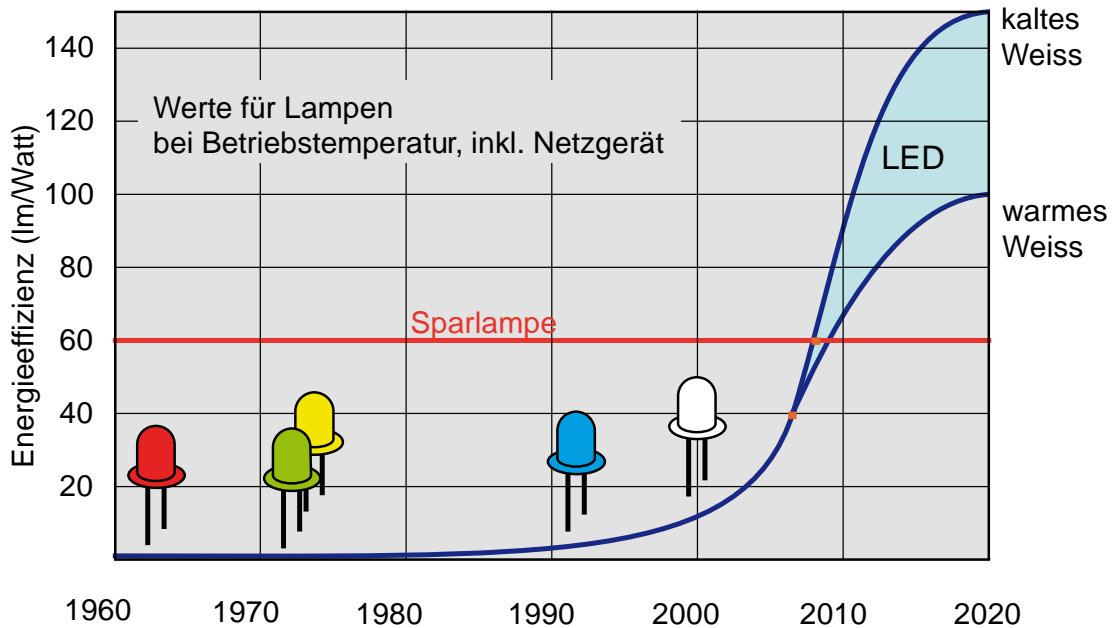




Schlussbericht 1. September 2009

Qualitätsmerkmale der LED-Beleuchtung

Aktueller Stand der Technik, Vorteile,
Problempunkte und Entwicklungspotential



Autor:

Stefan Gasser, eteam GmbH, stefan.gasser@eteam.ch

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien & -anwendungen
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

etteam GmbH
Schaffhauserstrasse 34
CH-8006 Zürich
www.etteam.ch

BFE-Bereichsleiter: Dr. Michael Moser

BFE-Programmleiter: Roland Brüniger

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 153721 / 102901

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	4
1.1	Résumé	4
1.2	Abstract	5
2	Vorgehen	6
2.1	Zielsetzung	6
2.2	Projektablauf	6
2.3	Experten	7
2.4	Auswahl von Fragen zur aktuellen LED-Technologie	7
3	Grundlagen zur LED-Beleuchtung	8
3.1	Physik	8
3.2	Entwicklung	9
3.3	Drei Produktionsschritte: Komponenten, Module und Lampen	10
4	Qualitätskriterien	12
4.1	Überblick	12
4.2	Premium-Kriterien	13
4.3	Schlüsselkriterium «Energieeffizienz»	14
4.4	Schlüsselkriterium «Farbwiedergabe»	16
4.5	Schlüsselkriterium «Lebensdauer»	19
4.6	Weitere Kriterien	21
4.7	LED im Vergleich zu herkömmlichen Leuchtmitteln	22
5	Aktuelle Produkte	23
5.1	Retrofit Spotlampen	23
5.2	Retrofit Classic Lampen	24
5.3	Lese- und Arbeitsleuchten	25
5.4	Downlights und Strahler	26
5.5	Weitere Produkte	27
5.6	Wirtschaftlichkeit (Beispiel Retrofit)	28
6	Handlungsmöglichkeiten für das BFE und Dritte	29
7	Anhang	30
7.1	Hersteller Deklaration von LED-Modulen	30
7.2	EUP-Verordnung und Deklarationspflicht	33
7.3	Messreihe LED-Lampen HTW Chur	34
7.4	Messungen neuer LED Spots der Firma Megaman	36

1 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht dokumentiert den Stand der LED-Technologie für die Raumbelichtung im Juni 2009 auf der Basis von Internetrecherchen, Befragungen von Fachleuten, sowie einem Experten-Workshop. Von den 20 eruierten LED-Qualitätskriterien ergeben sich drei Schlüsselkriterien, die für den Durchbruch der LED-Technologie entscheidend sind:

- Energieeffizienz: Die aktuell angebotenen LED-Lampen erreichen im Betrieb Werte zwischen 50 und 70 Lumen pro Watt; damit liegt die LED im Bereich der heutigen Sparlampen. Experten rechnen in den nächsten fünf Jahren mit einer Verdoppelung der Lichtausbeute. Die Deklaration ist oft mangelhaft; statt der vom Käufer erwarteten Effizienz im realen Betrieb werden häufig unrealistische Laborwerte oder sogar Fantasiazahlen angegeben.
- Lichtqualität: Gute LEDs erreichen heute Farbwiedergabeeigenschaften, die nahe bei der Halogenbeleuchtung liegen und den Sparlampen meist überlegen sind (Farbwiedergabeindex 80 bis 90, kontinuierliches Lichtspektrum).
- Lebensdauer: Werte von bis zu 50'000 Stunden können nur erreicht werden, wenn die Wärmeabgabe sichergestellt ist und die Qualität des benötigten Betriebsgerätes mit der Lebensdauer der LED mithalten kann. Auf dem Markt werden zurzeit viele LED-Produkte angeboten, die nach Meinung der Experten diese zwei Bedingungen nicht erfüllen können.

Grosse Unsicherheit verursacht die uneinheitliche Deklaration und die teilweise fehlende Normierung; in den USA ist man mit dem ANSI-Standard bereits fortgeschrittener als in Europa. Zum heutigen Zeitpunkt ist die LED-Beleuchtung dort attraktiv und wirtschaftlich, wo sie ihre einzigartigen Vorteile ausspielen kann: gerichtetes Licht, sehr lange Lebensdauer, keine Wärme im Lichtstrom, ultraviolettrees Licht, Farbmodulation, verlustarme Dimmung. Aktuell interessante Anwendungen:

- Professioneller Bereich: Betriebszeiten > 3'000 Stunden pro Jahr, z.B. Beleuchtungen im Verkauf oder Downlights in Korridoren (Hotel, Verwaltung, Spital, etc.). Ferner Strahler in Museen, Tischarbeitsleuchten, hybride Lösungen (z.B. indirekt Leuchtstofflampe, direkt LED)
- Haushaltbereich: Arbeits- und Leseleuchten (kleine Lichtmenge, keine Wärmestrahlung, Sofortstart, brillantes Licht).
- Strassenbeleuchtung: Für eine Grosszahl der Anwendungen bereits heute die beste Lösung (sehr genaue Ausleuchtung der Fahr- und Fusswege ohne Streulicht, weniger Licht nötig dank besserer Farbwiedergabe)Der vorliegende Bericht dokumentiert den Stand der LED-Technologie für die Raumbelichtung im Juni 2009 auf der Basis von Internetrecherchen, Befragungen von Fachleuchten, sowie einem Experten-Workshop.

1.1 Résumé

Le présent rapport décrit l'état de la technologie LED pour l'éclairage intérieur au mois de juin 2009 ; il se base sur des enquêtes web, des entretiens avec des spécialistes ainsi que d'une table ronde d'experts. Dans la liste établie pour 20 critères de qualités des LED, trois critères clés s'avèrent décisifs pour la percée de la technologie LED.

- Efficacité énergétique: En fonctionnement réel, les lampes LED disponibles sur le marché atteignent 50 à 70 lumens par watt ; leur efficacité est donc comparable à celle des lampes économiques. Les experts s'attendent à un doublement du rendement lumineux dans les cinq ans à venir. La déclaration s'avère souvent erronée ou insuffisante. Au lieu de l'indication de l'efficacité en fonctionnement réel attendue par les clients, on trouve souvent des valeurs peu réalistes de laboratoire ou même des indications purement fantaisistes.
- Qualité de la lumière: Des LED de qualité atteignent aujourd'hui des caractéristiques de rendu des couleurs proche de celles des lampes halogènes et elles dépassent le plus souvent celles des lampes économiques. (Indice du rendu des couleurs 80 à 90, spectre lumineux continu).

- Durée de vie: Des valeurs jusqu'à 50'000 heures ne sont atteignables que si le dégagement de la chaleur est assuré et si la qualité de l'appareil d'exploitation atteint une durée de vie équivalente au LED. De l'avis des experts, de nombreux produits LED actuellement mis en vente ne remplissent pas ces deux conditions.

La déclaration hétéroclite et le manque partiel de normes causent une grande incertitude. Aux Etats-Unis, l'introduction du standard ANSI est plus avancé qu'en Europe. A ce moment, l'éclairage par LED est attractif et économique dans les domaines où il arrive à faire profiter de ses avantages uniques: lumière directionnelle, très longue durée de vie, pas de réchauffement du faisceau lumineux, pas d'émission de rayons ultra-violet, variations des couleurs, variateurs à faibles pertes. Les applications actuellement intéressantes:

- Domaine professionnel: Durée de fonctionnement > 3'000 heures par an, p.ex. éclairage commercial, plafonniers encastrés (downlights) de couloir (hôtel, administration, hôpital, etc.). En plus, projecteurs dans des musées, luminaires de bureau, solutions hybrides (p.ex. lampe fluocompacte indirecte, LED pour lumière directionnelle)
- Eclairage domestique: Luminaire de travail/de lecture (petite quantité de lumière, pas de radiation thermique, démarrage immédiat, lumière brillante).
- Eclairage public: Meilleure solution pour de nombreuses applications (éclairage très précis des chaussées et chemins sans lumière dispersée, moins de puissance d'éclairage nécessaire grâce au meilleur rendu des couleurs) Ce rapport documente l'état de la technologie LED pour l'éclairage en Juin 2009 sur la base de recherches Internet, des entrevues et une workshop avec des experts.

1.2 Abstract

The present report describes the state-of-the-art of LED technology for room lighting in June 2009, based on internet research, expert interviews as well as a workshop with experts. Of the 20 attributes determined, three key quality characteristics crucial for the breakthrough of LED technology were identified:

- Energy efficiency: with values of 50 – 70 Lumen/Watt when in usage, current LED lamps on the market are comparable to energy saving lamps. Experts expect the luminous efficiency to double within the next five years. Declaration is often poor: instead of efficiency in real-life usage many producers declare unrealistic lab measurement results; sometimes even fantasy values are declared.
- Light quality: Today's good LEDs reach colour rendering attributes which are comparable to those of halogen lamps and usually better than the CFL's (colour rendering index 80 to 90, with a continuous light spectrum).
- Lamp life: A lamp life of up to 50'000 hours can only be reached if the heat dissipation is secured and if the Control gears quality keeps up with the LED's life time. According to the experts, many of today's LED products on the market don't meet these two requirements.

Strong uncertainty is caused by inconsistent declaration and partly missing standardisation. With the ANSI standard, the US is ahead of Europe in this matter. Today LED lighting is attractive and economic where its unique advantages can be applied: directional light, very long life-span, no heat in the luminous flux, UV-free light, colour modulation, dimming with little losses. Interesting applications today include:

- Professional field: operating time > 3'000 hours per year, e.g. shop illumination or downlights in a hall (hotel, administration, etc.). Further spotlights in museums, working place table light fixtures, hybrid solutions (e.g. indirect fluorescent lamp, direct LED).
- Domestic field: working place and reading lamps (low luminance, no heat radiation, instant start up, brilliant light).
- Street lighting: Today LED already is the best solution for a high number of applications (highly precise illumination of streets and walkways without diffused light, less light necessary thanks to better colour rendering).

2 Vorgehen

2.1 Zielsetzung

Mit der Entwicklung der weissen LED (Licht emittierende Diode) steht eine neue Technologie zur effizienten Raumbelichtung zur Verfügung. Doch Markt und Entwicklung sind sehr unübersichtlich, Qualitätsstandards kaum vorhanden. Neben Produkten, die ein hohes Potential versprechen, findet man sehr viel Unbrauchbares. Konsumenten aller Kategorien (vom Leuchtenentwickler zum Einkäufer bis zum Endkonsumenten) sind überfordert, das Risiko eines Fehlkaufes ist – auch angesichts der rasanten Entwicklung – gross.

Das Projekt «Qualitätsmerkmale der LED-Beleuchtung» hat eine systematische Aufarbeitung der offenen Fragen im Zusammenhang mit LED-Anwendungen für Raumbelichtung (nicht farbige LEDs zu Dekorationszwecken) zum Ziel. Dabei soll eine ganzheitliche Beschreibung der Qualitätsmerkmale der LED-Beleuchtung erstellt werden, die den potentiellen Anwendern (Bauherren, Architekten, Planer, Einkäufer; Energieberater, etc.) eine Bewertung der LED Technologie ermöglicht. Die Grundlagen können für allfällige Deklarationen, Definitionen von Zielwerten oder Minergieanforderungen verwendet werden. In einem Flyer (nicht Bestandteil dieses Projektes) sollen die Erkenntnisse anschliessend praxisnah und visuell attraktiv aufgearbeitet werden.

