

SEPA® Komponenten zur Elektronikkühlung sind heute weltweit u.a. in Geräten der Elektronikindustrie, Fahrzeugtechnik und Medizintechnik sowie der optischen und chemischen Industrie verbreitet. In besonderen Fällen werden kundenspezifische Modelle gefertigt, die auf jahrzehntelanger Erfahrung in der Technik der Lüfter aufbauen.

2 Elektronikkühlung

Dieses Kapitel befasst sich mit der Kühlung von Bauelementen, insbesondere mit passiver oder aktiver Wärmeabfuhr durch Lüfter. Hier wird auf die besonderen Eigenschaften der **SEPA**® Lüfter eingegangen.

2.1 Verlustleistung

Elektronische Bauelemente arbeiten nicht verlustfrei. Sie entwickeln beim Betrieb Wärme, die abgeführt werden muss. Die Verlustleistung wird in Watt angegeben. Doch wie entstehen Verluste und wie müssen sie bei der Kühlungskonzeption berücksichtigt werden?

2.1.1 Statische Verluste

sind Verluste, die permanent nach der Inbetriebnahme des Bauteils entstehen. An ohmschen **Widerständen** entsteht Verlustleistung nach dem Gesetz:

$$P_V = I^2 \cdot R \quad (1)$$

oder

$$P_V = \frac{U^2}{R} \quad (2)$$

Widerstände können schaltungsbedingt notwendig oder parasitär, d.h. unerwünscht, vorhanden sein.

Dioden haben einen physikalisch bedingten und vom Halbleitermaterial abhängigen Spannungsabfall in Durchlassrichtung (0,1 bis 2 V), typisch sind 0,7 V bei Siliziumdioden. Die Verlustleistung ist $P_D = U_D \cdot I_D$ (3)

Schalttransistoren haben im On-Zustand einen nicht vernachlässigbaren Widerstand. In den Datenblättern wird bei bipolaren Transistoren die Sättigungsspannung U_{CESat} bei definiertem Basis- und Kollektorstrom I_C und bei MOS-Transistoren der Widerstand in eingeschaltetem Zustand angegeben. Die Verlustleistung P_{ON} errechnet sich aus:

$$\text{Bipolare Transistoren} \quad P_{ON} = U_{CESat} \cdot I_C \quad (4)$$

bzw.

$$\text{MOS-Transistoren} \quad P_{ON} = I_D^2 \cdot R_{DSon} \quad (5)$$

Dioden (und Transistoren), die in Sperrrichtung betrieben werden, zeigen einen, durch einen parallel liegenden Isolationswiderstand hervorgerufenen, Sperrstrom. Die Verlustleistung ist

$$P_S = \frac{U^2}{R_S} \quad (6)$$

2.1.2 Dynamische Verluste

entstehen erst, wenn das Bauelement elektrisch Änderungen erfährt, wie beim Ein- und Ausschalten von Transistoren, Umpolen von Dioden usw. Die einzelnen Zonen eines Halbleiterbauteils sind durch Sperrschichten voneinander und von der Trägerzone isoliert. Neben den oben erwähnten parasitär vorhandenen Widerständen bilden die leitenden, voneinander isolierten Zonen die Flächen eines Kondensators.

Ändert sich beispielsweise beim Taktbetrieb die Spannung der isolierten Zonen gegeneinander, werden die parasitären Kondensatoren periodisch umgeladen. Der Umladestrom erzeugt in den parasitären Bahnwiderständen eine Verlustleistung, die mit steigender Taktfrequenz zunimmt. Bei tieffrequent betriebenen Bauelementen, wie im Audio-Bereich, sind die dynamischen Verluste im Allgemeinen vernachlässigbar. Hochfrequent getaktete Bauelemente wie CPUs oder HF-Halbleiter weisen dagegen sehr hohe dynamische Verluste bei vergleichsweise geringen statischen Verlusten auf.

Für gewöhnlich sind die zur Berechnung der statischen Verlustleistung benötigten Angaben oder die Summe der statischen und dynamischen Verlustleistung in den Datenblättern der Komponenten angegeben.

2.2 Wärmeabgabe

Ein mit Verlustleistung behaftetes Bauteil erwärmt sich, seine Oberflächentemperatur T_C steigt an. Dadurch erhöht sich der Temperaturunterschied zur Umgebung T_A ($\Delta T = T_C - T_A$) und damit die an die Umgebung durch Strahlung, Konvektion oder Wärmeleitung abgeführte Leistung.

