

# **„Lichttechnische Grundlagen für die Praxis“**

**Zusammengestellt und bearbeitet von Prof. Dr.-Ing. Peter Marx**

**info@mx-electronic.com**

**[www.mx-electronic.com](http://www.mx-electronic.com)**

| <b>Inhalt</b>                                   | <b>Seite</b> |
|---|--------------|
| Historie der Lichtquellenentwicklung            | 3            |
| Elektromagnetische Strahlung                    | 6            |
| Licht und Sehen                                 | 3            |
| Licht- und Strahlungsgrößen                     | 29           |
| Licht- und Farbe                                | 47           |
| Licht- und Farbmessung                          | 53           |
| Messung photometrischer Größen                  | 75           |
| Lichtquellen                                    | 111          |
| Elektronische Betriebsgeräte für Lichtquellen   | 124          |
| Messung elektrischer und thermischer LED-Größen | 133          |
| Planung von Beleuchtungsanlagen                 | 138          |
| Berechnung der Lichtausbeute der Sonne          | 144          |
| Literatur und Normen                            | 153          |

# **Historie der Lichtquellenentwicklung**

## **Lichtquellen des Menschen bis 1800**

- \* Kienspan, Kerze , Öle und Fette

## **Zeit der Lichterzeugungstechnik von 1800 bis 1925**

- \* ca. 1800 Erfindung der Petroleumlampe
- \* Gasbeleuchtung wurde mit der Erfindung des Gasglühstrumpfes 1886  
signifikant verbessert
- \* Praktische Anwendung der Glühlampe ab 1881 durch Thomas Edison,  
ab 1889 industrielle Fertigung

**Anmerkung:** Als Edison begann, die Glühlampe zu entwickeln, war die damalige Wissenschaft davon überzeugt, dass es unmöglich sei, brauchbare elektrisch betriebene Lichtquellen herzustellen. Glücklicherweise kannte Edison, als talentierter Autodidakt ohne höhere Schul- und Universitätsausbildung diese damals anerkannte - **leider aber falsche Lehrmeinung** – nicht!

Als seine Entwicklung erfolgreich war, gab es einen langen Kampf gegen die Gaslicht-Lobby, teilweise bis in unsere Tage, siehe z.B. die vielen Gasleuchten in Berlin, aber schließlich zeigte sich, dass das Bessere der unerbittliche Feind des Guten ist. Ähnliche Kräfte sind heute sicher auch gegen die E-Mobilität wirksam.

## **Zeit der Lichterzeugungstechnik von 1925 bis 1950**

Güteanforderungen werden gestellt, neben den physikalischen sind auch physiologische und psychologische Kenntnisse für die Lichttechnik notwendig

- \* 1932 Quecksilberhochdrucklampen und Natriumniederdrucklampen
- \* 1938 Leuchtstofflampen

## **Zeit der Leuchtdichtetechnik ab 1950**

Beleuchtungsanlagen werden auf der Basis der Leuchtdichte geplant und berechnet

- \* 1958 Halogenglühlampen
- \* 1964 Halogen-Metalllampen
- \* 1965 Natriumdampf-Hochdrucklampen
- \* 1980 Kompakt-Leuchtstofflampen
- \* 2000 Hochleistungs-Leuchtdioden (LED)

## **Elektromagnetische Strahlung**

Das sichtbare Licht liegt im Spektrum der elektromagnetischen Schwingungen zwischen der ultravioletten Strahlung (UV) und der infraroten Strahlung (IR).

### **Die UV-Strahlung wird unterteilt in die Bereiche**

UV-C (100 nm ...280 nm),

UV-B (280 nm...315 nm) und

UV-A (315 nm...380 nm).

### **Die IR-Strahlung wird unterteilt in die Bereiche**

IR-A (780 nm...1400 nm),

IR-B (1400 nm...3000 nm) und

IR-C (3  $\mu\text{m}$ ...1000  $\mu\text{m}$ ).

Die elektromagnetische Strahlung, die im Auge eine Helligkeitsempfindung hervorruft, bezeichnet man als Licht. Die Lichtquanten haben entsprechend ihrer Frequenz  $\nu$  die Energie

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Ws}^2$$

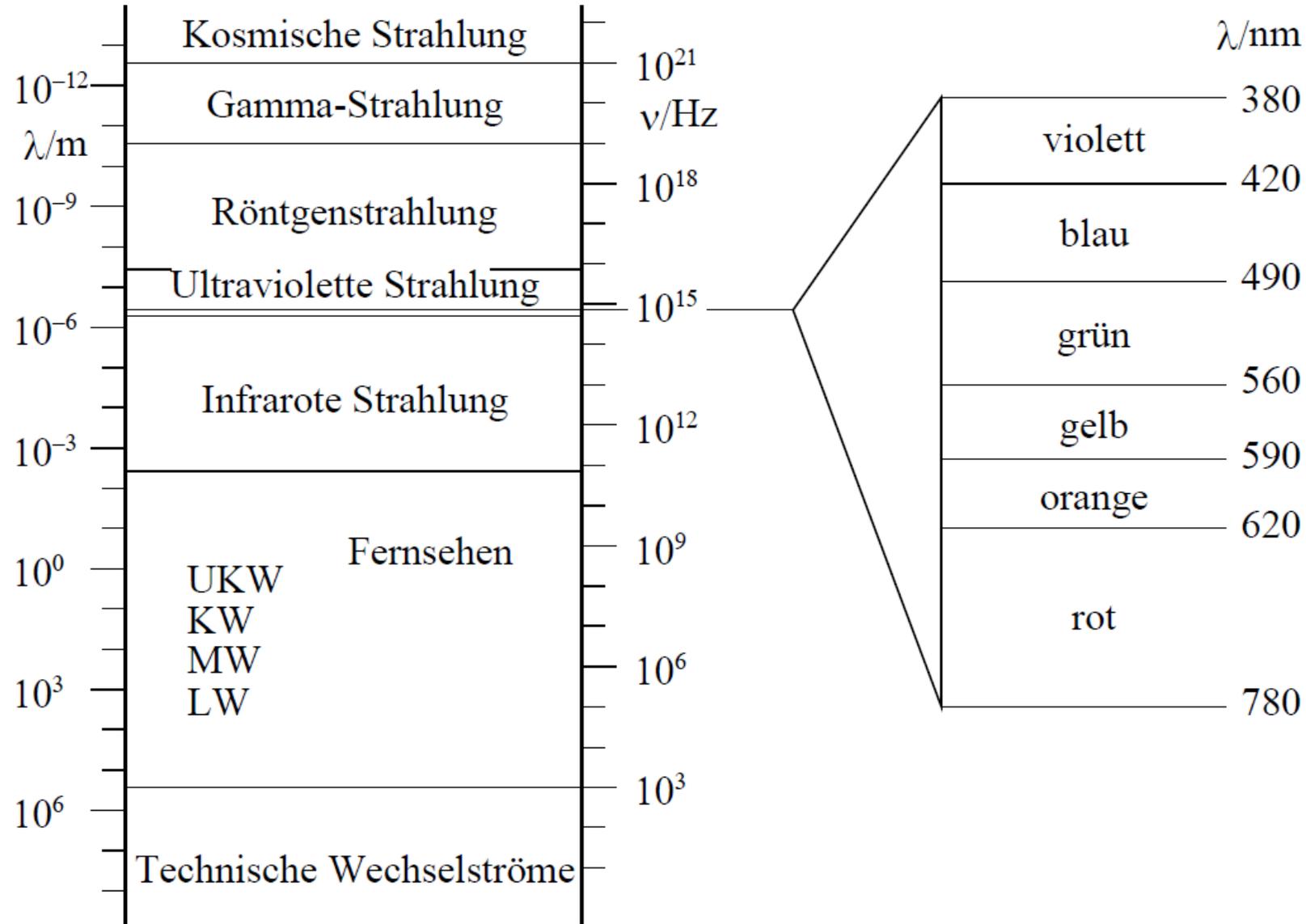
Plancksches Wirkungsquantum

$\nu$  = Frequenz

$$c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

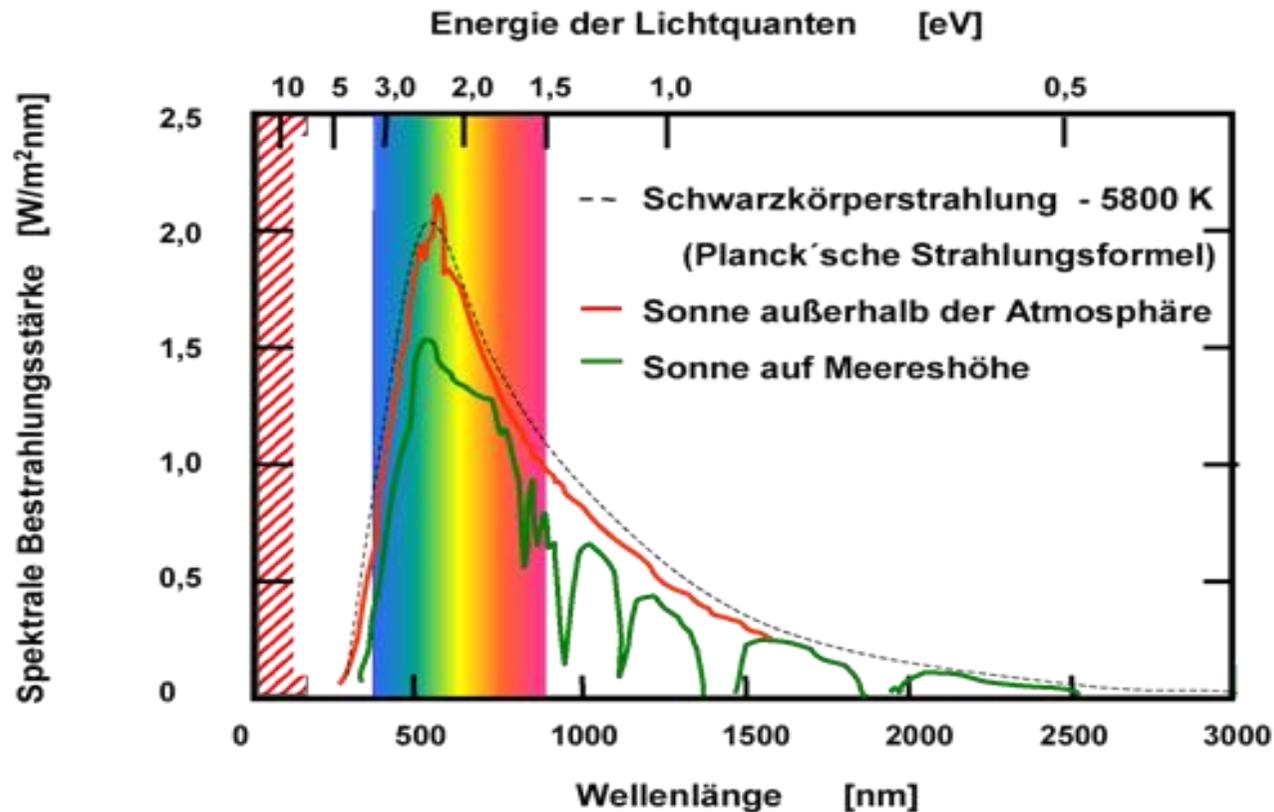
Lichtgeschwindigkeit

$\lambda$  = Wellenlänge



**Spektrum der elektromagnetischen Schwingungen**

# Physiologische Grundlagen



[Quelle: K. Wendt et al, Institut für Physik, Johannes Gutenberg-Universität Mainz]

# Sonnenstrahlung

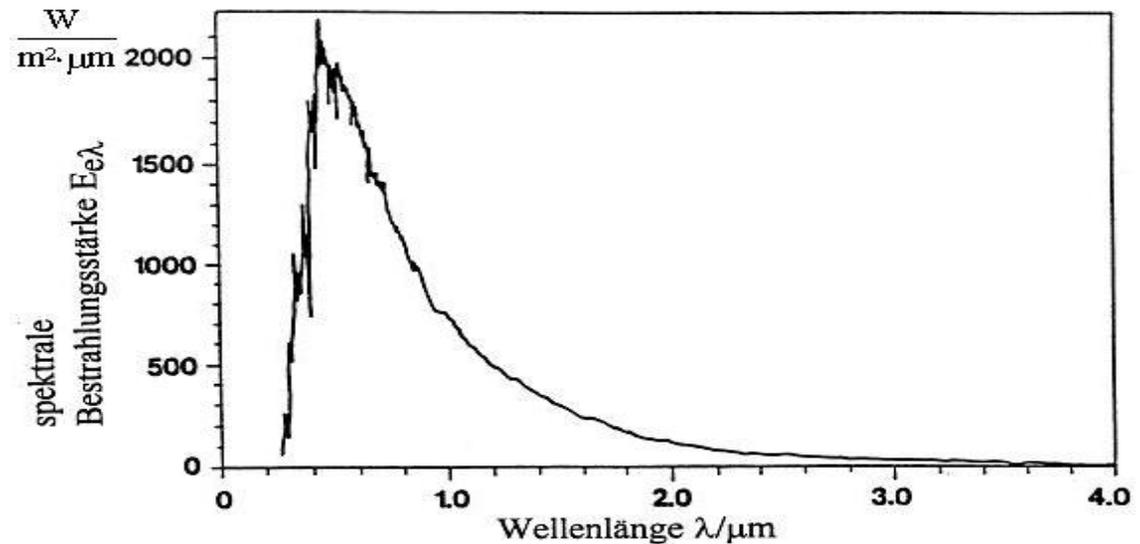


## Extraterrestrische Bestrahlungsstärke

- 1.400 W/m<sup>2</sup>

## Bestrahlungsstärke auf der Erdoberfläche

- 1.000 W/m<sup>2</sup>



# Physikalische Strahlungsbewertung

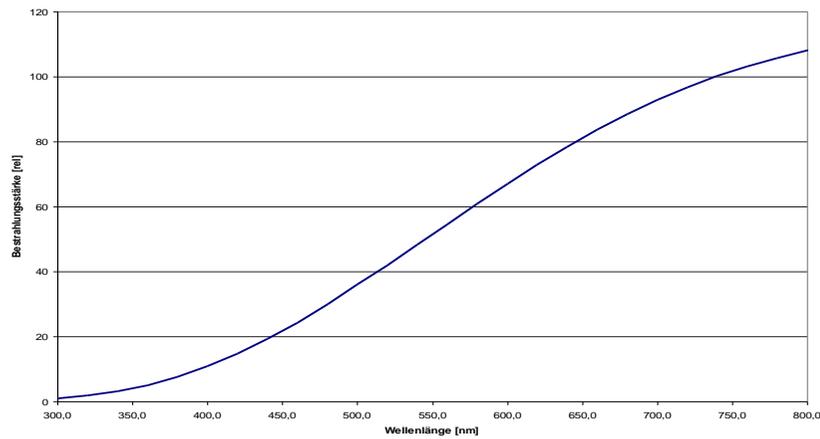


## Strahlung

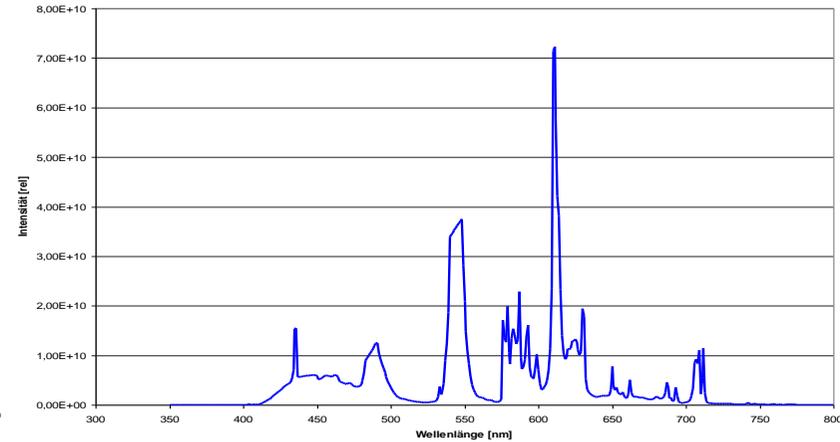
- monochromatische Strahlung
- Kontinuumsstrahlung