2.2 Projektablauf

Meilenstein	Detail	Termine
Vorbereitung	<ul style="list-style-type: none">- Konzept- Recherchen	Januar / Februar 09
Expertenbefragung	<ul style="list-style-type: none">- Vorbereitung- Durchführung von 6 bis 8 Interviews- Nachbereitung	März / April 09
Synthese	<ul style="list-style-type: none">- Auswertung- Berichtstruktur- Berichtsentwurf	Mai 09
Wokshop	<ul style="list-style-type: none">- Vorbereitung- Durchführung- Nachbereitung	Juni / Juli 09
Schlussbericht	<ul style="list-style-type: none">- Schlussbericht	August 09

Als Vorbereitung für eine Experten-Befragung soll das Thema «LED für Raumbelichtung» aufgearbeitet und die wesentlichen Fragestellungen ausgearbeitet werden. Anschliessend werden Gespräche mit Fachexperten geführt, welche sich in unterschiedlicher Weise mit der LED-Technologie für Raumbelichtung beschäftigen. Aufgrund der Expertengespräche werden die Antworten zu den Fragestellungen strukturiert und in einem Berichtsentwurf zusammengefasst. Der Entwurf des Berichtes wird den Experten zur Vernehmlassung unterbreitet. In einem gemeinsamen Workshop mit allen interessierten Experten sollen Widersprüchlichkeiten und offene Fragen nochmals vertieft und bereinigt werden. Nach dem Workshop wird der Schlussbericht erstellt. Zentrales Element dieses Berichts ist die Beschreibung der Qualitätsmerkmale der LED-Beleuchtung, die potentiellen Anwendern (Bauherren, Architekten, Planer, Einkäufer; Energieberater, etc.) eine Bewertung der LED Technologie ermöglicht. Der Bericht kann als Grundlage für allfällige Deklarationen, Definitionen von Zielwerten oder Minergieanforderungen verwendet werden.

2.3 Experten

Bereich	Firma	Personen
Hersteller Lampen	Philips	Job Daams, Zürich Stefan Lutz, D-Hamburg
	Osram	Hans-Rudolf Bosshard, Winterthur Gerhard Kuhn, D-Regensburg Caroline Schliephake, D-München
Hersteller Leuchten	Regent	Thierry Dreyfus, Basel Yannick Gouédard, Basel V Sfika, Basel
	Zumtobel	Daniel Cathomen, Zürich Katharina Keller, A-Dornbirn Wolfgang Bechter, A-Dornbirn
	Baltensweiler	Gabriel Baltensweiler, Ebikon
weitere	Metas	Peter Blattner, Bern
	HTW Chur	Toni Venzin, Chur
	Onlog	Stefan Kreidler, Tenero
	Amstein+Walthert	Daniel Tschudy, Zürich
	SAFE	Giuse Togni, Zürich

2.4 Auswahl von Fragen zur aktuellen LED-Technologie

- Welche Arten von LED gibt es aktuell am Markt, was im Labor?
- Funktionsweise, physikalische Möglichkeiten und Grenzen
- Welches sind die wichtigsten Hersteller? Traditionelle und neue Player.
- Preis- Leistungs-Verhältnis, Wirtschaftlichkeit
- Stand der Technik 2008: Vor- und Nachteile, aktuelle Anwendungen
- Künftige Entwicklung, Preise, Effizienz, Sättigung
- Typische Anwendungen aktuell, künftig
- Normierung?
- Lichtausbeute und Energieeffizienz
- Betriebsgeräte (Verlustleistung, Leistungsfaktor)
- Temperaturmanagement: Wärmeabgabe und Wärmeabfuhr
- Alterung, Lebensdauer, Herstellergarantien
- Lichtqualität: Farbwiedergabe, Farbtemperatur, Farbspektrum, Blendung
- Elektromagnetische Verträglichkeit (Elektrosmog)
- Messungen: Möglichkeiten herkömmlicher Messtechnik, neue Anforderungen
- Deklaration: welche Angaben müssen deklariert werden,
- Klassifizierung: analog Energieetikette für Lampen?
- Licht mit ohne UV und IR-Anteile
- Farbmodulation und Dimmbarkeit
- Lebensdauer, Schaltfestigkeit
- Vorteile/Nachteile gegenüber Spar- und Halogenlampen

3 Grundlagen zur LED-Beleuchtung

3.1 Physik

Leuchtdioden sind Halbleiter-Bauelemente, wie sie in der Elektronik verwendet werden. Im Gegensatz zu normalen Dioden geben Leuchtdioden bei Stromdurchfluss Licht ab; man nennt sie deshalb «Licht emittierende Diode» oder LED.

Halbleiter haben einen kristallinen Aufbau und sind teilweise elektrisch leitfähig. Wird einem Elektron des Halbleiters in der Grenzschicht genügend elektrische Energie zugeführt, wird es aus seinem Verband herausgelöst. Trifft dieses freie Elektron ein so genanntes Loch, ein positiv geladenes Teilchen, wird dieses rekombiniert. Dadurch wird Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung mit einer bestimmten Wellenlänge frei. Wie jede Diode lässt die LED den Strom nur in eine Richtung fließen. Wenn eine Spannung in der Durchlassrichtung von ca. 3 Volt angelegt wird, ist die Diode leitend und erzeugt Licht. Der Stromdurchfluss muss jedoch begrenzt werden, da sonst die LED zu heiss wird. Die Lichtabstrahlung ist proportional zum elektrischen Strom. Temperaturen über 60 Grad reduzieren die Lebensdauer der LED wie auch deren Lichtausbeute. Bei Überhitzung werden sie zerstört.

Rote und grüne LED als Anzeigelampen gibt es seit 1960. Die blauen LED, die zur Erzeugung von weissem Licht nötig sind, existieren seit 1995. Blaues LED-Licht wird auf der Basis des Halbleitermaterials Galliumnitrid (GaN) oder Gallium-Indium-Nitrid (GaInN) erzeugt. Zur Umwandlung in weisses Licht wird die blaue LED mit Leuchtstoffen (z.B. gelb) beschichtet. Je nach Konzentration und Farbe des Leuchtstoffes können verschiedene Weisstöne erzeugt werden.

Der typische heute verwendete weisse LED-Chip ist 1mm² gross, nimmt eine elektrische Leistung zwischen 1 und 3 Watt auf und gibt 50 bis 150 Lumen sichtbares Licht ab. Alle grösseren Leistungen werden durch Aneinanderreihen von solchen Einzelchips erreicht. Aktuell werden Module mit Leistungen bis ca.100 Watt angeboten. Die maximale Grösse wird durch die Möglichkeiten der Wärmeabgabe begrenzt.

Neben den (monokristallinen) LEDs wird auch an der Entwicklung von organischen Leuchtdioden (OLED) gearbeitet. Bei OLED ist das Trägermaterial ein Kunststoff, OLEDs werden als grossflächige Leuchtpanelen hergestellt und können z.B. als Hintergrundbeleuchtung von Bildschirmen oder auch für ganze leuchtende Wände verwendet werden. Die OLED-Technik weisst aktuell etwa die halbe Effizienz der «normalen» LED auf. In der Raumbeleuchtung hat diese Anwendung zurzeit noch wenig Bedeutung.

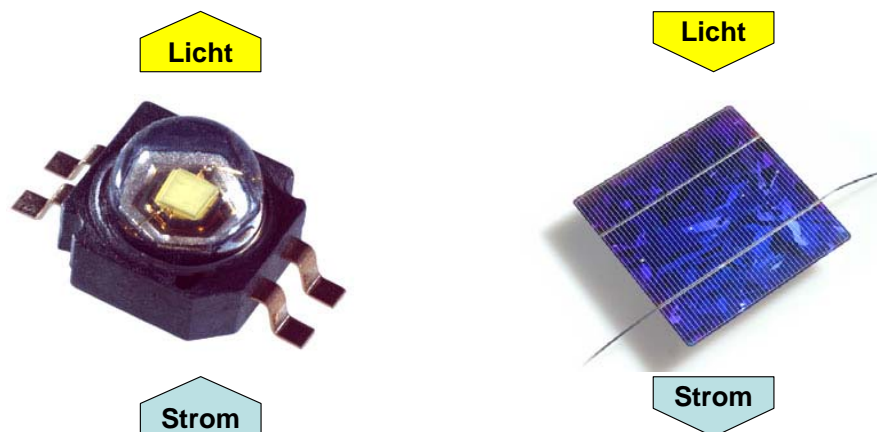


Abbildung 1: Vereinfacht gesagt ist die LED die physikalische Umkehr der Solarzelle.

3.2 Entwicklung

Die Entstehungsgeschichte der LED ist bereits etwa 100 Jahre alt.

- 1907 Entdeckung des Lichtphänomens «LED» im Siliziumkristall (kaltes Licht)
- 1951 Erklärung des Phänomens durch die moderne Quantenphysik (Luminiszenz)
- 1961 Erste rote LED der Firma General Electric
- 1971 Grüne, orange, gelbe LED, Licht für Anzeigen + Signalisation
- 1988 Steigerung der Lichtintensität durch neue Halbleiterstoffe
- 1993 Erste blaue LED durch die Firma Nichia
- 1998 Erste weisse LED (Leistung: 0.02W) ein Leuchtstoff wandelt blau in weiss um
- 2000 RGB-Technik ermöglicht die Mischung von beliebig farbigem Licht
- 2003 Erste Power-LED mit 1.2 Watt-Leistung
- 2009 LED mit bis zu 100W Leistung

Die Energieeffizienz-Entwicklung der Leuchtdioden ist in untenstehender Grafik gezeigt. In den Jahren 2003 bis 2009 hat sich die Effizienz der LED verdreifacht. 2009 stehen wir mit der Effizienz etwa am Punkt der Sparlampe. In den nächsten 10 Jahren wird die Zunahme wahrscheinlich nicht mehr so stark sein, eine Verdoppelung liegt aber allemal drin. Damit wird die LED zur eindeutigen Lichtquelle der Zukunft.

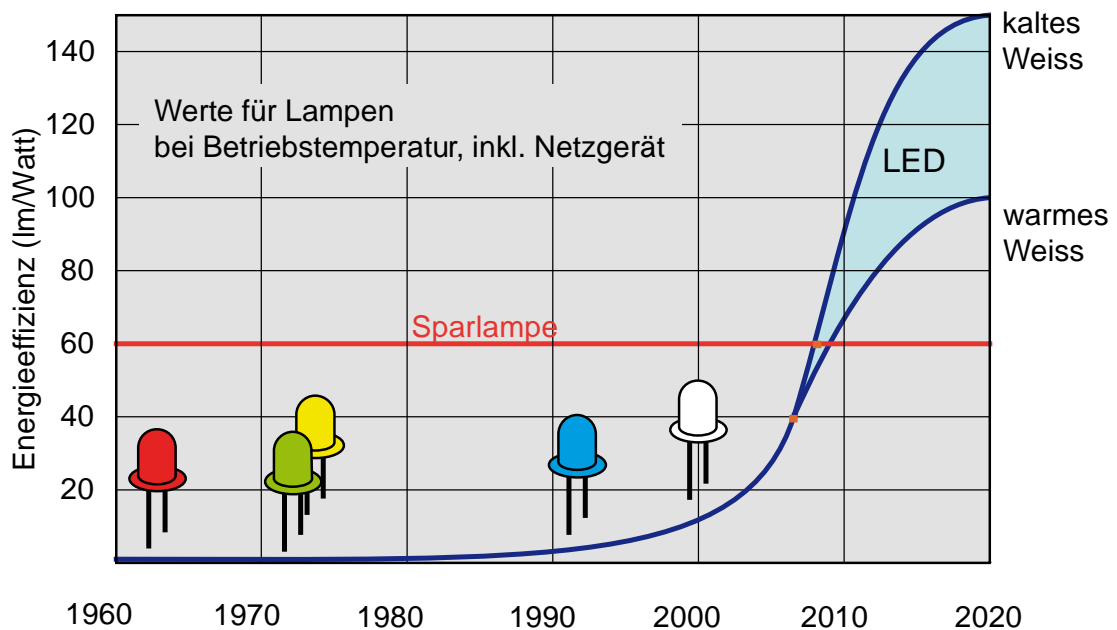


Abbildung 2: Entwicklung der Energieeffizienz von LED

3.3 Drei Produktionsschritte: Komponenten, Module und Lampen

Herstellung der LED-Komponenten

Einige wichtige weltweite Hersteller von LED-Komponenten sind:

- Cree (USA, www.cree.com)
- Lumiled (www.philipslumileds.com)
- Nichia (Japan, www.nichia.co.jp)
- Osram (Deutschland, www.osram-os.com)

Als einzige Fabrik in Europa stellt Osram in Regensburg bei München LED-Komponenten her; 2008 wurde das Werk mit 2000 Angestellten und einer Produktion von jährlich 10 Milliarden LED-Chips in Betrieb genommen. Der Fertigungsprozess am Anfang entspricht demjenigen aus der Solarzellenproduktion.

1. Herstellung des hochreinen, monokristallinen Halbleiters aus Gallium Arsenid. (Form wie «Döner Kebab»)
2. Zersägung des Kristalls zu schallplattengrossen runden Scheiben (20cm Durchmesser, 0.5mm Dicke)
3. Züchtung der Halbleiterschicht (Epitaxie) mit den Elementen Indium, Gallium, Aluminium und Stickstoff; daraus entsteht die blaue LED.
4. Entfernung des Substrates (Gallium-Arsenid) und Aufbringung der LED auf eine Trägerschicht aus Germanium. Diese Scheiben nennt man Wafer.
5. Beschichtung der blauen «LED-Scheibe» mit Leuchtstoffen führt zur weissen LED.
6. Zersägung der beschichteten Scheibe in LED-Chips von 1 Quadratmillimeter.
7. Messung der lichttechnischen und elektrischen Eigenschaften der einzelnen Chips und Roboter gesteuerte Zusammenstellung von Wafern mit gleichen Eigenschaften. Auf diese Weise entstehen die so genannten Bins. Jeder Bin unterscheidet sich in Bezug auf Farbtemperatur, Helligkeit und Stromfluss. Für die Weiterverarbeitung werden der LED-Komponenten zu Modulen ist der Bin die massgebende Qualitätskennzeichnung.

