

Virtuelle Thermographie von Leiterbahnen und Leiterplatten



Teil 1: Hotspots durch Bauteile

Dr. Johannes Adam, ADAM Research

Eine Serie von drei Artikeln will einige Grundbegriffe und physikalische Konzepte der Elektronikkühlung zusammenstellen. Die Grenzen von bekannten Thermik-Faustformeln werden anhand von 3D-Simulationen ausgelotet. Da die Simulationen detailgenau sind und ohne große Vorkenntnisse durchgeführt werden können, spricht nichts dagegen, sie routinemäßig in den Entscheidungsprozess für ein intelligentes Wärmemanagement einzubinden. Im ersten Artikel geht es um Grundlagen und Bauteilhotspots, im zweiten um Strombelastbarkeit und im dritten um Leistungspulse.

An die Temperaturbelastbarkeit mancher Leiterplatten werden hohe Anforderungen gestellt. Speziell in der Automobilelektronik sind es die extremen Umgebungstemperaturen von -40 bis +140 °C, der Druck zum Downsizing und zur Erhöhung der Leistungsdichte, die eine sorgfältige Vorausplanung des thermischen Managements der Leiterplatte erfordern. Manche Bauteile sind gegen hohe Temperaturen eher robust, manch andere wie LED sind es nicht. Von den

vielen Optionen, die die Temperatur T beeinflussen, will man natürlich einen Kompromiss aus gut und günstig erreichen.

Gut geplant kommt günstiger

Die erwähnte sorgfältige Vorentwicklung kann über Testlayouts, Musterbau und Thermokamera erfolgen. Wir beschreiben hier einen numerischen Weg der diesen Zyklus beschleunigen kann – vom Layout

Tab. 1: Physikalische Eigenschaften einiger Werkstoffe

Stoff	λ (W/(m×K))	ρ (kg/m ³)	C (J/(kg×K))
Reinkupfer	360	8900	385
Kühlkörperaluminium	180 ... 210	2700	890
Silizium (@100°C)	110 (sinkt mit T)	2400	700
Cr-Ni Stahl	40	7800	460
Messing	110	8500	380
Lote	20 ... 50		
Keramik Al ₂ O ₃	10 ... 20	800	300
Glas	0.8 ... 1.3	2500	800
Harze, Lacke	0.3	1200	1000
„FR4“	0.3 ... 0.4	1200 ... 1900	900 ... 1200
„Leiterplatte“	1 ... 50		
[Ruhende Luft]	0.026	1	1200

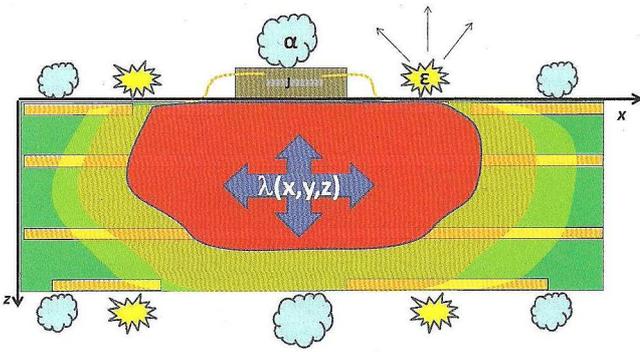


Abb. 1: Wärmetransport durch Wärmeleitung in einer Leiterplatte und stilisierte Temperaturentstehung. Dabei stellen Wolken oder Sterne die Wärmeabfuhr durch Konvektion oder Strahlung dar

direkt zum virtuellen Thermogramm. Ein wichtiger Nebenaspekt ist die Einfachheit der Methode, bzw. der zugrundeliegenden Software, die für jeden Layouter, Entwickler oder Berater in EMS-Betrieben schnell Ergebnisse liefern sollte und unabhängig vom Layout-Tool ist. Die berechneten Thermogramme sind hochauflösend, so dass Details, Hotspots und hohe Temperaturkontraste auf kurzen Distanzen erkennbar sind. Durch eine Änderung der Lagendicke bzw. Lagenanzahl kann man die Grenzen des Temperaturbereichs ausloten und durch eine geschickte Kombination Materialersparnis oder ein sichereres Lötresultat ableiten. Technologievergleiche können durchgeführt und die Versprechen verschiedener Hersteller am konkreten Projekt ausgetestet werden. Die Berechnungsergebnisse können in die Abschätzung der tatsächlichen Fertigungskosten für die Leiterplattenkühlung einfließen, indem man den Bohraufwand, die Materialkosten, die Lagenzahl, notwendige Zusatzelemente, den Flächenbedarf und die Zahl der Arbeitsschritte, die man zum Einhalten einer bestimmten Grenztemperatur braucht, für verschiedene Varianten vergleicht (Cent pro Kelvin). Danach ist eine experimentelle Überprüfung am realen Board notwendig.

Im ersten Teil dieser kleinen Serie beschäftigen wir uns mit den Grundlagen und einem LED Board als Musterbeispiel.

