

Thermisches Design

von LED-Leuchten



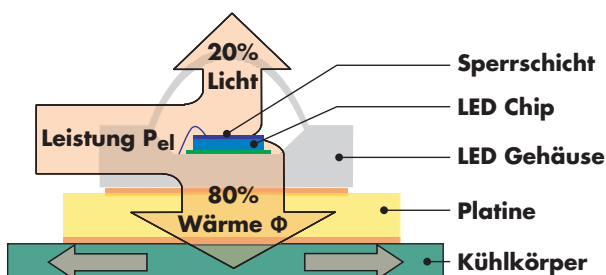
A New Lighting Experience

Die LED ist die modernste Lichtquelle und eröffnet eine Vielfalt von innovativen Lichtlösungen. Der Umgang mit LEDs ist jedoch noch vielfach durch Missverständnisse und fehlerhaften Umgang mit dieser Halbleitertechnologie gekennzeichnet. Insbesondere den speziellen thermischen Anforderungen von Hochleistungs-LEDs wird oft nicht genug Beachtung geschenkt. Dieser Informationsflyer geht auf die Besonderheiten beim Leuchtendesign mit LED-Technologie ein und versucht das Bewusstsein für ein optimales thermisches Management zu schaffen.

1 Temperaturverhalten der LED-Technologie

1.1 Besonderheiten der LED-Technologie

LEDs basieren auf Halbleiterchips und werden im Hochleistungsbereich mit Strömen von bis zu 1 A betrieben. Während des Lichtgenerierungsprozesses in der so genannten Sperrschicht (p-n-Junction) werden bis zu 80 % der eingesetzten elektrischen Energie in Wärme umgewandelt. Die Erwärmung während des Betriebs führt sowohl zur Verringerung der Lichtausbeute als auch zur Verkürzung der Lebensdauer der LED. Wird die maximal erlaubte Sperrschichttemperatur dauerhaft überschritten, wird der Halbleiter unwiderruflich zerstört.



Im Betrieb heizt sich der Chip schnell auf bis zu 100 °C und mehr auf. Um die gewünschten Eigenschaften der LED-Leuchte im Hinblick auf Lichtniveau und Lebensdauer zu erreichen, muss die Sperrschicht unterhalb einer definierten Soll-Temperatur gehalten werden und die entstehende Wärme vom Chip an den Leuchtenkörper und von dort an die Umgebung abgeführt werden. Deshalb sollte bereits während des Designs der Leuchte auf eine ausreichend dimensionierte Kühlung geachtet werden.

1.2 Helligkeit und Lebensdauer von LED-Modulen

Obwohl LEDs unter günstigen Betriebsbedingungen die längste Lebensdauer aller Leuchtmittel aufweisen, verlieren der Halbleiter und der Konversionsleuchtstoff mit der Zeit ihre physikalischen Eigenschaften. Die LED degradiert.

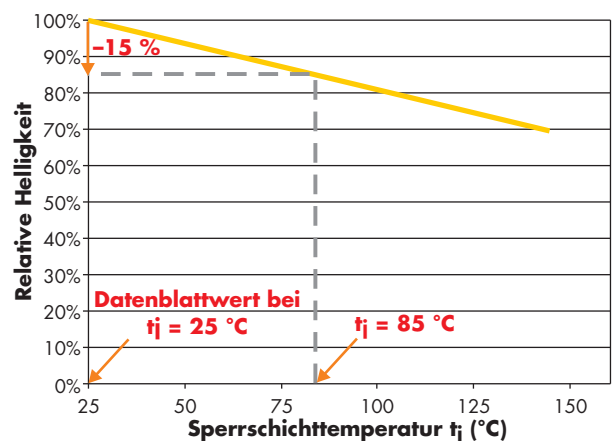
VS gibt die Lebensdauer seiner LED-Module als L70- oder L50-Wert an. Der L70-Wert gibt z. B. an, nach wie vielen Stunden Betriebszeit der Lichtstrom 70 % des Ausgangslichtstroms beträgt. Nach dieser Zeit sollten die LED-Module durch neue ersetzt werden. Dieser Wert ist speziell in der Allgemeinbeleuchtung relevant. In anderen Anwendungsbereichen wie Effekt- oder Zusatzbeleuchtung wird ein Austausch erst vorgenommen, wenn der Lichtstrom auf die Hälfte des Ausgangslichtstroms abgefallen ist, also L50.

Die Geschwindigkeit des Alterungsprozesses hängt stark von der Temperatur in der Sperrschicht ab und beschleunigt sich mit der Zeit. Deshalb gelten Lebensdauerangaben nur bei bestimmten Sperrschichttemperaturen (t_j). Lebensdauerangaben sind in Versuchsreihen der LED-Hersteller ermittelte statistische Werte und spiegeln nicht das genaue Verhalten einer einzelnen LED wider.

