

Die Wärmeleitfähigkeit von Dicht- und Klebstoffen präzise bestimmen

Bewährtes Messverfahren nach ASTM D5470-17

AUTOMOTIVE, ELEKTRONIK MESS- UND PRÜFTECHNIK – Werden Dicht- und Klebstoffe in elektronischen Systemen eingesetzt, ist neben den mechanischen Kennwerten vor allem die Wärmeleitfähigkeit ein entscheidendes Auswahlkriterium. Sie kann z.B. durch die Beigabe von gut wärmeleitenden Füllstoffen optimiert werden. Eine zielgerichtete und effiziente Materialentwicklung erfordert eine zuverlässige und präzise Messtechnik.

Elektronik wird zunehmend kleiner und leistungsfähiger. Auf kleinerem Gerätevolumen werden mehr Funktionen untergebracht und die Leistungsdichte steigt. Das thermische Design bestimmt in vielen Fällen die Lebensdauer des Systems und wird zunehmend zum wettbewerbsentscheidenden Faktor. Um entstehende Verlustwärme bestmöglich abführen zu können, müssen alle eingesetzten Materialien eine höchstmögliche Wärmeleitfähigkeit aufweisen.

Die Leistungsdichte und die Abwärme elektronischer Geräte steigen kontinuierlich. Das Wärmemanagement wird bei der Entwicklung neuer Technologien zur zentralen Aufgabe, denn: Jedes Grad, das einem System auch innerhalb des zulässigen Temperaturbereichs erspart bleibt, verlängert dessen

Lebensdauer. Den Flaschenhals im Wärmepfad – von der Wärmequelle bis zur Umgebung – bilden häufig Polymerwerkstoffe. Ihre Wärmeleitfähigkeit ist im Vergleich zu Aluminium ein bis zwei Größenordnungen kleiner. Der Fokus aktueller Entwicklungen liegt daher auf neuen Materialien, die die abzuführende Wärme besser transportieren. Die präzise Messung der Wärmeleiteigenschaften dieser Polymere ist Voraussetzung für deren Weiterentwicklung und die thermische Optimierung der Systeme. Das im Folgenden beschriebene Messsystem hat sich dafür als besonders geeignet erwiesen.

Messprinzipien zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Im Lauf der Jahre wurden verschiedenste Messverfahren, den unterschiedlichen Anforderungen, wie z.B. Probengröße oder gewünschte Temperatur- und Druckbereiche, entsprechend, entwickelt. Diese lassen sich in zwei Kategorien einteilen: stationäre und transiente Verfahren. Beiden stationären Verfahren wird die Probe mit einem konstanten Wärmestrom beaufschlagt und der Temperaturabfall in der Probe bestimmt. Bei transienten Verfahren wird die Probe mit einem zeitabhängigen Wärmestrom, wie z.B. einem kurzen Lichtblitz, aufgeheizt und die thermische Antwort gemessen. Der Ver-

gleich der gemessenen thermischen Antwort mit einer vorausgerechneten Temperaturfunktion liefert die gesuchten Stoffwerte. Einen Überblick über die Messverfahren liefern z.B. die Normen ISO 22007-1:2023 und ISO 22007-2:2022.

Messprinzip des TIMTesters

Der TIMTester beruht auf der stationären Zylindermethode nach ASTM D5470-17 (Bild 1). Die Probe, wie z.B. der Dichtstoff, wird zwischen zwei Referenzzylinder aus Aluminium eingebracht. Es können sowohl ausgehärtete Probenkörper als auch unvernetztes Probematerial untersucht werden. Der obere Zylinder wird an dessen Oberseite konstant elektrisch beheizt. An der Unterseite des unteren Zylinders wird die Wärme mit einem Kühlkreislauf abgeführt. Durch den Aufbau fließt Wärme senkrecht von oben nach unten. Dies führt zu einem linearen Temperaturabfall in den beiden Referenzzylindern (Bild 1). Die Temperaturen werden in den Referenzzylindern an definierten Positionen mit Thermoelementen gemessen. Mit der bekannten Wärmeleitfähigkeit des Zylindermaterials lässt sich der Wärmestrom \dot{Q} im oberen und unteren Zylinder präzise bestimmen. Wärmeverluste durch Strahlung und Konvektion entlang des Wärmepfades sorgen dafür, dass der Wärmestrom im unteren Zylinder geringfügig kleiner ist als im oberen. Diese Abweichung wird in der Auswertung berücksichtigt. Der Temperaturverlauf in den Referenzzylindern wird jeweils bis zur Probenkante extrapoliert. So kann der Temperatursprung ΔT an der Probe gemessen werden. Aus diesem und dem Wärmestrom \dot{Q} ergibt sich der thermische Widerstand der Probe:

$$R_{th} = \Delta T / \dot{Q} \text{ in K/W} \quad (\text{Gl. 1.})$$

Aus dem R_{th} -Wert, der gemessenen Probenstärke d und der Querschnittsfläche A der Probe lässt sich die Wärmeleitfähigkeit berechnen mit

$$\lambda = d / R_{th} \cdot A \text{ in W/(mK)}. \quad (\text{Gl. 2.})$$

Bei genauer Betrachtung wird klar, dass der gemessene R_{th} -Wert, bzw. die daraus berech-