Wärmestrahlung ist eine elektromagnetische Strahlung, die jeder Körper abhängig von seiner Temperatur emittiert.

Konvektion ist ein Mechanismus zum Transport von thermischer Energie, bei dem die Wärme von Teilchen übertragen wird und in Gasen oder Flüssigkeiten kaum zu vermeiden ist. Bei der freien Konvektion erfolgt der Teilchentransport ausschließlich durch die Auswirkungen des Temperaturgradienten, also durch Auf- und Abtrieb des Fluids infolge der durch die Temperaturänderung hervorgerufenen Dichteunterschiede. Durch äußere Einwirkung, wie beispielsweise durch Lüfter oder Pumpen, wird der Teilchentransport bei der erzwungenen Konvektion hervorgerufen.

Wärmeleitung, auch Wärmediffusion oder Konduktion, bezeichnet in der Physik den Wärmefluss in einem Feststoff oder ruhendem Fluid. Wärme fließt dabei von selbst immer in Richtung der geringeren Temperatur (zweiter Hauptsatz der Thermodynamik). Ein Maß für die Wärmeleitung in einem bestimmten Medium ist die Wärmeleitfähigkeit, die teilweise von der Temperatur abhängt. Der Kehrwert der Wärmeleitfähigkeit ist der *Wärmewiderstand* R_{th} , für die Anwendung des *ohmschen Gesetzes des thermischen Kreises*.

Der Wärmewiderstand eines Körpers wird berechnet nach der Formel:

$$R_{th} = \frac{l}{\lambda \cdot A} \quad (7)$$

R_{th} [K/W], A [m²], λ ist die Wärmeleitfähigkeit W/m · K

Stoff	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
Silber	429
Kupfer	390
Aluminium	204
Graphit	119...165
Silizium	148
Stahl, legiert	42
Keramik	12...17
Glas	1,0
FR4 (Epoxy)	0,3
Luft	0,026

Tabelle 1: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Materialien

2.2.1 Bauteilkühlung

Sind zugeführte und abgeführte Leistung gleich, ist der Zustand stabil: Die Bauteiltemperatur steigt nicht weiter an. Ein am Bauteil angebrachter Kühlkörper vergrößert – in erster Näherung – dessen Oberfläche, sodass eine höhere Leistung abgegeben werden kann. Nach dem Einschalten des Bauteils setzt der Temperaturanstieg sofort ein und folgt dann einer e-Funktion, ähnlich einer Kondensatoraufladung. Die thermische Zeitkonstante (Steilheit der Kurve) hängt von der Masse des Bauteils bzw. von der Masse des Kühlkörpers ab.

Aufgrund des Zeitverhaltens des Temperaturanstiegs wird zwischen verschiedenen Betriebsarten unterschieden, von denen bei elektrischen Komponenten nur DB, AB und KB relevant sind: Der Dauerbetrieb DB ist die häufigste Betriebsart eines Bauteils bzw. Gerätes. Die Endtemperatur wird erst nach einiger Zeit erreicht und bleibt dann konstant, muss aber unterhalb dem erlaubten Grenzwert liegen.

Im Kurzzeitbetrieb KB wird das Bauteil (Gerät) nur so lange eingeschaltet, dass der thermische Endzustand nicht erreicht wird. Während der Ruhepause kann das Bauteil völlig abkühlen. Die Maximaltemperatur ist von der Einschaltdauer, der thermischen Zeitkonstante und von der Verlustleistung abhängig. Bei gleicher Grenztemperatur kann das Bauteil während der Ein-Phase mit höherer Leistung betrieben werden.

Der Aussetzbetrieb AB ist ähnlich dem KB, jedoch kann das Bauteil während der Ruhephase nicht völlig abkühlen. Die hier erreichte Maximaltemperatur ist niedriger als beim DB, aber höher als beim KB, sodass bei gleicher Grenztemperatur ein Betrieb mit, im Vergleich zum DB, mäßig erhöhter Leistung möglich ist, abhängig von der thermischen Zeitkonstante, der Ein- und der Ausschaltdauer. Sind Einschaltdauer, Zykluszeit und die Verlustleistung während der Einschaltzeit bekannt, kann die wirksame Dauerverlustleistung P_D näherungsweise wie folgt bestimmt werden:

$$P_D = P_E \cdot \sqrt{\frac{t_B \%}{t_S \%}} \quad t_B = \text{Zeit „on“}, \quad t_S = \text{Zeit „off“} \quad (8)$$

Der Kühlkörper muss die durch P_D erzeugte Wärme so abführen können, dass die zulässige Grenztemperatur des Bauteils auch im Worst Case nicht überschritten wird. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass die Temperatur während der Einschaltzeit höher (abhängig von der thermischen Zeitkonstante) als die durchschnittliche, durch P_D erzeugte Temperatur ist.