Verlustleistung ist nicht alles

Die im Bauteil, in der Leiterbahn oder an einer Kontaktstelle erzeugte Wärmeenergie verteilt sich in der Leiterplatte in einem diffusionsar-

tigen Prozess. Ein vektorieller Wärmestrom $\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad } T$ (W/m²) gleicht Temperaturunterschiede durch Wärmetransport von warmen Stellen zu kalten Stellen aus, wobei auf diesem Weg die Energie erhalten bleibt. Die Wärmeleitfähigkeit eines Werkstoffs bezeichnet man mit λ (W/(m×K)). Die Kombination aus Wärmefluss und differentieller Energieerhaltung ergibt die bekannte Fouriersche Wärmeleitungsgleichung (s. z.B. [1], [2]). Die Stoffwerte in Tabelle 1 sind nur Anhaltspunkte.

Die Lösung der Wärmeleitungsgleichung bei 1-dimensionalem Wärmestrom durch eine Platte ist das Ohmsche Gesetz der Wärmeleitung

$$T_{\text{Hei\ss}seite} - T_{\text{Kaltseite}} = R_{th,z} \times P \quad \langle 1 \rangle$$

wobei die Wärmequelle mit Verlustleistung P (W) außerhalb des Leitungspaths liegen muss und keine Wärme verloren gehen darf. Dann kann man Plattenschichten der Dicke d einen Wärmewiderstand $R_{th,z}$, gemäß

$$R_{th,z} = \frac{d}{\lambda \cdot A} \quad \langle 2 \rangle$$

zuweisen. Nur bei speziellen Anwendungen in der Elektronik Kühlung, die diese drei Bedingungen näherungsweise erfüllen, erhält man mit einem R_{th} -Ansatz sinnvolle Ergebnisse.

Wärmeleiter und Wärmeblocker

Eine Leiterplatte ist ein Stapel aus gut und weniger gut leitenden Schichten. Wir wollen an Beispielrechnungen zeigen, dass die Vorstellung, die Wärme eines Bauteils fließe in den Cu-Lagen, nicht ganz stimmt, weil auch das ‚FR4‘ seinen bescheidenen, aber wesentlichen Beitrag dazu gibt. Würde man in einer Leiterplatte das FR4 durch Luft ersetzen, würde nämlich kein Bauteil überleben. Andererseits zeigt sich aber auch, dass ein doppelt so gut leitendes Basismaterial nicht zu einer Hälfte des Temperaturanstiegs führen wird. Häufig findet man die Meinung, dass die Wärmeleitfähigkeit ausreiche, um aus

einer Verlustleistung P die Temperaturen T abzuleiten. Wie warm die Leiterplatte wirklich wird, wird aber durch die Effektivität der Kühlung bestimmt. Wenn sie hoch ist (z. B. bei starken Lüftern) wird

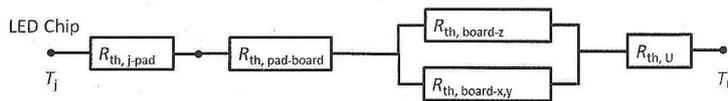


Abb. 2: Ein vereinfachtes Netzwerk aus thermischen Widerständen verknüpft die Wärmequelle links mit der Wärmesenke rechts. Eigentlich müsste das Board aus sehr viel mehr Widerständen aufgebaut werden

T klein und umgekehrt (z.B. unterdrückte Konvektion in einem Gehäuse). Die Größe, mit der man den Wärmestrom an die Umgebung parametrisiert, heißt Wärmeübergangskoeffizient α ($W/(m^2 \times K)$). Je höher α , desto mehr Wärme fließt bei einem Temperaturgefälle ΔT je Flächeneinheit in die Umgebung ab. α ist keine Stoffkonstante! Wie α nach Theorie und Experiment mit Fluidwerten und geometrischen Dimensionen zusammenhängt, findet man in Lehrbüchern zur Wärmeübertragung (s. z. B. [1], [2], [10]). α enthält strenggenommen nur den konvektiven Anteil der in die Grenzschicht abgeführt wird und zur Erwärmung der Luft führt.

Parallel dazu entwärmt die Leiterplatte über Wärmestrahlung nach dem T^4 -Gesetz. Die Effektivität der Strahlung ist abhängig von einer Oberflächeneigenschaft, die Emissionsgrad ϵ genannt wird. Kunststoffe oder lackierte Flächen haben ein hohes

$\epsilon \approx 0,9$, blanke Metalloberflächen einen Wert um 0,1 oder kleiner. Näherungsweise kann man Konvektion und Strahlung in einem Effektivwert α_{eff} zusammenfassen. *Tabelle 2* stellt typische Werte für Leiterplatten zusammen. α_{eff} wird im Folgenden synonym für α verwendet und ist in allen Betrachtungen dieser Aufsätze eine Eingabegröße, weil wir keine Berechnung der lokalen Strömung (CFD, computational fluid dynamics) um die Leiterplatte durchführen. Wir werden alle Leiterplatten senkrecht stehend in freier Konvektion mit $\alpha_{eff} = 12 W/m^2K$ und $T_U = 20^\circ C$, also in Laborsituation, simulieren. In der Praxis ist α entsprechend der realen Strömungsbedingung anzupassen.

