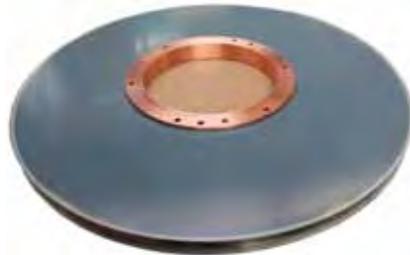


Quelle: GSI

Die unterschiedlichen magnetisch-elektrischen Anforderungen einer Kavität machen es notwendig, durch geschickte Auswahl aus verschiedenen Werkstoffen die optimale Lösung zu erarbeiten. Möglichst geringe Kernverluste und eine speziell an das Beschleunigersystem angepasste Permeabilität sind hierbei von besonderer Bedeutung.

Neben Großferriten haben sich metallische Ringkerne, basierend auf amorphen oder nanokristallinen Werkstoffen, bewährt. Bei Verwendung von Kernen mit möglichst dünnem Bandmaterial können besonders hohe Ansprüche an die technische Performance einer Kavität erfüllt werden.

Abb. 6.34: Ausführungsbeispiel für einen Beschleunigerkern (Ø ca. 70 cm)



Quelle: Vacuumschmelze

Aufgrund der mitunter sehr unterschiedlichen Anforderungen an die Ringkerne (verschiedenartige Beschleunigerkavitäten) wird der Weiterentwicklung von Werkstoffen eine besondere Bedeutung zukommen. Sehr gute Ansätze zeigen sich hierbei bei den nanokristallinen Fe-Basis-Legierungen.

Die Entwicklung von Klebesystemen, die den konstruktiven und den magnetischen Anforderungen gerecht werden müssen, wird immer wichtiger. Dabei sind erhebliche Herausforderungen an das Design und die Stabilität zu berücksichtigen.

6.3 EMV-Filter

EMV-Filter sind passive Filter zur Sicherstellung der elektromagnetischen Verträglichkeit von elektrischen Geräten gegenüber ihrer Umwelt. Sie bestehen in der Regel aus einem Netzwerk unterschiedlicher passiver Bauelemente wie zum Beispiel Kondensatoren, Induktivitäten und Widerständen. Elektronische Geräte, besonders Geräte mit Leistungselektronik (IGBTs, Schaltungsteile), erzeugen elektromagnetische Störungen, die andere Verbraucher in ihrer Funktion beeinträchtigen können. Produktstandards definieren Grenzwerte für Störaussendung und Beeinflussung. Speziell in Europa ist die elektromagnetische Verträglichkeit von elektronischen Geräten ein wichtiger Bestandteil der Gerätequalifizierung gerade auch in Hinblick auf die vorgeschriebene CE-Kennzeichnung. Die Anforderungen an die Funktionssicherheit und Zuverlässigkeit von elektronischen Geräten und Anlagen werden zukünftig durch den vermehrten

Einsatz von sensibler Sensorik und hohen Anforderungen an den Datentransfer in der digitalen Fabrikation (Industrie 4.0) weiter steigen.

6.3.1 Anwendungen

EMV-Filter werden in elektrischen und elektronischen Geräten und Anlagen eingesetzt. Hierbei wird die elektrische Spannung durch Leistungshalbleiter in der Amplitude oder der Frequenz verändert. Die klassischen Anwendungsbereiche in Stromversorgungen von elektronischen Geräten in der Gebäudetechnik, Medizintechnik und in Industriesteuerungen werden durch die Marktsegmente der energiesparenden Antriebssysteme für Werkzeugmaschinen (z. B. Fräs-, Schleif-, Stanz- und Drehmaschinen), Roboter und Aufzüge ergänzt. Auch im Bereich der erneuerbaren Energien wie Photovoltaik und Windenergie sowie in Energiespeichersystemen werden EMV-Filter eingesetzt. Zukünftig wird ein weiterer Bedarf für EMV-Filter im wachsenden Markt der Elektrifizierung des Straßenverkehrs entstehen.

6.3.2 Bauarten

Typische Bauarten sind IEC-Stecker-Filter, Einphasenfilter in Metall- oder Kunststoffgehäusen sowie Dreiphasenfilter mit und ohne Neutralleiter. Man unterscheidet zwischen Standard-EMV-Filtern, wählbar aus dem Katalog, und kundenspezifischen EMV-Filtern, welche speziell auf die jeweilige Anwendung zugeschnitten sind. Der Spannungsbereich erstreckt sich in einer Bandbreite von Kleinspannungen für Steuersignale bis zu 1.000 VAC / 2.000 VDC, der Strombereich von wenigen mA bis weit über tausend Ampere.

Abb. 6.35a: Dreiphasenfilter



Quelle: TDK Electronics

Abb. 6.35b: DC-EMV-Filter Elektromobilität



Quelle: Schaffner

6.3.3 Performance

Die Leistungsfähigkeit eines EMV-Filters spiegelt sich in der Einfügungsdämpfung, typischerweise in einem Frequenzbereich von 150 kHz bis 30 MHz, wider und wird bestimmt durch die geeignete Auswahl der richtigen Bauelemente und den Einsatzfall sowie die zu erfüllenden Grenzwerte der jeweiligen Produktnorm. Speziell in der Leistungselektronik (z. B. Frequenzumrichter oder Schaltnetzteile) hat das Verhalten der Leistungshalbleiter (z. B. Taktfrequenz, Spannungsanstiege) einen wesentlichen Einfluss auf die notwendige Filterperformance. Daneben können Vorgaben für den Ableitstrom (z. B. Brandschutzvorgaben) oder geforderte Approbationen, wie ENEC, UL, CSA, aber auch spezielle Applikationen, beispielsweise rückspeisefähige Umrichter, das Filterdesign leiten.

6.3.4 Zukünftige Markt-anforderungen & Technologien

Durch den zunehmenden Einsatz der Leistungselektronik in immer mehr Anwendungsbereichen steigt das Störrisiko. Forderungen nach einer besseren Verträglichkeit der elektronischen Geräte mit der Umgebung (Stichwort „Power Quality“) werden Einfluss auf die Produktstandards nehmen, indem Grenzwerte für Oberwellen verschärft werden und der geltende EMV-Frequenzbereich in den niederfrequenten Bereich ab 2 kHz bzw. 9 kHz erweitert wird. Dies kann in einigen Applikationen zu einem Zusammenwachsen verschiedener Funktionalitäten führen, wie zum Beispiel ein kombiniertes LCL- und EMV-Filter. Forderungen an geringere Ableitströme können zukünftig auch mit elektronischen Schaltungen umgesetzt werden. Der generelle Trend zu höher taktenden Halbleitern (SiC, GaN) wird bei Drosseln den Einsatz von Ferriten, Pulverkernen oder nanokristallinen und amorphen Materialien anstelle geblechter Kerne einleiten und auch zu kompakteren, leichteren und leistungsfähigeren Endgeräten führen. Die Elektrifizierung der Mobilität (Automobil, Lkw, Busse) wird sowohl

für die Lösungen im Fahrzeug als auch in der Ladeinfrastruktur für steigende Bedarfe an EMV-Filtern führen.

Die Vorhersage und genaue Modellierung von EMV-Phänomenen wird zunehmend an Bedeutung gewinnen, um die optimale Filtertopologie zu dimensionieren und auszuwählen. Designoptimierungsverfahren, die gleichzeitig die beste Dämpfungsleistung, ein optimiertes Bauvolumen und minimale Kosten evaluieren können, stellen den modernen Ansatz für die effiziente Entwicklung eines EMV-Filters dar. Neben geringem Bauvolumen und der Optimierung von Performance und Kosten werden auch die Qualitätsanforderungen an EMV-Filter zunehmend wichtige Design-Kriterien, da Ausfallsicherheit und Zuverlässigkeit der elektrischen Anlagen und Systeme im Zeitalter der Industrie 4.0 eine wichtige Rolle zukommen wird.

6.4 Widerstände

Widerstände finden sich überall, wo der Stromfluss beschränkt werden soll. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen linearen und nicht linearen Widerständen. Das Spektrum der linearen Widerstände reicht von einzelnen (diskreten) Widerständen auf der Basis von Metall- und Kohlefilm, Draht, Metallstreifen, Dünn- oder Dickschichtsystemen und anderen Technologien bis hin zu Widerstandsnetzwerken, bei denen mehrere Widerstände in einem einzigen Paket kombiniert werden. Die nicht linearen Widerstände basieren hingegen auf speziellen Keramiken, die den Bauelementen ihre typischen Charakteristiken verleihen.

6.4.1 Marktsegmente mit wesentlichen Impulsen auf die Weiterentwicklung

Wesentliche Impulse im Bereich der Weiterentwicklung von Widerständen gibt es vor allem in den folgenden Marktsegmenten:

Leistungselektronik: Ein wichtiger Trend in der Leistungselektronik ist die Integration von Widerständen in Leistungsmodule sowie das Embedding der Bauelemente direkt in die Leiterkarte.

Automobilelektronik: Generell findet in der Automobilelektronik die fortschreitende Elektrifizierung von Nebenaggregaten statt. Das bedeutet den Ersatz von mechanischen durch elektrische Funktionen, wie unter anderem bei elektronischen Parkbremsen und der Lenkung. Damit einher geht eine Steigerung der Leistungsdichte in diesen Modulen.

Mobilität: Derzeit bestimmt die Elektrifizierung des Antriebsstrangs bei Kraftfahrzeugen die Zukunftsaussichten der Automobilindustrie. Mobilität umfasst zudem den Bereich der Bahn- und Tramtriebe, auch wenn dieser nicht direkt im Zentrum der allgemeinen Aufmerksamkeit steht.

Industrieelektronik: Charakteristisch für die Industrieelektronik sind hocheffiziente Antriebselektroniken, Traktion in Industrieanwendungen inklusive Robotik sowie der Klimatechnik und der Gebäudesicherheitstechnik (Smart Home).

Energie: Zu den Treibern in der Energietechnik zählen eindeutig die Bereiche Erneuerbare Energien, Smart Grid und Smart Home, wobei letzterer sehr eng mit der Industrieelektronik verknüpft ist.

6.4.2 Nicht lineare Widerstände

Die drei wichtigsten Familien der nicht linearen Widerstände sind:

Varistoren Spannungsabhängige Widerstände, auch als VDR (Voltage Dependent Resistor) bezeichnet. Sie werden zum Überspannungsschutz an Netzeingängen oder in miniaturisierten SMT-Bauformen zum ESD-Schutz von IO-Ports von Geräten der Kommunikations- und Unterhaltungselektronik verwendet.

NTC-Thermistoren (Negative Temperature Coefficient), auch Heißeleiter genannt. Bei diesen Widerständen fällt mit steigender Temperatur der Widerstand. Diese Bauelemente werden als Einschaltstrombegrenzer oder als Temperatursensoren eingesetzt.

PTC-Thermistoren (Positive Temperature Coefficient), auch Kalteleiter genannt. Sie sind die vielfältigsten Bauelemente im Bereich der nicht linearen Widerstände. Sie finden Anwendung als Heizer, selbstrückstellende Sicherungen, Einschaltstrombegrenzer und Temperatursensoren.

6.4.2.1 Varistoren: Miniaturisierung, Embedding und Reduzierung der Kapazitäten

Besonders beim ESD-Schutz von IO-Ports werden immer kleinere Vielschicht-Varistoren mit höherer Energieabsorptionsfähigkeit gefordert. Dies lässt sich nur durch eine weitere Steigerung der Feinkörnigkeit der Keramikpulver erzielen. Ein weiterer Ansatz besteht darin, ESD-Schutzbauelemente direkt in Leiterplatten oder Trägersubstrate wie LTCC zu embedden, was neue Designs bei den Terminierungen erfordert.

Bei steigenden Datenraten auf den IO-Ports nimmt die Problematik der Signalintegrität weiter zu. Aus diesem Grund müssen die Designs neuer ESD-Schutzbauelemente extrem kapazitätsarm ausgelegt sein.

Bei den monolithischen Varistoren zum Schutz von Netzeingängen gehen die Entwicklungen in Richtung höherer Energieabsorption und besonders einer verbesserten Eigensicherheit.

Abb. 6.36: ThermoFuse-Varistor



Quelle: TDK Electronics

6.4.2.2 NTC-Thermistoren: weniger Verluste und geringere Toleranzen

Bei den NTC-Thermistoren in ihrer Funktion als Einschaltstrombegrenzer gilt es, die Verluste in geschaltetem Zustand zu reduzieren. Nur so ist es möglich, die Gesamtwirkungsgrade zum Beispiel von Stromversorgungen weiter zu verbessern. Möglich wird das durch neue Keramikmischungen, die bei hohen Temperaturen einen geringeren Widerstand aufweisen.

Bei den NTC-Thermistoren als Temperatursensoren sind zwei Forderungen zu erfüllen. Einerseits gilt es, kostengünstige Typen zu entwickeln, die auch für den Hochtemperaturbereich geeignet sind. Dies fordert neue Keramikmischungen sowie entsprechend temperaturfeste Anschlussstechnologien. Andererseits müssen auch die Toleranzen sowie die Langzeitstabilität verbessert werden.

6.4.2.3 PTC-Thermistoren: höhere Spannungen und steilere Kennlinien

Besonders in der Elektromobilität werden PTC-Thermistoren eine zunehmend bedeutende Rolle bei der Heizung der Fahrgastzelle spielen. Entsprechend sind hierfür Keramikmischungen erforderlich, die für die hohen Spannungen der Batterien geeignet sind.

Für eine Verbesserung ihrer Funktion als Grenzwert-Temperatursensoren etwa zum Schutz von Motoren oder Leistungshalbleitern gilt es, künftig eine höhere Steilheit der Kennlinien bei gleichzeitig engeren Toleranzen und höherer Langzeitstabilität zu erzielen.

6.4.3 Lineare Festwiderstände

6.4.3.1 Keramikbasierte Festwiderstände hoher Leistungsfähigkeit

Dickschichtwiderstände beinhalten ein keramisches Substrat, auf das Bahnen aus Widerstandspaste mit angrenzenden Kontaktbereichen mittels Siebdruck aufgebracht und anschließend in einem Sinterprozess eingebrannt werden. Diese Widerstandssubstrate (flach oder zylindrisch) werden abschließend mit elektrischen Kontaktierungen und einem Schutz gegen Umwelteinflüsse versehen und sind in unterschiedlichsten Bauformen/-größen sowie weiten Widerstandsbereichen und Leistungsklassen verfügbar. Auch hohe Anforderungen an Widerstandstoleranzen können erfüllt werden.

Keramische Festwiderstände können auch über eine gesinterte **Widerstandskeramik** dargestellt werden. Ein spezieller pulvertechnologischer Prozess ermöglicht die Herstellung von meist zylindrischen Widerständen, die sich besonders für die Absorption von Pulsen eignen, die in größeren Zeitabständen auftreten.

Ein wesentlicher Trend hierbei ist die immer steigende Leistungsdichte:

Die Entwicklung von Umrichtern in der Industrieelektronik ist getrieben von dem Streben nach reduziertem Bauraum, verbesserter Stromqualität, minimierten Verlusten sowie optimalen Herstell- und Lebenszykluskosten. Kompakte Ultrahochleistungswiderstände in der Dickschichttechnik leisten einen wichtigen Beitrag zum Beispiel als Schutzwiderstände, Vor- und Entladewiderstände für DC-Links, als Teil von di/dt-Filtern oder Strombegrenzern.

Die hohen Anforderungen an Stromtragfähigkeit, Isolations-/Kriechstrecken sowie Teilentladefestigkeiten für AC-/gepulsten Betrieb können mit induktionsfreien Widerstandssubstraten vergossen in Kunststoffgehäusen gelöst werden. Elektrische Anschlüsselemente werden üblicherweise als Schraub- oder Kabelanbindung entsprechend den Anwendungsanforderungen ausgeführt.

Abb. 6.37: Leistungswiderstände in Dickschichttechnik zur Montage auf Kühlkörpern



Quelle: Vishay

Moderne neue Hochleistungskeramiken für die Widerstandssubstrate erlauben die Steigerung der spezifischen Verlustleistung um das 2,5-Fache gegenüber Standardbauelementen. Damit ist es auch möglich, einfach zu skalierende Hochleistungswiderstandskühler-Einheiten zu realisieren, die sich durch extreme Kompaktheit und besondere Robustheit und Leistungsreserven auszeichnen. Widerstände mit bereits appliziertem thermischem Interface auf der Bodenplatte erlauben automatisierte Montage.

Abb. 6.38: Widerstands-/Kühler-Modul mit Hochleistungswiderständen (UXP-Typ) in Dickschichttechnik; Verwendung z. B. für kompakte Filtereinheiten



Quelle: EBG

Widerstände speziell für E-Fahrzeuge müssen eine hohe spezifische Leistung bei kleinem Bauraum aufweisen sowie „fail safe“ und einfach zu montieren (auch ohne zu löten) sein.

Dickschichtwiderstände können für den Einsatz einfach direkt an der Batteriespannung, die niedrigen Ohmwerte sowie den verfügbaren Bauraum angepasst werden. Sie eignen sich sehr gut für niederinduktive Schaltkreise und sind aufgrund ihrer Bauweise „fail safe“. Zur Pulsabsorption kann Widerstandskeramik zum Einsatz kommen.

**Abb. 6.39a–c: Lade- und Entlade-
widerstände für E-Fahrzeuge in
Dickschichttechnologie (Bauarten von
oben nach unten: TO220, SOT227,
UXP Serie, ESP Serie**

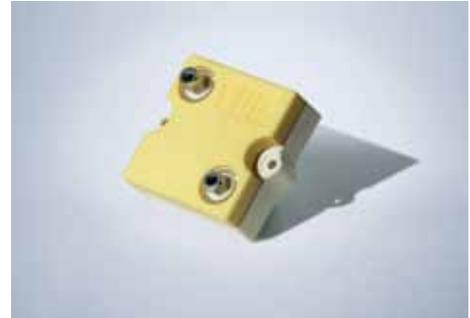


Quelle: EBG

Ein besonderer Trend bei Leistungswiderständen kann im Umfeld von Industrie 4.0 beobachtet werden:

Zur Unterstützung der Zustandsdiagnostik sowie zur Optimierung der Lebenszykluskosten können Dickschichtwiderstände mit integrierter Sensorik genutzt werden. Realtime-Erfassung von Temperatur, Spannung und Strom im Gehäuse von Hochleistungswiderständen eröffnet neue Möglichkeiten zu Überwachung, Steuerung und aktivem Eingriff für den Betreiber von Umrichtern. Die Messdaten werden „onboard“ im Widerstand aufbereitet und über ein Sendemodul an die Steuerung/Kontrolleinheit des Umrichters oder ein mobiles Display drahtlos übertragen. Eine kompakte und kostengünstige Integration der Sensoren und der Auswerte-/Sende-elektronik ist gefordert. Die Langzeitfunktion ist sicherzustellen.

**Abb. 6.40: Basiswiderstand mit
integrierter Sensorik sowie Auswerte-
und Übertragerelektronik (gelber
Bereich); Anwendung: Überwachung
von Schaltkreisen**



Quelle: EBG

6.4.3.2 Metallbasierte Festwiderstände hoher Leistungsfähigkeit

Neben den keramikbasierten Leistungswiderständen finden in den hier angesprochenen Leitapplikationen auch immer mehr metallbasierte Leistungswiderstände ihren Einsatz. Hierbei handelt es sich um Grid- oder Drahtwiderstände oder auch um direkt oder indirekt wassergekühlte Hochleistungswiderstände. Diese stehen je nach Leistungsklasse in einem Wettbewerb mit den zuvor beschriebenen Hochleistungsdickschichtwiderständen.

Bei Hybrid- und Elektrofahrzeugen gewährleisten Elektromotoren anstelle von konventionellen Verbrennungsmotoren den Antrieb. Diese integrieren eingangsseitig einen Zwischenkreiskondensator. Beim Zuschalten der Batterie auf eben diesen Kondensator würde der Kurzschlussstrom fließen. Um die Lebensdauer des Leistungsrelais zu verlängern bzw. die Schaltleistung zu verringern, ist es notwendig, einen Vorladewiderstand (der den Strom begrenzt) in das System einzubringen. Dieser wird parallel zum Leistungsrelais über einen Halbleiter zugeschaltet und lädt somit den Kondensator vor Zuschalten des Leistungsrelais vor.

Bei konventionellen Antrieben müssen die elektronischen Komponenten wie Steuergeräte eingangsseitig vor Spannungsspitzen, verursacht durch die Kfz-Lichtmaschinen bei Lastabwurf, über Load-Dump-Schutzschaltungen gesichert werden. In diesen kommen neben TVS-Dioden zunehmend impulsfeste Widerstände, welche die entstehende Pulsleistung aufnehmen können, zum Einsatz.

Abb. 6.41: Metallbasierter Messwiderstand für Batterieströme



Quelle: Vishay

Im Bereich der Traktions- und Antriebstechnik verhindern pulsafeste niederinduktive Chopper/Bremswiderstände die Überladung von Zwischenkreiskondensatoren, die beispielsweise durch die Rückkopplung von Motoren im Generatorbetrieb auftreten.

Wie im Bereich der industriellen Traktions- und Antriebstechnik kommen auch in der Bahntechnik Chopper/Bremswiderstände zum Einsatz.

In Windanlagen finden zusätzlich niederohmige, hoch impulsfeste Load-Dump-Widerstände Verwendung. Bei Netzausfall wird, bedingt durch das Trägheitsmoment der Generatoren von Windkraftanlagen, weiterhin Energie in die Zwischenkreiskondensatoren eingebracht. Um die Überladung bzw. Zerstörung der Kondensatoren zu verhindern, werden kurzzeitig hochimpulsfeste Widerstände zugeschaltet. Diese zeichnen sich nicht durch die Dauerleistung aus, sondern durch die Aufnahme extrem hoher Impulsenergien im MJ-Bereich.

Abb. 6.42: Wassergekühlter Leistungswiderstand für Leistungen von 1,5 bis 2,5 kW



Quelle: Vishay

Analog zur Industrieelektronik benötigt auch die Energietechnik Hochleistungswiderstände zur Energiewandlung in Zusammenhang mit Umrichtern. Am anderen Ende des Energienetzes führt der stetige Ausbau der Netze mit dezentralen „Energieerzeugern“ dazu, dass die Netze stärkeren Schwankungen im Frequenzgang und in der Spannungslage unterliegen. Darum brauchen viele elektronische Komponenten, die eingangsseitig am Niederspannungsnetz betrieben werden, Schutz durch Sicherungswiderstände.

6.4.3.3 Messwiderstände für (Hoch-) Spannung

Das präzise Messen von Spannungen ist ein wesentliches Einsatzgebiet von Widerständen. Während für Spannungen bis etwa 1.000 V Widerstände sowohl auf der Basis von **Dünnschichttechnologie** als auch von **Dickschichttechnologie** eingesetzt werden, sind es für Hochspannungsapplikationen zum Beispiel in der Energietechnik vor allem **Dickschichtwiderstände**.

In heutigen Elektro- und Hybridfahrzeugen ermöglichen komplexe Batteriemanagementsysteme ein sicheres und effizientes Laden des Lithium-Ionen-Akkus sowie das Ausbalancieren des Ladezustands der einzelnen Zellen. Das verlangt eine präzise Spannungsmessung. Der Trend geht dabei zu Hochspannungswiderständen in Dünnschichttechnologie, die in kompakter SMD-Bauform bei Spannungen bis zu 1.000 V und im automobilen Temperaturbereich eingesetzt werden können.

In Industrieanwendungen steigen die Anforderungen an erhöhte Spannungs- und Impulsbelastungen.

Hochspannungsgeeignete Dickschichtmesswiderstände zum Beispiel für Smart Grid und (HV-) DC-Anwendungen können die Messaufgabe oft präziser und kostengünstiger lösen als bisherige induktive oder kapazitive Messanordnungen. Keramische Festwiderstände für diese Anwendungen müssen sehr stabile Widerstandswerte insbesondere bei Temperaturschwankungen aufweisen, da sie unter wechselnden Klimabedingungen funktionieren müssen. Hohe Stabilität bei Spannungsschwankungen ist ebenfalls notwendig.

Dies erfordert neue Pastenmischungen sowie entsprechende Verarbeitungsprozesse zur gezielten Beeinflussung von TCR (Temperature Coefficient of Resistivity) und VCR (Voltage Coefficient of Resistivity) des Widerstandsmaterials. Die Testmethoden sind für eine industrielle Fertigung zu optimieren.

Abb. 6.43a/b: Hochspannungswiderstände in unterschiedlichen Bauformen (oben); Anwendung in hochpräzisen Spannungsversorgungen und Grid-Anwendungen (unten)



Quelle: EBG

6.4.3.4 Messwiderstände für Strom

Durch die höhere Elektrifizierung in allen Industriebereichen und die Forderungen nach Energieeffizienz entwickelt sich insbesondere die Produktgruppe des Strommesswiderstands immer weiter: Er wird in die Leitung des zu messenden Stroms gebracht, der Stromfluss bewirkt einen Spannungsabfall am Widerstand, der dann mit einer geeigneten Messelektronik eingelesen wird. Vorteile des Strommesswiderstands sind seine Einfachheit und Linearität, zudem stellt er eine kostengünstige Lösung dar. Mit einem stabilen Temperaturkoeffizienten des Widerstands (TCR) von deutlich $<100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ oder $0,01 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ ist auch eine geringe thermische Drift gegeben. Zudem bieten diese sehr niederohmigen Strommesswiderstände (z. B. $<1 \text{ m}\Omega$) eine überlegene Überspannungsleistung für zuverlässigen Schutz bei Kurzschluss- und Überstromereignissen.

Je nach Stromstärke kommen **Dickschicht-, Folien-** oder **Metallstreifenwiderstände** in SMD-Technik oder **massive metallische** niederohmige Messwiderstände im direkten Strompfad zum Einsatz.

Durch konsequente Verbesserungen und Automatisierung im Fertigungsprozess und die steigenden Anforderungen in der Leistungselektronik werden konventionelle Lötprozesse vermehrt durch andere Verbindungsprozesse abgelöst, wie zum einen durch sinter- und bondbare Bauteile, zum anderen durch Schweißverbindungen. Dies ermöglicht die direkte Platzierung der Widerstände in den Leistungsmodulen wie in IGBTs.

Abb. 6.44: Metallwiderstand der Baugröße 1213

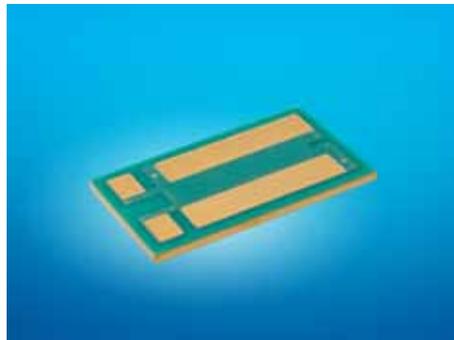
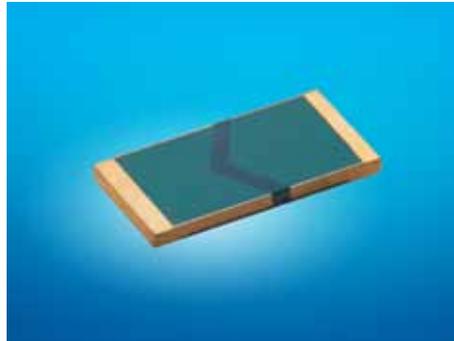


Quelle: Isabellenhütte

Im Automobilbereich steigen die Anforderungen an die Widerstandsbauelemente durch extreme Einsatzbedingungen wie hohe Temperaturen oder Einsatz in Öl. Mit der vermehrten Einführung des 48-V-Bordnetzes bei konventionellen wie auch bei Hybrid- und Elektrofahrzeugen steigt der Bedarf an Messwiderständen für DC/DC-Wandler und Batteriemangement.

Bei hohen Umgebungstemperaturen, wie sie im Motorraum üblich sind, erfolgt heute die Anordnung der elektronischen Steuerungen mehr und mehr in unmittelbarer Nähe der Funktionsmodule. Dafür sind zunehmend Hochtemperaturbauelemente erforderlich. Das treibt den Bedarf an Widerständen für Leitlebetechnologie an, beispielsweise mit Gold- oder Silber-Palladium-Kontakten, die sich auch noch im Schmelzbereich herkömmlicher Lote verwenden lassen.

Abb. 6.45a/b: SMD-Strommesswiderstand mit vergoldeten Kontakten zur Leiterplattenmontage mit Leitkleber (oben); Strommesswiderstand mit Bondoberflächen zur Montage auf Leistungshybriden (unten)



Quelle: Isabellenhütte

In den letzten Jahren hat sich in der Industrie-elektronik der Fokus der Entwicklung in Richtung größere Leistungsdichten und höhere Schaltfrequenzen von Halbleitern verlagert. Ersteres ermöglicht ein besseres Kosten-Leistungs-Verhältnis, weil bei nahezu gleichen Systemkosten die Ausgangsleistung optimiert werden kann. Letzteres steigert den Systemwirkungsgrad, da höhere Schaltfrequenzen zu geringeren Verlusten im System führen. Allerdings ist es bei einer Erhöhung der Schaltfrequenzen notwendig, die induktiven Einflüsse auf das Gesamtsystem so gering wie möglich zu halten. Somit werden zukünftige Anforderungen an niederinduktive Widerstandstechnologien immer anspruchsvoller.

Zur Strommessung in modernen intelligenten Stromzählern eignen sich Metallstreifen-Messwiderstände oder niederohmige SMD-Widerstände in Filmtechnologie. Fortschritte in der Messelektronik erlauben die Verarbeitung immer kleinerer Spannungsabfälle, sodass die eingesetzten Widerstandswerte und damit in der Folge die thermische Verlustleistung minimiert werden kann. Somit stehen solche Messwiderstände in direktem Wettbewerb zu induktiven Lösungen. Sie zeichnen sich vor allem durch eine große Robustheit, eine hohe Stabilität und einen geringen Preis aus.

Bei der Energieerzeugung werden für die Messung von Strömen jenseits einiger 100 A in allen Wechselrichtern, sei es für Photovoltaik oder Windgeneratoren, vermehrt Hochstrommesswiderstände benötigt. Hier eignen sich vor allem niederohmige Shunts (unter $80 \mu\Omega$). Zugleich steigt der Bedarf an immer kompakteren Invertiern. Aktuelle Entwicklungen konzentrieren sich deshalb auf höhere Schaltfrequenzen, um die Größe der Kapazität und Induktivität zu reduzieren.

Es ist deshalb davon auszugehen, dass auch in der Energietechnik bei sehr hohen Strömen $>1.000 \text{ A}$ widerstands-basierte Messsysteme zunehmend induktive Lösungen verdrängen werden. Zudem bieten solche Lösungen die Möglichkeit, sehr kompakt die Auswerteelektronik zu integrieren und damit hochgenaue und zugleich sehr kompakte Messlösungen zu bieten.

Abb. 6.46: 1 $\mu\Omega$ Widerstand mit integrierter Messelektronik für Ströme bis 30.000 A



Quelle: Isabellenhütte

6.5 SAW-Filter

SAW-Filter (Surface Acoustic Wave) – oder akustische Oberflächenwellenfilter – gehören zu den Standardbauteilen in der Kommunikationstechnik. Die Oberflächenfilter basieren auf Piezotechnologie und können bis zu einem Frequenzbereich von 3 GHz eingesetzt werden. Die feine Struktur des Filters wird mittels lithografischer Prozesse aufgebracht.

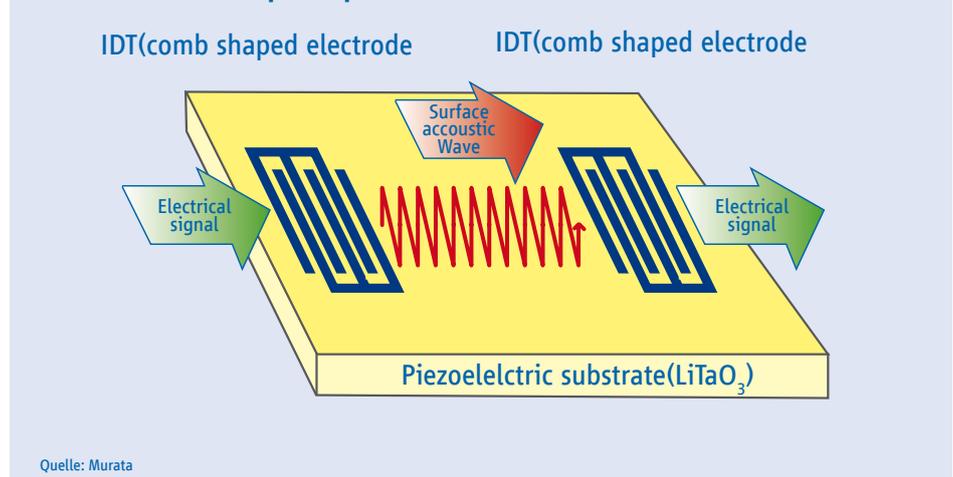
Durch diesen einfachen Aufbau ist das SAW-Filter eines der günstigsten Filter für den Einsatz in der Kommunikationstechnik. Gerade im Bereich der Mobilfunktechnologie geht der Trend zu immer kleineren Bauformen. Derzeit ist die Bauform 1109 Standard für ein Single-Filter, wohingegen bei den Dual-Filtern die Bauform 1511 und bei den Diplexern die Größe 1814 vorherrscht.

Dadurch kann dem Abnehmer aus dem Infotainment oder dem Consumer- bzw. industriellen Sektor die gleiche Bauform zur Verfügung gestellt werden, und der Kunde kann den Filter der Applikation entsprechend auswählen.

Im Automotive-Bereich werden auch zukünftig noch die derzeitigen Filter mit der Baugröße 3×3 mm zur Verfügung stehen und erst nach und nach ersetzt, um neue Frequenzbänder für die Netzanbindung zugänglich zu machen. Die Roadmap zur Anpassung an kleinere Bauformen wird in den nächsten Jahren folgen.

Multiplexer: Die Herausforderung im Bereich der mobilen Kommunikation ist es, viele Filterfunktionen in einem einzigen Bauteil zu realisieren und dabei die gewünschten Bandbreiten mit den schmalbandigen SAW-Filtern zu erreichen.

Abb. 6.47: Grundprinzip des SAW-Filters



6.5.1 Entwicklungstrends und -ziele

Kompakte Abmessungen: Das Hauptziel in der Entwicklung ist eine immer kleinere Abmessung der Single-Filter, wobei mit der Bauform 1109 bereits eine sehr kleine Bauform erreicht ist. Eine weitere Miniaturisierung wird durch Dual-Filter bzw. Triple-Filter in einem Gehäuse ermöglicht.

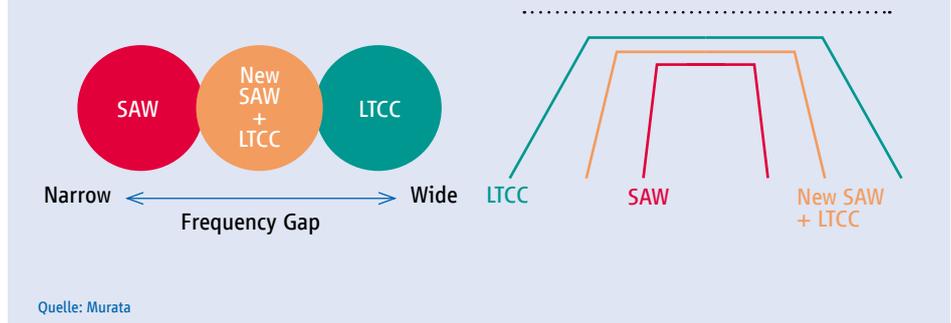
Hohe Zuverlässigkeit: Die Kunden wünschen sich Pin-Kompatibilität in der Gehäuseform 1109 für alle Applikationen. Unterschiedliche Zuverlässigkeiten ermöglichen es, die Applikationen anzupassen, ohne ein Neudesign durchzuführen. Da in der Gehäuseform 1109 ein Wirebond-Prozess für den Anschluss des SAW-Filters jedoch nicht mehr möglich ist, wurde die HSP-Technologie (Hybrid SAW Package) entwickelt.

Multiplexer stellen eine Kombination aus verschiedenen Filtertechnologien dar, zum Beispiel LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics) im Tiefband, SAW im Mittelband, SAW oder LTCC im Hochband.

Durch die Kombination von SAW+LTCC können schon heute Bänder abgedeckt werden, die bis vor Kurzem noch BAW- oder FBAR-Filtern vorbehalten waren.

Koexistenz von Bändern: Durch die Einführung von 5G wird in den nächsten Jahren die Anzahl der belegten Bänder weiter ansteigen. Das Internet der Dinge (IoT) und speziell BT5.0 werden auch den Bedarf an Filtern weiter steigen lassen. Daraus ergibt sich als Herausforderung, schmalbandige Filter mit möglichst steiler Flanke für die neuen Bänder zu entwickeln. Dadurch minimiert sich der EMI-Aufwand, der nötig ist, um unerwünschte Effekte wie Nachbarkanalinterferenz

Abb. 6.48: Kombination von SAW- und LTCC-Technologien

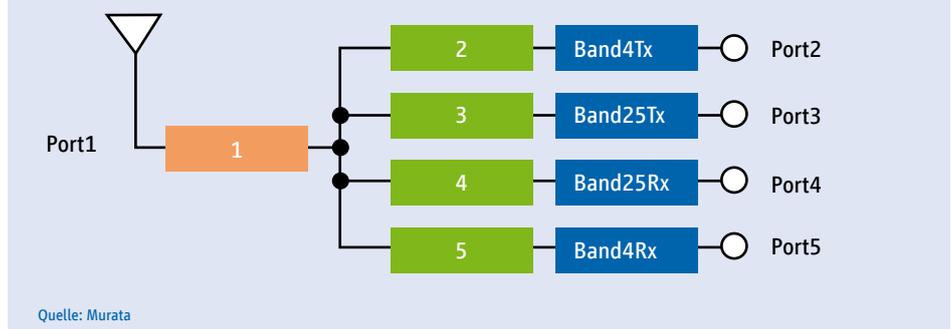


zu dämpfen. Die Entwicklung von Keramiken mit niedrigen Temperaturkoeffizienten ermöglicht bereits Filter, die mit B7 und Wifi kompatibel sind und dadurch eine Koexistenz von Bändern erlauben. Die I.H.P SAW genannte Serie zeichnet sich durch einen hohen Q-Faktor aus und bietet dadurch eine preiswerte Alternative zu BAW- und FBAR-Filtern.

Automotive: Der für die Automotive-Anwendungen erforderte Qualitätsstandard Grade1 kann technologiebedingt nur in 3-x-3-mm-Gehäusen erfüllt werden, wobei eine Verkleinerung zu Bauformen der Größe 2 x 1,6 mm geplant ist. Für Navigationsanwendungen werden derzeit Multi-bandlösungen zur Verbesserung der Standortgenauigkeit angestrebt, indem neben L1 auch die Bänder L2 und L5 mitgenutzt werden.

Als weiteres Beispiel für eine Koexistenz von Bändern kann auch das Low-Power-Wide-Area-Network (LPWAN) angeführt werden. Dieser Standard wird hauptsächlich für Smart Metering und M2M-Kommunikation verwendet und benutzt einen ähnlichen Frequenzbereich wie das LTE-Band B20. Möglich wird das durch die entsprechenden SAW-Filter, die auch für Außeninstallation und einen Temperaturbereich von -40 °C bis 85 °C geeignet sind.

Abb. 6.49: Quadplexer für die gleichzeitige Nutzung der Bänder B4TX und RX sowie B25TX und RX



7 Elektromechanische Bauelemente



Quelle: Industrieblick / Fotolia.com

Unter den elektromechanischen Bauelementen verstehen wir die Produktgruppen Steckverbinder, Schalter, Taster und Geräteschutzsicherungen.

7.1 Steckverbinder

Steckverbinder ermöglichen die modulare Strukturierung von Baugruppen, Geräten, Systemen und Anlagen. Sie vereinfachen den Betrieb, die Herstellung und Wartung sowie den schnellen Austausch von Komponenten, erlauben die Integration neuer Funktionalitäten in bestehende Systeme und fördern damit die wirtschaftliche Nutzung. Steckverbinder folgen den Entwicklungen in allen elektrotechnischen Systemen. Heute schon erkennbar sind steigende Bandbreiten der Signalübertragung zum Beispiel in der Telekommunikation, Datentechnik und Automatisierung. Das erfordert Steckverbinder, die bei zumindest gleichbleibender Zuverlässigkeit diese Anforderungen erfüllen können.

Die wesentliche Herausforderung für jeden Steckverbinderhersteller ist die Erfüllung maximaler technischer Leistungen bei kleinster Baugröße.

7.1.1 Trend zur Regulierung und Standardisierung für Steckverbinder

Normung: Die vorwettbewerbliche Kooperation von Herstellern und Anwendern im Rahmen der Normung forciert kontinuierliche Technologieverbesserungen und schafft damit eine der Voraussetzungen für den weltweiten Geschäftserfolg. Eine Differenzierung der Marktteilnehmer ist durchaus möglich und gängige Praxis. Diese erfolgt durch Leistungsmerkmale, welche die Anforderungen aus Normen und Spezifikationen übertreffen und durch zusätzliche für die Interoperabilität nicht relevante Besonderheiten („Features“).

Zusätzlich zu den Normen gibt es Branchen- oder technologiespezifische Standards und Spezifikationen, die ergänzende Anforderungen festlegen. Deren Erarbeitung erfolgt im Allgemeinen durch geschlossene Interessengruppen aus Herstellern und/oder Anwendern („Konsortien“).

Im Bereich der Produktsicherheit gibt es einen Trend zu speziellen Steckverbindernormen für einzelne Anwendungen und deren Harmonisierung unter der Niederspannungsrichtlinie durch Listung im Amtsblatt der EU, wie beispielsweise in den Bereichen der Bahntechnik und der Photovoltaik. Jedoch ist derzeit für Anwendungen mit sehr speziellen Anforderungen an die Anslusstechnik von einer Kombination von Steckverbindern unterschiedlicher Hersteller abzuraten (und bei Photovoltaik sogar nicht zulässig).

Das Zusammenwirken und die Austauschbarkeit von Steckverbindern unterschiedlicher Hersteller sind wichtige Voraussetzungen für

Abb. 7.1: Beispiele für standardisierte Steckbilder an metrischen Rundsteckverbindern



Quelle: Phoenix Contact

den breiten Einsatz vieler Steckverbinder. Um ein definiertes Maß an Kompatibilität zu erreichen, werden in sogenannten Bauartnormen die relevanten Dimensionen und Eigenschaften der freien „Stecker“ und der festen „Buchsen“ bei IEC/SC 48B „Electrical connectors“ international genormt. Diese Normen beziehen sich auf die in IEC 610761 festgelegten Kompatibilitätsstufen:

- Stufe 1 (**Montagekompatibilität**) legt nur die Außen- und Montage Maße zwecks Austauschbarkeit fest.
- Stufe 2 (**Steckkompatibilität**) normt die elektrischen und mechanischen Schnittstellen, wobei die Interoperabilität von Steckverbinderhälften verschiedener Hersteller nicht gewährleistet ist.
- Stufe 3 (**Montage- und Steckkompatibilität**) ist die Kombination aus den Stufen 1 und 2.
- Stufe 4 (**Austauschbarkeit**) gewährleistet die Übereinstimmung der elektrischen, mechanischen und klimatischen Anforderungen und folglich die Interoperabilität der Hälften verschiedener Hersteller.

Die derzeit mit den Trends Industrie 4.0 und Internet of Things einhergehende Entwicklung zu diversifizierten Daten- und Leistungsverbindungen führt vermehrt zu Anforderungen der Stufe 4, die die Interoperabilität in heterogenen Gerätelandschaften sicherstellen.

Regulierung: Regionale oder nationale Regulierung verfolgt im Allgemeinen die Ziele, eine nachhaltige Entwicklung der Wirtschaft zu gewährleisten und gleichzeitig die Interessen der Verbraucher – speziell im Hinblick auf Gesundheit, Sicherheit und Umweltschutz – zu schützen.

So bewirkt die Europäische Union eine Harmonisierung der Rechtsvorschriften mit dem übergeordneten Ziel der Schaffung eines gemeinsamen Wirtschaftsraums durch Erlasse von Richtlinien und Verordnungen unter anderem in den Bereichen der Sicherheit elektrotechnischer Produkte, ihrer umweltgerechten Gestaltung (Ökodesign), der Stärkung einer zirkularen Wirtschaft und der Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe.

Im Zusammenhang mit Steckverbindern sind als relevante EU-Richtlinien folgende zu nennen:

- Die **Richtlinie 2001/95/EG** über die allgemeine Produktsicherheit. Die Richtlinie fordert von Unternehmen die Sicherstellung, dass alle zum Verkauf angebotenen Waren sicher sind, sowie die Ergreifung von Korrekturmaßnahmen, falls festgestellt wird, dass dies nicht der Fall ist.
- Die **Niederspannungsrichtlinie 2014/35/EU** definiert als (Schutz-)Ziele, vor Gefahren zu schützen, die von elektrischen Betriebsmitteln ausgehen können oder durch äußere Einwirkungen auf elektrische Betriebsmittel entstehen können. Sie ist anwendbar für elektrische Betriebsmittel mit einer Nennspannung zwischen 50 V und 1.000 V AC bzw. zwischen 75 V und 1.500 V DC. Der Begriff „elektrische Betriebsmittel“ ist hier im Sinne des elektrotechnischen Wörterbuchs der IEC als „Produkt, das zum Zweck der Erzeugung, Umwandlung, Übertragung, Verteilung oder Anwendung von elektrischer Energie benutzt wird“ zu verstehen, jedoch mit der Einschränkung, dass die Konformität des Produkts mit den Sicherheitsanforderungen, in Bezug auf die es kontrol-

liert worden ist, durch seinen ordnungsgemäßen und seiner Bestimmung entsprechenden Einbau keinesfalls beeinträchtigt werden kann (EuGH AZ C-132/13).

- Die **RoHS-Richtlinie 2011/65/EU** beschränkt die Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe wie zum Beispiel Blei, Cadmium, Quecksilber und Zink und gilt für „Elektro- und Elektronikgeräte“ bis 1.000 V AC und 1.500 V DC, die unter eine der in Anhang I dieser Richtlinie gelisteten Kategorien fallen. Die RoHS-Richtlinie ist also nicht unmittelbar auf Steckverbinder anwendbar, jedoch ist deren Konformität mit dieser Richtlinie Bedingung für den Einbau in Geräte, die in ihren Gültigkeitsbereich fallen und in der EU auf den Markt gebracht werden sollen.

Andere Wirtschaftsräume haben abweichende Regularien und Zulassungsbestimmungen. Über die allgemeinen Vorgaben hinaus sind außerdem die für den jeweiligen Anwendungsbereich (u. a. Bahn-, Medizin-, Chemie-, Lebensmitteltechnik) spezifischen Vorschriften zu beachten.

Kompatibilität: In Anwendungen mit sehr speziellen Anforderungen an die Anschlusstechnik ist von einer Kompatibilität von Steckverbindern unterschiedlicher Hersteller abzurufen bzw. insbesondere bei Photovoltaik nicht erlaubt. So können Eigenschaften wie UV-Beständigkeit, Wasserdichtheit oder Übergangswiderstände in manchen Anwendungen nur durch Steckverbinder der gleichen Typenfamilie eines Herstellers bei aufeinander abgestimmten Prozessen, Materialien, Produktionshilfsstoffen, Maßtoleranzen etc. sichergestellt werden.

7.1.2 Branchen und Anwendungsfelder

Die Flexibilität von Steckverbindern spiegelt sich in den vielfältigen Anwendungen wider, in denen sie zum Einsatz kommen.

Mit der Verbreitung von Drahtlosnetzwerken und der damit verbundenen Zunahme an Zugangspunkten entwickelt sich ein weiteres Anwendungsgebiet für Steckverbinder zum Anschluss dieser Zugangspunkte an die vorhandene Infrastruktur.

Anschlusstechnologien und Ausführungsformen für Steckverbinder können der ZVEI-Broschüre „Die Welt der Steckverbinder – Technologien und Trends“ entnommen werden.

7.1.2.1 Industrieelektronik

Die Industrieelektronik zählt zu den am stärksten wachsenden Branchen. Geprägt von Automatisierung und klassischer Energietechnik spannt die Industrieelektronik heute einen weiten Bogen von der Prozess- und Fertigungstechnik über Gebäude- und Heimautomation, regenerative Energieerzeugung und -verteilung, Transportation (Verkehrstechnik, Schienen-, Luft- und Seefahrzeuge) bis hin zu Medizintechnik und professionellen Entertainmentsystemen.

a. Prozess- und Fabrikautomation

In der Smart Factory kommunizieren „smarte“ mechatronische Systeme über IoT-Netzwerke und ermöglichen so standort- und firmenübergreifende flexible, sich selbst optimierende Produktionsprozesse. Maschinen(baugruppen), Roboter, Werkzeuge und Steuerungen werden zu intelligenten Fertigungseinheiten verknüpft, die über Industrial Ethernet (IE) und Internet miteinander kommunizieren und ihre Arbeitsschritte automatisiert aufeinander abstimmen. Die Produktionsanlage ist somit in der Lage, ihren Betriebszustand dynamisch an den Bedarf anzupassen. Damit rücken kleine Losgrößen zu den geringen Kosten der Massenfertigung in greifbare Nähe.

Abb. 7.2: Platzsparende Kombinationschnittstellen für die Übertragung von Signalen und Leistung in der Industrieautomation



Quelle: Harting

Für die geforderte Flexibilität der Anlage, das einfache Auf- und Umrüsten der Fertigungseinheiten sowie deren betriebssichere Versorgung mit Daten und Energie sind für den industriellen Einsatz vorgesehene Steckverbindungen für die Indoor- und Outdoor-Verwendung auch zukünftig von zentraler Bedeutung.

Abb. 7.3: In IP67 ausgeführte Terminal-Outlets für raue Einsätze, zum Beispiel an Schweißrobotern



Quelle: Phoenix Contact

Abb. 7.4: Dezentrale Leistungsübertragung im PROFINET-Standard mit Rundsteckverbinder M12-L-Kodierung



Quelle: Binder

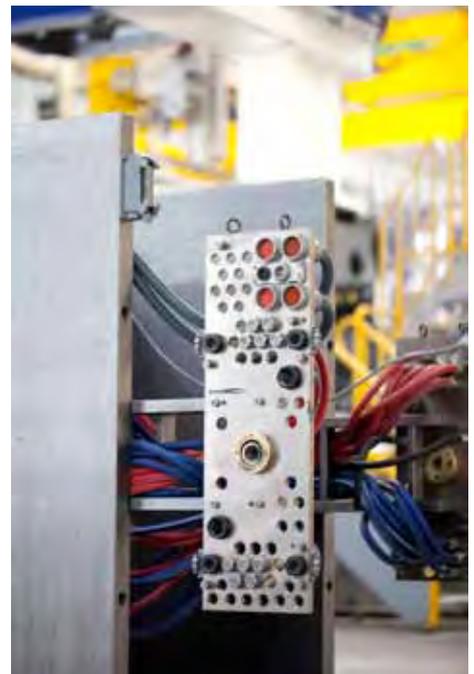
Besonders komplex und umfangreich sind heute die Anforderungen an Steckverbinder im Maschinen- und Anlagenbau und in der Prozess- und Fabrikautomatisierung. Während individuelle technologische Lösungen je nach Anwendung gefordert sind, muss die Verbindung häufig extremen Bedingungen wie Feuchtigkeit, Staub, chemischen Substanzen, hohen Temperaturen, Vibrationen usw. über die geplante Nutzungsdauer standhalten. Die Sicherheit der Anlagen muss gewährleistet sein, regionale und industrienspezifische Standards sind zu berücksichtigen.

Abb. 7.5: Automatisierungsgeräte mit standardisierten Rund- und Rechteck-Steckverbindern zum Einsatz in industriellen Datennetzwerken



Quelle: Phoenix Contact

Abb. 7.6: Multikupplung zum Kuppeln bzw. Docken von verschiedenen Medien (Leistung, Signale, Kühlwasser, Öl, Gase etc.)



Quelle: Stäubli

In Zukunft kommunizieren Gegenstände – Werkstücke, Werkzeuge, Maschinen etc. – untereinander und mit dem interagierenden Menschen. Dies bedeutet, dass viele unterschiedliche Akteure große Mengen an zum Teil zeitkritischen Daten erzeugen und daraus abgeleitete Informationen austauschen. Um diese Mengen schnell und störungsfrei auch durch weitläufige Anlagen bis zur Leitebene zu führen, bietet sich neben SC/LC-Standard-LWL der Einsatz von LWL-Multifaser-Steckverbindern (MPO/MTP) an. Perspektivisch sind hier Datenraten von 400Gbit/s auf 32 parallelen Fasern bidirektional erzielbar.

Abb. 7.7: LWL-Rangierfeld mit LC-Duplex und MPO/MTP-Rundsteckverbinder mit zwölf optischen Fasern in einem Kontakteinsatz



Quelle: Phoenix Contact

Maschinen, Automaten und Roboter benötigen mehr und empfindlichere Sensorik. Sie müssen gleichzeitig jedoch schlanker und flexibler werden, um komplexe Montagetätigkeiten bis in den Mikrobereich hinein übernehmen zu können. Die Verbindungstechnik kann die Entwicklung solcher Systeme unterstützen, indem sie durch Miniaturisierung höhere Kontaktdichten ermöglicht und so eine geschirmte Signal- und Datenübertragung auch auf kleinstem Raum sicherstellt.

Abb. 7.8a/b: Miniaturisierter Steckverbinder für den industriellen Einsatz. Geräteseitig bis zu 70 Prozent kleiner als entsprechende RJ45-Lösungen



Quelle: TE Connectivity



Quelle: Harting

Abb. 7.9: Hohe Kontaktdichte bei kleinstem Bauraum: M8 12pol



Quelle: Binder

Bei den Fertigungsmodulen liegen höhere Datenraten ebenfalls im Trend, da sie beispielsweise von der Einbindung in die Automation profitieren: Das dient zum einen der Identifikation von Produkten und der Qualitätskontrolle, zum anderen liefern die Kameras die Umgebungsdaten, die für die direkte Montage und das kollaborative Arbeiten von Menschen und Robotern benötigt werden.

Modulare und standardisierte Steckverbinder tragen dazu bei, die Automatisierung flexibler und effizienter zu machen. Sie können die Übertragungsdichte zusätzlich durch hybride Konfigurationen steigern, indem sie neben elektrischen Signalen noch Daten, Druckluft, Fluide, Lichtwellen und hohe elektrische Leistungen übertragen. Eine hybride Schnittstelle übernimmt die Aufgaben mehrerer Einzelschnittstellen, der Bauraum im Feldgerät, am Automaten oder am Roboter wird optimal genutzt.

Abb. 7.10: Kombination von u. a. Leistungs-, Daten- und Signalkontakten, Glasfaser, Pneumatik und Fluidverbindungen in einem einzigen Gehäuse oder Rahmen



Quelle: Stäubli

Abb. 7.11: Modular-Steckbinder zur Daten-, Signal- und Leistungsübertragung



Quelle: Harting

Abb. 7.12: 3D-Online-Konfiguratoren ermöglichen eine einfache und schnelle Auswahl der Modular-Steckverbinder



Quelle: Phoenix Contact

Abb. 7.13: Feldkonfektionierung eines modularer Steckverbinders



Quelle: Weidmüller

Um den Aufwand zur Herstellung der elektrischen Verbindungen zu minimieren, haben sich neben den klassischen Verbindungstechniken wie Crimpen und Schrauben auch zuverlässige Schnellanschlusstechniken etabliert. IDC- und Federklemmverbindungen – teilweise mit besonders kraftsparender Hebelmechanik ausgestattet – ermöglichen den werkzeugfreien Anschluss im Feld und können dadurch Montagezeiten erheblich verkürzen.

Abb. 7.14: Beispiel für feldkonfektionierbaren Gerätesteckverbinder, basierend auf Schneidklemm-Verbindungstechnik



Quelle: TE Connectivity

Abb. 7.15: Beispiel für feldkonfektionierbaren Gerätesteckverbinder mit Federkraft-Hebelanschlusstechnik



Quelle: Phoenix Contact

Automatisierungsgeräte mit den Schutzarten IP20 und IP6x wie zum Beispiel Steuerungen, I/O-Konverter, Frequenzumrichter etc. sind für gewöhnlich mit spezifischen Steckverbindern für den Einzeladeranschluss ausgestattet. Dies ermöglicht maximale Flexibilität bei der Anbindung der anlagenspezifischen Sensoren und Aktuatoren, bei der Energieversorgung aller Komponenten – im Schaltschrank wie im Feld. Auch hier geht der Trend zur weiteren Miniaturisierung der Schnittstellen, zu Schnellanschlusstechniken und zu hybriden Steckbildern zur Signal- und Leistungsübertragung. Beispielsweise erfordern die immer kleiner werdenden Servomotoren heute schon Verbindungslösungen für eine 630-V-Versorgung plus Kommunikation in M12.

Abb. 7.16a/b: Verbindungslösung für Servomotoren mit Schnellverschluss und bis 630 V bei geringer Baugröße in den Formaten M12 (oben) und M23 (unten)



Quelle: TE Connectivity

Abb. 7.17: Hybrid-Rundsteckverbinder mit Daten-, Signal- und Leistungskontakten zum Anschluss von Servomotoren in Schutzart IP6x



Quelle: Phoenix Contact

Abb. 7.18: Energieverteilungslösung mit ungeschnittenem Energie- und Signalbus. Schnellanschluss durch Piercingtechnik



Quelle: Wieland Electric

In der **Leistungselektronik** lösen Leiterplatten-Steckverbinder immer häufiger die Klemmlösungen ab und ermöglichen somit kompaktere und flexiblere Gerätedesigns bei hoher Stromtragfähigkeit. Wichtige Kriterien für diese Steckverbinder sind erhöhte Sicherheit, sichere Schirmung, robuste Bauform und hohe Schutzarten (IP6x) für den Feldeinsatz.

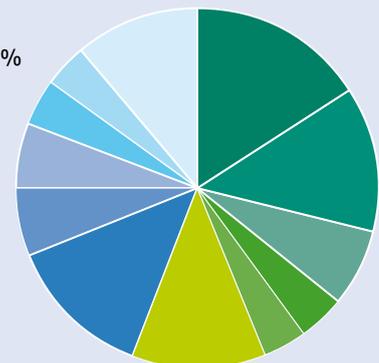
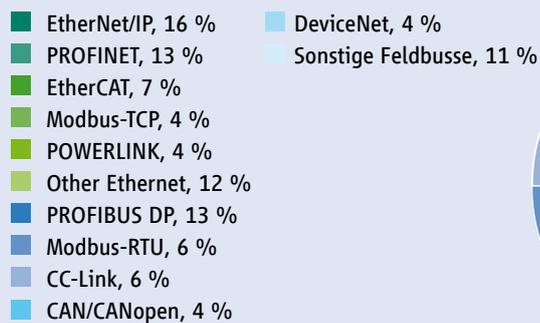
Abb. 7.19: Hybrid-Leiterplattensteckverbinder zum Beispiel zur Verbindung von Antrieb und Frequenzumrichter. Energie- und Signalleitungen sowie das Schirmgeflecht von Hybridkabeln in nur einer Schnittstelle kombiniert



Quelle: Weidmüller

Bei **Datenanschlüssen** findet ein Übergang von den klassischen Feldbussystemen zu Industrial Ethernet (IE) statt. Laut einer Analyse durch HMS Industrial Networks wachsen seit einigen Jahren Industrial-Ethernet-Netzwerke schneller als traditionelle Feldbusse und haben diese nun überholt.

Abb. 7.20: Anteile von klassischen Feldbussen und Industrial Ethernet am globalen industriellen Netzwerkmarkt



Quelle: modifiziert nach Zahlen von HMS Industrial Networks und eigenen Recherchen

Durch seine flexible Topologie (Stern oder Bus) ist Ethernet geeignet, auch Geräte in den unteren Ebenen der Automatisierungshierarchie zu verbinden. So werden neben Einbauschränken (Cabinets) an Maschinen zunehmend auch Aktoren und Sensoren – speziell in der Prozessindustrie – via IE eingebunden. Dies hat zur Folge, dass neben den für industrielle Anwendungen genormten Varianten des RJ45- und M12-Rundsteckverbinders miniaturisierte Rechteck- und Rundsteckverbinder erforderlich sind, um Geräte geringer Baugröße mit geeigneter feldkonfektio- nierbarer Anschlussstechnik anzubinden.

Abb. 7.21a/b: Beispiele für Rund- und Rechtecksteckverbinder zur Daten- und Signalübertragung in Schutzart IP20 und IP6x



Quelle: Phoenix Contact



Quelle: Harting

Abb. 7.22: Steckverbinderlösung für automatischen Werkzeugwechsel am Roboter mit bis zu 1 Mio. Steckzyklen



Quelle: Stäubli

Abb. 7.23: Schematische Darstellung für Industrial-Ethernet-Network



Quelle: Weidmüller

Um eine weitere Verringerung der Baugrößen der Geräte zu unterstützen, werden Funktionalitäten in den Stecker verlagert wie beispielsweise die Entkopplung von Ethernet-Transceivern und Leitung durch die Integration von Übertragern (Magnetics).

Abb. 7.24: RJ45-Jack mit integrierten Magnetics



Quelle: TE Connectivity

Abb. 7.25: RJ45-Leiterplattenbuchse mit integrierten Magnetics



Quelle: Weidmüller

Der Schaltschrank (oder dezentrale Verteilerkasten) ist die Schnittstelle hin zur Feldverdrahtung, die häufig eine deutlich höhere Schutzklasse und robustere Ausführung von Geräten und Steckverbindern verlangt. Auch im und am Schaltschrank müssen Steckverbinder platzsparend die Übertragung für die Leistungsverteilung, die Anlagensteuerung oder die Speicherung von Elektrizität ermöglichen. Die jeweiligen Module bzw. Einschubelemente lassen sich schnell und sicher über den Andockrahmen kontaktieren.

Abb. 7.26: Beispielhafte Andockrahmen und Wanddurchführungen als Schnittstelle vom Schaltschrank ins Feld

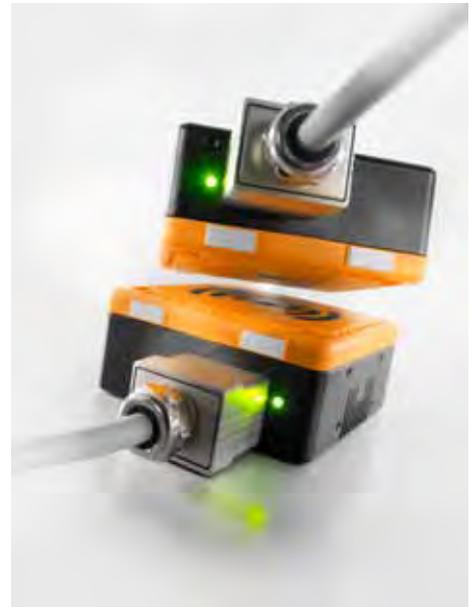


Quelle: Weidmüller

Mit dem wachsenden Automatisierungsgrad wird die kontaktlose Energieübertragung immer mehr an Bedeutung gewinnen. Gegenüber der konventionellen Energieübertragung mit Steckverbindern erfolgt die kontaktlose Energieübertragung vollständig automatisiert und ohne mechanischen Verschleiß. Ferner eröffnet die kontaktlose Energieübertragung durch die mechanische Entkopplung ganz neue Möglichkeiten für Automatisierung und Prozessoptimierung.

Besondere Relevanz hat die kontaktlose Energieübertragung für Applikationen, in denen zahlreiche Steckzyklen erforderlich sind. Dazu zählt beispielsweise der oftmalige Werkzeugwechsel bei Industrierobotern. Hier ist der Verschleiß besonders hoch. Lösungen kontaktloser Übertragung erlauben es, Energie mittels induktiver Resonanzkopplung über einen Luftspalt zu übertragen – gänzlich verschleißfrei und besonders effizient. Auch manuelle Arbeitsschritte können durch den Einsatz kontaktloser Energieübertragung reduziert werden. Beispielweise beim Akkuladevorgang von automatischen Transportsystemen.

Abb. 7.27a/b: Beispiel für kontaktlosen Übertrager für IP65/67-Umgebungen zur Bereitstellung von Leistungen bis zu 240 W



Quelle: Weidmüller

Abb. 7.28: Beispiel für kontaktlosen Übertrager für IP65/67-Umgebungen zur Versorgung und Anbindung von bis zu acht PNP-Sensoren mit insgesamt bis zu 12 W



Quelle: TE Connectivity

b. Gebäudeautomation

Die elektrische Infrastruktur innerhalb von Gebäuden gliedert sich in die folgenden Themenbereiche auf:

- a. Energieverteilung (AC und DC)
- b. Datenverteilung, drahtgebunden, wireless (Ethernet, zigbee ...)
- c. Integrierte Systeme, Energie und Daten (z. B. PoE)

Energieverteilung: Die Energieverteilung erfolgt derzeit durch verschiedene Niederspannungsnetze (AC 400/230 V). Im Bereich der klassischen AC-Stromversorgung finden anstelle der konventionellen Installation über Anschlussklemmen zunehmend industriell vorkonfektionierte, steckbare Verteilungssysteme Verwendung.

Abb. 7.29: Vorkonfektionierte, steckbare Energieverteilungslösung in Schutzart IP20; Applikationsbeispiel: Beleuchtung



Quelle: Wieland Electric

Die Verwendung von Gleichstromnetzen (DC) zur Energieversorgung gewinnt in Zukunft an Bedeutung.

Treiber dieser Entwicklung sind:

- Energieeinsparung (Wegfall der Gerätnetzeile)
- Erneuerbare Energien
- LED-Technik in der Beleuchtung
- Integration von Energieversorgung und Datenkommunikation

Abb. 7.30: Energie-Controller mit Steckverbindern zur Daten- und Signalübertragung



Quelle: Phoenix Contact

Die zentralen, meist in Verteilungen installierten Feldbusgeräte werden heute in der Regel über Anschlussklemmen kontaktiert. Dabei kommt zunehmend Federklemmtechnik und IDC zum Einsatz. Schraubkontaktierung ist wegen seiner Robustheit weiterhin notwendig.

Die Geräte in der dezentralen Feldbusebene werden zunehmend mit vorkonfektionierten Steckverbindersystemen angeschlossen.

Dies gilt gleichermaßen für die Anwendung im trockenen Innenbereich (Schutzgrad IP20) und bis IP69K im höhergradigen Schutzbereich, zum Beispiel Außenbeleuchtung, Tiefgaragen, Versorgungsschächte und -tunnel, Windkraftanlagen, PV-Anlagen.

Abb. 7.31: Steckbare Energieverteilung IP68 / IP69 mit verschiedenen Kodierungen



Quelle: Wieland Electric

Abb. 7.32: IDC-Steckverbinder mit hochgradigem IP-Schutz gegen starke Verunreinigungen und Feuchtigkeitseinflüsse zum Beispiel in Straßenverkehrstunneln



Quelle: Phoenix Contact

Die Energie bei schwierigen Umgebungsbedingungen oder in schwer zugänglichen Bereichen zu verteilen, stellt hohe Anforderungen an die Installationstechnik – etwa für Beleuchtungslösungen in Infrastrukturprojekten wie Tunnel oder Brücken. Hier kann die Leitungslänge oft nur vor Ort bestimmt werden, die Vorkonfektionierbarkeit ist daher begrenzt. Flexible IDC-Kontaktierungssysteme zum Beispiel auf Basis der Schneidklemm- oder Piercingtechnik ermöglichen eine fehlerfreie hohe Installationsgeschwindigkeit.

Trends: Im Nichtwohngebäude (Zweckbau) erfordern häufiger werdende Nutzungsänderungen eine flexible und schnelle Anpassung der Energieverteilungsinfrastruktur. Herkömmliche Installationsmethoden lassen dies nicht zu. Gefragt sind hierfür in Zukunft standardisierte, steckbare Verteilungssysteme.

Dort, wo die Leitungslänge erst vor Ort bestimmt werden kann, werden IDC-Komponenten verwendet, die ohne Vorplanung eine reibungslose schnelle Installation ermöglichen.

Der zunehmende Fachkräftemangel erfordert einfachere, sichere und geprüfte Verlegesysteme in der Elektroinstallation.

Datenverteilung: Die Aufgaben der Gebäudeautomation reichen von Heizung, Lüftung und Klima über Beschattung sowie Beleuchtung bis hin zur Sicherheitsanwendung.

Während die einzelnen Gewerke bisher deutlich voneinander getrennt waren, wachsen diese zunehmend zusammen und kommunizieren über standardisierte Gebäude-Bussysteme.

Abb. 7.33: Steckbare Anschlussklemmen für I/O-Geräte



Quelle: Metz Connect

Abb. 7.34: Kompaktsteuerungen für die Gebäudeleittechnik mit Signal- und Datenschnittstellen

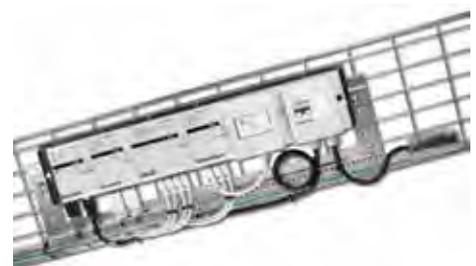


Quelle: Phoenix Contact

Die Automation innerhalb der Gebäude wird häufig in drei Ebenen gegliedert:

- Leitebene (Leitrechner mit Software)
- Automatisierungsebene (z. B. BACnet/IP)
- Feldebene, Sensor-/Aktorebene (z. B. LON, KNX, DALI)

Abb. 7.35: Gebäudeautomation mit KNX und DALI



Quelle: Wieland Electric

In Zukunft werden Informationen/Daten der Leit- und Automatisierungsebene zunehmend über die bestehende Dateninfrastruktur (LAN, W-LAN, LiFi ...) des Gebäudes vernetzt. Die Funktionen und Vorteile des IoT werden verstärkt genutzt.

Durch die Einführung des Single-Pair-Ethernets wird es in Zukunft auch in der Feldebene zu einer Integration in das LAN des Gebäudes kommen. Hier werden neue Steckverbinder entstehen, die die übertragungstechnischen Anforderungen des Single-Pair-Ethernets erfüllen, aber auch die erforderliche Robustheit für die Installation in der Feldebene berücksichtigen.

Abb. 7.36: Feldbusanschluss mit Einzelklemmen



Quelle: Metz Connect

Abb. 7.37: Automatisierungsgeräte mit Kommunikationsschnittstellen und I/O-Anschlüssen in Federkrafttechnik



Quelle: Phoenix Contact

Trends: Die drei Automationsebenen werden in Zukunft stärker miteinander verschmelzen. Beispiel hierfür ist ein KNX-Raumtemperaturregler, der als klassisches Feldgerät Automationsaufgaben übernimmt. Diese Entwicklung führt zukünftig vermehrt zu integrierten Systemen.

Integrierte Systeme: Sie sind die Integration von Leistung (DC) und Daten in einem System.

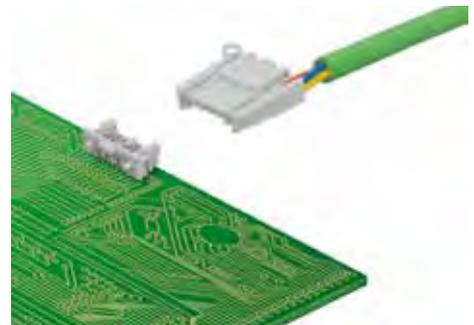
Beispiele hierfür sind:

- PoE (Power-over-Ethernet)
- Powerline

Anwendung finden solche integrierten Systeme zum Beispiel in LED-Beleuchtungssystemen oder Lüftungsklappenansteuerungen.

Die Steckverbinder für die LAN-Anschlüsse müssen daher künftig in der Lage sein, Leistungen von bis zu 100 W sicher und möglichst verlustarm zu übertragen.

Abb. 7.38: IDC-Klemme für 100 Mbit Ethernet



Quelle: Metz Connect

Trends: Die Beleuchtung wird zukünftig, neben der Lichterzeugung, vielfältige Raum- und IT-Funktionen übernehmen können:

- Datenübermittlung (WLAN, VLC – Visual Light Communication)
- Sensor für Raumklima (CO₂, Raumtemperatur, Luftfeuchte ...)
- Sensor für Beleuchtungsregelung (Beleuchtungsstärke, -farbe, Lichttemperatur)
- Anwesenheits- und Präsenzmeldung

Damit verbunden sind neue Anschlusstechniken erforderlich.

Diese Entwicklung führt zu einer „Revolution in der Installationstechnik“ mit tiefgreifenden Konsequenzen für die gesamte Installationstechnik – von der Planung bis zum Betrieb.

Die Bediengeräte für die Interaktion zwischen Mensch und Automatisierungssystem werden zunehmend durch mobile Bediengeräte ersetzt, die über drahtlose Verbindungen mit dem System kommunizieren. Daher werden bei diesen Geräten keine Gerätesteckverbinder mehr eingesetzt. Die verbleibenden fest installierten Bediengeräte sollen sich besser in das Design einfügen und mehr Informationen darstellen.

Dazu ist es erforderlich, dass sie immer dünner werden. Das führt dazu, dass die Steckverbinder in diesen Geräten flacher werden und gleichzeitig mehr Informationen übertragen müssen.

Abb. 7.39: Kompressionskontaktanschluss für Bediengeräte



Quelle: Metz Connect

c. Steckverbinder in der Energieverteilung (PGTD)

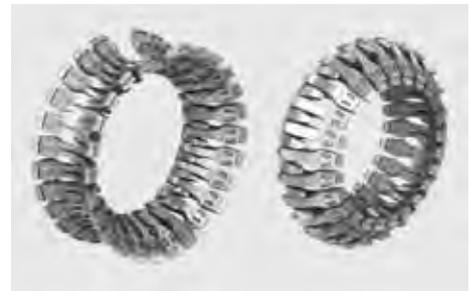
Die Stromverteilung steht vor einem umfassenden Umbau: Grund ist die Umstellung des Systems von Kraftwerken mit fossiler Verbrennung auf Anlagen, die sich aus regenerativen Quellen speisen. Ziel ist es, die fluktuierende Leistung aus den dezentralen Einheiten möglichst verlustfrei ins Netz zu integrieren. Nur eine umfassende Netzmodernisierung ermöglicht die Integration der Erneuerbaren in die Versorgung.

Abb. 7.40: Steckverbinder-Anschluss von Kondensatorboxen für die Energieerzeugung



Quelle: Harting

Abb. 7.41: Flexibles Kontaktelement zur Hochstromübertragung zum Beispiel in gasisolierten Schaltanlagen



Quelle: Stäubli

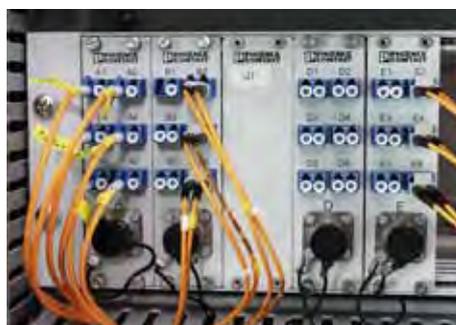
Dabei geht es nicht nur um klassischen „physischen“ Netzausbau. Mithilfe von smarten Übertragungstechniken und intelligentem Netzmanagement lassen sich Last und Erzeugung im Netz besonders effizient ausgleichen. Die zunehmende Automatisierung der Infrastruktur erleichtert die Integration des dezentral erzeugten Stroms. Intelligente und flexible Lösungen an vielen Stellen tragen dazu bei, das Netz besser auszulasten. Der Bedarf nach „physischer“ Erweiterung des Netzes reduziert sich.

Für die Regelung werden fein aufgelöste Daten über Last und Erzeugung benötigt. Dezentrale Sensorik erfasst die Last in definierten Netzabschnitten und lokalisiert gegebenenfalls Fehler. Dreh- und Angelpunkt sind die Verteilerstationen: In diesen und um sie herum wachsen folglich die Datenmengen. SCADA-Einrichtungen erfassen diese Daten, werten sie aus, errechnen Reaktionsmöglichkeiten und leiten die Ergebnisse an die Leitstellen weiter, die die Maßnahmen veranlassen.

Industrie-Steckverbinder unterstützen die fortschreitende Digitalisierung der Übertragungs- und Verteilnetzeinrichtungen. Umspann- oder Schaltanlagen sind modular aufgebaut und mit Rückwandplatinen und Leiterplattengehäusen ausgestattet. Sie nehmen die Anzeige- und Schaltmodule der Anlage auf und binden sie in die Netzumgebung ein. Im Vergleich zur Festverdrahtung verringert der Einsatz von Steckverbindern den Aufwand für die Instandhaltung. Einzelne funktionale Einheiten lassen sich schnell austauschen und anpassen. Auch können sich die Montagezeiten verkürzen, denn die gesamte Verkabelung einer Verteilerstation lässt sich vor der Installation im Feld konfektionieren und auf Funktionalität prüfen.

Zu den Treibern des Steckverbindermarkts für die Energieverteilung gehört das wachsende Interesse an Smart-Grid-Lösungen, die über das Net-Metering zum Beispiel Lastverschiebung und Tariffdifferenzierungen ermöglichen. Das Auftreten neuer Versorger und die Liberalisierung der Strommärkte haben den Druck auf die Netzbetreiber erhöht, Durchleitungsverluste zu minimieren. Altersbedingt steht Teilen der Netzinfrastruktur in den westlichen Industrieländern ohnehin die Modernisierung bevor. Parallel dazu wächst in vielen aufstrebenden asiatischen Industrienationen die Nachfrage nach intelligenter Technologie für die Stromverteilung.

Abb. 7.42a/b: Schaltschränke in der Kraftwerksleittechnik und faseroptische Signalverteiler in Umspannwerken



Quelle: Phoenix Contact

d. Regenerative Energien

Unsere Gesellschaft braucht ein neues Energiekonzept für die Zukunft: Öl, Kohle und Gas sind auf Dauer nur begrenzt verfügbar. Darüber hinaus schadet die Verbrennung dieser Ressourcen der Umwelt, dem Klima und somit auch den Menschen. Risiken gehen auf lange Sicht auch von der Kernenergie aus.

Mit der Gewinnung von Strom aus Wind, Sonne und weiteren regenerativen Quellen hingegen baut Deutschland als internationaler Vorreiter heute auf nachhaltige und umweltfreundliche Stromerzeugung. Steckverbinder leisten einen wichtigen Beitrag sowohl zur Steuerung und sicheren Verfügbarkeit dieser Stromerzeuger als auch zu ihrer Einbindung in die intelligenten Energienetze der Zukunft (Smart Grids).

Abb. 7.43: Windenergie – klassisches Einsatzgebiet für Steckverbinder



Quelle: Harting

Windenergie: Moderne Windenergieanlagen (WEA) sind modular aufgebaut. Das hat den Vorteil, dass funktionale Einheiten vorab im Werk gefertigt und getestet werden können. Der Aufwand für Installation, Inbetriebnahme und Service verringert sich.

Beispiele für funktionale Module sind Steuerungen oder Antriebsregelungen wie Windnachführung und Rotorblattverstellung sowie Kontroll- und Sicherungssysteme (z. B. Bremsen, Befuerung und zentral gespeiste Notbeleuchtungssysteme). Hinzu kommen Systeme zur Erzeugung, Aufbereitung und Umwandlung der elektrischen Energie. WEA arbeiten effizient, wenn all diese funktionalen Einheiten optimal zusammenarbeiten. Dafür müssen sie unter anderem mit einer zuverlässigen Verbindungstechnik ausgestattet sein, die eine sichere Übertragung von Signalen, Daten und Leistung gewährleistet.

Abb. 7.44a/b: Maschinenhaus einer Windenergieanlage; Schnittstellen an einer Pitch-Control-Box, die die Stellung der Rotorblätter regelt



Quelle: Harting



Quelle: Senvion

Im Trend liegen höhere Türme, größere Generatoren und eine komplexere Vernetzung der internen Anlagenteile sowie der WEAs im Windpark. Daraus resultieren ein erhöhter Datenfluss und erweiterte Serviceangebote der Hersteller. Das Ziel der Betreiber ist die Absenkung der Gesamtbetriebskosten, der Total Cost of Ownership. Eine vorausschauende Instandhaltung (Predictive Maintenance) und eine Integration der entsprechenden Sensorik und Verkabelung sind dafür maßgebend.

Abb. 7.45a/b: Turmsegmentinstallation mit verschiedenen Energieschnittstellen und Beleuchtung

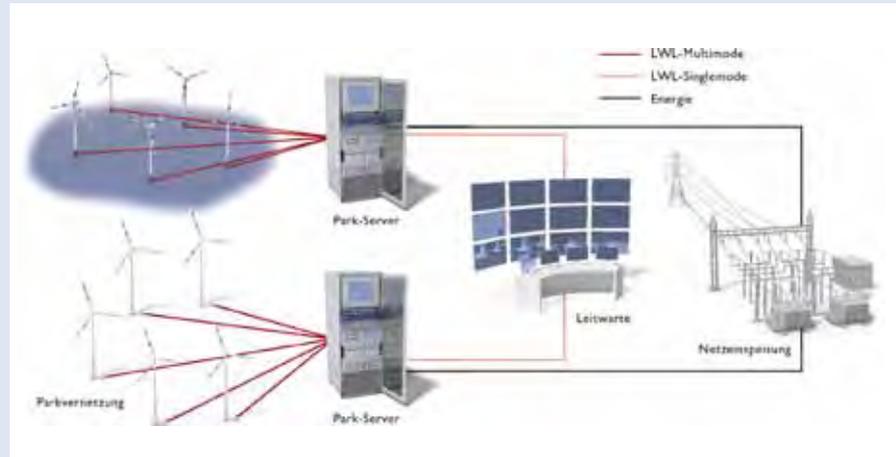


Quelle: Wieland Electric

Die Distanzen, über die in WEA Daten und Signale übertragen werden, sind größer geworden. Ab Nabenhöhen über 100 Meter kommen für die Datenübertragung mittels Ethernet verstärkt Lichtwellenleiter (LWL) zum Einsatz. LWLs erreichen höhere Übertragungsraten und benötigen keine Zwischeneinrichtungen (Repeater) für die Übertragung zwischen Turmfuß und Gondel. Die LWL-Datenübertragung benötigt zudem keine Schutzmaßnahmen gegen EMV-Störungen.

Als Schnittstellen dienen optische Steckverbinder aus der Datentechnik oder optische Kontaktsysteme, die mit Leistungs- und Signalkontakten in hybriden oder modularen Steckverbindern kombiniert werden. LWLs sind nicht teurer als herkömmliche Kupferkabel (z. B. mit RJ45-Schnittstellen) und erreichen höhere Übertragungsgeschwindigkeiten, sind allerdings etwas empfindlicher gegenüber mechanischen Einwirkungen (größere Biegeradien und alternative Kabelwege u. U. notwendig). Der komplexere Konfektionieraufwand der LWL-Systeme wird in der Regel durch einbaufertige Kabelsätze kompensiert.

Abb. 7.46: Schema für faseroptische Kommunikationsnetzwerke in Windparks



Quelle: Phoenix Contact

Abb. 7.47: Konfektionierte LWL-Kabelsätze (IP20 und IP6x) vereinfachen die Installation vor Ort



Quelle: Phoenix Contact

Dabei setzen die Hersteller und Projektierer verstärkt auf das modulare Prinzip: Die Baugruppen (Türme, Rotor, Gondel ...) werden in transportfähige voll ausgestattete Einheiten unterteilt, auf die Baustelle geliefert und dort zusammengefügt. Steckverbinder leisten zu diesem Aufbau einen wichtigen Beitrag, indem sie die Konfektionierung und die Montage vor Ort vereinfachen.

Die besten Zukunftschancen haben Steckverbinder, die wirksam gegen Außeneinflüsse abgeschirmt sind. Die besonderen Betriebs- und Umweltbedingungen in der Windenergie, wie starke Temperaturschwankungen, Nässe, Hitze, Staub, Vibrationen, Stoßbelastung oder salzhaltige Luft, erfordern eine robuste und einfache Anschlusstechnik sowie belastbare Gehäuse. Diese können zum Beispiel aus korrosionsresistenten Aluminium-Druckguss-Legierungen oder Hochleistungskunststoffen bestehen. Auch andere Materialien, die entsprechend widerstandsfähig beschichtet sind, kommen hier zum Einsatz.

Abb. 7.48a/b: Beispiele von Steckverbindern für erhöhte Umweltbedingungen (Schutzart IP69): EMV-geschützt und hoch korrosionsbeständig



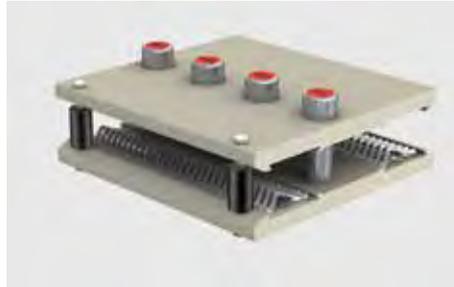
Quelle: Wieland Electric



Quelle: Phoenix Contact

Im Bereich der Infrastruktur von WEA übertragen Steckverbinder in Umrichter- und Verteilsystemen sehr hohe Ströme. Diese Schnittstellen werden oft als flache Stromschielenkontaktierung in Form von Steckverbindern ausgeführt.

Abb. 7.49: Doppelgabelstecker für Stromschielen und hohe Ströme



Quelle: Stäubli

Photovoltaik (PV): PV-Steckverbinder müssen für einen sicheren und effizienten Betrieb der PV-Anlage über die gesamte Lebensdauer (>25 Jahre) sorgen sowie durch einen anhaltend niedrigen Kontaktwiderstand den effizienten Betrieb der PV-Anlage gewährleisten.

Für die Verkabelung von Photovoltaikanlagen (PV) – vom megawattstarken Solarpark bis hin zu dach- und fassadenmontierten PV-Panels in der Gebäudeinstallation – hat die Industrie spezifische Steckverbinder entwickelt. Damit können Installateure PV-Module und Wechselrichter schnell vor Ort miteinander verbinden und Anlagen sicher in Betrieb nehmen.

In Abhängigkeit von der Bauform nehmen PV-Steckverbinder Kabel mit Leiterquerschnitten von 2,5 bis 16 mm² auf, übertragen Ströme bis 65 A und sind für Betriebsspannungen bis

zu 1.500 VDC ausgelegt. Alle Bauformen erfüllen die Schutzart IP68, das heißt Schutz gegen Druckwasser bei dauerndem Untertauchen und das Eindringen von Staub.

Um den Aufwand zur Herstellung der elektrischen Verbindungen zu minimieren, haben sich neben den klassischen Anschlusstechniken wie Crimpen und Schrauben auch zuverlässige Schnellanschlusstechniken mit Federklemmverbindungen etabliert. Sie ermöglichen den werkzeugfreien Anschluss im Feld und können dadurch Montagezeiten erheblich verringern.

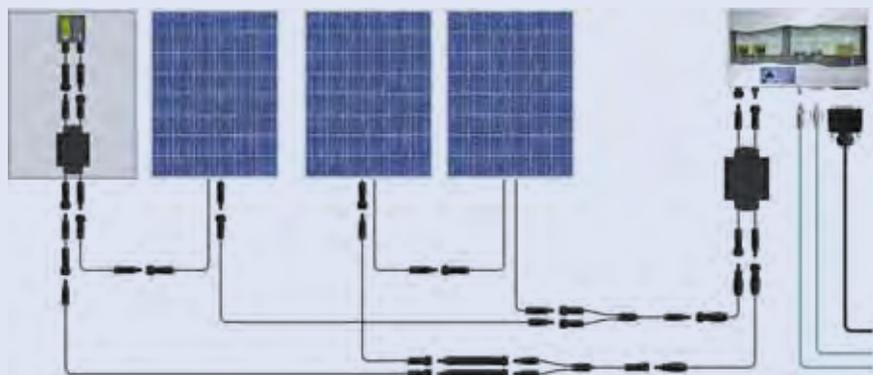
Neben den im Großanlagenbau eingesetzten 1.500-V-Steckverbindern mit hoher Strombelastbarkeit werden inzwischen auch miniaturisierte Bauformen für gebäudeintegrierte PV-Module sowie AC-Steckverbinder für den Netzanschluss von (Mikro-)Invertern angeboten.

Bisher gibt es keine Norm für PV-Steckverbinder, die eine herstellerübergreifende Kompatibilität gewährleistet. Die Steckkompatibilität scheidet oftmals schon an unterschiedlichen Herstellertoleranzen oder der Verwendung unterschiedlicher Materialien für Kontaktsystem, Isolierkörper und Dichtungen.

Ein Kreuzverbau mit mechanisch kompatiblen Steckverbindern anderer Hersteller ist daher gemäß Errichternorm VDE 0100-712 für PV-Stromversorgungssysteme nicht zugelassen.

Welcher Steckertyp vom PV-Installateur einzusetzen ist, wird faktisch durch den Modul- bzw. Wechselrichterhersteller und die von ihm favorisierte Anschlusstechnik bestimmt.

Abb. 7.50: Schema PV-Anlage mit System-Steckverbindern in IP68



Quelle: Phoenix Contact

Für Steckverbinder bildet die positive Entwicklung bei den erneuerbaren Energien in technologischer Hinsicht eine Herausforderung: Sie müssen den hohen Anforderungen an die UV- und Ammoniakbeständigkeit von Gehäusen, Isolierkörpern, Kontakten, Kabeln, Verschraubungen und Dichtungen entsprechen. Gleichzeitig müssen sie die eigene Verlustleistung möglichst geringhalten, um eine größtmögliche Effizienz zu gewährleisten.

Weitgehend unverändert zeigt sich der Trend zu Systemspannungen von 1.500 VDC. Dieser Wert hat sich als Standard für Großanlagen durchgesetzt. Erhebliche Auswirkungen auf die Komponentenentwicklung erwartet die Branche vom weiteren Ausbau von Stromspeicherung und Energiewandlung. Impulse dürften zum Beispiel von Power-to-Gas-Technologien, Brennstoffzellen, stationären Akkus, einer zunehmend flexiblen Abstimmung der Netzebenen sowie von der Verwendung steckerfertiger PV-Module (Plug-in-PV) ausgehen.

Abb. 7.51: Steckverbinder für PV mit Kontaktlamelle



Quelle: Stäubli

Abb. 7.52: 1.500-V-Steckverbinder für die sichere Verkabelung von PV-Anlagen



Quelle: Weidmüller

Abb. 7.53: PV-Installation mit Schutzorganen und feldkonfektionierbaren DC-Steckverbindern



Quelle: Phoenix Contact

Stromspeicherung, stationäre Speicher: Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien ist natürlichen Schwankungen unterworfen. Das liegt am tages- und jahreszeitlich unterschiedlichen Angebot von Sonne, Wind und zum Teil auch der Wasserkraft. Die Schwankungen lassen sich mithilfe von Energiespeichern für Strom und Wärme ausgleichen. Bisher haben jedoch erst wenige Speichertechnologien die notwendige technische Reife zu wettbewerbsfähigen Kosten erreicht.

Unterschiedliche Technologien werden vorangetrieben: Die Verfahren reichen von der Nutzung kleiner Batteriespeicher für Privathaushalte über Superkondensatoren und supraleitende Spulen bis hin zur Netzstabilisierung durch Schwungradspeicher-, Pumpspeicher- oder große Batteriespeicherkraftwerke. Weitere Themen sind eine Optimierung des Netzbezugs durch die Umwandlung von Elektrizität in chemische Energie in der Industrie, also die Umwandlung von Strom zum Beispiel in Ammoniak, Wasserstoff, synthetisches Gas, Wärme oder Liquide.

Abb. 7.54: e-Mobility-Batterie-Modulverbinder



Quelle: Stäubli

Steckverbinder können in vielen dieser Technologien effizienzverbessernd wirken, beispielsweise in der Nutzung von:

- Powerpack-Zellverbindern,
- Einschubverbindern, Rack-Verbindern, Schrankverbindern,
- Kommunikations- und Leistungsanschlüssen, häufig als Hybride ausgeführt,
- DC-Netzwerken mit 400–800 V Systemspannung.

Viele der genannten Speichertechnologien arbeiten derzeit mit proprietärer Anschlusstechnik, Standards haben sich noch nicht durchgesetzt. Das wird sich mit der zunehmenden Marktfähigkeit von Speichertechnologie ändern. Steigt die Wartungsfreiheit von Batterien, müssen auch die angrenzenden Komponenten höheren Qualitätsanforderungen gerecht werden. Das heißt, sie dürfen keine Schwachstellen bilden. Steckverbinder erfüllen dieses Kriterium schon heute, weil sie sich auch mit hohen Steckzyklen und unter anspruchsvollen Umgebungsbedingungen wartungsfrei betreiben lassen.

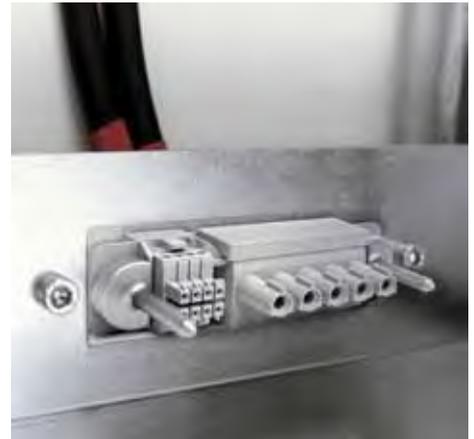
Größere Batteriespeichersysteme sind modular aufgebaut, damit sie sich flexibel an unterschiedliche Erzeugungskapazitäten anpassen lassen und redundant aufgebaut werden können. Der Einsatz von Steckverbindern erleichtert die Vorkonfektionierung der Speichermodule und beschleunigt den Aufbau von Speichern zu größeren Einheiten. Auch ermöglichen Steckverbinder den raschen Austausch von Modulen im Fehlerfall. Steckverbinder unterstützen also den Betrieb von Speichern, die das Netz stabilisieren. Dazu können Speicher Strom aufnehmen, wenn es gilt, das Netz zu entlasten, und Strom abgeben, wenn das Netz dies für den Ausgleich braucht. Um die Sicherheit für den Bediener und die Netzstabilität zu erhöhen, sind die Steckverbinder für Stromspeicher großzügig ausgelegt, berührungsschützt und besonders zuverlässig verriegelbar.

Abb. 7.55: Batteriesteckverbinder für hohe Steckzyklen



Quelle: Stäubli

Abb. 7.56: Rack-Steckverbinder für Batterie-Einschubsysteme



Quelle: Phoenix Contact

Abb. 7.57: Rundsteckverbinder für Speichertechnik und Notstromanwendungen



Quelle: Stäubli

e. Bahntechnik

Steckverbinder sind im modularen Fahrzeugbau unverzichtbar, denn sie gestalten den Übergang zwischen den elektrischen Teilsystemen – flexibel und schnell. Sie ermöglichen die Versorgung aller Einheiten des Fahrzeugs mit Leistung, Daten und/oder Signalen. Zugleich reduzieren sie den Aufwand für Betrieb und Wartung durch ihre schnelle Handhabung.

Abb. 7.58a–c: Anwendungen von Steckverbindern im Bahnbereich: Unterflurcontainer (oben), Wagenübergang (unten) und Schaltschrank in der Bahninfrastruktur (rechts)



Quelle: Harting



Quelle: Harting

Elektrische Baugruppen sind im Außenbereich von Schienenfahrzeugen neben starken Vibrationen, Stößen und elektromagnetischen Feldern insbesondere der Witterung extrem ausgesetzt. Deshalb werden dort robuste Steckverbinder eingesetzt, die spezielle mechanische Verriegelungen und hohe Schutzarten (IP68/IP69K) aufweisen. Für den Innenbereich gelten niedrigere Schutzanforderungen, aber auch hier erfüllt der Steckverbinder wichtige Aufgaben. So können elektromagnetische Störungen der Systeme durch spezielle Schirmungen im Steckverbinder vermieden werden. Verbindungen zum Antriebsstrang, zum Beispiel zum Fahrmotor, müssen auch bei hoher Leistung sehr kompakt und zuverlässig sein.

Abb. 7.59: Verschiedene Steckverbinder für die Bahntechnik



Quelle: Stäubli

Digitalisierung des Zuges: Für Wagenübergänge werden vorkonfektionierte Kabelbäume mit speziell kodierten Steckverbindern, häufig Hybride für die Übertragung von Leistung, Signalen und Daten, eingesetzt, die zur Erhöhung der Zuverlässigkeit vorab geprüft werden. Moderne Züge verfügen zudem über waggonübergreifende Ethernet-Netzwerke, die Kameras, digitales Entertainment und Displays für Statusinformationen versorgen. Dafür werden unter anderem Steckverbinder der Übertragungskategorie 5 oder 6 eingesetzt.

Abb. 7.60: Übersicht Schnittstellen bei Schienenfahrzeugen: Steckverbinder führen die elektrischen Systeme des Zuges und der Bahninfrastruktur zusammen



Quelle: Harting

Die Steckverbindertechnologie wird von der normativen Entwicklung im Bahnbereich maßgeblich beeinflusst, wie die vielen bahnspezifischen Normen zeigen. DIN EN 50155 (Elektronische Einrichtungen in Bahnfahrzeugen), DIN EN 61373 (Prüfung für Schwingen und Schocken) oder DIN EN 45545 (Brandschutz in Schienenfahrzeugen) seien hier beispielhaft genannt, aber auch DIN EN 50467 (Bahnanwendungen – Fahrzeuge – Elektrische Steckverbinder, Bestimmungen und Prüfverfahren), die unter anderem die erhöhte Widerstandsfähigkeit von Steckverbindern gegen aggressive Medien wie Reinigungsmittel und Hydrauliköl regelt.

Auch in der Bahntechnik geht der Trend in Richtung Digitalisierung. Mit einer „Digitalisierungsoffensive“ optimiert die Bahn gerade diverse Bereiche von der Fahrplanauskunft bis zum Zugbeeinflussungssystem (ETCS). Das wirkt sich auch auf Art und Anzahl der eingesetzten Steckverbinder aus. Denn eine schnelle Austauschbarkeit der modularen Systeme, zum Beispiel eines WLAN-Accesspoints im Zug, gewährleistet eine hohe Verfügbarkeit. Die Miniaturisierung macht es möglich, in dem begrenzten Raum der Schienen-

fahrzeuge mehr Technologie zu platzieren. Die primäre Funktion der Bahn bleibt natürlich der Transport von Menschen und Gütern. Kompakte Steckverbinder wie das Format M12 aber ermöglichen es, die wachsenden Datenmengen für Unterhaltungselektronik und Sicherungssysteme an Bord auch im Zug problemlos zu bewältigen.

Abb. 7.61: Plug and Play für die Signalübertragung im Zugschaltschrank



Quelle: Weidmüller

Abb. 7.62: Übersicht Steckverbinder für die Bahntechnik



Quelle: Weidmüller

Bahninfrastruktur – Sicherheit hat oberste Priorität: Der Zug zählt zu den sichersten Verkehrsmitteln. Grund dafür ist eine ausgefeilte Leit- und Sicherungstechnik, die den Verkehr auf der Schiene steuert, Gefahren frühzeitig erkennt, die Verkehrsteilnehmer lenkt und Unfälle verhindert. Neben Stellwerken und Zugbeeinflussungssystemen zählen verschiedene Außenanlagen wie Signale und Bahnübergänge zur Leittechnik.

Die Stellwerke sind die Schaltzentralen: Sie steuern den Zugverkehr, geben Steuerbefehle für Weichen, Signale und Bahnübergänge und erteilen einem Zug nur dann Erlaubnis zur Einfahrt in einen Gleisabschnitt, wenn sicher ist, dass sich kein anderes Fahrzeug darin befindet. Bei modernen elektronischen Stellwerken geschieht das alles vollelektronisch. Zusätzlich werden die Abläufe auf den Monitoren des Fahrdienstleiters dargestellt.

Hohe Verfügbarkeit durch modularen Aufbau:

Moderne Stellwerksanlagen (Stellwerk und Außenanlagen) sind modular aufgebaut. Die Modularisierung dient dazu, Komplexität zu reduzieren, das heißt, die Systeme leichter beherrschbar zu machen. Einzelne Module oder Komponenten lassen sich einfacher austauschen oder warten. Diese modularen Zugsicherungssysteme bedürfen einer passenden Schnittstellenarchitektur, die sich mithilfe normierter Steckverbinder für die Übertragung von Energie, Daten und Steuersignalen realisieren lässt.

Vorteile standardisierter Schnittstellen: In der rauen Umgebung von Bahntrassen sind Störungen durch Witterungseinflüsse wie zum Beispiel Blitzeinschläge unvermeidlich. Diese können schnell zu Systemstörungen und Betriebsausfällen führen. Für den Betreiber gilt es dann, den sicheren Betrieb der Bahn so schnell wie möglich wiederherzustellen. In diesen Fällen kommen die Vorteile insbesondere von Plug-and-Play-fähigen Industriesteckverbindern zum Tragen: Sie ermöglichen es, den sicheren Betrieb einer Anlage schnell wiederherzustellen.

Abb. 7.63a–d: Beispielhafte Steckverbinder mit Gehäusen in Schutzklasse IP68 für die Übertragung von Energie, Signalen und Daten im Bahnumfeld

f. Militärtechnik, Luft- und Schifffahrt

Bei Fahrzeugen, Schiffen und Fluggeräten für militärische Anwendungen werden Steckverbinder unter anderem zur Stromversorgung der Antriebe/Motoren, für elektronische Steuerungen oder Sensoren, für die stetig wachsende Kommunikationselektronik, Radar- und Visualisierungssysteme oder für Waffensysteme, aber auch für Notstromversorgungen und zur Fahrzeugerdung verwendet. Es werden mehrheitlich genormte Steckverbinder mit runden Kontakten und metallischen Gehäusen eingesetzt. Steckverbinder basieren auf eigenen militärischen Normen, deren wichtigste Vertreter die VG-Norm (deutsche Verteidigungsgerätenorm) und die MIL/SAE (US-Normen) sind. Typische Produktanforderungen umfassen Beständigkeit gegen Betriebsstoffe, Temperatur, hohe Drücke, Vibration und Schockbeständigkeit, gute Schirmeigenschaften und hohe Übertragungsqualität. Die deutsche VG-Norm ist maßgeblich für den hohen Qualitätsstandard bei Anwendungen zum Beispiel bei der Marine oder Landfahrzeugen. Aus diesem Grund werden auch außerhalb Deutschlands Produkte nach der VG-Norm bevorzugt, obwohl diese in den Spezifikationen nicht explizit gefordert wird.

Die Bandbreite der genormten Steckverbinderlösungen reicht von einpoligen Leistungssteckverbindern für die Antriebstechnik über hochpolige Signalsteckverbinder für zum Beispiel Steuerungs- oder Waffentechnik bis hin zu Stecksystemen für die Kommunikations- und Datentechnik.

Eine Besonderheit ist die noch übliche Verwendung von Stoffen, die die Umweltgesetzgebung (RoHS bzw. REACH) in anderen Industriezweigen bereits einschränkt. Die Forderung nach sicherer Funktionalität und hoher Verfügbarkeit militärischer Ausrüstung ist Grundlage für verlängerte Nutzung von Stoffen wie beispielsweise Chrom VI, für die es zum aktuellen Zeitpunkt noch keine adäquaten technischen Lösungen gibt.

Abb. 7.64: VG96929-Leistungssteckverbinder



Quelle: Harting

Quelle: Weidmüller

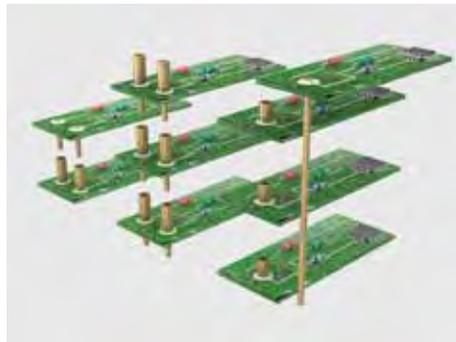
Quelle: ITT

Abb. 7.65: I/O-Steckverbinder für 10-GB-Ethernet, für Luft- und Raumfahrt-, Verteidigungs- und Marine-sektor



Quelle: TE Connectivity

Abb. 7.66: Mit der Printplattentechnik lassen sich Leiterplattenkontak-tierungen in der Sandwichbauweise für die Luftfahrt realisieren



Quelle: Stäubli

Im Bereich der zivilen Luft- und Schifffahrt werden Steckverbindungen für Anwendungen wie Motoren, Steuerungen, Kommunikation, Entertainment sowie Beleuchtungs- und Sicherheitssysteme eingesetzt. Vergleichbar zur Militärtechnik spielen auch in der zivilen Luftfahrt Normen eine zunehmend wichtige Rolle, wobei europäische Standards (EN) und der globale Standard ARINC zu nennen sind.

Im Kabinenbereich kommen etwa für Bestuhlung und Inflight-Entertainment (IFE) zusätzlich Steckverbinder aus der Kommunikations- und Industrietechnik zum Einsatz. Aufgrund der erhöhten Bandbreiten für Kommunikation und Steuerung, aber auch wegen der erzielbaren Gewichts- und Platzeinsparungen, kommen sowohl in der zivilen als auch in der militärischen Luftfahrt verstärkt Glasfasersysteme mit entsprechenden Steckverbindern zur Anwendung. Ganze Systeme, wie beispielsweise die Bordelektronik in der zivilen Luftfahrt oder die Systemelektronik im militärischen Bereich, können darüber hinaus dezentralisiert werden, um Gewicht und Platz zu sparen.

Für sicherheitsrelevante Bereiche und außerhalb der Kabine greift man in der zivilen Luftfahrt dagegen auf Steckverbinder aus der Militärtechnik zurück.

Abb. 7.67: Steckverbinder nach MIL-DTL-38999



Quelle: TE Connectivity

Abb. 7.68: Steckverbinder nach EN4165 für MiniMRP – Luftfahrt



Quelle: Molex

Ein Schwerpunkt der zivilen Luftfahrt ist die Optimierung der Baugrößen von Steckverbindern, die aber auch in militärischen Anwendungen voranschreitet. Existierende Stecksysteme beispielsweise gemäß der Spezifikation MIL-DTL-38999 mit integriertem Industriestandard RJ45 werden zunehmend durch kleinere Stecker mit höherem Datendurchsatz ersetzt.

Generell ist im zivilen wie militärischen Markt ein Zuwachs im Einsatz von Sensorprodukten zu beobachten. Neben den herkömmlichen Bereichen zur Messung von Druck, Kraft, Temperatur, Vibration und Position rückt die Beobachtung der Materialbeanspruchung (beispielsweise eines Flugzeugflügels) immer mehr in den Fokus der Industrie. Somit können Wartungszyklen besser geplant und Kosten gespart werden.

Mit Blick in die Zukunft der zivilen Luftfahrt und dem von der IATA (International Air Transport Authority) prognostizierten kontinuierlichen Anstieg der Passagierzahlen in den kommenden 30 Jahren kann man einen weiteren Trend der Industrie klar erkennen: die Vermeidung von CO₂ und, damit verbunden, die Reduzierung von Kerosin zum Schutz der Umwelt. Führende

Hersteller von Personenflugzeugen investieren in neue Wege, Flugzeuge leichter und umweltfreundlicher zu gestalten, wie die neueren Modelle in Verbundstruktur zeigen. Die verwendeten Stecker und Steckermaterialien folgen dem Trend und tragen somit zum Ziel der „Green Aircraft“ bei.

g. Medizintechnik

In der Medizintechnik kommen Steckverbindungen in verschiedensten Anwendungen zum Einsatz, von bildgebenden Diagnosegeräten in Krankenhäusern über elektrochirurgische Geräteanschlüsse im Operationssaal bis hin zu Geräten für die häusliche Therapie. Bei der Auslegung von Steckverbindern für medizinische Geräte ist besonders auf Kontaktsicherheit, robuste Lösungen für hohe Steckzyklen und die Erfüllung medizinspezifischer Normen für gesetzliche und behördliche Zulassungen zu achten. Anforderungen an die Schirmung und den Berührungsschutz sowie die Möglichkeit, den Stecker sterilisieren zu können, sind von entscheidender Bedeutung. Als wesentliche Trends bei medizinischen Geräten sind die Miniaturisierung und intelligente Konnektivität zu nennen.

Abb. 7.69: Die für die Übertragung von Bilddaten notwendige hohe Bandbreite wird durch das fortschrittliche Steckverbinder- und Kabel-Design unterstützt



Quelle: TE Connectivity

Telemedizin wird in der Zukunft eine Schlüsselrolle im Gesundheitswesen spielen, da Gesundheitsdienstleister nach innovativen Mitteln suchen, um die Kosten stationärer Behandlungen zu senken. Die Anslusstechologien für Heimgeräte müssen deshalb in der Lage sein, an entfernten Standorten mit hoher Genauigkeit zu arbeiten. Sie müssen darüber hinaus robust, einfach (auch vom Laien) zu bedienen und anzuschließen sowie klein und tragbar für den Einsatz zu Hause sein. Solche Geräte müssen auch komplexe Daten an Ärzte übertragen, die den Einsatz modernster und präziser Anslusstechologien erforderlich machen.

Abb. 7.70: Potenzialausgleichslösungen für die Medizintechnik



Quelle: Stäubli

Die raschen Fortschritte in der Bildverarbeitungstechnologie, die diverse Facetten des menschlichen Lebens von der Unterhaltung bis zur Telekommunikation beeinflussen, verbessern auch medizinische Behandlungen. Beispielsweise ermöglicht die 4K-Bildgebung im OP die verbesserte Diagnose und Visualisierung erkrankter Organe. Anschlüsse mit einer hohen Anzahl an Kontakten sind die Grundlage für die Etablierung fortgeschrittener Visualisierungstechnologien für Endoskope und Bildgebungsgeräte. Hochentwickelte Konnektor- und Kabeldesigns unterstützen die Hochgeschwindigkeitsübertragung von Bilddaten, während gleichzeitig weitere Funktionen wie Beleuchtung und Übertragung elektrischer Energie in eine einzelne Produktkomponente integriert werden. Solch eine fortschrittliche Bildgebungstechnologie liefert auch einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung des chirurgischen Roboter-Operationssaals der Zukunft, in dem Ärzte entweder vor Ort oder aus der Entfernung eine exakte Visualisierung des Körpers erhalten, fortschrittliche Behandlungen planen und durchführen können.

Abb. 7.71: Steckverbinder für mobile Diagnose-, Überwachungs- und Therapiegeräte



Quelle: Stäubli

Um effektiver zu wirtschaften, investieren in den letzten Jahren Kliniken zunehmend in multifunktionale Operationssäle. Die Mehrfachnutzbarkeit der neuen OP-Konzepte reduziert die Investitions- und Betriebskosten. Zum Einsatz kommen dort OP-Einheiten, die sich entsprechend der anstehenden chirurgischen Eingriffe unterschiedlich konfigurieren lassen. Von großer Bedeutung sind hier die „Umrüstzeit“ beim

Wechsel der Gerätekonfigurationen und die einfache Bedienbarkeit. Modulare Steckverbindersysteme ermöglichen den Anschluss unterschiedlichster Versorgungssysteme für Stromversorgung, Gase und Flüssigkeiten in einem Arbeitsgang.

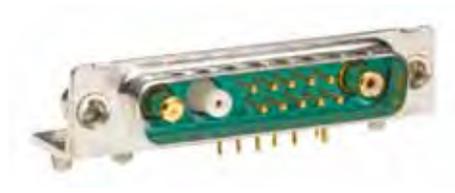
Abb. 7.72: Rundsteckverbinder für medizinische Anwendungen



Quelle: Molex

Darüber hinaus wächst die Beliebtheit der minimalinvasiven Chirurgie und implantierbarer medizinischer Geräte mit hohen Anforderungen an Robustheit und Zuverlässigkeit auch für die verwendete Verbindungstechnik. Geräte wie beispielsweise Herzschrittmacher und Infusionspumpen müssen extrem zuverlässig und leicht bedienbar sein, wobei gleichzeitig hohe Anforderungen an Leistung, Portabilität, Miniaturisierung und digitale Bandbreite zu erfüllen sind.

Abb. 7.73: D-SUB-Steckverbinder mit Monitoreinheit für medizinische Anwendungen



Quelle: Molex

Auf der anderen Seite gibt es viele medizinische Geräte, die für den einmaligen Gebrauch bestimmt sind. Die Abstimmung von Qualität und Kosten für diese Einmal-(Disposable-)Lösungen sind eine besondere Herausforderung bei der Produktgestaltung.

Herausforderungen für die Verbindungstechnik:

- Kontaktsicherheit
- Teilweise hohe Steckzyklen
- Schirmung
- Vibrationsschutz
- Autoklavierbarkeit und Sterilisation
- Miniaturisierung
- Zuverlässigkeit – lange Lebenszyklen
- Robustheit
- Ergonomie
- Datenübertragung

Abb. 7.74: Schlauchset mit Heizfunktion für laparoskopische Bauchuntersuchung mit zentralem Rundsteckverbinder



Quelle: Lumberg

7.1.2.2 Daten- und Telekommunikations-elektronik

Die Menschheit befindet sich im Zeitalter digitaler, globaler Vernetzung. Zu jeder Zeit und an nahezu jedem Ort des Globus werden zwischen zahllosen Sendern und Empfängern gleichzeitig Informationen in unvorstellbarer Menge und Geschwindigkeit ausgetauscht.

Egal ob Events, Industrie 4.0, Telemedizin, Onlineshopping, Transport und Verkehr oder private Kommunikation, die gesamte Kommunikation basiert letztendlich auf „physikalischen Vorgängen“. Dafür wird ständig weiterzuentwickelnde Hard- und insbesondere Software fundamental benötigt.

Infolge wachsender Mobilität von Mensch und Maschine (an Land, zu Wasser, in der Luft) laufen diese Vorgänge enorm dynamisch nach Zeit und Ort ab. Qualität, Zuverlässigkeit und Sicherheit der zu übertragenden Daten sind zum Teil von existenzieller Bedeutung und können im Extremfall über Leben und Tod entscheiden (Telemedizin, autonomes Fahren usw.).

Neben konventionellen Sende- und Empfangsanlagen/-geräten übernehmen zunehmend mobile Sender/Empfänger (z. B. Automobile, Transportmittel im Allgemeinen) die Kommunikation. Damit wachsen natürlich auch die Anforderungen an die Bauelemente der Daten- und Telekommunikationstechnik, insbesondere an die Steckverbinder und Kabel. Steigende Anforderungen entstehen zum Beispiel in Bezug auf Störfestigkeit/Störstrahlung, Intermodulationsfreiheit, Brandschutz oder die Nichtverwendung „verbotener Stoffe“. Zudem stellt der insbesondere im Consumer-Bereich kürzer werdende Lebenszyklus der Endgeräte und damit ihrer Komponenten (tlw. <1,5 Jahre) eine Herausforderung an die Recyclingfähigkeit/umweltgerechte Entsorgung dar.

a. Rechenzentren, Vermittlungstechnik

Das stark anwachsende Datenvolumen und die stärkere Abhängigkeit von funktionierenden Datenverbindungen führen insbesondere in den Rechenzentren, wo sich die Datenmengen konzentrieren, zu einem Bedarf an immer höheren Übertragungsleistungen und höherer Zuverlässigkeit. Sind heute in Rechenzentren je nach Größe Übertragungsraten von 10 Gbit/s bis 40 Gbit/s meist noch ausreichend, so werden künftig Datenraten von mehr als 400 Gbit/s erforderlich sein. Dies führt dazu, dass immer häufiger optische Verbindungen an die Stelle der elektrischen Verbindungen treten.

