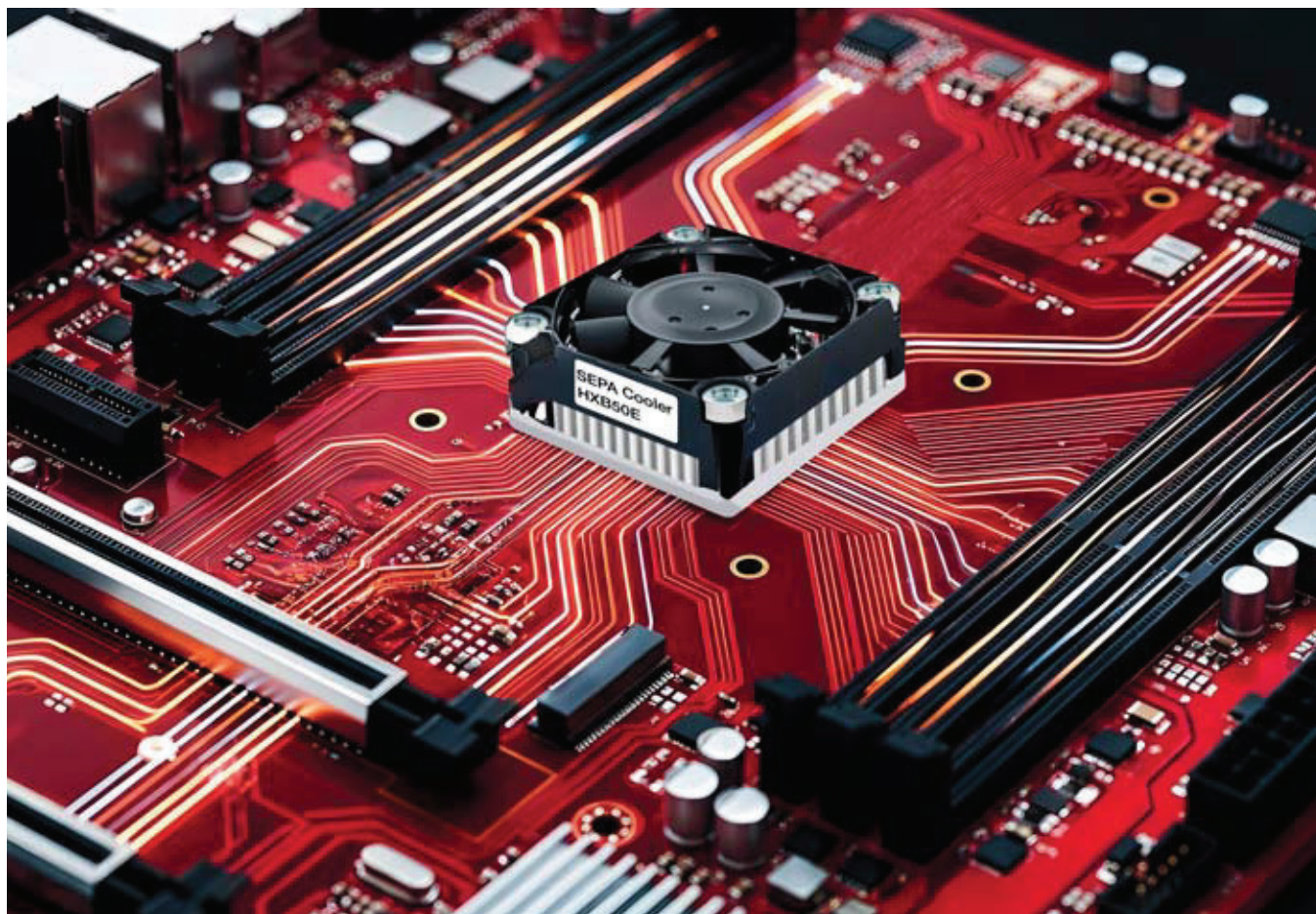


Power





Wie gelingt effizientes Wärmemanagement? Kühlkonzepte, Heatspreader und aktive Kühlsysteme für hohe Leistungsdichten im Überblick.