Gleiches gilt für die Helligkeit der LED. Durch die Erwärmung der Sperrschicht verliert der Lichtgenerationsprozess an Effizienz und ein Helligkeitsrückgang ist messbar.

Die LED-Hersteller geben die Helligkeiten ihrer LEDs typischerweise bei einer t_j von 25 °C an, was nicht den realistischen Betriebsbedingungen in einer Leuchte entspricht.

Beispielsweise beträgt der Lichtrückgang bei $t_j = 85$ °C bereits 15 % verglichen mit dem im Datenblatt angegebenen Ausgangswert bei $t_j = 25$ °C.



Je kühler die Sperrschicht einer LED im Betriebszustand ist, desto besser und langlebiger ist die Leuchte. Um die Lebensdauer und die Helligkeit einer LED-Leuchte richtig zu kennen, muss also die Sperrschichttemperatur bekannt sein. Diese ist in der Praxis nur schwer messbar.

1.3 Definierte Produkteigenschaften durch stabile Temperatur am t_c -Punkt

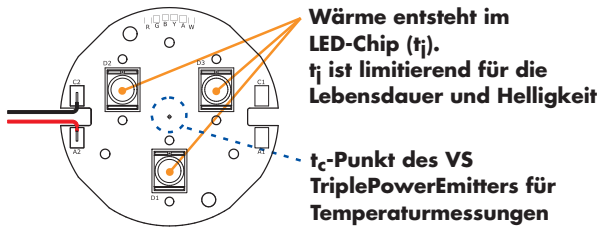
Da die Sperrschichttemperatur (t_j) nur unter großem Aufwand direkt gemessen werden kann, hat VS zur Vereinfachung auf seinen LED-Modulen den Referenzpunkt t_c eingeführt.

Der t_c -Punkt ist auf der LED-Platine angebracht und die hier gemessene Temperatur korrespondiert mit dem t_j -Wert und erlaubt direkten Rückschluss auf das Verhalten der LED.

Der t_c -Punkt ist gut per Temperaturfühler zu erreichen und die Messungen sind leicht durchführbar.

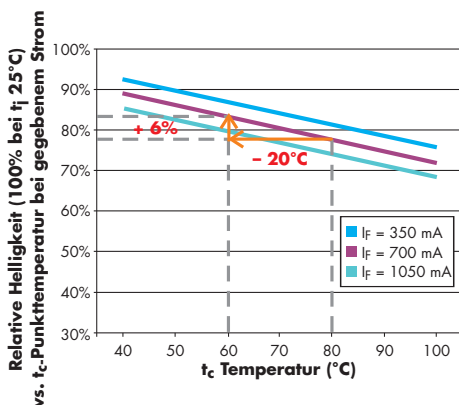
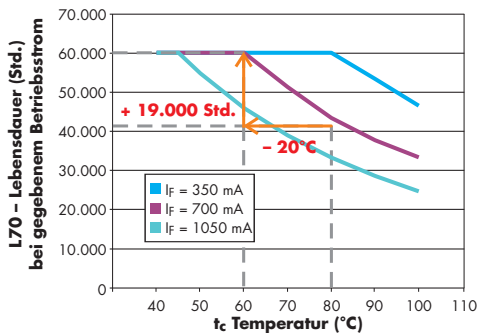
1.3 Definierte Produkteigenschaften durch stabile Temperatur am t_c -Punkt

Weiterhin gibt VS die Lebensdauer und Helligkeit seiner High-Power-Module in Abhängigkeit von der t_c -Temperatur und dem Betriebsstrom in einer separaten Broschüre an. Die Broschüre "Lifetime and Brightness dependent on t_c point temperature" stellen wir Ihnen auf Anfrage zur Verfügung. Somit kann über die Festlegung der Wunsch-Lebensdauer die dazu notwendige t_c -Temperatur ermittelt werden. Das ist die Grundlage für das zu entwerfende Thermodesign.



Als Grundregel gilt: um alle Parameter zu verbessern muss die t_c -Temperatur so niedrig wie möglich gehalten werden!

Beispiel: TriplePowerEmitter XRE betrieben mit 700 mA
Durch die Reduzierung der t_c -Temperatur von 80 °C auf 60 °C erhöht sich die erwartete Lebensdauer um 19.000 Stunden und die Helligkeit um 6 %!



