

Thermisch leitfähige Interfacematerialien - Wissenswertes

Ziel thermischen Managements ist die Sicherstellung der Funktion temperaturkritischer elektronischer Bauelemente in elektronischen Schaltungen und die Erhöhung ihrer Lebensdauer. Dazu sind fundierte Kenntnisse über das Verlustverhalten in der Elektronik und über den Wärmefluss im thermischen Pfad maßgebend.

Aufgabe ist es, den thermischen Pfad schon bei der Definition elektronischer Bauteile und ihres Verhaltens unter Last durch Wahl des richtigen thermischen Interface Materials - oder auch als TIM bezeichnet - und durch das abgestimmte Design der Peripherie aus Kühlkörper bzw. des Kühlgehäuse sowie der Befestigung des Bauteils an der Wärmesenke zu optimieren.

Thermischer Widerstand

Wärmeleitmaterialien minimieren den thermischen Spannungsabfall ΔT und damit den thermischen Widerstand zwischen zwei Grenzschichten.

Die Fähigkeit, eingetragene Wärme abzuleiten wird als materialspezifische Wärmeleitfähigkeit k in der Dimension W/mK definiert. Dabei wird vereinfachend von Eindimensionalität, stationärer Betriebsweise und Homogenität des Materials ausgegangen. Bei homogenen Materialien ist die Größe der Wärmeleitfähigkeit dickenunabhängig. Bei nichthomogenen Materialien wie glasfaser- oder filmverstärkten Elastomer- oder Verbundfolien ist sie dickenabhängig. Der Wärmeleitwert wird durch den Wärmeeintrag Q [W] durch die Kontaktfläche A [m²], die Weglänge [Dicke d] und den Temperaturgradienten ΔT definiert:

$$k = Q \cdot d / (A \cdot \Delta T); \text{ mit } d / \Delta T = \text{konst. für homogene Materialien}$$

Bei Wärmeleitmaterialien, die keine elektrische Leitfähigkeit aufweisen und als elektrische Isolatoren wirken, wird die thermische Leitfähigkeit durch Compounding mit thermisch leitfähigen Keramiken, z.B. Aluminiumoxid oder Bornitrid erhöht. Dabei sind sowohl der Füllgrad als auch die Leitfähigkeit und Mikrostruktur des verwendeten Keramiktyps Einflussparameter. Je höher die Betriebstemperatur ist, desto geringer sind, bedingt durch den positiven Materialausdehnungskoeffizienten, die thermischen Leitfähigkeiten.

Der thermische Widerstand durch ein Material $R_{th \text{ Material}}$ kann als Innenwiderstand bezeichnet werden und ist nach Fourierreihe definiert als

$$R_{th \text{ Material}} = \Delta T / Q \text{ oder } d / (k \cdot A)$$

Der thermische Innenwiderstand des Materials ist im wesentlichen abhängig von den Faktoren:

- Materialdicke
- thermischer Leitwert
- Kontaktfläche

Bei weichen Materialien vor allem Gap-Fillern besteht zudem eine nicht vernachlässigbare Druckabhängigkeit.

Zusätzlich zum inneren thermischen Widerstand des Materials sind die Temperaturgradienten an den Kontaktflächen, die die thermischen Kontaktwiderstände $R_{th \text{ Kontakt 1}}$ und $R_{th \text{ Kontakt 2}}$ bedingen, entscheidend. Kontaktwiderstände werden durch unvollständige Anpassung und die als thermischen Isolator wirkenden Lufteinschlüsse mit $k_{Luft} = 0,027 \text{ W/mK}$ an den Grenzschichten verursacht.

Kontaktwiderstände sind abhängig von den Faktoren:

- Oberflächenstruktur, Oberflächenwellig- und -rauigkeiten
- Druck
- Zeit
- Materialausdehnungen

Mit zunehmender Zeit sinken die Kontaktwiderstände durch bessere Anpassung in den ersten Stunden materialabhängig. Je höher der Montage-Druck vom elektronischen Bauelement auf das thermisch leitfähige Interface Material ist, desto geringer sind die Kontaktwiderstände.