Bild: Sepa Europe

Effizientes Wärmemanagement für Hot Spots

Kühlkonzepte für leistungsstarke Elektronik

Steigende Leistungsdichten in KI-, Embedded- und High-Performance-Computing-Systemen erhöhen die Anforderungen an das Wärmemanagement. Durchdachte Kühlkonzepte, Heatspreader und aktive Kühllösungen sichern Leistung, Effizienz und Zuverlässigkeit.

Die Rechenleistung moderner Geräte wird immer höher und damit steigt die Anforderung an ein geeignetes Wärmemanagement deutlich. Besonders in Anwendungen, in denen KI- und High-Performance-Computing enorme Datenmengen verarbeiten, führt die gesteigerte Leistung unweigerlich zu mehr Abwärme. Um diese zuverlässig abzuführen, sind heute noch leistungsstärkere und effizientere Kühlstrategien erforderlich.

Besonders anspruchsvoll wird es bei elektronischen Bauelementen mit sehr hoher Leistungsaufnahme und kleiner Wärmeübergangsfläche, den sogenannten Hot Spots. Diese Komponenten müssen punktgenau und effizient gekühlt werden, was fundiertes Know-how im Thermal- Management und ein durchdachtes Kühlkon-

zept voraussetzt. Dieser Fachartikel bietet Entwicklern und Konstrukteuren praxisnahe Unterstützung, technische Hintergründe und konkrete Anregungen, um die thermischen Herausforderungen moderner Elektronik optimal zu meistern. Die verwendeten Abkürzungen basieren auf englischen Fachbezeichnungen. Diese werden in der nachstehenden Übersicht vorgestellt und erklärt.

Das Kühlkonzept

Die Festlegung des Kühlkonzeptes zur Kühlung von Leistungshalbleitern muss gemeinsam mit der Entwicklung des Gerätes erfolgen. Nachträgliche Änderungen sind nur schwer oder gar nicht möglich. Sie verlängern die Entwicklungszeit deutlich und sind außerdem teuer.

Bei der Auswahl oder Berechnung des Kühlkörpers für Komponentenkühlung sind wichtige Punkte zu beachten:

- Das Kühlsystem muss so bemessen sein, dass die maximal erlaubte Junction-Temperatur des Halbleiters, auch bei möglichen Grenzbedingungen, nie überschritten wird.
- Die Angabe des Wärmewiderstandes in den Datenblättern allgemein einsetzbarer Standard-Kühlkörper kann nur zum Vergleich mehrerer Kühlkörper herangezogen werden. Sie bezieht sich immer auf die optimal mögliche Wärmekopplungsfläche.
- Im praktischen Einsatz sind die zu kühlende Metalloberfläche des Halbleitergehäuses A_C und die Wärmeübergangsfläche des Kühlkörpers A_{HS} nicht identisch, die zu kühlende (metallische) Fläche des Bauteils ist immer kleiner als die thermische Koppelfläche des Kühlkörpers. Der Kühlflächenfaktor (Cooling Surface Factor $CSF = A_C / A_{HS}$), die Positionierung und Montage des Bauteils sind wichtige Faktoren, die die Kühlwirkung sehr stark beeinflussen können.
- So wie der Luftdruck mit steigender Höhe sinkt, verschlechtert sich die Kühlwirkung eines Kühlkörpers, z. B. bei 3000 m auf nur 80 Prozent gegenüber Meereshöhe.
- Die Oberfläche des zu kühlenden Chips wird über ein thermisch gut leitendes Interface-Material TIM (Wärmeleitpaste oder -Folie) mit der Oberfläche des Kühlkörpers verbunden. Dieses Material gleicht die Rauigkeit und die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten beider Oberflächen aus, isolierende Lufteinschlüsse werden weitgehend vermieden. Besteht das TIM aus einer beidseitig klebenden Folie, wird der Kühlkörper an der metallischen Seite des Halbleitergehäuses fixiert/montiert. Der thermische Widerstand des Interface-Materials R_{thIF} ist zum thermischen Widerstand des Kühlkörpers $R_{th_{HA}}$ zu addieren.
- Der Kühlkörper muss die abgestrahlte oder abgeblasene Wärme im zur Verfügung stehende Raum ohne Behinderung an die umgebende Luft abgehen können.
- Minimierung des Geräuschpegels anstreben. Es ist immer ein Lüfter mit den größtmöglichen Abmessungen und der niedrigsten Drehzahl oder mit temperaturabhängiger PWM-Drehzahlregelung zu wählen.
- Die Summe aller Wärmewiderstände im Kühlsystem bestimmt dessen Effektivität.