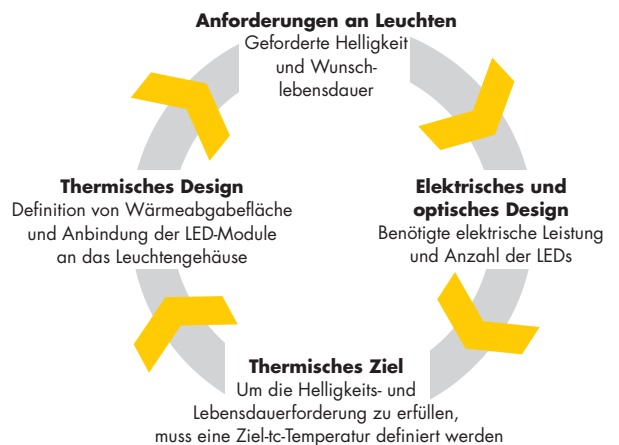
2 Thermisches Management und seine Herausforderungen

Beim Design einer LED-Leuchte muss die eingesetzte elektrische Leistung im optimalen Verhältnis zum Kühl-Design stehen. Nur so kann das gewünschte Betriebsverhalten über viele Stunden stabil gehalten werden. Je nachdem wie viel Platz für den Einbau zur Verfügung steht und je nach Materialwahl, kann man dieselbe Helligkeit mit höheren Strömen und weniger LEDs (Fall 1) oder mehr LEDs und niedrigeren Strömen (Fall 2) erreichen.

Bei gleicher Kühlung und identischen Betriebsbedingungen ist die Lebensdauer im ersten Fall sicherlich geringer als im zweiten Fall. Je nach Einsatzzweck der LED-Leuchte und den Betriebsbedingungen muss man bei der Festlegung der Designziele Prioritäten setzen, da sich die möglichen Ziele

- elektrische Leistung,
- Verringerung des Kühlaufwands und
- Steigerung der Lichtausbeute und Lebensdauer

konträr verhalten.



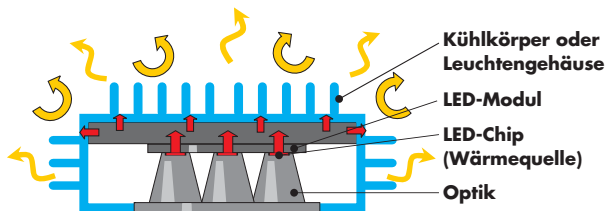
2.1 Thermisches Design von LED-Leuchten

Ist die Anzahl der LEDs und der Betriebsstrom während des elektrischen und optischen Designs festgelegt, muss das thermische Management einer LED-Leuchte gewährleisten, dass die entstandene Wärme von der Sperrschicht zum Leuchtenkörper abgeführt wird und die Wunsch-Temperatur am t_c -Punkt unter den ungünstigsten Umgebungsbedingungen eingehalten wird. Bei einer freischwebenden Leuchte ist dies die maximal mögliche Umgebungstemperatur $t_{a \max}$.

2.1 Thermisches Design von LED-Leuchten

Die Wärme fließt nur von wärmeren zu kühleren Materialien. Für den Wärmetransport sind drei unterschiedliche Prozesse verantwortlich:

- **Wärmeleitung** Wärmetransfer durch Medien mit direktem physikalischen Kontakt untereinander ohne dass ein Medium fließt. Z. B. Von der Sperrschicht durch das LED-Gehäuse zur Platine.
- **Konvektion** Kombination aus Wärmeleitung und Wärmetransfer durch ein sich bewegendes Medium. Dabei werden die heißeren Teilchen in kühlere Regionen transportiert. Z. B. ein Kühlkörper, der von der Umgebungsluft umströmt wird.
- **Wärmestrahlung** Wärmetransport durch elektromagnetische Abstrahlung. Zum Transport ist kein Medium notwendig. Strahlung funktioniert auch in und durch perfektes Vakuum. Z. B. ein Kühlkörper oder LED-Leuchten-Gehäuse strahlt Wärme als Infrarot (IR)-Strahlung ab.



2.1.1 Internes thermisches Management

Der Wärmetransfer von der Sperrschicht bis zum Leuchtenkörper oder Kühlkörper kann als das interne Wärmemanagement der LED-Leuchte verstanden werden.

Der effizienteste Wärmetransportmechanismus ist die Wärmeleitung. Die Qualität der Wärmeleitung hängt ganz stark von den verwendeten Materialien und der Geometrie ab. Die Verwendung von Materialien mit niedrigem spezifischem Wärmewiderstand, wie Kupfer oder Aluminium, kann als der wichtigste Faktor angesehen werden. Damit die gesamte Strecke vom LED-Modul bis zum Leuchtenkörper einen niedrigen Wärmewiderstand (R_{th}) hat, sollten auch die Materialdicken von thermisch schlecht leitenden Materialien, durch die die Wärme fließt, so gering wie möglich sein.