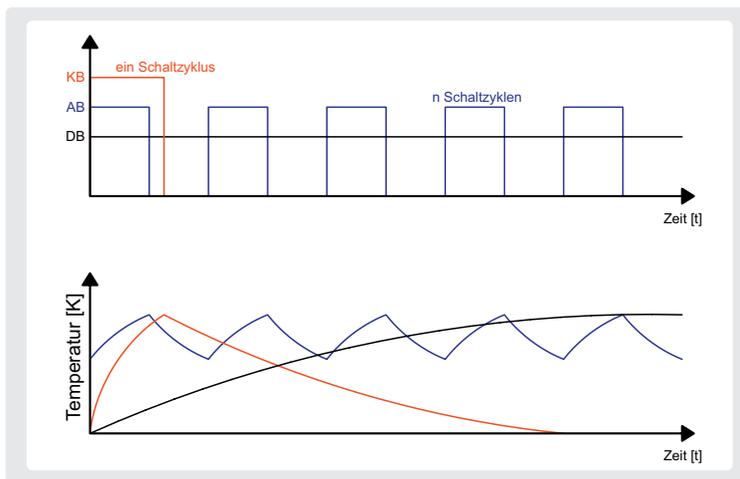


Abb.2: Verlauf von Verlustleistung und Temperatur bei verschiedenen Betriebsarten

Abbildung 2 vergleicht den Temperaturverlauf einer verlustbehafteten Anordnung bei verschiedenen Betriebsarten. Die maximal erreichte Temperatur ist in allen Betriebsarten gleich. Bei der hier dargestellten Betriebszeit t_B kann die Verlustleistung im Aussetzbetrieb (AB) um ca. 50 Prozent und im Kurzzeitbetrieb (KB) um ca. 100 Prozent höher sein als im Dauerbetrieb (DB).

2.2.2 Aktive und passive Kühlung

Die von den Bauteilen in einem Gerät abgegebene Energie erwärmt allmählich auch die im Gerät befindliche Luft. Erst wenn die durch das Gerät an die Umgebung abgegebene Leistung gleich der erzeugten ist, stellt sich ein stationärer Zustand ein und die Temperatur steigt nicht weiter an. Die Wärmeabgabe erfolgt dabei zum einen durch den Wärmeübergang von der erwärmten Luft im Geräteinneren über die Gehäusewände an die kühlere Außenluft, zum anderen durch Konvektion. Freie Konvektion wird die ungezwungene freie Luftströmung genannt, die durch den Dichteunterschied zwischen kühler und erwärmter Luft entsteht. Eine erzwungene Luftströmung (Lüfter) kann den Wärmeübergang verbessern. Eine grobe Abschätzung der erforderlichen Luftleistung bei gegebener Gesamtverlustleistung eines Gerätes zeigt Abbildung 3. In diesem Diagramm ist der Volumenstrom für kleinere Lüfter in m^3/h der Verlustleistungsskala bis 60W Verlustleistung zugeordnet ($1 \text{ m}^3/\text{h} = 16,7 \text{ l}/\text{min}$).

Beispiel: $P_V = 40 \text{ W}$, $\Delta T_{\text{max}} = 15\text{k}$, benötigte Luftleistung $\sim 12 \text{ m}^3/\text{h}$

