

LED – Entwärmung und thermisches Management



Die geeignete und sichere Entwärmung bei LEDs ist die Voraussetzung für deren einwandfreie und langlebige Funktion.

Die Verwendung von LED begann, nachdem ab dem Jahre 1957 die Erforschung der Lichterzeugung bei Halbleitermaterialien im sichtbaren Bereich der Lichtemission, zu brauchbaren Ergebnissen führte.

Die ersten kommerziellen Lumineszenzdioden (rote GaAsP) die 1962 angeboten wurden, waren der erste Schritt einer langen Entwicklungsgeschichte bis zu den heutigen Hochleistungs-LEDs.

Anders als die Lichterzeugung mittels Glühlampe, Gasentladungslampe, etc., ist der LED - Beleuchtungskörper ein Halbleiterbauteil !

Daher wurden LEDs ursprünglich als zuverlässige und langlebige Leuchtindikatoren (Anzeigelämpchen) verwendet; jedoch führte in den letzten 3 Jahren der technische Fortschritt zu einer bedeutenden Verwendung der LEDs als Beleuchtungseinrichtung. Diese neue Lichttechnik ergibt neue Möglichkeiten der Verwendung von Beleuchtungskonzepten, hat aber als Herausforderung die Betrachtung der thermischen Problematik beim Einsatz dieser Halbleiter-LEDs

Die künstliche Lichterzeugung erfolgt durch zwei gänzlich unterschiedliche Arten: thermische Strahler und Lumineszenzstrahler. Thermische Strahler sind z.B. Glühlampen, bei denen elektrische Energie in Strahlungsenergie umgewandelt wird, wobei ca. 5...7% der eingesetzten Energie im sichtbaren Lichtspektrum abgestrahlt werden und die restliche Energie als infrarote Wärmestrahlung für Beleuchtungszwecke nicht nutzbar ist. Lumineszenzstrahler wie z.B. Gasentladungslampen, Leuchtstofflampen etc. übertragen dagegen die elektromagnetische Strahlung durch Photonen, deren Energie sie zwar durch thermische Prozesse als Gitterschwingung erhalten können, aber auch chemische und elektrische Prozesse können als nichtthermische Funktion sog. „kaltes Licht“ abgeben. Zu diesen Lumineszenzstrahlern zählt auch die LED, die „Light Emitting Diode“ oder Leuchtdiode, mit der Funktion der direkten Lichtumwandlung des elektrischen Stromes durch einen Halbleiter

Energieeinsatz und Lichtmenge

Für die gleiche Lichtmenge verbrauchen LEDs deutlich weniger Energie als andere Leuchtmittel, sie erzeugen kaum Wärme in Richtung der Lichtabstrahlung (fast keine Infrarotstrahlung). LEDs sind unempfindlich gegenüber mechanischen Erschütterungen, haben dadurch eine sehr lange Lebensdauer, und erreichen hohe Schaltleistungen.

Wie aus der Benennung ersichtlich, ist die LED halbleitertechnisch eine Diode. Vereinfacht dargestellt, bilden zwei Halbleiterzonen unterschiedlicher Ladungsart, einen sog. pn-Übergang, wobei durch Anlegen einer elektrischen Spannung in Durchlaßrichtung der Diode, über halbleiterphysikalische Vorgänge der Elektronenwanderung und Rekombination, Photonaussendung erfolgt.

Die Farbe und Effizienz der LED kann über die chemische Zusammensetzung und Dotierung des Halbleitermaterials eingestellt werden, jedoch sollen die optischen Zusammenhänge hier nicht dargelegt werden. Die Abhängigkeit der Leuchtdichte, des Lichtstromes, der Lichtleistung allgemein, ist verknüpft mit der Größe des Vorwärtsstromes; und dieser beeinflusst durch die entstehenden Temperaturen maßgeblich Funktion und Lebensdauer der Halbleitersperrschicht, und damit der LED.