Der Grundansatz für die Wärmeübertragung von einer gleichmäßig geheizten Platte an die Umgebung lautet: der Wärmestrom \dot{Q} (W) von einer Oberfläche mit Temperatur T an die Umgebung T_U ist propor-

Tab. 2: Typische Wärmeübergangskoeffizienten α und Wärmewiderstände $R_{th,U}$ für Platten der Höhe H und Breite B

Luftbewegung	v (m/s)	H (mm)	B (mm)	P (W)	α (W/m^2K) @ $T_U \approx 20^\circ C$	$R_{th,U}$ (K/W)
Freie Konvektion mit Strahlung , ruhende Luft'	($\approx 0,1-0,4$)	5	5	0.5	35	570
	„	50	50	5	15	13
	„	160	100	10	12	2,6
Freie Konvektion ohne Strahlung	„	5	5	0,5	17	1200
	„	50	50	5	8	25
	„	160	100	10	6	5,2
Erzwungene Konvektion	1	5	5	-	65	310
	1	160	100	-	17	1,8
	2	5	5	-	90	220
	2	100	160	-	20	1,6

tional zum Temperaturunterschied und zur Fläche A mit α als Faktor $\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (T - T_U)$. Für eine Leiterplatte mit Vorder- und Rückseite gilt $A = 2 \times L \times B$. Da der abgehende Wärmestrom \dot{Q} gleich der zugeführten Verlustleistung P sein muss, gilt $P = \alpha \cdot A \cdot (T - T_U)$ und damit

$$T - T_U = R_{th,U} \cdot P \quad \langle 3 \rangle$$

mit

$$R_{th,U} = 1 / (\alpha \cdot A) \quad \langle 4 \rangle$$

$R_{th,U}$ ist der Wärmewiderstand der Platte gegen die Umgebung. Bei allen Betrachtungen mit Wärmewiderständen in der Leiterplatte und zu Bauteilen muss der Abschlusswiderstand $R_{th,U}$ als Vergleichsmaßstab dagegegenghalten werden.

Ist die Leiterplatte auf einen Kühlkörper geklebt, dann ist der Abschlusswiderstand $R_{th,U} = R_{th,KK}$ natürlich kleiner, weil die Oberfläche eines Kühlkörpers größer ist.

Richtige Leiterplattenthermik für Jedermann

Die in den nachfolgenden Abschnitten gezeigten Temperaturbilder sind numerische Lösungen der Fougiergleichung auf einem x,y -Gitter mit Gitterweiten zwischen 100 und 200 μm und einer z -Schichtung gemäß dem Lagenaufbau, oder einer feineren Unterteilung (s. Abb. 3). Auf Grund der feinen Ortsauflösung nennen wir die $T(x,y)$ -Karten auf den Oberflächen $z=0$ und $z=D$ virtuelle Thermogramme, die aus den berechneten Thermopixeln aufgebaut sind. Eine Euroformatkarte hätte bei 100 μm Auflösung auf den Oberflächen jeweils 160 000 Thermopixel. Um im Bild der Wärmewiderstände von Abbildung 2 zu bleiben, besteht das Leiterplattenmodell aus einem Netzwerk mit Millionen von Wärmewiderständen. Die in diesem Artikel benutzte Software [3] berücksichtigt im Prinzip alle Multilayer-Aufbauten, SMD-Bauteile (Schicht 00), Embedded compo-

nents (07), Inlays, Stromschienen (03), Dickkupfer, Kleber (10), gepluggte, ungepluggte, blind und burried (05) Vias, solange es sich um eine starre Flachbaugruppe handelt. Kühlkörperrippen können über einen R_{th} an (11) berücksichtigt werden.

Für eine Berechnung der Temperatur oder der Strombelastbarkeit (in Teil 2) werden gebraucht:

- der Lagenaufbau mit Endkupferdicke
- das Leiterbild der Lagen, z. B. im Gerberformat
- das Bohrbild der plattierten und unplattierten Bohrungen, z. B. im Gerber- oder Excellonformat
- Pins an denen Strom zu- oder abgeführt wird und die Stromstärke
- Bauteile und deren Verlustleistung
- die äußeren Bedingungen, z. B. freie Konvektion oder Lüfter

Die Rechenzeiten hängen stark von der Auflösung und der Zahl der Schichten ab und liegen im Bereich von Minuten. Als Ergebnis erhält man T -Karten für alle Schichten, einen Atlas der Stromdichte, des Potentials (also auch den Spannungsabfall) und der temperaturabhängigen Stoffwerte. Bei transients Simulation (in Teil 3) kann man virtuelle Thermoelemente setzen und die zeitlichen T -Kurven aufnehmen.

