

Berechnung von Kühlkörpern für elektronische Bauteile

Einführung

Im Bereich der Elektronik existieren viele Bauteile, die im Betrieb einen nennenswerten Betrag elektrischer Leistung in **Verlustleistung** (in Form von **Wärme**) umsetzen. Dies gilt insbesondere für ohmsche Widerstände und Halbleiterbauelemente (z.B. Transistoren). Dabei beträgt die am Bauelement umgesetzte Leistung $P_D = U \cdot I$, die Verlustleistung ist also das Produkt aus der am Bauteil abfallenden Spannung und dem Strom, der durch das Bauteil hindurchfließt.

Aus diesem Grunde steht ein Entwickler elektronischer Baugruppen oft vor der „nicht-elektrotechnischen“ Aufgabe der Dimensionierung einer Kühlung für Bauteile. Wenn man sich allerdings gewisse physikalische Zusammenhänge vor Augen führt, stellt man schnell fest, dass die Aufgabe (zumindest in einfacheren Fällen) durchaus mit etwas modifizierten Mitteln der Elektrotechnik lösbar ist. Bei der Wärmeübertragung existiert nämlich eine Analogie zum Stromtransport in elektrischen Leitern. Betrachtet man eine Anordnung aus einer Wärmequelle und einer Wärmesenke (also aus zwei Punkten mit unterschiedlicher Temperatur) und einer Verbindung der beiden über ein thermisch leitfähiges Objekt, dann kann man prinzipiell ein „Ohmsches Gesetz für Wärmewiderstände“ aufstellen, indem man die Analogien

- Temperatur θ bzw. $T \Leftrightarrow$ elektrisches Potenzial Φ (\Rightarrow Temperaturdifferenz $\Delta\theta$ bzw. $\Delta T \Leftrightarrow$ Spannung U)
- Leistung (Wärmestrom) $P \Leftrightarrow$ elektrischer Strom I und
- Wärmewiderstand $R_\theta \Leftrightarrow$ ohmscher Widerstand R

ausnutzt. In thermischen Größen lautet der Zusammenhang dann

$$\Delta\theta = R_\theta \cdot P$$

Das bedeutet, dass ein Wärmestrom mit der thermischen Leistung P durch ein Objekt mit dem thermischen Widerstand R_θ über diesem Objekt eine Temperaturdifferenz erzeugt. Diese Temperaturdifferenz ist analog zur elektrischen Spannung über einem von Strom durchflossenen ohmschen Widerstand. Dabei ist die Temperatur an der Wärmequelle um $\Delta\theta$ höher als an der Senke. Dementsprechend ist die Einheit des Wärmewiderstandes $\frac{K}{W}$ (Kelvin pro Watt). Ein Wärmewiderstand von $10\frac{K}{W}$ bedeutet also, dass sich pro Watt thermischer Leistung, die den Wärmewiderstand durchfließen, die Temperatur auf der Quellen-Seite um $10K$ gegenüber der Senken-Seite erhöht. Dabei ist besonders zu beachten, dass sich immer eine **Temperaturdifferenz** ergibt. Die Temperatur an der Leistungsquelle errechnet sich dann zur Summe aus der Temperatur der Senke und der berechneten Differenz:

$$\theta_Q = \theta_S + \Delta\theta$$

Dabei ist allerdings zu beachten, dass diese Gleichung ausschließlich die Wärmewiderstände berücksichtigt und Wärmekapazitäten vernachlässigt, was aber in den meisten einfachen Fällen zulässig ist.

Rechenbeispiel aus der Leistungselektronik

In der Leistungselektronik kommen Transistoren (bipolar oder FET) als Schalter (Zwei-punktbetrieb) und als Verstärker (Linearbetrieb) zum Einsatz. An dieser Stelle soll beispielhaft der (einfacher zu berechnende) Schaltbetrieb betrachtet werden. Dabei ist auch im durchgeschalteten Zustand je nach Transistortyp entweder eine weitgehend stromunabhängige Restspannung (Kollektor-Emitter-Sättigungsspannung U_{CEsat} , beim bipolar-Transistor bzw. IGBT) oder ein ohmscher Restwiderstand (Drain-Source-Einschaltwiderstand R_{DSon} , beim MOSFET) zu berücksichtigen.

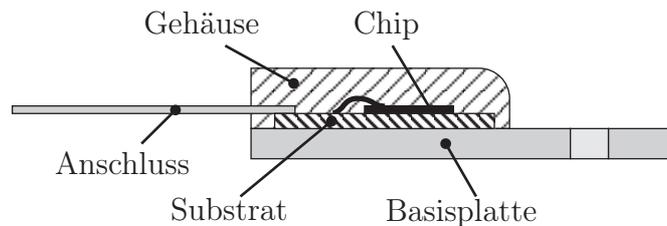


Abbildung 1: Schematisches Schnittbild (Seitenansicht) eines Leistungstransistors (Gehäuse TO-220 oder vergleichbare)

Für Transistoren im Bereich kleinerer Leistungen kommen oft Gehäuse wie das TO-220 zum Einsatz (schematische Darstellung s. Abb. 1). Dieses Gehäuse basiert auf einer Kupferplatte, auf die das Keramiksubstrat mit dem Chip und den Bauteilanschlüssen aufgelötet ist. Substrat und Chip werden mit Kunststoff vergossen, der dann das eigentliche „Gehäuse“ bildet. Die im Chip entstehende Verlustwärme muss also über das Substrat und die Kupferplatte abgeführt werden. Für das Bauteil bestehen thermische Grenzwerte, die v.a. durch die Temperaturbeständigkeit der verwendeten Materialien (Kunststoff und v.a. die Lötverbindungen) gegeben sind. Es ist im Betrieb dafür zu sorgen, dass diese Grenzwerte nicht überschritten werden.

