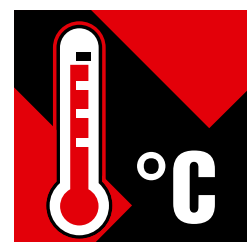


Wärmemanagement bei Leiterplatten



Dieser Beitrag beschreibt die von Würth Elektronik eingesetzte Heatsink-technik anhand des Anwendungsbeispiels „maxon compact drive“. Außerdem wird beschrieben, wie durch konstruktive Maßnahmen die Wärmeableitung verbessert werden kann.



Wärmemanagement bei Leiterplatten

Einleitung

Mit der zunehmenden Miniaturisierung und Leistung von elektronischen Bauteilen steigt nicht nur die Anforderung an die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), es muss außerdem ein Konzept für das Wärmemanagement erarbeitet werden. Zuverlässigkeitsuntersuchungen ergaben, dass 50 % der Ausfälle elektronischer Systeme durch die erhöhten Temperaturanforderungen verursacht werden [1].

Das bedeutet, dass kritische Temperaturen zu vermeiden sind und die Bauelemente innerhalb ihrer vorgeschriebenen Temperatur betrieben werden müssen. Für ein effektives Wärmemanagement kommt der Leiterplatte eine besonders wichtige Bedeutung zu. Bereits in der Konstruktions- und Entwicklungsphase sollte über geeignete Maßnahmen zur Wärmeableitung nachgedacht werden, da spätere Änderungen in der Regel aufwändiger und kostspieliger sind.

In diesem Artikel wird die von Würth Elektronik eingesetzte Variante des Wärmemanagements am Beispiel einer Motorsteuereinheit beschrieben. Unsere Technik wird hauptsächlich bei Leiterplatten eingesetzt, die mit Leistungshalbleitern oder LED's bestückt sind. Diese Leiterplatten sind in der Regel zweilagige Schaltungen oder Multilayer, da die Logiken auf einlagigen Schaltungen nicht untergebracht werden können.

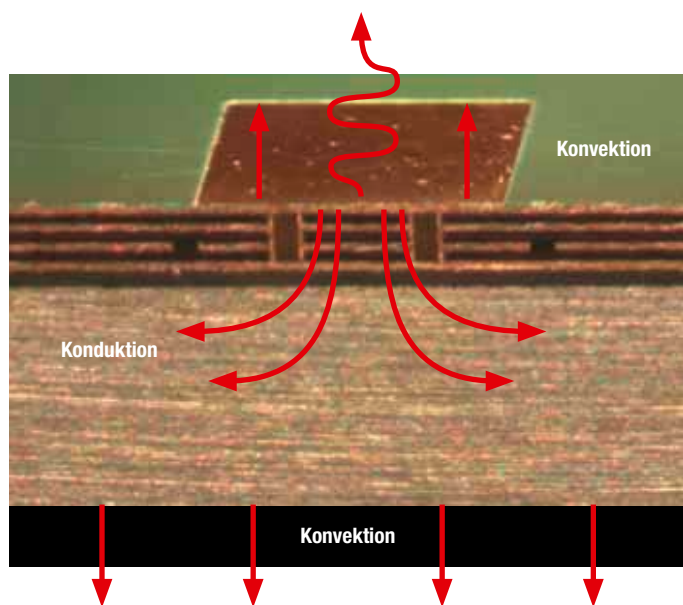


Abbildung 1: Drei Arten der Wärmeübertragung

Grundlagen

Es gibt drei Wege, über die eine Wärmeübertragung erfolgen kann (Abbildung 1). Die erste Möglichkeit der Wärmeableitung ist die Konvektion. Als Konvektion bezeichnet man die Wärmeübertragung durch Gase und Flüssigkeiten (z.B. Luft und Wasser). Die Wärme wird dabei mit dem Medium abtransportiert. Die zweite Art der Wärmeübertragung ist die Emission von Infrarotphotonen (Strahlung). Auf diese beiden Übertragungsarten können die Leiterplattenhersteller nur begrenzt Einfluss nehmen. Die dritte Art der Wärmeübertragung ist die Wärmeleitung (Konduktion) durch feste Körper. Der in Abbildung 1 dargestellte Aufbau zeigt einen 4-lagen Multilayer verklebt auf einem Aluminium Heatsink.