Der thermische Gesamtwiderstand setzt sich zusammen aus:

$$R_{th \text{ Gesamt}} = R_{th \text{ Material}} + R_{th \text{ Kontakt 1}} + R_{th \text{ Kontakt 2}}$$

Durch den Einsatz von thermisch leitfähigen Interface Materialien werden sowohl die Kontaktwiderstände und als auch der thermische Gesamtwiderstand verringert. Je formanpassungsfähiger ein Material ist, desto weniger Lufteinschlüsse gibt es und desto geringer sind die Kontaktwiderstände unter Druck. Je dicker ein Material ist, desto größer ist der Anteil des thermischen Innenwiderstands gegenüber den Kontaktwiderständen. Dieses ist vor allem bei Gap-Fillern mit niedrigen Wärmeleitwerten der Fall. Abb. 1 zeigt das Prinzip linearer thermischer Spannungsabfälle.

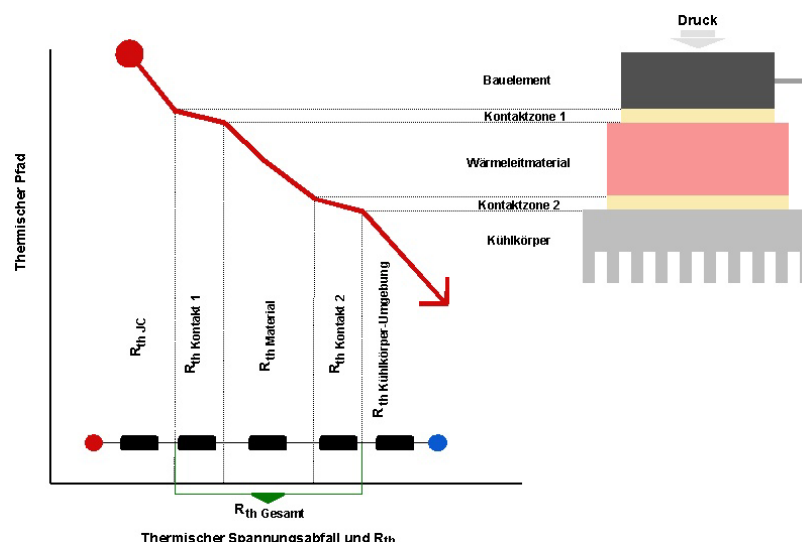


Abb. 1: Thermische Spannungsabfälle im thermischen Pfad

Auswahlkriterien thermisch leitfähiger Materialien

Das Design-In von Wärmeleitmaterialien ist neben den thermischen Anforderungen von den Forderungen an die elektrische Isolation der thermisch anzubindenden elektronischen Bauteile und anderen Bedingungen z.B. Mindestabständen oder Kriechstromstrecken abhängig. Die einzusetzenden Wärmeleitmaterialien sind daher entweder

- elektrisch isolierend oder
- elektrisch nicht isolierend

Weitere wichtige Parameter beim Produkt Design-In sind u.a. die chemische Zusammensetzung, gute Oberflächeneigenschaften zur Kompensation von Oberflächenabweichungen und von mechanischen Toleranzen, Weichheit und Flexibilität, Zugfestigkeit, leichte Handhabung und Lieferformen sowie die Wirtschaftlichkeit.

Darüber sind Umweltverträglichkeit, Wiederverarbeitbarkeit, Beschichtbarkeit mit Klebstoffen, chemische-, Temperatur- und Alterungsbeständigkeit sowie Lebensdauer und gegebenenfalls ein geringes Ausgasverhalten von Silikon wichtige Auswahlkriterien.

Klassifizierung

a) Elektrisch isolierend

Elektrisch isolierende Wärmeleitmaterialien gliedern sich in:

- Silikonfolien mit und ohne mechanische Verstärkung z.B. durch Glasfaser
- technische Kunststofffilme mit erhöhter Wärmeleitung z.B. Kapton® MT und
 - Phase Change Beschichtungen oder
 - weichen Kontakt-Beschichtungen z.B. aus Polymeren
- Gap-Filler aus weichen Elastomeren mit oder ohne mechanische Verstärkung z.B. durch Glasfaser
- Klebefilme mit elektrisch isolierenden Trägern
- technische Kunststofffilme mit verbesserten Wärmeleit- und Kontakteigenschaften

Dünne wärmeleitende Folien und Filme dienen zur direkten Anbindung von elektronischen Bauelementen an Kühlkörper oder -gehäuse über eine sehr kurze Strecke von wenigen Zehntel Millimeter.