Wie bekannt, hängt die Lebensdauer einer LED sowohl vom verwendeten Halbleitermaterial, als auch besonders von der Strom-Wärme Relation ab. LED werden nach und nach schwächer in ihrer Lichtleistung und nach Erreichen der Hälfte des Anfangswertes ist die LED Lebensdauer per definitionem erreicht.

Lebensdauer von einigen hundert, bis zu 100.000 Stunden sind möglich, immer jedoch unter der Berücksichtigung der Vermeidung hoher Temperaturen, welche die Lebensdauer drastisch reduzieren.

Die Strahlungsleistung, der Lichtstrom einer LED, ist stark abhängig von der Temperatur des Halbleiters, d.h. die Effizienz der LED lässt mit höherer Temperatur deutlich nach.

Auch wenn von der LED als „kaltem Strahler“ gesprochen wird, in der LED wird nicht die gesamte elektrische Energie in Lichtleistung umgewandelt. Auch hier wird, wie bei anderen Halbleitern, ein großer Teil der elektrischen Energie in Wärme umgewandelt, weshalb anders als bei thermischen Strahlern (Glühlampe), ein thermisches Management (Entwärmung), unbedingt erforderlich ist.

Der Wirkungsgrad, die Effizienz der LED ist das Verhältnis von abgestrahltem Lichtstrom zu eingesetzter elektrischer Energie, und hat als Einheit Lumen per Watt [lm/W].

All die wunderbaren Eigenschaften der weiß strahlenden Hochleistungs-LEDs, und dadurch neuen Möglichkeiten einer modernen Lichttechnik, funktionieren jedoch nur dann einwandfrei und langlebig, wenn die wärmetechnischen Randbedingungen eingehalten werden.

Unterschiedliche Bauformen von Leuchtdioden, jeweils dem Verwendungszweck angepaßt, sind auf dem Markt erhältlich. Bedrahtete LED als Anzeigeelement, SMT-Bauformen im PLCC-Gehäuse, hexagonale und oktagonale Typen mit diversen Herstellerbezeichnungen, und besonders die COB (Chip on Board) Ausführungen, bei der die LEDs direkt auf die Leiterkarte gelötet werden.

Für Beleuchtungszwecke wird ein möglichst hoher Lichtstrom der Hochleistungs-LED gewünscht, halbleitertechnische Konzepte, neue Bauformen, Mehrfachchips in einem Gehäuse usw., erfordern allerdings ein optimales Wärmemanagement.

Thermische Zusammenhänge

Die Umgebungs- und damit die Chiptemperatur beeinflussen direkt die Effizienz und die Lebensdauer der LED. Halbleiter-LED verändern über die Zeit Ihre Emissionseigenschaften - die Intensität der Lichtausbeute nimmt kontinuierlich ab. Dieses Verhalten wird als Alterung, bzw. als Degradation bezeichnet, und steht im Zusammenhang mit der Ausweitung und Vergrößerung von Störstellen im Chip (Halbleiterristall).

Ein zu hoher Lichtstrom, durch erhöhten elektrischen Strom, erhöht auch die Temperatur in der LED, und ebenso verkürzen starke Temperaturschwankungen die Lebensdauer erheblich. Auch die für Kapselung und Linsenformung verwendeten Kunststoffe in der LED unterliegen der Alterung und somit Trübung.

Temperaturabhängige Fehlfunktionen

Die Umgebungstemperatur und die Selbsterwärmung durch elektrischen Stromfluß beeinflussen die Chiptemperatur, und auch der Einfluss auf die Lichtausbeute, die Lichtfarbe und die Vorwärtsspannung korreliert unmittelbar mit der Chiptemperatur der LED.

