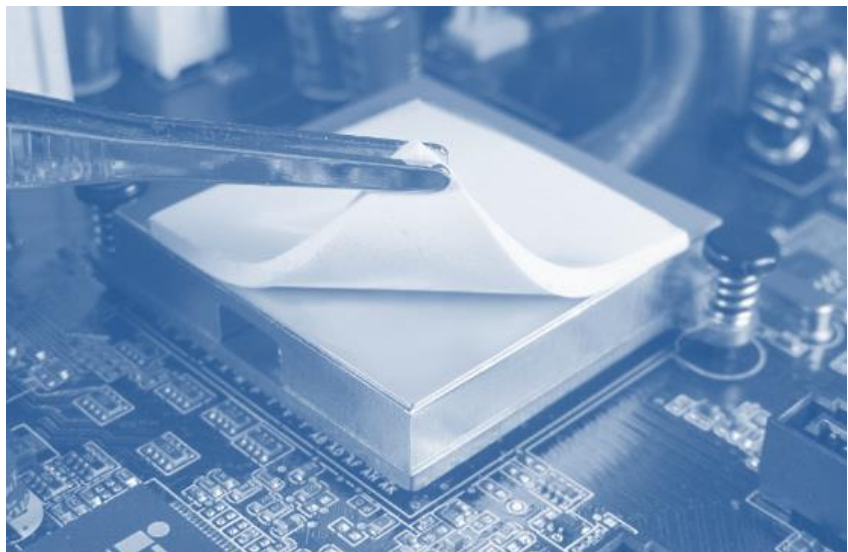


Leitfaden

Strategien zum Wärmemanagement





Die Elektroindustrie

Impressum

Leitfaden

Strategien zum Wärmemanagement
in der Elektro- und Elektronikindustrie

Herausgeber:

ZVEI e.V.

Verband der Elektro- und Digitalindustrie
Fachverband Electrical Winding & Insulation Systems
Lyoner Str. 9
60528 Frankfurt am Main

Verantwortlich:

Winter, Dr.-Ing. Rolf

Telefon: +49 69 6302-402

Fax: +49 69 6302-407

E-Mail: winter@zvei.org

www.zvei.org/ewis

Autoren:

Baumgarten, Gunther – Elantas

Becker, Stefan – Sekels

Frank, Julia – Ephy-Mess

Franken, Carina – Wickeder Westfalenstahl

Friederici, Gerald – CMC Klebetechnik

Gieser, Harald – Isotek

Hillemacher, Dr.-Ing. Bernd – en2Aix – energy engineering Aachen

Hollstein, Dr. Werner – Huntsman

Kohlhof, Jens – Ephy-Mess

Koschmieder, Ulf – Axalta

Kübler, Frank – Krempel

Neumann, Alexander – VonRoll

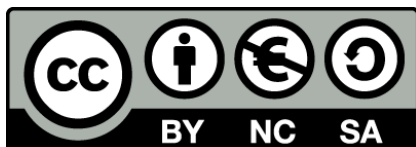
Radbruch, Jens – TMC Sensortechnik

Rohlf's, Prof. Dr. Dr. Wilko – Universität Twente / en2Aix

Seifert; Stefan – WEVO

Speil, Bernd – SIKA

Oktober 2021



Dieses Werk ist lizenziert unter einer
Creative Commons Namensnennung,
Nicht-kommerziell, Weitergabe unter
gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz.
Trotz größter Sorgfalt übernimmt der ZVEI für
Vollständigkeit und Richtigkeit der Inhalte keine Gewähr.

Inhaltsverzeichnis

	1. Einleitung	5
	2. Wärme und Temperatur	5
Theorie	3. Physikalische Grundlagen der Wärmeleitung (Entwärmung)	7
	Thermische Widerstände – Analogie zwischen Wärmeübertragung und elektrischem Strom	9
	Wärmeleitung in heterogenen Systemen – Verschaltung von Widerständen	10
	Mehrschichtige Materialien – Reihenschaltung von Widerständen	10
	Composite Materialien - Parallelschaltung verschiedenen Widerständen	11
	Wärmeleitung in Elektroisolierstoffen	12
	Bedeutung der Grenzflächen für die Wärmeleitung - Kontaktwärmeübertragung	13
		4. Produkte für die Praxis
Praxis	Isolationsfolien	15
	Isolationsfolien mit verbesserter thermischer Leitfähigkeit	16
	Beschichtungen	16
	Silikonkautschuk	16
	Mehrschichtisolationssysteme	17
	Wärmeleitpasten	18
	Harze, Tränklacke, Vergussmassen	19
	5. Ansätze zur Verbesserung der Wärmeableitung	21
	Vermeidung von Lufteinschlüssen	21
	Erhöhung des Füllfaktors	21
	Vollverguss	23
	Verwendung eines Metall-Entwärmerblechs (Metall-Gapfiller)	24
	Wärmeableitung am Beispiel von leistungsstarken MOSFET Modulen	25
	6. Testverfahren Wärmeleitung	26
	Mess- und Prüfsystem zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit heterogener Materialien	26
7. Fazit	28	
8. Literaturverzeichnis	29	
9. Bildnachweis	29	
10. Relevante Normen	30	

1. Einleitung

Anforderungen wie Energieeffizienz und Miniaturisierung erhöhen seit Jahren die Energiedichte von elektrischen und elektronischen Geräten. Dadurch steigen auch die Anforderungen an das Wärmemanagement. Kompakte Einrichtungen wie Frequenzumrichter, Elektromotoren, Batterien und Batteriemanagementsysteme, On-Board-Charger oder Schaltnetzteile erfordern ein durchdachtes, einfaches und ausfallsicheres Entwärmungskonzept, um Schäden durch Hitzestaus („Hot Spots“) zu vermeiden.

Bei der Entwicklung geeigneter Wärmemanagement-Konzepte führen die beiden Anforderungen einer a) guten thermischen Leitfähigkeit und b) einer guten elektrischen Isolation zu einem Zielkonflikt, da die elektrische und thermische Leitfähigkeit in den meisten Materialien eng miteinander verknüpft ist.

Dieser an Einsteiger und Spezialisten gerichtete Leitfaden soll mögliche Lösungsansätze aufzeigen als auch eine Einführung und Hilfestellung in Bezug auf den Einsatz von geeigneten Werkstoffen geben.

2. Wärme und Temperatur

Wärme ist eine Form von Energie und wird in der Regel in der Einheit Watt [W] angegeben. Auf der molekularen Ebene entspricht die Wärmeenergie der mikroskopischen Bewegung, sowie den Schwingungen von Atomen und Molekülen.

Neben der Wärmeenergie nimmt die Temperatur eine entscheidende Rolle in der Wärmeübertragung ein. Die Temperatur in der Einheit Kelvin [K] oder Celsius [°C] beschreibt das Potential der Wärmeenergie, ähnlich wie die Spannung U [V] das elektrische Potential beschreibt. Ein Wärmestrom kann nur von einem Ort höherer Temperatur (Potential) zu einem Ort niedrigerer Temperatur fließen. Temperaturunterschiede streben danach sich auszugleichen. Dieser Ausgleichsprozess ist auch unter dem „2. Hauptsatz der Thermodynamik“ bekannt. Am absoluten Nullpunkt, bei 0 K bzw. -273,15 °C, befinden sich alle Atome und Moleküle in Ruhe. Wärmeenergie ist bei dieser Temperatur nicht mehr vorhanden.

Die Übertragung von Wärme durch den Wärmetransport kann makroskopisch betrachtet auf drei Arten erfolgen, Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion (umgangssprachlich Wärmeströmung).

Bei der **Wärmestrahlung** wird die Energie mittels elektromagnetischer Wellen übertragen. Diese Form des Wärmetransports ist nicht an ein Medium gebunden und daher ist dies der einzige Wärmetransportmechanismus im Weltraum zwischen Himmelskörpern (siehe Abb. 1). Die Intensität der Wärmestrahlung steigt in der vierten Potenz mit der Temperatur ($\dot{Q} \propto T^4$). Bei Temperaturen unter 400°C ist die Wärmestrahlung daher in den meisten Fällen zu vernachlässigen. Oberhalb von 800°C dominiert hingegen der Transport durch Wärmestrahlung.

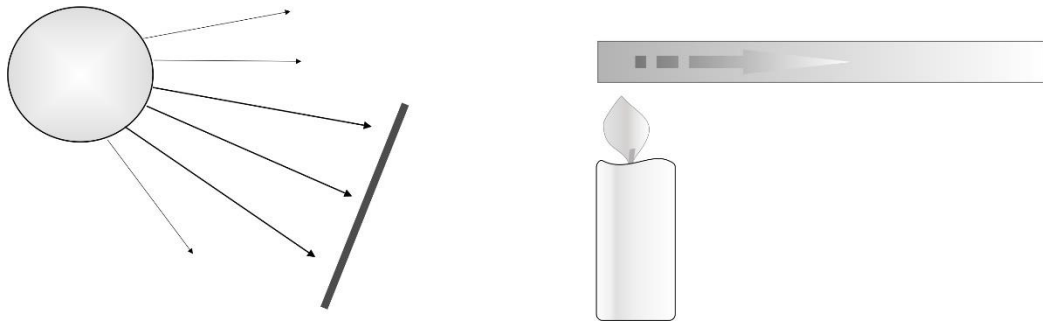


Abbildung 1: *Beispiel: Wärmestrahlung (Sonne) und Wärmeleitung in einem Festkörper (Metall). (Bildquelle: G. Friederici)*

Bei der **Wärmeleitung** wird die Wärmeenergie unmittelbar durch die Interaktion von benachbarten Atomen und Molekülen (z.B. durch Stöße oder Gitterschwingungen) übertragen. Innerhalb eines Festkörpers ist dies die einzige Art der Wärmeübertragung. In einem LötKolben zum Beispiel wird Wärme in der Heizpatrone durch einen Stromfluss generiert (Joulesche Wärme). Durch die gut leitenden Kupfer-Lötspitze wird die Wärmeenergie zur Lötstelle transportiert, um das Lot dort aufzuschmelzen.

Die **Konvektion** (Wärmeströmung) beschreibt den Transport von Wärmeenergie durch eine makroskopische Bewegung (Strömung) innerhalb einer Flüssigkeit oder eines Gases. Konvektion ist ein sehr effizienter Transportmechanismus sobald die Strömungsgeschwindigkeit ausreichend hoch ist. Aufgrund geringer Strömungsgeschwindigkeiten in unmittelbarer Nähe zur Wand ist die größte Herausforderung die Wärmeenergie von einem Bauteil zunächst durch die wandnahe Luft-/Fluidschicht (auch Grenzschicht genannt) zu transportieren. Zu diesem Zweck kommen in der Regel Kühlkörper mit Rippen zum Einsatz, welche die Austauschfläche zwischen Bauteil und Luft erheblich vergrößern.