Der Ort ist wichtig

Ein und derselbe Bauteiltyp kann auf einer Leiterplatte unterschiedliche Temperaturen haben, je nach dem in welcher lokalen Leitfähigkeitsumgebung es sich horizontal und vertikal befindet. Wir demonstrieren das in Abbildung 4 anhand einer vierlagigen Stromversorgungsplatte (2s2p). Die ausgewählten

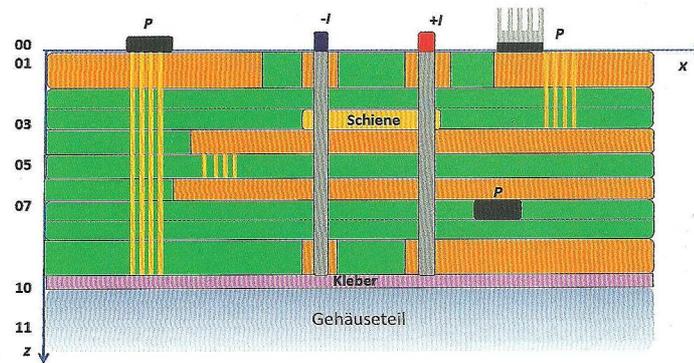


Abb. 3: Mögliche Zutaten für ein Leiterplattenmodell. Jede vertikale Schicht könnte eine Wärmeleitfähigkeitskarte aus dem Layout enthalten

Wärmequellen seien dünne Cu-Plättchen mit SO-8-Footprint (5 mm x 4 mm) und mit einer Verlustleistung von je $P = 0,8 \text{ W}$. Der im Datenblatt angegebene Wert Junction-Ambient $R_{th,j-amb}$ von 150 K/W kann für keine Art von Berechnung verwendet werden, weil dort nicht dazugesagt wird, auf welcher Testleiterplatte oder in welcher Testumgebung gemessen (oder berechnet) wurde und was davon der Anteil von Junction-to-Board ist. Jedec-51 [4] definiert zwar einige Testleiterplatten, die mal mehr mal weniger Leiterstruktur enthalten und als Testumgebung einen 1ft^3 großen luftdichten Plexiglaswürfel vorschreiben, ob sich die Hersteller daran halten erfährt man oft nur auf Anfrage. Lohan [5] maß z. B. mit dem gleichen Bauteil Unterschiede von bis zu 83 K , je nachdem ob hoher oder niedriger Kupfergehalt in der LP vorhanden war.

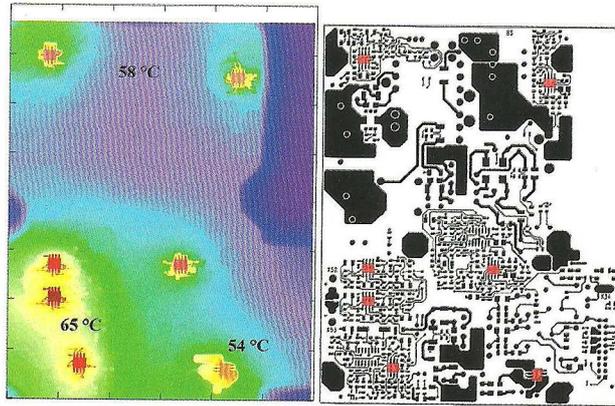


Abb. 4: Testboard Power Supply 4-lagig mit sieben SO-8 Wärmequellen

Layout



Layer Stack

Index	Name	Type	File	Thick (mil)	Conductor	Dielectric
1	Top	ger	30110212C.GTL	35	CuSTRM	ε=2.25TRM
2	HT-04502	pre		76	CuSTRM	ε=2.25TRM
3	Platte	met		1500	AlSTRM	FR4STRM

Leiterbild *.GTL
 Bergquist HT-04583, $\lambda=2.2 \text{ W/mK}$
 1.5 mm Alu, eloxiert

Ausschnitt mit 6 LEDs

Länge 1500 mil = 38.1 mm
 Auflösung 50 mu
 $P_{LED} = 0.3 \text{ W}$ (Annahme)

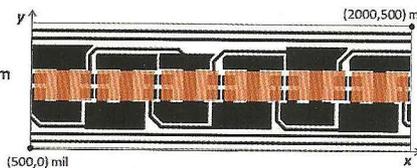


Abb. 5: Modellbestandteile eines IMS-Testboards und LED-Belegung (rot transparent)

Die Bauteile von *Abbildung 4* lassen sich in drei Temperaturgruppen einteilen: 54°C , 58°C , 65°C . Da die zweite Lage (erste Innenlage) die GND Lage ist und diese bis auf die Freistellung der Bohrungen voll verkupfert ist, müssen für die Unterschiede das Leiterbild von Top und das Bohrbild verantwortlich sein. In [6] zeigen wir in einem Supplement die Bilder des Layouts und weitere Details. Das Bauteil rechts unten hat den meisten Kupferkontakt und ist damit das kälteste. Das lokale Layout aller anderen sieht in etwa gleich aus. Die Dreiergruppe links unten ist eng gepackt und erzeugt gemeinsam ein höheres Niveau (65°C). Die beiden oberen liegen weit auseinander und beeinflussen sich nicht. Das Bauteil in der Mitte ist leicht wärmer, weil es nur eine (statt 2 oder 3) Durchkontaktierung hat. Diese Temperaturwerte sind ‚relativ‘, weil andere Lagen- und andere Prepregdicken andere Temperaturen erzeugen würden. Natürlich bedarf jedes Layout und jede Leiterplatte seiner individuellen Untersuchung. Wir können die Einflussfaktoren auf die Temperaturen zusammenfassen:

- Lokale Kupferfläche

- Packungsdichte der Bauteile
- Ableitung durch DKs

Wie stark sich eine Verbesserungsmaßnahme auswirkt hängt nicht nur von Material und Geometrie ab, sondern auch davon, ob das Bauteil ‚nahe genug ein Kaltgebiet sieht‘. Diese Einsichten kann die 3D-Analyse liefern.