## Spektrum

### Glühlampe



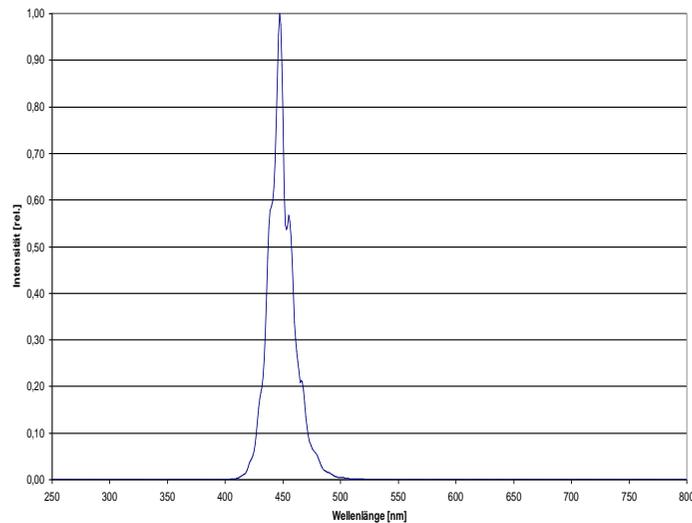
### Leuchtstofflampe



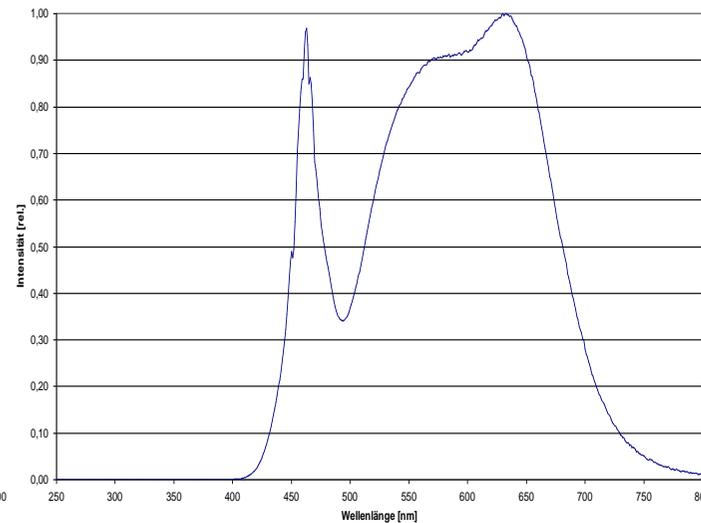
## LED - Strahlung

- Weitgehend monochromatische Strahlung
- Erzeugung von weissem Licht durch Leuchtstoffe oder Mehrchip-Farbmischung

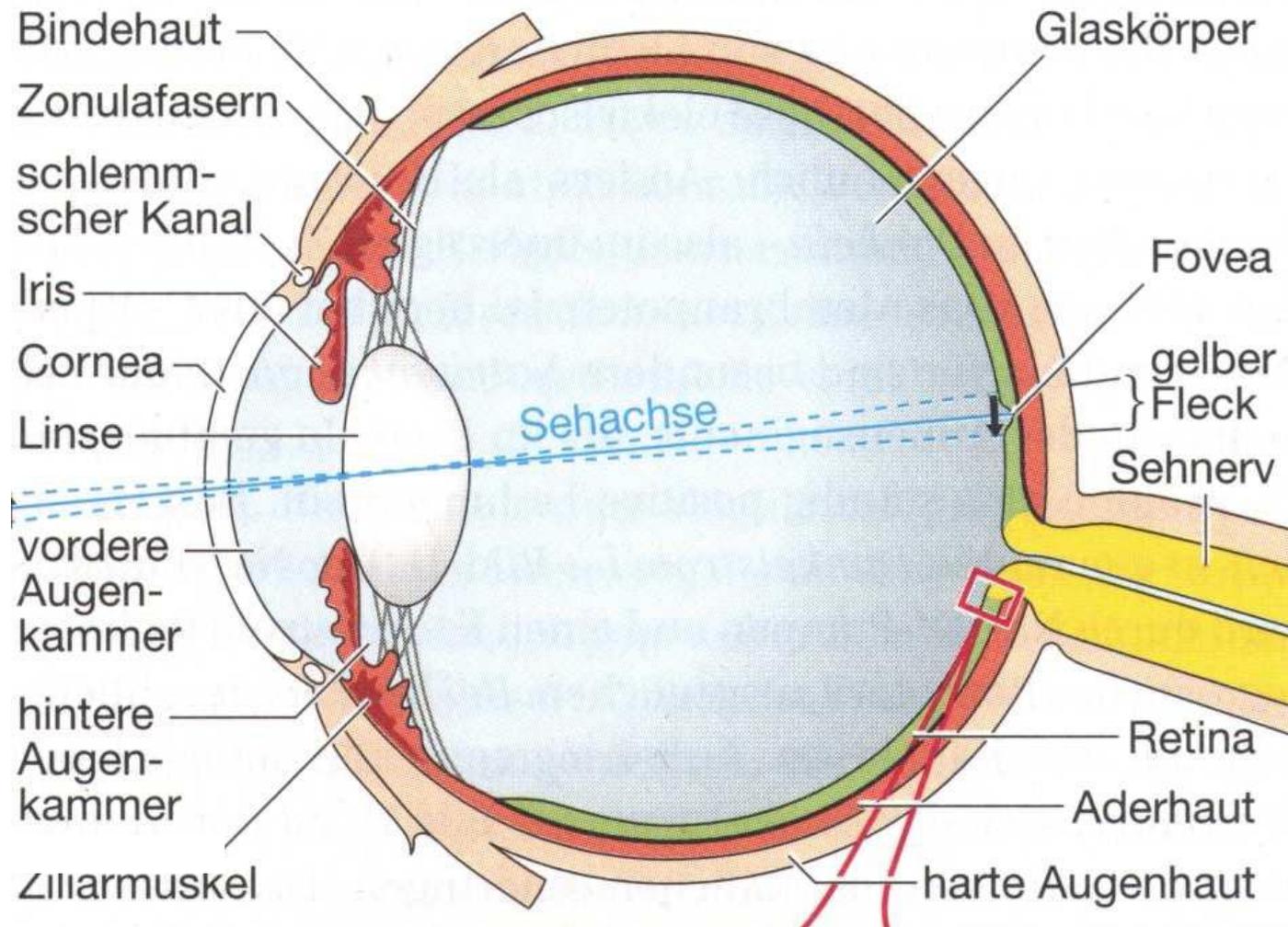
Lumiled LED royalblau



Lumiled LED warmweiss



## Licht und Sehen (physiologische und psychologische Grundlagen)



Das Sehen ist der wichtigste Sinn des Menschen. 80% der Umweltinformationen nimmt der Sehtüchtige über die Augen auf.

### Aufbau des Auges

Der Durchmesser des Augapfels beträgt beim Erwachsenen etwa 25 mm. Die dingsseitige Brechkraft (Reziprokwert der Brennweite) beträgt durchschnittlich 58 Dioptrien ( $1\text{dpt} = 1/\text{m}$ ), die Brennweite ist damit 17 mm.

### Hornhaut:

Sie ermöglicht, auf der Netzhaut ein Bild zu erzeugen.

### Augenkammer:

Sie ist mit Kammerwasser gefüllt, das der Linse beim Akkomodieren auf unterschiedliche Gegenstandsweiten den nötigen Bewegungsspielraum gibt.

### Linse:

Mit dem veränderlichen Krümmungsradius hat sie eine variable Brechkraft.

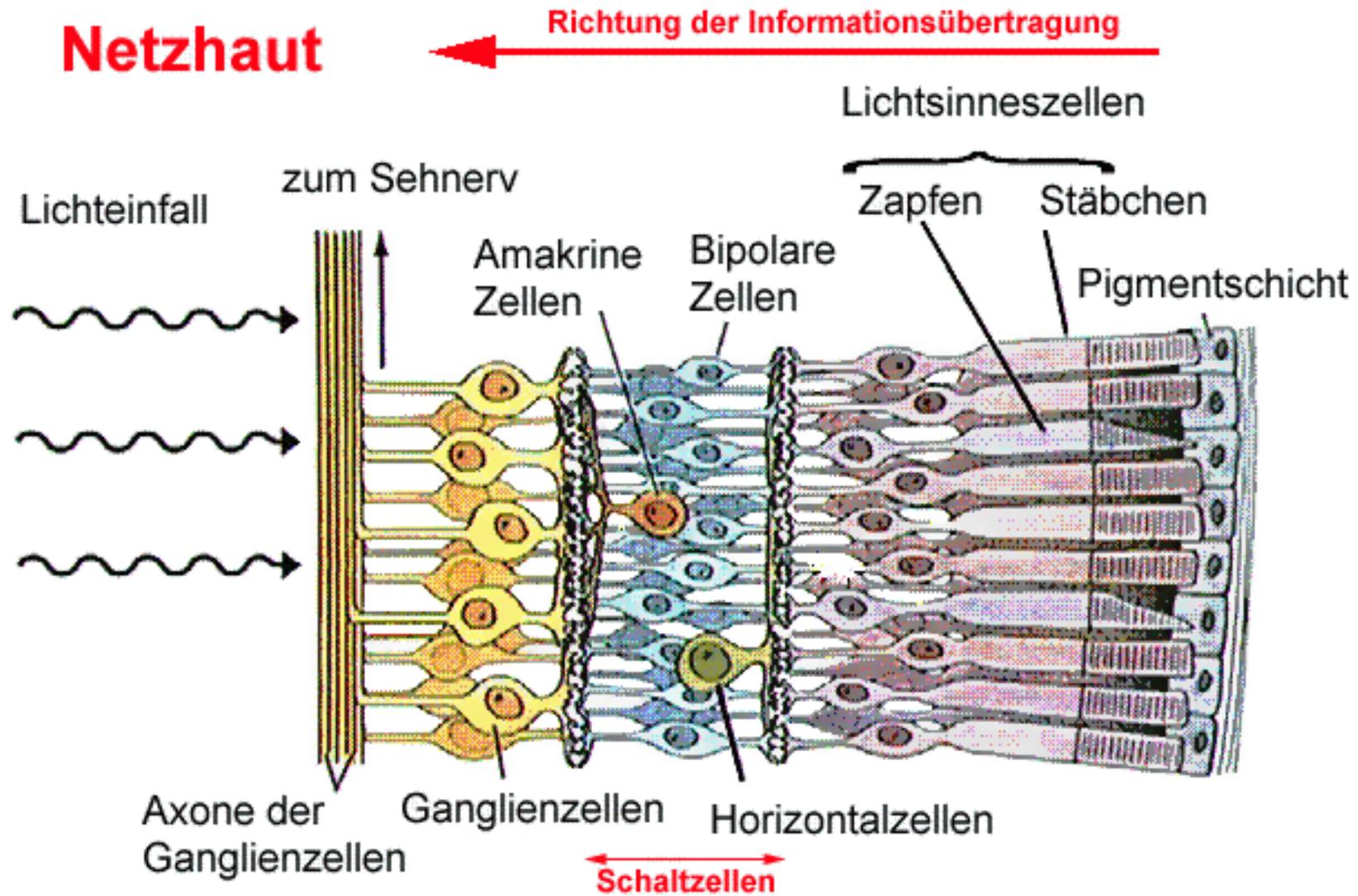
### Glaskörper:

Er ist ebenfalls durchsichtig und dient zur Stabilisierung des Augapfels.

### Netzhaut:

Sie ist der Träger der Empfangsorgane für die Lichtreize. Die 100 Millionen Stäbchen (farbuntüchtig) dienen für das Nachtsehen (skotopischer Leuchtdichtebereich  $< 0,001 \text{ cd/m}^2$ ) und die 5 Millionen Zapfen ermöglichen das farbige Tagessehen (photopischer Leuchtdichtebereich  $> 10 \text{ cd/m}^2$ ), dazwischen liegt das Dämmerungssehen mit Stäbchen und Zapfen (sog. mesopischer Leuchtdichtebereich).

# Netzhaut





## Physiologische Grundlagen

### Nachtsehen

- Stäbchen
- Anzahl: 100.000.000

### Zapfenarten

- L-Typ rot 570 nm
- M-Typ grün 540 nm
- S-Typ blau 430 nm

### Tagsehen

- Zapfen
- Anzahl: 5.000.000
- Rot : Grün : Blau  
4 : 16 : 1



Das Gesichtsfeld reicht in der Senkrechten von etwa  $120^\circ$  bis  $140^\circ$  und in der Horizontalen mehr als  $180^\circ$ . Die Hellempfindlichkeit beginnt bei Lichtreizen von  $10^{-6} \text{ cd/m}^2$  die abhängig von der spektralen Zusammensetzung des Lichts wahrgenommen werden.

## Adaptation:

Anpassung an variable Leuchtdichte durch Iris-Blende und Netzhaut.

Das Auge kann sich einem Leuchtdichtebereich vom  $10^{-6}$  cd/m<sup>2</sup> bis  $10^5$  cd/m<sup>2</sup> anpassen. Gute Sehleistungen werden zwischen  $10^2$  cd/m<sup>2</sup> und  $10^4$  cd/m<sup>2</sup> erreicht. Die Dunkel-Hell-Anpassung erfolgt schnell. Die Hell-Dunkel-Anpassung erfolgt in 0,1 s; volle Zapfenadaptation wird erst nach einigen Minuten erreicht, volle Stäbchenadaptation erst nach einer Stunde.

## Sehschärfe

Sie ist die Eigenschaft, zwei eng benachbarte Linien getrennt wahrzunehmen. Dabei ist sie von der Leuchtdichte abhängig und nimmt bei älteren Menschen ab.

### Akkommodation:

Durch Veränderung der Brennweite der Linse können verschieden weit entfernte Gegenstände scharf auf der Netzhaut abgebildet werden. Bei Nahsicht ist die Linse kugelig (Jugendliche bis 10 cm, 50-jährige etwa 50 cm) bei Weitsicht flacht sie ab.

### Abberation:

Bei seitlichem Lichteinfall wird das Licht entsprechend den unterschiedlichen Wellenlängen in der Linse gebrochen und führt so zur Unschärfbildung auf der Netzhaut (siehe auch Lichtbrechung beim Prisma).

### Farbwahrnehmung:

Ab einer Leuchtdichte von  $L > 0,003 \text{ cd/m}^2$  (Reizschwelle) können Farben von den Zapfen wahrgenommen werden.

Eine eindeutige Farberkennung ist ab  $L > 3 \text{ cd/m}^2$  möglich. Beste Farbunterscheidung wird ab  $L > 100 \text{ cd/m}^2$  erreicht.

### Farbton:

Der Farbton ist die Eigenschaft der Farbe, ob sie rot, grün, blau usw. empfunden wird.

### Farbsättigung:

Die Farbsättigung bestimmt, ob eine Farbe gesättigt oder blass erscheint.