Abbildung 2:
Beispielapplikation
Leiterplatte mit
Kühlkörper

Anwendungsbeispiel

Im Folgenden soll eine Möglichkeit des Wärmemanagements durch die Leiterplatte am Beispiel der Motorsteuereinheit des „maxon compact drive“ (Abbildung 2) der Firma maxon motor behandelt werden. Es sollte eine Möglichkeit gefunden werden, die Steuereinheit im Inneren des Motorgehäuses zu integrieren und dadurch eine kompaktere Bauart zu erhalten. Im Allgemeinen wird die Steuereinheit außerhalb des Motorgehäuses platziert, da die Motortemperatur diese negativ beeinflusst. Diese Beeinflussung muss durch eine Wärmemanagementlösung minimiert werden, so dass eine zuverlässige Funktion des Motors, trotz Integration der Steuereinheit im Motor, gewährleistet ist. In diesem Fall wurde die Leiterplatte der Steuerlogik als Heatsink-Leiterplatte produziert. Als Heatsink-Leiterplatte bezeichnet man im Allgemeinen einen Verbund von Leiterplatte und Kühlkörper (Abbildung 3).



Abbildung 3: Heatsink-Leiterplatte

Bei dem von Würth Elektronik eingesetzten Konzepten des Wärmemanagements handelt es sich um eine Kombination aus vertikaler Wärmeleitung (Thermovias oder die Kombination von Microvias und Buried Vias) und horizontaler Wärmeleitung (Wärmespreizung in Kupferflächen und/oder auflaminierten Aluminium Kühlkörper).

Als Thermovia bezeichnet man eine Bohrung, die speziell für den Wärmetransport in der Leiterplatte platziert wird. Üblicherweise sollten diese Bohrungen unter der Wärmequelle liegen, da so ein direkter Wärmeabfluss erfolgen kann. In Abbildung 4 sind die Thermovias des Beispiels dargestellt. Diese Thermovias sind mit Harz verfüllt und einem Kupferdeckel verschlossen, so dass ohne Lotabfluss auf ihnen gelötet werden kann.

Eingeschlossene Luft in den Thermovias, welche sich negativ auf den Lötprozess auswirken könnte, wird vermieden.

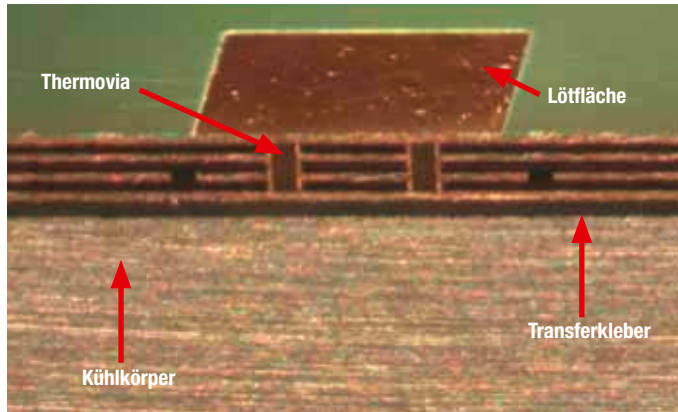


Abbildung 4: Schliff des Thermoviahohfeldes

Um den Vorteil dieser Thermovias zu veranschaulichen, erfolgt eine Berechnung des thermischen Widerstands der in Abbildung 4 dargestellten Lötfläche - mit und ohne Thermovias. Als weiterer Vergleich wird der thermische Widerstand des Bohrfeldes von innen liegenden Bohrungen (Buried Vias) und Laserbohrungen (Microvias) berechnet (Abbildung 6 und 7). Die Berechnung von thermischen Widerständen erfolgt analog zur Berechnung von Reihen- u. Parallelschaltungen elektrischer Widerstände (Gleichung 1 und 2).

Gleichung 1

$$R_{th} \text{ (Reihenschaltung)} = \sum_i R_i$$

Gleichung 2

$$\frac{1}{R_{th} \text{ (Parallelschaltung)}} = \sum_i \frac{1}{R_i}$$

Es ist darauf zu achten, dass es sich dabei um eine Abschätzung des thermischen Widerstands handelt. Die Wärmespreizung außerhalb des Lötfeldes wird nicht berücksichtigt. Eine exaktere Berechnung kann jedoch mittels Simulationen oder Erstellung eines FEM-Modells bestimmt werden. Der thermische Gesamtwiderstand der Steuereinheit ergibt sich aus der Summe der thermischen Einzelwiderstände (Abbildung 5).