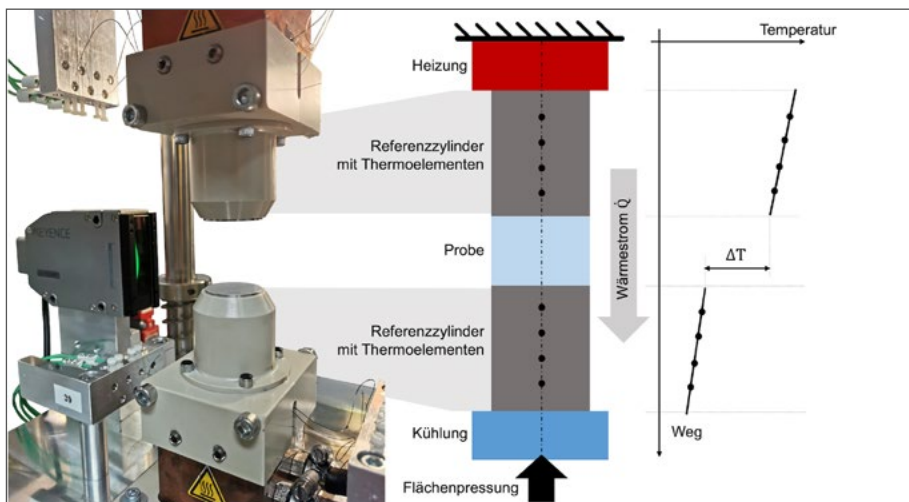


Bild 1: TIMTester zur Messung des thermischen Widerstands und der Wärmeleitfähigkeit von Dicht- und Klebstoffen, links: die Messzelle des ZFW TIMTesters, rechts: Schema der Messstrecke mit Temperaturverlauf (Bild:ZFW)

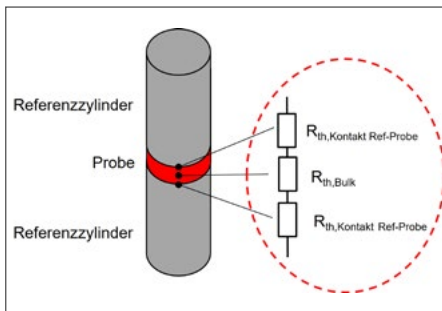


Bild 2: Der gemessene thermische Widerstand der Probe ist die Summe des Bulk-Widerstands und der zwei Kontaktwiderstände $R_{th,Kontakt\ Ref-Probe}$ zwischen den Referenzzylindern und der Probe (Bild:ZFW)

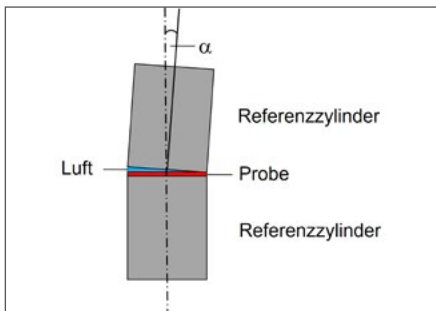


Bild 3: Messfehler bei der stationären Zylindermethode durch Verkipfung der Referenzzylinder (Bild:ZFW)

nete Wärmeleitfähigkeit den Einfluss der oberen und unteren Kontaktflächen zwischen den Referenzzylindern und der Probe enthalten (Bild 2).

Diese Kontaktwiderstände können extrahiert werden, indem ein Probenmaterial in unterschiedlichen Schichtdicken gemessen wird [1]. Trägt man die gemessenen R_{th} -Werte über der Schichtdicke auf, ergibt sich durch Extrapolation auf die Schichtdicke Null der verbleibende Widerstand der beiden Kontakte $R_{th,Kontakt\ Ref-Probe}$.

Besondere Herausforderungen bei der Messung

Messfehler durch Wärmeverluste

Bei thermischen Messungen besteht grundsätzlich die Herausforderung, Wärmeverluste weitestgehend zu reduzieren bzw. bei der Auswertung zu berücksichtigen. Vollständig vermeiden lassen sie sich nicht, da prinzipiell jede Temperaturdifferenz einen Wärmestrom verursacht. Beim TIMTester wird der Messfehler durch Wärmeverluste dadurch reduziert, dass die im oberen und unteren Referenzzylinder gemessenen Wärmeströme gemittelt werden. Verbleibende Einflüsse werden in der Auswertung berücksichtigt, bzw. gehen in die Fehlerrechnung mit ein.