### Farbhelligkeit:

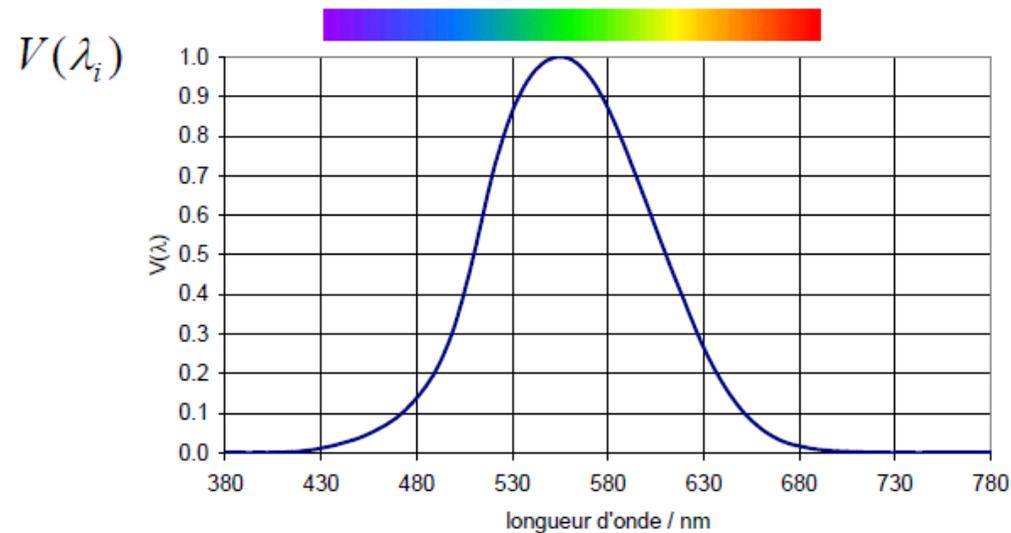
Die Farbhelligkeit entspricht der Leuchtdichte in  $\text{cd/m}^2$ .

Im Leuchtdichtebereich von  $16 \text{ cd/m}^2$  bis  $3200 \text{ cd/m}^2$  können etwa 160 Farbtöne unterschieden werden. Das Auge arbeitet integrierend. Diese Eigenschaft wird beim Farbfernsehen und beim Farbfilm auf der Basis der drei Grundfarben Rot, Grün und Blau ausgenutzt.

Farbblindheit, die teilweise oder vollständig auftreten kann, stört das Farbempfinden oder es fehlt ganz. Rot-Grün-Blindheit ist häufig, Blindheit ist eher selten.

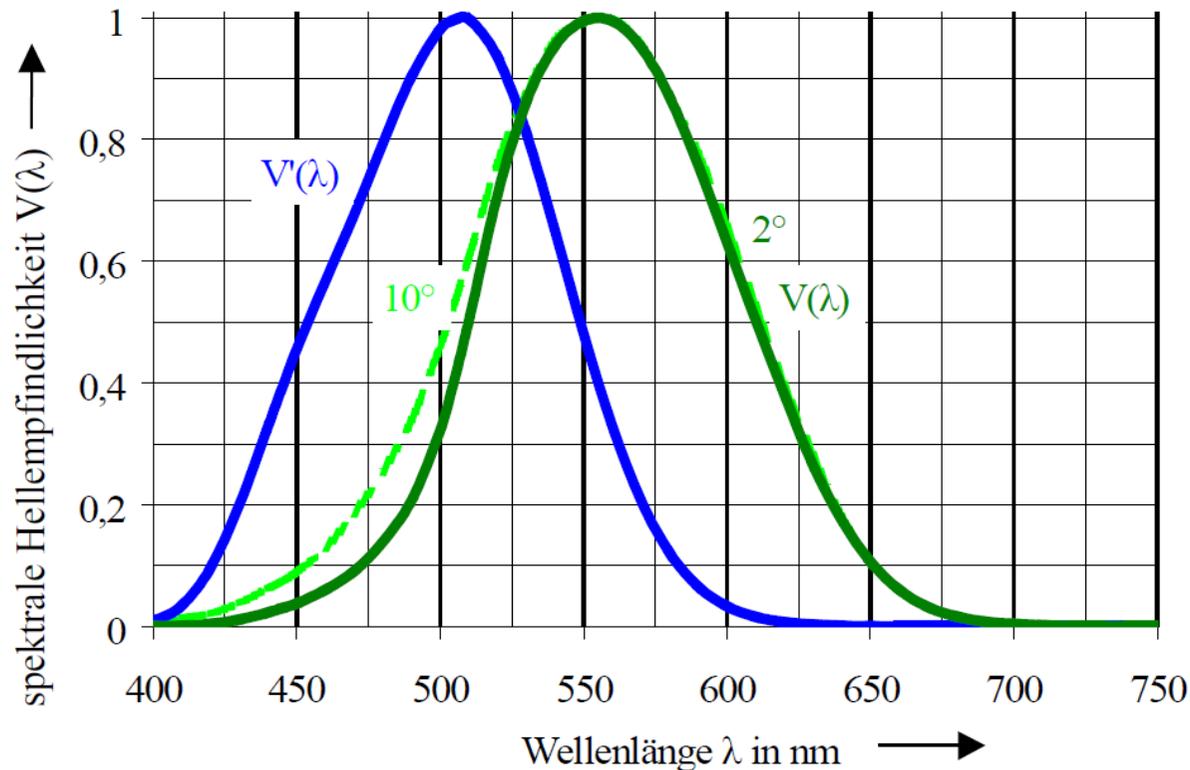
Eine besondere Bedeutung für die Beleuchtungstechnik hat die spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges, die sog.  $V(\lambda)$ -Kurve. Diese gilt für das helladaptierte Auge ab Leuchtdichtewerten  $>10 \text{ cd/m}^2$ .

### Spektrale Hellempfindlichkeitsgrad (Tagessehen)



- Standardisiert durch die CIE (CIE S010:2004)
  - Hellempfindung bei 640 nm ist nur noch 15% der Hellempfindung bei 555 nm
  - Ein Photometer muss dieselbe Hellempfindlichkeit besitzen
-

Im blaugrünen Bereich besteht ein Unterschied zwischen dem 2°- und dem 10°- Gesichtsfeld (Tagsehen). Die  $V'(\lambda)$ -Kurve des dunkeladaptierten Auges gilt für Adaptationsleuchtdichten  $L < 0,001 \text{ cd/m}^2$  (Nachtsehen).



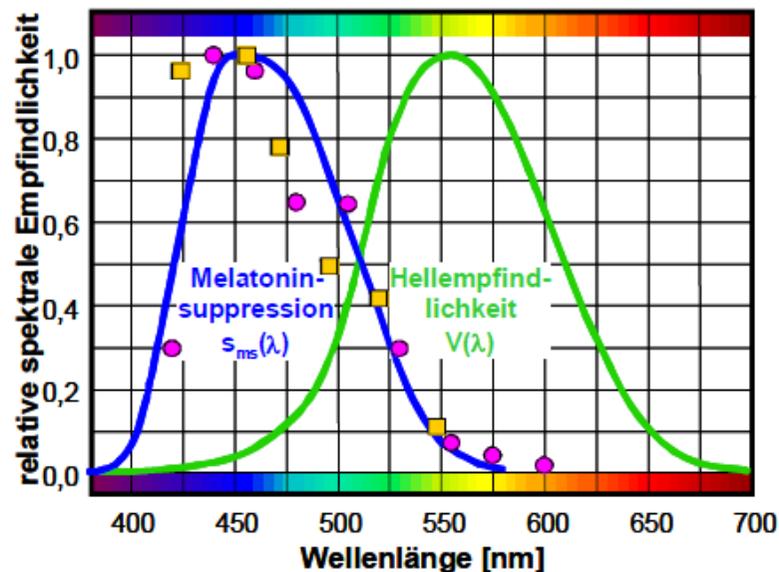
**Hellempfindlichkeitskurven des menschlichen Auges nach DIN 5031**

## Das circadiane System

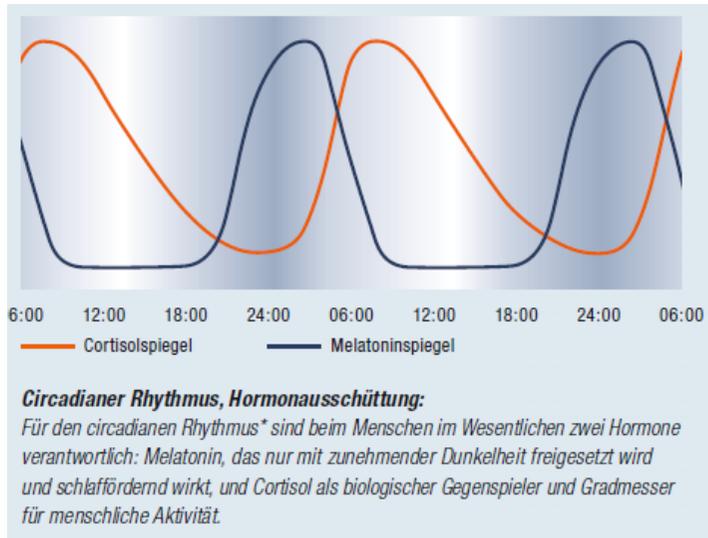
Circadiane Rhythmik ([*circa*] lat. ungefähr / [*dies*] lat. der Tag

Licht steuert unsere innere Uhr, d.h. den Tag- und Nachtrhythmus.

Winterdepression und Müdigkeit am Tag werden durch die Bildung von Melatonin im menschlichen Körper beeinflusst. Die Steuerung der Melatoninproduktion erfolgt durch bestimmte blauempfindliche Rezeptoren (circadiane Sensoren), die sich wie die für das Sehen notwendigen Zapfen und Stäbchen ebenfalls in der menschlichen Netzhaut befinden.

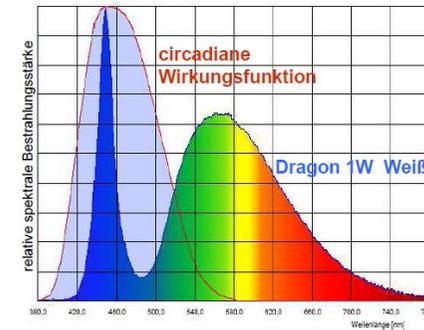


Wirkungsspektrum für Melatonin-Suppression (-Unterdrückung)



## Circadiane Bewertung von LED Spektren

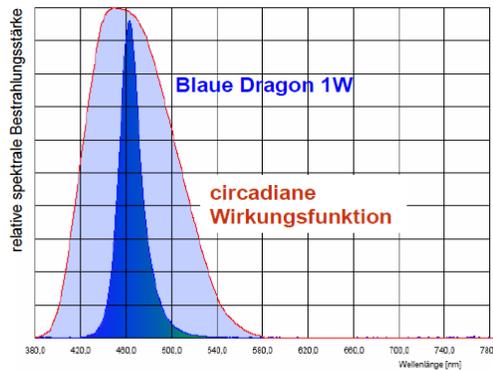
DIN Deutsches Institut für Normung e. V.



Beispiel 1:  
 Dragon 1W, Weiß,  
 $T_n = 4500\text{K}$   
 $a_{cv} = 0,56$   
 Vergleichbar mit LL  
 bei 4500 K

## Circadiane Bewertung von LED Spektren

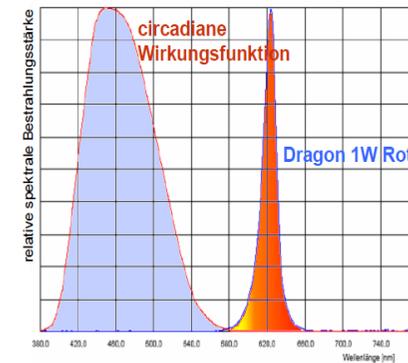
DIN Deutsches Institut für Normung e. V.



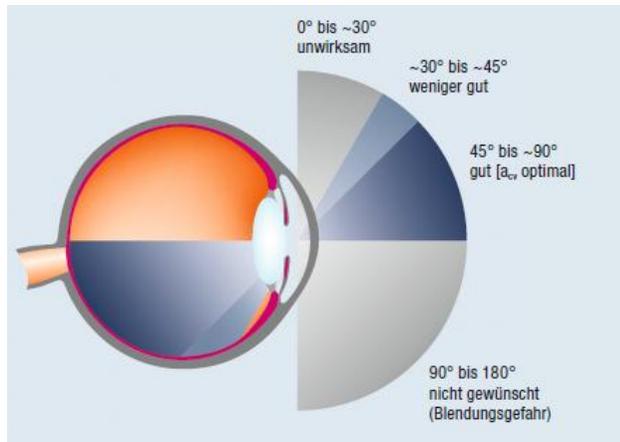
Beispiel 2:  
 Dragon 1W, Blau,  
 $(T_n = 190000\text{K})$   
 $a_{cv} = 9,8$   
 sehr starke  
 biologische Wirkung

## Circadiane Bewertung von LED Spektren

DIN Deutsches Institut für Normung e. V.



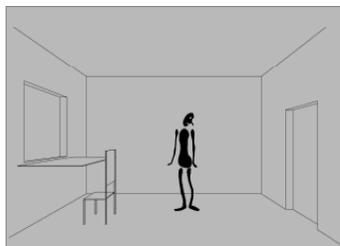
Beispiel 3:  
 Dragon 1W, Rot,  
 $(T_n = 2500\text{K})$   
 $a_{cv} = 0,001$   
 keine biologische  
 Wirkung



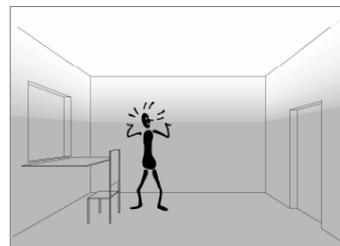
**Biologische Lichtwirkung über das menschliche Auge:**  
 Entscheidend für eine aktivierende Wirkung des Lichts sind neben der Lichtfarbe auch eine großflächige Lichtquelle (indirekte Beleuchtung) und der richtige Einfallswinkel der Lichtstrahlen ins Auge.

## Folgerungen für biologisch wirksame Leuchtdichten im Raum

DIN Deutsches Institut für Normung e. V.



Leuchtdichteverteilung im Raum  
ungünstig  
für  $a_{cv}$ -Rezeptorenwirkungsgrad

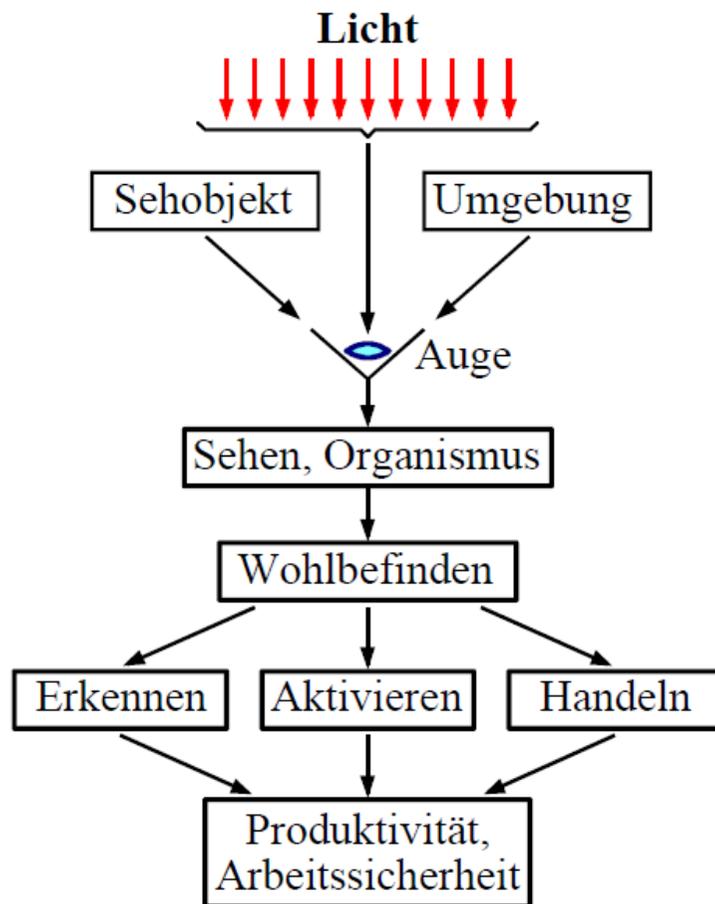


Leuchtdichteverteilung im Raum  
günstig  
für  $a_{cv}$ -Rezeptorenwirkungsgrad



**Licht beeinflusst unseren Körper:**  
 Tageslicht mit hohem Blauanteil wirkt aktivierend und konzentrationsfördernd, denn es stimuliert die Rezeptoren im Auge und damit das Steuerzentrum unseres Gehirns sehr viel stärker als Licht mit höheren Rotanteilen.