Abb. 7.75: Steckverbinder für High-speed-Transceiver-IO-Module



Quelle: Molex

Bei den hierfür eingesetzten Steckverbindern gibt es zwei parallele Trends. Anstelle der heute üblichen Multimode-Fasern werden zum einen Steckverbinder mit bis zu 72 Fasern und zum anderen verstärkt Steckverbinder für Singlemode-Fasern eingesetzt. Um die Vorteile der einfacheren Handhabung von elektrischen Steckverbindern weiter nutzen zu können, besteht außerdem ein Trend zu sogenannten aktiven Kabeln, bei denen die Umsetzung von elektrischen in optische Signale im Steckverbinder erfolgt. Aber auch im Inneren der Geräte sind erste Anzeichen für ein Vordringen der optischen Verbindungstechnik zu erkennen, das heißt, auch Leiterplattensteckverbinder werden künftig als optische Steckverbinder zur Verfügung stehen.

Abb. 7.76: Patch-Management-System mit elektronischer Identifikation der Steckverbinder



Quelle: Metz Connect

b. Mobilgeräte

Smartphone, Tablet und weitere mobile Geräte bieten heute eine enorme Vielfalt an Technologie und Leistungsfähigkeit in einem erstaunlich kleinen Paket.

Die integrierten Baugruppen müssen daher auf kleinstem Raum funktionssicher miteinander verbunden werden und den unterschiedlichen Umweltbedingungen standhalten. Daraus folgt einerseits eine extreme Miniaturisierung der Steckverbinder, andererseits wird bei Leistungsanforderungen die kompakte Bauweise erforderlich.

Der verbreitete Einsatz von Technologien wie dem drahtlosen Laden und den verschiedenen Möglichkeiten zur drahtlosen Kurzstreckenkommunikation (z. B. NFC, Bluetooth) werden künftig dazu führen, dass die Smartphones und Tablets keine externen Steckverbindungen mehr besitzen. Im Gegenzug werden viele neue Mobilgeräte, die fest mit Fahrzeugen oder beweglichen Gütern verbunden sind, zusätzliche Anwendungsfelder für Steckverbinder bieten.

Abb. 7.77: Slim Stack Board-to-Board-Connector



Quelle: Molex

Abb. 7.78: USB-Type-C-Kabel



Quelle: Molex

c. Lokale Netzwerktechnik (LAN)

Lokale Daten-/Kommunikationsnetzwerke (LAN) werden nach den Standards für die strukturierte Gebäudeverkabelung erstellt. Die hierbei eingesetzten Steckverbinder sind ebenfalls genormt. Es können dabei sowohl Rechtecksteckverbinder (RJ45) als auch LWL-Steckverbinder zum Einsatz kommen. Die Steckverbinder werden zu Anschlussdosen und Verteilfeldern (patch panel) integriert. Das „Steckgesicht“ ist weltweit standardisiert. Die Gegebenheiten „vor Ort“ führen national insbesondere bei den Anschlussdosen zu sehr unterschiedlichen Varianten. In bestimmten Bereichen wie Fabrikhallen, Maschinen- oder Außenanwendungen werden höhere Anforderungen an die Robustheit der Steckverbindung gestellt. In diesen Bereichen werden die Steckverbinder mit Schutzgehäusen versehen oder es werden Rundsteckverbinder vom Typ M12 eingesetzt.

Abb. 7.79: IP67-geschützte Steckverbindung bis 10 Gbit/s



Quelle: Metz Connect

Die neuen Möglichkeiten, über die Datensteckverbinder gleichzeitig auch Leistung zu übertragen (Power over Ethernet, PoE), der verbreitete Bedarf, mobile Geräte drahtlos über WLAN anzubinden und der Trend, dass Sensoren und Aktoren (z. B. intelligente Leuchten) der Gebäudeautomation in das LAN eingebunden werden, führt zu neuen Strukturen in der LAN-Verkabelung. Die Verkabelung und damit die Steckverbindungen wandern zunehmend in den Bereich der Raumdecke. Durch die eingeschränkte Zugänglichkeit werden die Geräte dort praktisch fest angeschlossen. Dies führt dazu, dass sich der Trend zu feldkonfektionierbaren Gerätesteckern weiter verstärken wird.

Abb. 7.80: Feldkonfektionierbare RJ-Steckverbinder



Quelle: Metz Connect

d. Weitverkehrsnetz (WAN)

Wide-Area-Network (WAN) ist ein Rechnernetz, das sich im Unterschied zu einem LAN über einen sehr großen geografischen Bereich erstreckt, das heißt auch über Ländergrenzen bzw. den gesamten Globus. Diese vernetzen wiederum verschiedene LANs, Rechenzentren etc.

Ein neues Phänomen stellt die breite Nutzung digitaler Spiele (Games-Branche) dar. Hier wird enormes Wachstum erwartet, was entsprechende hohe Netzkapazitäten erfordert. Auch hier spielt die digitale Echtzeit-Datenübertragung eine wichtige Rolle. Aufgrund der Bedeutung für Bildung und Kultur wird dieser Sektor inklusive notwendigen Netzausbaus staatlich gefördert werden, was entsprechenden Schub verleiht.

Anwendungsübergreifend führen 3D-Simulationen zu enormen Datenraten. Damit erhöht sich der Druck auf den ständigen Ausbau und die Kapazitätserweiterung der LAN-/WAN-Netzwerke wie auch der Mobilfunknetze.

Aufgrund der geforderten Datenraten und Entfernungen werden heute im Bereich des WAN für neue Strecken fast ausschließlich Singlemode-Glasfaserleitungen eingesetzt. Die Forderung

nach einer geringen Dämpfung an der Steckverbindung wird auch künftig ein Hauptkriterium bleiben. Aufgrund des Ausbaus der Breitbandnetze ist mit einem weiteren Wachstum in diesem Umfeld zu rechnen.

Abb. 7.81: Singlemode-Glasfaser-Trunk-Kabel



Quelle: Metz Connect

e. Mobilfunk

Im Bereich Mobilfunk werden die Verbindungen zwischen Basisstation und Antennen alternativ durch Glasfaser- oder Koaxialleitungen realisiert. Mit der neuen, genormten 4,3-10-Steckverbinderfamilie (IEC 61169-54) für den Mobilfunkmarkt reagiert die Industrie auf sich verändernde Anforderungen an eine moderne Mobilfunk-Infrastruktur. Basisstationen und Antennen werden immer kompakter, die technischen Anforderungen wachsen stetig.

Abb. 7.82: Mobilfunksteckverbinder



Quelle: Spinner

4,3-10-Steckverbinder wurden eigens für die steigenden Effizienzanforderungen an Mobilfunknetze entworfen und sie erfüllen gleichzeitig die allgegenwärtigen Anforderungen nach einer kompakteren Baugröße. Die Montage-, Demontage- bzw. Reparaturbedingungen sind simpel. Damit machen 4,3-10-Steckverbinder den Aufbau der Mobilfunk-Infrastruktur einfacher, zuverlässiger und leistungsfähiger.

Das Stecksystem kann mit verschraubbarem, handverschraubbarem und Push-Pull-Kupplungsmechanismus angeboten werden.

Gegenüber der im Mobilfunk weitverbreiteten Serie 7–16 erfüllen Steckverbinder der Serie 4,3–10 den geforderten Anspruch an wesentlich verbesserte Packungsdichte und zum Teil werkzeugloses Kuppeln. Diese neue Serie bietet sehr gute, reproduzierbare Werte der „Rückflussdämpfung“ (Return-Loss-RL) sowie „passiver Intermodulation“ (PIM).

Die weitere Entwicklung der Mobilfunksteckverbinder wird dazu führen, dass diese nochmals kleiner werden und sich dadurch auch für höhere Frequenzen eignen.

Abb. 7.83: Beispiele für RF-Steckverbinder



Quelle: Molex

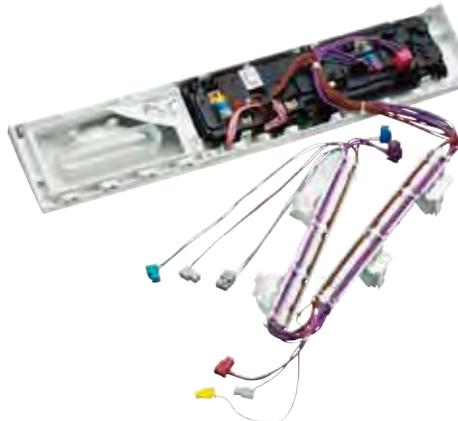
7.1.2.3 Konsumelektronik

Ein Schlüsselsegment im Konsumgütermarkt sind Hausgeräte, die im allgemeinen Sprachgebrauch als „Weiße Ware“ bezeichnet werden. Dazu gehören Waschmaschinen, Trockner, Kühl-, Gefrierschränke, Geschirrspülmaschinen, Herde und Mikrowellen sowie Kleingeräte, zu denen unter anderem Kaffeemaschinen, Toaster, Mixer, Staubsauger und Rasierer zählen.

Das Segment der „Roten Ware“ bezeichnet Produkte der Heizungsindustrie und umfasst die Bandbreite vom klassischen Kessel über Wärmepumpen bis zur Kraft-Wärme-Kopplung.

Kennzeichnend für diese Branchen ist, dass Gerätelebensdauern von zehn Jahren und mehr gefordert sind. In Europa haben sich in beiden Segmenten RAST-Steckverbinder durchgesetzt. Weitere Applikationen sind unter anderem Flachsteckverbinder, Schraubklemmen, Flachbandkabelsteckverbinder und Foliensteckverbinder. Der Trend zu kommunikationsfähigen Geräten führt zum steigenden Einsatz von Datensteckverbindern.

Abb. 7.84: Bedienblende eines Wäschetrockners mit RAST-5-Steckverbindern



Quelle: Lumberg

Das Segment der Unterhaltungselektronik, die „Braune Ware“, umfasst im Wesentlichen Audio-, TV- und Videogeräte sowie Spielkonsolen.

Für die äußeren Geräteschnittstellen werden ausschließlich genormte I/O-Steckverbinder wie zum Beispiel HDMI, USB, RJ45, D-SUB, Speicher- und Smartcardsocket, Koax-, Cinch- und Klinkenstecker genutzt.

Für die interne Verdrahtung werden Board-to-Board-, Wire-to-Board- und Flachbandsteckverbinder in den verschiedensten Ausführungsformen verwendet.

Abb. 7.85: Heizkörperregelung mit Zeitadapter



Quelle: Lumberg

Ein derzeit prägender Trend für „Rote“, „Weiße“ und „Braune“ Ware ist ihre Zusammenführung zum „Smart Home“. Als Smart Home wird ein Haushalt bezeichnet, in dem Haushalts- und Multimediageräte interagieren und zentral

ferngesteuert werden können. Durch die Smart-Home-Technologie werden einerseits Alltagsvorgänge automatisiert, andererseits können die Geräte-Einstellungen, zum Beispiel von Heizung, Licht, Sicherheits- und Komforteinrichtungen und Lautsprechern, per Smartphone und App schnell an die persönlichen Bedürfnisse angepasst werden – zu Hause oder unterwegs. Sogar die endgerätlose Steuerung (bediengerätelose), etwa der Sprachbefehl an ein Heizkörperthermostat oder ein Handzeichen, gewinnt zunehmend an Bedeutung. Das Smart Home ist die neue Generation der Hausautomation. Richtigen Aufwind bekam die Hausautomation mit zwei technologischen Fortschritten:

- Bidirektionale Funkstandards, wie WLAN und Bluetooth, die Haushalts- und Multimediageräte dazu befähigen, Informationen nicht nur zu empfangen, sondern auch zu senden. Kurz: Dinge können mit uns und untereinander kommunizieren, der Kühlschrank zum Beispiel eine Lebensmittelbestellung aufgeben, intelligente Thermostate die Heizung regeln.
- Smartphones oder Tablets als „Fernbedienung“ via App des intelligenten Hauses. Mit der Verbreitung dieser Standards ist die Hausautomation nun ohne großen Aufwand für jeden realisierbar. Für die funkbasierte Vernetzung smarter Geräte und Gadgets setzt sich dann auch der „knackige“ Begriff Smart Home durch.

Abb. 7.86: Staubsauger-Gelenkstück



Quelle: Lumberg

Smart Home hilft dabei, den Alltag komfortabler zu gestalten, indem es uns viele Steuer- und Überwachungstätigkeiten abnimmt. Gleichzeitig hilft ein klug vernetztes Zuhause dabei, Strom zu sparen und somit Umwelt und Ressourcen zu schonen.

Abb. 7.87: Steuerung für Kühlgeräte-kompressor



Quelle: Lumberg

Besondere Herausforderungen für die zukünftige Konsumelektronik sehen wir in der Kontaktsicherheit, der Miniaturisierung und in den Werkstoffeigenschaften, die den steigenden Umgebungsbedingungen standhalten müssen. Die Smart-Home-Technologie wird die Weiterentwicklung von Steckverbindern deutlich vorantreiben, um zum Beispiel die steigende Datengeschwindigkeit abbilden zu können.

Abb. 7.88: Steuerungselektronik einer Waschmaschine mit RAST-2.5-Steckverbindern



Quelle: Lumberg

7.1.2.4. Kfz-Elektronik

Pkw und Nutzfahrzeuge: Die Steckverbinder sind im Automobil ein wichtiger Bestandteil des Bordnetzes und sind in der Ausführungsform Wire-to-Wire oder Wire-to-Board ausgelegt. Der Anschluss der Leitung zum Kontakt ist fast ausschließlich in einer Crimpkontaktierung ausgeführt.

Abb. 7.89: Inliner-Terminal-System



Quelle: Lear

Steckverbinder für Anwendungen im Automobil sind in vielfältiger Ausprägung vorhanden:

- nach Bauraum und Polzahl
- in Signal- oder Hochstromauslegung
- in federgestützter Verrastung oder als Clean-Body-Kontakte für die Primär- sowie Sekundärverriegelung
- ungedichtet oder gedichtet mit Einzeladerabdichtung oder Gruppendichtung
- mit Gehäusen für abgesicherte Steckposition (CPA), Bajonett- oder Push-Pull-Verriegelungen
- mit oder ohne EMV-Beständigkeit (elektromagnetische Verträglichkeit)
- für Datenübertragung

Am häufigsten angewendet werden Kontaktsysteme in den Abmessungen 0,5 mm / 0,63 mm / 1,2 mm und 1,5 mm Messer / Kontaktbreite für Signal- und 2,8 mm / 4,8 mm / 6,3 mm / 8 mm / 9,5 mm / 12 mm Messer / Kontaktbreite für Hochstrom.

Abb. 7.90: Sicherungsbox im Automobil



Quelle: Lear

Der Automobil-Markt stellt bei niedrigsten Kosten die höchsten Sicherheitsanforderungen. Um Gewicht und Bauraum einzusparen, wird versucht, die Steckverbinder immer kompakter auszulegen. Damit steigt die Kontaktdichte, die bei einzelnen Systemen schon die Anzahl von 300 Kontakten überschritten hat. Mit dem Ziel, möglichst klein aufzubauen, sind die heutigen Kontaktfamilien unter Verwendung von hochleistungsfähigen

Legierungen (z. B. CuNiSi) gegenüber den bisherigen Systemen wesentlich stromtragfähiger. Miniaturisierte Systeme erfordern heute Gruppendichtungen anstelle von Einzeladerabdichtungen.

Abb. 7.91: Automotive Kontaktsysteme



Quelle: Lear

Im Pkw werden üblicherweise Steckverbinder in rechteckigen Kontaktsystemen eingesetzt, die teils modular aufgebaut sind. Im Nutzfahrzeugbereich werden nicht so hohe Anforderungen hinsichtlich Bauraum und Masse gestellt, sodass in diesem Applikationsfeld sehr viele Rundsteckverbinder-Systeme verwendet werden. Die vorgesehenen Laufleistungen im Lkw-Bereich sind ein Vielfaches höher als im Pkw-Bereich, sodass die Kontaktsysteme massiver ausgelegt sind, wobei es auch hier einen Trend zu Flachkontaktsystemen gibt, da immer mehr Schnittstellen von Schwingungen entkoppelt werden.

Abb. 7.92: Automotive Kontaktsysteme



Quelle: Lear

Die Steckhäufigkeit im Automobil ist eigentlich nur durch den Reparatur- oder Servicefall definiert. Unter dieser Voraussetzung ist die meist verwendete Kontaktoberfläche Zinn und für Leistungskontakte Silber.

Mit der Steigerung der elektrischen Funktionalität, der Kommunikationsdichte und der Sicherheitsanforderungen, beeinflusst durch die Elektromobilität sowie autonomes Fahren, werden auch in Zukunft immer mehr Kontaktsysteme, gerade aus dem Bereich der Datentechnik, im Automobilssektor verwendet und das bei zunehmender Dezentralisierung der Bordnetzstruktur.

Abb. 7.93: Automatisch abdimmender Innenspiegel mit RAST-Steckern in Schneidklemmtechnik



Quelle: Lumberg

Der Trend der Gewichtseinsparung führt dazu, dass für die Leitungen alternative Materialien wie zum Beispiel Aluminium bzw. bei kleineren Leiterquerschnitten harte Kupferlegierungen (CuMg, CuAg) verwendet werden. Dazu müssen Anschlusskontaktierungen angepasst und optimiert werden.

Abb. 7.94: LED-Rücklicht mit direkter Kontaktierung der Leiterplatte in Schneidklemmtechnik



Quelle: Lumberg

E-Mobilität, Elektrische Antriebe und Hybride:

Die Hersteller verfolgen verschiedene Konzepte, elektrische Antriebe in die Fahrzeuge zu integrieren. Diese Antriebe können zusätzlich zum Verbrennungsmotor (Hybrid) oder ausschließlich als E-Motor realisiert werden.

Abb. 7.95: Schnellladelösung für Busse



Quelle: Stäubli

Mit dem jeweiligen Antriebskonzept werden die Spannungs- und Stromklassen definiert. Diese sind nicht standardisiert, unterscheiden sich bei den OEMs und in den Modellklassen der OEMs selbst. Damit sind die derzeitigen Systeme in der Regel kundenspezifisch aufgebaut.

Hybrid- und Elektrofahrzeuge sind gekennzeichnet durch wesentlich höhere Temperatur- und Vibrationsbelastungen. Daraus resultieren schärfere Anforderungen für das Steckverbinder-Design, die Basismaterialien und Kontaktoberflächen. Es werden runde und rechteckige Kontaktsysteme verwendet, die vorwiegend mit Schirmung ausgeführt sind.

Derzeit gilt es, in verschiedenen Regionen und OEM-Arbeitskreisen Standards zu definieren. Konkrete Festlegungen sind bisher nur vereinzelt erfolgt, sodass weitestgehend jeder OEM auf individuelle Lösungen setzt. Weiterhin unterscheiden sich regional die gesetzlichen Rahmenbedingungen hinsichtlich der Sicherheitsanforderungen. Es gibt besondere Lösungen für Nutzfahrzeuge und Fahrzeuge mit hohen Leistungen für das sogenannte Opportunity-Charging.

Ladesteckverbinder für Elektro-Kfz und Plug-in-Hybride: Eine gut ausgebaute und einheitliche Ladeinfrastruktur ist für die erfolgreiche Entwicklung der Elektromobilität unabdingbar. Das zuverlässige Laden von Elektrofahrzeugen

erfolgt weltweit mit Steckverbindern, die speziell für den Einsatz an Elektro-Kfz und Ladepunkten entwickelt und normativ vereinheitlicht wurden. Auch wenn es verschiedene regionale Ausprägungen gibt, sind Ladestecker einer Norm untereinander kompatibel. Unterschieden wird zwischen den Standards Typ 1, Typ 2, GB/T und CHAdeMO.

Fahrzeug- und infrastrukturseitig setzen die meisten Hersteller heute auf das Combined-Charging-System (CCS). Das Steckgesicht ist so konzipiert, dass sich sowohl ein AC-Ladestecker (Wechselstrom) als auch ein DC-Ladestecker in das CCS-Fahrzeug-Inlet stecken lassen. Die Fahrzeugakkus können damit an der heimischen AC-Steckdose langsam über Nacht an speziellen Wandanschlussdosen (Wallboxen) und/oder an DC-Ladestationen mit deutlich höherer Geschwindigkeit geladen werden.

Bisher sind beim CCS Ladeströme bis zu 200 A in der Norm beschrieben. Um die Anforderung nach besonders kurzen Ladezeiten zu erfüllen, sind jedoch deutlich höhere Leistungen erforderlich. Die herkömmliche Ladetechnik ist damit überfordert, gefährliche Überhitzungen oder entsprechend große und damit unhandliche Ladekabel wären die Folge.

Auf Basis des etablierten CCS wird daher an der High-Power-Charging-Technologie (HPC) mit Ladeströmen bis zu 400 A bei 850 V Systemspannung (perspektivisch 500 A bei 1.000 V) gearbeitet. Bei heute üblichen Motorleistungen und Batteriekapazitäten würde ein HPC-System dann in ca. drei bis fünf Minuten Energie für etwa 100 Kilometer Fahrstrecke zuladen.

Abb. 7.96: Ladestation mit flüssigkeitsgekühltem HPC-Steckverbinder für 500 A/ 1.000 V DC-Ladeleistung



Quelle: Phoenix Contact

Voraussetzung für diese Ladeleistung sind flüssiggekühlte Kabel und Steckverbindungen mit integrierter Sensorik sowie entsprechend dimen-

sionierte Kühlaggregate in bzw. im Umfeld der Ladesäule. Die Wärmeentwicklung im Kabel und an den Leistungskontakten wird dabei kontinuierlich ermittelt und zur bedarfsgerechten Regulierung der Kühlleistung herangezogen.

Abb. 7.97: Flüssigkeitsgekühlter HPC-Steckverbinder für 500 A / 1.000 V DC-Ladeleistung



Quelle: Phoenix Contact

Die wesentlichen Abstimmungen zur Standardisierung des HPC-Systems und der eingesetzten Komponenten finden auf ISO/IEC-Ebene primär innerhalb der IEC 62196 statt.

7.1.2.5 Prüf- und Messtechnik

Jede Messsituation stellt neue Herausforderungen an den Anwender und das verwendete Prüf- und Messzubehör. Jede Branche, jeder Anwendungsbereich, jedes Spannungsumfeld ist in sich anders. Egal ob es sich dabei um Prüfspitzen, Abgreifer oder Steckverbinder handelt, die entscheidenden Parameter sind immer dieselben: Sicherheit, Zuverlässigkeit, Praxistauglichkeit, Präzision und Belastbarkeit des Messzubehörs. Um die Zuordnung des jeweils einzusetzenden Messzubehörs zu vereinfachen, hat die Norm EN 61010-031 mehrere Kategorien festgelegt, die bestimmen, wo in der Netzversorgung gearbeitet werden kann, und für die jeweilige Kategorie die entsprechenden Anforderungen definiert. Hierbei entscheidend ist die in der jeweiligen Messkategorie verfügbare Leistung im Falle eines Kurzschlusses.

Es gibt verschiedene Messkategorien, abgekürzt „CAT“, und im Allgemeinen gilt: Je höher die CAT, desto höher sind die Sicherheitsanforderungen an das Produkt.

Was den Bereich von Kleinspannungen (bis 30 V AC / 60 V DC) betrifft, geht man davon aus, dass die Berührung blanker Teile als ungefährlich einzustufen ist. Wird die Kleinspannung aber über ein Netzgerät geliefert, besteht immer eine Verbindung zur Netzversorgung. Insbesondere Menschen mit Vorerkrankungen (v. a. Herzerkrankungen) sollten Kontakt mit elektrischen Spannungen jedoch prinzipiell vermeiden. Aus diesem Grund wird die generelle Verwendung berührungsgeschützten Messzubehörs empfohlen – man denke etwa an einen Fehler im Netzgerät oder mögliche Überspannungen im Netz, hervorgerufen durch beispielsweise einen Blitzschlag. Mit entsprechender Vorsicht lassen sich Versuche in Elektroniklaboren und Ausbildungsstätten, aber auch vom Hobbyelektroniker zu Hause sicher realisieren.

Abb. 7.98: Die Kontaktelemente der Flanschdose sind durch einen gefederten Deckel geschützt



Quelle: Binder

Berührungsgeschütztes Messzubehör gemäß IEC/EN 61010-031 ist spätestens dann unerlässlich, wenn der Anwender Messungen an Stromkreisen vornimmt, die direkt mit dem Niederspannungsnetz verbunden sind. So spielt neben den Messergebnissen immer die Sicherheit die maßgebliche Rolle, sei es für Servicetechniker in Reparaturwerkstätten (CAT II) oder für Elektroinstallateure und EVU-Mitarbeiter (CAT III und CAT IV).

Abb. 7.99: Übersicht Steckverbinder Messzubehör/Labora-ausrüstung



Quelle: Stäubli

Abb. 7.100a/b: Messzubehör für unterschiedliche Einsatzgebiete bis zu Messkategorie CAT IV



Quelle: Stäubli

Abb. 7.101: Messstelle einer Förderrollenbahn



Quelle: Lumberg

7.2 Schalter und Taster

Aus der Historie sind viele Arten von Schaltern bzw. Schaltsystemen bekannt, die mit den heutigen „Schaltern“ und den sich entwickelnden Tendenzen nicht mehr viel Gemeinsames haben.

Schalter und Taster kommen je nach Einsatzgebiet und Anforderung in unterschiedlichen Varianten und Anwendungen vor.

7.2.1 Einsatzgebiete und Varianten

Schalter für Gehäuse und Bediensysteme: Hierzu gehören Wipp-, Druck-, Schiebe-, Zug-, Dreh-, Schnapp- oder Hebelschalter. Die Ausführung der Schalter oder Schalterabdeckungen trägt in hohem Maße zu Alleinstellungsmerkmalen für die damit ausgestatteten Geräte bei. Dies erfordert insbesondere im Bereich des Consumer-Markts eine hohe Flexibilität und kurze Reaktionszeit im Design und der Lieferung der ersten Muster.

Tasten: Hierzu gehören Drucktasten aus unterschiedlichen Materialien, Tastaturen mit Oberflächen aus Folie, Edelstahl und mit Touchbereichen, die unter anderem auf Piezo-, Optik- und Kapazitivtechnik beruhen. Eine wesentliche Anforderung, insbesondere bezüglich Tastaturen, ist die hohe Zyklusfestigkeit. Aufgrund der häufig horizontalen Bauweise im Gebrauch ist im besonderen Maße eine Absicherung gegenüber unbeabsichtigten Einwirkungen von Staub oder Flüssigkeiten (umgeworfene Kaffeetasse) sowie eine hohe Toleranz bezüglich der mechanischen Belastung bei der Betätigung der Tasten gefordert. Neben der zunehmenden Auslegung für raue Umgebungsbedingungen ist auch die Miniaturisierung ein wesentlicher Treiber. In Ergänzung zu den Tastaturen kommen in zunehmendem Maße Trackball, Touchpad und Fingermaus zum Einsatz. Die flexible, kurzfristige und kundenspezifische Auslegung auf Basis einer vielfach nutzbaren Plattform wird als Ansatz gesehen, kostengünstige und optimal adaptierte Lösungen zu erreichen. Je nach Anwendung ist jedoch auch eine Vergrößerung der Bedienfläche gewünscht, da die Anforderung an eine Bedienung Eindeutigkeit und Einfachheit darstellt.

Die Materialentwicklung für Tasten, meist mit hinterleuchteter oder funktioneller Optik, wird in Richtung abriebfester, gewichtsarmer und chemisch beständiger Oberflächen getrieben. Die Schwierigkeit besteht darin, diese gewünschten Eigenschaften mit den Rohstoffrichtlinien und Recyclingforderungen in Einklang zu bringen und Optik sowie Schaltfunktion miteinander zu verbinden.

Schalter und Taster für Leiterplatten: Hierzu gehören Kippschalter, Drehschalter, Dreh- und Kodierschalter, DIL/DIP-kompatible Schalter, Subminiaturschalter, taktile und berührungslose Schalter. Die wesentliche Anforderung an diese Schalter ist die Kompatibilität mit den Pick-and-Place-Automaten sowie den auf der Leiterplatte eingesetzten Lötverfahren.

Ein wesentlicher Trend für diese Schalter, insbesondere wenn sie ausschließlich für die Festlegung einzelner durch Schalter programmierbarer Funktionalitäten genutzt werden, ist die Miniarisierung. Die Einsparung an Fläche reduziert die Kosten der Leiterplatte und erlaubt gleichzeitig, die Geräte, insbesondere mobile, kleiner zu machen. Die Bedienbarkeit durch die Bedienungsebene darf darunter jedoch nicht leiden.

Sensorschalter und Taster: Hierzu gehören insbesondere kapazitive, magnetische und optische Sensortasten oder Tastenfelder bis hin zum Touchscreen. Konzeptionell sind diese Schalter/Taster durch die Vermeidung mechanischer Schaltfunktionen für höhere Zyklenzahlen ausgelegt. Die elektronische Erzeugung der Schaltsignale bietet sich an, die Schaltfunktion mit einer Busstruktur oder Controllerfunktion direkt zu koppeln. Insbesondere Touchscreen- und Tastenfeld-basierte Schalter und Taster erlauben durch die Programmierbarkeit ein Höchstmaß an Flexibilität. Hinsichtlich der Vereinfachung in der Bedienung und Benutzerführung werden diese Taster erheblich an Bedeutung und Verbreitung gewinnen. Der Trend geht dabei von den einzelnen Schaltelementen hin zu integrierten Funktionslösungen.

Für einen zunehmenden Markt ist die kapazitive Taste mit kraftloser Betätigung von großem Interesse. Dabei besteht nicht nur für die Oberflächenform der Tasten und Einbauorte eine hohe Flexibilität, sondern auch für die Auswahl der Materialien.

Neben den aktiv betätigten Schaltern gehören hierzu unter anderem auch die Sensoren, wie Temperaturschalter, Beschleunigungsschalter oder Druckschalter. Diese sensorgetriebenen Schalter sind insbesondere für automatische Überwachung der Betriebssicherheit, Füllstände, Förderüberwachung etc. konzipiert.

Abb. 7.102: Beschleunigungsschalter mit USB-Schnittstelle zur Beschleunigungs- und Lagemessung und für die Erfassung niederfrequenter Vibrationen



Quelle: Code Mercenaries Hard- und Software

Sicherheitsschalter: Hierzu gehören Schutz- und Sicherungsschalter, Not-Aus-Schalter, explosionsgeschützte Schalter und Endschalter. Als wesentliches Merkmal beinhalten diese Schalter in hohem Maße Redundanz und Rückmeldefunktionen. Die Auslegung für eine Funktionsfähigkeit unter extremen Umgebungsbedingungen wird als selbstverständlich vorausgesetzt und erfordert eine kontinuierliche Weiterentwicklung bezüglich Konzeption und Aufbautechnik.

Abb. 7.103: NOT-HALT-Schalter



Quelle: EAO

Automobilelektronikschalter: Schalter für die Automobilelektronik sind spezifisch für raue Umgebungsbedingungen ausgelegt. Neben der Materialoptimierung hinsichtlich Gewicht und Haltbarkeit unter extremen Temperaturwechselbelastungen spielt die Schaltsicherheit unter extremen Vibrationen eine große Rolle. Eine Vielzahl von Schaltfunktionen im Automobil sind sicherheitsrelevant und erfordern daher zunehmend die Integration einer Art Benutzerführung durch Beleuchtung und lichtbasierte Signale. Für Infotainment und Telematik werden aufgrund der Vielfalt der schaltbaren Funktionen in zunehmendem Maße programmierbare Touchscreen-Schalter oder Auswahlknöpfe zum Einsatz kommen.

Spezialschalter: Hierzu gehören spezifische Ausführungsformen wie Fußschalter, Tastendreh-schalter, Schloss- und Schlüsselschalter und galvanisch entkoppelte Reedschalter.

Ein wesentlicher Trend geht in Richtung geringerer Einbautiefen, um eine flexible Montage auf flachen Panels oder dicht gepackten Schaltschränken zu ermöglichen.

7.2.2 Anforderungen

Mechanik: Im Bereich der allgemeinen Mechanik sind keine gravierenden Änderungen zu erwarten. Nach wie vor reduzieren sich Geometrien und Anzahl der Anschlüsse, die SMT-Applikationen steigen gegenüber THT und die Anforderungen an eine höhere Flexibilität steigen gleichfalls.

Aufgrund der Forderung nach Programmierbarkeit intelligenter Schaltsysteme lässt sich jedoch die Forderung nach Komplexität bei gleichzeitiger Reduzierung der Anschlüsse nicht immer umsetzen und bedingt eine Erhöhung der Anzahl der Anschlüsse.

Weiterhin ist zu erkennen, dass vermehrt „Kurzhubtaster“ zum Einsatz kommen. Darüber hinaus steigen Anwendungen mit Schutzarten, speziell wo Dichtigkeiten (z. B. mobile Anwendungen) gefordert werden.

Design: Insbesondere für Consumer-Anwendungen ist das Design wie auch die funktionale Ausgestaltung entscheidend. Aber auch bei Industrienanwendungen wird im Hinblick auf gute und sichere Bedienbarkeit verstärkt auf Designaspekte geachtet. Die Ergonomie wie die Vereinfachung der Bedienung tritt noch mehr in den Vordergrund. Ergonomie und Komfortsteigerungen schlagen sich gleichzeitig in dem Trend der Be- oder Hinterleuchtung nieder. Dabei ist die Beleuchtung nicht nur eine optische Untermalung, sondern spielt eine wachsende Rolle in der Visualisierung der Schalter als solche und der Erkennung des jeweiligen Schaltzustands. Die Kombination dieser Eigenschaften bestimmt als Alleinstellungsmerkmal den Markterfolg eines gesamten Geräts. Die Funktionalität wird als Selbstverständlichkeit auf einem adäquaten Niveau vorausgesetzt.

Feedback: Neben der klassischen Stellung eines Schalters für die Erkennung des jeweiligen Schaltzustands spielt der Einsatz von Zustandsbeleuchtung eine wachsende Rolle. LEDs können dabei punktuell auf der Oberfläche der Schaltsysteme den Schaltzustand anzeigen, die gesamte Fläche in verschiedenen Farben ausleuchten oder in wachsendem Umfang bei Einsatz von Vielfach-LEDs Informationen durch wechselnde Lichtspiele auf der Schalteroberfläche oder am Rande der Taster wiedergeben. Sowohl die bessere Erkennung als auch die dadurch mögliche Kundenführung spielen eine wachsende Rolle bei Warenautomaten, medizinischen Geräten oder Anwendungen in der Prozessautomation.

Ebenso wird verstärkt auf eine haptische Rückmeldung beim Betätigen von insbesondere Sensorschaltern und -tasten wie auch bei Touchpads Wert gelegt, sodass der Anwender auch eine spürbare Rückmeldung erhält, wenn er zum Beispiel eine Taste betätigt.

Kapselung: Die wachsende Nutzung mobiler Geräte stellt wachsende Anforderungen an einen optimalen Schutz gegenüber Staub und Flüssigkeiten. Selbst klassische Wippschalter werden deshalb zunehmend für höhere Dichtigkeitsanforderungen und Schutzklassen ausgelegt.

Extreme Einsatzbedingungen / Vandalensicherheit: Für extreme Einsatzbereiche wie direkte Sonneneinstrahlung, Feuchtigkeit durch Regen oder Minustemperaturen mit Eis und Schnee ist die Auswahl an einsetzbaren Technologien für Schalter und Taster deutlich reduziert. Alle Schalter mit beweglichen Teilen sind anfällig für Fehlfunktionen durch thermische Ausdehnung oder Frieren. Insofern liegt die Betonung auf Sensortastern, die sich vollständig kapseln lassen. Insbesondere Piezotaster und kapazitive Taster mit komplett geschlossener Oberfläche sind für solche Anforderungen prädestiniert.

Je nach Ausführung können die Schalter für die Mechanik und den elektrischen Anschluss unterschiedliche Schutzklassen aufweisen. Angestrebt werden immer höhere Schutzklassen von zum Beispiel IP67. Dies ist herausfordernd für mechanische Taster, da der Aufwand für eine solche Schutzart stark steigt.

Abb. 7.104: Dezentrale Bedieneinheit für robuste industrielle Umgebungen am Beispiel der NOT-HALT-Funktion



Quelle: EAO

Elektrik/Elektronik: Die Komplexität von Schaltern und Tastern wird zukünftig stark davon abhängen, ob diese für das Schalten von Analogsignalen, als digitales Schaltelement oder als Sensorelement (gegebenenfalls mit Eigenintelligenz, die programmierbar ist) eingesetzt werden.

Anwendungen in Schaltsystemen werden immer komplexer und höherer integriert. Diese bewirken eine Vereinfachung in der Bedienbarkeit, bedingen jedoch eine gewisse (programmierbare) „Intelligenz“ in den Systemen. Zusätzlich halten Features für Ambiente- bzw. Such- und

Funktionsbeleuchtung verstärkt Einzug in den Schaltern.

Bei der Verwendung in Steuerungssystemen und auch auf Prozessorebene müssen Schaltspannung und Durchgangswiderstand deutlich verringert werden, was vermehrt sensorische Komponenten zum Einsatz kommen lässt.

Sonstige Aspekte: Unverkennbar ist der Trend zur vermehrten kundenspezifischen Entwicklung auf Kosten der Standardentwicklungen. Diese Entwicklung hat unmittelbar den Effekt, dass die Normierung von Schaltern und Tastern zunehmend in den Hintergrund tritt.

Prüfzeichen und Zertifizierungen bekommen weitere Bedeutung, da Anforderungen aus Kunden-, Gesetzes- und Versicherungssicht zunehmen. Auch globale Wirtschaftsräume und deren Abschottungsstrategien nehmen verstärkt Einfluss.

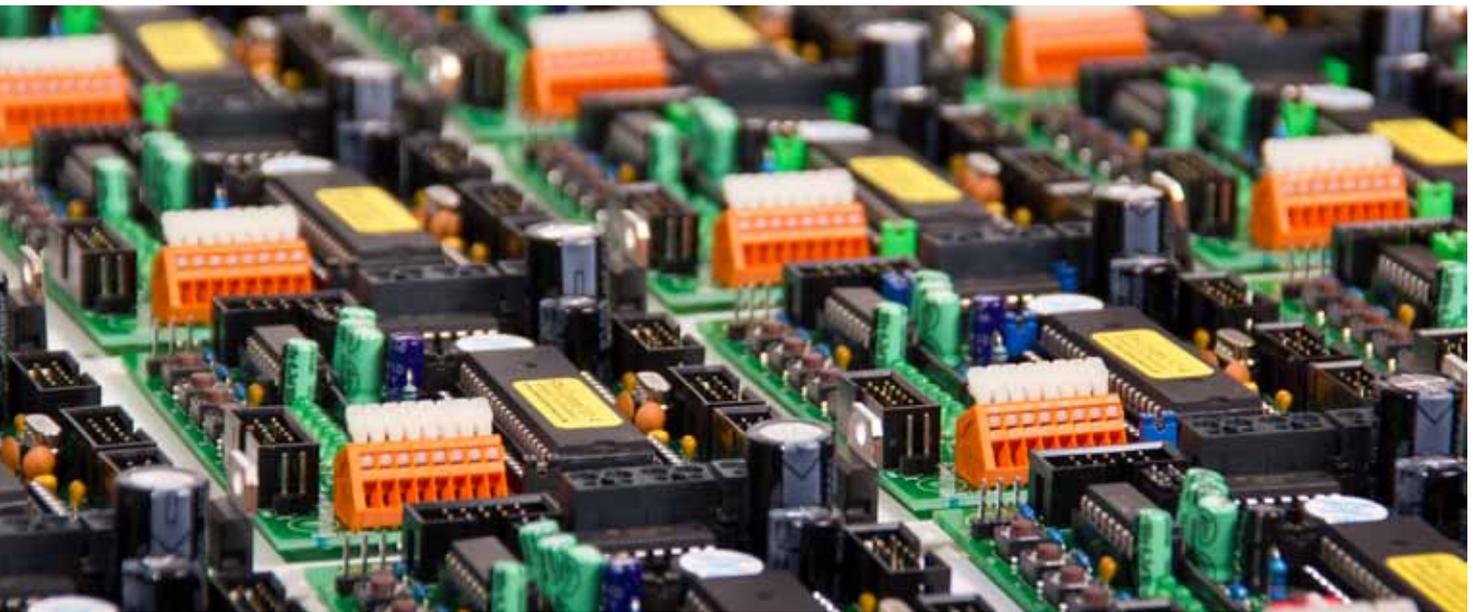
Die Sicherheitsforderungen werden weiter in ihrer Bedeutung steigen. Alle Hersteller müssen höherwertiger, qualitätsorientierter und sicherheitsbewusster fertigen. Dies resultiert allein schon aus der Globalisierung der Märkte und den gestiegenen Forderungen beispielsweise aus der Produkthaftung.

Schlussfolgerungen: Man kann feststellen, dass die Entwicklungen insgesamt breiter in die jeweiligen Projektierungen reichen, sodass auch die Anforderungsprofile vielfältiger sind. Der Effekt daraus ist die sehr breite Entwicklungstiefe in die jeweiligen Kunden- und Applikationsanforderungen hinein und dies in zunehmendem Maße nicht nur im Bereich Automotive, sondern auch im Bereich der Industrieelektronik.

Schaltsysteme der Zukunft werden immer komplexer und intelligenter werden und weniger als Standard, sondern vermehrt in Form von kundenspezifischen Entwicklungen zu projektieren sein. Dabei ist insbesondere bei der gesellschaftlichen Entwicklung zu beachten, dass nicht nur das technisch Machbare, sondern auch die Erfordernisse des „Human Interface“ als Grundlage für weitere Entwicklungen gesehen werden müssen (z. B. Design und Bedienbarkeit: Größe des Bedienteils etc.).



8 Leiterplatten

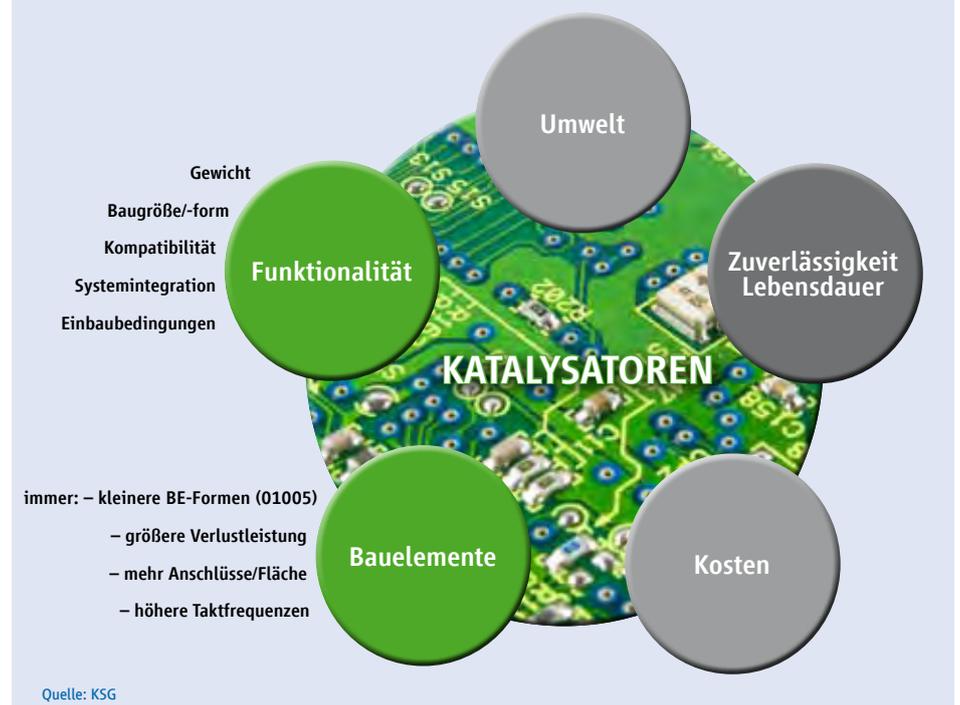


Quelle: Leonardo Franko / Fotolia.com

Unabhängig von den Technologiesprüngen, welche die Leiterplattentechnologien in ihrer geschichtlichen Entwicklung durchlaufen haben, ihre Hauptinnovation, als Träger und elektrisches Verbindungselement elektronischer Bauelemente zu fungieren, ist bis heute erhalten geblieben und wird auch in der Zukunft ihre Hauptfunktion definieren.

Die Entwicklung der Leiterplattentechnologie wurde und wird primär gelenkt durch die zu erreichenden Funktionalitäten des Endprodukts und damit der elektronischen Baugruppen. Sowohl die immer weiter voranschreitende Entwicklung der Bauelemente (z. B. elektrische, physikalische Eigenschaften, Bauform/Baugröße usw.), der Kostendruck, die Anforderungen an Zuverlässigkeit und Lebensdauer als auch die sich verschärfenden Umweltaforderungen wirken als Katalysatoren der Technologieentwicklung.

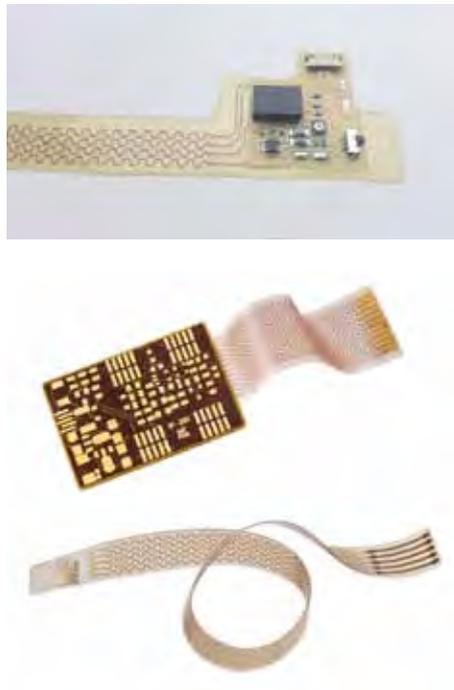
Abb. 8.1: Einflussgrößen Entwicklung Leiterplattentechnologie



Trends wie Mobilität, Gesundheit und Digitalisierung strahlen in alle Bereiche des gesellschaftlichen Lebens und der Wirtschaft und beeinflussen die Entwicklungstrends in Wissenschaft und Technik und damit auch der Elektronikindustrie.

Hierdurch eröffnen sich neue Einsatzfelder der Elektronik, wie beispielsweise in der textilen Anwendung mit den sogenannten „Smart Textiles“ oder „Wearables“, die eine neue Form der Mensch-Technik-Interaktion mit nahezu unendlichen Möglichkeiten darstellen. Sie revolutionieren unseren Umgang mit digitalen Technologien, zum Beispiel als Smart Shirts, intelligente Accessoires oder Medizinprodukte. Für die Leiterplattenhersteller bedeutet dies, auf neuen Trägermaterialien innovative Lösungen zur Dehnbarkeit, Biokompatibilität, Hautverträglichkeit, aber auch Waschbarkeit eines Schaltungsträgers zu finden. Anforderungen, die in der Vergangenheit keine oder nur eine untergeordnete Rolle spielten, aber künftig für diese Anwendungsfälle unerlässlich werden.

Abb. 8.2a/b: Beispiele für dehnbare Elektronik zur Integration in Textilien



Quelle: Würth Elektronik

Mit Blick auf einen weiteren Megatrend, den demografischen Wandel, eröffnen sich mit der steigenden Lebenserwartung, dem erweiterten Gesundheitsbewusstsein und mit dem damit einhergehenden Kostendruck im Gesundheitswesen neue Märkte und Herausforderungen für die Elektrotechnik/Elektronik im Bereich der medizi-

nischen Analytik und Diagnostik. Beispielhaft sei hier die Integration von miniaturisierter Sensorik in minimalinvasiven Werkzeugen (Kathedern, Endoskopen) genannt, aber auch die Entwicklung implantierbarer hochzuverlässiger Elektronik.

Mit geeigneten Endoberflächen können künftig hautfreundliche oder sogar biokompatible Flex-Leiterplatten für Anwendungen im medizinischen Bereich realisiert werden. Diese sind in der Lage, sich an die unterschiedlichsten Formen und Konturen anzupassen, womit Anwendungen am Menschen möglich werden. Besonders die Hautfreundlichkeit, Weichheit und ultraflexible Verformbarkeit sind für die stressfreie und komfortable Befestigung des Systems auf der empfindlichen Haut zwingend erforderlich. Hier können Leiterplatten auf Basis von Polyurethan eine Lösung darstellen. Leichte, dehnbare und semitransparente Schaltungsträger, die direkt auf Textilien laminiert werden, ermöglichen einen hohen Tragekomfort. Die Vorteile einer konventionellen Leiterplatte (Fertigungsoptionen, Bestückung, Robustheit etc.) und neuartige Eigenschaften der biegeschlaffen Polyurethanfolien (Dehnbarkeit, Weichheit, Biokompatibilität) sind in der neuen Technologie vereint.

Auch der bereits eingesetzte dynamische Veränderungsprozess im Bereich der Mobilität mit ihren Mainstreams der Konnektivität des Automobils, dem autonomen Fahren und den alternativen Antriebssystemen beeinflusst heute schon stark die Entwicklungstrends in der Elektronikbranche und damit auch die Zukunft der Leiterplattentechnologien. Der explosionsartige Anstieg des Bedarfs an unterschiedlichster Sensorik im Automobil forciert nicht nur die weitere Miniaturisierung und damit die Notwendigkeit zur Integration von Funktionalitäten in das Innere der Leiterplatte, sondern erfordert zum Beispiel auch den Einsatz und die Verarbeitung neuer hochfrequenztauglicher Basismaterialien. Innovative Lösungskonzepte sind für das Thermomanagement der neuesten Generation intelligenter LED-Fahrzeugbeleuchtungssysteme genauso gefragt wie im Bereich der Leistungselektronik für Antriebs- und Energiespeichersysteme im Fahrzeug. Immer weniger zur Verfügung stehender Bauraum erfordert neue 3D-Integrationskonzeptionen.

Abb. 8.3: 3D-starrflexible Leiterplatte wird zum Würfel



Quelle: Würth Elektronik

Erfüllen heute flexible bzw. starrflexible Standardtechnologien die Anforderungen, so werden zukünftig auch faltbare oder gerollte Schaltungs-träger benötigt. Im Vergleich mit konventionellen Technologien bieten diese zahlreiche Vorteile und tragen zur Lösung physikalischer und mechanischer Probleme bei. Zu nennen wären hier beispielhaft die Nutzung der Höchstauf-lösung und Erhöhung der Wicklungsdichte in Mul-tilayern, die Kombination mit konventionellen und neuartigen sensorischen Materialien, wie zum Beispiel mit Magnetkernen, Piezofolien, aktiven und passiven Bauelementen, sowie die zunehmende Integration bei eingeschränkter Strukturdichte. Sensoren (induktiv, kapazitiv, piezo etc.), Energy-Harvester und Übertrager (Energie und Datenübertragung), motorische Anwendungen (Linear-, Planar-, Mikromotoren) sind nur einige Einsatzgebiete.

Abb. 8.4: Gefaltete Spule aus flexi-blem Material



Quelle: Würth Elektronik

Die vorgenannten Beispiele zeigen, dass die Entwicklung der Elektronik und damit auch der Leiterplattentechnologien bereits heute schon maßgeblich von diesen global wirkenden Main- und Subtrends gesteuert wird. Es ist davon aus-zugehen, dass sich dieser Prozess künftig noch beschleunigt und verstärkt.

Alle diese ursächlich durch die Anforderungen an die Produktfunktionalität getriebenen Ent-wicklungstrends wirken sich gleichfalls auf die Entwicklung der Maschinen- und Anlagentechnik des Leiterplattenproduzenten aus. Digitale und additive Fertigungstechnologien wie Laserdirekt-

belichtungssysteme und Inkjet-Technik halten hier schon seit Jahren Einzug und verändern grundlegend die technische Basis der Leiterplat-tenhersteller. Während sich in der Vergangenheit Technologien zum Druck von Elektronik aufgrund fehlender geeigneter Materialien nicht flächen-haft durchsetzen konnten, so zeigen die neues-ten Entwicklungen auf dem Gebiet der additi-ven Fertigungstechnologien mit dem 3D-Druck neue Chancen und Möglichkeiten zur additiven volldigitalisierten Herstellung einer Leiterplatte außerhalb der bekannten Standardprozesse auf. Auch hier wird ein erfolgreicher Technologe-durchbruch davon abhängen, ob es in den nächs-ten Jahren der Materialforschung gelingt, druck-bare Materialien zu entwickeln, die vergleichbare oder bessere Endigenschaften aufweisen, und ob die Maschinenhersteller die Prozesskosten in einen wirtschaftlichen Korridor bringen können. Nur dann kann die Vision einer gedruckten Lei-terplatte Wirklichkeit werden.

8.1 Materialien für die Leiterplattenfertigung

8.1.1 Basismaterialien

8.1.1.1 Starre Basismaterialien

Ausgangspunkt einer Leiterplatte mit ihren in den nächsten Jahren steigenden Anforderungen ist ein funktionelles und zuverlässiges Basismaterial.

Derzeit sind Epoxidharz-Basismaterialien mit dem Flammschutzhemmer TBBPA, entweder Dicy- oder phenolisch gehärtet und in ungefüllter oder gefüllter Variation, der Stand der Technik. Trotz seit Jahren steigender thermischer Anforderun-gen sind Dicy-gehärtete, ungefüllte Tg135-Mate-rialien in vielen Bereichen unserer Industrie noch im Einsatz und werden als „Standard-Materialien“ bezeichnet. Jedoch werden diese Materialien auf lange Sicht den technologischen Entwicklungen nicht genügen, sodass sie auch in Europa durch Tg150-Materialien als „Standard-Tg-Materialien“ ersetzt werden.

Zukünftig werden die entwicklungstreibenden Trends aus Sicht des Basismaterials vornehmlich durch die Anforderungen der Miniaturisierung (über alle Bereiche hinweg), der Signalintegrität bei hohen Datenraten und hohen Frequenzen (gegeben durch die fortschreitende Digitalisie-rung) und durch das Management von hohen Temperaturen für unterschiedliche Bereiche der Leistungselektronik abgeleitet. Zusätzlich zu ver-besserten Härtermechanismen und Füllstoffen werden andere Harzsysteme zum Einsatz kom-men, wie beispielsweise Polyimid, PTFE sowie Mischungen daraus als sogenannte Blends.

Die Miniaturisierung wird den Einsatz von Dünnstlaminaten und entsprechenden Prepregs notwendig machen. Der CTI-Wert wird im Hinblick auf erhöhte Isolationsanforderungen in den Vordergrund rücken.

Hinzukommende Anforderungen der Signalintegrität werden den flächendeckenden Einsatz von Spreaded Glass und Kupferfolien mit minimalen Rauigkeiten forcieren. Alternative, kostengünstige Lösungen für Low-Loss-/Low-Dk-Materialien werden benötigt.

Hohe Wärmebelastungen durch steigende Verlustleistungen und Umgebungstemperaturen in Verbindung mit längeren Lebenszyklen werden den Basismaterialien höhere Temperaturbeständigkeit und Zuverlässigkeit abverlangen. Unabhängig ist dabei die Kombination der Wärmebeständigkeit mit einem Wärmemanagementsystem in Form von besser wärmeleitfähigen Materialien und IMS-Konstruktionen (Insulated Metal Substrate) in Laminataufbauten. Effizientes Abführen von Wärme wird zur Reduktion der Wärmebelastung und höheren Lebenszyklen führen. Zusätzlich wird speziell für die Leistungselektronik oder für Hochvolt-Anwendungen die CAF-Beständigkeit bei hohen Spannungen bedeutsam.

Dazu wird in den nächsten Jahren der Ruf nach Halogenfreiheit lauter werden. Nicht nur der Umweltaspekt eines solchen „grünen“ Materials, sondern auch die technischen Features, wie eine erhöhte Wärmebeständigkeit und geringere Feuchtigkeitsaufnahme, sprechen dafür.

Besonders bedeutsam ist die Eigenschaft der höheren CAF-Beständigkeit des halogenfreien Materials gegenüber dem TBBPA-Material.

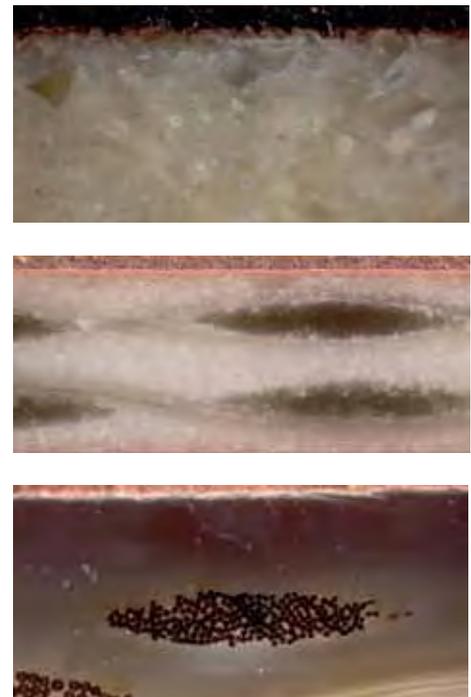
Unter Wärmeeinfluss werden Bromide aus dem TBBPA freigesetzt und es kann zu Lunkerbildung kommen, was wiederum die CAF-Beständigkeit eines Materials negativ beeinflusst.

Die Anforderungen an ein einzusetzendes Basismaterial erhöhen sich schrittweise und werden von folgenden Faktoren getrieben:

- Wärmestabilität unter dem Aspekt erhöhter Dauergebrauchstemperatur und Lebenszyklen (neben Hoch-Tg-Td/T300-Materialien)
- Wärmemanagement [Materialien mit hohen Wärmeleitfähigkeiten und IMS-Laminaten (Insulated Metal Substrate)]
- höhere Zyklenfestigkeit
- CAF-Beständigkeit bei hohen Spannungen und engsten Abständen
- geringe Feuchtigkeitsaufnahme
- Signalintegrität (Temperatur- und Frequenzstabile Low Loss / Low Dk bei hohen Frequenzen)

Diese Anforderungen werden sich für bestimmte Anwendungen teilweise überschneiden, aber die Entwicklung spezialisierter Basismaterialien wird für spezielle Bereiche und High-Performance-Applikationen unabdingbar.

Abb. 8.5a–c: Schliffbild (oben), Materialstrukturen (Mitte) und Basismaterialien (unten) für HF-Anwendungen



Quelle: KSG

Tab. 8.1: Vergleich Tg150-Basismaterial mit halogeniertem und halogenfreiem Flammenschutz

	TBBPA	Halogenfrei
Tg (°C) DSC (TMA* or DMA**)	150	150
T-260 (min) unclad	>60	>60
T-288 (min) unclad	>25	>60
Td (°C), 2 % Wt. loss	330	370
Td (°C), 5 % Wt. loss	340	390
Water absorption %	0,10	0,09

Quelle: Isola

8.1.1.2 Flexible Basismaterialien

Für die Herstellung von flexiblen Leiterplatten werden flexible Folien eingesetzt. In Abhängigkeit von den Anforderungen für die Weiterverarbeitung (z. B. Bestücken, Löten) sowie den geforderten Endprodukthanforderungen kommen unterschiedlichste Materialien zum Einsatz, wie zum Beispiel:

- PET, PEN (nicht lötfähig)
- Polyimid
- LCP (Liquid-Crystal-Polymer)

Für lötfähige, flexible und Starrflex-Leiterplatten werden heutzutage mehrheitlich kleberlose Basismaterialien eingesetzt, also ohne zusätzlichen Kleber zwischen der Flexfolie und der Kupferkaschierung. Ein weiterer Trend liegt darin, dass die flexiblen Materialien immer dünner und damit noch flexibler werden (z. B. PI mit 12,5 µm Dicke) bei gleichzeitig sehr dünnen Kupferkaschierungen für sehr feine Strukturen (z. B. 5 µm Basiskupfer). Um diesen Trends folgen zu können, sind neue Materialien in der Entwicklung. Diese ultradünnen kupferkaschierten und mit einer Harzkleberschicht ausgestatteten Flexmaterialien sind vergleichbar mit der in der Vergangenheit in HDI-Technologie eingesetzten RCC-Folie. Im Vergleich zur bekannten RCC-Folie sind diese jedoch dünner und besitzen eine sichere Isolation.

8.1.1.3 Klebefolien, Deckfolien, Verbundfolien

Klebeschichten aus Acryl oder Epoxy dienen zum Aufbau mehrlagiger Systeme, wobei Acrylkleber zunehmend durch Epoxysysteme ersetzt werden. Deckfolien aus Kleber und Flexmaterial dienen zum Schutz der Kupferstrukturen (in der Starrflex-Technologie üblicherweise nur im flexiblen Bereich). Verbundfolien sind flexible Folien mit Klebersystemen auf beiden Seiten.

Zukünftig könnten alle diese Funktionen durch eine einzige Schicht aus einem hochtemperaturbeständigen Polyimid realisiert werden, das bei hohen Temperaturen als Kleber fungiert und gleichzeitig eine hohe Isolation bietet.

8.1.1.4 Lacksysteme

Durch die Einbauorte – gerade im Automobilbereich – verschieben sich die Anforderungen an die Temperatur und die Temperaturwechselbeständigkeit in einen immer höheren Bereich. Während bei der Temperaturwechselfestigkeit der Testzyklus bei niedrigen Temperaturen recht konstant mit -40 °C beschrieben wird, kommt es bei den hohen Temperaturen zu Anforderungen, die in den Bereich 175 °C bis 200 °C gehen. Neben den Einbauorten der Baugruppen

sind diese Temperaturen auch der Zyklanzahl geschuldet. Hier möchte man von Anforderungen von 2.000 bis 3.000 Zyklen durch Erhöhung der Temperatur wieder auf kürzere Testzeiten kommen.

Hinzu kommt der steigende Anteil an Leistungselektronik zum Beispiel bei E-Fahrzeugen und den Ladestationen. Hohe Ströme und neue Halbleiter (GaN) sorgen für Hotspots auf der Leiterplatte und führen zu Temperaturstress.

Um Bestückungsprobleme zu verhindern, sind Applikationsverfahren gefordert, die eine ausreichende Kantenabdeckung von etwa 4 µm bei gleichzeitig limitierter maximaler Abdeckung der Flächen erzielen.

Die Bauteilgeometrie erlaubt eine immer engere Bestückung, die auch eine möglichst hohe Auflösung sowie eine Reduzierung bzw. weitere Einschränkung der bestehenden Toleranzbereiche der Restringbreite erfordert. Hier werden verstärkt Direktbelichtungssysteme zum Einsatz kommen, die neben einer deutlich schnelleren Belichtungszeit der Lötstopplacke auch den Einsatz von weißen und schwarzen Lacksystemen ermöglichen. Neben der höheren Auflösung und dem Entfall von Belichtungsfilmen werden durch die Direktbelichtungstechnologie neben der Kapazität auch die Flexibilität, die Kostenstruktur sowie die technischen Möglichkeiten (z. B. Serialisierung, Traceability) verbessert.

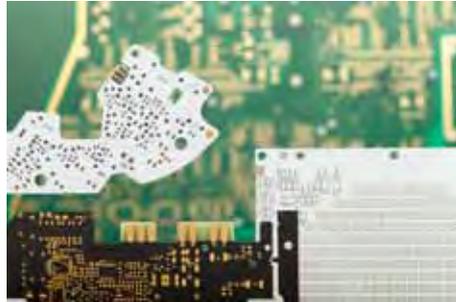
Diese Forderungen der Produktionstechnik, verbunden mit den immer kleineren Serien – gerade in Europa –, beschleunigen den Trend zu Lötstopplacken, die im Inkjet-Verfahren appliziert werden. Bei diesem Verfahren können neben der Realisierung der 1-Stück-Serie auch ganze Prozessschritte wie Belichtung und Entwicklung wegfallen. Selbstverständlich sind die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der fotostrukturierbaren Lötstopplacke einzuhalten.

Die Wärmeableitung der immer leistungsfähigeren Bauteile wird vermehrt mit wärmeleitfähigen Lacken und Pasten realisiert, aber auch durch eine höhere Wärmeleitfähigkeit der Lötstopplacke unterstützt.

Die rasant wachsende LED-Lichttechnik bewirkt durch den Einsatz von leistungsfähigen High-Power-LEDs eine stärkere Wärmeentwicklung auf dem Substrat, die mit den oben beschriebenen Methoden abgeführt werden müssen. Die hierfür entwickelten lichtausbeuteverbessernden weißen Lötstopplacke sind damit einem zusätzlichen enormen Temperaturstress ausgesetzt. Hier

kommt künftig der Remission, der vergilbungsarmen Hitzebeständigkeit sowie der UV-Beständigkeit eine immer größere Bedeutung zu.

Abb. 8.6: Produktbeispiele



Quelle: Lackwerke Peters

8.2 Oberflächen

Auch unter der Maßgabe, dass dem Verfasser zur prozentualen Verteilung der Oberflächentechnologien der deutschen bzw. europäischen Leiterplattenfertigung keine gesicherten statistischen Zahlen vorliegen, kann man doch anhand einer Analyse der Produktneuanläufe der letzten Jahre folgende Aussage treffen:

8.2.1 Lötflächen

Aufgrund des vom Gesetzgeber eingeleiteten und mittlerweile abgeschlossenen Umstiegs auf bleifreie Oberflächen sowie der zunehmenden Miniaturisierung der Leiterbilder gewinnen die chemischen Oberflächen unverändert an Bedeutung.

Hierbei spielt die chemisch NiAu-Oberfläche (ENIG) eine dominante Rolle, da sie neben einer planaren Oberfläche auch eine Langzeitverarbeitbarkeit garantiert. Gleichzeitig eröffnet sie dem Anwender die Möglichkeit des Aluminiumdraht-Bondens. Es kann davon ausgegangen werden, dass mit dem prognostizierten Anstieg der Fein- bzw. Feinstleitetchnologien der Fertigungsanteil dieser Oberflächentechnologie weiter kontinuierlich wachsen wird.

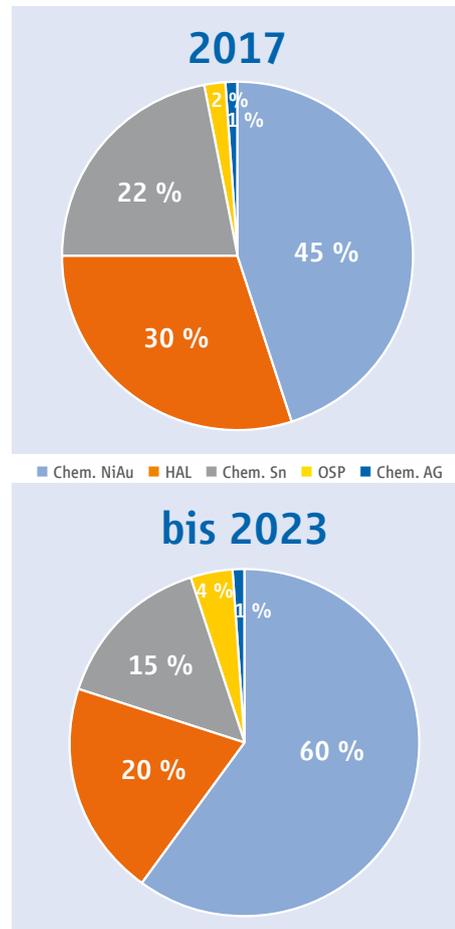
Im Gegensatz hierzu ist im gleichen Zeitraum eine Stagnation des Anteils der chemisch Sn-Oberfläche zu beobachten. Obwohl die chemisch Sn-Oberfläche ebenfalls eine sehr gute planare Oberflächentopografie und Wirtschaftlichkeit bietet, führt sowohl die eingeschränkte Lagerfähigkeit als auch die teilweise nicht gegebene, aber geforderte Prozessstabilität bei Mehrfachlötlungen nicht zu den erwarteten Steigerungsraten. Dieser Trend wird sich voraussichtlich auch in den nächsten Jahren fortsetzen.

Gleiches gilt auch für die OSP-Oberfläche (Organic Solderability Preservative), wenngleich sich der Fertigungsanteil bei den Leiterplattenherstellern schon seit Jahren auf einem sehr geringen Niveau bewegt. Die OSP-Oberfläche kommt heute im Wesentlichen für kostensensible Produkte, die in der Weiterverarbeitung nicht mehr als zwei Lötprozessen unterzogen werden, zum Einsatz. Hier unternahm die Chemie-Hersteller in der Vergangenheit große Anstrengungen zur Optimierung ihrer Produkte und erreichten im Ergebnis eine höhere thermische Beständigkeit der abgeschiedenen organischen Schicht. Damit waren die Voraussetzungen gegeben, dass sich heute die Entwicklungsabteilungen namhafter Automobilzulieferer dieser Oberflächentechnologie wieder bedienen und sie für Hochfrequenzanwendungen und sogar für Einpresstechnologien erfolgreich qualifizierten.

Die „altherwürdige“ HAL-Oberfläche (Hot Air Leveling; dt. Heißluftverzinneung) in ihrer bleihaltigen bzw. bleifreien Version ist heute für Leiterplatten mit geringeren Leiterbildanforderungen, trotz ihrer Nachteile in der Schichtdickenverteilung und der thermischen Stressausübung auf das FR4-Basismaterial, noch relativ weit verbreitet. Mit dem sukzessiven Auslaufen der Ausnahmegenehmigungen zur Bleifreiheit für heute von der Umstellung noch befreite Anwendungsgebiete sowie der Entwicklung zu hochkomplexeren Leiterbildern wird der Anteil der HAL-Oberfläche in den nächsten Jahren weiter kontinuierlich sinken.

Obwohl die chemisch Ag-Oberfläche ebenfalls eine gute Lötbarkeit gewährleistet und in einigen Anwendungsgebieten, wie zum Beispiel der Hochfrequenztechnik, sogar Vorteile gegenüber den Alternativoberflächen besitzt, hat sich diese bis heute in Europa nicht entscheidend durchsetzen können. Als Grund hierfür sind die Sensibilität dieser Oberfläche gegenüber Schwefeldioxid-Verbindungen (SO₂) und die damit zusammenhängenden notwendigen Zusatzaufwände bei der Lagerung bzw. Verarbeitung zu sehen.

Abb. 8.7: Trendabschätzung Deutschland/Europa der ZVEI-AK-Mitgliedsfirmen

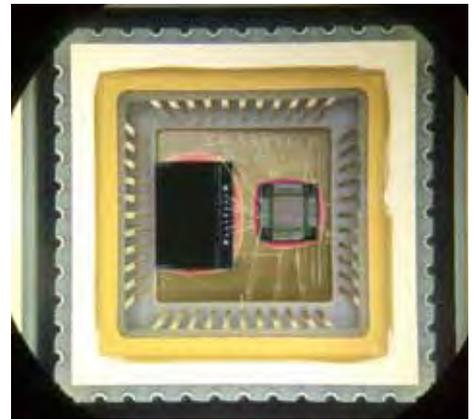


Quelle: ZVEI

8.2.2 Bondoberflächen

Dem Baugruppenhersteller steht heute eine Vielzahl von Bondoberflächen für Aluminium- bzw. Golddraht-Bondverfahren zur Verfügung (siehe Tab. 8.2). Aufgrund der stärker verbreiteten Aluminiumdraht-Anwendungen besitzt die kostengünstige ENIG-Oberfläche die größte Marktdurchdringung. Wegen der wachsenden Zuverlässigkeitsanforderung (Vermeidung von Nickel-Korrosionserscheinungen) gewinnen die nickelfreien Oberflächen und die teilreduktiven Goldverfahren (TRG) zunehmend an Bedeutung. Zusätzlich erfordern Anwendungen in der Hochfrequenztechnik zunehmend nickelfreie Endoberflächen.

Abb. 8.8: System-in-Package-Lösung / Al-Draht wedge-wedge



Quelle: KSG

Tab. 8.2: Übersicht der am weitesten verbreiteten Bondoberflächen

Abkürzung	TBBPA	Einsatzgebiet Bonden
ENIG	Elektroless Ni, Immersion Gold	Al-Draht
ENIG TRG	Elektroless Ni, Immersion Gold, teilreduktiv Gold	Au-Draht mit erhöhter Au-Dicke
ENIG RG	Elektroless Ni, Immersion Gold, reduktives Gold	Au-Draht
ENEPIG TRG	Elektroless Ni/Pd, Immersion Gold, teilreduktiv Gold	Al-Draht, Au-Draht
ISIG	Immersion Silber, Immersion Gold	Al-Draht, Au-Draht
EPIG	Elektroless Pd, Immersion Gold	Al-Draht, Au-Draht
ASIG	Autocatalytic Silber Immersion Gold	Al-Draht, Au-Draht

Quelle: KSG

8.3 Einseitige, nicht durchkontaktierte (ndk) Leiterplatten / zweiseitig durchkontaktierte (dk) Leiterplatten

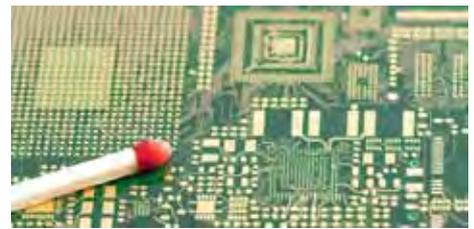
Mit der Verlagerung der Massen- und Großserienprodukte aus allen Anwendungsbereichen nach Asien, dem stetig wachsenden Kostendruck und dem Trend zur Komplexitätssteigerung sinkt sowohl die absolute Produktion als auch der relative Anteil dieser einfacheren Technologien an der Gesamtproduktion in Europa kontinuierlich (siehe Abb. 8.9). Damit verlieren diese Basistechnologien immer mehr an Bedeutung, zumal sie aufgrund ihres geringen technischen Schwierigkeitsgrads in der Regel keine technologischen Herausforderungen an den Leiterplattenfertiger stellen.

Es kann davon ausgegangen werden, dass sich dieser Trend auch in den nächsten Jahren fortsetzen wird. Ausgenommen von dieser Entwicklung werden Produkte sein, die aus logistischen Gründen oder Sonderanwendungen (z. B. HF-Anwendungen) hier in Europa verbleiben.

8.4 Multilayer-Technologie / High Density Interconnected (HDI)

Die Multilayer-Technologien mit HDI-Merkmalen (siehe Tab. 8.3) wie kupfergefüllten Microvias, SBU-Aufbauten (Sequential Build Up) und einem Line/Space von $\geq 100 \mu\text{m}$ im Bereich von 4–10 Lagen dominieren heute den europäischen Markt. Allerdings wird die immer weiter steigende Integrationsdichte mit der damit einhergehenden Bauteilminiaturisierung und den Forderungen zur Signalintegrität die Entwickler zwingen, impedanzkontrollierte Multilayer mit Lagenaufbauten >10 Lagen, kombiniert mit komplexen SBU-Aufbauten $(3 + x + 3)$ und Feinstleiterbildern $<75/75 \mu\text{m}$ Line/Space einzusetzen. Dieser Trend wird sich in den nächsten Jahren verstärkt fortsetzen.

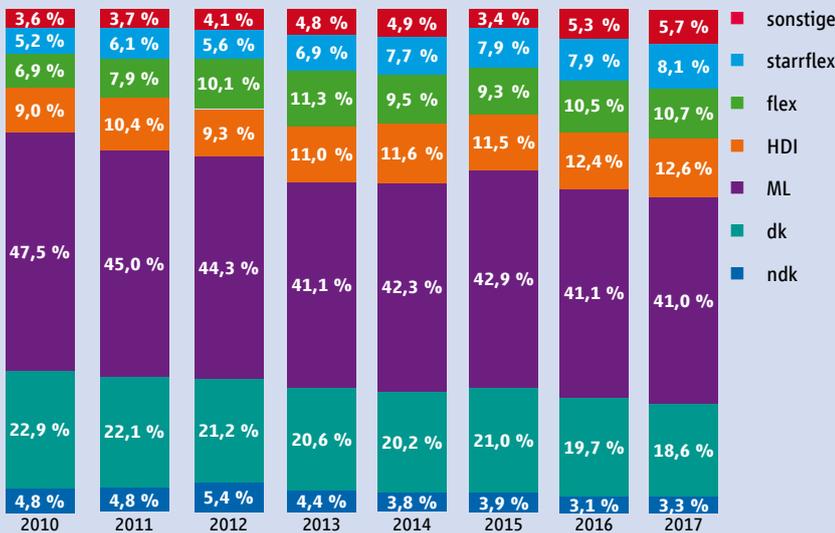
Abb. 8.10: HDI-Multilayer



Quelle: Würth Elektronik

Aus diesem Grund spielen bei der Entflechtung von Fine-Pitch-BGA-Strukturen die Umverdrängungsstrategien mittels harz- oder kupfergefüllter Staggered bzw. Stacked Via-Anordnungen eine immer größere Rolle. Ist die Entflechtung einer 0,8 mm Pitch-BGA-Struktur noch mittels Dog-Bone-Anbindung und einer Durchgangsbohrung möglich, so wird für eine 0,65 mm Pitch-BGA-Struktur bereits ein SBU-Aufbau mit Staggered Microvias benötigt. Die in der Zukunft immer häufiger zur Anwendung kommenden BGA-Pitches $\geq 0,5 \text{ mm}$ erfordern dann unabdingbar komplexere Lösungen (siehe Abb. 8.10).

Abb. 8.9: Entwicklung der Technologieverteilung in Europa



Quelle: Data4PCB, ZVEI

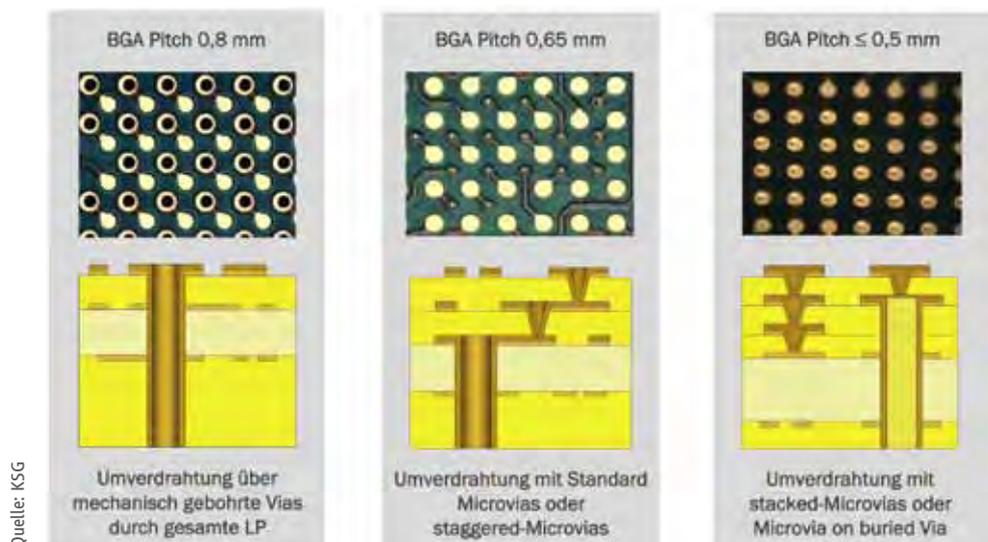
Tab. 8.3: Übersicht zu Trends ausgewählter HDI-Multilayer-Merkmale

Merkmal	Status quo 2018		Prognose 2025	
	Standard ¹	High End	Standard ¹	High End
Lagenanzahl	4 bis 10	bis 30	4 bis 12	bis 30
SBU-Aufbauten	2 + x + 2	3 + x + 3	3 + x + 3	≥ 4 + x + 4
Line/Space (µm)	100/100	50/50 (30/30) ²	75/75	30/30 (15/15) ²
BGA Pitch (mm)	0,8/0,65	0,5	0,5	0,4
Dicke Innenlage (µm)	100	50	100	25
Dicke Basis-Cu (µm) Microvia-Lage	18	9	18	5
AR Blind Microvias (Ø/Tiefe)	1 : 0,8		1 : 1,2	
Breite Stopplacksteg (µm)	100	70	70	50
Stopplackfreistellung Pad (µm)	100	50	50	<50
Umverdrahtungs- technologien	Blind Microvia (Cu-gefüllt) Buried Via Staggered Via Stacked Via		Cu-gefüllte PTH (THF) Blind Microvia (Cu-gefüllt) Buried Via Staggered Vias Stacked Via	

¹ Volumenproduktion. ² Niveau wird nur von spezialisierten Herstellern erreicht

Quelle: ZVEI

Abb. 8.11a–c: Umverdrahtungstechnologien für unterschiedliche BGA-Pitches



Für BGA-Pitches ≤0,50 mm wird eine Umverdrahtung im SBU-Aufbau mittels kupfergefüllter Stacked-Via- oder Microvia-on-Buried-Via-Lösungen unumgänglich. Dies ist zwar aufgrund des Kupferfüllprozesses mit einem technologisch komplexeren Fertigungsablauf verbunden, allerdings wird hierdurch der Einsatz von Feinstleiterlayouts <75 µm vermieden. In der Regel sind

parallel hierzu Anpassungen der Via-Paddurchmesser der Start- und Ziellage sowie die Stopplackmaskengestaltung mittels Non Solder Mask Defined Pads notwendig.

Die Anzahl der erforderlichen Microvialagen hängt von der Komplexität der Baugruppe ab.

8.5 Starrflex-/Semiflex-Leiterplatten

Die Starrflex-Technologie ist bereits seit den 1970er-Jahren für komplexe Anwendungen mit hohen Ansprüchen an die Zuverlässigkeit im Einsatz. Heute sind viele Aufbauten und Herstellprozesse standardisiert und werden auch in großen Stückzahlen für Produkte der Industrie-, Automobil- und Medizintechnik eingesetzt.

Abb. 8.12: Anforderungen Starrflex-/Semiflex-Leiterplatten



Quelle: Würth Elektronik

Die Semiflex-Technologie ist vom Ansatz her ähnlich, nutzt jedoch im Gegensatz zur klassischen Starrflex-Technologie Standard-FR4-Materialien und kein kostenintensives flexibles Polyimid- oder Polyester-Trägermaterial. Aufgrund der damit im Zusammenhang stehenden einge-

schränkten Eigenschaften (z. B. größere Biege- radien, breitere Biege- zonen, geringere zulässige Anzahl Biegezyklen) sind diese Leiterplatten nicht für dynamische Belastungen geeignet, sondern ausschließlich für „Flex to Install“-Anwendungen vorgesehen.

8.5.1 Material und Aufbauten

Semiflexible Leiterplatten benötigen kein spezielles, flexibles Basismaterial. Die Biegebarkeit wird für Leiterplatten mit einer Leiterbildlage im flexiblen Bereich in der Regel durch eine Dickenreduzierung mittels z-Achsen-kontrolliertem Fräsprozess erzeugt. Für Anwendungen mit einer doppelseitigen Leiterbildbelegung können aber auch Fertigungstechnologien der konventionellen Starrflex-Leiterplattenfertigung (Prepregaussparung, Gegenfräsen) zum Einsatz kommen. Der biegbare Bereich wird durch einen flexiblen Lötstopplack oder durch eine Deckfolie geschützt.

Bei Starrflex-Leiterplatten ist die durchgängige, flexible Lage aus dem hochtemperaturbeständigen Polyimid. Die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale bei den bekannten Starrflex-Varianten liegen in der Anzahl und der Ausführung der flexiblen Lagen.

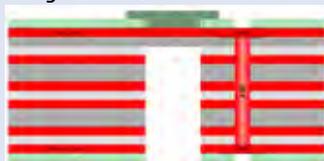
Eine Nomenklatur hilft in der Bezeichnung und Unterscheidung: $xRi = x$ starre Lagen ($Ri = Rigid$), $yF = y$ flexible Lagen.

Mehr als vier flexible Lagen sind möglich und in der Nomenklatur entsprechend benennbar.

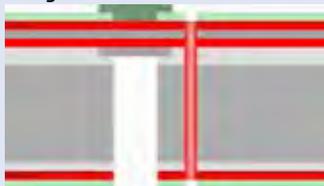
Abb. 8.13: Nomenklatur typischer Starrflex-Lagenaufbau

Flexible Lage(n) außen liegend

1 Lage (1F-xRi)

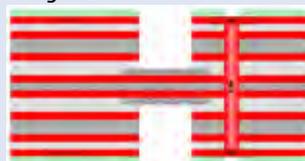


2 Lagen (2F-xRi)



Flexible Lage(n) innen liegend

4 Lagen (xRi-4F-xRi)



2+2 Lagen (xRi-2F-2F-xRi)



2 Lagen (xRi-2F-xRi)



Quelle: Würth Elektronik

8.5.2 Weiterentwicklung, Trends

Die Starrflex-Technologie folgt im Wesentlichen den Trends in der HDI-Technologie. Partielle Via-Techniken als Blind- und Buried Vias sind auch bereits „State of the Art“. Getrieben durch immer kleinere BGA-Anschlussraster setzen sich auch hier komplexere Leiterbilder mit immer kleineren Leiterbildstrukturen, Vias und Via-Pads, aber auch komplexere Via-Anordnungen wie Stagge- red- bzw. Stacked-Vias durch.

Aufgrund der steigenden Anforderungen an die geometrischen Abmessungen und Kantenqualität kommt immer häufiger Laserschneidtechnik in den Fertigungen der Leiterplattenhersteller zur Anwendung. Durch den Ersatz dieser Technologie werden nicht nur eine neue Qualität und eine Kostenminimierung erreicht, sondern eröffnen sich auch neue Anwendungsmöglichkeiten wie zum Beispiel die partielle Öffnung der Deckfolie über Kupferpads.

Um immer kleiner und vor allem auch dünner werden zu können, sind neue innovative Materialien in der Entwicklung: sehr dünne, kupferkaschierte Flex-Materialien mit einer Harz-Kleberschicht oder auch hochtemperaturbeständige Flex-Materialien, die gleichzeitig als Deckschicht und Kleber verwendet werden können.

Tab. 8.4: Übersicht ausgewählter Merkmale der Starrflex-Technologie

Merkmal	Status quo 2018		Prognose 2025	
	Standard ¹	High End	Standard ¹	High End
Lagenanzahl starrer Bereich	4–8	16	4–12	>16
Lagenanzahl flexibler Bereich	2	4	≥4	>4
Besonderheiten	<ul style="list-style-type: none"> • Kombination Starrflex mit HDI-Lagen • Staggered HDI-Aufbauten • Dünne Fullflex-2-8-lagige Aufbauten mit mehrstufigen Biegezonen 		<ul style="list-style-type: none"> • Starrflex mit embedded ICs und Inlays • Stacked HDI-Aufbauten • Übergang zu Fullflex mit abgedünnten Biegezonen (100 µm gesamt mit 25 µm Biegezone) 	

¹ Volumenproduktion

Quelle: ZVEI

Abb. 8.14: Anwendungsbeispiel Medizintechnik – Starrflex 1F-5Ri mit integrierten Bauteilen



Quelle: Würth Elektronik

Abb. 8.15: Anwendungsbeispiel Industrieelektronik – Starrflex 3Ri-2F-3Ri für eine USB3-Kamera



Quelle: Würth Elektronik

Abb. 8.16a/b: Anwendungsbeispiele für Sensorik – Semiflex 1Ri-3Ri ersetzt Kabelbaum



Quelle: Würth Elektronik

8.6 Flexible Leiterplatten

Flexible Leiterplatten ermöglichen neue und erweiterte Einsatzgebiete – vor allem wenn diese dreidimensional verbaut bzw. dynamischen Belastungen ausgesetzt werden.

Ihr Anteil an der Gesamt-Leiterplattenfertigung beträgt in Europa seit dem Jahr 2010 um die 10 Prozent (Quelle: Data4PCB, ZVEI). Während sie in Asien schwerpunktmäßig für Produkte der Consumer-Industrie in Großserien im Rolle-zu-Rolle-Verfahren gefertigt werden, kommt diese Technologie in Europa im Wesentlichen in der Industrieelektronik und Automobilindustrie, der Hausgeräte- und Sicherheitstechnik sowie verstärkt in der Medizintechnik im Klein- und Mittelserienensegment zum Einsatz. Eine durchgreifende Veränderung dieser Konstellation wird in den nächsten Jahren in Europa nicht erwartet, wenngleich mit Blick auf den immer breiteren Einzug der Schaltungsträgertechnologien in den textilen bzw. den medizinischen körpernahen Anwendungsbereich sich das Materialportfolio für diese Technologie erweitern wird. Hier werden neben der Flexibilität des Materials auch Eigenschaften wie etwa Dehnbarkeit, Biokom-

patibilität, Hautverträglichkeit sowie Waschbarkeit stärker in den Fokus rücken. Materialien wie Polyurethan, Silikon, Latex oder Textilien werden dann zum Träger von Schaltungselektronik und erfordern sowohl beim Leiterplattenproduzenten als auch bei der Bestückung neue technologische Lösungsansätze in der Weiterverarbeitung.

Abb. 8.17: Gerollte Spule aus flexiblem Material



Quelle: Würth Elektronik

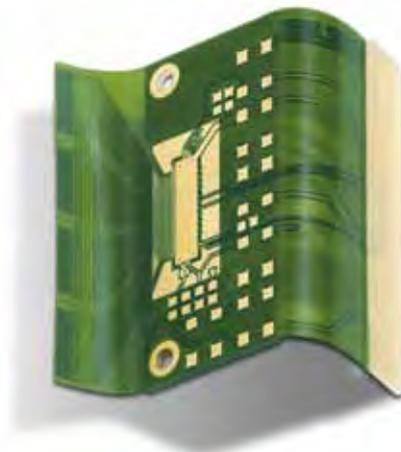
Flexible Leiterplatten werden aus dünnen Folien hergestellt und sind vielfältig einsetzbar. Die Anwendungen reichen von einfachen, einlagigen Verbindungslösungen aus Volumenproduktion im Rolle-zu-Rolle-Verfahren bis hin zu hochintegrierten, komplexen und flexiblen Multilayern von spezialisierten Herstellern, die in Kleinstserien etwa medizinische Implantate herstellen.

Die Verwendung von dünnen Folienmaterialien ohne Verstärkungen wie zum Beispiel Glasfasern bei FR4-Material erfordert angepasste Prozesse, bringt aber auch viele Vorteile mit sich, wie beispielsweise:

- Flexibilität, Formbarkeit
- Handling auf Rolle, Bearbeitbarkeit durch Laser, Stanzen, Schneiden ohne Exposition von Schmutz (z. B. Glasfaserstaub, Epoxyartikel)
- Homogenes Dielektrikum kann gut mit Laser gebohrt werden, dünne Folien erlauben kleinste Vias
- Dünne Kupferkaschierungen mit geringer Rauigkeit ermöglichen feinste Kupferstrukturen und bieten gute Hochfrequenzeigenschaften

Flexible Schaltungen können partiell durch das Aufkleben eines lokalen Stiffeners stabilisiert werden. Ein Stiffener aus Metall oder Aluminium kann zur Entwärmung dienen. Außerdem können flexible Leiterplatten auch umspritzt werden.

Abb. 8.18: Flexible 2-Lagenschalung aus Polyimid mit Stiffener im Bestück- und Kontaktbereich



Quelle: Würth Elektronik

Zur Herstellung von mehrlagigen, flexiblen Schaltungen werden Klebersysteme auf Acryl- oder Epoxy-Basis eingesetzt. Zukünftig sollen auch hochtemperaturbeständige Klebefolien auf Polyimid-Basis das Einsatzspektrum erweitern.

System-in-Foil: Im Rahmen von Entwicklungen und Forschungsprojekten wird bereits an der weiteren Integration von gedünnten Chips in flexible Folien gearbeitet. Nachfolgendes Beispiel zeigt einen 20 µm dünnen Siliziumchip, eingebettet in LCP.

Abb. 8.19: Embedded-Chip in LCP



Quelle: Würth Elektronik

Dehnbare flexible Leiterplatten: Elektronische Systeme, die bei mechanischer Verformung ihre Funktionalität beibehalten können, ermöglichen neue Eigenschaften wie die Fähigkeit, sich an beliebig geformte Flächen anzupassen oder reversible Dehnung zu bewältigen, und werden daher heute schon in vielen Bereichen wie Medizintechnik oder medizinischer Prothetik, Softrobotik, Wearables oder Textilien eingesetzt.

Mithilfe der in der Leiterplattenindustrie etablierten Technologien wie Starrflex, aber auch durch das Nacharbeiten wie Falten oder Rollen von flexiblen Leiterplatten werden viele geometrische Strukturen erfasst, wobei die eckige Verformung meist auf eine Achse begrenzt ist. Auf der Grundlage von Polyurethan- oder Silikon-Werkstoffen, Vliesstoffen und Textilien, aber auch von dehnbaren Leitern aus Metall oder Polymer und dünnen oder gedruckten ICs können neue flexible und dehnbare Systeme konstruiert werden.

Eine einfachere Alternative stellen dehnbare Polyurethan-Leiterplatten dar. Diese sogenannten Stretch-Leiterplatten werden in angepassten, jedoch konventionellen nasschemischen Ätztechniken realisiert, wobei die Dehnbarkeit der metallischen Leitern durch ein spezielles Mäander-Design erreicht werden kann.

Thermoplastisches Polyurethan wird aus Diolen und Isocyanaten ohne Einsatz von Weichmachern hergestellt und ist in unterschiedlichen Beschaffungszuständen von hart über weich bis hin zu elastisch erhältlich. Aufgrund des breiten Eigenschaftsprofils findet dieses Polymer vielfache Anwendungen. Das Multiblock-Co-Polymer besteht aus „harten“ und „weichen“ Segmenten. Dadurch erhält es Eigenschaften wie Flexibilität, Biegeschlaffheit oder Dehnbarkeit, wodurch es sich ideal für Einsätze in Textilien oder Wearables eignet. Da alle Additive physikalisch in der Polymermatrix gebunden sind, die außerdem Hydrolyse- und Mikrobenbeständigkeit aufweisen, können hautfreundliche und biokompatible Applikationen realisiert werden, die den Einsatz dieser Substrate im medizinischen Sektor ermöglichen. Die hohe Oberflächenenergie macht Polyurethan kratz- und verschleißfest. Außerdem besitzt Polyurethan bekanntermaßen charakteristische Eigenschaften wie hohen Weiterreißwiderstand oder gute wärmeisolierende Eigenschaften. Polyurethan haftet exzellent auf Kupfer und weist gute physikalische und chemische Stabilität auf, sodass es auch als Basismaterial in der Leiterplattentechnik eingesetzt werden kann. Polyurethan ist für Leiterplatten in 50–200 µm Dicke erhältlich und wird bei <180 °C verarbeitet. Aufgrund der niedrigen Erweichungstemperatur von Polyurethan werden Stretch-Leiterplatten in einem Niedrigtemperatur-Reflowprozess bestückt und mit einem Zinn/Bismut-Lot bei ca. 140 °C gelötet.

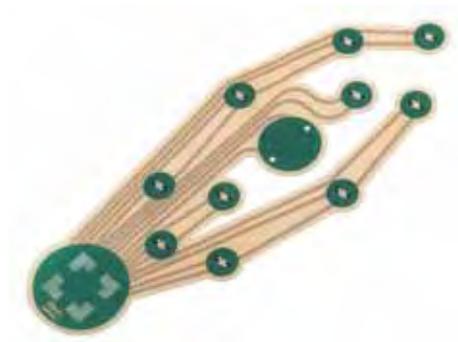
Mit dehnbaren Schaltungsträgern (Stretchflex) entstehen noch mehr geometrische Gestaltungs- und Miniaturisierungsoptionen. Je nach Anwendungsbereich und Anforderung eröffnet

sich eine breite Palette von Folgeverarbeitungsverfahren, um zur gewünschten Geometrie oder zum Produkt zu gelangen. Die bestückte oder unbestückte Leiterplatte kann auf unterschiedliche Substrate wie Textilien, Polymere oder Metalle laminiert, gelötet, geklebt oder geschweißt werden. Bei erhöhten Temperaturen entfaltet Polyurethan seine Klebereigenschaften. Damit kann eine sehr gute Haftung auf vielen Substraten erzielt werden. Durch Verguss oder Hinterspritzen können die Schaltungsträger vor Umwelteinflüssen geschützt und gleichzeitig in die gewünschte dreidimensionale Form gebracht werden.

Die thermisch umformbare Elektronik steht schon lange im Fokus der Forschung. Mit der Entwicklung dehnbare Schaltungsträger gelingt es, in einem thermischen Umformprozess elektronische 3D-Strukturen relativ einfach zu realisieren. Die fertig bestückten Polyurethan-Leiterplatten werden auf einen geeigneten Polymerträger laminiert und anschließend mittels Tiefziehen oder Thermoumformen in die gewünschte Form gebracht. Ein Gehäuse, verbunden mit der innen oder außen sitzenden Elektronik, entsteht.

Der Technologietransfer aus dem Entwicklungsstadium in die Serienfertigung ist inzwischen abgeschlossen. Ein- und doppelseitige Leiterplatten sowie flexible Systeme mit partieller Verstärkung werden für die Kunden aller Branchen angeboten. Wobei nicht immer nur die elektrische Performance im Vordergrund steht, sondern für die Anwender Eigenschaften wie die Dehnbarkeit oder die Weichheit das entscheidende Einsatzargument sind. Des Weiteren sind die Weiterverarbeitungstechnologien ebenfalls ein bedeutender Faktor, da die neuartigen Leiterplatten geklebt, geschweißt, umgeformt etc. werden können.

Abb. 8.20: Dehnbare Elektronik



Quelle: Würth Elektronik

8.7 Leiterplattentechnologien für das Wärmemanagement

Leiterplatten für das Wärmemanagement gewinnen in zunehmendem Maße in der Leistungselektronik an Bedeutung. Überall dort, wo hohe Ströme fließen, wird von den Designern nach kostengünstigen und multifunktionalen Alternativlösungen gesucht, um hohe elektrische Leistungen unter Berücksichtigung des Wärmemanagements zu übertragen. Als Einsatzgebiet dieser Technologie sind heute neben der Automobilindustrie (Lichttechnik) hauptsächlich die Photovoltaik (Wechselrichter) sowie die Industrieelektronik mit ihren Anwendungen in Stromversorgungs-, Wandlungs- und Steuerungssystemen zu sehen. Eine hohe Varianz an technologischen Lösungsmöglichkeiten wird hier von der Leiterplattenindustrie heute schon angeboten. Diese wird aller Voraussicht in den nächsten Jahren im Wesentlichen von Entwicklungen der E-Mobility, dem potenziellen Wachstumstreiber in diesem Technologiesegment, abgerufen werden. Auch hier werden Embedded-Lösungen zur Integration von Funktionalitäten verstärkt Einzug halten.

8.7.1 Dickkupfer-Technologien

Erfüllten in der Vergangenheit Techniken mit Stanzgittern und Stromschienen bzw. Multilayer mit mehreren 70–105 µm Cu-Innenlagen die Aufgaben der Übertragung hoher Ströme, so werden von der Leiterplattenindustrie schon seit Langem Standard-Dickkupfer-Technologien bis 400 µm für Innenlagen bzw. 210 µm auf den Außenlagen angeboten (siehe Abb. 8.21).

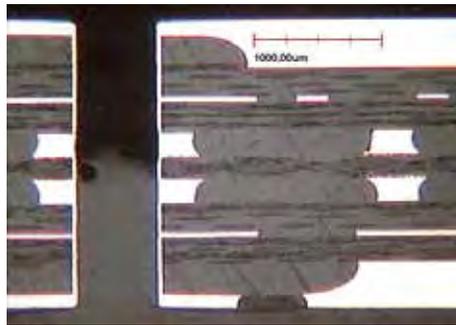
Abb. 8.21: Schliffbild: 6-Lagen-Multilayer mit 4 x 210 µm Innenlagen



Quelle: KSG

Mit Sonderlösungen wie zum Beispiel der in Abbildung 8.22 dargestellten Iceberg-Technologie® (KSG) sind auch Kupferdicken von ca. 400 µm auf den Außenlagen umsetzbar. Lösungen mit Innenlagenkupfer-Kaschierungen >400 µm werden durch den Einsatz von speziellen Integrationstechnologien möglich.

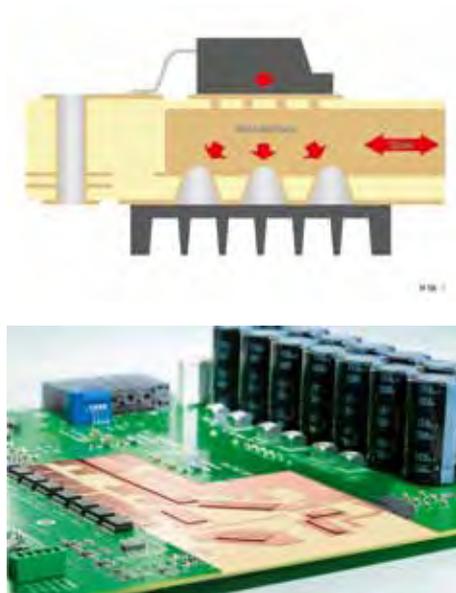
Abb. 8.22: Schliffbild – Iceberg-Technologie® mit kombiniertem 400/70-µm-Layout



Quelle: KSG

Durch die selektive Einbringung großer Kupferquerschnitte an jeder beliebigen Stelle eines Standard-Multilayers lassen sich Ströme bis zu 400 A einfach mit feinsten Leiterstrukturen innerhalb einer Leiterplatte kombinieren. Beispielhaft seien hier die HSMtec®-Technologie (Abb. 23a/b) oder Wirelaid®-Technologie (Abb. 24a/b) genannt. Zusätzliche integrierte Funktionen und Leistungsbauteile wie Shunts und einfache Leistungshalbleiter erhöhen die Integrations- und Funktionsdichte der Hochstromleiterplatte und schaffen mehr Platz auf den Außenlagen für Steuerelektronik. Signalwege werden kürzer und begünstigen somit das elektrische Verhalten der Leistungsleiterplatte der Zukunft.

Abb. 8.23a/b: Prinzipdarstellung/ Produktbeispiel HSMtec®-Technologie

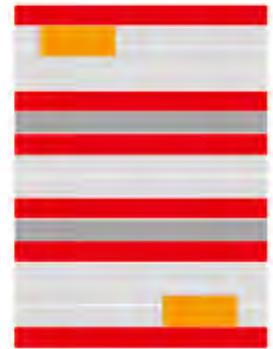


Quelle: KSG Austria

Abb. 8.24a/b: Prinzipdarstellung/ Produktbeispiel Wirelaid®

Außenlage

ML6 Wire@1@6



Das Beispiel zeigt einen Multilayer mit 6 Lagen und Drähten unter Lage 1 und Lage 6.



Quelle: Würth Elektronik

8.7.2 IMS-Technologie (Insulated Metal Substrat)

Insulated Metal Substrates sind wärmeabführende Leiterplatten mit metallischem Träger aus Aluminium bzw. Kupfer, der vom Leiterbild durch eine wärmeleitende, dielektrische Lage getrennt ist. Mit der Marktdurchdringung der LED-Technik im Automobilbereich und der Beleuchtungstechnik gewann diese Sondertechnologie vor allem für einfache, einseitige Anwendungen zunehmend an Bedeutung. Sie wird auch zukünftig immer dann zum Einsatz kommen, wenn die thermischen Betriebsbedingungen den Einsatz von klassischem FR4-Basismaterial nicht mehr zulassen und der Komplexitätsgrad des Leiterbilds keine mehrlagige technologische Lösung erfordert. Bedingt durch den Materialaufbau ist eine zweiseitige durchkontaktierte Variante auch in Zukunft nur mit kostentreibenden technologischen Zusatzaufwendungen (Isolation der Lochmetallisierung) realisierbar.

Abb. 8.25: Schliffbild Kupfer-IMS-Schaltung



Quelle: KSG

Abb. 8.26: LED-Anwendung auf IMS-Schaltungsträger



Quelle: Ventec

8.7.3 Inlay-Technologie

Zur Entwärmung von Hotspots auf Leiterplatten kommen in der Mehrzahl der Anwendungen kupfergefüllte oder ungefüllte Thermalvias zum Einsatz. Hierbei wird eine Vielzahl von kleinen Bohrungen in den Schaltungsträger eingebracht und durchkontaktiert. Über diese thermischen Pfade wird dann versucht, die Verlustwärme vom Leistungsbauteil abzutransportieren und über Wärmespreizung an passive bzw. aktive Kühlkonzepte zu übergeben. Immer dann, wenn dieses Standardkonzept an seine Grenzen stößt, kommt in der Regel die Inlay-Technologie zum Einsatz, die mit ihren einzupressenden bzw. einzubettenden massiven Kupfer-Inlays den thermischen Widerstand im Wärmepfad um den Faktor 20 senken kann. Im Inneren der Leiterplatte eingebettete Inlays werden über Thermalvias angebunden. Die Größen und Dicken der Kupfer-Inlays sind auf die Anwendung und Anforderungen abgestimmt. Die partielle Integration von massiven Kupferelementen in FR4-Leiterplatten ermöglicht es, geringste thermische Widerstände für jede Bauteilgröße und Form zu realisieren und somit Hotspots gezielt zu vermeiden.

Zukünftig werden auch hier verstärkt spezielle wärmeleitende Materialien (auch flexible Materialien) in einem Hybridbau in Kombination mit integrierten Kupfer-Inlays zum Einsatz gelangen. Systemlösungen in Form des Umspritzens einer

bestückten Leiterplatte mit wärmeleitendem Kunststoff (Thermoplastik) macht die Baugruppe zu einem Komplettsystem. Der umspritzte Kunststoff übernimmt hierbei sowohl die Funktion des Kühlkörpers als auch des Gehäuses bzw. des Reflektors (siehe Abb. 7.25).

Abb. 8.27a/b: Produktbeispiel Systemlösung Inlay-Technologie mit umspritztem wärmeleitendem Kunststoffgehäuse



Quelle: KSG Austria

8.8 Leiterplattentechnologien zur Integration von Funktionalitäten

Endgeräte für den Telekommunikations- und Konsumgütermarkt sind auch heute noch der weltweite Treiber für die Entwicklung der Leiterplatte vom einfachen Komponententräger zum multifunktionalen Systemboard mit integrierten aktiven und passiven Komponenten.

Im Mittelpunkt stehen eine höhere Funktionalität, kleine, leichte Bauformen sowie eine hohe Zuverlässigkeit. Die Miniaturisierung ist eine der treibenden Kräfte für die Entwicklungen dieser Technologie. Für die Signalintegrität sind kurze und impedanzangepasste Verbindungen notwendig. Dies kann durch eingebettete Komponenten gewährleistet werden.

Diese Entwicklung erfordert adäquate, technologische 3D-Integrationslösungen. Gleichfalls steigen die Anforderungen an den Systementwurf (Chip-Package-Board Co-Design), der sowohl

elektrische als auch thermomechanische Zuverlässigkeitsaspekte zu berücksichtigen hat.

Neben der weiteren Steigerung der Integrationsdichte und Funktionalität auf Chipebene werden unterschiedliche Komponenten (IC, Passive, MEMS u. a.) in einem Package als System integriert. Dies ist heute als System-in-Package (SiP) realisiert. Hierbei werden unterschiedlichste Technologien kombiniert, wobei organische Materialien als Substratträger unverändert eine wichtige Rolle spielen.

Bedeutsam für diese Technologie ist der in den nächsten Jahren auch weiter anhaltende Trend zu dünneren Substraten. Dies geht mit der Reduzierung der Leiterbahndicke für Build-up-Substrate und der weiteren Reduzierung der Leiterbahnbreiten/Abstände sowie der Via-Durchmesser einher.

Wenn auch heute noch in Europa die Marktdurchdringung dieser Technologie nicht flächendeckend erfolgte, so verzeichnen die europäischen Leiterplattenhersteller in den letzten Jahren immer häufiger Produktentwicklungen, die den Einsatz dieser Technologie erfordern. Dieser Trend wird sich in den nächsten Jahren weiter verstärken. Im Folgenden sollen die in Europa verbreiteten und favorisierten Integrationstechnologien vorgestellt werden.

8.8.1 Integrationstechnologien zum Embedding von Funktionalitäten

Unter dem Begriff „Embedding“ wird das Einbetten von elektronischen Komponenten in die Leiterplatte verstanden. Dies können passive Komponenten wie Kondensatoren, Widerstände oder Spulen sein oder aktive Komponenten, also Halbleiter.

Bei der Bestückung von aktiven Komponenten muss grundsätzlich zwischen „Logik“ und „Power“ unterschieden werden, da die Anforderungen hinsichtlich Komplexität der Verdrahtung wie auch Leistungsaufnahme und Verlustleistungsabführung stark unterschiedlich sind. ASICs können hier eine Sonderrolle einnehmen, da diese Komponenten sowohl eine hohe Verdrahtungsdichte als auch eine hohe Leistungsdichte aufweisen können.

8.8.2 System in Package (SiP)

Als SiP werden Bauelemente bezeichnet, bei denen mehr als eine Funktion in einem Package verbaut werden, zum Beispiel Halbleiterchips zusammen mit passiven Komponenten oder mehrere Halbleiter in einem Package. Embedded-SiPs stellen eine der möglichen Ausführungen von SiP dar.

SiPs werden aber auch auf Substraten aufgebaut, die nach Bestückung gemoldet werden. Eine weitere Variante ist das sogenannte WLB, das „Embedded Wafer Level Ball Grid Array“, zum Beispiel von Infineon und Nanium. Diese Wafer-Level-Packages werden in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt. Embedded-SiPs im Sinne dieser Roadmap sind SiPs, die unter Verwendung von Leiterplattentechnologien zur Herstellung von Bauteile-Packages oder Sub-Systemen wie Multichip-Module gefertigt werden. Ein SiP wird später selbst auf einer Leiterplatte bestückt.

8.8.2.1 System-in-Package-Lösungen (SiP) – Logiklösungen

Embedded-Component-Packaging-Technologie (ECP®): Eine Kupferfolie wird mit Halbleitern bestückt, die mittels Prepregs, die im Bereich der Komponenten einen Durchbruch aufweisen, zu einer Kernlage verpresst werden. Die Kontaktierung erfolgt über Laserbohren auf verkupferte Kontakte des Halbleiters, die anschließend galvanisch vercupfert werden. Die Technologie startete mit einem DC/DC-Wandler im Telekommunikationsbereich und wird sukzessive um weitere Anwendungen mit höherer Anzahl von Komponenten erweitert.

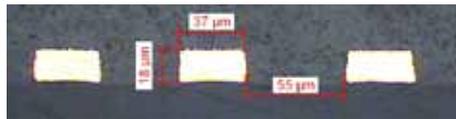
μ²-Pack®-Technologie: Auf einer dünnen Kupferlage werden Umverdrahtungsstrukturen für Logikhalbleiter erzeugt. Diese werden mit Flip-Chip-Methoden bestückt und, wie zuvor beschrieben, mit Prepregs zu einer Kernlage oder einem Multilayer verpresst. Nach dem Laminierprozess wird die dünne Kupferlage durch einen Differenzätzprozess entfernt und die eingebettete Umverdrahtungsstruktur wird an der Oberfläche freigelegt. Diese wird in der Folge mit Lötstopplack abgedeckt und kann zum Beispiel mit Lotkugeln oder anderen Bauelement-Kontakten versehen werden. Die so erzeugten Strukturen können mit geringer Leiterbreite erzeugt werden, sodass eine direkte Ankontaktierung von hochpoligen Chips mit geringem Anschlussraster (pitch) in einer Verdrahtungsebene möglich wird. Diese Technologie kann auch für Systeme in PCB-Lösungen zur Anwendung kommen.

Abb. 8.28: μ^2 -Pack[®]-Querschliff durch Nacktchip, aufgebaut auf Umverdrahtungsebene nach dem Verpressen



Quelle: Schweizer Electronic

Abb. 8.29: μ^2 -Pack[®]-eingebettete Leiterbahnen zur Entflechtung und zur Bestückung von Fine-pitch-Komponenten



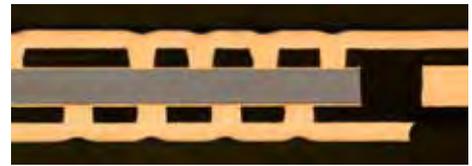
Quelle: Schweizer Electronic

8.8.2.2 System-in-Package Lösungen (SiP) – Powerlösungen

Embedded-Component-Packaging-Technologie (ECP[®]): Die bereits oben beschriebene Technologie kann auch für Leistungshalbleiter verwendet werden, wodurch alternative Packages zu Leadframe-basierten Packages werden, die sich durch eine besonders niedrige Eigeninduktivität auszeichnen. Als Variante zum Montageprozess auf der Kupferfolie wird eine Montage in einem Durchbruch in der Kupferfolie verwendet. Dadurch kann der Prozess des Laserbohrens auf einer Seite des Halbleiters eingespart werden und die galvanische Ankontaktierung erfolgt vollflächig, zum Beispiel auf der Drain-Seite eines MOSFETs.

p^2 -Pack-DSV[®]-Technologie: Bei der p^2 -Pack-DSV[®]-Technologie wird ein Leistungshalbleiter in einem Durchbruch einer Kernlage verlegt und beidseitig mit Prepregs und Kupferfolien zu einem Mehrlagenaufbau verpresst. Die Ankontaktierung erfolgt beidseitig auf verkupferte Kontakte des Leistungshalbleiters. Die Kernlage kann als Kupferlage ausgeführt werden und zur Stromführung zu den Kontakten und für die Spreizung der Verlustleistung eingesetzt werden.

Abb. 8.30: p^2 -Pack[®]-DSV: MOSFET von beiden Seiten mit Microvias kontaktiert



Quelle: Schweizer Electronic

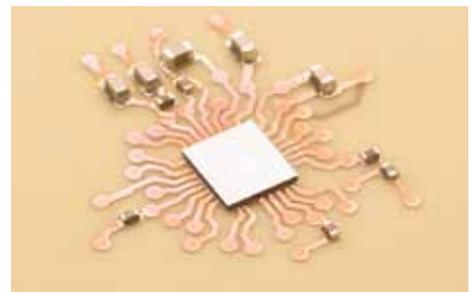
8.8.3 System-in-PCB

Dabei handelt es sich um eine Leiterplatte mit Bauteilen im Inneren der Leiterplatte. Eine System-in-PCB-Leiterplatte wird in der Regel zusätzlich auf den Außenlagen mit weiteren Komponenten bestückt und stellt damit das „Main Board“ dar.

8.8.3.1 System-in-PCB-Logiklösungen – i^2 -Board[®]-Technologie

Bei der i^2 -Board[®]-Technologie erfolgt die Bestückung der Komponenten nicht auf direktem Weg, sondern über die Verwendung eines sogenannten Interposers, einer kleinen Umverdrahtungslage, die aus FR-4-Prepregs hergestellt wird. Die Bestückung der Interposer erfolgt bei OSAT-Partnern (Out Sourced Assembly and Test), die bestückte und getestete Interposer an den Leiterplattenfertiger liefert. Der eingebettete Interposer wird mittels Durchkontaktierungen mit dem Multilayer verbunden.

Abb. 8.31a/b: i^2 -Board[®]-Technologie: Nacktchip und passive Komponenten, bestückt auf Interposer. Oben vor Einbettung, unten Querschliff nach Einbettung



Quelle: Schweizer Electronic

8.8.3.2 System-in-PCB-Powerlösungen – p²-Pack®-Technologie

Bei der p²-Pack®-Technologie werden Leistungshalbleiter in Kavitäten eines Leadframes bestückt. Dieses wird in die Kernlage einer Leiterplatte einlamiert und über Microvias ankontaktiert. Die Außenlagen bestehen aus Dickkupfer, erhöhen die Stromtragfähigkeit und verbessern die Wärmespreizung. Die isolierenden Lagen werden mit thermisch leitfähigem Prepreg zur Verbesserung der Abfuhr der Verlustleistung hergestellt. Der so produzierte Leistungsteil kann in einem weiteren Schritt in eine Logikleiterplatte einlamiert werden, wodurch die Leistungselektronik und die Ansteuerung in einer Leiterplatte untergebracht werden können. Die Kombination aus Logik und Leistungselektronik wird als „Smart p²-Pack“ bezeichnet.