Da die Kupferplatte selbst nur eine sehr kleine effektive Oberfläche besitzt, über die sie die Wärme an die Umgebung abgeben kann, ist es i.d.R. erforderlich, einen zusätzlichen Kühlkörper anzubringen, der die Verlustwärme besser abführen kann. Diese Kühlkörper können z.B. als Rippenkühlkörper ausgeführt sein, die über eine große effektive Oberfläche ohne zusätzliche Maßnahmen die Wärme durch Konvektion an die unmittelbare Umgebung abgeben. Falls das nicht ausreicht, kann durch Zusatzmaßnahmen (Zwangskühlung) z.B. über einen gesteuerten Kühlmittelstrom (Luft über einen Ventilator oder andere Kühlmittel, z.B. Wasser) die abführbare Wärmemenge erhöht werden.

Beispielhaft soll hier ein MOSFET angenommen werden, der im Eingeschalteten Zustand einen Widerstand R_{DSon} von $10\text{ m}\Omega$ besitzt und einen Strom $I_D = 35\text{ A}$ führen soll. Das führt zunächst zu einer Verlustleistung am Chip von

$$\begin{aligned} P_D &= R_{DSon} \cdot I_D^2 = 10\text{ m}\Omega \cdot 35^2\text{ A}^2 \\ &= \mathbf{12,25\text{ W}} \end{aligned}$$

Diese $12,25\text{ W}$ sind die am Chip entstehende thermische Leistung, die abzuführen ist.

Für das TO-220-Gehäuse sind zwei Wärmewiderstandswerte im Datenblatt angegeben:

- $R_{\theta JC}$ (thermal resistance junction-case), Wärmewiderstand Sperrschicht-Gehäuse und

- $R_{\theta JA}$ (thermal resistance junction-ambient), Wärmewiderstand Sperrschicht-Umgebung

Der erstgenannte Wert beschreibt also den Wärmewiderstand vom Chip zur Kupferplatte des Gehäuses (über das Keramik-Substrat), während der zweite Wert zusätzlich den Wärmewiderstand Kupferplatte-Umgebungsluft beinhaltet. Für $R_{\theta JA}$ kann natürlich kein genauer, allgemeingültiger Wert angegeben werden. Der Wert im Datenblatt gilt i.d.R. nur, wenn das Bauteil freistehend mit *ausreichend Luftzufuhr* montiert ist, also unter „idealen Bedingungen“. $R_{\theta JA}$ ist die Summe aus $R_{\theta JC}$ und dem Wärmewiderstand Kupferplatte-Umgebung ($R_{\theta CA}$), der oft nicht explizit im Datenblatt angegeben wird:

$$R_{\theta JA} = R_{\theta JC} + R_{\theta CA}$$

Für das TO-220-Gehäuse gelten die typischen Werte

- $R_{\theta JA} = 62 \frac{K}{W}$
- $R_{\theta JC} = 2,5 \frac{K}{W}$

Ohne Kühlkörper ergäbe sich damit eine (theoretische) Chip-Temperatur (bei einer angenommenen maximalen Umgebungstemperatur von 50 °C) von

$$\begin{aligned} \theta_J &= \theta_A + \Delta\theta = \theta_A + P_D \cdot R_{thJA} = 50^\circ C + 12,25W \cdot 62 \frac{K}{W} \\ &= \mathbf{809,5^\circ C} \end{aligned}$$

Diese Temperatur ist jedoch ein rein rechnerischer Wert, der in der Realität niemals auftreten kann, da das Bauteil bereits bei wesentlich niedrigeren Temperaturen thermisch zerstört würde. Es ist allerdings damit bestätigt, dass eine Kühlung allein über das Gehäuse nicht ausreicht, um die Chiptemperatur innerhalb des laut Datenblatt zulässigen Betriebsbereiches zu halten. Die maximal zulässige Betriebstemperatur solcher Bauteile liegt i.d.R. zwischen 125 und 175 °C.

Geht man von 150 °C aus, dann ergibt sich mit der oben angenommenen maximalen Umgebungstemperatur von 50 °C eine maximale Temperaturdifferenz $\Delta\theta$ von 100 °C. Diese kann man wiederum in die Grundgleichung einsetzen:

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{max} &= R_{\theta, max} \cdot P_D \\ \Rightarrow R_{\theta, max} &= \frac{\Delta\theta_{max}}{P_D} \\ &= \frac{100K}{12,25W} \approx \mathbf{8,16 \frac{K}{W}} \end{aligned}$$

Dieser ermittelte Wert für $R_{\theta, max}$ ist der Maximalwert für den gesamten Wärmewiderstand zwischen Chip und Umgebung, also die Reihenschaltung aus $R_{\theta JC}$ und dem Wärmewiderstand des zu verwendenden Kühlkörpers. Letzterer errechnet sich dann zu

$$R_{\theta KK, max} = R_{\theta, max} - R_{\theta JC} = 8,16 \frac{K}{W} - 2,5 \frac{K}{W} = \mathbf{5,66 \frac{K}{W}}$$

Da dies unter den gemachten Annahmen der Grenzwert ist, sollte für den Einsatz in der Schaltung ein Kühlkörper mit einem Wärmewiderstand von maximal $\mathbf{5 \frac{K}{W}}$ gewählt werden.