

In Geräten fällt durch Verlustleistung oft in erheblichem Maße Wärmeenergie an. Sie führt zu thermischen Belastungen mit negativem Einfluss auf die Funktion und Zuverlässigkeit. In elektronischen Baugruppen ermöglicht die technologische Entwicklung immer höhere Packungsdichten und Schaltfrequenzen, was größere Verlustleistungsdichten zur Folge hat. Thermische Aspekte gewinnen auch bei der Entwicklung von elektromechanischen und mechanischen Baugruppen an Bedeutung, da diese ebenfalls einem vergleichbaren Trend hin zu kompakterem Aufbau und höherer pro Volumeneinheit umgesetzter Leistung folgen. Hinzu kommt hier die zunehmende Verwendung von schlecht wärmeleitenden Kunststoffen.

Die Betrachtungen über die Zuverlässigkeit in Kap. 4 haben gezeigt, dass die Temperatur eine der wichtigsten Einflussgrößen auf die Ausfallrate von Bauelementen ist. Eine Halbierung der in °C gemessenen Betriebstemperatur eines Bauelementes kann dessen Ausfallrate um eine halbe bis ganze Zehnerpotenz reduzieren.

Aus den genannten Gründen sind elektronische Geräte nicht nur in elektrischer, sondern auch in thermischer Hinsicht sorgfältig zu dimensionieren. Dabei ist u. a. sicherzustellen, dass die zulässigen Temperaturen in allen ihren Lebensphasen unter den zu erwartenden Beanspruchungen eingehalten werden. Insbesondere muss die thermische Dimensionierung so erfolgen, dass alle Temperaturen im Gerät stets kleiner als die vorgegebenen Grenztemperaturen sind.

Das in diesem Kap. 5 erlangte Wissen soll es ermöglichen, bei einem Gerät die anfallende Wärmeenergie zu bestimmen (Abschn. 5.1) und mittels thermischer Netzwerke die Wärmepfade zu berechnen (Abschn. 5.2). Unter Kenntnis der möglichen Wärmeübertragungsprinzipie (Abschn. 5.3) kann dann durch Auswahl und Dimensionierung geeigneter Elemente zur Wärmeabführung (Abschn. 5.4) die Einhaltung der thermischen Anforderungen an konkreten gerätetechnischen Beispielen (Abschn. 5.5) sichergestellt werden. Abschließende Empfehlungen zur thermischen Gerätegestaltung gibt Abschn. 5.6.

5.1 Einleitung

5.1.1 Problembeschreibung

Energieverluste in elektronischen Systemen, wie z. B. in Bauelementen und Geräten, erzeugen Wärmeenergie, die sich als Wärmestrom \dot{Q} (Wärmeenergie pro Zeiteinheit) von der Wärmequelle entfernt. Das geschieht jedoch oftmals so unvollkommen, dass eine beträchtliche Temperaturerhöhung im System auftritt.

Bei den meisten informationsverarbeitenden elektronischen Bauelementen und Geräten dient die zugeführte elektrische Eingangsleistung nur zu einem geringen Teil zur Informationsverarbeitung, der weitaus größere Teil fällt als Verlustleistung an. *Damit geht man bei der thermischen Dimensionierung von der Annahme aus, dass die einem elektronischen Bauelement oder Gerät zugeführte elektrische Leistung annähernd zu 100 % in Verlustleistung und damit Wärme umgesetzt wird. Diese ist als Wärmestrom abzuführen.* Je effizienter diese Abführung erfolgt, umso geringer ist die sich ergebende Temperaturerhöhung im Bauelement und Gerät. Damit sind vom Geräteentwickler mögliche Abführungsmechanismen für den Wärmestrom gezielt und durch geeignete technisch-konstruktive Maßnahmen wirkungsverstärkt einzusetzen.

Zur Einführung in diese Problematik soll die Abführung der Verlustleistung P_V eines Widerstandes R untersucht werden, der sich in einem geschlossenen Gehäuse befindet (Abb. 5.1). Die Befestigung des Widerstandes sei so angenommen, dass sie die Wärmeabführung weder begünstigt noch behindert.