Abb. 8.32: Explosionsdarstellung Smart p²-Pack®



Quelle: Schweizer Electronic

Abb. 8.33: Querschliff durch Smart p²-Pack mit MOSFET

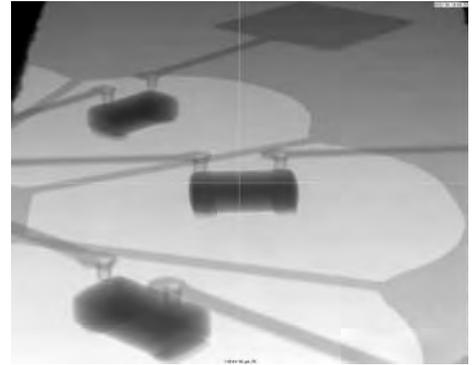


Quelle: Schweizer Electronic

8.8.4 Embedding Passiver Bauelemente

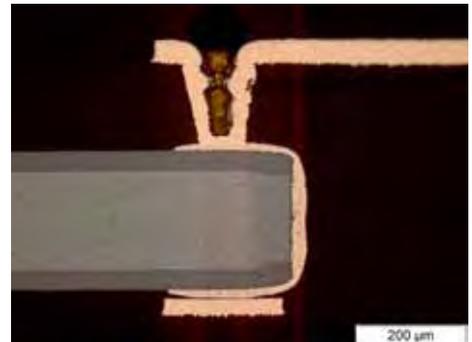
Diskrete Bauelemente, Ankontaktierung mittels Microvias: Beim Embedding passiver Komponenten sind die Unterschiede der Herstellverfahren gering und werden deswegen übergreifend beschrieben. Die Bestückung der Komponenten erfolgt auf einer Innenlage oder Kupferfolie. Prepregs mit Durchbrüchen im Bereich der Komponenten werden um die Bauelemente verlegt, mit vollflächigen Prepregs abgedeckt und mit Kupferfolie in der Außenlage in den Aufbau einlamiert. Die Komponenten weisen dabei in der Regel verkupferte Kontakte auf, sodass eine Ankontaktierung auf galvanischem Wege nach einem Laserbohrprozess auf die Kontakte erfolgen kann.

Abb. 8.34: Röntgenaufnahme eingebetteter diskreter Bauelemente



Quelle: KSG

Abb. 8.35: Schliffbild eingebettetes diskretes Bauelemente



Quelle: KSG

Diskrete Bauelemente, Ankontaktierung mittels Löttechnik: Bei der Ankontaktierung von passiven Bauelementen mittels Löttechnik erfolgt eine Bestückung von kompletten Innenlagen oder Interposern in SMD-Technologie: Nach Bedrucken der Lötflächen mit Lotpaste werden die passiven Komponenten bestückt und im Reflowprozess verlötet. Danach erfolgt das Verpressen zum Multilayer in der zuvor beschriebenen Art und Weise. Da die Komponenten bereits leitfähig verbunden sind, muss keine direkte Kontaktierung über die Außenlage vorgenommen werden.

Abb. 8.36a/b: Schliffbilder eines eingebetteten diskreten Bauelements mittels Löttechnik



Quelle: KSG

8.9 Leiterplattentechnologien für Hochfrequenzanwendungen

Die Anwendungsbereiche von Hochfrequenzleiterplatten lassen sich unter anderem nach Bandbreite, nach Maximalfrequenz wie auch nach Anwendung in analoge HF-Schaltungen und Highspeed-Digitalschaltungen einteilen.

8.9.1 Analoge HF-Leiterplatten

Bei analogen HF-Schaltungen gilt zu unterscheiden, ob ein breitbandiges, analoges Spektrum über lange Signalpfade notwendig ist (z. B. bei Signalgeneratoren und Breitbandverstärkern) oder ein bandbegrenztetes Spektrum über kurze Signalpfade ausreicht (z. B. Trägerband von Radarapplikationen bei 77 GHz). Bei letzteren wird das Signal zumeist über kurze Leiter und wenige Lagen geführt und die Signalverarbeitung erfolgt in unmittelbarer Nähe der Antennen und HF-Bereiche. Dies stellt geringe Anforderungen an Lamine, Lagenaufbau und Entflechtung. Aktuell werden Leiterplatten mit großflächigen Signalpfaden bis 60 GHz realisiert. Zukünftig müssen Leiterplatten mit großflächigen HF-Signalpfaden bis 80 GHz und später bis über 100 GHz realisiert werden können.

Für HF-Anwendungen werden zumeist niedrige und vor allem eng tolerierte Dk-Werte benötigt (niedrigere Dispersion, bessere Breitbandanpassung). Um die Leitungsverluste zu begrenzen, zählen auch ein geringer Verlustfaktor und ein sehr geringes Kupfertreatment. Für sehr breitbandige Anwendungen mit hohen Anforderungen an die Signalqualität und für Frequenzen ≥ 40 GHz sind PTFE-Materialien quasi verpflichtend. Sind die Anforderungen an das Frequenzspektrum, die Leitungslängen und die Signalqualität weniger kritisch, so lassen sich auch Non-PTFE-Materialien noch gut im hohen zweistelligen GHz-Bereich verwenden. Für niedrigere Frequenzen < 20 GHz kommen zudem auch noch bessere FR-4-Materialien (low loss / enhanced Dk) infrage. Hierbei können auch Kupferfolien mit geringer Rauheit noch deutlich zu einer erweiterten Hochfrequenzzeichnung beitragen.

8.9.2 Highspeed-Digital-Leiterplatten

Demgegenüber stehen die digitalen Highspeed-Schaltungen mit komplexer Entflechtung, zum Beispiel von FPGA-Bausteinen. Die Entflechtung kann sich über sehr lange, differenzielle Signalpfade, über mehrere Lagen und hochpolige Steckverbinder erstrecken (z. B. in Backplanes und Motherboards). Damit sind die Signalpfade besonders kritisch bezüglich der Einfügedämpfung und dem differentiellen Laufzeitunterschied (differential skew), zum Beispiel durch Glasfasergewebemuster.

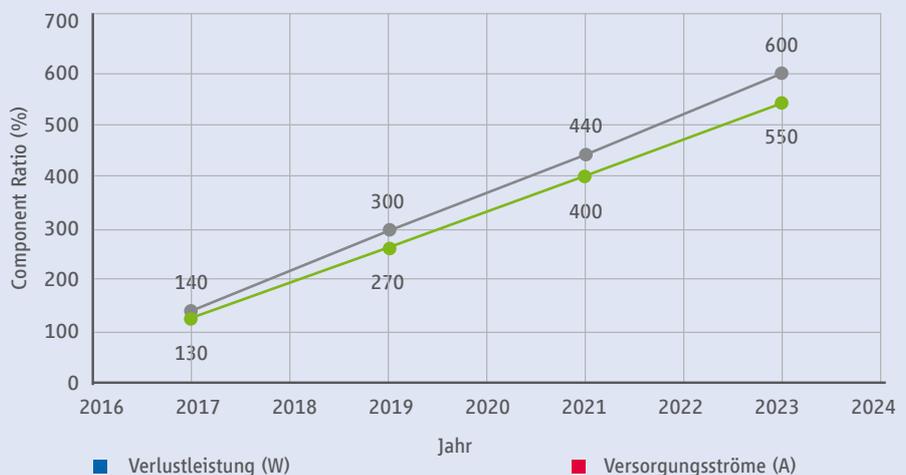
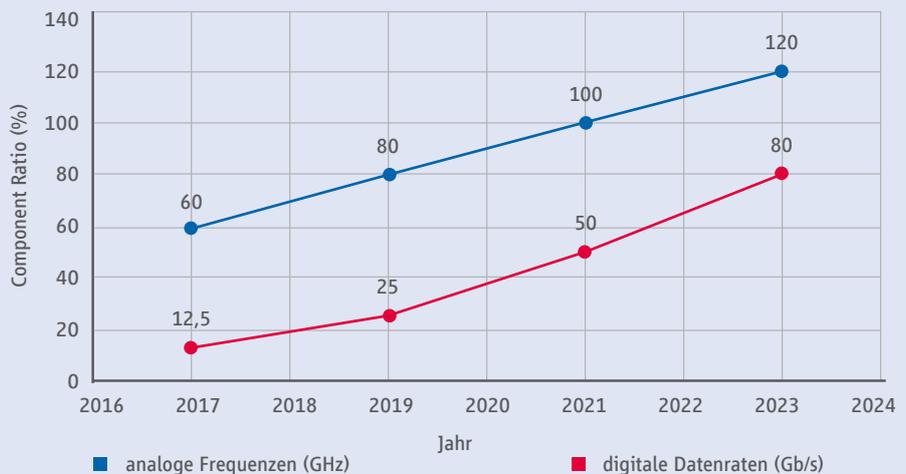
Aktuelle Schaltungen verarbeiten Signale mit ca. 12,5 Gb/s. Zukünftig werden Datenströme von 25 Gb/s, 50 Gb/s oder darüber zu verarbeiten sein. Idealerweise lassen sich dazu Frequenzen mit dem Dreifachen der Bitrate übertragen, was derzeit ca. 38 GHz entspricht. Mit technischen Kniffen (Equalizer, PAM-Modulation u. a.) lassen sich alternativ auch mit 25 GHz Bandbreite Datenraten von 50 Gb/s erreichen. Die höhere Übertragungsrate mit begrenztem Frequenzspektrum muss jedoch mit einer verbesserten Signalqualität erkaufte werden, was für die Leiterplattenanforderung wiederum niedrigere Leitungsverluste und Prozesstoleranzen bedeutet. Für die Signallagen werden aktuell bereits bessere FR4-Materialien (low loss / enhanced Dk) benötigt. Für die toleranzarme Leiterbildstrukturierung werden geringe Kupferkaschierungen $\leq 18 \mu\text{m}$ verlangt. Zum Erreichen der notwendigen Leitungsimpedanzen müssen die Dk-Werte der Lamine eng toleriert im Bereich 3,5–4,0 liegen.

Für Highspeed-Digital-Leiterplatten werden zur Entflechtung sehr hochlagige Aufbauten, zunehmend mit HDI-Lagen, benötigt. Während derzeit 20-Lagen-Multilayer verwendet werden, geht der Trend in Richtung 30 Lagen. Dabei spielt der Kostenfaktor pro Laminat eine tragende Rolle, weshalb die günstigeren Materialgruppen bis zum elektrisch und technisch Machbaren ausgereizt werden. So spielen für Spannungsversorgungslagen die Standard-FR4-Materialien weiter die dominierende Rolle, wobei die Kupferkaschierungen zur Stromversorgung vermehrt 70 µm oder mehr aufweisen müssen. Gleichzeitig werden dünnere Laminatstärken ≤ 50 µm benötigt, um die Gesamtdicke und Via-Länge der Aufbauten möglichst gering zu halten. Kritische Signal-Vias mit Anbindung an Innenlagen werden zunehmend rückgebohrt (Backdrilling), um

die nötige Signalqualität zu erreichen. Das Backdrillen kostet Platz im Design und viel Zeit und Kosten im Arbeitsablauf, weshalb es sich nur für eine geringe Anzahl an Vias eignet. Daher werden auch vermehrt Blind- und Buried-Vias in den Lagenaufbauten zum Einsatz kommen.

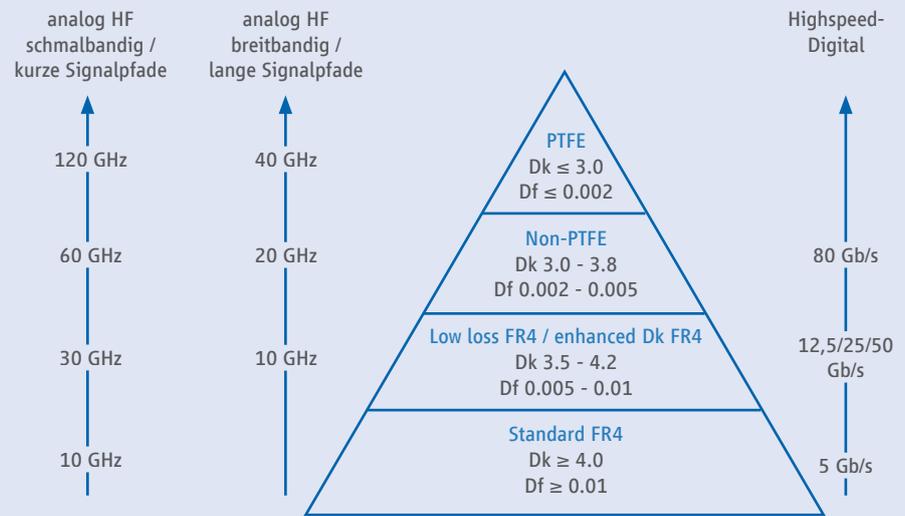
Zudem erzeugen bereits heutige Prozessoren und Rechenbausteine enorme Verlustleistungen von 130 W und mehr, was gleichzeitig Versorgungsströme von 140 A erfordert. Vor fünf Jahren betrug die Verlustleistung lediglich 30 W. Lässt sich die Entwicklung linear oder gar exponentiell fortsetzen, so müssen in weiteren fünf Jahren über 550 W Verlustleistung auf kleinster Fläche mit Versorgungsströmen bis 600 A bedient und gleichzeitig entwärmt werden können.

Abb. 8.37a/b: Roadmap der Signalfrequenzen und Datenraten auf Leiterplatten (oben), Roadmap der Verlustleistungen und Versorgungsströme für Rechenbausteine auf Leiterplatten (unten)



Quelle: Rohde & Schwarz

Abb. 8.38: Basismaterialgruppenpyramide und deren Einsatzbereiche für Hochfrequenzanwendungen



Quelle: Rohde & Schwarz

9 Integrierte Schichtschaltungen (ISS)



Quelle: dell – stock.adobe.com

Die Herausforderung, innovative Elektroniksysteme und Mikrosystemlösungen mit maximalem Anwendernutzen zu ermöglichen, ist eng mit der integrierten Schichtschaltungstechnik in all ihren Facetten des praktischen Einsatzes verbunden.

Die Unternehmen der Fachgruppe Integrierte Schichtschaltungen im ZVEI sind seit Jahrzehnten im Dialog mit dem Markt, um die Schichtschaltungstechnik einem breiten Kreis von Anwendungspartnern nutzbar zu machen.

Vor mehr als 40 Jahren, als Hochtechnologie zum Einsatz in hochwertigen Funktionssystemen entwickelt und kommerzialisiert wurden, haben sich die Technologien der Baugruppenfertigung in der Schichtschaltungstechnik weiterentwickelt und nehmen in zahlreichen Anwendungen der Leistungselektronik, Hochfrequenztechnik, Sensorik, Medizintechnik, Automobilelektronik, Beleuchtungstechnik, Antriebstechnik, Kommunikationstechnik und in Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien heutzutage einen festen Platz ein.

Serienanwendungen in Industrie- und Automobiltechnik belegen die Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit durch den Einsatz bei Kleinmengenbedarfen bis zur Volumenforderung.

Die Spezifik der Strukturierung sowie des keramischen Trägermaterials bietet Möglichkeiten der funktionalen Integration – zum Beispiel durch Einbindung passiver Bauelemente wie Widerstände und Induktivitäten in den Schichtaufbau.

Abb. 9.1: Typische Schichtschaltung in Automobilanwendungen



Was unterscheidet Elektronikbaugruppen in Schichtschaltungen von konventionellen, auf Leiterplatten basierenden Flachbaugruppen?

Schichtschaltungen nutzen anorganische Materialien als Träger der Schaltungstechnik. Hauptsächlich kommen keramische Werkstoffe, aber auch metallische Materialien zum Einsatz. In der Vielzahl der möglichen Strukturierungstechnologien werden die Schaltungsträger in Schichtschaltungen der Dick- und Dünnschicht sowie der DCB- und der LTCC/HTCC-Technik unterschieden. Die Kombination mit etablierten Technologien zur Komponentenmontage und Häusung eröffnen beispiellose Möglichkeiten der Funktionsintegration.

Getrieben wird die Entwicklung durch die steigenden Anforderungen des Markts an robuste, zuverlässige, kompakte, komplexe und integrierte Systemlösungen. Eine etablierte Forschungslandschaft flankiert diese Entwicklung.

9.1 Markt und Marktentwicklung für integrierte Schichtschaltungen

Der weltweite Markt für integrierte Schichtschaltungen im Jahr 2018 wird auf ein Volumen von fünf Milliarden Euro geschätzt. Davon hat Europa einen Anteil von ca. 20 Prozent am Weltmarkt und Deutschland wiederum einen Anteil von ca. 50 Prozent am europäischen Markt.

In den Jahren 1987 bis 2012 war in Deutschland ein langsames, aber kontinuierliches Wachstum zu verzeichnen. Sowohl die wirtschaftlichen Krisenjahre als auch die jeweiligen Erholungsphasen haben sich in dieser Entwicklung abgebildet.

Als langfristiger Trend zeichnet sich ab, dass

- der asiatische Markt wächst,
- der US amerikanische Markt stabil ist mit geringen Zuwachsraten, die durch den jeweiligen Wechselkurs überlagert waren,
- der japanische Markt stabil ist, aber ohne erkennbares Wachstum und
- der europäische Markt leicht rückläufig ist, was unter anderem auf das starke Wachstum in Asien zurückzuführen ist.

Die Technologien für Schichtschaltungen teilen sich auf in Dickschichttechnik, Dünnfilmtechnik, LTCC (enthält HTCC) und DCB. Bezogen auf den deutschen Markt wird der Anteil an den Technologien im Jahr 2018 wie folgt eingeschätzt:

- Dickschichttechnik 29 Prozent
- Dünnfilmtechnik 6 Prozent
- LTCC (mit HTCC) 25 Prozent
- DCB 40 Prozent

Als gesamttechnologischer, langfristiger Trend zeichnet sich ab,

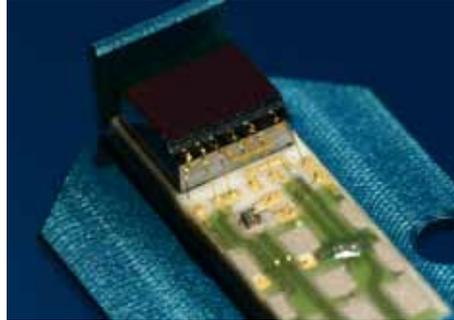
- dass die Kombination der Technologien miteinander aufgrund der Heterogenität der Anforderungen bei gleichbleibendem Kostendruck zunehmend angenommen wird und auch die Entwicklungsanstrengungen der Zulieferer und Inhouse-Anwender in diese Richtung gehen.
- dass auch neue Substrate wie Glas, Polymer, Silizium und neue Beschichtungstechnologien wie Aerosol, Ink-Jet und Laser zum Einsatz kommen werden.

Für die einzelnen Technologien ergibt sich langfristig folgendes Bild:

- Der Anteil der Dickschichttechnik wird für die nächsten Jahre mit geringen Wachstumsraten, die im Wesentlichen durch die Kfz-Technik und die Industrieelektronik bestimmt werden, stabil bleiben. Alte Einsatzfelder werden durch Leiterplatten und digitale Lösungen abgelöst, neue Einsatzfelder entwickeln sich in der Sensorik und in der Leistungselektronik. Ein Rückgang ist dann zu erwarten, wenn der Anteil an Verbrennungsmotoren im Kfz deutlich zurückgeht. Dies ist in den nächsten Jahren aber noch nicht abzusehen.
- Der Anteil der Dünnfilmtechnik wird für die nächsten Jahre mit Wachstumsraten, die im Wesentlichen durch neuartige Sensorlösungen für die Industrie (4.0) und durch Miniaturisierung in der Medizintechnik, vor allem für Anwendungen im Körper, bestimmt werden, stabil bleiben. Der vor einigen Jahren prognostizierte starke Rückgang im Verteidigungsbereich ist aufgrund der geänderten Weltlage so nicht eingetreten.
- Der Anteil an Schichtschaltungen in LTCC-Technologie wird in den nächsten Jahren leicht rückläufig eingeschätzt. Hintergrund hierfür ist der Trend zur Digitalisierung und zur kostengünstigeren HDI-Leiterplatte. Dies betrifft vorrangig die Ablösung bestehender LTCC-Schaltungen durch kostengünstigere HDI-Leiterplatten in der Automobilindustrie. Im Gegenzug finden auch Neuentwicklungen in LTCC-Technologie statt. Aufgrund der zunehmenden Miniaturisierung, die auch in der LTCC-Technologie permanent stattfindet, können diese aber nicht vollständig das zurückgehende Volumen kompensieren.
- Der Anteil an DCB-Modulen wird weiterhin stark wachsen. Hintergrund hierfür ist die bereits beginnende Elektrifizierung von Fahrzeugen (E-Bike, E-Car, Hybrid-Fahrzeuge) sowie die zunehmende Automatisierung in der Industrie (4.0).

9.2 Dickschichttechnik

Abb. 9.2: Typische Schichtschaltung in Industrieanwendungen



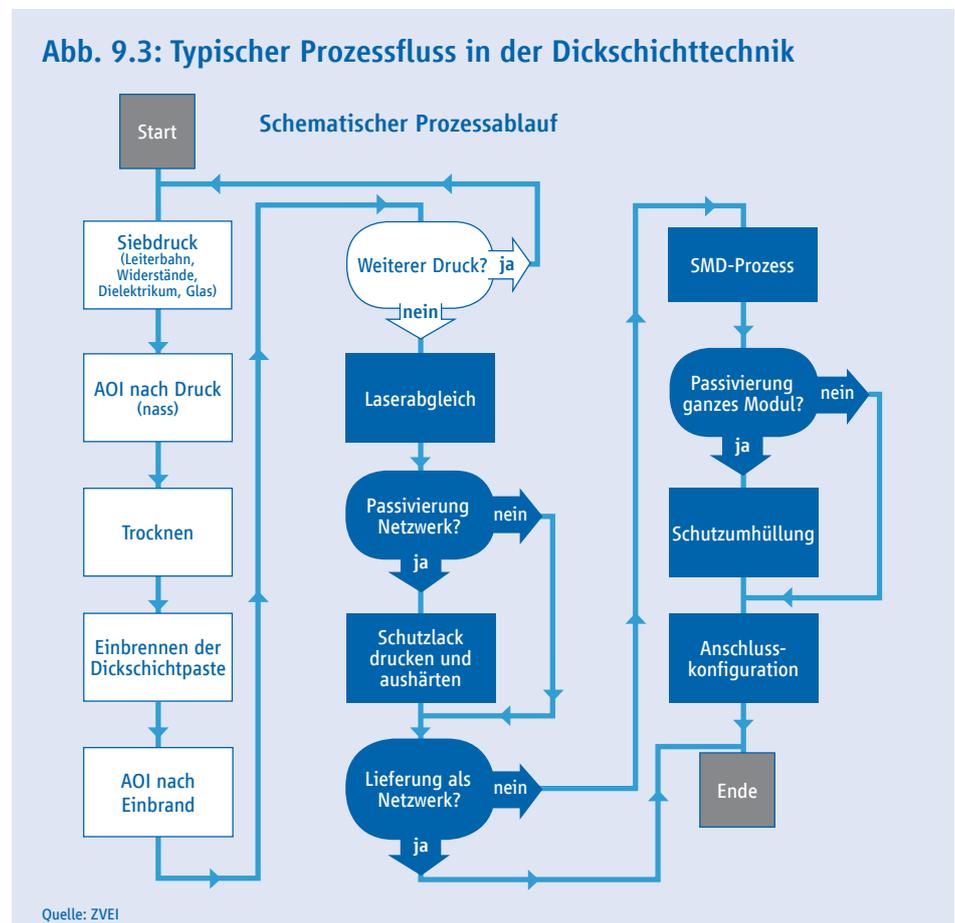
In der Dickschichttechnik werden passive Schaltungsstrukturen wie Leiterbahnen, Isolations- und Widerstands- sowie Schutzschichten auf Keramiksubstrate (meist Al_2O_3 , aber auch AlN für höhere Wärmeleitfähigkeiten) mittels Siebdrucktechnik aufgebracht. Jede gedruckte Ebene wird getrocknet und anschließend gebrannt. Durch das Einbrennen werden die elektrischen und physikalischen Eigenschaften der Strukturen bestimmt. Es entsteht ein monolithischer keramischer Schaltungsträger. Leiterbahnmaterialien auf Basis von Gold, Silber, Silber-Platin und -Palladium erlauben später unterschiedliche Assem-

blierungsverfahren – vom Lötten über Bonden bis hin zum Kleben mit hoher Reproduzierbarkeit und Zuverlässigkeit. Widerstandswerte von wenigen Milliohm bis in den dreistelligen Megaohm-Bereich sind mit hoher Präzision mittels Laserabgleich einfach realisierbar. Sensorische Elemente sind im Schichtaufbau integrierbar.

Höhere Verdrahtungsdichten der keramischen Leiterplatte erreicht man mit mehreren Leiterbahnebenen oder mit Leiterbahnkreuzungen. Die einzelnen Leiterbahnebenen werden dabei durch eine dielektrische Schicht voneinander isoliert. Auch können beide Seiten des keramischen Schaltungsträgers zum Aufbau der Verdrahtungsstruktur verwendet werden. Die elektrische Verbindung der Vorder- und Rückseite wird dabei mit Durchkontaktierungen durch die Keramikplatte realisiert.

Als Schutzschicht der Dickschichtschaltung dient eine Glas- oder Dielektrikumspaste. Auch andere Passivierungs- und Schutzmechanismen können eingesetzt werden, wie etwa Lackieren, Tauchen oder Umspritzen mit alternativen Materialien (Silikone, Tauchlacke, Epoxide etc.).

Abb. 9.3: Typischer Prozessfluss in der Dickschichttechnik



Erzeugte Strukturen:

- Leitungen
- Durchkontaktierung zur Rückseite
- Isolationsschichten zwischen Leitungen
- Vias zwischen Isolationsschichten
- Widerstände
- Abschirmungen
- Sensorische Elemente: Temperatur, Wärmefluss, Druck, Kraft
- Aktorische Elemente: Heizer
- Schutzschichten aus Glas und Polymer

Tab. 9.1: Kenngrößen Keramiksubstrate

Typischer Werkstoff	96 % Al ₂ O ₃
Typische Abmessung	150 x 100 x 0,63 mm
Wärmeleitfähigkeit	17 W/m*K bis 26 W/m*K
Isolationswiderstand	>10 ¹⁴ Ohm/mm
Oberflächenrauigkeit <i>ra</i>	<0,8 µm
Durchbiegung	<200 µm

Quelle: ZVEI

Tab. 9.2: Kenngrößen Pasten – Leiter

Leiter	Interface Funktion	Typische Schichtdicke	Breite/ Abstand typisch	Flächenwiderstand
Gold	Bonden	10 µm	200 µm	<5 mOhm
Silber	Kleben	10 µm	250 µm	<5 mOhm <3 mOhm
Silber Platin-dotiert	Löten	10 µm	250 µm	<30 mOhm <10 mOhm <5 mOhm

Quelle: ZVEI

Tab. 9.3: Kenngrößen Pasten – Isolatoren

Isolatoren	Funktion	Typische Schichtdicke	Typische Via-Größe	Isolationswiderstand
Dielektrikum	Isolationsschicht	40 µm	400 µm	>10 ¹² Ohm
Schutzglas	Schutzschicht	10 µm	entfällt	>10 ¹² Ohm

Quelle: ZVEI

Hauptanwendungsgebiete:

- Steuerungstechnik
- Leistungselektronik und Sensorik für Industrie, Automobil und Luftfahrt

Herausragende Eigenschaften:

- Gute thermische Leitfähigkeit
- Ausdehnungskoeffizient ist an Halbleitermaterial angepasst
- Hohe Integrationsdichte
- Verbindung zwischen Metall und Keramik verhindert die laterale Ausdehnung des Metalls
- Gute elektrische Isolationseigenschaft

9.3 Dünnschichttechnik

Abb. 9.4: Typische Dünnschichtschaltung

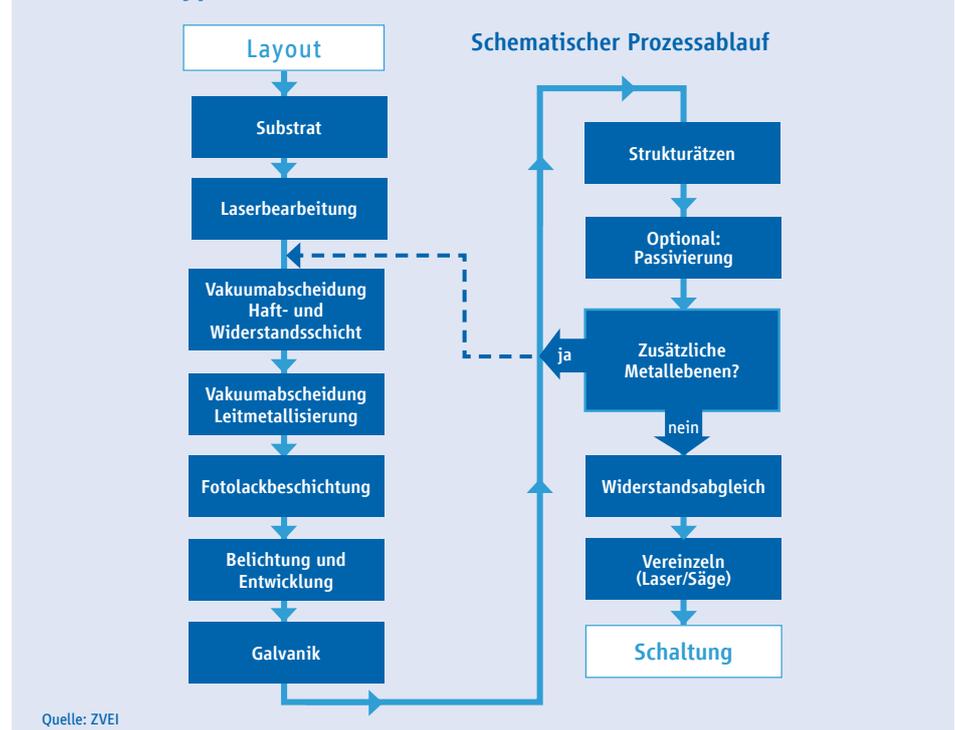


Schaltungsträger in Dünnschichttechnik erlauben es, eine hohe Verbindungsichte und hochpräzise Strukturen in Kombination mit keramischen und/oder organischen Isolationsmaterialien zu realisieren. Die Dünnschichttechnik ermöglicht es hierbei, den Schaltungsträger oder die Komponente in Bezug auf thermische, mechanische und elektrische Eigenschaften der Materialien oder auch auf Bioverträglichkeit zu optimieren. Als Substratmaterialien (Trägermaterial) werden für starre Schaltungen vorwiegend Keramik (Al_2O_3 oder AlN), aber auch Ferritmaterial oder Glas verwendet. Zur Herstellung flexibler Schaltungen finden verschiedene Polymermaterialien Anwendung.

Für die Erzeugung der Strukturen wird in der Dünnschichttechnik Fotolithografie, analog zur Halbleitertechnologie oder der Mikrosystemtechnik, eingesetzt, was eine Auflösung bis hinunter zu 10 μm Leiterbahnbreite und -abstand oder sogar darunter erlaubt. Zusätzlich werden typischerweise auch Prozesse aus der Leiterplattentechnik mit der Dünnschichttechnik kombiniert, um die Breite der bedienbaren Anwendungen zu erhöhen. Dünne Metallschichten, zum Beispiel für integrierte Widerstände (typisch NiCr oder TaN), werden direkt durch Vakuumabscheidung erzeugt und meistens durch subtraktives Ätzen strukturiert. Für dickere Leitschichten (z. B. Au oder Cu) wird normalerweise Galvanik eingesetzt, die es erlaubt, Schichtdicken von wenigen Mikrometern bis zu mehreren 100 μm zu realisieren.

Eingesetzt wird die Dünnschichttechnik auf Keramik vorwiegend für Hochfrequenzschaltungen, bei denen enge Strukturtoleranzen, Zuverlässigkeit und geringes Gewicht wichtige Faktoren sind. Starre und flexible Schaltungen auf Dünnschichtbasis finden weiterhin auch vermehrt dort Verwendung, wo die dadurch mögliche Reduzierung des Formfaktors und die Verwendung von Edelmetallen anstelle von Kupfer einen zusätzlichen Vorteil bringen.

Abb. 9.5: Typischer Prozessfluss in der Dünnschichttechnik



Tab. 9.4: Kenngrößen Keramik

Typischer Werkstoff	99,6 % Al ₂ O ₃ , AlN
Typische Abmessung	100 x 100 mm
Typische Substratdicken	0,127 bis 1,0 mm
Wärmeleitfähigkeit	20 W/m*K bis 170 W/m*K
Isolationswiderstand	>1014 Ohm/mm
Oberflächenrauigkeit ra	<0,2 µm bis 0,05 µm
Durchbiegung	<100 µm bis < 10 µm

Quelle: ZVEI

Erzeugte Strukturen:

- Leitungen
- HF-Elemente, Filter
- Magnetische Elemente, Spulen
- Widerstände
- Sensorische Elemente mit sensitiven Werkstoffen
- Magnetische Elemente mit magnetischen Werkstoffen
- Passivierungsschichten
- Kondensatoren
- Elektroden

Tab. 9.5: Kenngrößen flexible Substrate

Typischer Werkstoff	Polyimid, LCP
Typische Abmessung	Bis zu 150 x 150 mm
Typische Substratdicken	5 µm bis 250 µm

Quelle: ZVEI

Tab. 9.6: Kenngrößen Schichten

	Funktion	Schichtdicken	Minimale Breite / Abstand	Flächenwiderstand
Ti	Haftung	0,02 bis 0,05 µm	20 bis ? µm	<250 Ohm
NiCr	Haftung Widerstand	0,02 bis 0,05 µm	20 bis 5 µm	<250 Ohm
TaN	Haftung Widerstand	0,02 bis 0,05 µm	20 bis 5 µm	<200 Ohm
Ni	Diffusionsbarriere	1 bis 5 µm	25 µm	<250 Ohm
Al	Leiter	1 bis 3 µm	20 bis 5 µm	<0,1 Ohm
Au	Leiter	0,1 bis 40 µm	20 bis 5 µm	<1 Ohm
Cu	Leiter	0,3 bis 200 µm	25 µm	<1 Ohm

Quelle: ZVEI

Tab. 9.7: Kenngrößen Isolatoren

	Funktion	Schichtdicken	Minimale Breite / Abstand
SiOx	Dielektrikum	0,5 bis 1 µm	25 µm
Polyimid	Passivierung, Lötstopp	1 µm	20 µm
Gedruckte Isolatoren	Passivierung, Lötstopp	20 µm	250 µm

Quelle: ZVEI

Tab. 9.8: Kenngrößen Widerstand

Bereich	Genauigkeit	Stabilität	Temperaturkoeffizient
mOhm bis MOhm	<0,1 % nach Abgleich	<0,2 %	+/-100 ppm

Quelle: ZVEI

Herausragende Eigenschaften:

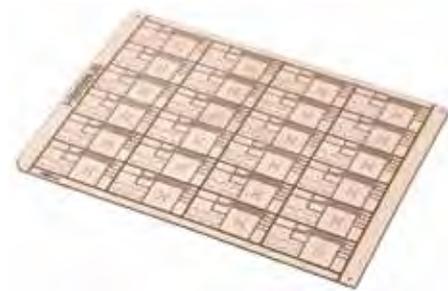
- Höchste Integrationsdichte
- Hervorragende HF-Eigenschaften
- Präzise Bauelemente
- Gute thermische Leitfähigkeit
- Ausdehnungskoeffizient ist an Halbleitermaterial angepasst
- Bioverträgliche Materialsysteme und Substratmaterialien

Hauptanwendungsgebiete:

- Radarsysteme
- Raumfahrt
- Sensorik
- Telekommunikationstechnik
- Optoelektronik
- Medizintechnik

9.4 Direkt kupferbeschichtete Keramik (DCB)

Abb. 9.6: Typische DCB-Schaltung



Auf dem DCB-Substrat werden Leistungshalbleiter wie IGBTs, MOSFETs und Dioden, basierend auf Si, GaN und SiC, mittels Lötens oder Sintern elektrisch und mechanisch kontaktiert. Die elektrische Verbindung der Chips sowie die Anbindung (z. B. an das Gehäuse) erfolgt durch Bonden mit Al- und Cu-Dickdraht oder Al- und Cu-Bändchen.

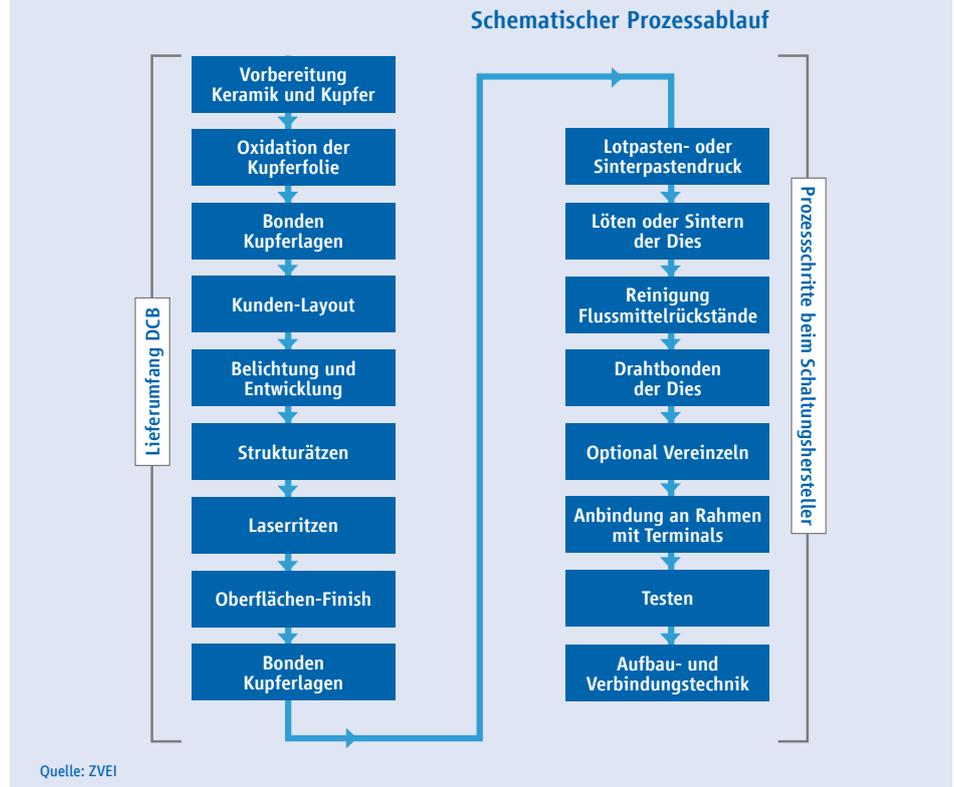
Bei Modulen für die Leistungselektronik bildet die direkt kupferbeschichtete Keramik, das DCB-Substrat, das „Rückgrat“. Es vereint die Aufgaben des Schaltungsträgers für den Halbleiter mit denen des elektrischen Isolators für den Kühlkörper und das Invertergehäuse.

Die dicken Kupferschichten ermöglichen den Einsatz hoher Ströme und eine gute Ableitung der Wärme, die an den Komponenten der Leistungshalbleiter (z. B. IGBTs) entsteht, wenn diese mit hoher Leistungsdichte betrieben werden.

DCB-Substrate bestehen aus einer 0,4 bis 1 mm dicken Keramikplatte als Träger, die unter Nutzung des eutektischen Schmelzprozesses bei hohen Temperaturen beidseitig mit einer ca. 0,3 mm dicken Kupferfolie verbunden wird. Die Kupferschicht der Substrat-Vorderseite wird durch einen Ätzprozess strukturiert und generiert so das kundenspezifische Schaltungslayout.

Die innenliegende Keramik (Al_2O_3 , Zr-dotiertes Al_2O_3 , AlN für bessere Wärmeleitfähigkeiten, Si_3N_4 für beste mechanische Robustheit) weist eine exzellente Spannungsisolations bis zu mehreren 1.000 V auf. Der Wärmeausdehnungskoeffizient des DCB-Substrats liegt, verglichen mit der Metallkernplatte, näher an dem der Halbleitermaterialien und sorgt für eine gute Temperaturwechselbeständigkeit.

Abb. 9.7: Typischer Prozessfluss DCB-Technik



Erzeugte Strukturen:

- Leitungen
- Wärmespreizer
- Wärmespeicher
- Wärmesenken

Hauptanwendungsgebiete:

- Leistungselektronik für Industrieanwendungen (Frequenzumrichter)
- Elektrofahrzeuge
- Windkraft, Traktion, Solar

Der direkte Beschichtungsprozess:

- Eingesetzt für die Verbindung von Metall und Keramik
- Bei ca. 1.070 °C verbindet sich Kupferoxid mit der Keramik
- Keine zusätzlichen Verbindungsmaterialien nötig
- Kupferschichten bis 0,6 mm

Herausragende Eigenschaften:

- Exzellente thermische Leitfähigkeit und thermisches Management
- Ausdehnungskoeffizient ist an Halbleitermaterial angepasst
- Starke Verbindung zwischen Metall und Keramik reduziert die laterale Ausdehnung des Metalls und reduziert bei Lastwechseln die Scherkräfte auf die Halbleiter
- Konstante, sehr gute elektrische Isolationseigenschaft über die ganze Lebensdauer, auch bei sehr hohen Spannungen

Alternative Beschichtungstechniken und Substrate:

- AMB-Prozess:
Kupfer wird bei 800 bis 1.000 °C auf die Keramik aufgelötet (Active Metal Brazed)
- TPC-Prozess:
Kupfer wird als Dickdruck auf die Keramik aufgesintert (Thick Print Copper). Substratmaterialien AlN, Zr-dotiertes Al₂O₃ und Si₃N₄

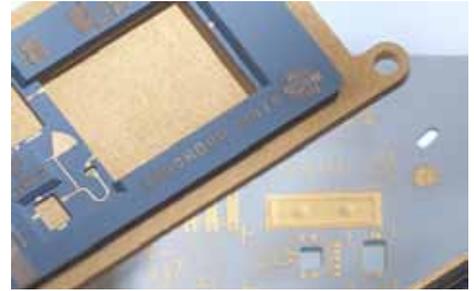
9.5 Mehrlagenkeramik (LTCC/HTCC)

Abb. 9.8: Treiberschaltung für IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)



Für höchste Funktionsintegration bei kleinstem Volumen werden bevorzugt keramische Schichtschaltungen in Mehrlagentechnik (LTCC = Low Temperature Co-fired Ceramics) eingesetzt. Der Aufbau dieser Schaltungen erfolgt durch die Strukturierung einzelner, ungebrannter Keramiklagen mit Leitungen und passiven Bauelementen durch Siebdruck, das Aufeinanderstapeln und Verpressen der einzelnen Lagen, das Co-firing bei ca. 850 °C und die anschließende Vereinzelung zu Modulen. Daraufhin werden die Halbleiterkomponenten als Bare Dies mit sogenannter Chip&Wire-Technologie mit der Keramik verbunden und die passiven Bauelemente in SMT-Technik gelötet oder geklebt. Besonders vorteilhaft für Hochfrequenzanwendungen ist die Möglichkeit, passive Bauelemente wie Widerstände, Kondensatoren, Filter, Spulen, Koppler und die Wellenleitung zwischen die einzelnen Lagen einzubetten und in die Substratebene zu integrieren. HF-Halbleiter können in Kavitäten eingebaut und auf kürzestem Weg mit der Leitung verbunden und gegebenenfalls hermetisch verschlossen werden. Dadurch wird eine hohe Miniaturisierung erreicht.

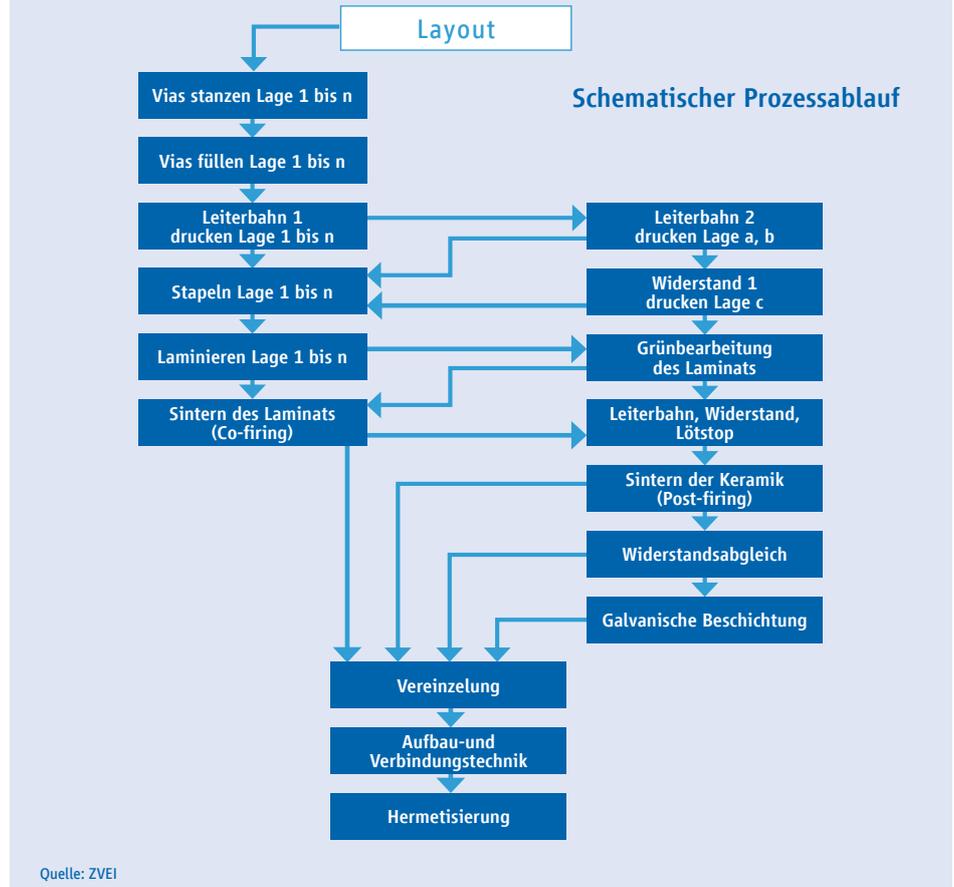
Abb. 9.9: Typische LTCC-Schaltung für TR-Module



LTCC in Verbindung mit der ausgezeichneten elektrischen Leitfähigkeit von Ag, Cu oder Au prädestinieren diese Technologie für Hoch- und Höchstfrequenzanwendungen.

Aufgrund der hohen mechanischen Festigkeit, der guten thermischen Leitfähigkeit und Hermetizität wird HTCC (High Temperature Co-fired Ceramic, ca. 1.600 °C) demgegenüber als Mehrlagensubstrat in der Gehäusetechnologie (Packaging) eingesetzt.

Abb. 9.10: Typischer Prozessfluss in der LTCC/HTCC



Erzeugte Strukturen:

- Leitungen
- Gefüllte Vias
- Abschirmungen
- Vergrabene Komponenten R, L, C
- Widerstände
- Sensorische Elemente
- Versenkte Einbauplätze
- Mehrere Bondebene
- Kavitäten, Fenster, Kanäle

Tab. 9.9: Kenngrößen Keramikfolien

Kenngrößen Keramikfolie	LTCC (850 °C)	HTCC (1.600 °C)
Typischer Werkstoff	Glaskeramik Komposit	Al ₂ O ₃
Typische Abmessung	150 x 200 x 0,2 mm	100 x 100 x 0,3 mm
Wärmeleitfähigkeit	2 W/m*K	17 W/m*K
Isolationswiderstand	>10 ¹⁴ Ohm/mm	>10 ¹⁴ Ohm/mm
Oberflächenrauigkeit ra	<0,5 µm	<0,8 µm
Durchbiegung	<200 µm	<200 µm

Quelle: ZVEI

Tab. 9.10: Kenngrößen Pasten – Leiter LTCC

Leiter LTCC	Interface Funktion	Typische Schichtdicke	Typische Breite / Abstand	Flächenwiderstand
Gold	Bonden	7 µm	150 µm	<5 mOhm
Silber	Kleben	7 µm	150 µm	<5 mOhm
AgPt	Löten	10 µm	150 µm	<30 mOhm
AuPt	Brazing	40 µm	250 µm	<20 mOhm

Quelle: ZVEI

Bondbare und lötbare Schichten werden auch durch elektrochemische Beschichtung mit PdNiAu erzeugt.

Tab. 9.11: Kenngrößen Pasten – Leiter HTCC

Leiter HTCC	Typische Schichtdicke	Typische Breite / Abstand	Flächenwiderstand
Mn	7 µm	150 µm	<20 mOhm
W	7 µm	150 µm	<20 mOhm
Pt	7 µm	150 µm	<100 mOhm

Quelle: ZVEI

Bondbare und lötbare Schichten werden durch elektrochemische Beschichtung mit NiAu erzeugt.

Tab. 9.12: Kenngrößen Widerstände

	Bereich	Genauigkeit nach Abgleich	Stabilität 1.000 h / 150 °C	Temperaturkoeffizient
Postfire-Widerstand	100 mOhm bis 1 MOhm	2 %	0,5 %	+/-150 ppm
Cofire-Widerstand	100 Ohm bis 100 kOhm	2 %	0,5 %	+/-200 ppm
Buried-Widerstand	100 Ohm bis 100 kOhm	50 % Kein Abgleich	0,5 %	+/-200 ppm

Quelle: ZVEI

Hauptanwendungsgebiete:

- Kommunikationssysteme
- Automotive, Steuerungstechnik, Gehäusetechnik, Radarmodule

Herausragende Eigenschaften LTCC und HTCC:

- Hohe Integrationsdichte
- Ausdehnungskoeffizient ist an Halbleitermaterial angepasst
- Gute elektrische Isolationseigenschaften

Besonderheiten LTCC:

- Gutes thermisches Management
- Gute HF-Eigenschaften
- Integration von HF-Bauelementen
- Integration passiver Bauelemente

Besonderheiten HTCC:

- Gute thermische Leitfähigkeit
- Exzellente mechanische Stabilität
- Exzellente chemische Stabilität

9.6 Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT)

Für die Montage von elektronischen Komponenten auf keramische Schaltungsträger werden die Prozesstechnologien angewandt, die auch bei der Bestückung von PCB-Flachbaugruppen zum Einsatz kommen. Bestückt werden SMD-Komponenten, beginnend bei Miniaturbauformen 01005 bis zu hochpoligen Bauteilen im Fine-Pitch-Anschlussraster, wie zum Beispiel CSP-Ausführungen und BGA-Gehäuse. Die elektrische Kontaktierung erfolgt in Standardlöt- und -klebverfahren über den Maskenauftrag von Lotmaterial oder die Inkjet-Strukturierung und das anschließende Löten in einem Reflowprozess. Neben Standardlotmaterialien wie SnAgCu, SnAg oder SnCu kommen auch Sonderlote oder Leitlebermaterialien zum Einsatz.

Es entsteht ein bestückter keramischer Schaltungsträger, auch Hybrid genannt.

Abb. 9.11: LTCC-Baugruppe auf DCB-Leistungsmodul



Die Bewertung der Fertigungsqualität basiert auf bekannten MIL- und IPC-Richtlinien (MIL883, IPC610). Die hervorragenden Wärmeleiteigenschaften des Schaltungsträgers eröffnen darüber hinaus auch Möglichkeiten der Optimierung des Thermomanagements vom Halbleiter zur Wärmesenke, zum Beispiel durch lunkerarmes Löten der Leistungskomponenten in inerter Atmosphäre oder die Direktkontaktierung des gesamten Schaltungsträgers an den Kühlkörper.

Abb. 9.12: Dickschicht-Hybridbaugruppe mit passiven SMT-Bauelementen und drahtgebondeten Halbleitern



Zur klassischen Chipmontage (Chipbonden) werden typischerweise elektrisch leitfähige oder nicht leitfähige Klebstoffe verwendet, bei höheren Verlustleistungen wird die Chiprückseite mittels Lötverbindung oder Ag-Sintern mit dem Basissubstrat oder einer Wärmesenke verbunden. Die elektrische Ankontaktierung der Chips erfolgt typischerweise durch Drahtbonden mit 17 bis 35 μm Au-Draht oder 20 bis 35 μm Al-Draht und bei Leistungsanwendungen 150 bis 500 μm Al oder Cu.

9.6.1 Flipchipbonden

Das Flipchipbonden ist eine bei hohen Stückzahlen besonders effektive Sonderform des Chipbondens, bei dem mehrere elektrische Verbindungen synchron durch eine „Überkopf“-Montage (flippen) des Chips erzeugt werden. Verfahren sind hier Löten, Kleben, Thermokompression-Bonden oder Thermosonic-Bonden.

Abb. 9.13: Dickschicht-Hybridbaugruppe, mit Flipchip-gebondetem Halbleiter, Linse und drahtgebondetem Halbleiter mit Glob-Top-Abdeckung



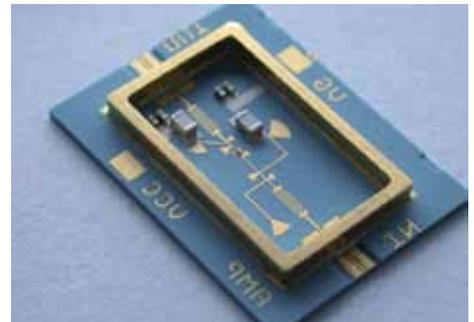
9.6.2 Vakuumlöten von Leistungshalbleitern

Vakuumlöten wird eingesetzt, um Baugruppen mit ungehäusten Leistungshalbleitern wie IGBTs und Dioden mit optimaler thermischer Ankopplung auf Keramiksubstraten guter Wärmeleitfähigkeit (z. B. DCB) zu realisieren. Hierzu werden überwiegend hochbleihaltige Lote verwendet, in Einzelfällen auch eutektisches AuSn. Die Liquidtemperatur dieser Lote von über 280 °C erlaubt eine hohe Arbeitstemperatur und eine Prozesshierarchie, die weitere thermische Prozesse unter 280 °C zulässt.

9.6.3 Vakuumlöten von Baugruppen

Leistungsfähige, zuverlässige und langlebige Baugruppen, wie sie beispielsweise in der Raumfahrt eingesetzt werden, müssen hermetisch dicht verschlossen werden. Besonders geeignet sind die hier erwähnten keramischen Schichtschaltungen, die im Ausdehnungsverhalten exzellent an die üblichen schweißbaren Rahmen und die löt- und klebefähige Wärmesenke angepasst sind. Unter Einsatz des Vakuumlötens und einer rückstandsfreien Aktivierung des Lotes mit Ameisensäure lassen sich die Komponenten Schichtschaltung, Rahmen, Kühlelemente und Anschlusskämme flussmittelfrei mit Preforms aus AuSn oder hochbleihaltigen Lotwerkstoffen verbinden und zu hermetisch dichten Baugruppen weiterverarbeiten.

Abb. 9.14: LTCC-HF-Modul mit Kovar-Rahmen für den hermetisch dichten Verschluss



9.6.4 Umhüllung (Schaltungsschutz)/Packaging

Zum Erreichen höchster Zuverlässigkeit und dauerhaften Schutzes der Schaltungen werden in der Hybridtechnik verschiedene Packaging-/Umhüllungsverfahren eingesetzt. Diese sind an die anwendungsbezogenen Umgebungsbedingungen angepasst.

Abb. 9.15: Dünnschicht Hybridbaugruppe im hermetischen Gehäuse mit Glas-Metall-Durchführung vor dem hermetischen Verschluss



- Lackieren oder Conformal Coating zu einfachem Feuchtigkeitsschutz und elektrischer Isolation
- Globtop-Verguss zu lokaler Abdeckung und mechanischem Schutz drahtgebondeter Chips
- Molden – Umspritzen von Bauteilen oder Teil-Baugruppen mit Kunststoff für Großserien/Massenanwendungen
- Polymerverguss (z. B. PU/Silikon) der Schaltungen insbesondere zum chemischen Schutz der eingesetzten Halbleiter unter rauen Umgebungsbedingungen
- Verschweißte oder gelötete hermetische Gehäuse, z. B. Keramik, Kovar oder Titan, für höchste Zuverlässigkeit bzw. Schutz vor extremen Umgebungsbedingungen

Durch die äußere Robustheit und das inerte Verhalten der Keramik können keramische Verdrahtungsträger, insbesondere LTCC und HTCC, als Bestandteil des hermetischen Packages verwendet werden.

9.7 Applikationsbeispiele für die Technologien

Abb. 9.16: Hybridaufbau mit LTCC als Schaltungsträger im TO-Gehäuse.
Einsatz: Röntgendetektor

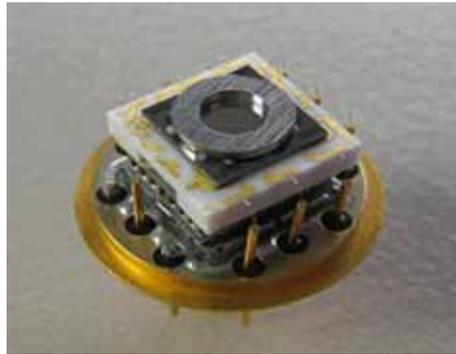


Abb. 9.17: Vakuumgelötete Leistungsbaugruppe auf Kühlkörper.
Kontaktierung durch Dickdrahtbonds.
Einsatz: Anwendungen der Antriebstechnik

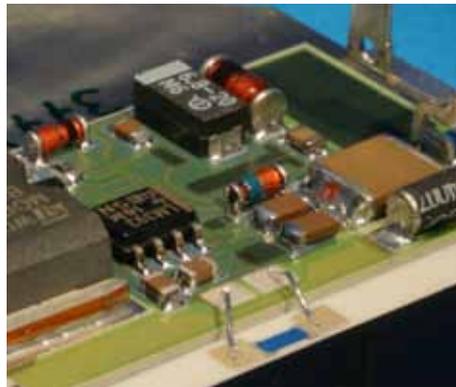


Abb. 9.18: Dünnschichtsubstrat (Al_2O_3), bestückt im Gehäuse mit SMD- und Chipmontage.
Einsatz: Hochfrequenz-Datenübertragung und Telekommunikationsmesstechnik

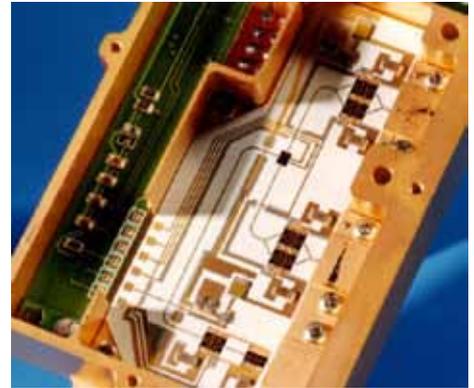


Abb. 9.19a/b: Hochintegriertes Multimode und Multiband, LTCC-Frontendmodul mit 3D-Layoutdaten.
Einsatz: Mobilfunkanwendungen

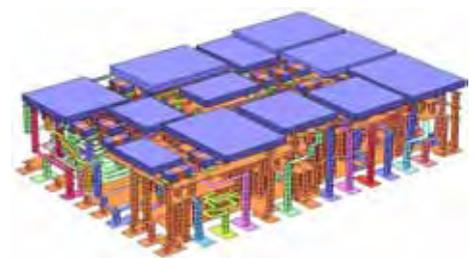


Abb. 9.20a/b: Drucksensor zur Erfassung von Relativ- oder Absolutdrücken in Flüssigkeiten und Gasen in Dickschichttechnik, oben Sensor und unten bestückte Sensorbaugruppe



Abb. 9.21: Vakuumgelötete Dickschichtschaltung, wärmeleitend geklebt auf Alublech. Kontaktierung zum Steckergehäuse durch Dickdrahtbonden. Einsatz: Zündelektronik für Benzinmotoren



9.8 Megatrends und ihre Auswirkungen auf die Technologien integrierter Schichtschaltungen

Die Megatrends Globalisierung, demografischer Wandel, Nachhaltigkeit und Digitalisierung werden sich auch im Hinblick auf die Schichtschaltungen wie auch auf deren Entwicklung auf den Markt signifikant auswirken. Dies wird sowohl neue Anwendungsfelder eröffnen als auch neue Herausforderungen mit sich bringen.

9.8.1 Der Megatrend „Globalisierung“

In Bezug auf den Subtrend Mobilität ergeben sich für Schichtschaltungen neue Aufgabenstellungen im Bereich der Sicherheit für die Integration von Sensoren und Aktoren, ihrer Integration in Sensornetze, der Datenübertragung innerhalb der Sensornetze, der Datenschnittstellen nach außen und einer optimalen Energieversorgung unter Berücksichtigung der Anforderungen nach Autonomie und Autarkie.

Im Bereich der Infrastruktur ergeben sich, vor dem Hintergrund der Zugangsautorisierung, der Positionsbestimmung, der Leistungserfassung und der Leistungsabrechnung, neue Aufgabenstellungen beispielsweise bei der Vernetzung öffentlicher und privater Verkehrsmittel oder bei neuen Nutzungsmodellen wie Carsharing, Bikesharing und E-Bikesharing.

- **Subtrend Nutzung des Internets:**

Der Kapital-, Waren- und Personenverkehr in Verbindung mit extrem schneller Kommunikation erreicht nie zuvor da gewesene Größenordnungen.

Steigende Datenmengen benötigen eine leistungsfähige Übertragungstechnik für Kurz-, Mittel- und Langstrecken. Daraus resultieren neue Anforderungen an miniaturisierte und robuste HF-Sender/Empfänger/Module.

Die Datensicherheit erfordert eine aufwendige Verschlüsselungstechnik und den Schutz der Frequenzbänder für die Datenkommunikation. Dies setzt neben Softwarelösungen auch höhere Aufwendungen für die Schaltungsperipherie voraus.

Der Ausbau der Infrastruktur mit Basis-, Sende- und Empfangsstationen, schnellen Datenleitungen mit vielen Anschlüssen führt zu hohen Verlustleistungen und elektromagnetischen Abstrahlungen (Elektrosmog), die reduziert werden müssen.

9.8.2 Der Megatrend „demografischer Wandel“

- **Alterung der Gesellschaft, Sicherheit und Schutz von Eigentum:**

Veränderte angepasste Freizeitangebote, mehr Überwachungsanlagen und private Sicherheitsdienste.

- **Wachsende Weltbevölkerung:**

Ressourcenverknappung mit den Maßnahmen Recycling und Remining, Sicherung des Zugriffs auf Ressourcen durch Sicherheit und Schutz von Industrieanlagen mit zunehmendem Bedarf an Überwachungseinrichtungen (IR-Sensoren, Radartechnik, Kamertechnik, Röntgentechnik ...).

- **Gesundheit:**

Monitoring von Gesundheitsparametern, tragbare Kleingeräte, Smartphone, textile Elektronik, Messen und Monitoring von Krankheitsparametern, Kleingeräte zur Hausanwendung, höherwertige Geräte, zur Überwachung und Einhaltung gesundheitsfördernder/krankheitsauslösender Indikatoren in Arztpraxen, Apotheken, bei Therapeuten.

Zunehmende Digitalisierung und Vernetzung von Patienten und ihren lebensunterstützenden elektronischen Helfern mit der Arztpraxis, ambulanten und stationären Einrichtungen. Daraus entwickelt sich ein hoher Bedarf an Datensicherheit und Manipulationsfreiheit mit neuen Software- und Hardwarelösungen.

Abb. 9.22: Biomedizinischer Immunosensor. Basiert auf der Reaktion zwischen immobilisierten Rezeptoren (Antikörper) und einem Immunogen (Antigen)



9.8.3 Zunehmende Verstädterung, „Urbanisierung“

Innerstädtische Emissionen in Luft und Wasser, Lärm sowie elektromagnetische Strahlung nehmen zu und der Emissionsschutz sowie die Emissionsüberwachung erfordern eine steigende Anzahl an Sensoren zu deren Erfassung und Kontrolle.

Die Verkehrsdichte nimmt zu und bedarf im Hinblick auf die Verkehrssicherheit intelligente, software- und hardwarebasierte Lösungen zur Verkehrsflussplanung und Verkehrsleitung sowie eine koordinierte Einführung unterschiedlicher Schritte des autonomen Fahrens.

Implizit birgt der Trend der Urbanisierung die Gefahr zunehmender sozialer Spannungen durch Akkumulation der Besitzverhältnisse regional und global. Dies erhöht den Bedarf nach Sicherung, Schutz und Überwachung von Eigentum durch Sensoren, Signalgeber, Alarmierung von Sicherheitsdiensten und auch nach Minimierung der Vulnerabilität öffentlicher und privater Einrichtung durch Überwachung und Kontrolle von Versorgungseinrichtungen (Strom, Wasser).

9.8.4 Der Megatrend „Nachhaltigkeit“

- **Ressourceneffizienz:**

Hierunter fallen der minimale Einsatz und die Wiederverwertung von Rohstoffen. Dazu müssen Einsatz- und Verbrauchsmengen mit hohen Datenmengen simuliert wie auch real messtechnisch erfasst und die erfassten Messdaten zur Parametersteuerung für die Verbrauchsreduzierung eingesetzt werden. Dies erfordert sowohl den Einsatz hoher Rechnerleistungen, den Einsatz von Software- und Hardwarekomponenten als auch den Einsatz von Sensoren und Aktoren. Hauptanwendungsgebiete sind die industrielle Produktion und der Transport.

Ebenso fallen energierelevante Parameter wie optimale Energiebilanz und maximale Energieeffizienz darunter. Dies erfordert beispielsweise hochkomplexe Simulationen zur Ermittlung optimaler Brennstoff-Gas-Gemische und deren Strömungsverhalten in Einspritzprozessen zur Verbrennung sowie die Erfassung physikalischer und chemischer Parameter bei hohen Einsatztemperaturen zur Prozessoptimierung und Optimierung der Energiebilanz unter Realbedingungen. Neben einer Verwendung geeigneter Sensoren und Aktoren erfordert dies wiederum neue Software- und Hardwareelemente sowie immense Rechnerkapazitäten.

Von zunehmender Bedeutung in diesem Zusammenhang ist die Relation der verbrauchten Ressourcen zur gesamten Nutzungsdauer.

- **Umweltschutz:**
Hierunter fallen
 - zunehmend gesetzliche Einschränkungen aufgrund neuer Erkenntnisse der Umweltverträglichkeit und der Gesundheitsgefährdung beim Einsatz von chemischen Produkten und Rohstoffen,
 - zunehmend schärfere gesetzliche Vorgaben zur Kontrolle und Reduzierung von Schadstoffen in industriellen, öffentlichen und privaten Abgasen und Abwässern,
 - die Verhinderung von Emissionen durch Sensorkatalysator- und Sensorfiltersysteme,
 - die Bindung der Schadstoffe in stabilen oder metastabilen Systemen (CO₂). Hinzu kommen noch schwer einzuschätzende Gefährdungspotenziale durch hochfrequente elektromagnetische Strahlung bei gleichzeitig zunehmender Strahlungsdichte.

Es ist abzusehen, dass die Zahl der Messstellen und die Messgenauigkeit zunehmen werden, dass große Datenmengen gehandhabt werden, die Systeme kommunizieren und an vielen Einsatzorten auch autark funktionieren müssen.

- **Soziale Standards:**
Die sozialen Standards werden mitbestimmt durch die Verfügbarkeit von Internet, mobiler Kommunikation und den Zugriff auf die digitalen Medien.

9.8.5 Der Megatrend „Digitalisierung“

- **Miniaturisierung:**
Hierunter fällt nach wie vor die zunehmende Integrationsdichte nach dem Moore'schen Gesetz auf Halbleiterebene, aber auch die heterogene Integration als gemouldetes Multichipmodul, als klassische Hybridschaltung und hermetisches Package, die Einbettung von Halbleitern in die Leiterplatte und das Packaging auf Wafer-Level mit unterschiedlichsten Technologien.

Dies ist das klassische Gebiet der Schichtschaltungen, deren Einsatzmöglichkeiten sich aus den Anwendungsanforderungen und dem Kosten-Nutzen-Verhältnis in Abhängigkeit der Stückzahlen ergeben.

Wesentliche Herausforderungen bestehen in der weiteren Reduzierung von Leiterbahn-

breiten und Abständen, in der Reduzierung der Substratdicken, in der Bereitstellung einer hochpoligen Anschluss technik, im thermischen Management, in der Beherrschung von Parasitäreffekten und in der Simulation der Zuverlässigkeitsparameter und Lebensdauervorhersagen. Hinzu kommen Anforderungen nach neuen, weniger stressarmen und die Lebensdauer erhöhenden Verfahren in der AVT-Aufbau- und -Verbindungstechnik wie diffusive, mikrothermische und reaktive Verbindungsprozesse sowie neue Technologien zur Strukturierung wie hochauflösender Siebdruck, 3D-Siebdruck, Aerosol- und Inkjet-Druck, fotolithografische Verfahren, Galvanik und Ätztechnik.

- **Internet der Dinge:**
Schlüsselemente für ein funktionierendes Internet der Dinge sind unter anderem die autonome Stromversorgung mit Photovoltaik, Energy-Harvesting sowie Brennstoffzellen, die drahtlose Stromversorgung, ergänzt durch induktive ladbare Batterien kleiner Leistung, der minimale Energieverbrauch durch neue Bauelemente mit geringen Leistungsverlusten, die drahtlose Kommunikation mit neuen Schaltungselementen und neuen Frequenzbändern.

Eine besondere Stellung in diesem Zusammenhang nimmt die Datensicherheit ein. Diese erfordert besondere Verschlüsselungstechniken, geschützte Frequenzbänder, gesicherte Software und sichere Hardware.

- **Big Data:**
Die Rechnung und Simulation mit großen Datenmengen findet bereits in einem Umfang statt, dass die Rechnerkapazitäten und die Rechengeschwindigkeiten nicht ausreichen. Die bereits genannten Trends signalisieren einen dramatisch steigenden Bedarf nach Rechenkapazität und Rechengeschwindigkeit. Die Entwicklung neuer Technologie – Stichworte sind Spintronic, Quantendots – ist weltweit in vollem Gange und lässt in den nächsten Jahren erste Umbrüche auf diesem Gebiet erwarten. Entsprechend ergibt sich ein Bedarf nach neuen Bauelementen (GaN, Laser, THz) und Leitungen für schnelle Datenübertragung und die Übertragung großer Datenmengen. Hinzu kommen Infrastrukturmaßnahmen wie Datenübertragungsanlagen, Datenleitungen, Leitungsanschlüsse, Großrechenanlagen und die erforderlichen Maßnahmen zur maximalen Sicherung der Daten. Hierfür müssen neuartige Baugruppen entwickelt werden und es entstehen neue Herausforderungen an die AVT und die jeweiligen Übertragungsinterfaces.

- **Branchenübergreifende Kooperationen:**

Die in der bisherigen Ausdifferenzierung nach Technologien vorhandenen Zulieferunternehmen werden mit den vorhandenen Wertschöpfungsmöglichkeiten die neuen Herausforderungen nicht vollumfänglich bedienen können. Dies erfordert auf der einen Seite eine neue Dynamik in der bedarfsorientierten Bildung von Clustern, Netzwerken und Verflechtungen und auf der anderen Seite eine übergreifende Spezifikation mit transparenten Schnittstellen.

9.9 Entwicklungstrends für integrierte Schichtschaltungen

9.9.1 Allgemeine Anforderungen aus den bestehenden Anwendungsfeldern

Für die integrierten Schichtschaltungen treffen die in der Elektronik üblichen Anforderungen nach zunehmender Miniaturisierung, Robustheit und Zuverlässigkeit in besonderem Maße zu. Hintergrund hierfür ist die erforderliche Lebensdauer in den Einsatzgebieten, die häufig mehr als zehn Jahre beträgt. Ein allgemeiner Handlungsbedarf in diesen Anwendungsfeldern ergibt sich darüber hinaus aus der zunehmenden Funktionsdichte auf Substratebene, der Kombination von Leistungselektronik mit Logik, den zunehmenden Einsatztemperaturen und zunehmenden Verlustleistungen in Richtung einer flexiblen Außen-AVT und stressarmen und werkzeuglosen Packagingverfahren.

Aus der Betrachtung einiger wesentlicher wachsender Anforderungen wie Einsatztemperaturen $>175\text{ °C}$, Wärmeleitfähigkeit der Substrate $>100\text{ W/mK}$ und effektivere Entwärmung der Substrate ergeben sich auch neue Herausforderungen für die Entwicklung zukünftiger Schichtschaltungen in diesem Umfeld. Dies sind insbesondere die Ermittlung und Bereitstellung mechanischer, thermischer und elektrischer Daten der einzusetzenden Werkstoffe und die Durchführung von Simulationen der Prozesse und der Zuverlässigkeit, basierend auf diesen Daten.

Auf Substratebene ergibt sich für LTCC der Bedarf nach Feinstrukturierung $<50\text{ }\mu\text{m}$ bei gleichzeitiger Realisierung von Strompfaden von 100 A und für hochfrequente Anwendungen die Forderung nach guter Ebenheit und hoher Randschärfe. Für DCB und AMB ist die Forderung nach Strukturen $<100\text{ }\mu\text{m}$ erkennbar.

Die Abgassensorik ist durch die Diskussion um Elektromobilität etwas in den Hintergrund getreten, bekommt aber wieder neue Impulse. Anwendungsbereich ist die Messung und Reduzierung von NO_x und Kohlenwasserstoffen (für On-Board-Diagnosen etc.). Insbesondere Platinpasten als Leiter und Heizer sowie Pt/Rh für Thermoelemente zum Einsatz auf Al_2O_3 und LTCC-Substraten sind hier gefragt, wobei das thermische Management von Wärmeableitung und Wärmeentkopplung eine wichtige Rolle spielt.

Daraus ergibt sich eine anhaltende Entwicklung zur Verkleinerung der Leiterbahnbreite / des Abstands, die zu Strukturen deutlich $<100\text{ }\mu\text{m}$ führt und den Einsatz von Pasten mit Nanokörnung erfordert. Die Dickschichttechnik dringt somit in Grenzbereiche ein, die heute der Dünnschichttechnik vorbehalten sind. In gleicher Weise steigen die Reinraumanforderungen und die Kosten. Mit dem zunehmenden Einsatz an Leistungselektronik steigen auch die Anforderungen an Schaltung, Steuerung und Überwachung, sodass der Logikanteil wächst und eine geeignete Anbindung von Leistung und Logik in einer Schichtschaltung erforderlich ist. Dadurch werden Stromtragfähigkeiten der Leiterbahn von $>10\text{ A}$ benötigt: Die Topologien der Schichten innerhalb einer Schaltung werden einen Bereich von wenigen μm für Feinstrukturen bis zu einigen $100\text{ }\mu\text{m}$ für Leistungsstrukturen aufweisen. Einhergehend mit dem Druck zur Miniaturisierung ist auch eine Verkleinerung gedruckter Widerstände und anderer Bauelemente von $<0,5 \times 0,5\text{ mm}$ erforderlich. Für Multilayertechniken wie die Dickschichttechnik und LTCC führt dies zu einer Verkleinerung der VIA-Durchmesser auf unter $50\text{ }\mu\text{m}$ und zur Notwendigkeit von pinholefreien Dielektrika zur defektfreien Isolierung bei geringen Schichtdicken.

Der Trend zur Miniaturisierung geht einher mit der gleichzeitigen Steigerung von Leistungsdichten, Schaltfrequenzen und Taktzeiten und erfordert Materialsysteme und Technologien mit einem hohen Maß an Defektfreiheit und vielfältigen Möglichkeiten zur Optimierung des Wärmemanagements. Hinzu kommen zunehmende Anforderungen nach Erhöhung der Funktionsdichte, der Leistungsdichte und der Einsatztemperatur. Einige Elemente sind im Folgenden beispielhaft herausgehoben.

Robustheit:

- Hochpolige und robuste Press- und Steckverbindungen
- Hochtemperaturstabile AVT mit Schweißverbindungen
- Entwicklungsbedarf besteht für Pasten, die für das Laserschweißen und andere Schweißtechniken geeignet sind. Laserschweißen findet zunehmend Einsatz in Automotive und Industrieanwendungen
- Fügeprozesse mit hoher thermischer Leitfähigkeit und geringem thermischem Mismatch
- Sintersilber für die Montage von Leistungshalbleitern. Entwicklungsbedarf besteht für eine drucklose Variante sowie Material auf Cu-Basis

Funktionsdichte:

- Kombination von Logik und Leistung, Hochfrequenz, Hochspannung und Hochstrompfaden auf einem Substrat

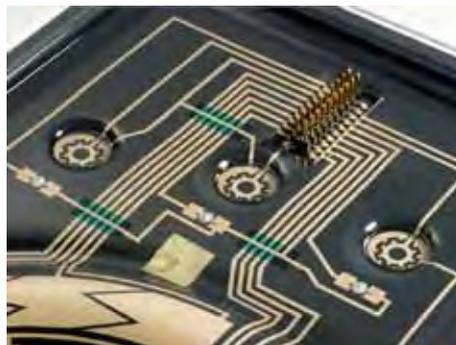
Fineline:

- Fan-out für komplexe Mikroprozessoren
- Laserstrukturierbare Pasten sind entwickelt. Die Strukturierung erfolgt im getrockneten Zustand und wird auch im Produktionsmaßstab eingesetzt. Leiterbahnabstände: 35 µm

InMold Electronics (IME):

- Der Markt hat die Technologie für 3D-kapazitive Eingabesystem akzeptiert und Volumenanwendungen werden bereits gefertigt. Hauptanforderung sind Pasten auf Polymerbasis, die thermoformbar und spritzgussresistent sind. Kompatible Systemkomponenten sind verfügbar (Leiterbahn, Polymerabdeckung, Dielektrikum, transluzente Pasten sowie Leitleiber beispielsweise für die LED Montage).

Abb. 9.23: InMold-Electronics-Demonstrator für Dusch-Bedieneinheit (Rückseite) mit kapazitiver Oberfläche



Elektrisches Heizen:

- Zunehmender Bedarf einerseits nach steuerbaren Heizelementen zur thermischen Behandlung in der Industrie und andererseits als Heizelemente in Elektrofahrzeugen. Das umfasst Ambiente-Beheizung im Innenraum, Defrosting
- sowie punktuell Heizen durch Sensoren von Beleuchtung zur Vermeidung von Kondensation

9.9.2 Anwendungen und Entwicklungsbedarf DCB, Dickschicht/LTCC

Automotive und Industrie: Die Elektrifizierung in der Automobiltechnik und die zunehmende Automatisierung in der Industrie sind die treibenden Kräfte für einen stark zunehmenden Einsatz elektrischer Antriebe und Stellglieder. Das autonome Fahren und die digitale Verknüpfung in der Industrie hingegen sind die treibenden Kräfte für den zunehmenden Einsatz von Navigation, Sensorik, Kommunikation und zentraler Datenverarbeitung. Dadurch ergeben sich neue Anwendungen und Einsätze für Schichtschaltungen der Technologien DCB, Dickschicht und LTCC.

Tab. 9.13: Anwendungen für Schichtschaltungen der Technologien DCB, Dickschicht und LTCC

Anwendungen	Einsatz
Leistungselektronik	Wechselrichter, Wandler, Kleinmotoren
Sensorelektronik	IR, US, Video, Radar, Lidar
Kommunikationselektronik	Wireless im Auto, von Auto zu Auto, von Auto zu Infrastruktur, von Maschine zu Maschine, von Maschine zu Infrastruktur

Quelle: ZVEI

Vor dem Hintergrund des anhaltenden Kostendrucks, der zunehmenden Miniaturisierung und der zunehmenden Leistungen ergeben sich neue Herausforderungen in nahezu allen technologischen Bereichen der Schichtschaltungen.

Für die Konstruktionselemente sind dies:

Tab. 9.14: Konstruktionselemente und Technologien

Konstruktionselemente	Technologie
Substrat	DCB, AMB (Si_3N_4), LTCC, HTCC, AlN-Multilayer, Al_2O_3
Substrat-AVT	ICA (Isotropic Conductive Adhesives) ACF (Anisotropic Conductive Films), Lötten, Sintern
Substrat-/AVT-Housing	Molden, Spritzgießen, Vergießen

Quelle: ZVEI

Für die Fügepartner sind dies:

Tab. 9.15: Fügeparameter

Substrat-Fügepartner	Technologie
SMD-Bauelemente	ICA von Standard-SMD auf LTCC, Al_2O_3
Leistungshalbleiter	Lötten und Sintern auf DBC, AMB, LTCC, Al_2O_3

Quelle: ZVEI

Für die Anschlüsse sind dies:

Tab. 9.16: Anschlusstechnologien

Anschlüsse	Technologie
Leadframes	ICA, Lötten und Sintern auf DBC, AMB, LTCC, Al_2O_3
Cu-Clips	ICA, Lötten und Sintern auf DBC, AMB, LTCC, Al_2O_3
Pins	ICA, Lötten und Sintern auf DBC, AMB, LTCC, Al_2O_3
Flex-PCB	ICA, ACF und Lötten auf LTCC, Al_2O_3

Quelle: ZVEI

Für die Fügwerkstoffe ergeben sich:

Tab. 9.17: Fügwerkstoffe

Fügwerkstoff	Fügepartner
Leitkleber	LTCC, Al_2O_3
Lot	DBC, AMB, LTCC, Al_2O_3
Niedertemperatur-Sinter-Ag	für Leistungshalbleiter auf DBC, AMB, LTCC, Al_2O_3
Hochtemperaturkleber/Lote	auf LTCC, DCB, Al_2O_3

Quelle: ZVEI

Für die Substrat-Verbindungstechnik sind dies:

Tab. 9.18: Substrat-Verbindungstechniken

Substrat-Verbindungstechnik	Substrat
Leitkleben	LTCC, Al_2O_3
Lötten	DBC, AMB, LTCC, Al_2O_3
Sintern	Leistungshalbleiter auf DBC, AMB, LTCC, Al_2O_3
Bändchenbonden	Leistungshalbleiter auf DBC, AMB, LTCC, Al_2O_3
Laserschweißen	auf LTCC, DCB, Al_2O_3
Pressfit	auf LTCC, DCB, Al_2O_3

Quelle: ZVEI

9.9.3 Besonderer Entwicklungsbedarf: LTCC in industriellen Anwendungen

Industrielle Anwendungsbereiche für LTCC ergeben sich immer dort, wo keine konventionellen Lösungen existieren oder diese den Anforderungen nicht gerecht werden. Häufig sind dies neben einem selbstverständlich hohen Miniaturisierungspotenzial Anforderungen nach Temperaturstabilität, Vakuumtauglichkeit, Isolationsfestigkeit, dielektrische Verluste, Hochfrequenzstabilität und Vermeidung von Störeffekten.

Die wichtigsten Applikationsfelder sind industrielle Sensorik (Halbleiterherstellung, Analytik), Medizin, Energieerzeugung, Raumfahrt, Satellitenkommunikation und Verteidigung.

Beispiele hierfür sind Magnetfeldsensoren für den Kernfusionsreaktor, Sensoren zur Identifizierung von einzelnen Ladungswolken im Weltraum, Gehäuse für Röntgendetektoren, Druck- und Feuchtesensoren, Baugruppen für die Computertomografie, hochauflösende Abstandssensoren.

Entwicklungsbedarf bei der Generierung von Kavitäten mit hohen Positionsgenauigkeiten und ohne Fehlstellen, Fluidikanschlüssen in der Substratebene, Dicken der Multilayersubstrate unter 0,4 mm, Linienauflösung unter 50 μm . Weiterhin gibt es aufgrund möglicher Änderungen der Gesetzeslage den Bedarf nach bleifreien Produkten sowohl bei Widerstandspasten als auch bei LTCC.

9.9.4 Besondere Anforderungen aus neuen Anwendungsfeldern

Gesundheit/Demografie: Die Biosensorik entwickelt sich als starker Wachstumsmarkt, dies betrifft auch die Point-of-Care-Diagnose in der Medizin: Blutzucker, Blutgerinnung, Blutgas, Laktose, Alkohol etc. müssen gemessen und überwacht werden. Hierfür kommen klassische Dickschicht- und LTCC-Schaltungen zum Einsatz, aber auch gedruckte Schichten auf organischen Substraten. Dies erfordert die Weiterentwicklung von polymerbasierten Pt, Au, Ag, AgCl, Carbonpasten und Dielektrikumpasten.

Mobilfunk und Hochfrequenz: 5G ist ein Thema, das in den Jahren 2018 bis 2025 einen großen Raum einnehmen wird, auch im Automotive-Bereich. Hier wird LTCC bei Basisstationen eine geeignete Technologie darstellen.

Zwei Frequenzen sind für 5G interessant, wobei aber 5G nur ein Überbegriff für den Wechsel von 4G auf 5G ist. Es kommen die Frequenzen um die 28 GHz und 77 GHz zum Einsatz.

Antennenmodule: Bei diesen hohen Frequenzen spielen nun die dielektrischen Verluste eine viel größere Rolle als die metallischen Verluste. Prädestiniert dazu ist deshalb LTCC, da ein niedriges Epsilon wünschenswert ist. Fotostrukturierung ist ein Muss! Diese Technologie ist für die Außenbereiche bereits etabliert, auf den Innenlagen gibt es keine wirtschaftlich sinnvoll anwendbare Technologie. Entwicklungsaktivitäten auf diesem Gebiet laufen im industriellen Umfeld. Für alternative Strukturierungstechniken mit digitalem Ansatz, in dem das vergrabene Feedingnetwork, das heißt die 2.5D der LTCC, ausgenutzt werden kann, gibt es einen konkreten Bedarf, weil insbesondere gerade bei diesen Frequenzen Lagenversatz und Strukturtreue eine viel größere Rolle als bei konventionellen Anwendungen spielen.

Ein wichtiges Element bei der Fotostrukturierung mit Kupfer ist aber nickelfreies Finishing: das heißt OSP, ISIG (chem. Ag, chem. Au), IS.

Für das Assembly mit großen Chips ist die Oberflächentopografie ein begrenzendes Thema, sodass extreme Ebenheitsanforderungen von $\pm 2 \mu\text{m}$ as fired eine zwingende Notwendigkeit darstellen. Insgesamt geht der Trend in Richtung Kombisysteme und Interposer.

Seitens der Substrat- und Siebdrucktechnik sind für Frequenzen von 77 GHz und darüber die Minimierung der Oberflächenrauigkeit und die Verbesserung der Oberflächenhomogenität sowie der Randauflösung der gedruckten Schichten erforderlich.

9.9.5 Zukünftige Anwendungen von integrierten Schichtschaltungen

Ein Einblick in zukünftige Anwendungsgebiete und Prozesse für integrierte Schichtschaltungen ergibt sich aus der Betrachtung der Forschungsaktivitäten. Dabei ist zum einen relevant, in welchen Forschungsthemen integrierte Schichtschaltungen derzeit involviert sind und zum anderen, welche Herausforderungen an das Packaging durch die Forschung auf dem Gebiet der Informations- und Kommunikationstechnik mit Mikro- und Nanotechnologien entstehen.

9.9.5.1 LTCC und Dickschicht in der F&E-Förderlandschaft

- **Funktionalitäten:** Gasführung, Ionisierung, Elektrolyseur, Flüssigkeitsführung, Mischer, Reaktor, Sensor
- **Anwendungen und Produkte:** Brennstoffzelle, Elektrolyseur, Flammen-Ionisations-Detektion, NO_x -Detektion, Gasflussmessung, Heizer Elemente, Temperatursensoren, Bioreaktor, Ionendetektor, Zirkulator,

Drucksensor, Biosensor, chemischer Sensor, Brennstoffzelle

- **Materialien:**
Si-angepasste LTCC, anodisch bondbare LTCC, piezoelektrische Schichten, magnetische Schichten, Hoch-K-, Niedrig-K-Folien, Ferrit-Folien
- **Prozesse:**
Wafer-Level-Packaging, 3D-Druck, reaktive Schichten, Galvanik, eingebettete Komponenten, druckunterstütztes Sintern, Stickstoff-Sintern, Dickschicht-Substrate für die Leistungselektronik in Kupfer und Silber
- **Neue Einsatzgebiete:**
Wasser, Abwasser, Pharmazie, Biotechnologie, Kraftfahrzeuge, Elektromobilität
- **Integrierte Bauelemente:**
Induktoren, Transformatoren, Zirkulatoren, Sensoren, Aktoren
- **Strukturierung:**
Dünnschicht, Kurzpulslasertechnik, Prägetechnik, Fotolithografie, Dickschichtschaltungen als Basistechnologie für Sensorentwicklungen
- **Standardisierung und Normung:**
Es fehlen statistisch fundierte Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsdaten für die in Schichtschaltungen verwendeten Materialien und Technologien. Im Hinblick auf die anwachsende Bedeutung von Nachhaltigkeit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit ist zu erwarten, dass die Ermittlung dieser Daten im Rahmen der öffentlich geförderten Forschungslandschaft zunehmend wichtiger wird

9.9.5.2 Nanotechnologien für die Informations- und Kommunikationstechnik in der Förderlandschaft

Aus einer Querschnittsbetrachtung aktueller europäischer Forschungsthemen auf diesem Gebiet lassen sich folgende Entwicklungsaktivitäten erkennen:

- Beherrschung einzelner Quanteneffekte
- Beherrschung elektrischer und magnetischer Felder auf Molekularebene
- Realisierung von Spin-Effekten für elektronische Bauelemente (Spintronics)
- Realisierung höchst empfindlicher Sensoren auf Bauelementebene
- Übertragung großer Datenmengen durch THz-Technologien
- Leistungssprung in der Simulation und im Design
- Einsatz von höchstauflösender Niedertemperaturmesstechnik und Analytik (AFM)
- Subatomare/molekulare Visualisierung und Modellierung
- Mensch-Maschine-Interfaces bis zur direkten Implantation von Bauelementen

9.9.5.3 Herausforderungen an das Packaging

Aus den Schlüsselanforderungen an zukünftige Packagingtechnologien ist zu erkennen, dass zu deren Erfüllung auch integrierte Schichtschaltungen beitragen werden:

- Minimierung von Parasitäreffekten durch störungsarme Hardware und intelligente Software
- Verlustarme und störungsarme Signalführung und Interfaces für die AVT
- Integrierte Schnittstellen zur störungsarmen Datenübertragung, Vernetzung und zur Energieübertragung
- Kombination von paralleler und sequenzieller Systementwicklung mit spezifizierten Schnittstellen
- Multiparameter-Simulation von Querempfindlichkeiten zwischen Primär- und Sekundäreffekten zwischen Elektronik/Sensorik und Package
- Integrationssystem in Packagelösungen zur Verkürzung der Signalwege und zum Schutz der Signale
- Schaffung von Interfaces zur Verbindung von Nano- und Mikroelektronik
- Miniaturisierung von Strukturen zum Nano-screening, zur Mikrofabrikation und zum Molekular-design auf Bauelementebene
- Miniaturisierung, Biokompatibilität, drahtlose Energieübertragung und drahtlose Kommunikation bei Implantaten
- Flexibilität der Anschlusskonfiguration, Dichtigkeit, Zuverlässigkeit und Autoklavierbarkeit

9.9.6 Leistungsmerkmale integrierter Schichtschaltungen

In den folgenden Abbildungen erfolgt die grafische Darstellung der Roadmap-Elemente sowohl in Bezug auf die übergeordnete Ebene der Leistungsmerkmale als auch auf die einzelnen Ebenen der Substrat-, Schicht- und Pastenebene.

Abb. 9.24: Leistungsmerkmale für integrierte Schichtschaltungen

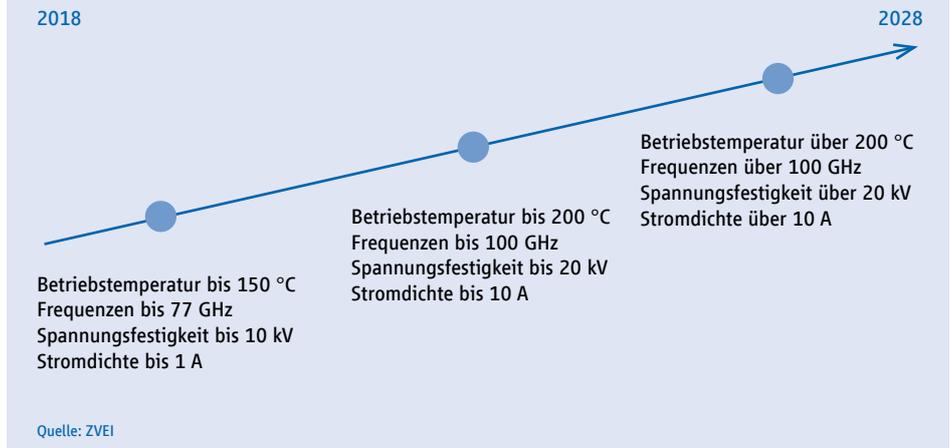


Abb. 9.25: Substrate für integrierte Schichtschaltungen

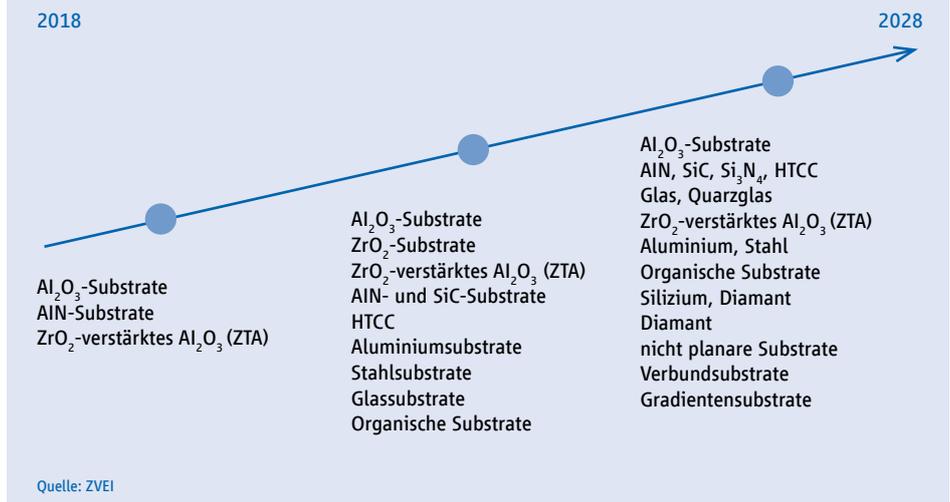


Abb. 9.26: Schichten für integrierte Schichtschaltungen

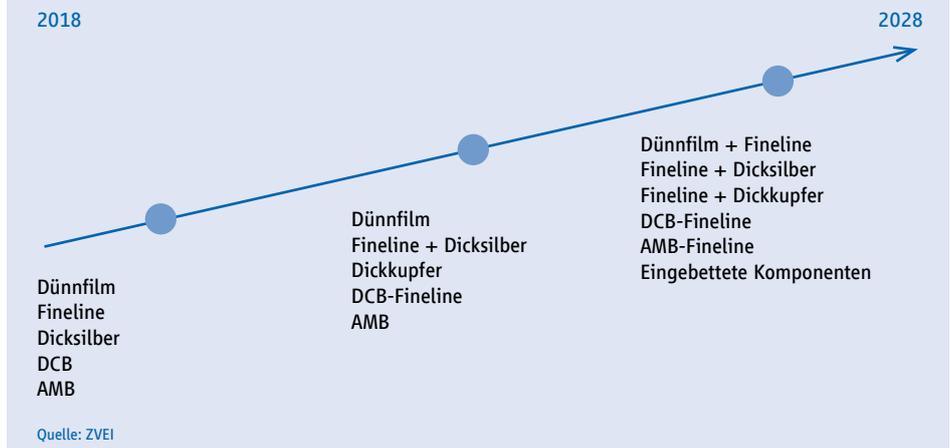
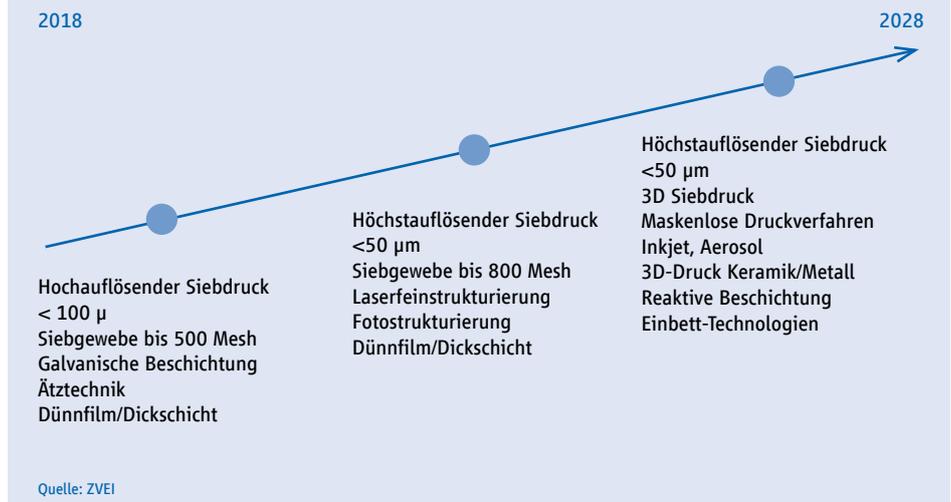


Abb. 9.27: Pasten für integrierte Schichtschaltungen



Abb. 9.28: Strukturierungstechniken für integrierte Schichtschaltungen



Zusammenfassend lassen sich für die Strukturgrößen im dargestellten Zeitrahmen folgende Zielgrößen erkennen:

- Leiterbahnabstand/Breite <50 µm
- Substratdicken <50 µm
- Verbindungstechnik µbumps <50 µm
- Hochauflösender Siebdruck <25 µm
- Hochauflösende digitale Drucktechnik <25 µm
- Schichtdicken >5 µm

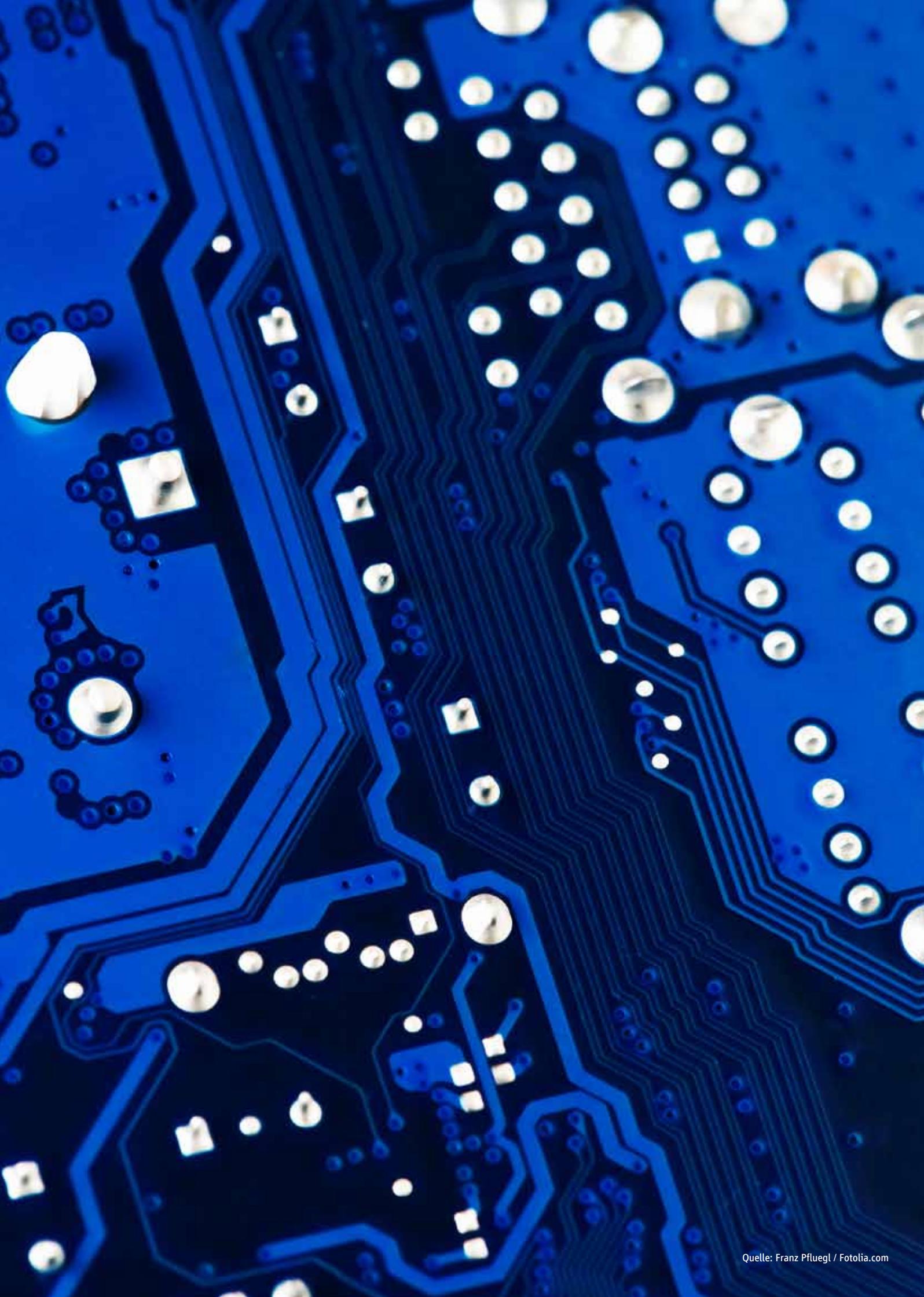
In der folgenden Tabelle sind die Vorzüge integrierter Schichtschaltungen (ISS) in unterschiedlichen Anwendungen in Bezug auf die Megatrends dargestellt:

Tab. 9.19: Neue und wachsende Anwendungsgebiete für integrierte Schichtschaltungen (ISS)

Anwendungen für ISS	Beitrag der ISS-Anwendungen in den Megatrends			
	Globalisierung	Digitalisierung	Demografischer Wandel	Nachhaltigkeit
Sensorik	+++	+++	+++	+++
Abgasrückführung	+++			+++
Leistungselektronik	+++			+++
Elektromobilität	+++	+++	+++	+++
Autonomes Fahren	+++	+++	+++	
IoT	+++	+++		
Smart XYZ	+++	+++	+++	+++
AAL		+++	+++	+++
Smart Home	+++	+++	+++	
Implantate			+++	+++
Energietechnik		+++		+++
LED-Beleuchtungstechnik			+++	+++
Energieeffizienz		+++	+++	+++
Energieerzeugung				+++
Interposer		+++	+++	+++

+++ : hoch

Quelle: ZVEI



10 Elektronische Baugruppen



Quelle: sreelson / Fotolia.com

10.1 Heutige Anforderungen und Herausforderungen

10.1.1 Elektronische Baugruppen

Elektronische Baugruppen müssen je nach Einsatzzweck unterschiedlichsten Ansprüchen genügen. Aufgrund der zunehmenden Miniaturisierung werden nicht nur die zu bestückenden Bauteile immer kleiner, sondern auch die Packungsdichte erhöht sich stetig. Daraus ergibt sich, dass an die Leiterplatte (oder das Substrat) immer höhere Anforderungen in Bezug auf Genauigkeit, Dimensionsstabilität und Feinheit von Leiterzügen und Anschlussflächen sowie deren Abstände (Gap) gestellt werden. Darüber hinaus unterliegen auch die Bauteile immer engeren Toleranzen, und natürlich müssen sowohl der Lotpastendruck als auch die Bestückung mit einer entsprechend hohen Genauigkeit ausgeführt werden. Es muss immer die gesamte Prozesskette der Aufbau- und Verbindungstechnik in ihrem Zusammenspiel betrachtet werden und nicht nur jeder Einzelprozess. Weist zum Beispiel die Leiterplatte Verzüge, Dehnungen oder Stauchungen auf, so ist ein passgenauer Lotpastendruck nicht mehr möglich und es kann in der Folge vermehrt zu Lötfehlern bis hin zu Bestückfehlern kommen.

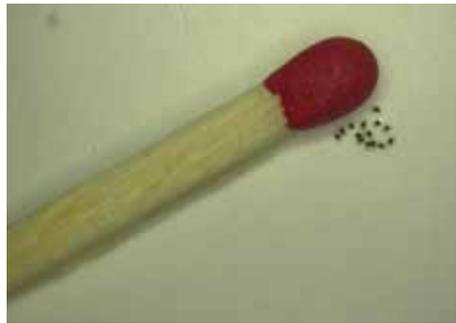
Um steigende Fehlerraten zu vermeiden, werden die Herausforderungen an die einzelnen Prozesse, das Fertigungsequipment und die benötigten Messgeräte und Inspektionssysteme, abhängig von den Implementierungsschritten, stetig zunehmen. Neben der höheren Traceability-Dichte zur Rückverfolgbarkeit der einzelnen Fertigungsschritte werden, basierend auf Daten aus der Prozesskontrolle, die teilweise in der Cloud zur Verfügung stehen werden, übergeordnete Expertensysteme ertüchtigt, in Echtzeit die kritischen Fertigungsprozesse zu stabilisieren und zu optimieren. Closed-Loop-Prozesse zwischen dem Lotpastendruck, der SPI (Solder Paste Inspection) und dem Bestückungsautomaten sowie nachgeschalteter AOI (Automated Optical Inspection) seien hier als nur ein Beispiel genannt.

Gleichzeitig wird es Mischbestückungen mit extremen Eckpunkten geben: Zum einen werden für den Steuerungsbereich Bauteile geringer Größe verbaut werden. Zum anderen werden für den Leistungsbereich große und leistungsstarke Bauteile eingesetzt werden. Dies erzeugt sowohl schwierige Layout-, Lotpastendruck- als auch Lötbedingungen durch die unterschiedlichen Lotbedarfe, Wärmekapazitäten und Temperaturempfindlichkeiten. Dem Kondensationslöten kommt dabei eine große Bedeutung zu.

10.1.2 Elektronische Bauelemente

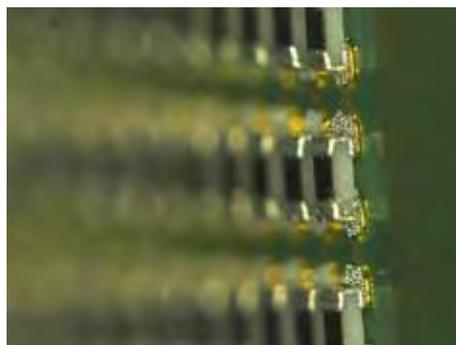
Bauteile heute: Die kleinsten gebräuchlichen Bauteile sind 01005 bei den Chipbauteilen und bei den IC-Gehäusen (Integrated Circuit) mit Raster 0,3 mm. Des Weiteren gibt es viele Sonderbauformen (besonders bei den Induktivitäten).

Abb. 10.1: Streichholz und 01005-Bauteile



Quelle: ASM Assembly System

Abb. 10.2a/b: 01005-Bauteile in Lotpaste bestückt



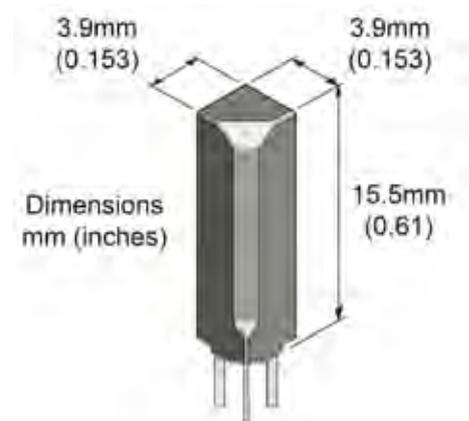
Quelle: ASM Assembly System

Die Verarbeitung von Widerständen, Kondensatoren und Induktivitäten in Chip-Bauform der Größe 01005 (L x B: 0,4 x 0,2 mm) lässt sich mittlerweile gut beherrschen, das heißt: Es sind Anlagen verfügbar, mit denen Lotpaste auf entsprechende Pads gedruckt, der Lotpastendruck inspiziert und diese Bauteile zuverlässig bestückt und gelötet werden können. In Deutschland und Europa sind sie aber noch wenig verbreitet.

Bei den Steckverbindern ist im THT-Bereich (Through Hole Technology) die Miniaturisierung durch die Geometrie beschränkt. Rastermaße <1 mm sind nicht zu finden. Im SMT-Bereich (Surface Mounted Technology) sind bei den Abständen der Lötkontakte Rastermaße von bis zu 0,35 mm bereits üblich. Auf den Steckbereich bezogen, sind sogar Raster von 0,2 mm anzutreffen.

Bei den THT-Bauteilen wird die Miniaturisierung (trotz Begrenzung durch die Geometrie) weiter vorangetrieben (z. B. THT-Reedrelais).

Abb. 10.3a/b: THT-Reedrelais



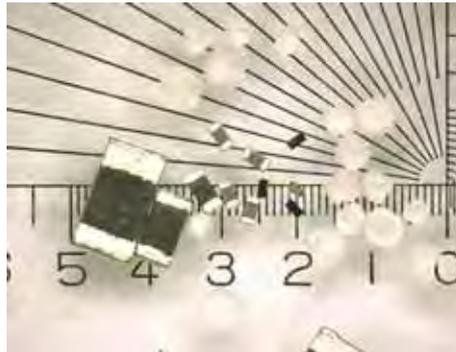
Quelle: Pickering

Bauteile morgen: Die gebräuchlichen Bauteilgrößen werden (durch den Drang nach gleicher oder mehr Funktion bei geringerer Größe) weiter schrumpfen, zum Beispiel wird 0201m zu den Standardgrößen gehören. Durch die geringeren Baugrößen werden auch die fließenden Ströme reduziert. Folglich wird zum einen die Energieaufnahme der Geräte verringert, zum anderen aber werden sich die Störempfindlichkeit und die damit verbundenen Gegenmaßnahmen erhöhen.

Für die Zukunft zeichnet sich deutlich ab, dass innerhalb von zwei Jahren die nächst kleinere Generation von Chip-Bauelementen der Größe 0201m (L x B: 0,25 x 0,125 mm) in der Elektronikfertigung Einzug halten wird. Überwiegend wird man sie in Submodulen oder in der Embedding-Technologie einsetzen, aber auch

zur Verbesserung der elektrischen Eigenschaften: Um zum Beispiel parasitäre Kapazitäten von Anschlussflächen zu vermeiden, werden kleinere Bauelemente eingesetzt, weil damit auch nur kleinere Anschlussflächen benötigt werden. Eine erste Anwendung ist im Bereich des neuen 5G-Mobilfunkstandards zu erwarten, der laut „Heise Online Portal“ im Jahr 2020 startet.

Abb. 10.4: 0603, 0402, 0201, 01005, 0201m und NaCl-Kristalle



Quelle: ASM Assembly Systems

Abb. 10.5: 0201m auf 1-Cent-Münze



Quelle: ASM Assembly Systems

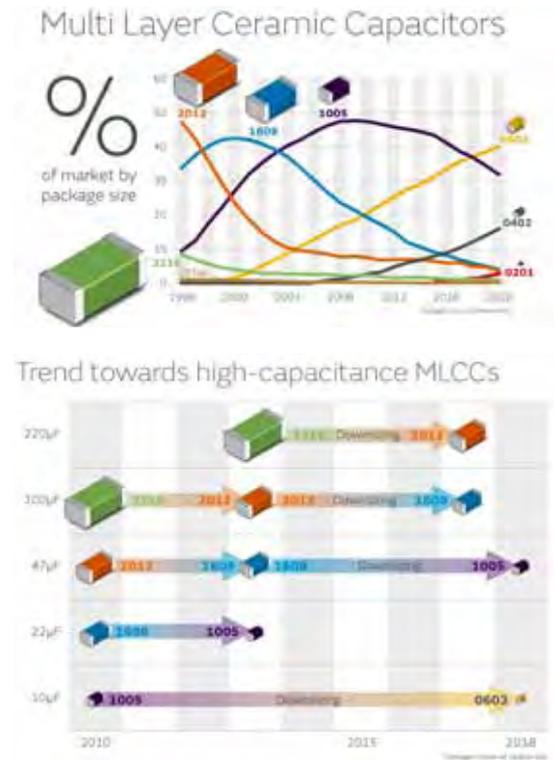
Abb. 10.6: 01005, 0201m und 0201 auf Bleistiftspitze



Quelle: ASM Assembly Systems

Die Bauteilhersteller haben Bauteile der Bauform 0201m bereits verfügbar, so hat zum Beispiel Murata diese Bauteile bereits in seine aktuellste Bauteiltrend-Darstellung aufgenommen.

Abb. 10.7a/b: Entwicklungstrends bei Keramikkondensatoren



Quelle: Murata

Die eben beschriebene Situation wird zu starken Veränderungen in verschiedenen Sektoren der Fertigung führen.

So wird der Leiterplatte eine viel größere Aufmerksamkeit gewidmet werden müssen: Geringe Fertigungsabweichungen (Länge, Verwindung) können zu großen Problemen beim Drucken führen, da beispielsweise das Padlayout der Leiterplatte nicht mehr genau deckungsgleich zur hochpräzisen Schablone ist. Daraus resultiert eine verstärkte Neigung zur Bildung von „Grabsteinen“ (Tombstone-Effekt).

Dem Layout muss im Vorfeld viel mehr Beachtung bezüglich Fertigbarkeit beigemessen werden als bisher. Durch die geringen Bauteilabmessungen ist man auch beim Rework-/Repairprozess stärker eingeschränkt als bisher. Ein manuelles Rework ist bei solchen Bauteilgrößen nicht mehr möglich.

Die Pastendispenser als Alternative zum Schablonendruck werden an ihre Grenzen stoßen.

Bei der Serienfertigung mit 0201m-Bauteilen sind zwingend SPI und AOI auch schon bei der Musterfertigung notwendig, da eine objektive Bewertung mit dem unterstützten menschlichen Auge (Mikroskop) schwierig ist (siehe Kapi-

tel 10.2.3.1/10.2.3.2). Gleichbleibende ideale Umweltbedingungen im Fertigungsbereich werden zwingend erforderlich sein. Die Reduzierung von Verschmutzungen jeglicher Art wird eine erhöhte Bedeutung gewinnen.

Im Bereich der Steckverbinder und Bedienelemente wird es nur noch eine begrenzte Miniarisierung geben, da auch eine gewisse Haptik und Robustheit für den Bediener vorausgesetzt werden muss. Stattdessen wird es zu einer Funktionserweiterung bei gleicher Größe kommen (z. B. Intelligenz durch Mikrocontroller im Steckverbinder). Bedienelemente wie Drucktaster werden weiter zurückgedrängt werden. Stattdessen wird mehr auf Touchscreens oder Sensortasten gesetzt werden. Im Gerätebereich mit geringer Leistungsaufnahme werden die Steckverbinder durch drahtlose Kommunikation bzw. drahtlose Energieversorgung ersetzt werden. Diese Entwicklung lässt sich bereits heute auf Messen erkennen.

10.2 Fertigung von elektronischen Baugruppen

10.2.1 Baugruppendesign

Bei der Entwicklung elektronischer Produkte und Systeme wird es immer wichtiger, die Belange der kompletten „Design Chain“ zu kennen und zu berücksichtigen.

Der Einfluss der einzelnen Disziplinen Schaltungsentwicklung, PCB-Design (Printed Circuit Board), Leiterplattenherstellung und Produktion elektronischer Baugruppen auf ein Endprodukt ist in den letzten Jahren massiv angestiegen. Die rasante Entwicklung der Materialien, Bauelemente, Verfahren, Prozesse, Produktionen und Auflagen verlangt eine lebende Dokumentation. Gleichzeitig wächst das Spektrum der Anforderungen, aber auch die Leistungsfähigkeit der Fachbereiche in immer kürzeren Zeitabständen.

Dabei kommt der Entwicklungs- und Designphase eine absolute Schlüsselstellung zu, denn hier werden die Weichen für das gesamte Produkt bzw. System gestellt.