Auswahl des Kühlkörpers

Zwischen Halbleiterkristall und umgebender Luft befinden sich mehrere Materialien, deren Wärmewiderstände, ähnlich wie bei ohmschen Widerständen, in Reihe angeordnet sind und in Summe den gesamten Wärmewiderstand des Kühlsystems bilden.

Der Wärmewiderstand des Kühlkörpers wird in drei Schritten ermittelt:

- Berechnung des Wärmewiderstands des kompletten Kühlsystems
 - Berechnung des Wärmewiderstands der Interfacematerialien
 - Berechnung des Wärmewiderstands Kühlkörpers
- Folgende Parameter sind vor der Berechnung festzulegen:
- Maximal erlaubte Junction-Temperatur des Halbleiters $T_{J_{max}}$ [°C], und der Wärmewiderstand zwischen Junction



on und der zu kühlenden (Metall-) Oberfläche des Halbleiters R_{thJC} [K/W], oder alternativ die maximal zulässige Gehäusetemperatur an dessen metallischen Kühlfläche [°C] (Datenblatt).

- Maximal auftretende Umgebungstemperatur im Gerät $T_{A_{max}}$ [°C].
- Wärmeleitwert λ [W/m*K] der thermischen Interfacematerialien (TIM) (Datenblatt).
- Maximal auftretende Verlustleistung des Halbleiters P_{max} [W] im Betrieb (Datenblatt).
- Berechnung des Wärmewiderstandes des kompletten Kühlsystems:
- Maximale (metallische) Gehäusetemperatur: $T_{C_{max}} = T_{J_{max}} - (R_{th_{JC}} * P_{max})$ [°C].

Beispiele für Heat-Injektoren

Bild: Sepa Europe, Rolf Gehring

Standex DETECT
Electronics



Besuchen Sie uns
Halle B4 Stand 241

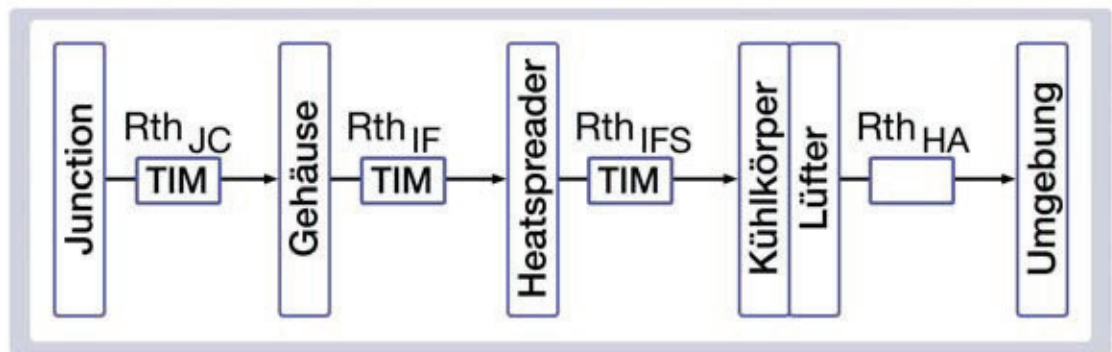
Reed Relais – MHV Serie für Elektrofahrzeuge