## Einfluß der Beleuchtung auf den arbeitenden Menschen



Beleuchtung beeinflusst die Arbeitsbedingungen und kann zu Leistungssteigerungen genutzt werden. Die Beleuchtungsstärke muss den Tätigkeiten angepasst sein. Stark sehabhängige Tätigkeiten benötigen hohe Beleuchtungsstärken.

**Einfluss der Beleuchtung auf den arbeitenden Menschen**

| E / lx               | 100 | 200  | 500  | 1000 |
|----------------------|-----|------|------|------|
| einfache Tätigkeit   | 0   | 5 %  | 8 %  | 10 % |
| schwierige Tätigkeit | 0   | 20 % | 35 % | 45 % |

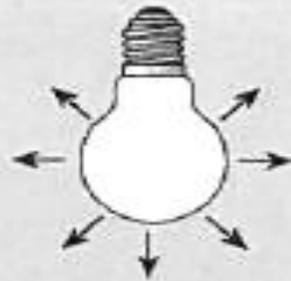
**Leistungssteigerung gegenüber einer Beleuchtungsstärke von  $E = 100$  lx**

# Licht- und Strahlungsgrößen

| Physikalische Größe                     | Einheit                        | Lichttechnische Größe         | Einheit                |
|---|--------------------------------|-------------------------------|------------------------|
| Strahlungsmenge<br>(Strahlungsenergie)  | $W \cdot s$                    | Lichtmenge                    | $lm \cdot s$           |
| Strahlungsfluss<br>(Strahlungsleistung) | $W$                            | Lichtstrom                    | $lm$                   |
| Spezifische Ausstrahlung                | $W \cdot m^{-2}$               | Spezifische Lichtausstrahlung | $lm \cdot m^{-2}$      |
| Strahlstärke                            | $W \cdot sr^{-1}$              | Lichtstärke                   | $cd, lm \cdot sr^{-1}$ |
| Strahldichte                            | $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$ | Leuchtdichte                  | $cd \cdot m^{-2}$      |
| Bestrahlungsstärke                      | $W \cdot m^{-2}$               | Beleuchtungsstärke            | $lx$                   |
| Bestrahlung<br>(Energiedichte)          | $W \cdot m^{-2} \cdot s$       | Belichtung                    | $lx \cdot s$           |

**Lichtstrom**  
Lumen (lm)

**Lichtausbeute**  
Lumen/Watt (lm/W)

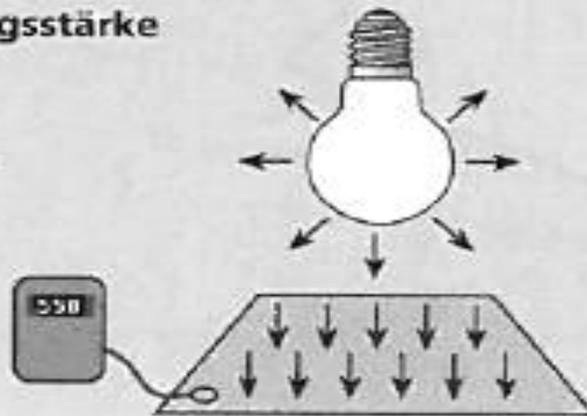


**Lichtstärke**  
Candela (cd)



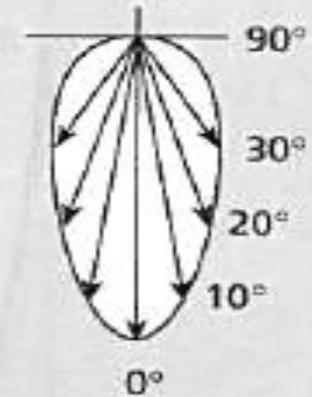
**Beleuchtungsstärke**  
Lux (lx)

$$= \frac{\text{Lumen}}{\text{m}^2}$$



|               | Glühlampe<br>60W                                  | Leuchtstofflampe<br>58W                            |
|---------------|---|--|
| Lichtstrom    | 730lm   | 5200lm   |
| Lichtausbeute | $\frac{730\text{lm}}{60\text{W}} = 12\text{lm/W}$ | $\frac{5200\text{lm}}{58\text{W}} = 90\text{lm/W}$ |

Lichtverteilungskurve zur Charakterisierung der Lichtausstrahlung z.B. bei Reflektorlampen

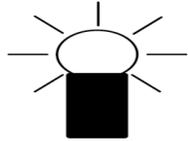


Auftreffendes Licht pro Fläche, z.B.:

|                                     |        |
|-------------------------------------|--------|
| Baustelle                           | 20lx   |
| Büro                                | 500lx  |
| Fußballstadion (farbfernsehgerecht) | 1000lx |

## Grundgrößen - Lichtstrom

---



**Name:** Lichtstrom  
**Einheit:** Lumen [ lm ]  
**Zeichen:**  $\Phi$  [ Phi ]

$$\Phi = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

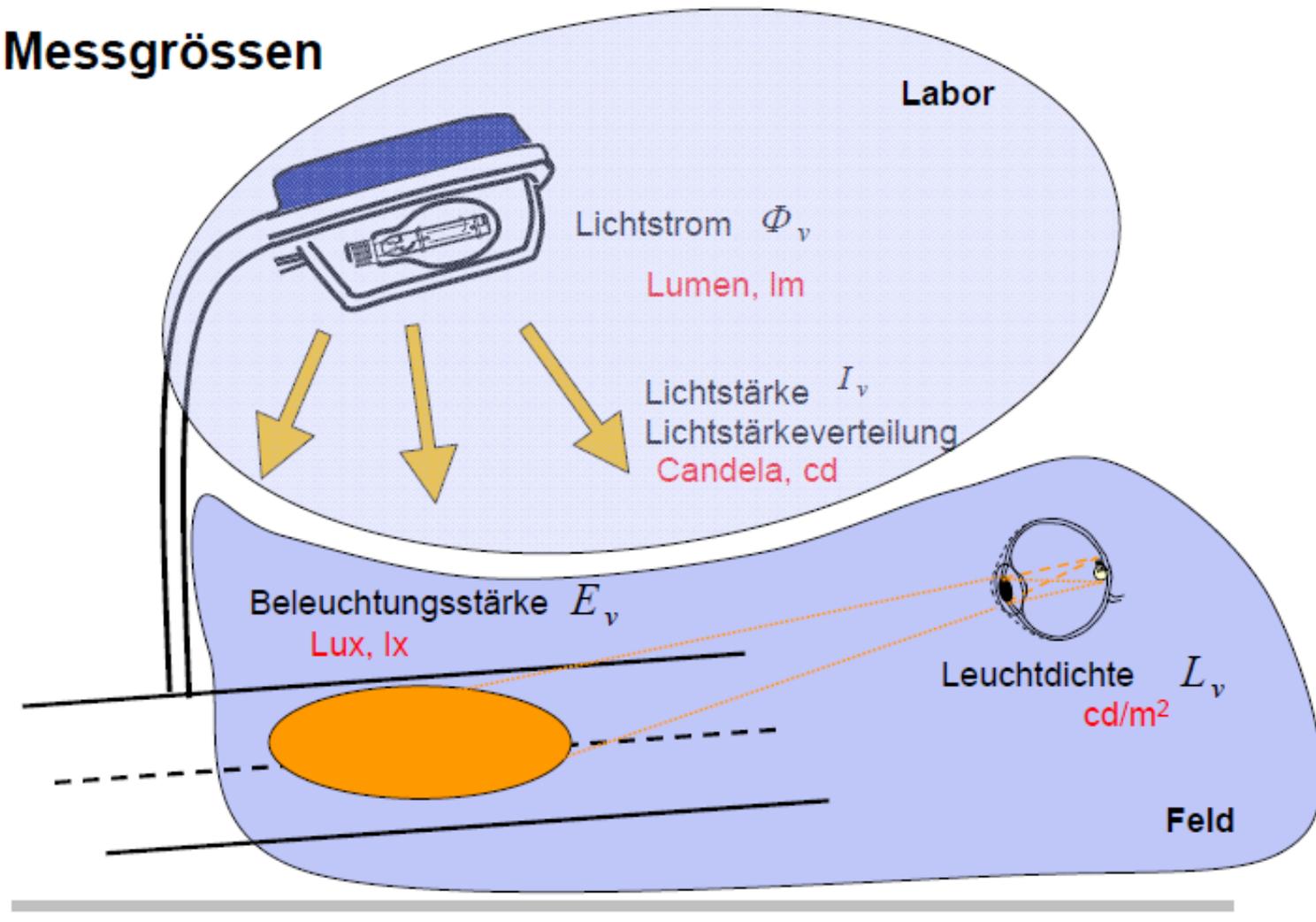
**Maximales photometrische Strahlungsäquivalent**

$$K_m = 683 \text{ lm/W}$$

$$\Phi = \int_{4\pi \text{ sr}} E(\vartheta, \varphi) dA$$

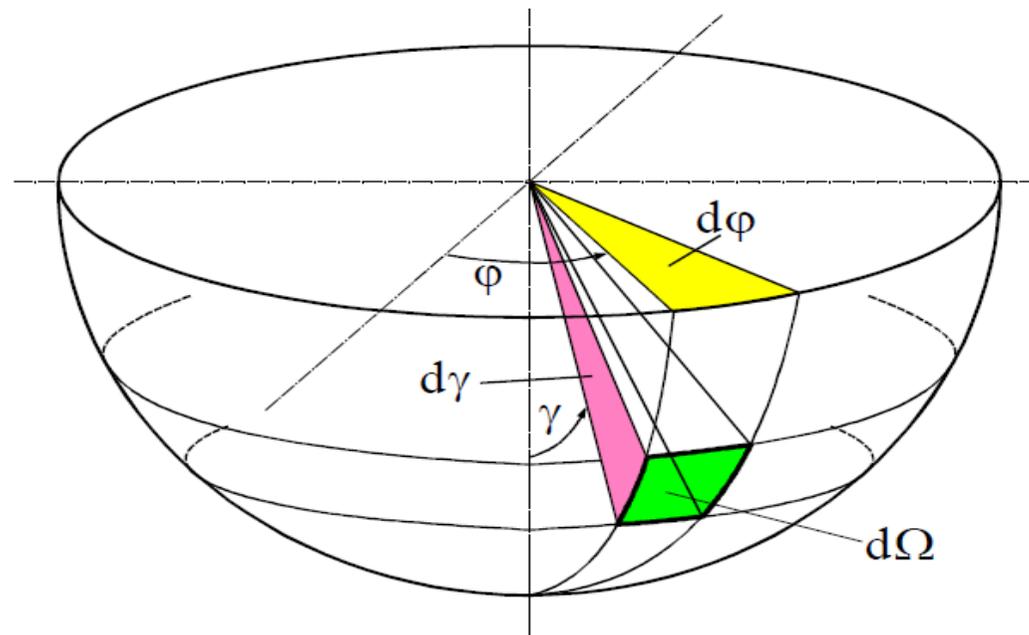
$$\Phi = \int_{4\pi \text{ sr}} I(\vartheta, \varphi) d\omega$$

## Messgrößen



Der Raumwinkel  $\Omega$  ist als Quotient eines Teils der Kugeloberfläche  $A_K$  zum Quadrat des Kugelradius definiert.

$$d\Omega = \frac{dA_K}{r^2} \cdot \Omega_0 \quad (1.4)$$

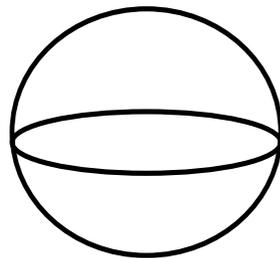


**Darstellung zum Raumwinkel**

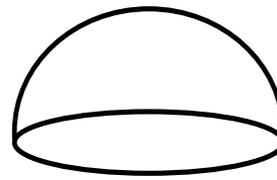
## Raumwinkel, Zahlenwerte



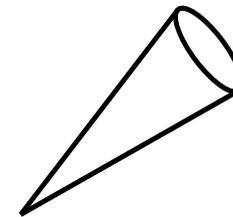
|                                      |                   |
|--------------------------------------|-------------------|
| Vollraum                             | $4\pi \text{ sr}$ |
| Halbraum                             | $2\pi \text{ sr}$ |
| Kreiskegel mit $\alpha=32^\circ 46'$ | $1 \text{ sr}$    |



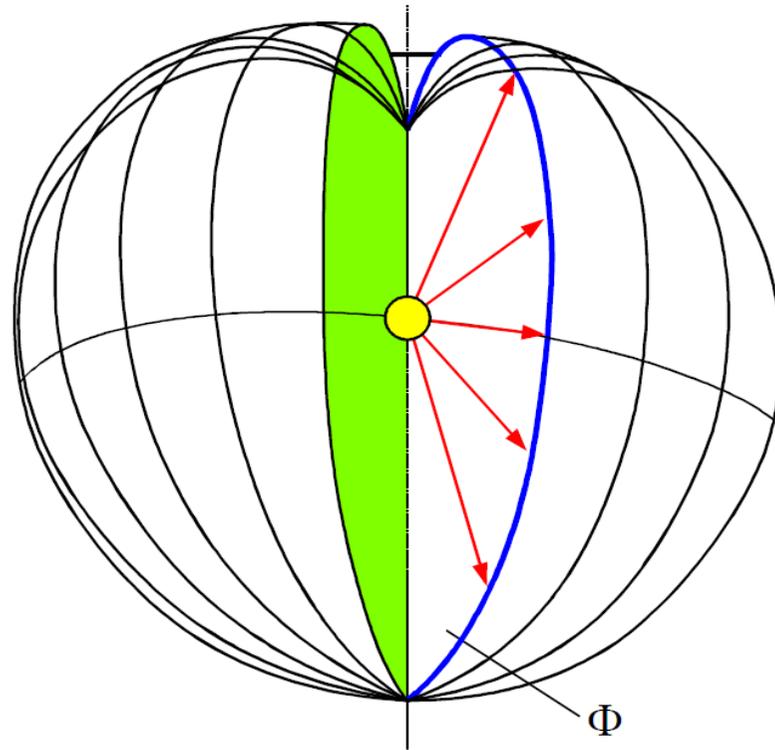
$4\pi \text{ sr}$



$2\pi \text{ sr}$



$1 \text{ sr}$



**Darstellung des Lichtstromes  $\Phi$   
und seine Verteilung**

## Lichtstromwerte einiger Lichtquellen

Glühlampe            100 W:  $\Phi = 1380 \text{ lm}$ , d.h. 13,8 lm/W

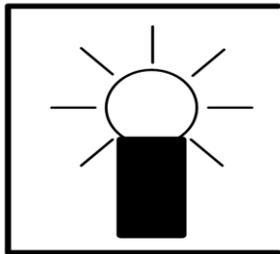
Leuchtstofflampe 58 W:  $\Phi = 5200 \text{ lm}$ , d.h. 90 lm/W