LED-Testleiterplatte

LED-Anwendungen sind temperaturempfindlich weil sich Licht und Farbeigenschaften der LED bei hohen Temperaturen verändern. Zur besseren lokalen Kühlung setzt man gerne sog. IMS Substrate ein. Eine IMS (Insulated Metal Substrate) Leiterplatte besteht aus einer Metallplatte, einer elektrischen Iso-

lation (Dielektrikum) und einem Leiterbild, das die LED mit Strom versorgt [7]. Die Metallplatte soll die Wärme der LED auf eine größere Fläche spreizen. Normalerweise sind IMS Platten einlagig. Als Muster für ein Leiterbild benutzen wir das Osram Referenz Layout DURIS E5 ,30110212C' [8]. *Abbildung 5* oben zeigt das Board etwa nur zur Hälfte. Der weiße Bereich wird simuliert. Das ganze Board ist ca. 30 cm lang und trägt 48 LED (5.7 mm x 3.0 mm x 0.9 mm). Der im Datenblatt angegebene $R_{th,J-Solder}$ ist 45 K/W.

Die Zutaten für das Modell adaptieren wir gemäß [8]. Wir berechnen nur aus Gründen der Übersichtlichkeit das Board nicht in ganzer Länge, sondern einen Ausschnitt mit 6 LED zwischen $x=500$ und 2000 mil (1 mil=1000in). Die Breite beträgt 500mil. Die Schicht (Level) mit Index 01 ist die Top Lage, die ein Leiterbild aus einem Gerberfile (type = ,ger') des Referenzlayouts enthält. Die Umwandlung des Layouts auf die 50 x 50 μ m großen künftigen Thermopixel, sieht man in *Abbildung 5* rechts unten. Der Layerstack enthält außerdem das Dielektrikum HT-04503 (type = ,pre') und die Aluminium Platte, quasi als Bottom Layer (type = ,met'). Die LED sind rechts unten transparent an ihrer entsprechenden Position dargestellt. Die Bauteilblöcke liegen auf der Top Lage auf und werden zur Top Lage hin durch den Wärmewiderstand zwischen Solderpad und Junction nach Datenblatt

$R_{th,J-Solder}$ getrennt. Deshalb ist die in *Abbildung 6* abzulesende Bauteiltemperatur als Junction-Temperatur zu interpretieren. *Abbildung 6* zeigt die berechnete Junction-Temperatur für eine aktive LED, sowie die Temperaturverteilung in der Top-Lage. Es bildet sich kein Hotspot, weil die Al-Platte sehr effektiv die Wärme spreizt. Es ist kaum eine Variation von $T(x,y)$ zu erkennen. Dieses Ergebnis lässt sich in diesem Fall durch eine manuelle Übersichtsrechnung verifizieren: unter der Annahme, dass $P = 0.3$ W auf einer Fläche von 13 mm x 38 mm verteilt sind und mit $\alpha = 12$ W/m²K an beiden Oberflächen die Wärme abgeht, folgt aus Gln. <3> und <4>

$$R_{th,U} \approx 1 / (2 \times 12 \text{ W/m}^2\text{K} \times 0.013 \text{ m} \times 0.039 \text{ m}) \approx 83 \text{ K/W}$$

$$T_{Board} - T_U \approx 83 \text{ K/W} \times 0.3 \text{ W} \approx 25 \text{ K}$$

$$T_{Board} \approx 20^\circ\text{C} + 25 \text{ K} = 45^\circ\text{C} \approx T_{Solder}$$

$$T_J - T_{Solder} \approx R_{th,J-Solder} \times P = 45 \text{ K/W} \times 0.3 \text{ W} \approx 13 \text{ K}$$

$$T_J \approx 58^\circ\text{C}$$

Die Summe aller Temperaturerhöhungen führt zu einer Junction-Temperatur von etwa 60 °C.

Wir wollen jetzt noch den Wärmewiderstand des Dielektrikums in z-Richtung mit dem Wärmewiderstand zur Umgebung vergleichen. Nach Gleichung <2> ist $R_{th,Diel} \approx 76 \times 10^{-6} \text{ m} / (2.2 \text{ W/mK} \times 0.013 \text{ m} \times 0.038 \text{ m}) \approx 0.07 \text{ K/W}$, also vernachlässigbar

klein gegenüber $R_{th,U} \approx 83 \text{ K/W}$. Das wird in Werbematerialien meistens nicht erwähnt.

Das Temperaturbild für 6 LED ist noch homogener, allerdings machen 6 LED die Platte 6 x 25 K wärmer, d.h. $T_{Board} \approx 20^\circ\text{C} + 150 \text{ K}$ ([6]). Ohne Kühlkörper kann diese Leuchtleiste nicht betrieben werden, da die maximale Junction-Temperatur bei $\approx 110^\circ\text{C}$ liegt. Wie man unter diesen Bedingungen den Kühlkörper auslegt, finden Sie in [6]. Das Ergebnis wäre $R_{th,KK} \approx 60 \text{ K/W}$.