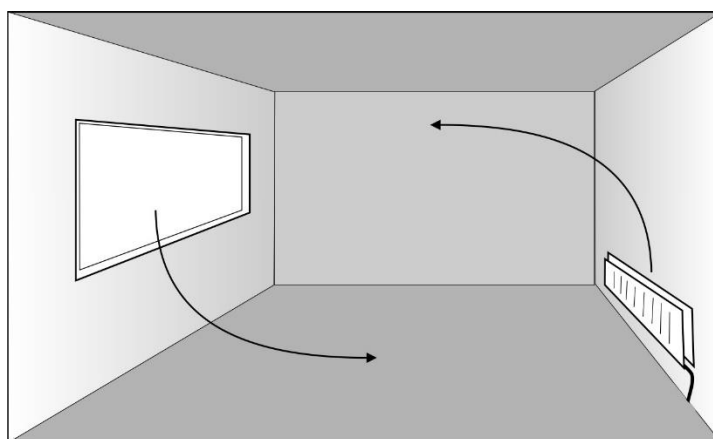


Abbildung 2: *Ungünstige Anordnung eines Heizkörpers erzeugt eine kalte Konvektionsströmung am Fußboden durch Luftzirkulation (Bildquelle: G. Friederici).*

3. Physikalische Grundlagen der Wärmeleitung (Entwärmung)

Jean Baptiste Joseph Fourier beschrieb im Jahr 1822 erstmals empirisch den Zusammenhang zwischen dem übertragenen Wärmestrom und der Temperaturdifferenz. Durch einen Körper konstanter Querschnittsfläche A [m²] fließt ein Wärmestrom \dot{Q} [W], der direkt proportional zum örtlichen Temperaturgradienten $(T_{ein} - T_{aus})/d$ [K/m] ist. Die verbindende Proportionalitätskonstante wird Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)] genannt.

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{d} A(T_{ein} - T_{aus}) \quad \text{Fourier'sche Wärmeleitungsgleichung}$$

- \dot{Q} = Wärmestrom [W]
- λ = spezifische Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]
- d = Schichtdicke des Objektes [m]
- A = Querschnittsfläche des Objektes [m²]
- T_{ein} = Temperatur der wärmeren Seite [°C]
- T_{aus} = Temperatur der kälteren Seite [°C]

In der physikalisch korrekten Schreibweise steht in der Fourier'schen Wärmeleitungsgleichung ein negatives Vorzeichen. Dieses beschreibt, dass die Wärme immer entgegen des Temperaturgradienten vom Ort höherer Temperatur zum Ort niedrigerer Temperatur fließt. Ein analoges Beispiel ist eine Kugel, die von allein nur bergab, und nicht bergauf rollen kann.

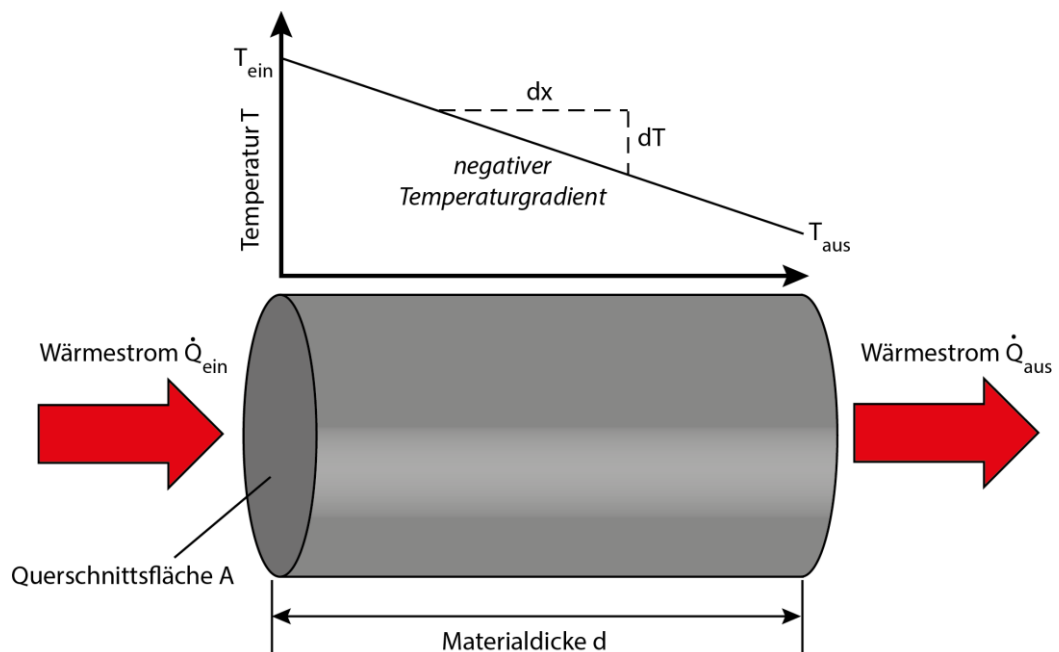


Abbildung 3: Skizze zur Veranschaulichung des Wärmetransports durch Wärmeleitung in einem homogenen Körper. (Bildquelle: W. Rohlf's)

Merke:

Bis auf wenige Ausnahmen besteht ein Zusammenhang zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und der thermischen Leitfähigkeit, vgl. auch Wiedemann-Franz'sches Gesetz.

Im Umkehrschluss gilt daher auch, dass elektrische Isolatoren auch schlechte Wärmeleiter sind. Ausnahmen sind z.B. Karbide und Oxide bestimmter Metalle sowie die strukturierteste Gitterformation des Kohlenstoffs: der Diamant.

Material	Spezifische Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	Elektrische Leitfähigkeit [S/m]
Kupfer	401	58×10^6
Aluminium	236	37×10^6
Eisen	80	10×10^6
Stahl	ca. 48 ... 58	ca. $1 \dots 9 \times 10^6$
Glas	0,76	$10^{-15} \dots 10^{-11}$
FR4 (Leiterplatte)	0,29... 1,059	2.5×10^{-15}
Polymere (ungefüllt)	ca. 0,1...0,3	1×10^{-5}
Kork	ca. 0,04	37×10^6
Wasser	0,556	$5 \dots 50 \times 10^{-3}$
Öle	ca. 0,13...0,15	$10..2000 \times 10^{-12}$
Luft	0,026	10×10^{-6}
Teflon	0,24	$10^{-25} \dots 10^{-23}$

Tabelle 1: Typische Werte spezifischer Wärmeleitfähigkeit sowie elektrischer Leitfähigkeit für verschiedene Werkstoffe.

(Quelle: Wikipedia und <https://www.thoughtco.com/table-of-electrical-resistivity-conductivity-60849>, <https://www.q8oils.com/de/allgemeine-industrie/elektrostatische-entladung-hydraulikoele/>)

Thermische Widerstände – Analogie zwischen Wärmeübertragung und elektrischem Strom

In Analogie zur Elektrotechnik lässt sich ein Wärmewiderstand als Kehrwert der thermischen Leitfähigkeit definieren.

$$R_{\text{el}} = \frac{d}{A \sigma} \quad \text{bzw.} \quad R_{\text{th}} = \frac{d}{A \lambda}$$

R_{el} = elektrischer Widerstand [Ω]

σ = spezifische elektrische Leitfähigkeit [$\text{m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)$]

R_{th} = thermischer Widerstand [K/W]

λ = spezifische thermische Leitfähigkeit [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]

d = Materialdicke in Richtung des Temperaturgradienten [m]

A = Querschnittsfläche des betrachteten Objektes [m^2]

Mit der Definition des thermischen Widerstands lässt sich eine Gleichung für den Wärmestrom analog dem Ohm'schen Gesetz formulieren

$$I = \frac{U}{R} \rho \quad \text{bzw.} \quad \dot{Q} = \frac{dT}{R_{\text{th}}}$$

Ursache für den elektrischen Strom ist die elektrische Spannung U . In Analogie ist die Ursache eines Wärmestroms das thermische Potenzial, der Temperaturunterschied zwischen zwei Orten.

Aus den Gleichungen ist ersichtlich, dass der thermische Widerstand sinkt, wenn sich die Fläche vergrößert oder sich die thermische Leitfähigkeit verbessert. Wird hingegen die Materialdicke d erhöht, so sinkt der Wärmestrom bei ansonsten identischen Bedingungen.

Wärmeleitung in heterogenen Systemen – Verschaltung von Widerständen

In der Praxis bestehen Bauteile oftmals aus einer Kombination unterschiedlicher Materialien mit verschiedenen thermischen und elektrischen Eigenschaften. Analog zu den Widerstandsregeln für den elektrischen Strom lassen sich auch thermische Widerstände zu einem Widerstandsnetzwerk zusammenfassen. Daher lassen sich wie bei der elektrischen Widerstandsberechnung die Kirchhoff'schen Regeln anwenden.

Mehrschichtige Materialien – Reihenschaltung von Widerständen

Ändert sich das Material in Richtung des Wärmestroms, so kann das Problem als eine Reihenschaltung von Widerständen betrachtet werden. Abbildung 4 zeigt eine dreischichtige Wand unterschiedlicher Materialien und Materialdicken. Material 1 und 3 sind von guter Wärmeleitfähigkeit, Material 2 ist ein Isolator.