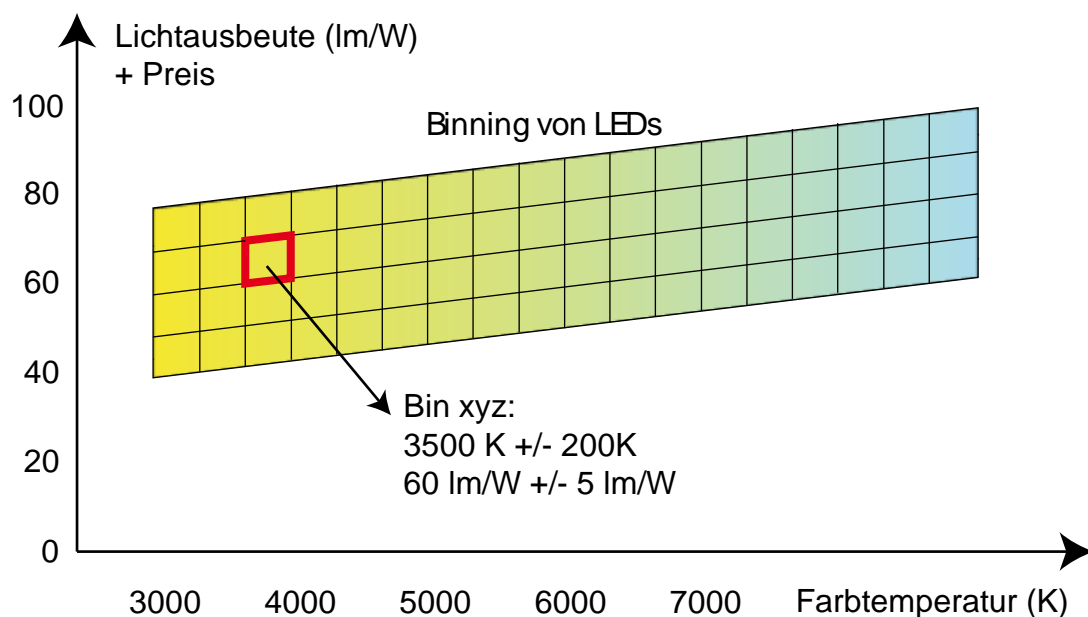


Abbildung 3: Sortierung von LED-Komponenten nach Farbtemperatur und Lichtausbeute (Binning)

Das Produktionsverfahren mit dem Binning macht deutlich, wie komplex der Aufbau einer LED-Komponente ist und dass Fertigungstoleranzen unvermeidlich sind, obwohl diese in den letzten Jahren deutlich gesunken sind. Um eine grosse Ausbeute der LED-Wafern zu erreichen (ca. 95%), werden die Bins entsprechend Nachfrage gehandelt. Generell kann man festhalten:

- LED aus Bins mit hoher Energieeffizienz sind teurer
- LED mit kleinen Fertigungstoleranzen sind teurer
- LED mit kälterer Farbtemperatur sind effizienter

Ein Lampen- oder Leuchtenbauer muss sich also fragen zu welchem Preis er welche Qualität einkauft bzw. als fertiges Produkt weiterverkaufen kann. Und es sind nicht immer alle Bins erhältlich.

Fertigung der LED-Module

Auf der Basis der gebinteten LED-Komponenten werden nun Module hergestellt. Bei Osram wird dieser Fertigungsschritt in einem eigenen Werk in Malaysia durchgeführt.

- Anbringen der elektrischen Leitungen
- Fertigung der Linse zur Lichtlenkung
- Einbau in ein Gehäuse



Abbildung 4: Fertiges LED-Modul

Ein solches Modul hat eine typische elektrische Leistung von 1.1 Watt bei einer Stromaufnahme von 0.35 A und einer Spannung von 3.2 Volt. Es können auch mehrere Komponenten zu einem Modul zusammengebaut werden, entweder als Strang oder als kompakte Fläche. So entstehen Module mit aktuellen Leistungen bis zu 10 Watt oder mehr. Die LED-Module haben dieselben Bins wie die LED-Komponenten und sind Basis für Lampen- und Leuchtenbauer.

LED-Lampen und Leuchten

Zur fertigen Lampe oder Leuchte braucht es zusätzlich eine Stromversorgung und ein Gehäuse mit ausreichender Kühlung. Vom Markt gefordert sind so genannte Retrofit-Lampen, also Produkte, die anstelle herkömmlicher Lampen über bekannte Gewinde und Sockel in bestehende Leuchten geschraubt oder gesteckt werden können. Diese Lampen haben aktuell meist «brachial» anmutende Kühlkörper (vergleiche Abbildung 13), im Gegensatz zu LED-Leuchten, welche direkt mit Modulen bestückt sind und die Kühlung über den metallischen Leuchtenkörper abführen können. Da LED-Module bis zu 50'000 Stunden leben, ist ein Lampenersatz nicht mehr nötig ist und das auswechselbare Zwischenstück «Lampe» könnte mit der Zeit verschwinden. Es ist jedoch zu beachten, dass die Lebensdauer auch von der Qualität der Stromversorgung abhängt; einfache Stromversorgungen haben eine deutlich kleine Lebenserwartung als die LED-Module.

4 Qualitätskriterien

4.1 Überblick

Aufgrund der Recherchen und den Interviews mit den Experten lassen sich drei Bereiche von Qualitätskriterien bei der LED-Beleuchtung ausmachen.

Als «Premium»-Kriterien sind Aspekte einzuordnen, bei denen die LED-Technik deutliche Vorteile gegenüber allen sonst üblichen Beleuchtungstechniken aufweist. Hier kann bereits heute mit LED ein Mehrwert generiert werden, welcher wirtschaftliche Betrachtungen in eine andere Relation stellen. Schlüsselkriterien betreffen die Aspekte, bei denen zum Teil noch technische, aber insbesondere kommunikative Anstrengungen gemacht werden müssen, um die Akzeptanz bei den Anwendern zu erreichen. Weiteren Kriterien sind Themen zugeordnet, bei denen die LED-Technik vergleichbar ist mit anderen Beleuchtungstechnologien.

Premium-Kriterien: Vorteile LED

- Kein Ultraviolett im Lichtstrahl
- Keine Wärme im Lichtstrahl
- Frei modulierbare Lichtfarbe
- Verlustfreies Dimmen
- Optimal für präzise Lichtführung (z.B. Streiflichter)
- Stoss- und Vibrationsfestigkeit

Schlüsselkriterien

- Energieeffizienz
- Lebensdauer
- Farbwiedergabe

Weitere Kriterien

- Leistungsbereich
- Netzteilverluste und Standby
- Leuchtdichte
- Blendung
- Optische Strahlung
- Schaltfestigkeit
- Aufstartzeit
- Umgebungstemperatur
- Messtechnik
- Graue Energie
- Elektromagnetische Strahlung
- Schädliche Stoffe (zum Beispiel Quecksilber)
- Eignung als Retrofit-Lampen

Alle Kriterien werden im Folgenden beschrieben, die Schlüsselkriterien ausführlich.

4.2 Premium-Kriterien

Kein Ultraviolett im Lichtstrahl

LED-Licht ist praktisch frei von Ultraviolett. Die Beleuchtung von verderblicher Ware ist deshalb mit LEDs besonders attraktiv.

- Sehr geringe Farbausbleichung bei Bildern, Kleidern, Verpackungen
- Verringerung des Alterungsprozesses bei Frischware wie Gemüse, Fleisch, Käse

Keine Wärme im Lichtstrahl

Im Lichtstrom sind praktische auch keine Infrarotanteile. Der Nutzen ist wie beim Ultraviolett, dazu kommen weitere Nutzen.

- Sehr geeignet für die Beleuchtung von Kühlmöbeln
- Geeignet in Lese- und Arbeitslampen, die nahe beim menschlichen Körper stehen

Wichtig für die Kommunikation ist, dass der Wärmehaushalt insgesamt nicht tiefer ist als bei gleich effizienten Sparlampen und keine Einsparung bei der Klimatisierung erzielt werden kann. Die Wärme bei LED ist nicht im Lichtstrahl, aber nach hinten gibt die LED die Verlustenergie (von ca. 75%) ab.

Frei modulierbare Lichtfarbe

Durch die Kombination von roten, grünen und blauen LEDs lässt sich praktisch jede Lichtfarbe erzeugen (RGB). Auch weisses Licht ist auf diese Weise mischbar. Eine bessere weisse Lichtqualität erreicht man durch Beschichtung von blauen LEDs mit Leuchtstoffen. Das Prinzip ist ähnlich wie bei Leuchtstofflampen. Durch Kombination von beschichteten weissen mit gelben oder roten LEDs lassen sich so auch sehr warme Lichttöne von hoher Qualität generieren, wie sie Kunden von Ambiente Licht oft fordern. Werden weisse und farbige LEDs gemeinsam in einer Leuchte eingebaut, können durch unterschiedliche Stromsteuerung der verschiedenen LEDs Leuchten konstruiert werden, die stufenlos Weissstöne von warmweiss bis kaltweiss erzeugen (Beispiel PAL-Strahler der Firma Regent). Im Verkaufsbereich oder in Museen können durch diese Technik typische Farben von Exponaten (rote Kleider, blaue Kleider, etc.) gezielt herausgeholt werden. Hohe Farbindizes und modulierte Farbtemperaturen gehen meist zu Lasten der Energieeffizienz.

Verlustfreies Dimmen

Weil LED bei tiefen Strömen eine höhere Effizienz hat als bei hohen Strömen, können Netzteilverluste, die bei Teillast mehr ins Gewicht fallen, kompensiert werden. Die Möglichkeit der Dimmung hängt allerdings von der Qualität des Netzteils ab. Bei Retrofit-Lampen sind die Möglichkeiten zur Dimmung eingeschränkter (aber möglich) als bei integrierten LED-Leuchten.

Optimal für Streiflichter

In vielen Verkehrsflächen (z.B. Korridore in Bürobauten) sind Streiflichter im Trend. Wegen des hohen Lichtstroms pro Längeneinheit von Leuchtstoffröhren werden hier oft deutlich zu hohe Beleuchtungsstärken erzielt oder die Beleuchtungsstärke wird durch simple Abdeckung verringert. Mit LED-Technologie kann ein Streiflicht exakt auf entsprechend den Bedürfnissen bei voller Energieeffizienz dimensioniert werden.

4.3 Schlüsselkriterium «Energieeffizienz»

Beim Kriterium «Energieeffizienz» muss insbesondere auf Deklaration der Energieeffizienz geachtet werden. Verkäufer und Prospekte bewerben LED-Module oft mit hohen Effizienzen, die beim Endprodukt (der Lampe oder der Leuchte) aufgrund verschiedener Faktoren nicht erreicht werden können. Der Grund dafür liegt beim Missverständnis zwischen Produktdeklaration der Hersteller von LED-Modulen und dem Nichtbeachten der in diesen Unterlagen definierten Rahmenbedingungen. An einem Beispiel im Anhang (Kap. 7.1, Seite 30) werden die Produktdeklaration eines LED-Moduls und deren Interpretation aufgezeigt.

Vereinfacht gesagt liegt der Praxiswert heute häufig etwa bei der Hälfte des beworbenen Wertes im Prospekt. Die wesentlichen Verringerungsaspekte zwischen Labor und Praxis sind im Folgenden dargestellt.

1. Laborwert = «Werbewert» (LED-Hersteller):
kaltweisse Lichtfarbe, gemessen bei **Teillast** (350mA), **25°** Chiptemperatur, **ohne** externe Stromversorgung
2. Bester Praxiswert (Einfluss Modulhersteller):
kaltweisse Lichtfarbe, gemessen bei Teillast (350mA), **80°** Chiptemperatur, **inkl.** externe Stromversorgung.
3. Warmweisses Licht (Einfluss Modulhersteller)
warme Lichtfarbe, gemessen bei Teillast (350mA), **80°** Chiptemperatur, **inkl.** externe Stromversorgung.
4. Volllastbetrieb + warmweisses Licht (Einfluss Modulhersteller)
gemessen bei **Volllast** (700mA), **80°** Chiptemperatur, **inkl.** externe Stromversorgung.
5. Inkl. Reflektor (Einfluss Leuchtenhersteller)
Wie 4, zusätzliche Vorrichtung zur Blendbegrenzung und Lichtlenkung

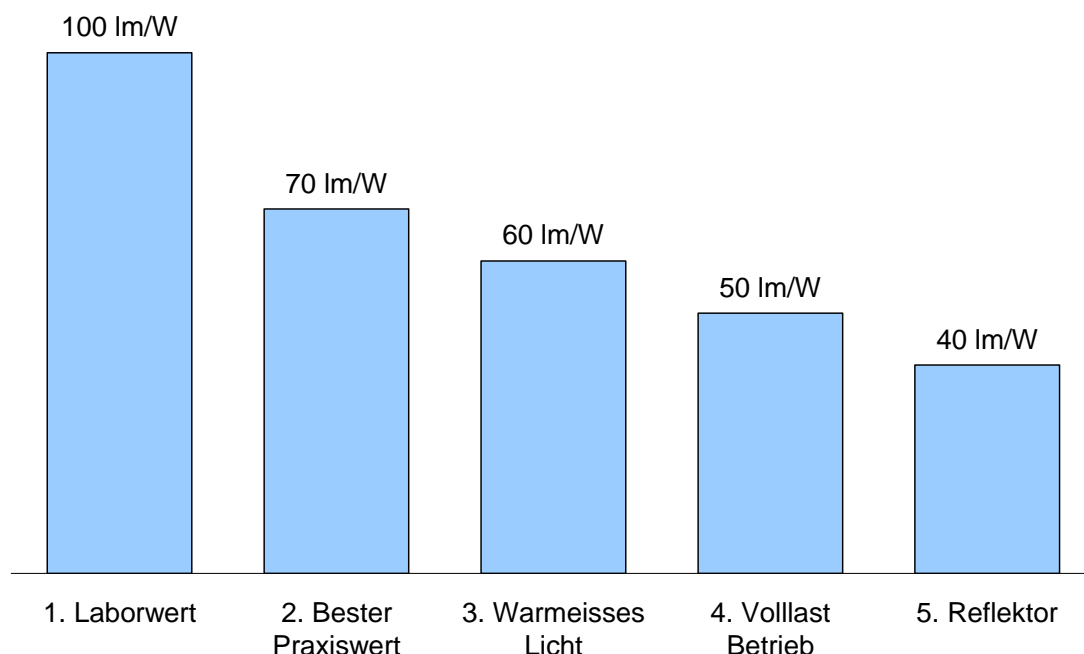


Abbildung 5: Energieeffizienz der gleichen LED unter verschiedenen Bedingungen

Netzteilverluste + Standby

Die Hersteller lassen bei der Deklaration den Eigenverbrauch der Stromversorgung generell weg und messen nur die Leistung am Chip selber; je kleiner das LED-Modul, desto grösser ist aber die Eigenleistung der Stromversorgung. Unter 0.5 Watt Eigenverbrauch ist kein Netzteil zu bauen; bei einem 1-Watt-LED beträgt also der Anteil des Netzteils min. 33%; d.h. die Effizienz sinkt um diesen Prozentsatz. Je grösser das Modul, desto geringer wird der Anteil des Netzteils.