Zum werkzeuglosen Anbringen von LED-Modulen an anderen Bauteilen, gibt es selbstklebende wärmeleitende Pads. VS bietet für jedes LED-Modul die passenden wärmeleitenden Klebepads an. Weil Luft ein sehr schlechter Wärmeleiter ist, sind Luftspalte im Wärmeleitpfad zu vermeiden.

2.1.2. Externes thermisches Management

Darunter versteht man die Wärmeabfuhr vom Leuchtenkörper oder Kühlkörper zur umgebenden Luft. Die Hauptprozesse in diesem Fall sind Konvektion und Wärmestrahlung. Die Konvektion hängt hauptsächlich von der Fließgeschwindigkeit der Umgebungsluft und der umströmten Fläche ab. Eine große Oberfläche und freie Luftzirkulation sind die wichtigsten Kriterien.

Die Wärmestrahlung hingegen hängt am stärksten von der Temperatur und der Oberfläche der Leuchte ab. Je heißer und größer, desto mehr Wärme wird per IR-Strahlung abgegeben. Im Normalfall kommt dieser Prozess erst ab einer Temperatur von 60 °C merklich zum tragen. Hochglanzpolierte Metalloberflächen strahlen nur wenig Wärme ab, während lackierte Oberflächen eine sehr gute Wärmeabstrahlung ermöglichen.



Beispiel eines Kühlkörpers/Leuchtenkörpers mit Kühlrippen zur besseren Wärmeabgabe an die Umgebungsluft

Nachdem das LED-Modul thermisch optimal an das Leuchtengehäuse oder den Kühlkörper angebunden ist, erfolgt die Wärmeabgabe hauptsächlich durch die Konvektion in die Luft. Die abgeführte Wärmemenge wird durch die Oberfläche der Leuchte oder des Kühlkörpers beeinflusst.

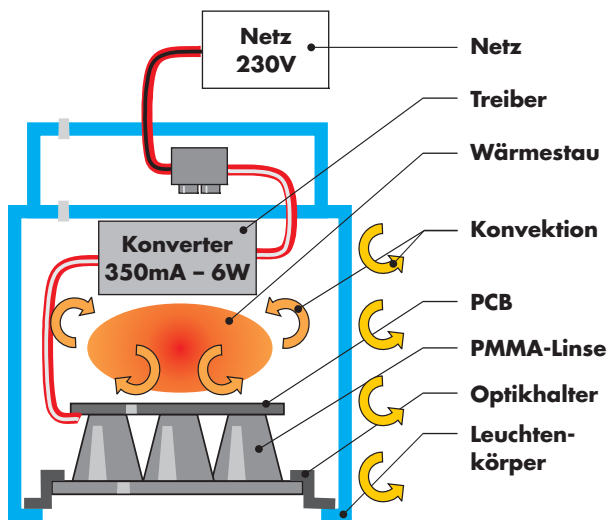
Als grober Richtwert gilt, zur Abfuhr von 1 Watt thermischer Leistung benötigt man eine Oberfläche von 25 cm².

Die Oberfläche kann durch Lamellen vergrößert werden. Die Kühlleistung kann auch durch die Erhöhung der Umfließgeschwindigkeit der Luft, z. B. durch Ventilatoren, gesteigert werden.

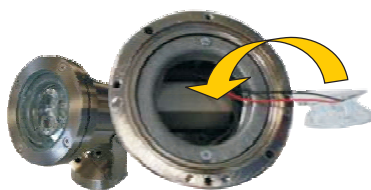
2.2 Beispiele des thermischen Designs von LED-Leuchten

2.2.1 Schlechtes thermisches Design

In dieser Leuchte wurde das LED-Modul ohne Wärmeleitverbindung zwischen LED-Modul und Leuchtenkörper eingesetzt. Im Ergebnis überhitzen die LEDs. Nach 50 Minuten Betrieb mit nur 350 mA erreicht die t_c -Temperatur bereits kritische 105 °C, was deutlich über der maximal spezifizierten Temperatur des Moduls liegt. Dies kann zur Beschädigung von Bauteilen, z. B. angebrachten Optiken, führen.



Der Hauptwärmeprozess innerhalb der Leuchte ist in diesem Fall Konvektion. Das ist nicht genug, um die Wärme effizient abzuleiten. Die Wärme staut sich und überhitzt das LED-Modul und den LED-Treiber, was zu einer deutlichen Verkürzung der Lebensdauer führt.