In den vergangenen Jahren arbeiteten die einzelnen Fakultäten im Entwicklungsprozess, wie zum Beispiel die Elektronikentwicklung und die mechanische Konstruktion, weitestgehend unabhängig voneinander und die Ergebnisse wurden anschließend zusammengeführt. Mit immer schnelleren Signalanstiegszeiten und bei zunehmendem Volumen an zu verarbeitenden Informationen sind die physikalischen Anforder-

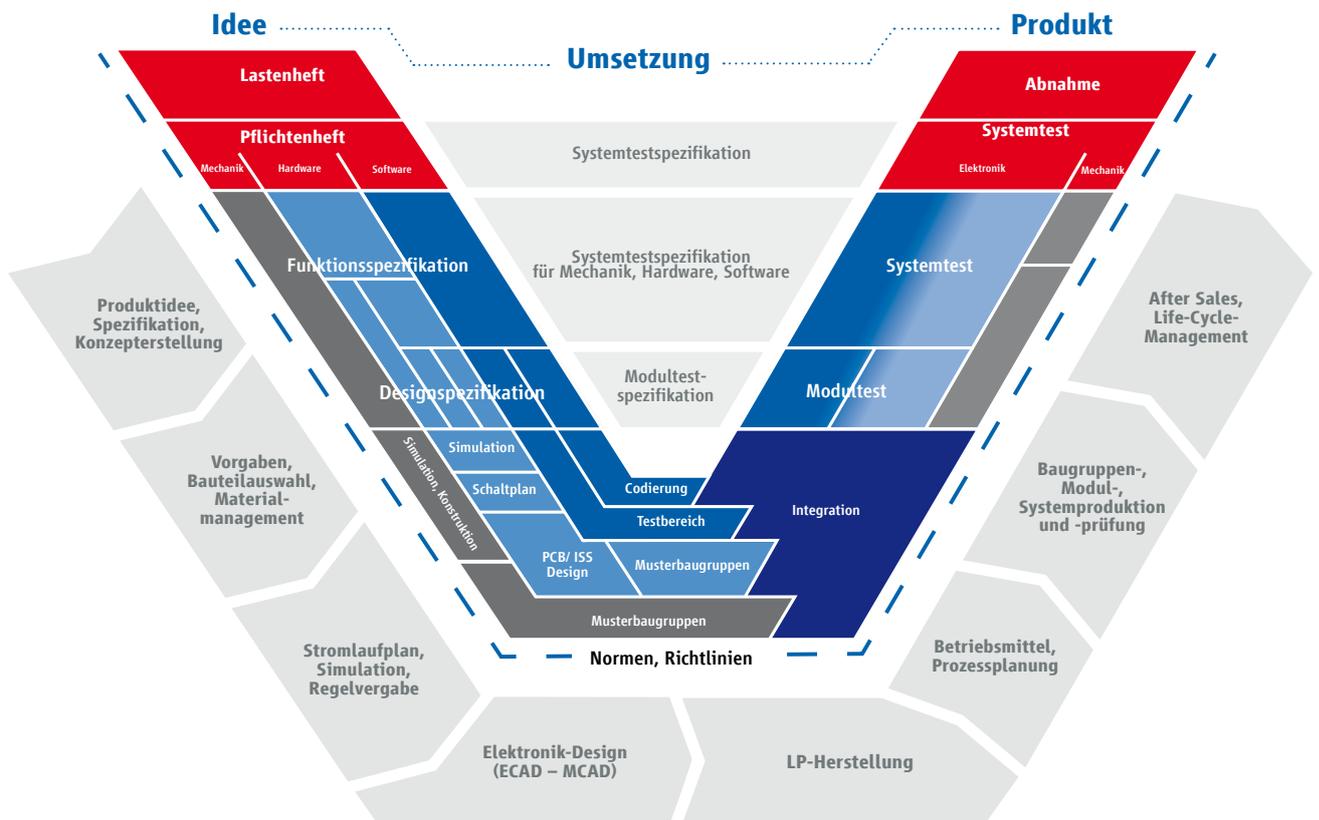
ungen an Leiterplatten/Baugruppen gestiegen. Signalintegrität, Powersysteme und Entwurfskonzepte gewinnen als strategische Qualitäten an Bedeutung. Leiterplatten werden mehr und mehr ein wichtiger funktionaler Teil eines elektronischen Geräts. Die Vorgehensweise, einzelne Abschnitte für die Entwicklung einer neuen elektronischen Produktgeneration voneinander isoliert zu optimieren, scheidet zunehmend. Zu viele Einflüsse wirken auf das Produkt. Materialkenntnis, Fertigungsabläufe, Anlagentechnologie, Anwendungsspezifikationen, Reproduzierbarkeit, Dokumentation und künftig wichtigere Aspekte wie die Umweltverträglichkeit und die spätere Entsorgung verlangen eine ganzheitliche Betrachtung.

Die Konstrukteure, Designer und Produzenten für die Erstellung des Schaltplans, des CAD-Layouts (Computer Aided Design), der Leiterplatte und der Baugruppe werden infolge dieser Entwicklung vor die Summe aller möglichen Probleme gestellt, für die es eine wirtschaftliche, effektive, zuverlässige und technisch innovative Lösung zu finden gilt.

Das umfassende Wissen über die elementaren Regeln zur Produktion und Funktion einer Leiterplatte wird damit eine unverzichtbare Voraussetzung für die Konstruktion einer zuverlässigen Baugruppe.

Da der Bereich des Designers weder durch ein Studium noch durch eine Berufsausbildung erlernt werden kann, ist es umso wichtiger, dass die Entwickler auf fundierte Informationen zugreifen können. Denn nur so kann unter Berücksichtigung der Aspekte Preise, Logistik, Verfügbarkeit, Initialkosten, Prozesssicherheit, Reparatur und Update-Service ein hoher Innovationsgrad erreicht werden. Die notwendigen Informationen können über firmeneigene Portale, EMS-Dienstleister (Electronic Manufacturing Services) und/oder Portale der Industrieverbände abgerufen werden. Die Informationssammlungen unterstützen also den einzelnen Entwickler, sodass eine technische und wirtschaftliche Realisierbarkeit aller Prozesse bezogen auf das Qualitätsziel und den Preis vereinfacht wird. Gleichzeitig werden alle Risiken frühzeitig aufgedeckt und unnötige Redesignaufwände verhindert, was wiederum die Time-to-Market-Philosophie positiv beeinflusst.

Abb. 10.8: V-Modell der Produktentwicklung



Quelle: ZVEI

Jedes Glied dieser Kette beeinflusst also die Entstehungskosten und Marktfähigkeit eines Produkts. Das beginnt bei der Produktidee und reicht über die erfolgreiche Markteinführung hinaus bis zum After-Sales-Service.

Frühzeitige Absprachen und Kommunikation entlang der „Design Chain“ verkürzen die Dauer der Entwicklungsphasen und erhöhen die Qualität.

10.2.2 Prozesse und Technologien

10.2.2.1 Leiterplatten-Kennzeichnung

Die Kennzeichnung von Leiterplatten im Fertigungsprozess ist eine zwingende Voraussetzung zur Identifizierung während der Produktion, bei Überprüfungen im Feld und bei Rework/Repair. Als maschinenlesbare Kennzeichnung ist der Data-Matrix-Code heutzutage Standard. Die Kennzeichnungsverfahren reichen vom Aufbringen eines gedruckten Etiketts oder eines gelaserten Etiketts bis hin zur direkten Laserkennzeichnung auf der Baugruppe. Der Nachteil dieser Kennzeichnung ist, dass immer ein System im Hintergrund benötigt wird, um die ausgelesenen Informationen interpretieren zu können.

Abb. 10.9a/b: Data-Matrix-Kennzeichnung



Quelle: Zollner Elektronik

Als Grundlage für Industrie 4.0 brauchen die Produkte zusätzlich eine gewisse Intelligenz. Dies ist durch die Verwendung eines passiven RFID-Chips (Radio Frequency Identification), der in der Leiterplatte integriert oder als Bauteil bestückt wird, möglich. Durch Auslesen und Beschreiben des User-Memorys können dem Produkt Informationen vom Leiterplattenhersteller über die Fertigungsprozesse bis hin zu einem Datensatz für den Kunden mitgegeben werden. Durch Nachrüstung der Fertigungsanlagen mit Antennen ist eine parallele Erfassung von mehreren Transpondern gleichzeitig möglich. Derzeit hat die Speicherkapazität noch einen enormen Einfluss auf den Preis. Für logistische Zwecke ist eine Kennzeichnung mit einem RFID-Etikett oft ausreichend.

Abb. 10.10a/b: Beispiele RFID-Chips und RFID-Etikett



Quelle: Murata

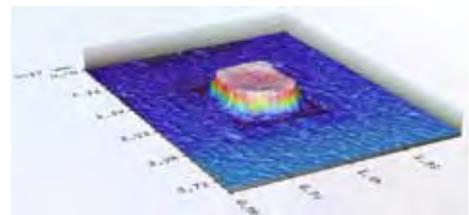
10.2.2.2 Lotpastendruck

Durch die immer feiner werdenden Strukturen und die steigende Anzahl von verdeckten Lötstellen (BGA = Ball Grid Array, QFN = Quad Flat No Leads Package) ist eine permanente Kontrolle des Lotpastenvolumens (3D-Kontrolle) unumgänglich. Dies wird mittels einer separaten SPI (Solder Paste Inspection) oder einer in den Drucker integrierten SPI durchgeführt.

Um sofort auf Veränderungen im Druckbild reagieren zu können und den Druckprozess laufend zu korrigieren, hat sich die sogenannte Closed-Loop-Funktion zwischen Drucker und SPI etabliert. Hier erfolgt eine direkte Kommunikati-

on auf Maschinenebene zur Offsetkorrektur bzw. das Anstoßen von Reinigungszyklen im Drucker.

Abb. 10.11a/b: Closed-Loop-Regelung



Quelle: Zollner Elektronik AG

Für die Verarbeitung von überlangen Leiterplatten (bis zu 1,5 m Länge), wie sie in der Lichttechnik verwendet werden, wurden in letzter Zeit verschiedene Anlagenkonzepte entwickelt, um diese Übergrößen im Druckprozess verarbeiten zu können. Dies geht von Dispenslösungen bis hin zu aufwendigen Multistep-Druckern.

Abb. 10.12: Multistep-Druck



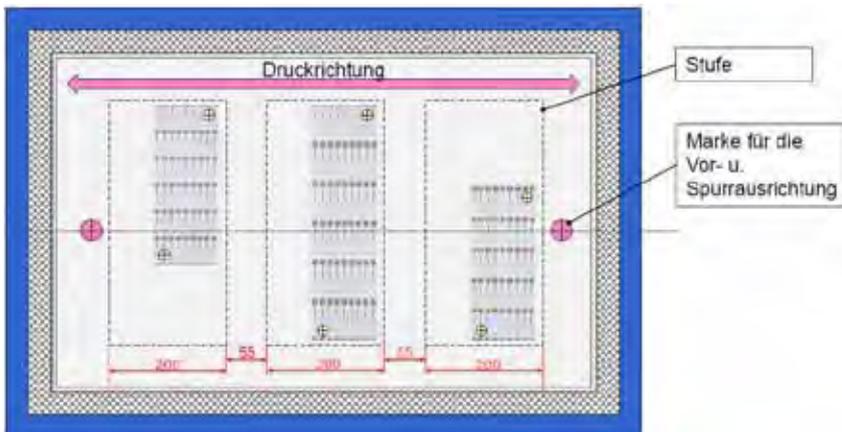
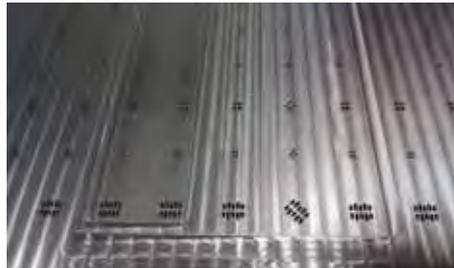
Quelle: Zollner Elektronik

Bei Produktionen mit geringerem Volumen und im NPI-Prozess (New Product Introduction) werden oft Jet-Printer zum Aufbringen der Lotpaste verwendet. Dies ist bis zu einer Bauteilgröße von 0201 bereits möglich, allerdings ist die Auswahl an jetbaren Pasten eingeschränkt und die Prozesszeit deutlich länger als beim Schablonendruck. Vorteil ist die schnelle Programmierung der Anlagen und die hohe Flexibilität.

Neben der Anlagentechnik wird auch die Schablonengestaltung für den Prozess immer wichti-

ger. Speziell bei Sonderformen von BTCs (Bottom Termination Components), für die es keine generellen Schablonendesignregeln gibt, ist das Prozesswissen des einzelnen Mitarbeiters entscheidend. Die Schablonenlieferanten bieten heute vielfältige Möglichkeiten, bis hin zu geschlitzten Rakeln für mehrstufige Schablonen mit Pasten-depot.

Abb. 10.13a/b: SMT-Schablonen



Quelle: Zollner Elektronik

Der Einsatzort der sogenannten Siebdrucktechnik ist hauptsächlich in der Solartechnik sowie in der Herstellung von DCB-Leistungsmodulen (Direct-Copper-Bonding).

10.2.2.3 Löt- und Verbindungsverfahren, Sonderanwendungen

Die klassischen Verfahren wie Reflowlötung, Wellenlötung und Selektivlötung haben sich in der letzten Zeit grundsätzlich nicht maßgeblich verändert. Es wurden lediglich Optimierungen hinsichtlich Voidreduzierung (Unterdruck- oder Überdrucklötung), Erhöhung der thermischen Leistungsfähigkeit für die Prozessierung von Leistungselektroniken sowie der Verbesserung in der thermischen Isolation und im Residue-Management durchgeführt.

Der Anteil bleihaltiger Lötprozesse ist aufgrund der RoHS-Beschränkungen weiter rückläufig, für bestimmte Branchen jedoch immer noch das einzig freigegebene Verfahren.

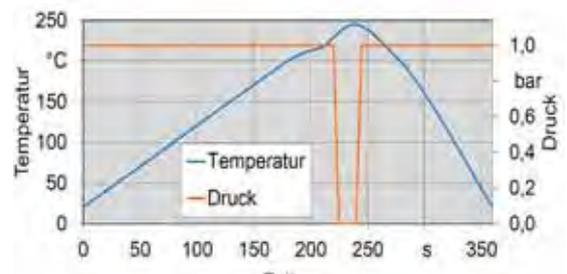
Im Nachfolgenden werden die unterschiedlichen Anlagentechniken ohne Berücksichtigung des Lots vorgestellt.

a. Reflowlötung

Es werden grundsätzlich zwei Verfahren unterschieden:

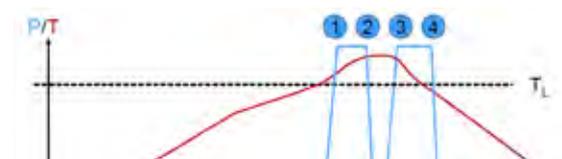
Konvektion: Das Konvektionslötung ist die am meisten verbreitete Variante. Der Wärmeeintrag geschieht über Flüssigkeiten oder Gase. Konvektionslötanlagen werden mit Luft oder Stickstoff betrieben. Die einzelnen Konfigurationen unterscheiden sich in der Anzahl der Vorheizungen, Peakzonen und Abkühlzonen. Eine Vakuumkammer oder Überdruckkammer zur Reduzierung von Poren in den Lötstellen kann als Option enthalten sein.

Abb. 10.14: Temperatur/Druckverlauf beim Vakuumlöten



Quelle: Seho Systems

Abb. 10.15: Temperatur/Druckverlauf beim Überdrucklötung



- 1 Das bereits flüssige Lot wird erstmals mit Druck beaufschlagt
- 2 Druck wird abgelassen
- 3 Das immer noch flüssige Lot wird ein zweites Mal mit Druck beaufschlagt
- 4 Druck wird abgelassen, wenn das Lot erstarrt ist

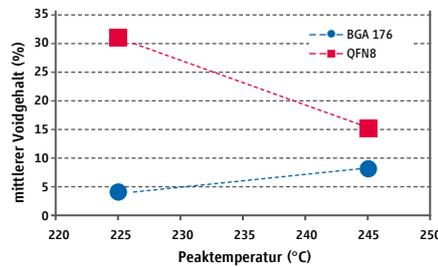
Quelle: Seho Systems

Kondensation (Dampfphase): Beim Kondensationslötung (Dampfphasenlötung, Vapour Phase Lötung) wird die Kondensation eines dampfförmigen Mediums (Galden) zur Energieübertragung genutzt. Hierfür wird eine hermetisch dichte Prozesskammer benötigt, daher ist nur ein „Batch“-Betrieb mit höheren Zykluszeiten als beim Reflowlötung möglich. Der Vorteil des Kondensationslötens liegt in der Begrenzung der Höchsttemperatur, da diese durch den Siedepunkt des Mediums definiert ist. Eine Kombination mit einem Vakuumprozess zur Reduzierung von Voids (Luft einschließen in Lötstellen) ist hier ebenfalls möglich.

Ein weiterer Vorteil ist der wesentlich höhere Wärmeübergangskoeffizient gegenüber dem Reflowlöten, sodass massereiche Bauteile hier leichter prozessiert werden können. Eine produktspezifische Profilierung der Baugruppe ist aber ebenfalls notwendig, damit keine Bauteile durch zu hohe Aufheiz- und Abkühlgradienten geschädigt werden.

Die Herausforderungen bei beiden Verfahren (Konvektion und Kondensation) liegen in der Prozessführung, da einzelne Anlagenparameter bei verschiedenen Bauteilen teilweise gegensätzliche Auswirkungen haben. Eine Erhöhung der Peaktemperatur reduziert bei QFNs den Voidgehalt, während sie bei BGAs die Voidrate erhöht.

Abb. 10.16: Voidverhalten BGA/QFN



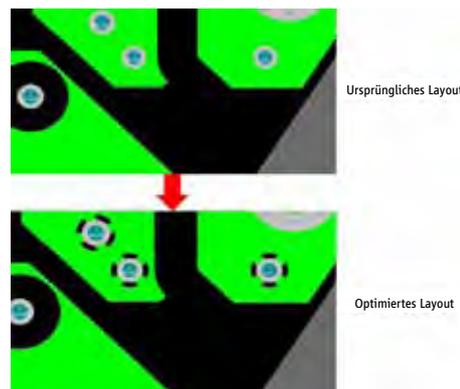
Quelle: Technische Universität Dresden

b. Wellenlötung

Bei den sogenannten Flow-Verfahren unterscheidet man ebenfalls mehrere Varianten.

Bei allen Varianten ist zu beachten, dass für die Lötung von Leistungsbaugruppen die üblichen Designregeln für die Gestaltung von Durchkontaktierungen und Wärmefallen nicht immer gelten, sondern Anpassungen im Layout erfolgen müssen, um eine normgerechte Lötstelle erzeugen zu können.

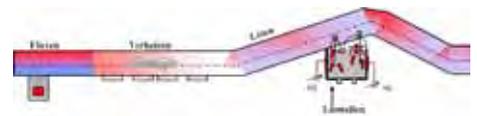
Abb. 10.17: Layoutoptimierung Leistungselektronik



Quelle: Zollner Elektronik

Selektivwellenlöten: Beim Wellenlöten werden innerhalb der Anlage verschiedene Prozessschritte vollzogen. Zu Beginn sorgt ein Fluxersystem auf der Unterseite der Leiterplatte für einen gleichmäßigen Flussmittelauftrag. Im Anschluss fährt die Leiterplatte durch einen Vorheizbereich (Infrarot-, Quarz- oder Konvektionsheizungen), wo die gleichmäßige Erwärmung der gesamten Leiterplatte erfolgt. Je nach Anwendungsfall und Leiterplattenlayout können zusätzlich zu der Unterseitenheizung auch auf der Oberseite Heizungen eingesetzt werden. Im Lötbereich befindet sich dann der Löttiegel, der bis zu zwei stationäre Wellen aus flüssigem Lot erzeugt. Die Leiterplatte fährt durch den oberen Kamm der Wellen, sodass die Lötbereiche in Kontakt mit dem Lot kommen. Durch unterschiedliche Löt Düsen können verschiedene Wellenformen erzeugt werden. Die Abdeckung von Bereichen, die nicht mit Lot in Berührung kommen sollen, erfolgt durch produktspezifisch angepasste Maskenrahmen.

Abb. 10.18: Prinzip Doppelwellenlötanlage



Quelle: Zollner Elektronik

Abb. 10.19a/b: Maskenrahmen mit Niederhaltersystem



Quelle: Zollner Elektronik

Selektivlöten: Beim Selektivlöten gibt es unterschiedliche Möglichkeiten der Anlagengestaltung. Bei einem Low-Volume-/High-Mix-Produktspektrum verwendet man häufig Anlagen mit einer sogenannten Punktwellle. Diese Anlagen sind sehr variabel, da die Lötstellen mit einer Lötdüse einzeln angefahren werden. Bei vielen Lötstellen auf der Baugruppe steigt aber die Bearbeitungszeit deutlich an.

Abb. 10.20: Selektivlöten



Quelle: Zollner Elektronik

Bei hochvolumigen Produkten wählt man im Gegensatz dazu sogenannte Lotkamäne. Hier hat man auf das Produkt abgestimmte Düsenplatten, mit denen man in einem Arbeitsgang alle Lötstellen auf einmal erstellt (Hubtauchlöten). Dies bietet einen enormen Zeitvorteil. Bei einem Produktwechsel ist hier jedoch eine hohe Umrüstzeit der Anlage einzurechnen.

Abb. 10.21: Selektivlöten



Quelle: Zollner Elektronik

c. Sonderprozesse Löten

Roboterlöten: Roboterlöten ist ein universell einsetzbares, mehrdimensionales Lötverfahren, das jedoch mit relativ hohen Investitionskosten verbunden ist.

Heißgaslöten: Heißgaslöten ist ein Sonderlötverfahren, das in der Regel für spezielle produktspezifische Anwendungen eingesetzt wird. Das Verfahren wird für die Reparatur von Leiterplatten oder den Reballing-Prozess von BGAs eingesetzt. Doch auch die Mikromontage von miniaturisierten Komponenten ist aufgrund des hochpräzisen Platzierungssystems möglich.

Laserlöten: Ein an einem Achssystem montierter Laserkopf mit Lotdrahtzuführung verlötet jede Lötstelle separat. Die Prozessparameter können für jede Lötstelle individuell optimiert werden.

Induktionslöten: Induktionslöten ist ein berührungsloses Lötverfahren, das hauptsächlich im Inline-Prozess bei hohen Stückzahlen eingesetzt wird.

THT-Reflowlötlung: THT-Bauelemente werden im Reflowlötprozess mitverlötet. Dadurch kann ein zusätzlicher Selektiv- oder Wellenlötprozess entfallen. Es ist darauf zu achten, dass diese Bauteile für die Temperaturen im Reflowbereich geeignet sind und entsprechende Designrules für die Durchkontaktierung beachtet werden. Durch neue technische Möglichkeiten in der Schablonentechnik (z. B. Stufenschablonen) findet diese Methode immer mehr Anwendung.

Abb. 10.22a/b: Beispiele für Heißgaslöten (oben) und THT Reflowlöten (unten)



Quelle: Zollner Elektronik

d. Lotmaterialien

Aus Gesprächen mit Herstellern bzw. Distributoren für Lotpasten hat sich folgendes Bild ergeben:

Für Lotmaterialien zeichnet sich derzeit im Industrie- und im Automotive-Bereich aus Kostengründen ein Trend zur Reduktion von Silber ab. Dabei sind allerdings engere Prozessfenster zu erwarten, die im Reflowbereich kritisch werden können. Vor allem das untere Prozessfenster wird dabei aufgrund des höheren Schmelzpunkts dieser Legierungen nach oben gezogen.

Aufgrund der geringeren Pitch-Abstände und der Druckbarkeit der Lotpasten ergeben sich kleinere Korngrößen. Aufgrund der Forderungen nach höherer elektrischer Sicherheit und der Normänderung in Richtung kleiner elektrischer Isolationsabstände gibt es eine Entwicklung hin zu komplett halogenfreien Flussmitteln. Dabei sind kleinere und engere Prozessfenster aufgrund der geringeren Aktivierung und der größeren Oberfläche und dem damit einhergehenden höheren Oxidanteil zu erwarten. Aufgrund dessen ist der Einsatz von Stickstoff als Standardatmosphäre im Reflowofen wahrscheinlich.

Derzeit ist SAC305 als Standardlegierung weit verbreitet, in einigen Bereichen werden auch noch SnPb-Legierungen verwendet. In Zukunft ist mit einer höheren Diversifikation bei den Legierungen zu rechnen, die speziellen Anforderungen, wie etwa nach höherer Zuverlässigkeit, gerecht wird – beispielsweise InSn oder Zinn-/Antimon-Legierungen bei Baugruppen mit höherer Dauerbetriebstemperatur. Im Bereich der LED-Baugruppen, aber auch im Consumer-Bereich, gibt es einen Trend hin zu Legierungen auf Basis von Zinn und Bismut. Aufgrund der niedrigeren Prozesstemperaturen und der damit verbundenen niedrigeren Prozesskosten ist mit einem Anstieg der Verbreitung in den nächsten Jahren zu rechnen.

e. Bonden

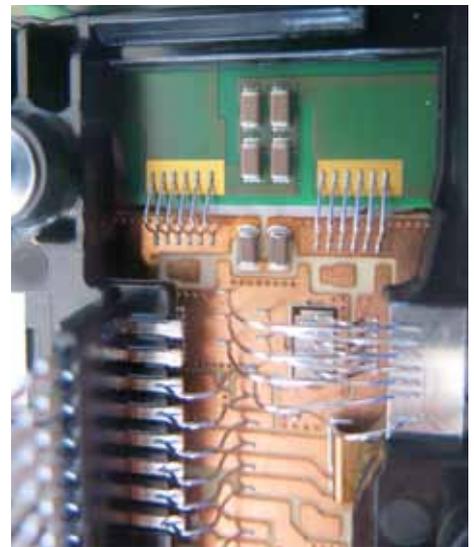
Beim Bonden unterscheidet man zwischen Dickdrahtbonden und Dünndrahtbonden.

Die Dickdrahtbondtechnik wird hauptsächlich in der Leistungselektronik eingesetzt. Sie dient dazu, Halbleiterchips wie zum Beispiel Power-MOSFET-Transistoren mit Keramiksubstraten zu verbinden, kann aber auch dazu verwendet werden, verschiedene Module zu verbinden. Beispiel hierfür sind Verbindungen zwischen Leiterplatten und Keramiksubstraten oder auch zwischen Leiterplatten und Stanzgittern. Zum Einsatz kommen hierfür Aluminiumdrähte mit einem Durchmesser von

100–600 µm. Das Dickdrahtbonden bedarf nicht immer eines Reinraums und kann in einer Sauberrzone (SAS1) oder einem Sauberraum (SAS2) durchgeführt werden.

Die Dünndrahtbondtechnik wird vorwiegend zur Verbindung eines Bauteils mit einem Schaltungsträger angewendet. Hier sind oft noch zusätzliche Prozesse wie Leitkleben, Globtop oder Silikonverguss notwendig. Der Bondprozess muss hier zwingend in einem Reinraum (SAS3) durchgeführt werden. In letzter Zeit werden vermehrt aus Kostengründen die Golddrähte durch Kupferdrähte ersetzt.

Abb. 10.23: Dickdrahtbonden



Quelle: Zollner Elektronik

Abb. 10.24: Dünndrahtbonden

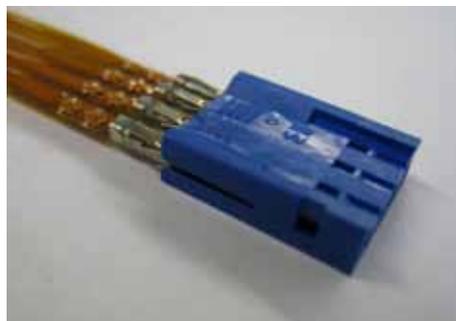


Quelle: Zollner Elektronik

f. Crimpen

Um eine notwendige Verbindung zwischen flexibler Leiterplatte und anderen feststehenden Komponenten zu schaffen, werden in der Regel Steckkontakte verwendet. Diese Steckkontakte werden durch Crimpen auf flexible Leiterplatten aufgebracht, dadurch entsteht eine gasdichte Verbindung. Um gecrimpten Kontaktstiften mechanisch Halt zu geben und das Handling zu verbessern, wird ein Gehäuse über die Stecker geschoben, das an den Federzungen der Crimpkontakte einrastet.

Abb. 10.25a–c: Crimptechnik

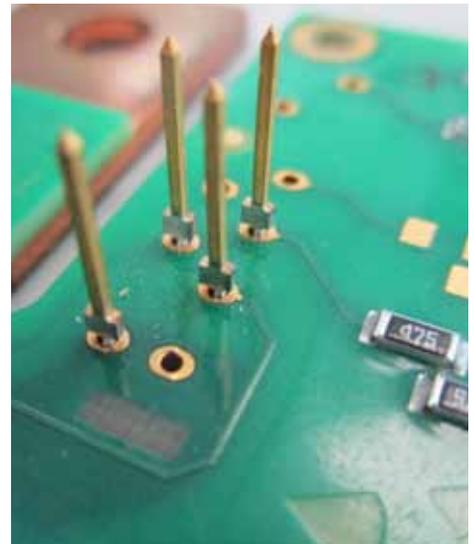
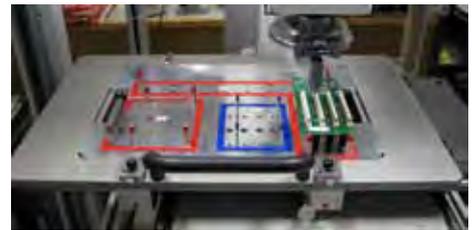


Quelle: Zollner Elektronik

g. Einpresstechnik

Bauteile mit starrer oder elastischer Einpresszone (überwiegend Stecker) werden in Durchkontaktierungen der Leiterplatte unter Berücksichtigung von Kraft und Weg eingepresst. Es entsteht eine gasdichte Verbindung zwischen Bauteilanschluss und Leiterplatte, was eine dauerhafte elektrische und mechanische Verbindung schafft. Eine thermische Beanspruchung während des Prozesses entfällt.

Abb. 10.26a/b: Einpresstechnik

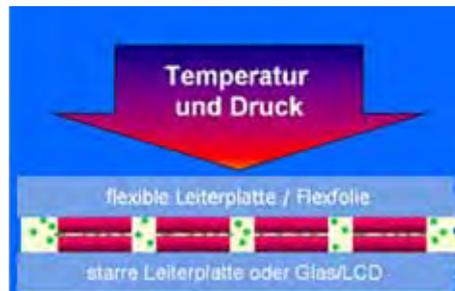


Quelle: Zollner Elektronik

h. Heißsiegelprägeverfahren

Heißsiegelverbindungen werden mit anisotrop leitfähigen Klebstoffen hergestellt. Dabei werden beispielsweise flexible Folien mit Leiterplatten oder Glas-Anschlussflächen kontaktiert. Der Klebstoff ist mit leitfähigen Partikeln gefüllt und stellt nach dem Siegelprozess eine elektrische Verbindung in nur einer Richtung her. Es lassen sich dabei verschiedene Materialien elektrisch verbinden, unter Einwirkung einer relativ geringen Prozesstemperatur (ca. 150 °C).

Abb. 10.27a/b: Illustration Heißsiegelprägeverfahren



Quelle: Zollner Elektronik

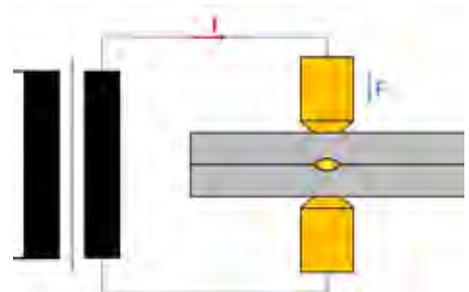
i. Laserwiderstands- und Ultraschallschweißen

Die Verfahren zeichnen sich durch folgende Besonderheiten aus:

Laserschweißen: Ein kontaktloses Schweißverfahren, wobei mit dem Laserstrahl schwer zugängliche Stellen erreicht werden können. Eine exakte und punktuelle Energieübertragung sind die Hauptvorteile des Verfahrens. Kunststoffteile werden ohne erkennbare Schweißnaht verbunden.

Widerstandsschweißen: Der Einsatz erfolgt speziell bei hohen Belastungen der Verbindungsstellen (mechanisch und Temperatur), das Verfahren ist jedoch nur für spezielle Anwendungen geeignet.

Abb. 10.28: Illustration Widerstandsschweißen



Quelle: Zollner Elektronik

Ultraschallschweißen: Hier können ebenfalls hochbelastbare und dichte Kunststoffverbindungen erzeugt werden mit den Vorteilen einer geringen Taktzeit. Konstruktive Einschränkungen in der Kombination mit Elektronik sind jedoch die Regel.

Abb. 10.29a/b: Illustration Ultraschallschweißen

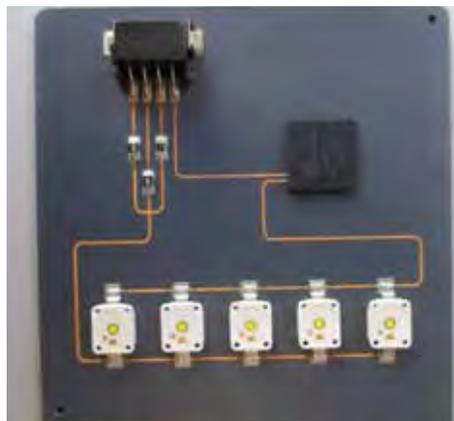


Quelle: Zollner Elektronik

j. 3D-MID-Technik

Die MID-Technik hat sich aufgrund der hohen Kosten und Investitionen in Maschinen bisher nicht im Massenmarkt durchgesetzt. Die hohe Flexibilität im Design macht sie für bestimmte Anwendungen jedoch immer noch attraktiv.

Abb. 10.30a/b: Beispiele für MID-Anwendungen



Quelle: Zollner Elektronik

k. Digitale Direktmetallisierung (DDM)

Eine weitere Anwendung entwächst gerade den Kinderschuhen, die sogenannte digitale Direktmetallisierung. Anders als bei der MID-Technik ist das Trägermaterial beliebig. Auf das Grundmaterial wird eine Lackschicht aufgebracht, die dann mittels Laser teilweise abgetragen wird. Anschließend wird in einem Plasmaprozess das Kupfer appliziert. Dieses Kupfer muss nicht aufwendig geschützt werden und ist auch nach längerer Zeit noch lötlbar.

l. Leitkleben

Neben dem Einsatz beim Die-Bonden wird das Leitkleben immer öfter bei der Verbindung von temperaturempfindlichen Komponenten oder der Verarbeitung von thermisch sensitiven Grundmaterialien (3D-MID-Technik) eingesetzt. Auch bei Anwendungen in der Leistungselektronik, bei denen eine lunkerfreie Verbindung benötigt wird oder kein Selbstzentrierungseffekt des Bauteils beim Löten gewünscht wird, findet diese Verbindungsart immer mehr Einsatzgebiete. Aufgrund der höheren Kosten bleibt das Leitkleben noch eine Nischenanwendung, da gegenüber dem Löten diese Verbindung auch eine geringere Scherfestigkeit aufweist.

Derzeit werden neuere Leitkleber entwickelt, die bei einem reduzierten Ag-Anteil (ca. 40 %) die gleichen mechanischen und thermischen Eigenschaften aufweisen.

m. Sintern

Beim Sintern werden zwei Verfahren unterschieden: druckloses Sintern und Sintern unter Druck. Bei beiden Verfahren ist der rückstands-freie Prozess ein Vorteil gegenüber dem klassischen Reflowlöten mit Lotpaste. Das Sintern unter Druck ist das etabliertere Verfahren, das hauptsächlich in der Verbindung von Halbleitern mit DCBs eingesetzt wird und bei High-Power-Anwendungen der Standard ist.

Das Sintern unter Druck ist für alle Größen geeignet und zeichnet sich durch eine hohe Wärmeleitfähigkeit aus. Beim drucklosen Sintern ist die Größe aktuell noch beschränkt. Ein Hauptvorteil ist aber eine um etwa 30 Kelvin niedrigere Prozess-temperatur, Nachteil die deutlich längere Prozesszeit. Für den Einsatz in HF- und LED-Anwendungen ist das drucklose Sintern jedoch eine kostengünstige Alternative.

Aktuelle Materialentwicklungen versuchen, den Silberanteil in den Sinterpasten durch Füllmaterialien zu reduzieren, um hier zu einer Preisreduzierung zu kommen.

10.2.2.4 Bestückungstechnologien

a. SMD-Bestückung

SMD-Bauteile werden seit nunmehr über 30 Jahren von sogenannten Bestückmaschinen aus standardisierten Gurtrollen, Trays oder Stangenmagazinen, die in geeigneten Fördervorrichtungen der Bestückmaschine zugeführt werden, entnommen und auf mit geeigneten Verbindungsmaterialien, Lot oder Kleber, vorbereiteten Substraten oder Leiterplatten, hochgenau abgesetzt. Vor Beginn der Bestückung einer Leiterplatte werden, sofern vorhanden, Passmarken auf der Leiterplatte mit einer verfahrbaren Kamera vermessen, um die Position und eine eventuelle Verdrehung der Leiterplatte festzustellen. Die aktuelle Position der Leiterplatte wird dann in die Bestückpositionen der einzelnen Bauteile miteingerechnet, sodass diese exakt auf ihrer Zielposition bestückt werden können. Dabei werden die Bauteile durch Vakuumpipetten oder Greifer verschiedener Formen und Größen aus der Verpackung entnommen, durch eine Kamera vermessen und auf Beschädigung und ihre Lage an der Pipette oder dem Greifer bestimmt. Auch ein auf diese Weise ermittelter Versatz zwischen Pipettenmitte und Bauteilmitte wird individuell beim Anfahren der Zielposition eines jeden Bauteils mitberücksichtigt.

Bisher war es – und ist es natürlich auch in Zukunft – die Aufgabe einer Bestückmaschine, elektronische Bauteile so auf der Leiterplatte zu positionieren, dass die Anschlussflächen der Bauteile und der Leiterplatte sich möglichst exakt überdecken, um eine gut leitende und mechanisch tragfähige Verbindung beim Löten zu erzeugen. Da die Anwendungen für Elektronik aber immer komplexer werden und gleichzeitig der Zusammenbau kostengünstiger werden soll, zeichnet sich seit einigen Jahren ein neuer Trend ab. Eine Bestückmaschine muss nicht nur in der Lage sein, das richtige Bauteil an die richtige Position zu bringen, sondern auch nach anderen Kriterien ein Bauteil auszurichten oder mit anderen Bauteilen zu kombinieren.

Ein gutes Beispiel ist hier der vielfältige Einsatz von LED-Bauteilen (Light Emitting Diode), bei denen es oft nicht genügt, die LED ausgerichtet nach den Lötflächen zu bestücken, sondern vorrangig nach der Licht emittierenden Fläche, die auf mechanische Merkmale (Öffnungen im Substrat, wie z. B. Langlöcher, Kerben oder auch Bohrungen) referenziert wird. Diese Öffnungen fixieren bei der späteren Montage die Optik, mit der das Licht gebündelt wird. Erst nachrangig muss dann bei der Bestückung auch noch überprüft werden, ob die Lötanschlüsse noch genügend Überlappung haben für eine sichere elektrische und mechanisch stabile Verbindung.

Bei LED-Bauteilen gibt es weitere Anforderungen für die Bestückung, zum Beispiel werden LEDs in Kombination mit Widerständen bestückt, die individuell zur Charakteristik der jeweiligen LED ausgewählt und bestückt werden müssen.

Bei der Herstellung von Sensoren werden immer öfter Anforderungen gestellt, dass die LED als Sender dient und ein passender Empfänger, erst ausgerichtet auf das zuvor gesetzte LED-Bauteil, bestückt werden kann. Ähnlich geht man auch beim Bestücken von Linsen vor, die über eine vorher bestückte LED bestückt werden.

Immer mehr kommt auch die „Reel to Reel“-Verarbeitung von flexiblen Endlossubstraten gerade bei Bestückung von LEDs zum Einsatz.

Fasst man all diese Beispiele zusammen, ergibt sich, dass sich die Bestücktechnik und damit die Bestückmaschine weiterentwickelt: von der ausschließlichen Montage elektronischer Bauelemente hin zu immer flexibleren Maschinen, die ganze funktionale Einheiten oder Module montieren können. Damit einher geht auch, dass weitere Prozesse, wie bei-

spielsweise das Aushärten von Klebern oder Prüfschritte, in die Bestückmaschine integriert werden müssen.

Mit sich verändernden Materialien, also zum Beispiel Silizium oder Keramik als Substrate, die nur noch geringe Dicken – zum Beispiel 100 µm oder weniger – aufweisen, müssen die Transportsysteme erweitert und verbessert werden, um sowohl empfindliche als auch flexible Substrate exakt transportieren zu können.

Immer mehr Branchen fordern inzwischen, alle (100 %) Bauteile einer Baugruppe automatisch möglichst auf einer Montagelinie zu montieren. Manuelle Montagen werden aufgrund der „menschlichen Fehler“ nicht mehr zugelassen und jeder Montageschritt muss nachverfolgbar sein. So wird die Bestückmaschine zu einem zentralen Punkt der Montagelinie, weil dort die größte Menge und Vielfalt an Bauelementen verarbeitet wird. Die Bestückmaschine sammelt mittlerweile unzählige Daten und stellt diese über zentrale Datenverwaltungssysteme zur Verfügung. Diese Daten dienen zum einen für die Bauteileversorgung, zum anderen auch zur Nachverfolgung, wo diese bestückt wurden. Während des Bestückprozesses erzeugt die Maschine wertvolle Daten, um die Qualität der Bauteile zu dokumentieren (optische Vermessung von Bauteilen) und stellt über optische und weitere Sensoren sicher, dass die Bauteile dort abgesetzt wurden, wo sie laut Programm vorgesehen sind.

b. THT-Bestückung

Obwohl diese Bestückungsart die älteste ist, hat sie auch heute noch ihre Bedeutung und erlebt durch die Leistungselektronik wieder ein Revival.

Allerdings hat sich die Ausprägung etwas verändert, heute ist eher die Bestückung von Sonderkomponenten wie Trafos, Übertragern oder großen Steckern die Herausforderung. Somit sind oft produktspezifische Greifer in den Bestückern notwendig, die erst konstruiert werden müssen, oder der Einsatz eines kompletten Sonderbestückers wird notwendig, um zum Beispiel die notwendige Bestückkraft zu erreichen. Neben den automatisierten Systemen kommt bei Branchen mit geringerer Stückzahl (Luftfahrt und Verteidigung) auch noch die klassische manuelle Bestückung zum Einsatz.

Abb. 10.31: Bestückungsmaschine für die Backend-Automatation



Quelle: Fuji

Abb. 10.32: Baugruppe mit THT-Bestückung



Quelle: Zollner Elektronik

c. Schraubverbindungen

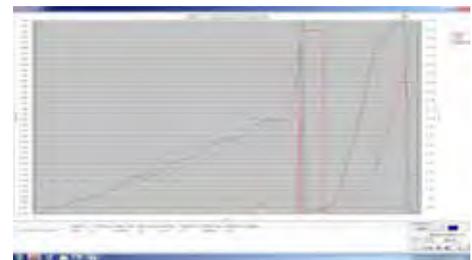
Schraubverbindungen stellen eine einfache und zuverlässige Art der Verbindung von Baugruppen mit Gehäusen oder Kühlkörpern her, die auch den Vorteil haben, im Vergleich zu geklebten Verbindungen wieder lösbar zu sein. Aufgrund der mechanischen Belastung der Baugruppen und einer damit einhergehenden möglichen Beschädigung von Komponenten oder Lötstellen in der Umgebung der Verbindungsstelle ist es bei der Montage notwendig, den Drehmomentverlauf bzw. den Drehwinkel der Schrauben zu überwachen. Für die Verschraubung werden deshalb Gradientenschrauber eingesetzt, die dies ermöglichen. Aufgrund der Toleranzen von Schrauben und Bauteilen kann es allerdings sein, dass die erwünschte Präzision bei der Verschraubung nicht erreicht wird. Um dies zu umgehen, werden Systeme verwendet, welche die Kopfauflage der Schraube erkennen können und somit sicherstellen, dass die Schraube mit einem definierten Drehmoment angezogen wird. Dabei werden konstante und wiederholbare Verschraubungen erzielt.

Abb. 10.33: „Schraubertisch“ – Prüfplatz für Schraubverbindungen



Quelle: cms electronics

Abb. 10.34: Beispielhafter Ausdruck einer mit einem Prüfplatz aufgenommenen Drehmomentkurve



Quelle: cms electronics

Aufgrund der steigenden Anforderungen an die technische Sauberkeit von Baugruppen insbesondere im Bereich von elektrisch leitfähigen Partikeln wird es immer wichtiger, den Schraubprozess so zu gestalten, dass es dabei zu keiner oder zumindest nur geringfügigen Entstehung von leitfähigen Partikeln kommt. Dies ist vor allem beim Einsatz von selbstfurchenden Schrauben unumgänglich, da die hierbei erzeugten Partikel in jedem Fall in einem Größenbereich sind, der zu Problemen führen kann. Der Einsatz von Verschraubungen bei Produkten mit hohen Anforderungen ist dabei generell kritisch zu hinterfragen. Dies hat auch Auswirkungen auf die Konstruktion der Baugruppen, die Konstruktion der Schraubensysteme und die Gestaltung des Arbeitsplatzes. Außerdem ist eine enge Zusammenarbeit zwischen Entwicklung und Produktion bereits in der Designphase notwendig, um die Kosten und den Aufwand zu reduzieren. So sind die Verwendung von nur einem Schraubentyp und möglichst wenige unterschiedliche

Anzugsmomente zu bevorzugen. Besonders bei empfindlichen Baugruppen, zum Beispiel LED-Baugruppen mit Kühlkörpern, ist die Möglichkeit der Beschädigung von LEDs immer gegeben. In diesem Bereich ist die Forderung zur Minimierung des manuellen Handlings der Baugruppen zu erwarten. Dies wird einen höheren Automatisierungsgrad zur Folge haben.

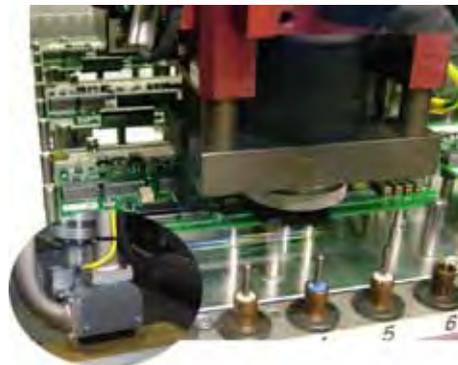
10.2.2.5 Endbehandlung a. Leiterplattentrennverfahren

Je nach verwendetem Leiterplattenmaterial (starr, flexibel, IMS = Insulated Metal Substrate) werden unterschiedliche Trennverfahren eingesetzt.

Bei flexiblen Leiterplatten hat sich für hohe Stückzahlen das Stanzen, bei niedrigen bis mittleren Stückzahlen das Trennen mittels Laser etabliert.

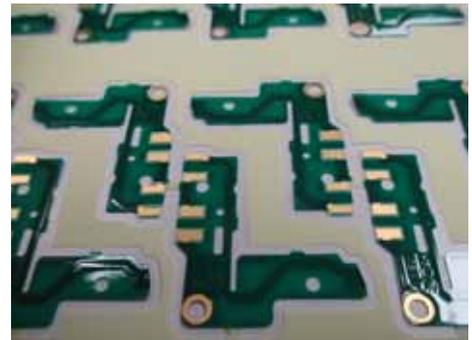
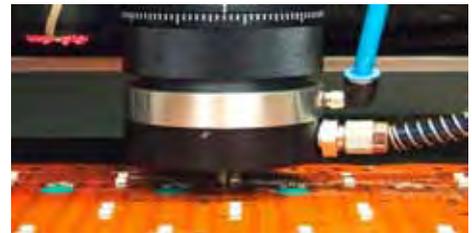
Starre Leiterplatten werden in der Regel mit Fräsen oder Sägen vereinzelt, hier ist der Einsatz des Lasers wegen der Gefahr von Karbonrückständen (CAF = Conductive Anodic Filament Gefahr) nicht so verbreitet.

Abb. 10.35: Trennverfahren für starre Leiterplatten



Quelle: Zollner Elektronik

Abb. 10.36a/b: Lasertrennung flexible Leiterplatten



Quelle: Zollner Elektronik

b. Baugruppenreinigung

Elektronische Baugruppen werden mittels lösemittelhaltigen bzw. -freien Medien von Rückständen der Vorprozesse befreit. Das verwendete Reinigungsverfahren hängt von den zu entfernenden Rückständen sowie der Materialverträglichkeit und Eignung der Komponenten ab.

Übliche Verfahren sind Sprühverfahren, Ultraschallreinigung und Druckumflutung.

Eine weitere Art der Reinigung für metallische Oberflächen, die auch selektiv für zum Beispiel Bondprozesse durchgeführt werden kann, ist die Behandlung mittels Plasma. Dies wird erreicht, indem die Leiterplatte von metallischen Oxiden wie beispielsweise Kupfer- und Zinnoxid gereinigt wird.

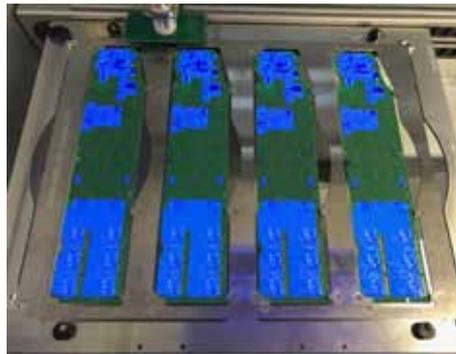
c. Schutzbeschichtungen

Der Schutz von Baugruppen vor Umwelteinflüssen kann durch verschiedene Verfahren erfolgen. Diese reichen von Conformal Coating bis hin zum Verguss oder Hot Melt und richten sich immer nach dem Einsatzgebiet der Baugruppe.

Partielle Lackiertechnik (Gießverfahren und Sprühverfahren): Im Gegensatz zum klassischen Lackieren wird beim Sprühverfahren der Lack ohne Lacknebel (Overspray) auf die elektronische Baugruppe (im Gießverfahren) aufgebracht. Die zu beschichtenden Flächen können frei und individuell programmiert werden. Notwendige Freiflächen, Kontaktierungen, Steckverbinder etc. können im Programm ausgespart werden

und müssen daher nicht maskiert werden. Die Lackierung erfolgt im Dünn- und Dickschichtverfahren. Typische Schichtdicken betragen bei diesem Verfahren 30–50 µm. Beim Sprühverfahren wird der Lackierbereich durch kontrollierte Zuführung von Luft geregelt.

Abb. 10.37: Partielle Lackiertechnik (Sprühverfahren)



Quelle: Zollner Elektronik

Beschichtung mit Nanotechnik: Die Beschichtung findet in einem Tauchprozess statt. Es wird eine Schichtdicke von etwa 1 µm erzielt. Die Trockenzeit beträgt etwa fünf Minuten bei Raumtemperatur, eine Ofentrocknung ist nicht notwendig. Aufgrund der niedrigen Viskosität dringt die Beschichtung auch in kleinste Zwischenräume ein und bietet einen wirksamen Schutz vor Betauung bei einer Umgebungstemperatur von bis zu 175 °C.

Beschichtung mit Parylene: Parylene sind eine ultradünne, porenfreie und konforme Schutzschicht, die je nach Material ausgezeichnete Eigenschaften beim Schutz von Feuchtigkeit, Chemikalien und Lösemitteln bieten. Außerdem haben Parylene hervorragende dielektrische Eigenschaften und hohe thermische Stabilität – mittlerweile gibt es auch UV-stabile Produkte. Ein Nachteil sind die hohen Kosten für die Anlagentechnik, da der Prozess unter Vakuum durchgeführt werden muss und somit nur ein Batchbetrieb möglich ist. Eine Reinigung der Baugruppe vor der Beschichtung ist unbedingt erforderlich.

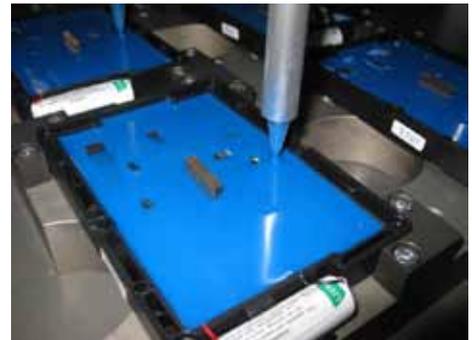
Vergusstechnik: Ein Verguss der Elektronik ist mit unterschiedlichen Materialien möglich. Typische Vergussmaterialien und Oberflächen sind:

- Silikongele für keramische Schaltungsträger und Sensoren
- Epoxidharze für Anwendungen, bei denen hohe mechanische Festigkeit gefordert ist
- Polyurethanharz als kostengünstige Alternative bei geringer thermischer und mechanischer Belastung

Alle diese Verfahren bieten neben der mechanischen Stabilisierung von Bauteilen auch oft eine Erhöhung der Isolationsfestigkeit sowie einen bedingten Feuchteschutz.

Der Verguss kann bei normaler Atmosphäre oder unter Vakuum erfolgen.

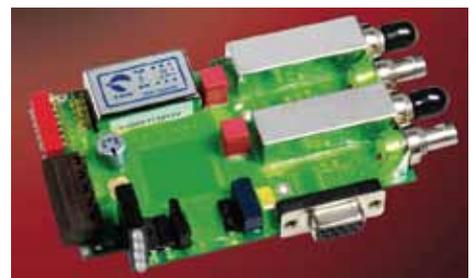
Abb. 10.38: Vergusstechnik bei Baugruppen



Quelle: Zollner Elektronik

Beschichtung mit Schmelzharz (Melting): Die thermoplastischen Schmelzharze für das Melting bestechen durch vielfältige Applikationsmöglichkeiten. Die Harze lassen sich formgebend applizieren, dispensen oder mittels Sprühtechnik aufbringen.

Abb. 10.39: Schmelzharzbeschichtung von Baugruppen



Quelle: Zollner Elektronik

Beschichtung mit Hot Melt: Das Hot-Melt-Verfahren ist eine weit verbreitete Technologie im Kabelanschlussbereich und eine kostengünstige Variante gegenüber dem Vergießen – es bietet einen Schutz der Flachbaugruppe vor Umwelteinflüssen. Die Temperaturbelastung der Elektronik ist niedrig.

Umspritzen von Elektronik: Das Verfahren erlaubt die kostengünstige Fixierung der Elektronik im Kunststoff, allerdings besteht beim Spritzvorgang eine hohe Temperaturbelastung der Elektronik. Die Technologie ist daher nur für spezielle Anwendungen geeignet.

Typische Anwendungen sind das Umspritzen von Steckern oder Kabelanschlüssen. Zum Einsatz kommen je nach Anwendung alle spritzfähigen Kunststoffe wie zum Beispiel Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS).

10.2.2.6 Baugruppensauberkeit / Technische Sauberkeit

Im Bereich der Elektronikindustrie hat der Trend zur Miniaturisierung in den letzten Jahren dazu geführt, dass sich die Potenzialabstände auf bestückten elektronischen Baugruppen deutlich verkleinert haben. Dies gilt nicht nur für Produkte der Consumer-Elektronik, sondern auch für Automotive-Anwendungen. Bezogen auf das Merkmal der Technischen Sauberkeit bedeutet dies, dass das Kontaminationsniveau metallischer Partikel stärker in den Fokus gerückt ist und noch weiter rücken wird.

Auf der Anforderungsseite spezifizieren Kunden die Technische Sauberkeit häufig indirekt über die tolerierten Ausfallzahlen. Über Lebensdauer nur zum Teil direkt, indem metallische Partikel ab einer gewissen Größe in der Spezifikation bzw. auf der Zeichnung komplett ausgeschlossen werden.

Um diese Anforderungen im Bereich der Fertigung von bestückten elektronischen Baugruppen abbilden zu können, sind zunächst folgende grundlegende Rahmenbedingungen zu berücksichtigen:

Es muss eine standardisierte und damit vergleichbare Durchführung von Sauberkeitsanalysen gewährleistet werden. Zudem muss die Darstellung deren Ergebnisse einheitlich erfolgen.

Da bei der Technischen Sauberkeit die Wahrscheinlichkeit für Ausreißer sehr hoch ist und man sich mit einer teilweise sehr großen Streuung der Anzahl an Partikeln in den einzelnen Größenklassen konfrontiert sieht, müssen die Ergebnisse von Sauberkeitsanalysen statistisch betrachtet und interpretiert werden.

Trotz der Festlegung der oben genannten grundlegenden Rahmenbedingungen gilt aus der Sicht der Elektronikfertigung, dass mit Partikelgrößen metallischer Partikel zu rechnen ist, die größer sind als der minimale Isolationsabstand auf einer bestückten elektronischen Baugruppe. Aufgrund der Fertigungsprozesse der verwendeten Bauteile und der Baugruppen selbst können diese Partikel nicht vermieden werden, sondern es können nur Anstrengungen unternommen werden, diese zu minimieren.

Um das potenzielle Risiko für einen elektrischen Kurzschluss auf einer bestückten elektronischen Baugruppe quantifizieren und bewerten zu können, ist eine produktspezifische Risikobetrachtung notwendig.

Die Partikelgrößenverteilung für das Gesamterzeugnis kann entweder über die Durchführung von Sauberkeitsanalysen auf Erzeugnisebene ermittelt oder über Sauberkeitsanalysen der Einzelkomponenten erschlossen werden.

Die Durchführung solcher Sauberkeitsanalysen wird in Zukunft vermehrt nicht nur bei der Produktionsfreigabe der Baugruppen, sondern auch im Rahmen der Requalifikation gefordert werden.

Aufgrund der Partikelverunreinigungen sollte eine signifikante Anzahl an elektrischen Kurzschlüssen zu erwarten sein. Die Felderfahrung zeigt jedoch, dass trotz Vorhandenseins dieser geometrisch potenziell kritischen Partikel das Ausfallverhalten der Baugruppe dadurch nur in vereinzelten Fällen negativ beeinflusst wird. Dies ist im Wesentlichen dadurch begründet, dass nicht jeder Partikel, der geometrisch einen elektrischen Kurzschluss verursachen könnte, dies real auch tut.

Auf Basis des Ergebnisses einer Risikoabschätzung muss dann entschieden werden, ob das potenzielle Risiko für den elektrischen Kurzschluss, verursacht durch metallische Partikel, getragen werden kann oder ob weitere Maßnahmen zur Reduktion der Partikelfracht oder zum Schutz vor Partikeln getroffen werden müssen.

Ebenfalls muss bewertet werden, inwieweit es für eine gleichbleibende Qualität bzw. eine robuste Aussagesicherheit notwendig ist, Partikelgrößenverteilungen für das Gesamterzeugnis bzw. die Einzelkomponenten zu spezifizieren. Außerdem muss eine sinnvolle Prüffrequenz sowie eine Warn- bzw. Eingriffsgrenze festgelegt werden.

Es darf dabei jedoch nicht vergessen werden, dass Sauberkeitsanalysen eine zerstörende Prüfung darstellen, was eine 100-Prozent-Kontrolle unmöglich macht. Zudem ist im Rahmen der wirtschaftlichen Gegebenheiten häufig lediglich ein Fertigungsmonitoring mit niedriger Prüffrequenz möglich.

Da die Technische Sauberkeit in der Lieferkette zunehmend an Bedeutung gewinnt, ist damit zu rechnen, dass die Anforderungen in der Zukunft tendenziell eher steigen werden, unabhängig von weiteren Verschärfungen, bedingt durch Effekte wie die weitere Miniaturisierung.

Aus diesem Grund ist es aus Sicht der Elektronikfertigung sinnvoll, ein ganzheitliches Konzept für die Betrachtung der Technischen Sauberkeit zu definieren und zu verfolgen.

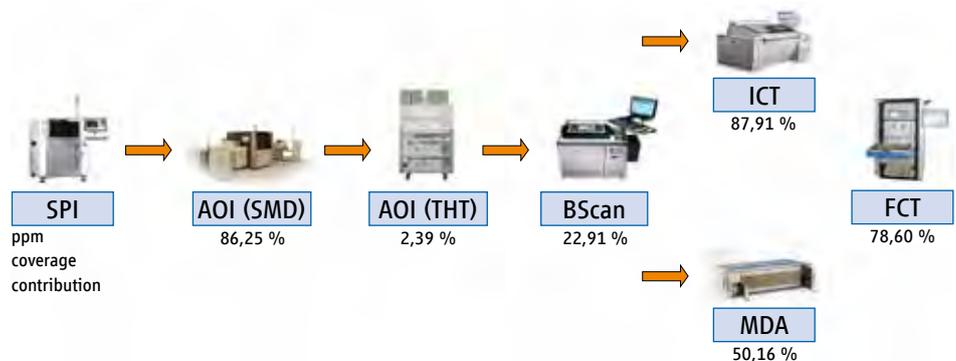
10.2.3 Testverfahren

Im Bereich der Testverfahren hat sich in den letzten Jahren einiges verändert. Bei der gesamten Prüfplanung für ein Produkt ist es mittlerweile entscheidend, eine Teststrategie zu entwickeln. Basis dafür ist eine DFT-Analyse (Design For Testability). Darunter versteht man die Kontrolle von Baugruppen hinsichtlich ihrer Testbarkeit unter Berücksichtigung der jeweiligen Prüfverfahren (elektrische, optische und röntgentechnische Tests). Bei dem elektrischen Test (ICT = In Circuit, FAT = Funktion und Abgleich, EOL = End of Line) wird zwischen einer physikalischen DFT und einer elektrischen DFT unterschieden. Bei der physikalischen DFT wird die Zugänglichkeit im Layout für die Kontaktierung der Netze ermittelt, bei der elektrischen DFT wird der Schaltplan daraufhin analysiert, wo eine Kontaktierung von Netzen notwendig ist. Bei den optischen Testverfahren haben die Möglichkeiten der 3D-Prüfung deutlich zur Fehlerreduzierung bzw. Fehlervermeidung (Pseudofehler) und zu einer Verschiebung der Testarten beigetragen. Viele Prüfungen, die früher mit einem ICT durchgeführt wurden, werden mittlerweile durch ein AOI oder eine Kombination von AXI (Automated X-Ray-Inspection) und AOI abgedeckt. Für die Beurteilung der Abdeckung von AOI-Systemen werden 3D-Informationen über die Bauteile immer wichtiger, um hier mögliche Abschattungen zu erkennen. Diese Informationen sind mittlerweile bei Standardbauteilen über Content-Services abrufbar, bei mechanischen Bauteilen wie zum Beispiel Steckern allerdings noch unvollständig.

Eine Verknüpfung der Prüfergebnisse auch mit anderen Inspektionssystemen über ein AOI oder AXI hinaus (automatisierte Systemkommunikation ähnlich zum Closed Loop, siehe Abschnitt SPI) ist herstellerabhängig in der Regel möglich. So können beispielsweise an einer Verifikationsstation zu AOI-/AXI-Fehlern oder -Prozessindikatoren zur Bedienerunterstützung alle Pastenprüfergebnisse angezeigt werden. Zuweilen ist es auch möglich, bei entsprechend markierten Fehlertypen am Pastenprüfssystem, durch dieses angefordert, im AOI-Prüfvorgang die Aufnahme von zusätzlichen Bildern durch die Schrägblickkameras vornehmen zu lassen. Solche Schnittstellen können bis hin zu einer direkten Kommunikation und (Selbst-)Regelung der Systeme untereinander führen, sodass automatisch zusätzliche Prüfroutinen gestartet werden können.

Dieser Datenaustausch der Prüfsysteme untereinander und der regelnde Eingriff in die Produktionsprozesse werden immer wichtiger und sind bereits der Anfang von Industrie 4.0. Die nachfolgende Verdichtung der Daten durch übergeordnete Analysetools wird für die Einführung neuer Produkte wertvolle Inputs liefern und schneller zu stabilen Produktionsprozessen führen. Schon heute lassen sich auch die Inspektionsergebnisse aus mehreren Fertigungslinien vernetzen und ermöglichen so eine zentrale Verifikation. Die Einbeziehung von Inspektionsdaten verschiedener Hersteller ist dafür grundlegend.

Abb. 10.40: Beispiel einer DFT-Analyse



Quelle: Zollner Elektronik

10.2.3.1 SPI (Solder Paste Inspection, Lotpasteninspektion)

Die Bedruckung mit Lotpaste markiert den Startpunkt des Fertigungsprozesses einer definierten Baugruppe. Hierbei ist eine automatische Inspektion des Drucks durch ein 3D-Prüfsystem bereits seit mehreren Jahren Standard. Die Bildaufnahme inklusive der Pastendepot-Vermessung geschieht in der Regel scannend mit sehr hohen Geschwindigkeiten von bis zu 200 cm²/s. Für die Prüfung sind Auflösungen von bis zu 10 µm und somit auch die Inspektion von Pastendruck für sehr kleine Bauteile bis hin zu 03015 möglich.

Um die Systembetreuung im vorderen Linienabschnitt zu minimieren, haben sich Closed Loops, also automatisierte Regelschleifen zwischen der SPI und zum Beispiel dem Pastendrucker, etabliert. So können unter anderem Reinigungszyklen der Schablone optimiert werden. Aber auch der Bestücker kann eingebunden werden und beispielsweise größere Bauteile gemäß der gemessenen Pastenhöhe oder kleinere gemäß der tatsächlichen Depot-Position absetzen, was in beiden Fällen bessere Lötungsergebnisse verspricht.

10.2.3.2 AOI (Automatische optische Inspektion)

Ein automatisches optisches Inspektionssystem (AOI) zur Inspektion von SMD- (Surface-Mount Device) und THT-Bauteilen sowie deren Lötstellen wird mittlerweile in fast jeder Fertigung eingesetzt. Durch die automatisierte Inspektion ist eine sichere, wiederholbare und dokumentierte Prüfung auch für immer kleinere Bauteile garantiert. Das optische Prüfen nicht nur in 2D, sondern auch eine Inspektion und sogar Messungen in 3D setzen sich aufgrund der verbesserten Robustheit bei der Featurebestimmung wie etwa der Bauteilhöhe oder auch, darauf aufbauend, der genauen Position eines Bauteils, immer mehr gegen die reine 2D-Prüfung durch.

Grundsätzlich gibt es bei der optischen 3D-Inspektion in der Elektronikfertigung nur ein etabliertes Verfahren, nämlich die sogenannte Streifenprojektion (auch mittels Moiré-Pattern). Dabei kann im Wesentlichen zwischen zwei verschiedenen Hardware-Settings unterschieden werden: zum einen die seitliche Projektion der Streifenmuster und orthogonale Bildaufnahme durch eine Topkamera, was bedeutet, dass freie Sicht für die Kamera gewährleistet ist, aber auch, dass immer nur ein Bild gleichzeitig aufgenommen werden kann. Zum anderen können die Muster auch orthogonal projiziert werden, sofern das Inspektionssystem über Seitenkameras verfügt. Das hat bei wenig oder keinen Abschattungen

den Vorteil einer gleichzeitigen Bildaufnahme aus mehreren Blickrichtungen und führt somit zu einer kürzeren Laufzeit.

Abb. 10.41: Eine gleichzeitige Bildaufnahme aus mehreren Richtungen ermöglicht einen hohen Durchsatz und bietet zudem höchste Genauigkeit bei den 3D-Messungen



Quelle: Viscom

Grundsätzlich wird eine maximale Fehlererkennung durch die Kombination von 3D-Messung sowie orthogonaler und seitlicher Inspektion erzielt. Zudem bietet die Bildaufnahme aus mehreren Winkeln (z. B. durch Rotation der Schrägblickkameras oder durch die Installation von multiplen, fixen Schrägblickkameras) eine ergänzende Sicherheit bei dicht bestückten Baugruppen und hohen Bauteilen.

Abb. 10.42: Die Detektion von flachen Aufliegern ist mit Schrägblickkameras möglich



Quelle: Viscom

Aufgrund des Wachstums im Bereich Elektromobilität und alternativer Energiekonzepte ist der Bedarf an Leistungsbaugruppen mit THT-Bauelementen ungebrochen. Bezüglich Qualitäts-

Kontrolle ist bei dieser Technologie ebenfalls ein Trend im Einsatz von AOI-Systemen zu erkennen. Die Inspektionsaufgaben bestehen dabei in der Kontrolle der THT-Bauteile auf der Oberseite (typischerweise vor dem Lötprozess) sowie in der Prüfung der THT-Lötstellen auf der Unterseite. Im Unterschied zu SMD-AOI-Systemen stehen hier die Forderungen nach einer besonders hohen Bauteilfreiheit oberhalb der Leiterplatte (über 100 mm) sowie der Inspektion der Lötstellen von unten. Die Inspektion beider Baugruppenseiten kann dabei zeitgleich erfolgen.

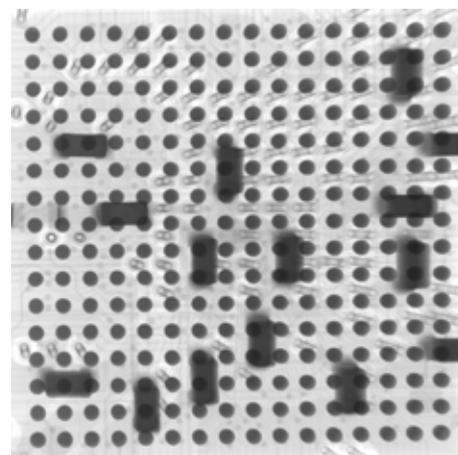
Vom 3D-Trend ausgenommen sind bisher die Inspektion von Underfills und auch die von transparenten Schutzlack-Beschichtungen (sog. Conformal Coatings), wobei bei letzteren eine automatisierte punktuelle Schichtdickenmessung, also auch eine Art der dreidimensionalen Messung, möglich ist. Die optische Schutzlackinspektion wird, wie auch bei der manuellen Inspektion, mittels UV-Beleuchtung und den Fluoreszenzeigenschaften der Lacke ausgeführt. Dabei ergeben sich bei unterschiedlichen Lacktypen (Acryl, Silikon ...) und Beschichtungsstärken verschiedene Anforderungen. Insbesondere benötigen hauchdünne Nano-Beschichtungen und auch die in der Regel nur schwach reflektierenden Silikonlacke höhere Belichtungsintensitäten/-dauern oder sogar den Einsatz spezieller High-Power-LEDs. Die Inspektion von gebondeten Drähten findet ebenfalls in 2D statt. Die automatisierte Prüfung in 3D ist angestrebt und auch bereits eingeschränkt für die Bändchenprüfung sowie für Dickdrähte möglich. Bei Dünndraht (etwa mit Drahtstärken von nur noch 17 µm) kann dies mit den heute zur Verfügung stehenden Technologien noch nicht anforderungsgerecht in der automatisierten Prüfung eingesetzt werden.

10.2.3.3 3D-Röntgen

Die Röntgeninspektion ist neben der automatischen optischen Inspektion ein etabliertes Verfahren zur Prüfung bestückter Leiterplatten und eignet sich gleichermaßen zur Bewertung verdeckter wie auch sichtbarer Lötstellen. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen manuellen Röntgeninspektionssystemen (MXI) und automatischen Systemen (AXI). Die manuellen, zum Teil auch halbautomatischen MXI-Systeme werden meist serienbegleitend zur Analyse und Stichprobenkontrolle verwendet. Die AXI-Systeme hingegen werden zur 100-Prozent-Kontrolle entweder direkt in der Produktionslinie oder als Prüfinstel eingesetzt.

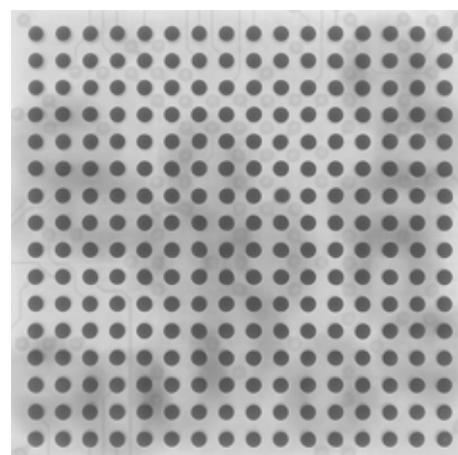
Am Markt findet man je nach Prüfanforderung 2D-, 2.5D- und 3D-Röntgeninspektionssysteme vor. Ein 2D-Röntgenbild entsteht durch eine senkrechte, ein 2.5D-Bild durch eine schräge Durchstrahlung der Leiterplatte. Aus einer bestimmten Anzahl von Schrägdurchstrahlungsbildern (sog. Projektionen) kann zudem ein als umgangssprachlich „3D-Röntgenbild“ bezeichnetes Bild berechnet werden. Die Berechnung, auch Bildrekonstruktion genannt, erfolgt auf Basis diverser mathematischer Ansätze. Etablierte Berechnungsverfahren sind die digitale Laminografie/Tomosynthese und die planare Computertomografie (planarCT).

Abb. 10.43: 2.5D-Röntgenbild einer beidseitig bestückten Leiterplatte mit Überlagerung von Lötstellen der Leiterplattenober- und -unterseite



Quelle: Göpel electronic

Abb. 10.44: 3D-Röntgenbild (horizontales Schnittbild) ohne störende Überlagerungen



Quelle: Göpel electronic

Die 3D-Röntgentechnologie erlaubt einen virtuellen Schnitt an einer beliebigen Stelle der Leiterplatte. Dabei können sowohl horizontale als auch vertikale Schnittbilder erzeugt werden, in denen ein AXI-System anschließend eine automatische Beurteilung der Lötstellen mittels Bildverarbeitung durchführen kann. Speziell bei der Inspektion beidseitig bestückter Baugruppen und in Situationen, in denen mehrere Lötebenen übereinander liegen, erlaubt oftmals lediglich die 3D-Röntgenprüfung eine sinnvolle Prüfaussage. Die Prüfung in der zweidimensionalen Schnittansicht liefert in diesem Fall eine wesentlich bessere Ergebnisqualität als die 2D- und 2.5D-Röntgenprüfungen, bei denen durch störende Überlagerungen eine Auswertung meist nicht möglich ist. Ebenso können mittels 3D-Technik auch Volumenprüfungen durchgeführt werden, beispielsweise bei der Bewertung des Zinndurchstiegs einer THT-Lötstelle.

Um die 3D-Röntgeninspektion im Takt einer Produktionslinie einsetzen zu können, muss zum einen die Aufnahme der zur Berechnung benötigten Schrägdurchstrahlungsbilder sehr schnell und zum anderen die Rekonstruktion des 3D-Bilds möglichst zeitneutral erfolgen. In der Inline-Röntgenprüfung werden typischerweise zwischen acht und 24 Schrägbilder zu einem 3D-Röntgenbild verrechnet. Um diese Anzahl an Bildern schnell aufnehmen zu können, werden entweder Zeilensensoren oder Flächensensoren verwendet. Bei den Flächensensoren haben sich die sogenannten Flat-Panel-Detektoren durchgesetzt. Zur Prüfung werden Pixelauflösungen im Bereich von 5 µm/Pixel bis 30 µm/Pixel verwendet. Um in der geforderten Taktzeit prüfen zu können, ist eine Kombination aus 2D-, 2.5D- und 3D-Röntgeninspektion sinnvoll.

Das höchste Maß an Prüfabdeckung wird durch die Kombination von automatischer optischer Inspektion und Röntgeninspektion erreicht.

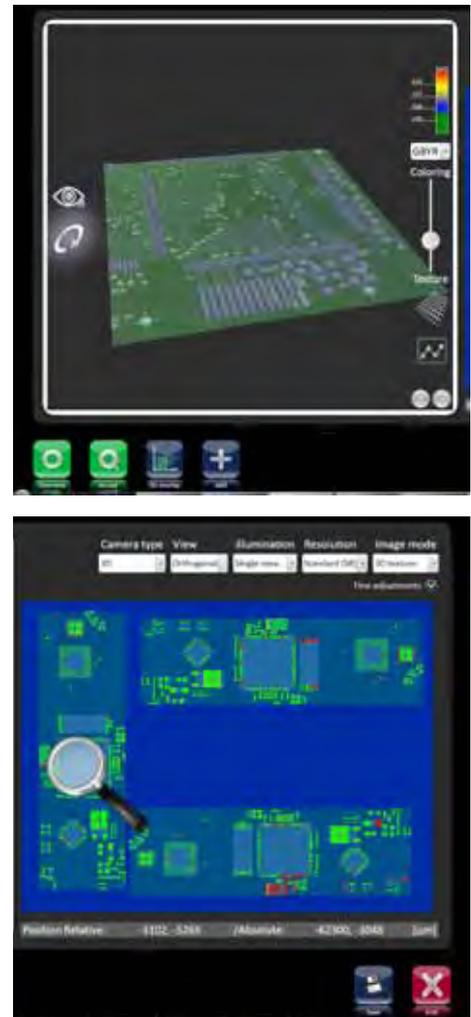
10.2.3.4 Vergleich der optischen Inspektionsverfahren

a. Welche Fehler erkennt welche Inspektionstechnik?

Innerhalb der komplexen Elektronikproduktion durchlaufen die Baugruppen verschiedene Fertigungsschritte wie den Lotpastendruck, die ein- oder beidseitige Bestückung mit SMD- und THT-Bauteilen sowie den Lötprozess. Eine Kontrolle an relevanten Punkten im gesamten Fertigungsprozess ist daher unerlässlich, um insbesondere die Fehlerursachen zu analysieren, zu beheben und zukünftig zu vermeiden.

Ein verkipptes Bauteil kann zum Beispiel fehlerhaft bestückt worden oder aber auch eine Folge des fehlerhaften Aufbringens der Lotpaste zu Beginn der Fertigung sein.

Abb. 10.45a/b: Bedienoberfläche AOI-Röntgeninspektion



Quelle: Viscom

Beim Aufbringen der Lotpaste auf die Leiterplatte können erste Fehler entstehen, die die Systeme zur Lotpasteninspektion (3D-SPI) schnell und zuverlässig detektieren. Die Lotpastendepots werden auf die Merkmale Fläche, Höhenprofil und Volumen vermessen. Die Mess- und Bilddaten der Inspektion können an den Lotpastendrucker rückgekoppelt werden (Closed Loop) und gleichzeitig auch an den Bestückungsautomaten weitergegeben werden (Closed Forward Loop), damit dieser die Bestückposition an den tatsächlichen Lotpastendruck anpasst. Kritisch ist, wenn Bauteile trotz Lotpastenversatz an die Sollposition bestückt werden, da dann die Gefahr eines Aufliegers ohne elektrischen Kontakt oder einer Grabsteinbildung (Tombstoning) besteht. Lotpastenfehler wie Pastenversatz, zu wenig Paste oder Pastenbrücken

zählen zu den typischen Fehlern, die die SPI erkennt. Rückschlüsse zur Optimierung von Reinigungszyklen, Offset-Korrekturen oder auch Elimination von Schwachstellen im Leiterplattendesign sind dadurch möglich.

Abb. 10.46: Fehlerbild Grabsteinbildung



Quelle: Viscom

b. AOI zur Bestückungsinspektion (Pre-Reflow-AOI)

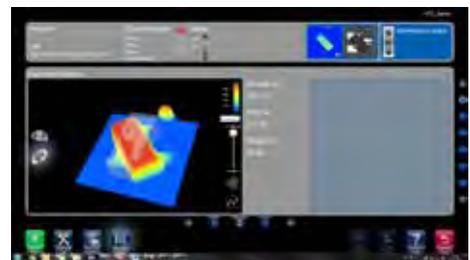
Als nächster Kontrollpunkt werden automatische optische Inspektionssysteme zur Bestückungsinspektion eingesetzt. Geprüft werden das Vorhandensein von Bauteilen, deren Verdrehung, Verpolung oder Vertauschung. Auch verlorene Bauteile, die sich noch auf der Leiterplatte befinden können – mitunter unter anderen Bauteilen versteckt –, werden vom AOI zuverlässig erkannt und an den Bestücker rückgemeldet. Der könnte korrigierende Maßnahmen einleiten, damit derartige Fehler zukünftig nicht noch einmal auftreten. Fehlerhafte bestückte Leiterplatten können vom Pre-Reflow-AOI zur Nacharbeit ausgeschleust werden.

c. Lötstellenvermessung (Post-Reflow-AOI)

Die Post-Reflow-Inspektion mit einem AOI-System vermisst insbesondere Lötstellen. Hierbei hat sich der dreidimensionale Ansatz durchgesetzt: In einem 3D-AOI-System werden zusätzlich zur orthogonalen Kamera und zum Streifenprojektor wahlweise vier oder acht Schrägkameras integriert. Neben einer rasant schnellen Bildaufnahmegewindigkeit lassen sich aufgrund der zusätzlichen Bildaufnahmen hochauflösende 360-Grad-Bilder als 3D-Rekonstruktionen erstellen. Dabei können kleinste Bauteile wie der 01005-Kondensator auf Beschädigung oder Versatz überprüft werden. Eine moderne 3D-AOI erkennt so unter anderem auch Lotkugeln, verkrümmte Pins oder Lot-Brückenbildungen, die zum Kurzschluss führen.

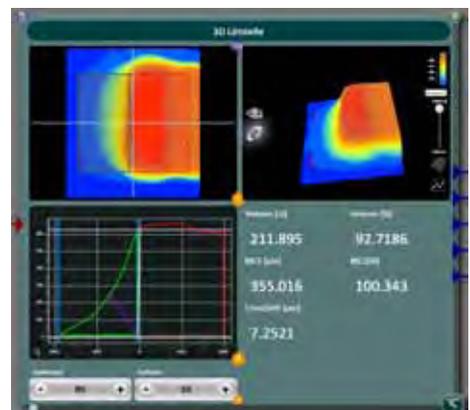
Eine grobe Vermessung der Lötstelle ist im Prinzip schon mit dem äußersten unteren und dem obersten Punkt des Meniskus möglich. Unter Verwendung des genauen Höhenprofils und weiterer Messungen kann aber auch der kleinste tragende Querschnitt (KTQ) ermittelt werden: Dabei handelt es sich um den geringsten Abstand zwischen der Meniskusoberfläche und dem Fußpunkt des Bauteils. Dieser KTQ ist die wahrscheinlichste Stelle, an der bei Verschleiß und Überbelastung ein Risspfad entstehen kann. Daher ist seine Länge für die korrekte Klassifizierung von Lötstellen von Interesse.

Abb. 10.47: Vermessung von Lötstellen



Quelle: Viscom

Abb. 10.48: Vermessung von Lötstellen



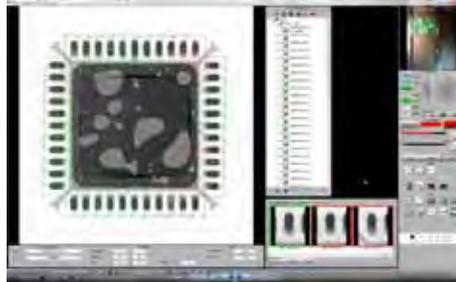
Quelle: Viscom

d. Inspektion verdeckter Lötstellen mit Röntgentechnologie

Verdeckte Lötstellen und auch verdeckte Fehler in Miniaturgehäusen wie BGA, µBGA, QFN und CSP (Chip Scale Package) können nur mit Röntgentechnologie – manuellen oder automatischen Systemen (MXI/AXI) – erkannt werden. Die Oberflächen der äußeren Schnittflächen von beispielsweise MLFs sind extrem ungleichmäßig. Die Lötbarkeit dieser Flächen ist nicht gewährleistet, sodass die Ausformung der Lötstellen im sichtbaren Bereich extrem variieren kann. Mit Röntgentechnik lassen sich sowohl Größe und Verteilung der Poren als auch die Ausformung

der Lötstelle an der hinteren Kante des Anschlusses bewerten. Nicht benetzte Pins, Wicking-up-Effekte oder auch Voids in der Lötstelle werden deutlich nachweisbar.

Abb. 10.49: Inspektion verdeckter Lötstellen



Quelle: Viscom

e. Dilemma zwischen Prüfschärfe und Pseudofehlerrate

Eine hohe Prüfschärfe erlaubt auch engere Toleranzbereiche, die sicherstellen sollen, dass Echtfehler den Prozess keinesfalls unerkannt durchlaufen können. Eingesetzt an den als kritisch bekannten Prozessschritten, sorgen Inspektionssysteme für eine eindeutig bewertbare Bild- und Informationsdatenbasis, die zu einer kontinuierlichen Verbesserung der Prozessstabilität und der Fertigungsergebnisse herangezogen werden kann.

Pseudofehler entstehen dann, wenn aufgrund von Fehlinterpretationen des Inspektionssystems, zum Beispiel aufgrund von zu eng definierten Toleranzen in der Auswertung, Fehler ausgewiesen werden, die in der visuell manuellen Nachbeurteilung von Mitarbeitern als akzeptabel oder als gut bewertet werden. Die Pseudofehlerrate lässt sich in der Regel bei neuen Baugruppen bzw. neu erstellten Prüfprogrammen durch den Einsatz von Softwaretools (ähnlich einer integrierten Verifikation aller in der Vergangenheit erkannten Fehler) sehr schnell drastisch reduzieren.

Dennoch bleibt in der Regel eine geringe Pseudofehlerquote bestehen, die den sich ständig verändernden Prozesseigenschaften geschuldet ist. Kleinere Varianzen im Leiterplattenmaterial, dem Leiterplattenfinish, dem Leiterplattenlayout und den Bauteilen aus unterschiedlichen Chargen oder von unterschiedlichen Herstellern beeinflussen die Analysen. Um diesen variablen Prozess nachhaltig in den Griff zu bekommen, müssen die abweichenden Eigenschaften (Merkmale) erfasst und in die Prüfpläne integriert werden. Dazu können im AOI vorhandene, bewährte Bibliotheken für die Standardinspektionen

kopiert und auf neue Baugruppen mit besonderen Merkmalen und massiven Abweichungen wie Keramiksubstrate oder Leiterplatten mit farbigem Lötstopplack für die aufgabenspezifische Baugruppeninspektion angepasst werden.

Alternative Prüfungen mittels 3D-Vermessung und mit Schrägkameras schaffen hier einen deutlichen Mehrwert, um X-/Y-Verschiebungen und Rotationen, Verkippungen/Koplanarität, Lifted Leads, Tombstones und fehlerhafte Lötstellen als eindeutige Echtfehler mit markanten Prüfmerkmalen auszugeben. So können dunkle Bauteile auf dunklem Grund zuverlässig vermessen werden. Auch der Einsatz einer kombinierten Inline-AOI/AXI oder zusätzlichen Röntgenprüfung (MXI/AXI) kann zu robusteren Prüfprogrammen führen, die dabei helfen, Pseudofehler zu vermeiden.

Neueste Ansätze nutzen sogar einen Deep-Learning-Ansatz: So können Prognosen aus den bisher gesammelten Daten abgeleitet werden, die die Toleranzgrenzen in Prüfplänen automatisch optimieren, um die Pseudofehlerrate gegen null zu senken.

10.2.3.5 Boundary-Scan

Das Boundary-Scan-Testverfahren wurde in den 1980er-Jahren entwickelt und als IEEE-Standard 1149.1 (Institute of Electrical and Electronics Engineers) im Jahre 1991 verabschiedet. Vielen ist es seitdem unter dem Namen JTAG (Joint-Test-Action-Group) oder JTAG-Test bekannt, andere nutzen das JTAG-Interface ausschließlich zum Debuggen, zur Emulation oder zur Programmierung. Fast alle der heute verfügbaren komplexen digitalen Bausteine unterstützen das Testverfahren und haben entsprechende Ressourcen, die sogenannten Scan-Zellen, eingebaut. Diese Zellen treiben und messen digitale Werte der entsprechenden Pins und werden durch den TAP-Test-Access-Port-Controller über das JTAG-Interface angesteuert. Durch die Standardisierung des Testverfahrens erstellt die Prüfsoftware Testpattern automatisch anhand der CAD-Daten des Prüflings. Fehler werden bei der Testausführung als Text ausgegeben oder in Schaltplan und Layout sichtbar gemacht.

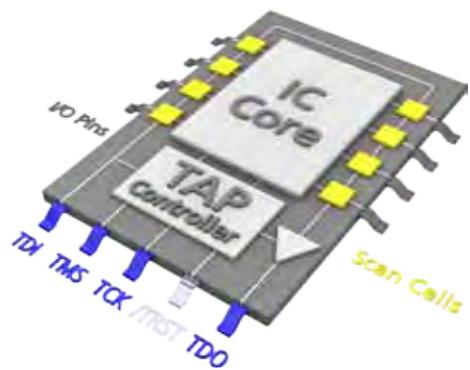
Ein Boundary-Scan-Testablauf besteht aus mehreren Schritten. Der wichtigste davon ist der automatisch generierte Verbindungstest, bei dem die gesamte Baugruppe betrachtet wird. Durch ihn werden Kurzschlüsse detektiert oder auch fehlende Pull-Widerstände gefunden. Gleichzeitig wird die korrekte Verbindung zwischen mehreren Boundary Scan-ICs sichergestellt. Dabei spielt es keine Rolle, ob diese direkt besteht oder ob sich

Serienwiderstände oder sogar Treiber-ICs oder Logik-ICs im Signalpfad befinden.

Trotz Standardisierung gibt es sehr viele ICs ohne Boundary-Scan-Ressourcen, zum Beispiel Speicher oder Logik. Diese Bereiche lassen sich trotzdem automatisiert testen, indem der Boundary-Scan-IC als Controller fungiert und die Funktion solcher ICs anhand entsprechender IC-Beschreibungen nachbildet (z. B. RAM schreiben und lesen). Der gleiche Mechanismus findet auch bei der Programmierung von Flash-Speichern (NAND, NOR, I2C, SPI ...) Anwendung.

Das JTAG-Interface wird außerdem zur Konfiguration von FPGA (Field Programmable Gate Array) / CPLD (Complex Programmable Logic Devices) verwendet, sowie zur Programmierung von internem Flash-Speichern in μ Controllern.

Abb. 10.50: Boundary-Scan-IC mit Scanzellen



Quelle: Göpel electronic

Trotz dieser Vielfältigkeit gibt es einige Einschränkungen, zum Beispiel lange Programmierzeiten in der Produktionsumgebung, die beim Einsatz von Boundary-Scan beachtet werden müssen. Aktuelle Entwicklungen zeigen daher eine Ausweitung des Testverfahrens in zwei Richtungen: zum einen die Erhöhung der Testabdeckung durch Einbeziehung analoger und/oder funktioneller Testschritte und zum anderen die Beschleunigung von Abläufen zum Beispiel durch schnellere Programmierung unter Verwendung vorhandener FPGA- und μ Controller-Ressourcen.

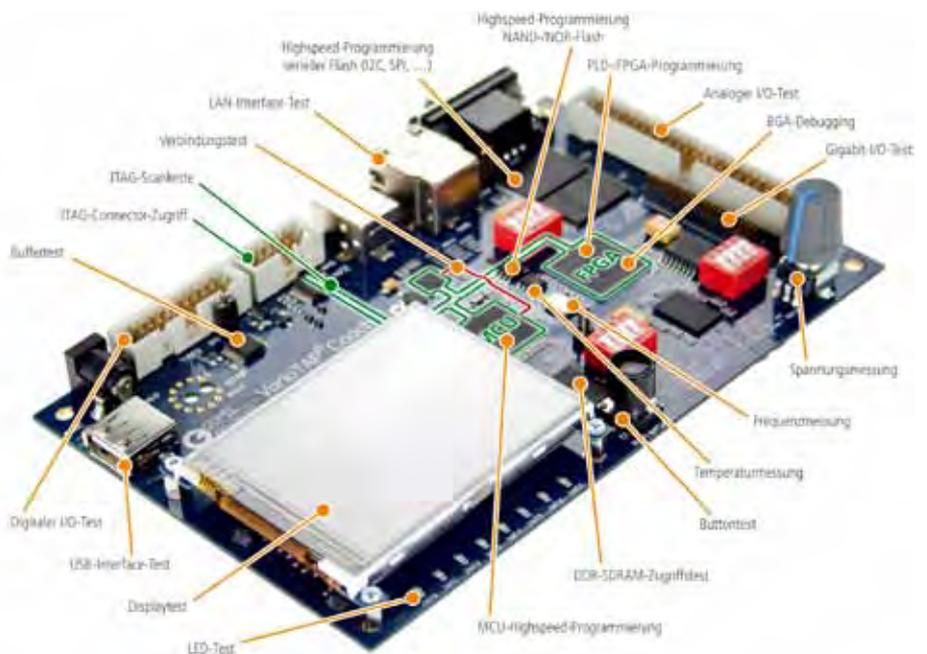
Das höchste Maß an elektrischer Prüfbarkeit wird durch die Kombination verschiedener Testverfahren erreicht, beispielsweise durch Boundary-Scan-Test (BST) mit In-Circuit-Test (ICT) oder Flying-Probe-Tester (FPT). Ist eine nahezu 100-prozentige Abdeckung nicht notwendig (und z. B. aus Kostengründen naheliegend), dann kann eine Kombination mit einem Funktionstest (FKT) Sinn ergeben, meist als End-of-Line-Tester (EOL).

10.2.3.6 ICT (In Circuit Test) / Flying Probe Test

a. ICT

Die Kontaktierung der Baugruppe erfolgt hier über baugruppenspezifische Nadeladapter. Durchgeführt wird in der Regel ein Verbindungstest, es ist aber auch möglich, einzelne Bauteilwerte zu überprüfen oder eine Programmierung von Bauteilen (In-System-Programming) durchzuführen.

Abb. 10.51: Testabdeckung mit Embedded-Board-Testverfahren



Quelle: Göpel electronic

Die Tests werden mittels produktspezifischer Prüfadapter auf unterschiedlichen Prüfsystemen durchgeführt. Entscheidend ist hier die Anzahl der vorhandenen Messkanäle bzw. Testmöglichkeiten (z. B. Boundary-Scan).

Da die Testabdeckung durch optische Prüfsysteme wie AOI oder AXI mittlerweile sehr hoch ist, geht der Trend zu kostengünstigeren MDA-Systemen (Manufacturing Defect Analyzing).

a. Flying-Probe-Test

Beim Flying Probe wird kein eigener Prüfadapter benötigt, die Baugruppe wird direkt mit Prüfnadeln kontaktiert. Dies ist im Bereich der Kleinserien und Musterphase eine sehr flexible Testmöglichkeit, allerdings ist die Prüftiefe eingeschränkt und die Testzeit relativ hoch.

Abb. 10.52a/b: ICT-Adapter



Quelle: Zollner Elektronik

Abb. 10.53: Flying Probe



Quelle: Zollner Elektronik

10.2.3.7 Funktionstest

Die Kontaktierung der Baugruppen erfolgt beim Funktionstest ebenfalls über Nadeladapter. Das Testequipment im Hintergrund ist individuell konfiguriert (AC- und DC-Quellen, AC- und DC-Lasten, Signalgeneratoren, Oszilloskope ...). Bei Tests auf Systemebene werden die Prüflinge meist über Stecker an den externen Schnittstellen kontaktiert. Während der Prüfung finden auch häufig Abgleicharbeiten und Programmierungen an den Baugruppen oder Geräten statt. Nach der Prüfung wird oft die Prüfsoftware durch die eigentliche Betriebssoftware ersetzt. Im Bereich der Leistungselektronik, speziell bei Anwendungen in der Elektromobilität, werden sehr aufwendige Tester eingesetzt, um die Funktion des Systems auch unter den hohen Strömen, Spannungen und Lasten zu testen.

Eine weitere Herausforderung ist der Test von Baugruppen oder Geräten, die während der Prüfung eine WLAN-, Mobilfunk- oder Cloudverbindung aufbauen. Diese Prüfungen müssen oft in einzeln abgeschirmten Kammern erfolgen und haben eine Limitierung in der Anzahl der verfügbaren Verbindungen (z. B. bei WLAN).

Abb. 10.54: Funktionstester für Baugruppen



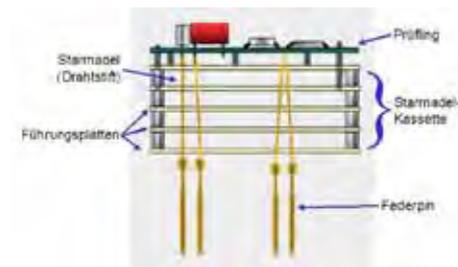
Quelle: Zollner Elektronik

In Einzelfällen werden ICT und Funktionstest kombiniert. Hier wird ein sogenannter Zweistufenadapter eingesetzt, in dem beide Prüfungen nacheinander durchgeführt werden.

10.2.3.8 Sondertest-/Spezialtestverfahren a. Sonderkontaktierungen

Durch die immer geringeren Abstände auf den Baugruppen und bei den immer höheren Frequenzen ist es nicht in jedem Fall möglich, entsprechende Testpunkte ins Layout einzuarbeiten. Bei geringen Abständen ist mit der Verwendung von Starrnadeladaptern eine Kontaktierung oft möglich. Die Grenzen liegen hier bei einem Pitch von $<0,8\text{mm}$.

Abb. 10.55: TAC-Technologie



Quelle: Zollner Elektronik

Die TAC-Technologie (Test Access Component) ist eine alternative Möglichkeit, Leiterbahnen zu kontaktieren, ohne dass ein Testpunkt vorhanden ist. Es wird ein Bauteil auf eine Leiterbahn gesetzt, auf das mit einer großen (kostengünstigen) Prüfnadel kontaktiert wird.

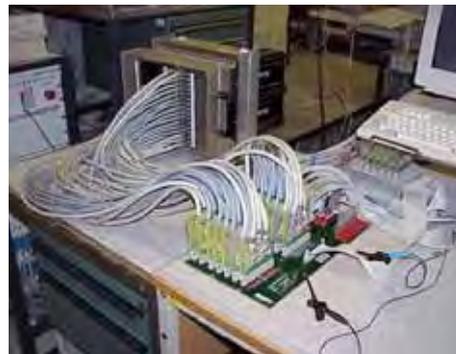
b. Beadprobe-Technologie

Hier wird auf ein Lotdepot kontaktiert, das auf einer Leiterbahn sitzt. Eine Kontaktierung mit herkömmlichen Nadeln ist somit wieder möglich.

c. Backplane-Test

Mit diesem Test werden Backplanes oder Kabelbäume auf Verbindung und Kurzschluss getestet. Ebenso kann die Spannungsfestigkeit überprüft und Bauteilwerte (Kapazitäten, Widerstände, Induktivitäten) können vermessen werden.

Abb. 10.56: Backplane-Test



Quelle: Zollner Elektronik

d. Sicherheitstest (High Voltage, Ground, Isolation, Leckstrom)

Dieser Test wird in erster Linie zur Erfüllung von gesetzlichen Anforderungen durchgeführt und ist Bestandteil bei der Zulassung von Produkten.

Abb. 10.57: Elektrischer Sicherheitstest



Quelle: Zollner Elektronik

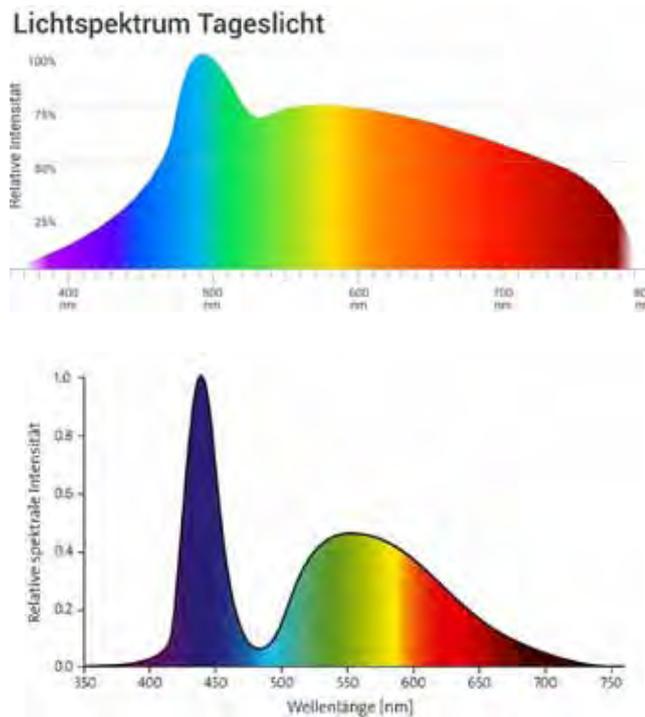
e. Run-in/Burn-in

Dies sind serienbegleitende aktive Tests, bei denen eine Stichprobe an Geräten verschiedenen Belastungsszenarien ausgesetzt wird. Üblicherweise ist dies Temperatur, Vibration, Druck, mechanische Belastung. Ziel ist es, Frühausfälle zu detektieren und somit die Qualität der Feldbaugruppen zu gewährleisten. Eine weitere Testart in dieser Kategorie sind die sogenannten HALT-Prüfungen (High Accelerated Life-Test) und HASS-Prüfungen (Highly Accelerated Stress-Screening).

f. Optische Prüfungen

Diese dienen zur Überprüfung von Leuchtdichte, Ausleuchtung, Spektralanalysen bzw. zur Justierung von optischen Systemen.

Abb. 10.58a/b: LED-Spektrum



Quelle: Zollner Elektronik

g. Umweltprüfungen

Für die Zulassung von Produkten bzw. auch für serienbegleitende Tests steht noch eine Reihe von Prüfmöglichkeiten zu Verfügung, die durch die schnellen Innovationszyklen bei den Produkten immer mehr an Bedeutung gewinnen. Ziel dieser Verfahren ist es, durch beschleunigte Tests frühzeitig Schwachstellen im Produkt zu finden bzw. die Leistungsreserven eines Systems zu ermitteln (Robustness Validation).

- Vibrationstest (mit und ohne Temperaturüberlagerung)
- Temperaturwechseltest
- Temperaturschocktest
- Temperatur und Feuchtetest
- Salzsprühnebeltest
- Staubtest
- Mechanischer Schock (mit und ohne Temperaturüberlagerung)
- Steinschlagtest
- Hochdruckreinigertest
- Spritzwasser (inkl. thermischer Schock)
- Chemische Tests

Abb. 10.59a/b: Umwelttestcenter



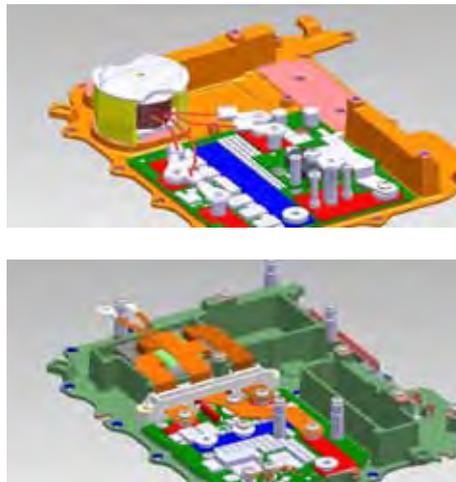
Quelle: Zollner Elektronik

10.2.4 Endmontage

Die Grundlage für eine zuverlässige und wirtschaftliche Montage (fertigungsgerechtes Design) wird bereits bei der Entstehung des Produkts gelegt. Hier ist eine enge Zusammenarbeit zwischen Entwickler und dem Produzenten extrem wichtig. Bereits in frühen Phasen der Produktentstehung kann mittels DFA-Analyse (Design for Assembly) eine Bewertung durchgeführt werden. Dies beginnt bei der Variantenreduzierung von Schrauben und endet bei der Optimierung von Komponenten und mechanischen Teilen. Die Optimierung des Produkts für die Montage ist ein Schwerpunkt, der zu beachten ist. Die Logistik inklusive Teilezuführung und Ergonomiebetrachtung sind weitere Faktoren, die nicht vernachlässigt werden dürfen.

Heutzutage ist es möglich, mit Softwaretools eine durchgängige Planung vom Produktdesign über die Montage, die Gestaltung des Arbeitsplatzes inklusive Ergonomiebetrachtung bis hin zur kompletten Linien-, Logistik- und Gebäudeplanung durchzuführen und virtuell darzustellen. Den Abschluss bildet dann eine Ablaufsimulation zur Verifizierung der Planung.

Abb. 10.60a/b: Trafoeinheit vor und nach der Optimierung



Quelle: Zollner Elektronik

Abb. 10.61a/b: Digitale Planung und Umsetzung in der Realität



Quelle: Zollner Elektronik

Parallel zur Planung, speziell bei umfangreichen Montagelinien, ist ein Datenkonzept für die Prozessverriegelung und Überwachung zu erstellen. Bei kurzen Taktzeiten müssen die Ergebnisse der Vorgängerstation innerhalb kürzester Zeit als Input für die Bearbeitung der nächsten Station vorliegen. Dies ist bei der Überwachung oder Verriegelung von komplexen Prozessen wie zum Beispiel Schrauben oder Einpressen oft zeitkritisch.

10.2.5 Traceability

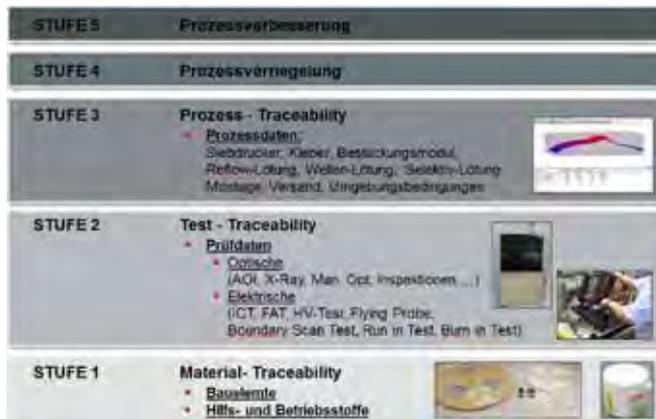
Für viele Produkte wird dieses Thema auch in Zukunft beispielsweise zur Eingrenzung von Austauschaktionen von einschneidender Bedeutung sein, deshalb wird im Nachfolgenden darauf eingegangen. Traceability ermöglicht die Rückverfolgbarkeit von Produkten und Erzeugnissen entlang der gesamten Supply-Chain:

- Das im Produkt verbaute und verwendete Material ist nachzuverfolgen. Dazu sind die Materialdaten aufzunehmen und hinter der Produktkennung zu speichern. Zum Material gehören sowohl Bauteile als auch Verbrauchsstoffe. Um Materialdaten im Wareneingang effizient zu erfassen, ist eine einheitliche Kennzeichnung von Vorteil, die beispielsweise in der Empfehlung VDA 4992 geregelt ist.
- Die für die Entstehung des Produkts verantwortlichen Prozesse sind zu verfolgen. Dazu sind entscheidende Daten der Prozesse zu erfassen und mit der Produktkennung zu speichern. Prüfprozesse zählen ebenso zu den Prozessen.
- Der Logistikweg eines Produkts ist zu verfolgen. Dazu sind den Daten der Logistik die Produktkennungen zuzuordnen.

Interne und externe Traceability: Unter externer Traceability ist die Rückverfolgbarkeit von Informationen zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer zu verstehen. Diese ist mittels einer eindeutigen Kennzeichnung auf dem Produkt, der kleinsten Verpackungseinheit und der Begleitdokumentation einer Lieferposition zu gewährleisten. Neben einer physischen Informationsübertragung auf Papier gewinnen digitale Datenübertragungen (EDI = Electronic Data Interchange) immer mehr an Bedeutung. Daten können schon vorab übermittelt oder bei Bedarf in Echtzeit abgefragt werden.

Unter interner Traceability ist die Produkt- und Prozessrückverfolgbarkeit des Auftragnehmers innerhalb seiner Wertschöpfungskette zu verstehen. Umfang, Parameter und Dokumentationen dieser Rückverfolgbarkeit unterliegen gesetzlichen und internen Regularien und werden im Allgemeinen nicht nach außen kommuniziert. Es soll dadurch eine Risikobewertung ermöglicht werden, aber kein Know-how-Transfer stattfinden. Die Aktivitäten zum Thema Traceability für Produkte lassen sich in der nachfolgenden Abbildung als Stufenprozess beschreiben. Als Ausbaustufen sind Prozessverriegelung bzw. -verbesserung möglich.

Abb. 10.62: Fünf-Stufen-Modell einer Integration von Traceability

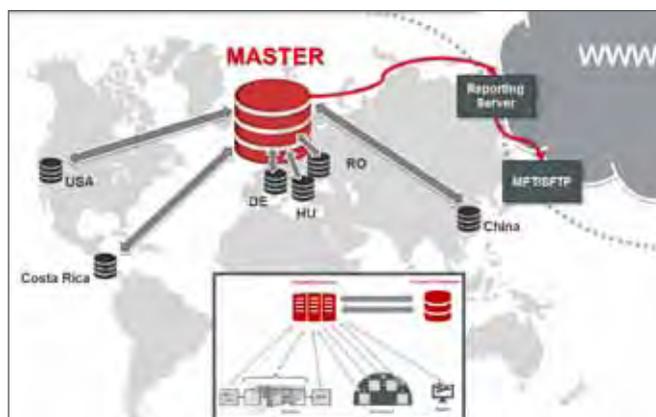


Quelle: Zollner Elektronik

Im Rahmen von Industrie 4.0 wird aus den Bereichen interne und externe Traceability immer mehr eine durchgängige digitale Datenaufzeichnung der gesamten Supply-Chain über alle Lieferantenebenen hinweg.

Das System, in dem Traceability-Daten für gewöhnlich gespeichert werden, ist ein MES (Manufacturing Execution System). Es bietet viele Schnittstellen und Möglichkeiten, um Daten zu erfassen und diese auch sinnvoll auszuwerten. Umfangreiche Performanceanalysen, prädiktive Wartungspläne und Qualitätskennzahlen lassen sich beispielweise daraus automatisch ableiten. Des Weiteren kann ein MES auch Daten für Prozessverriegelungen bereitstellen, indem es Materialdaten (z. B. Ablaufdatum oder MS-Level) mit Prozess- und Logistikdaten intelligent verknüpft.

Abb. 10.63: Beispiel einer MES-Struktur



Quelle: Zollner Elektronik

10.3 Industrie 4.0, Smart Solutions, Automatisierung, Robotereinsatz

Industrie 4.0 ist ein Zukunftsprojekt im Bereich der Hightech-Strategie der deutschen Bundesregierung und der Industrie, mit dem in erster Linie die Informatisierung der Fertigungstechnik und der Logistik vorangetrieben werden soll. Das Ziel ist die intelligente Fabrik (Smart Factory), die sich durch Wandlungsfähigkeit, Ressourceneffizienz, ergonomische Gestaltung sowie die Integration von Kunden und Geschäftspartnern in Geschäfts- und Wertschöpfungsprozesse auszeichnet. Technologische Grundlage sind cyber-physische Systeme und das Internet der Dinge (IoT).

Das IoT verbindet aber auch im privaten Bereich intelligente Produkte und Daten miteinander. Dies kann vom Smart Home bis hin zu smarten Wearables oder autonomen Fahrzeugen praktisch jedes Produkt sein, das mit einer Sensorik und einer Datenschnittstelle ausgestattet ist.

Das Thema Industrie 4.0 hat mittlerweile in allen relevanten Regionen mit Fertigungsstandorten Einzug gehalten, auch wenn es unterschiedliche Begrifflichkeiten und Schwerpunkte in den einzelnen Ländern gibt. Für die Baugruppenfertigung kann man grundsätzlich zwischen folgenden größeren Themenblöcken differenzieren:

- Automatisierung
- Big-Data-Analytics/Data-Mining

10.3.1 Automatisierung

In vielen Regionen steht die Automatisierung von Abläufen – von der Produktionsplanung über die Fertigungsvorbereitung bis zur Produktion – im Zusammenhang mit Industrie 4.0 im Fokus. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass eine komplett automatisierte und menschenleere Baugruppenfertigung in den nächsten zwei bis fünf Jahren eher unwahrscheinlich ist. Viele der heute installierten Maschinen und Anlagen werden auch in diesem Zeitraum noch in den Fertigungen stehen. Diese Anlagen sind von der Konzeption nur teilweise für den Betrieb ohne Mensch geeignet.

Abb. 10.64: Handling von Baugruppen mit dem Roboter



Quelle: ASM Assembly Systems

Die Maschinenhersteller sind hier gefragt, in Design und Entwicklung befindliche Anlagen für den Betrieb und die Bedienung mit Robotern zu konzipieren. Es gibt jedoch auch mit dem bestehenden Maschinen- und Anlagenpark schon viele Abläufe, die anstatt von Menschenhand mit Robotern bewerkstelligt werden können. Zum aktuellen Zeitpunkt werden in vielen Fertigungen bestehende manuelle Abläufe auf den Prüfstand gestellt – mit dem Ziel der Automatisierung. Man kann sehr viele experimentelle Ansätze beim Einsatz von Robotern zur Bedienung von Anlagen erkennen. Als Beispiel sei hier die Bedienung von Testsystemen mit Leichtbaurobotern zu nennen. Bestückte Baugruppen aus den Fertigungslinien werden von einem Roboter aus Magazinen genommen und in ein Testsystem eingelegt. Nach erfolgter Prüfung wird die Baugruppe wieder vom Tester je nach Ergebnis in ein entsprechendes Magazin gelegt. Wenn ein Magazin voll ist, wird dieses vom Roboter gewechselt. Eine Herausforderung bei der Implementierung solcher Abläufe ist das sehr heterogene Softwareumfeld in der Baugruppenfertigung. Standardschnittstellen für die Kommunikation dieser Systeme untereinander sind leider noch Mangelware. Deshalb arbeiten die Anlagenhersteller und Integratoren meist mit proprietären Schnittstellen. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass zur M2M-Kommunikation (Maschine zu Maschine) innerhalb einer SMT-Linie aktuell 20 Anlagenhersteller die Initiative ergriffen haben, eine Standardschnittstelle mit dem Namen „Hermes“ zu etablieren. Diese Kommunikation basiert auf

Ethernet und TCP/IP als Basisprotokolle. Darauf aufsetzend, hat sich der Verbund der Hersteller auf ein weiteres Protokoll zum Austausch von Informationen entlang der SMT-Linie geeinigt. Parallel zum realen Transport jeder Leiterplatte wird ein Datensatz von Maschine zu Maschine gesendet. Dabei werden Informationen ausgetauscht, die zum Beispiel vor der Übergabe der Leiterplatte von einem Vorgängermodul an die nachfolgende Anlage die entsprechende Einstellung von Transportbändern erlauben. Weiterhin können Serialnummern der Leiterplatten übergeben werden, damit diese nicht an jeder einzelnen Anlage neu erfasst werden müssen. Ziel der Initiative ist die Ablösung der heute fast ausschließlich anzutreffenden SMEMA-Schnittstelle (Surface Mount Equipment Manufacturers Association), die jedoch auf Basis von elektrischen Signalen nur eine sehr eingeschränkte Kommunikation zwischen den Anlagen erlaubt.

Betriebsmittel- und Materialmanagement: Ein großes Themengebiet bei der Automatisierung von Abläufen ist die Bereitstellung von Materialien vom Warenlager zum Point of Use. Maschinen mit eingebetteten Softwarelösungen können heute schon die aktuellen Füllstände von Bauteilen erkennen. Eingestellte Schwellwerte an den Bestückanlagen lösen einen Trigger an ein Materialverwaltungssystem aus, das die einzelnen Signale konsolidiert und dann an ein Materiallager zur Auslagerung der Bauteile sendet. Im Warenlager werden daraufhin, meist noch teilautomatisiert, entsprechende Teile auf autonom fahrende Transportsysteme verladen. Diese sogenannten AGVs (Autonomous Guided Vehicles) oder AIVs (Autonomous Intelligent Vehicles) fahren dann innerhalb der Fertigung an vordefinierte Haltestellen zur ebenfalls noch häufigen manuellen Entladung. Mangels einheitlicher Schnittstellen zwischen den oben genannten Systemen werden hier ebenfalls noch meist proprietäre Kommunikationsprotokolle der Anlagen- und Softwareanbieter entwickelt.