Chiptemperatur

Die Hersteller messen die LEDs bei 25°C Chiptemperatur. Diese Temperatur ist nur wenige Mikrosekunden nach dem Einschalten vorhanden. Danach steigt die Temperatur schnell auf über 60°C und die Effizienz nimmt um ca. 15% ab. Die kurze Messzeit widerspricht den normativen Vorgabe in anderen Beleuchtungsnormen (z.B. EN 13032 oder EN 60969), wo man generell vom Betriebszustand ausgeht, der in der Regel nach 10 bis 15 Minuten erreicht ist.

Farbtemperatur

Je höher die Farbtemperatur des LED-Lichts, desto höher ist die erreichbare Lichtausbeute oder Energieeffizienz. Kaltweisse LEDs (5000 Kelvin und höher) haben eine rund 25% bessere Lichtausbeute als warmweisse LEDs mit ca. 3000 Kelvin. Die Farbtemperatur ist grundsätzlich kein Qualitätsmerkmal, aber v.a. im Heimbereich gelten warmweisse Lichter aus Gewohnheit als angenehm.

Betriebsstrom

Um Kosten zu sparen, kann man eine 1-Watt Power-LED auch als 2 Watt oder sogar als 3-Watt-LED betreiben, in dem man den Strom von typischerweise 350mA auf 700 mA oder sogar 1000mA erhöht. Dadurch nimmt die Lichtausbeute ab und das Thermomanagement der LED wird anspruchsvoller. Sowohl in Bezug auf die Lebensdauer, als auch in Bezug auf die Energieeffizienz fährt man besser mit tief bestromten LEDs.

Reflektor, Entblendung

Da die Leuchtdichte der LEDs aufgrund der kleinen Abmessungen sehr hoch ist, blenden diese oft, wenn man sie nicht geeignet entblendet. (z.B. durch mattiertes Glas, Lamellen, etc). Diese Entblendung kostet nochmals etwas Effizienz. Im Gegensatz zu normalen Leuchten muss bei LED aber keine Lichtreflexion erzeugt werden, weil LEDs bereits gerichtetes Licht abgeben. Die Leuchtenverluste sind bei LEDs also deutlich geringer als bei allen anderen Leuchtmitteln. Weisst eine durchschnittliche Leuchte einen Leuchtenbetriebswirkungsgrad von 60% auf, liegt dieser Wert bei LED meist bei über 80%.

Absoluter Lichtstrom

Selbst wenn eine LED eine sehr hohe Effizienz aufweist, wird ihr Einsatz heute oft durch den maximalen Lichtstrom des Moduls begrenzt; bei Retrofit-Lampen liegt der max. Lichtstrom aktuell bei ca. 400 Lumen (entspricht 40 Watt Glühlampe) bei professionellen Strahlern bei ca. 2000 Lumen (entspricht 150 Watt Glühlampe).

Fazit «Energieeffizienz»

Der aktuelle Praxiswert bei weissen LED-Lampen liegt zwischen 50 und 70 Lumen pro Watt, im selben Bereich wie Sparlampen. Die Industrie geht von einer Verdoppelung der Energieeffizienz bis in den nächsten 5 Jahren aus.

Studien zeigen, dass viele LED-Produkte schlecht (bis falsch) deklariert sind. Die Annahmen zur Definition der Energieeffizienz müssen klar deklariert werden; falls keine Angaben gemacht werden, muss der Besteller von derselben Definition ausgehen können, die auch für alle anderen Leuchtmittel gelten.

4.4 Schlüsselkriterium «Farbwiedergabe»

Ausserhalb von Fachkreisen werden die verschiedenen Aspekte, welche die Lichtqualität von Lampen ausmachen, oft falsch verstanden und oft auf die subjektive Wahrnehmung der Farbtemperatur reduziert. In Wirklichkeit sind mehrere physikalische Eigenschaften für die Farbgröße des Lichts in Betracht zu ziehen, dazu gehört auch die subjektive Wahrnehmung, weil die physikalischen Grössen die Lichtqualität nicht vollständig zu beschreiben vermögen.

Farbtemperatur

Die Farbtemperatur gibt den Blau- bzw. Rotanteil des Lichts an. Rötliches Licht wird als Warmweiss, bläuliches Licht als Kaltweiss bezeichnet. Dazwischen liegt das so genannte Neutralweiss. Die Farbtemperatur wird in Kelvin angegeben.

- Warmweiss: 2700 bis 3500 Kelvin (Glühlampe)
- Neutralweiss: 3500 bis 5000 Kelvin
- Kaltweiss: 5000 bis 10'000 Kelvin (Tageslicht)

Die Farbtemperatur hat nichts mit der Lichtqualität zu tun aber sehr viel mit der subjektiven Empfindung und der Gewohnheit.

Farbwiedergabe

Die Qualität der Farbwiedergabe wird mit dem so genannten Farbwiedergabeindex «Ra» (oder englisch: CRI = Color Rendering Index) angegeben. Der CRI wird aus dem Mittelwert der Farbechtheit von 8 verschiedenen Farben ermittelt, der beste Wert ist 100. Der CRI ist das anerkannte Kriterium für die Farbwiedergabequalität, obwohl er in Fachkreisen auch nicht unumstritten ist (es werden nur 8 Farben betrachtet). In der EUP-Verordnung wird ab 1.9.09 die Deklaration des CRI verlangt (siehe Kap. 7.2, Seite 33).

- Tageslicht, Glühlampenlicht, Halogenlampen: CRI = 100
- Sparlampen: CRI = 80
- Leuchtstoffröhren: CRI = 80 bis 90
- LED (gute Produkte): CRI: 80 bis 95 (letzte Generation: CRI: 50 bis 70)
- Natriumdampflampen: CRI: 25 («orange» Strassenbeleuchtung)

Farbspektrum

Der Farbwiedergabeindex sollte in Kombination mit dem Farbspektrum betrachtet werden. Im Spektrum werden die Farbanteile im Regenbogen-Diagramm sichtbar. Die verschiedenen Lichtquellen zeigen ganz unterschiedliche Verteilungen, auch wenn sie punkto Farbwiedergabe gleich oder ähnlich sind:

- Tageslicht: kontinuierliches Spektrum, dominanter Blauanteil
- Glüh- und Halogenlampen: kontinuierliches Spektrum, extremer Rotanteil
- Sparlampen: lückenhaftes Spektrum, ausgeprägte Linien bei den Grundfarben
- LED: kontinuierliches Spektrum, Abfall bei Grün und bei Rot (in Relation zur kleinen Empfindlichkeit des menschlichen Auges im Rotbereich)

Im Bereich «Lichtfarbe und Farbwiedergabe» gibt es mit dem amerikanischen ANSI (American National Standards Institute, www.ansi.org) bereits einige Norm-Entwürfe für LED-Licht.

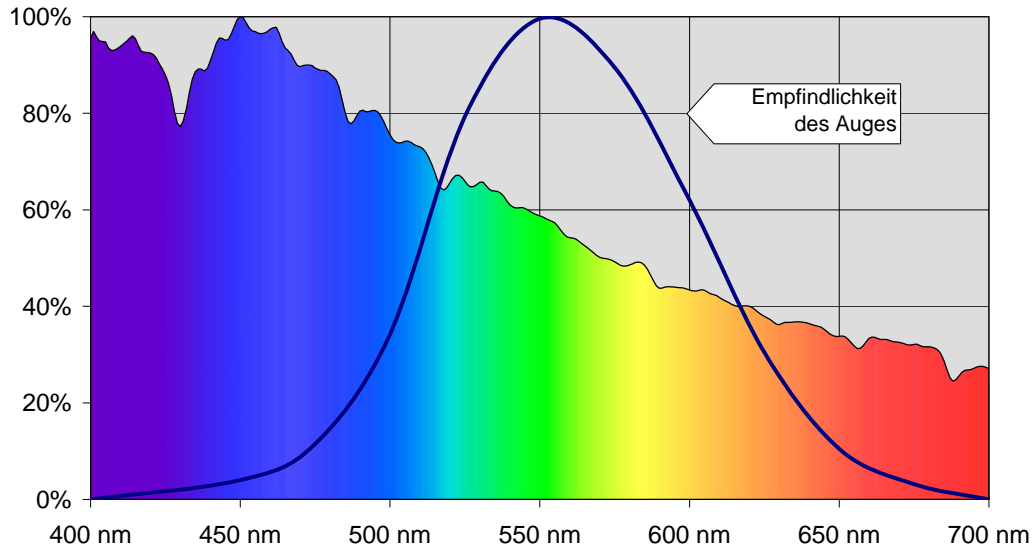


Abbildung 6: Farbspektrum von Tageslicht

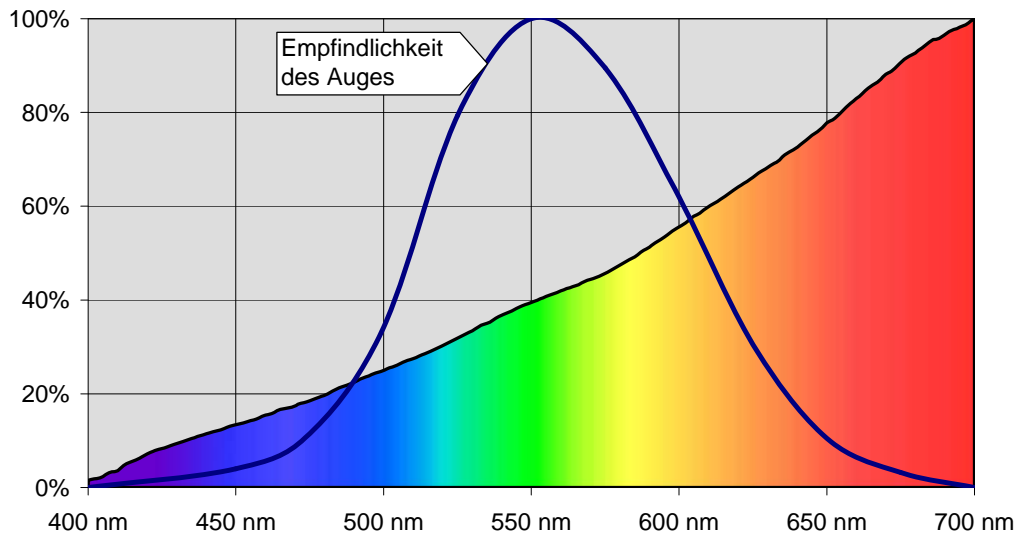


Abbildung 7: Farbspektrum einer Halogenlampe

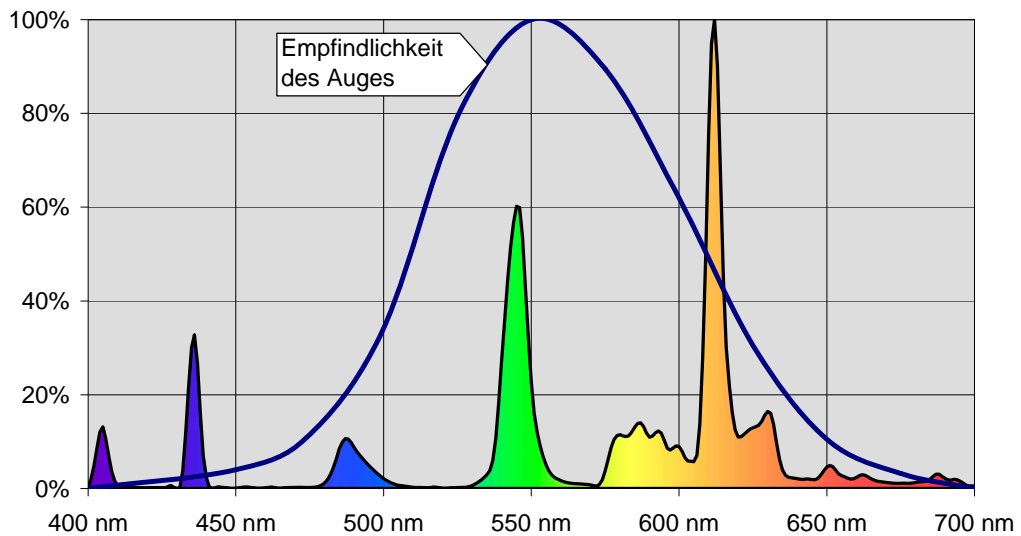


Abbildung 8: Farbspektrum einer Sparlampe

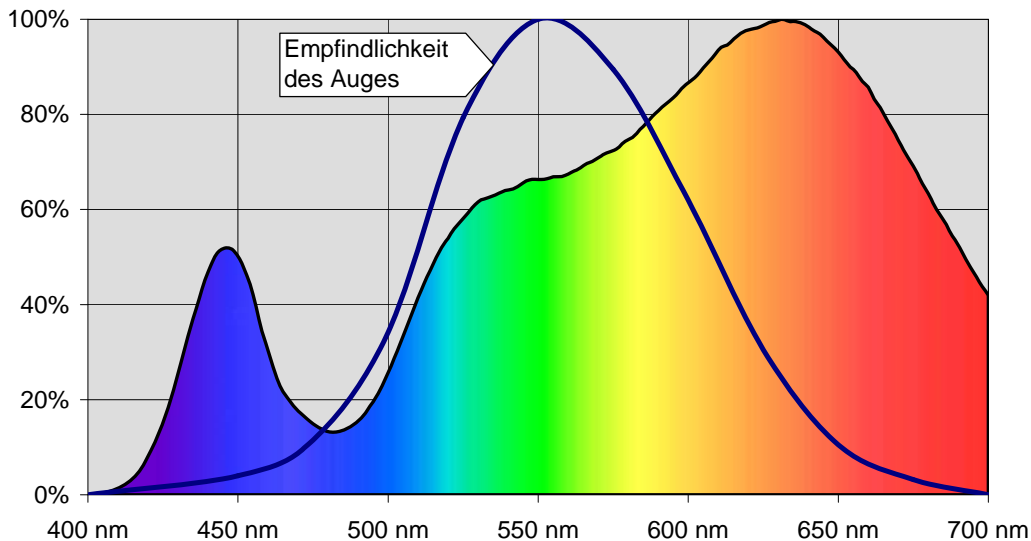


Abbildung 9: Farbspektrum einer warmweissen LED (Philips Spot GU10, 3000K)