Wärmespreizung und Wärmedurchgang

Ein wesentliches Konstruktionselement, um eine niedrige Bauteiltemperatur zu erhalten,

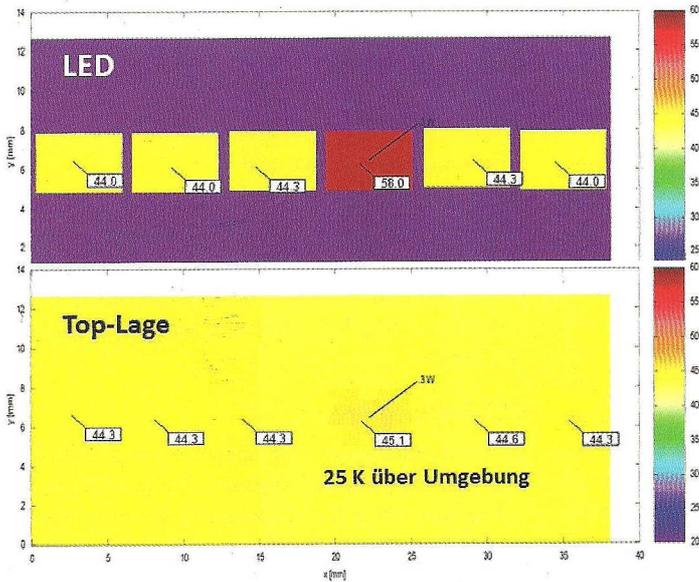


Abb. 6: Die gute Wärmeverteilung in der Al-Platte wirkt auf die Top Lage zurück

Tab. 3: Schätzungen für den Wärmekreis in freier Konvektion

Wärmeleitfähigkeit λ	Plattendicke D	Wärmekreisradius δ
0,3	1,5 mm	4 mm
25	1,5 mm	40 mm
210	1,5 mm	110 mm

ist die Wärmespreizung in der Leiterplatte. Sie sorgt dafür, dass die Fläche, über die ein Hotspot Temperatur an die Luft abgeben kann, vergrößert wird. Die lokale Wärmespreizung wird sowohl vom Layout in x-y Richtung, als auch vom vertikalen Lagenaufbau bestimmt, als auch von der Wärmeabfuhr in die Umgebung. Die Temperaturverteilung in homogenen Platten ist mit Aufwand noch analytisch beherrschbar [9,10], für PCB sind Abschätzungen mit Bleistift und Papier allerdings unrealistisch. In unserem 1-LED-Beispiel können wir uns alternativ fragen, wie die Materialwahl oder die Dicke des Materials die Temperatur beeinflusst, um z.B. Gewicht oder Kosten zu senken. Wann bricht die gute Wärmeverteilung der Trägerplatte (Schichtindex 3) zusammen? Die Übung ist zwar akademisch, aber wir variieren trotzdem am Grundmodell die Leitfähigkeit und die Dicke der Trägerplatte. Die Ergebnisse sind in *Abbildung 7* zusammengefasst. $R_{th,SU}$ ist der Wärmewiderstand

des solder pad zur Umgebung. Zwei Punkte sind bemerkenswert:

- Von Leitfähigkeit 50 (Blech) bis 360 (Kupfer) W/mK unterscheiden sich die Temperaturen kaum. Eine doppelt so gute Wärmeleitfähigkeit erzeugt keine doppelte Kühlung.
- Hotspots sind bei moderat niedriger Leitfähigkeit auf einem dickeren Substrat kühler, d. h. der reine Durchgangswärmewiderstand in z wäre ein falscher Vergleichsparameter.

Im einfachen Rechenmodell mit einzelnen Wärmewiderständen erklärt man die Situation üblicherweise so: Der thermische Hauptwiderstand ist der von der Platte zur Umgebung $R_{th,U} \approx 83 \text{ K/W}$ (s. oben), die beiden anderen sind der in z durch das Substrat und der in x-y-Richtung zu den Ecken. Das Konzept hat zwei entscheidende Schwächen. Erstens ist es schwierig die Wärmedurchgangsfläche A und die Wärmedurchgangslänge d für $R_{th,z}$ in Gl. <2> vernünftig