Power-LED            10 W:  $\Phi = 1200 \text{ lm}$ , d.h. 120 lm/W

Interessant sind auch die Angaben

lm/€            und            lm•h/€

## Grundgrößen - Lichtstärke



**Name:** Lichtstärke

**Einheit:** Candela [ cd ]

**Zeichen:** I

**Name:** Raumwinkel

**Einheit:** Steradian [ sr ]

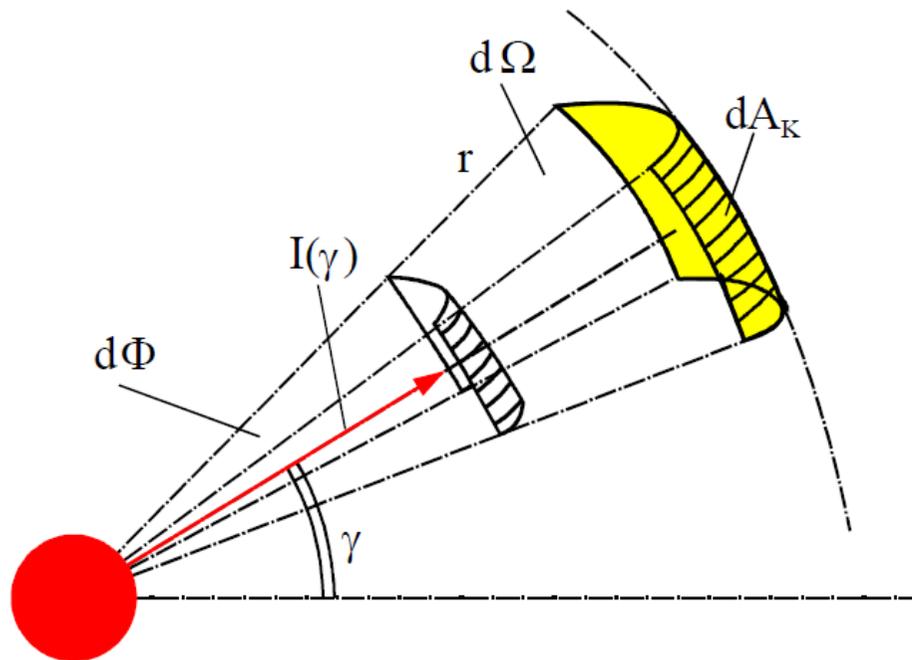
**Zeichen:**  $\omega$  [ Omega ]

$$I = \frac{\Phi}{\omega}$$

## Lichtstärke I

Die Lichtstärke I mit der Einheit Candela (cd) ist der Quotient aus Lichtstrom und Raumwinkel:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (1.11)$$



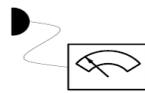
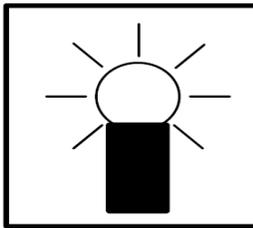
Die Angabe der Lichtstärke ist nur bei (nahezu) punktförmigen Lichtquellen sinnvoll.

### Lichtstärkedefinition

Die Einheit Candela (Kerze) ist die Grundeinheit der Beleuchtungstechnik. Als Grundeinheit im SI-System ist sie definiert:

- **1 Candela entspricht der Strahlungsleistung von 1/683 Watt einer monochromatischen Strahlung der Frequenz von  $540 \cdot 10^{12}$  Hz.**

## Grundgrößen - Beleuchtungsstärke



**Name:** Beleuchtungsstärke

**Einheit:** Lux [ lx ]

**Zeichen:** E

$$E = \frac{\Phi}{A}$$

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \varepsilon$$

## Beleuchtungsstärke E

Die Beleuchtungsstärke E mit der Einheit Lux (lx) ist der Quotient aus Lichtstrom und beleuchteter Fläche. Für die ebene Fläche gilt:

$$E = \frac{d\Phi}{dA_2} \quad (1.12)$$

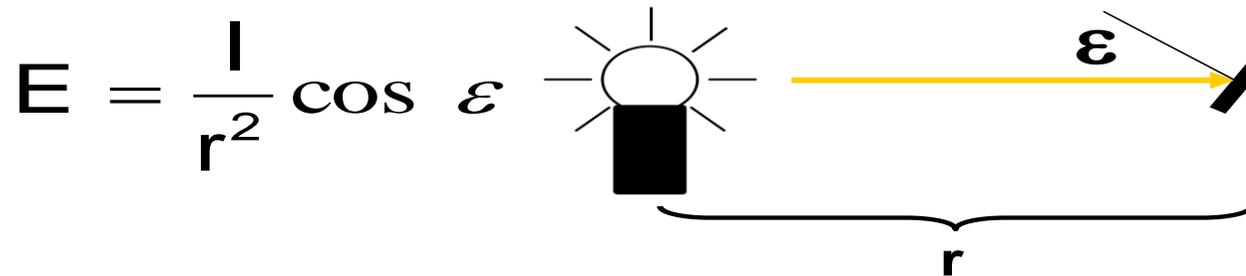
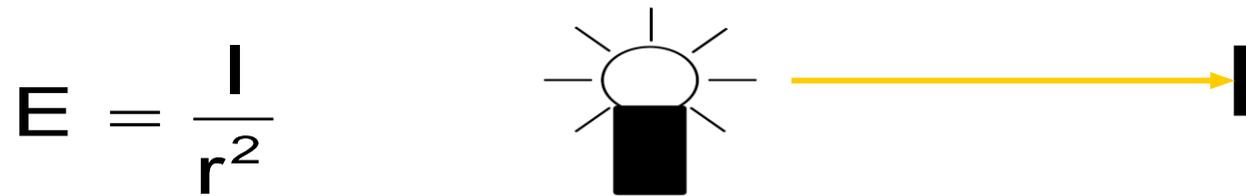
Die Beleuchtungsstärke E dient vor allem in der Innenraumbeleuchtung als Dimensionierungsgröße. Den Helligkeitseindruck, den das Auge empfindet, erfasst die Beleuchtungsstärke nicht.

Beispiele für Beleuchtungsstärken:

|                                  |                |
|----------------------------------|----------------|
| ➤ Wolkenloser Sommertag          | E = 100 000 lx |
| ➤ Trüber Sommertag               | E = 20 000 lx  |
| ➤ Trüber Wintertag               | E = 400 lx     |
| ➤ Vollmondnacht                  | E = 0,3 lx     |
| ➤ Bürobeleuchtung                | E = 500 lx     |
| ➤ 100-W-Glühlampe in 1 m Abstand | E = 110 lx     |

# Photometrisches Entfernungsgesetz

$$E = L \cdot \Omega \quad \oplus \quad I = L \cdot A \quad \oplus \quad \Omega = \frac{A}{r^2}$$



Für die Beleuchtungsstärke  $E$  senkrecht zur Strahlungsrichtung gilt:

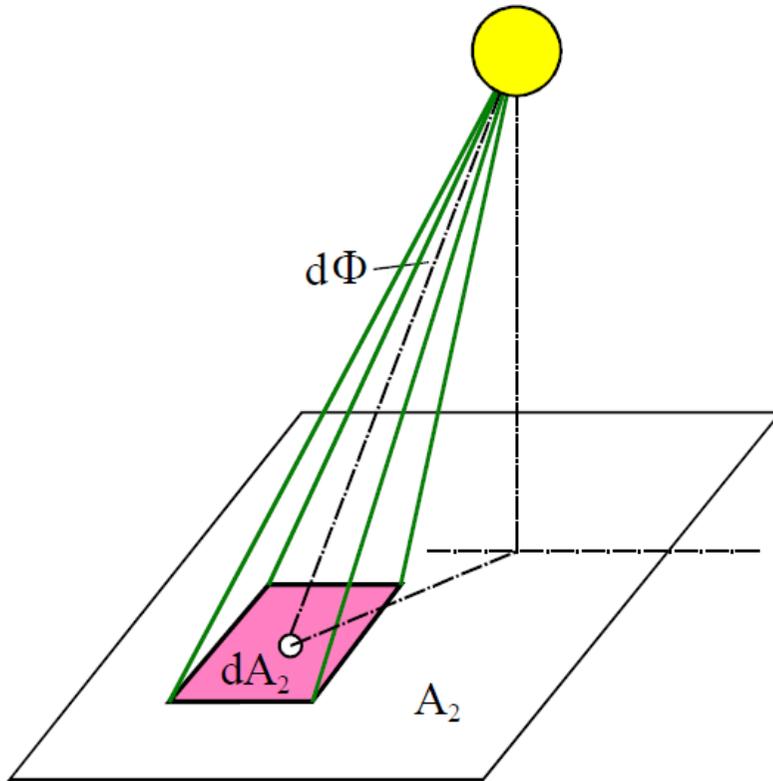
$$E = \frac{\Phi}{A} = \frac{I \cdot \Omega}{A} = \frac{I}{r^2} \quad (1.13)$$

Die Beleuchtungsstärke ändert sich quadratisch mit dem Abstand  $r$  nur für punktförmige Lichtquellen. Gute Näherungen werden erreicht, wenn der Abstand größer als die 5fache größte lineare Ausdehnung des leuchtenden Objektes ist.

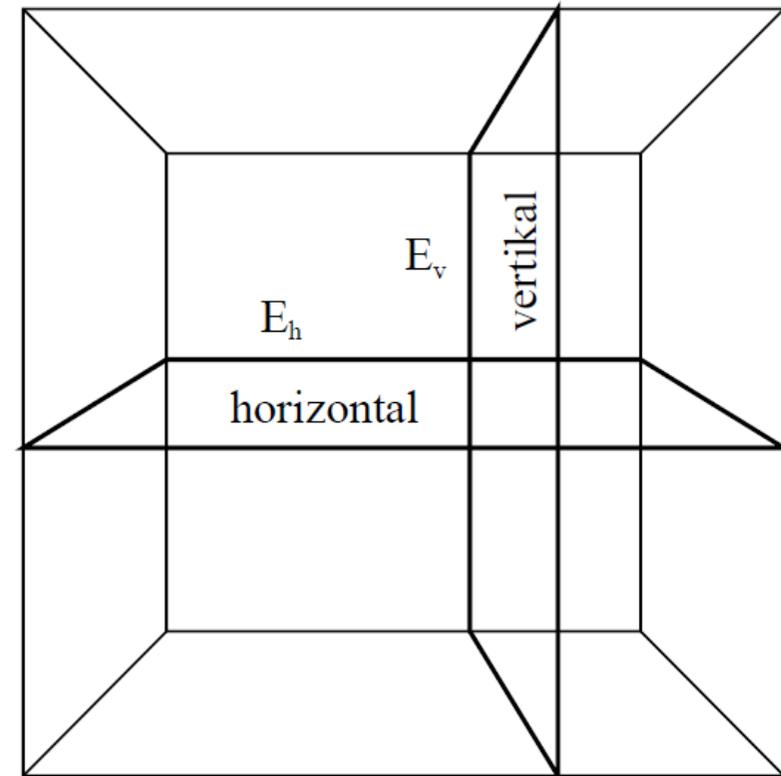
Die Integration der Beleuchtungsstärke über die Zeit ergibt die Belichtung  $H$ .

$$H = \int_{t_1}^{t_2} E \cdot dt \quad (1.14)$$

Diese Größe leistet bei der Filmbelichtung gute Dienste.



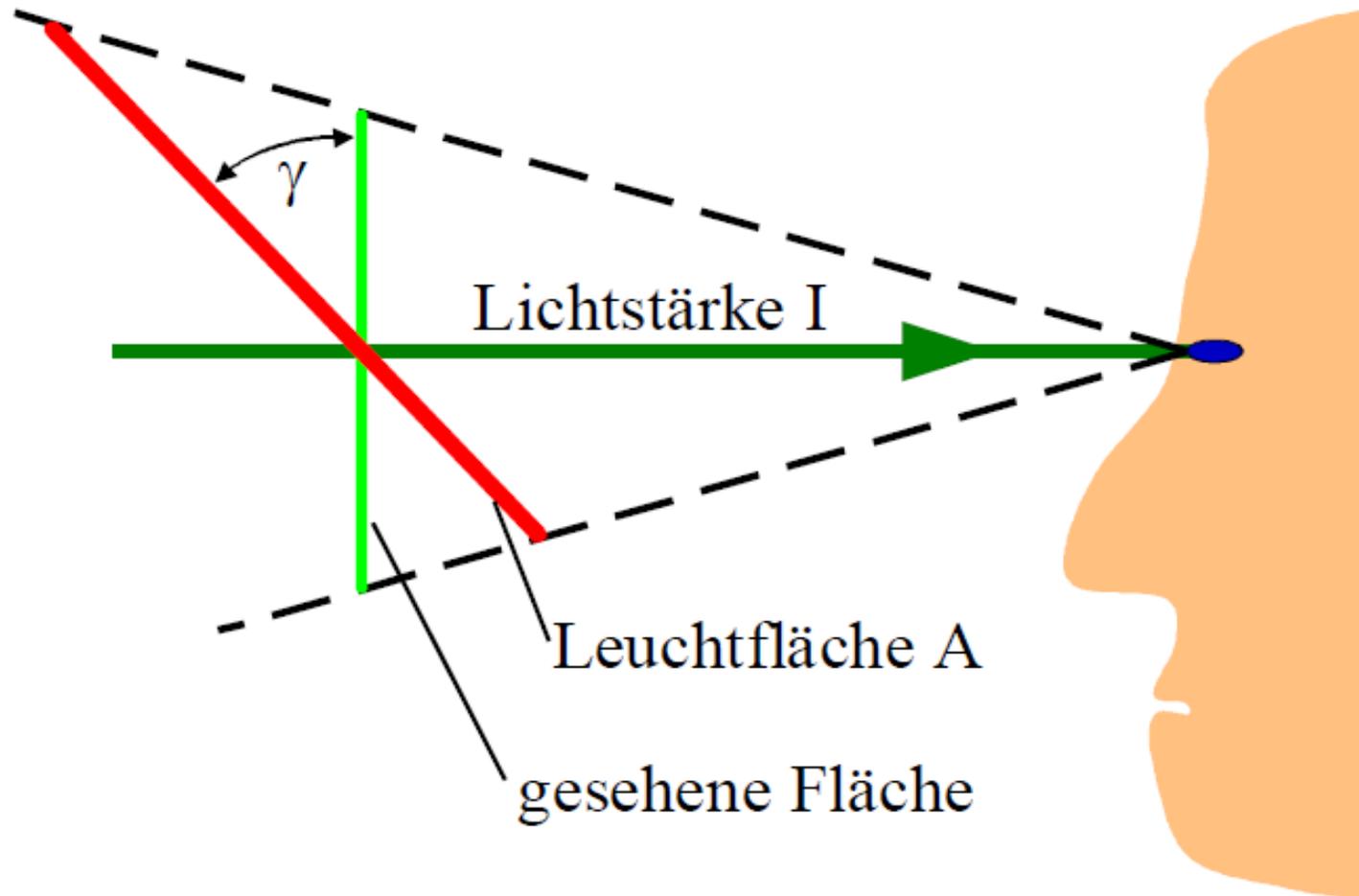
**Beleuchtungsstärkedefinition**



**Horizontale Beleuchtungsstärke  $E_h$   
und vertikale Beleuchtungsstärke  $E_v$**

## Leuchtdichte

Die Leuchtdichte  $L$  in  $\text{cd/m}^2$  ist das Maß für den Helligkeitseindruck, den eine leuchtende oder beleuchtete Fläche  $A$  im Auge erzeugt. Von den lichttechnischen Größen ist sie eigentlich die einzige „sichtbare“ Größe.