Wärmeleitfolien und Gap-Filler sind meist mit wärmeleitenden Keramiken wie Bornitrid, Aluminiumoxid oder Mischungen gefüllte hochvernetzte Elastomere wie Silikone. Hochwertiges Bornitrid zeichnet sich durch seine sehr hohe thermische Leitfähigkeit sowie seine Weichheit und Mikrostruktur der Keramikpartikel zur Erzielung eines sehr guten thermischen Kontakts besonders aus.

Gap-Filler werden zur thermischen Überbrückung großer Spaltmaße im Bereich ab etwa einem halben Millimeter und zum Ausgleich von großen Bauteiltoleranzen im Millimeterbereich eingesetzt. Durch ihre Elastizität wirken sie selbst als Federelemente und erzeugen den Kontaktdruck. Bei ihrer Anwendung ist vor allem auf die richtige Auswahl des Materialtyps und der -dicke unter besonderer Berücksichtigung der auszugleichenden Summentoleranzen und der Komprimierbarkeit im elastischen Bereich zu achten. Die den thermischen Kontakt erzeugenden federnden Rückstellkräfte müssen im gesamten Betriebsbereich wirken. Im Bereich plastischer Verformung lassen die Kräfte durch Kriechen und Relaxation nach. Rein plastisch verformbare Gap-Filler füllen Spalte fast ohne Druckausübung aus und weisen hohe Adhäsionskräfte auf, womit die Kontaktierung sichergestellt wird.

Gut eignen sich elektrisch isolierende technische Kunststoffe wie Polyimid (z.B. Kapton[®]), deren eigene Wärmeleitfähigkeit durch Füllstoffe erhöht ist und die wärmeleitende Phase Change -, oder Kontakt-Beschichtungen z.B. aus Polymeren aufweisen. Ebenso werden technische Kunststoffe wie Kapton[®] durch Beschichtung mit Transferklebebändern als klebende Filme ausgebildet. Durch Beschichtungen lassen sich eine gute Oberflächenanpassung und thermische Kontaktierung erzielen.

b) Elektrisch nicht isolierend

Elektrisch nicht isolierende Interface Materialien gliedern sich in

- Träger z.B. Aluminium mit
 - Phase Change Beschichtungen oder
 - Beschichtungen zur Kontaktverbesserung, z.B. Polymerbeschichtungen
- Phase Change Filme ohne Träger
- Grafitfolien zur Wärmespreizung
- Wärmeleitende Klebefilme
 - aus elektrisch leitfähigen Trägern z.B. Aluminium mit Transferkleberbeschichtung
 - als Klebebänder ohne Träger
- Wärmeleitpasten

Die Beschichtungen und Träger von Verbunden weisen keine elektrische Isolationseigenschaft auf und sind deshalb durch eine sehr hohe natürliche thermische Leitfähigkeit gekennzeichnet. Als Träger werden meist Aluminium, Grafit oder Kupferfolien verwendet. Der Kontaktwiderstand wird durch zusätzliche Beschichtung der Oberflächen z.B. durch Phase Change Materialien oder durch Polymere ebenso wie durch Aufbringung wärmeleitender Transferkleber minimiert. Phase Change Materialien und Transferkleber können auch als Filme ohne Verstärkung ausgeführt sein. Beim Einsatz von Klebefilmen werden die thermische Anbindung und die Anforderungen an die Verbindungstechnik gleichzeitig erfüllt.

Grafitfolien bestehen über 98% aus reinem Grafit. Durch ihre flockenförmige Struktur weisen sie anisotrope Wärmeleitfähigkeiten in der Folienebene (x-y-Ebene) und Senkrechten (z-Richtung) auf. Dadurch kann Wärme aus punktförmigen Wärmequellen, sogenannten Hot Spots, über die Folien gespreizt und gerichtet abgeleitet werden. Durch ihre Weichheit passen sie sich Oberflächen sehr gut an, wodurch der thermische Kontaktwiderstand minimiert wird. Als Nebeneigenschaft wirken sie sich durch ihre hohe elektrische Leitfähigkeit günstig auf die EMV aus.

