

THERMISCHE SIMULATION, RESULTATE IM PCB DESIGN

Thermische Simulation, eine wissenschaftliche Disziplin wird praxisrelevant. Berechnungen werden erleichtert und führen zu erheblichen Vorteilen bei Kriterien wie Grösse, Zeit, Produktdesign und Qualität. Ziel dieses Artikels ist es anhand einiger thermischer Probleme, die bei der Entwicklung von Leiterplatten und Baugruppen auftreten können, aufzuzeigen weshalb sich Board-Designer so früh wie möglich in Ihren Projekten mit der Wärmeentwicklung befassen sollten.

1. EINFÜHRUNG

Wann beginnen Überlegungen und Entscheidungen, durch die die thermischen Eigenschaften des fertigen Produktes beeinflusst werden?

- Wenn neue Materialien / Komponenten eingesetzt werden sollen?
- Wenn die Speisungs-Baugruppe überhitzt?
- Wenn das Gehäuse nur noch aus Löchern besteht?
- Wenn der erste Prototyp nach kurzer Zeit ausfällt?

Um diese Fragen zu behandeln, beginnt der Artikel mit einer kurzen (versprochen!) Wiederholung einiger Grundlagen zur Wärmeübertragung. Dann folgen einige Tips und Tricks zur Thermik sowie eine einfache Fallstudie.

2. GRUNDLAGEN

Zuerst eine kurze Übersicht zu den drei Arten der Wärmeübertragung:

- Wärmeleitung
- Konvektion
- Strahlung.

a.) Wärmeleitung ist der Übergang von Wärmeenergie zwischen festen Stoffen durch einen Temperaturgradienten. Die einfache 1D-Wärmeleitung erfolgt nach der Fourier-Gleichung, $Q = -kA \Delta T / \Delta x$, wobei k die Wärmeleitfähigkeit des Materials, A die Fläche des Wärmeübergangs und ΔT den Temperaturunterschied über die Distanz Δx bezeichnen. Da es sich bei einer Leiterplatte um ein komplexes Gebilde aus verschiedenen Lagen eines elektrischen Leiters (gewöhnlich Cu) mit Zwischenlagen aus einem Dielektrikum (FR4) handelt, ist die Wärmeleitfähigkeit sehr orthotrop, d.h., die Leitfähigkeit innerhalb einer Lage (k_x und k_y) ist typischerweise 100mal größer als zwischen den Lagen (k_z). So hat eine Leiterplatte mit einem gesamten Cu-Anteil von nur 7,5% innerhalb einer Lage eine Leitfähigkeit von ca. 30 W/(m-K), während die Leitfähigkeit zwischen den Lagen nur etwa 0,3 W/(m-K) beträgt. In Tabelle 1 ist die Wärmeleitfähigkeit einiger in der Elektronikindustrie gebräuchlicher Materialien aufgeführt.

Tabelle 1 – Wärmeleitfähigkeit von Materialien, die in der Kühlung elektronischer Schaltungen gebräuchlich sind.

Material	Wärmeleitfähigkeit [W/(m-K)]
Kupfer	390
FR4	0,30
Aluminium	150
Silizium, $f(T)$	117 bei 100°C
Kunststoff	< 1

b.) Mit Konvektion bezeichnet man die Wärmeübertragung von der Oberfläche eines festen Körpers auf eine in Bewegung befindliche Flüssigkeit oder ein Gas. Konvektion wird häufig durch das Newton'sche Gesetz der Kühlung ausgedrückt:

$Q = hA\Delta T$. Dabei ist h der Wärmetransportkoeffizient, A die Fläche und ΔT die Temperaturdifferenz zwischen Fläche und Flüssigkeit. Der Wärmetransportkoeffizient h hängt in hohem Ausmaß von den Temperatur- und Geschwindigkeitsprofilen an der Kontaktstelle ab. Die natürliche Konvektion zeichnet sich durch geringe Werte von h [ca. 5 W/(m²K)] aus. Die Wärmeübertragung erfolgt ausschließlich als Ergebnis der Luftbewegung, die ihrerseits durch die Temperaturänderung und den dadurch entstehenden Auftrieb ("warme Luft steigt auf"), entsteht. Erzwungene Konvektion beschreibt die Fälle, in denen eine externe Vorrichtung (z.B. ein Lüfter) dazu eingesetzt wird, die Flüssigkeit über die Oberfläche zu bewegen, was zu deutlich höheren Werten von h führt [>20 W/(m²K)].

c.) Strahlung bezeichnet die Wärmeübertragung durch elektromagnetische Energie, die von einer Fläche abgestrahlt wird, deren Temperatur höher als die Umgebungstemperatur ist. Wärmeübertragung durch Strahlung von einer Fläche T_s zur Umgebung T_e kann einfach durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz $Q = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_e^4)$ ausgedrückt werden. Dabei ist ε die Emissivität der Fläche, σ eine physikalische Konstante und A die Größe der strahlenden Fläche. Während die Strahlung in vielen Fällen natürlicher Konvektion bei der Kühlung elektronischer Geräte und Bauteile leicht bis zu 30% der gesamten Wärmeübertragung ausmachen kann, ist der Anteil der Strahlung in den meisten Fällen mit erzwungener Konvektion vernachlässigbar.

3. TIPS UND TRICKS

Nachdem wir die Grundlagen nun abgehandelt haben, wollen wir uns einigen praktischen Fragen zuwenden.

3.1 zum Leiterplatten Design

Neben ihrer Funktion der elektrischen Verbindung aller Bauelemente untereinander ist eine Leiterplatte für das elektronische Bauteil eine große Fläche, die sich auszeichnet als Kühlkörper einsetzen läßt. Natürlich hängt die Wirkung der Leiterplatte als Kühlkörper von einer Reihe von Faktoren ab:

1. Wie bei jedem Kühlkörper hat auch bei der Leiterplatte die Fläche großen Einfluß auf ihr Vermögen, Wärme an die Umgebung abzugeben. Kurz gesagt: je größer die Fläche, desto besser die Kühlwirkung.
2. Je mehr Kupfer die Leiterplatte enthält, desto besser wirkt sie als Kühlkörper, da sich die Wärme besser ausbreiten kann.
3. Genauso wichtig ist die Art der Bauteile und ihre Befestigung. Allgemein kann man sagen, daß bei Arrays oder vielpoligen Bauformen die Wärmeübertragung zur Leiterplatte durch möglichst viele Anschlüsse begünstigt wird. Die bessere Kühlung sorgt direkt für eine niedrigere Betriebstemperatur der Bauteile.
4. Auch die Bauteiledichte spielt eine Rolle. Je dichter die Bauteile gepackt sind, desto schlechter kann sich die Wärme der einzelnen Komponenten ausbreiten. Der für die Konvektion nutzbare Bereich wird kleiner.
5. Und schließlich haben die Umgebungsbedingungen einen bedeutenden Einfluß darauf, in welchem Umfang die Leiterplatte als Kühlkörper wirken kann. Je höher die Geschwindigkeit der vorbeiströmenden Luft ist, desto mehr Wärme wird über die Oberseite der Bauteile abgegeben, wodurch der Einfluß der Leiterplatte abnimmt.

3.2 Auswahl der geeigneten Bauform

Wenn für eine bestimmte Funktion verschiedene Bauformen angeboten werden, wird die Auswahl durch eine Vielzahl von Faktoren bestimmt. Dazu gehören die Kosten, Größe, Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und hoffentlich auch die thermischen Eigenschaften. Während Arrays häufig teurer als Leaded Packages und TBGAs teurer als wire-bonded PBGAs sind, ist es häufig kurzsichtig, immer nur die auf den ersten Blick billigere Variante zu wählen. Während ein PBGA als Bauteil billiger als ein TBGA ist, kann es im Nachhinein einen zusätzlichen Kühlkörper, einen deutlich stärkeren Lüfter oder im ungünstigsten Fall wesentliche Änderung am Layout erforderlich machen. Das heißt nicht, daß thermische Erwägungen bei der Auswahl der Bauteile grundsätzlich Vorrang gegenüber allen übrigen Aspekten haben müssen – sie sollten jedoch in angemessener Weise berücksichtigt werden.