- Nennleistung Max. 100 W/1000 VDC/1 A
- Anwendungen in E-Mobility für Batterie Management Systeme
- Kleinstes HV Reed Relais

Reihenanzordnung
von thermischen
Widerständen eines
Kühlsystems

Bild: Sepa Europe



Zur Vereinfachung geben manche Hersteller auch direkt die maximal zulässige Temperatur an der für die Entwärmung vorgesehenen metallischen Fläche des Gehäuses an: T_{Cmax} [°C]. Die Temperaturdifferenz zwischen Gehäuse und Umgebung ist: $\Delta T_{CA} = T_{Cmax} - T_{Amax}$ [K]. Der Wärmewiderstand des kompletten Systems ist: $Rth_{SYS} = \Delta T_{CA} / P_{max}$ [K/W].

Der Wärmewiderstand des TIM setzt sich aus einer Materialkonstante λ , der Materialdicke H [mm] und der Fläche A [mm²] (Länge * Breite) zusammen und wird so berechnet: $Rth_{IF} = 1000 * H / \lambda * A$ [K/W].

Sind mehrere Interface-Materialien vorhanden, z. B. bei zusätzlicher Verwendung eines Heatspreaders, sind die thermischen Widerstände aller Interfacestellen ΣRth_{IF} zu ermitteln. Der Wärmewiderstand des Kühlkörpers ist dann: $Rth_{HS} = Rth_{SYS} - \Sigma Rth_{IF}$ [K/W].

Korrekturanpassungen

Der oben ermittelte Wert gilt nur für Meereshöhe und bei idealer, vollflächiger Wärmeübertragung zwischen Kühlkörper und der zu kühlenden Oberfläche. Entsprechend den Einsatzbedingungen müssen Korrekturanpassungen vorgenommen werden.

Höhenkorrektur: So wie der Luftdruck mit steigender Höhe sinkt, verschlechtert sich auch die Kühlwirkung eines Kühlkörpers. Je nach der zu erwartenden Einsatz-

höhe in m über NN muss der erforderliche Wärmewiderstand des Kühlkörpers angepasst werden.

Flächenkorrektur, der Cooling-Surface-Factor (Kühlflächenfaktor) CSF: Die zu kühlende Fläche A_C ist meist deutlich kleiner als die Koppelfläche des Kühlkörpers A_{HS} . Dadurch verschlechtert sich der Wärmewiderstand des Kühlkörpers. Die tatsächlich zu kühlende Fläche und Lage des zu kühlenden Bauteils am Kühlkörper sind individuell bestimmt und müssen berücksichtigt werden. Meist ist der Platz in der Höhe sehr begrenzt, so dass der Kühlkörper nur in der Fläche, parallel zur PCB, ausgedehnt werden kann. Aluminium, das für Kühlkörper aus Preis- und Gewichtsgründen fast ausschließlich verwendet wird, hat nur mittleren Wärmeleitwert. Daraus folgt, Kühlrippen oder -Stifte, die weiter weg von der (metallischen) Gehäuseoberfläche des Halbleiters entfernt liegen, tragen wegen des internen Wärmewiderstandes des Kühlkörperbodens deutlich weniger zur Wärmeabgabe bei. Der Cooling Surface Factor (Kühlflächenfaktor) ist das Verhältnis der Kühlfläche am Halbleiter zur Koppelfläche des Kühlkörpers $CSF = A_C / A_{HS}$. Ein Richtwert des Korrekturfaktor für den Kühlkörper kann aus dem Diagramm Rth in Abhängigkeit von CSF ermittelt werden.