Liegt eine elektrische Spannung U am Widerstand R an, so resultiert aus der elektrischen Eingangsleistung P_E eine Verlustleistung

$$P_V \approx \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R, \quad (5.1)$$

welche zu einer Temperaturerhöhung ΔT des Widerstandes gegenüber der umgebenden Luft führt. Durch diese Temperaturdifferenz entsteht ein Wärmestrom \dot{Q} zwischen der Oberfläche des Widerstandes und der Umgebung. Die Temperatur des Widerstandes steigt gegenüber der Temperatur seiner Umgebung so lange an, bis die elektrisch erzeugte Verlustleistung P_V und der abgeführte Wärmestrom \dot{Q} gleich groß sind. Nach dem Wegfall der Verlustleistung P_V entsteht ein Abkühlvorgang, bei dem die Temperaturdifferenz zwischen dem Bauelement und seiner Umgebung wieder verschwindet.

Bei thermischen Berechnungen geht man im Allgemeinen vom *stationären Zustand* mit konstanter Temperatur und $P_V = \dot{Q}$ aus, da die mathematische Behandlung der instationären Aufheiz- und Abkühlvorgänge schwierig ist.

Wie wird nun die Verlustleistung von der Oberfläche des Widerstandes nach Abb. 5.1 abgeführt? Die Wärme, die in einem Körper, einer Flüssigkeit oder einem Gas enthalten ist, entspricht der Bewegung seiner Moleküle. Diese Bewegung wird mit dem Grad der Erwärmung intensiver. Das Maß für den augenblicklichen Mittelwert der kinetischen Energie der Moleküle ist die *Temperatur*. Bringt man einen warmen Körper in ein Medium