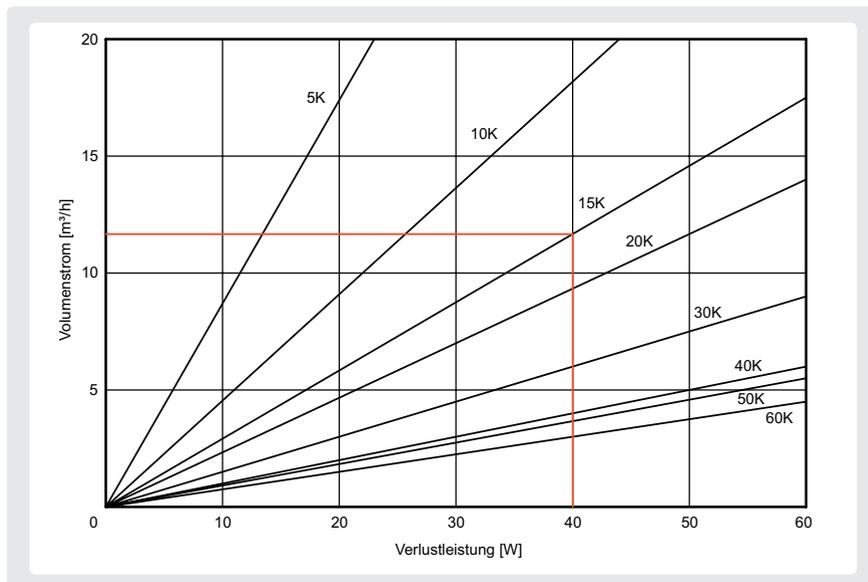


Abb. 3: Überschlägige Ermittlung des Volumenstroms bei gegebener Verlustleistung und gewünschter max. Temperaturerhöhung

Dabei ist zu beachten, dass einzelne Bauteile mit besonders hoher Verlustleistung, wie Prozessoren, Leistungstransistoren und -ICs, trotz niedriger Lufttemperatur im Geräteinneren zu heiß werden können und zusätzlich passiv oder aktiv gekühlt werden müssen. Heiße Leistungsbauteile können auch temperaturempfindliche Komponenten wie Elektrolytkondensatoren in ihrer Nähe schädigen, indem sie diese indirekt erwärmen. Ein auf der ebenen Oberfläche des Leistungsbauteils befestigter Kühlkörper vergrößert die Oberfläche erheblich. Die Wärmeabgabe steigt, die Bauteiltemperatur sinkt. Mit stärkerer Luftbewegung erhöht sich dieser Effekt. Zur Auswahl stehen Kühlkörper mit aufgesetztem Lüfter, Kühlkörper mit integrierten Lüftern und Kühlkörper mit seitlich angebrachten Tangentiallüftern. Dank der vielen verschiedenen Lüfterbauformen kann leicht eine optimale Lösung gefunden werden.

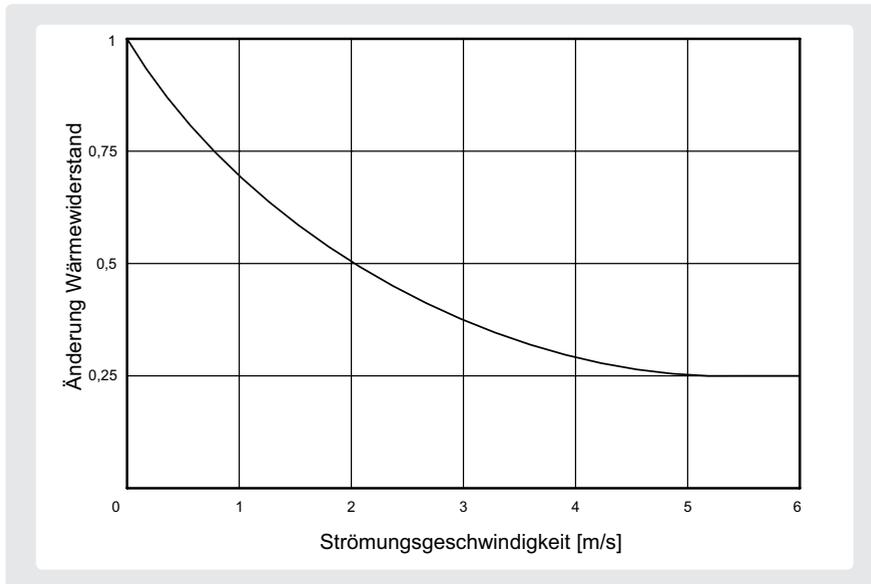


Abb. 4: Forcierter Luftstrom verbessert den Wärmewiderstand

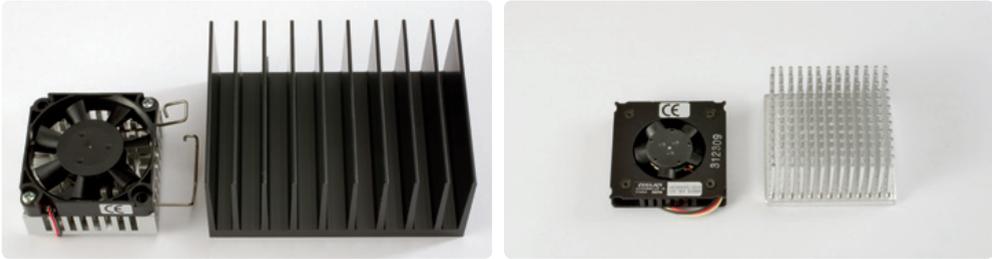


Abb. 5: Vergleich aktiver (links) und passiver (rechts) Kühlkörper mit annähernd gleichem Wärmewiderstand. Forcierte Kühlung bringt Volumen- und Gewichtseinsparung bei Kühlkörpern