Abhilfe schaffen Heatspreader, das sind dünne, sehr gut wärmeleitende Platten, mit der gleichen Fläche wie die Wärmeübergangsfläche des Kühlkörpers A_{HS} , die zwischen dem zu kühlenden Bauteil mit geringer Fläche und einem Kühlkörper angebracht werden. Als Material für Heatspreader eignet sich z.B. Kupfer, mit einem Wärmeleitwert von 380 W/m²K, etwa 1,8-mal besser als der von Aluminium mit nur 193-205 W/m²K. Alternativ kann natürlich auch der gesamte Kühlkörper aus Kupfer hergestellt werden. Mit einem ebenen Heatspreader aus Kupfer, kann bei geringer Zunahme an Bauhöhe eine kostengünstige Verbesserung des wirksamen Wärmewiderstandes bei großflächigen Kühlkörpern erzielt werden. Voraussetzung ist aber, dass die planparallele Ebenheit des Heatspreaders und der Wärmekoppelfläche des Kühlkörpers optimal ist und die beiden Flächen über ein entsprechendes Interface-Material gut wärmeleitend verbunden werden. Dünne, auch gut wärmeleitende Folien eignen sich nicht zur Verbesserung des CSF.

Wärmewiderstand messen

Bevor das gewählte Kühlkonzept endgültig in das Gerätedesign übernommen wird, muss eine Kontrollmessung erfolgen. Die Entwärmung einer individuellen Kühlanordnung ist nur mit großer Ungenauigkeit zu berechnen. Viele, teilweise schwer zu erfassende Faktoren beeinflus-

Abkürzungen

A_C : Die zu kühlende Metalloberfläche des ICs oder Transistors

A_{HS} : Wärmeübergangsfläche am Kühlkörper

CSF: Kühlflächenfaktor (Cooling Surface Factor)

TIM: Thermisch gut leitendes Interfacematerial zwischen AHI und AHS

T_A : Lufttemperatur in der Umgebung des Kühlkörpers

Rth_{JC} : Thermischer Widerstand zwischen Kristall (Junction) und der Kühlfläche des Halbleiters

Rth_{HA} : Thermischer Widerstand zwischen Wärmeübergangsfläche am Kühlkörper und umgebender Luft

Rth_{IF} : Thermischer Widerstand des Interfacematerials

T_{Jmax} : Maximal erlaubte Temperatur

des Halbleiterkristalls (Junction)

T_{Cmax} : Maximal erlaubte Temperatur an der Wärmeübergangsfläche AHI

P_{max} : Maximal auftretende Verlustleistung des zu kühlenden Halbleiters

λ : Wärmeleitwert, eine Materialkonstante, die die thermische Eigenschaft eines Materials beschreibt

HI: Heizelement zur Wärmeeinkopplung bei thermischen Messungen (Heat Injector)

ΔT_{CA} : Temperaturunterschied zwischen Halbleitergehäuse (Wärmeübergangsfläche) und umgebende Luft

P_H : Heizleistung des Heat-Injectors

T_{HI} : Temperatur des Heat-Injectors

sen das Ergebnis. Eine Messung, die auch Größe und Lage der Wärmeübergangsfläche berücksichtigt, liefert praxistgerechte und genauere Daten.

Im Labor erfolgt die Wärme-Einkopplung über einen Heat-Injector HI, der das Halbleiterbauelement ersetzt. Er besteht aus einem 5mm dicken Block aus Aluminium oder Kupfer. Die Flächen-Abmessungen entsprechen der metallenen Wärmeübergangsfläche des Halbleitergehäuses A_C . Die Heizung erfolgt über einen Präzisionswiderstand, montiert an der gegenüberliegenden Seite der Koppelfläche. Ein im Injektor eingeklebter NiCr-Ni-Miniaturfühler erfasst die Temperatur des Injektors T_{HI} , der an der vom Anwender vorgesehenen Stelle am Kühlkörper befestigt wird. Die Heizleistung wird durch den Steuerstrom bestimmt ($P_R = I^2 \cdot R$ [W]). Bei SEPA Europe werden Heat-Injektoren in den Abmessungen $15 \times 15 \text{ mm}^2$, $25 \times 25 \text{ mm}^2$, $30 \times 30 \text{ mm}^2$, $40 \times 40 \text{ mm}^2$, $50 \times 50 \text{ mm}^2$ und $60 \times 100 \text{ mm}^2$ oder individuell abgestimmte Größen verwendet.