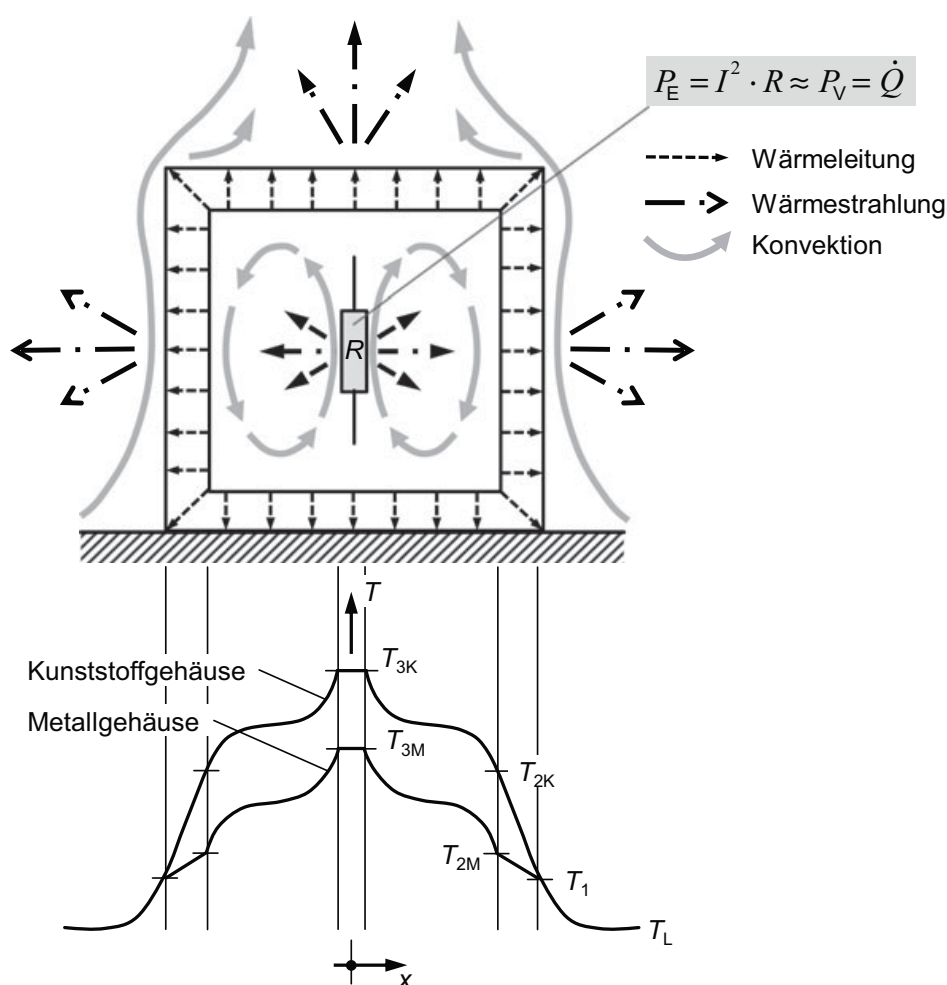


Abb. 5.1 Ableitung der sich aus der elektrischen Eingangsleistung P_E ergebenden Verlustleistung P_V eines Widerstandes in einem Gehäuse (oben) sowie der prinzipielle Temperaturverlauf (unten)

mit geringerer Temperatur, z. B. in Luft, so übertragen die sich bewegenden Moleküle des wärmeren Körpers durch elastische Stöße im Mittel mehr kinetische Energie auf die Moleküle des kälteren Mediums als umgekehrt. Dieser Vorgang hält so lange an, bis sich ein neuer gemeinsamer Mittelwert, eine *Ausgleichstemperatur*, eingestellt hat. Dieser Vorgang der Wärmeübertragung ist nicht umkehrbar.

Die schwingenden Moleküle der Oberfläche des Widerstandes in Abb. 5.1 geben ihre Energie an die Moleküle der umgebenden Luft ab. Die erwärmte Luft in der Nähe des Widerstandes dehnt sich aus. Sie besitzt daher eine geringere Dichte (sie ist „leichter“) als die weiter entfernte. Der dadurch entstehende Auftrieb erzeugt eine Luftströmung im Innern des Gehäuses. Bei der Berührung der strömenden Luft mit der kühleren Gehäusewand entsteht ein Wärmeübergang zum Gehäuse. Die dadurch abgekühlte Luft wird „schwerer“, wodurch sie nach unten sinkt. Den beschriebenen Vorgang bezeichnet man als *Konvektion* (s. Abschn. 5.3.3).

In der Gehäusewand wird der Wärmestrom durch Schwingungen von Molekül zu Molekül weitergeleitet. Dieser Effekt der *Wärmeleitung* (s. Abschn. 5.3.2) kann in festen,

flüssigen und gasförmigen Medien auftreten. Dabei spielt die Art des Mediums, hier beispielsweise die Gehäusewand, eine wesentliche Rolle. Kunststoffgehäuse setzen dem Wärmedurchgang einen wesentlich größeren „Widerstand“ entgegen als Metallgehäuse. An der Außenwand des Gehäuses tritt wieder Konvektion auf.

Ist der Raum zwischen dem Widerstand und der Gehäusewand sehr eng (wenige Millimeter), so kann sich keine freie Luftströmung zwischen Wärmequelle und Wand ausbilden. In diesem Fall findet der Wärmeübergang fast ausschließlich durch Wärmeleitung statt. Die praktisch ruhende Luft setzt dem Wärmeübergang einen hohen Widerstand entgegen. Dieser Effekt wird beispielsweise bei Isolierglas von Fenstern ausgenutzt, bei denen sich zwischen zwei Glasscheiben eine schmale Luftzone befindet.