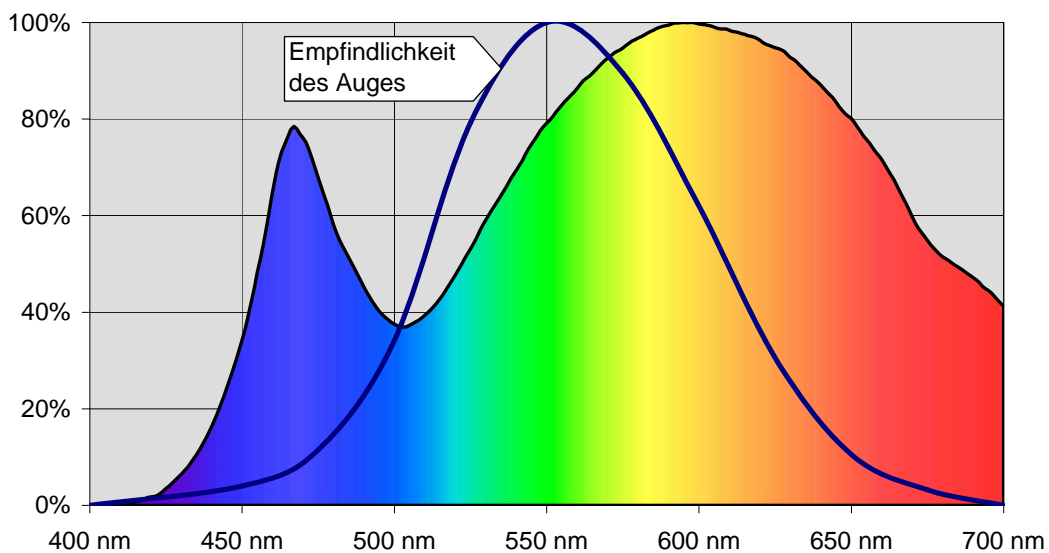


Abbildung 10: Farbspektrum einer kaltweissen LED (Osram Spot GU10, 5'500K)

Fazit «Farbwiedergabe»

Die aktuellen LEDs weisen einen Farbwiedergabeindex (CRI) von 80 bis 95 auf und sind damit der Technik der Leuchtstofflampen ebenbürtig oder leicht überlegen. Das Spektrum der LEDs kann mit technischen Mitteln praktisch beliebig geformt werden (im Gegensatz zu allen anderen Lichtquellen). Problematisch sind die aktuell sehr breit angebotenen verschiedenen Farbtemperaturen bei LEDs; dies ist eine Folge der grossen Fertigungstoleranzen; man kann zwar ganz bestimmte und exakte Farbtemperaturen kaufen; diese sind dann aber sehr teuer (vergleiche auch Abbildung 3)

- Glühlampen: Bereich zwischen 2500 bis 2800 Kelvin
- Leuchtstofflampen: fixe Farbtemperaturen: 2700, 3000, 4000, 5400, 6500 Kelvin
- LEDs: alle Varianten zwischen 2700 und 10'000 Kelvin

4.5 Schlüsselkriterium «Lebensdauer»

Die Lebensdauer der LED-Produkte wird mit Werten zwischen 20'000 und 100'000 Stunden angegeben; diese Werte sind sehr hoch und ein entscheidendes Verkaufsargument. Die Lebensdauer wird meist als Zeitraum angegeben, nach welchem die LEDs noch einen Lichtstrom von 70% des Anfangslichtstroms ausweisen.

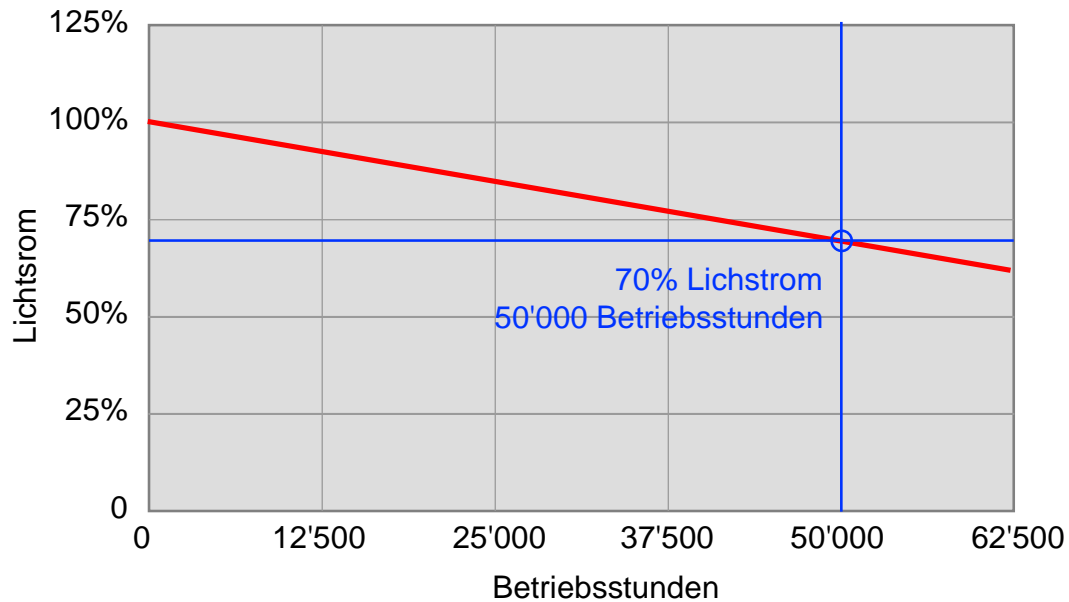


Abbildung 11: Übliche Definition der Lebensdauer von LED-Modulen

Langzeitmessungen, ob solch lange Lebensdauern effektiv erreicht werden können, fehlen weitgehend. Einzelne Anbieter haben bereits Messungen durchgeführt, um die Lebensdauer ihrer Produkte zu verifizieren.

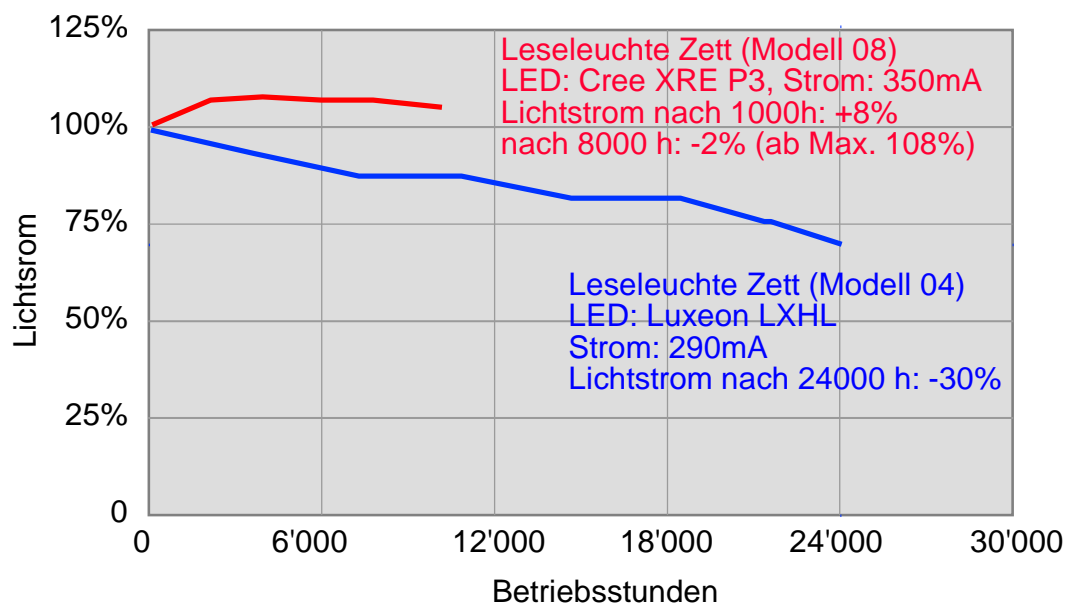


Abbildung 12: Hersteller-Messung der Lebensdauer von LED-Leseleuchten

Temperaturmanagement

Die kritische Grösse bei LED bezüglich Erreichung der Lebensdauer ist das Temperaturmanagement; bei hohen Chip-Temperaturen (offizielle Bezeichnung: Junctiontemperatur) sinken Lichtausbeute und Lebensdauer stark, bei Überhitzung wird der Chip zerstört. Auf dem LED-Chip sollte eine maximale Betriebstemperatur (typischerweise 80°C, kann je nach Typ auch tiefer oder höher sein) herrschen. Über das Modul, bzw. den Print mit der elektronischen Schaltung wird die Wärme abgeleitet (Abnahme ca. 10K bei 1 Watt). Die Abwärme von Modul und Steuerelektronik müssen weiter über einen externen Kühlkörper abgeführt werden. Bei den so genannten Retrofit-Produkten (also LED als Ersatz für herkömmliche Lampen) führt dies zum Teil zu sonderbar anmutenden Kühlkörpern. Bei fest in Leuchten integrierten LEDs kann die Wärme über den (metallischen) Leuchtenkörper abgeführt werden. Eine lange Lebensdauer kann nur erreicht werden, wenn Lampe und Leuchten die Temperaturbedingungen an den Chip erfüllen und die anfallende Abwärme abführen können. Der Lampen- und Leuchtenbauer muss bei der Entwicklung neuer LED-Produkte die Temperatur am Lötunkt im Dauerbetrieb messen.

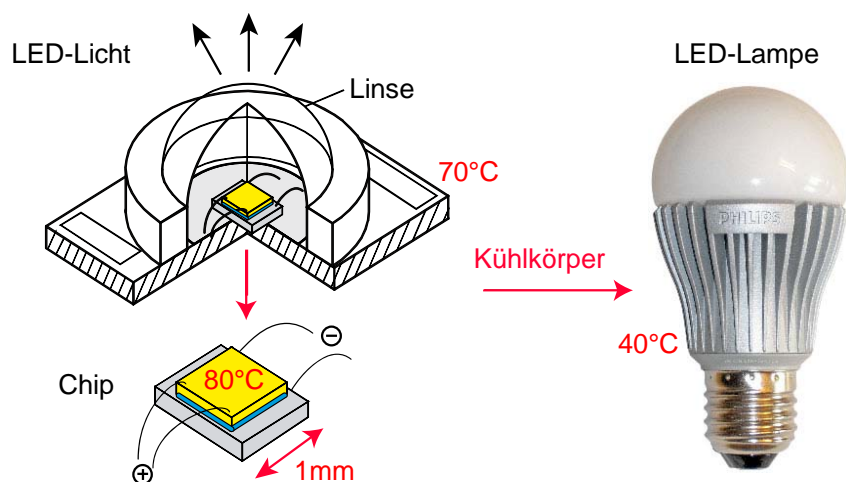


Abbildung 13: Temperaturmanagement der LED



Abbildung 14: Print mit drei 1-Watt-Power-LEDs

Fazit «Lebensdauer»

Wenn für ausreichende Kühlung gesorgt wird, kann eine Lebensdauer von 25'000 bis 50'000 Stunden mit einer hohen Wahrscheinlichkeit sichergestellt werden. Eine LED, die nicht mit maximal zulässigem Strom betrieben wird (also z.B. 350mA statt 700 oder 1000mA) wird weniger heiss und ist zusätzlich resistenter gegen erhöhte Temperaturen. Bei Produkten, die im Betrieb aussen sehr warm werden (z.B. 50 bis 60°) und einen für ihre Leistung kleinen Kühlkörper ausweisen, ist grosse Vorsicht geboten. Neben dem Temperaturmanagement ist auch die Qualität der eingesetzten Elektronik sehr wichtig.

Die erreichbare Lebensdauer einer LED-Lampe/Leuchte ist nur sehr schwierig ohne Messungen zu ermitteln – und die Messungen dauern sehr lange. Das Qualitätskriterium «Lebensdauer» ist also in der Praxis kaum belegbar.

4.6 Weitere Kriterien

Leistungsbereich

Eine typische LED-Komponente hat eine Leistung zwischen 1 und 3 Watt; in Serie geschaltet werden heute Einheiten bis zu 100 Watt realisiert. Damit ist man im gleichen Leistungsbereich wie die etwa gleich effiziente Leuchtstofftechnik. Die grösseren Leistungspakete über 10 Watt sind erst ganz neu.

Netzteilverluste und Leistungsfaktor

Analog zu den Entladungslampen benötigen LEDs eine Netzstromumwandlung. Diese weist einen gewissen Verlust aus, bei guten Geräten wird der Wirkungsgrad mit ca. 90% angegeben. Der Leistungsfaktor (also das Verhältnis zwischen verbrauchter Wirkleistung und im Stromnetz transportierter Scheinleistung) wird über die Qualität des Netzteiles definiert. In der EUP-Verordnung wird für Kompaktleuchtstofflampen ein minimaler Leistungsfaktor von min. 0.5 für Lampen unter 25 Watt und min. 0.9 für Lampen über 25 Watt verlangt.

