

Hochtemperaturanwendungen auf Leiterplatten – der Einfluss von Temperatur und Geometrie

Von Dipl.-Ing. Oberender, Johann Hackl, Häusermann GmbH, Gars am Kamp, Österreich

Die Analyse von Anwendungen mit hohen thermischen und elektrischen Anforderungen zeigt, dass für das Einhalten der für die Baugruppe vorgeschriebenen maximalen Temperatur unterschiedlichste Technologien zum Einsatz kommen. Das gilt gleichermaßen für die gesamte Baugruppe, das Substrat als auch für einzelne Bauteile.

Bei der Konzipierung von Baugruppen mit einem vorgegebenen Temperaturregime sind primär zwei Werte bezüglich der Temperatur zu berücksichtigen. Einerseits die Umgebungstemperatur, in der die Baugruppe bzw. in der das Bauteil betrieben wird und andererseits die zulässige Erhöhung der Temperatur gegenüber dieser Umgebungstemperatur. Diese beiden Temperaturwerte haben bei der Realisierung hoher Ströme und für die Entwärmung bei hohen Verlustleistungen einen entscheidenden Einfluss auf die geometrischen Verhältnisse. Man spricht insbesondere bei der Berechnung von hohen Strömen auf Baugruppen von der vierten (Temperatur) und der fünften (Geometrie) Dimension. Die Zeiten, als die Stromtragfähigkeit mittels der IPC 2221 berechnet wurde bzw. bei der Entwärmung beinahe ausschließlich auf das Potenzial von Kühlkörpers geachtet wurde, gehören erfreulicherweise der Vergangenheit an.

1 Grundlagen

1.1 Temperatur

Der Zusammenhang zwischen dem elektrischen Widerstand und der Temperatur eines elektrischen Leiters ist physikalisch wie folgt beschrieben:

$$R_{t\text{-real}} = R_{20^{\circ}\text{C}} [1 + \alpha \cdot (t_{\text{real}} - 20)]$$

$R_{20^{\circ}\text{C}}$ = Widerstand bei 20°C t_{real} = Betriebstemperatur
 α = Temperaturkoeffizient $R_{t\text{-real}}$ = Widerstand bei realer Temperatur

Wird nun ein Leiter bei einer von 20 °C abweichenden Umgebungstemperatur betrieben, gilt der fol-

engl.

gende Zusammenhang bezüglich Temperatur und Strom:

$P_{\text{real}} = I_{\text{real}}^2 \cdot R_{\text{real}}$	$P_{20^{\circ}\text{C}} = I_{20^{\circ}\text{C}}^2 \cdot R_{20^{\circ}\text{C}}$	$R_{\text{real}} = R_{20^{\circ}\text{C}}(1 + \alpha \Delta t)$
$P_{\text{real}} = P_{20^{\circ}\text{C}}$		
$I_{20^{\circ}\text{C}}^2 \cdot R_{20^{\circ}\text{C}} = I_{\text{real}}^2 \cdot R_{20^{\circ}\text{C}}(1 + \alpha \Delta t)$		$I_{t\text{-real}} = I_{20^{\circ}\text{C}} / (1 + \alpha \Delta t)^{1/2}$
$I_{20^{\circ}\text{C}} \cdot \overset{\uparrow R_{20^{\circ}\text{C}}}{R_{20^{\circ}\text{C}}} = I_{\text{real}}^2 \cdot \overset{\uparrow R_{20^{\circ}\text{C}}}{R_{20^{\circ}\text{C}}} (1 + \alpha \Delta t)$		

- I_{real} = Strom bei realer Temperatur
- $I_{20^{\circ}\text{C}}$ = Strom bei 20°C
- P_{real} = elektrische Leistung bei realer Temperatur
- $P_{20^{\circ}\text{C}}$ = elektrische Leistung bei 20°C
- $R_{t\text{-real}}$ = Widerstand bei realer Temperatur
- $R_{20^{\circ}\text{C}}$ = Widerstand bei 20°C
- t_{real} = Reale Temperatur (Betriebstemperatur)
- Δt = Differenz Betriebstemperatur zu 20°C
- α = Temperaturkoeffizient

Daraus ist ersichtlich, dass sich der reale Strom bei erhöhter Temperatur vermindert. Das bedeutet, ein elektrischer Leiter trägt bei nach oben abweichender Temperatur gegenüber 20 °C einen geringeren Strom beziehungsweise die Temperatur des Leiters erhöht sich bei gleichem Strom.