Im Beispiel nach Abb. 5.1 tritt außer den beschriebenen physikalischen Effekten Konvektion und Wärmeleitung noch Wärmeübertragung durch Strahlung auf. *Wärmestrahlung* (s. Abschn. 5.3.4) ist eine elektromagnetische Schwingung, die sich nach den Gesetzen der Optik ausbreitet. Strahlungsaustausch findet zwischen den Oberflächen von Körpern statt. Da Luft für Wärmestrahlung praktisch völlig durchlässig ist, wird sie beim Strahlungsdurchgang auch nicht erwärmt. Wärmestrahlen breiten sich geradlinig aus und werden beim Auftreffen auf Materie absorbiert, reflektiert oder durchgelassen. Bei der Absorption werden sie wieder in Wärme (Schwingungen der Moleküle) umgesetzt.

In elektronischen Geräten treten im Normalfall Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung nebeneinander auf. Da sie unterschiedlichen Gesetzmäßigkeiten unterliegen, sind sie bei der Berechnung einzeln zu behandeln.

Abschließend soll die prinzipielle *Temperaturverteilung* zwischen der „Wärmequelle“ Widerstand R und der Umgebungsluft außerhalb des Gehäuses (s. Abb. 5.1 unten) betrachtet werden. Dabei nimmt man vereinfachend eine gleichmäßige Wärmeabführung durch das Gehäuse an.

Die niedrigste Temperatur besitzt die Luft außerhalb des Gehäuses (T_L). Die Temperatur steigt wegen der Konvektionsvorgänge nichtlinear auf die äußere Gehäusetemperatur T_1 an. *Die äußere Gehäusetemperatur ist unabhängig von der Innentemperatur des Gehäuses* (s. Abschn. 5.5.4 und 5.5.5).

Der Temperaturdifferenz in der Gehäusewand ist von der Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffs abhängig. Bei einem schlechten Wärmeleiter ist für den Durchtritt einer bestimmten Verlustleistung P_V eine höhere Temperaturdifferenz ($T_{2K} - T_1$) erforderlich als bei einem gut leitenden Werkstoff ($T_{2M} - T_1$).

Auf der inneren Wandtemperatur baut sich die Lufttemperatur im Innern des Gehäuses auf. Deren Verlauf ist, wegen der Konvektionsvorgänge, wieder nichtlinear. Die Werte T_{3M} und T_{3K} sind die Oberflächentemperaturen des Widerstandes bei Metall- und Kunststoffgehäusen. Die Bauelementetemperatur lässt sich also senken, wenn für einen guten Wärmeübergang zwischen der Bauelementeoberfläche und der Umgebung des Gehäuses gesorgt wird.

Die hier nur qualitativ behandelten Vorgänge sollen nachfolgend näher aufbereitet werden, einschließlich der Definitionen der wichtigsten Grundbegriffe. Abschnitt 5.2 behandelt die ingenieurmäßige Vorgehensweise bei der thermischen Dimensionierung. Die

Berechnung der Wärmeübertragung erfolgt mit einem Analogiemodell, welches ein thermisches Netzwerk analog einem elektrischen Stromkreis nutzt. Abschnitt 5.3. widmet sich den physikalischen Grundlagen der Wärmeübertragung. Dieses Wissen ist für das Verständnis der Zusammenhänge und die richtige Auswahl sowie die effektive Anwendung der zu implementierenden Wärmeabführung unverzichtbar. Abschnitt 5.4 beschreibt die wichtigsten Elemente zur Wärmeabführung, die man aufgrund ihrer intensivierten Wärmeübertragung zur Lösung thermischer Probleme nutzt. Ihre Anwendung bei gerätetypischen Problemstellungen ist Gegenstand des Abschn. 5.5.

5.1.2 Grundgrößen der thermischen Dimensionierung

Liegt während der Zeit t an einem Widerstand R eine elektrische Spannung U an bzw. fließt ein Strom I , so wird während dieser Zeit die elektrische Arbeit

$$W = U \cdot I \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t = P \cdot t \quad (5.2)$$

geleistet bzw. die *elektrische Energie* W in eine gleich große *thermische Energie* umgewandelt. Die thermische Energie eines Körpers äußert sich in seiner Temperatur und entspricht der mittleren kinetischen Energie seiner Moleküle.