Standby

Bei regulierten oder sekundär geschalteten Leuchten (z.B. kostengünstige Leseleuchten) ist speziell auch auf den Standby zu achten; gute Werte liegen hier bei ca. 0.2 Watt. Eine 4 Watt LED-Leuchte mit einem Standby von 1 Watt verbraucht 75% der zugeführten Energie im Standby!

Leuchtdichte und Blendung

Dank der hohen Leuchtdichte der LED kann man die Strahlung mittels Linse bündeln. Je höher die Leuchtdichte ist umso mehr "Design-Flexibilität" gibt es. Z.B. ist es quasi nicht möglich mittels einer Sparlampe einen vernünftigen Strahler zu kriegen weil eben die Leuchtdichte ein Vielfaches kleiner ist. Das Gegenstück zur Leuchtdichte ist die Blendung, die mit geeigneten planerischen oder konstruktiven Mitteln begrenzt werden muss, analog wie bei anderen Punktstrahlern.

Optische Strahlung

Es wird eine gewisse Gefährdung durch optische Strahlung bei blauen und weissen LEDs vermutet. Grund dafür ist eine photochemische Reaktion auf der Netzhaut. Dieses Phänomen wird zurzeit weiter untersucht.

Schaltfestigkeit + Aufstartzeit

LEDs haben einen Sofortstart und lassen sich praktisch beliebig ein- und ausschalten, analog Glüh- und Halogenglühlampen; Schaltfestigkeit + Aufstartzeit sind zentrale Minuspunkte bei den Leuchtstoff- bzw. Sparlampen.

Umgebungstemperatur

Sehr effizient arbeiten LEDs bei tiefen Temperaturen (ideal für Strassen- und Aussenbeleuchtung!). Bei höheren Temperaturen (z.B. ab 40°C) können sie die interne Wärme nicht mehr abgeben; es droht Überhitzung und Defekt.

Messtechnik

Grundsätzlich können LED-Lampen und Leuchten mit denselben Instrumenten wie herkömmliche Produkte ausgemessen werden (Ulbrichtsche Kugel für Lichtstrommessung, Photogoniometer für Lichtstärkeverteilung). Zu beachten ist die bei allen bisherigen Leuchtmitteln übliche Messung im warmen Betriebszustand; die LED-Komponentenhersteller messen im kalten Zustand. In den Normen-Gremien der EU und den USA (ANSI) wird zurzeit an Grundlagen zu LED-Messtandards gearbeitet.

Graue Energie

Die Herstellungsenergie für LED-Lampen wird zurzeit untersucht; Nach Aussagen von Osram dürfte sie im Bereich von Sparlampen liegen (3.5 kWh Herstellungsenergie, 100 bis 200 kWh Betriebsenergie).

Elektromagnetische Felder

LEDs benötigen eine elektronische Stromversorgung, die elektromagnetische Felder erzeugt. Sie unterscheidet sich in diesem Bereich grundsätzlich nicht von allen anderen elektronischen Geräten. Die Intensität der Felder ist abhängig von der Höhe der aufgenommenen elektrischen Leistung und vom Abstand zur Elektronik. Da die elektrische Leistung einer aktuellen LED-Lampe deutlich geringer als z.B. die einer Stereoanlage, ist auch das elektromagnetische Feld geringer.

Schädliche Stoffe

LEDs enthalten kein Quecksilber (wie Sparlampen) aber elektronische Bauteile, die bei Defekt separat entsorgt werden müssen. Die Stiftung Licht Recycling Schweiz (www.slrs.ch) regelt mit einer vorgezogenen Recycling Gebühr die Rückführung defekter Sparlampen und LED-Lampen.

Eignung als Retrofit

Der Tradition des Glühlampenersatzes folgend werden bereits Retrofit-LED-Lampen in Form von Spot- oder Classiclampen angeboten. Wegen der Kühlproblematik werden Retrofit-Lampen zurzeit meist nur mit kleinen Leistungen angeboten; dies dürfte sich in absehbarer Zeit ändern. Die Effizienz der LED-Lampen wird auch deswegen steigen, weil bei grösseren Wattagen die Verlustleistung der Stromversorgung anteilmässig kleiner wird.

4.7 LED im Vergleich zu herkömmlichen Leuchtmitteln

Mit unten stehender Tabelle soll der Versuch gemacht werden, die aktuell besten am Markt erhältlichen weissen LEDs im Vergleich zu den Leuchtmitteln Halogenglühlampe, Sparlampe, Fluoreszenzlampe (FL) und Halogenmetaldampflampe (CDM) darzustellen und zu bewerten.

Da ist die LED: ++ viel besser, + besser, o gleichwertig, - (noch) schlechter

Qualitätsmerkmal LED	Halo	Spar	FL	CDM
1 Ultraviolett im Licht	+	+	+	+
2 Wärme im Lichtstrom	++	+	+	+
3 modulierbare Lichtfarben	++	++	+	++
4 Dimmverhalten	+	+	+	+
5 Anwendung für Streiflichter	+	+	+	+
6 Energieeffizienz	+	o	-	-
7 Lebensdauer	++	+	+	+
8 Farbwiedergabe	-	o	o	o
9 Leistungsbereich	-	-	-	-
10 Netzteilverluste und Leistungsfaktor	o	o	o	o
11 Brillanz des Lichts	o	++	++	o
12 Blendung	o	-	-	o
13 Schaltfestigkeit	-	++	+	++
14 Aufstartzeit	o	+	+	++
15 Kalte /warme Umgebungstemperatur	+/-	++/o	++/o	++/o
16 Messtechnik	o	o	o	o
17 Graue Energie	-	o	o	o
18 Elektromagnetische Strahlung	o	+	+	+
19 Schädliche Stoffe	-	+	+	o
20 Eignung als Retrofit	+	o	o	o

5 Aktuelle Produkte

5.1 Retrofit Spotlampen

Retrofit-Lampen können in vorhandenen Leuchten anstelle von herkömmlichen Glüh- oder Halogenlampen eingesetzt werden. Sie haben die typischen Sockel E14, E27, GU10 und GU5.3 (Niedervolt). Aufgrund der für LED-Lampen ungünstigen Form weisen Retrofit-LEDs relativ grosse seitliche Kühlkörper auf. Aktuell sind Lampen bis ca. 8 Watt erhältlich. Mit steigender Effizienz der LED werden die Leistungen in 2 bis 3 Jahren etwa verdoppelt werden können. Den Glühlampenspots qualitativ gleichwertige Lampen kosten aktuell ca. 60 bis 250 Franken (5 Watt resp. 15 Watt); sie sind in Betrieben mit langen Betriebszeiten (>3'000 h/a) bereits heute wirtschaftlich.



Abbildung 15: Aktuell angebotene LED-Retrofits für Spotlampen

Bild	LED-Spot	ersetzt
1	Philips, 7 Watt, dimmbar (PAR16, GU10, 40°, 230V)	Halogenspot, 35 Watt, 230V
2	Osram, 5,5 Watt (R50, E14, 10°, 230V)	Glühlampenspot, 25 Watt, 230V
3	Osram, 5,5 Watt (PAR16, E27, 20°, 230V)	Halogenspot, 20 Watt, 230V
4	Onlux, 3.7 Watt (MR16, GU5.3, 35°, 12V)	Halogenspot, 35 Watt, 12V

5.2 Retrofit Classic Lampen

Retrofit Classic-Lampen haben die Form von klassischen Glühlampen. Bezüglich Kühlkörper gilt die gleiche Aussage wie bei den Spotlampen. Im Gegensatz zu den Spots sind Retrofit Classic-Lampen meist keine sinnvolle Alternative zu den Sparlampen, weil der Nutzungen der Lichtbündelung hier nicht zum Tragen kommt. Eine Retrofit-LED-«Glüh»-Lampe kostet aktuell auch ca. 50 bis 80 Franken. Die Kerzenlampe (ca. 20 Franken) könnte wegen des brillanten Lichts eine Ersatzlampe in Kronleuchtern sein.



Abbildung 16: Aktuell angebotenen LED-Retrofits für klassische Glühlampen

Bild	LED-Lampe	ersetzt
1	Philips, 7 Watt (Classic A, E27, dimmbar)	Glühlampe, 40 Watt
2	Osram, 8 Watt (Classic A, E27)	Glühlampe, 40 Watt
3	Cree, 8 Watt (Classic A, E27)	Glühlampe, 40 Watt
4	Osram, 2 Watt (Classic A, E14)	Kerzenlampe, 15 Watt

5.3 Lese- und Arbeitsleuchten

Bei den Leseleuchten werden die Vorteile der LED evident:

- Keine Wärmestrahlung
- Sofortstart
- Brillantes Licht
- Beleuchtungsstärke auf der Arbeits- oder Lesefläche > 1000 Lux
- Energieeinsparung Faktor 5 bis 10 gegenüber Glüh- oder Halogenlampe
- LED-Leseleuchten haben Leistungen zwischen 5 und 10 Watt
- Weniger «Elektrosmog» als bei Sparlampen, wenn Netzteil bei Steckdose.



Abbildung 17: Lese- und Arbeitsleuchten mit LED

Bild	LED-Leuchte	Ersetzt Leuchte mit Glühlampe
1	Zett von Baltensweiler, 5 Watt	Leseleuchte, 25 Watt
2	Solo von Mindspring, 8 Watt	
3	Leed von Tobias Grau, 10 Watt	Arbeitsleuchte, 40 Watt
4	Tolomeo micro LED (Artemide) 7 Watt	
5	Berenice Tavolo LED (Luceplan) 10W	Arbeitsleuchte, 60 Watt
6	Let von Baltensweiler, 9 Watt	

5.4 Downlights und Strahler

Im professionellen Bereich sind v.a. im Bereich von Strahlern und Downlights bereits Produkte auf dem Markt, die auch den Entladungslampen – ausser beim Anschaffungspreis – überlegen sind:

- Sofortstart
- Verlustfreie Dimmung
- Lange Lebensdauer (25'000 bis 50'000 Stunden)
- Sehr gute Farbwiedergabe (CRI ca. 90)



Abbildung 18: LED-Downlights und Strahler für Büro und Verkauf

Bild	LED-Leuchte	Ersetzt Leuchte mit
1	Downlight Crayon von Zumtobel, 12 W (650 Lumen, warmweiss)	Downlight mit Kompakt-FL 18 W oder Glühlampe 75 Watt
2	Downlight von Onlux.ch, 10 Watt (650 Lumen, warmweiss)	
3	Strahler PAL von Regent, 25 Watt (1000 Lumen, variabel 3000 bis 6000°K)	Ersetzt Halogen 75 Watt oder 20 Watt Halogenmetaldampflampe
4	Strahler Vivo von Zumtobel, 32 Watt (1150 Lumen, 4200 K)	Ersetzt Halogen 90 Watt oder 25 Watt Halogenmetaldampflampe

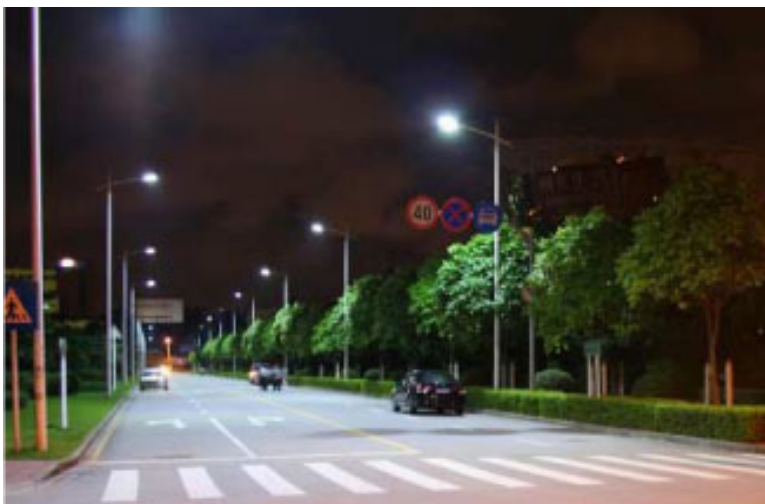
5.5 Weitere Produkte

Mit der Möglichkeit, zunehmend auch LED-Leuchten mit höheren Leistungen herzustellen, entstehen laufend weitere LED-Produkte. Bereits sind einzelne Typen folgender Kategorien verfügbar:

- Büro Stehleuchten: Die Firma Trilux bringt im Herbst 2009 eine 110-Watt Stehleuchte mit LED auf den Markt, welche alle lichttechnischen Anforderungen einer vergleichbaren 2x55 Watt- Stehleuchte mit Kompaktleuchtstofflampen erfüllt. Weitere Anbieter werden folgen.
- Pendelleuchten: verschiedene Produkte mit Leistungen um 20 Watt sind bereits erhältlich, z.B. die Pendelleuchte «LET» von Baltensweiler.
- Strassenleuchten: Osram hat verschiedene Pilotanlagen in China, Malaysia und Finnland gebaut; ein 108 Watt LED-Kandelaber ersetzt z.B. eine 250 Watt Natriumhochdrucklampe und sorgt für eine bessere Lichtqualität bei über 50% Energieeinsparung. Elektrizitätswerke in der Schweiz planen ähnliche Pilotanlagen. Eine erste LED-Strassenbeleuchtung mit 13 Leuchten hat das Elektrizitätswerk des Kantons Zürich am 9. Juni 2009 in Rüslikon in Betrieb genommen.



- Natriumdampflampen 250W
- oranges Licht
- orange Bäume
- schlechte Erkennbarkeit



- LED-Lampen 250W
- weisses Licht
- grüne Bäume
- gute Erkennbarkeit

Abbildung 19: Strassenbeleuchtungen in China (oben Natriumdampf, unten LED)

5.6 Wirtschaftlichkeit (Beispiel Retrofit)

Bei langen Betriebszeiten (> 3000 Stunden pro Jahr) lassen sich LED-Lampen bereits bei heutigen Preisen als wirtschaftliche Alternative zur Glühlampe einsetzen. In der folgenden Tabelle wird die Berechnung dargestellt. Allerdings muss auch gesagt werden, dass Sparlampen in diesem Fall noch wirtschaftlicher sind.