1.2 Geometrie

Auch bezüglich der Geometrie gibt es eindeutige Gesetze. Hier muss allerdings der dreidimensionale Raum betrachtet werden. In diesem Zusammenhang müssen sowohl der Wärmedurchgang und die Kon-

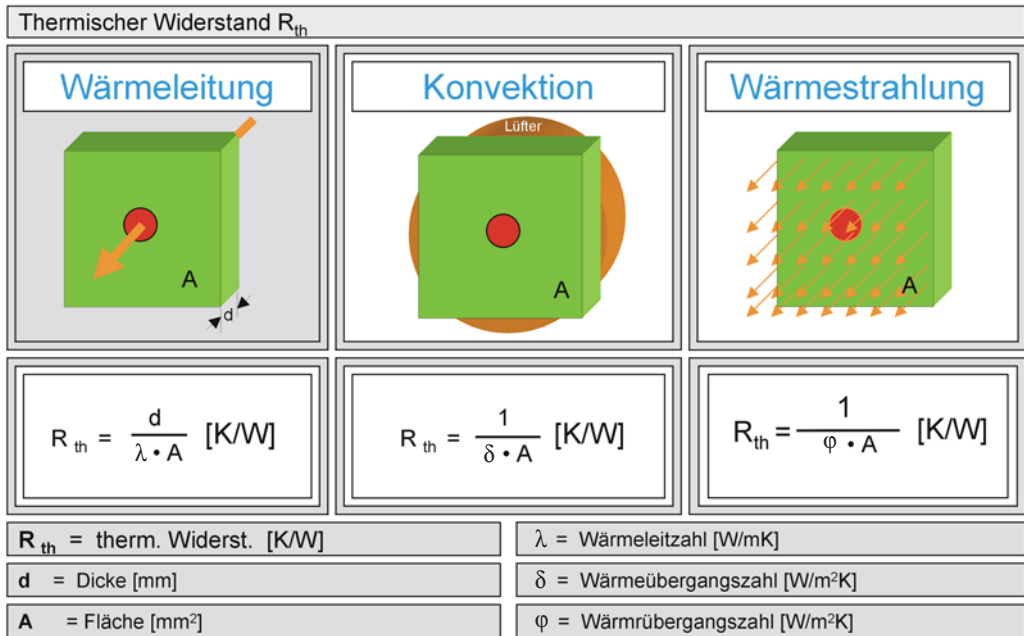


Abb. 1: Das Prinzip der Wärmeleitung, der Konvektion und der Wärmestrahlung

vektion als auch die Wärmestrahlung beachtet werden, wobei jedes dieser drei Gesetze seine eigenen Materialkonstanten hat (Abb. 1).

Bei der Dimensionierung von Baugruppen wird in der Regel die Wärmeleitung gerechnet. Die natürliche Konvektion ist Bestandteil der Materialkonstanten für Fluide. Die umgebende Luft ist so ein fluidischer Körper. Ohne die natürliche Konvektion würde das umgebende Luftvolumen ausschließlich den Anteil des Wärmedurchgangs leisten. Dies wäre der weitaus geringere Anteil gegenüber der Konvektion. Die Wärmestrahlung gewinnt in Form von großen Absorptionsflächen, beispielsweise bei Schaltschränken, an Bedeutung.

2 Berechnung

2.1 Strom

In den nachfolgenden Beispielen werden Ströme in Abhängigkeit von der Temperatur (hier bei einem Δt von 40 K) betrachtet. Gleichzeitig wird der Einfluss der Geometrie, die diesen Leiter umgibt, einbezogen. Der Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Änderung des elektrischen Widerstandes ist mit dem Gesetz

$$R_{t-real} = R_{20^\circ C} [1 + \alpha \cdot (t_{real} - 20)]$$

relativ einfach dargestellt. Die Ermittlung der Einflüsse der Geometrien, die solche Strom tragenden Leiter umgeben, ist weitaus komplexer. Vier unterschiedliche Geometrien auf einer Leiterplatte sollen das zeigen (Abb. 2):

Die in *Abbildung 3* aufgezeigten Berechnungen sollen diesen Zusammenhang am Beispiel konkreter Geometrien aufzeigen. Grundlage für diese Berechnung sind empirisch ermittelte Faktoren für unterschiedliche Leiterplattenaufbauten. Bei Typ B ist eine gegenüberliegende Kupferfläche vorhanden. Bei den Typen C und D sind vollflächige Versorgungslagen (z. B. VCC oder GND) in die Innenlagen eingefügt. All diese Kupferflächen dienen hier zur Wärmespreizung, wenn diese keine Eigen Erwärmung haben.