Abb. 10.65: Robotereinsatz bei der SMT-Bestückung



Quelle: ASM Assembly Systems

Eine nächste logische Weiterentwicklung wird die vollautomatische Beladung der Anlagen mit Robotern sein, wobei hier die Anlagen noch roboterkonform gestaltet werden müssen.

Ebenfalls wird es für den automatischen Werkzeugwechsel noch einige Weiterentwicklungen bei den Anlagenherstellern geben müssen, damit dieser von Robotern durchgeführt werden kann. Diese Entwicklung wird jedoch ebenfalls in einigen Jahren in den Fertigungen Einzug erhalten.

Produktionsplanung: Die Produktionsplanung von der Ebene zur Fertigungssteuerung (ERP) ist in vielen Fertigungen noch mit zahlreichen Medienbrüchen versehen. In ERP-Systemen wird eine Grob- und Feinplanung inklusive der Festlegung von Start- und Endezeitpunkten für Fertigungsaufträge durchgeführt. Dabei werden aber sehr häufig die zum Produktionsstartpunkt verfügbaren Ressourcen und Materialverfügbarkeiten auf Verpackungsebene nicht berücksichtigt. Nach Freigabe der Fertigungsaufträge erfolgt dann am Shopfloor meist mithilfe von Standard-Bürosoftware die Einlastung der Aufträge auf Fertigungslinie. Die Optimierung der Auftragsreihenfolge im Hinblick auf die aktuelle Ressourcenlage und Minimierung von Umrüstvorgängen erfolgt in diesem Schritt. Bei diesem Vorgang ist die Erfahrung des Fertigungssteuerers gefragt.

Bedienerunterstützung/Ressourcenmanagement: Intelligente Bedienerführungen für Tätigkeiten am aktuell zu bearbeitenden Halberzeugnis sind in heutigen Fertigungen meist an manuellen Arbeitsplätzen zu finden. Dabei werden Informationen nach Erfassen der Halberzeugnisse mittels Barcodescan elektronisch angezeigt. Diese Organisation der Bediener ist sehr häufig durch feste Zuordnung der Bediener an Arbeitsplätze bzw. Fertigungslinien geregelt. Zukünftig wird erwartet, dass diese feste Zuordnung zumindest an Fertigungslinien nicht mehr der Fall sein wird. Durch die Einführung von Smart Devices in der Fertigung werden Bediener sehr wahrscheinlich abhängig von ihren Kenntnissen und aktuellem Standort auf mobilen Geräten angesteuert und nur noch bei Bedarf an die Linien gerufen. Begünstigt wird diese Entwicklung noch von zunehmenden Möglichkeiten, Maschinen und Anlagen remote zu bedienen. Für Inspektionssysteme und zukünftig wahrscheinlich für wesentlich mehr Maschinen wird es die Möglichkeit der Fernbedienung von einer zentralen Monitoring- und Steuerungsstelle geben.

Abb. 10.66: Maschinenüberwachung mit Wearables



Quelle: ASM Assembly Systems

Eine weitere Entwicklung ist dann die Bedienerführung mit sogenannten Mixed-Reality-Systemen: Dabei wird eine virtuelle Umgebung in Form von Anleitungen zu Bedienaktionen der physischen Landschaft überlagert und die Bediener bekommen Arbeitsanweisungen abhängig von der aktuellen Situation am jeweiligen Standort sehr intuitiv dargestellt.

Neue Medien wie zum Beispiel Smart Devices sind jedoch nur teilweise für den industriellen Einsatz am Markt verfügbar. Die Robustheit der Geräte sowie die Ergonomie spielen beim mobilen Einsatz in der Fertigung eine wichtige Rolle. Smart Devices sind aus oben genannten Gründen in der Baugruppenfertigung noch relativ selten vorzufinden. Es wird zum heutigen Zeitpunkt jedoch sehr viel experimentiert und entwickelt.

Fertigungssteuerung: „Das Produkt steuert den Prozess“ – dies ist eine großgeschriebene Intention von Industrie 4.0. Es bedeutet, dass mehr Information und Intelligenz vor Produktionsstart in die Materialien und Anlagen übertragen wird. In einer Baugruppenfertigung wird zum Beispiel eine Rohleiterplatte mit einem beschreibbaren Speicher und entsprechender Kommunikationseinrichtung ausgestattet. Der Arbeitsplan für jedes individuelle Produkt kann von Beginn an in diesem Speicher abgelegt werden. Durch die Kommunikation des Rohmaterials mit den Anlagen und entsprechenden Transportsystemen bahnt sich das Produkt anschließend völlig autonom den Weg durch die Fertigung. Diese Vision ist allerdings aufgrund von geringen Speicherkapazitäten bei RFIDs oder ähnlichen Datenträgern und auch aufgrund der heute möglichen Datenübertragungsraten in diesem Umfeld noch nicht in der Realität anzutreffen. Hierzu muss es noch einige Weiterentwicklungen in diesen Systemen geben. Derzeit ist in der Baugruppenfertigung meist ein MES als zentrales Fertigungssteuerungssystem im Einsatz, das den Produktionsablauf von oben mit entsprechender Kommunika-

tion vom Hostsystem zu den Anlagen steuert. Ein geeigneter Standard für diese Kommunikation hat sich leider auch noch nicht etabliert, obwohl es von einigen Instituten und Vereinigungen Bestrebungen dazu gibt.

Neue Produkteinführung, Prozessvalidierung und Produktdatenmanagement: In der Baugruppenfertigung herrscht nach wie vor eine sehr heterogene Softwarelandschaft vor. Ineinander übergreifende Standardschnittstellen zur Vermeidung von Medienbrüchen werden sehr häufig mit proprietären Lösungen umgesetzt. Dies trifft auf das Produktdatenmanagement wie auch im Bereich Produktionsplanung mit Berücksichtigung von verfügbaren Ressourcen, Assets und Materialien zu.

10.3.2 Big-Data-Analytics/ Data-Mining

Diese Schlagworte werden sehr häufig mit den Themen „Predictive Maintenance“ oder auch der kontinuierliche Optimierung von Produktionsprozessparametern in Verbindung gebracht. Eine Herausforderung bei diesem Themengebiet besteht darin, dass sehr große Datenmengen analysiert und in Zusammenhang mit realen Ereignissen in der Vergangenheit gebracht werden müssen.

Abb. 10.67: Analyse von Fertigungsdaten



Quelle: ASM Assembly Systems

Nur diese Korrelation lässt sinnvolle Schlussfolgerungen und eine Projizierung auf zukünftige Ereignisse zu. Die Kompetenzen für die Speicherung, Verarbeitung und Analyse von großen Datenmengen wie auch der Einsatz von mathematischen Modellen zur Analyse aufgezeichneter Daten sind bei IT-Experten zu finden. Diese Experten haben jedoch relativ selten entsprechendes Wissen und Erfahrungen mit Produktionsequipment und zugehörigen Prozessparametern in der Baugruppenfertigung. Diese Kenntnisse sind im Normalfall bei den Produktionsfachleuten zu finden. Sinnvolle Ergebnisse in diesem Bereich sind folglich nur in Zusammenarbeit mit diesen

Fakultäten zu erwarten. Zum heutigen Zeitpunkt gibt es in der Baugruppenfertigung aufgrund oben genannter Problematik noch sehr wenige fertige Anwendungen, wobei viele Unternehmen sich mit dem Thema in Experimenten befassen.

Infrastruktur und Datenmanagement: Softwareanbieter mit Lösungen für die Baugruppenfertigung bieten ihre Systeme zunehmend als cloud-basierte Lösungen an. Es muss dabei zwischen On-Premise und Off-Premise unterschieden werden. On-Premise bedeutet, dass die Daten noch in den Einrichtungen des Endanwenders gespeichert und verwaltet werden, wobei bei Off-Premise-Lösungen die Daten über die Unternehmensgrenzen hinweg bei Cloudanbietern vorgehalten werden. Reine Cloudlösungen zur Datenspeicherung und Verwaltung entlasten den Anwender von der Aufgabe der Verwaltung und Archivierung seiner Daten. Natürlich erübrigt sich bei Off-Premise-Lösungen auch die Investition in eigene Hardware zur Datenspeicherung, da die Informationen über Netzwerke auf externen Systemen abgelegt und vorgehalten werden.

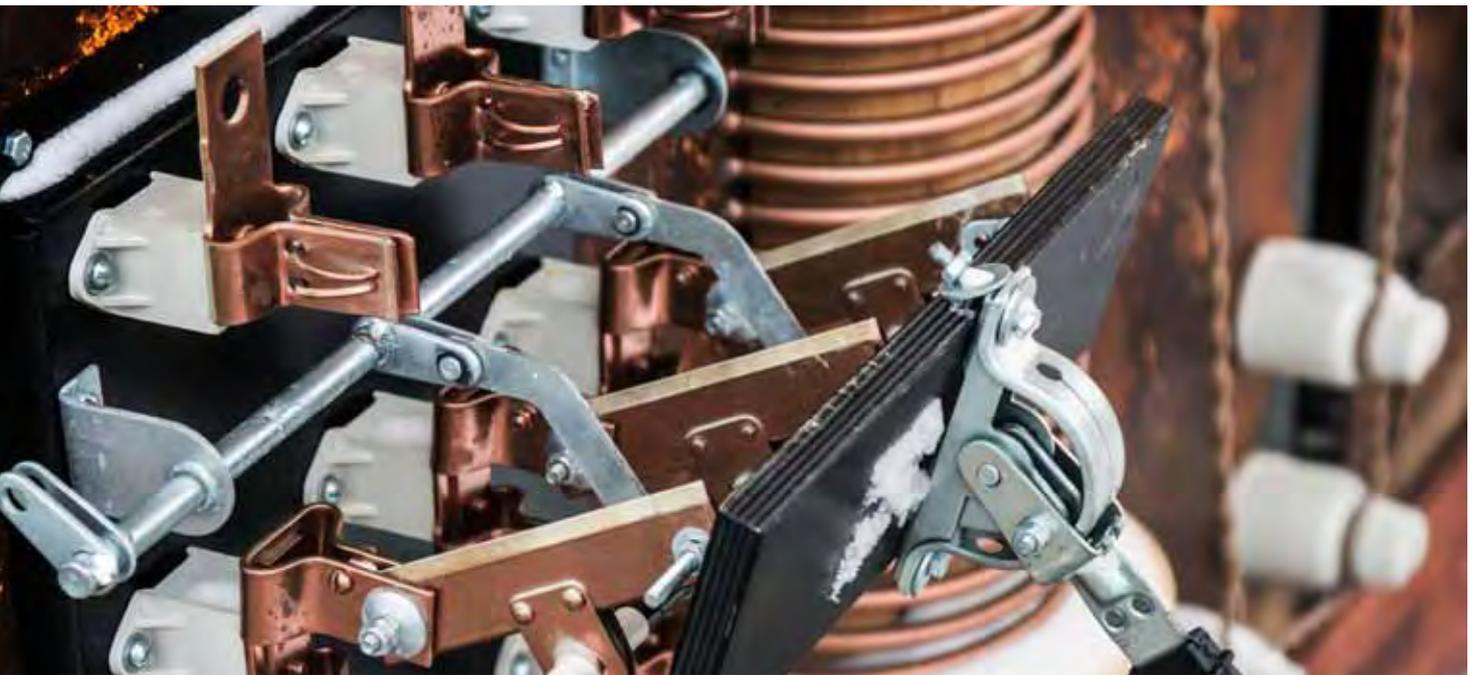
Neue Geschäftsmodelle: Neue Geschäftsmodelle im Zusammenhang mit Industrie 4.0 trifft man heute noch eher selten an. Vorreiter sind reine Softwareanbieter, die zunehmend Applikationen als SaaS (Software-as-a-Service) offerieren. Dies bedeutet den Erwerb des Nutzungsrechts auf Basis einer kontinuierlichen Zahlung anstatt eines einmaligen Lizenzkaufs. Kombinieren lässt sich dies mit der Bereitstellung der Applikation in einer cloudbasierten Lösung. Das heißt, die Applikation muss nicht mehr auf lokaler Hardware beim Endanwender installiert werden. Diese Geschäftsmodelle findet man aktuell jedoch nicht sehr häufig in Zusammenhang mit Software zur Unterstützung der Baugruppenfertigung.

10.3.3 Herausforderungen

Die Herausforderungen bei Industrie 4.0 sind vielfältig. Neben der Sicherstellung der Informationen in der Cloud muss auch der Austausch dieser Information in der Zukunft sichergestellt sein. Dies bedeutet, dass es Lösungen geben muss, die Daten auch in zehn oder 20 Jahren noch lesen und verarbeiten zu können. Wichtiger Punkt dabei ist eine einheitliche Datenstruktur und Datendefinition. Nachdem es aktuell noch nicht einmal eine gemeinsame Schnittstelle für die Kommunikation der Anlagen untereinander gibt (Hermes-Standard), ist hier ein Vorschlag oder eine Einigung auf europäischer Ebene durch aktive Verbandsarbeit notwendig.

Eine weitere Herausforderung wird sein, die Produktionsprozesse Industrie-4.0-tauglich zu gestalten. Bestehende Abläufe/Prozesse mit Industrie-4.0-Funktionen „aufzupeppen“, wird nicht den gleichen Erfolg bringen, wie sie von Anfang an dafür zu designen. Auch für das Designen gibt es bisher noch keine Empfehlungen oder Best-Practice-Beispiele.

11 Materialtrends

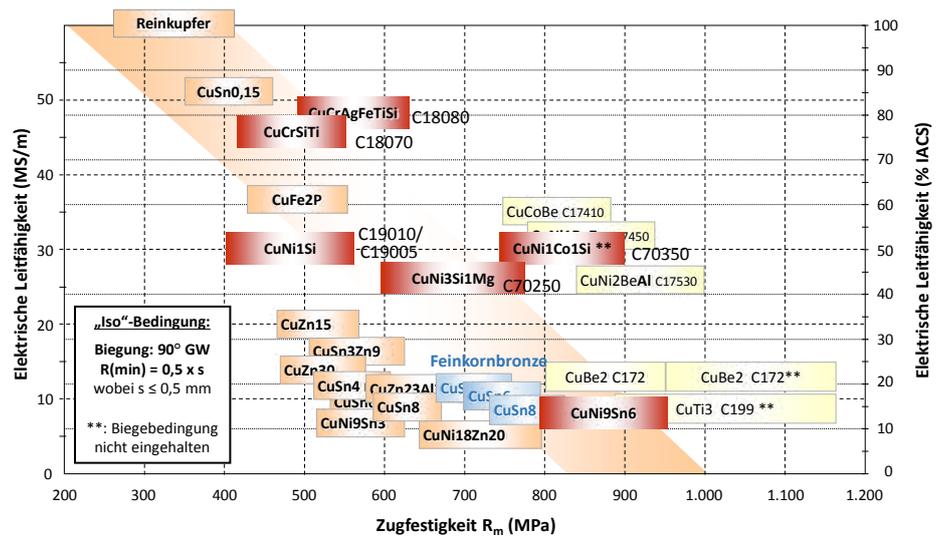


Quelle: OlegDoroshin / Fotolia.com

Die Materialtrends für die elektronischen Komponenten und Systeme (Bauelemente und Baugruppen) stehen in direktem Zusammenhang zu den Megatrends und sind vor allem von der Digitalisierung (Miniaturisierung, Elektromobilität) sowie Nachhaltigkeit (RoHS, WEEE, conflict materials etc.) beeinflusst.

Da die Materialtrends teilweise sehr anwendungsbezogen sind, werden in diesem Abschnitt die ausgewählten Themen Kontaktwerkstoffe sowie Werkstoffe der Leistungselektronik detaillierter betrachtet. In anderen Abschnitten dieser Roadmap werden vielfach Materialtrends an konkreten Beispielen dargestellt:

Abb. 11.1: Leitfähigkeits-Festigkeits-Diagramm für Kupferwerkstoffe.



Die dargestellten Werkstoffe sind mit den Festigkeitsbereichen dargestellt, bei denen sie eine gleich gute Umformbarkeit aufweisen, Kriterium: Biegung 90 Grad GW ist rissfrei durchführbar. Weitere enthaltene Information: Die relaxationsbeständigen, ausscheidungsgehärteten Werkstoffe sind in einem dunklen Braun dargestellt, die naturharten (nicht relaxationsbeständigen) Werkstoffe in einem hellen Orange.

Quelle: Wieland Werke

11.1 Kupferwerkstoffe für elektromechanische Anwendungen und Leadframes

Kupfer und Kupferlegierungen sind für stromführende elektromechanische Bauteile in der Elektronik und in der Elektrotechnik die bevorzugte Werkstoffgruppe, da sie eine angemessene Eigenschaftskombination aus Stromleitfähigkeit, konstruktiver Festigkeit und Federwirkung besitzen. Ebenso wichtig sind die Weiterverarbeitungseigenschaften. Kupferlegierungen werden in den Halbzeugformen Band, Draht und Stangen angeliefert und weiterverarbeitet, entweder mit Stanz-Biege-Maschinen (Band, Draht) oder mit Zerspanungsmaschinen (Zerspanungsdraht, Stangen). Daraus ergeben sich die Anforderungen einer guten Kaltumformbarkeit bzw. Zerspanbarkeit. Kaltumformschritte wie Biegungen und Prägungen müssen vom Grundmaterial rissfrei ertragen werden.

11.1.1 Knetwerkstoffe aus Band und Draht

Wesentliche Auswahlkriterien sind die beiden funktionellen Kerneigenschaften „elektrische Leitfähigkeit“ und „Festigkeit“. Abbildung 11.1 gibt eine Übersicht über die zur Verfügung stehenden Knetwerkstoffe im Leitfähigkeits-Festigkeits-Diagramm. Die darin dargestellten Werkstoffe sind mit den Festigkeitsbereichen dargestellt, bei denen sie eine gleich gute Umformbarkeit aufweisen. Das Kriterium hierfür ist eine rissfrei zu überstehende 90-Grad-Biegung senkrecht zur Walzrichtung (GW). Die weitere in Abbildung 11.1 enthaltene Information ist farblich hervorgehoben. Die dunkelrot hervorgehobenen Werkstoffe sind ausscheidungsgehärtete Legierungen wie zum Beispiel CuNi3Si1Mg oder CuCrSiTi, die eine exzellente Relaxationsbeständigkeit aufweisen und somit bei hohen Temperaturen eingesetzt werden können, ohne dass die Federkräfte zu stark nachlassen. Die naturharten Werkstoffe sind in hellem Orange dargestellt. Diese weisen geringere bis gar keine Relaxationsbeständigkeiten auf.

Reinkupfer zeichnet sich durch die höchsten erreichbaren elektrischen Leitfähigkeiten in Höhe von 58 MS/m bzw. 100 Prozent IACS (International Annealed Copper Standard) aus. In Anwendungen, in denen die Leitung hoher Ströme im Vordergrund steht, ist Reinkupfer erste Wahl. Typische Anwendungen sind beispielsweise Kabel, Busbars, Substrate für Leistungselektronik.

Reinkupfer-ähnliche niedrig legierte Werkstoffe kommen zur Anwendung, sobald etwas höhere Festigkeitsanforderungen bestehen bei gleichzeitig hoher Leitfähigkeit. Diese Legierungen enthalten zusätzlich geringe Mengen von mischkristallhärtenden Legierungsatomen, wie Zinn und Zink. Beispiele sind CuSn0.15 (C14415) und CuZn0.5 (keine UNS Nummer).

Messinge sind Kupfer-Zink-Mischkristalllegierungen mit einem Zinkgehalt bis zu 38 Prozent (Gewichtsprozent). Typische Vertreter sind CuZn30 (C26000) und CuZn36 (C27000). Wesentlicher Vorteil der Messinge sind vergleichsweise günstige Metallpreise, denn Zink ist deutlich günstiger als Kupfer. Es bestehen jedoch diverse Nachteile, wie geringe Temperaturbeständigkeit, Anfälligkeit für Spannungsrisskorrosion und Gefahr der Abdampfung von Zink bei Lichtbogenschweißungen.

Bronzen sind Legierungen aus Kupfer und Zinn. Typische Vertreter sind CuSn4 (C51100), CuSn6 (C51900) und CuSn8 (C52100). Bronzen weisen eine vorteilhafte Eigenschaftskombination von guter Festigkeit, guter Umformbarkeit und einer gewissen, jedoch eingeschränkten Beständigkeit gegen thermische Relaxation auf, die einen Einsatz bis zu ca. 100 °C erlaubt. So haben sie sich als Grundwerkstoffe in Steckverbindern und anderen Kontakten für die Übertragung von Signalen etabliert.

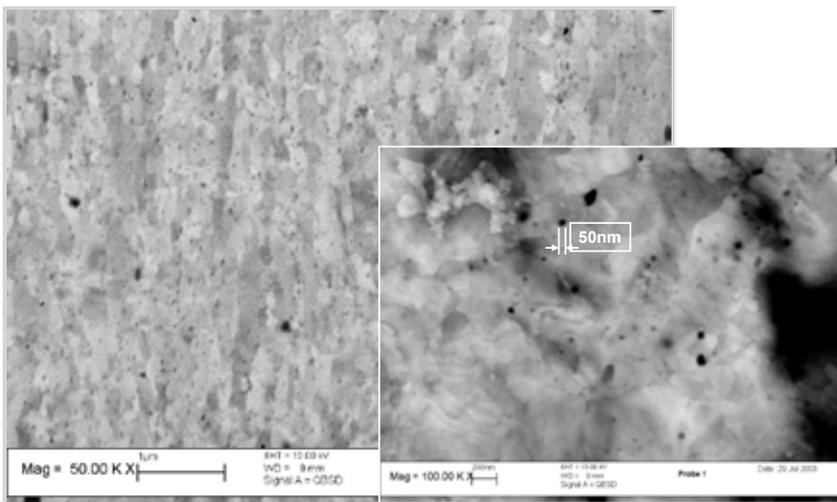
Als Besonderheit steht eine zusätzliche Werkstoffklasse, die der **Feinkornbronzen**, zur Verfügung. Das Gefüge weist feine Korngrößen von 1 bis 3 µm auf, was zu höherer Festigkeit, gepaart mit einer besseren Umformbarkeit führt. Bei gleicher Umformung stehen dem Konstrukteur bei den Feinkornbronzen eine ca. 120 MPa höhere Streckgrenze zur Verfügung. Zusätzlich weisen die Feinkornbronzen deutlich erhöhte Wechsellastbeständigkeit auf.

Ausscheidungshärtende Hochleistungslegierungen: Der Wunsch nach verbesserten Kombinationen von Festigkeit und elektrischer Leitfähigkeit war Treiber für die Entwicklung einer neuen Klasse von Kupferwerkstoffen, der ausscheidungshärtenden Hochleistungslegierungen. In den 1980er- und 90er-Jahren wurden Legierungen mit härtewirksamen Ausscheidungen auf Basis Kupfer-Nickel-Silizium (CuNiSi), Kupfer-Chrom-Silizium (CuCrSi) und Kupfer-Titan-Silizium (CuSiTi) zur Marktreife gebracht und fanden den Weg in die Anwendung in Steckverbindern (Buchsenkontakte), Kontaktfedern und Sockeln (sockets) für Mikroprozessoren. Die

Ausscheidungen haben einen weiteren Effekt, der als der wesentliche Vorteil dieser Werkstoffgruppe gilt, nämlich die gute Beständigkeit gegen thermische Relaxation. Dies ist die Fähigkeit des Werkstoffs, dem Verlust der Federkräfte durch Einwirkung von Temperatur einen Widerstand entgegenzusetzen.

Die Gruppe der Kupfer-Nickel-Silizium-Legierungen, kurz CuNiSi-Legierungen genannt, umfasst sowohl Legierungen im mittleren Festigkeitsbereich als auch die beiden hochfesten Werkstoffe CuNi3SiMg (C70250) und CuNi1Co1Si (C70350). Letztere weisen in den höchsten Festigkeitsklassen Streckgrenzen von ≥ 750 bzw. 810 MPa auf, und das bei Leitfähigkeiten um 50 Prozent IACS. Die für die hohen Festigkeiten und gute Relaxationsbeständigkeit verantwortlichen Ausscheidungen sind Nickelsilizide in einer Größenordnung von 50 bis 100 nm (siehe Abb. 11.2).

Abb. 11.2: Nickelsilizid-Ausscheidungen in CuNi3SiMg (C70250)



Quelle: Wieland Werke

Die Spezialität der Werkstoffgruppe mit Ausscheidungen aus Chromsiliziden (CrSi), Titansiliziden (TiSi) oder Chrom-Titan-Mischsiliziden (CrTiSi) ist deren hohe elektrische Leitfähigkeit von ≥ 75 Prozent IACS bei Festigkeiten in der Größenordnung von Bronze, zuzüglich der hervorragenden Beständigkeit gegen thermische Relaxation. Diese hervorragende Eigenschaftskombination macht die hochleitfähigen ausscheidungshärtenden Kupferlegierungen zu prädestinierten Grundwerkstoffen für Hochstromanwendungen, die hohe Federkräfte erfordern, zum Beispiel als Buchsenkontakte in automotiven Steuergeräten und Leistungselektroniken. Die Relaxationsbeständigkeit erlaubt auch den Einsatz unter erhöhter Temperatur, sei sie äußerlich oder stromdurchflussbedingt.

Neben der thermischen Relaxation hat in der Praxis auch die Pseudo-Relaxation eine große Bedeutung. Diese entspricht im Prinzip dem Setzungsverhalten eines Federteils bei der erstmaligen Belastung und ist lastabhängig, also athermisch. Die Pseudorelaxation hängt unter anderem von der weiteren Bearbeitung ab (insbesondere kaltumformende Operationen) und kann die gleiche Größenordnung wie die thermische Relaxation erreichen.

Tabelle 11.1 fasst die verschiedenen zur Verfügung stehenden ausscheidungsgehärteten Kupferlegierungen zusammen. Abbildung 11.3 zeigt einen Vergleich der thermischen Relaxationsbeständigkeit verschiedener Legierungen. Die Darstellung zeigt die nach Relaxationsbeanspruchung zu erwartende Restspannung über die Höhe der Belastung (Larson-Miller-Parameter, der zeit- und temperaturabhängig ist).

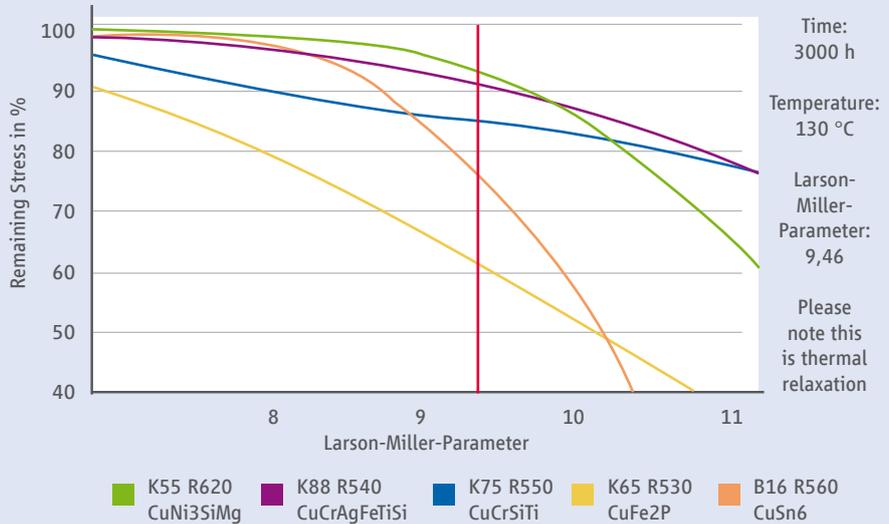
Tab. 11.1: Ausscheidungshärtende Kupferlegierungen, die üblicherweise für elektromechanische Bauelemente verwendet werden mit typischen Festigkeitszuständen

Werkstoff-Bezeichnung	UNS-Nummer	Elektrische Leitfähigkeit [% IACS]	Bemerkung
CuNi3Si1Mg	C70250	45	CuNiSi Hochfestigkeits-Typ
CuNi1Co1Si	C70350	50	CuNiSi Hochfestigkeits-Typ
CuNi1SiP	C19010	50	CuNiSi-Typ
CuNi1SiSn	C19005	47	CuNiSi-Typ
CuCrSiTi	C18070	78	CrTiSi Hochleitfähigkeits-Typ
CuCrFeTiSi	C18080	79	CrTiSi Hochleitfähigkeits-Typ

Quelle: Wieland Werke

Abb. 11.3: Vergleich der thermischen Relaxationsbeständigkeit verschiedener Legierungen

Die Ordinate weist die zu erwartende Restspannung in Prozent der Ausgangsspannung aus, die Abszisse die Höhe der Belastung in Form des Larson-Miller-Parameters, der den kombinierten Einfluss von Temperatur und Zeit berücksichtigt



Weitere in der Elektronik verwendete Kupferknetlegierungen sind Legierungen auf Basis CuMg, CuZr, CuCrZr, CuFeP, CuNiSnP, hochlegierte CuNiZn-Legierungen sowie CuBe und CuCoBe-Legierungen.

11.1.2 Werkstoffe für Systemträger (Leadframes)

Die Stromzu- und -ableitungen für Halbleiter werden als Systemträger (Leadframe) bezeichnet. Sie werden ebenfalls aus Kupferlegierungen in der Halbzeugform Band hergestellt. Systemträger kommen sowohl in diskreten Bauelementen (z. B. Leistungstransistoren) als auch in integrierten Schaltkreisen (IC) zum Einsatz. Dabei bestehen sowohl die Auflagefläche für den Chip als auch die Stromableiterbahnen (Leads) aus der gleichen Legierung, da sie aus einem Band gefertigt sind. Die Wahl der Legierung hängt von der Art der Anwendung und den damit verbundenen Anforderungen ab.

Reine Wärmeableiter in leadframefreien ICs und Systemträger für Leistungselektroniken (DCB-Substrate) werden aus Reinkupfer, meist Cu-OF (C10100) oder Cu-ETP (C11000), hergestellt.

Bei diskreten Bauelementen und bei Leadframes für LEDs sind Wärmeableitung, Stromleitung und mechanische Stabilität für Leiterbahnen erforderlich. Hier werden die hochleitfähige Kupfer-Eisen-Legierung CuFe0.1P (C19210) und die hochleitfähige ausscheidungsgehärtete

Legierung CuCrSiTi (C18070) verwendet. Ist die Leitfähigkeit von geringerer Bedeutung, werden CuFe2P (C19400) oder CuSn1CrNiTi (C18090) eingesetzt.

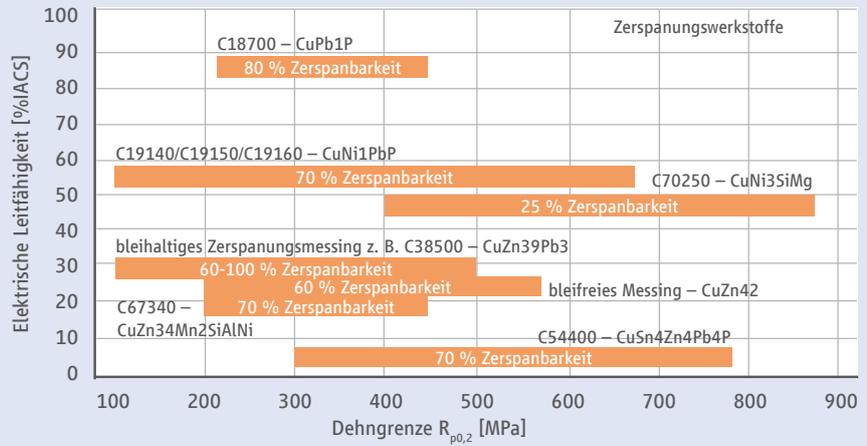
Für integrierte Schaltkreise hat sich der Werkstoff CuFe2P (C19400) etabliert, der sowohl die Leitung von Strömen als auch die mechanische Stabilität der Leitbahnen sicherstellt. Je dünner und schmaler die Leads werden, desto mehr rückt die mechanische Stabilität des Materials in den Verarbeitungsmaschinen in den Vordergrund. In diesen Fällen hat sich die hochfeste, ausscheidungsgehärtete Legierung CuNi3SiMg (C70250) in der Halbleiterindustrie als ein Standard herausgebildet.

11.1.3 Zerspanungswerkstoffe (Zerspanungsdrähte, Stangen)

Einige Bauteile, wie beispielsweise Buchsen und Stecker für Coaxial-Steckverbinder oder massive Einpresskontakte, werden ausschließlich über Zerspanung hergestellt. Bevorzugt verwendete Werkstoffe sind hierbei Zerspanungsmessing, zum Beispiel CuZn39Pb3 (C38500), die sehr gute Zerspanbarkeiten besitzen. Sind höhere Anforderungen an elektrische Leitfähigkeit, Relaxationsbeständigkeit oder Federverhalten gestellt, kommen weitere zerspanbare Kupferlegierungen mit verschiedenen Eigenschaftsschwerpunkten, wie zum Beispiel CuPb1P (C18700) oder CuNi1PbP (C19160) zum Einsatz.

Abb. 11.4: Leitfähigkeits-Festigkeits-Diagramm für Zerspanungswerkstoffe.

Das übliche CuZn39Pb3 wie auch neue, bleireduzierte und bleifreie Ersatzwerkstoffe sind eingeordnet



Quelle: Wieland Werke

Die aktuelle Gesetzgebung drängt aus Gründen des Gesundheits- und Umweltschutzes auf Eliminierung des Bleis aus den Zerspanungswerkstoffen. So müssen nach Auslaufen der Sondergenehmigungen für Blei alternative Werkstoffe zur Anwendung in Betracht gezogen werden. Die Halbzeugindustrie hat sich des Themas

angenommen und bleifreie Lösungen auf Basis anderer Spanbrecher entwickelt, siehe Abbildung 11.4 und Tabelle 11.2. Die Diskussion zu Bleiverbot und möglichen Ersatzwerkstoffen ist in der Elektronikindustrie in vollem Gange und noch lange nicht abgeschlossen. Es liegen noch keine einheitlichen Werkstoffempfehlungen vor.

Tab. 11.2: Traditionelle bleihaltige Zerspanungswerkstoffe und bleifreie Alternativen

Werkstoff	UNS-Nummer	Elektrische Leitfähigkeit [% IACS]	Zerspanungsindex [%]	Bemerkung
Bleihaltige Werkstoffe				
CuZn39Pb3	C38500	25	100	Bleihaltiges Zerspannungsmessing
CuSn4Zn4Pb4P	C54400	15	70	Hochfester Zerspanungswerkstoff, bleihaltig
CuNi1PbP	C19140/-50/-60	55	70	Leitfähiger und relaxationsbeständiger Zerspanungswerkstoff, bleireduziert
CuPb1P	C18700	88	80	Hochleitfähiger Zerspanungswerkstoff, bleireduziert
Bleifreie Werkstoffe				
CuZn42	C28500	31	60	Bleifreies Messing
CuZn34Mn2SiAlNi	C67340		70	Crimpfähiges und relaxationsbeständiges Messing
CuNi3SiMg	C70250	48	25	Hochfester, relaxationsbeständiger Werkstoff, bleifrei

Quelle: Wieland Werke

11.1.4 Trends bei Kupferwerkstoffen

Die Entwicklung zu immer leistungsfähigeren Legierungen ging seit den 1980er-Jahren bis etwa 2005 in großen Schritten voran. In diesem Zeitraum wurden verschiedene ausscheidungsgehärtete Legierungen und die Feinkornbronzonen in den Markt eingeführt. Heute konzentrieren sich die Entwicklungen auf die Optimierung der Leistungsfähigkeit dieser Legierungen und die Erweiterung der herstellbaren Abmessungsbereiche. Es gilt, die Trends in der Elektronikindustrie zu bedienen, die zunehmend höhere Anforderungen an die Werkstoffe stellen. Folgende Trends werden beobachtet:

Miniaturisierung: Miniaturisierung ist in nahezu allen Bereichen der Elektronik zu beobachten. Treiber sind zum einen die Verringerung der Größe eines Geräts, zum Beispiel eines Smartphones. Diese Anforderung an einen Ladestecker bedeutet, dass die Kontaktelemente (des Ladesteckers) trotz zunehmend flacherer Bauweise die gleiche Federwirkung aufweisen und möglichst zusätzlich noch höhere Ladeströme transportieren müssen. Dies ist nur mit hochleitfähigen ausscheidungshärtenden Kupferlegierungen zu erreichen. Deren hohe Leitfähigkeit begrenzt die Stromerwärmung und reduziert somit die Tendenz zur thermischen Relaxation.

Eine weitere Triebkraft ist die steigende Anzahl von Einzelkontakten pro Verbindung auf möglichst gleichbleibendem Volumen. Diese Entwicklung findet in der „3C industry“ (consumer, communication, computing) für IC-Sockel (sockets) und Board-to-Board-Verbindern (B2B connectors) statt. Die Miniaturisierung führt zur Verringerung der Banddicken auf $<0,1$ mm. Dennoch bleiben die Anforderungen an hohe Federkraft, hohe Leitfähigkeit und gute Umformbarkeit bestehen. Dieser Trend ist Treiber für die Entwicklung von Legierungen mit noch höherer Festigkeit auf Basis des Legierungssystems Cu-Ni-Si und Cu-Ni-Co-Si.

Die Steckverbinderindustrie entwickelt miniaturisierte Federkontakte zum Einsatz in multipolaren Signalkontakten zur Übertragung von Sensorsignalen im Automobil. Miniaturisierte Feder-Stift-Kontakte stellen hohe Anforderungen an die Umformbarkeit der Grundwerkstoffe und Beschichtungen durch Konstruktionen mit hohen Umformgraden und engen Biegungen. Diesen Trend begleitet die Halbzeugindustrie mit kundenbezogenen Entwicklungen.

Übertragung höherer Ströme: Dieser Trend geht einher mit hohen Anforderungen an den Basiswerkstoff, nämlich einer Kombination aus hoher Leitfähigkeit, hoher Festigkeit sowie gute Relaxa-

tionsbeständigkeit; letzteres, um der spannungsabbauenden Wirkung von Stromerwärmungen entgegenzuwirken. Ein solches Anforderungsprofil ist zugeschnitten für den Einsatz der hochleitfähigen ausscheidungsgehärteten Legierungen. Auf diesem Werkstoffsektor finden auf Basis der vorliegenden Legierungssysteme den Trend begleitende Werkstoffoptimierungen statt.

Erhöhte Betriebstemperaturen: Neben der oben beschriebenen Erhöhung der zu übertragenden Ströme führt die Elektrifizierung des Automobils zunehmend zu einem dezentralen Einsatz von Steckverbindern, der mit erhöhten Betriebstemperaturen einhergeht, zum Beispiel durch Motornähe. Die sich daraus ergebende Anforderung an den Kupferwerkstoff heißt thermische Relaxationsbeständigkeit, sodass der Werkstoff in der Lage ist, die Federkräfte aufrechtzuerhalten und die Ströme zu übertragen. Die hierfür prädestinierte Werkstoffgruppe sind wiederum die hochfesten und hochleitfähigen, relaxationsbeständigen Kupferwerkstoffe mit Ausscheidungshärtung.

Bleiverbot: Die Halbzeugindustrie hat sich des Themas „Bleiverbot“ angenommen und zwischenzeitlich verschiedene Werkstoff-Lösungen vorgeschlagen, deren Spanbrecher bleifrei sind. Noch hat sich keine bevorzugte Werkstoffgruppe herauskristallisiert. Es ist davon auszugehen, dass dieser Trend an Wichtigkeit zunimmt und verschiedene interessante Entwicklungen auf der Werkstoffseite hervorbringen wird.

11.2 Metallische Beschichtungen

Neben der Herstellung der Kontaktwerkstoffe aus der festen Phase, zum Beispiel auf schmelz- oder pulvermetallurgischem Wege (siehe Kap. 11.4), bietet sich die Herstellung über die flüssige und gasförmige Phase vor allem dann an, wenn dünne Schichten im μm -Bereich benötigt werden, die mit den üblichen Plattiertechniken nicht wirtschaftlich herstellbar sind. Derartige Schichten erfüllen, abhängig von ihrer chemischen Zusammensetzung und Dicke, unterschiedliche Anforderungen. Sie dienen zum Beispiel als Korrosions- und Verschleißschutz oder übernehmen die Funktion einer Kontaktschicht, an die bestimmte technische Anforderungen gestellt werden.

Diese Schichteigenschaften sind bei Steckverbindern, die in großen Mengen produziert werden, typischerweise ideal kombiniert. Steckverbinder sind überall da zu finden, wo über lange Zeit Strom und Spannungen in gleichbleibender Güte übertragen werden müssen. Um dieses zu

erreichen, werden Edelmetalle auf Oberflächen überwiegend selektiv aufgebracht. Wir finden diese Produkte in allen Lebensbereichen, von Automobilen über Weiße Ware bis hin zu Consumer-Elektronik und der Datenübertragung.

11.2.1 Feuerverzinnungen

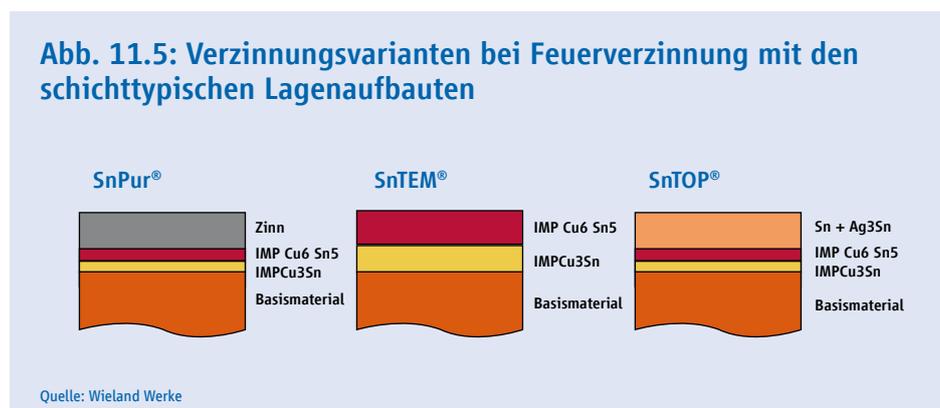
Feuerverzinnung ist eine wirtschaftliche, hoch-industrialisierte Methode zur vollständigen (im Gegensatz zu einer partiellen) Verzinnung von Band-Werkstoffen. Das Band wird abgewickelt, entfettet, aktiviert und durch ein Bad aus schmelzflüssigem Zinn geleitet. Nach Verlassen des Zinnbads wird das an der Oberfläche haftende flüssige Zinn abgeblasen oder abgestreift. Die verbleibende beidseitige Zinnbeschichtung mit einer definierten, gleichmäßigen Schichtdicke erstarrt in einer Kühlstrecke. Der Regelkreislauf zur Einstellung einer definierten Schichtdicke erfolgt über Schichtdickenmessung und Abblasdruck.

Während der heißen Phase des Feuerverzinnungsprozesses kommt es zu einer Reaktion

zwischen dem Zinn und dem Kupfer des Grundmaterials. Es bildet sich die sogenannte intermetallische Phase (IMP) in zwei Abstufungen: die kupferreichere Cu₃Sn-Phase sowie die zinnreichere Cu₆Zn₅-Phase. Diese Phase und ihr Bildungsmechanismus in der Wärme sorgen für eine spannungsarme Zinnschicht mit minimiertem Risiko zur Whiskerbildung. Whisker sind feine haarartige Zinnstrukturen, die unter bestimmten Bedingungen aus Zinnschichten herauswachsen und im schlimmsten Fall elektrische Kurzschlüsse zwischen benachbarten Leitern verursachen können.

Neben Reinverzinnungen werden auch thermisch durchgetemperte Schichten angeboten, die komplett aus intermetallischer Phase bestehen, sowie eine Zinn-Silber-Beschichtung. Der Aufbau der verschiedenen Lagen in den Verzinnungsschichten ist in Abbildung 11.5 dargestellt. Die typischen Schichtdicken und ihre Vorteile für verschiedene Anwendungen zeigt Tabelle 11.3.

Abb. 11.5: Verzinnungsvarianten bei Feuerverzinnung mit den schichttypischen Lagenaufbauten



Tab. 11.3: Typische Schichtdicken von Feuerverzinnungen und deren Anwendungen.

Verzinnungsvariante	Schichtdicke	Anwendung
Reinzinn	0.7–2.0 / 1–2 µm 1–3 / 2–4 µm	niedriger Kontaktwiderstand
	2–5 / 3–7 / 5–10 µm	zusätzlich: sehr gute Lötbarkeit
Zinn-Silber	0.7–2.0 / 1–2 µm 1–3 / 2–4 µm 2–5 / 3–7 / 5–10 µm	<ul style="list-style-type: none"> • reduzierte Steck- und Ziehkräfte, • höhere Einsatztemperaturen (bis ca. 160 °C) • bessere Korrosionsbeständigkeit
Zinn getempert	0.7–2.0 / 1–2 µm	<ul style="list-style-type: none"> • reduzierte Steck- und Ziehkräfte • geringer Verschleiß bei Mehrfachsteckung

Quelle: Wieland Werke

11.2.2 Galvanische Beschichtungen

Zur galvanischen Abscheidung von Metallen werden wässrige Lösungen (Elektrolyte) verwendet, die die abzuscheidenden Metalle in Form von Ionen (z. B. gelöste Metallsalze) enthalten. Unter dem Einfluss eines elektrischen Potenzialfelds zwischen der Anode und dem kathodisch geschalteten Beschichtungsgut gelangen positiv geladene Metallionen zur Kathode, um sich dort als Metall auf der Oberfläche abzuscheiden. Je nach Einsatzanforderungen an die Beschichtungen, in der Elektrotechnik und Elektronik, kommen unterschiedliche galvanische Bäder (Elektrolyte) zur Anwendung. Die typischen Schichtdicken der abgeschiedenen Schichten liegen im Bereich von 0,1 µm bis 30 µm. Anwendungsbeispiele für die Beschichtung von Teilen oder Bändern (auch vorgestanzt) sind in Abbildungen 11.6 und 11.7 dargestellt.

Abb. 11.6: Teile mit Edelmetallbeschichtungen



Quelle: Doduco Solutions

Abb. 11.7: Bänder und vorgestanzte Bänder mit selektiven Edelmetallbeschichtungen



Quelle: Doduco Solutions

Die Gesamtheit der galvanischen Bäder wird in die zwei Hauptgruppen Edelmetallbäder und Unedelmetallbäder und die entsprechenden Beschichtungen unterteilt:

11.2.2.1 Edelmetallbeschichtungen

a. Goldbeschichtungen

Um das Anforderungsprofil für Kontaktoberflächen vollständig zu erfüllen, kommen zum Beispiel bei Schwachstrom-Steckverbindern nur wenige Edelmetalle bzw. edelmetallhaltige Legierungen infrage. Im technischen Bereich wird das Vergolden vor allen Dingen wegen der ausgezeichneten elektrischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften des Golds angewandt.

Feingoldbeschichtung: Die Hauptanwendung von Feingoldschichten sind Bondanwendungen mit Au- oder Al-Draht in der Verbindungstechnik. Die typischen Schichtdicken der abgeschiedenen Schichten liegen im Bereich von 0,03 µm bis 0,5 µm. Ein weiterer Vorteil von Feingoldschichten ist, dass sie ohne aggressive Flussmittel sehr gut lötlbar sind.

Da Feingoldschichten nur eine sehr geringe Härte (HV 50) aufweisen, sind sie für elektro-mechanische Beanspruchungen nicht geeignet. Werden höhere Härten für mechanisch belastete Kontaktstellen erforderlich, werden Feingoldbäder mit metallischen Zusätzen verwendet. Diese werden als Hartgoldbäder bezeichnet.

Hartgoldbeschichtungen: In den Hartgoldbädern werden härtende, metallische Zusätze verwendet. Typischerweise kommen kobaltgehärtete (Co) bzw. nickelgehärtete (Ni) Goldschichten (HV 160–200) zum Einsatz. Die typischen Gehalte in den abgeschiedenen Schichten betragen bei Co 0,3 Prozent und bei Ni 0,1 Prozent. In den letzten Jahren wurden weitere Hartgoldbadtypen entwickelt. In diesen neuen, alternativen Systemen kommen die Elemente Eisen und Wolfram zum Einsatz. Es wird beobachtet, dass die Nachfrage in Europa für diese Neuentwicklungen im Bereich Elektronik/Elektrotechnik aus kommerziellen Gründen eher verhalten ist.

Im Bereich der Verbindungstechnik für unterschiedlichste Anwendungen (Steckkontakte, Schalter, Schleifer usw.) werden in Europa überwiegend Co-additivierte Goldbäder verwendet. Im amerikanischen Raum kommen dagegen auch vermehrt Ni-additivierte Goldbäder zum Einsatz. Die typischen Schichtdicken der abgeschiedenen Schichten liegen im Bereich von 0,1 µm bis 3 µm.

b. Silberbeschichtungen

Obwohl Silber die beste elektrische und thermische Leitfähigkeit besitzt und das mit Abstand kostengünstigste Edelmetall ist, sind seinem Einsatz als Kontaktoberfläche durch die starke Neigung zur Ausbildung von Silbersulfid-Belägen (Ag₂S) in schwefelhaltiger Atmosphäre und sein vergleichsweise schlechtes Abriebverhaltens deutliche Grenzen gesetzt. Für Kontakte mit hohen Steckkräften werden Silberschichten seit Jahrzehnten mit Erfolg eingesetzt, allerdings kommt Silber für Schwachstromkontakte bei niedrigen Kontaktkräften als Kontaktwerkstoff nicht in Betracht.

Silberbäder, die keine weiteren Zusätze enthalten, ergeben matte, weiche Niederschläge (HV ~ 70). Sie werden vor allem wegen ihrer hohen elektrischen Leitfähigkeit als Kontaktschichten zum Beispiel in Steckverbindern eingesetzt. Insbesondere für Hochfrequenzanwendungen ist Silber aufgrund der hervorragenden Leitfähigkeit und der positiven Eigenschaften für den Skin-Effekt die ideale Schicht. Die für dekorative Zwecke benötigten Eigenschaften, wie Glanz und Abriebfestigkeit, werden durch spezielle Badzusätze erreicht. Die typischen Schichtdicken der abgeschiedenen Schichten liegen bei Silber im Bereich von 1 µm bis 5 µm.

c. Palladiumbeschichtungen

Palladium wird im Bereich elektrischer Kontakte meist als Legierungsschicht mit ca. 20 Prozent Nickel abgeschieden (HV 280–350). Als alternative Schicht für Drahtbondanwendungen gewinnt Reinpalladium als Endoberfläche zunehmend an Bedeutung.

Einige Jahre nach der erfolgreichen Einführung der sauren Palladiumelektrolyte Anfang der 80er-Jahre kamen die ersten Palladium-Nickel-Elektrolyte auf den Markt. Moderne, schwach alkalische ammoniakalische Elektrolyte sind mittlerweile sehr robust und erreichen deutlich höhere Abscheidungs-geschwindigkeiten als Hartgoldbäder.

Neben dem Einspareffekt bieten Palladium-Nickel-Elektrolyte (80/20) gegenüber Reinpalladium wie zum Beispiel durch höhere Härte, bessere Abriebbeständigkeit und geringere Steckkräfte auch technologische Vorteile. Die typischen Schichtdicken der abgeschiedenen Palladiumschichten liegen im Bereich von 0,1 µm bis 1 µm.

11.2.2.2 Unedelmetallbeschichtungen

a. Zinn und Zinnlegierungen

Reinzinn- und Zinn-Legierungsschichten werden sowohl als matte wie auch als glänzende Endschichten für die Herstellung lötlbarer Oberflächen verwendet. Bei der Leiterplattenherstellung dienen sie auch als Ätzresist zur Leiterbildstrukturierung nach der galvanischen Kupferabscheidung.

Reinzinn: Eine wichtige Größe von Zinnschichten sind die miteingebauten Kohlenstoffverbindungen, die zu Kohlenstoffgehalten in den Schichten <150 ppm führen. Tendenziell beinhalten glänzende Schichten einen höheren (ca. 100 ppm) Gehalt an Kohlenstoff als matte Schichten (<50 ppm). Wobei in den letzten Jahren auch Glanzschichten mit sehr niedrigem Kohlenstoffgehalt auf dem Markt verfügbar sind. Die Lötfähigkeit von glänzenden Zinnschichten hat sich dadurch wesentlich verbessert.

Zinnlegierungen: Zinnlegierungen werden ebenfalls als glänzende und matte Schichten abgeschieden. Als Legierungselement in beiden Systemen wurde klassisch Blei verwendet, wobei typischerweise 3 bis 5 Prozent Pb und in Sonderfällen bis zu 40 Prozent Pb zulegiert wurden. Die Bleiverbotsverordnung seit dem Jahrtausendwechsel hat die Verwendung von Blei und Bleiverbindungen in Produkten neu geregelt. Alternative Metalle wie zum Beispiel Silber, Wismut oder Indium sind heute Hauptbestandteil von galvanisch abgeschiedenen Zinnlegierungen. Ein wichtiger Aspekt der Legierungszusätze ist unter anderem die damit erzielte Erniedrigung des Schmelzpunkts gegenüber reinem Zinn. Eine weitere wichtige Eigenschaft ist die reduzierende Wirkung auf die Whiskerbildung.

b. Nickelbeschichtungen

Nickelschichten werden überwiegend als Diffusionsbarriere beim Vergolden von Kupfer oder als Zwischenschicht beim Verzinnen eingesetzt. Des Weiteren kann Nickel als Zwischenschicht zur Erhöhung der Härte bei Reibverschleiß-Aspekten eingesetzt werden. Meistens werden beide Aspekte (Diffusionsbarriere und Härte) in Kombination betrachtet und angewendet.

Reinnickelschichten: Reinnickelschichten werden glänzend und matt abgeschieden. Die Rauheit der glänzenden Schichten ist deutlich geringer als bei matten Schichten. Die Duktilität ist bei matten Schichten deutlich höher. Diese Schichten ermöglichen eine nachgeschaltete Verformung der galvanisierten Produkte. Typischerweise werden Schichtdicken zwischen 1,5 µm und 3 µm abgeschieden. Auch eine Kombination

beider Nickelschichten ist ein gängiges Verfahren. Reinnickelschichten haben meist den Zweck, optisch ansprechende Oberflächen zu erzeugen und nicht für verbesserten elektrischen Kontakt zu sorgen.

Nickel-Phosphor-Beschichtung: Auch bei den Nickelbädern gibt es Legierungsabscheidungen. Die Nickel-Phosphor-Systeme (NiP) werden mit einem Legierungsanteil zwischen 5 und 15 Prozent an Phosphor abgeschieden. Je nach Phosphoranteil wird eine erhöhte Korrosionsbeständigkeit bzw. eine höhere mechanische Härte der Schichten erzielt. Die NiP-Schichten sind ideal für Drahtbondprozesse geeignet.

c. Kupferbeschichtungen

Kupferschichten werden in der Elektronik und Elektrotechnik überwiegend als Zwischenschichten eingesetzt. Gründe hierfür liegen zum einen in der guten Haftvermittlung zwischen Basismaterial und der nachfolgenden Schicht, zum anderen wird Kupfer in vielen Fällen aufgrund seiner guten elektrischen Leitfähigkeit auch als Zwischenschicht aufgebracht. Abhängig von den Basiswerkstoffen werden cyanidische oder saure Kupferelektrolyte eingesetzt.

Cyanidische Kupferbäder ermöglichen bei eisenbasierten Werkstoffen eine haftfeste Abscheidung der Zwischenschicht. Saure Kupferbäder haben gegenüber cyanidischen Kupferbädern eine deutlich höhere Abscheideleistung und können auf sehr vielen Basiswerkstoffen angewendet werden.

Die weitere Entwicklung der galvanisch abgeschiedenen Schichten geht in Richtung Legierungen und muss die erhöhten Einsatztemperaturen ($T > 150\text{ °C}$) und die steigenden Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Schichten berücksichtigen. Anforderungen aus dem Bereich der Elektromobilität erfordern angepasste Schichtdicken und Schichteigenschaften analog zum Niederspannungsbereich, das heißt für die Beherrschung eventuell auftretender Lichtbögen.

11.2.3 Vakuum-Beschichtungen (PVD)

Unter der Bezeichnung PVD (physical vapor deposition) werden Beschichtungsverfahren zusammengefasst, bei denen die Abscheidung von Metallen, Legierungen sowie chemischen Verbindungen im Vakuum durch Zufuhr thermischer oder kinetischer Energie mittels Teilchenbeschuss erfolgt.

In diesen Prozessen wird der Schichtwerkstoff unter Vakuum atomar von der Quelle zum Substrat transportiert und dort als dünne Schicht (einige nm bis ca. $5\text{ }\mu\text{m}$) niedergeschlagen. Damit können auch Schichten und Schichtkombinationen, die aus wässrigen Systemen nicht darstellbar sind, aufgebracht werden, wie zum Beispiel Al, W, Mo etc. Weiterhin sind PVD-Schichten auch auf nicht leitenden Substraten wie zum Beispiel Keramik, Kunststoff oder Glas applizierbar.

Mit dem PVD-Verfahren aufgebrachte Schichten werden unter anderem für Kontaktzwecke, zum Beispiel bei Minikontakten, in der Elektrotechnik und Elektronik, zur Belotung in der Verbindungstechnik, zur Metallisierung von Nichtleitern sowie in der Halbleitertechnik, Sensorik, Optoelektronik, Optik und Medizintechnik eingesetzt. Einige beschichtete Teile sind in Abbildung 11.8 zu sehen.

Diese Beschichtungstechnik eröffnet eine Vielzahl an Entwicklungsmöglichkeiten und wird in Zukunft verstärkt im industriellen Maßstab in der Produktion eingesetzt werden. Dabei sind insbesondere die Aufhängung und die Bewegung der Teile bei der Beschichtung zu optimieren.

Abb. 11.8: Teile mit Edelmetallbeschichtungen



Quelle: Doduco Solutions

11.2.4 Plattierungen für spezielle Anwendungen

a. Plattierungen für Bondanwendungen

Für Schichtsysteme auf Schaltungsträgern und Hybridgehäusen (Leadframes) kommen neben galvanisch aufgetragenen Gold- und Silberschichten häufig AlSi-plattierte Halbzeuge zum Einsatz (meist wird die Legierung AlSi1, analog zu den Bonddrähten, in einer Schichtdicke von 20–80 µm verwendet). Bei der Herstellung der Plattierung wird die AlSi-Legierung mit dem Träger aus Kupfer oder einer Kupferlegierung durch Kaltwalzen verbunden (Walzplattierung). Voraussetzung für die stoffschlüssige Verbindung zwischen den beiden Komponenten ist eine geeignete Vorbehandlung der Trägeroberfläche, ein hoher Umformgrad beim Plattiervorgang und eine anschließende Diffusionsglühung. Je nach Anforderung an die Montagetechnik des Endprodukts, zum Beispiel Steckverbindung oder Lötanschluss, werden die plattierten und vorgestanzten Bänder häufig im Anschlussbereich mit einer galvanischen Hartgoldschicht oder einer Oberflächenschicht aus Zinn bzw. einer Zinn-Legierung versehen. In den meisten Anwendungsfällen werden Stanzteile aus den plattierten Bändern mit Kunststoff umspritzt oder in Kunststoffformteilen montiert und dienen als Gehäuse für elektrische Baugruppen zum Beispiel in der Automobil-, Kommunikations-, Hausgeräte- und Consumertechnik.

b. Plattierungen für neue Anwendungen

Ein neues Verbundmaterial – AlCunnect – aus den Elementen Aluminium und Kupfer wird durch einen Kaltwalzumformprozess und anschließende Diffusionsglühung in flächiger oder Stirnkanten-Plattierung hergestellt. Es entsteht ein Material, das einerseits gute elektrische und mechanische Eigenschaften mit andererseits deutlich reduziertem Gewicht kombiniert. Dadurch kann bei gleichen elektrischen Kennwerten das Gesamtgewicht halbiert werden. Das sich einstellende Korrosionspotenzial kann durch geeignete Beschichtungen (z. B. mit galvanisch Nickel- und Zinn-Schichten oder mit UV-aushärtbaren Lacken) beherrscht werden. Das Material findet zum Beispiel als Übergangsmaterial zwischen der Kupfer- und der Aluminium-Verkabelung zunehmend Anwendung im Bereich der Elektromobilität und der Akkumulatortechnik. Außerdem eignet es sich für Kühlkörper in der Leistungselektronik.

11.3 Kontaktwerkstoffe für lichtbogenbelastete Kontakte

11.3.1 Lichtbogenbelastete Kontaktwerkstoffe

Auch im Bereich der Leistungselektronik werden zukünftig elektromechanische Schaltkontakte benötigt. Sie kommen insbesondere dann zum Einsatz, wenn Eigenschaften wie Sicherheit (Personensicherheit wie auch Störsicherheit) durch eine galvanische Trennung, geringe Verlustleistung und somit geringe Erwärmung bei Dauerstromführung, besonders anspruchsvolle elektrische Lasten (starke Induktivitäten oder hohe Einschaltströme) oder die Kurzschlussfestigkeit im Vordergrund stehen.

Diese Anforderungen werden je nach Anwendungsbereich durch elektromechanische Geräte wie Taster, manuelle Schalter, Relais, Schütze oder Schutzschaltgeräte erfüllt.

Die in ihnen verwendeten Kontaktwerkstoffe sind für die jeweilige Funktion und die hier auftretenden Lichtbogenbelastungen optimiert und bedürfen bei sich ändernden Anforderungen weiterer Anpassungen.

11.3.2 Kontaktwerkstoffe für Relais und manuelle Schalter

In diesem Anwendungsfall haben sich heterogene Kontaktwerkstoffe auf der Basis von Silber mit Nickel (Ag/Ni) für kleinere Schaltströme (5 A bis typisch 200 A) sowie Silber mit Zinnoxid (Ag/SnO₂) oder Silber mit Zinkoxid (Ag/ZnO) für erhöhte Schaltströme (bis typisch 5 kA) sehr bewährt. Es ist davon auszugehen, dass die verbliebenen vereinzelt Anwendungen des Kontaktwerkstoffs Silber mit Cadmiumoxid (Ag/CdO) wegen der toxischen Wirkung des Cadmiums und der sich hieraus ergebenden gesetzlichen Einschränkungen für viele Anwendungen insgesamt vom Markt genommen werden.

Die Abhängigkeit der Schalteigenschaften bei Silber-Metalloxid-Kontaktwerkstoffen vom Silbergehalt, von der Art und Menge der verwendeten Additive (wie Wismutoxid, Kupferoxid oder Wolframoxid), der Gefügehomoogenität, dem Herstellprozess und der Verbindungstechnik hat zu einer Reihe von unterschiedlichen Werkstoffqualitäten zur Lösung spezifischer Aufgabenstellungen geführt (Beispiel siehe Abb. 11.9). Hierbei hat sich insbesondere gezeigt, dass für das Schalten induktiver DC-Lasten ein sehr feinkörniges Gefüge Vorteile aufweist. Im Gegensatz zu der bei den meisten Verbundwerkstoffen verwendeten Herstellweise Pulvermetallurgie werden diese sehr feinkörnigen

Kontaktwerkstoffe typischerweise auf dem Weg der inneren Oxidation unter Verwendung des Zusatzes Indium hergestellt. Diese Werkstoffe, üblicherweise in einem Dickenbereich von 0,4 mm bis 3 mm eingesetzt, haben auch, bedingt durch die erhöhte Härte (weichgeglüht HV1 100 gegenüber HV1 60 für vergleichbare PM-Werkstoffe), gewisse Anwendungsvorteile.

Es wird erwartet, dass die Optimierung vorhandener Werkstofffamilien für besondere Anforderungen fortgesetzt wird. Gerade vor dem Hintergrund der zunehmenden Bedeutung von DC-Stromkreisen ist mit einer dynamischen Weiterentwicklung der hierfür benötigten elektromechanischen Schaltgeräte und somit der in ihnen verwendeten Kontaktwerkstoffe zu rechnen. Hierbei können Eigenschaften wie eine Reduktion der Materialwanderung im Gleichstrom-Lichtbogen oder ein verbessertes Lichtbogenlaufverhalten beim Ausschaltvorgang im Vordergrund stehen. Ein möglicher weiterer Optimierungsbedarf kann sich im Bereich elektronischer Zähler (Smart Meter) ergeben: Hier kommen bistabile Relais (latching relay) zum Einsatz, bei denen von den verwendeten Kontaktwerkstoffen eine hohe Sicherheit gegen statisches Verschweißen bei dem Führen von Kurzschlussströmen verlangt wird.

Bei der weiteren Optimierung der Silber-Zinnoxid-Werkstoffe in Richtung erhöhte Verschweißresistenz bei Einschaltvorgängen hochenergieeffizienter Motoren werden die Ansätze „Wirkzusätze“ sowie „Gefügeverfeinerung“ auch in Zukunft eine wichtige Rolle spielen.

Abb. 11.9: Gefügebild des pulvermetallurgischen Kontaktwerkstoffs Silber-Zinnoxid 14 WPA



Quelle: Doduco Contacts and Refining

11.3.3 Kontaktwerkstoffe für Schutzschalter

Mit den Anforderungen „Hohe Verschweißresistenz beim Einschalten von Kurzschlussströmen“ sowie „Sicheres Ausschalten von Kurzschlüssen“ haben sich in dieser Schalterfamilie insbesondere heterogene Kontaktwerkstoffe aus Silber mit Graphit (Ag/C), Silber mit Wolfram (Ag/W), Silber mit Karbiden (z. B. Ag/WC) sowie Mischformen wie Silber mit Karbiden und Graphit (z. B. Ag/WC-/C-Werkstoffe) bewährt, die in den Schaltgeräten in der Regel als asymmetrische Werkstoffpaarungen zum Einsatz kommen. Speziell im Bereich der Motorschutzschalter kommen auch Silber-/Metalloxid-Werkstoffe zum Einsatz. Auch bei diesen Werkstofffamilien sind die erzielbaren Schalteigenschaften wesentlich bestimmt vom Silbergehalt, den Wirkkomponenten, der Gefügeausprägung wie Feinheit und Verteilung der Komponenten sowie dem Herstellprozess (Einzelpresstechniken oder Strangpressen) und bedürfen für das Erfüllen sich ändernder Anforderungen gezielter Optimierung. Hierbei dürften neben der grundsätzlichen Zielrichtung der Verminderung des Materialverlusts bei Lichtbogenwirkung spezifische Anforderungen (wie reduzierte Materialwanderung) beim Schalten von DC im Fokus stehen.

Insbesondere bei Schutzschaltern für DC-Anwendungen für Spannungen bis 1.500 V DC (PV, e-Mobility) sind weitere Verbesserungen von Schaltgeräten und Kontaktwerkstoffen zu erwarten, wobei eine Erhöhung der Laufgeschwindigkeit des Ausschalt-Lichtbogens auf den Kontaktauflagen zu einer schnelleren Ausschaltung von Kurzschlussströmen beitragen kann.

11.3.4 Kontaktwerkstoffe für Schütze in Parallelstromkreisen

Um den hohen Aufwand für Kühlleistung von Baugruppen der Leistungselektronik zu verringern, kommen häufig elektromechanische Schalter (insbesondere Schütze) in Parallelschaltung zur Anwendung. Im bestimmungsgemäßen Betrieb erfolgen die Schalthandlungen des Schützes lichtbogenfrei. Entsprechend sind für das Schütz geringe Kontaktwiderstände und damit ein günstiges Erwärmungsverhalten essenziell. Im Falle eines Versagens der Elektronik sind aber auch gewisse Schalthandlungen mit Lichtbogenbelastung sicher zu beherrschen.

Werden bisher für diesen Anwendungsfall häufig traditionelle Geräte- und Kontaktwerkstoffe wie Ag/Ni oder Ag/SnO₂ der üblichen Zusammensetzungen genutzt, so werden in Zukunft für die Anforderungen dieses Marktsegments maßgeschneiderte Geräte und angepasste Kontaktwerkstoffzusammensetzungen erwartet.

11.3.5 Genereller Trend zur Kostenreduktion

Allen drei genannten Anwendungsbereichen für elektromechanische Schalter ist gemeinsam, dass aus Kostengründen die Reduktion der Schaltgeräte-Baugrößen fortschreiten wird. Für die verwendeten Kontaktwerkstoffe ergeben sich hieraus erhöhte Anforderungen, da zum Beispiel die thermische Belastung zunimmt.

Darüber hinaus ist eine Kostenreduktion der Kontaktmaterialien selber insbesondere durch eine Verminderung der Menge des benötigten Edelmetalls Silber anzustreben. Dies kann auf verschiedene Art und Weise realisiert werden:

- Durch verbesserte Schalteigenschaften optimierter Werkstoffe wie Ag/SnO_2 und Ag/WC/C und die damit mögliche Volumenreduktion der Kontaktplättchen.
- Durch die Änderung der Zusammensetzung hin zu erhöhten Anteilen von Unedelmetallkomponenten, wie es bereits mit der weitverbreiteten Verwendung von Ag/SnO_2 mit 14 Prozent statt 10 oder 12 Prozent Oxidgehalt begonnen wurde.
- Durch die Substitution des Silber-Rückens durch Kupfer bei Zweischicht-Kontaktwerkstoffen wie Ag/SnO_2 .

11.4 Werkstoffe für die Leistungselektronik

Das Kernstück der Leistungselektronik bilden Leistungshalbleitermodule, die in unterschiedlichsten Schaltungstopologien und geometrischen Ausführungen eingesetzt werden. Der generelle Aufbau dieser Leistungshalbleiterbauteile ist jedoch vergleichbar, unabhängig davon, ob sie als gemoldetes Bauelement, als klassisches Modul oder als eingebettetes Modul realisiert werden. Die für den Aufbau der Leistungshalbleiterbauteile verwendeten Materialien und Technologien können sich dabei aber signifikant unterscheiden.

Unabhängig von der Bauform der Leistungshalbleitermodule sind die Werkstofftrends für die Leistungselektronik getrieben von den stetig steigenden Anforderungen, das heißt von höheren Leistungsdichten bei gleichzeitiger Verbesserung der Zuverlässigkeit sowie Nachhaltigkeit auf der einen Seite und einem erhöhten Kostendruck auf der anderen Seite.

Abb. 11.10: Leistungsmodul Packaging

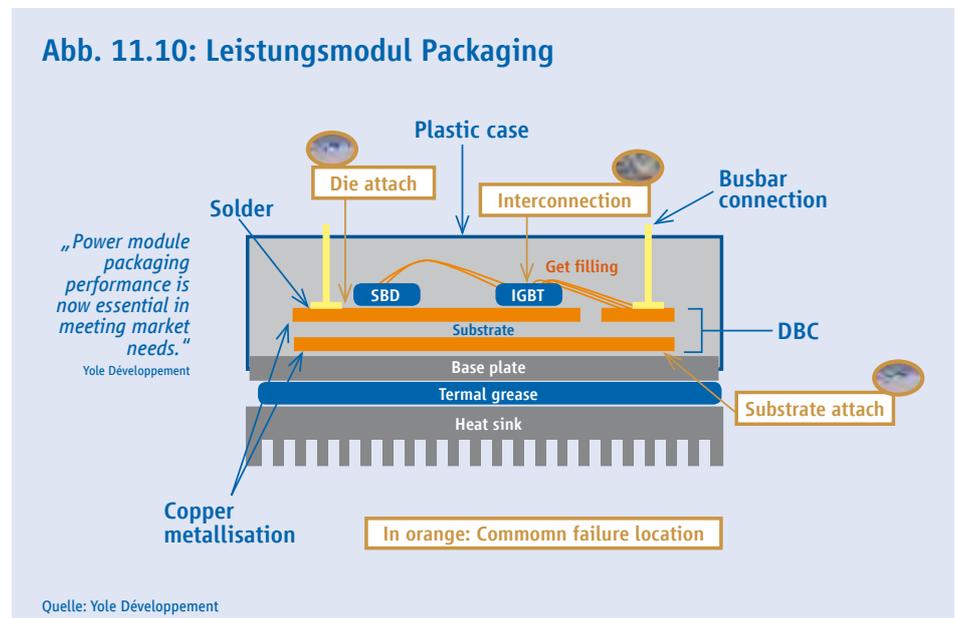
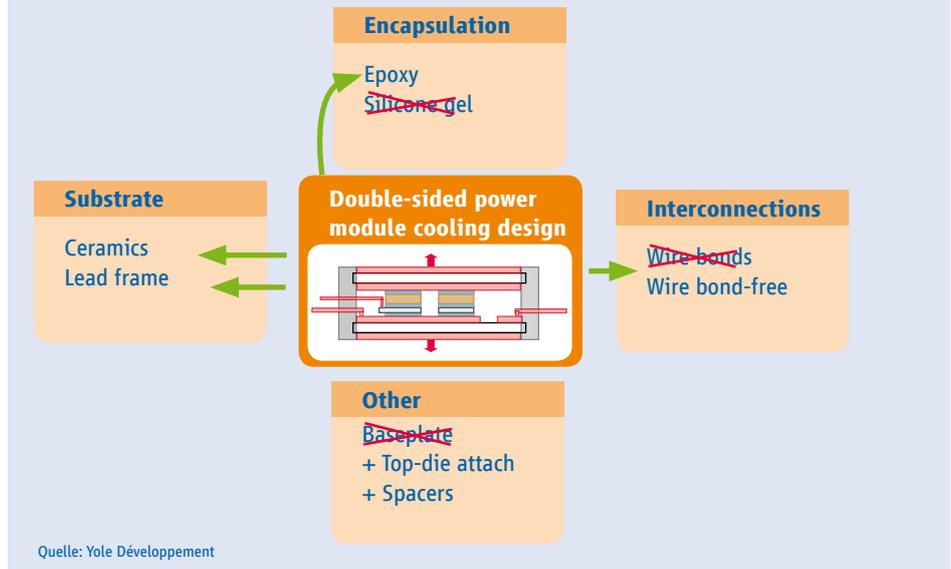


Abb. 11.11: Einfluss des Designs des Leistungsmoduls auf die Auswahl der Packaging-Materialien



Tab. 11.4 : Wichtige Themen bei Substrate and Packaging

Main Statements identified			
Substrate and Packaging	Cost Reduction		
	Increase of PD ↑	Imp. Robust/Rel. ↑	↑
Improved ceramic materials (high temp., pressure, ΔT)		X	
Assembly technology to fulfill reliability requirements of $T_{jop} = 200\text{ °C}$ (220 °C, 250 °C)	X	X	
Improved packaging with reduced parasitics	X		
Embedded power semiconductors and ICs/actives/passives in PCB	X	X	
Die-attach technologies to be explored for higher temp. up to 250 °C and top-level interconnects with lower failure rate, high PC capability and better manufacturability (incl. adhes.)	X	X	
Advanced knowledge of physics and chemistry (sintering is standard but not fully understood)		X	
Insulation and potting/molding materials (PD, R_{th})	X	X	
New improved packaging for fast switching power modules (second source, future standards)			X

Quelle: ECPE

11.4.1 Materialien für Leistungshalbleiter

Im Fokus der Werkstofftrends aufseiten der Leistungshalbleiter stehen seit geraumer Zeit SiC- und GaN-Bauteile (WBG = Wide-Band-Gap Halbleiter). Die effiziente Nutzung dieser WBG-Chips stellt erhöhte Anforderungen an die Technologien und Materialien für die Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) sowie die Gehäuse.

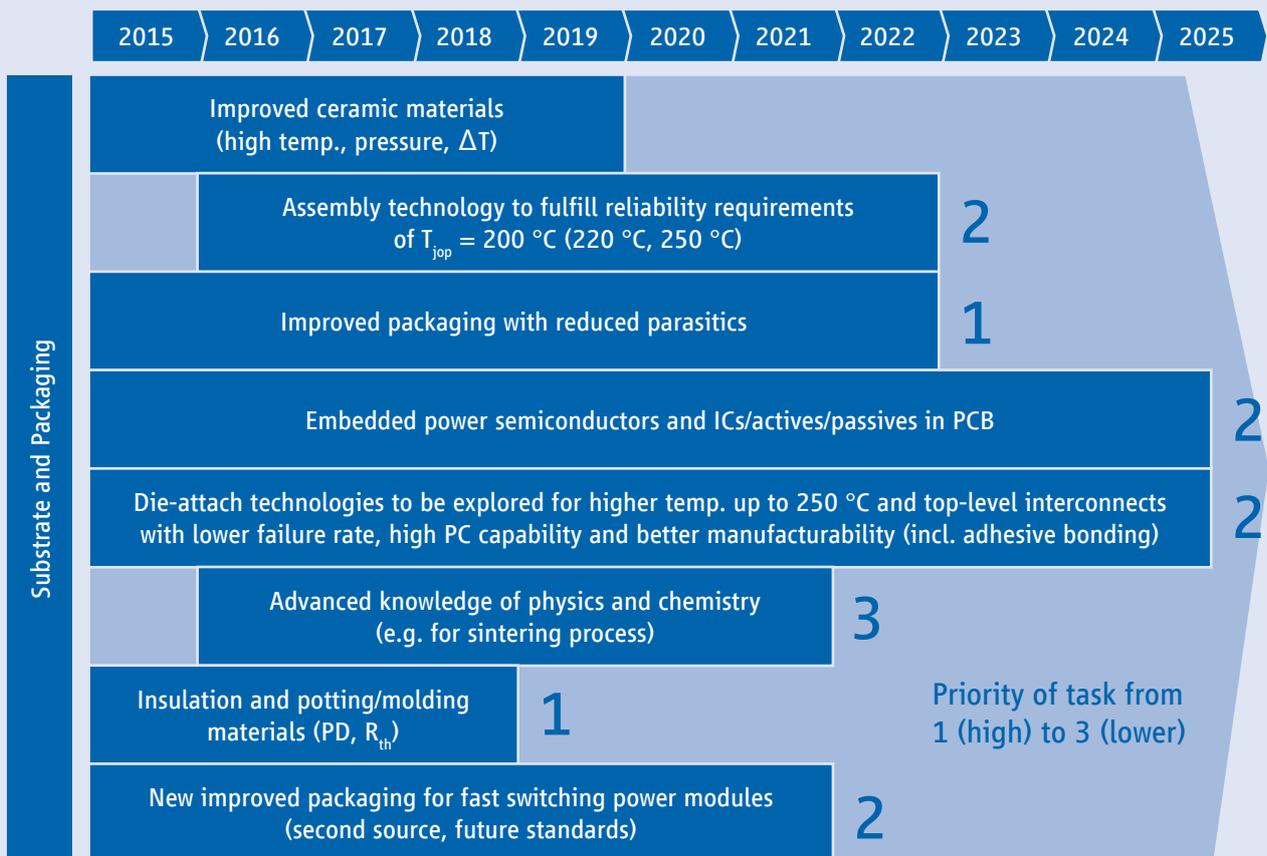
Jedoch sind zur Etablierung neuer Technologien/Materialien in der AVT (z. B. Ag-Sintern, Cu-Drahtbonden, Embedding) teilweise auch Anpassungen in den Metallisierungen der Kontaktflächen von Chipvorder- und -rückseite der Silizium-Halbleiter erforderlich.

11.4.2 Substrate

Die Schaltungsträger (Substrate) stellen in den Leistungselektronik-Baugruppen eine der wichtigsten Komponenten dar. Diese Substrate bestehen typischerweise aus einem beidseitig mit Metallisierungen stoffschlüssig kontaktierten Isolatormaterial. Die Strukturen der Substratmetallisierung müssen teilweise sehr hohe Ströme von einigen 100 A führen, wobei das Isolatormaterial die elektrische Isolation von einigen 1.000 V sicherstellt und gleichzeitig die thermische Weiterleitung der Verlustwärme im gesamten Lebenszyklus gewährleistet. Die Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Schaltungsträger werden dabei meist durch die Applikation vorgegeben.

Abb. 11.12: Zeitplan für Substrate und Packaging

ECPE Roadmap 2015–2025
Automotive & Aerospace Power Electronics



Quelle: ECPE

Die etablierten Materialien und Technologien sind DCB (Direct-Copper-Bonding), DAB (Direct-Aluminum-Bonding) und AMB (Active-Metall-Brazing). Diese werden auch in den nächsten Jahren in den bekannten Ausführungen Verwendung finden. Das heißt, die derzeit entsprechend den Anforderungen (z. B. thermische Leitfähigkeit, Isolationsspannung ...) verwendeten Isolationsmaterialien Aluminiumoxid (Standard und als HT-Ausführung), Aluminiumnitrid (AlN) und Siliziumnitrid (SiN) werden weiter eingesetzt, wobei Verbesserungen der Materialeigenschaften (Bruchzähigkeit, thermische LF, Verarbeitbarkeit) in beschränktem Umfang möglich erscheinen.

Als Substratmetallisierung bleiben Kupfer und in deutlich geringerem Umfang Aluminium unerlässlich. Auch vergleichsweise neue Technologien zum Auftragen von Metallisierungen auf Keramiken (z. B. Kaltgasspritzen, additive Fertigungsverfahren) werden diese Metallisierungen nutzen. Die Oberflächen der Substratmetallisierungen werden aber zukünftig noch stärker an die Erfordernisse der Kontaktierungsprozesse (Die-Attach, Terminal-Montage) angepasst werden. So bieten die Substrathersteller bereits spezielle Oberflächen für das Ag-Sintern an, die sich von den Oberflächen für das klassische Löten unterscheiden (z. B. selektives Ag-Plating, Ni/Au-Oberflächen).

Auch leiterplattenbasierte Substrate (PCB) für die Leistungselektronik können die klassischen Substrate nicht ersetzen, denn diese PCB-Lösungen erfordern angepasste Modul-Konzepte (Embedding).

11.4.3 Lote

Das Löten mit unterschiedlichen Materialien und Verfahren gehört seit Jahrzehnten zu den etablierten Verfahren für die Chip-, Substrat- und Terminalkontaktierung zur Herstellung von Leistungshalbleitermodulen.

Lotmaterialien werden dabei zur elektrischen und thermischen Kontaktierung der Halbleiterchips direkt mit dem Substrat (bzw. Leadframe), dem sogenannten Die-Attach, und beim Clip-Löten zur Kontaktierung der Chipoberseite verwendet. Die Lote können dazu als Pasten, Preforms bzw. Lotdraht verarbeitet werden.

In „Standard“-Leistungsmodulen mit typischen Anforderungen an die Zuverlässigkeit werden die derzeit verwendeten Pb-frei-Lotsysteme (meist SAC-Lote) auch in den nächsten Jahren weiter in großem Umfang eingesetzt, denn diese sind prozesssicher und kostengünstig. Die Aktivitäten der Lotmaterialhersteller zielen hier weiterhin auf die Reduzierung der Voids ab.

Für Anwendungen mit hohen Leistungsdichten (z. B. WBG) können diese SAC-Lote die steigenden Zuverlässigkeitsanforderungen nicht mehr erfüllen, auch weil die am Bauteil im Betrieb auftretenden Temperaturen den Schmelzpunkt dieser Lotmaterialien (z. B. 217 °C) erreichen bzw. überschreiten können.

Die teilweise insbesondere für Hochtemperaturanwendungen noch eingesetzten Hoch-Pb-haltigen Lote (z. B. PbSn5, geringer Preis, hohe Zuverlässigkeit) werden in den nächsten Jahren durch andere, auch zukünftig RoHS-konforme Lotmaterialien (z. B. SnSb-Legierungen, Bi-basierte-Legierungen, Zn-basierte-Legierungen, Innot) oder aber andere Technologien (z. B. Ag-Sintern, TLPB) abgelöst.

11.4.4 Silber-Sinter-Werkstoffe

Das Ag-Sintern im Bereich der Leistungselektronik unterscheidet sich vom klassischen Sintern feinkörniger Pulver dadurch, dass die verwendeten nano- bzw. mikroskaligen Silberpartikel mit organischen Stoffen umschlossen sind, die sich durch thermische Aktivierung bei ca. 200 °C zersetzen und damit den durch Diffusion getriebenen Sinterprozess zwischen den Silberpartikeln ermöglichen. Um den Sinterprozess innerhalb der Ag-Partikel und insbesondere auch an den Grenzflächen der zu fügenden Teile zu ermöglichen, enthalten die Sinterpasten Aktivatoren. Verfahrenstechnisch sind das drucklose Sintern und das Drucksintern (Druck: 2–40 MPa) zu unterscheiden. In den letzten Jahren hat sich das Ag-Sintern als Die-Attach-Technologie und auch zur Kontaktierung der Chipvorderseite als Serienprozess für Leistungsmodule etabliert. Vorteil dieser Silber-Sinter-Kontaktierung sind die hohe thermische Belastbarkeit ($T_s\text{-Ag} = 961\text{ °C}$), die hohe thermische Leitfähigkeit (180–350 W/mK), die geringen Schichtdicken (20–50 µm) und vor allem die hohe thermomechanische Zuverlässigkeit (geringe Fließspannung).

So sind Ag-Sinterpasten in unterschiedlichen Ausführungen von diversen Herstellern verfügbar (z. B. Heraeus, Indium, Kyocera, Alpha ...) und können nicht nur auf edlen Oberflächen wie Au und Ag, sondern auch auf Cu und Ni zuverlässig eingesetzt werden. Die Ag-Sinter-Pastensysteme werden in den nächsten Jahren noch Optimierungen hinsichtlich Reduzierung des Porenanteils in der Sinterschicht (low void) und der Prozessvereinfachung (low pressure, low temperature) erfahren, aber ansonsten in der derzeitigen Form weiter Verwendung finden.

11.4.5 Materialien für das Transient-Liquid-Phase-Bonding (TLPB)

Transient-Liquid-Phase-Bonding ist ein Fügeverfahren, bei dem ein niedrigschmelzendes Material in Kontakt mit einem höherschmelzenden Material steht, wobei das niedrigschmelzende auch eine hohe Diffusionsrate in das höherschmelzende besitzt. Beim Erwärmen dieses Systems bis zum Schmelzpunkt des niedrig schmelzenden Materials wird in den Kontaktbereichen das niedrigschmelzende Material stoffschlüssig in höherschmelzende Verbindungen umgewandelt (z. B. intermetallische Phasen).

Für den Die-Attach in Leistungsmodulen wird das Cu-Sn-Cu-TLBP-Verfahren verwendet. Dabei befindet sich eine Sn-Schicht zwischen dem Chip- bzw. den Substratmetallisierungen aus Cu. Durch den Fügeprozess bei Temperaturen um die 200 °C (ggf. mit zusätzlichem Druck) bilden sich im Verbindungsgebiet die intermetallischen Phasen aus, Cu₃Sn: $T_s > 600$ °C und Cu₆Sn₅: $T_s > 400$ °C. Weitere für den Die-Attach in Leistungsmodulen nutzbare Materialkombinationen sind Ni-Sn -> Ni₃Sn₄: $T_s > 794$ °C , Ag-Sn -> Ag₃Sn: $T_s > 480$ °C und Ag-In -> AgIn₂ / Ag₂In sowie Au-In.

Das einzusetzende TLP-Materialsystem wird durch die Anforderungen der Anwendung sowie die im Prozess verfügbaren Materialien bestimmt.

11.4.6 Reaktive Multischicht-Systeme (RMS)

Reaktive Multischicht-Systeme (Reactive Multilayer Systems) sind dünne Folien bzw. Schichten (Dicke: 20–100 µm), die aus einigen Hundert bis Tausend Lagen sich abwechselnder Bi-Material-Nano-Schichten bestehen (Dicke: 25–100 nm). Bekannte RMS-Materialkombinationen sind Ni/Al, Ti/Al, Zr/Si oder Zr/Al. Diese Bi-Material-Nano-Schichten befinden sich in den RMS in einem metastabilen Gleichgewicht und können durch Aktivierung ihre exotherme Energie freisetzen, die dann lokal begrenzt in Wärme umgesetzt wird (Temperaturen von 800 bis 2.000 °C). Die Aktivierung der RMS-Schichten kann zum Beispiel durch lokale elektrische Entladung (Funken) oder Laser erfolgen.

Werden diese RMS-Folien zwischen zwei Fügepartnern mit einer geeigneten Oberfläche (z. B. Lot) angeordnet und dann aktiviert, werden durch die lokal freigesetzte Wärme nur die Fügepartneroberflächen aufgeschmolzen, die so eine stoffschlüssige Verbindung bilden können. Weil die hohen Temperaturen nur auf den Fügebereich begrenzt sind, werden andere Bereiche der Fügepartner nicht thermisch belastet und somit

wird auch nur sehr wenig mechanischer Stress in der Fügenschicht verursacht. Mit dem RMS können unterschiedliche Materialein miteinander verbunden werden, zum Beispiel Metalle, Keramiken, Thermoplaste.

Im Bereich der Leistungselektronik kann dieses Verfahren beispielsweise zur Kontaktierung von Halbleitern auf Substrate sowie von Substraten auf Kühlkörper eingesetzt werden.

Die thermische Leitfähigkeit der reagierten RMS wird mit 25 bis 30 W/mK angegeben und ist damit etwas geringer als die thermische Leitfähigkeit von Sn-basierten Lotverbindungen. Da auch die Schichtdicken der mit dem RMS-Verfahren hergestellten Kontakte mit denen der Lötverfahren vergleichbar sind, ergeben sich im Bereich Die-Attach und Substrat auf Kühlkörper keine Verbesserungen zu typischen im Bereich der Leistungselektronik eingesetzten Lotverfahren.

Da der Prozessflow für das Fügen mit RMS im Bereich der Leistungsmodulfertigung nur schwer zu automatisieren ist und die Preise für die RMS deutlich über dem von Loten liegen, erscheint die Etablierung dieses Verfahrens als Standardfertigungsprozess in den nächsten Jahren als wenig wahrscheinlich.

Prozessflow (schematisch):

1. Folie passender Abmessung zwischen die beispielsweise mit Sn beschichteten Teile legen
2. Definierten Druck aufbringen (0,1–50 MPa)
3. Zünden der RMS mit Funken oder Laser

Reaktive Multischicht-Systeme (RMS) sind kommerziell verfügbar. Der Einsatz dieser Technologie in Serienprodukten ist bisher noch nicht veröffentlicht.

11.4.7 Leitkleber

Das Kleben mit thermisch/elektrisch leitenden Klebermaterialien ist auf grund seiner einfachen Prozessführung und der meist geringen thermischen Belastung ein seit geraumer Zeit in der Elektronikfertigung genutzter Prozess. Im Bereich der Leistungselektronik müssen diese Leitkleber für den Die-Attach sehr hohen Anforderungen an die thermische sowie elektrische Leitfähigkeit genügen und dürfen auch nur einer geringen Alterung unterliegen, um gegenüber anderen Verfahren (z. B. Löten, Ag-Sintern) bestehen zu können. Erste umfassende Bewertungen zu verfügbaren Materialien und Versuchsklebstoffen von unterschiedlichen Herstellern wurde zum Beispiel in einem grundlegenden Forschungsprojekt untersucht (E. Möller et al.: Schlussbericht „Prozess zum leitfähigen Kleben von Bauelemen-

ten für die Leistungselektronik“, IGF-Vorhaben 491-ZBG, 2016). Das Ergebnis offenbart den aktuellen Status der Leitklebstoffe für die Anwendung in höheren Leistungsbereichen und stellt vor allem Defizite in der thermischen Leitfähigkeit fest, die bei Weitem noch nicht die Werte von gelöteten/gesinterten Bauteilen erreicht (siehe Tabelle 11.4).

Eine relativ neue Materialgruppe im Bereich der Leitkleber sind die Sinterklebstoffe. Diese verbinden die Fügepartner in den Schritten a) Anheften durch eine elastisch wirkende Klebeverbindung und b) mittels thermisch/elektrisch leitfähigem Verbinden durch Sintern der im Klebstoff enthaltenen Silberpartikel. Diese Sinterklebstoffe benötigen meist höhere Prozesstemperaturen (z. B. 180 °C) und längere Aushärtezeiten als klassische Leitkleber. Bisher sind noch keine Serien-Sinterklebstoffe auf dem Markt erhältlich.

Im Bereich der Leitklebstoffe für den Die-Attach im Bereich der Leistungsmodule ist in den nächsten Jahren mit weiteren Werkstoffentwicklungen zu rechnen, denn der Prozess bietet ein hohes Potenzial auch für die Anwendung im Bereich WBG-Halbleiter.

Tab. 11.5: Typische thermische Leitfähigkeiten verschiedener Die-Attach-Materialien

Leitkleber	Lote	Ag-Sintern	TLPB	RMS
1...5 (20) W/mK	35...70 W/mK	100...350 W/mK	35...70 W/mK*	25...30 W/mK

* Cu-Sn TLP

Quelle: Wieland Werke

11.4.8 Bonddraht für das Drahtbenden

Das Drahtbenden ist ein Mikroreibschweißverfahren zum Herstellen elektrisch leitender Kontakte im Bereich der Mikroelektronik. Den unterschiedlichen Technologien (Thermo-Kompressions-Bonden, Thermo-Sonic-Ball-Wedge-Bonden und dem Ultraschall-Wedge-Wedge-Bonden) ist gemeinsam, dass die Bildung der Fügeverbindung durch Diffusionsprozesse erfolgt (d. h. keine flüssige Phase), die durch den zusätzlichen Energieeintrag (Wärme und/oder Ultraschall) beschleunigt werden. Typische Werkstoffe für Oberflächen und Bonddrähte sind Aluminium, Gold, Kupfer, Silber und Platin.

Aufgrund seiner Flexibilität wird das Dick-Drahtbenden mit Aluminium (Durchmesser 150–500 µm) im Bereich der Leistungselektronik zur Kontaktierung der Chip-Oberseiten, als Substratverbindung und als Terminalkontaktierung schon seit mehreren Jahrzehnten eingesetzt. Bei den verwendeten Al-Dickdrähten handelt es sich dabei meist um sehr weiche hochreine Al-Legierungen mit geringen Legierungsbestandteilen. Durch die Legierung mit bis zu 0,5 Prozent Mg und anderen Elementen können die Eigenschaften der Bonddrähte hinsichtlich Stabilität und Korrosionsbeständigkeit beeinflusst werden.

Für die Fertigung von Leistungsmodulen wird das Drahtbenden auch in den nächsten Jahren seine Bedeutung behalten. Durch die Zuverlässigkeitsverbesserungen beim Die-Attach (vor allem durch Ag-Sintern und TLPB) haben sich die Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Drahtbondverbindungen auf der Chip-Oberseite nochmals deutlich erhöht, sodass das etablierte Aluminium durch Kupfer als Bonddrahtmaterial ergänzt wird. Wie Tabelle 11.6 zeigt, hat Cu als Bonddrahtmaterial gegenüber dem Aluminium einige Vorteile. Die Nachteile des Cu-Bonddrahts liegen auf der technologischen Seite, das heißt, höhere Härte/Fließspannung und dickere Oxidschichten sind prozesstechnisch schwerer zu beherrschen. In den letzten Jahren wurden durch die Drahtbondhersteller jedoch deutliche Fortschritte gemacht, sodass nun Cu-Bonddrähte in unterschiedlichen Weichheitsgraden verfügbar sind. Mit dem von Heraeus entwickelten Bonddraht CuCorAl (d. h. Kupferkern mit äußerer Aluminiumplattierung, Bonddraht besitzt 60 bis 70 % Kupferanteil) können so auch bestehende Chip-Metallisierungen gebondet werden.

Tab. 11.6: Vergleich Eigenschaften Bonddraht

Eigenschaften	Einheit	Kupfer	Aluminium
Schmelzpunkt	°C	1083	658
Dichte	g/cm ³	8,9	2,7
Spezifische Wärme (@ 20 °C)	J/gK	0,386	0,900
Wärmeleitfähigkeit	kW/m ² K	39,4	22,2
Wärmeausdehnungskoeffizient	ppm/k	16,5	23,1
Elektrische Widerstandsfähigkeit (@ 20 °C)	10 ⁻⁸ Ω m	1,7	2,7
Elektrische Leitfähigkeit (@ 20 °C)	10 ⁷ /Ω m	5,88	3,65

Quelle: Heraeus

Da Dick-Kupfer-Bondpadmetallisierungen derzeit nur von wenigen Leistungshalbleiter-Chip-Herstellern bereitgestellt werden, wurden alternative Verfahren erarbeitet, um die Vorteile des Cu-Drahtbondens trotzdem nutzen zu können. Dabei werden zum Beispiel mit alternativen Verfahren (z. B. Ag-Sintern) Cu-Draht-bondbare Oberflächen auf die Chip-Oberfläche aufgebracht und mit Cu-Dickdraht kontaktiert.

Aus technologischer Sicht ist anzumerken, dass das Drahtbonden für Leistungsmodule mit beidseitiger Kühlung und für das Embedding nicht geeignet ist.

11.4.9 Vergussmaterialien

Vergusstechnologien finden überwiegend in klassischen Leistungsmodulen Anwendung und dienen zur elektrischen Isolation sowie zum mechanischen Schutz innerhalb des Moduls. Teilweise werden gefüllte epoxidbasierte Vergussmaterialien auch zur mechanischen Stabilisierung als „Konstruktionselemente“ mit in das Moduldesign integriert. In direktem Kontakt mit den Leistungsbauelementen stehen die derzeit vielfach verwendeten ungefüllten, hochreinen Silikon-Verguss-Werkstoffe. Diese Stoffgruppe der 1- bzw. 2-Komponenten-HTV-Silikongele (Hoch-Temperatur-Vernetzung, Additionsvernetzung mittels Platin-Katalysator) wird aufgrund ihrer Eigenschaften (hohe Isolationsfestigkeit, geringes E-Modul) auch in den nächsten Jahren weiterhin eingesetzt werden.

Die mit dem Einsatz von WBG-Halbleitern möglichen höheren Junction-Temperaturen $T_J > 175\text{ °C}$ erfordern hochtemperaturbeständige Vergussmaterialien. Denn diese Vergusswerkstoffe müssen die hohen lokalen Temperaturen im Bereich der Chip-Oberflächen über die gesamte Lebensdauer ertragen, ohne die Isolationseigenschaften zu verschlechtern (UL 1557). In den letzten

Jahren wurden dafür speziell angepasste Silikongele entwickelt und auf den Markt gebracht.

Conformal Coatings (z. B. Parylene) stellen zwar prinzipiell auch Lösungsansätze zur Isolation dar, benötigen aber zusätzlichen Aufwand (temporären Schutz der Kontaktflächen, Investitionen in Anlagen oder Logistik) und werden deshalb in den nächsten Jahren keine Serienanwendung in Leistungsmodulen finden.

11.4.10 Gehäuse

Den Gehäusen der Leistungsmodule ist unabhängig von ihrer Ausführung gemeinsam, dass sie die Hochspannung bzw. die hochstromführenden Teile des Leistungsmoduls über die gesamte Betriebszeit isolieren und strukturell stützen müssen.

Typische Anforderungen an die Kunststoffe sind deshalb:

- Hohe Isolationsfestigkeit
- Hohe mechanische Stabilität über gesamten Einsatztemperaturbereich
- Hohe Kriechstromfestigkeit (CTI = Comparative Tracking Index, UL746A)
- Hohe Resistenz gegen elektrolytische Korrosion
- Integrierte Flammschutzausrüstung, um den Anforderungen der UL 94 (bzw. IEC/DIN EN 60695-11-10 und -20) zu genügen

a. Materialien für Gehäuse klassischer Module

Als Basismaterialien für Gehäuse werden thermoplastische Kunststoffe wie PA, PBT, PEEK, LCP, PPS verwendet, die aber mit Glas- und/oder Mineralfasern zwischen 15 und 85 Prozent gefüllt sind. Diese Füllstoffe sind erforderlich, um die Gehäuse auch bei erhöhten Betriebstemperaturen mechanisch stabil zu halten und die thermischen Ausdehnungskoeffizienten zu verringern.

Die FlammSchutzrüstung der Gehäusematerialien wird sich in den nächsten Jahren wegen gesetzlicher Anforderungen zu Antimontrioxid und Halogenfreien (z. B. Br) meist auf Basis von auf Phosphor beruhenden Systemen weiterentwickeln.

b. Materialien für gemoldete Leistungsmodule

Die für gemoldete Leistungsmodule genutzten Compounds sind denen von anderen Anwendungen vergleichbar, das heißt epoxybasierte Kunststoffe, die ca. zu 75 bis 90 Prozent mit Glasfasern gefüllt sind. Da die gemoldeten Leistungsmodule jedoch Besonderheiten wie sehr große Abmessungen (L x B x H: 65 x 55 x 8 mm³) aufweisen können und teilweise auch keramische Substrate (z. B. DCB) mitummoldet werden, sind die Eigenschaften der Moldcompounds dementsprechend angepasst. Dies betrifft insbesondere die thermischen Ausdehnungskoeffizienten (CTE), die Glasatemperatur (T_g) und gegebenenfalls die thermische Leitfähigkeit.

Tab. 11.7: Vergleich Eigenschaften Moldcompounds

Leitkleber	Standard	Leistungsmodule	Hochtherm. LF
T _g (°C)	130...165	180...220	160...190
CTE α1 (ppm/K)	12...18	10...14	15...20
CTE α2 (ppm/K)	45...65	40...50	55...65
Therm. LF (W/mK)	0,6...0,8	0,6...0,8	2,0...3,5

Quelle: Heraeus

Die Umstellung auf „grüne“ Moldcompounds ohne Antimontrioxid und Halogene ist in den vergangenen Jahren fast vollständig umgesetzt worden.

Die Gehäusematerialien für das Embedding von Leistungsmodulen werden an dieser Stelle nicht betrachtet.

12 Applikationsfelder / Anwendungsfelder



Quelle: Gunnar Assmy / Fotolia.com

Elektronische Bauelemente, Module und Systeme finden sich in einer Vielzahl von unterschiedlichsten Anwendungen und Applikationsfeldern wieder.

Beispielhaft werden hier Entwicklungen und Trends einiger Applikationen und Anwendungen dargestellt, die entsprechend Rückschlüsse auf mögliche Entwicklungen bei Komponenten zulassen.

12.1 Automobiltechnik/-elektronik

12.1.12 Automobilproduktion und Verbreitung

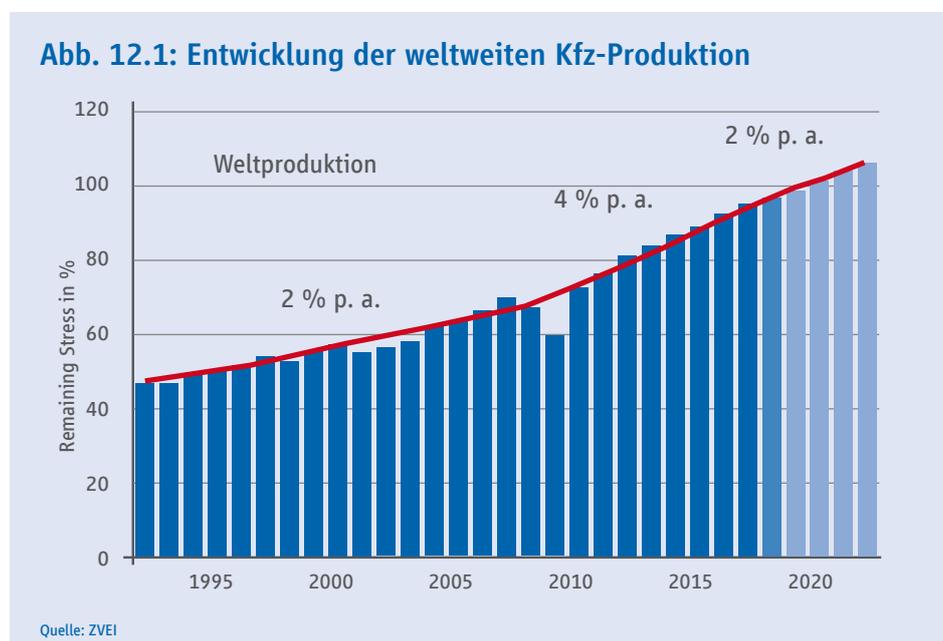
12.1.1.1 Fahrzeugproduktion in Deutschland

Die deutsche Autobranche mit ihren 1.300 Unternehmen erwirtschaftete 2017 einen Umsatz von mehr als 426 Milliarden Euro und ist damit,

gemessen am Umsatz, der bedeutendste Industriezweig Deutschlands. Das spiegelt sich auch am Arbeitsmarkt wider: Über 800.000 Menschen arbeiteten im Jahr 2018 bei Autobauern und deren Zulieferern. Indirekt hängen noch deutlich mehr Jobs von diesem Industriezweig ab. Wissenschaftliche Untersuchungen gehen von noch einmal etwa einer Million Arbeitsplätze aus, die mittelbar von der Autokonjunktur abhängen.

Ein erheblicher Teil dieser Arbeitsplätze ist dabei wiederum direkt oder indirekt mit dem Verbrennungsmotor verknüpft. Würde der Absatz von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ab 2030 in Deutschland verboten werden, hätte das nach Berechnungen des ifo Instituts deutliche Folgen für den Arbeitsmarkt und die Wirtschaftslage. Die Münchner Ökonomen errechneten, dass mehr als 600.000 industrielle Arbeitsplätze und 48 Milliarden Euro Bruttowertschöpfung verloren gehen könnten.

Abb. 12.1: Entwicklung der weltweiten Kfz-Produktion



Zu nicht ganz so gravierenden Beschäftigungseffekten kam das Fraunhofer-Institut in einer 2018 veröffentlichten Studie. Bis 2030 könnte demnach bei „als wahrscheinlich angenommenen Entwicklungen“ jeder zweite Arbeitsplatz der 210.000 Beschäftigten in der Pkw-Antriebstechnik direkt oder indirekt von der Umstellung auf Elektroantriebe und den Produktivitätszuwächsen betroffen sein. Dabei haben die Forscher schon die 25.000 Stellen gegengerechnet, die durch den Elektroantrieb neu entstehen würden.

Verkaufsschlager und Umsatzbringer waren 2018 SUVs mit Verbrennungsmotor: Weltweit war jedes zweite produzierte Auto ein SUV. In Deutschland und dem restlichen Europa sorgte die ungebrochene Nachfrage in diesem Segment 2017 für ein Plus von 30 Prozent gegenüber dem Vorjahr. Und die Fahrzeughersteller setzen auch nach 2018 verstärkt auf diesen Umsatz- und Ergebnisbringer.

12.1.1.2 Fahrzeugbestand national und international

Europas Fahrzeugflotte ist zwischen 2005 und 2015 um 4,5 Prozent auf 252 Millionen Einheiten angewachsen. Mehr gab es nirgendwo auf dem Globus. 2017 war sie noch größer und bestand laut Herstellerverband ACEA aus 259,7 Millionen Pkws und 39,1 Millionen Nutzfahrzeugen.

Auch in Deutschland hat die Zahl der angemeldeten Pkws seit 2008 stetig zugenommen, bis Anfang 2018 auf 46,5 Millionen.

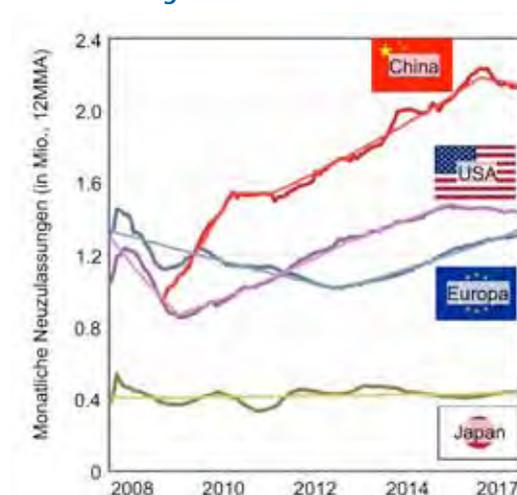
Die Fahrzeugflotte wird dabei in Deutschland und ganz Europa jedes Jahr älter. Im Durchschnitt waren europäische Pkws Anfang 2018 10,9 Jahre alt, die in Deutschland 9,4 Jahre.

Weltweit gibt es heute mehr als 1,2 Milliarden Kraftfahrzeuge, von denen über 900 Millionen Pkws sind. 2035 soll es weltweit zwei Milliarden Kfzs geben. Von den nach Angaben des Verbands der Automobilindustrie 2017 global produzierten 84.766.863 Pkws (5,645 Mio. davon in Deutschland), gingen 35 Millionen nach Asien, gefolgt von Amerika (24 Mio.) und den Nafta-Staaten (20 Mio.). In Europa wurden im gleichen Zeitraum 18 Millionen Pkws verkauft.

12.1.1.3 Verschiebung der Wachstums- und Absatzmärkte

Die Europäer werden im Jahr 2050 nur noch rund 5 Prozent der Menschheit stellen. Damit verändert sich auch Europas Position und Einfluss in der Welt grundlegend.

Abb. 12.2: Regionale Entwicklung der Neuzulassungen von Kfzs



Quelle: ZVEI

Mit 1,4 Milliarden Menschen war China bereits 2018 der größte Absatzmarkt der Erde. Innerhalb von 30 Jahren hat sich der Automarkt dort von fast null auf 26 Millionen Neuzulassungen im Jahr gesteigert. Der Pkw-Absatz wird nach einer Prognose des Center Automotive Research (CAR) 2025 im Reich der Mitte etwa 34,5 Millionen Neuwagen betragen.

Es ist zu erwarten, dass sich alle (westlichen) Autohersteller bis 2025 wegen der hohen Wachstumschancen in Asien, Afrika und Lateinamerika verstärkt diesen Märkten widmen werden.

12.1.1.4 Status E-Mobilität

Wie in den meisten Ländern der Erde war Ende 2017 der Anteil der verkauften Pkws mit alternativen Antrieben auch in Deutschland marginal.

57 Prozent der 2017 in der BRD neu zugelassenen 3,44 Millionen Pkws waren mit Benzinmotoren, 38 Prozent mit Dieselmotoren ausgerüstet. 25.056 Elektrofahrzeuge und 84.675 Pkws mit Hybridantrieb, inklusive 29.436 Plug-in-Hybriden, wurden neu angemeldet. Das entsprach trotz hoher Zuwächse bei den Fahrzeugen mit alternativen Antrieben nur einem Anteil von etwas über 3 Prozent der Neuanmeldungen. Der Bestand der rein elektrisch fahrenden Fahrzeuge erhöhte sich damit auf etwa 54.000.

Im restlichen Europa sind die Käufer ähnlich zurückhaltend, wobei ein deutliches Nord-Süd- und West-Ost-Gefälle zu verzeichnen ist. Der Marktanteil elektrifizierter Pkws lag 2018 in der EU im Durchschnitt unter 2 Prozent.

Doch es gibt Grund zu vorsichtigem Optimismus. 2017 nahm der Absatz in einigen Ländern merk-

lich zu. Bis Anfang 2018 stieg der Bestand an E-Autos (Fahrzeugen mit batterieelektrischem Antrieb, Range Extender sowie Plug-in-Hybride) laut einer Schätzung des ZSW weltweit auf rund 3,2 Millionen. Mit 37 Prozent erreichten E-Autos in Norwegen 2017 den weltweit höchsten Marktanteil. Zahlenmäßig die meisten Elektroautos gibt es in China. Zum Jahreswechsel 2017/2018 zählte die Volksrepublik gut 1,2 Millionen E-Autos, das sind mehr als ein Drittel des weltweiten Bestands. Auf Platz zwei und drei folgten die USA mit 751.510 und Japan mit 201.410 E-Pkws. Deutschland lag weltweit mit 92.740 E-Pkws auf Rang acht. Auch beim Zuwachs lag China vorne. Über 400.000 Stromer wurden 2017 verkauft, was einem Marktanteil von 2 Prozent entspricht. Besonders beliebt im Reich der Mitte: rein elektrisch betriebene Fahrzeuge (82 %). Chinesische Hersteller dominierten dabei mit weit über 90 Prozent den E-Fahrzeugmarkt im eigenen Land.

In einer 2018 veröffentlichten Innovationsstudie hat das Center of Automotive Management (CAM) Tesla und den chinesischen Herstellern attestiert, beim Thema Elektromobilität die Nase vorn zu haben. China überspringt die Verbrennungstechnologie weitgehend und setzt auf den rein elektrischen Antriebsstrang. Der Studie zufolge sind dafür die Autohersteller aus Deutschland besonders innovativ, wenn es um Konnektivität und Assistenzsysteme sowie die Verbesserung des Verbrennungsmotors geht.

12.1.2 Einflussfaktoren auf den Individualverkehr

12.1.2.1 Staus und Verkehr

Der motorisierte Individualverkehr hat in Deutschland von 2000 bis 2016 um 136 Milliarden Personenkilometer (Pkm) bzw. 16 Prozent zugelegt und wächst auf sehr hohem Niveau

weiter. Gut 80 Prozent des Personenverkehrsaufwands von insgesamt etwa 1,208 Milliarden Pkm gingen 2016 auf den motorisierten Individualverkehr (Pkws, Krafträder) zurück. Der Schienenverkehr hat demgegenüber nur einen Anteil von 8 Prozent, der öffentliche Straßenpersonenverkehr von 7 Prozent und der Luftverkehr von 5 Prozent (siehe Tab. 12.1 Verkehrsaufwand im Personentransport).

Abb. 12.3: Zunehmender Individualverkehr führt zu Staus



Quelle: Robert Bosch

Die Zunahme des Individualverkehrs bleibt nicht ohne Folgen. In seiner Staubilanz 2017 hat der ADAC allein für Deutschland (ganz ohne Megacitys) rund 723.000 Staus verzeichnet, Tendenz steigend. Die Staukilometer summierten sich auf eine Gesamtlänge von 1.448.000 km (+5 %). Die Verkehrsteilnehmer verloren zusammengenommen 457.000 Stunden im Stau.

Der Urlaubs- und Freizeitverkehr hat dabei mit über 40 Prozent den größten Anteil am Verkehrsaufwand im motorisierten Individualverkehr. Dann folgt mit etwa 36 Prozent der arbeitsbezogene Verkehr, das heißt der Berufs- und Ausbildungs- sowie der Geschäftsverkehr. Nur etwa 40 Prozent der arbeitsbezogenen Personenkilometer sind geschäftlich veranlasste Fahrten.

Tab. 12.1: Verkehrsaufwand im Personentransport

Verkehrsart	2000	2005	2010	2015	2016*	Veränderung 2016 zu 2010 in Prozent
	Milliarden Personenkilometer					
Eisenbahn	75,4	76,8	83,9	91,7	95,8	14,2
darunter Schienennahverkehr	39,2	43,1	47,8	54,8	56,5	18,2
Luftverkehr	42,7	52,6	52,8	61,5	63,9	21,0
darunter Inlandsverkehr	9,5	9,5	10,7	10,1	10,4	-2,8
Mobilisierter Straßenverkehr	926,9	958,2	980,5	1026,6	1048,0	6,9
Motorisierter Individualverkehr	849,6	875,7	902,4	945,7	965,5	7,0
Öffentlicher Straßenpersonenverkehr	77,3	82,5	78,1	81,8	82,5	5,6
Verkehr insgesamt	1045,1	1087,6	1117,2	1180,8	1207,8	8,1

Quelle: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

* zum Teil vorläufige Zahlen

Der wachsende Verkehr stellt insbesondere Städte vor Platzprobleme: So lässt Singapur wegen des Platzmangels und der konkurrierenden Bedürfnisse seit 2018 keine zusätzlichen Autos zu. Wollen Bewohner ein neues Auto anmelden, müssen sie eine der in der Anzahl und Laufzeit begrenzten Lizenzen vorweisen, die zuletzt ca. 26.000 Euro kosteten.