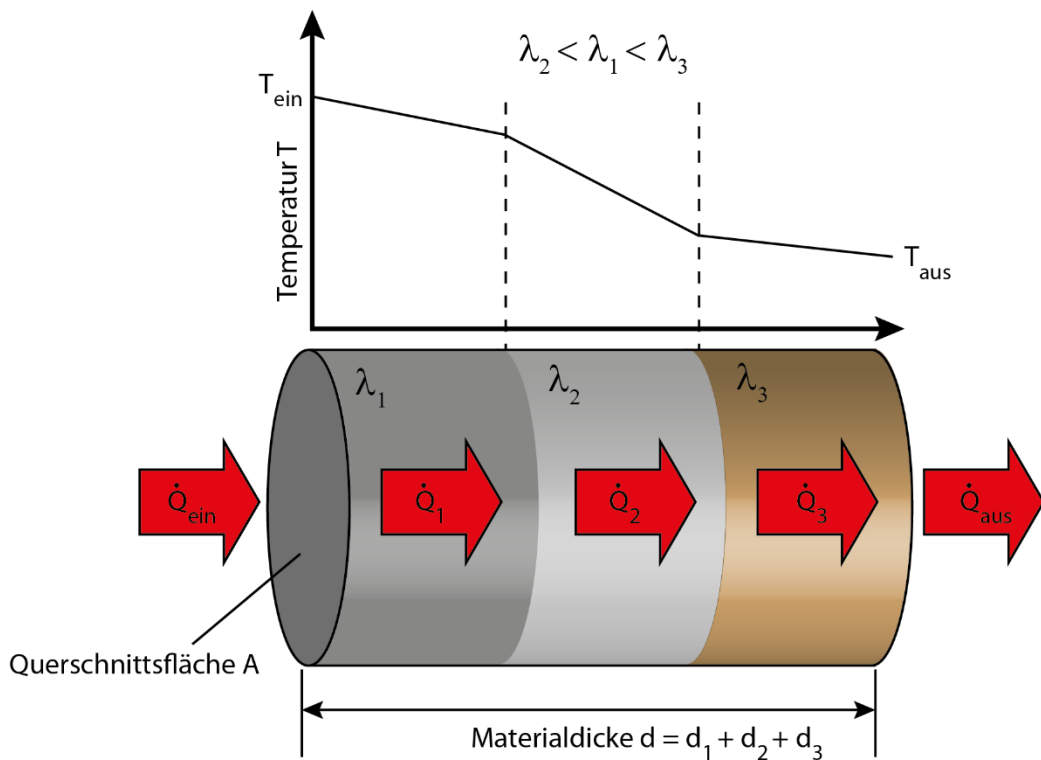


Abbildung 4: Skizze zur Veranschaulichung des Wärmetransports durch Wärmeleitung in einem mehrschichtigen Körper (Bildquelle: W. Rohlf's)

Der Gesamtwiderstand ergibt sich aus:

$$\text{Gleichung 1:} \quad R_{\text{ges}} = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{d_1}{A_1 \lambda_1} + \frac{d_2}{A_2 \lambda_2} + \frac{d_3}{A_3 \lambda_3}$$

Da der Wärmestrom, der durch die drei Materialien fließt, identisch ist ($\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 = \dot{Q}_3 = \dot{Q}_{\text{ges}}$), variiert nach dem Fourier'schen Gesetz (Gl. 1) der Temperaturabfall über die unterschiedlichen Materialien. In diesem Beispiel dominiert Material 2 den Gesamtwiderstand, sodass der stärkste Temperaturabfall in diesem Bereich erfolgt.

Composite Materialien - Parallelschaltung verschiedenen Widerständen

Ändert sich das Material quer zur Richtung des Wärmestroms, so entspricht dies einer Parallelschaltung von Widerständen. Abbildung 5 zeigt eine heterogene Materialkombination aus gut und schlecht leitendem Material.

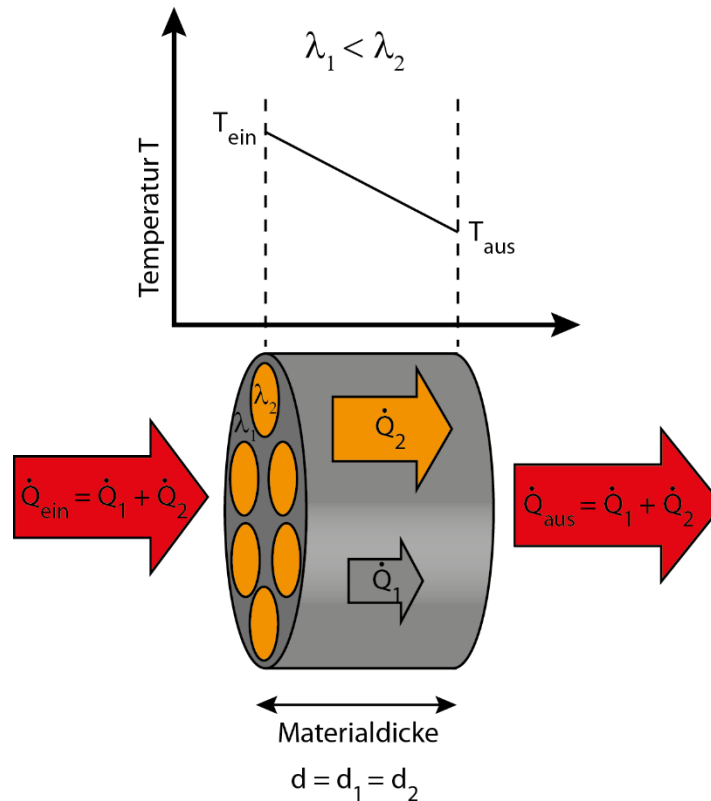


Abbildung 5: Skizze zur Veranschaulichung des Wärmetransports durch Wärmeleitung in einem Körper mit parallel angeordneten Materialien (Bildquelle: W. Rohlf's)

Der Gesamtwiderstand ergibt sich aus:

Gleichung 2

$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{A_1 \lambda_1}{d_1} + \frac{A_2 \lambda_2}{d_2}$$

Hier dominiert der gute Wärmeleiter. Der Wärmestrom durch die beiden Materialien ist in diesem Fall nicht identisch, wohl aber die Temperaturen T_{ein} und T_{aus} , sowie der Temperaturabfall innerhalb der Materialien.

In der Praxis kann eine solche Verschaltung gezielt eingesetzt werden, um Abwärme effizient abzuführen. Unerwünscht werden solche Wärme- bzw. Kältebrücken oftmals durch Verschraubungen herbeigeführt

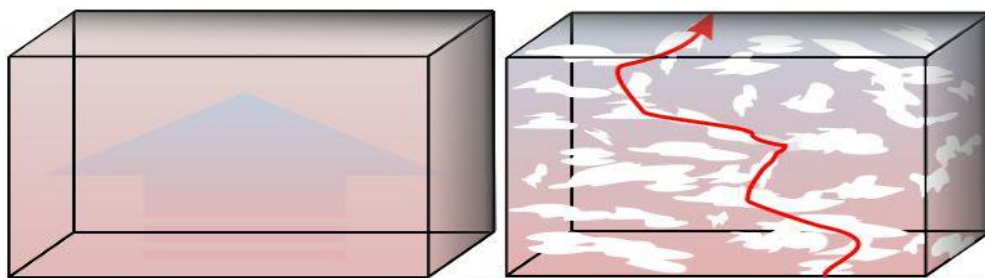
Die einfache Betrachtung von parallel bzw. in Reihe geschalteten Widerständen ist nur im Falle einer ein-dimensionalen Wärmeleitung möglich.

Wärmeleitung in Elektroisolierstoffen

Die Wärmeleitfähigkeit organischer Polymere in Reinform liegt im Bereich von 0,1 bis 0,3 W/(m·K). Ist eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit des Materials notwendig, so kann dies durch den Zusatz anderer, besser leitender Stoffe, auch Füllstoffe genannt, erreicht werden. Beispiel derartiger Füllstoffe sind anorganische Materialien wie Kupferpartikel oder Aluminiumoxidpartikel. Da sich diese Partikel in Polymeren nicht lösen lassen, liegt ein heterogenes, gefülltes System vor.

Bei kleinen Konzentrationen der Füllstoffpartikel (kein direkter Kontakt zwischen den Partikeln) kann die Wärmeleitfähigkeit durch eine einfache Mischungsregel berechnet werden.

Hier dominiert die „schlechte“ Wärmeleitfähigkeit des Polymers aufgrund des hohen Volumenanteils. Erst ab einem relativ hohen Füllgrad (Perkulationsgrenze, ca. 70% - 80%) erfolgt die Wärmeleitung zunehmend über den Füllstoff. Dies führt zu einem deutlichen Anstieg der Wärmeleitfähigkeit im Verbundmaterial.



Ungefüllter, homogener Werkstoff

verbesserte Wärmeleitung entlang der Füllstoffe

Abbildung 6: Organische Polymere haben eine geringe Wärmeleitfähigkeit (links). Durch Zugabe von Füllstoffen mit höherer Leitfähigkeit verbessert sich diese nach Erreichen der Perkulationsgrenze deutlich (rechts) (Bildquelle: G.Friederici)

Eine derart hohe Füllgrad bedeute jedoch auch, dass sich u.a. die mechanischen Eigenschaften des Isolationsmaterials deutlich verändern. Eine erhöhte Viskosität erschwert beispielsweise bei Vergussmassen die Vermeidung von Lufteinschlüssen.

Bedeutung der Grenzflächen für die Wärmeleitung - Kontaktwärmeübertragung

Die Wärmeleitfähigkeit von Festkörpern (z.B. Kupfer) liegt um das 800-fache höher als die Wärmeleitfähigkeit von Wasser. Bei Luft, einem eigentlich sehr guten Isolator, ist die Wärmeleitfähigkeit sogar um 16.000-fache geringer im Vergleich zu Kupfer. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von Festkörpern können Kontaktstellen zwischen Bauteilkomponenten erheblich zum Gesamtwiderstand beitragen (Kontaktwärmeübertragung).

Ursache für die Kontaktwiderstände ist, dass auch bei makroskopisch glatten Oberflächen die effektive Kontaktfläche auf Grund der mikroskopischen Oberflächenrauigkeit nur im Bereich von 2-10% liegt. Je nach a) **Oberflächenrauigkeit** oder b) **Deformation**, z.B. durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten oder c) **Delamination** kann sich die Kontaktfläche deutlich und ungewünscht reduzieren. In den Bereichen ohne direkten Kontakt erfolgt der Wärmetransport rein durch Wärmeleitung über das Zwischenmedium, zumeist die eingeschlossene Luft. Aufgrund der großen Differenz in der Wärmeleitfähigkeit hat ein Luftspalt von lediglich 0,2 µm, entsprechend der Rauigkeit eines Feinschliffs, denselben Wärmewiderstand wie eine 3,2 mm homogene dicke Kupferschicht. Da ein Großteil der Wärmemenge über die effektive Kontaktfläche stattfindet, stellen großflächige Bauteildeformationen oder Delaminationen einen erheblichen Wärmewiderstand dar.