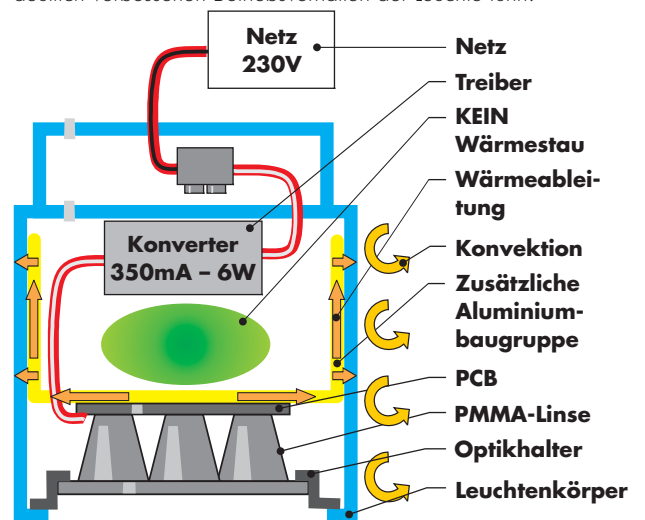


LED-Modul wurde ohne ausreichende Wärmeableitung ins Gehäuse eingesetzt

2.2.2 Gutes thermisches Design

Das thermische Design der Leuchte kann allein durch eine durchgehende thermische Verbindung des LED-Moduls zum metallenen Leuchtenkörper verbessert werden. Dazu kann ein zusätzliches Aluminium-Profil verwendet werden, an welches das LED-Modul per wärmeleitendem Klebepad befestigt wird. Dann wird das Aluminium-Profil so in das Leuchtengehäuse eingesetzt, dass eine gute Verbindung zum Leuchtenkörper entsteht.

In diesem Fall erreicht die Platinentemperatur im thermischen Gleichgewicht nach 45 Minuten nur 46 °C, was zu einem deutlich verbesserten Betriebsverhalten der Leuchte führt.



Der Hauptwärmeprozess von der Platine zum Leuchtenkörper ist jetzt Wärmeleitung. Das ist der effizienteste Prozess für das interne thermische Design. Dann kann die Wärme optimal durch den Leuchtenkörper abgeführt werden. In diesem Fall werden weder das LED-Modul noch der LED-Treiber überhitzt.



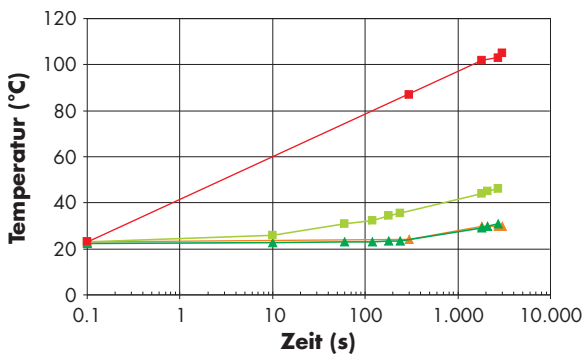
Durch das Hinzufügen von nur einem gut wärmeleitenden Bauteil, entsteht ein Wärmepfad, der die Wärme optimal von den LED-Modulen zum Gehäuseäußeren führt. Ein Wärmestau wird vermieden.

2.2.2 Gutes thermisches Design

Die Reduzierung der t_c -Punkt-Temperatur von 105 °C auf 46 °C führt zu einer Lebensdauersteigerung auf über 60.000 Stunden und einer Helligkeitssteigerung von 17 %.

Die Gehäusestemperatur der Leuchte ist in beiden Fällen identisch. Das bedeutet, dass durch besseres internes thermisches Management die Gehäusestemperatur einer Leuchte nicht ansteigt, sondern nur die Sperrschichttemperatur der Leuchte gesenkt wird.

Gleichzeitig zeigt dies, dass man durch reines "Fühlen" einer geringen Gehäusestemperatur nicht auf ein gutes thermisches Design schließen kann, sondern immer die t_c -Temperatur per Messung ermitteln muss.