Der Lichtstrom (Φ) als Funktion der Temperatur ist zu berechnen nach:

$$\Phi_V(T_j) = \Phi_V(T_2)e^{-k\Delta T_j} \quad (\text{Formel 1})$$

$$\Phi_V(T_1) = \Phi_V(T_2) e^{-k\Delta T_j}$$

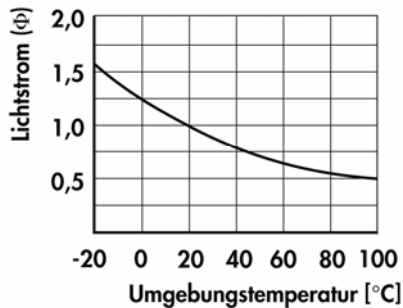
T₁ = Lichtstrom bei T_j 1

T₂ = Lichtstrom bei T_j 2

k = Temperaturkoeffizient

ΔT_j = Änderung der Temperatur T_j (T₂-T₁)

Die Degradation als Funktion des Temperaturanstieges ist beispielhaft in Diagramm1 angegeben:



Lichtstrom vs Umgebungstemperatur
für rote LED bei konstantem Strom
(nach Unterlagen der Fa. Lumileds)

Die Kurve zeigt, daß eine Temperaturerhöhung von 25°C auf 75°C den Lichtstrom um annähernd die Hälfte reduziert.

Die Glasübergangstemperatur der Die-Kapselung, d.h. der Übergang vom hart-festen zu einem weicheren Zustand, hat temperaturbedingt einen großen Einfluss auf die LED. Eine Veränderung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Materialien ist grundsätzlich mit einer Gehäusetemperaturerhöhung einhergehend. Um hier Ausfälle zu vermeiden, ist stets darauf zu achten, daß die Junction-Temperatur T_j nicht höher wird als die Gehäusetemperatur.

Die in der Wärmetechnik bekannten Abhängigkeiten und die Betrachtung des Thermal Management führen zu den Temperatur-Verlustleistungszusammenhängen mit Berechnung des Wärmewiderstandes nach der Formel:

$$R_{thja} = \frac{T_j - T_a}{P}$$

$$= \frac{(\Delta T_j + T_a) - T_a}{P} = \frac{\Delta T_j}{P}$$

Wobei : $T_j = \Delta T_j + T_a$

R_{thja} = Wärmewiderstand junction / ambient
 T_j = Junction Temperatur (Sperrschichttemperatur)
 T_a = Umgebungstemperatur (ambient)
 P = Gesamtleistung der LED ($I_f * V_f$)

Der in der Praxis relevante Wert der Junction-Temperatur errechnet sich nach:

$$T_j = R_{thja} * P + T_a$$

Wärmemanagement

Die wärmetechnisch optimale Auslegung für eine sichere Entwärmung ist äußerst komplex, da der Aufbau einer LED und die Berücksichtigung aller relevanten Wärmewiderstände, als Summation der einzelnen Wärmewiderstände der Materialien und Übergänge, zu berücksichtigen ist. Ca. 5 ...10 % der LED Leistung werden direkt in Licht konvertiert, die restliche Leistung, als Verlustwärme, muss beim Betrieb der LED von den Komponenten im System abgeleitet, und an die Umgebung (Luft) abgegeben werden. Das geschieht besonders einfach durch eine künstliche Oberflächenvergrößerung der LED-Montagekontaktzone.

Für die Entwärmung der LED sind drei Möglichkeiten vorhanden, über das Leuchtengehäuse, die Leiterkarte und mittels Kühlkörper, zusätzlich auf der Leiterkarte oder auch separat.

Der Entwärmungspfad über das Leuchtengehäuse besteht aus zwei Teilpfaden, dem des Junction zu den Anschlussbeinchen und dem zum Lampengehäuse, das ist Anschlussbeinchen zur Umgebungsluft. Diese erbringen nur minimale Wärmeableitung, und damit ist besonders für Hochleistungs-LEDs die sichere Funktion nicht gegeben.

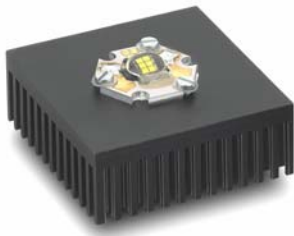
Eine weitere Entwärmungsform ist dann eine Wärmeableitung über die Leiterkarte auf der die LEDs montiert sind. (falls vorgesehen) Hier gibt es vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten für den Anwender. Bei sehr geringen Wärmemengen ist ein einfaches FR4 Leiterkartenmaterial mit zusätzlicher, aufgedruckter Wärmeleitpaste zur besseren Wärmeübertragung, in seltenen Fällen vielleicht noch ausreichend, bei größeren Wärmemengen kommen dann spezielle Leiterkartenbauformen zur Anwendung, da FR4 keine besonders gute Wärmeleitfähigkeit besitzt.