12.1.2.2 Umweltschutz und Gesundheit

Die Menge der gesundheitsgefährdenden Luftschadstoffe in Deutschland ist nach der Jahrtausendwende deutlich gesunken. Dennoch werden immer noch Grenzwerte überschritten. In den Innenstädten hat der Verkehr daran einen erheblichen Anteil. Zudem ist eine dauerhafte Trendumkehr bei den CO₂-Emissionen in Deutschland noch nicht gelungen.

a. CO₂

Für Deutschland hat die IEA für 2017 steigende Kohlendioxid-Emissionen festgestellt, die auch auf den Autoverkehr zurückzuführen sind.

Der durchschnittliche CO₂-Ausstoß aller neu zugelassenen Fahrzeuge ist durch den Hang der Deutschen zu PS-starken bzw. schweren Fahrzeugen wie SUVs 2017 wieder angestiegen. Nach Erhebungen der Deutschen Energie-Agentur liegen die CO₂-Emissionen der Neuzulassungen mit 127,9 g/km 7 Prozent über dem europäischen Flottendurchschnitt von 119,5 g/km. Die realen CO₂-Emissionen übersteigen dabei noch einmal deutlich die errechneten Werte. Das International Council on Clean Transportation kam 2017 zum Schluss, dass der Kraftstoffverbrauch von Neuwagen in Europa in den Vorjahren deutlich größer geworden ist und im Durchschnitt 42 Prozent über dem von den Herstellern angegebenen Wert liegt. Besonders hoch war die Diskrepanz zu diesem Zeitpunkt in Deutschland. Die ab 1. Sep-

tember 2018 für jedes neu in der EU zugelassene Auto vorgeschriebenen WLTP- und RDE-Fahrzyklustests haben Realität und Rechenwert mittlerweile aber wieder näher zusammengebracht.

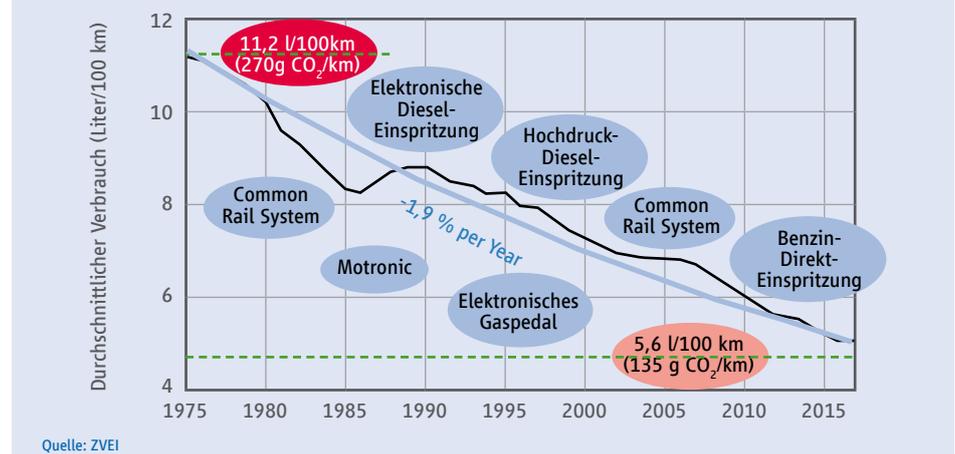
Weltweit sieht es nicht viel besser aus. Die CO₂-Bilanz der Internationalen Energieagentur von Anfang 2018 enthüllte, dass der Ausstoß des Gases nach drei Jahren gleichbleibender CO₂-Emissionen weltweit 2017 erstmals wegen höherer Energienachfrage (+2,1 %) wieder anstieg und den Rekordwert von 32,5 Gigatonnen erreichte (+460 Mio. t CO₂). 70 Prozent dieses zusätzlichen Bedarfs wurden durch fossile Energieträger gedeckt.

In der EU war 2017 die Energie- und Wärmezeugung für 31 Prozent des CO₂-Ausstoßes verantwortlich, gefolgt von Industrie (21,4 %), Verkehr (22,6 %) und der Landwirtschaft mit einem Anteil von 10,9 Prozent. China bläst allerdings innerhalb von drei Wochen mehr CO₂ in die Luft, als der gesamte Pkw-Verkehr in der EU innerhalb eines Jahres.

b. Feinstaub, NO_x und Verkehrslärm

Bessere Motoren mit geringerem Verbrauch und der Rückgang der Dieselmkäufe in Deutschland haben tendenziell für einen Rückgang der Belastung mit Feinstaub und Stickoxyde (NO_x) gesorgt, allerdings auf Kosten eines höheren CO₂-Ausstoßes. Trotzdem wurden in 65 Städten auch 2018 die Grenzwerte an Verkehrsbrennpunkten dauerhaft überschritten. Hessische Richter haben 2018 festgestellt, dass die bisher getroffenen Maßnahmen in Deutschland nicht ausreichen, um die Bürger zu schützen. Sie verlangen für Frankfurt Fahrverbote für Diesel der Norm Euro 4 und älter sowie für Benzin der Norm Euro 1 und 2 ab Februar 2019. Ab September 2019 sollen diesem Richterspruch zufolge

Abb. 12.4: Erfolg der optimierten Steuerungen im Antriebsbereich



dann auch Diesel mit Norm Euro 5 außerhalb der Stadtgrenzen bleiben. Mit weiteren entsprechenden Richtersprüchen ist zu rechnen.

Eine Studie der WHO kam 2015 zum Ergebnis, dass jährlich global rund sieben Millionen vorzeitige Todesfälle auf die Luftverschmutzung zurückzuführen sind. Als Hauptursache für die Emissionen wird der motorisierte Straßenverkehr genannt.

Eine 2015 in Nature veröffentlichte Studie zufolge sterben allein durch die Feinstaubbelastung jedes Jahr drei Millionen Menschen vorzeitig. Besonders betroffen sind Schwellen- und Entwicklungsländer wie Indien.

Verkehrslärm belastet die Gesundheit der Bevölkerung zusätzlich. Laut dem Umweltbundesamt ist etwa die Hälfte der bundesdeutschen Bevölkerung Straßenverkehrslärm mit Mittelungspegeln von mindestens 55 dB(A) tags bzw. 45 dB(A) nachts ausgesetzt. Circa 15 Prozent werden sogar mit Pegeln von mindestens 65 dB(A) tags bzw. 55 dB(A) nachts belastet.

Abb. 12.5: Hohe Umweltbelastung durch starkes Verkehrsaufkommen in Städten



Quelle: Robert Bosch

c. Staatliche Regulierung und kommunale Maßnahmen zur Reduzierung der Emissionen

Viele Länder, Städte und Kommunen auf der Welt stemmen sich gegen die Folgen des Klimawandels und der Luftverschmutzung. Dabei gehen sie sehr unterschiedlich vor, um die heimische Wirtschaft und Bevölkerung nicht zu sehr zu belasten und sich gleichzeitig in eine optimale Ausgangsposition für die anstehende Neuordnung der politischen und wirtschaftlichen Weltordnung zu bringen.

Zwar haben es die führenden Hersteller geschafft, immer sauberere Verbrennungsmotoren zu entwickeln, doch dieser Trend lässt sich nicht unbegrenzt fortsetzen, weil mit jedem weiteren Optimierungsschritt der erforderliche Material- und Kostenaufwand spürbar zunimmt.

Ambitionierte Ziele zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes lassen sich daher ohne eine Einschränkung der Mobilität bzw. eine intelligente Verteilung der Beförderungskapazitäten und/oder durch den Umstieg auf nahezu emissionsfreie Fahrzeuge kaum erreichen.

China setzt beim Umbau des Verkehrssystems auf ein Punktesystem und Quoten. Ab 2019 müssen Autohersteller und Importeure bestimmte Punktezahlen erreichen, sonst drohen Strafzahlungen. Elektroautos mit hoher Reichweite bringen dabei besonders viele Punkte. Zudem müssen alle Produzenten ab 2020 den Flottenverbrauch ihrer Fahrzeuge unter fünf Liter Benzin pro 100 Kilometer drücken. In den USA plant Präsident Trump dagegen, die Zielvorgaben der Vorgängerregierung abzuschwächen und die Verschärfung der Verbrauchsgrenze für Autos auf 2026 zu verschieben und aufzuweichen (6,3 l/km).

Während China und USA bis 2018 keine CO₂-Grenzwerte festgelegt haben, hat die Europäische Kommission im Herbst 2017 vorgeschlagen, der Autoindustrie bis 2025 eine weitere CO₂-Reduktion um 15 Prozent und bis 2030 um 30 Prozent vorzuschreiben. Allerdings waren die Flotten der Hersteller in Europa selbst Anfang 2018 noch etwa 35 Prozent von den ab 2020 vorgeschriebenen 95 g CO₂/km entfernt.

Umweltschützer gehen davon aus, dass trotzdem Minderungsziele für Autos von bis zu 75 Prozent bis 2030 erforderlich wären, um die Ziele des Weltklimapakts von Paris zu erreichen, und schlagen als Kompromiss eine Reduzierung um 50 Prozent vor. Der Herstellerverband ACEA hält dagegen, dass nur eine Minderung um 20 Prozent bis 2030 gegenüber 2020 realistisch sei.

Im Umfeld der Festlegung der CO₂-Flottengrenzwerte für die Zeit nach 2020 hat die EU-Kommission Quoten für Elektroautos (15 % ab 2025, 30 % ab 2030) ins Gespräch gebracht. Aufgrund des wirtschaftlichen Nord-Süd- und West-Ost-Gefälles müssten dafür in den wirtschaftlich führenden Ländern deutlich höhere Quoten erreicht werden.

Bereits 2015 ist Deutschland der International Zero-Emission Vehicle Alliance beigetreten, deren Mitglieder – darunter Großbritannien, die Niederlande, Norwegen und eine Reihe von US-Bundesstaaten – sich das Ziel gesteckt haben, auf ihren Straßen bis 2050 nur noch emissionsfreie Fahrzeuge zuzulassen.

Zusätzlich zu den Bemühungen der Staatsregierungen zur Emissionsverringerung ergreifen Städte und Gemeinden Maßnahmen zur kurzfristigen Reduzierung des Ausstoßes. Nachdem das Bundesverwaltungsgericht Anfang 2018 entschieden hat, dass Fahrverbote in besonders belasteten Bereichen zulässig sind, führen immer mehr deutsche Städte entsprechende Fahrbeschränkungen ein.

Über das Klimaschutznetzwerk C40 verbundene Städte (Stand 2018: 96 Städte, über 650 Mio. Einwohner, ¼ der Weltwirtschaftsleistung) haben bereits 2016 entschieden, bis 2025 alle Dieselfahrzeuge aus vier Vorreiterstädten (Paris, Mexiko-Stadt, Madrid und Athen) zu verbannen. Ab 2030 untersagt Paris allen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor die Zufahrt zum Stadtgebiet. London hat bereits 2003 deren Einfahrt mit einer Maut belegt und diese mehrfach verschärft. Mitte 2018 hat die Verwaltung des Finanzdistrikts angekündigt, dass sie in einem Pilotversuch Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren gänzlich aussperren will. Norwegen will ab 2025 flächendeckend nur noch emissionsfreie Autos zulassen.

Zudem arbeiten Städte daran, den öffentlichen Nahverkehr zu stärken und ihre Busflotten auf E-Antriebe umzustellen.

So hat die Hamburger Verkehrsgesellschaft das Ziel, ab 2020 nur noch Elektrobusse zu kaufen und Dieselfahrzeuge bis 2030 aus der gesamten Flotte von ca. 1.000 Fahrzeugen zu verbannen. 2018 wurden die ersten 30 Elektrobusse bestellt.

London hat sich wie elf weitere Großstädte auf die Fahnen geschrieben, ab 2025 nur noch emissionsfreie Busse zu kaufen und ab 2037 alle

Busse umzustellen. Ab 2050 soll dann sämtlicher Verkehr in der britischen Hauptstadt emissionsfrei abgewickelt werden. London betreibt (Stand Mitte 2018) Europas größte Elektrobusflotte mit über 100 Elektrobusen.

China ist auch hier, wie bei der Einführung von E-Pkws, noch weiter: Die Stadt Shenzhen hat beispielsweise ihre Busflotte bereits Ende 2017 komplett auf Elektrobusse umgestellt und zu diesem Zeitpunkt 16.359 dieser Busse im Einsatz.

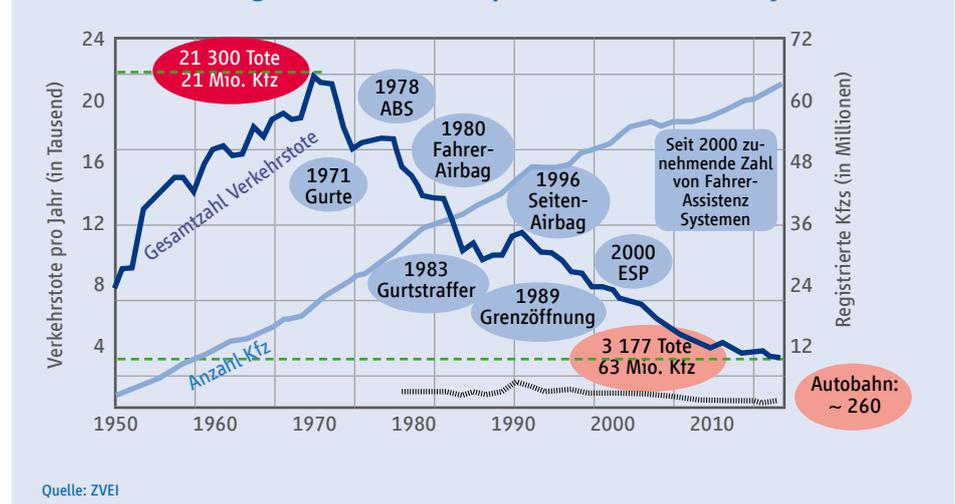
Zum Vergleich: Die gesamte Busflotte Deutschlands betrug Anfang 2018 etwa 40.000 Fahrzeuge, wovon 528 mit alternativen Antrieben (davon 88 reine E-Busse) ausgestattet waren.

12.1.2.3 Verkehrstote und Verletzte

Für 2016 registrierte die OECD in 14 von 30 untersuchten Ländern eine Zunahme getöteter Verkehrsteilnehmer. Weltweit kommen jedes Jahr geschätzt 1,3 Millionen Menschen bei Verkehrsunfällen ums Leben. Zu den Ländern mit der negativsten Entwicklung zählten unter anderem die USA, wo die Zahl der Getöteten 2016 um 15 Prozent auf über 40.000 Personen stieg. Einer der Hauptgründe: Ablenkung durch Smartphones und Tablets.

In Deutschland trat dieser negative Effekt noch nicht zutage. 2017 starben 3.177 Menschen bei Unfällen im Straßenverkehr und damit so wenige wie noch nie seit Beginn der Statistik vor mehr als 60 Jahren. Auch die Zahl der Verletzten ging 2017 gegenüber dem Vorjahr zurück, und zwar um 2,1 Prozent auf rund 388.200 Personen. Die Zahl der Unfälle erreichte 2017 allerdings mit 2,6 Millionen einen neuen Höchststand, wobei die meisten Verkehrsunfälle auf menschliches Versagen zurückzuführen sind.

Abb. 12.6: Erfolg der aktiven und passiven Sicherheitssysteme



Bei 88 Prozent der erfassten Unfallursachen lag ein Fehlverhalten des Fahrzeuglenkers zugrunde, 3 Prozent waren dem Fehlverhalten von Fußgängern geschuldet. Am häufigsten wurde zu schnell gefahren, zu dicht aufgefahren oder es wurden Fehler beim Abbiegen, Wenden, Rückwärtsfahren und beim Ein- und Ausfahren gemacht.

2017 kamen in den 28 Mitgliedstaaten der EU rund 25.300 Menschen im Straßenverkehr ums Leben, 20 Prozent weniger als noch 2010. Die EU-Kommission hat es sich zum Ziel gesetzt, die Zahl der Toten und Schwerverletzten bis 2050 auf nahezu Null zu senken (Vision Zero).

12.1.3 Trends in der Automobilindustrie

12.1.3.1 Antriebsstrang

a. Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor

Sinkende Verkaufszahlen beim Diesel in Deutschland infolge des Dieselskandals, Fahrverbote und der Aktionismus rund um das Thema E-Mobility sowie das zunehmend negative Image verstellen den Blick auf die weiterhin zentrale Bedeutung des Verbrennungsmotors (ICE = Internal Combustion Engine). Er ist auch bis 2025 unverzichtbar und bleibt darüber hinaus eine wichtige Antriebstechnologie. Das Fraunhofer-Institut bezeichnet in einer Studie einen Anteil von 60 Prozent an Fahrzeugen mit Otto- oder Dieselmotoren, 25 Prozent an rein elektrisch angetriebenen und 15 Prozent an Plug-in-Hybriden als ein wahrscheinliches Szenario für 2030. In den vergangenen Jahren wurden die ICEs durch Downsizing (Reduzierung des Hubraums ohne Leistungsverlust) und Abgasaufbereitung potenziell immer sauberer. Allerdings nutzten die Hersteller diese Effizienzsteigerungen in erster Linie, um die Leistungsdaten (Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigungsverhalten) bei gleichbleibendem Hubraum zu erhöhen. Da zudem der Aufwand für die Verbrauchsoptimierung der Motoren bei jeder Generation spürbar steigt, sind auch zukünftig nur geringe Einsparungseffekte zu erwarten. Bio-Treibstoffe und insbesondere auf lange Sicht mit billiger Sonnenenergie erzeugte synthetische Treibstoffe haben das Potenzial, einen nahezu emissionsfreien bzw. CO₂-neutralen Betrieb der ICEs zu ermöglichen. Bis es so weit ist, können Gasautos (Erdgas oder Flüssiggas) und Dieselfahrzeuge der Norm Euro 6b Temp als bereits gut beherrschte Zwischentechnologie einen Beitrag zur Reduzierung der (lokalen) Emissionen leisten.

b. Hybridfahrzeuge

Immer mehr Verbraucher in Deutschland entscheiden sich beim Kauf eines Autos für ein Fahr-

zeug mit Hybridantrieb, wie die Neuwagenanmeldungen 2017 zeigen. Insgesamt 84.675 Pkws mit Hybridantrieb (davon 29.436 Plug-in-Hybride) verzeichnete das Kraftfahrt-Bundesamt, was einem Anstieg um +76,4 Prozent entspricht. Die Kombination aus Verbrennungsmotor und Elektroaggregat in einem Antriebsstrang vereint die Vorteile beider Antriebsarten – lange Reichweiten und emissionsfreies Fahren (kurzer Strecken). Damit lässt sich der Verbrauch bei hohem Kurzstreckenanteil und optimalen Bedingungen maximal bis 40 Prozent (in der Realität meist jedoch deutlich weniger) gegenüber einem reinen Benziner drücken. Bei Langstrecken kann der Verbrauch sogar höher sein. Da bei Hybriden jeweils für beide Antriebsarten Komponenten benötigt werden, sind das Gesamtgewicht, der Rohstoffeinsatz und die Komplexität des Gesamtsystems und damit die Anschaffungs- und Unterhaltungskosten vergleichsweise hoch. Der durch die große Batterie besonders hohe Anschaffungspreis von Plug-in-Hybriden lässt viele preissensitive Kunden vor einem Kauf zurückschrecken. Nicht nur Automobilhersteller mit langer Verbrennertradition betrachten den Hybrid als wichtigen Zwischenschritt in eine CO₂-neutrale Zukunft. Besonders Japan, das Ursprungsland des ersten serienmäßig produzierten und bislang (Stand 2018) international erfolgreichsten Hybridfahrzeugs, weist diesem Antriebstyp eine wichtige Rolle im Mobilitätsmix zu.

c. Brennstoffzellenfahrzeuge

Die Brennstoffzelle fasziniert Umweltschützer und Technikbegeisterte gleichermaßen. Wasserstoff wird ohne Lärm oder Abgase in der Zelle zu Wasser reduziert und setzt dabei elektrische Energie und Wärme frei. Die Brennstoffzelle eignet sich prinzipiell als Energiequelle für Wohnhäuser, Nutzfahrzeuge und Pkws. Ihre Leistung variiert im Gegensatz zur Lithiumbatterie bei sinkender Umgebungstemperatur kaum, sodass es auch im Winter keine Reichweiteinbußen gibt. Mit einer Tankfüllung können die wenigen Ende 2018 erhältlichen Brennstoffzellenfahrzeuge je nach Tankgröße Strecken von 200 km bis weit über 700 km bewältigen. Ein weiteres Plus der Brennstoffzelle: Im Winter kann die Abwärme für die Fahrgastraumheizung verwendet werden, sodass die Heizung nicht die elektrische Leistung verringert.

Trotz dieser attraktiven Merkmale ist ein Brennstoffzellenfahrzeug auf absehbare Zeit ein reines Nischenprodukt. So wird Wasserstoff bisher in erster Linie aus Erdgas hergestellt, was sich negativ auf die CO₂-Bilanz auswirkt. Eine Erzeugung durch Elektrolyse ist bei den aktuellen

Strompreisen bzw. dem üblichen Strommix derzeit weder wirtschaftlich noch emissionsfrei.

Negativ auf die Wirtschaftlichkeit von Brennstoffzellen wirkt sich bislang auch der Katalysator aus, der für den chemischen Prozess erforderlich ist. Bisher musste dabei auf teures Platin zurückgegriffen werden. Forscher haben allerdings Anfang 2018 einen deutlich günstigeren Katalysator auf Basis von porösen Kohlenstoffasern und Kobalt vorgestellt. Seine Wirtschaftlichkeit und Massentauglichkeit bleibt abzuwarten.

Ein Minuspunkt der Wasserstofftechnik: Die Fahrzeuge müssen mit Hochdrucktanks (bis zu 700 bar) bestückt werden, da die volumenbezogene Energiedichte von Wasserstoff niedrig ist und sonst nicht genügend Brennstoff mitgeführt werden kann. Da Wasserstoff zudem extrem flüchtig ist und wegen seiner geringen Molekülgröße leicht durch Dichtungsmaterial diffundiert, ist die Wasserstoffspeicherung aufwendig. Bei der Verwendung von Flüssigwasserstoff führen unvermeidliche thermische Isolationsverluste dazu, dass sich der Tank auch im Stillstand ständig langsam entleert. Mit Flüssigwasserstoff betriebene Fahrzeuge dürfen daher nicht in geschlossenen Räumen geparkt werden. Die ausgesprochene Brennbarkeit des Gases erschwert die Handhabung und erfordert spezielle Sicherheitsmaßnahmen.

d. Batterieelektrischer Antrieb

Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV = Battery Electric Vehicle) sind deutlich einfacher aufgebaut als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, Hybridantrieb oder Brennstoffzelle. Die verwendete Technik im Antriebsstrang ist gut beherrscht, entsprechende Produkte befinden sich in der Serienproduktion.

Auch für den Anwender bieten BEVs klare Vorteile: Ansprechende Beschleunigungswerte, die für den nötigen Fahrspaß sorgen, ein grünes Image, freier Zugang zu Innenstädten und nicht zuletzt niedrige Unterhaltungskosten durch den Wegfall von Komponenten wie Ölpumpen und Ölfilter, Zylinderköpfe, Ventile oder Auspuffanlagen inklusive Abgasuntersuchung. Noch günstiger sieht die Rechnung für Besitzer von Eigenheimen aus, die mit Photovoltaik erzeugten Strom selbst als „Treibstoff“ speichern und verwerten können.

Elektrofahrzeuge waren jedoch auch 2018 noch deutlich teurer in der Anschaffung als vergleichbare Modelle mit Verbrennungsmotor. Das liegt zu einem guten Teil an der Traktionsbatterie. Zwar sind die Preise für die üblicherweise ver-

wendeten Lithium-Ionen-Batterien (LIB) mit flüssigem Elektrolyt zwischen 2010 und 2018 um etwa 70 bis 80 Prozent auf etwa 200 Euro pro Kilowattstunde gefallen. Aus Fachkreisen ist jedoch zu hören, dass sich die Anschaffungskosten von batterieelektrischen und konventionell angetriebenen Fahrzeugen erst bei 100 bis 130 Euro pro Kilowattstunde egalalisieren würden.

Weitere zentrale Schwachpunkte der BEVs sind die hohe Brennbarkeit (auch unter Sauerstoffausschluss) und die niedrige Energiedichte aktueller LIBs mit Kobaltdioxid-Kathoden. Letztere lag Ende 2017 bei etwa 200 bis 250 Wh/kg. Zum Vergleich: Benzin hat eine Energiedichte von 12.800 Wh/kg. Entsprechend wiegt eine Auto-LIB oft mehrere Hundert Kilogramm, um ausreichend Energie bereitzustellen zu können.

e. Einsatzfelder von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben

Die Fahrzeuge mit verschiedenen Antriebsarten unterscheiden sich deutlich in ihren Fahreigenschaften sowie Anschaffungs- und Betriebskosten. Dabei spielen der hohe Anschaffungspreis und die Reichweite batterieelektrischer Fahrzeuge für Kommunen, Autovermieter, Taxi-Unternehmen oder Car- und Ride-Sharing-Anbieter sowie andere Mobility-Dienstleister eine vergleichsweise geringe Rolle, während die niedrigen Betriebs- und Wartungskosten ein gewichtiger Pluspunkt sind. Diese Anwenderschicht reagiert dagegen zum Beispiel sensibel auf lange Ladezeiten, die auf Kosten der Auslastung des Fahrzeugs gehen, und eine geringe Lebensdauer der Batterie. Viele Privatkäufer in Deutschland und anderswo scheuen dagegen die hohen Anschaffungspreise und wünschen sich eine Reichweite, die auch die stressfreie Fahrt in den Familienurlaub ermöglicht. Sie tendieren daher dazu, reine Elektrofahrzeuge nur als Zweit- oder Drittfahrzeuge anzuschaffen. Hier spielt es dann auch kaum eine Rolle, dass nur kurze Strecken bewältigt werden können oder der Ladevorgang lange dauert.

Abb. 12.7: E-Mobilität in der Stadt



Quelle: Robert Bosch

Die unterschiedlichen Eigenschaften der alternativen Antriebe in Kombination mit den unterschiedlichen Rahmenbedingungen in den Ländern (Ausprägung der Kaufprämien, Steuervorteile, Fahrverbote, City-Maut etc.) sowie der regional unterschiedlichen Kaufkraft schaffen Raum für eine bisher nicht gekannte Vielfalt an Fahrzeugen, die auf die unterschiedlichen Anforderungen zugeschnitten sind (Beispiel Street-Scooter der Deutschen Post).

Aus Sicht des Klimaschutzes ist derzeit der Einsatz von Batteriefahrzeugen in Deutschland und den meisten Ländern Europas vorrangig im kommerziellen Umfeld und dem öffentlichen Nahverkehr sinnvoll, während sie im privaten Umfeld einen nennenswerten Beitrag nur zur lokalen Reduzierung der Emissionen leisten können.

12.1.3.2 CO₂-Bilanz

Die Diskussion um die CO₂-Bilanz von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV = Battery Electric Vehicle) und Hybridfahrzeugen wird sehr kontrovers geführt (andere alternative Antriebe werden, wenn überhaupt, nur am Rande erwähnt). So kommen einige Studien zum Schluss, dass die CO₂-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus dieser Fahrzeuge etwa gleich hoch sind und auf dem gleichen Niveau liegen wie die moderner Verbrenner. Andere attestieren den BEVs niedrigere Emissionen als den Hybridfahrzeugen, die wiederum deutlich besser wegkommen als die Verbrenner.

Diese Diskrepanzen lassen sich durch die unterschiedlichen Annahmen erklären, die allen Untersuchungen zugrunde liegen.

Besonders gilt das für die maßgeblichen Einflussfaktoren, die da sind: der verwendete Energiemix bei Produktion und Betrieb des Fahrzeugs, die Größe, Gewicht und insbesondere die Lebensdauer der eingesetzten Lithium-Ionen-Batterie, der angenommene Fahrzyklus sowie der Treibstoffverbrauch bzw. die Reichweite. So bleiben auch Verbrenner, die mit Erdgas oder Flüssiggas fahren und dadurch eine deutlich bessere CO₂-Bilanz aufweisen, unberücksichtigt. Daneben beeinflussen die Art und der Ort des Einsatzes sowie das Gewicht des Fahrzeugs die Emissionen spürbar. Einen großen Einfluss haben auch die für Karosserie und Fahrwerk der Fahrzeuge verwendeten Materialien (Primär- oder Sekundärstoffe). So hilft der Leichtbau mit Aluminium zwar die Batterie zu schonen, erfordert aber bei der Produktion den Einsatz großer Energiemengen.

In der Folge kursieren unterschiedliche Zahlen, ab wann ein BEV eine positive CO₂-Bilanz aufweist: Sie reichen von 30.000 Kilometern beim Laden mit Ökostrom bis zu mehreren 100.000 Kilometern Fahrleistung bei aktuellem europäischem Strommix.

In der Regel unberücksichtigt bleiben bei den Betrachtungen die Emissionen, die mit dem Aufbau/Betrieb der erforderlichen Infrastruktur zusammenhängen, wie auch der zusätzliche Verkehr, der durch neue Mobilitätsmodelle und die vergleichsweise niedrigen fahrleistungsabhängigen Kosten der BEVs induziert wird.

Da die Entwicklung und der Einsatz alternativer Antriebe im Gegensatz zum Verbrenner noch ziemlich am Anfang stehen und der Ausbau der erneuerbaren Energien weiter anhält, kann jedoch mittelfristig mit zusätzlichen Effekten gerechnet werden, die sich positiv auf die CO₂-Bilanz auswirken.

Eine Dekarbonisierung des Verkehrssektors ist ohne den Einsatz von emissionsfreien BEVs derzeit nicht machbar.

12.1.3.3 Vernetzung

Der Informationsaustausch zwischen den Fahrzeugen (V2V = Vehicle to Vehicle), den Fahrzeugen und den Fußgängern (V2P) sowie den Fahrzeugen und der Infrastruktur (V2I) – zusammenfassend als V2X-Kommunikation (Vehicle to Everything) bezeichnet – ist Voraussetzung für die Weiterentwicklung der Mobilität. Mit ihr lässt sich der Verkehr deutlich besser überwachen und steuern, um zum Beispiel freie Parkplätze, Staus und gefährliche Verkehrssituationen oder herannahende Rettungskräfte zu erkennen und die Verkehrsteilnehmer entsprechend in Echtzeit zu warnen und zu leiten. Sie ist auch Grundlage für Funktionen wie das Platooning von Fahrzeugen.

Abb. 12.8: V2X-Kommunikation



Quelle: Robert Bosch

Bis zu 30 Prozent der tödlichen und schweren Unfälle können laut Experten des eSafety-Forums der Europäischen Kommission durch kooperative Dienste verhindert werden. Der VDA geht davon aus, dass vernetztes Fahren etwa 20 Prozent der Staus verhindern würde. Der Nutzen für die Allgemeinheit wäre hoch. Schließlich hat das Centre for Economics and Business Research errechnet, dass Staus in Europa und den USA im Zeitraum von 2013 bis 2030 Kosten in Höhe von 4,4 Trillionen US-Dollar verursachen.

In Deutschland schlugen die Staus 2017 nach Schätzungen mit knapp 80 Milliarden Euro zu Buche. Jeder Autofahrer verliert etwa 1.770 Euro durch die Verschwendung von Zeit und Benzin sowie staubedingten höheren Transportkosten.

Wird zudem vor gefährlichen Straßenverhältnissen gewarnt, rechnen die VDA-Experten allein durch diese Funktion mit einer Reduzierung der Verkehrsunfälle um 5 Prozent. Zudem ließe sich die Pünktlichkeit von Bussen und Straßenbahnen erhöhen und etwa 20 Prozent Energie durch weniger Start- und Stoppvorgänge einsparen.

Als führende Standards für V2X-Kommunikation haben sich in den USA Dedicated Short-Range Communications (DSRC) und in Europa ETSI ITS-G5 herauskristallisiert, die beide auf dem WLAN-Standard IEEE802.11p basieren und Reichweiten von etwa 2.000 Metern abdecken. Daneben hat die Telekommunikationsindustrie den Standard Cellular-V2X (C-V2X) eingeführt, der auf LTE aufbaut und eine Vernetzung über das Mobilfunknetz, aber auch eine Kommunikation zwischen Endgeräten ermöglicht. Von vornherein wurde ein Migrationspfad für C-V2X zum Mobilfunknetz der 5. Generation (5G) vorgesehen.

Beide – WLAN- und Cellular-V2X – ergänzen sich optimal (Reichweite, Abdeckung, Latenzzeiten, Bandbreite, Verfügbarkeit) und ermöglichen einen robusteren Hybridbetrieb.

Die deutsche Automobilindustrie verfolgt dabei den Ansatz, den diversen Marktteilnehmern die gesammelten Fahrzeugdaten über sichere Server des Fahrzeugherstellers oder über neutrale Server bereitzustellen (NEVADA-Share & Secure). Zum Schutz der Fahrzeugsicherheit kann dabei ausschließlich der Automobilhersteller die Berechtigung vom Fahrzeughalter erhalten, die generierten Daten aus der Ferne abzufragen oder Updates aufzuspielen. Er ist der einzige, der die Berechtigung für einen Fernzugriff auf das Fahrzeug eingeräumt bekommen kann und trägt allein die Verantwortung für die Sicherheitssphäre des Fahrzeugs.

Die Europäische Kommission hat gemeinsam mit Straßenbetreibern die Plattform C-Roads ins Leben gerufen, um die Einführung auf Nahbereichsfunktechnik aufbauender Kooperativer Intelligenter Transportsysteme (C-ITS) in Europa grenzübergreifend zu harmonisieren und zu fördern. Stand Herbst 2018 sind 17 EU-Staaten der Plattform beigetreten, drei weitere Staaten waren zu diesem Zeitpunkt assoziierte Mitglieder.

In Zusammenarbeit von Ministerien, Straßenbehörden und -betreibern und der Automobilbranche haben Deutschland, die Niederlande und Österreich eine Teststrecke für Intelligente Transportsysteme (ITS-Korridor) eingerichtet. In den Jahren 2016 und 2017 konnten damit zwei technisch ausgereifte Anwendungen erfolgreich spezifiziert und getestet werden: die Warnung vor (Wander-)Straßenbaustellen und das Sammeln von Fahrzeugdaten unter Verwendung von IST-G5 und C-V2X. Weitere Testareale/-strecken gibt es unter anderem in Deutschland (Düsseldorf, München, Niedersachsen, Aldenhoven), in den USA (Pilotanwendungen in mehreren Bundesstaaten, Mcity Test Facility) und China (Shanghai).

12.1.3.4 Automatisierte Fahrzeuge a. Fahrerassistenzsysteme und autonomes Fahren

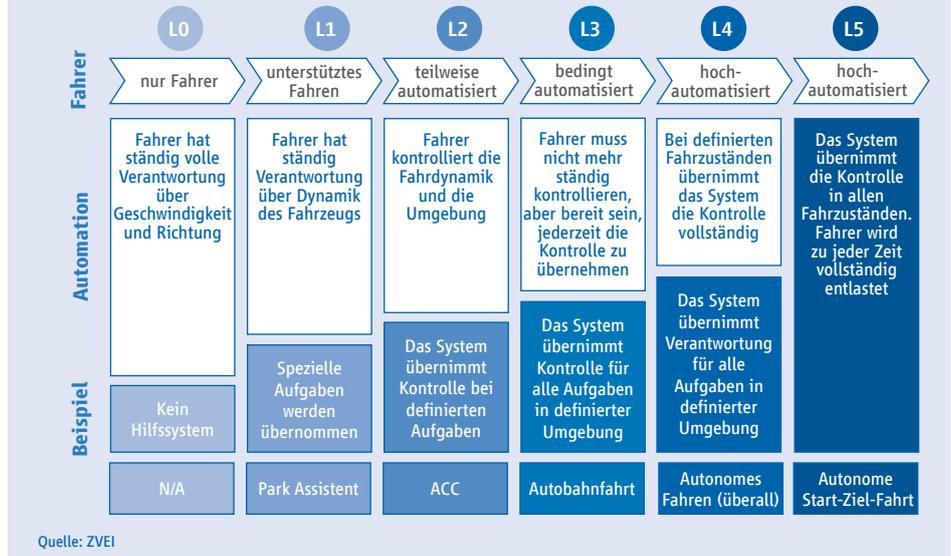
Fortschrittliche Assistenzsysteme (ADAS = Advanced Driver Assistance Systems) zur Erhöhung der Sicherheit und des Komforts sind in Europa klar auf dem Vormarsch.

Fast jeder Neuwagen hat solche Systeme mit an Bord. Besonders verbreitet waren bei den 2016 neu zugelassenen Pkws Parkassistenzsysteme (62 %), gefolgt von Notbremsystemen (38 %) und Systemen zur Fahrermüdigkeitserkennung (37 %). Spürbare Zuwächse erlebten auch Spurassistenzsysteme und Abstandsregeltempomaten (ACC = Adaptive Cruise Control).

Damit sind nach Definition der Norm SAE J3016 bereits seit einiger Zeit Fahrzeuge der Automatisierungsstufen 0 (kein eingreifendes System aktiv), 1 (assistiert, z. B. Tempomat) und 2 (teilautomatisiert, z. B. ACC) gleichzeitig auf den Straßen unterwegs.

Stufe 3 (hochautomatisiert) und Stufe 4 (vollautomatisiert) unterscheiden sich in der Häufigkeit des erforderlichen Eingriffs durch den Fahrer. Bei Stufe 3 kann er in ausgesuchten Situationen, zum Beispiel auf der Autobahn, die Kontrolle dem Fahrzeug übertragen, muss aber jederzeit wieder das Steuer übernehmen können. Bei Stufe 4 bewältigt das Fahrzeug die meisten Fahrscenarien (inkl. Stadtfahrten) eigenständig.

Abb. 12.9: Von alleiniger Fahrerverantwortung zum vollständig autonomen Fahren



Der Fahrer muss aber weiter fahrbereit bleiben, um im Bedarfsfall, etwa wenn ein Fahrzeug in zweiter Reihe parkt, das Steuer übernehmen zu können.

Erst das Fahrzeug der Stufe 5 (autonomes Fahren) kann auf einen Fahrer (und damit auf ein Lenkrad) in allen Situationen verzichten.

Fahrzeuge der Stufen 4 und 5 müssen immer online und ihre Software updatefähig sein. Zudem soll künstliche Intelligenz in Form von Deep-Learning-Algorithmen in den Fahrzeugen Einzug halten, damit sie (neue) Verkehrssituationen eigenständig einschätzen und bewerten können.

Abb. 12.10: Automatisiertes Fahren



Quelle: Robert Bosch

Die verschiedenen Stufen der Automatisierung von Fahrfunktionen bis hin zum autonomen Fahren sind dabei nicht auf Fahrzeuge mit batterieelektrischem Antrieb beschränkt, sondern mit allen Antriebsarten möglich. Allerdings ist

bei den meisten derzeit gestarteten Projekten autonom gleichbedeutend mit batterieelektrisch angetrieben.

b. Einsatzfelder automatisierter Fahrzeuge

Eine Online-Umfrage unter ADAC-Mitgliedern aus dem Jahr 2016 hat ergeben, dass 35 Prozent der Befragten damit rechnen, dass autonome Fahrzeuge in sechs bis zehn Jahren die Straßenzulassung erhalten werden. 40 Prozent erwarten das erst in elf bis 20 Jahren.

Anfang 2018 gab es noch keine marktreifen Fahrzeuge der Stufen 4 und 5. Unternehmen wie Tesla, Google, Uber und insbesondere die deutschen Autokonzerne und Zulieferer sowie zahllose Universitäten testen entsprechende Fahrzeuge und arbeiten intensiv an der Lösung der verbliebenen technischen, rechtlichen und ethischen Fragen.

Die grundlegende Technik ist aber bereits so ausgereift, dass ein hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen möglich ist. So hat Audi 2018 das erste Stufe-3-Serienfahrzeug auf den Markt gebracht. Der Staupilot des Audi A8 (Modelljahr 2018) kann das Fahrzeug auf Autobahnen und mehrspurigen Kraftfahrstraßen mit baulicher Trennung zur Gegenfahrbahn im zählfließenden Verkehr bis 60 km/h eigenständig lenken, beschleunigen und abbremesen. Zusätzlich gibt es einen Parkpiloten und einen Garagenpiloten, der das Auto fahrerlos ein- und ausparkt.

Im deutlich komplexeren städtischen Umfeld mit mehr Verkehrsteilnehmern lässt die höhere Komplexität (und das Gesetz) nur niedrigere Fahrge-

schwindigkeiten beim automatisierten Fahren zu. So legt das erste autonome Fahrzeug, ein E-Kleinbus, der seit Ende 2017 als Modellversuch eine Buslinie in Bad Birnbach bedient, die 700 m lange Strecke mit maximal 15 km/h zurück. In Hamburg nehmen Anfang 2019 drei autonom fahrende E-Kleinbusse ihren Testbetrieb auf, die auf der 3,6 km langen Strecke bis maximal 50 km/h fahren. In beiden Pilotanwendungen ist immer ein professioneller Fahrzeugbegleiter an Bord, der bei Bedarf unmittelbar eingreifen kann. Ab Ende 2020 sollen dann die Busse in Hamburg ohne menschliche Aufsicht fahren.

Dabei regelt die Norm UNR 79 bislang, dass automatisierte Eingriffe nur bis maximal 10 km/h erfolgen dürfen (z. B. in Form eines Einpark-Automaten). Deutschland setzt sich, unterstützt durch diverse Wirtschaftsverbände, dafür ein, dass dies zukünftig bis 130 km/h erlaubt sein soll.

Autonom fahrende Fahrzeuge ohne „professionelle Begleitung“ werden wegen der bestehenden rechtlichen und technischen Einschränkungen zuerst in Bereichen mit eng definierten Fahrsituationen, wie sie auf Betriebsgeländen und Parkflächen oder reservierten Fahrspuren herrschen, zum Einsatz kommen.

Etwas früher stoßen autonome Autos voraussichtlich in Teilen der USA in den normalen Straßenverkehr vor, da dort jeder Bundesstaat selbst über die Zulassung der Systeme entscheidet. So hat Volkswagen angekündigt, bis 2021 in zwei bis fünf Städten in den USA Flotten mit selbstfahrenden E-Ruftaxis aufzubauen.

Die britische Regierung will autonomes Fahren mit Millionensubventionen fördern und ab 2021 selbstfahrende Autos auf die Straße schicken.

Die Erwartungen, die Industrie und Marktforscher mit dem autonomen Fahren verknüpfen, sind jedenfalls hoch:

Insbesondere im Transportgewerbe hoffen viele Unternehmer auf (teil-)autonome Fahrzeuge, um Fahrer zu entlasten oder gänzlich einzusparen und so Platz für zusätzliche Fahrgäste oder Fracht zu schaffen. Dabei setzen Flottenmanager aber vorerst wegen der höheren Reichweite und der niedrigeren Anschaffungskosten weiter vorrangig auf den Verbrennungsmotor.

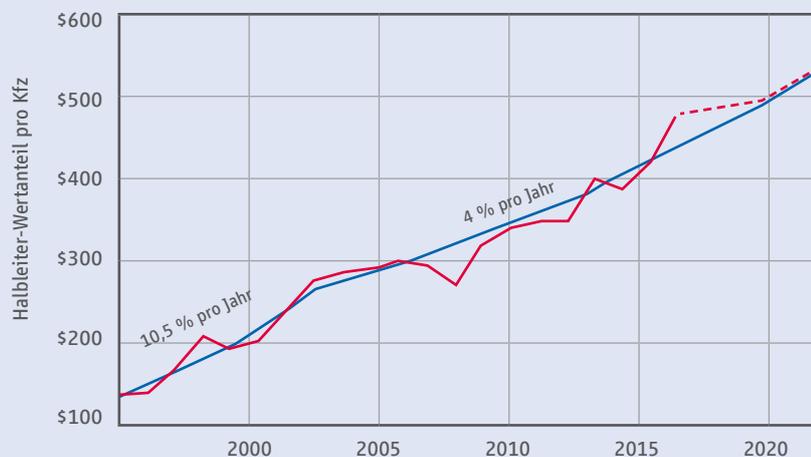
12.1.3.5 Neue Architekturen

Die zunehmende Elektrifizierung der Fahrzeuge hat dazu geführt, dass die Zahl der Steuergeräte in modernen Oberklassefahrzeugen auf über 100 gestiegen ist. Jedes Steuergerät hat dabei eine fest umrissene Aufgabenstellung, beispielsweise die Steuerung des Motors.

Diese Kopplung von Hardware und fest zugewiesener Funktion entfällt zukünftig. Es werden Verarbeitungsressourcen (Domänenrechner oder Server) bereitgestellt, die, wie schon bei Produktionsmaschinen üblich, je nach Bedarf den verschiedenen Steuerungsaufgaben zugewiesen werden.

Es entstehen standardisierte, offene Softwarearchitekturen (SOA = serviceorientierte Architektur), die es erlauben, verschiedene Anwendungsbestandteile (Dienste) aus unterschiedlichen Quellen zu einem erweiterbaren System zu integrieren und dabei das Security-by-Design

Abb. 12.11: Wertanteil der Halbleiter pro Kfz im weltweiten Mittel



Quelle: ZVEI

zu garantieren. Für die Automobilbranche wurde dafür Adaptive Autosar entwickelt.

Neben dem 12-V-/24-V-Bordnetz findet mit der zunehmenden Menge elektronischer Funktionen das 48-V-Bordnetz größere Verbreitung, um elektrische Aggregate mit Leistungsaufnahmen über 3 kW bis 12 kW betreiben zu können.

Bei Fahrzeugen mit Hochvoltbatterie und Drehstrommaschine, wobei letztere bei der Rekuperation der Bremsenergie als Generator und beim Fahren als Antriebsmotor genutzt wird, werden zusätzliche Hochvolt-Spannungsnetze ab 60 V mit bis zu 800 V bei Spitzenströmen bis 1.000 A DC und 550 A AC bei rein batterieelektrischen Sportwagen eingesetzt. Bei Hybridfahrzeugen sind 400-V-Netze verbreitet.

Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen von Fahrzeugen mit Elektro- und Verbrennungsmotor entwickeln die OEMs komplett neue Fahrzeugmodulbaukästen (z. B. MEB von VW).

12.1.3.6 CASE (Connected, Autonomous, Shared & Services, Electric) – disruptive Technologien

Die Kombination aus batterieelektrischem Antrieb, autonomem Fahren und vernetzten Fahrzeugen verändert die Wirtschaft und Gesellschaft grundlegend. Sie führt dazu, dass sich neue Geschäftsmodelle, neue Player und neue Partnerkonstellationen in der Automobilindustrie etablieren, sich Wertschöpfungsketten grundlegend ändern und Planungssicherheiten verloren gehen.

Elektrofahrzeuge bieten hardwareseitig deutlich weniger Unterscheidungsmerkmale als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor.

Dagegen wächst der Softwareanteil dramatisch. So bestand die Software des ab 2010 gebauten Hybridfahrzeugs Chevrolet Volt in der ersten Generation bereits aus etwa 40 Millionen Codezeilen, während eine Boeing 787 „nur“ 8 Millionen Codezeilen benötigt, um sicher zu fliegen.

Mit dem Softwareumfang nimmt auch die anfallende Datenmenge drastisch zu. Letztere wird durch die Vernetzung (allgemein) zugänglich und nochmals weiter vergrößert.

Unternehmen außerhalb der angestammten Automobilbranche mit Fokus auf datenbasierten Dienstleistungen und Kommunikation wie Google, Facebook, Uber oder Apple sehen CASE als logische Erweiterung ihrer bestehenden Geschäftstätigkeit mit großem Potenzial. Auf

den Zug aufspringen wollen auch Tankstellen- und Parkhausbetreiber, Energie- und Medienkonzerne, Bezahl Dienstleister und viele andere junge und etablierte Unternehmen. Dazu kommen Exoten wie Betonhersteller, die Lösungen für das induktive Laden von E-Fahrzeugen entwickeln und anbieten. CASE wird so zum Technologietreiber für viele Wirtschaftszweige.

Während der Markt für datenbasierte Dienstleistungen auf viele Milliarden Dollar geschätzt wird, sind die mit E-Fahrzeugen verdienten Margen niedrig oder sogar negativ. Gründe sind kleine Produktionsstückzahlen und die teure Traktionsbatterie.

Eine vergleichende Analyse, die von der UBS-Bank 2018 veröffentlicht wurde, beziffert die Marge bei einem Mittelklassefahrzeug eines deutschen Premiumherstellers mit Verbrennungsmotor je nach Ausstattung auf 9 und 14 Prozent. Bei einem führenden amerikanischen Elektroautohersteller errechneten die Analysten –17 bis maximal +7 Prozent. Noch sind Motoren mit Verbrennungsmotor also deutlich gewinnbringender für die Autohersteller. Doch das wird nicht so bleiben und die OEMs haben den Wandel vom Automobilhersteller zum Mobilitätsdienstleister (Mobility as a Service) eingeläutet. Mit wachsendem Anteil an Elektroautos und zurückgehenden Stückzahlen beim Verbrenner wird der Druck auf die OEMs wachsen, die Marge zu verbessern. Eine Konsequenz: Der klassische Zwischenhandel mit Händlernetz wird von den OEMs ausgedünnt bzw. zugunsten einer Direktvermarktung über das Internet aufgegeben.

Für Anbieter von Mobilitäts- und datenbasierten Dienstleistungen, die eigene Autos verkaufen, ist eine geringe oder negative Marge ein nachgeordnetes Problem, da sie ihr Geld nicht mit dem Verkauf der Autos verdienen, sondern mit deren Betrieb oder der Vermarktung der anfallenden Daten. Sie definieren Fahrkomfort zudem nicht vorrangig über die (Hardware-)Ausstattung eines Fahrzeug, sondern über die Serviceleistungen bzw. das Mobilitätsgesamtpaket. So kann es für einen Nachfrager von Mobilität in der Abwägung wichtiger sein, statt einer ausgeklügelten Soundanlage die Möglichkeit zu erhalten, dass bestellte Pakete in seinem/einem Auto abgelegt oder Rücksendungen dort abgeholt werden können.

Der Ballast, den große Automobilhersteller mit schleppen und mitfinanzieren müssen, eröffnet gerade auch kleineren, spezialisierten Unternehmen den Einstieg in den Bau von Elektrofahrzeugen. Zahllose Start-ups und bekannte

Unternehmen aus anderen Branchen haben bereits E-Fahrzeuge entwickelt oder haben dies angekündigt (z. B. Streetscooter, e.Go, Uniti, Einride, Dyson etc.). Erleichtert wird dies durch die geringeren Einstiegshürden im Vergleich zur Produktion eines Fahrzeugs mit dem deutlich komplexeren Verbrennungsmotor.

Zudem haben große Automobilzulieferer eigene Fahrzeugkonzepte (z. B. Cube von Continental) und Komplettsysteme (z. B. ZF mit Elektroantriebsmodul für Busse und Lkws) für E-Fahrzeuge entwickelt und verringern damit den Entwicklungsaufwand für Marktneulinge.

12.1.4 Infrastruktur

Ohne die passende Infrastruktur können die Zukunftsfelder CASE die erhoffte positive Wirkung auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft nicht entfalten. Dazu gehören ein ausreichend dichtes Netz an Lade- bzw. Tankstellen, intelligente Verkehrssysteme sowie leistungsfähige, flächendeckende Kommunikationseinrichtungen.

12.1.4.1 Stromladestationen

Die für viele Privatbesitzer von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) und Plug-in-Hybridfahrzeugen (PHEV) bequemste und einfachste Möglichkeit ist das Laden über die Haushaltssteckdose. Allerdings ist die Ladeleistung über den Schuko-Stecker maximal auf etwa 2,3 kW (10-A-Absicherung) bzw. 3,6 kW (16-A-Absicherung) begrenzt. Akzeptable Ladezeiten sind damit nur bei kleineren Batterien bis etwa 10 kWh, wie sie in PHEV verbaut werden, erreichbar. Das Laden eines 90-kWh-Akkus, mit dem batterieelektrische SUVs und Sportwagen der Modellgeneration 2018 ausgerüstet sind, würde dagegen bis zu 40 Stunden dauern.

Ladesäulen und Wall-Boxen arbeiten daher mit deutlich höheren Ladeleistungen, die aber spezielle Stecker/Ladekabel erfordern. Die unterschiedlichen Stromversorgungsnetze und herstellereigenspezifische Lösungen haben weltweit zu einer großen Vielfalt an Stecker- und Ladesystemen geführt. Von der EU wird der als Typ 2 bezeichnete Stecker mit einer maximal zulässigen Ladeleistung von 43 kW favorisiert. Er genießt zwar in Deutschland eine große Verbreitung, es gibt aber weitere herstellerübergreifende Stecker wie CCS (Combined Charging System, maximal 170 kW Ladeleistung) und CHAdeMO (maximal 100 kW Ladeleistung) für DC-Schnellladestellen. Für zusätzliche Vielfalt sorgen herstellereigenspezifische Ladestecker wie der Tesla Supercharger (145 kW).

Abb. 12.12: DC-Schnellladestecker Typ 2



Quelle: Harting

Während die über die Jahre langsam gewachsene Ladeinfrastruktur bis maximal 120 kW ausgelegt war, liefern neue Schnellladestationen 150 kW und Ultraschnellladestationen sogar 350 kW Leistung.

Abb. 12.13: Ladestation mit Steckverbinder



Quelle: Harting

Die Preisspanne für die Ladeeinrichtung ist dementsprechend groß: Für einfache Wall-Boxen (400 V, 16 oder 32 A) für die heimische Garage werden Preise ab ca. 600 Euro aufgerufen. Dazu kommen die Installationskosten durch einen Fachmann. Für einen 22-kW-Anschluss summieren sich diese schnell zu einigen Tausend Euro. Der Aufbau einer Schnellladestation kostet einen niedrigen bis mittleren fünfstelligen Betrag.

Zum 5. September 2018 gab es in Deutschland 5.686 bei der Bundesnetzagentur gemäß der Ladesäulenverordnung gemeldete, öffentlich zugängliche Ladeeinrichtungen, Tendenz steigend. Als Betreiber treten die unterschiedlichsten Unternehmen, vom Parkplatzbetreiber über Energieversorgungsunternehmen bis hin zu Ladesystemanbietern und Lebensmittelketten, auf. Die meisten (4.839) dieser Ladeeinrichtungen unterstützen das gleichzeitige Laden von zwei Fahrzeugen (die sich dann aber die Anschlussleistung teilen müssen). 296 der Ladeeinrichtungen haben vier Ladepunkte. Die absolute Mehrheit der Ladeeinrichtungen sind Normalladeeinrichtungen (5.002), wovon 1.557 eine Anschlussleistung von maximal 22 kW (Dreiphasen-Wechselstrom mit 400 V)

aufweisen. 684 sind als Schnellladeeinrichtungen (Anschlussleistung 50 kW und mehr) gelistet. Zum gleichen Zeitpunkt gab es in Deutschland erst an vier Standorten Ultraschnellladestationen mit insgesamt 16 Ladeplätzen. Die Ladestationen von Tesla sind Autos dieser Marke exklusiv vorbehalten.

Zusätzlich arbeiten Hersteller von Fahrzeugen und Ladeeinrichtungen an drahtlosen (induktiven) Ladesystemen. Sie sollen das Laden von Autos zukünftig deutlich bequemer und vandalismussicher machen. Die erreichbare Ladeleistung lag Ende 2018 bei etwa 3 bis 4 kW. Langfristig sollen deutlich höhere Werte erreicht werden und sogar ein Laden während der Fahrt über eingebaute Spulen möglich sein. Als Anwendung bieten sich aber nicht Pkws, sondern Linienbusse an.

Wer sein Fahrzeug an einer der Ladestationen via Kabel laden will, braucht nicht nur den passenden Stecker an Bord, sondern auch den richtigen Zugang. Hier bemühen sich bereits viele Ladestromanbieter, darunter Automobilclubs, Energieversorgungsunternehmen, Autohersteller, Bezahldienstleister sowie Anbieter von Tankkarten und Ladesystemen, um die Gunst der Kunden. Je nach Standort des Fahrzeugs und den angefahrenen Routen/Stationen sind so zum Teil mehrere Ladekarten mit unterschiedlichen Zugangsvoraussetzungen, Stromtarifen und Abrechnungsmethoden erforderlich.

12.1.4.2 H₂-Tankstellen

In Deutschland gab es zum Stand 5. Oktober 2018 51 öffentliche Wasserstofftankstellen. Damit lag die Bundesrepublik etwa gleichauf mit den USA auf Platz zwei. Auf Platz eins befand sich zur gleichen Zeit mit etwa 100 öffentlichen Wasserstofftankstellen Japan. 2019 sollen es laut der Initiative H₂-Mobility dann 100 öffentliche Wasserstoffstationen für Pkws sein. In Europa kostet der Bau einer H₂-Tankstation rund eine Million Euro. Die Betankung eines Brennstoffzellenfahrzeugs dauert daran etwa drei Minuten und ist vergleichbar einfach wie das Betanken eines Erdgasfahrzeugs. Wegen der großen Reichweite und des kurzen Tankvorgangs reichen vergleichsweise wenige Wasserstofftankstellen zur Abdeckung der Nachfrage. Wasserstoff lässt sich zudem bei entsprechenden Abnahmemengen in Pipelines verlustfrei und kostengünstig transportieren und auch zwischenspeichern. Auch das deutsche Erdgasnetz kann Wasserstoff aufnehmen. Zudem gibt es bereits Erfahrungen aus dem langjährigen Betrieb von H₂-Pipelines im Ruhrgebiet (259 km) und Sachsen-Anhalt (90 km). Technische Lösungen für eine Erzeu-

gung von Wasserstoff mithilfe des Stroms aus Photovoltaikanlagen sowie die für eine Betankung von Fahrzeugen erforderliche anschließende Komprimierung auf bis zu 700 bar sind für Privathaushalte nicht wirtschaftlich bzw. noch nicht entwickelt.

12.1.4.3 Erdgas-/Flüssiggas-Tankstellen

Im Jahr 2018 gab es bundesweit insgesamt 861 Erdgastankstellen (CNG = Compressed Natural Gas). Das Tanken von Autogas (LPG = Liquefied Petroleum Gas) war an 7.100 Stellen in Deutschland, europaweit an 25.000 möglich. Der Tankvorgang eines Gasfahrzeugs dauert je nach Tankgröße drei bis fünf Minuten. Die Kosten für eine CNG-Tankstelle liegen bei ca. 200.000 bis 250.000 Euro, wobei das Gas dem städtischen Leitungsnetz entnommen, auf 300 bar verdichtet und in einem Zwischentank gespeichert wird. Die Errichtung einer LPG-Tankstelle schlägt mit mindestens 10.000 Euro zu Buche.

Da Automobilhersteller kaum noch Gasautos herstellen und der Steuervorteil ab 2019 langsam abgeschmolzen wird, ist mit einem Rückgang der Tankmöglichkeiten zu rechnen.

12.1.4.4 Straßeninfrastruktur

Voraussetzung für autonomes Fahren ist die bidirektionale Vernetzung von Fahrzeugen und Verkehrsleitsystemen (V2I). Dafür wird eine intelligente Straßeninfrastruktur benötigt, die sowohl relevante Daten zum Verkehr und den Straßenverhältnissen sammelt und an übergeordnete Management-Systeme wie Verkehrsleitzentralen weitergibt als auch wichtige Informationen (Falschfahrer, Wanderbaustelle, Unfall, Ampelschaltungen etc.) in Echtzeit an die Verkehrsteilnehmer übermittelt. Der Begriff Infrastruktur schließt in diesem Zusammenhang alle Systeme für die Verkehrskontrolle und -steuerung, wie Lichtsignalanlagen (Ampelanlagen), Wechselverkehrszeichen, Schilderbrücken und Parkleitsysteme, ein.

Abb. 12.14: Verkehrskontrolle und -steuerung durch intelligente Systeme



Quelle: Robert Bosch

Es gibt keine offizielle Statistik zur Zahl der Signalgeber (Ampeln) in Deutschland. Schätzungen gehen von ungefähr 1,5 Millionen aus, die von rund 50.000 Ampelanlagen gesteuert werden.

Auch wenn die genaue Zahl der Ampelanlagen nicht bekannt ist, lässt sich feststellen, dass es lange keine Standards für deren Steuerungen gab, da die Lichtsignalanlagen je nach Zuständigkeit von Gemeinden, Ländern oder dem Bund beauftragt werden. Erst in den 90er-Jahren haben Städte damit begonnen, Standards für die Kommunikationsschnittstelle zwischen Leitstelle und Lichtsteuerungssystem zu definieren. Beispiele sind hier BEFA-15-Derivate (Hannover und Nürnberg), TELIS (Regensburg) und VNetS (München).

1999 haben sich dann Hersteller von Lichtsignalanlagen zur Initiative OCIT (Open Communication Interface for Traffic Systems) zusammengefunden, um eine Vereinheitlichung zu erreichen.

Mehrwertdienste wie Verkehrslageberichte (auch außerhalb des Kreuzungsbereichs), Falschfahrerwarnsysteme oder dynamisch koordinierte Grünphasen stellen Anforderungen, die von klassischen Steuerungsanlagen und Verkehrsleitsystemen nicht abgedeckt werden. Die Systeme und Standards müssen daher weiterentwickelt werden, um den Aufbau und die Wartung entsprechender Anlagen für Hersteller und Betreiber zu vereinfachen.

Die OCIT Developer Group (ODG) hat im Frühjahr 2018 daher die OCIT-O-Schnittstelle in der Version 3.0 veröffentlicht, die der Verkehrsinfrastruktur den Zugang zu aktuellen, von Verkehrsteilnehmern bereitgestellten Informationen zur Verkehrssituation erlaubt. Gleichzeitig wurde die OCIT-O-Car-V1.0-Schnittstelle für die Bereitstellung bzw. Erfassung von Verkehrsinformationen und Verkehrsdaten außerhalb des Kreuzungsbereichs vorgestellt.

Trotzdem hinkt die Infrastruktur in Deutschland den schnell wachsenden Erwartungshaltungen hinterher. Erst etwa 30 Prozent der Lichtsignalanlagen in Deutschland sind überhaupt mit Kameras, Radar- oder Infrarotsensoren ausgerüstet. Noch weniger verfügen über installierte V2X-Kommunikationsmodule. Der Aufwand für die Nachrüstung (Software und Sendeeinrichtungen) ist jedoch überschaubar, wenn eine Lichtanlage über einen entsprechenden Steckplatz verfügt bzw. ohnehin erneuert wird.

Erste Beispiele für vernetzte Infrastruktur im öffentlichen Raum gibt es bereits in Deutschland: So wurde in Düsseldorf im September 2018 das Testfeld KoMo:D eröffnet, für das Ampelanlagen auf einem 20 km langen Streckenabschnitt mit Funkmodulen ausgerüstet wurden. Im Rahmen des länderübergreifenden, über 1.300 km langen Cooperative ITS Corridors (C-IST) wurde auf Autobahnabschnitten straßenseitige kooperative Infrastruktur aufgebaut und 2017 mit dem Probetrieb gestartet. In Soest soll ab 2019 die erste Teststrecke für autonomes Fahren im ländlichen Raum entstehen, die im Endausbau 80 km lang sein soll. Und bis 2020 sollen Autos aller Hersteller sowie Fahrräder in Hamburg über Bordsysteme bzw. eine App eine Prognose über die Ampelschaltung auf ihrer Strecke bekommen. Von den 1.750 Ampeln im Stadtgebiet sollen 1.000 in das System eingebunden werden.

12.1.4.5 Kommunikationsinfrastruktur

Die positive Wirkung einer Vernetzung von Fahrzeugen untereinander (V2V) und mit der Infrastruktur (V2I) macht sich dabei bereits bei einer vergleichsweise geringen Marktdurchdringung bemerkbar: Selbst wenn nur 10 Prozent aller Fahrzeuge entsprechend vernetzt sind, lässt sich nach Angaben eines Siemens-Sprechers die Verkehrslageentwicklung mit einer Treffsicherheit von 98 Prozent vorhersagen.

Allerdings fallen gerade im Zusammenhang mit dem autonomen Fahren gigantische Datenmengen an, die zum Teil an übergeordnete Systeme übertragen werden müssen, um zum Beispiel Navigationsfunktionen ausführen zu können. Experten haben ermittelt, dass bei einer achtstündigen Fahrt knapp vier Terabyte an Daten im Fahrzeug gesammelt werden.

Die Fahrzeugsoftware ist äußerst komplex, sodass die Fahrzeuge nach Überzeugung der meisten Autoexperten ständig online sein müssen, um die Sicherheit im Straßenverkehr gewährleisten zu können. Je nach Verortung der Rechenleistung und der Abspeicherung der Daten reagieren diese Fahrzeuge empfindlich auf eine Unterbrechung der Kommunikationsverbindung. Damit Sicherheitslücken schnell gestopft werden können, muss die Software der Fahrzeuge über die Kommunikationsinfrastruktur ohne Werkstattbesuch zeitnah aktualisiert werden können, was die zu übertragenden Datenmengen noch einmal erhöht.

Dies setzt leistungsfähige Kommunikationskanäle mit geringen Latenzzeiten und großer Bandbreite voraus.

Für die Kommunikation der Fahrzeuge mit der Infrastruktur müssen Latenzzeiten von maximal etwa 100 Millisekunden erreicht werden. Zudem muss die Kommunikation auch mit Fahrzeugen sichergestellt sein, wenn sich diese mit 500 km/h bewegen.

Die Autoindustrie setzt deshalb bei der V2V-Kommunikation auf weiterentwickelte Standard-WLAN-Funktechnologie. Ihr zur Seite wird in vielen Telematikanwendungen eine Kommunikation via Mobilfunk (C-V2X) gestellt, die eine Kommunikation mit übergeordneten Systemen wie Verkehrsleitsystemen erlaubt. Beide Technologien ergänzen sich in einem Hybridbetrieb optimal in puncto Bandbreite, Reichweite, Abdeckung und Verfügbarkeit. So können von einem Fahrzeug via Mobilfunk erhaltene Daten über WLAN an andere Fahrzeuge weitergeleitet werden, die sich nicht in Reichweite eines Mobilfunkmastes befinden.

a. Elektronische Fahrzeug- (OBU) und Straßeneinrichtungen (RSU)

Zahlreiche von EU und Bundesregierung geförderte Projekte haben die unterschiedlichsten Aspekte der V2X-Kommunikation untersucht.

Die Entwicklung und Verbreitung der für die V2X-Kommunikation erforderlichen On-Board-Units (OBU) und Road-Side-Units (RSU) ist trotzdem, von der Öffentlichkeit weitgehend unbemerkt, weitergegangen.

So wurden bereits im Rahmen des europaweit größten Feldtests simTD in den Jahren 2009 bis 2013 im Großraum Frankfurt diverse Anwendungen und Dienste aus den Bereichen Verkehrssicherheit, Verkehrseffizienz und Mehrwegdienste getestet. Dafür standen über 100 Fahrzeuge mit OBUs und 100 RSUs zur Verfügung. Seit Mitte der zweiten Dekade gibt es V2X-Module als Serienprodukt.

Auch Infrastrukturhersteller wie Siemens statten ihre Ampeln mit RSUs aus bzw. haben entsprechende Steckplätze in aktuellen Designs implementiert. So wurden für das Compass4D-Projekt 300 RSUs in mehreren teilnehmenden europäischen Städten installiert.

Cadillac hat bereits 2017 den CTS mit OBUs versehen und will diese ab 2023 auch in ersten Hochvolumenfahrzeugen verbauen. VW plant, alle neuen Volumenmodelle vom Kleinwagen bis zum Nutzfahrzeug ab dem dritten Quartal 2019 werkseitig mit entsprechender Technik auszurüsten. Toyota verbaut OBUs ab 2021 in den Fahrzeugen für den US-Markt der Marken Toyota und Lexus.

Die US-amerikanische NHTSA hat im Januar 2017 vorgeschlagen, V2X in Zukunft zu einem gesetzlich vorgeschriebenen Teil aller US-Fahrzeugdesigns zu machen. Eine endgültige Entscheidung steht jedoch noch aus.

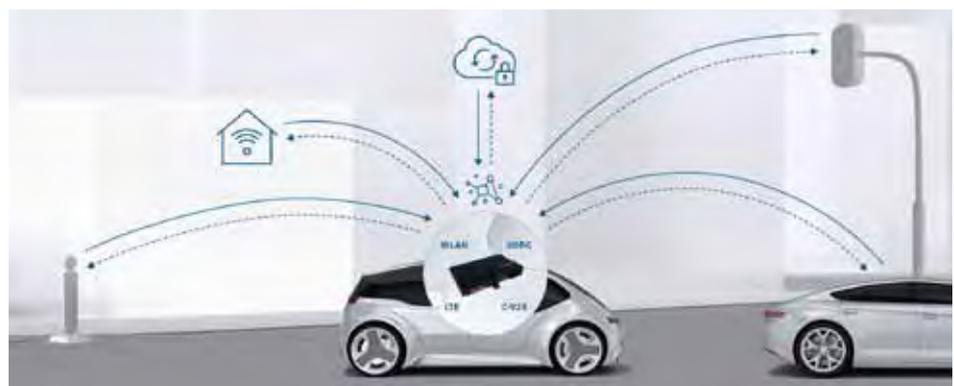
Vergleichbare Entscheidungen zur landesweiten Installation von RSUs zeichnen sich noch nicht ab.

b. Breitbandkommunikation

Da die Infrastruktur in Deutschland bislang kaum mit RSUs ausgestattet ist, wurde die Kommunikation von Fahrzeugen zu übergeordneten Systemen in diversen Pilotanwendungen in der Regel mithilfe der aktuellen Mobilfunkgeneration 3G (UMTS) bzw. 4G (LTE) realisiert. Trotz ständiger Weiterentwicklung des LTE-Standards (z. B. LTE Advanced, LTE Advance Pro/LTE+) stellen neue Anwendungen wie die zunehmende Zahl an Geräten und Sensoren mit Internetschnittstelle (IoT) und das autonome Fahren neue Anforderungen an den Mobilfunk. 5G ist wesentlich flexibler als LTE und dafür konzipiert, neben den Kommunikationsbedürfnissen der Menschen auch die künftigen Anforderungen vernetzter Fahrzeuge, Maschinen und Sensoren zu erfüllen.

Abb. 12.15: Zentrale Steuereinheit zur Fahrzeug-zu-X-Kommunikation

Bosch hat mit seiner Connectivity Control Unit (CCU) eine Vernetzungshardware entwickelt, die die Vehicle-to-X-Kommunikation (Vehicle-to-Everything) als zentrale Steuereinheit im Fahrzeug regelt.



Quelle: Robert Bosch

Abb. 12.16: V2X-Kommunikation



Quelle: Foto Bosch

So garantiert 5G erstmals eine bestimmte Latenzzeit. Zudem soll es möglich sein, dass das vernetzte Gerät seinen Bedarf vorgibt und das 5G-Netz flexibel darauf reagiert. Wem das noch nicht reicht, kann ein privates 5G-Netz aufbauen und auf seine speziellen Anforderungen zuschneiden. Nicht zuletzt soll eine Funkzelle mehr Teilnehmer versorgen können.

Auch bezüglich der Übertragungsraten verspricht 5G einen Quantensprung. Während mit LTE maximal eine Übertragungsgeschwindigkeit von 150 Mbits (im Download ohne Kanalbündelung) erreicht werden kann, sind es bei LTE Advanced schon 1.000 Mbits. 5G soll 10.000 Mbits ermöglichen.

Viele Automotive-Experten sind daher überzeugt, dass erst 5G die erforderlichen Voraussetzungen für das autonome Fahren mit sich bringt. Der Übergang von 4G auf 5G wird fließend erfolgen. Der kommerzielle Start soll ab 2020 in Angriff genommen werden.

Erste 5G-Funkzellen sind in Berlin seit 2017 im Probebetrieb. Mit einer vorläufigen Spezifikation des neuen Mobilfunkstandards (5G New Radio) erreichte der Betreiber Übertragungsraten von etwas über zwei Gigabit pro Sekunde auf einem einzelnen Endgerät bei einer Latenz (Ping) von nur drei Millisekunden.

Damit das in der Fläche auch ankommt, müssen allerdings die vorhandenen Sendestationen aufgerüstet und viele zusätzliche Funkzellen errichtet werden.

Datenbasierte Dienste und das autonome Fahren sowie die rasante Zunahme von vernetzten Geräten stellen auch neue Anforderungen an

konventionelle Rechenzentren. Abhilfe können hier Fog- und Edge-Computing bieten, also Rechnersysteme, die die Daten möglichst nahe am Entstehungsort (vor-)verarbeiten und so die zentralen Datacenter entlasten. Diese verteilte Architektur setzt aber leistungsfähige Datenübertragungswege in Form von Glasfaserkabeln voraus. Diese werden auch benötigt, um die zahlreichen Basisstationen mit dem Kernnetz des Providers zu verbinden.

c. GPS

Ohne präzise Positionsbestimmung lassen sich viele der für das automatisierte und autonome Fahren benötigten Funktionen nicht realisieren. Die Positionsbestimmung auf Basis des amerikanischen Satellitennavigationssystems GPS ist für kommerzielle Anwendungen jedoch auf mehrere Meter begrenzt. Nur militärische Anwender erhalten Zugriff auf genauere Daten. In Häuserschluchten oder tiefen Geländeeinkerbungen auftretende Reflexionen an Häusern und Felswänden verschlechtern die Genauigkeit zusätzlich.

Höhere Genauigkeiten lassen sich hier nur durch zusätzliche Maßnahmen (Assisted GPS) erreichen. Dazu gehören die Unterstützung durch Hilfssatelliten, das Mobilfunknetz, Lasermessungen der Umgebung oder die Einbeziehung anderer Sensordaten oder Datenquellen.

Das Satellitennavigationssystem Galileo und mittlerweile auch das amerikanische GPS-System nutzen ein zusätzliches Signal (E5a bzw. L5), um die negativen Einflüsse von Reflexionen, wie sie durch Felswände oder Häuserschluchten hervorgerufen werden, zu unterdrücken. Diese Signale erhöhen die erreichbare Genauigkeit der Positionsbestimmung ohne zusätzliche Maßnahmen auf ca. 30 cm.

Das Europäische Satellitennavigationssystem Galileo ist angetreten, um ohne zusätzliche Maßnahmen höhere Positionsgenauigkeiten zu ermöglichen. Anfang August 2018 umkreisten 26 Galileo-Satelliten die Erde, von denen 14 funktionierten. Damit das Navigationssystem seinen Betrieb aufnehmen kann, werden 22 funktionierende Trabanten benötigt. Mindestens 24 sind für eine weltweite Abdeckung erforderlich. Im Endausbau sollen es 30 sein, damit auch bei Störungen und Ausfällen von Satelliten die Position zuverlässig bestimmt werden kann.

Für automatisierte Navigationsfunktionen werden neben einer präzisen Positionsbestimmung hochgenaue Karten (HD-Karten) benötigt. Sie müssen die Realität detailliert in 3D und mit hoher Auflösung abbilden. Dabei müssen auch lokale und kurzfristig auftretende Ereignisse und Veränderungen (möglichst) in Echtzeit berücksichtigt werden.

12.1.5 Ausblick

Die gute Nachricht für alle Automobilhersteller: Die Zahl der Automobile wird global weiter ansteigen. Bis 2035 soll sie weltweit auf zwei Milliarden anwachsen – vor allem wegen des großen Nachholbedarfs Asiens und Südamerikas, aber auch Afrikas.

Die schlechte Nachricht: Die großen OEMs und Zulieferer geraten wegen steigender Umweltauflagen und neuer Konkurrenz aus China und den USA unter einen verstärkten Handlungs- und Veränderungsdruck und müssen ihre Geschäftsmodelle überdenken bzw. neu ordnen.

Abb. 12.17: Künstliche Intelligenz im Cockpit



Quelle: Robert Bosch

12.1.5.1 Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor

Der Anteil an Pkws, die ausschließlich von einem Verbrennungsmotor angetrieben werden, wird sinken. 2017 lag der Anteil immer noch bei fast 100 Prozent. Einige Marktforscher gehen allerdings davon aus, dass dieser 2025 nur noch bei etwa 50 Prozent liegen wird. Manche Experten erwarten sogar noch größere Rückgänge.

Unternehmen, die sich mittel- oder unmittelbar mit dem Antriebsstrang rund um den Verbrenner beschäftigen, müssen sich auf Rückgänge einstellen, auch wenn sich bei genauerem Betrachten die Zahlen relativieren. Zum einen nimmt die Zahl der verkauften Autos bis 2025 weiter zu, sodass der Rückgang der Verbrenner in absoluten Zahlen nicht so groß ausfallen wird. Zum anderen werden mehr Hybridfahrzeuge nachgefragt, sodass der Verbrennungsmotor auch bis 2025 und darüber hinaus ein wichtiges Standbein bleibt.

Das schließt auch den viel gescholtenen Dieselmotor mit ein, mit dem 2018 etwa 20 Prozent aller weltweit produzierten Autos ausgestattet wurden. Der Dieselskandal und die NOx-Diskussion haben die Tatsache überlagert, dass Selbstzünder durch den höheren Energieinhalt des Diesels und den besseren Verbrennungsvorgang grundsätzlich weniger CO₂ ausstoßen als vergleichbare Ottomotoren. Aufgrund dieser Eigenschaft steigen die Verkaufszahlen von Dieselfahrzeugen in Japan an, in einem Land, das bisher kaum auf den Diesel gesetzt hat und daher vom Dieselskandal unberührt geblieben ist.

Dazu kommt: Während Dieselmotoren in der EU bereits seit 2013 Grenzwerte bei Feinstaubemissionen einhalten müssen (Euro 5b), wurden diese für Neufahrzeuge mit Ottomotoren erst 2015 mit der Norm Euro 6b eingeführt und 2018 auf den Grenzwert für Dieselmotoren abgesenkt. Dabei stoßen Benziner in der Version des Direktinspritzers (ohne Filter) eine höhere Anzahl an ultrafeinen und damit besonders gesundheitsgefährdenden Partikeln aus. Sollte dies bei Politik und Öffentlichkeit zu einer ähnlichen Diskussion wie beim Diesel führen, könnte dies Fahrverbote nach sich ziehen und zusätzlichen Rückenwind für andere Antriebe – einschließlich des Dieselmotors – bedeuten.

Gerade bei Anwendungen, bei denen es auf hohe Reichweiten und/oder die Motorisierung großer Fahrzeuge ankommt, ist der Verbrennungsmotor ohnehin auf absehbare Zeit unverzichtbar. International agierende Fahrzeughersteller werden daher bis 2025 und darüber hinaus Modelle mit Verbrennungsmotoren entwickeln und bauen.

Städte als besonders dicht besiedelte Regionen leiden besonders unter den Folgen des Verkehrs. Mit der fortschreitenden Urbanisierung und ihrer damit einhergehenden zunehmenden politischen und ökonomischen Bedeutung setzen immer mehr Städte Maßnahmen zur Verringerung der (lokalen) Emissionsbelastungen durch. Dies

reicht von Fahrverboten und City-Mautgebühren für besonders emissionsreiche Fahrzeuge über die Einführung intelligenter Verkehrssysteme bis hin zur Reduzierung von Park- und Straßenflächen für Autos.

Da der Bestand an Fahrzeugen und deren Durchschnittsalter insgesamt zunehmen, sind weitgreifendere Maßnahmen erforderlich, um sowohl die lokale Belastung mit NO_x und Feinstaub als auch die CO₂-Belastungen weiter reduzieren zu können. Das gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass die realen Emissionswerte und die Herstellerangaben hierzu in jüngerer Vergangenheit immer weiter auseinanderklafften. Berechnungen der Organisation ICCT aus dem Jahr 2017 zeigen, dass auf Flottenebene über alle Fahrzeugsegmente hinweg Diesel 119 g/km und Benziner etwa 123 g/km des Klimagases in die Umwelt abgeben. Damit liegt die Industrie noch weit vom bereits ab 2020 geltenden flottenübergreifenden Grenzwert von 95 g/km entfernt. Die Hersteller bezeichnen denn auch die von den EU-Umweltministern im Herbst 2018 für die Zeit nach 2030 beschlossene Absenkung der CO₂-Werte um weitere 35 Prozent als zu ambitioniert.

12.1.5.2 Fahrzeuge mit alternativen Antrieben

Ohne massiven Einsatz von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben können die in Paris vereinbarten Klimaziele nicht erreicht werden.

Viele OEMs betrachteten die Entwicklung der ersten Pkws mit alternativen Antrieben jedoch aufgrund der in der EU geltenden Berechnungsmethode, bei der die Emissionen des elektrisch gefahrenen Anteils mit null angesetzt werden, als gute Möglichkeit, flottenübergreifend die Emissionen rechnerisch zu senken, um die EU-Flottengrenzwerte trotz des Verkaufs schwerer SUVs mit Verbrennungsmotor einhalten zu können.

Der WLTP-Fahrzyklus mit seinen realitätsnäheren, also tendenziell höheren Kraftstoffverbrauchsangaben und der ab 2020 geltende CO₂-Grenzwert von 95 g/km haben diesen Mechanismus noch stärker in den Fokus der OEMs gebracht. Gleichzeitig ist der Kampf um Marktanteile zwischen den Traditionsunternehmen und den Neueinsteigern der Branche entbrannt, sodass bis 2025 eine große Anzahl an Fahrzeugen mit alternativen Antrieben auf den Markt kommen wird.

Die Brennstoffzellentechnik wird dabei nur eine Nebenrolle bei der Elektrifizierung des Individualverkehrs spielen, da sie noch nicht massen-

tauglich ist. Zudem fällt die CO₂-Bilanz angesichts der bis dato zur Wasserstoffherzeugung genutzten Verfahren negativ aus. Gleichwohl setzen insbesondere Automobilhersteller in Japan und Südkorea, die auch die ersten entsprechenden Fahrzeuge in (Klein-)Serie produziert haben, auch auf die Brennstoffzelle als Energiequelle in Fahrzeugen der Zukunft. Diese Einschätzung teilen viele Fachleute, wie eine von KPMG durchgeführte Umfrage unter Automotive-Führungskräften zeigt. Eine Mehrheit der Befragten sieht in der Brennstoffzelle den Schlüssel zur Elektromobilität. Als Zwischentechnologie auf dem Weg zur Wasserstoffwirtschaft ist ein Hybridansatz (Brennstoffzelle / kleine Traktionsbatterie) denkbar.

Mit Gas (Flüssiggas oder Erdgas) betriebene Pkws werden auch weiterhin Nischenprodukte bleiben. Dies legen die im Jahr 2018 und in den Vorjahren zurückgehenden Anmeldungszahlen und die für Deutschland beschlossene Abschmelzung des Steuervorteils nahe.

Mittelfristig werden also neben Hybridfahrzeugen gerade Fahrzeuge mit batterieelektrischem Antrieb in erheblicher Zahl für die geforderte Senkung der Emissionen benötigt.

Welche Anteile die einzelnen Antriebsarten bis 2025 bei den Neufahrzeugen erreichen werden, lässt sich jedoch nur bedingt prognostizieren – dazu sind die maßgeblichen Einflussfaktoren zu vielfältig und zu volatil in der Entwicklung. Das Marktforschungsunternehmen IHS Automotive wagte trotzdem folgende Produktionsprognose für Europa für das Jahr 2025: 2,3 Millionen batterieelektrische Autos (BEV) und 10,2 Millionen Hybride (HEV). In einer anderen Prognose des gleichen Unternehmens wurde für den gleichen Zeitraum von einer globalen BEV-Produktion von 3,84 Fahrzeugen ausgegangen.

Fest steht aber, dass die Zahl der verkauften BEV in Deutschland bis 2025 anfangs nur langsam ansteigen wird, da sich viele private Käufer angesichts hoher Anschaffungspreise, geringer Reichweiten, geringer Zuladung und langer Ladezeiten vorerst lieber für ein Hybridfahrzeug entscheiden. Es vereint die Vorteile des emissionsarmen Fahrens mit hoher Reichweite und erfordert zudem kein verändertes Mobilitätsverhalten vom Konsumenten. Allerdings ist die elektrische Reichweite der Hybridfahrzeuge gering und der Mehraufwand (Service, Wartung, Anschaffungskosten) bei einem Hybridfahrzeug im Vergleich zu einem reinen Verbrenner deutlich höher. Zudem werden sich die Anschaffungspreise von batterieelektrischen Fahrzeugen und

Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor bis 2025 weiter annähern. Realistisch erscheint daher in Deutschland ein Anteil der Elektrofahrzeuge (Hybrid und batterieelektrischer Antrieb) an den Neuzulassungen bis 2025 von etwa 15 (konservativ) bis 30 Prozent (optimistisch). Weltweit gesehen ist jeweils mit einem deutlich geringeren Marktanteil zu rechnen.

Die damit erreichbare tatsächliche Reduzierung der (globalen) Emissionen wird insbesondere wegen der schlechten CO₂-Bilanz der Li-Ionen-Traktionsbatterie, des hohen Anteils fossiler Kraftwerke im europäischen Energiemix und des steigenden Fahrzeugbestands mittelfristig jedoch geringer ausfallen. Andere Batterietechnologien sind bis 2025 nicht serienreif. Von 2017 bis 2025 soll zwar der Anteil erneuerbarer Energien laut Gesetz in Deutschland von etwa 36 auf 40 bis 45 Prozent ausgebaut werden. Es zeichnet sich aber bereits eine Verlangsamung des Umbaus der Energieerzeugung ab, wie die zurückgehenden Investitionen in Windkraftträder belegen. Synthetische Kraftstoffe (z. B. aus bisher ungenutztem Pflanzenrestmaterial) könnten helfen, die CO₂-Emissionen der Bestandsflotte schnell zu reduzieren, sind aber bis 2025 kaum verfügbar.

12.1.5.3 Vernetzung und Datendienste

Städte und insbesondere die Fahrzeughersteller starten mit der großflächigen Vernetzung von Fahrzeugen mit dem Ziel, den Verkehrsfluss zu verstetigen und die Emissionen durch eine intelligente Verkehrsführung zu verringern. Die Hardwarekosten für die Vernetzung der Fahrzeuge untereinander sowie mit dem Mobilfunknetz liegen pro Fahrzeug im unteren zweistelligen Eurobereich. Die Hochgeschwindigkeitsanbindung der Infrastruktur via Glasfaser bzw. 5G-Mobilfunk kostet deutlich mehr und wird bis 2025 in Deutschland nur lückenhaft vorhanden sein. Trotzdem werden bis dahin erste positive Effekte

der Vernetzung für Autofahrer und Flottenbetreiber spürbar werden.

Die mit der Vernetzung verfügbar gemachten Fahrzeug- und Verkehrsdaten bilden die Grundlage für den Ausbau bestehender sowie den Aufbau neuer Geschäftsmodelle. Laut dem Marktforschungsunternehmen Deloitte bergen die Datenmonetarisierung sowie die Mobilitätsdienstleistungen für die OEMs großes Potenzial und könnten bis 2025 unter günstigen Bedingungen bis zu 15 Prozent des Gesamtumsatzes der Unternehmen ausmachen.

12.1.5.4 Automatisierung und autonomes Fahren

Der Markt für fortschrittliche Komfort- und Sicherheitsfunktionen (ADAS) legt jedes Jahr zweistellig zu. ADAS ist bei den OEMs für einen guten Teil der erzielten Marge verantwortlich. Die Investition in ADAS rechnet sich für die Fahrzeughersteller besonders, weil sie sich antriebsunabhängig realisieren lassen. Die Zahl der Modelle mit automatisierten Fahrfunktionen bis Level 3 wird daher bis 2025 deutlich zunehmen. Es besteht die realistische Chance, dass sich bald erste Level-4-Fahrzeuge dazugesellen werden.

Autonomes Fahren (Level 5) wird dagegen bis 2025 in Deutschland nur unter eng definierten Rahmenbedingungen in ausgewählten Bereichen zum Einsatz kommen. Zwar waren Ende 2018 bereits 90 Prozent aller erforderlichen technischen Voraussetzungen für das autonome Fahren gegeben, die verbleibenden 10 Prozent erfordern aber noch erhebliche Anstrengungen. Daneben gibt es offene rechtliche und ethische Fragen. Zudem fehlen noch (flächendeckende) Kommunikationswege für den Austausch großer Datenmengen, ohne die aber autonomes Fahren mit der verfügbaren Technik nicht bzw. nur eingeschränkt möglich ist.

Abb. 12.18: Autonomes Fahren



Quelle: Robert Bosch

Das Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) geht ebenfalls davon aus, dass das autonome Fahren frühestens ab 2025 in Deutschland und anderswo Einzug halten wird. Die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften nennt das Jahr 2030, die Unternehmensberatung Oliver Wyman das Jahr 2035 als Zeitpunkt. Einige Insider betrachten selbst dieses Datum als zu optimistisch und erwarten vollautonome Autos nicht vor 2050.

Entsprechend lange müssen Umwelt und Volkswirtschaft auf die positiven Effekte warten, die der Wechsel auf Roboterfahrzeuge nach Überlegungen von Prof. A. Herrmann von der Universität St. Gallen jährlich bringen soll: 30 Prozent weniger Energieaufwand, 90 Prozent weniger Unfälle und frei verfügbare Zeit im Wert von bis zu vier Billionen Euro.

12.1.6 Herausforderungen

CASE bietet enorme Chancen für die deutsche Wirtschaft und die Bevölkerung. Allerdings hat sich noch kein (Geschäfts-)Modell durchgesetzt, das etablierten OEMs, Zulieferern und Neueinsteigern den Weg in eine erfolgreiche CASE-Zukunft weisen könnte. Zudem beeinflussen zahlreiche Faktoren die Entwicklung der CASE-Märkte maßgeblich und können den erwarteten Nutzen (Wirtschaftswachstum, Umweltschutz, Unfallvermeidung etc.) verstärken oder aber auch gefährden.

12.1.6.1 Connected

Der Softwareumfang und die Softwarevielfalt nehmen bei Fahrzeugen durch neue Funktionen (ADAS, Online-Dienste inkl. Bezahlfunktion, Vernetzung etc.) drastisch zu. Mit zunehmender Komplexität, Heterogenität und Schnittstellenanzahl nimmt dabei auch die Zahl der Fehler überproportional zu. Auch ergeben sich neue und mehr Angriffsmöglichkeiten und Angriffswege für Cyberkriminalität. Die Gewährleistung eines bestimmten Sicherheitsniveaus erfordert also einen immer größeren Aufwand, der aus Wettbewerbsgründen gegebenenfalls infrage gestellt wird. Die Anforderungen ändern sich zudem während der Lebensdauer des Fahrzeugs und stehen in der Entwicklungsphase oft noch nicht im Detail fest. Die Software muss daher ständig aktualisiert werden können. Die Fahrzeughersteller führen neue Arbeitsprozesse und Architekturen ein und treiben die Standardisierung (z. B. Adaptive AUTOSAR, ISO 26262 und SOTIF) voran. Die Standards hinken aber naturgemäß der technischen Entwicklung hinterher, enthalten keine Umsetzungsdetails bzw. schreiben keine bestimmten Technologien vor und können nicht alle Aspekte abdecken. Jeder

Hersteller löst die Sicherheitsanforderungen daher anders. Vergleichsweise neu ist dabei für die OEMs das Thema Datensicherheit, das durch die Vernetzung der Fahrzeuge und die anfallenden großen Datenmengen in den Vordergrund rücken wird. Die Fahrzeuge sind aber nicht beliebige Knoten im Internet of Things, sondern nach Überzeugung der Hersteller Bestandteil herstellerspezifischer Netzwerke mit klar definierten Regeln und Zugriffen.

Trotz aller Bemühungen ist und bleibt Software nicht fehlerfrei und angriffssicher. Entsprechende Attacks, die zum Beispiel Tausende Fahrzeuge eines Modells betreffen und damit für Hacker interessant werden, oder eine Häufung bestimmter Fehlerbilder könnten die Einführung weiterer Dienste oder automatisierter Fahrfunktionen behindern.

Auch der Aufbau der für die Vernetzung erforderlichen Kommunikationsinfrastruktur läuft erst langsam an. Der für 2018 angestrebte Breitbandausbau, bei dem jeder Haushalt mit einem 50-MBits-Anschluss versorgt werden sollte, ist nicht umgesetzt worden. Im März 2018 hat sich die Koalition in Berlin das Ziel gesetzt, bis 2025 alle Regionen und Gemeinden an das Glasfasernetz anzuschließen. Doch gerade in ländlichen Gebieten sind die Kosten für die Hausanschlüsse hoch und der wirtschaftliche Nutzen für die Provider zu gering. Aus ähnlichen Gründen ist auch das Mobilfunknetz der 4. Generation (LTE) immer noch nicht flächendeckend verfügbar, sodass Deutschland damit zu den Schlusslichtern in Europa gehört. Die mit der eingeleiteten Vernetzung der Fahrzeuge rasant anwachsenden Datenmengen und die für automatisierte Fahrfunktionen nötige Versorgung der Fahrzeuge mit Echtzeitdaten erfordern noch schnellere und zuverlässigere Netze, wie sie nur die 5. Mobilfunkgeneration (5G) zu bieten vermag. Auch hier zeichnet sich wegen der im Vergleich zu 4G noch höheren Investitionskosten ab, dass die Provider den Ausbau mit einer ähnlichen Argumentation nicht so schnell wie erhofft vorantreiben werden. Zudem ist die ursprünglich für Ende 2018 angekündigte Frequenzversteigerung wegen Kritik an der Vergabeprozedur und den Vorgaben ins Stocken geraten, was die Einführung verzögerte. 2025 und darüber hinaus wird daher die für den Einsatz von autonomen Kraftfahrzeugen erforderliche leistungsfähige Breitbandtechnik ohne staatliche Subventionierung (insbesondere wenn die Infrastruktur nicht von mehreren Providern gemeinschaftlich genutzt wird) nur in Ballungszentren und entlang der Autobahnen – und auch hier nur zu hohen Verbindungspreisen – verfügbar sein. Anders kann die Situation aussehen,

wenn der Staat auf Lizenzeinnahmen verzichtet oder sich anderweitig finanziell engagiert.

12.1.6.2 Autonomous

Der Ethikrat der Bundesregierung hat im Frühjahr 2017 in einem 20-Thesen-Papier definiert, dass das automatisierte und vernetzte Fahren ethisch geboten ist, wenn die Systeme weniger Unfälle verursachen als ein menschlicher Fahrer. Letzterer bewältigt im Durchschnitt etwa 180 Millionen Kilometer ohne Unfall mit tödlichem Ausgang. Einige Experten erwarten allerdings neue Unfallszenarien in Zusammenhang mit automatisierten Fahrzeugen (Level 3 und 4), etwa bei der kurzfristigen Übergabe des Steuers an den Fahrer oder durch Fehlentscheidungen des Level-5-Automaten (ohne Möglichkeit zur Korrektur durch den Menschen). Nicht zuletzt wird der Mischverkehr von automatisierten und nicht automatisierten Fahrzeugen von diesen Experten kritisch gesehen. Viele fordern reservierte Fahrbahnbereiche für Roboterautos, um eine schrittweise, gefahrlose Einführung der Technik zu ermöglichen, zumal menschliche Fahrer sonst die Roboterautos mit ihrer unvermeidlich defensiven Fahrstrategie einfach ausbremsen und dabei den Verkehr behindern könnten.

Als größere Hürde für das autonome Fahren (in Deutschland/Europa) könnten sich allerdings Rechtsfragen erweisen. So ist noch offen, wie von der Gesellschaft damit umgegangen wird, dass beim selbstfahrenden Auto voraussichtlich KI-Routinen in nicht transparenter Weise (Black-box) Entscheidungen über Tod und Leben von Verkehrsteilnehmern treffen. So ist es denkbar, dass sich der Algorithmus in einer Notsituation dafür entscheidet, lieber das Leben der Insassen zu gefährden, als in eine als solche erkannte Fußgängergruppe zu fahren. Ungeklärt ist auch, wie die von Verkehrsjuristen und Versicherern geäußerte Forderung von den Verbrauchern aufgenommen wird, dass sie als Fahrzeughalter weiterhin für Unfälle haften (Gefährdungshaftung) sollen, auch wenn sie zum Unfallzeitpunkt gerade nicht die Kontrolle über das Auto innehatten. In dem im Sommer 2017 vom Bundestag verabschiedeten Gesetz zum automatisierten Fahren wurde zwar festgelegt, dass über einen im Auto installierten Datenspeicher geklärt werden können soll, ob Mensch oder Maschine zum Unfallzeitpunkt das Auto gesteuert hat. Inwieweit das mit dem Datenschutz vereinbar ist, ist jedoch weiter Gegenstand der Diskussion. Das Gesetz unterscheidet zudem nicht zwischen automatisiertem und autonomem Fahren. Unklar ist auch, welche Konsequenzen (z. B. vorübergehende Stilllegung) ein Unfall eines automatisch fahrenden Autos für die restlichen Fahrzeuge

der gleichen Baureihe haben soll. Schließt der Gesetzgeber diese und ähnliche Lücken nicht oder reagiert er zu spät oder nicht ausreichend auf technologische Entwicklungen, könnte dies die Einführung des autonomen Fahrens deutlich verzögern.

12.1.6.3 Shared & Services

Neue Geschäftsmodelle rund um die Datenmonetarisierung und Mobilitätsdienstleistungen bieten den OEMs neue Wachstumschancen. Allerdings haben Fahrzeughersteller auf diesen Gebieten kaum Erfahrung. Neben der Idee bedarf es zudem oft eines breiten und schnell adressierbaren Anwenderkreises, da viele Geschäftsmodelle erst ab einer bestimmten Teilnehmerzahl erfolgreich sein können. Hier befinden sich Google, Amazon & Co. mit ihrer riesigen Anwenderbasis oftmals in einer besseren Ausgangsposition.

Erste Studien zum Car- und Ride-Sharing zeigen, dass die Mobilitätsangebote vielfach in direkter Konkurrenz zum öffentlichen Nahverkehr (ÖPNV) und dem Fahrrad stehen. Wird der ÖPNV nicht attraktiver gestaltet, besteht die ernsthafte Gefahr, dass der Verkehr in den Innenstädten durch Sharing-Modelle nicht, wie erhofft, abnimmt, sondern sogar wächst und der ÖPNV weiter wirtschaftlich ins Hintertreffen gerät. Erste Städte haben auf diese Entwicklung mit der Beschränkung der Aktivitäten der Mobilitätsdienstleister im Stadtgebiet reagiert.

Auch die von der Wirtschaft vorangetriebene Monetarisierung der anfallenden Daten könnte durch staatliche Auflagen gebremst werden. Das Thesenpapier des Ethikrats der Bundesregierung aus dem Jahr 2017 enthält eine Empfehlung bezüglich des Datenschutzes bzw. der Datenautonomie, die besagt, dass der Fahrer grundsätzlich selbst über Weitergabe und Verwendung seiner Fahrzeugdaten entscheidet. Diesem Vorschlag folgen zwar auch die deutschen Autohersteller. Doch ist nicht definiert, was reine Fahrzeugdaten sind, die dem Hersteller gehören, und was persönliche Daten sind, über die der Fahrer die Kontrolle haben soll. Versicherer und Verbrauchervereine fordern zudem, dass die Fahrzeugdaten für die Abwicklung der Schäden bei einem Unfall von einer unabhängigen Treuhandstelle gesammelt werden und nicht (nur) von betroffenen Interessenträgern. Dem widersetzen sich Hersteller auch aus Sicherheitsgründen.

Abb. 12.19: Urbane Mobilität



Quelle: Robert Bosch

12.1.6.4 Electric

Entscheidend für den Erfolg batterieelektrischer Antriebe ist ein ausreichend dichtes Netz aus (Schnell-)Ladestationen und ein entsprechend ausgelegtes Stromnetz. Mehrere Studien kommen zu dem Schluss, dass nicht genügend Ladestationen aufgebaut werden können, um bis 2025 die angestrebten Marktanteile von E-Autos zu erreichen.

Analysten der UBS-Bank gehen etwa von einem weltweiten Bedarf an 18 bis 20 Millionen zusätzlichen öffentlichen Ladesäulen bis 2025 aus, sodass bei durchschnittlichen Kosten von 20.000 US-Dollar pro Säule 400 Milliarden US-Dollar investiert werden müssten. Allein in Europa seien zehn Millionen neue Säulen erforderlich. Der Verband der Automobilindustrie ACEA geht zwar nur von einem Bedarf von zwei Millionen öffentlicher Ladesäulen bis 2025 aus, doch auch dies scheint nicht ohne Weiteres erreichbar: Bislang rechnen sich die Säulen für die Betreiber trotz großzügiger staatlicher Förderung kaum. Entsprechend zögerlich entwickelt sich der Ausbau. So wollte die deutsche Autobranche bis Ende 2017 mit dem Aufbau der ersten 20 Schnellladestationen für das europaweite Ionity-Netz beginnen. Bis 2020 sollten es 400 sein. Zum Stand Herbst 2018 waren jedoch nur 15 in Betrieb. Laut Bundesnetzagentur gibt es zum gleichen Zeitpunkt bundesweit rund 10.000 Ladepunkte. Die Bundesregierung hat sich im

Februar 2018 für das Jahr 2020 stolze 100.000 Ladepunkte zum Ziel gesetzt, die Hälfte davon (nicht für jedes Fahrzeug geeignete) Schnelllader. Nicht gelöst ist auch die Frage, wie Ladestationen entlang der Autobahnen den Ansturm zu Urlaubszeiten bewältigen sollen. Problematisch ist zudem die Belastung des Stromnetzes durch die unkoordinierten Ladevorgänge und die zu geringe Anschlusskapazität. Letztere bedingt, dass die Mehrheit der Ladepunkte nur 22 kW und weniger an Ladeleistung bereitstellen kann. Autofahrer werden also insbesondere in ländlichen Regionen und in Bestandsmietshäusern weiterhin mit einem löchrigen Ladepunktenetz und langen Ladezeiten rechnen müssen, was wiederum die Verbreitung der Elektromobilität beeinflusst. Auch steht wegen der unterschiedlichen Wirtschaftsentwicklung zu erwarten, dass sich in Europa das Nord-Süd- und Ost-West-Gefälle in puncto Netzdichte eher verstärkt. 54 Prozent der in einer KPMG-Studie anonym befragten Führungskräfte aus der Automobilbranche glauben auch, dass sich batterieelektrische Fahrzeuge wegen Schwierigkeiten beim Aufbau der erforderlichen Infrastruktur nicht durchsetzen werden. Bei den CEOs lag der Anteil sogar bei 67 Prozent.

Für eine positive CO₂-Bilanz der Elektromobilität müsste zudem der Anteil an erneuerbaren Energien bis 2025 deutlich erhöht und das Stromnetz entsprechend umgebaut werden, wobei der zusätzliche Strombedarf durch die Elektromobilität bis 2030 nach Prognosen nur wenige Prozentpunkte über dem Strombedarf von 2018 liegen soll.

Bislang rechnet sich der Wechsel vom Verbrenner zum batterieelektrischen Antrieb für die wenigen Privatnutzer, die dies überhaupt in Betracht ziehen, wegen der hohen Batteriekosten aus ökonomischer Sicht selten (Anschaffungskosten, Reichweite, zul. Gesamtgewicht). Engpässe bei der Versorgung mit Rohstoffen wie Grafit, Lithium, Mangan und insbesondere Kobalt sowie zu geringe Batterieproduktionskapazitäten und fehlende wirtschaftliche Recyclingverfahren verlangsamen den Preisverfall oder könnten sogar zu einer Trendumkehr bei den Batteriepreisen führen und dadurch die Entwicklung der Elektromobilität verzögern. Zudem ist noch nicht abschließend belegt, wie sich die Batterien im harten Praxiseinsatz im Fahrzeug bewähren und welche Lebensdauer/Laufleistung sie tatsächlich unter den verschiedenen Rahmenbedingungen erreichen. Neuartige Batterien mit höherer Energiedichte sind noch im Forschungsstadium und gehen voraussichtlich erst nach 2025 in Serienproduktion.

Fehlerhafte Angaben zur Batterielebensdauer und der Reichweite, Probleme bei der Entsorgung bzw. beim Recycling der Fahrzeuge, eine negative CO₂-Bilanz, unbekannte Fahrzeuganbieter ohne lokales Werkstattnetz und eine Diskriminierung von Verbrauchern bei der Bereitstellung und Nutzung von Mobilität (z. B. über Scores) könnten die Akzeptanz durch die Verbraucher weiter belasten.

12.1.6.5 CASE-Umfeld

Der facettenreiche Themenkreis CASE genießt bei Regierungen und Unternehmen höchste Aufmerksamkeit. Entsprechend groß sind die Investitionsprogramme, die weltweit aufgelegt wurden. Dies hat zu einer unüberschaubaren Flut an Förderungen zur Entwicklung und Einführung emissionsarmer Fahrzeuge und einer ebenso unüberschaubaren Zahl an technischen Lösungsansätzen zum Beispiel für den Lade- und Bezahlvorgang sowie die Traktionsbatterien geführt. Diese unkoordinierte Vorgehensweise von Unternehmen und Staaten erhöht die Wahrscheinlichkeit von technischen Sackgassen und Fehlinvestitionen. Auch aufgrund der Komplexität und erforderlichen Verzahnung unterschiedlichster Branchen und Industrien (z. B. Automotive-, Finanz-, Energie- und Kommunikationsindustrie), der erforderlichen Sicherstellung der Rohstoffversorgung und der Verbesserung der Umweltbilanz sowie des anstehenden Umbaus der Arbeitswelt sind daher neue Wege der Zusammenarbeit und Arbeitsteilung von Staaten und Unternehmen zwingend für die Erreichung der erhofften Emissions- und Wachstumsziele erforderlich. Auch müssen sich Politik und Wirtschaft verstärkt mit der nachhaltigen Rohstoffversorgung unter Einhaltung der Menschenrechte sowie der Umwelt- und Sozialstandards auseinandersetzen. Von 53 für die E-Mobilität und andere Zukunftsfelder wichtigen mineralischen Rohstoffen, darunter viele seltene Erden, werden gerade einmal zwölf in die Gruppe mit geringen Beschaffungsrisiken eingeordnet. In allen anderen Fällen gibt es entweder nur wenige Anbieter oder die Rohstoffe werden in Ländern mit erhöhten politischen Risiken gefördert. Darüber hinaus ist Europa bei der Batteriezellenproduktion mittelfristig von Asien abhängig. Weitere zentrale Techniken müssen zugekauft werden, sodass die Wertschöpfung nicht in Europa erfolgt.

12.1.7 Auswirkungen auf die Bauelementeindustrie

Marktforscher rechnen damit, dass Automotive-Anwendungen zum nächsten großen Technologietreiber avancieren und der Automobilhalbleitermarkt überdurchschnittlich wachsen wird.

So prognostiziert Semico Research für die Automotive-Halbleiter in der Marktanalyse „Automotive Semiconductors: Accelerating in the Fast Lane“ für das Jahr 2023 ein Marktvolumen von 73 Milliarden US-Dollar.

Die Prognose fußt zum einen auf der von Politik und Wirtschaft angestrebten Steigerung des Anteils an Neufahrzeugen mit elektrischen Antrieben sowie dem ungebrochenen Trend zu immer mehr fortschrittlichen Fahrerassistenzsystemen. Zum anderen können sich neue Käufer-schichten in Schwellen- und Entwicklungsländern Fahrzeuge leisten, die auf zusätzliche Nachfrage hoffen lässt.

Als Innovationstreiber erweisen sich insbesondere der elektrische Antriebsstrang, das automatisierte Fahren, die Vernetzung der Fahrzeuge untereinander sowie neue Mobilitätsdienstleistungen wie Car- & Ride-Sharing.

Allein die Elektrifizierung des Antriebsstrangs sorgt für einen sprunghaften Anstieg des Elektronikanteils in den Fahrzeugen. Während bei einem Pkw mit Verbrennungsmotor aus deutscher Premiumproduktion Elektronikkomponenten im Wert von etwa 2.200 Euro verbaut sind, summieren sich diese nach Erhebungen einer Schweizer Großbank bei einem vergleichbaren batterieelektrischen Pkw aus der Fertigung eines US-Premiumherstellers auf den doppelten Wert (ohne Traktionsbatterie).

Zulieferer von Komponenten für den elektrischen Antriebsstrang können von diesem Trend überdurchschnittlich profitieren und sich bis 2025 über eine steigende Nachfrage freuen.

Noch deutlichere Zuwächse werden Hersteller von Komponenten und Systemen für automatisierte bzw. autonome Fahrzeuge erleben. Schließlich verfügen automatisierte Fahrzeuge der Level 4 und 5 jeweils über bis zu 30 Sensoren, die während der Fahrt riesige Mengen an Rohdaten liefern. Experten haben errechnet, dass bei diesen Fahrzeugen pro Stunde Autofahrt zwischen 1,9 und 19 Terabyte Rohdaten anfallen. Jede Kamera liefert dabei etwa 40 Millionen Bildpunkte pro Sekunde, sodass selbst Fahrzeuge mit geringerer Autonomie schon 25 GByte Daten pro Stunde erzeugen. Für die Verarbeitung der

Rohdaten eines hochautomatisierten bzw. autonomen Fahrzeugs sind sechs der besten Hochleistungsrechner (Spielerechner) und der Einsatz von Deep-Learning-Techniken erforderlich.

Die rasant anwachsenden Datenmengen und die Vernetzung sind auch dafür verantwortlich, dass zukünftig mehr Systeme und Halbleiterlösungen für die Erhöhung der Funktionssicherheit (Safety), der Daten-/IT-Sicherheit (Security) sowie für die Vernetzung von Fahrzeugmodulen, Fahrzeugen und Infrastruktur benötigt werden.

Signifikantes Wachstum kann daher in fast allen Bauelementsegmenten erwartet werden. Die folgende Liste vermittelt – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – einen Eindruck über die Komponenten in den verschiedenen Anwendungsdomänen, die besonders profitieren werden:

- In-Car- und V2X-Kommunikation sowie sichere Datenverarbeitung:
FRAM, MRAM, HSM, Sicherheits-MCU mit HSM- und SIL-Funktionen, TPM, Verschlüsselungshardware, Antennen, Mobilfunk-, Bluetooth-, WLAN-ICs, Ethernet-, USB-ICs, Car-PCs.
- ADAS-Funktionen und autonomes Fahren:
Sensoren (insbesondere LIDAR, Radar, Kamera, Ultraschall) zur Umgebungserfassung und Müdigkeitserkennung, Multi-/Many-Core-Prozessoren (Bildverarbeitung, KI-Anwendungen), Speicher (DRAM, NAND), DSP-, GPS-, SOC-, ADC-Chips sowie Displays und LEDs.
- Elektrisches Fahren:
Mosfet (24 V, 48 V, 600 V), IGBT, Motor-Treiber, Power-Module, Powertrain-ICs, Strom-/Spannungswandler, Hochstromstecker, Schütze, Batteriemanagementsysteme.

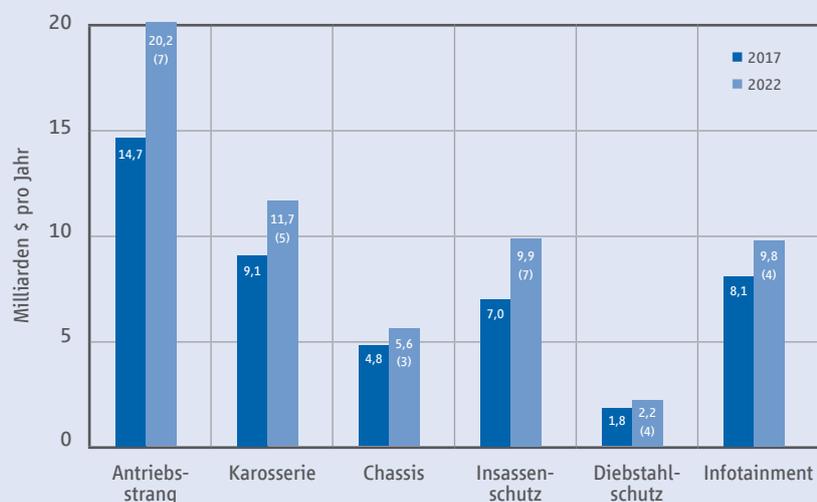
Einige Segmente werden jedoch von dieser Entwicklung nicht in gleichem Maße profitieren können. So wird die Zahl der Steuereinheiten pro Fahrzeug zurückgehen, da Sensordaten zusammengeführt (Sensorfusion) und neue Architekturen eingeführt werden, die Speicher- und Rechenressourcen zentral für verschiedene Funktionen bereitstellen. Das Wachstum von Komponenten wie SBC, einfachen MCUs, kleinen Speicherbausteinen etc. dürfte daher etwas langsamer ausfallen.

Es steht zudem zu erwarten, dass sich einige der Komponentensegmente zu Beginn des Zeitraums 2020 bis 2025 erst verhalten entwickeln, dann aber in eine Phase überproportionalen Wachstums eintreten, wenn sich zum Beispiel batterieelektrische Fahrzeuge gegenüber Hybridfahrzeugen durchsetzen.

Das durchschnittliche Alter der Fahrzeuge wird insbesondere auch durch den wachsenden Anteil batterieelektrischer Elektrofahrzeuge weiter ansteigen und diese Nachfrageentwicklung mittelfristig etwas dämpfen. In vielen Ländern wird zudem der Verkauf fest verbauter Radios oder Navigationsgeräte zurückgehen, da das Smartphone zunehmend auch beim Auto als Informations-Hub ins Zentrum rückt.

Genauere Vorhersagen über die Nachfrageentwicklung in den verschiedenen Segmenten sind indes vor dem Hintergrund der sich Ende 2018 verfestigenden negativen weltpolitischen Verhältnissen kaum möglich.

Abb. 12.20: Mikroelektronikverbrauch für Kfz nach Applikationen



Quelle: ZVEI

Angesichts des jungen Markts und der staatlichen Eingriffe ist darüber hinaus grundsätzlich mit vielen unterschiedlichen elektrifizierten Modellen etablierter wie auch neuer Fahrzeughersteller zu rechnen, wobei die Produktionsstückzahlen pro Modell/Antriebstyp im Vergleich zu heutigen Verbrennern vergleichsweise klein sein werden. Auch ist in einem schnell wachsenden, jungen Markt nicht absehbar, welche Produkte – bzw. welche Hersteller –, Fahrzeugtypen, Antriebskonfigurationen und dahinter stehenden technischen Systeme sich in einem sich verstetigenden Markt letztendlich durchsetzen werden.

Da die Marktanteile noch nicht klar verteilt sind, ist der Markteintritt hingegen vergleichsweise einfach. Die Herausforderung für die Zulieferer ist es, in diesem Marktumfeld das eigene Potenzial zu erkennen, auf die richtigen Partner zu setzen und rechtzeitig ausreichende Produktions- und Personalressourcen aufzubauen sowie die Bauteileversorgung sicherzustellen, um am erwartbaren hohen Wachstum teilhaben zu können.

12.1.8 Zusammenfassung

Die Automobilbranche steht nach 100 Jahren kontinuierlicher Erfolgsgeschichte vor einem noch nie da gewesenen, tiefgreifenden und sich beschleunigenden Veränderungsprozess mit vielen Widersprüchen, der große Chancen, aber auch Risiken für OEMs, die gesamte Zulieferkette und branchenfremde Wettbewerber birgt.

Die städtische Bevölkerung, die sowohl unter den Folgen des Klimawandels als auch unter den Auswirkungen der Urbanisierung und der zunehmenden Verkehrsbelastung besonders leidet, wird ihre wachsende wirtschaftliche und politische Bedeutung verstärkt einsetzen, um einen grundlegenden Mobilitätswandel einzufordern.

Die Markteinführung der elektrischen Antriebstechnik ist aber ein langwieriger Prozess, der in den verschiedenen Ländern, je nach wirtschaftlicher Leistungskraft, staatlichen Vorgaben und Interessenslagen der beteiligten Politiker, Unternehmen und Verbraucher, sehr unterschiedlich schnell voranschreiten wird. Geschwindigkeit und Erfolg des Strukturwandels hängen maßgeblich vom Verhalten des Verbrauchers ab. Insgesamt erscheint es für die Zulieferindustrie ratsam, entsprechende Anpassungs- und Transformationsstrategien frühzeitig vorzubereiten.