2.2.3 Kühlung von Leuchtmitteln

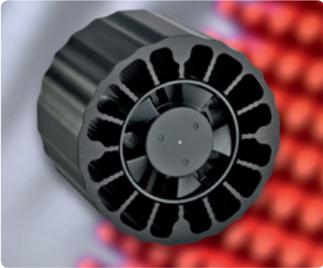
Neue Leuchtmittel, insbesondere LED Lampen, haben die Glühlampe weitgehend verdrängt. Normalerweise benötigt sie keine forcierte Kühlung, obwohl durch ihren sehr schlechten Wirkungsgrad von 3 bis 5 Prozent der Großteil der zugeführten Energie in Wärme umgesetzt wird. Licht emittierende Dioden wandeln bis zu 25 Prozent der zugeführten Energie in Licht um, müssen aber gekühlt werden, da ihre Energiedichte [W/cm^2] ungefähr tausendmal größer ist als bei Glühlampen.

Bei Leistungs-LEDs ist auf ein effektives Wärmemanagement zu achten, da Leuchtintensität und Lebensdauer um rund 10 Prozent je 10 °C Chiptemperaturanstieg abnehmen. Während sich Leistungs-LEDs mit kleinerer Leistungsaufnahme noch gut passiv kühlen lassen, müssen Hochleistungs-LEDs aktiv gekühlt werden, wenn ein passiver Kühlkörper zu groß, zu schwer und zu teuer wäre. Sämtliche Hersteller von Kühlkörpern bieten inzwischen spezielle Modelle für die LED-Kühlung an, die sich auch gut mit Lüftern quadratischer oder runder Bauform kombinieren lassen.

Die bei einer Junction-Temperatur, die Temperatur des Halbleiterkristalls, von 85 °C erreichbare LED Lebensdauer beträgt etwa 10.000 h und ist damit viel höher als die einer Glühbirne. Die Lebensdauerergrenze ist durch ein Absinken der Leuchtintensität auf 50 Prozent definiert und nicht durch einen Totalausfall der LED. Daher müssen die benötigten Lüfter entsprechend zuverlässig sein. L1 (1 Prozent Ausfall nach n Stunden) von mindestens 10.000 h bei 40 °C ist anzustreben, wenn die Lampenlebensdauer nicht durch den Lüfter begrenzt sein soll. **SEPA**[®] Lüfter erreichen bei 40 °C Umgebungstemperatur ein L1 von 12.000 h und erfüllen somit die Mindestanforderung ausgezeichnet.

2.2.4 Entwärmung mittels Kühlkörper

Die Aufgabe eines passiven oder aktiven Kühlkörpers ist immer die Abfuhr der durch die Verlustleistung des elektronischen Bauteils (IC, LED) entstehenden Wärme, so-



dass die Kristalltemperatur einen bestimmten Wert nicht übersteigt. Die maximal mögliche Umgebungstemperatur ist die zweite Kenngröße, die zur Ermittlung des Wärmewiderstands erforderlich ist. Auf dem Weg vom Kristall (Junction) bis zur Umgebung durchdringt die Wärme Zonen mit unterschiedlichen Wärmewiderständen. Der Wärmewiderstand des Kühlkörpers ist nur ein Teil in der gesamten Kühlstrecke.

Abb. 6: Runder Lüfter mit Kühlkörper

Äußerst wichtig ist die optimale thermische Ankopplung des zu kühlenden Bauteils an einen Kühlkörper. Die Oberflächen von Bauteil und Kühlkörper sind nie ganz eben und glatt. Ohne weitere Maßnahmen berühren sich beide Körper nur an relativ wenigen Punkten und die Wärmeleitung ist sehr schlecht, da größere Luftspalten bestehen, an denen kaum ein Wärmeübergang stattfindet. Im Kapitel Zubehör sind mehrere Möglichkeiten beschrieben um den Wärmeübergang zwischen Bauteil und Kühlkörper zu verbessern. Dabei wird immer die Luft zwischen Bauteil- und Kühlkörperfläche durch ein spaltfüllendes Medium mit möglichst hohem thermischen Leitwert verdrängt.