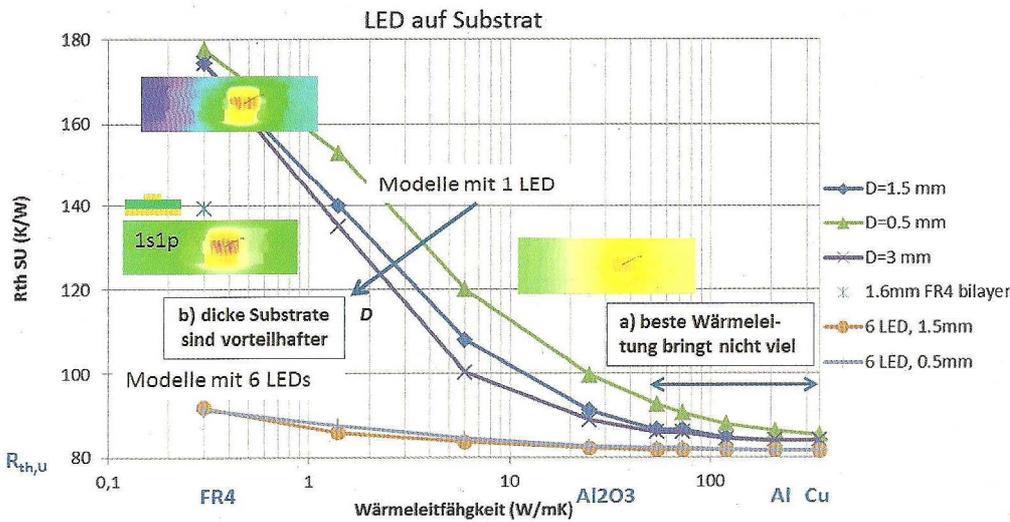


Abb. 7: Parameterstudie zu Leitfähigkeit und Dicke der Trägerplatte

anzugeben. Zweitens sind für den Wärmefluss weg vom Hotspot nicht alleine die Wärmewiderstände relevant, sondern auch die Temperaturunterschiede. Man kann es drehen und wenden wie man will: Es kommt mit zwei, drei Widerständen kein konsistentes Bild heraus.

Qualitativ kann man die in *Abbildung 7* eingeblendeten Thermogramme besser über das Konzept eines ‚Wärmekreises‘ verstehen. $T(x)$ fällt von einer (kleinen) Wärmequelle weg mehr oder weniger exponentiell ab. Ab einem Abstand um $3...5 \cdot \delta$ von der Wärmequelle ist dann T_U erreicht (s.a. [1], [9]). Mit der Board-Dicke D erhält man den Radius des Wärmekreises δ (m) aus

$$\delta \approx \sqrt{\lambda D / 2\alpha} \quad \langle 5 \rangle$$

Leider können wir aus Gleichung $\langle 5 \rangle$ keine quantitativen Temperaturen ableiten. Für die IMS-Alu Platte wäre $\delta \approx (210 \text{ W/mK} \times 0.0015 \text{ m}) / (2 \times 12 \text{ W/mK}) = 110 \text{ mm}$, also viel größer als die Platte selbst, so dass es nicht verwundert, dass in *Abbildung 7* keine T-Unterschiede zu sehen sind. Bei einer FR4-basierter Platte ist δ nur in der Gegend von 5 mm (*Tab. 4*), was man im Thermogramm in *Abbildung 7* links oben erkennen kann. Je dicker die Platte ist, desto besser kann die Wärme seitlich abfließen und die kalten

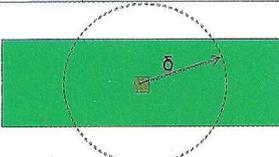
Beobachtungen:		
Variation	1 LED	6 LED
Wärmeleitfähigkeit des Trägers	Schlechtes $\lambda \rightarrow$ hohes R_{th} , Gutes $\lambda \rightarrow$ kleines R_{th}	Wenig Einfluss
Dicke des Trägers	Je dicker, desto besser	Keinen Einfluss
Erkenntnisse: <ul style="list-style-type: none"> λ reicht zur Beschreibung des R_{th} nicht aus Der Durchgangswärmewiderstand $D/\lambda A$ reicht nicht aus Die Verteilung der Wärmequellen muss angegeben werden 		
		
$\delta \approx \sqrt{\frac{\lambda D}{2\alpha}}$		
Erklärungen:		
Wärmeleitfähigkeit des Trägers	Bis 50 W/mK ist Wärmekreis größer als die Platte	Nicht relevante Größe, weil durch LED Positionen bereits gespreizt
Dicke des Trägers	Je dicker, desto größer der Wärmekreis und Leitung in die Ecken ist besser	Keine Auswirkung weil $R_{th,U} \approx 1/\alpha A \approx 83 \text{ K/W}$ der größte R_{th} ist

Abb. 8: Erklärung zu *Abbildung 7* mit Hilfe des Wärmekreises

Tab. 4: Wann machen Wärme-Vias Sinn?

Situation	Bohrungen machen Sinn	Nebenbedingung
Leiterplatte ohne Kühlkörper	Vias kontaktieren Lagen, die die Wärme spreizen können. Nicht in einen Wärmestau bohren, sondern am Rand entlang	Es gibt Bauteile mit Hotspots und irgendwo kalte Gebiete Bauteil gibt Hauptanteil seines Wärmestroms zum Board hin ab
Leiterplatte auf Kühlkörper	So nah wie möglich unter dem Hotspot	Gesamtwiderstand der Vias darf nicht winzig gegen $R_{th,KK}$ sein

Randbereiche erreichen, deshalb ist die $D = 3$ mm Kurve in *Abbildung 7* die tiefste der 1-LED-Kurven.

Bemerkungen:

- Durch α kommt auch die externe Wärmeabfuhr ins Spiel. Je nachdem, ob die externe Konvektion unterdrückt (in einem Gehäuse) oder verbessert wird (Lüfter oder Kühlkörper), ändert sich mit α auch die Wärmespreizung.
- Die Quadratwurzel zeigt an, dass eine Verdoppelung des Aufwands nicht zu einer Halbierung der Temperatur führt.