Allgemein ist Energie die Fähigkeit eines physikalischen Systems, Arbeit zu leisten, wie z. B. einen elektrischen Strom durch einen Widerstand zu treiben. Energie kann in den verschiedensten Formen auftreten, beispielsweise als mechanische, elektrische, magnetische, chemische, Strahlungs- oder thermische Energie. Nach dem Grundgesetz von der Erhaltung der Energie kann keine Energie vernichtet oder neu geschaffen werden, sie ist lediglich umwandelbar.

Über Systemgrenzen hinweg transportierte thermische Energie bezeichnet man als *Wärmeenergie* Q (auch *Wärmemenge* oder umgangssprachlich *Wärme*). Sie gibt damit an, wie viel thermische Energie ein Körper auf einen anderen überträgt. Gibt ein Körper Wärmeenergie ab, so verringert sich seine thermische Energie, und umgekehrt. Wärmeenergie wird aufgrund des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik immer vom System mit der höheren Temperatur in Richtung des Systems mit der niederen Temperatur übertragen. Die Wärmeenergie kennzeichnet den Prozess der Übertragung thermischer Energie von einem Körper auf einen anderen oder auch von einem Körper auf seine Umgebung. Sie ist deshalb eine Prozessgröße. Die Einheit der Wärmeenergie ist Joule (J).

Bei Temperaturdifferenzen fließt somit Wärmeenergie von den Stellen mit höherer Temperatur zu Stellen niederer Temperatur, es fließt ein *Wärmestrom* \dot{Q} . Dieser ist damit eine physikalische Größe zur Beschreibung von Wärmeübertragungsvorgängen. Der Wärmestrom \dot{Q} ist die in einer Zeiteinheit transportierte Wärmeenergie Q . Somit ist er eine Leistung (*Wärmeleistung*) mit der Einheit Watt (W) bzw. J/s.

Bezieht man den Wärmestrom \dot{Q} auf die von ihm durchdrungene Fläche A , so erhält man die *Wärmestromdichte* q . Ihre Einheit ist W/m^2 bzw. $J/(m^2s)$.