**Leuchtdichte =**  $\frac{\text{Lichtstärke in Candel cd}}{\text{gesehene Fläche in m}^2}$



z.B. bei:

|                           |                             |
|---------------------------|-----------------------------|
| Leuchtstofflampe          | 15 000 cd/m <sup>2</sup>    |
| Hochdruck-Entladungslampe | 3 000 000 cd/m <sup>2</sup> |

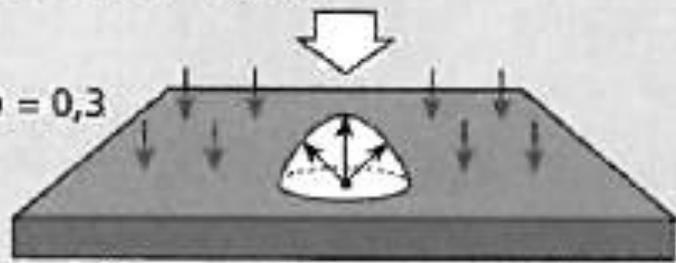
Diffuse Reflexion

$$L = \frac{\text{Reflexionsgrad}}{\pi} \times \text{Beleuchtungsstärke}$$

$$L = \frac{\rho}{\pi} \times E$$

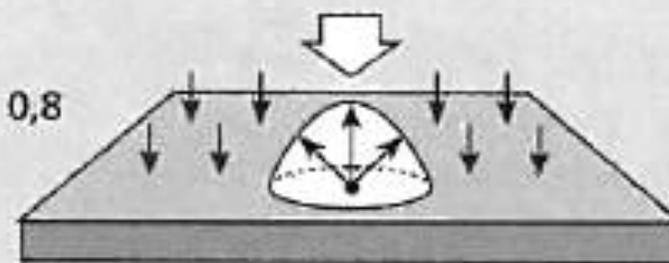
z.B. Büro  $E = 500 \text{ lx}$

$\rho = 0,3$



$L = 50 \text{ cd/m}^2$

$\rho = 0,8$



$L = 130 \text{ cd/m}^2$

## Licht und Farbe

Die Farbe, in der ein Gegenstand erscheint, hängt von folgenden Einflussgrößen ab:

- der spektralen Zusammensetzung des auf den Gegenstand fallenden Lichts
- der spektralen Zusammensetzung des vom Gegenstand reflektierten Lichts
- den individuellen Eigenschaften des Gesichtssinns des Betrachters

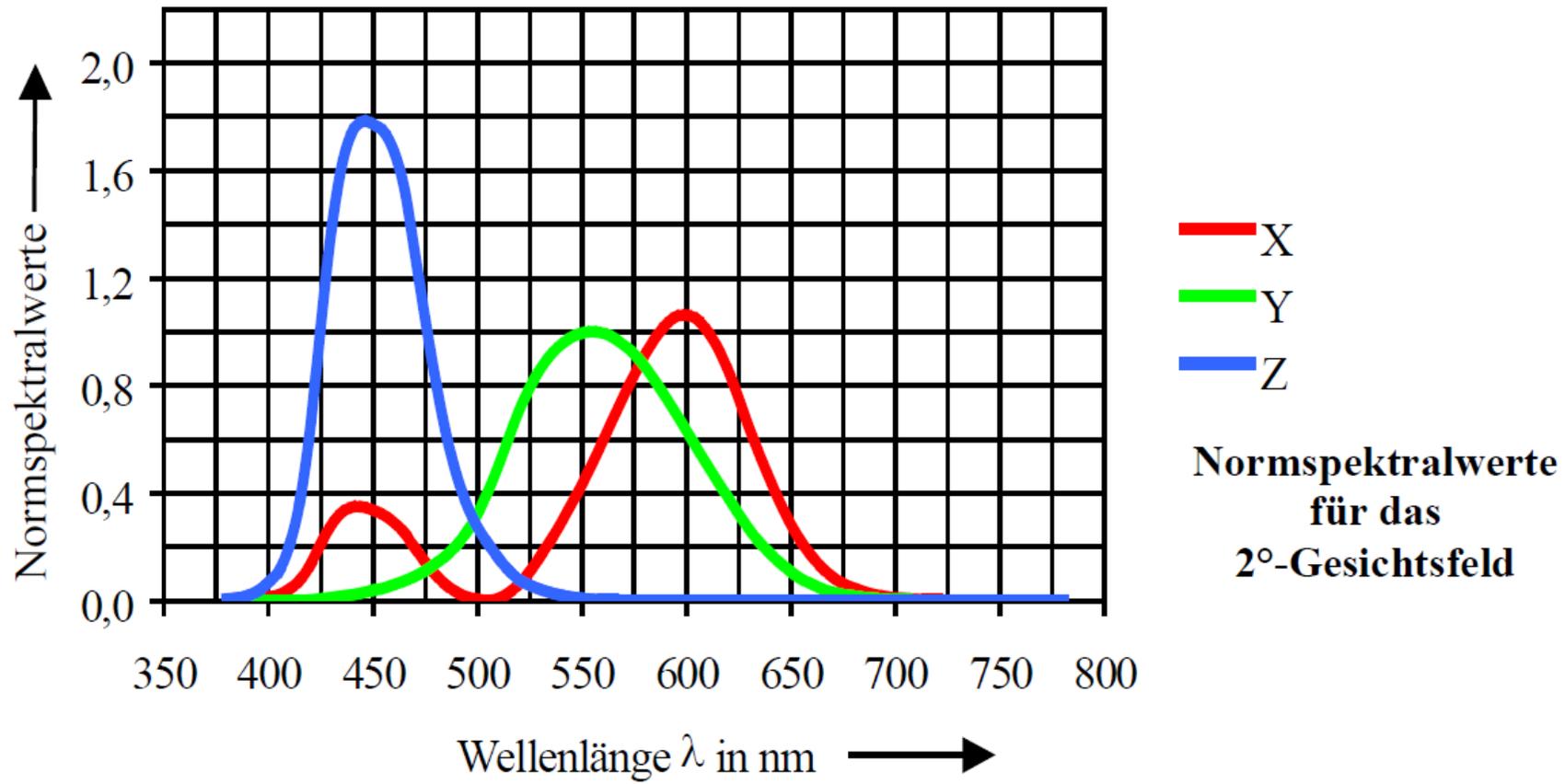
Ein Gegenstand erscheint z.B. gelb, wenn das auf ihn fallende Licht gelbe Strahlung im Spektrum enthält, er gelbe Strahlung reflektiert und der Beobachter Gelb als Farbe erkennt.

Ein Körper erscheint weiß, wenn er alle Farben reflektiert, und er ist schwarz, wenn er alle Farben absorbiert.

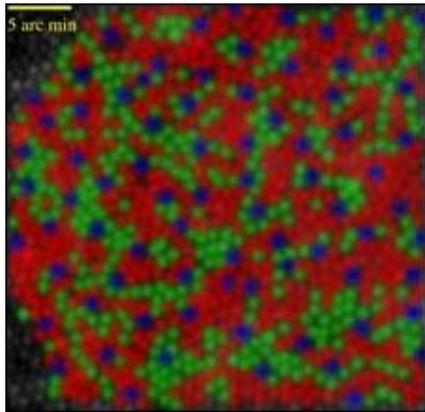
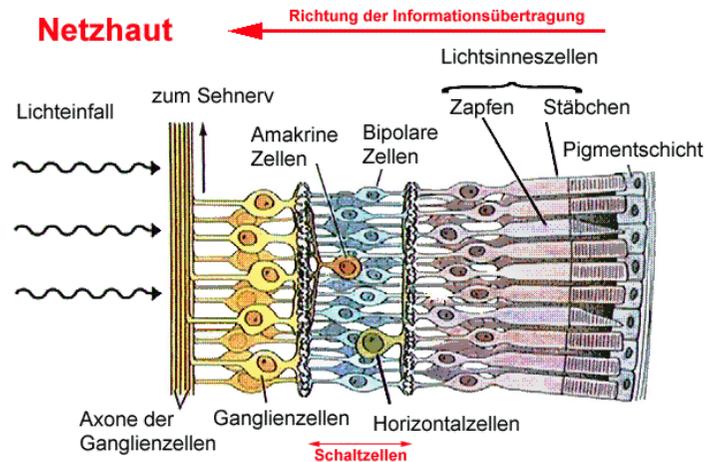
Mit der ähnlichsten Farbtemperatur  $T_F$  kann die Lichtfarbe einer Lichtquelle charakterisiert werden.

### Ähnlichste Farbtemperaturen

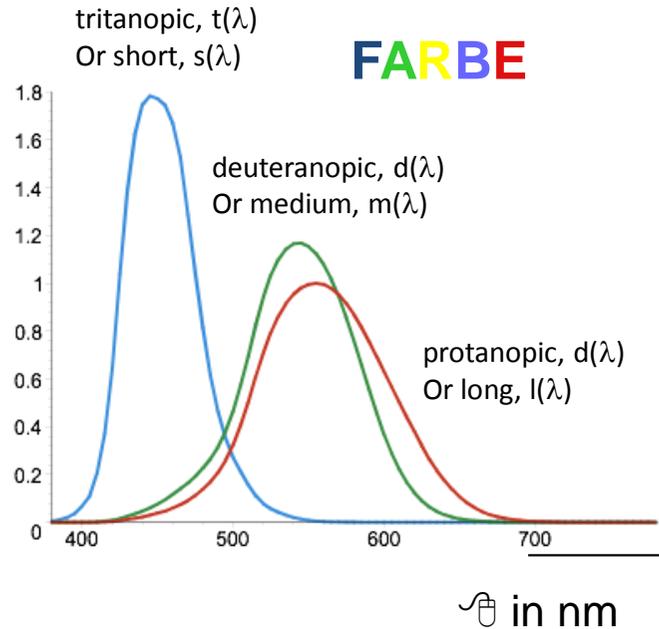
|                                     |                   |
|-------------------------------------|-------------------|
| Glühlampen                          | 2800 K            |
| Halogen- <u>gl</u> ühlampen         | 3100.....3400 K   |
| Leuchtstofflampen                   | 2800.....6500 K   |
| Halogen-Metall <u>d</u> ampf lampen | 3000.....6000 K   |
| LEDs                                | <3300.....>5300 K |
| Tageslicht                          | 6000 K            |
| Blauer Himmel                       | 20.000 K          |



# Farbe und Farbempfindung

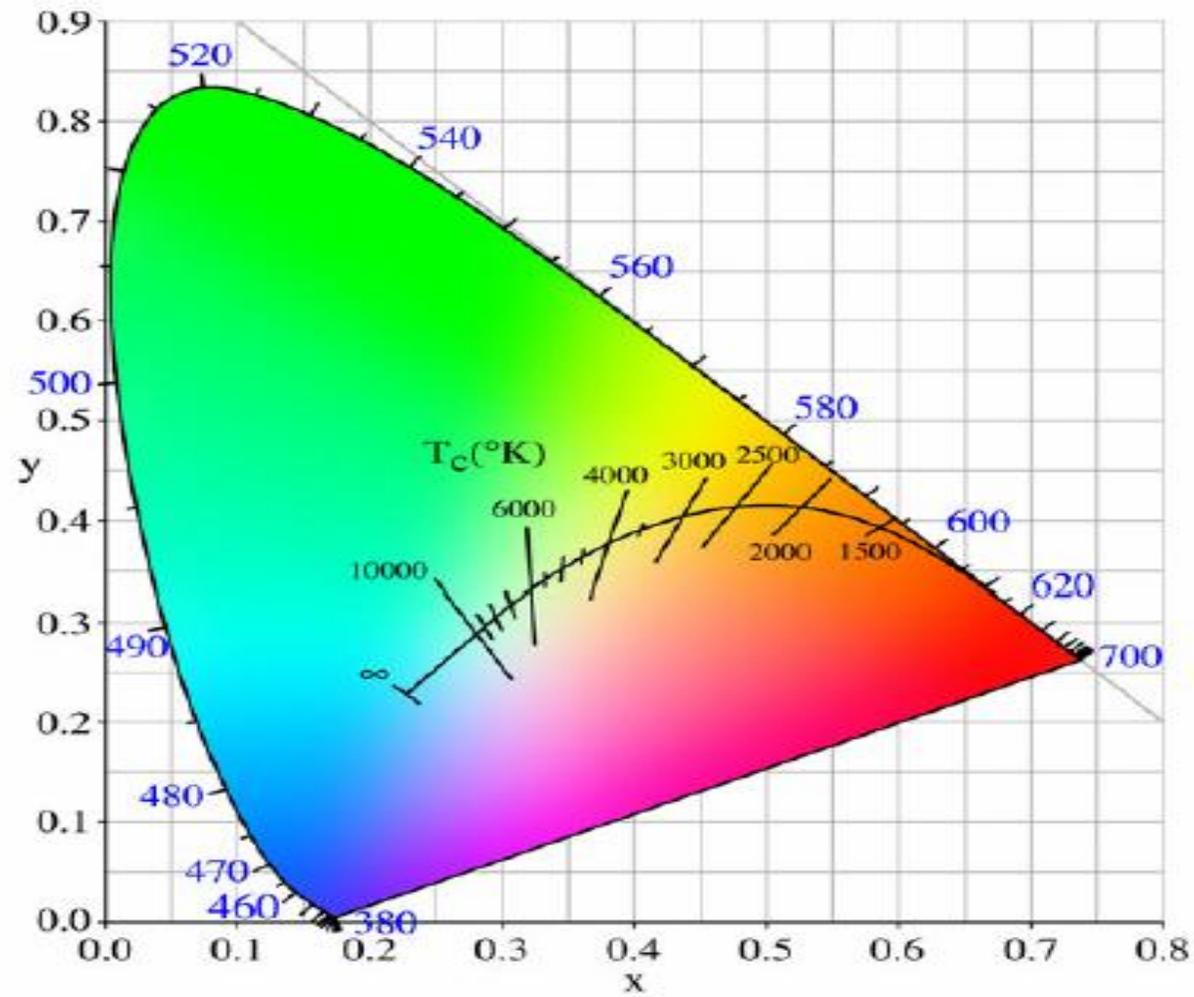


## Spektrale Empfindlichkeit



### Zapfenarten (Anzahl gesamt: 5 - 6,5 Mio)

- L-Typ rot 570 nm 1,2 Mio
- M-Typ grün 540 nm 4,9 Mio
- S-Typ blau 430 nm 0,3 Mio



**CIE-Normfarbtafel**

## Wie viele Farben können wir sehen?

200 Farbtöne \* 500 Helligkeiten \* 20  
Sättigungen = 2 Mio

[Gouras 1991a]

# Licht- und Farbmessung

Relevant sind:

- **Radiometrische Größen**
- **Spektrometrische Größen**
- **Photometrische Größen**
  - **Elektrische Größen**
  - **Thermische Größen**

**•Radiometrische Größen:**

Strahlungsenergie  $Q_e$  (Ws), Strahlungsleistung = Strahlungsfluss  $\Phi_e$  (W),  
Strahlstärke  $I_e$  (W/sr), Bestrahlungsstärke  $E_e$  (W/m<sup>2</sup>), Strahldichte  $L_e$  (W/srm<sup>2</sup>),  
Wirkungsgrad = Strahlungsausbeute

**• Spektrometrische Größen:**

Spektrum und Wellenlängen, Farbmetrische Größen: ähnlichste Farbtemperatur  
CCT, Farbkoordinaten  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ; Farbwiedergabe-Kennzahlen,

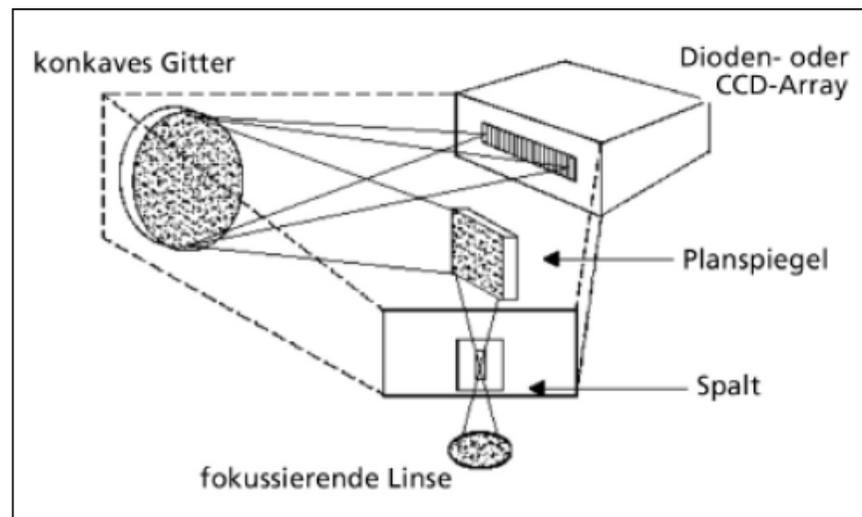
CRI ( $R_a$ ,  $R_i$  ( $i = 1 - 14$ ))

sowie andere Farbräume  $u'$ ,  $v'$  und  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , die durch Transformation aus  
den  $x$ -,  $y$ -,  $z$ - Werten errechnet werden.