Lampentyp	Glühlampe CLASSIC 40 W	Sparlampen Ersatz 8 W	LED Ersatz CLASSIC 8 W
Anzahl der Brennstellen	1 Stück		
Lampenleistung	40 W	8 W	8 W
mittlere Lebensdauer	1 000 h	8 000 h	25 000 h
Brenndauer im Geschäft	3 500 h/a		
Lampenersatzkosten	1,30 €/St.	8,00 €/St.	37,00 €/St.
Wechselkosten / Brennstelle	2,00 €/St.		
Stromtarif	0,17 €/kWh		
CO ₂ -Faktor	0,5 kg CO ₂ /kWh		
Betriebsstunden*	7 000 h		
Anzahl Lampen*	8 Lampen	1 Lampe	1 Lampe
Lampenkauf und Wechselkosten	26,40 €	10,00 €	39,00 €
Stromverbrauch*	280 kWh	56 kWh	56 kWh
Stromkosten*	47,60 €	9,52 €	9,52 €
Gesamtkosten*	74,00 €	19,52 €	48,52 €
CO ₂ -Emission*	140 kg CO ₂	28 kg CO ₂	28 kg CO ₂

*) in 24 Monaten

Quelle: Osram-Katalog Herbst 2009, Beispiel aus Deutschland.
Sparlampenersatz vom Autor hinzugefügt.

6 Handlungsmöglichkeiten für das BFE und Dritte

Der Einzug der LED in der Beleuchtungstechnik und die zentrale Bedeutung bei künftigen Lichtenwendungen ist bei allen Fachleuten unbestritten. Um den Durchbruch der viel versprechende neue Lichttechnik zu unterstützen und Qualitätsprodukte und falsche Versprechungen klar differenzieren zu können, sollten in den nächsten Jahren von neutraler Seite begleitete Projekte durchgeführt werden; die Industrie würde dies sehr begrüßen.

- Normierung/Marktbeobachtung: Beobachtung der Arbeiten von europäischen und amerikanischen (ANSI) Normengremien und evtl. Mitarbeit in der neuen EUP für gerichtetes Licht; diese wird Anforderungen an Spotlampen definieren, welche auch für die meisten LED-Lampen relevant sind. Update der vorliegenden Untersuchung im 2010.
- Regelmässige Testmessungen in unabhängigen Labors; in der Schweiz bieten sich das Lichtmesslabor der Metas in Bern (für sehr genaue, aber auch kostspielige) oder das Messlabor der Hochschule Chur (für einfachere und schnellere Messungen) an; beide verfügen über die entsprechende Messeinrichtungen.
- Gute Beispiele: Beispiele von guten ausgeführten LED-Anlagen sollten dokumentiert und interessierten Kreisen zur Verfügung gestellt werden. Im Moment überlegen sich verschiedenste Bauherren, Pilotanlagen zu realisieren. Nicht alle sind gut beraten. Beispiele von Pilotanlagen bei Strassenbeleuchtung, Laden- und Shopbeleuchtung, Hotellerie + Restaurants.
- Leuchtenwettbewerb: Im Heimbereich sind v.a. Tisch- und Leselampen, aber auch bereits Wand- und Pendelleuchten sowie Spotlampen mit LED erhältlich; die Qualitätsunterschiede sind noch grösser als im professionellen Bereich, da aus Kostengründen häufig minderwertige LEDs verbaut werden. Ein Leuchtenwettbewerb könnte im Heimbereich helfen, das notwendige Qualitätsniveau bei einem Wechsel von Halogen zu LED sicherzustellen.
- Labeling: Verschiedene Organisationen diskutieren das Labeling von LED-Leuchten + Lampen: z.B. Minergie und Blauer Engel. Gutes Labeling ist sicher ein Mittel zur Qualitätssicherung in dem jungen und undurchschaubaren LED-Markt.
- Ratgeber (Internet und/oder Print): Der Stand der Dinge bei der LED-Technologie sollte im Moment in regelmässigen Abständen nutzerspezifisch und einfach verständlich aufbereitet werden, z.B. für Haushaltskonsumenten, Lichtgestalter, Leuchtenbauer, Grosseinkäufer, Verkaufspersonal. Für den Vertrieb empfiehlt sich die Zusammenarbeit mit den Elektrizitätswerken.
- Förderprogramme: Mit LED lässt sich wirtschaftlicher Strom sparen als mit Photovoltaik erzeugen. Zudem gehören diese zwei Technologien physikalisch zusammen; denkbar wäre evtl. eine Koppelung der Förderung von LED-Beleuchtung in Kombination mit der Förderung von Solarstrom. Auch eine Förderung im Rahmen der Gebäudesanierung, bei der Strassenbeleuchtung oder als Kaufanreize bei LED-Wohnleuchten wäre denkbar. Modelle müssten natürlich vertieft werden.

Welche Massnahmen im Rahmen der aktuell zur Verfügung stehenden Mittel vertieft und unterstützt werden können, muss geprüft und Prioritäten gesetzt werden.

7 Anhang

7.1 Hersteller Deklaration von LED-Modulen

Am Beispiel eines typische LED Moduls (Cree® XLamp® XR-E LED) können Herstellerdeklaration und Ableitung der effektiven Betriebsbedingungen illustriert werden. (Alle folgenden Abbildungen in diesem Kapitel beziehen sich auf dieselbe Produktreihe). Für den ausgewählten LED-Typ werden 16 verschiedenen Varianten (Bins) mit unterschiedlichen Farbtemperaturen bzw. Helligkeiten (=Energieeffizienz) angeboten.

Die Angaben in der Tabelle geben den Lichtstrom unter Standardbedingungen an:

- Chiptemperatur: 25°C
- Stromaufnahme: 350 mA
- Leistungsaufnahme 1.12 Watt (vergleiche Strom-Spannungs-Kennlinie)
- Ohne Netzteil

Color	CCT Range		Base Order Codes Min Luminous Flux (lm)		Order Code
	Min.	Max.	Group	Flux (lm)	
Cool White	5,000 K	10,000 K	P4	80.6	XREWHT-L1-0000-00901
			Q2	87.4	XREWHT-L1-0000-00A01
			Q3	93.9	XREWHT-L1-0000-00B01
			Q4	100	XREWHT-L1-0000-00C01
			Q5	107	XREWHT-L1-0000-00D01
Neutral White	3,700 K	5,000 K	N4	62.0	XREWHT-L1-0000-006E4
			P2	67.2	XREWHT-L1-0000-007E4
			P3	73.9	XREWHT-L1-0000-008E4
			P4	80.6	XREWHT-L1-0000-009E4
			Q2	87.4	XREWHT-L1-0000-00AE4
			Q3	93.9	XREWHT-L1-0000-00BE4
Warm White	2,600 K	3,700 K	N3	56.8	XREWHT-L1-0000-005E7
			N4	62.0	XREWHT-L1-0000-006E7
			P2	67.2	XREWHT-L1-0000-007E7
			P3	73.9	XREWHT-L1-0000-008E7
			P4	80.6	XREWHT-L1-0000-009E7

Abbildung 20: Hersteller Deklaration eines LED-Moduls mit 16 verschiedenen Bins

Die effizienteste kaltweisse LED (aus Gruppe Q5) hat also eine Lichtausbeute von 96 lm/W. Die warmweisse Variante (Gruppe P4) hat eine Lichtausbeute von 72 lm/W.

Wird die LED (Q5) mit 700mA beschickt, bei 80°C Chip-Temperatur beschickt und ein Netzteil mit einem Eigenverbrauch von 0,5 Watt verwendet sinkt die Lichtausbeute von **96 lm/W auf 51 lm/W**. Bei grösseren LED-Modulen ist der Anteil des Netzteiles kleiner! Die entsprechenden Umrechnungskurven (ohne Netzteil) sind nachfolgend abgebildet.

Aus der Strom-Spannungs-Kennlinie geht hervor, wie viel die LED für die oben deklarierten Lichtmengen an elektrischer Leistung aufnimmt.

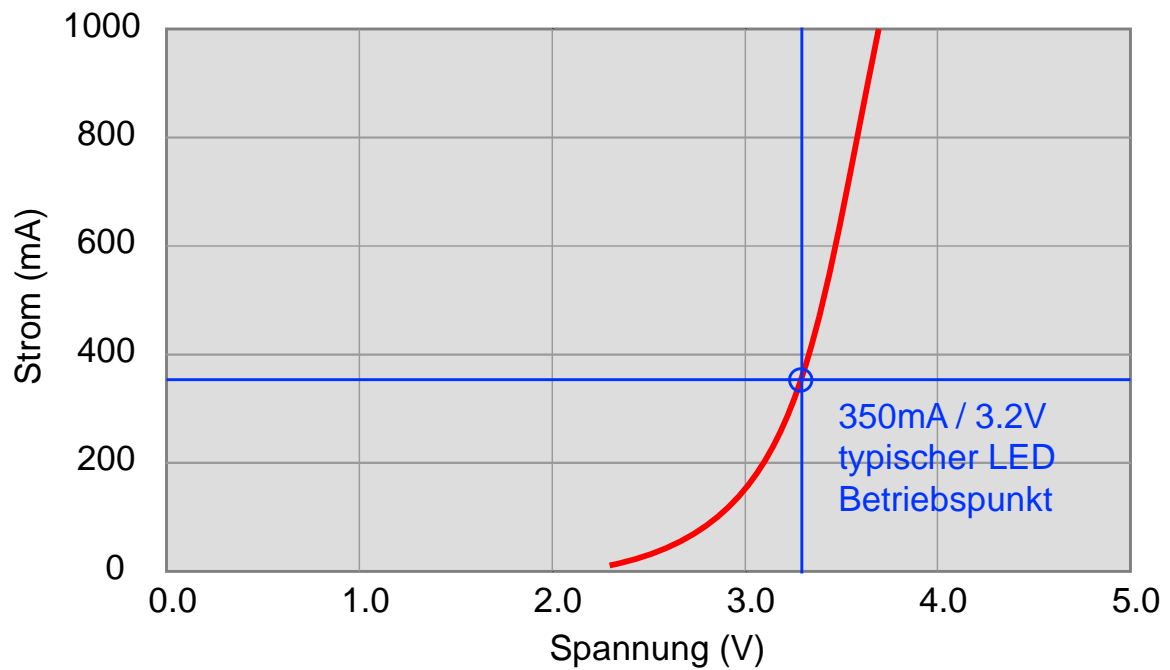


Abbildung 21: Strom-Spannungskennlinie einer typischen 1-Watt Power LED

Unter Betriebsbedingungen bei 80°C nimmt die Lichtausbeute etwa 15% ab.

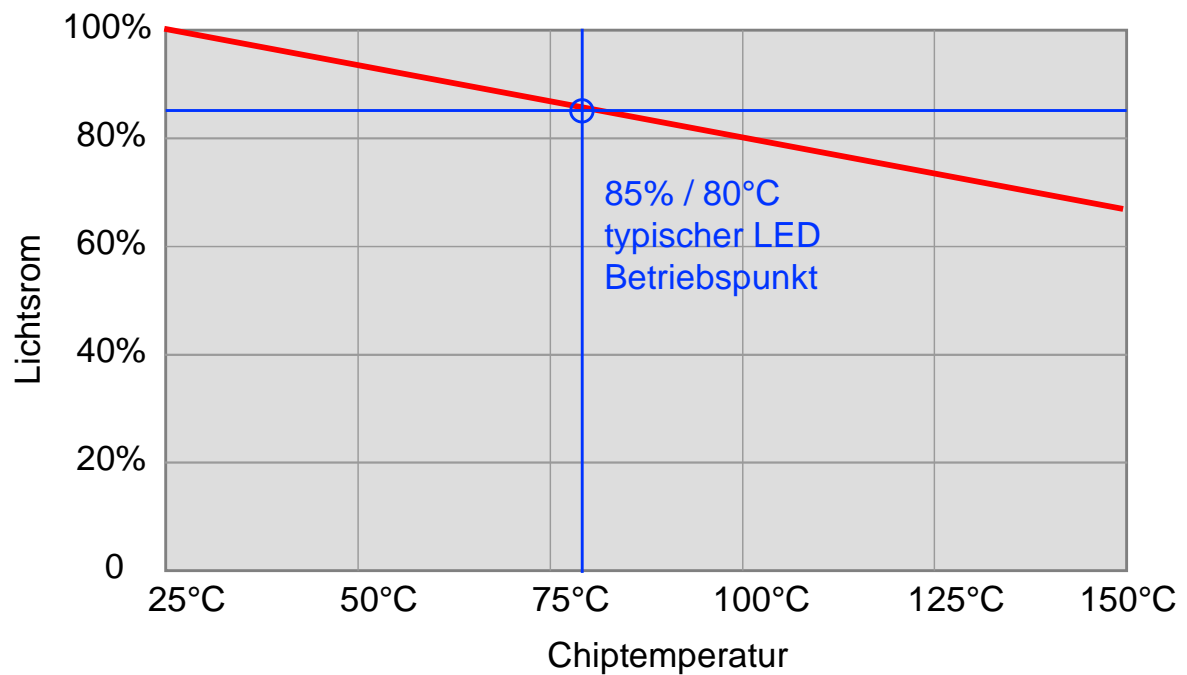


Abbildung 22: Reduktion der Lichtstroms bei Betriebstemperatur

Um Kosten zu sparen können LEDs auch mit höheren Strömen beschickt werden als dem Standardwert von 350mA. Dabei geht allerdings die Lichtausbeute zurück. Bei einem Strom von 700mA ist liegt die Energieeffizienz um 10% tiefer.