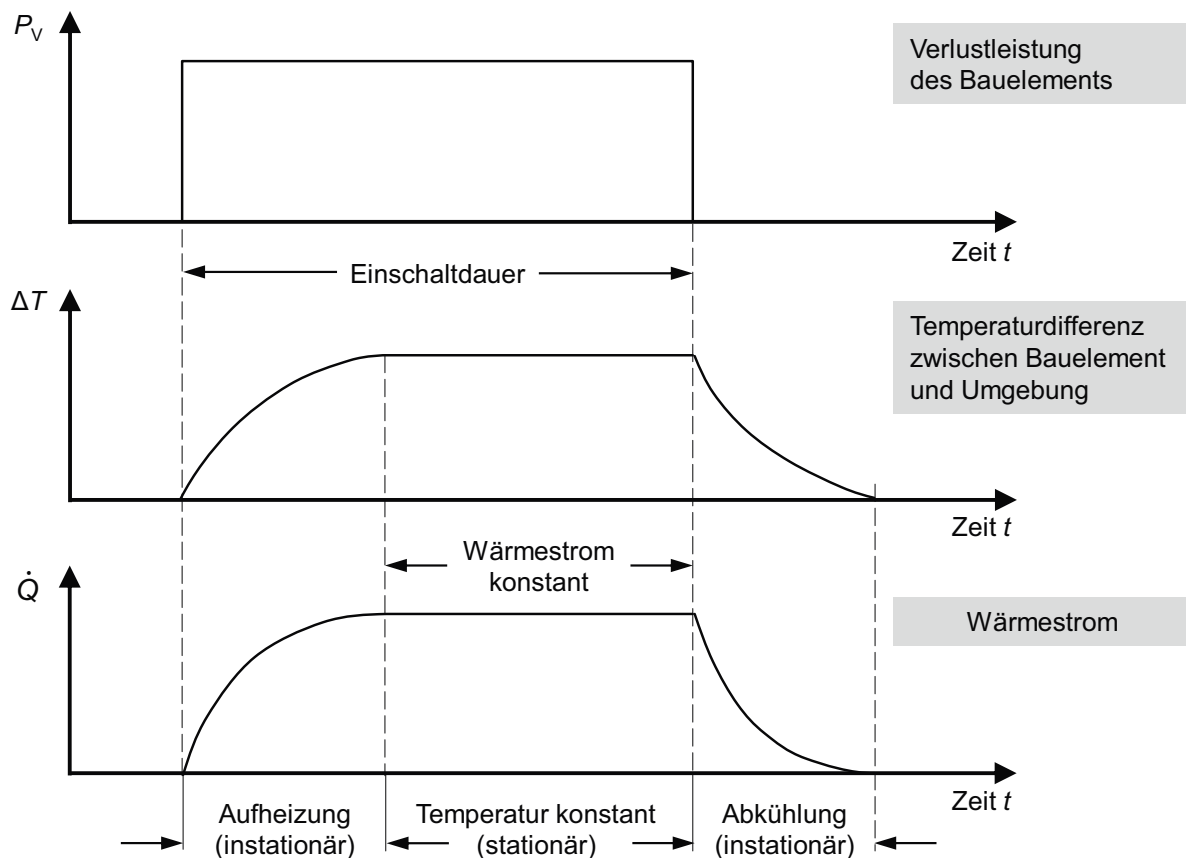


Abb. 5.2 Verlustleistung, Temperatur und Wärmestrom eines elektronischen Bauelements

In Bauelementen oder Geräten fällt der Wärmestrom als *Verlustleistung* P_V an. Diese resultiert aus der Differenz zwischen der Leistungsaufnahme eines elektrischen Bauelementes oder Gerätes und seiner gewünschten abgegebenen Leistung. Sie ist daher ein unerwünschter Teil der Leistung, der in einem Bauelement oder Gerät in einen Wärmestrom umgesetzt wird. Die Einheit der Verlustleistung ist damit die des Wärmestroms, nämlich Watt (W). Gibt ein elektrisches Gerät keine „Nutzleistung“ nach außen ab, wie beispielsweise Zeigermessgeräte, so wird die zugeführte elektrische Energie vollständig in Wärme Q umgesetzt und, im stationären Fall, komplett als Wärmestrom \dot{Q} abgeführt (Abb. 5.2).

Ein wichtiger Parameter elektronischer Bauelemente und Geräte ist die *Verlustleistungsdichte* q , welche der bereits eingeführten Wärmestromdichte q entspricht. Hier wird die Verlustleistung, also der Wärmestrom, auf die Fläche eines Chips bzw. Verdrahtungsträgers bezogen. Analog der Wärmestromdichte ist damit ihre Einheit W/m^2 . Zum Teil setzt man die Verlustleistungsdichte auch mit dem Volumen, z. B. von Bauelementen oder Geräten, in Relation; übliche Einheiten sind dann W/m^3 oder W/dm^3 .

Die *Temperatur* T beschreibt den Wärmezustand eines Körpers. Sie ist ein Maß für die durchschnittliche kinetische Energie der Teilchen eines Stoffes. Die Temperatur wird bezogen auf den absoluten Nullpunkt in Kelvin (K) oder, verknüpft mit dem Schmelzpunkt

des Eises, in Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$) angegeben, eine Temperaturdifferenz dagegen immer in Kelvin.