## **Messung radiometrischer und spektrometrischer Größen**

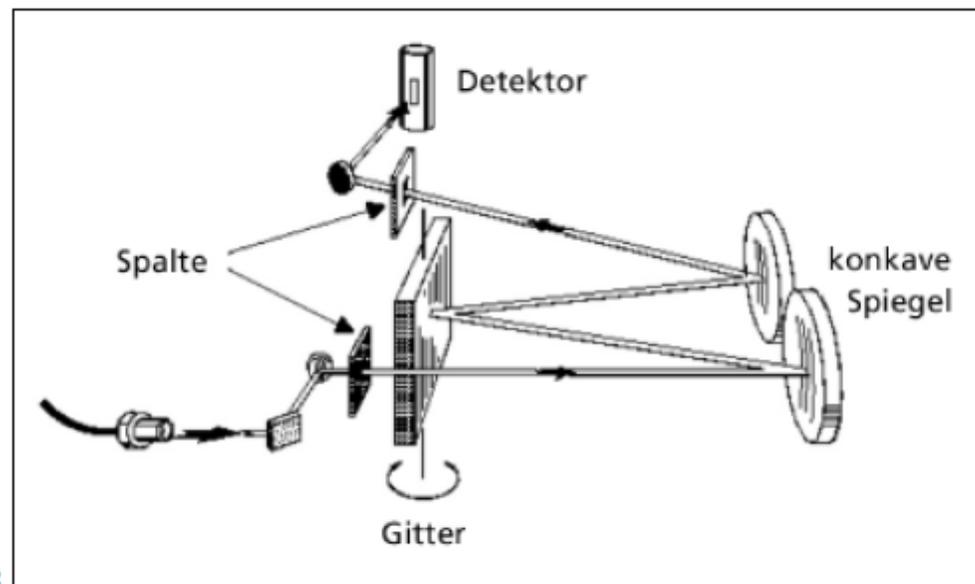
Alle radiometrischen, photometrischen und farbmétrischen Größen können mit präzisen Spektralradiometern über einen weiten Bereich von UV bis IR per Software aus den gemessenen Spektraldaten errechnet werden. Optische Spektrometer werden in zwei unterschiedlichen Bauweisen hergestellt.

**Array-Spektrometer** bestehen aus einem feststehenden Beugungsgitter und einer Detektorzeile (beispielsweise einem CCD-Sensor). Da das gesamte Spektrum durch die Detektorzeile simultan erfasst wird, können sehr kurze Messzeiten im Millisekundenbereich erzielt werden. Array-Spektrometer sind sehr robust und eignen sich insbesondere für den industriellen Einsatz.



Prinzip des Array-Spektrometers

**Scannende Spektrometer** beruhen auf einem Einzel-Detektor und einem sich drehenden Beugungsgitter. Da das Spektrum während des Drehvorgangs des Beugungsgitters sequenziell abgetastet wird, benötigen scannende Spektrometer eine Messzeit von mehreren Sekunden bis Minuten. Sie bieten eine sehr hohe Signaldynamik und Spektralauflösung sowie einen breiten Spektralbereich, da mehrere Gitter und Detektoren in einem Gerät integriert werden können.



Prinzip des scannenden Spektrometers

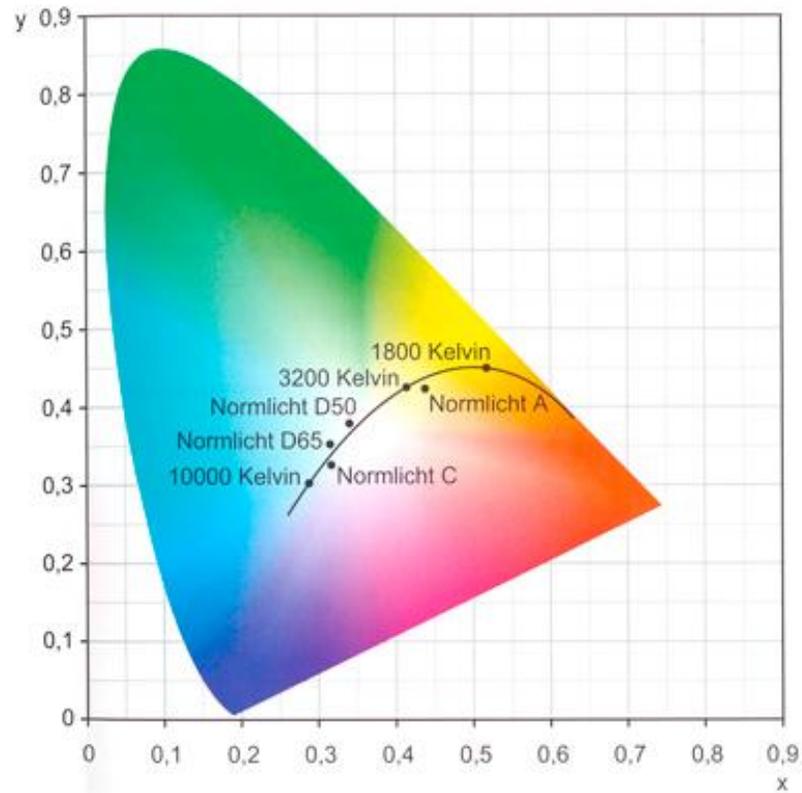
Für die Normfarbwerte X, Y, Z (DIN 5033) gelten die Beziehungen

$$X = k \int \varphi(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

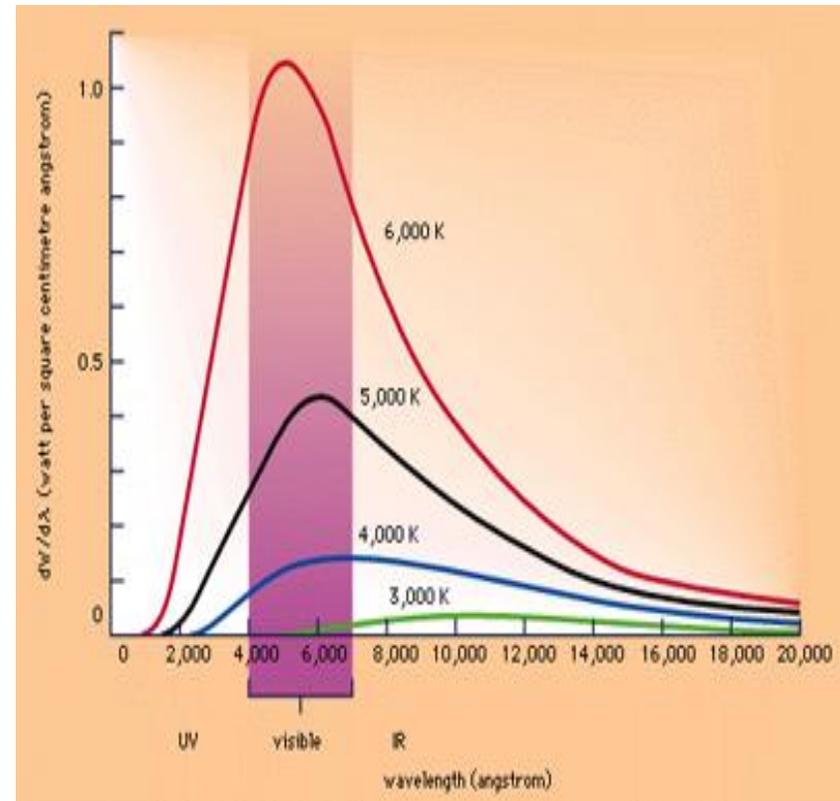
$$Y = k \int \varphi(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = k \int \varphi(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

$\varphi(\lambda)$  ist die relative spektrale Strahlungsfunktion und  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  sind die standardisierten Normspektralwertfunktionen. Zur praktischen Berechnung werden die Integrale durch Summen ersetzt.



Normfarbtafel



Spektrum des schwarzen Strahlers

Aus den Normfarbwerten  $X, Y, Z$  lassen sich zur Kennzeichnung der Farbart die Normfarbwertanteile  $x, y, z$  ableiten, von denen wegen  $x + y + z = 1$  meist nur  $x$  und  $y$  benutzt werden.

$$x = X / (X + Y + Z)$$

$$y = Y / (X + Y + Z)$$

$$z = Z / (X + Y + Z)$$

### **Ähnlichste Farbtemperatur CCT (Correlated Color Temperature)**

Durch die ähnlichste Farbtemperatur CCT wird die Lichtfarbe einer Lichtquelle gekennzeichnet. CCT wird aus den Farbkoordinaten  $x, y, z$  berechnet.

Für den CCT-Bereich 3000 K bis 50000 K gilt nach *Moreno und Contreras* die Formel

$$CCT(x,y,z) = A_0 + \sum_{i=1}^3 A_i \exp\left[-n(x,y,z)/t_i\right]$$

mit  $A_0 = -949,86315$ ,  $A_1 = 6253,80338$ ,  $A_2 = 28,70599$ ,  $A_3 = 0,00004$  sowie

$t_1 = 0,92159$ ,  $t_2 = 0,20039$ ,  $t_3 = 0,07125$  und  $n = \frac{x-x_e}{y-y_e}$

mit  $x_e = 0,3366$  und  $y_e = 0,1735$  //  $x, y$  sind die gemessenen Normfarbwertanteile,

$z = 1 - x - y$

## Klassifizierung:

|                 |                       |
|-----------------|-----------------------|
| Warmweiss       | CCT < 3300 K          |
| Neutralweiss    | 3300 K < CCT < 5300 K |
| Tageslichtweiss | CCT > 5300 K          |

## **Farbwiedergabeindex CRI (Color Rendering Index)**

Der Farbwiedergabeindex CRI gibt die Qualität der Farbwiedergabe bei Beleuchtung mit einer bestimmten Lichtquelle an und ist abhängig von der relativen spektralen Energieverteilung der Lichtquelle, der spektralen Remission der beleuchteten Objekte und der Farbstimmung des Auges

(vgl. DIN 6169, Teil 2).

Der allgemeine Farbwiedergabewert  $R_a$  sagt aus, wie „echt“ die Farben von Gegenständen für das menschliche Auge aussehen, wenn sie von einer Lampe beleuchtet werden. Der maximal erreichbare Farbwiedergabewert liegt bei 100, die Bewertung ist:

**Farbwiedergabeindex Farbwiedergabestufe Bewertung nach DIN**

|        |    |           |
|--------|----|-----------|
| 90-100 | 1A | sehr hoch |
| 80-90  | 1B | sehr hoch |
| 70-80  | 2A | hoch      |
| 60-70  | 2B | hoch      |
| 40-60  | 3  | mittel    |
| 20-40  | 4  | gering    |

Für die Büro- oder Arbeitsplatzbeleuchtung werden nach DIN 5035 mindestens die Farbwiedergabestufe 2A empfohlen, für Krankenhäuser und Speiseräume mindestens 1B, für besonders anspruchsvolle Aufgaben (z.B. Zahnarzt) 1A.

## Berechnung des Farbwiedergabeindex

Zur Bestimmung des Farbwiedergabeindex einer Lichtquelle K werden acht Testfarben, die in DIN 6169 definiert sind, mit der Lampe beleuchtet und gemessen, wie stark jede einzelne dieser Farben, im Vergleich zur Beleuchtung mit einer Bezugslichtquelle, auf der CIE-Farbkarte verschoben ist.

Um die Bezugslichtquelle zu finden, muss zuerst die Farbtemperatur der Lichtquelle bestimmt werden. Liegt die Farbtemperatur oberhalb von 5000K wird eine Phase des Tageslichts mit derselben Farbtemperatur als Bezugslichtquelle verwendet, bei einer Farbtemperatur unterhalb von 5000K ein Planckscher Strahler derselben Farbtemperatur.

Anschließend werden die Farborte von acht (bzw. 14) Testfarben bei Beleuchtung mit der Lichtquelle K und Beleuchtung mit der Bezugslichtquelle R bestimmt. Die Farben werden dabei mit  $i = 1 \dots 8$  durchnummeriert.

Die Farborte werden als  $(x_{iR}, y_{iR}, z_{iR})$  für die Bezugslichtquelle und  $(x_{iK}, y_{iK}, z_{iK})$  für die Lichtquelle bezeichnet.

Die Farborte werden in den uv-Farbraum transformiert:  $(u_{iR}, v_{iR})$  und  $(u_{iK}, v_{iK})$ . Da die Farborte der Lichtquelle K und der Bezugslichtquelle R nicht identisch sind, sondern nur ihre ähnlichsten Farbtemperaturen gleich sind, muss die chromatische Adaption des Auges an die Farbe des Lichts berücksichtigt werden (Farbumstimmung).