Dabei sollen Elektrofahrzeuge eine wesentliche Rolle spielen, da sich mit ihnen Transportaufgaben umweltfreundlicher gestalten lassen.

Allerdings ist die Produktion von batterieelektrischen Elektrofahrzeugen im Vergleich von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor deutlich energieintensiver, sodass eine globale CO₂-Reduktion nur dann zu erreichen ist, wenn die Weichen richtig gestellt werden. So müssen zum einen die Herstellung und der Betrieb der Fahrzeuge noch deutlich ressourceneffizienter gestaltet werden. Eine Voraussetzung dafür ist der massive Ausbau der erneuerbaren Energien inklusive des Umbaus des Stromverteilungsnetzes (smart und dezentral). Zum anderen muss die Lebensdauer der Fahrzeuge merklich verlängert und die Nutzung zum Beispiel durch Car-Sharing und ähnliche Betriebsmodelle intensiviert werden.

Da alle bislang verfügbaren Antriebstechnologien auch mittelfristig mit deutlichen Vor- und Nachteilen behaftet sind, kann es kein effizientes Allzweckfahrzeug für alle Anwendungsszenarien geben, sondern eine große Bandbreite an unterschiedlichen, maßgeschneiderten Fahrzeugen – vom Scooter über den Roller bis hin zu Bussen und Lkws unterschiedlichster Ausprägung und Reichweite mit jeweils zum Fahrprofil passender Antriebstechnik.

Die Beispiele Norwegen und China zeigen, dass eine hohe Anschubfinanzierung (z. B. keine Umsatz-, Import-, Kfz-Steuer) und andere Anreize (z. B. Maut-, Park-, Ladegebührenbefreiung) die Nachfrage nach Fahrzeugen mit alternativen Antrieben deutlich belebt. Die in Deutschland gewährten Vorteile gleichen die höheren Anschaffungskosten von batterieelektrischen Fahrzeugen nicht aus, sodass die verfügbaren Fördermittel zum Stand Herbst 2018 erst in geringem Maße abgerufen wurden.

Die Vernetzung von Fahrzeugen, Infrastruktur und Mobilitätsnachfragern eröffnet demgegenüber schon bei verhältnismäßig geringen Investitionen erhebliche zusätzliche Optimierungspotenziale und liefert die Basis für neue Geschäftsmodelle mit Milliardenumsätzen.

Bis 2025 werden die technischen, rechtlichen und ethischen Fragen rund um das autonome Fahren geklärt sein und Roboterfahrzeuge erste Nischenanwendungen besetzen. Ob sich diese Technik trotz vielversprechender Geschäftsideen auf breiter Front durchsetzen kann, bleibt trotzdem abzuwarten.

Ohne die positive Unterstützung durch Politik und Verbraucher können die bis 2025 und darüber hinaus anstehenden Mammutaufgaben beim Umbau der Mobilität von den Marktteilnehmern nicht bewältigt werden. Die Verbraucher sind

aufgefordert, ihre Einstellung gegenüber ihrer Mobilität kurzfristig zu überdenken und neu auszurichten: vom Besitzer/Halter zum Nutzer/Mieter. Weg von schweren, stark motorisierten Wagen für jeden denkbaren Anwendungsfall (z. B. SUV), hin zu einer Verkehrsmittelwahl, die sich an der jeweiligen Transportaufgabe orientiert.

Damit muss die Einsicht einhergehen, frei werdende Effizienzgewinne nicht zur Ausdehnung der Mobilitätsnutzung zu verwenden, damit die Emissionseinsparungseffekte nicht durch zusätzlichen Verkehr oder Verdrängung noch umweltfreundlicherer Verkehrsmittel ad absurdum geführt werden. Die Städte sind daher angehalten, den ÖPNV und das Fahrradfahren entsprechend attraktiv zu gestalten.

Insbesondere das Hightech- und Dienstleistungsland Deutschland mit seiner leistungsfähigen und innovativen Automobil- und Energiewirtschaft bringt beste Voraussetzung mit, sich an die Spitze des Wandels zu setzen und überdurchschnittlich zu profitieren. Voraussetzung ist, dass ein gesellschaftlicher Konsens mit klaren Zielsetzungen erreicht wird, für dessen Umsetzung dann die erforderliche Basis (z. B. Batteriezellenfertigung, 5G-Netz, Ladepunkte, Ladestandards, Smart Grids, weiterer Ausbau erneuerbarer Energien etc.) unter enger Kooperation der ehemaligen Wettbewerber und neuen Marktteilnehmer zeitnah geschaffen wird und bestehende Defizite (z. B. bei der Ausbildung) umgehend beseitigt werden.

Andernfalls besteht die große Gefahr, dass ein Großteil der Wertschöpfung nicht in Deutschland oder Europa, sondern in Asien, Afrika und Amerika erfolgen wird.

Die Jahre zwischen 2020 und 2025 werden prägend für die Automobilindustrie sein. Niemand kann absehen, wer dabei die Gewinner und Verlierer sein werden. Fest steht aber, dass viele neue Player auftauchen werden, die ihre Marktmacht in anderen Industrien nutzen oder schlagkräftige Kooperationen eingehen, unkonventionelle Wege beschreiten sowie innovative Lösungen anbieten werden. Elektromobilität und insbesondere das autonome Fahren sind dabei die entscheidenden Game-Changer, während (saubere) Verbrennungsmotoren in fast allen Ländern der Erde das Straßenbild weiter dominieren werden.

12.2 Industrie 4.0

In der Industrie verändert die voranschreitende Digitalisierung und Vernetzung der Produktion die Wertschöpfungsketten – dieser Wandel wird als Industrie 4.0 bezeichnet. Der Begriff Industrie 4.0 steht für das Zusammenspiel von drei Faktoren: Zum Ersten geht es um die Digitalisierung und Integration von Wertschöpfungsketten hin zu Wertschöpfungsnetzwerken in der Industrie. Zum Zweiten um die Digitalisierung des Produkt- und Serviceangebots und zum Dritten geht es aber vorwiegend auch um neue Geschäftsmodelle, die sich vor allem aus den technischen Voraussetzungen ergeben, die über die ersten beiden Faktoren geschaffen werden.

Industrie 4.0 steht dabei nicht nur für die Digitalisierung der industriellen Fertigung, sondern für die Einbettung von Geräten, Produkten und ganzen Produktionsstätten in das Internet der Dinge, Dienste und Menschen. Durch die Daten, die so erhoben werden können, entstehen völlig neue digitale Geschäftsmodelle (die dem Anwender evtl. entscheidende Vorteile bringen). Letztlich ist Industrie 4.0 die Verwirklichung der smarten Fabrik im digitalen Wertschöpfungsnetzwerk.

Abb. 12.21: Die drei zentralen Aspekte von Industrie 4.0



Quelle: ZVEI

Die deutsche Elektroindustrie hat beste Startvoraussetzungen, um bei der Umsetzung von Industrie 4.0 und Arbeit 4.0 eine Schlüsselrolle zu spielen. Ihre Geräte und Systeme stellen die Voraussetzungen für den Wandel zu einer grenzübergreifenden digitalen Produktion. Die zunehmende Vernetzung von Produktion und Internet bietet eine Vielzahl an wirtschaftlichen Potenzialen, insbesondere auch für Komponentenhersteller. Durch die Vernetzung von Produkten und die Erweiterung des Dienstleistungsportfolios um neuartige Softwarelösungen können neue Marktpotenziale erschlossen und kann sich vom Wettbewerb abgehoben werden. In diesem Zusammenhang muss auch darauf geachtet werden, dass selbstständig agierende Maschinen im rechtlichen Umfeld eine neue Herausforderung für die Legislative darstellen.

Die Integration der Wertschöpfungsketten und die Digitalisierung der Produktion erfordern mehr IT-Kompetenz. Unternehmen müssen deshalb in Zukunft ihre Software- und Hardwarekompetenz ausbauen. Ebenso werden neue Player aus der Softwarebranche mit ihren Geschäftsideen stärker hervortreten. Dabei entstehen neue Partnerschaften, aber auch neuer Wettbewerb. Gleichzeitig haben aber auch die am Markt etablierten Unternehmen der Elektroindustrie die Chance, Anbieter von neuen, smarten Services zu werden und in die IKT-Branche (Informations- und Kommunikationstechnologie) vorzudringen.

Bei Industrie 4.0 geht es nicht um „Mensch oder Maschine“, sondern um „Mensch mit Maschine“. Der Mensch ist Dirigent von Industrie 4.0. Er muss Informationen richtig interpretieren und Entscheidungen treffen. Im Fall des Einsatzes künstlicher Intelligenz ist er zusätzlich der Trainer der Maschinen, der sicherstellt, dass diese ihre Arbeit qualitätsbewusst, zuverlässig und sicher ausführen, und der im Weiteren stichprobenartig die Produktion überwacht. Mitarbeiter müssen daher für die zukünftigen Aufgaben qualifiziert sein. Die Arbeit in der smarten Fabrik der Zukunft wird die individuellen Fähigkeiten der Mitarbeiter in Bezug auf Komplexität, Abstraktions- und Problemlösungsvermögen stärker fordern. Neben diesen neuen Anforderungen bietet Industrie 4.0 jedoch auch große Chancen auf eine qualitative Anreicherung der Arbeit, eine Erleichterung von körperlich schweren Arbeitstätigkeiten, mehr Eigenverantwortung und damit eine zunehmende Selbstverwirklichung der Arbeitnehmer.

Kontinuierliche Weiterbildung versetzt die Mitarbeiter in die Lage, mit der rasanten technischen Entwicklung Schritt zu halten. Auf der Weiterbildung muss daher in den nächsten Jahren der Fokus liegen. Ebenso auf die frühzeitige Förderung von Nachwuchs für die sogenannten MINT-Fächer, das heißt Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik, durch mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht an den Schulen, der das Technikinteresse der Schülerinnen und Schüler frühzeitig weckt.

In und zwischen smarten Fabriken sollen Werkstücke und Maschinen künftig autonom miteinander kommunizieren. Dazu müssen Werkstück und Produktionssystem intelligent miteinander vernetzt sein. Das funktioniert nur über Standards, die die Kommunikation zwischen den Komponenten beschreiben. Hinzu kommt, dass die smarte Fabrik Teil eines globalen Wertschöpfungsnetzwerks ist. Daher braucht es globale Standards, die vorzugsweise von international anerkannten Normungsorganisationen erstellt werden. Nur so kann sichergestellt werden, dass alle Geräte dieselbe Sprache sprechen und so zuverlässig miteinander kommunizieren.

Um eine Kommunikationsinfrastruktur für Industrie 4.0 zu schaffen, sind Breitbandausbau und der Einsatz von drahtlosen Funkverbindungen in der Produktion notwendig. Die Kommunikationsfähigkeit aller Komponenten, Werkstücke und Maschinen bis zur untersten Produktionsebene ist Voraussetzung für eine hochdynamische und flexible Industrie-4.0-Produktion. Erst die drahtlose Kommunikation ermöglicht eine massenhafte Vernetzung aller Produktionseinheiten zu vertretbaren Kosten. Hierfür sind robuste Drahtlos-Technologien erforderlich, die Redundanz- und Echtzeitanforderungen einhalten, um auch zeitnah in Regelkreisläufe eingreifen zu können.

In der smarten Fabrik der Zukunft kommunizieren Gegenstände, Werkstücke, Werkzeuge, Maschinen etc. untereinander und mit dem Menschen. Dies bedeutet, dass viele unterschiedliche Akteure große Mengen an zum Teil zeitkritischen Daten innerhalb der Fabriken erzeugen und Informationen auch über Fabrikgrenzen hinweg austauschen. IT-Sicherheit muss daher von Anfang an integraler Bestandteil von Geschäftsprozessen, Systemen und Produkten werden. Ohne eine (gestufte) Absicherung lässt sich die unternehmensübergreifende Vernetzung nicht gestalten. Ohne derartige Absicherung sind weder die Kundendaten noch die wertschöpfenden Elemente im Geschäftsmodell vor unberechtigtem Zugriff zu schützen.

Das Thema Sicherheit besteht aus den Dimensionen Betriebssicherheit (Safety) und Schutz vor (gezielten) Manipulationen (Security). Für Industrie 4.0 ist das Zusammenspiel beider Dimensionen unzweifelhaft erfolgskritisch. Dafür müssen in einem ersten Schritt die Wechselwirkungen zwischen den beiden Dimensionen untersucht und formalisiert werden. Dabei geht es beispielsweise darum, inwiefern kryptografische Verfahren zeitkritische Funktionen der funktionalen Sicherheit beeinflussen oder umgekehrt, oder ob bestimmte sicherheitskritische Funktionen eines Teilsystems Schwachpunkte für Cyberangriffe bieten. Bei der Bewältigung der Sicherheitsproblematik muss zwangsläufig ein hybrider Weg beschritten werden. Aufgrund der langen Lebenszyklen von industriellen Produktionsanlagen werden sowohl nachrüstbare Lösungen (z. B. Softwareupdates) für die Industrie-4.0-Integration von bestehenden Maschinen und Anlagen als auch Security-by-Design-Konzepte für neue Produkte und Anlagen entwickelt werden. Wichtig ist es, einen Konsens bezüglich der Sicherheitsarchitektur entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu etablieren.

12.2.1 Auswirkungen von Industrie 4.0 auf die Elektroindustrie

Industrie 4.0 steht für eine neue Stufe der Organisation und Steuerung der gesamten Wertschöpfungskette über den Lebenszyklus von Produkten, die maßgeblich von zunehmend individualisierten Kundenwünschen und der kontinuierlichen Zunahme der marktseitigen Komplexität getrieben wird (Kagermann/Wahlster/Helbig

2013). Zentrale Facette und Basis dieser neuen Steuerungsmechanismen sind die Verfügbarkeit aller relevanten Informationen in Echtzeit durch die Vernetzung aller an der Wertschöpfung beteiligten Instanzen sowie die Fähigkeit, aus den Daten zu jedem Zeitpunkt den aktuellen Prozesszustand zu bestimmen und daraus den optimalen Wertschöpfungsfluss abzuleiten. Damit wird aus dem Kontrollzeitraum eines Produktherstellers, der heute bis zur Qualitätsprüfung und Auslieferung eines Produkts reicht und danach in eine nur bedingt kontrollierbare Garantie- und Wartungsphase übergeht, ein kontrollier- und steuerbarer Prozess, der auf die ganze Lebensdauer eines Produkts verlängert wird.

Der hier genannten Definition folgend, betrifft die vierte industrielle Revolution gleichermaßen Technologien, Systeme und Prozesse sowie deren komplexes Zusammenspiel. Die Verschmelzung von Produktionstechnologien und Produkten sowie die Vernetzung beteiligter Komponenten und (Teil-)Systeme ist somit ein zentrales Merkmal der Industrie 4.0. Ebenso wie die vorherigen industriellen Revolutionen werden sich die Veränderungen nicht auf die reine Produktion beschränken. Während frühere industrielle Revolutionen jedoch primär soziale und marktbezogene Veränderungen mit sich brachten, wird sich der wesentliche Paradigmenwechsel im Zuge von Industrie 4.0 auf die Entstehung neuer Geschäftsmodelle und die dabei zunehmende Bedeutung von Dienstleistungen und Software auswirken.

Abb. 12.22: Die wesentlichen Aspekte der Industrie 4.0



Quelle: Weidmüller

Experten sind sich einig, dass sich die Umsetzung von Industrie 4.0 auf die folgenden drei Dimensionen fokussieren wird:

- Horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke
- Vertikale Integration über Automatisierungshierarchien
- Durchgängigkeit des Engineerings über Wertschöpfungsketten

Unter der horizontalen Integration wird die Vernetzung von mehreren Akteuren und Systemen entlang der Wertschöpfungskette verstanden, sowohl innerhalb eines Unternehmens als auch innerhalb von Wertschöpfungsnetzwerken. Dies bedeutet nichts anderes, als dass Unternehmen, die gemeinsam an der Entwicklung und Produktion von Produkten arbeiten, in Zukunft deutlich besser als heute vernetzt sein werden.

Im Mittelpunkt der vertikalen Integration steht die Vernetzung der unterschiedlichen Hierarchieebenen innerhalb der Automatisierungstechnik wie der Aktorik und Sensorik, der Steuerungs-, Leit- und Planungsebene.

Durch die vertikale Vernetzung und Kommunikation zwischen den Hierarchieebenen wird eine Selbstoptimierung wesentlicher Produktionsressourcen denkbar – beispielsweise von Maschinen und Fördersystemen. Das wiederum verspricht eine bislang nicht erreichte Flexibilität und die Beherrschung der zunehmenden Komplexität der Produktionsabläufe.

Die Durchgängigkeit des Engineerings bezieht sich vor allem darauf, wie sich Geschäftsprozesse entlang der Produktentstehung auf der Basis durchgängiger Informationsmodelle optimieren lassen. Dabei sollen in der Zukunft alle an der Entstehung eines Produkts beteiligten Instanzen – vom Produktdesign über die Produktionsplanung bis zur Produktion und den Services – auf durchgängige und kompatible Informationen zurückgreifen können.

Viele Anwendungsfälle zum Thema Industrie 4.0 beziehen sich auf die Vernetzung und den Betrieb von Maschinen, Anlagen und Automatisierungstechnik zusammen mit höheren IT-Systemen. Neben diesen Komponenten, deren Verknüpfung zu einem intelligenten Gesamtsystem durch die Normung geeigneter Schnittstellen weiter vorangetrieben wird, ändern sich auch die Anforderungen an elektronische Bauteile, die sich gleichermaßen in die Wertschöpfungsketten und -systeme der Industrie 4.0 einfügen müssen. Das bedeutet, dass für alle Systeme und Komponenten von Industrie 4.0 die gleichen Anforderungen

an die horizontale Integration entlang der Wertschöpfungskette sowie an die vertikale Integration und die Migration hin zu dezentralen Systemen, Netzwerken und Diensten gelten müssen.

Bezüglich der Integration von intelligenten Funktionen wird es sich in vielen Fällen nicht um grundsätzlich neue handeln, sondern um eine Verlagerung von Funktionen (Dezentralisierung). Jedoch wird es auch neue Anwendungen geben, wie zum Beispiel eine eindeutige Identifikation und Verknüpfung mit Produkt- und Life-Cycle-Informationen. Diese Informationen können sowohl in Komponenten selbst als auch in externen Datenbanken (z. B. cloudbasierte Lösungen) vorhanden und abrufbar sein. Dazu müssen die Komponenten nicht zwangsläufig eigenständig kommunikationsfähig sein. Der Zugriff von außen auf die mit dem Bauteil assoziierten Daten muss jederzeit möglich sein, die Verknüpfung erfolgt jeweils durch einen eindeutigen Identifikator.

Neben der physikalischen Komponente wird auch eine digitale Repräsentanz erforderlich, das heißt ein digitales Modell (die Verwaltungsschale bzw. der digitale Zwilling), in dem alle relevanten Daten abgebildet sind und für zukünftige Industrie-4.0-Dienste verfügbar gemacht werden. Durch die Verknüpfung mit einer solchen Verwaltungsschale wird die physikalische Komponente zu einer Industrie 4.0-Komponente. Diese beinhaltet initial die produktbeschreibenden Daten, die für alle Instanzen einer Komponente identisch sind und in erster Linie während des Engineerings gebraucht werden. In diesem Engineering-Szenario werden mit der elektrischen Planung (ECAD) die technische Funktion definiert, das Material über Klassifizierungssysteme (z. B. eCl@ss) ausgesucht, eindeutig gekennzeichnet (Materialkennzeichen, Beschriftung) und die zu beziehenden Produkte technisch richtig konfiguriert, idealerweise über 3D-Produktkonfiguratoren, die alle notwendigen Daten liefern. Als Ergebnis liegt eine vollständige Dokumentation für den Einkaufsprozess, die Installation, Prüfung und die Nutzung im Betrieb vor. Änderungen sind über die Datenverknüpfungen jederzeit möglich und stehen den verschiedensten Systemen und Nutzern direkt zur Verfügung. Dieses ermöglicht neben dem parallelen auch ein kollaborierendes Arbeiten unter den Akteuren. Ferner unterstützen objektorientierte Ansätze bei der Planung und beim Engineering inklusive der notwendigen Tools die Modularisierung. Zusätzlich verringert sich der Aufwand bei der Auswahl, Planung, Projektierung und Errichtung einer Fertigungseinrichtung bzw. ihrer Automatisierungslösung. Verfügbar-

keit der produkt- und installationsabhängigen Daten über den gesamten Engineering-Zeitraum sorgen auch für eine Verkürzung des Anlagenaufbaus und der Inbetriebnahme. Während des Betriebs wird die Verfügbarkeit der Anlage durch die hohe Datenqualität im Wartungs- und Servicefall erhöht.

Gegenüber den aktuellen Lösungen und Vorgehensweisen bieten Industrie-4.0-Konzepte den Vorteil, dass auf Engineering-Daten während des gesamten Lebenszyklus in einfachster Art und Weise zurückgegriffen werden kann. Die Kopplung über standardisierte Schnittstellen der im Engineering und im Betrieb genutzten Tools verhindert Mehrfacheingaben sowie Übertragungsfehler und reduziert den Bearbeitungsaufwand.

Die Bauelemente, deren Ausprägung und Leistungsstand werden sich evolutionär entwickeln – es ist nicht davon auszugehen, dass der Wandel mit der Geschwindigkeit geschieht, die der Begriff Revolution impliziert. Somit werden auch die klassischen Bauelemente weiterhin verwendet werden. Es ist jedoch herauszustellen, dass der Nutzen und die Geschäftsmodelle, die im Industrie-4.0-Umfeld und mit den gewonnenen Daten ermöglicht werden, revolutionäre Ergebnisse hervorrufen und weitere Möglichkeiten erschließen werden.

12.3 Industrietaugliche (Industrie 4.0-) Kommunikationsinfrastruktur

Die Industrie braucht sichere und verlässliche Kommunikationsnetze mit garantierter Servicequalität. Neben Industrie 4.0 bieten die Digitalisierung und die Vernetzung auch in vielen anderen Bereichen der Wirtschaft neue Chancen. Eine leistungsfähige und industrietaugliche sowie flächendeckende Breitbandinfrastruktur ist der Schlüssel für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit des Wirtschaftsstandorts Deutschland.

Immer mehr Dienste und Produkte werden in Zukunft über das Internet angeboten. Kommunikationsverbindungen werden für intelligente Stromnetze, Telemedizin oder autonomes Fahren strenge Echtzeitanforderungen erfüllen müssen. Dafür sind Verlässlichkeit, Verfügbarkeit und Qualität zwingende Voraussetzung. Auch die Upload-Geschwindigkeit ist in digitalen Wertschöpfungsnetzwerken ein wichtiges Kriterium. Dies erfordert hohe Qualitätsstandards, sodass minimale Latenzen und minimaler Jitter (Schwankung in der Latenzzeit von Signalen) erreicht werden müssen. Insbesondere für die

Anwendungen in der Industrie und die Übermittlung industrieller Steuersignale sind diese Anforderungen unabdingbar. Bei der Etablierung neuer Standards sollten diese Anforderungen berücksichtigt werden.

Während die Versorgung von Unternehmen und Betrieben in den Städten meist schon recht gut ist, lässt die Breitbandversorgung im ländlichen Raum oft zu wünschen übrig.

In Deutschland befinden sich jedoch rund 70 Prozent der Industrieunternehmen auf dem Land. Viele dieser Unternehmen gehören zu den Hidden Champions der deutschen Wirtschaft.

Ein zukünftiges Netz ist so auszugestalten, dass es industriellen wie privaten Ansprüchen genügt. Qualitätskritische Anwendungen sind auf Netzressourcen mit höchster Qualität angewiesen, die unabhängig von der Auslastung der restlichen Ressourcen garantiert zur Verfügung stehen. Wichtig ist nicht nur der flächendeckende, sondern auch der nachhaltige Ausbau der Breitbandinfrastruktur. Dieser kann nur mit qualitativ hochwertigen Komponenten und qualitätsgeprüftem Ausbau funktionieren. Eine fachgerechte Installation der Komponenten ist zwingend notwendig. Unsere Wirtschaft braucht langlebige, wartungsarme und ausfallsichere Kommunikationsinfrastrukturen.

Um eine schnelle Datenübertragung zu ermöglichen, stehen verschiedene digitale Infrastrukturen zur Verfügung: das Telekommunikations-, das Kabelfernseh- und das Mobilfunknetz sowie die Satellitenübertragung. Langfristig ist der Glasfaserausbau bis in Gewerbegebiete, in einzelne Gebäude sowie in die Wohnung der optimale Lösungsansatz für die Breitbandversorgung.

12.3.1 Hochfrequenztechnik/ Mobilfunk

Die Hochfrequenztechnik befasst sich mit der Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen in elektronischen Schaltungen, entlang von Wellenleitern oder im freien Raum. Entscheidendes Kriterium für die Abgrenzung von der allgemeinen Elektrotechnik sind die Schaltungsdimensionen, die in der HF-Technik in der Größenordnung der Wellenlänge oder darüber liegen. In diesem Fall kommen die Effekte der Wellenausbreitung zum Tragen und die Geometrie der Schaltungselemente und Leitungen hat einen entscheidenden Einfluss auf die Funktion. Die Geometrien müssen entsprechend so ausgelegt sein, dass Störungen zum Beispiel durch Reflexionen, Resonanzeffekte oder unerwünschte Wellentypen vermieden werden. Bedingt dadurch werden die Bauteile und

Schaltungsdimensionen in der HF-Technik im Allgemeinen mit zunehmender Frequenz kleiner. Dies kann zum Beispiel im Hinblick auf Antennen vorteilhaft sein, wenn sie in einem Mobiltelefon eingesetzt, bei anderen Anwendungen aber sehr herausfordernd werden, etwa hinsichtlich Herstellbarkeit von sehr kleinen koaxialen Leitungskomponenten. Die beschriebenen Effekte bilden zusammen mit weiteren Einflussfaktoren wie beispielsweise der frequenzabhängigen Dämpfung der Wellenausbreitung im freien Raum und der Zuordnung des elektromagnetischen Spektrums zu bestimmten Applikationen die Rahmenbedingungen für die Vielzahl der heutigen und zukünftigen Anwendungen der HF-Technik.

In den Anfangsjahren der HF-Technik beschränkten sich die Anwendungen auf Funkverbindungen, Übertragung von Radioprogrammen und – ab dem Zweiten Weltkrieg – auf militärische Radaranlagen. Nach dem Zweiten Weltkrieg wurden diese Anwendungsfelder ausgebaut: Die Funkgeräte wurden kleiner und damit auch für mobile Anwendungen einsetzbar, im Broadcastbereich kam die Übertragung von Fernsehprogrammen dazu und die Radartechnik wurde auch in die zivile Luftraumüberwachung eingeführt. Aber es dauerte bis in die Siebzigerjahre des letzten Jahrhunderts, bis in größerem Umfang neue Anwendungsfelder für die HF-Technik dazukamen: Erste flächendeckende Mobilfunknetze wurden aufgebaut, Mikrowellenherde zogen in die moderne Küche ein und RFID-Tags ermöglichten den Aufbau von ersten elektronischen Warensicherungssystemen in Kaufhäusern.

Anfang der Neunzigerjahre begann der rasante Ausbau immer leistungsfähigerer Mobilfunknetze und der dazugehörigen Endgeräte. Diese Entwicklung ist auch heute noch nicht zu Ende. In den nächsten Jahren werden Mobilfunknetze der fünften Generation aufgebaut, die kleinere Funkzellen haben werden und neue Frequenzbänder belegen. Aufgrund der dadurch benötigten höheren Anzahl an Sendemasten soll vorhandene Infrastruktur wie Straßenlaternen oder Ampelanlagen mitgenutzt werden. Zur Datenversorgung der dafür nötigen Standorte werden diese mit einer Glasfaseranbindung ausgestattet sein müssen, um die Anforderungen für 5G zu erfüllen. 5G ist keine evolutionäre Weiterentwicklung von 4G, sondern eine völlig neue Entwicklung der Übertragungsstandards. Die für 5G notwendige aktive Technik wird die vorhandene 4G-Technik ersetzen müssen, wobei die bestehenden Antennenstandorte weiter genutzt werden können. Die neuen Frequenzbänder können sowohl im bereits heute genutzten Bereich von 700 MHz bis 3.500 MHz liegen als auch im wesent-

lich höheren Frequenzbereich bis zu 60 GHz. Das erfordert natürlich eine entsprechende Verkleinerung der Bauelemente wie Steckverbinder, Kabel und Antennen. Bei Frequenzen größer 30 GHz spricht man von sogenannten Millimeterwellen, die Wellenlänge beträgt dann weniger als einen Zentimeter.

Wo keine Anbindung bzw. Vernetzung der einzelnen Antennen durch Glasfaser möglich ist, werden Hochfrequenzrichtfunkanbindungen im sogenannten V-Band (57–64 GHz) und sogar E-Band (71–86 GHz) geplant.

Auch die Vernetzung von Maschinen, Geräten und Fahrzeugen sowohl in der Industrie als auch in jedem Haushalt ist nur möglich durch immer leistungsfähigere Komponenten der Hochfrequenztechnik. Durch den enorm steigenden quantitativen Bedarf müssen diese Teile in der Herstellung aber vereinfacht und damit massenfertigungstauglich werden. Das erfolgt meist dadurch, dass immer mehr diskrete mechanische und elektrische Bauteile durch Funktionslösungen direkt auf einem planaren Substrat (Leiterplatte oder Wafer) ersetzt werden.

Diese Entwicklung hat in der Radartechnik bereits stattgefunden. In jedem Kraftfahrzeug ab der Mittelklasse werden bereits heute mehrere Radar-Abstandssensoren verbaut. Durch die Entwicklung hin zum vollkommen autonomen Fahren wird der Bedarf dieser Sensoren noch weiter steigen. Autonomes Fahren ist aber auch nur möglich durch den Einsatz von immer genaueren und allzeit verfügbaren Satelliten-Navigationssystemen wie zum Beispiel GPS und GALILEO. Auch diese Technologien beruhen auf einem komplex modulierten Hochfrequenzsignal.

Ein weiteres Anwendungsfeld für HF-Technik stellen die sogenannten Material- und Körperscanner dar. Durch den Einsatz von hochfrequenten elektromagnetischen Wellen können damit ohne Strahlenbelastung Lebensmittel auf Verunreinigungen (z. B. Glassplitter in Babynahrung) oder Personen auf das Mitführen von Waffen oder Sprengstoff untersucht werden.

In der Medizintechnik findet die HF-Technik nicht nur in der Diagnostik in steigendem Maße Verwendung, sondern auch in der Tumorbehandlung (z. B. RFITT = radiofrequenzinduzierte Thermotherapie) und der Chirurgie (Elektroskalpell).

Für alle Anwendungsfelder müssen auch entsprechende Messverfahren und die dazu nötigen Messgeräte und Messhilfsmittel der HF-Technik entwickelt werden. Die klassischen Messverfah-

ren der HF-Technik sind die Netzwerkanalyse, bei der Reflexion und Dämpfung gemessen werden, sowie die Spektrumanalyse, die die spektralen Anteile eines Signals einschließlich ihrer Intensität ermittelt. In den letzten 20 Jahren wurde außerdem für den digitalen Mobilfunk eine Vielzahl an weiteren Messverfahren entwickelt, zum Beispiel zur Ermittlung von Störungen durch Frequenzkonversion (Intermodulation) an nichtlinearen Bauteilen oder zur Auswertung modulierter Mobilfunksignale. Durch die zunehmende Anzahl an Anwendungen im Mikrowellen- und Millimeterwellenbereich und die damit verbundene größere Ausnutzung des Spektrums wird auch der Bedarf an Messgeräten steigen, die zur Beurteilung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) nötig sind und die Einhaltung der hier relevanten Vorschriften sicherstellen, um damit Störungen unter den verschiedenen Geräten zu vermeiden.

Enorm wichtig ist natürlich auch, dass für alle neuen Technologien die entsprechenden Normen zeitgerecht erstellt und veröffentlicht sind. Unzählige Schnittstellen und Übertragungsprotokolle müssen eindeutig definiert und standardisiert sein, damit jederzeit ein reibungsloser Betrieb gewährleistet ist.

12.4 Robotik

Was vor Jahren noch bestenfalls eine Utopie im Science-Fiction-Genre war, ist heute längst Realität. Kaum eine Technologie entwickelt sich so schnell wie die der Roboter und die mit ihr verbundenen Komponenten.

Industrieroboter (IR) sind schon seit längerer Zeit (seit den 70er-Jahren) ein nicht wegzudenkender Part in der Automatisierungstechnik und übernehmen vielseitige Aufgaben wie zum Beispiel Montage, Veredelung, Prüfung, Transport usw. Dabei agieren sie bisher größtenteils innerhalb von Schutzzellen, die vor allem dem Arbeitsschutz geschuldet sind. Zunehmend werden hier durch die diversen Hersteller alternative Lösungen geschaffen, die die entsprechenden Käfige und Zäune überflüssig werden lassen und eine Kollaboration zwischen Mensch und Maschine realisieren. Sensorik (z. B. ein Lichtvorhang) in Verbindung mit einem Safety-Controller am Roboter ermöglicht den schnelleren Zugang und Eingriff in die Arbeitsprozesse.

Neu auf dem Markt zeigen sich völlig autonom fahrende Robotersysteme, unter anderem als Helfer in der Montage. Es sind Lösungsansätze für die nächste Stufe der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK), die sich inzwischen in der Praxis bewähren. Diese Roboter können an unterschiedlichste Arbeitsplätze fahren, ihr Material selbst zusammenstellen und dann die Arbeit aufnehmen. Dabei mischen sich die Roboter unter die Menschen, arbeiten mit ihnen zusammen oder erledigen monotone Aufgaben allein. So kann die Belegschaft von unliebsamen Arbeiten entlastet werden. Das System gilt weniger als Roboter, sondern mehr als Assistent, der flexibel zur Stelle ist, wo er gerade benötigt wird. Auch dienen diese Kompetenzen als Lösungen für den Fachkräftemangel, sodass autonom agierende Roboter in der Fertigung die Mitarbeiter gezielt dann entlasten, wenn dringende und komplexe Aufträge kommen, für welche die menschliche Hand noch immer die perfekte Lösung darstellt.

Abb. 12.23: Autonom fahrender und arbeitender Roboter



Quelle: Staubli

Für das System wird ein leistungsfähiger Standardroboter verwendet. Um flexibel als Assistenzroboter dienen zu können, gibt es Schnittstellen zum Beispiel für unterschiedliche Greifer oder für automatische Ladetechnik. Weiterhin verfügt das System über einen Werkzeugwechsler, um selbstständig das zur Aufgabe passende Werkzeug anzukoppeln. Die Verwendung eines Standard-Industrieroboters geht mit seinen Vorteilen einher: hohe Traglast, Reichweite, Dynamik und Präzision.

Kleinere Industrieroboter – sogenannte Cobots – sind schon heute Helfer und Zuarbeiter von Menschen, etwa in der Fertigung kleinerer elektronischer Geräte in großen Stückzahlen.

Dabei werden die Roboter immer intelligenter und leichter in der Bedienung. Aufwendige Softwareinstallation und Programmierung ist nicht mehr notwendig. Heute schon schafft die einfache Anwendung eines Teachpanels oder sogar mit einem Smartphone neue Möglichkeiten (Drag-and-Drop-Programmierung). Oder der Roboter lernt durch Zusehen und an die Hand nehmen (manual teaching): Durch Berührung und Führung der Arme lässt er sich anleiten und merkt sich den Prozess. Ermöglicht wird dieses über immer innovativere Algorithmen und Sensoren (z. B. Kameras).

durchzuführen und innerhalb von OP-Sälen sind sie bereits alltägliche Teammitglieder. Durch ihre präzise Technik können sie minimalinvasive Eingriffe durchführen, die durch menschliche Hand unmöglich oder zu riskant wären.

Auch in der Pflege spielen sie zukünftig eine bedeutende Rolle. Durch den demografischen Wandel haben wir schon heute ein Defizit in der Versorgung von pflegebedürftigen Menschen. Speziell entwickelte humanoide Pflegeroboter entlasten das Personal, übernehmen aber auch häusliche Pflege und erkennen sogar menschliche Emotionen.

Sie können außerdem natürlich auch weniger kritische Aufgaben des Alltags bewältigen und zum Beispiel hoffnungslos chaotischen Kinderzimmern wieder zu neuem Glanz verhelfen – die Möglichkeiten sind beinahe unbegrenzt.

Derzeit lösen diese Entwicklungen international heftige Ethikdiskussionen aus (besonders wegen der Entwicklung autonomer Roboter). Das ist ein wichtiger Prozess, vor allem, weil im Bereich der Militärtechnik ganz neue Maßstäbe gesetzt werden. Hier ist die Entwicklung so weit, dass Kampfroboter den Soldaten ersetzen können, aber noch nicht sein Gewissen und seine Bedenken.

Abb. 12.24: Zweiarm-Roboter

Der Zweiarm-Roboter lernt, indem er die Bewegung des Menschen nachmacht. Durch seinen „Körperbau“ verfügt der Zweiarm-Roboter über Fähigkeiten, die denen eines Menschen ähneln. Er kann zum Beispiel präzise greifen. Der Zweiarm-Roboter kann an menschlichen Arbeitsplätzen eingesetzt werden, ohne dass diese extra umgebaut werden müssen.



Quelle: Robert Bosch

Aber auch in anderen Branchen spielen Roboter eine immer wichtigere Rolle. In der Medizintechnik zum Beispiel helfen sie direkt in der Diagnostik, Chirurgie und Nachsorge. Sie ermöglichen es einem Arzt bereits heute, eine komplizierte Operation auf einem völlig anderen Kontinent

Es werden sich viele Chancen ergeben, neue Berufe werden entstehen und neue Verfahren ermöglicht, aber es bleibt zu wünschen, dass mit Blick auf die Gesellschaft alle Handelnden vernünftig und nachhaltig mit diesem Potenzial umgehen.

12.5 Medizintechnik – Gesundheitswirtschaft – Medizinprodukte

Die demografische Entwicklung wird das Gesundheitssystem in den nächsten Jahren vor enorme Herausforderungen stellen. Die Alterung der Bevölkerung und die Zunahme chronischer Erkrankungen erhöhen die Nachfrage nach Gesundheitsleistungen. Eine dauerhaft bezahlbare und qualitativ hochwertige Versorgung der Bevölkerung wird auch in Zukunft möglich sein, wenn die Digitalisierung der Gesundheitswirtschaft konsequent gefördert wird.

Digitalisierung und Vernetzung in der Gesundheitswirtschaft machen völlig neue Methoden und Verfahren in der medizinischen Versorgung möglich. Die Betreuung des einzelnen Patienten findet in Zukunft nicht nur in Krankenhaus und Arztpraxis, sondern auch zu Hause und unterwegs statt. Die Gesundheitswirtschaft der Zukunft beinhaltet neben moderner Medizintechnik auch eine umfassende Vernetzung und Digitalisierung.

Die Digitalisierung bietet für die Gesundheitsversorgung Chancen und Möglichkeiten bei Diagnose und Therapieentscheidung. So werden Daten- und Informationsmanagement, aber auch effiziente Ressourcenplanung und Steuerung von Arbeitsabläufen innerhalb von Arztpraxen und Krankenhäusern, aber auch über Sektorengrenzen hinweg, möglich.

Arzt und Patient können unabhängig von Ort und Zeit miteinander in Kontakt treten. Gesundheitsdaten werden nicht nur in der Arztpraxis oder im Krankenhaus erhoben, sondern auch zu Hause oder sogar mobil. Patienten werden so in die Lage versetzt, möglichst lange bei guter Gesundheit ein selbstbestimmtes und eigenständiges Leben zu führen. Kritische Situationen, unnötige Krankenhausaufenthalte und Arztbesuche lassen sich vermeiden, wenn eine bessere elektronische Überwachung von krankheitsrelevanten Parametern direkt beim Patienten zu Hause erfolgen kann. Dabei geht es sowohl um die Versorgung chronisch Kranker als auch um die verbesserte Versorgung von akuten Krankheitsfällen mithilfe digitaler Techniken. Somit erhöhen sich die Lebensqualität des Patienten sowie die Qualität seiner medizinischen Betreuung. Chancen liegen unter anderem in der Telemedizin: Facharzt- und Expertenwissen kann durch sie flächendeckend verfügbar gemacht werden. Die bessere Nutzung und Analyse bestehender Daten aus der Gesundheitsversorgung mit Big-Data-Ansätzen und mit Unterstützung von künstlicher Intel-

ligenz und Robotik können darüber hinaus die Organisation und vor allem aber auch die Qualität der Gesundheitsversorgung grundsätzlich verbessern. Außerdem können sie die Forschung an neuen Versorgungs- und Therapiekonzepten unterstützen. All diese Konzepte verlangen eine einheitliche Infrastruktur (kompatible Schnittstellen und Datenformate), aber auch und vor allem ein detailliertes Datenschutzkonzept: in vielen Punkten ähnlich dem industriellen Anwendungsfeld, jedoch in Bezug auf den persönlichen Datenzugriff zusätzlich rechtlich abgesichert (Anonymisierung von Daten, Recht der Patienten auf Zustimmung zur Weitergabe ihrer Daten).

Neben dem ersten Gesundheitsmarkt (klassische Gesundheitsversorgung mit Erstattung durch die Krankenversicherungen) wächst auch der zweite Gesundheitsmarkt rasant. Dieser umfasst alle privat finanzierten Produkte und Dienstleistungen wie Fitness, Wellness, mobile Gesundheitsanwendungen, Fitnessarmbänder etc. Viele Menschen achten auf Gesundheit und Wohlergehen und erheben dabei große Mengen an Daten, die bei geeigneter Analyse die Versorgung verbessern können. Die Grenze zwischen gesundem Konsumenten und krankem Patienten verschwimmt dabei ebenso wie die Grenze zwischen privaten, mobil genutzten Anwendungen und digitalen Anwendungen, die einen Behandlungsprozess begleiten oder unterstützen. Mobile Anwendungen decken dabei die gesamte Kette der Gesundheitsversorgung von der Prävention über die Diagnostik und die Therapie bis zur Kontrolle ab. Für die Beteiligung der Patienten an dieser Art der Versorgung haben mobile Anwendungen deshalb besondere Bedeutung. Die Digitalisierung der Gesundheitswirtschaft bringt vielfältige und tief greifende Veränderungen. Sie steht für eine personalisierte Gesundheitsversorgung mit optimierten Prozessen, einer Beteiligung der Patienten und der Chance, aus Versorgungsdaten neues medizinisches Wissen zu erzeugen.

12.5.1 Technische Möglichkeiten Medizinprodukte

Durch die Weiterentwicklung der verschiedenen Basistechnologien wie der Sensortechnologie – der Möglichkeit zur digitalen Signalverarbeitung (Multi-Sensor-Systeme) –, nicht zuletzt aber auch wegen der sich kontinuierlich verringern den Kosten und Baugrößen der Komponenten, ergeben sich viele neue Einsatzmöglichkeiten für Elektronik in Medizinanwendungen. Hier sind auch die neuen Möglichkeiten der Kommunikation zu erwähnen, die ganz neue therapeutische Ansätze zwischen Arzt und Patient ermöglichen.

Neu bei den medizinischen Großgeräten (CT, NMR ...), wie sie vor allem im klinischen Bereich eingesetzt werden, ist zum Beispiel die Verringerung der negativen Einflüsse (z. B. Strahlendosis) der verschiedenen Untersuchungsmethoden bei gleichzeitig immer genauerer Darstellung bei der bildgebenden Diagnostik. Dadurch werden auch im Analysebereich (z. B. bildgebende und biochemische Analyse) weitere Fortschritte gemacht: Immer mehr Vorgänge im inter- und intrazellulären Bereich können mit fortschrittlicheren Methoden der Analyse und vor allem auch der Datenverarbeitung sichtbar gemacht werden und damit besser verstanden werden.

Eine durch Elektronik ermöglichte Neuerung im Bereich der Arztpraxen ist zum Beispiel die Telemedizin, die es erlaubt, für erste Gespräche oder im Rahmen der therapeutischen Betreuung bei einzelnen Terminen oder einfachen ersten Diagnosegesprächen auf den Besuch des Patienten in der Arztpraxis oder des Arztes beim bettlägerigen Patienten zu verzichten.

Für die sichere Bestimmung von Erregern/Krankheiten wird es kleine, autarke und zum Teil auch leicht zu transportierende Analysensysteme geben (in der Größe eines Aktenkoffers). Die Analyse der Proben erfolgt innerhalb weniger Stunden. Dadurch können zeitnah geeignete Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Der Patient kann gleich beim ersten Arztbesuch die Ergebnisse der Laboranalyse erfahren und die Therapie somit schneller, bequemer und damit häufig auch erfolgreicher beginnen.

Es gibt heute bereits einen großen Markt an Sensoren, die Körperfunktionen wie Blutdruck, Sauerstoffsättigung des Blutes, das EKG oder auch andere leicht messbare Körpersignale erfassen können.

Auch die Kleidung wird zunehmend intelligenter und kann auch Körperfunktionen überwachen: So können etwa durch elektronische Pflaster, die unter anderem mit dem Mobiltelefon kommunizieren, der Blutzuckerspiegel und auch andere Körperfunktionen extern überwacht werden. Einige von diesen Systemen müssen noch weiter verkleinert und auf einen medizinisch zuverlässigen Stand gebracht werden. Es ist aber abzusehen, dass wir in Zukunft solche Funktionen leicht auslesbar und bequem tragbar zur Verfügung haben werden. Wenn die von solchen Sensoren aufgenommenen Informationen von ausreichender Qualität sind und von Ärzten (oder von trainierten künstlichen Intelligenzen) ausgewertet werden können, ist anzunehmen, dass damit nicht nur die Nachbehandlung von Krankhei-

ten und Operationen angenehmer und billiger durchgeführt werden kann, sondern mittelfristig auch einiges Potenzial für bessere Vorsorge bei Volkskrankheiten wie Bluthochdruck und seine Spätfolgen (Schlaganfall und Herzinfarkt) entstehen kann.

Über längere Sicht ist abzusehen, dass durch die voranschreitende Miniaturisierung immer kleinere, aber gleichzeitig komplexere Systeme in den menschlichen Körper implantiert werden können. Entweder geschieht das nur vorübergehend (z. B. als iPille) oder auch über einen längeren Zeitraum. Durch solche direkten Implantate (z. B. Insulinmessung und -pumpe), die sich vollständig im Körper befinden, kann sich die Lebensqualität chronisch kranker Patienten weiter erhöhen und gleichzeitig wird für sie die Infektionsgefahr sinken. Vielleicht können wir langfristig sogar komplette Organe (z. B. Niere) durch Implantate mit gleichem Funktionsumfang ersetzen.

Durch diese Technisierung der Diagnostik bzw. Überwachung der Körperfunktionen werden die Menschen zunehmend das eigene Körpergefühl verlieren. Es wird eine zunehmende „Gläubigkeit an die Technik“ (Apps) geben.

12.5.2 Rechtliche Rahmenbedingungen für Medizinprodukte

Um die Sicherheit und Wirksamkeit der Produkte zu garantieren, ist der Medizinproduktemarkt international, und damit auch in Deutschland, ein stark regulierter Markt. Hierbei gibt es jedoch zwischen den Märkten starke formale Unterschiede bei den Zulassungsverfahren, obwohl die technischen Anforderungen und Normen ähnlich sind.

In der EU handelt es sich immer dann um ein Medizinprodukt, wenn die Zweckbestimmung des Produkts der Definition der Medizinprodukterichtlinie entspricht. Medizinprodukte müssen die grundlegenden Anforderungen erfüllen und tragen eine CE-Kennzeichnung nach der Medizinprodukterichtlinie (93/42/EWG). Vorteil für den Hersteller ist, dass Medizinprodukte mit CE-Kennzeichnung in allen Ländern der EU in Verkehr gebracht werden können. Es genügt eine Konformitätserklärung statt behördlicher Zulassung. Das Konformitätsbewertungsverfahren stellt allerdings hohe Anforderungen an den Hersteller.

Der wichtigste Absatzmarkt für Medizinprodukte ist der sogenannte erste Gesundheitsmarkt, in dem professionelle medizinische Leistungen

erbracht und über Krankenversicherungssysteme bezahlt werden. Beim zweiten Gesundheitsmarkt zahlen die Kunden/Patienten selber für die Produkte, wobei hier sehr häufig genau hingeschaut werden muss, ob es sich dabei tatsächlich um ein Medizinprodukt handelt. Als Beispiel ist ein Manschetten-Blutdruckmessgerät genannt, das man nicht nur in Apotheken, sondern mittlerweile auch beim Discounter kaufen kann. Ein anderes Beispiel sind Pulsmesser in Wearables oder Smart Watches.

In der Praxis liegt die Verantwortung dafür, ob es sich gemäß Zweckbestimmung um ein Medizinprodukt handelt, beim Hersteller. Dabei kann er aber nicht willkürlich behaupten, dass es sich nicht um ein Medizinprodukt handelt, wenn alle Voraussetzungen dafür gegeben sind.

Ist ein Produkt als Nichtmedizinprodukt auf den Markt gebracht worden, wird aber von vielen Ärzten/Kliniken für medizinische Zwecke verwendet, da es für diese Verwendung gut geeignet ist, muss der Hersteller das Produkt entweder nachträglich als Medizinprodukt anmelden, sobald er von der medizinischen Verwendung erfährt, oder er muss die Anwendung als Medizinprodukt unterbinden.

Bei der Herstellung von Medizinprodukten gibt es technisch viele Ideen und Möglichkeiten. Ob ein Produkt vom Markt angenommen wird und ökonomisch rentabel ist, hängt jedoch hauptsächlich davon ab, ob die Krankenkassen bereit sind, für dieses Produkt bzw. seine Anwendung am Patienten zu zahlen. So kann es passieren, dass ein sehr gutes und effizientes Produkt von niemandem gekauft wird, weil die Krankenkasse nichts dafür bezahlt. Daran wird deutlich, dass ein Markterfolg in dieser Branche erst berechenbar wird, wenn man alle Regularien dieses Markts auch über die Voraussetzungen für das Inverkehrbringen hinaus sehr gut kennt.

In Zukunft werden die Anforderungen zum Beispiel an die klinische Bewertung noch weiter steigen, da ab 26. Mai 2020 die Medizinprodukt-richtlinie (MDD) durch die EU-Verordnung über Medizinprodukte (MDR) abgelöst wird. Dadurch werden viele Produkte höher klassifiziert und es ergeben sich strengere Überwachungen der benannten Stellen. Darüber hinaus entstehen nochmals strengere Anforderungen an die Risikoanalyse und klinische Bewertungen.

12.6 Smart City lockt aus der Komfortzone!

Mit dem Höhepunkt der Finanzkrise 2008/2009 begann die Popularität des Begriffs „Smart City“, die bis heute ungebrochen scheint. Dabei ist der Begriff nicht neu – er hat seinen Ursprung bereits in den 1990er-Jahren (Eger 2005; Hatzelhoff 2012).

Die Definitionen haben sich über die Jahre kaum verändert – sie beschreiben Smart City als Lösung für Herausforderungen aus Urbanisierung und sind meist technisch geprägt. Damals wie heute soll vor allem die Verwendung von Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) in urbanen Strukturen die Lebensqualität in Städten verbessern. Ein Beispiel: „Smart Cities are the urban centre of the future, made safe, secure environmentally green, and efficient because all structures – whether for power, water, transportation, etc. are designed, constructed, and maintained making use of advanced, integrated materials, sensors, electronics, and networks which are interfaced with computerized systems comprised of databases, tracking and decision-making algorithms“ (Hall et al. 2000, p. 1).

Mit Themenfeldern wie Smart Grid, Smart Building, Smart Mobility hat – nicht nur – die Elektroindustrie im Kontext Smart City einen neuen Markt entdeckt (Haque 2012; IBM 2015). Doch trotz technischer Machbarkeit und aller Marketingbemühungen lässt die Smart City seit Jahren eine entsprechend operative und wirtschaftliche Umsetzung vermissen. Dies wird in Europa zunehmend als Stagnation im Smart-City-Diskurs empfunden.

Gründe dafür liegen einerseits in der Marktbearbeitung mit dem damit verbundenen Rollenverständnis der Stakeholder und andererseits in der organisatorischen Befähigung von Akteuren. Beide Gründe werden im Folgenden näher ausgeführt.

12.6.1 Stagnation trotz technischer Weiterentwicklung

Die Akteure in Städten, seien es Stadtverwaltungen, städtische Unternehmen, Investoren oder anderweitig privatwirtschaftliche Gestalter von Urbanisierung, haben in der Vergangenheit jeweils zeitgemäße technische Lösungen implementiert, um auf die Herausforderungen aus Urbanisierung zu reagieren. Digitalisierung ist die heute zeitgemäße Weiterentwicklung von Technologie. Sie ist Voraussetzung für Netzwerken wie Smart Grid, Smart Building usw.

Digitalisierung und technische Vernetzung an sich machen Städte also nicht smarter, als sie in ihrer jeweiligen Zeit ohnehin waren. Kritiker der Smart City fragen daher, ob eine Stadt an sich überhaupt smart sein kann (Greenfield 2013).

Auf Basis dieser Überlegung werden die Stadtverwaltung und städtische Unternehmen auch weiterhin Absatzkanäle für Produkte und Dienstleistungen aller Art bleiben. Wenn der vermeintlich neue Markt Smart City aber primär traditionell angegangen wird – d. h. mit bestehendem Produktportfolio und Geschäftsmodell –, nach einer traditionellen Käufer-Mentalität, die ausschreibt, und einer Verkäufer-Mentalität, die nach Lastenheft anbietet, was macht dann den smarten Teil in Smart City aus? Angeblich sagte schon Albert Einstein, dass es verrückt sei, immer wieder das Gleiche zu tun und dabei andere Ergebnisse zu erwarten. Es ist daher eine Überlegung wert, wie das Ergebnis Smart City erreicht werden soll, wenn gleiche (wenn auch weiterentwickelte) Produkte und Methoden im Fokus des Handelns stehen.

12.6.2 Neue Geschäftsmodelle und neue Rollen

Der Erfolg vieler Unternehmen beruht auf Spezialisierung im Segment. Organisatorisch fragmentierte Strukturen optimieren ihre Leistung in sich. Ihr Fokus ist auf dem eigenen Produkt im Kontext der traditionellen Branche. Entsprechend werden gewohnte Routinen motiviert, das bereits Bekannte in gegebenen Strukturen weiter zu verbessern. Innovation wird daher oft im Silo der eigenen Spezialisierung versucht. Dabei kann es passieren, dass technische Machbarkeit über eigentliche Kundenbedürfnisse gestellt wird (Hernandez-Munoz 2013). Durch die Möglichkeiten der Digitalisierung und Vernetzung brechen die Segmentgrenzen allerdings auf und Geschäftsmodelle können von einem Bereich in den anderen übertragen werden. Ein Beispiel: Vor allem bei der jüngeren Generation und in Metropolen ist seit Langem der Trend „Weg vom Auto-Besitz“ zu beobachten. In Berlin besitzen nur etwa 50 Prozent der Haushalte einen eigenen Pkw. Die abnehmende Relevanz des Autos als Statussymbol ist ein alarmierendes Signal für die Automobilbranche und zwingt sie, über ihr Kernprodukt Auto hinaus zu denken. Nach wiederholten Angaben von Automobilherstellern (z. B. auf Smart-City-Konferenzen) werden diese in Zukunft nicht vom Verkauf einzelner Fahrzeuge leben, sondern vom Verkauf von Mobilitätslösungen. Sharingkonzepte und Intermodalitätslösungen sind erst der Anfang. Wenn das Elektrofahrzeug als Energiespeicher im Gebäude zum Einsatz kommt, verschwimmen die Seg-

mente Mobilität und Gebäude, und das Fahrzeug kann Teil des Energiemanagements im Haus, in der Straße oder im Quartier werden.

Entsprechend können sich die Rollen der (Automobil-)Hersteller vom Produktlieferanten zum Dienstleister im Bereich Mobilität und Wohnen wandeln – vielleicht auf Basis eines Pay-per-Use-Geschäftsmodells, wie es im Bereich IKT durchaus vorkommt. Vielleicht kaufen wir eines Tages das Nutzungsrecht auf ein Fahrzeug oder Gebäude für eine geringe Grundgebühr und kaufen Leistungen, wie mehr Licht, mehr Wärme, mehr Geschwindigkeit usw. gegen Gebühr zu – zentral aufgeschaltet über ein intelligentes Kontrollzentrum, das von einem privatwirtschaftlichen Unternehmen oder der Stadt betrieben wird.

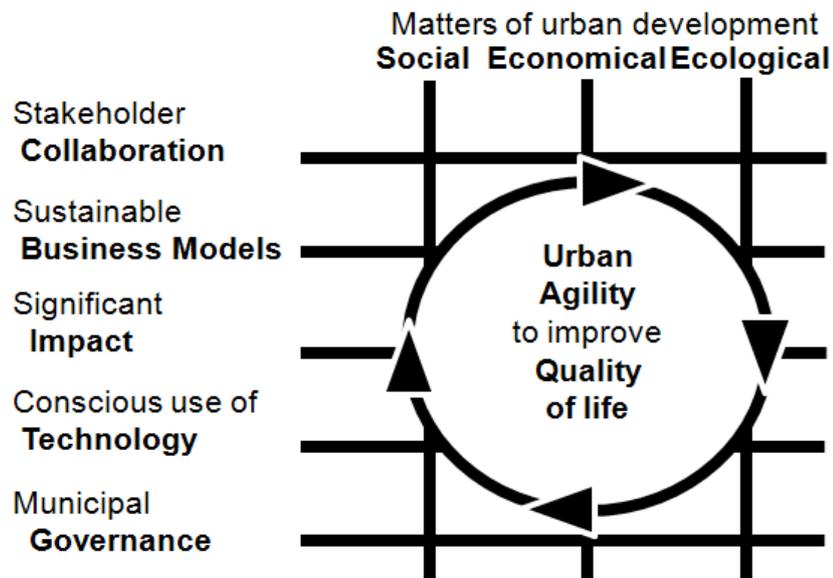
Das Beispiel zeigt: Ein Umdenken ist erforderlich, das traditionelle Organisationen aus der Komfortzone holt. Angestammte Märkte können von Branchenfremden „erobert“ werden, die disruptiv auf traditionelle Strukturen wirken – seien es Geschäftsmodelle, Unternehmen oder Branchen (Castells 2001). Weitere Beispiele hierfür sind Uber, MyTaxi oder die zunehmende Nutzung von Online-Händlern wie Amazon. In diesen Fällen verändert Digitalisierung ökonomische, ökologische und soziale Strukturen sowie Prozesse. Die Folgen der Digitalisierung wirken so auf innerstädtische Logistik, die lokale Wirtschaft und, als Folge, auf die Attraktivität der Innenstädte.

12.6.3 Technische Vernetzbarkeit braucht eine organisatorische Entsprechung

Technische Evolution kann also zu einer marktseitigen Revolution führen. Revolutionär ist dabei das disruptive Potenzial, das auf Basis bestehender Produkte Leistungen ersetzt oder vollständig verdrängt. Es ist daher wichtig für die Weiterentwicklung der (Elektro-)Industrie in Europa, dass Smart City nicht einfach als neuer Vertriebskanal für jetzt vernetzbare Produkte verstanden wird. Wäre dem so, würde versucht, die Herausforderungen zum Beispiel im Bereich Mobilität, Energie und Gebäude in den segmentierten Systemen zu begegnen, in denen sie entstanden sind.

Um daher vom Kunden Stadt zum Markt Smart City zu kommen, scheint eine segmentübergreifende Lösungsentwicklung erforderlich. Das impliziert ein Verständnis von Smart City, das über den vernetzten Produktmarkt hinausgeht – hin zu Smart City als Entwicklungsprozess. Folgende Grafik stellt diesen Prozess dar:

Abb. 12.25: Einflussfaktoren der Urbanen Agilität



Quelle: Robert Bosch

Dabei wird auch die Problemstellung in eine vernetzte Ebene gehoben. So wird zum Beispiel aus einzelnen Lösungen im Stadtverkehr ein gesamtstädtisches Parkraummanagement, ein Maßnahmenpaket zur Verkehrsflussoptimierung oder ein integriertes Quartierskonzept für nachhaltige Mobilität und Energie. Dies stellt eine Komplexität dar, die selten von einem Anbieter allein abgedeckt werden kann. Ein aktiver Austausch über den eigenen Kompetenzbereich hinaus liegt nahe. Bislang scheinen die Akteure jedoch zu zögerlich, um ihre Komfortzonen zu verlassen (Kahneman 2013) – sie legitimieren den Erfolg vergangener Tage.

Die Ausführungen machen deutlich, dass Smart City einen neuen Geschäftsprozess impliziert. Einen Prozess, der Offenheit für Experimentelles erfordert, der im Ökosystem mit anderen Neues entstehen lässt. Bestehende Produkte sind Befähiger für neue Services, Geschäftsmodelle und Lösungen. Sie sind nicht mehr zwingend das Angebot oder die Lösung an sich. Das wirkt sich auf Definition, Projektlaufzeit und Vergütung von Leistung aus. Smart City erfordert die Offenheit, bewährte Pfade zu verlassen und mit Experten unterschiedlichster Disziplinen und Organisationen die integrierte Lösung für ein übergeordnetes Thema zu entwickeln. Raus aus dem Segment, rein in den Gesamtkontext! Auch die öffentliche Hand kann mit einer neuen Rolle konfrontiert werden, denn die rechtlichen Rahmenbedingungen und Regelwerke sind auf die traditionellen Strukturen ausgerichtet. Agilität im Entstehungsprozess von Lösungen erfordert eine schlanke und schnelle Administration und aktive Rolle der Verwaltung.

Um dies zu ermöglichen, kann eine bereichsübergreifende Organisationsstruktur (und das gilt für Wissenschaft, Wirtschaft und Stadtverwaltung gleichermaßen) sinnvoll sein. Dies erfordert einen Paradigmenwechsel, denn die Furcht, Kompetenz und Relevanz zu verlieren, kann zu Widerstand führen. Aufgrund fehlender, offensichtlicher Dringlichkeit kann ein Smart-City-Vorhaben durch fehlendes Handeln (passiver Widerstand) zumindest gebremst werden. Der Erfolg von Smart City ist damit stark abhängig von Personen und deren Fähigkeit für holistische Sicht und Kollaboration.

Ein weiterer Gedanke zur Vielschichtigkeit des Themas ist die Partizipation der Bürger – für deren verbesserte Lebensqualität Smart City schließlich entstehen soll. Was Unternehmen heute kaum gewohnt sind, ist die Beteiligung dieser Bürger. Es geht dabei nicht um die gemeinsame Entwicklung technischer Lösungen, sondern vielmehr um die Frage, wie viel Einsatz von Technologie erforderlich ist. Partizipation im Sinne einer Smart City sollte daher viel stärker als bisher auf den Prozess einer gemeinsamen Bedarfs- und Nutzenanalyse basieren. Im Umkehrschluss heißt das, dass auch die Bürger gefordert sind, denn das Recht auf Stadt ist auch eine Pflicht, diese zu gestalten (Harvey 2003)!

12.6.4 Fazit

In der Pressemeldung zur 100-jährigen Geschichte des ZVEI steht, dass Innovation und technischer Fortschritt immer im Zentrum der Arbeit des Verbands standen, und dass eine „kraftvolle politische und gesellschaftliche Auseinandersetzung über Schlüsselthemen der

Zukunft“ gebraucht wird (ZVEI 2018). In diesem Sinn ist Smart City eine Herausforderung und Chance, die Errungenschaften dieses technischen Fortschritts auch in Geschäftsmodell-Innovationen weiterzuentwickeln. Der Aufbau eines Ökosystems zur Identifikation übergeordneter Fragestellungen, die gemeinsame Konzeption, Pilotierung und großflächige Umsetzung von Lösungen und ein möglicherweise verändertes Rollenverständnis der Beteiligten kann zum entscheidenden Wettbewerbsvorteil im Kontext Smart City werden.

12.7 Gebäudetechnik der Zukunft – Smart Building

Die intelligente Vernetzung von Geräten und Systemen im Zweckgebäude lassen dieses zum Smart Building werden. Das komplexe Zusammenspiel zwischen Gebäude und Nutzer steht dabei im Vordergrund. Entsprechend werden sich in Zukunft alle Funktionen des Smart Buildings stark am einzelnen Nutzer orientieren und sich seinen Bedürfnissen und Wünschen anpassen. Statt gleiche Bedingungen für alle zu schaffen, regelt das intelligente Gebäude individuell die Temperatur, reagiert in Gefahrensituationen adaptiv auf die aktuelle Lage und sorgt dafür, dass von Verbrauchsgütern bis zur Raumnutzung die Kapazitäten optimal ausgelastet sind. Das Smart Building ermöglicht individuelle Services, die zu einem hohen Maß an Komfort, Sicherheit und Energieeffizienz führen.

Möglich werden diese Funktionen erst durch die Erhebung und Analyse großer Datenmengen. Deshalb wird dem Datenschutz und der Datensicherheit in Zukunft eine größere Bedeutung zukommen. Der Nutzer muss zu jeder Zeit selbst entscheiden können, welche Daten er dem Gebäude zur Verfügung stellt und welche nicht. Ausschlaggebend ist immer, was für den einzelnen Nutzer tatsächlich einen Mehrwert darstellt – nicht, was technisch möglich ist.

12.7.1 Das individualisierte Gebäude

Das smarte Gebäude der Zukunft stellt sich auf die individuellen Bedürfnisse seiner Nutzer ein. Anstatt pauschal für alle die gleichen Bedingungen zu schaffen, werden Gebäudefunktionen auf die einzelne Person zugeschnitten. Das Gebäude wird dafür geeignete Kommunikationsschnittstellen zur Verfügung stellen und in der Lage sein, aus Wünschen und steuernden Eingriffen der Nutzer zu lernen.

Im individualisierten Gebäude werden Funktionen, zwischen denen Wechselwirkungen bestehen, integriert gesteuert. Heute agieren Systeme wie Klimaanlage und Verschattung häufig ohne Kenntnis des jeweils anderen Systems. Demgegenüber bedeutet integrierte Optimierung, dass alle Funktionen mit Blick auf die Nutzerfreundlichkeit ineinandergreifen und aufeinander abgestimmt sind.

Das Gebäude wird in der Lage sein, die Umgebung (Lichtszenerien, Temperatur, Luftstrom usw.) für jeden einzelnen Menschen im Gebäude so zu gestalten, dass sie seinen individuellen Bedürfnissen angepasst ist. Auf den ersten Blick mag dies aufwendiger und weniger energieeffizient erscheinen als ein betriebskostenoptimiertes Vorgehen. Unkontrollierte Eingriffe der Gebäudenutzer, die ein betriebskostenoptimiertes System leicht aus dem Gleichgewicht bringen können, werden auf diese Weise jedoch minimiert.

Damit diese personalisierten Einstellungen vorgenommen und aus vergangenen Steuerungseingriffen des Einzelnen gelernt werden kann, bedarf es einer individuellen Identifikation der Nutzer. Die kann zum Beispiel über fernauslesbare Chipkarten oder Smartphones, mithilfe arbeitsplatzunabhängiger Log-in-Mechanismen oder einer Multi-Sensor-Infrastruktur und einer intelligenten Datenauswertung geschehen.

Darüber hinaus lernt das Gebäude der Zukunft – soweit dies vom Betreiber gewünscht ist – von anderen Gebäuden. Lernalgorithmen können optimale Funktionseinstellungen im Betrieb ermitteln, die sich automatisiert auf andere Gebäude übertragen lassen.

12.7.2 Das vorausschauende Gebäude

Das smarte Gebäude der Zukunft ist dank intelligenter Analyse der im Gebäude erhobenen Daten in der Lage, vorausschauend zu agieren. Es antizipiert die Anfragen von Nutzern, statt einfach nur auf die konkrete Anforderung von Funktionen zu reagieren. Damit minimiert das vorausschauende Gebäude Engpässe und Wartezeiten. Funktionen und Services werden proaktiv zur Verfügung gestellt. Alle Prozesse im Gebäude können so reibungslos und ohne für den Nutzer wahrnehmbare Störungen ablaufen.

Grundlage für die antizipative Bereitstellung von Funktionen ist die intelligente Datenanalyse. Die dafür benötigten Daten werden in Zukunft dank steigender Anzahl und Qualität, neben sinkender Kosten von Sensoren, in großer Zahl in nahezu jedem Teilsystem an mehreren Punkten

im Gebäude bereitgestellt. Neben der Helligkeit werden beispielsweise die Lichtfarbe, Bewegung, Wärmequellen und Luftströmungen gemessen. Dazu kommen Sensoren zum Monitoring technischer Systeme. Die kombinierte Analyse dieser Daten kann zum Beispiel einen Brandausbruch wesentlich früher als ein gewöhnlicher Brandmelder erkennen. Zusätzlich zu den vom Gebäude selbst erhobenen Daten können beispielsweise Wetterdaten, Ablaufpläne, Flugpläne usw. hinterlegt und in die Analyse eingebunden werden, um Rückschlüsse und Optimierungen für den Gebäudenutzer und Dienstleister bereitzustellen.

Im vorausschauenden Gebäude kommen selbstlernende Algorithmen zum Einsatz, die in den Datenmengen nach Mustern suchen, auf deren Grundlage Vorhersagen getroffen werden, was im Gebäude wahrscheinlich geschehen wird. Der „Predictive Elevator“ der Zukunft ist zum Beispiel darauf optimiert, Wartezeiten zu vermeiden. Verlässt ein Hotelgast sein Zimmer, reagiert das Gebäude, indem es einen Aufzug in das entsprechende Stockwerk beordert. Wartezeiten am Sicherheitscheck von Flughäfen oder Bahnhöfen können nach ähnlichen Abläufen reduziert werden. Die Antizipationsfähigkeit des Gebäudes bezieht sich dabei nicht nur auf Vorgänge, die sich unmittelbar aus dem Verhalten der Menschen im Gebäude ergeben. Es können ebenfalls die Bedarfe technischer Systeme im Rahmen von „Predictive Maintenance“ anhand von charakteristischen Musterveränderungen in den entsprechenden Sensordaten frühzeitig erkannt werden.

12.7.3 Das wegweisende Gebäude

Desorientierung und zeitraubende Suchphasen gehören im smarten Gebäude der Zukunft der Vergangenheit an. Das wegweisende Gebäude übernimmt eine Lotsenfunktion und stellt dem Nutzer individualisierte Orientierungsangebote zur Verfügung, mit deren Hilfe sich jeder individuell und punktgenau an ein gewünschtes Ziel im Gebäude führen lassen kann. Darüber hinaus bietet das wegweisende Gebäude seinen Nutzern weitergehende kontextsensitive Informationen.

Die Grundlage der Orientierungs-, Service- und Informationsleistung sind personenbezogene Daten. Um einen Nutzer von einem Standort zum anderen zu leiten, benötigt das Gebäude zumindest Informationen über die jeweilige Position und Ziel des Nutzers.

Sollen einem Nutzer Services (z. B. Abflug-, Boardingzeiten an Flughäfen usw.) und Angebote (Shopping, Entertainment, Dienstleistungen usw.) unterbreitet werden, sind umfassendere Profildaten erforderlich. Der Nutzer, der

passgenaue Informationen erhalten will, muss in gewissem Maße seine Privatsphäre/Anonymität aufgeben. Alle diese Angebote müssen so konzipiert sein, dass sie ausschließlich auf Wunsch des Nutzers und mit seiner ausdrücklichen Zustimmung aktiviert werden.

Nicht zuletzt kann ein intelligentes, wegweisendes Gebäude auf konkrete Gefahrensituationen zugeschnittene Notfall- und Fluchtweginformationen bereitstellen. Die Basis für alle genannten Angebote ist eine verlässliche Indoor-Navigation, verknüpft mit Nutzerinformationen und relevanten Datenbeständen.

12.7.4 Das wehrhafte Gebäude

Das smarte Gebäude der Zukunft geht über den heute realisierten Sicherheitsstandard hinaus: Es ist nicht nur sicher, sondern wehrhaft. Gemeint ist damit, dass das Gebäude eine aktive Rolle in unterschiedlichen sicherheitsrelevanten Szenarien spielt, während es heute auf rein passive Weise Schutz gewährleistet. Das wehrhafte Gebäude stellt sich dynamisch auf situativ unterschiedliche Sicherheitsanforderungen ein, handelt adaptiv, um Bedrohungssituationen zu vermeiden oder zu entschärfen und leistet einen eigenständigen Beitrag zur Bewältigung akuter Gefährdungslagen. Dafür ist die Integration unterschiedlicher Informationen zu einem umfassenden Lagebild entscheidend.

Um Gefahren zu erkennen, werden sämtliche Daten, die im Rahmen des Gebäudemanagements anfallen, genutzt, im Hinblick auf ihre Sicherheitsrelevanz ausgewertet und zu einem dynamischen Echtzeitbild der aktuellen Sicherheitslage zusammengeführt. Die aus den unterschiedlichen Quellen stammenden Informationen ermöglichen es in ihrer Gesamtheit, die aktuelle Lage schneller und präziser einzuschätzen und Gefahrenherde genauer zu lokalisieren. So lassen sich Fehlalarme vermeiden; und falls tatsächlich ein Notfall vorliegt, sind die Einsatzkräfte früher vor Ort und können gezielter eingreifen.

Eine mehrstufige Sicherheitszonierung ist heute Standard. Das wehrhafte Gebäude geht mit dynamischen Zugangsregelungen über den Status hinaus. So lässt sich jeder Raum, jeder Flur, jeder Aufzug zu jeder Zeit daraufhin anpassen, welche Personen und Personengruppen Zugang zu ihm erhalten oder auch nicht. Eine Identifikation der Gebäudenutzer über biometrische Merkmale ermöglicht es, die Zugangsautorisierung zu automatisieren, sodass vom Nutzer eigens mitgeführte Identifikationsmittel überflüssig werden.

Um adäquat reagieren zu können, sind alle Schutzfunktionen im wehrhaften Gebäude adaptiv ausgelegt und passen sich an verändernde Umstände an. Bei einem Notfall steht beispielsweise das Ziel im Vordergrund, gefährdete Bereiche zu evakuieren. Dazu wird eine Fluchtweglenkung, die sich immer wieder aufs Neue auf unterschiedliche Gefährdungslagen und ihre Entwicklung im Zeitablauf einstellt, aktiviert. Im Rahmen des gesetzlich Zulässigen sind auch robustere Formen der Wehrhaftigkeit denkbar, etwa das Vernebeln von Gebäudeabschnitten, um Eindringlingen die Orientierung zu nehmen.

12.7.5 Datenschutz und Datensicherheit im smarten Gebäude

Mit zunehmender Integration von Sensor- und Informationstechnologie in Gebäuden wird der Umgang mit Daten auch im Gebäudekontext zu einem hochrelevanten – und hochsensiblen – Feld.

Dem Recht auf informationelle Selbstbestimmung folgend, werden Mehrwertdienste im Gebäude der Zukunft, sofern sie auf personenbezogenen Daten beruhen, nur mit der ausdrücklichen Zustimmung des Nutzers erfolgen. Gebäudenutzer, die ihre persönlichen Daten nicht freigeben wollen, können dann nur auf Kernfunktionen des Gebäudes zugreifen.

Datenschutz, Datensouveränität und Transparenz über die Datenverwendung sind eine elementare Grundlage für die Akzeptanz und damit das Marktpotenzial zukünftiger technischer Systeme.

Datensicherheit ist eine Eigenschaft von Produkten, Systemen und Prozessen, in denen gespeicherte Daten vor unbefugten Zugriffen (und Verlust) geschützt werden. Zusätzlich wird sichergestellt, dass die Geräte nicht für Angriffe auf Dritte missbräuchlich verwendet werden können. Für Unternehmen, die personenbezogene Daten erheben, gelten besonders hohe Anforderungen bei der Datensicherheit. Gebäudenutzer werden digitalen Diensten nur dann vertrauen, wenn die Gebäudebetreiber transparent machen können, dass sie mit den Nutzerdaten verantwortungsvoll umgehen und für die angemessene Datensicherheit Sorge tragen.

12.8 Anwendungen für Offshore und Tiefsee

Während die Tiefen des Alls seit Jahrtausenden kontinuierlich erforscht werden, ist die Erkundung der Tiefsee ein vergleichbar junges Forschungsgebiet. Der Mond und der Mars gelten

als deutlich besser erforscht als große Teile der Meere. Befähigt durch den technischen Fortschritt rückte die Exploration der Tiefsee in den letzten Dekaden allerdings immer stärker in den Fokus wissenschaftlicher und auch wirtschaftlicher Interessen. Als Tiefsee gilt hierbei der weitgehend lichtlose Bereich der Meere, der unterhalb einer Tiefe von 200 Metern beginnt, was für etwa 90 Prozent der Meere zutreffend ist.

Der Tiefseemarkt hat – nach dem Allzeithoch im Jahr 2013 – durch den Ölpreiseinbruch 2014 einen zwischenzeitlichen Rückgang erfahren. Gerade aber mit dem sich stabilisierenden Ölpreis wird sich dieser technologie- und innovationsintensive Markt wieder entwickeln. Zentrum des Offshore- und Tiefseemarkts sind neben Schottland, Norwegen und Brasilien vor allem die USA mit dem Hauptsitz in Houston.

Die technischen Anforderungen, die an Komponenten in der Tiefsee bzw. im nautischen Bereich gestellt werden, sind dabei vielfältig und stellen Ingenieure immer wieder vor Herausforderungen:

- Hoher Druck von bis zu 1.000 bar
- Korrosive Umgebung im Salzwasser bzw. Salznebel bei Wartung und Pause
- Hohe Temperaturunterschiede bei Wartung und Pause (in der Tiefsee liegt die Wassertemperatur dagegen konstant bei ca. 0–4 °C)

Insbesondere der hohe Druck in der Tiefsee erfordert ein geschicktes Handling. Die unbemannten U-Boote zeigen dabei große Vorteile gegenüber den bemannten, da erstere mit einem flüssigen oder festen, quasi inkompressiblen Medium, gefüllt werden können. Durch diese Befüllung wird in den Komponenten ein Gegendruck erzeugt, der dem externen Druck entgegenwirkt. Aufgrund der, wenn auch sehr geringen, endlichen Kompressibilität von Flüssigkeiten muss weiterhin ein Druckausgleichssystem verwendet werden. Im Fall von Öl als Ausgleichsmedium muss es in der Lage sein, Volumenänderungen in der Größenordnung von einem Volumenprozent pro 1.000 Meter Tauchtiefe ausgleichen zu können.

Die Erforschung oder Nutzung der Tiefsee kann über drei Haupttypen von U-Booten getätigt werden:

- Bemannte U-Boote: teuer und für größere Tiefen technisch sehr schwierig
- Kabelgebundene, gesteuerte Roboter (ROVs = Remotely Operated Vehicles): Hierbei handelt es sich um unbemannte U-Boote, die über eine Serie von Kabeln mit dem Mutterschiff verbunden sind. Diese Kabel übermitteln die

Steuersignale, Sensorsignale und häufig die notwendige elektrische Leistung an das ROV, wodurch die Steuerung durch einen Operator auf dem Mutterschiff ermöglicht wird. ROVs haben sich als optimal für die Verwendung und Erkundung der Tiefsee herausgestellt.

- Kabellose, automatische Roboter (AUVs = Autonomous underwater vehicle): Ein AUV, ebenfalls ein unbemanntes U-Boot, wird verwendet für Vermessungsaufgaben in der Tiefsee, zum Beispiel die Suche oder Kartierung von Wracks, Felsen oder anderweitigen Hindernisse für die Schifffahrt.

Bei den sogenannten ROVs liegt in der Verbindung zwischen Mutterschiff und ROVs eine der großen Herausforderungen. Sie wird über eine sogenannte Nabelschnur, ein schweres Tiefseekabel, mit dem Mutterschiff realisiert. Eine große Kabelwinde mit meist mehreren Kilometern an Kabel befindet sich auf dem Mutterschiff. In den meisten Fällen befindet sich am Ende dieses Kabels eine Garage, in dem sich das ROV im Ruhezustand befindet und in die Tiefe gelassen wird. Weiterhin dient die Garage als Zwischenstation zwischen dem ROV und dem Schiff. Ein kilometerlanges Kabel würde das ROV manövrierfähig machen. Deshalb wird ein dünneres, einige Hundert Meter langes Kabel zur Kommunikation zwischen Garage, ROV und letztendlich dem Mutterschiff verwendet. Auch für das dünnere Kabel wird eine Kabelwinde benötigt. Die ROVs selbst sind mit mehreren Sensoren und Steuerelementen und natürlich mit einigen hochauflösenden Kameras ausgestattet, damit der Operator am Mutterschiff die ROVs ideal steuern kann. Die hohen zu überbrückenden Distanzen von häufig einigen Kilometern Kabellänge bei gleichzeitig einer sehr hohen Datenrate erfordern die Verwendung von Singlemodeglasfasern für die Steuerung des ROVs und der Übertragung der Sensordaten.

Daher ist eine technische Schlüsselkomponente die in der Kabelwinde verbaute, für die Nutzung in der Tiefsee taugliche, das heißt druckkompensierte, Glasfaserdrehkupplung (FORJ = Fiber Optic Rotary Joint). Die neu entwickelten Technologien sind sowohl für passive als auch aktive optische Elemente ideal geeignet und das generierte Know-how kann weiterhin für die Optimierung anderer Komponenten genutzt werden. Die Erforschung der Meere benötigt solche innovativen Schlüsselkomponenten.

13 Produktentwicklung / Produktentstehung



Quelle: Gorodenkoff / Fotolia.com

Der Produktentstehungsprozess (PEP) beschreibt die Arbeitsabläufe von der Idee für ein neues Produkt oder System bis zu dessen Herstellung und Verkauf. Der Begriff wird vor allem im Umfeld der Automobilindustrie und deren Zulieferer verwendet.

13.1 Vorgehensmodelle im Entwicklungsprozess

Um den langfristigen Unternehmenserfolg zu sichern, müssen Unternehmen schneller als ihre Marktbegleiter auf Markt-, Kunden- und Technologieveränderungen reagieren und diesen Wandel als kontinuierlichen Prozess betrachten. So können Unternehmen sicherstellen, dass sie die richtigen Produkte zur richtigen Zeit und mit der richtigen Qualität kostengünstig entwickeln können. Für die Produktentwicklung stellt dies eine Herausforderung in Bezug auf die Flexibilität, Kosten und Durchlaufzeit der Projekte dar. Um die Flexibilität in der Produktentwicklung zu erhöhen, wechseln Unternehmen von klassischen zu agilen Vorgehensmodellen.

Vorgehensmodelle stellen vordefinierte Regeln, Aktivitäten und Rollen bereit, um die Komplexität bei der Planung und Ausführung von Produktentwicklungsprojekten zu reduzieren. Ein solches Rahmenwerk unterstützt nicht nur die sichere Projektdurchführung, sondern auch die Einhaltung von projektspezifischen Qualitäts- und normativen Anforderungen und es enthält Vorgaben für folgende typische Teilbereiche der Entwicklung:

- Phasen des Produktentstehungsprozesses
- Aufgaben und Aktivitäten in den einzelnen Phasen
- Arbeitsprodukte und Dokumente
- Rollen und Verantwortlichkeiten
- Methoden und Tools

Typischerweise besitzt ein Entwicklungsprozess folgende Phasen:

- Anforderungserhebung und Anforderungsmanagement
- Konzepterstellung, Grobentwurf
- Feinentwurf
- Implementierung
- Integration
- Verifikation
- Validierung

Wobei in den nachfolgend beschriebenen Vorgehensmodellen nicht immer alle Phasen enthalten sein müssen und diese auch unterschiedlich intensiv ausgeprägt sein können.

13.1.1 Code & Fix

Diese Vorgehensweise ist die einfachste denkbare Möglichkeit, ein Ziel zu erreichen, auch bekannt unter dem Namen „Trial & Error“. Man versucht, ein Ergebnis zu erzielen, und arbeitet dann an den Fehlern oder Unzulänglichkeiten. Das Ergebnis wird solange überarbeitet, bis das Ziel erreicht ist. Dazu zählt man auf die Erfahrung der Mitarbeiter. Da hierbei wenige Abläufe beschrieben sind, kommt es oftmals zu „Heldentum“ und das Projektziel wird nur mit massivem persönlichem Einsatz der Teammitglieder erreicht.

Vorteile:

- Die Teammitglieder arbeiten weitestgehend selbstständig, dadurch ist ein geringer Management-Aufwand notwendig.
- Die Ziele werden scheinbar schnell erreicht, da keine langwierigen Prozessschritte durchlaufen werden müssen.
- Änderungen und Kundenwünsche können schnell einfließen.

Nachteile:

- Das Vorgehen ist nach Abschluss der Entwicklung und von Außenstehenden nicht oder nur unzureichend nachvollziehbar bzw. reproduzierbar.
- Es sind oftmals viele Iterationen notwendig, um das Ziel mit entsprechender Qualität zu erreichen.
- Das Vorgehen ist nicht planbar hinsichtlich Kosten und Zeitaufwand.
- Der Überblick über Änderungen und deren Auswirkungen ist nicht vorhanden.

13.1.2 Wasserfallmodell

Ein Wasserfallmodell ist ein lineares Vorgehensmodell, das in aufeinanderfolgenden Projektphasen organisiert ist. Dabei gehen die Phasenergebnisse wie bei einem Wasserfall immer als bindende Vorgaben für die nächsttiefer Phase ein.

In einem Wasserfallmodell hat jede Phase vordefinierte Start- und Endpunkte mit eindeutig definierten Ergebnissen. Meist beschreibt das Modell auch einzelne Aktivitäten, die zur Herstellung der Ergebnisse durchzuführen sind. Zu bestimmten Meilensteinen und am jeweiligen Phasenende werden die vorgesehenen Entwicklungsdokumente im Rahmen des Projektmanagements verabschiedet.

Wasserfallmodelle werden allgemein dort vorteilhaft angewendet, wo sich Anforderungen, Leistungen und Abläufe in der Planungsphase relativ präzise beschreiben lassen.

Vorteile:

- Entwicklungsprojekte mit niedriger Komplexität können zielgerichtet und überschaubar abgearbeitet werden. Das Modell ist einfach und verständlich.
- Am Ende jeder Aktivität steht ein fertiggestelltes Dokument, das heißt, das Wasserfallmodell ist ein dokumentgetriebenes Modell.
- Sind die Anforderungen an ein Systementwicklungsvorhaben von Anfang an bekannt und über die gesamte Laufzeit auch stabil, dann kann das Wasserfallmodell sehr effizient eingesetzt werden.

Nachteile:

- Der Auftraggeber eines Entwicklungsprojekts ist nur am Anfang der Spezifikationsphase miteinbezogen.
- Der Entwicklungsablauf ist sequenziell, das heißt, jede Aktivität muss beendet sein, bevor die nächste anfängt.
- Unflexibel gegenüber Änderungen und im Vorgehen, denn die Phasen müssen sequenziell abgearbeitet werden.

13.1.3 Spiralmodell

Das Spiralmodell soll die Mängel des Wasserfallmodells (fehlende Iterationsschritte) ausgleichen, indem das Spiralmodell diese quasi vorschreibt. Bei diesem Entwicklungsmodell werden mehrere Iterationen im Entwicklungsprozess eines Produkts durchgeführt, wobei die Gesamtzahl dieser Iterationen nicht festgelegt ist. Dieses Modell sieht eine explizite Risikobetrachtung und Maßnahmen zur Beseitigung entdeckter Risiken bei jeder Iteration vor.

Vorteile:

- Ein System entwickelt sich natürlich aus einer Keimzelle in sukzessiven Zyklen in ein fertiges System.
- In jedem Zyklus sind Anpassungen aufgrund neuer Erkenntnisse oder geänderter Anforderungen möglich.
- Eine regelmäßige Risikobetrachtung minimiert das mögliche Scheitern des Projekts und macht aktuelle Probleme im Entwicklungsvorhaben transparent.

Nachteile:

- Jede Iteration stellt besondere Herausforderungen an die Verwaltung unterschiedlicher Versionen von Dokumenten, Werkstücken und Quellcodes.
- Die Vorgehensweise stellt hohe Anforderungen an das Projektmanagement bezüglich Planung und Trennung der einzelnen Iterationen.
- Das Spiralmodell setzt die Beherrschung von Risikomanagement des Entwicklerteams voraus.
- Obwohl das Modell iterativ ist, fordert es dennoch eine feste Abfolge von einzelnen Phasen in einem Zyklus. Selbst wenn es notwendig ist, kann nicht eine Phase wiederholt werden oder in eine andere Phase zurückgesprungen werden.

13.1.4 V-Modell / Erweiterung des V-Modells

Das V-Modell basiert wie das Spiralmodell auf dem Wasserfallmodell. Das V-Modell definiert einzelne Entwicklungsphasen, die logisch aufeinander aufbauen. In jeder Phase werden Aktivitäten und Ziele definiert. Die Ergebnisse der Vorgängerphasen dienen dabei als Eingangsgröße. Es werden aber nicht nur Entwicklungsaufgaben definiert, sondern gleichzeitig auch entsprechende Tests für spätere Testphasen erstellt, die die Ergebnisse der jeweiligen Entwicklungsphase absichern sollen. Hierbei können mehrere Phasen (V-Modell-Durchläufe) nacheinander definiert werden. Hier wird zunächst im ersten „V“ ein Prototypensystem entwickelt, das dann bei weiteren Durchläufen immer weiter verfeinert

wird. Durch die Hintereinanderschaltung mehrerer V-Modelle wird der Gesamtentwicklungsprozess sehr komplex und erfordert umso mehr Verwaltungs- und Projektmanagementaufwand.

Vorteile:

- In jeder Phase des V-Modells werden die Anforderungen detaillierter herausgearbeitet. Ein komplexes System wird daher in ein überschaubares Teilsystem zerlegt.
- Das V-Modell verhindert, dass man sich zu Beginn mit Einzelheiten aufhält und dabei das Gesamtbild aus dem Blick verliert.
- Die einzelnen Phasen des V-Modells führen auf natürliche Weise vom Einfachen zum Komplexen.
- Die Anzahl der Phasen ist nicht fest vorgegeben. Diese Möglichkeit der Dekomposition eines Systems in die gewünschte Granularität ist eine der Stärken des V-Modells.

Nachteile:

- Das Modell ist nach seiner Grundausrprägung nicht iterativ, damit hat das Modell die gleichen Nachteile wie das Wasserfallmodell.
- Für die Steuerung von Projekten nach dem V-Modell ist eine größere Projektorganisation notwendig. Dadurch ist das Modell nur für größere Projekte effizient einsetzbar.
- Die Dekomposition des V-Modells erfordert Erfahrung der Projektmitglieder.
- In der Standardversion des Modells sind keine Rückflussmöglichkeiten von Testergebnissen in frühere Phasen oder Iterationen vorgesehen.
- Werden während der Phase Fehler entdeckt bzw. ändern sich die Anforderungen, ist das Modell sehr unflexibel und erfordert wie das Wasserfallmodell einen erneuten Durchlauf durch alle Phasen.

13.1.5 Agile Vorgehensmodelle

Es gibt verschiedene agile Vorgehensmodelle, Scrum als eines der bekanntesten ist vor allem in Projektmanagement-Kreisen weit verbreitet. Vorgehensmodelle wie das Wasserfallmodell oder auch das V-Modell haben den entscheidenden Nachteil, dass sie mit sich ändernden Anforderungen nicht oder nur sehr aufwendig umgehen können.

Nicht so das agile Vorgehensmodell. Dieses Modell ist geradezu angewiesen auf Änderungen bzw. zerlegt ein Projekt in kleine Änderungen, um diese Schritt für Schritt zu einem Ganzen zusammenzufügen. Dieses Vorgehen erfreut sich immer stärkerer Beliebtheit gerade bei großen Projekten, da hier vage Zieldefinitionen ausreichend sind und diese mit kleinen Schritten

konkretisiert und letztlich erfüllt werden. Dabei werden die sogenannten Sprints geplant: Diese dauern in der Regel ca. einen Monat; innerhalb eines Sprints gibt es tägliche Scrums, in denen der Arbeitsfortschritt besprochen wird.

Als Eingabe in die Sprints dient das Sprint-Backlog, das den Arbeitsvorrat (Arbeits- oder Änderungspaket) darstellt. Der Output ist das produzierte Feature, das sich als Summe der durchgeführten Arbeitspakete ergibt. Zur Steuerung und Optimierung des Projektfortschritts dienen der Sprint-Review und die Sprint-Retrospektive.

Vorteile:

- Dieses Vorgehensmodell bindet den Kunden intensiv wie kein anderes ein.
- Das Vorgehensmodell lässt Änderungen zu jeder Zeit (quasi täglich) zu, da es in den Daily-Scrums sofort berücksichtigt werden kann.
- Das Modell kommt mit wenig Dokumentation aus, da die Kommunikation der Teammitglieder im Fokus steht (das bedeutet nicht, dass auf Dokumentation verzichtet werden kann).

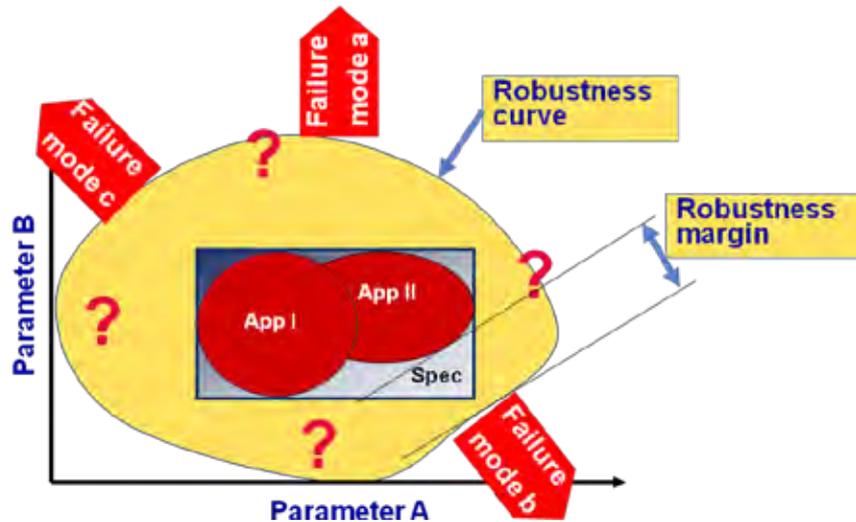
Nachteile:

- Da in diesem Modell Änderungen stets eingebracht werden können, ist ein intensives Änderungsmanagement vonnöten.
- Da das Modell mit wenig Dokumentation auskommt, muss besonderer Wert auf eine detaillierte Planung der Dokumentation gelegt werden, da sonst die Transparenz im Projekt verlorengeht.
- Normative Anforderungen an die Dokumentation sind auch bei agilen Methoden zu erfüllen.
- Da die agile Vorgehensweise auf eine gute Kommunikation angewiesen ist, ist die Auswahl der Teammitglieder für den Projekterfolg essenziell wichtig.
- Dem Scrum-Master und seinen Stellvertretern kommt eine besondere Bedeutung bei der Moderation der Meetings zu. Seine Soft Skills und seine Führungsqualitäten sind entscheidend für den Projekterfolg.

13.2 Anforderungserhebung und Anforderungsmanagement

Ein zentraler Punkt in jedem Vorgehensmodell und Produktentwicklungsprozess ist die Anforderungserhebung. Anforderungen an das Produkt (oder die Dienstleistung) kommen dabei vom Kunden. Es gibt gesetzliche Anforderungen und Anforderungen aus dem Systemkontext, in dem ein Produkt benutzt oder integriert werden soll.

Abb. 13.1: Beispiel Robustness-Validation für zwei Parameter



Quelle: ZVEI

Anforderungen lassen sich dabei grob in funktionale Anforderungen und nicht funktionale Anforderungen untergliedern. Zu den nicht funktionalen Anforderungen gehören unter anderem die Zuverlässigkeit (Reliability, Robustness, Verfügbarkeit), die Funktionale Sicherheit (Functional Safety) und die Datensicherheit (Cybersecurity). Auf diese drei Anforderungskategorien soll im Nachfolgenden näher eingegangen werden, da im Designprozess nicht nur großes Augenmerk auf diese Anforderungen gelegt werden muss, sondern auch teilweise spezielle Nachweise erbracht werden müssen (z. B. Safety Case).

13.2.1 Zuverlässigkeit

Zuverlässigkeit ist eine Eigenheit, die grundsätzlich immer gewünscht ist und vor allem bei technischen Produkten eigentlich eine essenzielle Voraussetzung darstellt.

In einer vereinfachten Definition spricht man nicht selten dann von einem zuverlässigen Produkt, wenn dieses genau das macht, was es soll, und zwar zu jedem gewünschten Zeitpunkt und über einen am besten unbegrenzten Zeitraum hinaus.

Um diesem Wunschdenken auf der Funktionsebene am Ende so nahe wie möglich zu kommen, sind aber verschiedenste Voraussetzungen notwendig, die, genauer betrachtet, aus vielen verschiedenen Bereichen stammen.

Am besten verständlich ist hier noch die entsprechende oder produktkonforme Anwendung. Damit ist aber nichts anderes gemeint, als dass ein Produkt nur unter bestimmten Voraussetzungen und bei einer entsprechenden Handhabung

zuverlässig funktioniert. Es darf also weder überlastet werden, noch darf es Funktionen dienen, für die es nicht konstruiert wurde.

Die Experten sprechen hier von einem sogenannten Mission Profile, also einer Art mehrdimensionaler Hüllkurve, welche die verschiedensten Stressoren aufzeigt und die jeweilige Spezifikationsgrenze definiert. Abbildung 13.1 zeigt in vereinfachter Form ein solches Diagramm.

Die jeweils in roter Farbe dargestellten Kreise symbolisieren die jeweilige Anwendung und die daraus resultierenden Stressparameter für „A“ und „B“ (z. B. Wärme und Druck). Das in blau dargestellte Rechteck definiert die von der Entwicklung spezifizierten Eckpunkte, in denen das Produkt einwandfrei zuverlässig für einen definierten Zeitraum funktionieren muss. Die gelbe Hüllkurve gibt nun Auskunft über die Robustheit, also den zusätzlichen Stress, den ein Produkt über die definierte Belastung hinaus vertragen kann. Dieser ist, abhängig vom jeweiligen Stressfaktor und auch von der Faktor-Überlagerung, einmal mehr und einmal weniger.

Diese Tatsache ist nun aber nichts grundlegend Neues und prinzipiell schon seit jeher existent. Zur Manifestierung der jeweiligen Daten benutzt man entsprechende Testmethoden, die durch eine Art beschleunigtes Altern die jeweiligen Stressfaktoren und die Produktlebenszeit definieren. Es stellt sich nun die Frage, wo der Bezug zur Technologie bzw. zu einer technologischen Entwicklung ist und welchen Vorteil man sich daraus ableiten kann. Zunächst einmal haben die vorherigen Kapitel der Technologie-Roadmap bereits aufgezeigt, wohin sich die Technologie

bewegt und auch plausibel erklärt, dass sich die Zeiträume zwischen den jeweiligen Technologieständen ständig verkürzen. Genau hier entsteht nun die große Herausforderung, da man, auch wenn die Stressfaktoren weitgehend gleich bleiben, irgendwann zu dem Punkt kommt, dass der verbleibende Technologiezyklus kürzer ist als die schnellste Methode, die noch ein vernünftiges Testen ermöglicht. Ab diesem Zustand würden dann nur noch theoretische Modelle helfen.

Es besteht also die Notwendigkeit, Methoden zu entwickeln oder bestehende Methoden so zu erweitern, dass man weiterhin in der Lage ist, auch bei verkürzten Zyklen noch so weit zu testen, dass das Ergebnis eine hinreichende Prognose für die jeweilige Zuverlässigkeit zulässt.

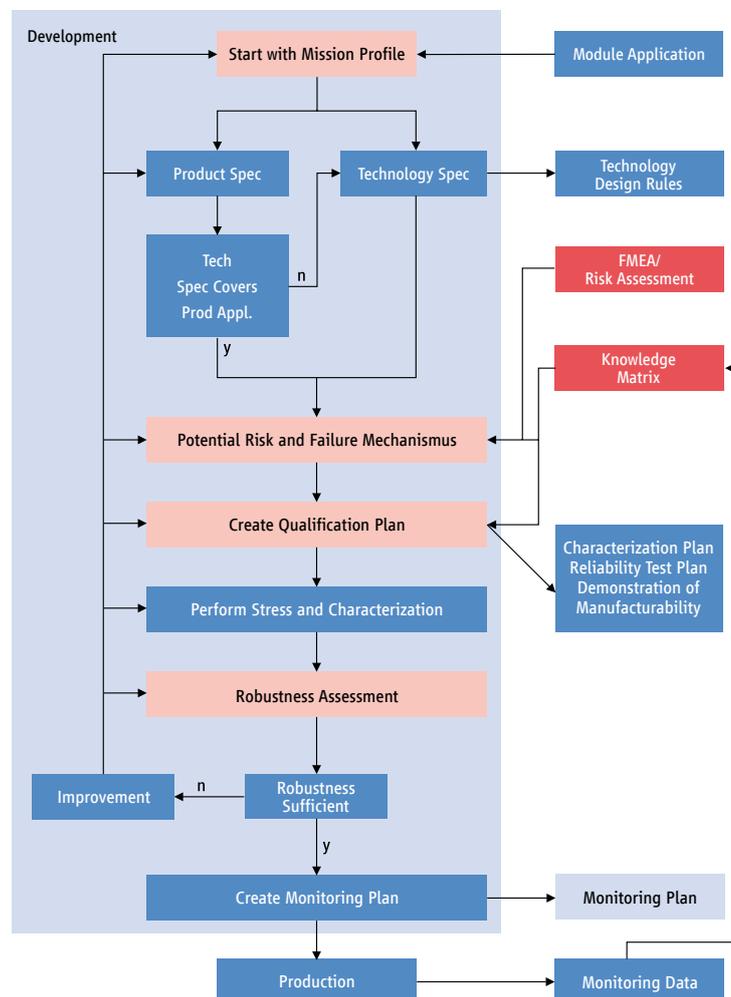
13.2.2 Existierende Methoden und der Produktlebenszyklus

Die in der Kapitelüberschrift genannten Begriffe stehen grundsätzlich in direkter Relation zueinander. So ermöglicht ein entsprechend langer Produktlebenszyklus hinreichend genaue Methoden und auch eine gewisse Standardisierung bei der Methodenanwendung. Weiterhin können

genügend viele Daten und Erfahrungen gewonnen werden, um hinreichende Aussagen über das potenzielle Ausfallverhalten eines Produkts zu gewährleisten. Industriezweige, wie zum Beispiel die Automobilindustrie oder die Luftfahrt, haben hier vorzügliche Arbeit geleistet und eine Vielzahl von Standards entwickelt, die potenziell auftretende Fehler definieren, das Ausfallverhalten beschreiben und Abstellmaßnahmen aufzeigen. Weiterhin können vordefinierte Tests durchgeführt werden, um all das zu bestätigen. Der Erfolg stand jedoch schon immer im Verhältnis zur richtigen Methodenauswahl und in ihrer Kombination. Es gibt leider kein Allheilmittel, das die Grundgesamtheit aller möglichen Fehler abdeckt und innerhalb kürzester Zeit testen lässt.

Das nachfolgende Diagramm erklärt den prinzipiellen Prozess zur Entwicklung und Anpassung eines Qualifizierungsplans. Hier sei bereits im Voraus der Fokus auf den Anpassungsprozess (= Create Qualification-Plan + Perform Stress-Test and Characterization) gelegt, da nur dieser die Lücke zu schließen mag:

Abb. 13.2: Definition des Qualifizierungsplans



Quelle: ZVEI

Zur Generierung eines anzuwendenden Qualifizierungsplans ist allerdings jede Menge an Wissen und vor allem eine ausreichende Kenntnis zur Technologie sowie des Einsatzprofils (Mission Profile) notwendig. Das Ziel, die Testzeit soweit möglich zu reduzieren, um allgemein Zeit und damit auch Kosten zu sparen, steht kontrovers zur Testabdeckung und der Bandbreite sowie der Aussagefähigkeit des Ergebnisses. Da Stressoren leider nicht einzeln und sequenziell auftreten, sondern überlagert und gegebenenfalls zeitlich überlagert, machen sie die Anwendung von standardisierten Verfahren (wie z. B. der AEC Q100 oder anderen) sehr schwierig oder lassen es zumindest nicht zu, dass die Ergebnisse eine eindeutige Aussage hinsichtlich der finalen Lebensdauer eines Produkts treffen.

Der Technologietrend und die damit auch teilweise revolutionären Entwicklungsmethoden sind mitunter getrieben durch die Anforderung der Verbraucher, immer schneller immer mehr Funktionen in einem Produkt haben zu wollen. Lässt sich der grundsätzliche Produktentstehungsprozess noch durch agile Methoden beschleunigen, kommen wir allerdings bei den bereits erwähnten Testmethoden sehr schnell an eine Grenze, da die beschleunigte Alterung im Test nach bestimmten physikalischen Gesetzen abläuft und hier der Faktor Beschleunigung nicht unbegrenzt gesteigert werden kann. Blieben wir also bei den konventionellen Verfahren, um die Zuverlässigkeit zu testen, würden die notwendigen Validierungen und Qualifikationen weiterhin die auch heute benötigte Zeit belegen und wären, rein zeitlich betrachtet, somit nicht mehr unmittelbar anwendbar.

13.2.3 Robustness Validation als mögliche Lösung

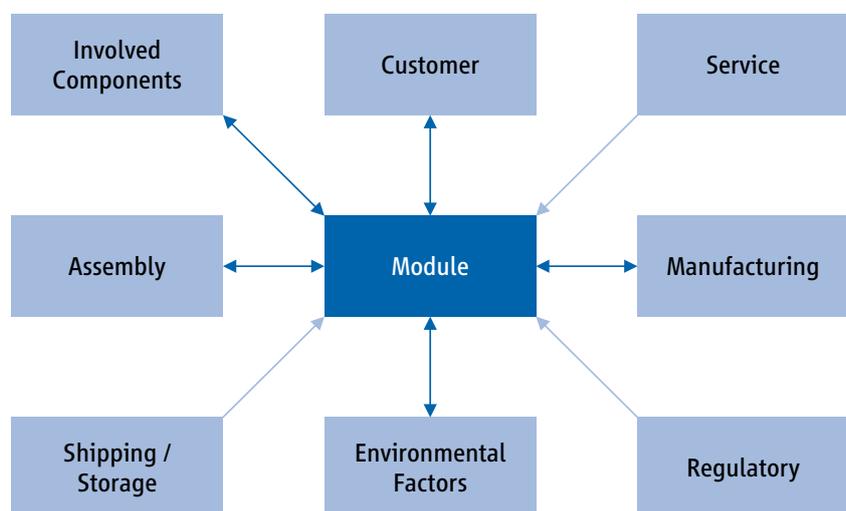
Die vorher beschriebenen Herausforderungen beschäftigen die Experten bereits seit längerem. Unterschieden wird hier aber dennoch nach den grundsätzlichen Zielen und den Anwendungsgebieten.

Zum einen gilt der Grundsatz einer Null-Fehler-Strategie, der nicht nur bereits von bestimmten Geschäftssegmenten (z. B. Automobilindustrie) gefordert wird, sondern in der Gesamtheit auch als Quintessenz vieler Bestrebungen und Standardisierungen angesehen werden kann. Zum anderen, und hier befindet man sich bereits sehr tief in der Technologie, ist man bestrebt, sämtliche Faktoren, die entweder lebensdauerbegrenzende oder eine Fehlfunktion verursachende Wirkung haben können, zu verstehen und zu kontrollieren. Hier setzt die Initiative der Robustness Validation an.

Unter Robustness versteht man grundsätzlich die Eigenschaft eines Produkts – auf welcher Stufe auch immer (Komponente, elektronische Steuereinheit, Endprodukt) –, gegenüber einem vorher definierten Lastspektrum zu bestehen und die vorgegebene Funktion über eine gewisse Zeit uneingeschränkt zu erfüllen. Die Robustness Margin ist demnach unter anderem die Zeitanzeige, die die Lebensdauer über die der Spezifikation hinaus beschreibt. Weiterhin kann dieser Begriff auch für die einzelnen Lastprofile oder die individuellen Belastungskriterien verwendet werden und beschreibt dann das Delta zwischen spezifizierter und realer Last.

Würde man nun voraussetzen, alle Faktoren genau zu kennen und die Wechselwirkungen derselben zu verstehen, wäre man in der Lage, alle Robustheiten zu definieren.

Abb. 13.3: Einflussfaktoren



Quelle: ZVEI

Genau hier liegt auch der Vorteil der Methode Robustness Validation. Es werden also die bekannten Produktcharakteristika mit dem spezifizierten Lastprofil gespiegelt und durch Individualvalidierungen die Robustheit derselben bestimmt. Grundsätzlich wird zwischen zwei Hauptkategorien, nämlich der Umweltbelastung und der Funktionsbelastung, unterschieden.

Die jeweiligen Ergebnisse werden in einer Wissensdatenbank (Knowledge Matrix) gesammelt und stehen somit als Kenn- und Richtwerte zur Verfügung.

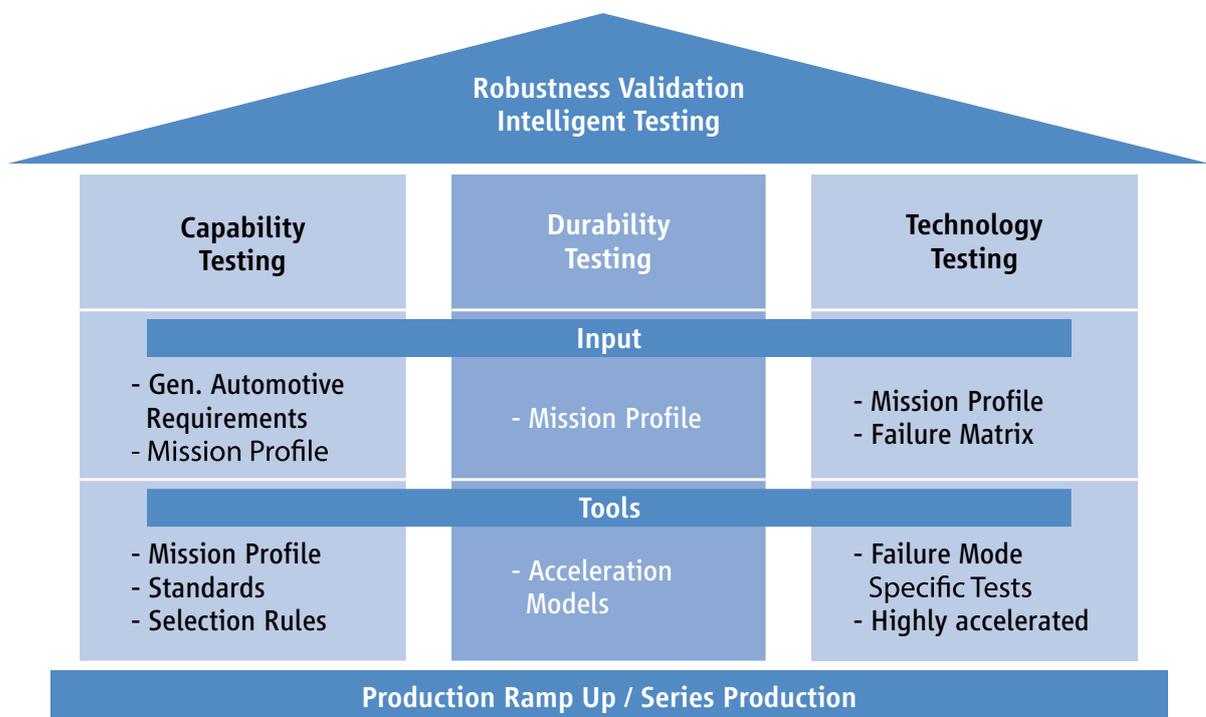
Um jetzt das Ziel zu verfolgen, die Zeit für die notwendige Produktvalidierung und -qualifikation zu reduzieren, würde man nur noch auf diejenigen Faktoren testen, die gemäß Definition eine zu geringe Robustheit darstellen. Damit ist zwar nicht zwingend eine Zeitersparnis gegeben, es verringert sich aber dennoch die Zahl der durchzuführenden Tests und es erhöht sich somit die Wahrscheinlichkeit, dass gesamtheitlich eine Ersparnis eintritt, doch erheblich.

Damit aber noch nicht genug, denn das Wissen um die verschiedenen Faktoren und deren Verhalten bzw. Zusammenhänge erlaubt auch ein sogenanntes Intelligent Testing. Ein Vorteil dieser Methode besteht darin, dass man unter eben dieser Kenntnis versucht, bestimmte Qualifikationsaktivitäten bereits in den Produktentstehungsprozess hinein zu verlagern. So kann man davon profitieren, dass die Ergebnisse nach wie vor vorliegen, jedoch nicht am Ende durch zusätzliche Tests generiert werden müssen, sondern mehr oder weniger zeitneutral beispielsweise während der Fertigung erzeugt werden können.

Dieser Ansatz ist zwar sehr komplex und kann nicht für alle Parameter Verwendung finden, ermöglicht aber bei entsprechend gründlicher und professioneller Anwendung am Ende eine Zeitersparnis.

Je nach Produkttyp und Anwendung lassen sich mehr oder weniger die unter den drei Säulen dargestellten Inhalte verwenden.

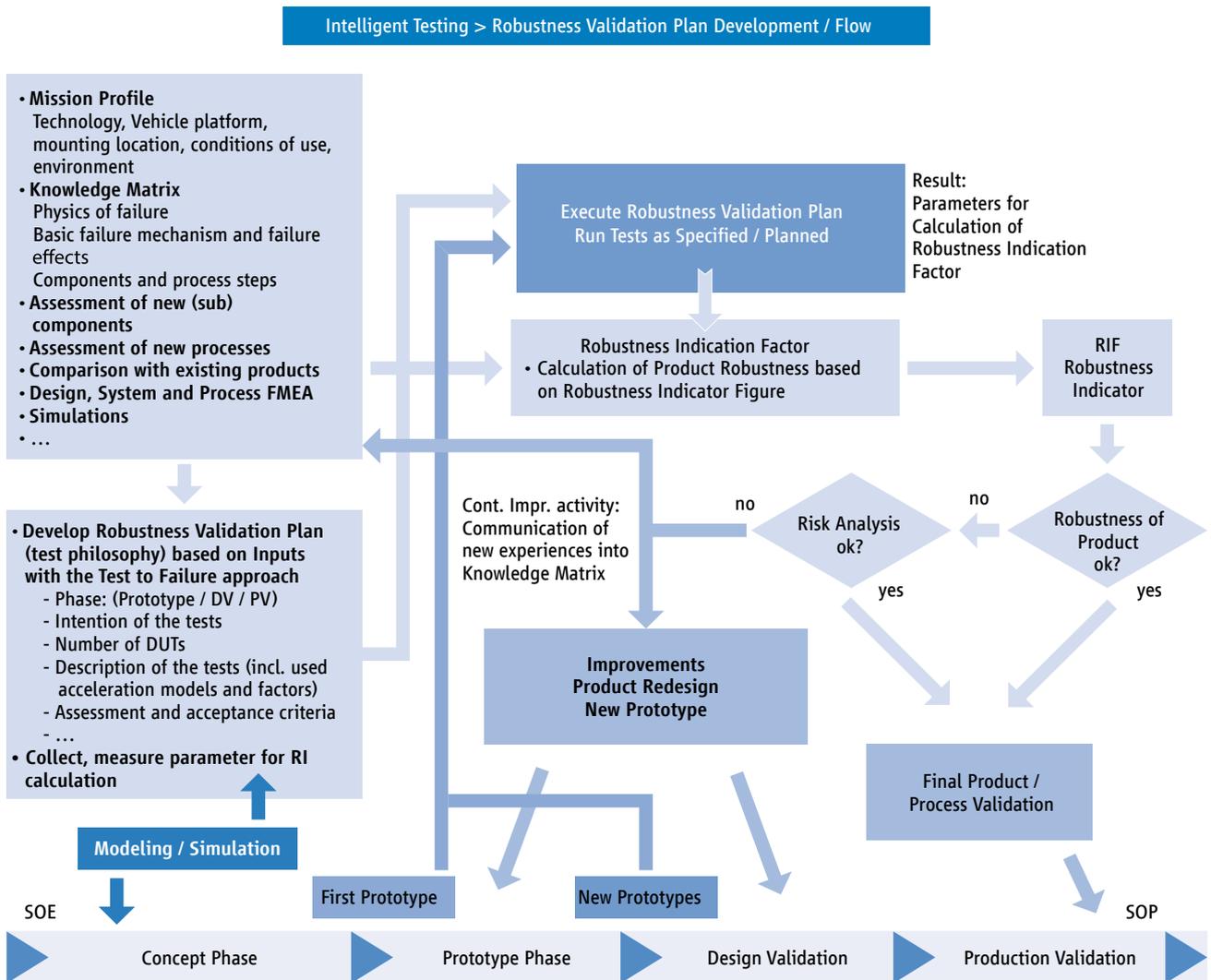
Abb. 13.4: Übersicht Intelligentes Testen



Quelle: ZVEI

Unten stehender Prozessfluss zeigt diesen Ansatz plakativ auf.