Bei $-273,15^{\circ}\text{C}$ hört die Bewegung der Moleküle auf. Diesen Wert bezeichnet man als *absoluten Nullpunkt* und ordnet ihn als Basis der Kelvin-Temperaturskala zu. Das Temperaturintervall „ein Grad“ entspricht dem der Celsiuskala. Da die Kelvinskala die Formulierung thermodynamischer Gesetze vereinfacht, wurde sie im SI-System als thermodynamische Temperaturskala mit der Einheit Kelvin festgelegt; als Formelzeichen ist T eingeführt. Für die Celsius-Temperaturskala wird zum Teil ϑ als Formelzeichen benutzt. Für die Umrechnung zwischen der Kelvin- und der Celsius-Skala gilt

$$\frac{T_{\text{K}}}{\text{K}} = 273,15 + \frac{T_{\text{C}}}{^{\circ}\text{C}}. \quad (5.3)$$

Das folgende Beispiel zu Gl. (5.3) zeigt diesen Zusammenhang:

$$T_{\text{C}} = 40^{\circ}\text{C}, \quad \frac{T_{\text{K}}}{\text{K}} = 273,15 + \frac{40^{\circ}\text{C}}{^{\circ}\text{C}}, \quad T_{\text{K}} = 313,15 \text{ K}.$$

Ein durch einen Körper fließender Wärmestrom erzeugt entlang des Strömungspfades eine Temperaturdifferenz. Das Verhältnis aus dieser Temperaturdifferenz (Temperaturabfall bzw. Temperaturfall) und dem Wärmestrom ist der *Wärmewiderstand* oder *thermische Widerstand* R_{th} des Pfades. Damit besteht eine Analogie zum elektrischen Widerstand R , der sich aus dem Verhältnis der über ihn abfallenden elektrischen Spannung und den durch ihn fließenden Strom ergibt. Auch gilt, dass sich die Wärmewiderstände einer mehrschichtigen Wand in gleicher Weise addieren wie hintereinander geschaltete elektrische Widerstände. Der Wärmewiderstand wird u. a. zur Charakterisierung von Kühlkörpern verwendet. Seine Einheit ist K/W .

Fließt in einen Körper ein Wärmestrom ein, so erhöht sich dessen Temperatur. Das Verhältnis aus einfließender Wärme und Temperaturanstieg ist die *Wärmekapazität* C_{th} , angegeben in J/K bzw. $(\text{W} \cdot \text{s})/\text{K}$. Die Wärmekapazität ist damit das Vermögen eines Körpers, thermische Energie zu speichern. Hier existiert die Analogie zur elektrischen Kapazität C , die das Speichervermögen bezüglich elektrischer Energie angibt. Sollte in einem betrachteten System die Wärmekapazität so groß sein, dass die Temperaturerhöhung vernachlässigt werden kann, so bezeichnet man diesen Körper als *Wärmesenke*.

Tabelle 5.1 fasst die wichtigsten Grundgrößen der thermischen Dimensionierung noch einmal zusammen.

5.1.3 Zulässige Temperaturbereiche von Bauelementen und Geräten

Eine höhere Temperatur bedingt eine Abnahme der Zuverlässigkeit von elektronischen Bauelementen und Geräten. Zur Sicherung ihrer Zuverlässigkeit sind daher zulässige Umgebungstemperaturen als Betriebs- und Durchgangstemperaturbereiche festzulegen.

Der *Betriebstemperaturbereich* gibt dabei die im Betrieb und der *Durchgangstemperaturbereich* die im ausgeschalteten Zustand, z. B. bei Montage, Lagerung oder Transport,

Tab. 5.1 Wichtige physikalische Größen der thermischen Dimensionierung

Physikalische Größe	Zeichen	Einheit
Wärmeenergie, Wärme	Q	J
Wärmestrom, Wärmeleistung	\dot{Q}	W
Verlustleistung	P_V	W
Wärmestromdichte, Verlustleistungsdichte	q	W/m ² (W/m ³)
Temperatur	T	K, °C
Wärmewiderstand	R_{th}	K/W
Wärmekapazität	C_{th}	J/K bzw. W · s/K

zulässigen Umgebungstemperaturen an. In den meisten Fällen ist der Durchgangstemperaturbereich größer als der Betriebstemperaturbereich. Beispielsweise beträgt der Durchgangstemperaturbereich vieler Labormessgeräte -40 bis 60 °C, während der Betriebstemperaturbereich auf 10 bis 40 °C eingeschränkt ist.