Die Endtemperatur wird nach 30-60 Minuten erreicht. Um Messfehler klein zu halten, soll sie möglichst hoch sein (z.B. 80-100 °C) und kann durch den Steuerstrom beeinflusst werden. Die Raumtemperatur T_A wird an einem in der Nähe befindlichen Aluminiumblock, ebenfalls mit einem NiCr-Ni-Temperaturfühler ausgestattet, festgestellt.

Der Wärmewiderstand des untersuchten Kühlsystems, einschließlich Interface, ist dann: $R_{th_{HA}} = (T_{HI} - T_A) / P_R$ [K/W]. Da die tatsächliche Umgebungs-Endtemperatur in einem geschlossenen Gerät deutlich über der Raumtemperatur bei der Messung liegen wird, ist die im eingebauten Zustand erlaubte maximale Verlustleistung des elektronischen Bauteils niedriger als die bei der Systemmessung eingekoppelte Leistung.

Die Kontrollrechnung mit einer realistisch anzunehmenden Umgebungstemperatur im Geräteinneren T_{Amax} und dem ermittelten Wärmeübergangswiderstand des Kühlsystems ergibt die maximal Verlustleistung des Halbleiters P_J , die abgeführt werden kann, ohne dass der Chip überhitzt wird: $P_{Jmax} = (T_{HI} - T_{Amax}) / R_{th_{HA}}$ [W] (oft wird

eine maximale Umgebungstemperatur T_{AINmax} im Inneren von 40 °C angenommen).

Die neue Kühlkörperserie von SEPA Europe mit effizienten Lüftern bietet sowohl mehr Kühlleistung als auch verbesserte Effizienz. Die Anwendung aktiver Kühlkörper kann die Spotkühlung von Hochleistungs-ICs auch bei geringer Bauhöhe deutlich verbessern und gleichzeitig Energie sparen. Die Hauptmerkmale der Kühlelemente:

- Geringe Bauhöhe durch im Kühlkörper versenkte oder direkt aufgesetzte flache DC-Lüfter.
- Ein Lüfter mit hoher Leistungsdichte fügt sich in einem kompakten Kühlkörper ein und bietet flexible Gestaltungsmöglichkeiten.
- Smarte Funktionalität: Intelligente Drehzahlsteuerung macht das System flexibel und multifunktional, auch unter extremen Bedingungen.
- In Standardgrößen erhältlich oder individuell kundenspezifisch gestaltet, für verschiedenste Anwendungen wie Servoregler, Stromversorgungen, Embedded-PCs, KI-Power Compact PCs etc. optimal geeignet.
- Aktive Standardkühler mit Litzenenden oder mit individueller Litzenlänge und Steckern nach Wunsch, mit beliebiger Pinbelegung, werden 100 Prozent geprüft.

Fazit

Die Kühlung von Hochleistungskomponenten, insbesondere in Geräten mit KI- und High-Performance-Computing-Anwendungen, stellt eine immer größere Herausforderung dar. Angesichts der steigenden Wärmeentwicklung in kompakten Systemen ist ein durchdachtes Kühlkonzept entscheidend, um die Leistungsfähigkeit und Lebensdauer der elektronischen Bauteile zu gewährleisten. Die Auswahl und Berechnung des richtigen Kühlkörpers, unter Berücksichtigung von Faktoren wie maximaler Verlustleistung, Umgebungstemperatur und thermischen Widerständen, ist komplex, aber notwendig, um eine effiziente Entwärmung zu erreichen. (na)

Autor: Heinrich Cap, Senior-Geschäftsführer Sepa Europe

MES THE CONNECTOR

Vollendete Spitzenklasse

Wenn aus Konfektionen echte Kabelkunst wird, haben wir unser Ziel erreicht.

JETZT KOSTEN!

mes-electronic.de