Messfehler durch Verkipfung der Referenzzylinder

Sind die Messzylinder nicht vollständig planparallel ausgerichtet (Bild 3), entsteht ein keilförmiger Luftspalt zwischen der Zylinderoberfläche und der Probe.

Die Wärmeleitfähigkeit von Luft ist rd. 10.000-mal kleiner als die von Aluminium. Es reicht eine minimale Verkipfung α von wenigen $1/100^\circ$, um das Messergebnis vollkommen zu verfälschen. Im TIMTester ist eine ausgeklügelte Hydraulikeinheit verbaut, die für eine perfekte Ausrichtung der Referenzzylinder sorgt.

Präzise Messung der Probendicke

Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit λ aus der primären Messgröße, dem R_{th} -Wert, muss zwingend die Probendicke d bekannt sein (Gl. 2). Für die Wegmessung kommen verschiedene Messmethoden infrage. Berührende Methoden bergen die Gefahr, dass parasitäre Wärmepfade und zusätzliche Wärmeverluste entstehen. Im TIMTester wird deshalb ein LED-Lichtbandmikrometer verwendet, welches die Probendicke kontaktlos misst. Die Messunsicherheit beträgt $< \pm 2 \mu\text{m}$.

Messung von Dicht- und Klebstoffen

Diese werden bei unterschiedlichen Flächenpressungen verbaut und in unterschiedlichen Schichtdicken verarbeitet. Aufgrund von Grenzflächeneffekten und deren Einfluss auf die Anordnung der Füllpartikel im Probenmaterial hängt die Wärmeleitfähigkeit von diesen Parametern ab.

Im TIMTester lassen sich vollautomatisiert Flächenpressungen zwischen 0 und 20 bar bei einem Probendurchmesser von 30 mm einstellen. Alternativ zu vorgegebenen Flächenpressungen können gewünschte Probendicken zwischen 20 μm und 30 mm angefahren werden.

Untersuchung von Delaminationseffekten

Für die Untersuchung der Anbindungsqualität von Dicht- und Klebstoffen bietet der TIMTester einen Delaminationstestmodus. Dieser simuliert die thermische Dehnung, die ein System bei Temperaturänderung zwangsläufig erfährt. Je nach Haftungseigenschaften und Anforderungen an die Substratoberflächen wird die Probe entweder direkt auf die Referenzzylinder aufgebracht oder zwischen zwei Substratmustern ausgehärtet. Diese und die dazwischen ausgehärtete Probe werden anschließend in den TIMTester eingesetzt. Für den Test bewegt sich der untere Referenzzylinder perio-

disch mit einer max. Geschwindigkeit von 5 $\mu\text{m/s}$ auf und ab. Die maximale Auslenkung lässt sich frei wählen. Üblich sind Werte zwischen 5% und 30% der Probendicke. Der thermische Widerstand der Probe wird dabei kontinuierlich aufgezeichnet. Bereits kleinste Ablösungen des Dicht- oder Klebstoffs von der Oberfläche der Referenzzylinder oder Substratmuster zeigen sich in einem Anstieg des R_{th} -Werts. Damit sind wertvolle Aussagen zum Alterungsverhalten der Probe und speziell zu deren Substratanbindung möglich.

Fazit

Zunehmende Leistungsdichten bei elektronischen Geräten erfordern ein durchdachtes thermisches Design. Dazu gehören Dicht- und Klebstoffe mit optimierten Wärmeleitfähigkeitseigenschaften. Die Messung ist eine besondere Herausforderung. Als zuverlässige und präzise Messmethode für Dicht- und Klebstoffe hat sich die stationäre Zylindermethode etabliert. Der ZFW TIMTester setzt die in ASTM D5470-17 spezifizierte Methode um und kompensiert dabei potenzielle Fehlerquellen bestmöglich. Er misst den thermischen Widerstand und die Wärmeleitfähigkeit des Materials. Ein integrierter Delaminationstestmodus simuliert die Wärmedehnung in der realen Anwendung und liefert wertvolle Informationen zur Anbindung des Materials über die Lebensdauer.

Literatur

[1] Griesinger A. (2019) Wärmemanagement in der Elektronik, Theorie und Praxis, Springer Vieweg, Berlin, S. 147ff

Fakten für die Konstruktion

- Valide Dicht- und Klebstoffwerte hinsichtlich der gewünschten Thermomanagementfunktion

Fakten für das Qualitätsmanagement

- Bewährte qualitätsrelevante Thermomanagementfunktion von Materialien

Weitere Informationen

Zentrum für Wärmemanagement Stuttgart (ZFW)
www.zfw-stuttgart.com

Von Prof. Dr. Andreas Griesinger, und Oliver Roser

DICHT!digital: Weitere Informationen auf der Thermal Management Europe vom 5. bis 7. Dezember in Stuttgart