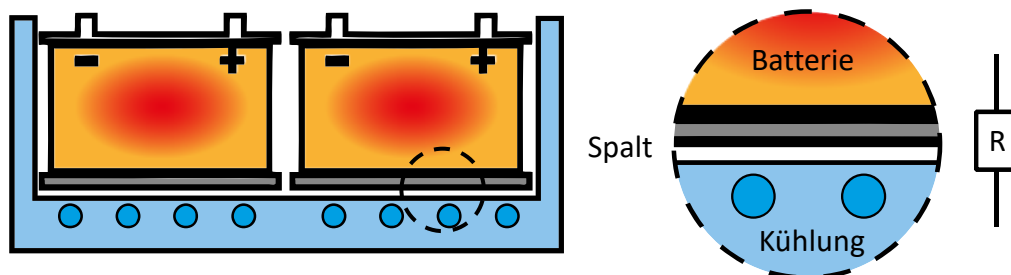
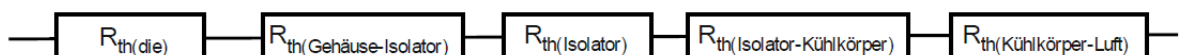


Abbildung 7: Zusammensetzung des Gesamtwiderstandes am Beispiel der thermischen Anbindung einer Batterie an externe Gehäusekühlung. (Bildquelle: Rohlf's)



$$R_{th\ gesamt} = R_{th(Die)} + R_{th(Gehäuse-Isolator)} + R_{th(Isolator)} + R_{th(Isolator-Kühlkörper)} + R_{th(Kühlkörper-Luft)}$$

Abbildung 8: Zusammensetzung des Gesamtwiderstandes am Beispiel eines galvanisch vom Kühlkörper getrennten Transistors. (Gerald Friederici)

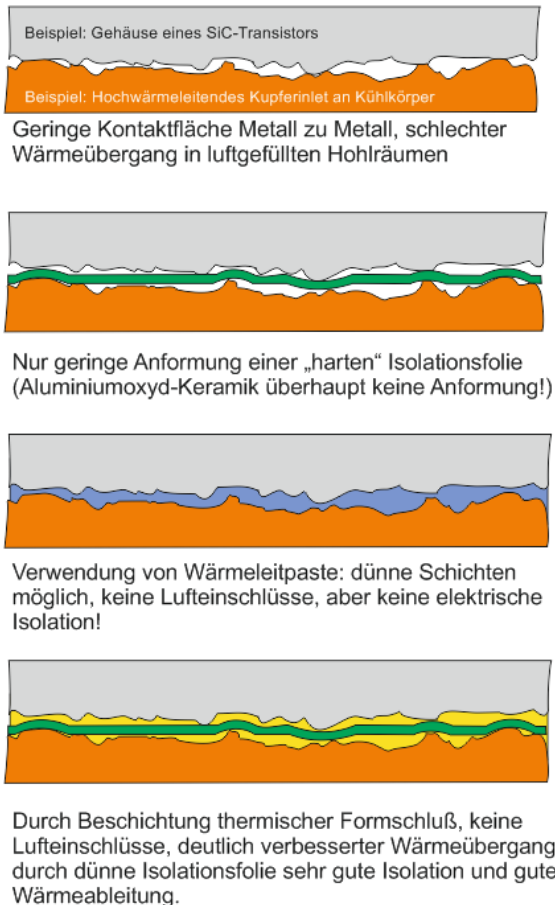


Abbildung 9: Zusammensetzung des Gesamtwiderstandes am Beispiel eines galvanisch vom Kühlkörper getrennten Transistors. Bildquelle Gerald Friederici, CMC

Eine etablierte und bewährte Methode zur Reduzierung von Übergangswiderständen ist die Verwendung von Wärmeleitpasten (mit einer Wärmeleitfähigkeit von $1 - 5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) zwischen den festen Bauteiloberflächen.

Obwohl die Wärmeleitfähigkeit von Polymeren im Vergleich zu metallischen Werkstoffen sehr gering ist, so ist diese im Vergleich zu Gasen noch um den Faktor 10 höher. Lufteinschlüsse im Kontaktbereich reduzieren daher den Wärmeübergang stark und sind unbedingt zu vermeiden. Ob Lufteinschlüsse durch eine schlechte Anpassung der Oberflächen, durch mechanische Verformung oder durch die Trennung von an sich festen Verbunden (Delaminierung) auftreten ist dabei unerheblich.

Weitere Informationen und Hintergründe zum Thema Wärmeübertragung mit vielen Videos und Beispielaufgaben finden Sie in den „HeatQuiz“ Online-Kursen. Diese sind über die Lernpfade auf der Webseite www.heatquiz.app kostenfrei zugänglich.

4. Produkte für die Praxis

In diesem Abschnitt werden Produkte und deren Charakteristika für typische Anwendungsfälle vorgestellt:

Isolationsfolien

In der Elektrotechnik werden sehr häufig Folien und folienartige Produkte als Isolation eingesetzt.

Vorteile sind unter anderem:

- die geringe Dicke,
- gute Flexibilität,
- einfache Handhabung,
- definiert, gleichbleibende Stärke,
- keine aufwendige Prozesstechnik notwendig,
- in selbstklebender Ausführung montagefreundlich,
- meistens sehr kostengünstig.

Klassische Isolierfolien bestehen z.B. aus Polyester (PEN / PET), Polyimid, Aramid oder Polypropylen. Wird eine verbesserte Wärmeleitfähigkeit benötigt, werden auch Silikonfolien oder Silikonkautschuk-Matten, teil kombiniert mit dünnen Metallfolien als sogenannte *Gapfiller* verwendet.

Während die Gapfiller (manche gibt es auch in nicht Silikon-haltiger Ausführung zum Beispiel auf Acrylatbasis) gut bis sehr gut thermisch leitfähig gemacht werden können, verfügen die klassischen Isolierfolien alle nur über eine Wärmeleitfähigkeit von 0,2 W/(m·K) bis ca. 1 W/(m·K). Diese „schlechten“ Werte kompensieren die Folien allerdings durch eine hohe Spannungsfestigkeit [V/μm]. Dadurch werden nur dünne Isolationsschichten benötigt, die dementsprechend einen nur geringen Wärmedurchgangswiderstand haben, vgl. auch Tabelle 1 auf Seite 7.

Vergleich spezifischer Wärmeleitwerte von Isolationsmaterialien vs. Kupfer	Spezifische Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]
Kupfer	ca. 400
Silikonkautschuk mit Glasgewebe-Einlage	0,5 bis ca. 5
Silikonkautschuk Gapfiller (weich)	2,5 bis ca. 10
Kapton MT+	ca. 0,75
Polyester	ca. 0,2
Styropor	ca. 0,034

Tabelle 2: spezifischer Wärmeleitwerte von Isolationsmaterialien (Quellen Wikipedia, Du Pont)

Isolationsfolien mit verbesserter thermischer Leitfähigkeit

Thermisch leitfähige Isolationsfolien haben meist eine Isolationsfähigkeit von über 150 kV/mm. Sie verbinden also geringe Materialstärke mit einer hervorragenden elektrischen Spannungsfestigkeit. Allerdings besitzen diese eine schlechte Formanpassungsfähigkeit.

Solche Folien werden überall dort eingesetzt, wo elektrische Potentiale getrennt werden müssen, der Wärmestrom aber möglichst wenig beeinflusst werden soll.

Durch die mangelnde Flexibilität der eher steifen Folien kann es bei rauen Oberflächen oder bei konkaven oder konvexen Verformungen dazu kommen, dass nicht die gesamte zur Verfügung stehende Fläche einen Formschluss hat. Dann wird der Wärmestrom partiell unterbrochen, da Luft ein sehr schlechter Wärmeleiter ist.

Beschichtungen

Thermisch leitfähige Beschichtungen vermeiden den Nachteil der fehlenden elektrischen Isolation bei Wärmeleitpasten. Wärmeleitfähige Folien werden häufig mit leitfähigen Beschichtungen ausgerüstet, die eine gute Verbindung zwischen Folie und Kontaktoberfläche erzeugen. Zum Einsatz kommen thermisch leitfähige Kleber oder sogenannte Phase-Change-Beschichtungen. Diese werden ab einer bestimmten Temperatur (ca. 55°C) weich und dringen beim ersten Erhitzen in die Oberflächenrauigkeit ein. Dabei wird die störende Luft verdrängt und der Formschluss deutlich verbessert. Der sogenannte Übergangswärmewiderstand verringert sich erheblich.

Silikonkautschuk

Wärmeleitende Silikonkautschuke sind in verschiedenen Härtegraden erhältlich. Sie können extrem weich hergestellt werden, aber auch mit einer Shorehärte A bis zu 80. Sie sind alle von sich aus in der Lage, Oberflächenrauigkeiten auszugleichen. Sie formen sich unter Druck an die Oberfläche an und verbessern den Formschluss. Dies erklärt, warum sich bei höherem Druck der Wärmewiderstand solcher Wärmepfade verringert. Wärmeleitfähige Kautschuke gibt es auch in nicht Silikon enthaltender Ausführung.

Dünne Versionen, meist mit Glasfaserverstärkung, werden ähnlich der Isolationsfolien eingesetzt. Sie isolieren elektrisch und leiten die Wärme gut. Die Spannungsfestigkeit ist jedoch recht gering.

Sehr viel dickere, weiche Kautschuk-Folien dienen dagegen zum Auffüllen eines Spaltes, der auch wechselnde Höhen haben kann. So lassen sich thermisch selbst unebene Oberflächen wie eine bestückte Platine flächig an einen Kühlkörper anbinden.

Die richtige Wahl des wärmeleitenden Isolationsmaterials hängt stark davon ab, welche Erfordernisse die Anwendung hat. Die Kenntnis der Vor- und Nachteile der möglichen Produkte verbessert entscheidend das spätere Ergebnis eines Entwärmungskonzeptes. Die Unternehmen des Fachverbandes EWIS helfen Ihnen dabei, die optimale Lösung zu finden.

Mehrschichtisolationssysteme

Flächige Mehrschichtisolationssysteme spielen in der Elektrotechnik eine große Rolle. Ohne diese Laminatmaterialien aus unterschiedlichen Materialien wären viele mechanischen, elektrischen und chemischen Eigenschaftskombinationen nicht möglich.

Einer der bekanntesten Vertreter dieser mehrschichtigen Werkstoffe ist eine Kombination aus zwei Lagen Aramid-Papier auf einem Kern aus Polyester-Isolationsfolie. Die Polyesterfolie trägt wesentlich zur Spannungsfestigkeit und zu besseren mechanischen Eigenschaften des Laminats bei, während das Aramidpapier zur Aufnahme von wärmeleitendem Tränkmittel eingesetzt wird.