Mit Wärmeleitung **Ohne Wärmeleitung**
 —■— Temperatur des PCB —■— Temperatur des PCB
 —▲— Temperatur des Leuchtengehäuses —▲— Temperatur des Leuchtengehäuses

2.4 Grundsätze des optimalen thermischen Managements

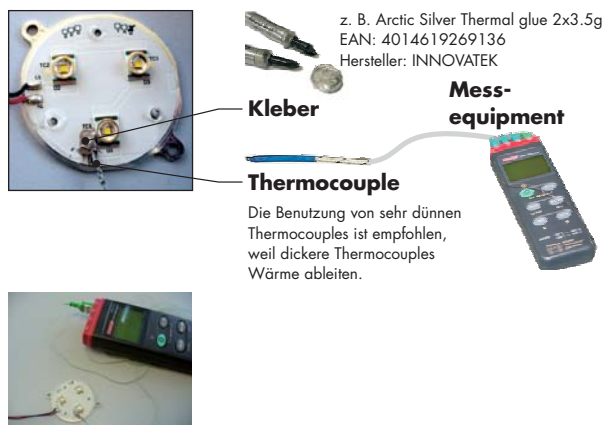
Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für eine langlebige LED-Leuchte folgende Grundsätze für das thermische Management während des Entwicklungsprozesses eingehalten werden sollten:

- LED-Leuchten sollten niemals ohne angemessene Kühlung betrieben werden.
- Benutzung von möglichst niedrigen Betriebsströmen, damit die abzuführende Wärmemenge minimalisiert wird.
- Minimierung der t_c -Temperatur des LED-Moduls durch gute Wärmeleitung im Inneren der Leuchte.
- Minimierung des Wärmewiderstands (R_{th}) von der LED-Platine zum Leuchtengehäuse durch Verwendung von gut wärmeleitenden Materialien, z. B. Aluminium.
- Luftschlüsse im Wärmepfad vermeiden, z. B. durch wärmeleitende Klebepads.
- Maximierung der Leuchtenoberfläche zum optimalen Wärmeabtransport durch Konvektion in die Umgebungsluft.
- Überprüfung des Designs durch Messung der Platinentemperatur am t_c -Punkt unter den denkbar schlechtesten Umgebungsbedingungen (bei $t_{a, max.}$ der Leuchte).

2.3 Wie überprüft man die Temperatur am t_c -Punkt?

Die thermische Messung des t_c -Punkts muss im thermisch eingewohlenen Zustand gemäß EN 60598-1 erfolgen. Dazu muss per Thermocouple oder Sensor die t_c -Temperatur des LED-Moduls in der Leuchte gemessen werden. Zusätzlich muss eine entsprechende maximale Umgebungstemperatur – z. B. in einem Ofen – simuliert werden, die dem Einbaustand entspricht.

Befestigung eines Thermocouples mit Wärmeleitkleber am t_c -Punkt des LED-Moduls



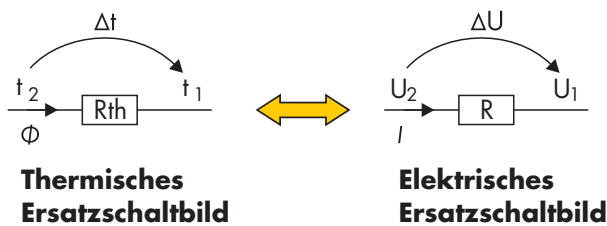
3 Weiterführende Formeln und Berechnungsbeispiele

Abschließend werden die beschriebenen Vorgänge in physikalischen Formeln zusammenfassend dargestellt und am Beispiel einer Kühlkörperberechnung angewendet.

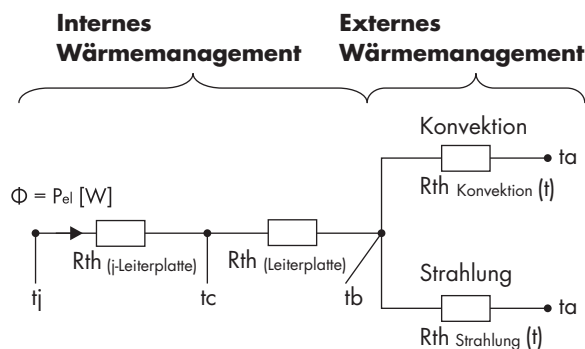
3.1 Analogie Grundstromkreis zum thermischen Netzwerk

Zur thermischen Berechnung kann die Analogie zum elektrischen Stromkreis verwendet werden. Es gelten dieselben Prinzipien zur Parallel- oder Reihenschaltung von thermischen Widerständen, wie im elektrischen Netzwerk.