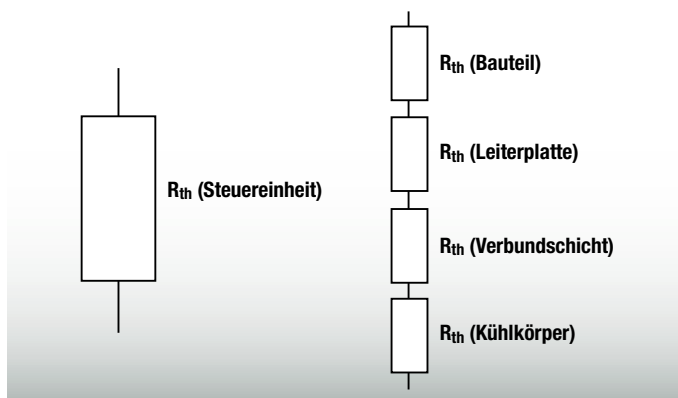


Abbildung 5: Gesamtwiderstand der Heatsinkplatte

Ohne Thermovias beträgt der thermische Widerstand der Lötfläche:

Gleichung 3

$$R_{th} \text{ (LP)} = \frac{d}{\lambda \cdot A} = 118 \frac{K}{W}$$

d (Kupfer) = 280 µm, λ (Kupfer) = 360 W/mK;
d (FR4) = 370 µm, λ (FR4) = 0,30 W/mK;
A (Lötfläche) = 10,50 mm².

Bei dem maxon compact drive beträgt der thermische Widerstand der Lötfläche mit 9 Thermovias:

$$R_{th} \text{ (9 Vias)} = 7,4 \frac{K}{W}$$

End Ø (Thermovia) = 0,30 mm, Stärke (Kupferhülse) = 25 µm,

Im Vergleich beträgt der thermische Widerstand des Bohrfeldes mit Microvias und Buried Vias (Abbildung 6 und 7).

$$R_{th} \text{ (40 Microvias \& 9 Buried Vias)} = 3,7 \frac{K}{W}$$

End Ø (Microvia) = 0,100 mm
Kupferhülse: Wandstärke = 25 µm
End Ø (Buried Via) = 0,25 mm
Kupferhülse: Wandstärke = 25 µm

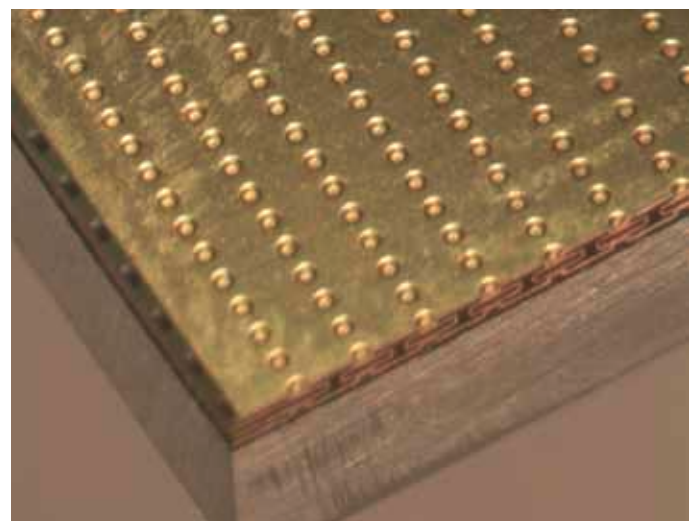


Abbildung 6: Microviabohrfeld

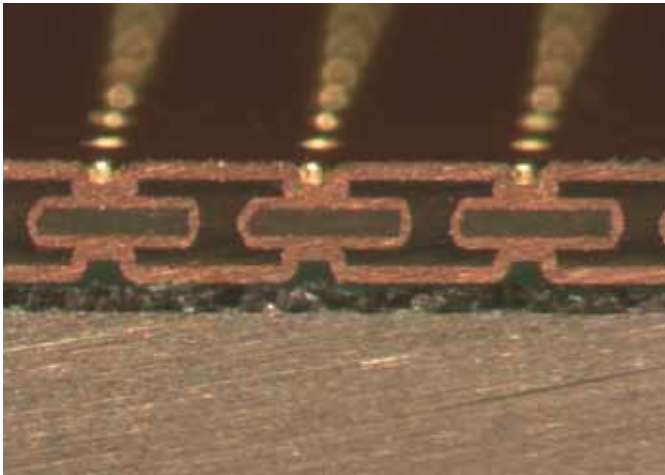


Abbildung 7: Schliff des Microviabohrfeldes

Dieses Beispiel zeigt, dass eine Erhöhung des Kupferquerschnitts den thermischen Widerstand erheblich senkt. In Tabelle 1 sind die berechneten thermischen Widerstände zusammengefasst. Die schlechteste Wärmeleitung erzielt man mit der Variante ohne Thermovias. Die beste Wärmeleitung wird durch den Einsatz von Microvias und Buried Vias erreicht.