3.3 Das optimale "Thermische Design"

Standort, Standort, Standort. Die Anordnung der Bauteile bezogen auf die Außenkanten, die übrigen Bauteile und die zuströmende Luft haben bedeutende Auswirkungen auf die thermischen Eigenschaften. Bauteile, die zu nahe am Rand der Leiterplatte platziert werden, haben nicht genug Fläche unter sich, an die sie ihre Wärme abgeben können.

Wenn Bauteile zu nah beieinander angeordnet werden, führt dies zu örtlichen Konzentrationen der Leistungsdichte, die einem gleichmäßigen Abfluß der Wärmeenergie in die Leiterplatte entgegenstehen. Und schließlich, als vielleicht wichtigster Punkt, beeinflusst die Anordnung der Bauteile die lokale Temperatur und Geschwindigkeit der Luft, die zur Kühlung aller dahinter befindlichen Bauteile benötigt wird. Dieser Gesichtspunkt wird in der folgenden Fallstudie näher behandelt.

4. FALLSTUDIE LEITERPLATTE: BEDEUTUNG EINER ZWECKMÄSSIGEN ANORDNUNG

Wie schon im vorstehenden Abschnitt erwähnt, kann die Anordnung von Bauteilen auf der Leiterplatte erheblichen Einfluß auf das thermische Verhalten haben. Abbildung 1 zeigt eine sehr einfache Leiterplatte von 10 x 15 cm mit drei Hauptkomponenten: einem DC/DC-Wandler, einem ASIC und einem Laser. Die Leiterplatte sitzt in einem Steckplatz mit einer Breite von 20 mm und wird durch einen abwärts gerichteten Luftstrom gekühlt. Die Lufttemperatur beträgt 40 °C bei 400 LFM.

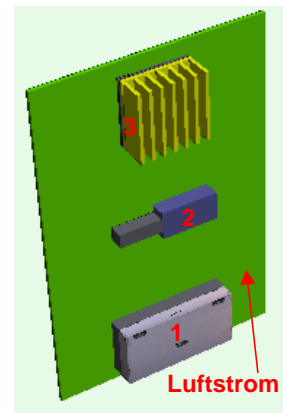


Abbildung 1 – Einfache Leiterplatte mit drei Bauteilen

Die einzelnen Bauteile sind in Tabelle 2 mit Art, Leistung und kritischer Temperaturgrenze (Sperrschichttemperatur T_j bzw. Gehäusetemperatur T_c) aufgeführt.

Tabelle 2 – Eigenschaften der Bauteile

#	Typ	Leistung	Grenztemp.
1	DC/DC-Wandler	8,0 W	$T_c = 125 \text{ °C}$
2	Laser	0,4 W	$T_c = 70 \text{ °C}$
3	BGA ASIC mit Kühlkörper	7,0 W	$T_j = 90 \text{ °C}$

Neben diesen Komponenten wird bei dieser Leiterplatte davon ausgegangen, daß weitere 10 W gleichmäßig über die gesamte Fläche abgegeben werden. Um die Auswirkung der Anordnung der Bauteile auf die thermischen Eigenschaften zu untersuchen, befassen wir uns nun nacheinander mit den vier verschiedenen Anordnungen aus Abbildung 2. Bei den Anordnungen A, B und C werden einfach die Positionen der Bauteile auf der Leiterplatte (oben, Mitte, unten) untereinander vertauscht. Bei der vierten Anordnung, D, werden alle Bauteile eng beieinander angeordnet.