Eine typische Anwendung dieser Kombination sind Nut-Isolationen und Deckschieber [Nutabdeckung] bei Elektromotoren und Generatoren. Der Flächenisolierstoff wird in die Nuten der Rotoren oder Statoren eingelegt. Er ist notwendig, um die Wicklung gegenüber dem Blechpaket elektrisch zu isolieren. Außerdem schützt er den Lackdraht vor Beschädigungen durch das umgebende Metall.

Die stromdurchflossene Spule ist der Ort größter Wärmeentwicklung. Stator oder Rotor fungieren dagegen als Wärmesenke. Ein möglichst guter Übergang der Wärme vom Lackdraht auf das z.B. Blechpaket ist entscheidend für die erzielbare Leistung (und/oder Baugröße) bei limitierter Maximaltemperatur der Spule.

Allerdings sind der verbesserten Wärmeleitung durch Flächenisolierstoffe Grenzen gesetzt. Zwar kann man einen wärmeleitfähig eingestellten Tränklack verwenden, der auch in das Aramid-Papier eindringt. Bei einem Mehrschichtaufbau verringert sich in der Regel das Wärmeleitvermögen jedoch durch zusätzliche Kleberschichten und die innenliegende dicke Folienschicht (z.B. Polyethylenterephthalat – PET, Polyester).

Man kann auch Kombinationen einsetzen, bei denen z.B. hochspannungsfestes (coronabeständige) und gut wärmeleitende Schichtsilikate (Glimmer) in eine Kunststoffmatrix eingebunden ist. Dennoch sind mit den heute verfügbaren Kombinationen keine Wärmeleitfähigkeiten über $0,5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ erzielbar.

Die Stellschraube, mittels derer auch Flächenisolationssysteme am effizientesten zur verbesserten Wärmeableitung beitragen können, ist daher die Materialstärke (Länge des Wärmepfades) oder die Verwendung eines Monomaterials. Mehrschichtisolationssysteme können i.d.R. allerdings viel besser gefalzt und geknickt werden und die unterschiedliche Formgebung der Nutauskleidung und Abdeckung ist somit viel leichter abbildbar.

Daher werden hochspannungsfeste Isolationsfolien mit dünneren Flächenwerkstoffen wie Glasgewebe oder Hochleistungs-Papiere und ~Vliese kombiniert, um mechanisch ausreichend robuste und dennoch dünne Kombinationen zu erzielen. Das führt auch bei der konstruktiven Auslegung zu Vorteilen, da der Füllfaktor¹ erhöht werden kann, erfordert jedoch auch modifizierte Produktionsverfahren.

Weitere typische Flächenisolierstoffe, wie sie auch z.B. in Trocken- und Öltransformatoren, Windkraftanlagen und Solarmodulen eingesetzt werden, sind:

- Hartpapier
- Glas-Hartpapier
- Glimmergefüllte Aramid-Papiere mit Isolationsfolien kombiniert
- Faserverbundwerkstoffe
- Pressspan
- Aromatische Polyamide
- Polyimidfolien

Wärmeleitpasten

In vielen Fällen der Leistungselektronik erfolgt die Übergabe des bauteilinternen Wärmepfades an die Umgebung über eine Metallfläche. Sofern keine galvanische Trennung notwendig ist, werden klassisch Wärmeleitpasten eingesetzt, um eine gute thermische Kopplung mit der Wärmesenke (Kühlkörper) zu erzielen. Ausreichend dünn aufgebracht stellen sie eine optimale Kopplung der sich gegenüber liegenden Flächen dar.

Nachteile von Wärmeleitpasten sind eine problematische Dosierung, die Gefahr des Auspumpens durch thermische Ausdehnung und Kontraktion von Gehäusen sowie das Austrocknen der Paste. Vor allem aber fehlt bei Wärmeleitpaste die elektrische Isolation.

¹ Verhältnis des elektrisch wirksamen Querschnitts zum Flächenbedarf für Isolation

Harze, Tränklacke, Vergussmassen

Die Wärmeleitfähigkeit organische Polymere liegen alle im Bereich 0,1 bis 0,3 W/(m·K). Bei gefüllten Harzsystemen liegen die wärmeleitfähigen Füllstoffe (i.d.R. anorganisch) als Körper in einer Harzmatrix vor.



Abbildung 10:
Vergießen dient nicht nur zum Schutz der Schaltung, sondern kann auch für eine Verbesserung der Wärmeableitung genutzt werden. (Bildquelle WEVO)

Kombiniert man ein ungefülltes Harz mit 0,2 W/(m·K) (z.B. Polyurethane, ungesättigte Polyester, Epoxide, Silikone) und einen gut wärmeleitenden Füllstoff (z.B. Aluminiumnitrit, 140 W/m²*K) und erhöht nach und nach die Anteile des Füllstoffs, so ergibt sich der in Abbildung 11 gezeigte Verlauf der Wärmeleitfähigkeit und Viskosität:

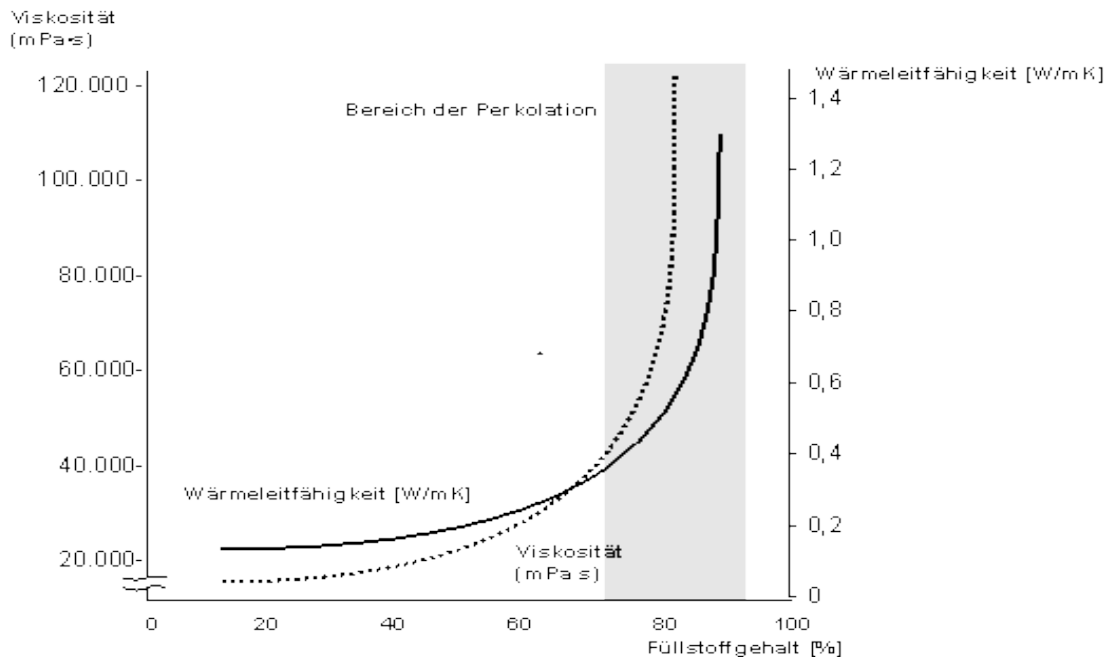


Abbildung 11: Wärmeleitfähigkeit und Viskosität steigen mit einsetzen der Perkolations massiv an. In der Praxis gilt es einen Füllstoff und Füllgrad zu finden, der eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit bei noch akzeptabler Viskosität liefert (veranschaulichende Darstellung des Verlaufs). Bildquelle: Gerald Friederici

Verbackene Kupferspulen wie zum Beispiel auch Nutstäbe stellen eine Abwandlung eines wärmeleitend gefüllten Harzes dar. Vom Standpunkt der Wärmeleitfähigkeit ist solch eine Konstruktion ein mit Kupfer gefülltes Harz. Da der „Füllstoff“ aber gerichtet in das Harz eingebracht wurde, verhält sich dieses System im höchsten Maße anisotrop. Das heißt die Wärmeleitfähigkeit ist von der Ausrichtung abhängig.

Anhand des in Abbildung 12 gezeigten Probenkörpers – einem mit 30 volumensprozent Kupferdraht gefülltem Harz – wurde diese Richtungsabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit untersucht. Die Ergebnisse finden sich in Tabelle 3.

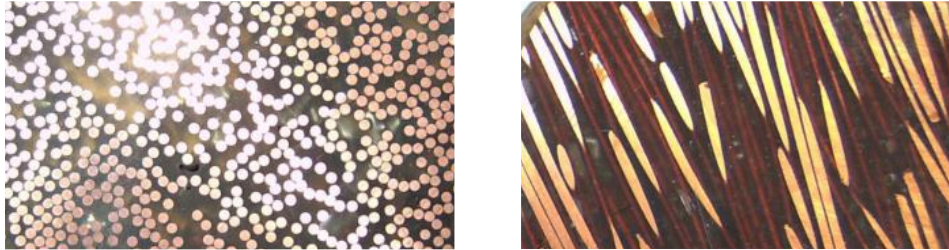


Abbildung 12: Probekörper zu Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit (Wärmefluss parallel des Kupferdrahtes, Wärmefluss senkrecht zur Wickelrichtung)
(Quelle: ELANTAS Europe)

Kupferdraht gefülltes Harz Bezeichnung	Spezifische Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]
Ungesättigtes Polyester Harz (ungefüllt)	0,19
Ungesättigtes Polyester Harz + 30 Vol% Kupferdraht (Wärmestrom parallel zum Draht)	27
Ungesättigtes Polyester Harz + 30 Vol% Kupferdraht (Wärmestrom rechtwinklig zum Draht)	0,76

Tabelle 3: spezifischer Wärmeleitwerte von Isolationsmaterialien, Quelle: ELANTAS Europe

5. Ansätze zur Verbesserung der Wärmeableitung

Vermeidung von Luft einschüssen

Luft hat eine Wärmeleitfähigkeit von $0,0262 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und leitet damit etwa um den Faktor 10 schlechter als der elektrische Isolierstoff. Somit sollten Luft einschüsse grundsätzlich vermieden werden.

Sollten sich flächige Hohlräume oder Ablösungen zum Beispiel an den Wandungen ergeben, ist die Wärmeleitfähigkeit deutlich schlechter.

Oftmals werden Objekte gerade genug gefüllt, um mechanische Mindestanforderungen zu erfüllen. Die Anforderungen an die Wärmeabfuhr dürfen jedoch nicht außer Acht gelassen werden.