Als Leiterkartentyp für LED Entwärmung wird häufig die Metal-Core Leiterkarte verwendet. Eine Basisplatte aus Aluminium kann die Wärme,

die von den LEDs über „Thermal Vias“ (Kupfer -Durchkontaktierungen) an diese Aluminiumplatte weitergeleitet wird, von dort direkt, oder über zusätzlich montierte Kühlkörper, an die Umgebungsluft ableiten. Neben den starren Leiterkarten funktioniert das in gleicher Weise für flexible PCB aus PET, PEN, PI etc., denn auch hier besteht die Möglichkeit einen Aluminium-Wärmespreizbereich und auch Kühlkörper, z.B. aufzukleben.

Für LED-Anwendungen mit hohen Leistungen ist die Entwärmung mittels Kühlkörper unerlässlich. Dazu sind unterschiedliche Ansätze der Kühlkörpergestaltung vorhanden.

Die Verwendung von Kühlkörpern für freie Konvektion ist bereits heute ein probates Konzept zur Entwärmung von Hochleistungs - (Power-) LEDs. Hierzu werden die zu entwärmenden LEDs, auf dem ausgewählten Kühlkörper montiert.

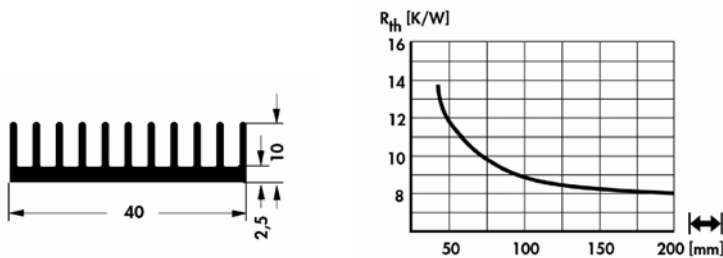


Auswahl geeigneter Kühlkörper

Nach Aufstellung der thermischen Kriterien (es sollten immer auch die Unterlagen und Hinweise der LED Herstellerfirmen beachtet werden), der Berechnung des Wärmewiderstandes und unter Berücksichtigung der Einbausituation, und des zur Verfügung stehenden Platzes / Raumes, erfolgt die Auswahl eines geeignete Kühlkörpers.

Besondere Berücksichtigung sollte die Orientierung des Kühlkörpers im Raum erhalten. Kammprofile sollten so montiert werden, dass der natürliche, konvektive Auftrieb nicht behindert wird, bei aktiver Entwärmung ist auf eine möglichst barrierefreie Luftzufuhr und Luftabfuhr zu achten.

Die Anbieter der Kühlkörper für LEDs, geben in Ihren Diagrammen die Wärmewiderstandswerte in Abhängigkeit von der Größe des Kühlkörpers an.



Mittels der Daten des zuvor errechneten Wärmewiderstandes, kann der Anwender nun in den Diagrammen der Kühlkörperhersteller, den zu erreichenden Wert ablesen, und eine Auswahl der für die spezifische Applikation geeigneten Kühlkörper treffen.

Für die stetig steigende Nachfrage nach LED - Kühlkörpern werden speziell abgestimmte Konzepte entwickelt. Neben vielen Standardkühlkörpern die für LED Entwärmung einsetzbar sind, werden auch besonders für LED modifizierte Kühlkörpervarianten und speziell auf einzelne LED Systeme abgestimmte Versionen angeboten.

Für eine zusätzliche Wärmespreizung gibt es die Möglichkeit der Kupferbeschichtung des Kühlkörperbodens, wobei diese Kupferfläche auch lötfähig sein kann und eine direkte Lötmontage der LED auf dem Kühlkörper ermöglicht.