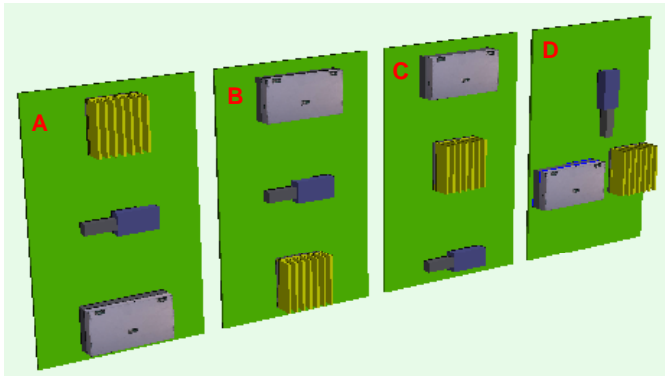


Abbildung 2 – die Anordnungen A, B, C und D

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse der vier CFD-Analysen (computersimulierte Flüssigkeitsdynamik), die mit der kommerziellen Software FLOW/PCB oder FLOTHERM zur thermischen Analyse erzielt worden sind. Die Linien stellen die kritischen Temperaturgrenzen der einzelnen Bauteile dar. Die ausgefüllten Symbole bezeichnen die Bauteiletemperaturen bei den vier Anordnungen A, B, C und D. Hier fällt zuerst auf, daß der DC/DC-Wandler bei allen Anordnungen deutlich unter seiner kritischen Temperaturgrenze betrieben wird. Bei den Temperaturen des ASIC zeigt sich, daß auch dieses Bauteil in den meisten Fällen deutlich unterhalb seiner Grenztemperatur arbeitet. Die Ausnahme ist Anordnung A, bei der das ASIC oben auf der Leiterplatte angeordnet ist und mit 90 °C die Grenztemperatur erreicht. Bleibt noch zu bemerken, daß die Grenzwerte des Lasers in Anordnung A und B überschritten werden, während bei einem Einbau unten auf der Leiterplatte, wie in Anordnung C, auch hier ein sicherer Betrieb erreicht wird.

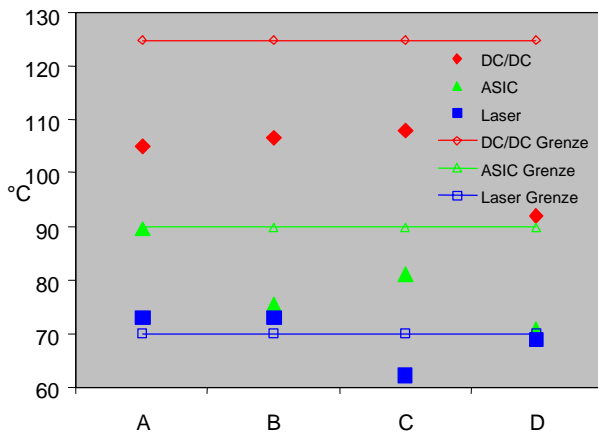


Abbildung 3 – Betriebstemperaturen der Bauteile bei den vier verschiedenen Anordnungen.

Um die Faktoren zu identifizieren, die die Betriebstemperaturen dieser Bauteile beeinflussen, muß man die Physik der Luftströmungen und der Wärmeübertragung über die Leiterplatte einer sorgfältigen Betrachtung unterziehen. Da der Laser die niedrigsten Temperaturgrenzwerte hat, konzentrieren wir uns in den einzelnen Anordnungen besonders auf sein Verhalten. Abbildung 4 zeigt grafische Darstellungen der Lufttemperatur und -geschwindigkeit in 9 mm Höhe über der Leiterplatte. Es fällt auf, daß, durch die aufheizende Wirkung des DC/DC-Wandlers, der im Fall A vor dem Laser und im Fall C hinter dem Laser angeordnet ist, bei der Luft, die den Laser erreicht, ein Temperaturunterschied von immerhin 10 °C auftritt. Beachten Sie auch, daß die Strömungsgeschwindigkeit der Luft am Laser, die in Anordnung C ca. 400 LFM (linear feet per minute) beträgt, bei Anordnung A um 75% auf 100 LFM abnimmt. Schließlich zeigt sich, daß der Laser in Anordnung D, obwohl er sich im Luftstrom hinter dem Wandler und dem ASIC befindet, innerhalb seiner Temperaturgrenzen arbeitet. Dies ist darauf zurückzuführen, daß der Laser in der Lücke zwischen den beiden anderen Bauteilen angeordnet ist und dadurch in einem gebündelten Luftstrom aus vergleichsweise kühler Luft sitzt, der für eine ausreichende Kühlung sorgt.