Um eine gute Wärmeableitung zu erreichen, ist eine 100%ige Füllung von Hohlräumen zu erreichen. Dabei muss das Harz gut an allen Oberflächen haften, um Ablösungen zu vermeiden.

Erhöhung des Füllfaktors

Füllstoffe können die Wärmeleitfähigkeit verbessern. Durch die geeignete Auswahl der Füllstoffe kann eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit erreicht werden, ohne dass sich die Verarbeitungsviskosität signifikant verschlechtert. Dadurch kann ein gutes Spaltfüllverhalten erhalten bleiben.

Hinweis: Bei zu engen Zwischenräumen (e.g. Zündspulen mit Feinstdrähten) können u.U. die Füllstoffe herausfiltriert werden und dadurch reduziert sich in der Wicklung die Wärmeleitfähigkeit auf die des ungefüllten Polymers.

Die Auswirkungen von Füllstoffbeimischungen auf die Wärmeleitfähigkeit und die Viskosität eines PEI-Tränkharzes zeigt beispielhaft Abbildung 13. Zu erkennen ist ein Anstieg der Viskosität durch die anorganischen Füllstoffe bei gleichzeitiger Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit. Die vergleichsweise hohe Viskosität bei Raumtemperaturen erfordert eine gezielte Aufheizung des Harzes zur Erreichung der gewünschten Verarbeitungsviskosität für die entsprechende Imprägnierung.

Folgendes Beispiel zeigt die Imprägnierung eines Industriemotors mit einem wärmeleitfähigeren, emissionsarmen Tränkharz. Die erhöhten Wärmeleitfähigkeiten werden durch das Einbringen von anorganischen Füllstoffen erreicht, was zu einer vergleichsweise hohen Viskosität des Tränkharzes führt. Die Verarbeitung erfolgt in einem Heißtauchverfahren (Vorwärmen per Stromwärme mit nachgeschalteter Ofenhärtung).

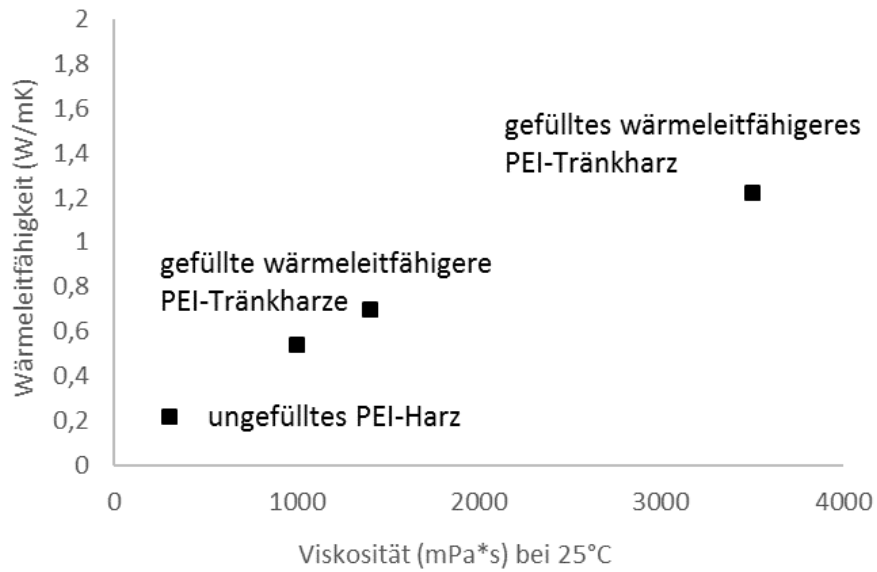


Abbildung 13: Wärmeleitfähigkeit über die Viskosität von PEI-Tränkharzen (Quelle Axalta)

Trotz der relativ hohen Viskosität bei Raumtemperatur wird mit dieser Applikationsmethode ein sehr gutes Eindringverhalten in die Wicklung und eine vollständige Durchdringung im Bereich der Nuten erreicht. Der Schichtaufbau auf dem Blechpaket blieb akzeptabel gering wie auf Abbildung 14 zu sehen.

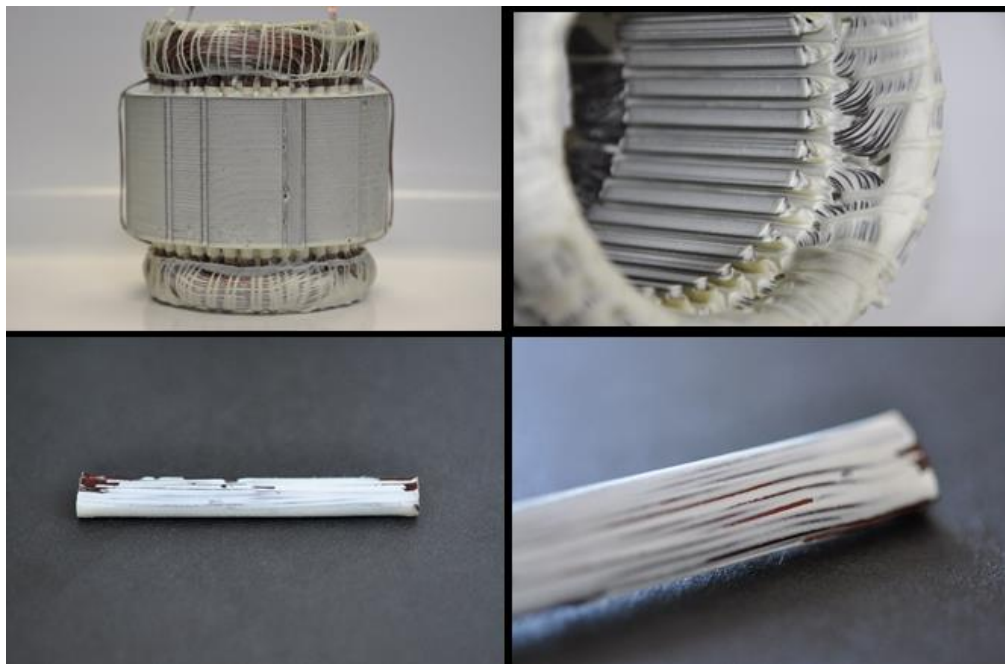


Abbildung 14: Stator und herausgetrennte Nutstäbe, imprägniert mit einem wärmeleitfähigeren PEI-Tränkharz, (Quelle Axalta)

Dieses Beispiel zeigt eine gelungene Anwendung eines wärmeleitfähigeren Tränkharzes in der elektrischen Maschine durch eine ausreichende Imprägnierung.

Die Verwendung eines noch höher gefüllten Harzsystems mit weiter verbesserter Wärmeleitfähigkeit führt zu einem erhöhten Schichtdickenaufbau im Bereich des Wickelkopfes. Dies bedeutet an dieser Stelle eine zusätzliche thermische Isolierung gegenüber aktiver Luftkühlung im Bereich des Wickelkopfes und wirkt der eigentlichen Funktion entgegen. Zudem würde sich mit einem solchen System die vollständige Imprägnierung der Nutstäbe erschweren.

Mit einem gefüllten Tränkharz mit erhöhter Wärmeleitfähigkeit kann bei entsprechender Imprägnierung der elektrischen Maschine eine bis zu 40 K niedrigere Betriebstemperatur gegenüber der Verwendung eines Standard Tränkharges erreicht werden.

Vollverguss

Alternativ zur Tränkung kann auch ein Vollverguss erfolgen. Je nach Bautyp kann durch einen reinen Vollverguss mit geeigneten Vergussystemen (ohne vorherige Imprägnierung) die Wärmeableitung aus der Statorwicklung zum Blechpaket sowie zum Statorgehäuse erheblich verbessert werden. Gegenüber konventionell imprägnierten Statorn gleicher Bauart können durch die verbesserte Wärmeabfuhr - ohne die sonstige Auslegung des Stators zu verändern – Drehmomentsteigerungen von bis zu 30 % erreicht werden.

Zudem kann die deutlich verbesserte Entwärmung entweder zu einer signifikanten Erhöhung der Lebensdauer beitragen oder alternativ die thermische Isolationsauslegung des jeweiligen Stators - bei sonst gleicher Leistung - oftmals um eine Temperaturklasse absenken.

Für den reinen Statorvollverguss stehen heute Vergussysteme mit Wärmeleitfähigkeiten im Bereich 1,2 – 1,6 W/(m·K) und vergleichsweise niedrigen Verarbeitungsviskositäten zur Verfügung wie in Abbildung 9 zu sehen.

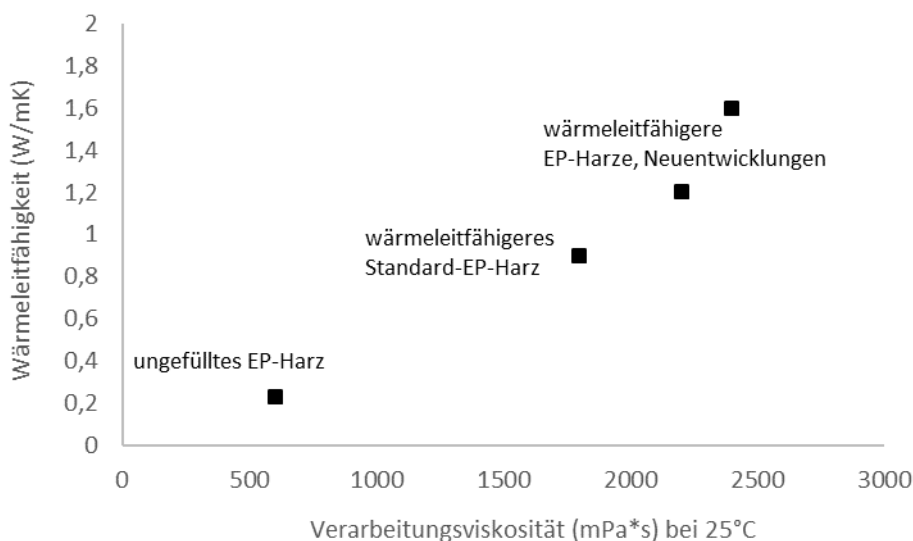


Abbildung 15: Wärmeleitfähigkeit über Verarbeitungsviskosität von EP-Gießharzen

Verwendung eines Metall-Entwärmerblechs (Metall-Gapfiller)

Für Entwärmungsaufgaben, bei denen eine elektrische Isolation nicht erforderlich ist, stellen Metallblech-Entwärmer (in Form einer thermisch wirkenden Kontaktfeder) eine Alternative zu organisch gefüllte Pasten und Harzen dar. Wie in Tabelle auf Seite 8 beschrieben, liegt die spezifische Wärmeleitfähigkeit von Metallen um eine oder mehrere Zehnerpotenzen höher als bei organischen Polymeren oder Harzen (0,30 W/(m·K) zu 400 W/(m·K)). Zudem können sie eine effiziente Lösung darstellen, die zusätzlich Vorteile im Verarbeitungsprozess und im Sinne des Umweltschutzes (auswechselbar, wiederverwendbar, 100% recyclebar) bieten. Unter anderem werden Probleme bei der Verarbeitung umgangen (z.B. Dosierung, Aushärtung, Fässer- oder Materialreinigung, Einstellen des Mischungsverhältnisses, Blasenbildung, der Düsenverstopfung während der Topfzeiten usw.). Zudem sind Metallblechlösungen nicht wärme- oder kälteanfällig.