In *Abbildung 4* werden einander unterschiedliche stromtragende Leitergeometrien bei gleichem Querschnitt und gleicher den Leiter umgebenden Geometrie gegenübergestellt. Der Vergleich zeigt einen weiteren erheblichen Unterschied der Stromtragfähigkeit bezogen auf das Verhältnis der Leiterbreite zur Leiterhöhe.

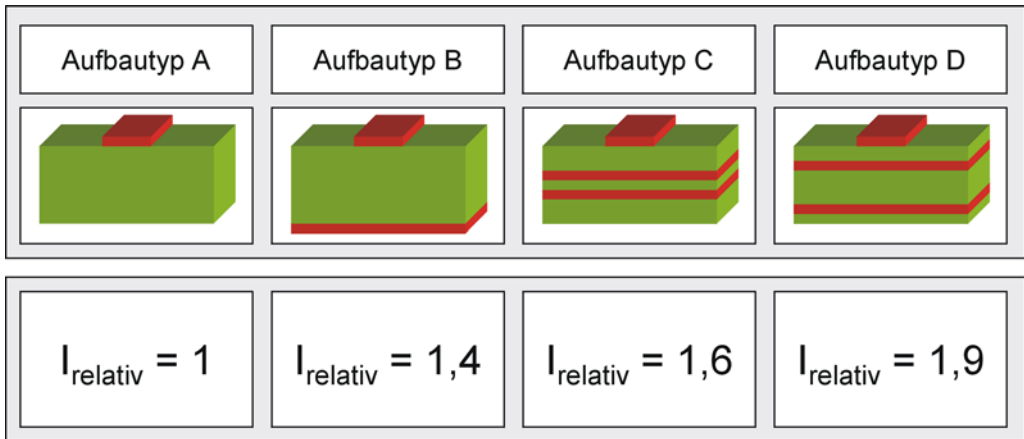


Abb. 2: Stromtragfähigkeit unterschiedlicher umgebender Geometrien bei gleichem Δt gegenüber Umgebungstemperatur



Abb. 3: Berechnung der Stromtragfähigkeit unterschiedlicher umgebender Geometrien am realen Beispiel

b/h = 120		Bezeichnung	Wert	Strom
		Delta T[°C]	40	50A
		Typ	B	
		b[mm]	12	
		h[μm]	100	
b/h = 67		Bezeichnung	Wert	Strom
		Delta T[°C]	40	47A
		Typ	B	
		b[mm]	9	
		h[μm]	133	
b/h = 30		Bezeichnung	Wert	Strom
		Delta T[°C]	40	42A
		Typ	B	
		b[mm]	6	
		h[μm]	200	
b/h = 7,5		Bezeichnung	Wert	Strom
		Delta T[°C]	40	36A
		Typ	B	
		b[mm]	3	
		h[μm]	400	

Abb. 4: Berechnung der Stromtragfähigkeit zum Verhältnis Leiterbreite zur Leiterhöhe bei gleichem Leiterquerschnitt

2.2 Thermische Verlustleistung

Beim Strom wird vom Äquivalent der elektrischen Leistung zur thermischen Leistung gesprochen. Für die Berechnung des Entwärmungspotenzials bei vorgegebener Verlustleistung in Form von $P = I^2 \cdot R$ in Watt, wird neben den thermischen Widerständen zunächst das elektrische Ersatzschaltbild herangezogen. In der Folge kann dann der thermische Gesamtwiderstand berechnet werden. *Abbildung 5* zeigt ein Ersatzschaltbild.

Es wird davon ausgegangen, dass die Wärmequelle Q und das Lot die Wärme fast ausschließlich in der Senkrechten transportieren. Die darunter lie-

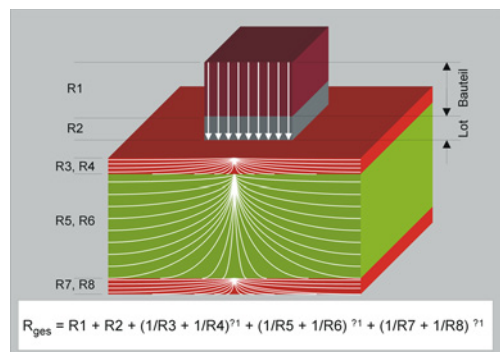


Abb. 5: Berechnung des thermischen Gesamtwiderstandes

genden Schichten haben in der Wärmespreizung zum senkrechten Widerstand jeweils einen Parallelwiderstand lateral. So ist der Gesamtwiderstand der Kupferschicht R3-R4:

$$(1/R_{\text{ges R3 R4}})^{-1} = (1/R3 + 1/R4)^{-1}$$

3 Design – Entwärmung von Bauteilen

Es werden einander zwei unterschiedliche Entwärmungskonzepte gegenübergestellt:

- Mit Harz gefüllte, gedeckelte Durchkontaktierungen direkt unter dem Bauteil (Abb. 6)

- Kupferprofile (0,5 mm dick) unter dem Bauteil mit Durchkontaktierungen seitlich des Bauteils (Abb. 7)

Der Vergleich der beiden Konzepte führt zu dem in *Tabelle 1* aufgeführten Ergebnis:

In *Abbildung 10* werden vier unterschiedliche Entwärmungskonzepte am Beispiel eines TO-220 in SMD-Ausführung gegenüber gestellt. Ohne jeglichen Eingriff ergibt sich ein thermischer Widerstand von mehr als 50 K/W.

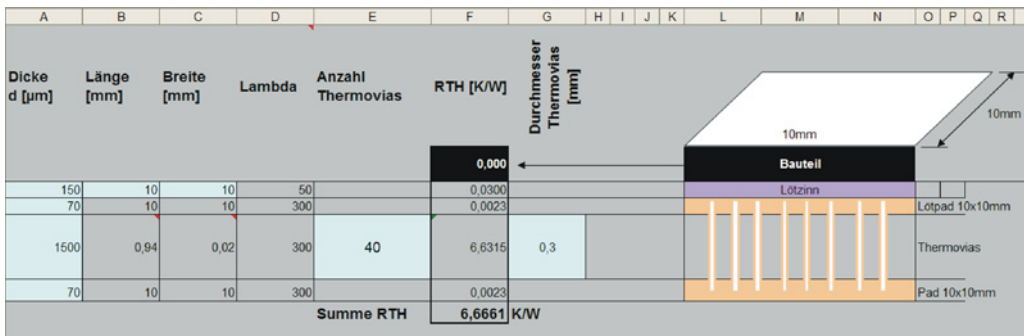


Abb. 6: Entwärmungskonzept mit unter dem Bauteil platzierten, mit Harz gefüllten und gedeckelten Vias

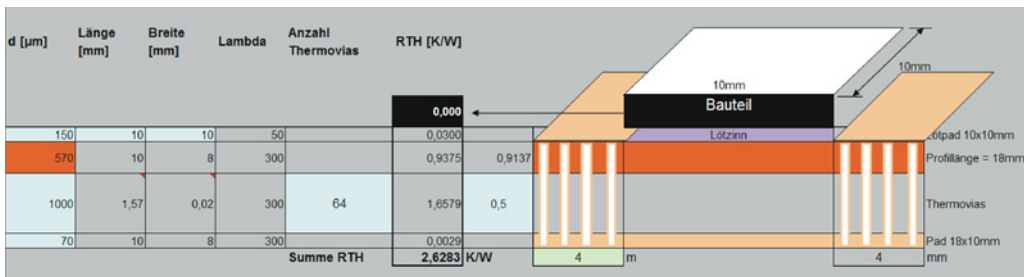


Abb. 7: Entwärmungskonzept mit zwei Kupferprofilen 4 x 0,5mm unter dem Bauteil mit seitlich angeordneten Vias

Tab. 1: Bewertung von zwei unterschiedlichen Entwärmungskonzepten

Ausführung	
<i>Vias unterm Bauteil gepluggt und gedeckelt</i>	<i>Profile unterm Bauteil mit seitlichen Vias</i>
<i>Rth</i>	<i>Rth</i>
<i>Bewertung</i>	<i>Bewertung</i>
<p>6,7 K/W</p> <p>Aufwändige Fertigung durch den Pluggingprozess und die anschließende galvanische Übermetallisierung der Vias. Bei gleicher Anzahl der Vias gegenüber der Version mit Profilen ist der Rth mit 6,7K/W deutlich höher.</p>	<p>4,3 K/W</p> <p>Die Integration der Profile unter der Außenlage ist wesentlich kostengünstiger als die Version mit gepluggten und übermetallisierten Vias. Der Rth ist mit 4,3K/W deutlich geringer.</p>