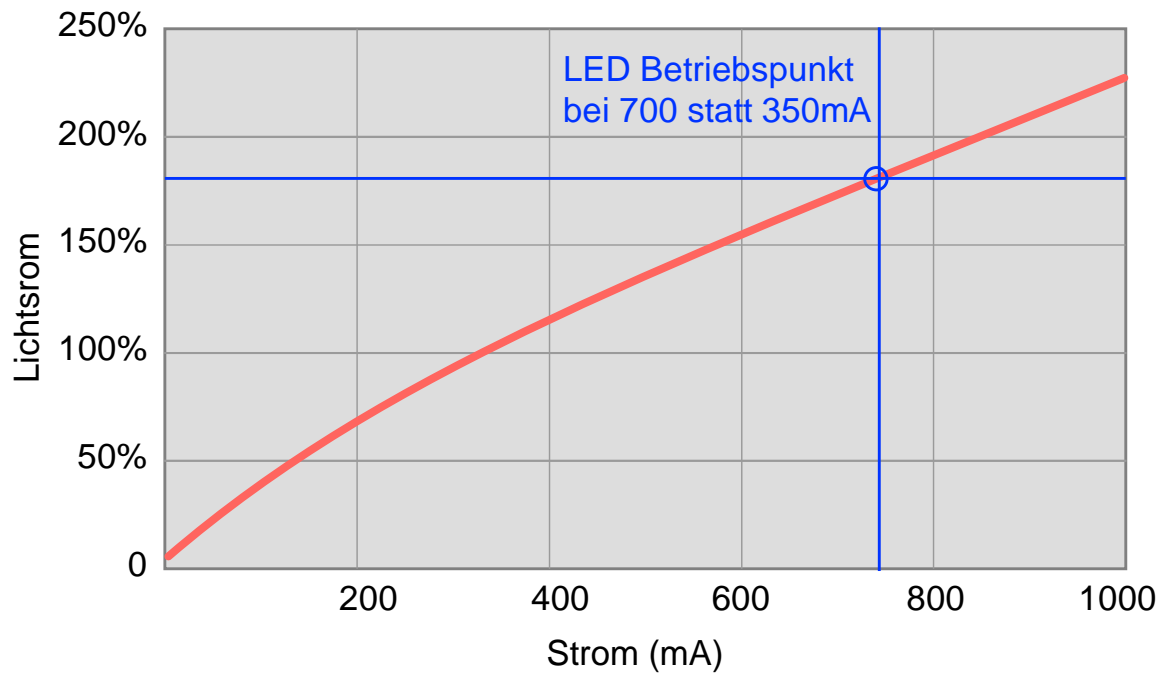


Abbildung 23: Lichtstromrückgang der LED bei höheren Strömen

Ganz wichtig für den Lampen- und Leuchtenhersteller ist, dass die maximale Chiptemperatur beim eingestellten Strom nicht überschritten wird. Bei 700mA Betriebsstrom ist bei einer Chiptemperatur von 80°C Schluss; oberhalb muss der Strom reduziert werden oder die LED wird zerstört.

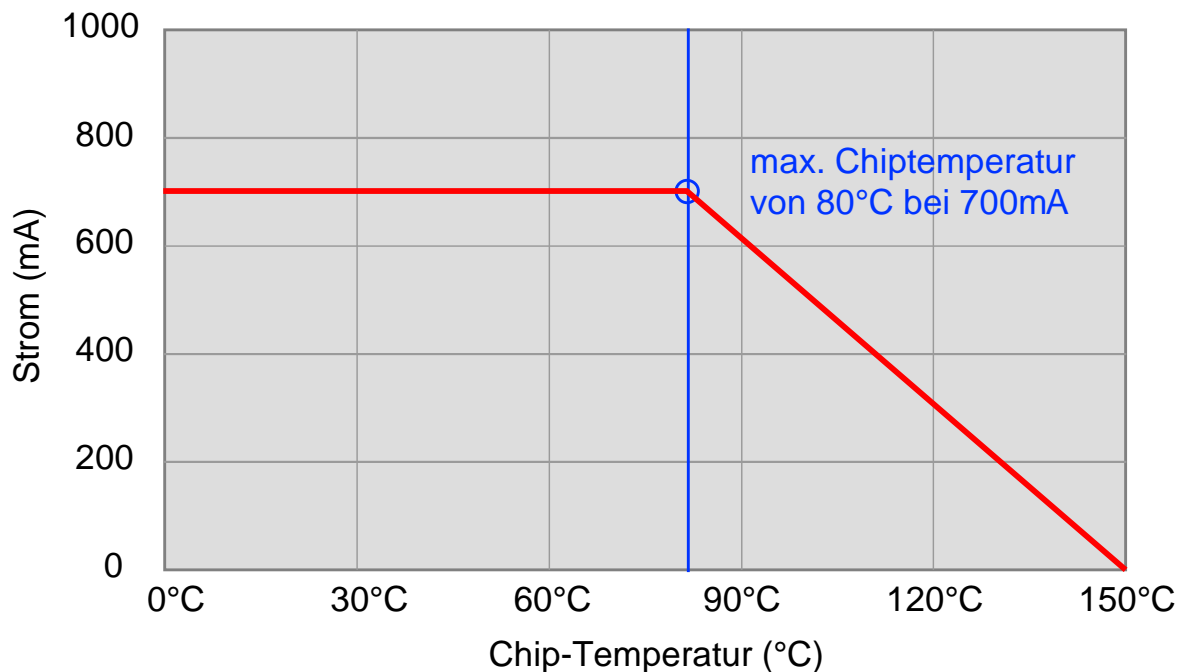


Abbildung 24: Maximal zulässige Chiptemperatur bei 700mA Betriebsstrom

7.2 EUP-Verordnung und Deklarationspflicht

Die EUP-Verordnung für «umweltgerechte Gestaltung von Haushaltslampen mit ungebündeltem Licht», die am 1.9.2009 in Kraft tritt, sieht neben dem Ausstieg aus der Glühlampentechnologie auch Vorschriften für die Deklaration von Lampen vor. Diese gilt allerdings momentan noch nicht für Spotlampen – viele LED-Lampen fallen also im Moment noch nicht unter die Deklarationspflicht. Die so genannten LED-Glühlampenersatzprodukte aber werden von der neuen Verordnung betroffen sein. Die Lücke bei der Deklaration von Lampen bei gerichtetem Licht (also Spotlampen) wird in einigen Jahren geschlossen sein.

Deklariert werden müssen ab 1.9.09

- Leistungsaufnahme (bereits bisher gemäss Energieetikette)
- Lichtstromabgabe (bereits bisher gemäss Energieetikette)
- Lampenlebensdauer
- Lampenlichtstromerhalt (Lichtstromrückgang mit der Alterung)
- Zahl der Schaltzyklen bis zum Ausfall
- Zündzeit
- Anlaufzeit (bis zur Erreichung 60% der Endhelligkeit)
- Ausfallrate (vorzeitiger Ausfall vor 200 Stunden)
- UV-Strahlung (UVA, UVB, UVC)
- Elektrischer Leistungsfaktor der Lampe
- Farbwiedergabeindex (Ra)

Für alle Kriterien sind Anforderungen definiert und Zeitpunkte, ab wann diese gelten. Nicht alle Angaben müssen auf den Lampenverpackungen angegeben werden, aber frei zugänglich im Internet verfügbar sein. Wenn eine entsprechende Deklaration auch mit gerichtetem Licht kommt, sind die Bedürfnisse an eine saubere Produktdeklaration von Lampen (inkl. LED) weitgehend erfüllt.

PARATHOM® CLASSIC A 15		OSRAM DULUXSTAR® Mini Twist	
Energy	-87 %	Energy	-80 %
t[h] ¹	25000 h = 25 years (= 2,7 h/day)	t[h] ¹	8000 h = 8 years (≈ 2,7 h/day)
lm/W	66 lm/W	lm/W	62 lm/W
Kelvin	3000 K = warm white	Kelvin	2700 K = warm comfort light
R _a	70	R _a	80
Quick light	0 s = 100 % light	Quick light	15 s = 60 % light
on/off	tbc	on/off	5000x
V · Hz	100-240 V~ · 50-60 Hz	V · Hz	220-240 V~ · 50-60 Hz
Hg	0,00 mg	Hg	2,5 mg
	E27		E27
www.osram.com/ledlamps		www.osram.com/energysaver	

Abbildung 25: Osram-Entwurf für Lampendeklaration ab Sept. 09, links LED, rechts Sparlampe (Es handelt sich nicht um Werte von effektiven Produkten)

7.3 Messreihe LED-Lampen HTW Chur

Retrofit-Lampen

Lampe	Deklarierte Lebensdauer (h)	Leistung (W)	Leistungsfaktor (-)*	Farbtemperatur (°K)	Farbwiedergabe (Ra)	Farbwiedergabe R9 =rot**
Osram PAR16 4W ww GU10	20'000	3.9	0.53	3'338	86	40
Osram PAR16 4W cw E14	20'000	3.9	0.53	5'533	77	5
Osram Classic A 2W ww E27	25'000	2.0	0.51	2'612	60	-67
Osram R50 6W ww E14	15'000	5.4	0.58	3'445	85	42
Philips PAR16 7W ww GU10	45'000	6.7	0.56	3'010	91	77
Philips Classic A 7W cw E27	45'000	6.7	0.56	3'919	66	-26
Philips PAR16 1W ww GU10	k.A.	0.4	0.13	3'419	79	21
Onlux PAR16 4W ww GU10	25'000	3.8	0.42	2'988	79	18
Noser PAR16 2W 4000K GU10	50'000	1.1	0.27	9'030	78	-8
Paulmann PAR16 1W ww GU10	50'000	1.0	0.22	3'047	68	-20
Conrad PAR16 2W ww GU10	k.A.	1.1	0.18	3'099	65	-31
Sparlampe zum Vergleich: IKEA, 11W, E27, ww	8'000	10.7	0.65	2'662 °K	82	-11

*) die EUP schreibt ab 1.9.08 für Sparlampen (<25 W) einen Wert von > 0.5 vor. Die fett markierten LED-Lampen erfüllen diese Normvorschrift nicht.

***) das gesättigte Rot (R9) liegt ausserhalb des normalen Ra für den Farbwiedergabeindex; der R9-Wert ist aber für die Wahrnehmung der «Wärme des Lichtes» signifikant; hier treten sehr grosse Unterschiede auf, auch bei Lampen mit an sich gutem Ra; vergleiche z.B. Philips PAR16 7W und Osram Classic A 2W. Je höher der Wert, desto besser; Maximum ist 100

Leuchten

Lampe	Deklarierte Lebensdauer (h)	Leistung (W)	Leistungsfaktor (-)*	Farbtemperatur (°K)	Farbwiedergabe (%)	Farbwiedergabe R9 =rot**
Baltensweiler Leseleuchte Zett (Modell 2008)	20'000	5.4	0.55	2'876 °K	87%	44
Baltensweiler Leseleuchte Zett (Modell 2004)	20'000	4.8	0.55	6'642 °K	80%	-9
Zumtobel Downlight Creyon 650lm	50'000	12.1	0.93	2'721 °K	93%	63
Regent Strahler PAL Farbmodulation: kaltweiss	50'000	24.3	0.99	5'809 °K	88%	51
Regent Strahler PAL Farbmodulation: warmweiss	50'000	26.3	0.98	2'818 °K	91%	85
Zum Vergleich: Stehleuchte Halogen 300W	2'000	285	1.00	2'734 °K	97%	88

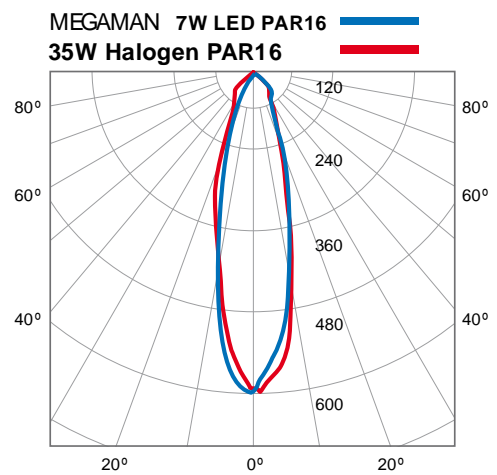
*) die EUP schreibt ab 1.9.08 für Sparlampen (<25 W) einen Wert von > 0.5 und für Lampen über 25 W einen Wert < 0.9 vor.

***) das gesättigte Rot (R9) liegt ausserhalb des normalen Ra für den Farbwiedergabeindex; der R9-Wert ist aber für die Wahrnehmung der «Wärme des Lichtes» signifikant; hier treten sehr grosse Unterschiede auf, auch bei Lampen mit an sich gutem Ra.

7.4 Messungen neuer LED Spots der Firma Megaman

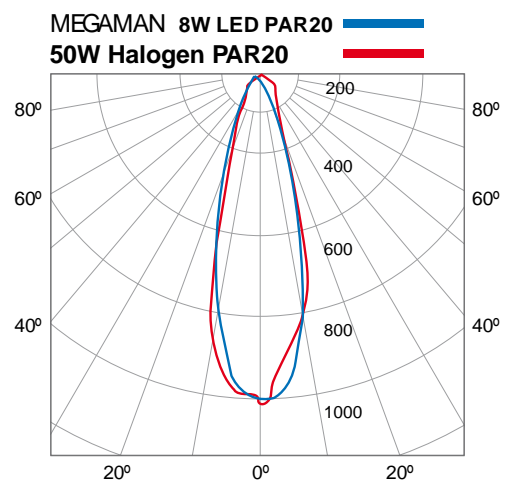
Megaman 7W PAR16 (Durchmesser 55mm) ersetzt 35W Halogen

Farbtemperatur 2800K, Lichtstärke 600 cd, Abstrahlwinkel 35°, Farbwiedergabe = 95%



Megaman 8W PAR20 (Durchmesser 65mm) ersetzt 50W Halogen

Farbtemperatur 2800K, Lichtstärke 1000 cd, Abstrahlwinkel 35°, Farbwiedergabe = 95%



Megaman 15W PAR30 (Durchmesser 95mm) ersetzt 75 bis 100 W Halogen

Farbtemperatur 2800K, Lichtstärke 2800 cd, Abstrahlwinkel 24°, Farbwiedergabe = 95%