Obwohl die Kontaktfläche im Vergleich zu Pastenlösungen sehr gering ist, kann unter der Voraussetzung, dass die Wärmequelle sowie der Kühlkörper aus Metall sind - die Wärme sehr effizient abgeführt werden, da ein direkter Kontakt zwischen Metallflächen ermöglicht wird. Um den Kontaktwiderstand so niedrig wie möglich zu halten, ist auf eine glatte Oberfläche, sowie auf eine hohe Anpresskraft zu achten. Dies kann durch gezielte Bauteil- und Materialkonzipierung erreicht werden.

Die Dicke des Metallblech-Entwärmers hat Einfluss, sowohl auf die Wärmeabfuhr als auch auf die Anpresskraft: je dicker das Material, desto höher das Wärmeübertragungsvermögen. Bei der Wahl der Materialstärke sind folgende Einflüsse zu berücksichtigen: Steifigkeit, Durchbiegewiderstand von Wärmequelle und Kühlkörper, sowie die Herstellbarkeit, respektive die produktions-technische Realisierbarkeit.

Bei der Verwendung von Metallblech-Entwärmern die auch Umwelteinflüssen ausgesetzt sind, muss die Korrosivität berücksichtigt werden. Neben den Umgebungs- und Umweltbedingungen (Feuchtigkeit, Salze, Elektrolyte) hat auch das elektrochemische Potential zwischen Entwärmermetall und der zu überbrückenden Objekte einen nicht vernachlässigbaren Einfluss. Mit Verfahren der gezielten Oberflächenveredelung bzw. mittels Plattierkonzeptionen können die elektrochemischen Potentialunterschiede reduziert werden.

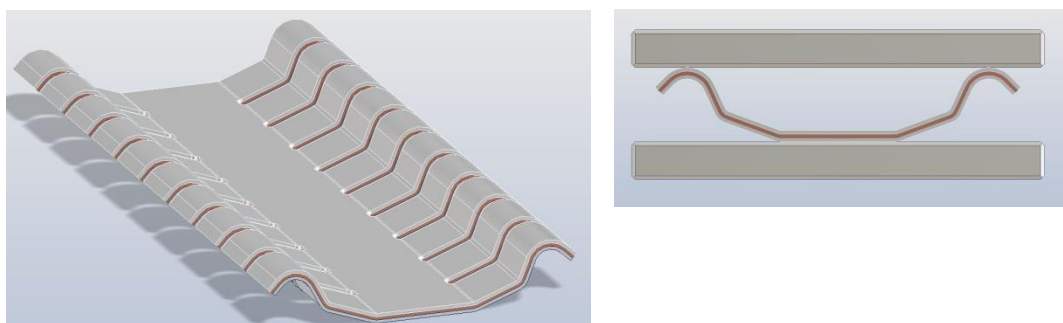


Abbildung 16: Schematische Darstellung eines Metallblech-Entwärmers. Wärmequelle, Kühlkörper sowie Kontaktfläche des Entwärmers zur Senkung des elektrochemischen Potentials. Die Materialien sind alle aus Aluminium. Der Kern des Entwärmers zur Gewährleistung der Wärmeleitfähigkeit und Anpressdrucks besteht aus niederlegiertem, hartgewalztem Kupfer. (Bildquelle: Wickeder)

Wärmeableitung am Beispiel von leistungsstarken MOSFET Modulen

In der Antriebstechnik werden heute in sehr vielen Fällen Elektromotoren mit Frequenzumwandlern betrieben. Diese elektronischen Stellglieder erlauben eine in weiten Bereichen regelbare Drehzahl, was u.a. zur Effizienzsteigerung von Anlagen beiträgt. Auch kann man einen Sanftanlauf realisieren und ggf. sogar eine Netzurückspeisung von Bremsenergie.

Zentrale Bauelemente für einen Frequenzrichter sind IGBT- oder MOSFET-Module (neuerdings auch SiC-Transistoren). Sie zerteilen die im Zwischenkreis gleichgerichtete Spannung in kurze Energieimpulse, die dann dem Motor zugeführt werden (meist PWM, Pulsweitenmodulation).

Trotz hoher Schaltgeschwindigkeiten und sehr geringen Durchlasswiderständen entsteht Verlustleistung in den oft zu Halb- oder Vollbrücken (Six-Pack) zusammengeschalteten Leistungstransistoren.

Da diese Module eine recht große Auflagefläche haben können, ist ihre Anbindung an Kühlkörper nicht ganz einfach. Viele Hersteller verwenden eine galvanische Trennung der innenliegenden elektronischen Schaltung von den außenliegenden Kühlflächen durch Verwendung von Keramikscheiben. In diesen Fällen wird häufig ein im Siebdruckverfahren aufgebrachtes Thermal-Phase Change Material (PCM) verwendet. Beim Transport der Bauteile zum Kunden und bis zum Einbau ist das wärmeleitfähige Material formstabil. Beim ersten Hochfahren (Eigenerwärmung) des Bauteils schmilzt das PCM und füllt den Spalt zwischen Gehäuse des Leistungsmoduls und dem Kühlkörper.

Wegen der großen möglichen Temperaturschwankungen -60°C ... 150°C spielt die Wärmeausdehnung der beteiligten Materialien eine Rolle. Auch die Befestigungsart der Module kann zu Verformungen führen, wenn sie nicht ausreichend der Ausdehnung bei Erwärmung nachgeben kann.

Hier nur am Rande erwähnt sei, dass neben einer natürlichen Konvektion von Luft über die Finnen eines Kühlkörpers natürlich auch forciert gekühlt (z.B. mittels Lüfter) werden kann. Die Abgabe von Wärme durch Wärmestrahlung wird durch Nutzung schwarzer Oberflächen verbessert.

Sofern die interne Elektronik des Leistungsmoduls nicht galvanisch von der Kühlfläche getrennt ist (z.B. gemeinsame Masse), kann zur thermischen Leitung die Forderung nach einer elektrischen Isolation hinzukommen. Je nach Spannungsniveau kommen dann Hochleistungsisolationsfolien in Frage. Diese werden meist zur vereinfachten Vormontage mit einer Kleberausrüstung angeboten. Eine noch bessere thermische Anbindung an den Kühlkörper (z.B. Aluminiumkühlkörper) erzielt man durch eine zusätzliche PCM-Beschichtung auf der anderen Seite der wärmeleitenden Isolationsfolie.

Da, wo größere Spaltbildung zwischen Leistungsmodul und Kühlfläche erwartet werden, kann eine dünne, wärmeleitende Silikonfolie eingesetzt werden. Diese leitet zwar die Wärme gut, entkoppelt jedoch nicht nur elektrisch die Flächen voneinander, sondern bildet als elastisches Element auch einen Puffer für mechanische Bewegungen (man denke einfach nur an 100.000 Warm-Kalt-Zyklen in Solarwechselrichtern und Stellantrieben für Chemiebetriebe).

6. Testverfahren Wärmeleitung

Die Ermittlung eines spezifischen Wärmewiderstandes kann durch unterschiedliche Messmethoden erfolgen. Einige dieser Messmethoden sind sowohl für homogene Materialien als auch für inhomogene Materialien oder mehrschichtig aufgebaute Systeme geeignet. Allerdings ist ihre Praxisrelevanz unterschiedlich.

In vielen Elektronik-Entwicklungsabteilungen wird vergleichend gemessen. Bei dieser sehr praxisnahen Messmethode wird ein Leistungstransistor verwendet, der mit einer bestimmten und geregelten Leistung betrieben wird. Mit z.B. PT100-Messfühlern wird die Temperatur z.B. des Gehäuses nahe an dem Halbleiterkristall ermittelt und mit verschiedenen Wärmeleitmaterialien verglichen.

- Ein standardisierter Test mit guter Praxisnähe ist **ASTM D5470**. Bei diesem Test wird zwischen zwei Metallzylindern das zu prüfende Material eingespannt. Die Kontaktflächen sind poliert und sollen so größtmögliche Kontaktfläche bieten. Es wird ein stabiler Wärmestrom eingestellt und die Differenztemperatur ermittelt, die an den Grenzflächen des Probenmaterials entsteht. Durch Anpassung des Drucks, mit dem die beiden Metallzylinder die Probe komprimieren, kann die Wärmeleitfähigkeit zusätzlich in Abhängigkeit der Kompression ermittelt werden. Mit dieser Methode kann man auch kombinierte Produkte (z.B. beschichtete Folien) gut charakterisieren.
- Bei der **Laserflash Methode** wird die Probe von unten mit einem Laserimpuls erwärmt, während man auf der anderen Seite die Sprungantwort misst. Diese Messmethode ist sehr schnell. Nachteil: die Messung berücksichtigt keine Topografien (Oberflächenstrukturen). So kann im Extremfall z.B. ein hartes Keramikmaterial eine hervorragende Leitfähigkeit, mangels Anpassung an Oberflächenrauigkeit jedoch einen sehr hohen Übergangswiderstand besitzen.
- Bei der **3-Omega-Methode** wird mittels Heizdraht eine oszillierende Wärmewelle in die Probe geschickt. Die als Antwort auf die Anregung gemessene Wechsellspannung bei dreifacher Anregungsfrequenz lässt sich umrechnen in die spezifische Wärmeleitfähigkeit. Die Methode ist gut für dünne Schichten geeignet. Sie wird jedoch selten in der Praxis angewendet.
- Beim „**Hot-Disk**“ Verfahren (**DIN EN ISO 22007-2**) wird ein Sensor zwischen zwei identischen Scheiben des zu messenden Materials mit einer konstanten Rate (Wärmestrom) aufgeheizt. Die instationäre Erwärmung des umgebenden Probekörpers ist ein Maß für die Wärmeleitfähigkeit.