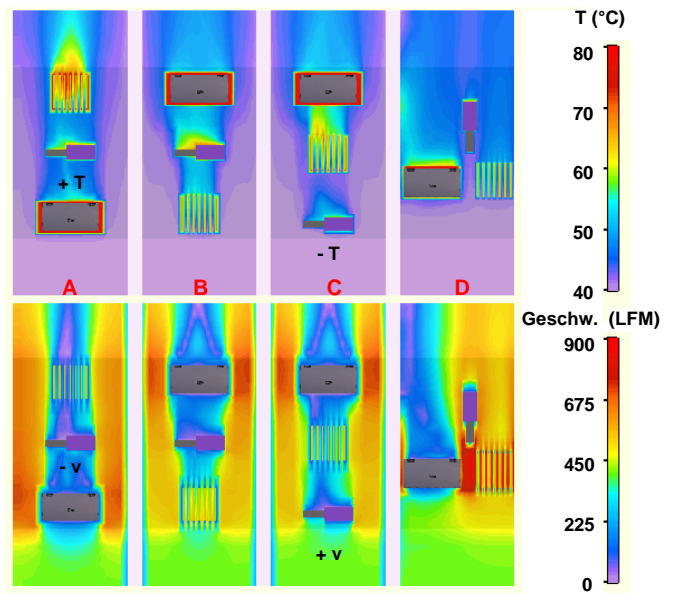


Abbildung 4 – Geschwindigkeit und Temperatur der Luft

Während wir gezeigt haben, daß sich die Bauteile durch die Luftgeschwindigkeit und die so entstehenden Lufttemperaturprofile in hohem Maße gegenseitig beeinflussen, üben sie einen weiteren wechselseitigen Einfluß durch die Wärmeverteilung in der Leiterplatte selbst aus. Abbildung 5 zeigt die Temperaturverteilung in der Leiterplatte bei den einzelnen Anordnungen. Auffallend ist der starke Einfluß des Wandlers auf die Temperatur der Leiterplatte, der dadurch entsteht, daß dessen Wärme zur Leiterplatte hin abfließt und sich dort ausbreitet. Der Einfluß des Wandlers zeigt sich besonders beim Vergleich der Temperatur der Leiterplatte unterhalb des Lasers in den Anordnungen A (ungünstigster Fall) und C (günstigster Fall). Hier beträgt der Temperaturunterschied beachtliche 12 °C. Beachten Sie auch die ausgeprägte Wirkung der erzwungenen Konvektion, besonders in Anordnung D, auf die Temperaturverteilung der Leiterplatte in Richtung des Luftstroms.