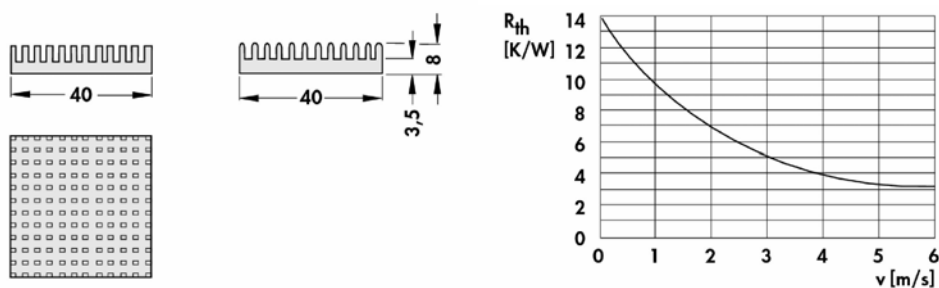


Die Leistungsfähigkeit der Entwärmung ist mit der Verwendung von bewegter Luft weiter zu steigern. Ein Kühlkörper mit Ventilator erreicht je nach Applikation, nochmals eine Verbesserung der Wärmeableitung um

ca 40%. Die dazu verwendeten Kühlkörper sind speziell auf die gute Wärmeableitung mittels bewegter Luft ausgelegt. Die aktive Entwärmung ist allerdings nicht geräuschlos, Lüftermotoren und Luftbewegung erzeugen Schallwellen, die bei etlichen Anwendungen, z.B. Haushaltsbeleuchtung, Konzertsäle, Institutsräume etc., nicht erwünscht sind.

Weitere positive Aspekte der Lüfterkühlung sind neben der niedrigeren Gesamttemperatur auch geringere Verschmutzung (Staubablagerungen), und besonders eine gleichförmigere Wärmeverteilung bei häufigerem Ein- Ausschalten.

Für die Auswahl des passenden Kühlkörpers mit bewegter Luft, sind die entsprechenden Wärmewiderstandsdiagramme in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit gegeben und helfen auch hier bei der Bestimmung der geeigneten Wärmesenke.



Andere Entwärmungsmöglichkeiten für sehr große Wärmemengen bei LED Anwendungen sind z.B. noch: Thermoelektrik-Kühlung (Peltier-Element) oder auch Flüssigkeitskühlung (Mikrokanal etc) deren Verwendung jedoch nur marginal ist, da sehr aufwendig und teuer.

Montage der LEDs

Besondere Aufmerksamkeit und Sorgfalt ist auf die Anbindung der LED an die Wärmesenke zu richten, da bei einem schlechten Wärmeübergang von der LED zum Kühlkörper, die Wärmeleitung, der Wärmedurchgang, reduziert und die LED Temperatur deutlich erhöht wird. Dadurch kann die Funktion und Lichtleistung der LED eingeschränkt werden und auch ein Temperaturanstieg bis zur Zerstörung ist möglich.

Der bestmögliche Übergang zwischen LED-Bauteil und Kühlkörper ist nur dann zu erreichen, wenn die durch Fertigungsprozesse unvermeidlichen Toleranzen, Unebenheiten und Rauigkeiten der zu verbindenden Oberflächen egalisiert werden, und Lufteinschlüsse, die den Wärmetransport behindern, vermieden werden.

Besonders bei einer mechanischen Befestigung der LED mittels Schrauben, ist die Verwendung von Wärmeleitpaste, die zum verbesserten Wärmeübergang führt, notwendig und anzuraten. Bei einer klebtechnischen Befestigung mittels doppelseitigem Klebeband, oder auch 2-Komponenten Epoxydharz Wärmeleitkleber, sind die Unebenheiten gleichermaßen egalisiert. Bei der Verwendung von Klebstoffen ist jedoch unbedingt darauf zu achten, dass keine oder nur wenige flüchtige organische Verbindungen ausdünsten, die sich evtl. auf der LED Oberfläche niederschlagen könnten, und dann zu einer Trübung der Kunststoffabdeckung / Linse führen.