Vollkommen irrelevant wird im Beispiel die Wärmespreizung, wenn bereits eine flächenhafte Verteilung der Wärmequellen vorliegt, d.h. wenn alle 6 LED an sind. Dann bestimmt der äußere Wärmewiderstand $1/(\alpha A)$ und in geringem Maße der Durchgangswärmewiderstand in z die Temperatur. Die Situation lässt sich dann in der Tat 1-dimensional als kleine Widerstandskette behandeln. Dann ist auch nicht mehr die Materialwahl des Substrats entscheidend (siehe *Abb. 7* untere Kurvenschar), sondern die Effektivität eines Kühlkörpers und die Klebetechnik.

Wärme-Vias

Der Wärmedurchgang durch die Leiterplatte in z kann durch aufgekupferte DK-Bohrungen, sog. Wärmevias, verbessert werden. Ob dies zur Temperaturerniedrigung beiträgt, hängt von den Umständen ab und einige Argumente sind in *Tabelle 5* zusammengefasst. Wichtig ist, dass die Vias, über die die Wärme potentiell abgeführt werden soll, in irgendeiner Art mit kühleren Gebieten Kontakt bekommen und dadurch potentiell einen Temperaturunterschied ‚sehen‘ können.

Abbildung 7 zeigt bei x-Koordinate FR4 ($R_{th,SU} = 140$ K/W) auch das Ergebnis für eine 2-lagige FR4-Leiterplatte (1s1p) mit unstrukturiertem Kupfer auf der Bottom Lage. Die Effektiv-Leitfähigkeit wird durch die zweite Lage von 0,3 auf 1 W/mK angehoben. Durch zusätzliche Wärme-Vias erhält man je nach Bohrbild, Bohrdurchmesser und Bohrabstand andere Temperaturen, wobei man natürlich die elektrische Funktionstüchtigkeit erhalten muss. Beispiele dazu auch bei [12].

Die *Abbildung 9* zeigt das Thermogramm der Top-Lage für zwei Berechnungsexperimente in der 1s1p-Konfiguration, einen unbefriedigenden und einen besseren. An der unbefriedigenden Position ist die

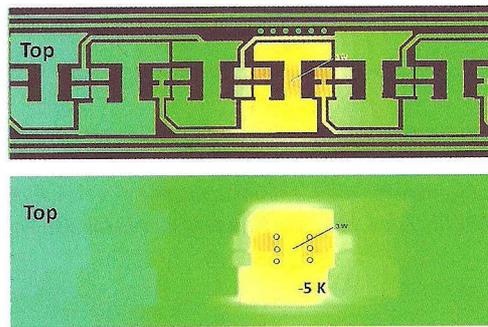


Abb. 9: Beispiele für Wärme-Vias. Thermogramm der Top-Lage; oben: schlechte Stelle, unten: bessere Stelle

Temperatur schon zu weit auf das Niveau ‚grün‘ abgefallen (oben), an der besseren (unten) führen Vias die Wärme direkt unter dem Bauteil in die spreizende Bottom Lage ab. Allgemein gilt, dass viele kleine Bohrungen zusammen einen effektiv größeren Cu-Anteil in der Hülse haben als wenige große.

Schluss

Das Ziel des Artikels war, Entwickler, Layouter und Berater für eine genauere physikalisch-thermische Betrachtung von Leiterplatten zu interessieren. Wärmewiderstände aus Application Notes sind nicht auf jede Leiterplatte anwendbar, eher sogar in den seltensten Fällen. Es hängt immer von den Umständen ab, wie warm ein Bauteil oder die Leiterplatte wird. Gute Vorentwicklung wird zu sichereren und vielleicht auch zu günstigeren Produkten führen. Im nächsten Teil werden wir uns mit der Strombelastbarkeit befassen.

Literaturverzeichnis

- [1] Wutz, M.: Wärmeabfuhr in der Elektronik. Vieweg Verlag (1991)
 - [2] Wagner, W.: Wärmeübertragung. Vogel Verlag (2011)
 - [3] www.adam-research.de/TRM.html
 - [4] JESD 51-3: ‚Low effective thermal conductivity test board for leaded surface mount packages‘. Electronic Industry Association (1996)
 - [5] Lohan, J. et al.: ‚Effect of PCB Thermal Conductivity on the Operating Temperature of an SO-8-Package in a Natural Convection Environment‘. Thermic Rome (1999)
 - [6] Supplement zu diesem Artikel bei www.adam-research.de/dokumente.html
 - [7] http://www.bergquistcompany.com/pdfs/web_trifold_led_510.pdf
 - [8] <http://ledlight.osram-os.com/led-ssl-tools/printed-circuit-board-designs/>
 - [9] Adam, J.: ‚Die Leiterplatte als Kühlkörper‘. 3. Tagung Elektronik Kühlung, Haus der Technik (2009)
 - [10] Ellison, G.N.: Thermal Computations for Electronics. CRC Press (2011)
 - [12] <http://www.ti.com/lit/an/snva183a/snva183a.pdf>
- Kontakt: Dr. J. Adam, Th.-Heuss-Str. 12, 69181 Leimen, www.adam-research.de