Mess- und Prüfsystem zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit heterogener Materialien

Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit inhomogener oder periodisch strukturierter Materialien können die bisher etablierten Messmethoden nicht gleichermaßen geeignet eingesetzt werden. Insbesondere bei Composite-Produkten mit signifikanter Variation der Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Materialkomponenten (z.B. der Metallblech-Entwärmer in Abb. 16), sind die bisherigen Messverfahren nicht adäquat anwendbar.

Eine Messmöglichkeit bietet das Verfahren in Anlehnung an die Norm **ASTM D5470**, jedoch mit einem im Vergleich zur Norm deutlich abweichenden vergrößerten Probendurchmesser. Durch die größere Fläche und die damit verbundenen höheren Wärmeströme sind hohe Heiz- und Kühlleistungen zu bzw. abzuführen, um eine hinreichende Messgenauigkeit sicherzustellen. Die von Grund auf neu konzipierte Messapparatur (vgl. Abb. 17) des Unternehmens **en2Aix** mit einem Probendurchmesser von 150 mm und einer maximalen Probendicke von 5 mm erlaubt die Messung von Wärmewiderständen von 0,0001 bis 0,01 m²K/W bei einer maximalen Heiz- bzw. Kühlleistung von bis zu 4 kW.

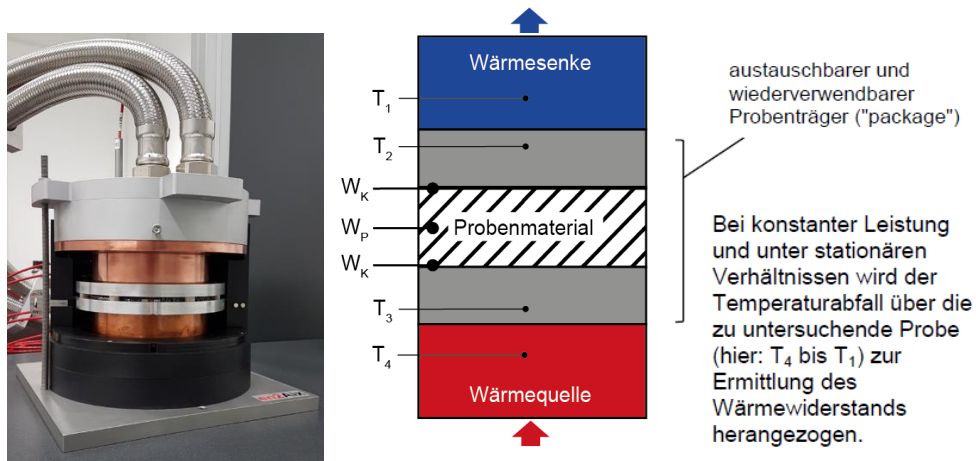


Abbildung 17: Links: Foto der teilweise geöffneten Messapparatur
Rechts: Schematische Darstellung des Messsystems mit wechselbarem Probenträger, (Bildquelle: en2Aix)

Abbildung 18 zeigt die Ergebnisse einer Messreihe mit zwei unterschiedlichen pastösen Probenmaterialien, die in unterschiedlichen Dicken zwischen den Probenträgerplatten appliziert wurden. Ein erwarteter linearer Anstieg des Wärmewiderstands mit steigender Materialdicke ist deutlich erkennbar. Das in rot gekennzeichnete Material weist hierbei eine geringere Wärmeleitfähigkeit auf als das in schwarz eingezeichnete Material.

Die Extrapolation der Messdaten auf eine Materialdicke von 0 mm erlaubt darüber hinaus auch eine quantitative Aussage über die vorhandenen, beidseitigen Kontaktwärmewiderstände zu den an die jeweiligen Probenmaterialien angrenzenden Probenträgerplatten. Auch eine Bestimmung von Kontaktwärmewiderständen zu anderen Materialien und Materialpaarungen ist mit diesem Mess- und Prüfsystem möglich.

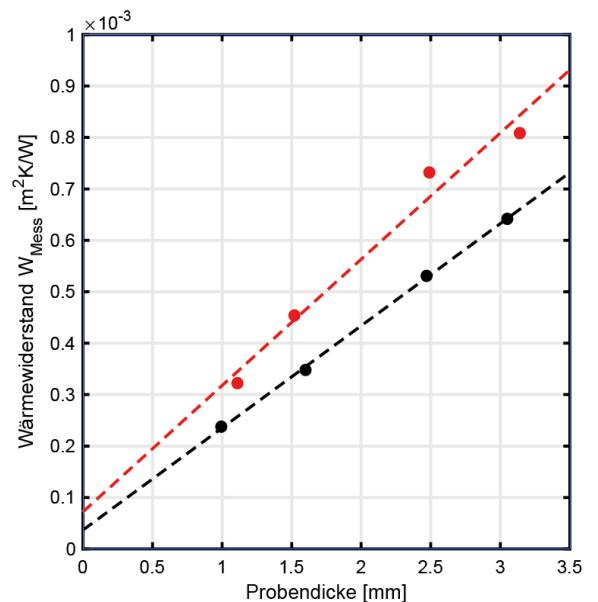


Abbildung 18: Messergebnisse von pastösen Probenmaterialien, aufgetragen über unterschiedlichen Probendicken. (Bildquelle: en2Aix)

7. Fazit

Auch bei der Behandlung von Entwärmungsaufgaben in der Elektrotechnik und Elektronik gilt, dass viele Wege zum Ziel führen.

Zur Vermeidung von Stauwärme kann man:

1. wärmeleitende Produkte zur Verbesserung des Wärmepfades einsetzen,
2. das Entstehen der Verlustwärme durch hocheffiziente Bauteile vermeiden,
3. Applikation und Produktionsprozess aufeinander abstimmen (dies muss bereits in der Konstruktionsphase bedacht werden)
4. forcierte Kühlmaßnahmen ergreifen (z.B. Peltier, Wasserkühlung, Ventilatoren, ...)
5. das Design ändern (elektrische Verluste vermeiden),
6. konstruktive Ansätze nutzen (z.B. große Kontaktflächen).

Oft werden es kombinierte Maßnahmen sein, die die eigene Applikation energieeffizient und langlebig machen.

Doch erst die Kenntnis der verschiedenen Lösungsansätze plus das Identifizieren der echten Schwachstellen des eigenen Systems wird beste Ergebnisse bringen.

Die Mitgliedsfirmen des Fachverbandes EWIS finden auch für Ihre wärmetechnische Aufgabenstellung eine Lösung. Dafür stehen sie Ihnen mit ihrem umfassenden Fachwissen zur Verfügung und unterstützen Sie bei der Realisierung Ihres nächsten Projektes.

Sprechen Sie uns gerne an!

8. Literaturverzeichnis

- [1] Andreas Griesinger, ‚Wärmemanagement in der Elektronik in Theorie und Praxis‘ Springer Verlag 2019, ISBN 978-3-662-58682-2
- [2] Bert Heinz, Oliver Holz, Christian Kalkmann, Uwe Kieshauer, Jörg Schrader, – Wärmemanagement auf und in Leiterplatten, Fachverband Elektronik-Design (FED) e.V., Bibliothek des Wissens Band 13 (2014)
- [3] G. Friederici, CMC Klebetechnik, <https://www.cmc.de/thermal-management-folien-klebeband> + <https://www.cmc.de/kapton-mt>
- [4] Wilko Rohlf s et al., HeatQuiz - Game-based learning of heat and mass transfer, <https://www.wsa.rwth-aachen.de/cms/WSA/Studium/~rayq/HeatquizApp/> als auch <https://heatquiz.wsa.rwth-aachen.de/>

9. Bildnachweis

Deckblatt:	Gerald Friederici, CMC Klebetechnik
Abbildung 1+2:	Gerald Friederici
Abbildung 3-5:	W. Rohlf s
Abbildung 6:	Gerald Friederici
Abbildung 7:	W. Rohlf s
Abbildung 8+9:	Gerald Friederici
Abbildung 10:	WEVO
Abbildung 11:	Gerald Friederici
Abbildung 12:	ELANTAS
Abbildung 13-15:	Axalta
Abbildung 16:	Wickeder Westfalenstahl
Abbildung 17+18:	en2Aix

10. Relevante Normen (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

Nachfolgend einige Normen für die weit verbreiteten Messverfahren LFA, HFM und GHP:

LFA = Laser Flash,

ASTM E1461 - 13 Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method

DIN EN 821-2:1997-08 Hochleistungskeramik - Monolithische Keramik, Thermophysikalische Eigenschaften - Teil 2: Messung der Temperaturleitfähigkeit mit dem Laserflash (oder Wärmepuls-) Verfahren; Deutsche Fassung EN 821-2:1997

mophysikalische Eigenschaften - Teil 2: Messung der Temperaturleitfähigkeit mit dem Laserflash (oder Wärmepuls-) Verfahren; Deutsche Fassung EN 821-2:1997

ISO 22007-4:2017-06: Kunststoffe - Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und der Temperaturleitfähigkeit - Teil 4: Laserblitzverfahren

ISO 18755:2005-03: Hochleistungskeramik - Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit monolithischer Keramik mit dem Laserflash-Verfahren

HFM = Heat Flow Meter

ASTM C518-17 Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus

ISO 8301:1991-08: Wärmeschutz; Bestimmung des stationären Wärmedurchlasswiderstandes und verwandter Eigenschaften; Verfahren mit dem Wärmestrommeßplatten-Gerät

DIN EN 12667:2001-05: Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand; Deutsche Fassung EN 12667:2001

JIS A 1412-1: Test method for thermal resistance and related properties of thermal insulations - Part 1: Guarded hot plate apparatus

GHP = Guarded Hot Plate

ISO 8302:1991-08: Wärmeschutz; Bestimmung des stationären Wärmedurchlasswiderstandes und verwandter Eigenschaften; Verfahren mit dem Plattengerät

ASTM C177-19 Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus,

DIN EN 12939:2001-02: Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Dicke Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand; Deutsche Fassung EN 12939:2000

DIN EN 12667:2001-05: Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand; Deutsche Fassung EN 12667:2001

DIN EN 13163:2017-02: Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus expandiertem Polystyrol (EPS) - Spezifikation; Deutsche Fassung EN 13163:2012+A2:2016



ZVEI e.V.
Verband der Elektro- und Digitalindustrie
Lyoner Straße 9
60528 Frankfurt am Main

Telefon: +49 69 6302-0

E-Mail: zvei@zvei.org

www.zvei.org