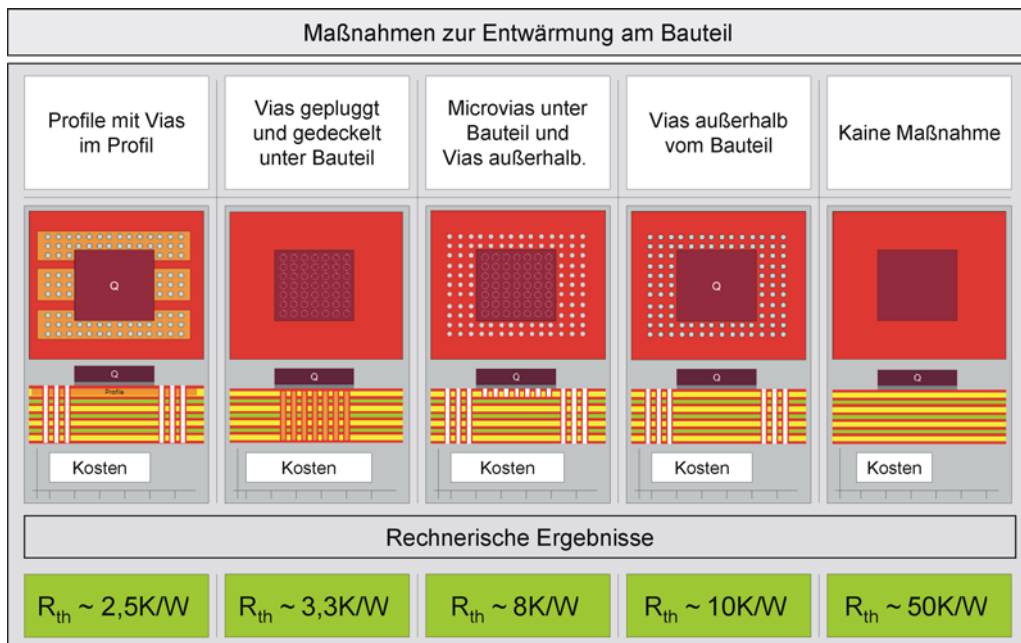


Abb. 8: Vier Ausführungsmöglichkeiten bezüglich der Entwärmung auf Ebene von Bauelementen

Die vier häufigsten konstruktiven Maßnahmen aus *Abbildung 8* sind:

- Profile unter Lage 1 (unter dem Bauteil)
- Gepluggte gedeckelte Löcher unter dem Bauteil
- Microvias unter dem Bauteil mit seitlich angeordneten Vias
- Seitlich vom Bauteils angeordnete Vias

Zusammenfassung

Auf Leiterplattensubstratebene lassen sich für viele Baugruppen eine Reihe intelligenter Lösungen für die Realisierung hoher Ströme und das Thermalmanagement hoher Verlustleistungen finden. Im Zuge der Diskussion mit Entwicklern und Konstrukteuren können aber gleichzeitig immer wieder Defizite hinsichtlich der Handhabung der Berechnungsgrundlagen festgestellt werden. Auch die Vielzahl an konstruktiven Möglichkeiten bei der Gestaltung der Leiterplattensubstrate ist vielfach unbekannt.

Die vermehrte Nutzung der Qualifizierungsmöglichkeiten und der damit verbundene Erfahrungsaustausch unter den Entwicklungsingenieuren hat in den letzten Jahren jedoch zu deutlich verbes-

serten Ingenieursleistungen geführt. Sowohl der *Fachverband für Elektronikdesign FED* als auch unterschiedliche Leiterplattenhersteller und Baugruppenfertiger bieten Schulungen an, in welchen man sich einen Überblick über die unterschiedlichen Technologien und Layoutlösungen verschaffen kann. Für die Auswahl der für eine konkrete Anwendung optimal geeigneten Technologie ist die Kenntnis über die Kosten der einzelnen Technologien eine wesentliche Voraussetzung.

Im Zuge der Auseinandersetzung mit den am Markt verfügbaren Technologien wird deutlich, dass es nicht an Lösungen mangelt, welche eine optimale Auslegung von Baugruppen bezüglich der Realisierung hoher Ströme und der partiellen Entwärmung von Bauteilen gewährleisten. Der ideale Einsatz und die Auswahl der für die jeweilige Anwendung optimal geeigneten Technologie bleiben dem Entwicklungsingenieur und dessen Know-how überlassen.

Kontakt

Dipl.-Ing. Lothar Oberender, Häusermann GmbH, Zitternberg 100, A-3571 Gars am Kamp, lothar.oberender@haeusermann.at, www.haeusermann.at