Thermische Größe	Elektrische Größe
Absoluter Wärmewiderstand $R_{th} [\frac{K}{W}]$	Elektrischer Widerstand $R [\Omega]$
Temperaturdifferenz $\Delta t [K]$	Elektrische Spannung $U [V]$
Wärmestrom $\Phi [W]$	Elektrischer Strom $I [A]$
Wärmeleitfähigkeit $\lambda [\frac{W}{mK}]$	Elektrische Leitfähigkeit $\sigma [\frac{S}{m}]$



3.2 Thermisches Ersatzschaltbild einer Leuchte



- $\Phi = P_{el} =$ Wärmestrom
Zur Vereinfachung ist dieser der aufgenommenen elektrischen Leistung gleichzusetzen.
- $t_j =$ Sperrschichttemperatur der LED (Junction Temperature)
- $t_c =$ Temperatur der Platine (Casing Temperature)
- $t_b =$ Temperatur des Leuchtenkörpers oder Kühlkörpers (Body Temperature)
- $t_a =$ Umgebungstemperatur (Ambient Temperature)

- $R_{th} (j\text{-Leiterplatte}) =$ Wärmewiderstand von der Sperrschicht zur Platine
- $R_{th} (\text{Leiterplatte}) =$ Wärmewiderstand von der Platine zum Leuchtenkörper = Summe aller in diesem Pfad verwendeten Wärmewiderstände
- $R_{th \text{ Konvektion}} (t) =$ Temperaturunabhängiger Wärmewiderstand im Konvektionszweig
- $R_{th \text{ Strahlung}} (t) =$ Temperaturabhängiger Wärmewiderstand im Strahlungszweig

3.3 Wärmetransport und Wärmewiderstand

- $\Phi = \lambda \frac{A}{l} (t_2 - t_1) = \frac{\Delta t}{R_{th}}$ und somit $R_{th} = \frac{l}{\lambda A}$
- $\lambda [\frac{W}{mK}] =$ Spezifische Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffs
- $A [m^2] =$ Querschnitt des Werkstoffs
- $l [m] =$ Länge des Werkstoffs
- $t_2 [^\circ C \text{ oder } K] =$ Höhere Temperatur
- $t_1 [^\circ C \text{ oder } K] =$ Niedrigere Temperatur
- $R_{th} [\frac{K}{W}] =$ Wärmewiderstand

Typische Wärmeleitfähigkeiten üblicher Werkstoffe sind:

Material	Spezifische Wärmeleitfähigkeit $\lambda [\frac{W}{mK}]$
Kupfer	350
Aluminium	221
Silizium	148
Zinn	67
Silber	429
Luft	0,0261

3.4 Konvektion

- $\Phi = hA (t_2 - t_1) = \frac{\Delta t}{R_{th \text{ Konvektion}}}$ und somit $R_{th \text{ Konvektion}} = \frac{1}{hA}$
- $h [\frac{W}{m^2K}] =$ Wärmeübergangskoeffizient, temperaturabhängig
Typische Größenordnungen für den Wärmeübergangskoeffizienten bei Übergang Kühlkörper zu Luft sind 3,5 bis $35 \frac{W}{m^2K}$
- $A [m^2] =$ Oberfläche
- $t_2 [^\circ C \text{ oder } K] =$ Höhere Temperatur
- $t_1 [^\circ C \text{ oder } K] =$ Niedrigere Temperatur

3.5 Wärmestrahlung

$$\Phi = \sigma \epsilon A (t_2^4 - t_1^4)$$

Eine Vereinfachung in die Form $\Phi = \frac{\Delta t}{R_{th\text{Strahlung}}}$ ist auf Grund der 4. Potenz der Temperatur nicht möglich. Mit höheren Temperaturen verringert sich der Wärmewiderstand im Strahlungsweig und mehr Wärme wird über Strahlung abgegeben.

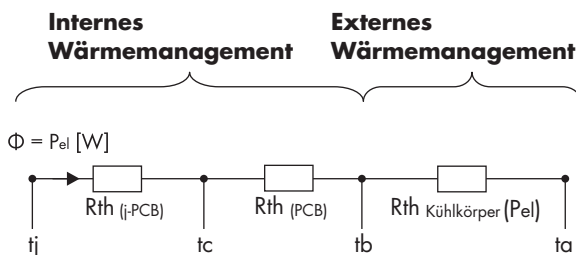
- σ = Stefan-Boltzmann-Konstante = $5,610 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2K^4}$
- ϵ = Emissionskoeffizient = Faktor zwischen 0 und 1, je nach Oberflächenbeschaffenheit des Kühlkörpers

Beispiele für Emissionskoeffizienten ϵ	
Aluminium, poliert	0,038
Aluminium, unbehandelt	0,09
Aluminium, eloxiert	0,8
Eisenguss, poliert	0,21
Normalstahl / Edelstahl	0,2
Kupfer, poliert	0,04
Keramik, grau	0,9
Mattschwarz lackierte Oberfläche	0,97