Sind in einem Gerät Wärmequellen, d. h. Verlustleistungsquellen, vorhanden, so ist dessen Innentemperatur durch die Eigenerwärmung höher als die Umgebungstemperatur. Bei derartigen Geräten ist immer die Oberflächentemperatur der Bauelemente für die Bestimmung des Betriebstemperaturbereiches zu verwenden, auch wenn sie selbst keine Wärme erzeugen. Beim Betriebstemperaturbereich ist außerdem darauf zu achten, dass es zu einer Überlagerung der äußeren Wärmequellen, z. B. des Motors im Auto, mit dem durch Bauelemente bzw. Geräte selbst hervorgerufenen Wärmestrom aufgrund der inhärenten Verlustleistung kommen kann.

Als *Übertemperatur* bezeichnet man die Temperaturdifferenz zwischen einem eigenerwärmten Bauelement bzw. Gerät und einer festgelegten Umgebungstemperatur. Dagegen ist die *Grenztemperatur* ein definierter maximal zulässiger absoluter Temperaturwert.

In Normen und Richtlinien sind die zulässigen Übertemperaturen für unterschiedliche Anwendungsgebiete von elektronischen Geräten festgelegt. Für äußere Teile von Geräten, wie z. B. Bedienelemente, gelten darüber hinaus aus Sicherheitsgründen (u. a. Gefahr von Verbrennungen) eigene Grenztemperaturen.

5.1.4 Verlustleistungsquellen in elektronischen Geräten

Alle elektronischen Bauelemente und Leitungsverbindungen setzen Verlustleistungen P_V in Form von Wärmeströmen \dot{Q} frei. Bei elektronischen Systemen unterscheidet man zwischen widerstandsabhängigen Leitungsverlusten und frequenzabhängigen Schaltverlusten. Mit der Annahme, dass die zugeführte elektrische Leistung nahezu komplett in Verlustleistung und damit in einen abzuführenden Wärmestrom umgesetzt wird, liegt man bei der thermischen Dimensionierung auf der sicheren Seite.

Tabelle 5.2 vermittelt einen Überblick über die Berechnung der Verlustleistung wichtiger Bauelemente und deren bestimmende Parameter.

Tab. 5.2 Verlustleistungen P_V ausgewählter elektronischer Bauelemente (nach [1])

Bauelement	Verlustleistung	Bestimmende Parameter
Widerstand, Leitung	Ohmsche Verluste: $P_V = I^2 \cdot R = I^2 \cdot \rho \cdot \frac{L}{A} = I^2 \cdot \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{L}{A}$	I Leitungsstrom R Leiterwiderstand ρ spezif. elektr. Widerstand σ spezif. elektr. Leitfähigkeit L Leiterlänge A Leiterquerschnitt
Kondensator	Dielektrische Verluste bei harmonischer Wechselspannung: $P_V = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \tan \delta$	U Effektivwert der Kondensatorspannung ω Kreisfrequenz C Kapazität $\tan \delta$ Verlustwinkel des Dielektrikums
Diode	$P_V = U_d \cdot I_d$	U_d Diodenspannung I_d Diodenstrom
CMOS-Bauelemente	Schaltverluste (70 bis 90 % der Verluste): $P_V = C \cdot U_{dd} \cdot f$	C Lastkapazität U_{dd} Versorgungsspannung f Schaltfrequenz
Bipolartransistor	$P_V = U_{CE} \cdot I_C + U_{BE} \cdot I_B \approx U_{CE} \cdot I_C$	U_{CE} Kollektor-Emitter-Spannung I_C Kollektorstrom U_{BE} Basis-Emitter-Spannung I_B Basisstrom
Sperrschicht- Feldeffekttransistor, JFET	$P_V = I_D^2 \cdot R_{DS(on)}$	I_D Drainstrom $R_{DS(on)}$ Drain-Source-Widerstand