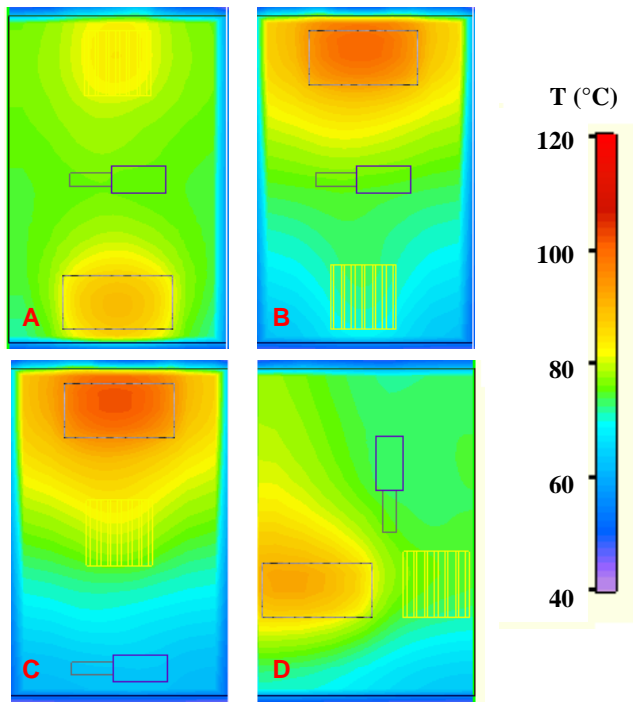


Abbildung 5 – Temperaturverteilung innerhalb der Leiterplatte

5. DIE "OPTIMALE" LEITERPLATTE UND "OPTIMIERTE" BAUGRUPPE

Je nachdem, wie die Aufgaben in Ihrem Unternehmen verteilt sind, ist bereits schon der Entwickler auf Leiterplatten Ebene auch für thermische Fragen zuständig. In den meisten Fällen übergeben Sie Ihre Informationen an einem bestimmten Punkt des Ablaufs zur eingehenden Untersuchung und Umsetzung der mechanischen Konstruktion. Neben den selbstverständlichen Angaben wie Größen und Anordnung von Bauteilen und Leiterplatte gibt es eine Reihe weiterer Informationen, die für den Konstrukteur hilfreich sein können:

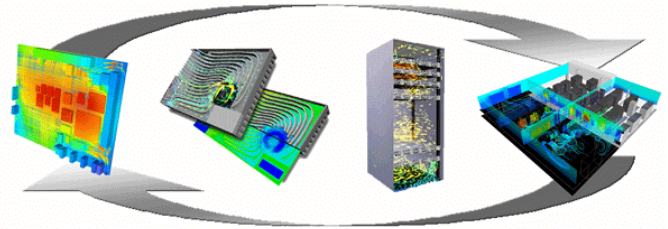
- Mechanik und thermisches Verhalten der Leiterplatte im eingebauten Zustand?
- Was muss wie stark gekühlt werden?
- Welche Materialien und Herstellungstechnologien können eingesetzt werden?
- Wie beeinflussen diese das Gesamtkonzept?
- Kann man Daten vom ECAD einsetzen um die optimale Baugruppe "zu erarbeiten"?

Im Zuge der standardisierten Schnittstellen ist es ohne weiteres möglich diese Feststellungen und Fragestellung sehr elegant zu lösen.

Es ist der Schritt zwischen Wissenschaft (Material Kenndaten aus der SW Bibliothek) und dem SW Tool welche Bibliotheken mit weiteren Komponenten (IC's, Lüfter, Wärmeleitpaste, Lochblech) welche zu diesem hohen Kundennutzen und der im ersten Wurf schon stark optimierten Lösung führt.

Hier sind am Markt Simulationsprodukte (SW) vorhanden welche die Schnittstellen zur gängigen Entwicklungswelt aufweisen und die Daten durchgängig verwendet werden können von der Konzeptphase (Komponenten Platzierung

auf der Leiterplatte) - über den Geräteaufbau - bis zur EMC Analyse, und dies im spielerischen Einsatz. Per Mausklick Material Zuweisung verändern (Anstelle Alublech – Stahlblech?) so komfortabel wird die Entwicklungsarbeit.



6. FAZIT

Je früher man sich mit der Thermik in seinen Projekten auseinandersetzt, desto geringer sind negative Auswirkungen auf das Endprodukt im Design und Qualität. Durch Tools können Entwickler „spielerisch“ Denk- und Lösungsansätze per Mausklick visualisieren, ohne viele Mannstunden und teure Prototypen dazu investieren zu müssen.

Autor:

Jörg A. Doswald, Elinter AG

Quellen:

Dave Stiver, Flomerics PM Flo/PCB

Dr. Johannes Adam, Flomerics; FAE Deutschland