Abb. 13.5: Prozessfluss Intelligentes Testen



Quelle: ZVEI

13.2.4 Anwendung der Methoden für zukünftige Technologien

Wie bereits dargestellt, haben sich über die Zeit verschiedenste Standards und Vorgehensweisen herauskristallisiert, die alle an und für sich anwendbar sind. Das Problem liegt nur darin, dass es nicht eine einheitliche Verkettung oder Abfolge gibt, die eine Art „Schema F“ darstellen würde. Es liegt vielmehr am Individualfall und mehr noch am Verständnis des Anwenders, welche Güte letztendlich das vermeintliche Ergebnis haben wird.

Deutlich wird dies an einem vereinfachten Modell: Das Weibull-Diagramm (Badewannenkurve, siehe Kapitel 5, Abb. 5.24) zeigt in einfacher Darstellung, welche Arten von Ausfällen (Frühausfälle, Zufall und Verschleiß) grundsätzlich betrachtet werden.

Bei einem Design, das bezüglich der Parameter grundsätzlich für die Anwendung ausreichend ist, steht die Kategorie Frühausfälle meist in direktem Zusammenhang mit Materialien oder Prozessen, die ein unzureichendes Ergebnis hinsichtlich Belastbarkeit liefern. Fehlfunktionen werden also dadurch verursacht, dass das Lastprofil die Fehler im Einsatz frühzeitig aktiviert.

Die zweite Kategorie Zufall – vorausgesetzt, man geht von einer Null-Fehler-Strategie aus – würde demnach keine aktivierten Fehler zulassen. Die Anzahl der Ausfälle wäre also von externen Ereignissen abhängig, die Lastprofile außerhalb der Spezifikation applizieren (z. B. Unfall eines Fahrzeugs).

Der Verschleiß hingegen ist wieder erklärbar, hier treten Fehler aufgrund Alterung über die Zeit und in Verbindung mit dem Lastprofil auf.

Der Methodenansatz muss also mindestens zwei oder drei Kategorien abdecken. Frühausfälle gilt es noch während des industriellen Testkonzepts zu entdecken: Es sind also potenzielle Schwächen zu kennen und die Tests so auszulegen, dass das Testprofil die Fehler aktiviert, aber das Produkt an sich nicht weiter vorschädigt. So einfach diese Logik auch erscheint, umso schwieriger ist jedoch die Umsetzung. Es ist nämlich meist nicht nur ein einzelner Parameter, der unzureichend ist, sondern eine Vielzahl an Parametern, die sich in Summe auch noch überlagern oder gegenseitig beeinflussen können. Um Aussagen darüber treffen zu können, bedient man sich des Robustheitsdiagramms des Designs und der individuellen Spezifikationsgrenzen und Toleranzen der einzelnen Bauelemente oder Parameter. Zeigt hier die Verkettung, dass es gegebenenfalls zu Schwachstellen kommen kann oder könnte, sucht man nach geeigneten Aktivierungsmodellen. Zunächst aber ist es essenziell, dass man ein tiefgründiges Verständnis für diese Zusammenhänge erlangt, da sich ein Design leider nicht immer aller technischen Möglichkeiten bedienen kann, sondern meist bestimmten Zwängen unterliegt bzw. da sich die technischen Voraussetzungen nicht immer zeitgleich entwickeln.

Hat man sich dann für bestimmte Technologien, Materialien usw. entschieden, gilt es, die grenzwertigen Parameter im Detail zu verstehen. Das kann etwa durch eine Charakterisierung erfolgen, die viele Hersteller bereits über einen Design-Record/Datenblatt oder zusammen mit dem Ansatz Robustness Validation anbieten.

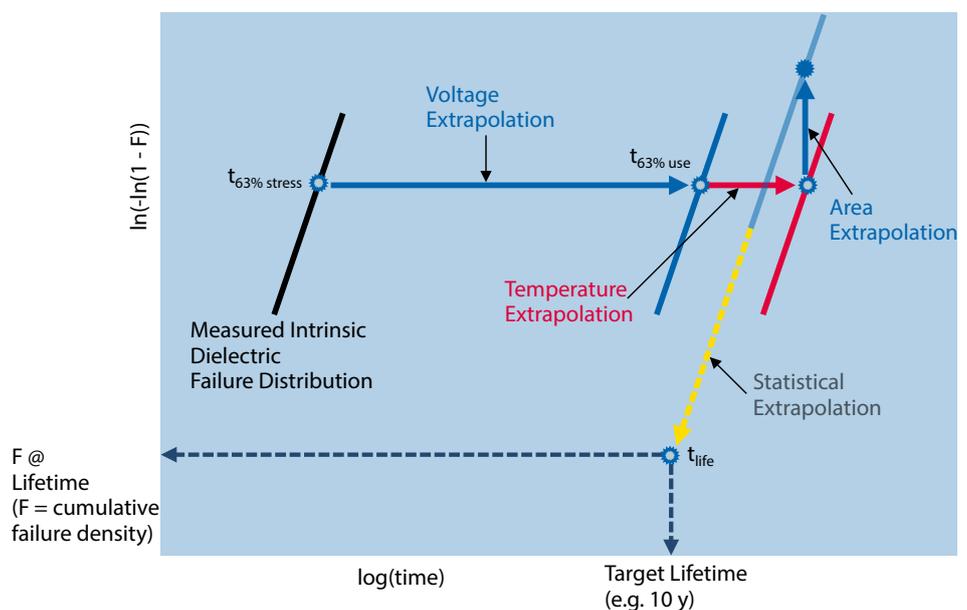
Auch die Fertigung von Baugruppen oder Systemen kann in ähnlicher Weise ihren Beitrag leisten. Dieser Ansatz geht aber aufgrund seiner Komplexität weit über eine Charakterisierung hinaus und muss deshalb entsprechend definiert bzw. auch abgegrenzt werden. Vereinfacht dargestellt, ergeben sich die Ebenen Bauelemente oder Komponenten und die Aufbau- und Verbindungstechnik derselben. Für das Lastprofil hinsichtlich Funktion kommt dann auch noch Software mit dazu.

Geht man aber davon aus, dass Software ohne Design- oder Hardwareänderung angepasst werden kann, können wir uns hier zunächst auf die Aufbau- und Verbindungstechnik beschränken, mit der sich der ZVEI in diversen Arbeitsgruppen bereits seit Jahren beschäftigt und zu der er auch bereits eine erhebliche Anzahl an Schriftreihen entwickelt und veröffentlicht hat. Für diesen Themenbereich seien hier nur einige genannt, die sich jedoch schon einem Großteil der Herausforderungen stellen und Lösungen anbieten (verwiesen sei hier auf: Leitfaden AVT, „Saubereit von Bauelementen“, „Robustness Validation-ECU“, „Services in EMS“).

Zum Verständnis des Denkansatzes sollen hier noch einmal das Schema und die wesentlichen Zusammenhänge erklärt und hinsichtlich zukünftiger Technologien erläutert werden.

Die technischen Eingaben zur Baugruppenfertigung bestehen im Wesentlichen aus einer Stückliste (ausgewählte und für das Design hin-

Abb. 13.6: Komponenten Charakterisierung



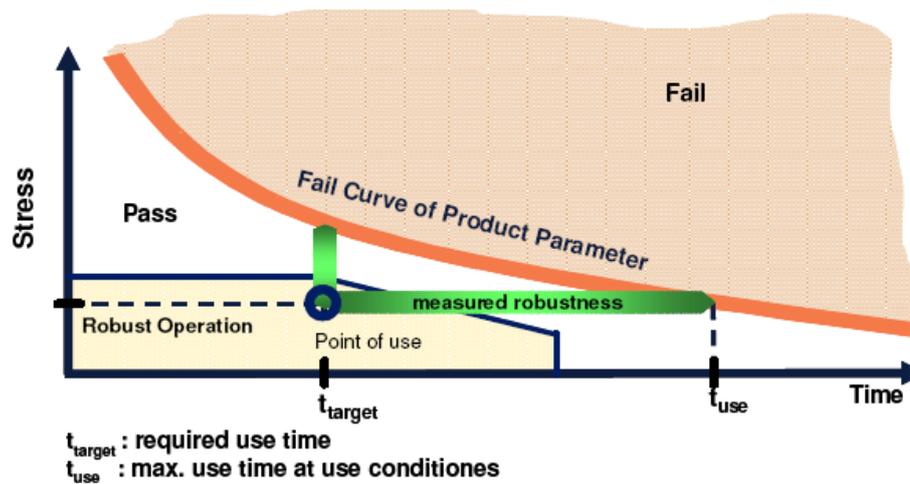
Quelle: ZVEI

reichend zuverlässige Bauelemente) sowie dem Layout (CAD-Daten). Zur Fertigung von Baugruppen oder elektronischen Modulen bzw. Systemen ist dann noch der Produktions- und Testprozess zu definieren. In einer theoretischen Betrachtung könnte man nun annehmen, dass Design und Komponenten hinreichend robust und somit zuverlässig wären – somit wäre das Augenmerk nur noch auf die eigentlichen Fertigungsparameter zu lenken. In der Realität ist dies aber meist nicht der Fall, sodass der Produktionsprozess mit einer Vielzahl von Design-Unzulänglichkeiten zu kämpfen hat und am Ende sicherstellen muss, dass eben durch das Lastprofil „Produktion und Test“ keine oder nicht zu viel Lebensdauer konsumiert wird oder im Extremfall sich die Verbindungstechnik sogar noch proaktiv auf die Lebensdauer auswirkt (z. B. thermischer Aufbau und Ableitung derselben = Kühleffekt).

13.2.5 Gesamtheitlicher Methodenansatz zur Beherrschung neuer Technologien

Gemäß dem Leitsatz „Gutes bewahren und Neues schaffen“ ist es zielführend, die vorhandenen Methoden zu nutzen und bisher bewährte Vorgehensweisen soweit möglich anzuwenden. Durch Schaffung eines umfassenden Verständnisses bezüglich neuer Technologien können somit Adaptionen stattfinden und eventuell noch vorhandene Lücken durch intelligente Verkettingsansätze geschlossen werden. Hier ist aber ebenfalls vorauszusetzen, dass dieses von der gesamten Lieferkette berücksichtigt wird und jeder einen gewissen Teil dazu beiträgt – nur so kann eine Aufwands- und Zeitreduzierung stattfinden, die final auch den neuen Produktlebenszyklen gerecht werden kann.

Abb. 13.7: Verbrauchte Zuverlässigkeit



Quelle: ZVEI

Weiterhin kann das Design in Verbindung mit dem Fertigungsprozess optimiert werden. So ist es zum Beispiel möglich, durch eine gewisse Pad-Geometrie eine Lötstelle zu optimieren und somit positiv zur Lebensdauer beizutragen. Des Weiteren kann beispielsweise der Pastendruckprozess in Verbindung mit dem Siebdesign dazu beitragen, dass Luftpneinschlüsse und somit negative Auswirkungen auf die thermische Widerstandskette vermieden werden. Derartige Maßnahmen hinsichtlich neuer Technologien sind nicht nur optional, sondern essenziell, um vor allem bei fehlenden Erfahrungen das Handlungsspektrum voll ausnutzen zu können. Qualitätsmethoden wie DOE (Design of Experiments) helfen dabei, Werte relativ schnell zu ermitteln und einer optimalen Lösung auch noch innerhalb eines verträglichen Zeitintervalls möglichst nahezukommen.

13.2.5.1 Maßnahmen beim Design

An dieser Stelle wäre es überzogen, in die einzelnen Design-Details einsteigen zu wollen. Dazu hat der ZVEI in der Publikation „Design Chain“ bereits sehr viel Wissen zusammengetragen und dieses auch anwenderfreundlich aufbereitet. Es geht hier um einen ganzheitlichen Ansatz, der jedoch final der einzig erfolgversprechende sein kann. Da aber am Ende nur dann ein robustes Produkt entstehen kann, wenn die geforderte Robustheit bereits als Grundstein mit dem Design gelegt wird, soll an dieser Stelle noch einmal beispielhaft auf verschiedene Relationen zwischen Design und anderen Faktoren eingegangen werden.

Orientiert an der Technologie-Roadmap, geht es in erster Linie darum, wie neue Materialien oder Technologien in den Design-Prozess integriert

werden können, ohne dass man grundsätzlich Gefahr läuft, intrinsische Fehler zu machen.

Das Design soll also nicht als zentrale Einheit gesehen werden, sondern als ein Stellglied unter vielen gleichberechtigten. Wenn es also gelingt, die einzelnen Beziehungen darzustellen und daraus die richtigen Schlüsse zu ziehen, kann zum Beispiel eine neue Technologie durchaus in bestehende Strukturen eingearbeitet werden. Dieses ist aus dem V-Diagramm Design-Chain (siehe Kapitel 10, Abb. 10.8) ersichtlich.

13.2.5.2 Maßnahmen Fertigungs- und Testprozess

Der Fertigungsprozess bzw. das gesamte Thema um die Fertigung wurde bisher nur wenig miteinbezogen. Doch stellt gerade dieses Segment den eigentlichen Wertschöpfungsanteil im Produktentstehungsprozess dar. Man sollte auch nicht dem Trugschluss unterliegen, hier nur auf das reine Zusammenbauen von irgendwelchen Produkten zu schauen – unter dem neudeutschen Begriff Manufacturing wird wesentlich mehr verstanden: So reichen Schnittstellen vom Designprozess über Materialauswahl und Validierung bis hin zu komplexen Testsystemen. Nicht zu vernachlässigen sind auch all die Logistik und die Prozessentwicklung, die im Vergleich zum Produktdesign nicht weniger schwierig ist.

Ein Design ist nur so gut, wie es sich später in einer industriellen Fertigung herstellen lässt. Demzufolge ist es notwendig, die Aspekte der Fertigung und des Testens bereits beim Design zu berücksichtigen. Dazu werden verschiedenste Methoden angewandt – ein weitverbreiteter Begriff dazu ist DFM (Design for Manufacturability). Hier arbeiten Produkt- und Prozessdesigner Hand in Hand und stellen somit die Fertigbarkeit sicher. Aus technologischer Sicht werden somit also Design-Rules und Manufacturing-Needs zusammen angewandt und die entsprechende Schnittmenge wird berücksichtigt.

Wichtig ist dabei, dass sämtliche Parameter erfasst und dokumentiert werden. Der sogenannte Validierungsplan beinhaltet am Ende alle Faktoren, die für die Fertigung und das Testen wichtig sind, und kann somit als umfassendes Arbeitsdokument verwendet werden.

Einer der wichtigsten Parameter im Fertigungsprozess ist die Prozessstabilität und somit die Wiederholgenauigkeit einer jeden Prozessstufe über die Zeit und in Verbindung mit dem Volumen. Dieser Wert entscheidet am Ende auch mit darüber, was noch getestet werden muss und

was gegebenenfalls, auf Basis eines bestimmten Fähigkeitsindex bestimmt, als „In Ordnung“ definiert ist. Die Evaluierung dieser Fähigkeiten erfolgt für den kurzzeitigen Bereich mit der Prozessqualifikation und für Langzeit über eine Echtzeitmessung bestimmter in direkter oder indirekter Relation zum Ergebnis stehender Faktoren.

Da jeglicher Prozess zwangsläufig auch mit Toleranzen zu kämpfen hat und diese soweit möglich aushalten können muss, ist es weiterhin notwendig, diverse Beziehungen (z. B. zwischen Material und Maschine) zu evaluieren. Auch dazu gibt es Methoden, die sich über die Jahre als hilfreich erwiesen haben. Speziell aber im Hinblick auf neue Technologien ist eine solche Anwendung zwingend geboten. Die Details dazu sind im Handbuch „Robustness Validation ECU“ erklärt – hier sei nur ein Ausblick auf das CPI-Modell (Component Process Interaction) gegeben, das am Ende die jeweiligen Beziehungen und ihre Kritikalität aufzeigt.

technischen System liegen. Abschalten als primäres Sicherheitskonzept ist keine Option mehr, sondern das Aufrechterhalten einer – wenn auch degradierten – Mindestfunktionalität wird notwendig werden.

Damit einher geht die Vernetzung der Systeme untereinander beziehungsweise mit der Umgebung, da ein sicheres Fahren nicht ohne Informationen aus der Systemumgebung möglich ist. Physikalische Defizite fahrzeugeigener Sensorik müssen über andere Informationskanäle kompensiert werden.

Um ein hochautomatisiertes Fahrzeug im Straßenverkehr zu bewegen, werden Technologien aus dem Umfeld der kollaborativen Robotik und des maschinellen Lernens verstärkt Anwendung in automobilen Systemen finden.

13.3.2 Standardisierung

Mit dem Trend zu steigender technologischer Komplexität, softwarebasierten Funktionalitäten und mechatronischer Implementierung steigen die Risiken aufgrund systematischer Fehler und zufälliger Hardwarefehler. Um hierbei ein mindestens gleichbleibendes oder gar höheres Sicherheitsniveau zu gewährleisten, arbeitet die Automobilindustrie intensiv an der Standardisierung der Vorgehensweisen zur Vermeidung und Beherrschung dieser Fehlerquellen.

Die ISO 26262, die 2018 als erste überarbeitete Version veröffentlicht wird (2nd Edition),

- stellt einen anpassbaren Referenzprozess zur Verfügung, der den gesamten Produktlebenszyklus von der Entwicklung über die Produktion und Betriebsphase bis hin zur Außerbetriebnahme des Systems adressiert,
- definiert eine automobilspezifische Methodik zur Ermittlung der notwendigen Sicherheitsintegrität (ASIL = Automotiv Safety Integrity Level),
- spezifiziert Maßnahmen zur Erreichung der jeweiligen Sicherheitsintegrität,
- gibt eine Orientierungshilfe zur Umsetzung von sicherheitsrelevanten Verfügbarkeitsanforderungen,
- adressiert die Themenbereiche Management, Entwurf, Umsetzung, Produktion, Wartung, Außerbetriebnahme, Verifikation, Validation und Bestätigungsmaßnahmen und
- definiert das Vorgehen an den Schnittstellen zwischen Herstellern und Zulieferern.

Insbesondere die 2nd Edition der ISO 26262 fokussiert hierbei unter anderem auf die Anforderungen zur Entwicklung von Halbleiterbauelementen.

Bei Fahrerassistenzsystemen und beim hochautomatisierten Fahren stellt sich jedoch nicht nur die Frage, wie mit systematischen Fehlern und zufälligen Hardwarefehlern umzugehen ist. Es stellt sich die Frage nach der Sicherheit der fehlerfreien, sicheren Nominalfunktion, die unter dem Begriff SOTIF = Safety of the intended functionality in der Automobilindustrie diskutiert wird. Hier wurde 2018 der ISO/PAS 21448 veröffentlicht. Danach begannen darauf basierend die Arbeiten an ISO 21448, die nach aktueller Planung gegen 03/2021 veröffentlicht werden wird.

Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass es – sowohl auf internationaler Ebene als auch in verschiedenen Regionen auf nationaler Ebene – Aktivitäten zur Standardisierung im Bereich der (nicht nur funktionalen) Sicherheit geben wird. Als Beispiel sei China genannt, wo kürzlich mit dem GB/T-Standard ein nationales Derivat der ISO 26262 veröffentlicht wurde.

13.3.3 Handlungsfelder

1. Organisatorische Vernetzung

Grundsätzlich werden die Safety-Aktivitäten in der Entwicklung stärker organisatorisch mit anderen Disziplinen vernetzt werden müssen. Dies betrifft insbesondere – aber nicht ausschließlich – die Cybersecurity. In der 2018 veröffentlichten Version von ISO 26262 wird aufgrund ihrer Aktualität dieser Aspekt explizit adressiert.

Diese explizite Schaffung von Kommunikationskanälen zwischen den verschiedenen Disziplinen soll sicherstellen, dass safetyrelevante Anforderungen an diese Disziplinen systematisch kommuniziert und dort umgesetzt sowie widersprüchliche Anforderungen aus den verschiedenen Bereichen frühzeitig erkannt und aufgelöst werden.

2. Systems-Engineering

Aufgrund der größer werdenden Interaktion von Systemen im Fahrzeug untereinander und mit deren Umgebung ist eine systemübergreifende Betrachtung von Funktionen und deren Sicherheit notwendig, insbesondere um die Verlässlichkeit (Dependability) vernetzter Open-context-Systeme sicherstellen zu können. Dies kann nur erreicht werden durch ein systematisches Engineering, um interdisziplinär die Schichten Sicherheit (i. S. v. Safety und Security), Zuverlässigkeit (Reliability), Verfügbarkeit (Availability) zu konsolidieren. Hier werden Methoden des Models Based Systems Engineerings (MBSE) an Bedeutung gewinnen, insbesondere neue Ansätze wie zum Beispiel die Verwendung von

Komponentenfehlerbäumen (CFT) oder die systemische Berücksichtigung von Cybersecurity-Aspekten.

3. Steigende Sicherheitsrelevanz einzelner Systeme

Auf technischer Ebene wird durch die wachsende Leistungsfähigkeit von Funktionalitäten im Fahrzeug deren Sicherheitsrelevanz zukünftig ansteigen. Dies liegt begründet in der geringeren Beherrschbarkeit von Fehlfunktionen durch den Menschen, wenn zum Beispiel Sicherheitsverantwortung mehr und mehr weg vom Menschen und hin zum technischen System verschoben wird.

4. Fahrzeugklassenübergreifender Austausch

Weiterhin lässt sich beobachten, dass unterschiedliche Fahrzeugklassen unterschiedliche Anforderungen an Fehlererkennungszeiten stellen: Die Beherrschbarkeit bestimmter Fehler von Systemen im Motorrad geht sehr viel schneller verloren als in einem Personenkraftwagen. Dies führt zu unterschiedlichen Anforderungen an die Implementierung der Systeme in den verschiedenen Fahrzeugdomänen, ein domänenübergreifender Austausch (Plattformentwicklung) wird hierdurch erschwert.

5. Safety of the intended functionality

Die Sicherheit der nominellen Sollfunktion erfordert eine hinreichend robuste Objekterkennung, sodass zum Beispiel „false-positive“-Fehlklassifikationen minimiert werden. Dies führt zukünftig zu einem verstärkten Einsatz von neuen Sensor-komponenten (Video, Radar, Lidar). Die Informationsfusion und Fahrsituationsinterpretation durch künstliche Intelligenz muss zukünftig durch entsprechend leistungsfähige Hardware und Software unterstützt werden.

Eine besondere Herausforderung aus Sicht der Sicherheit stellt die Verifikation und Validation solcher Systeme dar. Idealerweise möchte man zeigen, dass die Fehlverhaltensrate des Systems sehr klein ist (in Größenordnung von 0 bis 2 pro Stunde). Der klassische Ansatz des Testens trägt dafür nicht mehr. Hier sind einerseits neue Ansätze gefragt, die den Sicherheitsnachweis auf Basis von Evidenzen aus dem gesamten Entwicklungslebenszyklus ermöglichen, zum Beispiel auf simulativer Basis oder aufgrund von Daten aus dem realen Fahrbetrieb (Field Based Validation). Zum anderen wird sich die Art der Dokumentation dem anpassen müssen, insbesondere auch in der hersteller- bzw. zuliefererübergreifenden Zusammenarbeit.

In diesem Zusammenhang wird auch der Beobachtung der Systeme im Feld eine steigende Bedeutung zukommen. Event-Data-Recorder zeichnen Systemzustände auf und speichern sie für einen späteren Nachweis ab (die damit verbundenen datenschutzrechtlichen Herausforderungen lassen wir an dieser Stelle außen vor). Bei Identifikation von Systemdefiziten sind unter Umständen schnelle Reaktionen notwendig, bei denen Update over the Air (FOTA/SOTA) an Bedeutung gewinnen wird. Dies wiederum bedingt weitere Safety-Herausforderungen zum einen bei der Konfiguration korrekter Baselines im Backend, zum anderen beim Übertragen und Einspielen solcher Konfigurationen ins Fahrzeug. Als Beispiel für die Interaktion von Safety und Security sehen wir hier, dass Safety-Risiken bedingt durch bewusste Manipulationen von Maßnahmen der Cybersecurity zu adressieren sind.

6. Sicherheitsrelevante Verfügbarkeitsanforderungen

Wie bereits oben erwähnt, werden sicherheitsrelevante Verfügbarkeitsanforderungen insbesondere im Umfeld des automatisierten Fahrens an Bedeutung gewinnen. Abschalten von Systemen oder Funktionen ist nicht mehr tragfähig, wenn die Verantwortung an einen Fahrer nicht mehr schnell genug abgegeben werden kann. Kritische Situationen müssen dann – zumindest zeitweise und möglicherweise mit reduzierter Performanz – durch das System selbst beherrscht werden können. Fail-Safe-Passive-Sicherheitskonzepte sind daher zukünftig nicht mehr ausreichend, die Verfügbarkeit von Funktionen gewinnt an Sicherheitsrelevanz.

In heutigen Systemen wird dies oftmals realisiert durch Redundanz, das heißt bei Ausfall eines Kanals wird die Funktionalität durch einen redundanten Parallelkanal aufrechterhalten. Zukünftig geht der Trend in die Richtung, diese Redundanz durch Integration in ein Steuergerät beziehungsweise in ein Bauelement aufzulösen. Hier stellt sich dann die Frage, wie die Sicherheit einer solchen integrierten Lösung argumentiert werden kann, zum Beispiel in Bezug auf Dependent Failures (Common Cause Failures und Cascading Failures). Auf technischer Ebene bedingt dies die Entwicklung fehlertoleranter Bauteile, die auch bei Auftreten eines Erstfehlers noch in der Lage sind, ihre Funktionalität aufrechtzuerhalten (fehlertolerante Mikroprozessoren und -controller).

13.4 Cybersicherheit

13.4.1 Ausgangslage

Die beiden Megatrends Digitalisierung und Vernetzung prägen auch künftig die Cybersicherheit für Produkte, Systeme und Unternehmen. So haben sich in den vergangenen Jahren mehrere Erkenntnisse in Industrie, Politik und Öffentlichkeit durchgesetzt, gleichwohl die konsequente Umsetzung der Erkenntnisse eine Herausforderung bleibt. Erstens: Schwachstellen werden gefunden und ausgenutzt. Zweitens: Die (Un-)Sicherheit des schwächsten Bestandteils bestimmt die Sicherheit eines gesamten Systems. Zur Gewährleistung der Cybersicherheit gehören Prozesse, Technik und vor allem der Faktor Mensch. Vor dem Hintergrund zahlreicher Vorfälle (siehe Snowden-Veröffentlichung, WannaCry, Telekom-Router, Mirai-Botnetz, Jeep-Cherokee-Hack etc.) bildete sich ein Konsens: Digitalisierung und Vernetzung sind ohne Cybersicherheit nicht zu gestalten.

Grundsätzlich wichtig ist die Erkenntnis, dass alles, was mit dem Internet verbunden ist, jederzeit angegriffen werden kann und auch angegriffen wird. Angriffe im Internet sind automatisiert und geschehen mit hoher Frequenz. Eine der Hauptmotivation für die Angriffe ist es, weitere Knoten für Botnetze zu kapern. Auch scheinbar untergeordnete Komponenten können zu einem Einfallstor werden oder für Botnetze gekapert werden. Eine Komponente, die zu uninteressant für einen Angriff ist, gibt es nicht. Dies ergibt sich schon daraus, dass heutzutage eingesetzte Microcontroller die Leistungsfähigkeit von Supercomputern der 1980er-Jahre besitzen.

13.4.2 Konsequenzen

Cybersicherheit wird in diesem Zusammenhang in der Breite der Industrie ankommen und verstärkt zur regulatorischen Anforderung werden. Insbesondere im Bereich der Konsumgüter und Commercial off-the-shelf (COTS) sind zusätzliche Vorgaben zu erwarten. Für den Industriebereich gewinnt das Prinzip der Vertrauenswürdigkeit (Trustworthiness) an Bedeutung. Das heißt, der bisherige Security-Fokus auf Betreiber (siehe deutsches IT-Sicherheitsgesetz und europäische NIS-Richtlinie) wird sich auf Integratoren und Zulieferer ausweiten. Denn Unternehmen müssen verstärkt nachweisen, dass die Sicherheit ihrer eigenen Produkte und Lösungen nicht durch die Unsicherheit verarbeiteter und integrierter externer Teile kompromittiert wird. Die Gewährleistung der Cybersicherheit entlang der Zulieferkette wird eine zentrale Herausforderung für die kommende Zeit.

Umfassend gilt auch aus Sicht der Politik: Künftig wird es keine vernetzbaren Geräte und Systeme ohne eine Art Basis-Cybersicherheit geben können. Die Gefahren durch leicht skalierbare Angriffe und Botnetze können von der Öffentlichkeit und dem Gesetzgeber nicht ignoriert werden. Initiativen wie das Gütesiegel für IT-Sicherheit in Deutschland oder das europäische Trusted Label und Zertifizierungssystem für Cybersicherheit deuten bereits darauf hin. Es ist daher die kommende Aufgabe der Industrie,

- eine gestufte Basis-Cybersicherheit durch Entwicklung, Standardisierung und Normung zu definieren,
- die zunehmenden Wechselbeziehungen zu managen (siehe Security in Beziehung zu Safety, funktionaler Sicherheit und Usability) und
- international kompatible sowie unternehmensübergreifende (Stichwort Industrie 4.0) Konzepte für Menschen, Maschinen und Komponenten zur Verfügung zu stellen.

13.4.3 Handlungsfelder

Aus Sicht des ZVEI stehen folgende Handlungsfelder bei der langfristigen Weiterentwicklung der Cybersicherheit im Fokus (Auswahl):

1. Unternehmensübergreifende (sichere) Identitäten und Kommunikation

Im Zuge zum Beispiel der Industrie 4.0 und des Smart Home sollen Komponenten, Dinge und Systeme miteinander sowie mit dem Menschen interagieren können. Aus Sicht der Cybersicherheit sind übergreifend gemeinsame Voraussetzungen dafür notwendig. Dinge und Nutzer müssen sich identifizieren und gegebenenfalls authentifizieren können (Mit wem kommuniziere ich?). Dies ist Grundlage für ein notwendiges Rollen- und Rechtmanagement (Mit wem darf ich wie und nach welchen Regeln kommunizieren?). Erst dann kann eine gestufte, gesicherte Kommunikation stattfinden und je nach Anwendungsfall eine Detektion von Vorfällen umgesetzt werden.

Diese Vertrauensarchitektur beginnt mit gesicherten digitalen Identitäten für Menschen, Maschinen und Komponenten. Hierfür fehlt in Europa und anderen Regionen ein Gesamtsystem. Über Hard- und Softwaremaßnahmen sowie geeignete Prozesse muss geklärt werden, wie Identitäten erzeugt, vergeben, gegenseitig anerkannt und validiert sowie im Lebenszyklus gemanagt werden. Heutzutage gelingt dies innerhalb einer Unternehmensorganisation. Künftig muss dies international unternehmensübergreifend und ad hoc möglich sein. Diese Fähigkeit ist so grundlegend, dass sie gemeinsamen von Staat und Wirtschaft als Infrastruktur zu gestalten ist.

2. Technologieentwicklung und Anbieterstärkung

Angesichts zunehmender Nachweispflichten müssen sich Unternehmen auf vertrauenswürdige Produkte, Technologien und Dienstleister verlassen können. Es liegt im langfristigen Eigeninteresse Europas, wettbewerbsfähige Anbieter für Cybersicherheit zu haben und Security-Technologiefelder zu entwickeln. Dazu bedarf es einer klaren Analyse der eigenen technologischen Kompetenzen und Abhängigkeiten. Wie lässt sich die künftige Identitäts- und Kommunikationsinfrastruktur von Menschen, Maschinen und Komponenten gesichert aufbauen und schützen? Angesichts der IT-Infrastruktur und 5G-Entwicklung kann nicht alles aus Europa kommen. Konzepte wie die Security-Replaceability (Einfügung von vertrauenswürdigen Security-Komponenten in ein Gesamtsystem) sind vor diesem Hintergrund umso mehr zu fördern, industrietauglich zu gestalten und in die internationale Standardisierung und Normung einzubringen. Analysen, Ziele und Maßnahmen sind entsprechend in einer europäischen Industriestrategie festzuhalten und durch eine Förderung des Marktumfelds auf Anbieter- und Anwenderseite zu flankieren. In folgenden Bereichen sollten von Politik und Wirtschaft erste Schritte entwickelt werden:

- Applikations- und Datensicherheit
- Transport- und Netzwerksicherheit
- Identitäts- und Berechtigungsverwaltung
- Ereignisprotokollierung und Detektion

Eine Zertifizierung ist in diesem Kontext nicht zielführend. Die technologische Entwicklung der Produkte und die Entwicklung neuer Angriffsmethoden sind zu schnell, als das eine Zertifizierung zu etwas anderem als einer scheinbaren Sicherheit führt. Mit Meltdown und Spectre wurde deutlich, dass massive Sicherheitslücken auch über Jahre unentdeckt bleiben können. Zertifikate täuschen eine vermeintliche Sicherheit vor, die tatsächlich nicht gegeben ist und so die stetige Weiterentwicklung der Sicherheitsmaßnahmen verhindern kann, was zu einem hohen potenziellen Schadensrisiko führt.

3. Synchronisierung der Verantwortungsbereiche

Die Verantwortung für Cybersicherheit wird künftig zwischen Herstellern, Integratoren, Betreibern und Anwendern dauerhaft im Lebenszyklus geteilt. Klare, zeitlich getrennte Verantwortungsübergänge sind schwerer zu definieren, vielmehr werden Überlappungen zum Regelfall. Bei komplexen Systemen kann der Betreiber und teilweise auch der Integrator die Vor- und Nachsorge für Cybersicherheit nur mithilfe des Herstellers bewerkstelligen. Dies geschieht im Zusammen-

spiel von dezentralen Zuständigkeiten, vermehrten Fernzugriffen, vertieften Dokumentationen und einer längeren Know-how-Bereitstellung. Auch werden wesentliche Änderungen oder Abkündigungen aus Security-Gründen zunehmen. Die Konsequenzen für gesetzliche Vorgaben, (Re-)Zertifizierung, rechtliche Pflichten und Vertragsbeziehungen sind gemeinsam von den Industriepartnern zu beraten.

Ein wichtiges Problemfeld hierbei ist die Produktlebensdauer. Anders als bei Consumer-Produkten werden zum Beispiel im Industriebereich und der Gebäudetechnik Einsatzzeiten von Jahrzehnten vorausgesetzt. Konzepte, wie Produkte über solche Zeiträume mit Sicherheitsupdates versorgt werden können, sind notwendig und derzeit noch nicht verfügbar.

4. Security by Design

Cybersicherheit kann nicht nachträglich in ein Produkt hineingetestet werden. Die Sicherheit muss von Anfang an ein Hauptbestandteil des Designs sein.

Dafür ist es wichtig zu identifizieren, welcher Art Angriffe das Produkt ausgesetzt sein kann und welche Gegenmaßnahmen möglich sind. Im besten Fall werden Angriffsmöglichkeiten durch physikalische Eigenschaften ausgeschlossen – nach dem Prinzip: Was nicht vorhanden ist, kann auch nicht gehackt werden kann.

Neben der Identifizierung und Authentifizierung ist für die Cybersicherheit auch die Integrität und Vertraulichkeit der Informationen sicherzustellen (CIA = Confidentiality, Integrity and Authenticity). Cybersicherheit hat nicht nur wesentlichen Einfluss auf ein Produkt und Systemdesign, sondern muss auch im Produktionsprozess berücksichtigt werden, da in der Produktion ein sogenanntes „Urgeheimnis“ (Trust Anchor) eingebracht werden muss, auf dem dann alle weiteren Sicherheitsmaßnahmen aufsetzen. Die dafür notwendige Datenlogistik muss zur Verfügung stehen.

13.5 Marktanalyse und Produktmanagement

In den vorhergehenden Abschnitten wurden der Produktentwicklungsprozess und Themen wie Zuverlässigkeit, funktionale Sicherheit und Cybersicherheit behandelt. Zentrale Eingangsgröße für den Entwicklungsprozess sind die Produktanforderungen. Genau diese Anforderungen werden durch das Produktmanagement bereitgestellt.

Das Produktmanagement ist zwischen dem technischen Vertrieb und der Produktentwicklung angeordnet. Es steuert den gesamten Produktlebenszyklus von der Bedarfsanalyse im Markt über den Produktentstehungsprozess bis zum Ausphasen eines Produkts am Ende des Lebenszyklus. Das Produktmanagement ist „Anwalt für sein Produkt“ und damit auch der Motor für den Produkterfolg. Die Aufgabe des Produktmanagements besteht darin, die heutigen und zukünftigen Kundenbedürfnisse zu identifizieren und daraus Produkthanforderungen abzuleiten sowie die reibungslose Zusammenarbeit der Unternehmensbereiche sicherzustellen. Produktmanager haben dabei mehrere Rollen: Sie unterstützen den Vertrieb mit entsprechenden Markt- und Produktinformationen. Darüber hinaus ist ein Produktmanager auch Krisenmanager beim Kunden vor Ort im Fall von Qualitätsproblemen. Neben den operativen Tätigkeiten spielen strategische Aufgaben eine wichtige Rolle: die Beobachtung des Marktgeschehens und die Erstellung von Wettbewerbsanalysen wie auch die Entwicklung und Bewertung von Zukunftsszenarien.

Dem Produktmanagement muss es gelingen, viele Interessen und berechtigte Anforderungen unterschiedlicher Seiten (Kunden, Produktentwicklung, Fertigung, Vertrieb, Marketing) in Einklang zu bringen und im Produkt zu vereinen. So ist das Produktmanagement die strategische und operative Koordinationsstelle, die die Prozesse und Zusammenarbeit von Unternehmensbereichen und Abteilungen steuert. Kernerfolgskriterium ist allerdings die richtige Definition der Produkthanforderungen, die passenden Produkthanforderungen entscheiden wesentlich über den Erfolg eines Produkts.

Die Produkthanforderungen sind das Ergebnis einer Marktanalyse und anschließender Generationen- und Produktplanung. In der Generationen- und Produktplanung plant der Produktmanager neben einer eventuellen Produktsegmentierung (z. B. low, mid, high) in einer Produktgeneration – wenn bekannt – auch den Zeitpunkt der Nachfolgeneration mit den voraussichtlichen geänderten Anforderungen. Die Anforderungen an das Produkt werden üblicherweise in einem Lastenheft niedergeschrieben. Neben den funktionalen Anforderungen spielen die nicht funktionalen Anforderungen wie Zuverlässigkeit, funktionale Sicherheit und Cybersicherheit eine zentrale Rolle. Diese werden nicht immer von den Kunden als Produkthanforderungen genannt. Der Produktmanager stellt daher die Vollständigkeit und Konsistenz aller Anforderungen sicher, bevor eine Produktentwicklung gestartet werden kann.



14 Geschäftsmodell – Innovationsfeld der Zukunft



Quelle: Kirill / Fotolia.com

Das europäische – und besonders das deutsche – Unternehmertum war im vergangenen Jahrhundert geprägt von herausragenden Technologieunternehmen mit besonderen Stärken in Prozess- und Produktinnovation. Wettbewerbsvorteile wurden durch entsprechende Produkte höchster Qualität erzielt. Trotz durchgehend hohen Niveaus der Produktqualität haben viele dieser Technologieunternehmen genau diesen Wettbewerbsvorteil im Lauf der letzten Jahre verloren: AEG, Grundig, Nixdorf Computers, Siemens Mobile, Harman Becker Automotive Systems, Blaupunkt, um ein paar namhafte Vertreter zu nennen. Auch auf nordamerikanischer Seite lassen sich Beispiele hierfür finden: BlackBerry, Commodore oder Kodak. Trotz ausgezeichneter Produkt- und Prozessinnovationen haben diese Unternehmen es versäumt, ihre Geschäftsmodelle an geänderte Umweltbedingungen anzupassen und ihr Wertversprechen an neue Kundenbedürfnisse zu adressieren. Es ist die aufeinander abgestimmte Kombination aus ausgereifter Technologie und einem ummantelnden Geschäftsmodell, die einen optimalen Wettbewerbsvorteil generiert. Insbesondere durch ein sich iterativ, immer wieder neu entwickelndes Geschäftsmodell werden sich ändernde äußere Einflüsse berücksichtigt, sodass neue Marktanforderungen adressiert bleiben. Durch strategische Berücksichtigung und unternehmerische Fokussierung auf Geschäftsmodellinnovation kann ein langfristiger Wettbewerbsvorteil eingestellt werden. Ein bekanntes Beispiel für systematische Nichtberücksichtigung von Geschäftsmodellinnovation, mit entsprechend negativem unternehmerischem Erfolg, stellt der Kodak-Case dar. Aus Produktinnovationsper-

spektive verpasste Kodak die initiale Digitalisierung nicht. Man entwickelte 1975 die weltweit erste Digitalkamera. Somit war man im Besitz des ersten Fotoapparats, der auf digitalen Signalen beruhte und enorme Potenziale für neue, digitale Geschäftsfelder offeriert hätte. Ein Denken in Geschäftsmodellinnovation wurde bei Kodak jedoch nicht eingeführt. Die Organisation sträubte sich gegen die Digitalkamera, da sie es gewohnt war, Konsumartikel – in der Form von Diafilmen – zu verkaufen. Eine Marktlancierung der Digitalkamera hätte bedeutet, dass man dem Verkauf von Diafilmen die Basis genommen und sein tradiertes, lukratives Geschäftsmodell kannelisiert hätte. Besonders das mittlere Management stellte eine Hürde für genau diesen Sinneswandel dar. 1994 nutze Kodak eigene Produktinnovationskompetenzen für Digitalkameras, um im Auftrag von Apple eine Digitalkamera (Quicktake) zu entwickeln und zu produzieren, statt diese selber zu lancieren. 1999 prognostizierte Kodak den weltweiten Marktanteil für Digitalkameras für das Jahr 2009 auf 5 Prozent. Tatsächlich lag dieser 2009 jedoch bei 95 Prozent. Diese fatale Fehleinschätzung führte 2012 schlussendlich zum Bankrott Kodaks.

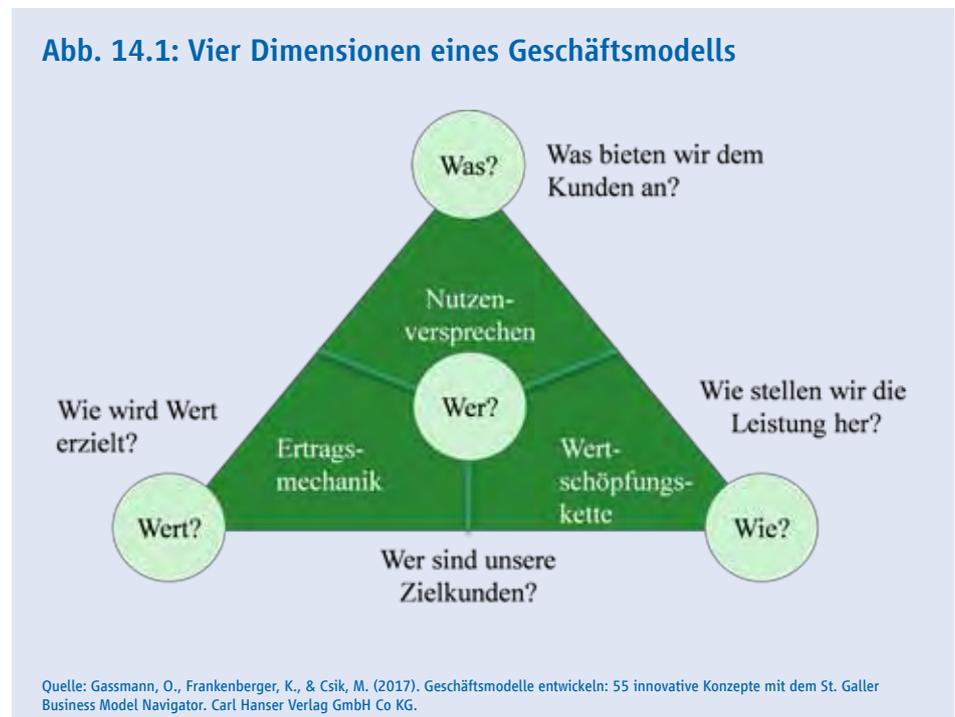
Heutzutage beobachten wir das Phänomen, dass Prozesse und somit auch Produkte und deren Qualität unter Wettbewerbern immer gleichwertiger werden. Um einen neuen Wettbewerbsvorteil zu generieren, bedarf es daher unternehmerischen Denkens in Geschäftsmodellinnovation. Es ist zu erwarten, dass der zukünftige Wettbewerb nicht mehr zwischen Produkten stattfindet, sondern über deren Geschäftsmodelle entschieden wird. Doch was ist ein Geschäftsmodell? Ein Geschäftsmodell besteht im Kern aus der Schaffung von Kundennutzen (Value Creation) zu einem attraktiven Wertversprechen (Value Proposition) und dem Abschöpfen der Werte durch das eigene Unternehmen mit einer geeigneten Ertragsmechanik (Value Capturing). Die Universität St. Gallen beschreibt Geschäftsmodelle durch das Modell des „magischen Dreiecks“ und der darin enthaltenen vier Dimensionen „Who“, „What“, „How“, „Why“:

- Who: Der Kunde und seine Bedürfnisse stehen im Zentrum eines Geschäftsmodells.
- What: Die zweite Dimension beschreibt das Nutzenversprechen (Value Proposition), also welche Produkte oder Services dem Kunden angeboten werden, um seine Bedürfnisse zu adressieren.

- How: Hier werden die Aktivitäten und Prozesse beschrieben, um die Value-Proposition herzustellen und zu vertreiben. Dazu gehören auch Wertschöpfungspartner, Schlüsselressourcen sowie Kommunikations- und Vertriebskanäle.
- Why: In der Why-Dimension werden die finanziellen Aspekte eines Geschäftsmodells beschrieben. Wie funktioniert die Ertragsmechanik? Womit wird Umsatz erzielt? Wie sehen die Kostenstrukturen aus?

Erfolgreiche Geschäftsmodelle haben diese vier Dimensionen so definiert und miteinander verknüpft, dass das Wertversprechen effizient und zweckmäßig an den Kunden gebracht wird und alle Dimensionen aufeinander abgestimmt sind.

Abb. 14.1: Vier Dimensionen eines Geschäftsmodells



14.1 Geschäftsmodellinnovation

Von Geschäftsmodellinnovation wird gesprochen, wenn sich bei Veränderung des Geschäftsmodells mindestens zwei der beschriebenen vier Dimensionen ändern. Die Dimensionen dürfen hierbei nicht willkürlich geändert werden, sondern müssen so aneinander abgestimmt werden, dass sie sich gegenseitig maximal unterstützen und innerhalb des Geschäftsmodells symbiotische Wirkungen entfalten. Nach Joseph Schumpeter wird Innovation wie folgt definiert: „Innovation is the market introduction of a technical or organisational novelty, not just its invention“. Entsprechend muss eine Erfindung erfolgreich auf dem Markt lanciert werden, damit von Innovation gesprochen werden kann.

Warum fällt es etablierten Unternehmen jedoch so schwer, Geschäftsmodellinnovationen zu lancieren? Unternehmen sind gefangen in der vorherrschenden Logik ihrer Branche. Bedingt durch den vergangenen wirtschaftlichen Erfolg fällt es Unternehmen schwer, „außerhalb der Box“ zu denken. Warum sollte das bestehende Geschäftsmodell innoviert werden, solange noch beträchtliche Profite erreicht werden? Je größer der wirtschaftliche Erfolg etablierter Geschäftsmodelle, desto schwerer fällt es Unternehmen, sich von diesen zu lösen. Trotz dieses Dilemmas hat Geschäftsmodellinnovation zuletzt immer mehr an Relevanz und Notwendigkeit gewonnen. Eine Erklärung hierfür könnte die Digitalisierung mit ihren Implikationen für industrieweite Märkte sein. Zum einen sind digitale Geschäftsmodelle nicht lokal begrenzt, sondern können nun global, zu Nullkosten skaliert, in Wettbewerb gebracht werden. Zum anderen können digitale Geschäftsmodelle, datengetrieben, durch Connectivity-Technologien und Updates Over-the-Air unmittelbar variiert und an neue Umstände angepasst werden. Diese beiden Umstände führen zu einer erhöhten Marktdynamik, was Geschäftsmodelle mit ihrem sich iterativ weiterentwickelnden Charakter unumgänglich macht. Die Konsequenz für den Umgang mit Geschäftsmodellinnovation lautet: „Disruptiere dich selber, bevor es andere tun.“

14.1.1 Herausforderungen für die Elektroindustrie

Mit der sich stetig verbessernden Prozessinnovation und den sich ebenfalls verbessernden Produkten aus dem asiatischen Raum steht die deutsche Elektroindustrie vor neuen und großen Herausforderungen, den Wettbewerbsvorteil auf der Ebene der Produktinnovation beizubehalten. Besonders unter dem Gesichtspunkt unterschiedlicher Lohnkosten und regulatorischer Hürden

scheinen sich hier eher Wettbewerbsnachteile aufzubauen. Asiatische Produkte sind längst keine „Copy and Paste“-Ware mehr, sondern qualitativ hochwertig und innovativ. Auffällig ist hierbei, dass teilweise gar nicht mehr die reine Produktinnovation fokussiert wird. Physische Produkte werden durch digitale Services ergänzt – Servitization. Hierdurch entsteht ein zusätzliches Wertversprechen, das datengetrieben dynamisch weiterentwickelt werden kann. Eine Hochburg der Servitization ist das chinesische Shenzhen, auch „Hardware Silicon Valley“ genannt. Extra auf Hardware-Innovation ausgerichtete (HAX-)Acceleratoren fördern agiles und schnelles Entwickeln von hardwarebasierten Geschäftsideen. Viele Hardwareprodukte werden ohne Marge verkauft, da sie primär dem Sammeln von Daten dienen, auf deren Basis lukrative digitale Geschäftsmodelle lanciert werden sollen. Die Hardware wird hierdurch zum reinen Enabler degradiert.

Eine weitere Herausforderung dürfte ein absehbares Ende von Moore's-Law sein. Die Halbleitertechnologie wurde auf atomare Größen miniaturisiert, wodurch einer weiteren Entwicklung und Miniaturisierung physikalische Grenzen gesetzt sein dürften. Weitere Produktinnovationen müssten durch Entwicklungen in der Computer-Architektur erreicht werden. Die Geschwindigkeit in der Technologieentwicklung der letzten Jahre dürfte sich jedoch verlangsamen, was die Generierung von Wettbewerbsvorteilen von Produkt auf Geschäftsmodellinnovation verlagert.

14.1.2 Produktinnovation als Wettbewerbsvorteil

Um die eigene Organisation sowohl auf ungewisse Markt- und Kundenanforderungen als auch auf ungewisse technologische Herausforderungen vorzubereiten, müssen Unternehmen einen zusätzlichen Fokus auf Geschäftsmodellinnovation legen. Somit können Produktinnovationen optimal ummantelt und auf dem Markt platziert werden. Es wird ein langfristiger Wettbewerbsvorteil möglich, da durch Geschäftsmodelle auf sich schneller ändernde äußere Einflüsse reagiert werden kann. Es bedarf nicht unbedingt einer kostspieligen Änderung des Produkts, wenn ein sich flexibel änderndes Geschäftsmodell bereits sich ändernde Kundenanforderungen adressieren und beantworten kann.

Doch wie können Unternehmen innovative Geschäftsmodelle für ihre Kunden entwickeln? In den letzten Jahren wurden in enger Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Industrie verschiedene Ansätze entwickelt. So entstand beispielsweise die Blue-Ocean-Methode der INSEAD,

das Business Model Canvas aus Lausanne, Design-Thinking in Stanford und der Business Model Navigator an der Universität St. Gallen. Der Business Model Navigator wurde auf der Basis fünfjähriger Forschung am Institut für Technologiemanagement unter Prof. Dr. Oliver Gassmann entwickelt. Es wurde beobachtet, dass 90 Prozent der erfolgreichen Geschäftsmodellinnovationen der letzten Jahrzehnte aus Rekombination von Elementen bereits existierender Geschäftsmodelle bestehen. Die Wichtigsten dieser Elemente wurden als 55 Muster beschrieben, die jeweils eine eigene Geschäftsmodelllogik beschreiben. Eines dieser Muster ist das „Razor and Blade“-Muster, benannt nach einem Geschäftsmodellmuster Gillettes, das dem Kunden das Grundprodukt, nämlich den Rasierer, günstig oder gar umsonst anbietet, um eine Nachfrage nach passenden Verbrauchsmaterialien, den Rasierklingen, zu schaffen und diese langfristig mit hohen Margen zu verkaufen. Das Konzept war so durchschlagend, dass Gillette bereits drei Jahre nach der Ersteinführung des Wegwerfklingen-Systems im Jahr 1904 jährlich über 134 Millionen Rasierklingen verkaufen konnte. Das „Razor and Blade“-Muster wurde jedoch bereits Ende des 19. Jahrhunderts von John D. Rockefeller und der Standard Oil Company genutzt, um durch den Verkauf von günstigen Kerosinlampen eine Nachfrage nach Kerosin in China zu etablieren. Auch Nestlé schaffte mit der Nespresso-Kaffeemaschine seinen eigenen Markt nach Nespresso-Kapseln. Um sicherzustellen, dass die Kunden die Verbrauchsmaterialien nur beim eigenen Unternehmen kaufen, wurde bei Nespresso zusätzlich das „Lock-in“-Muster verwendet. Nach Ablauf des Patents für das Nespresso-System und der Marktlancierung billiger Kaffeekapseln, die an die Nespresso-Kaffeemaschine angepasst waren, wurde mithilfe des „Lock-in“-Musters ein erneuter Wettbewerbsvorteil geschaffen. Anstatt den gesamten Dichtring zwischen Kapsel und Kaffeemaschine aus Kostengründen an der Kaffeemaschine anzubringen, wurde hier nur ein Drittel des Dichtrings angebracht. Die restlichen zwei Drittel der Dichtringverbindung wurden an jede einzelne Nespresso-Kapsel angebracht, auf die ein erneutes Patent wirksam wurde. Werden in den Nespresso-Maschinen original Nespresso-Kapseln verwendet, entsteht nun eine dichte Verbindung, die den benötigten Wasserdruck bei der Kaffeezubereitung garantiert. Werden Billig-Kapseln verwendet, kann der benötigte Druck nicht aufgebaut werden, die Kaffeemaschine tropft und der Kaffeegeschmack ist reduziert. Der Business-Model-Navigator basiert auf dieser zentralen Erkenntnis, dass sich neue Geschäftsmodelle über kreative Imitation und Rekombination erfolgreich entwickeln lassen. Es

wird hierbei grundsätzlich zwischen Designphase der Geschäftsmodellinnovation und deren Realisierung unterschieden. Beide Phasen bestehen zusammen aus den folgenden vier Schritten:

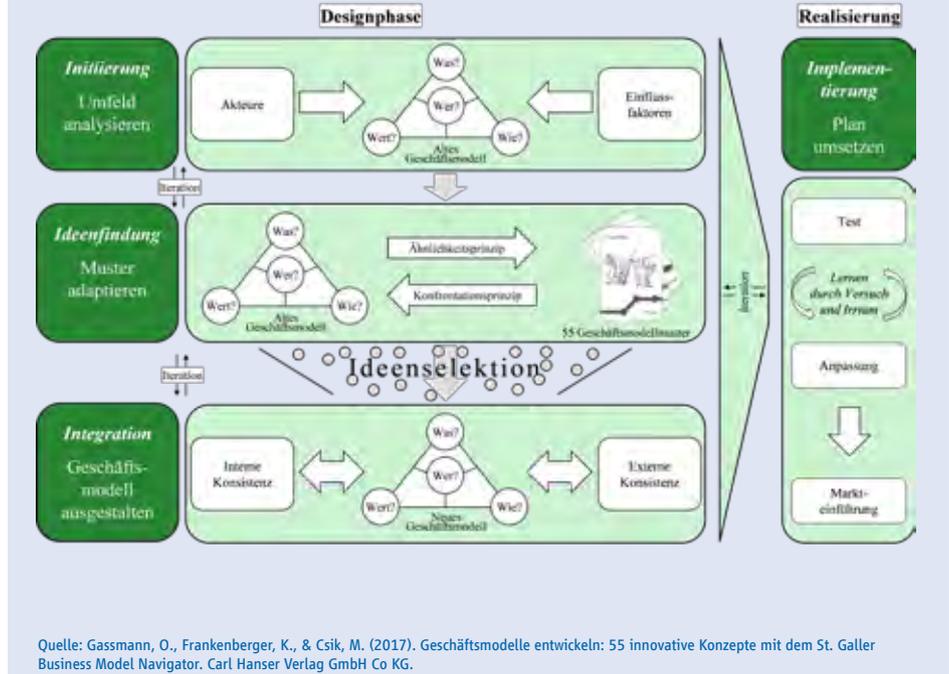
1. Initiierung: Der Prozess für die Geschäftsmodellinnovation wird durch eine Umfeldanalyse initiiert: Wer sind neue Akteure (Asienabwanderung in der Elektroindustrie)? Was sind neue Einflussfaktoren (Digitalisierung)?

2. Ideenfindung: Die 55 Geschäftsmodellmuster werden verwendet, um neue Ideen zu finden, mit denen aus Umweltveränderungen neue Chancen werden können.

3. Integration: Erfolgversprechende Ideen werden detailliert und ausgearbeitet, bis die Geschäftsmodelldimensionen konsistent sind und sich symbiotisch unterstützen.

4. Implementierung: Durch iteratives Testen kritischer Annahmen wird das Geschäftsmodell weiter verfeinert und anhand von Kundenrückmeldungen angepasst, bis eine Markteinführung möglich wird.

Abb. 14.2: Der St. Gallen Business Model Navigator ist ein wissenschaftlich fundiertes und praxiserprobtes Vorgehen, mit dem sich systematisch Geschäftsmodellinnovationen entwickeln und implementieren lassen



14.2 Geschäftsmodelle

Geschäftsmodelle? Beim Lesen der Überschrift haben Sie sich vielleicht gewundert, warum so ein Thema in der Technologie-Roadmap erscheint. Die Entwicklung und Vermarktung von anspruchsvollen, technologisch ausgeklügelten Produkten verspricht doch noch viel Potenzial für gutes Geschäft in der Zukunft – gerade im Zeitalter zunehmender Digitalisierung. Das ist sicher richtig, aber Geschäftsmodelle werden zunehmend die Schlüsselrolle für Wettbewerbsdifferenzierung und nachhaltiges Wachstum einnehmen. Das Marktumfeld verändert sich zunehmend und die Zyklen, in denen neue Angebote benötigt werden, lassen sich aufgrund der notwendigen Entwicklungszeiten mit neuen Produkten allein kaum noch realisieren. Geschäftsmodellinnovationen können hier eine Lösung sein. Analysen zeigen, dass gerade diejenigen Unternehmen überdurchschnittlich erfolgreich sind, die ihr Geschäftsmodell schnell auf veränderte Randbedingungen anpassen. Technologisch ausgerichteten Unternehmen fehlt jedoch oft die Expertise, gezielt die bestehenden Geschäftsmodelle weiterzuentwickeln oder mit neuen Modellen in neue Märkte vorzustoßen.

Geschäftsmodelle sind nichts Neues, denn jedes Unternehmen hat eine spezifische Art und Weise, mit der Gewinne erwirtschaftet werden, und damit ein Geschäftsmodell. Damit ist ein Geschäftsmodell an sich keine Strategie und entsprechend findet sich der Begriff nicht in der klassischen Strategieliteratur. Seit den 1990er-Jahren mit der Entstehung des Internets sind jedoch viele neue Modelle entstanden und die Wissenschaft hat das Thema in diesen Jahren ebenfalls aufgegriffen und analysiert.

14.2.1 Definition von Geschäftsmodellen

Es gibt weder in der Wissenschaft noch in der Praxis eine allgemein anerkannte Definition. Weithin bekannte Beschreibungen, zum Beispiel von Wirtz und Osterwalder, detaillieren in mal mehr und mal weniger Teilmodellen das Nutzenversprechen für ein spezifisches Kundensegment, die Ausgestaltung der Kundenbeziehung und die wesentlichen Elemente der Wertschöpfungskette. Ein Modell kann natürlich immer nur eine Annäherung an die Wirklichkeit sein und je nach Ziel der Beschreibung ist der Detaillierungsgrad unterschiedlich. Für eine Strategieentwicklung reicht gegebenenfalls ein grobes Detaillieren, während für die Entwicklung von Software viele Elemente genau zu beschreiben sind, damit zum

Beispiel Prozess- und Datenmodelle abgeleitet werden können. Vier Grundelemente – was, wem, wie und warum verkaufe ich etwas – sind in der einen oder anderen Form immer Gegenstand der Betrachtung.

14.2.2 Relevanz der Ausarbeitung von Geschäftsmodellen

Ein Geschäftsmodell darzustellen ist unter Umständen ein aufwendiges Unterfangen. Gerade wenn Unternehmen langjährig mit einem breiten Produkt- und Dienstleistungsportfolio aktiv sind, haben sich die verschiedenen Modelle über die Zeit entwickelt und sind nicht bewusst entworfen worden. In reifen Industrien sind die Modelle teilweise unternehmensübergreifend etabliert, sodass von einer Branchenlogik gesprochen werden kann. Um den Ausgangspunkt für eine Veränderung zu schaffen ist es wichtig, den Aufwand zu investieren und sich über die Logik des eigenen Geschäftsmodells klar zu werden.

Ausgehend vom bestehenden Geschäftsmodell kann durch Änderungen in einem der Grundelemente, zum Beispiel durch Adressierung eines neuen Kundensegments (wem) oder durch einen neuen Verkaufskanal (wie), zum Beispiel eine Online-Plattform oder ein neues Vertragsangebots, ein neues Geschäftsmodell zur Differenzierung gegenüber dem Wettbewerb eingesetzt werden. Wenn gleichzeitig mehrere Elemente geändert werden, kann von einer Geschäftsmodellinnovation gesprochen werden. Besonders erfolgreich sind neue Modelle dann, wenn das Angebot die Branchenlogik durchbricht.

Ein anschauliches Beispiel dazu sind beispielsweise Flottenverträge, bei denen Wartung und Einsatzbereitschaft von Flugzeugturbinen durch den Hersteller sichergestellt werden. Die betreibende Fluggesellschaft bezahlt nur eine Flugstundenrate und muss nicht wie bisher das Triebwerk erwerben. Damit wurden sowohl Investitionen für die Turbinen und die Wartungskapazitäten als auch die Risiken in Bezug auf geplante und ungeplante Wartungsarbeiten bei den Betreibern minimiert. Der Vorteil liegt in der engen Kundenbindung und im Zugang zu allen relevanten Daten in Bezug auf den Einsatz der Turbinen. Die Daten können sowohl zur Optimierung der Lebenszykluskosten der Triebwerke als auch für neue datenbasierte Angebote und damit für neues Geschäft genutzt werden. Dieses Modell hat die damals existierende Branchenlogik durchbrochen und sich als sehr erfolgreich erwiesen.

14.2.3 Entwicklung von Geschäftsmodellen

Der Ausgangspunkt eines jeden Geschäftsmodells ist ein möglichst präzise definiertes Kundensegment, das als vielversprechend eingeschätzt wird. Teil der Kundensegmentdefinition kann das Alter, die Ausbildung, das Einkommen, das Geschlecht, aber auch das Verhalten, die Produktverwendung, der Lebensstil oder die Weltanschauung sein. Verbunden mit der jeweiligen Kundengruppe ist die Annahme über eine spezifische Problemstellung, die durch die Produkte und Dienstleistungen des Anbieters gelöst werden soll. Erste Überlegungen zu den Verkaufskanälen und der Kundenbindung lassen sich zum Beispiel mithilfe des St. Galler Business Model Navigators gestalten. Nach diesen Vorbereitungen gilt es, die Annahme zu validieren. Dies geschieht durch eine Vielzahl an Kundeninterviews, in denen zuerst möglichst lösungsoffen versucht wird, die angenommene Problemstellung zu bestätigen. Die Erfahrung dabei zeigt, dass die ersten Hypothesen meist nicht zielführend sind. Die gewonnenen Erkenntnisse über die Problemstellungen der Kunden sind aber überaus wertvoll und erlauben die gezielte Anpassung des Wertangebots. Sollte sich das notwendige Angebot als zu weit entfernt vom Kerngeschäft des Unternehmens erweisen, kann versucht werden, Anpassungen im Kundensegment vorzunehmen und den Prozess erneut zu starten. Wenn trotz all dieser Modifikationen kein tragfähiges Modell zustande kommt, wurde diese Erkenntnis mit nur moderatem Mitarbeiterinsatz und praktisch ohne Entwicklungskosten erzielt. Ist die Idee jedoch tragfähig, kann eine zweite Validierungsphase gestartet werden, in der mit ersten Mustern und ausgewählten Kunden Versuche zur finalen Gestaltung durchgeführt werden. Sind diese ebenfalls erfolgreich abgeschlossen, ist das Ziel eines wiederholbaren, skalierbaren Geschäftsmodells erreicht und die Umsetzungsphase kann begonnen werden.

14.2.4 Merkmale erfolgreicher Geschäftsmodelle

Die im St. Galler Business Model Navigator beschriebenen Grundmuster wurden durch Analyse der Geschäftsmodelle von 350 erfolgreichen Unternehmen erstellt, wobei die Muster unterschiedliche Aspekte des gesamten Geschäftsmodells adressieren. Manche, wie zum Beispiel Freemium – deren Basisversion kostenlos erhältlich ist, erst die umfangreichere muss bezahlt werden –, zielen eher auf die Kundenbindung und das Bezahlmodell, während etwa Layer Player – mit ihrer extremen Spezialisierung auf einen Abschnitt der Wertschöpfungskette, hier sei beispielsweise Foxconn genannt – auf die

Positionierung im Ökosystem der Branche abzielen. Entsprechend lassen sich die Muster bezüglich der unterschiedlichen Aspekte kreativ kombinieren und je besser und zielgerichteter dies gelingt, desto schwerer ist es, das Geschäftsmodell zu kopieren. Letztendlich ist es aber essenziell, dass ein Geschäftsmodell nicht als statisch betrachtet wird, sondern einer regelmäßigen Bewertung und gegebenenfalls einer Weiterentwicklung unterzogen wird.

14.2.4.1 Geschäftsmodelle im Bereich Elektronik/Automotive

Rund um die Consumer-Electronic und das Internet haben bereits viele neue Geschäftsmodelle Einzug gehalten. Gerade hier lassen sich, da die Kosten vergleichsweise überschaubar sind, schnell neue Ideen austesten oder das Kundeninteresse durch Schaltung einer Internetseite, einer sogenannten Landingpage, vor der Produktentwicklung überprüfen. Im Fahrzeugbau gestaltet sich der Wandel langsamer, zeichnet sich jedoch ebenfalls ab.

14.2.4.2 Branchenlogik in der Automobilindustrie

Die Geschäftsmodelle in der Automobilindustrie sind im Wesentlichen geprägt vom einmaligen Verkauf der Produkte und gegebenenfalls durch ein Ersatzteilgeschäft. Die Industrie ist stark käufergeprägt und die Entwicklung auf Bestellung dominiert die Wertschöpfungskette. Dabei steht die Hardwarekomponente im Zentrum und Software als eigenständiges Produkt ist im Gegensatz zur Consumer-Electronic-Welt noch nicht ausgeprägt. Im Bereich Mobilitätslösungen, zum Beispiel Carsharing, oder in angrenzenden Bereichen, zum Beispiel bei der Kfz-Versicherung durch Angebote auf Basis der Analyse des Fahrverhaltens, bilden sich neue Geschäftsmodelle beispielsweise auf Basis von Daten heraus.

14.2.5 Veränderungen und Herausforderungen

Sowohl die Branche wie auch die Systeme selbst sind im Wandel, wobei einheitliche Ansätze sich noch nicht ausgeprägt haben, jedoch notwendig sind. Dies bedeutet zum einen Chancen zur Gestaltung, zum anderen bergen die radikalen Veränderungen aber auch Risiken. Große Firmen sind oft schwerfällig in der Anpassung, kleinen Firmen fehlen die Experten, und das Risiko eines Fehlschlags kann existenziell sein. Dementsprechend ist es wichtig, zur Risikominimierung Wege zu finden, wie ohne hohe Entwicklungskosten und schnell neue Ideen ausprobiert werden können. Die Ansätze der gezielten Geschäftsmodellentwicklung bieten diese Möglichkeiten für Innovationen, für wirtschaftlich erfolgreiche Ideen, in der Zukunft.

Die Differenzierung in der Automobilindustrie basiert derzeit auf Leistungsmerkmalen und Preisführerschaft, wobei sich die dafür wichtigen Produktunterschiede zwischen den Marken immer weiter angleichen und damit das System infrage stellen. Die jüngsten Entwicklungen rücken die Umweltverträglichkeit in den Fokus, und Veränderungen in der Einstellung gegenüber dem Fahrzeug – nutzen statt besitzen – stellen die Branche ebenfalls vor neue Herausforderungen. Die Digitalisierung, die noch dazu die Branchengrenzen auflöst und neue Wettbewerber bringt, ergänzt das Bild.

Im engeren Bezug auf die Elektronik ergeben sich durch neue Fahrzeug-Architekturen Veränderungen, die die Einheit zwischen Hardware und Software auflösen, wobei der Software-Lebenszyklus kürzer sein wird als die Fahrzeug- bzw. Hardware-Lebensdauer. Neben den damit notwendig gewordenen Geschäftsmodellen für Software als eigenständiges Produkt ergeben sich neue Chancen zum einen durch die Wartung und Aktualisierung der Software im Feld wie auch durch Spezialisierungen in der Wertschöpfungskette dieser komplexen Softwaresysteme.



Trend Analysis

Digital Distributions and Sales



15 Fördermittel für Innovationen – Forschung, Entwicklung und Markteinführung



Quelle: Phils Photography / Fotolia.com

Die Expertenkommission Forschung und Innovation (Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschland 2017, Seite 22: Expertenkommission Forschung und Innovation, <https://www.e-fi.de/>) führte im Jahresbericht 2017 aus: „Bisher erreichte die staatliche Innovationsförderung – trotz gut ausgebauter Projektförderung – zu wenige KMU. Gerade die Vielzahl an spezifischen Bundes- und Länderprogrammen macht die Fördermöglichkeiten für antragstellende Unternehmen komplex und der mit der Antragstellung verbundene Aufwand ist von kleinen Unternehmen schwerer zu schultern als von größeren Unternehmen.“

Ein Grund für die nicht befriedigende Nutzung der Innovationsförderung ist die Unsicherheit von Unternehmen über die Motivation, Struktur und Vorgehensweise im Umgang mit öffentlichen Förderprogrammen. Die Erforschung neuer technologischer Grundlagen, die Entwicklung innovativer Komponenten und Bauelemente und die Markteinführung dieser Innovationen sind aber wesentlich für den technologischen Fortschritt und die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen. Die staatliche Innovationsförderung spielt eine zentrale Rolle bei dem Erhalt und dem Ausbau dieser unternehmerischen Fähigkeiten. Dieser Artikel soll einen Beitrag dazu liefern, staatliche Förderung für die Entwicklung und Markteinführung innovativer elektronischer Bauelemente und Baugruppen auszubauen und zu nutzen.

15.1 Innovationsprozesse in mittelständischen Unternehmen

Innovative Unternehmen, also Firmen mit neuen, ihre Kunden überzeugenden Produkten und Dienstleistungen, sind rentabler und schaffen überdurchschnittlich viele Arbeitsplätze. Die Chancen innovativer Unternehmen sind insbesondere für einen Hochtechnologie-Standort wie Deutschland vielfach demonstriert. Der Beginn eines Innovationsprozesses ist dabei oft die Einsicht, dass Stillstand in Wahrheit Rückschritt bedeutet: Die Wettbewerber entwickeln sich weiter, neue Wettbewerber entstehen am Markt, Absatzmärkte verschwinden, wenn komplette Produktgruppen nicht mehr benötigt werden usw. Wer sich nicht bewegt, wird abgehängt. In manchen Branchen, zum Beispiel bei internet-basierten Geschäftsprozessen, kann dies sehr schnell innerhalb von wenigen Monaten gehen – in anderen Branchen, zum Beispiel der Rohstoffindustrie, dauert dies länger.

15.2 Innovationsstrategie als Kernkomponente der Produkt- und Geschäftsstrategie

Wo will ich hin? Was will mein Kunde? Was macht der Wettbewerb? Wie sieht mein Geschäft aus, wenn das heutige Produkt so veraltet ist, dass es am Markt nicht mehr besteht? Kann ich mit neuen Produktideen mehr Deckungsbeitrag erzielen als mit den bestehenden Produkten? Solche und andere Fragen sind typisch für innovative Unternehmen.

In einem strukturierten Prozess zur Entwicklung einer Innovationsstrategie wird immer der Bezug zu der Geschäftsstrategie eines Unternehmens hergestellt: Wie sieht das Geschäftsfeld des Unternehmens heute und in Zukunft aus? Welche Marktsegmente will ich festigen, halten, abgeben oder erreichen. Welche Produkte/Dienstleistungen wird das Unternehmen in Zukunft vertreiben? Ein neues Geschäftsfeld mit einem neuen Produktportfolio aufzubauen, ist der Königsweg der Innovation und entsprechend schwierig und selten. Weiter verbreitet ist die Entwicklung neuer Produkte für ein bestehendes Geschäftsfeld, in dem gute langjährige Kontakte zu Kunden bestehen. Alternativ ist der Aufbau eines neuen Geschäftsfelds in Kombination mit dem bestehenden möglich, wobei auf die Anforderung des neuen Geschäftsfelds mit der Anpassung der Produkte reagiert wird.

Abbildung 15.1 zeigt ein vereinfachtes Produkt-Geschäftsfeld-Portfolio als Basis für die Entwicklung einer Innovationsstrategie. Die Klärung, welche der vier Varianten der Produkt- und Geschäftsentwicklung ein Unternehmen benötigt, ist eine der wichtigsten Managemententscheidungen der Unternehmensführung. Die Entscheidung über eine oder mehrere dieser Varianten ist dann die Basis für die konkrete Planung des Innovationsprozesses und für die Entscheidung, ob mit oder ohne Fördermittel eine Entwicklung angegangen werden soll.

Bei Klarheit über die geplante Geschäftsentwicklung ist der nächste Schritt die Konzeption des Innovationsprozesses. Mit welchen Schritten soll Marktfähigkeit, technisches Konzept, Nutzerorientierung und Wettbewerbsstärke erreicht werden? Kosten einer zukünftigen Produktion und der Markteinführung (z. B. Zulassungen) müssen abgeschätzt werden.

Eine wesentliche Komponente der Kosten neuer Produkte sind oft die Entwicklungskosten für Produkt und/oder Produktionsprozess. Hier setzen Innovationsförderprogramme an, die für Unternehmen, die ihre Geschäftsstrategie, Produktstrategie und Innovationsprozesse „im Griff“ haben, sehr gute Chancen zur Finanzierung der Kosten von Forschung und Entwicklung bieten.

Abb. 15.1: Vereinfachte Portfolio-Darstellung Produkte/Geschäftsfelder mit Visualisierung von vier grundlegenden Varianten einer Innovationstätigkeit

Variante 1
Erhebliche Verbesserungen von bestehenden Produkten

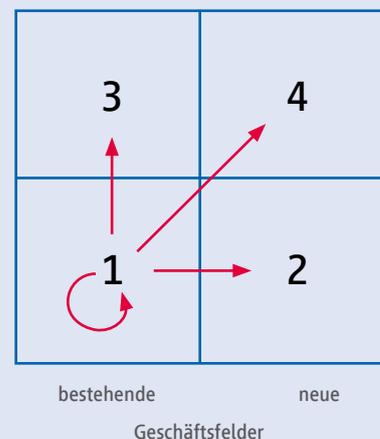
Variante 2
Bestehende Produkte weiterentwickeln für die Erschließung eines neuen Geschäftsfelds

Variante 3
Neue, innovative Produkte für das bestehende Geschäftsfeld

Variante 4
Mit neuen innovativen Produkten ein komplett neues Geschäftsfeld erschließen

originär
neues
Produkt

bestehendes
Produkt



Quelle: EurA



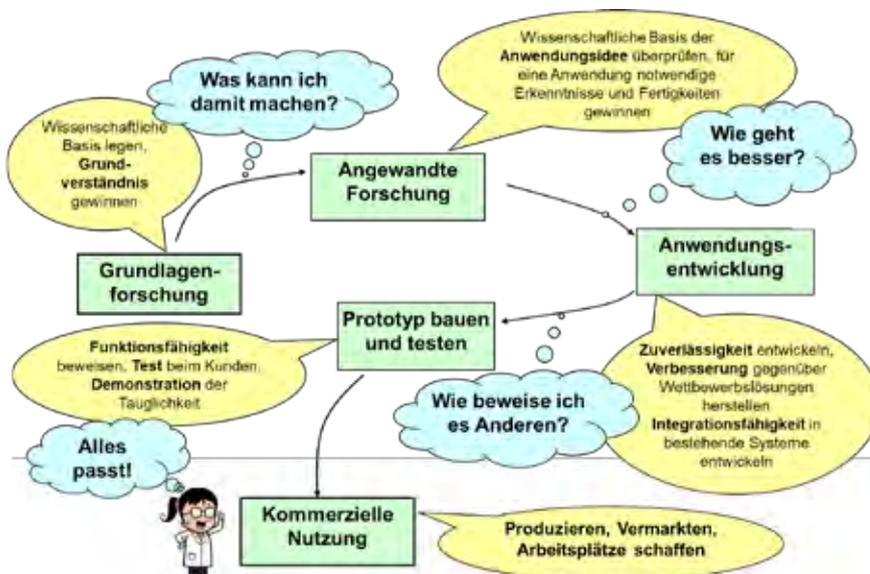
15.3 Motivation zur Nutzung öffentlicher Innovationsförderprogramme

Mit Innovationsförderprogrammen der Bundesländer, der verschiedenen Bundesministerien und der Europäischen Union können alle wesentlichen Aktivitäten von der grundlegenden Idee für ein neues Produkt bis zur Zulassung und Markteinführung gefördert werden. Diese Arbeiten zur Entwicklung und unternehmerischen Umsetzung von Innovationen werden mit verlorenen Zuschüssen gefördert: Ein Unternehmen muss die Fördermittel nicht zurückzahlen – ob erfolgreich oder nicht erfolgreich. Es werden keine Unternehmensanteile verlangt und es müssen keine Sicherheiten dargestellt werden.

Innovationsförderung arbeitet mit öffentlichen Zuschüssen, die mit Förderquoten von typischerweise 25 bis 70 Prozent der Kosten hoch attraktiv sind.

Für die Realisierung innovativer Produkte müssen Unternehmen unterschiedliche Aufwände finanzieren. Ein OECD-Handbuch (Oslo Manual: Guidelines for Collecting and Interpreting Innovation Data, <http://www.oecd.org/>) definiert: Innovationsausgaben umfassen neben FuE-Ausgaben auch Ausgaben für den Erwerb von Maschinen, Anlagen, Software und externem Wissen (z. B. Patenten oder Lizenzen), Ausgaben für Konstruktion, Design, Produktgestaltung, Konzeption, Schulung und Weiterbildung, Markteinführung und andere Vorbereitungen für die Produktion und den Vertrieb von Innovationen.

Abb. 15.2: Ablauf unternehmerischer Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten von der selten in Unternehmen durchgeführten Grundlagenforschung bis zur kommerziellen Nutzung



15.3.1 Typische Aktivitäten von Innovatoren

Die Motivationen, Fragestellungen und typischen Tätigkeiten in den verschiedenen Innovationsphasen sind in Abbildung 15.2 dargestellt.

Die Kosten dieser Tätigkeiten können, mit unterschiedlicher Förderquote und unterschiedlichen Förderhöhen, durch öffentliche Förderprogramme mit Zuschüssen finanziert werden. Öffentliche Förderprogramme beteiligen sich mit Zuschüssen zwischen 25 und 100 Prozent an diesen Kosten, können also einen wesentlichen Beitrag leisten.

Quelle: EurA

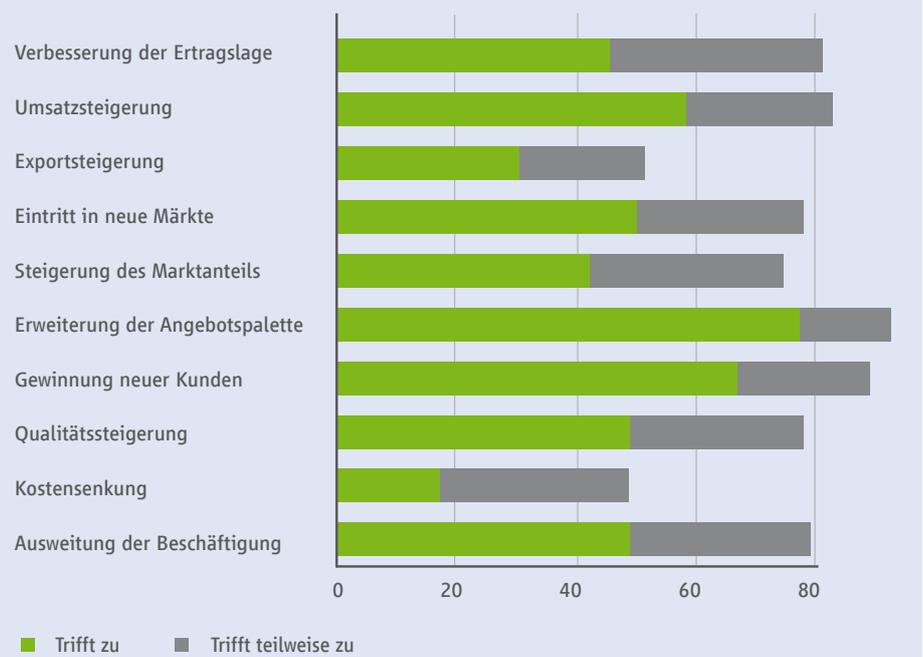
15.3.2 Förderprogramme aktiv nutzen

Die Motivation zur Nutzung öffentlicher Förderprogramme entsteht aus dem klaren Wettbewerbsvorsprung, der sich damit erzielen lässt:

- Strategisch – da durch Förderprogramme frühzeitig neue Technologien und Kooperationspartner erschlossen werden können
- Konzeptionell/Operativ – eine stringente Projektplanung mit klaren Arbeitspaketen und Meilensteinen ist obligatorisch bei geförderten Projekten
- Finanziell – die eigenen Finanzanteile für Forschung und Entwicklung können reduziert werden bzw. für zusätzliche Entwicklungen genutzt werden

In Abbildung 15.3 sind die Ergebnisse einer Umfrage unter geförderten Unternehmen zur ihrer Motivation bei der Nutzung von Förderprogrammen dargestellt. Die Umfrageergebnisse zeigen sehr konkret auf, warum Unternehmen aktiv auf Förderprogramme zugehen und sich engagieren.

Abb. 15.3: Bedeutung von Forschung und Entwicklung aus Sicht innovativer Unternehmen. Umfrage unter 2.720 Unternehmen des DIW



Quelle: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V., DIW-Studie zur Innovationsintensität 2012, <https://www.diw.de>

15.4 Vier Beispiele für Innovationsförderprogramme für die Entwicklung und Markteinführung elektronischer Bauelemente

Die Innovationstätigkeit von Unternehmen wird insbesondere in der anwendungsorientierten Forschung, in der Entwicklung konkreter Produkte und bei der Vorbereitung einer Kommerzialisierung durch zum Beispiel Prototypen und Zulassungen breit gefördert. Fachlich breit angelegte Innovationsförderprogramme ergänzen dabei fachspezifische Förderprogramme, die konkrete wissenschaftlich-technische Ziele verfolgen.

Abb. 15.4: Darstellung von einem fachspezifischen Förderprogramm und drei thematisch offenen Förderprogrammen

Beispiele: Fachthemen des ZVEI	Anwendungsorientierte Forschung	Entwicklung von konkreten Produkten	Vorbereitung der Umsetzung im Markt
Automation*	KMU-Innovativ	Programm	Förderprogramme der EU
Batterien*			
Consumer Electronics*			
Elektrofahrzeuge*		Fachspezifisches Programm Elektromobilität	
Energietechnik*		ZIM	
Medizintechnik*			
Stromversorgung*			

* Anmerkung: Fachspezifische Programme gibt es für fast alle Fachthemen des ZVEI

Quelle: EurA

Tab. 15.1: Zusammenfassung der vier Innovationsförderprogramme

Fördergegenstand	FuE für Komponenten und Systeme für Elektromobilität	Anwendungsorientierte Forschung	Entwicklung von konkreten Produkten	Vorbereitung der Umsetzung im Markt
Für elektronische Bauelemente und Komponenten geeignetes Programm	Fachprogramm Elektromobilität vor Ort	KMU-Innovativ: Elektroniksysteme	ZIM: Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand	KMU-Instrument und Fast Track to Innovation
Fördergeldgeber	Bundesministerium für Verkehr	Bundesministerium für Bildung und Forschung	Bundesministerium für Wirtschaft	EU: European Innovation Council
Internet	http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/foerderrichtlinie-elektromobilitaet-foerderaufruf.html	https://www.bmbf.de/foerderung/bekanntmachung-1160.html	https://www.zim-bmwi.de/	http://www.nks-kmu.de/foerderung-fti.php

Quelle: EurA

Programmbeispiel 1:
Fachspezifische Förderung für Komponenten und Systeme für die Elektromobilität

Mit diesem auf den Ausbau der Elektromobilität ausgerichteten Programm des Bundesverkehrsministeriums werden Unternehmen unterschiedlicher Größe gefördert. Das Programm deckt die ganze Breite der Innovationstätigkeit von Unternehmen ab: anwendungsorientierte Forschungs- und Demonstrationsvorhaben zur strategischen Unterstützung des Markthochlaufs von Elektrofahrzeugen, vernetzte Mobilität und Einsatz von Elektrobussen oder E-Lkws im Kontext innovativer Mobilitäts- bzw. Logistikkonzepte bis zu kommunalen Elektromobilitätskonzepten.

Fördersteckbrief Fachprogramme Elektromobilität des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur:

- Verschiedene Teilprogramme im Bereich Elektromobilität mit unterschiedlicher Laufzeit
- Förderung großer Unternehmen möglich
- Förderung von Einzelprojekten und Verbundprojekten mit typisch drei bis sechs Partnern
- Zuschuss von 25 bis zu 60 Prozent für Forschung und Entwicklung möglich
- Zuschussvolumen bis zu mehreren Millionen Euro
- Investitionszuschüsse möglich für die Unterstützung der Markteinführung
- Verschiedene Termine pro Jahr, abhängig von den Themen der Teilprogramme
- Entscheidungsdauer von Antrag bis Projektbeginn vier bis acht Monate

Programmbeispiel 2:
Stärkung des Innovationspotenzials im Bereich der Spitzenforschung für Elektroniksysteme

Das Programm KMU-Innovativ: Elektroniksysteme fördert kleine und mittlere Unternehmen bis 250 Mitarbeiter und eingeschränkt auch größere Unternehmen. In diesem Programm sind anwendungsorientierte Forschungsarbeiten beispielsweise im Bereich der Sensorik, der Aktorik, der Aufbau- und Verbindungstechnik, bei Komponenten und in der Systemintegration möglich. Fokus sind Einsatzgebiete in Elektronikanwenderbranchen wie der Industrieautomatisierung, der intelligenten Mobilität, der Medizintechnik und der Energietechnik.

Fördersteckbrief Programm KMU-Innovativ Elektroniksysteme des Bundesministeriums für Bildung und Forschung:

- Schwerpunkt bei anwendungsorientierter Forschung und der Umsetzung von Forschungsergebnissen in eine Produktentwicklung
- Förderkriterien sind Exzellenz, Innovationsgrad und Relevanz im Thema Elektroniksysteme
- Förderung kleiner und mittlerer Unternehmen bis 250 Mitarbeiter, eingeschränkt auch Teilnahme größerer Unternehmen möglich
- Förderung von Einzelprojekten und kleinen Verbundprojekten mit typisch bis zu vier Partnern
- Zuschuss von 50 bis 60 Prozent der Kosten von Forschung und Entwicklung
- Zuschussvolumen typisch 500.000 Euro bis 1,5 Millionen Euro
- Zwei Termine pro Jahr: 15. April / 15. Oktober für Skizzen, danach Antrag
- Entscheidungsdauer von Skizze bis Projektbeginn sechs bis neun Monate

Programmbeispiel 3:
Förderung für die Entwicklung neuer Produkte, Verfahren oder technischer Dienstleistung

Das Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) ist ein bundesweites technologie- und branchenoffenes Förderprogramm für mittelständische Unternehmen und für Forschungseinrichtungen, die mit diesen zusammenarbeiten. ZIM fördert die Entwicklung konkreter neuer Produkte, die mit ihren Funktionen, Parametern oder Merkmalen die bisherigen Produkte, Verfahren oder technischen Dienstleistungen deutlich übertreffen. Das fachlich und thematisch offene Programm soll die konkrete technologische Leistungsfähigkeit und die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen erhöhen.

Fördersteckbrief ZIM-Programm:

Schwerpunkt bei konkreten Produktentwicklungen, auch Entwicklung von Verfahren und technischen Dienstleistungen möglich

- Förderkriterien sind Innovationshöhe, Orientierung am internationalen Stand der Technik sowie ein erhebliches, aber kalkulierbares technisches Risiko
- Förderung von Einzelprojekten oder Kooperationsprojekten von kleinen und mittleren Unternehmen mit Forschungseinrichtungen oder Hochschulen
- Typische Fördersätze im Bereich 40 bis 55 Prozent bei einem maximalen Projektvolumen von 380.000 Euro pro Unternehmen
- Antragstellung ist jederzeit möglich
- Entscheidungsdauer zwischen Antrag und Projektbeginn drei bis sechs Monate

Programmbeispiel 4:

Konkrete Innovationen zur Marktreife bringen mit Förderung der EU

Das EU-Förderprogramm KMU-Instrument richtet sich ausschließlich an kleine und mittlere Unternehmen mit Wachstumspotenzial, einer Idee mit hohem Marktpotenzial und Innovationsgrad sowie europäisch bzw. international ausgerichteter Geschäftstätigkeit. Im Programm Fast Track to Innovation sind zusätzlich zu KMU auch Großunternehmen, Hochschulen und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen förderfähig. In beiden Programmen werden Arbeiten zur Markteinführung von Innovationen gefördert. Dazu gehören Aktivitäten wie Demonstration, Tests, Erstellung von Prototypen, Pilotmaßnahmen, Scale-up, Zulassung, Miniaturisierung oder Design bis hin zur Marktumsetzung.

Fördersteckbrief EU-Programme KMU-Instrument und Fast Track to Innovation:

- Förderung zur Erlangung der Marktreife und Markteinführung von innovativen Produkten, Verfahren oder Dienstleistungen
- Förderkriterien sind das Marktpotenzial, der europäische Mehrwert und das Alleinstellungsmerkmal. Bewertet wird nach Kriterien wie Innovationshöhe (Excellence), Auswirkung auf den europäischen Markt und das Unternehmen (Impact) und Qualität der Umsetzung (Implementation)
- KMU-Instrument: Förderung von einzelnen Unternehmen bis zu 2,5 Millionen Euro bei 70 Prozent Förderquote
- Fast Track to Innovation: Förderung von kleinen Verbänden von drei bis fünf Partnern mit bis zu drei Millionen Euro bei 70 Prozent Förderquote für Unternehmen und 100 Prozent Förderquote für Hochschulen und außeruniversitäre Institute
- Antragstellung zu festen Terminen, üblicherweise viermal pro Jahr
- Entscheidungsdauer zwischen Antrag und Projektbeginn: drei bis vier Monate

15.5 Vorgehensweise bei der Inanspruchnahme öffentlicher Innovationsförderprogramme

Mit den dargestellten Innovationsförderprogrammen und vielen weiteren nationalen und europäischen Programmen können alle wesentlichen Aktivitäten von der grundlegenden Idee für ein neues Produkt bis zur Zulassung und Markteinführung gefördert werden. Die Förderquoten sind mit typischerweise 25 bis 70 Prozent der Kosten eines Unternehmens attraktiv. Dementsprechend ist die Nachfrage nach solchen Fördermitteln meistens deutlich höher als das Programmvolumen. In vielen Programmen kann nur ein Teil der Anträge gefördert werden.

Wenn ein Unternehmen sich entschließt, für die Entwicklung oder Markteinführung einer Innovation Fördermittel zu nutzen, sollten folgende beiden Analysen vorab durchgeführt werden:

Schritt 1 – Vorbereitung:

Analyse des Bedarfs für den Einsatz von Fördermitteln und der Chancen eines Antrags

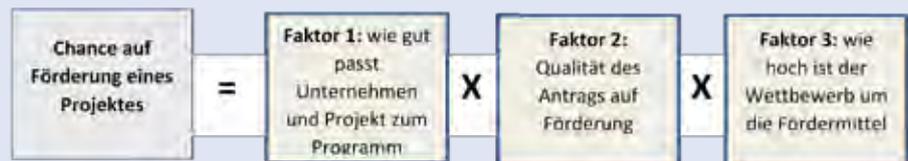
Bei der Bedarfsanalyse werden beispielsweise folgende Fragen gestellt:

- Welche Priorität hat die geplante Innovation für das Unternehmen?
- Kann das Unternehmen die Innovation auch ohne Förderung entwickeln?
- Welcher finanzielle Umfang einer Förderung ist zu welchem Zeitpunkt notwendig?
- Werden Entwicklungs- bzw. Markteinführungspartner benötigt, die gegebenenfalls bei Verzicht auf Fördermittel direkt bezahlt werden müssen?

Die Chancen eines Antrags auf Fördermittel sind in vielen Fällen nur schwer einschätzbar. Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass viele Fördermittel in wettbewerbsähnlichen Verfahren vergeben werden und die konkurrierenden Ideen und Anträge nicht bekannt sind.

Für eine Einschätzung der Chancen eines Antrags und für die Auswahl eines Programms können folgende grundlegenden Faktoren herangezogen werden:

Abb. 15.5: Faktorenbetrachtung zur Abschätzung der Chancen eines Förderantrags



Quelle: EurA

Wenn die Analyse des Bedarfs und der Chancen für eine Nutzung eines Förderprogramms spricht, geht es üblicherweise an das Erstellen des Förderantrags.

Schritt 2 – Antragstellung:

Erstellung des Förderantrags und Einreichung

Typische Bestandteile von Förderanträgen sind die Erläuterung der technologischen Grundlagen des innovativen Produkts, die Ziele des Projekts, die besonderen Eigenschaften bezüglich der Kundenanforderungen und des Wettbewerbs. Zur Projektbeschreibung gehören eine Zeit- und Ressourcenplanung, die Beurteilung der Marktsituation und die Beschreibung der kommerziellen Umsetzung. Neben dem fachlich-inhaltlichen Teil eines Projektantrags gehören Angaben zum Unternehmen, zur wirtschaftlichen Situation, Personal- und Finanzdaten, Planungsrechnungen und bei Zusammenarbeit mit Projektpartnern auch Kooperationsverträge zu den Unterlagen, die mit Antragstellung eingereicht werden müssen. Der Umfang von Förderanträgen kann, abhängig von den konkreten Anforderungen des Programms, von zehn bis 15 Seiten bis zu mehr als 100 Seiten betragen.

Die Dokumentation der Bestandteile eines Antrags ist Voraussetzung der fristgerechten Einreichung. Leider nutzen Förderprogramme keine einheitliche Gliederung. Auch die Einreichungsprozesse können sehr unterschiedlich sein: Eingang per Brief zu einem beliebigen Termin, elektronische Einreichung über ein Internet-Portal und zusätzlich schriftlich in mehrfacher Ausfertigung oder ausschließlich elektronische Einreichung nach Erfassung und Vorprüfung des antragsstellenden Unternehmens sind typische Verfahren.

Schritt 3 – Projektdurchführung:

Entgegennahme von Fördermitteln

Bei positiver Entscheidung des Förderprogramms erhält das Unternehmen einen Fördermittelbescheid, gegebenenfalls auch eine Bitte um Einreichung zusätzlicher Unterlagen.

Die fachlich-inhaltliche Projektdurchführung wird von dem geförderten Unternehmen verantwortlich durchgeführt. Bei Innovationsprojekten gibt es immer Änderungen der Projektplanungen, dies wird von den Förderprogrammen auch meistens akzeptiert, muss aber immer dokumentiert und begründet werden. Neben der Durchführung der Forschungs- oder Entwicklungsarbeit ist die Abrechnung der Fördermittel eine wichtige Aufgabe.

Hierzu gehört zunächst die Bewertung des Fördermittelbescheids und seiner Nebenbestimmungen. Dies sollte unbedingt vollständig und in allen Details durchgeführt werden. Typische Bestandteile bei der Durchführung öffentlich geförderter Innovationsprojekte sind ein umfassendes Projektcontrolling (Überwachung Projektfinanzen, Berichtstermine, Fristen, Meilensteine etc.) sowie eine detaillierte Belegung der Projektkosten inklusive Soll-Ist-Vergleichen, Erstellung der Abrufunterlagen für die Fördermittel, Prüfung der Förderfähigkeit von Kosten etc.

Ein erfolgreicher Projektabschluss ermöglicht die Markteinführung innovativer Produkte oder Dienstleistungen bzw. die Nutzung neuer Verfahren. Mit Abschluss der Förderung besteht üblicherweise keine weitere Verpflichtung gegenüber dem Förderprogramm.

16 Forschung und Bildung – Investitionen in Köpfe und Zukunft



Quelle: Gorodenkoff / Fotolia.com

Das digitale Deutschland wird durch eine immer weiter voranschreitende Vernetzung gekennzeichnet sein. Die Grundlage für die Entwicklung sind neue Informations- und Kommunikationstechnologien. Eine Stärkung der Schlüsseltechnologien der Digitalisierung wird unerlässlich sein. Der Schlüssel für eine erfolgreiche digitale Agenda liegt daher in einer darauf ausgerichteten Forschungs- und Bildungspolitik. Die Elektroindustrie ist mit einem breiten Produktspektrum von elektronischen Bauelementen bis zu Systemlösungen der Automation, der Energie-, Verkehrs-, Sicherheitstechnik und der Gesundheitswirtschaft der wichtigste Ideengeber für Produkt- und Prozessinnovationen in der deutschen Industrie. Die Verfügbarkeit von Fachkräften wird dabei mit über die (internationale) Wettbewerbsfähigkeit der Elektroindustrie entscheiden.

Durch die Digitalisierung steigt auch der Bedarf an qualifizierten technischen Fachkräften. Der Mangel an Fachkräften, sowohl bei Facharbeitern in technischen Berufen als auch bei Ingenieuren der Elektro- und Informationstechnik, ist enorm. Zu wenige Jugendliche entscheiden sich nach ihrem Schulabschluss für einen MINT-Beruf. Die Abbruchquoten in MINT-Studiengängen sind zudem besonders hoch. Die Metall- und Elektroberufe sind heute bereits systemorientiert auf branchenübergreifende Zusammenarbeit ausgerichtet. Flexible Ausbildungsordnungen ermöglichen die Anpassung an die betrieblichen Erfordernisse und an die technische Entwicklung.

Daneben muss der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht (MINT-Fächer) an Schulen und eine entsprechende Lehrerfortbildung für techniknahen Unterricht gefördert werden. Zusätzlich muss eine Aufwertung der Digitalisierung in den Fachdidaktiken und in der Lehreraus- und -fortbildung erfolgen. Zur Deckung des Bedarfs an neuen Fachkräften sind der Erhalt einer flächendeckenden Versorgung mit Berufsschulen und, damit verbunden, attraktivere Stellenangebote und Arbeitsbedingungen für Berufsschullehrer unerlässlich.

Auch in den Unternehmen und bei dem Mitarbeiter selbst muss ein Umdenken geschehen. Die Arbeitsanforderungen werden sich durch ein immer höheres Maß an Komplexität auszeichnen. Das Denken in interdisziplinären Zusammenhängen wird entscheidend. Die Mitarbeiter müssen sich mit veränderten Problemlösungsanforderungen auseinandersetzen. Prozesse und Wertschöpfungsnetze prägen künftig den Workflow. Facharbeiter werden ein ganzheitliches Verständnis der Zusammenhänge entwickeln müssen, Ingenieure benötigen übergreifende Kompetenzen in Systems Engineering und Informatik. Vernetzung beginnt in den Köpfen. Deshalb brauchen wir neben einer zeitgemäßen Lernumgebung und Förderung der digitalen Kompetenz eine Weiterbildungsinitiative und gezielte Investitionen in Köpfe. Flankiert wird die Entwicklung durch den Aufbau neuer Studiengänge an der Schnittstelle zwischen digitalen und analogen Technologien.

17 Schlusswort

Es war ein hartes Stück Arbeit, das von vielen engagierten Verbandsmitgliedern über einen doch sehr langen Zeitraum geleistet wurde: ein herzliches „Dankeschön“ für das erbrachte Engagement und das nun als Kompendium niedergeschriebene Fachwissen.

Das Werk braucht sich ganz bestimmt nicht zu verstecken – im Gegenteil, es glänzt mit Inhalt und Expertise, und das auf eine Weise, die vielen Lesern eine Welt nahebringt, wie sie morgen sein kann und größtenteils bestimmt auch sein wird. Die Elektroindustrie trägt zu diesem Wandel in einem erheblichen Maße bei und hat sogar in vielen Bereichen eine herausragende Führungsrolle inne. Das gelingt aber nur, wenn alle an einem Strang ziehen, was wiederum ermöglicht wird durch einen Verband wie den ZVEI – deshalb hier auch der Dank an die hauptamtlichen Mitarbeiter, die immer mit Rat und Tat und vor allem aber mit ausdauernder Koordinationsleistung zur Seite standen.

Eine Komplexität unter stetiger Veränderung anschaulich darzustellen und dazu auch noch die Belange von verschiedensten Beteiligten aus Wirtschaft und Politik, aber auch von anderen Interessenspartnern nicht nur zu verstehen, sondern in Wort und Bild zu fassen, sodass ein erheblicher Mehrwert für alle entsteht, bedarf einer Leitfunktion mit Vorbildcharakter und einer erheblichen Motivationsfähigkeit – nicht nur für sich selbst, sondern für alle Beteiligten. In diesem Sinne möchte ich mich vor allem bei Herrn Dr. Andreas Lock bedanken. Er stand mit all seinem Wissen und seiner Ausdauer dem Projekt von Beginn an vor und hat auch persönlich maßgeblich zum Erfolg beigetragen.

Zuletzt noch ein kleiner Ausblick: Da es sich mit dieser Ausgabe bereits um die vierte Version der Technologie-Roadmap handelt, möchten wir schon jetzt an die Zukunft denken und streben auch zukünftig eine erfolgreiche Verbandsarbeit an, indem wir weiterhin an Publikationen wie dieser arbeiten. Gemäß dem Motto „Ein Verband gibt mehr zurück als man gibt“ würden wir uns freuen, auch weiterhin all die interessantesten Themen im ZVEI fortführen zu können, und hoffen auf Ihre Mitarbeit.

Bernd Enser
Vorsitzender der „Technischen Kommission“

18 Redaktionsteams

An dieser Stelle einen herzlichen Dank an alle Beteiligten für die tatkräftige Unterstützung bei der Erstellung der Broschüre.

Großer Dank gilt insbesondere Herrn Enser als Vorsitzenden der Technischen Kommission der Fachverbände Electronic Components and Systems und PCB and Electronic Systems und auch Herrn Dr. Lock als Vorsitzenden des Arbeitskreises Technologieplattform für die Koordination und das Engagement.

Dr. Andreas Lock, Robert Bosch (Kordinator)
Bernd Enser, Semikron Elektronik (Kordinator)
Volker Kaiser, ZVEI (Projektleitung)
Patricia Lutz, ZVEI (Redaktionsassistentin)

Franz Joachim Roßmann, B2B-Kommunikation
Dr. Martin Schleicher, Elektrobit
Dr. Harald Eifert, EurA
Heiko Pabst, EPSa Elektronik & Präzisionsbau Saalfeld

Joachim Uffelmann, ifm ecomatic
Hans Ehm, Infineon Technologies
Bodo Eilken, Infineon Technologies
Jochim Weitzel, Infineon Technologies
Dr. Günter Kowalski
Unternehmensconsulting & Projektmanagement
Silke Neuschaefer, Molex Deutschland
Dr. Andrea Bräuning, Robert Bosch
Dr. Andreas Lock, Robert Bosch
Dr. Johannes Sommerhäuser, Robert Bosch
Dr. Alexander Würz-Wessel, Robert Bosch
Bernd Enser, Semikron Elektronik
Wolfgang Zißler, Spinner
Kilian Schmück, Universität St Gallen – Bmi Lab
Iris Stroh, Weka Fachmedien
Dr. Oliver Blank, ZVEI
Hans-Peter Bursig, ZVEI
Volker Kaiser, ZVEI
Lukas Linke, ZVEI
Sarah Linke, ZVEI

Redaktionsteam Kapitel Passive Bauelemente:

Dr. Jan Marien, Isabellenhütte Heusler (Kapitelverantwortlicher)
Dr. Thomas Ebel, FTCAP
Matthias Harder, Kemet Electronics
Frank Lipski, Kemet Electronics
Dr. Raimund Ratzl, Miba Energy Holding
Markus Buheitel, Murata Elektronik
Andreas Kürzdörfer, Murata Elektronik
Reinhard Sperlich, Murata Elektronik
Helmut Philipowski, Panasonic Industry Europe
Ralph M. Bronold, TDK Electronics
Ralph Lutsche, TDK Electronics
Philipp Laurer, TDK Electronics
Carsten Juergens, TDK Electronics
Ulrich Stitz, Schaffner Deutschland
Thomas Pfeifer, Vacuumschmelze
Harry Hassfurter, Vishay Electronic
Dr. Marcus Dietrich, ZVEI

Redaktionsteam Kapitel Steckverbinder:

Silke Neuschaefer, Molex Deutschland (Kapitelverantwortliche)
Claus Burger, Franz Binder
Jana Wagner, Franz Binder
Andre Beneke, Harting Electric
Volker Uphoff, Harting Electric
Achim Raad, ITT Cannon
Frank Steckling, Lear Corporation
Dirk Pfaffenbach, Lumberg Connect
Joachim Borst, Metz Connect
Jürgen Zeltwanger, Murrelektronik
Thomas Hinder, Phoenix Contact
Bernd Zimmerhäckel, Spinner
Wolfgang Zißler, Spinner
Oliver Barabas, Stäubli Electrical Connectors
Alexander Hornung, Stäubli Electrical Connectors
Dr. Michael Hilgner, TE Connectivity Germany
Dr. Helge Schmidt, TE Connectivity Germany
Tosha Hübert, Weidmüller Interface
Dr. Sascha Nolte, Weidmüller Interface
Markus Dorscht, Wieland Electric
Volker Kaiser, ZVEI

Redaktionsteam Kapitel Leiterplatte:

Ralph Fiehler, KSG (Kapitelverantwortlicher)
Elke Krüger, CCI Eurolam
Johann Hackl, Häusermann
Dr. Anna Graf, ISOLA
Rüdiger Dietrich, Lackwerke Peters
Silke Neuschäfer, Molex Deutschland
Helmut Schmucker, Rohde & Schwarz
Thomas Gottwald, Schweizer Electronic
Andreas Schilpp, Würth Elektronik
Dr. Alina Schreivogel, Würth Elektronik
Bernd Schröder, Würth Elektronik
Peter Trunz, ZVEI

Redaktionsteam Kapitel

Integrierte Schichtschaltungen (ISS):

Franz Bechtold, VIA electronic
(Kapitelverantwortlicher)
Peter Weigand, DuPont de Nemours
Stefan Flick, Heraeus Deutschland
Dirk Schönherr, LUST Hybrid-Technik
Uwe Mirschberger, Murata Elektronik
Dr. Sebastian Brunner, Qualcomm Austria RFFE
Dr. Alexander Kaiser, Reinhardt Microtech
Dr. Michael Bork, RHe Microsystems
Dr. Josef Weber, Robert Bosch
Walter Distler, Siegert electronic
Dr. Mareike Haaß, Turck Duotec
Bernd Thyzel, Turck Duotec
Dr. Christoph Weiß, ZVEI

Redaktionsteam Kapitel

Elektronische Baugruppen:

Dr. Wolfgang Stark, Fujitsu Technology
Solutions (Kapitelverantwortlicher)
Ralf Blömer, ASM Assembly Systems
Norbert Heilmann, ASM Assembly Systems
Hubert Egger, ASM Assembly Systems
Raimund Antonitsch, cms electronics
Alexander Wolf, cms electronics
Heiko Pabst, EPSa Elektronik & Präzisionsbau
Saalfeld
Dr. Jörg Schambach, Göpel electronic
Matthias Müller, Göpel electronic
Enrico Zimmermann, Göpel electronic
Stefan Schröder, Neways Electronics Riesa
Jan Elste, Viscom
Rebekka Malten, Viscom
Torsten Pelzer, Viscom
Thomas Mückl, Zollner Elektronik
Dr. Christoph Weiß, ZVEI

Redaktionsteam Kapitel Materialien:

Dr. Robert Zauter, Wieland Werke
(Kapitelverantwortlicher)
Thomas Honig, Doduco Contacts and Refining
Volker Behrens, Doduco Contacts and Refining
Uwe Dreißigacker, Doduco Solutions
Dr. Joachim Ganz, Doduco Solutions
Heiko Knoll, Sensitec

19 Literaturverzeichnis

- ZVEI - Integrierte Roadmap III Automation 2015+ – Nachhaltige Rohstoffversorgung: Recycling als Rohstoffquelle
- ZVEI – Stellungnahme zum Grünbuch Energieeffizienz (Diskussionspapier vom BMWi, Stand August 2016)
- ZVEI – Der Fachverband Kabel und isolierte Drähte im Überblick 2016/2017
- ZVEI – Aufbruch in ein smartes industrielles Wissenszeitalter
- ZVEI – Positionspapier Industrie 4.0: Auf dem Weg zur smarten Fabrik – die Elektroindustrie geht voran
- Eine erfolgreiche Nachhaltigkeitsstrategie am Beispiel der Infineon Technologies AG, Auszug aus dem Bericht „Nachhaltigkeit bei Infineon 2017“
- Köhler, P.; Six, B.; Michels, J. S. (2015). Industrie 4.0: Ein Überblick. In: Köhler-Schute, C. (Hrsg.), Industrie 4.0: Ein praxisorientierter Ansatz. Berlin: KS-Energy
- ZVEI (Hrsg.) (2015). Elektrische Verbindungstechnik für Industrie 4.0? Herausforderungen an die elektrische Verbindungstechnik durch den Einzug von „Industrie 4.0“-Konzepten. White Paper des ZVEI Arbeitskreises Systemaspekte
- ZVEI – Smart Building: der Nutzer im Mittelpunkt, März 2017
- Castells, M. (2001). Space of Flows, Space of Places: Materials for a Theory of Urbanism in the Information Age. The City Reader, Fifth Edition, S. 572 - 582. London: Routledge Taylor and Francis Group.
- Eger, J. (2005). Biography John M. Eger President World Foundation for Smart Communities. [Online] Available: <http://newsroom.cisco.com/dlls/2005/bio_john_eger.pdf> [accessed: 23.10.2013]
- Greenfield, A. (2013). Against the Smart City, Edition 1.0, S. 76. New York
- Hall, R. E.; Bowerman, B.; Braverman, J.; Taylor, J.; Todosow, H.; von Wimmersperg, U. (2000). The vision of a smart city. Paper presented at 2nd International Life Extension Technology Workshop, 28 September 2000, p. 1. Paris: [Online] Available: <<http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/773961>> [accessed: 16.10.2013]
- Hatzelhoffer, L.; Humboldt, K.; Lobeck, M.; Wiegandt, C. (2012). Smart City konkret, S. 21, 96, 98: jovis
- Haque, U. (2012). Surely there's a smarter approach to smart cities? Ideas Bank, London: WIRED.CO.UK. [Online] Available: <<http://www.wired.co.uk/article/potential-of-smarter-cities-beyond-ibm-and-cisco>> [accessed: 27.05.2016]
- Harvey, D. (2003). The Right to the City. International Journal of Urban and Regional Research, 27.4, S. 939 - 941. Oxford: Blackwell Publishing Ltd.
- Hernández-Muñoz, J. M.; Bernat Vercher, J.; Muñoz, L.; Galache, J. A.; Presser, M.; Hernández Gómez, L. A.; Pettersson, J. (2013). Smart Cities at the Forefront of the Future Internet, S. 447. [Online] Available: <http://www.smartsantander.eu/downloads/Presentations/fia_book_2011_smartcities.pdf> [accessed: 13.10.2013]
- IBM, (2014). Smarter Cities – New cognitive approaches to long-standing challenges, Armonk: IBM Corporation. [Online] Available: <http://www.ibm.com/smarterplanet/us/en/smarter_cities/overview/> [accessed: 14.08.2016]
- Kahneman, D. (2013). Creatures of habit. OrganisationsEntwicklung No.1, 2013, No.1, 2013, S. 1 - 9: OrganisationsEntwicklung
- ZVEI (2018). 100 Jahre Innovation für Menschen – der ZVEI feiert Geburtstag; 15/2018. [Online] Available: <<https://www.zvei.org/presse-medien/pressebereich/100-jahre-innovation-fuer-menschen-der-zvei-feiert-geburtstag/>> [accessed: 05.03.2018]
- Gassmann, O.; Csik, M. & Frankenberger, K. (2013). Geschäftsmodelle entwickeln: 55 innovative Konzepte mit dem St. Galler Business Model Navigator. München: Hanser
- Osterwalder, A. & Pigneur, Y. (2010). Business Model Generation. Hoboken NJ: John Wiley & Sons
- Wirtz, B. W. (2010). Business Model Management: Design – Instrumente – Erfolgsfaktoren von Geschäftsmodellen. Wiesbaden



ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-
und Elektronikindustrie e.V.

Lyoner Straße 9
60528 Frankfurt am Main

Telefon: +49 69 6302-0

Fax: +49 69 6302-317

E-Mail: zvei@zvei.org

www.zvei.org