2.2.5 Beispiel

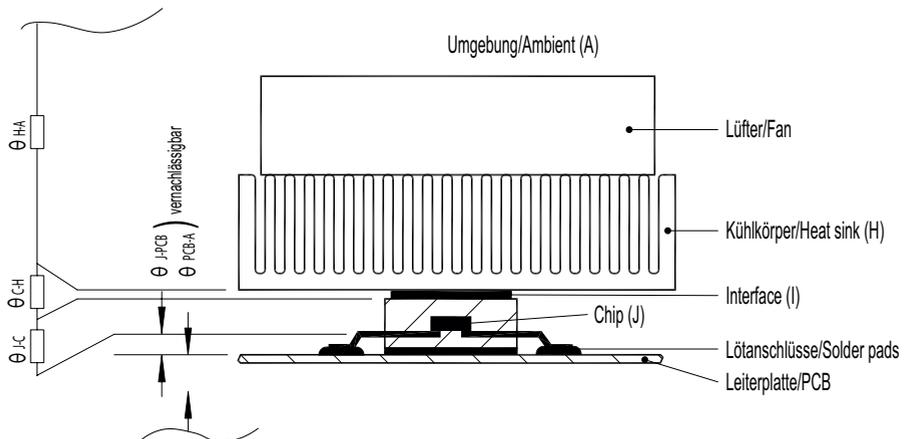


Abb. 7: Wärmeübergang Junction-Umgebung

Summe Wärmewiderstand: $\theta = \theta_{JC} + \theta_{CH} + \theta_{HA}$

Daraus Wärmewiderstand Kühlkörper: $\theta_{HA} = \theta - \theta_{JC} - \theta_{CH}$

Dabei sind:

θ_{JC} = Wärmewiderstand Kristall (Junction) – Gehäuseoberfläche oder wärmeerzeugende Halbleiterzone – Gehäuseoberfläche, die mit dem Kühlkörper in Verbindung kommt. Die Angabe entfällt, wenn der Hersteller eine maximal zulässige Gehäuseoberflächentemperatur angibt.

θ_{CH} = Wärmewiderstand Gehäuse – Kühlkörper. Durch spaltfüllende Materialien optimierbar.

θ_{HA} = Wärmewiderstand des Kühlkörpers, der letztlich gesucht wird.

Rechenbeispiel:

Eine CPU soll gekühlt werden.

$P_{V\text{CPU}} = 18 \text{ W}$ (Angabe des Herstellers)

$T_{C\text{max}} = 85 \text{ °C}$ (Angabe des Herstellers)

$T_{A\text{max}} = 50 \text{ °C}$ (geschätzte Maximaltemperatur im Gerät)

Das Temperaturgefälle zwischen IC-Oberfläche und Umgebung beträgt

$$\Delta T = T_{C\text{max}} - T_{A\text{max}}, \text{ also } 85 - 50 = 35 \text{ [K]}, \quad (9)$$

und der Gesamtwärmewiderstand

$$R_{\text{th}} = \Delta T / P_{V\text{CPU}}, \text{ gleich } 35/18 = 1,94 \text{ [K/W]}. \quad (10)$$

Der Übergangswiderstand zwischen IC-Oberfläche und Kühlkörper kann anhand der thermisch aktiven Fläche und den Daten des spaltfüllenden Materials berechnet werden und liegt bei modernen Materialien etwa bei 0,2 K/W. Daher muss der Wärmewiderstand des Kühlkörpers

$$\theta_{HA} = \theta - \theta_{CH} \text{ } 1,94 - 0,2 = 1,74 \text{ [K/W]} \text{ oder kleiner sein.} \quad (11)$$

Für das Beispiel eignet sich ein HXB50E05 mit 1,5 K/W. Nicht berücksichtigt ist hier der parallel zu θ liegende Wärmewiderstand Chip – Leiterplatte (θ_{JPCB}). Diese eher vernachlässigbare Größe verbessert die Gesamtwärmeableitung nur geringfügig.

Viele moderne CPUs enthalten eine integrierte Messdiode, mit deren Hilfe die tatsächliche Chiptemperatur einfach festgestellt und mit den Herstellerangaben verglichen werden kann.