Typische Druckabhängigkeiten von Wärmeleitmaterialien

Wärmeleitmaterialien weisen spezifische Druckabhängigkeiten des thermischen Widerstandes auf.

Widerstände von Wärmeleitmaterialien bei jeweils geringer Materialdicke im Vergleich.

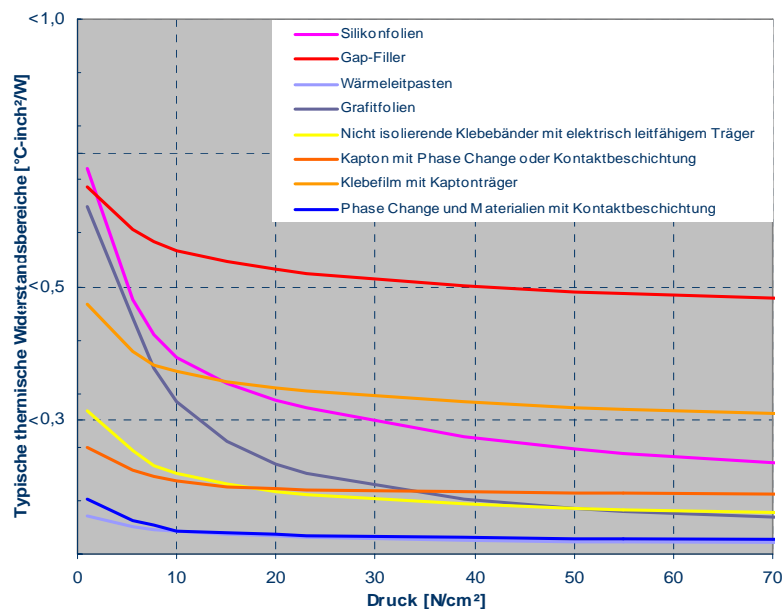


Abb. 2: Typische Druckabhängigkeiten thermischer Widerstände von Wärmeleitmaterialien. Der Montagedruck muss in jedem Fall geringer als die maximalen Belastbarkeiten der Bauelemente, Leiterplatte, Lötverbindungen, der Lead Frames und des Systems sein. Oftmals sind Drücke von nur 5 - 10 N/cm² (50 - 100 kPa) oder sogar weniger toleriert. In diesem Fall müssen kompressible Gap-Filler aus sehr weichen Elastomeren eingesetzt werden.

In Systemen bei denen die Bauelemente und wärmeleitenden Folien mit der Wärmesenke durch Halbleiterklammern kraftschlüssig zusammengebracht sind, muss die Klammerkraft ausreichend hoch sein. Dadurch wird die optimale thermische Anbindung unter Berücksichtigung der spezifischen Druckabhängigkeit des thermischen Widerstandes des Wärmeleitmaterials erzielt. Abb.3 zeigt das Prinzip der Wechselwirkung zwischen Wärmeleitfolien und Halbleiterklammern.

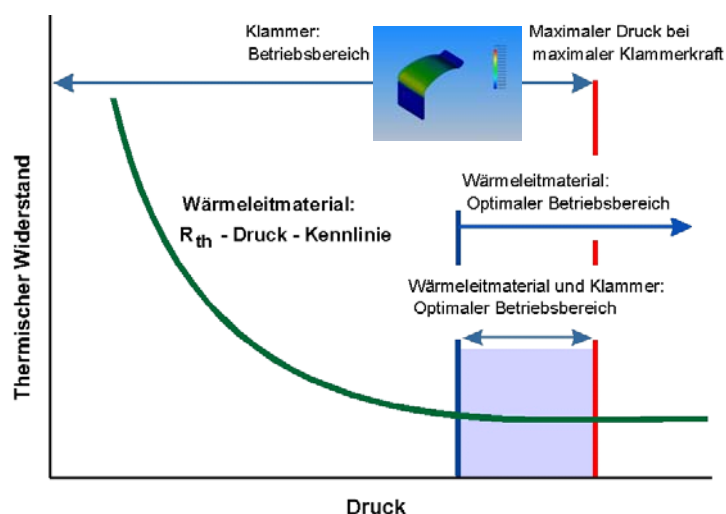


Abb. 3: Optimaler Betriebsbereich von Wärmeleitfolien und Halbleiterklammern - qualitativ

Der optimale Betriebsbereich ergibt sich aus dem Bereich der optimalen Funktion des Wärmeleitmaterials vor der mechanischen Belastungsgrenze.