Tabelle 1: Thermische Widerstände

Wärmeleitung	Thermischer Widerstand R_{th}
Ohne Thermovias	118 K/W
9 Thermovias	7,4 K/W
Microvias und Buried Vias	3,7 K/W

Eine Übersicht der alternativen Bohrfelder und ihrer thermischen Widerstände ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Bohrfeldkonstellation Leiterplattendicke 1,60 mm

Pitch Array 10,50 x 10,50 mm	Anzahl der Bohrungen End Ø 0,35 mm	R_{th} in K/W	Kupferanteil	Wärmeleitfähigkeit W/mK
Freie Anordnung	20	8,25	0,51 %	1,94
1,50 mm	49	3,39	1,18 %	4,15
1,10 mm	81	2,04	2,07 %	7,86
1,00 mm	100	1,65	2,55 %	9,70
0,90 mm	121	1,36	3,09 %	11,74
0,80 mm	169	0,98	4,29 %	16,57
0,60 mm	289	0,57	7,38 %	28,03
0,52 mm	400	0,41	10,21 %	38,30

Um den thermischen Widerstand der Leiterplatte noch stärker verringern zu können, sollten so viele Bohrungen wie möglich in der Nähe der Wärmequelle platziert werden. Ebenfalls ist eine minimale Leiterplattendicke bei maximaler am Wärmeübergang beteiligter Fläche anzustreben.

Anbindung der Leiterplatte an Kühlkörper

Zu den gängigen Methoden der Kühlung gehört das Verbinden der Leiterplatte mit einem Kühlkörper. Bei unserem Beispiel wird dieser Verbund durch einen Transferkleber geschaffen (Abbildung 4). Eine Übersicht der Wärmeleitwerte unterschiedlicher Materialien zeigt Tabelle 3.

Tabelle 3: Wärmeleitwerte häufig verwendeter Materialien

Stoff	Wärmeleitwert [W/mK]
Silber	429
Kupfer	360
Aluminium	204
Eisen	73
Transferkleber	0,20 - 0,90
FR4	0,30
Luft	0,026

In der Leiterplattenpraxis haben sich Kühlkörper aus Aluminium bewährt. Eine gängige Methode ist das Verpressen mit einem FR4-Prepreg oder die Verwendung von Transferkleber. Der Vorteil der Verwendung des Klebers im Vergleich zu einem Prepreg ist die Dynamik beim Löten. Dauerelastische Kleber können die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten des Aluminiums und der Leiterplatte von bis zu 300% ihrer Dicke kompensieren.

Im Applikationsbeispiel wurde der Kühlkörper – unter Vakuum – mit der Leiterplatte kalt verklebt.

Der thermische Widerstand des Transferklebers beträgt für die Beispiellothfläche des maxon compact drive

$$R_{th} \text{ Transferkleber} = 20,1 \frac{K}{W}$$

(A = 10,50 mm²; λ = 0,9 W/mK; d = 0,19 mm)

Idealer Weise wird die Rückseite der Leiterplatte mit einer vollflächigen Kupferlage produziert. D.h. die Wärme verteilt sich auf dieser Ebene und wird dann durch den Transferkleber an den Kühlkörper abgegeben.

Der Thermische Widerstand verringert sich auf

$$R_{th} \text{ Transferkleber} = 0,12 \frac{K}{W}$$

(A = 1740 mm²; λ = 0,9 W/mK; d = 0,19 mm)

Vergleiche Gleichung 3:

Eine Vergrößerung der Fläche verringert den thermischen Widerstand.

Die Abgabe der Wärme vom Kühlkörper zum Gehäuse erfolgt durch Schraubverbindungen. Diese Verbindungen sind durch das Einbringen von Gewinden im Kühlkörper ermöglicht. Dadurch ergibt sich ein idealer Wärmeübergang vom Kühlkörper zum Gehäuse. Diese Gewinde sind in Abbildung 3 grau markiert. Eine Detailsicht eines der Gewinde ist in Abbildung 8 zu sehen.