Ein sehr guter thermischer Übergang zum Kühlkörper etc. ist zu erzielen, wenn für etliche geeignete Bauformen der LEDs, eine löstechnische Montageverbindung mittels Reflow- oder IR-Löten erfolgt.

Grundsätzlich ist auch bei allen Montagearten zu beachten, dass keine, den LEDs benachbarte oder beigefügte elektronische, wärmeemittierende Bauteile, Widerstände, Transistoren etc., die Wärmeableitung behindern, oder sogar noch zusätzliche Wärme in das System einkoppeln.

LEDs für Beleuchtung

Die Beleuchtungs-LEDs sind aufgrund Ihrer geringen mechanischen Abmessungen und Stabilität, ihrer hohen Effizienz und langen Lebensdauer in vielen Bereichen einsetzbar.

Eine Lichtabstrahlung ohne IR- und UV- Anteil, prädestiniert LEDs für Anwendungen im Medizinbereich und überall dort, wo lichtempfindliche Gegenstände beleuchtet werden müssen (Museen, Galerien). Gegenüber Stoß, Schock und Vibration ist die relative Unempfindlichkeit der LEDs ein bedeutender Faktor bei der Verwendung in der Fahrzeugtechnik, vom Automobil, über Fahrräder bis zur Bahn-, Schiff- und Luftfahrttechnik.

Vorzugsweise bei wenig benutzten Anlagen (Signalleuchten), oder schwer zugänglichen (explosionsgefährdete Bereiche), und auch wartungsintensiven Anlagen (Straßen- und andere Signalleuchten) ist die Langlebigkeit von großem Vorteil. Zu diesen vielen technischen Vorteilen kommen noch hinzu die Umwelt- und Kostenvorteile, LEDs

enthalten keine umweltgefährdenden Stoffe und sind im Betrieb sehr energieeffizient. Nicht zuletzt sind es neue und vielfältige Designfreiheiten für Beleuchtungszwecke, die interessante Lösungen bieten, die mit den bislang verfügbaren Leuchtmitteln nicht realisierbar waren.

Möglichkeiten / Trends

Die in den 60er Jahren möglichen Leuchtdichten bei LEDs von $<0,1$ [lm/W] sind bis heute zu Standards von >100 [lm/W] geworden. Die weitere technische Entwicklung von Hochleistungs-LED in Richtung besserer Wirkungsgrad, höherer Lichtausbeute und höherer Lichtstrom erlaubt sicher noch in 2007 die Verwendung von LED Leuchten die mit >150 [lm/W] auch Leuchtstofflampen ersetzen können.

Namhafte Hersteller haben eine 1000 Lumen, ca 75 [lm/W] LED entwickelt die, in Ihrer Leuchtdichte einer 50 W Halogenlampe mit ca. 900 lm entspricht.

Eine nochmalige Steigerung der Lichtleistung um ca 40% ist eine weiße 3W, SMT-LED mit 160 [lm/W] die am Markt verfügbar ist, und für mobile Anwendungen hervorragend geeignet ist.

Da die bisherigen LED mit Gleichspannung betrieben werden müssen, werden spezielle Treiberschaltungs-IC und neuartige Ansteuerschaltungen für die Regelung PWM (**PulsWeitenModulation**) von LED mit hohen Stromdichten benötigt, allerdings gibt es erste Angebote von Wechselspannungsleuchtdioden die ohne externe Beschaltung direkt an das Haushaltsstromnetz (Steckdose) angeschlossen werden können (AC- (rich) - Technologie) und eine Lebensdauer von 30.000 Std. erreichen sollen. Auch die Stromeinsparung ist enorm, 60-80% gegenüber Leuchtstoff- und Glühlampe.

Als universelle Lichtquelle für jegliche Art der Beleuchtungsanwendung wird sich die LED in der Zukunft als das bestgeeignete Leuchtmittel am Markt etablieren. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Einbaubedingungen wird für sehr viele Anwendungsfälle ein Kühlkörper notwendig sein. Das geeignete thermische Management wird dabei die schnelle Entwicklung unterstützen, und eine gute, langlebige und einwandfreie Funktion der LED garantieren.