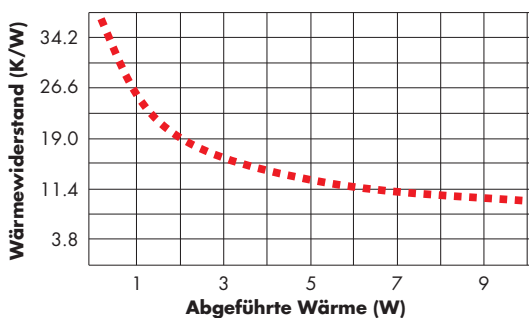
- $A [m^2]$ = Oberfläche
- $t_2 [^\circ C \text{ oder } K]$ = Temperatur der Wärmequelle
- $t_1 [^\circ C \text{ oder } K]$ = Umgebungstemperatur

3.6 Wärmewiderstände von Kühlkörpern

Weil die per Konvektion und Strahlung abgeführte Wärme abhängig von der Temperatur des Körpers ist, fassen die Kühlkörperhersteller den R_{th} ihrer Kühlkörper zu einer R_{th} -Angabe in Abhängigkeit von der abzuführenden Leistung zusammen. Meist wird dies in Form eines Diagramms angegeben. Das vereinfacht die Kühldimensionierung erheblich, da das Ersatzschaltbild zu einer Reihenschaltung zusammengefasst werden kann. Je niedriger der R_{th} eines Kühlkörpers ist, desto besser leitet er die Wärme ab.



Beispiel einer R_{th} -Kurve für einen Kühlkörper:



3.7 Beispiel für die Dimensionierung eines Kühlkörpers

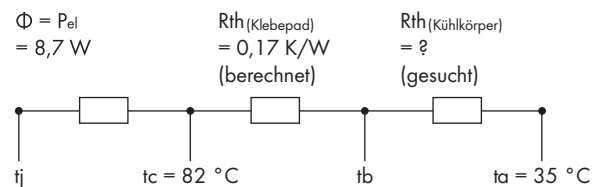
An einer Beispielrechnung soll die Dimensionierung eines Kühlkörpers in einer einfachen Anwendung demonstriert werden.

Es soll der passende Kühlkörper für den Betrieb des VS-TriplePowerEmitters XRE in Kaltweiß ermittelt werden. Dabei soll der TriplePowerEmitter mit 700 mA betrieben werden und die Lebensdauer sollte mindestens 40.000 Stunden sein. Der TriplePowerEmitter wird auf den entsprechenden Kühlkörper per Klebepad aufgebracht und in freier Luftkonvektion bei max. $t_a = 35^\circ C$ betrieben. Es wird kein Gehäuse verwendet.

Ausgangsdaten:

- $\Phi = P_{el}$ max. bei 700 mA = 8,7 W (Datenblattangabe)
- Ziel- t_c -Temperatur für die angestrebten 40.000 Stunden: $t_c = 82^\circ C$
- Umgebungstemperatur max. $t_a = 35^\circ C$

Ersatzschaltbild:



Kalkulation:

$$\Phi = \frac{\Delta t}{R_{th}} \text{ und somit } R_{th} = \frac{\Delta t}{\Phi}$$

Die Temperaturdifferenz Δt ergibt sich aus $t_c - t_a$.

Die abzuführende Wärmemenge Φ ist bekannt.

Zwischen t_a und t_c sind zwei Wärmewiderstände in Reihe geschaltet $R_{th} = R_{th(Klebe-pad)} + R_{th(Kühlkörper)}$.

Der Wärmewiderstand des Klebepads kann aus der Geometrie des Artikels berechnet werden (Angaben siehe Datenblatt):

$$\lambda = 0,8 \frac{W}{mK}, \text{ Durchmesser } \varnothing 43 \text{ mm, Dicke } l = 0,20 \text{ mm}$$

$$\text{und somit } R_{th(Klebe-pad)} = \frac{l}{\lambda A} = \frac{4l}{\lambda \pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,0002m}{0,8 \frac{W}{mK} \cdot \pi \cdot (0,043m)^2} = 0,17 \frac{K}{W}$$

Somit ergibt sich für den benötigten Kühlkörper:

$$R_{th(Kühlkörper)} = \frac{(t_c - t_a)}{\Phi} - R_{th(Klebe-pad)} = \frac{82^\circ C - 35^\circ C}{8,7W} - 0,17 \frac{K}{W}$$

$$= 5,40 \frac{K}{W} - 0,17 \frac{K}{W} = 5,23 \frac{K}{W}$$

Damit sich die t_c -Temperatur bei einer Umgebungstemperatur von $35^\circ C$ nicht auf mehr als auf $82^\circ C$ erhöht, benötigt man einen Kühlkörper der einen Wärmewiderstand von $5,23 K/W$ bei einer Leistungsaufnahme von $8,7 W$ hat.