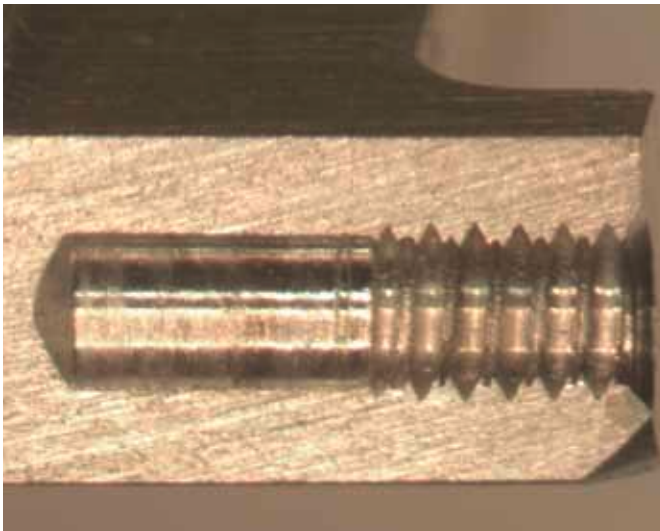


Abbildung 8: Gewinde

Wie beschrieben sind die hier aufgeführten Berechnungen keine exakten Werte, jedoch sind sie für eine Abschätzung ausreichend. Diese theoretische Abschätzung durch die Berechnung ist eine gute Möglichkeit die Dimensionierung des Leiterplattenlayouts zu ermitteln. Das Diagramm 1 bestätigt diese Annahme.

In Diagramm 1 sehen Sie die Temperaturmesskurven der Beispielapplikation. Die Messung erfolgt durch Heißeiter (Negative Temperature Coefficient- Widerstände).

Die Testbedingungen für die Messung sind:

- Motorstrom: $I = 2,6A$
- Drehzahl: $n = 5000 \text{ rpm}$
- Verlustleistung des Motors: $P = 4,7W$
- Umgebungstemperatur: $T = 25^\circ C$

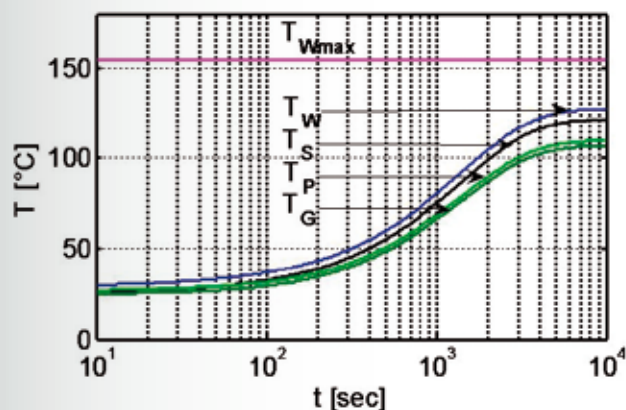


Diagramm 1: Temperaturmesskurve des maxon compact drive

Die Graphen repräsentieren die Temperaturen der Wicklungen des Elektromotors (T_W), des Stators (T_S), der Platine (T_P) und des Gehäuses (T_G). Die Temperatur $T_{W \text{ Max}}$ ist die maximal zulässige Temperatur der Wicklungen. Der Temperaturunterschied zwischen der Leiterplatte ($115^\circ C$) und dem Gehäuse ($105^\circ C$) beträgt ca. $10^\circ C$.

Dieses sehr gute Ergebnis verdeutlicht die guten Wärmeleiteigenschaften der vorgestellten Heatsink-Technologie.

Diskussion

Bei der Auswahl des Lötverfahrens (z.B. Reflow, Wellenlöten) unterliegt die beschriebene Heatsinklösung der Einschränkung, dass die Rückseite nicht für eine SMD-Bestückung genutzt werden kann. Eine Bestückung der Aluminium freien Seite mit bedrahteten Bauelementen stellt kein Problem dar, wenn der verwendete Kühlkörper und der Transferkleber an den Durchkontaktierungen der Bauteile ausgespart wird. Bei einer idealen Wärmeableitung ist der Lötprozess erschwert! Durch die sehr gute Wärmeableitung muss die Temperaturführung im Lötprozess entsprechend angepasst werden. Im Normalfall bedeutet dies eine längere Vorheizdauer und eventuell höhere Temperaturen, was einen erhöhten Stress auf die Bauelemente und die Leiterplatte bedeutet. Die genauen Lötparameter müssen für jede Applikation durch Löttests verifiziert werden.



Literatur

[1] US Air Force Avionics Integrity Program,
ieexplore.ieee.org/iel3/62/3013/00090949.pdf

[2] Pressemitteilung „maxon compact drive. Intelligenz und hohe Leistungsdichte auf kleinsten Raum“, maxon motor, 24. Juli 2006, www.maxonmotor.com

Autor

Bert Heinz

Mehr Informationen zum Thema Wärme-
management bei Leiterplatten erhalten
Sie auf unserer Internetseite unter dem
Link www.we-online.de/heatsink

Würth Elektronik GmbH & Co. KG

Circuit Board Technology

Salzstr. 21 · 74676 Niedernhall · Germany

Tel. +49 (0) 7940 946-0

Fax +49 (0) 7940 946-550000

info@we-online.de