Wirkprinzip von Phase Change Materialien

Phase Change Materialien eignen sich in besonderer Weise zur Minimierung der Kontaktwiderstände und folglich des thermischen Gesamtwiderstandes. Sie werden vor allem als Beschichtungen auf dünne Folien und Filme aufgebracht, um den gegenüber dem thermischen Widerstand durch den Träger hohen Anteil der thermischen Kontaktwiderstände am Gesamtwiderstand stark zu reduzieren. Mit ihnen können Wärmeleitpasten, die schwer handhabbar und im Auftrag prozessunsicher sind, ideal ersetzt werden. Sie sind meist als Poly- oder Monomere ausgebildet und gehen in einen weichen Aggregatzustand über wenn das Material das erste Mal über die sogenannte Phase Change Temperatur hinaus erwärmt wird. Im weichen Zustand und die Volumenausdehnung von 10 bis 15% werden Luft einschüsse aus der Mikrostruktur der Oberfläche ausgetrieben, Unebenheiten ausgefüllt und die Kontaktflächen benetzt. Bei Abkühlung werden die Materialien wieder fest. Bei jedem weiteren Erwärmungsprozess werden die Phasen wieder durchlaufen, der thermische Kontaktwiderstand bleibt nach der ersten Erwärmung aber dauerhaft minimal. Durch die thixotrope Eigenschaft findet weitgehend kein Ausfließen statt. Abb.4 zeigt die prinzipielle Wirkungsweise und Kontaktverbesserung vor und nach der Erwärmung. Es wird deutlich, dass bei Erwärmung die Luft einschüsse eliminiert werden. Abb.5 zeigt qualitativ die thermischen Widerstände beim ersten und den folgenden Erwärmungsvorgängen.

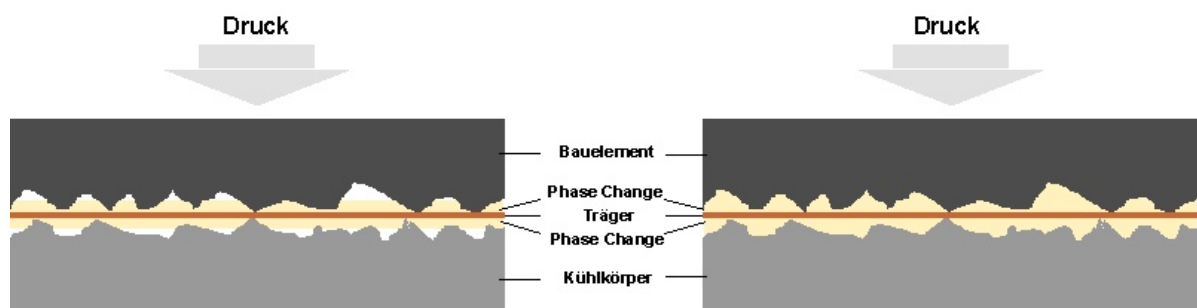


Abb. 4: Wirkungsweise von Phase Change Materialien und Beschichtungen

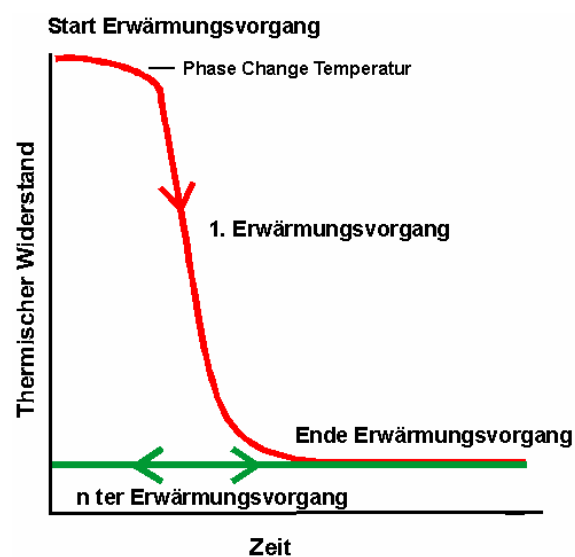


Abb. 5: Thermischer Widerstand von Phase Change Materialien bei Erwärmungsvorgängen