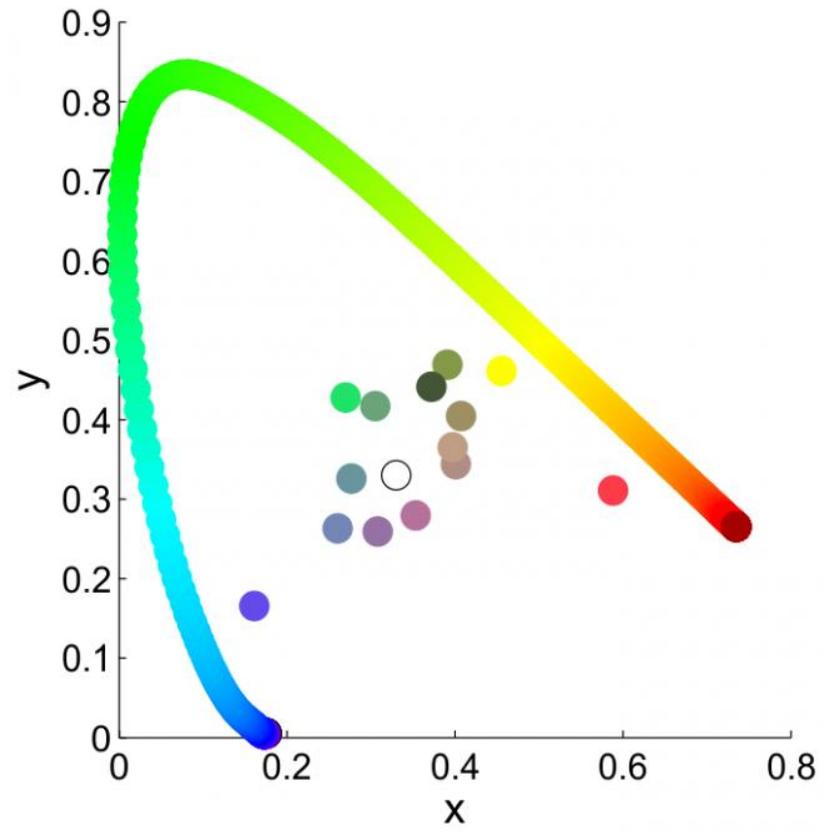
Dazu werden die Farborte  $(u_{iR}, v_{iR})$  in den CIE-1976-UCS-Farbraum  $(u'_{iR}, v'_{iR})$  transformiert. Diese Transformation ist auch als von Kries-Transformation bekannt. (UCS = Uniform Chromaticity Scale)

Zuletzt werden diese Koordinaten in den CIE 1964 Farbraum transformiert und in diesem Koordinatensystem wird der Abstand  $\Delta E_i$  für jede Farben bestimmt. Damit ergibt sich der Farbwiedergabeindex  $R_i$  dieser Farbe zu

$$R_i = 100 - 4,6 \Delta E_i.$$

Der allgemeine Farbwiedergabeindex ist dann der Mittelwert für die ersten acht Farben

$$Ra = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 Ri$$

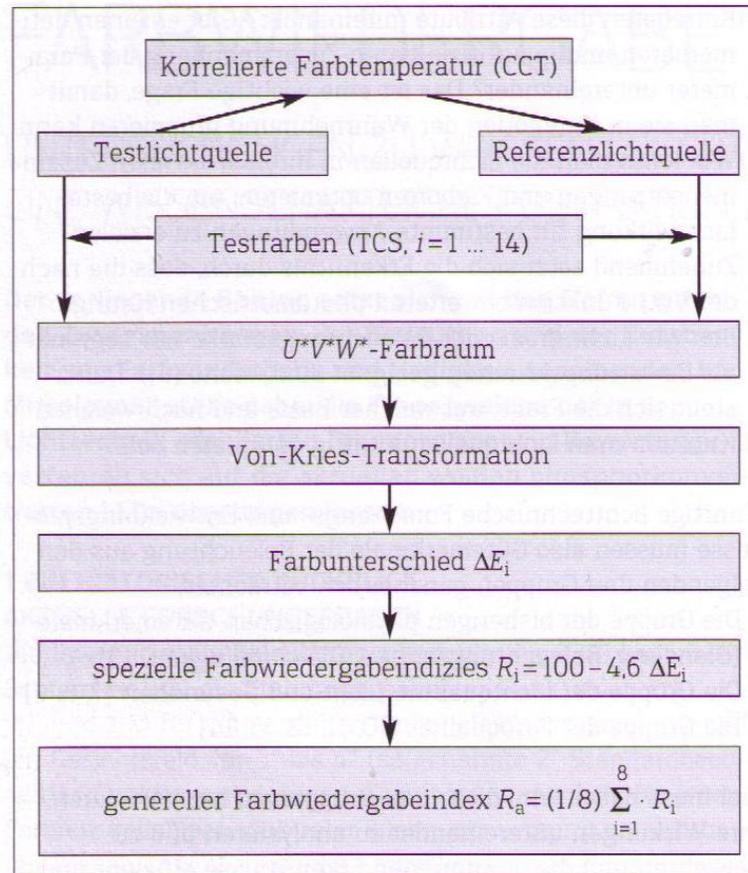


| Testfarben                                    |          |  |                 |                |   |
|---|----------|--|-----------------|----------------|---|
| R <sub>1</sub>                                | Altrosa  |    | R <sub>5</sub>  | Türkisblau     |    |
| R <sub>2</sub>                                | Senfgelb |    | R <sub>6</sub>  | Himmelblau     |    |
| R <sub>3</sub>                                | Gelbgrün |    | R <sub>7</sub>  | Asterviolett   |    |
| R <sub>4</sub>                                | Hellgrün |    | R <sub>8</sub>  | Fliederviolett |    |
| Zusätzliche Testfarben mit gesättigten Farben |          |  |                 |                |   |
| R <sub>9</sub>                                | Rot      |    | R <sub>12</sub> | Blau           |    |
| R <sub>10</sub>                               | Gelb     |   | R <sub>13</sub> | Hautfarbe      |   |
| R <sub>11</sub>                               | Grün     |  | R <sub>14</sub> | Blattgrün      |  |

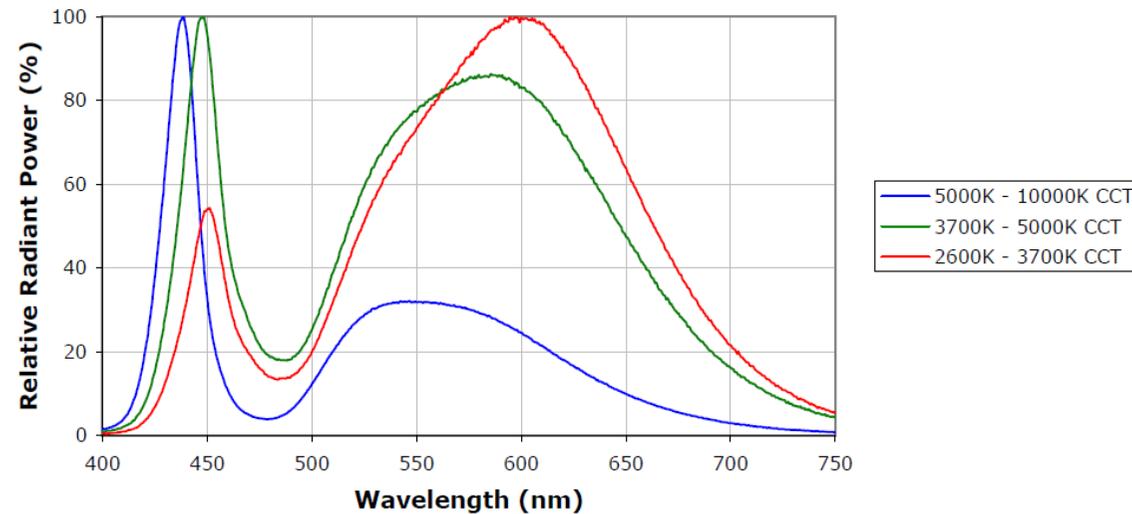
Die 14 Testfarben nach DIN 6169

## Farbwiedergabeindex einiger Lampen

| <u>Lampe</u>                                | <u>Index <math>R_a</math></u> |
|---|-------------------------------|
| Glühlampe                                   | bis 100                       |
| Leuchtstofflampe, weiß de Luxe              | 85..100                       |
| Leuchtstofflampe, weiß                      | 70...84                       |
| LED, weiß                                   | 70...95                       |
| Leuchtstofflampe                            | 50...90                       |
| Halogen-Metall dampflampe                   | 60...95                       |
| Natriumdampf-Hochdrucklampe, warmweiß       | 80...85                       |
| Natriumdampf-Hochdrucklampe, Standard       | 18...30                       |
| Natriumdampf-Hochdrucklampe, farbverbessert | 60                            |
| Quecksilberdampf-Hochdrucklampe             | 45                            |



Schema der Berechnung des CIE-Farbwiedergabeindex für Lichtquellen  
(vgl. CIE-Publ. 13.3-1995)



Typische spektrale Verteilung weißer LEDs (phosphorkonvertiert) bei verschiedenen Farbtemperaturen

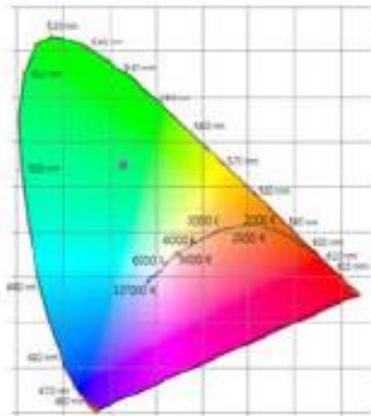
LEDs können zudem mäßig gesättigte Farben relativ gut wiedergeben, während Farben hoher Sättigung nur schlecht wiedergegeben werden.

Aus visuellen Farbwiedergabeversuchen ergab sich, dass die gegenwärtige CRI-Methode Beleuchtungssituationen mit weißen LED-Lichtquellen nicht gut beschreibt.

Daher wurde beim CIE TC1-69 Meeting in Peking im Jahr 2007 die Zielvorgabe gemacht, innerhalb von 4 Jahren einen neuen Farbwiedergabeindex für sämtliche Lichtquellen zu entwickeln.

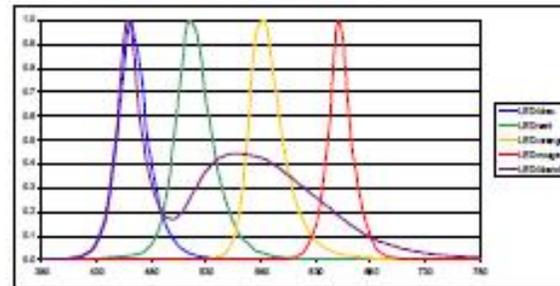
# Farbmessstechnik: 2 Instrumententypen

## Dreibereich-Farbmessgerät



→  $x, y, T_{cp}, \Delta_{uv}$

## Spektroradiometer



→  $x, y, T_{cp}, R_p, R_a, \Delta_{uv}$   
*BLH, circadian,*  
*UV, ...*

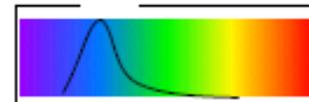


## Farbmessung: Vergleich spektral zu integral



### Dreibereichs-Farbmessgeräte

- +hohe Empfindlichkeit
- +kurze Integrationszeiten
- +einfacher Gebrauch
- +Mobil
- +Stabil
- Spektrale Anpassung
- Keine Information über weitere Messgrößen wie  $R_a$  oder  $r_{sp}$



### Spektralmessung & Numerische Integration

- + spektrale Anpassung
- + Zusatzinformation  $R_a$  oder  $r_{sp}$
- Stabilität
- Komplexe Kalibrierung
- Preis
- Empfindlichkeit
- fragil

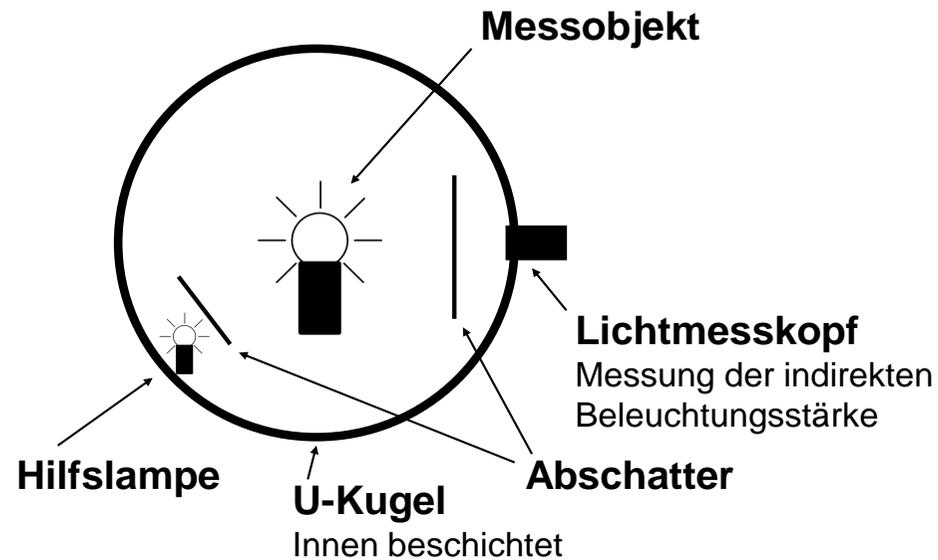
Kombination von beiden ist die ideale Lösung...

# Messung photometrischer Größen

## Lichtstrommessung

U-Kugel, Aufbau

ID



Der Lichtstrom ist proportional zur indirekten Beleuchtungsstärke  $E_{ind}$  auf der Kugelwand  $A_k$ .

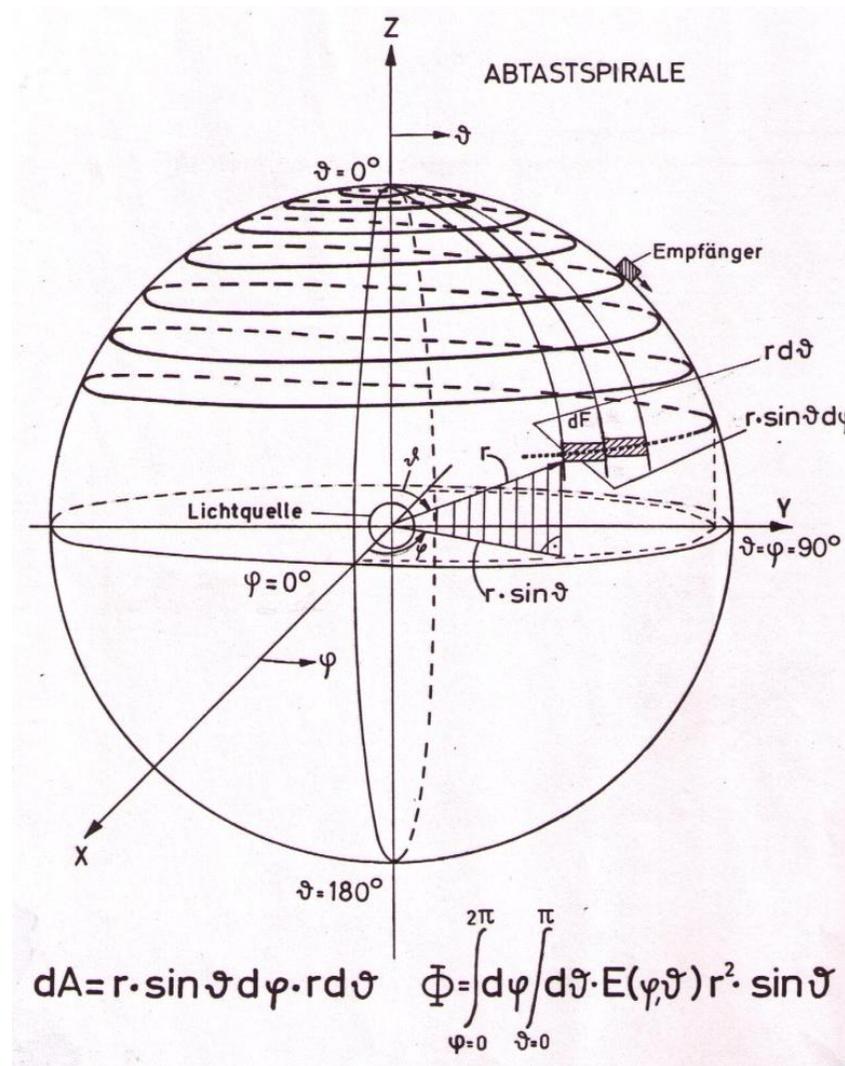
$$\Phi = E_{ind} \cdot A_k \cdot \frac{1 - \rho}{\rho}$$



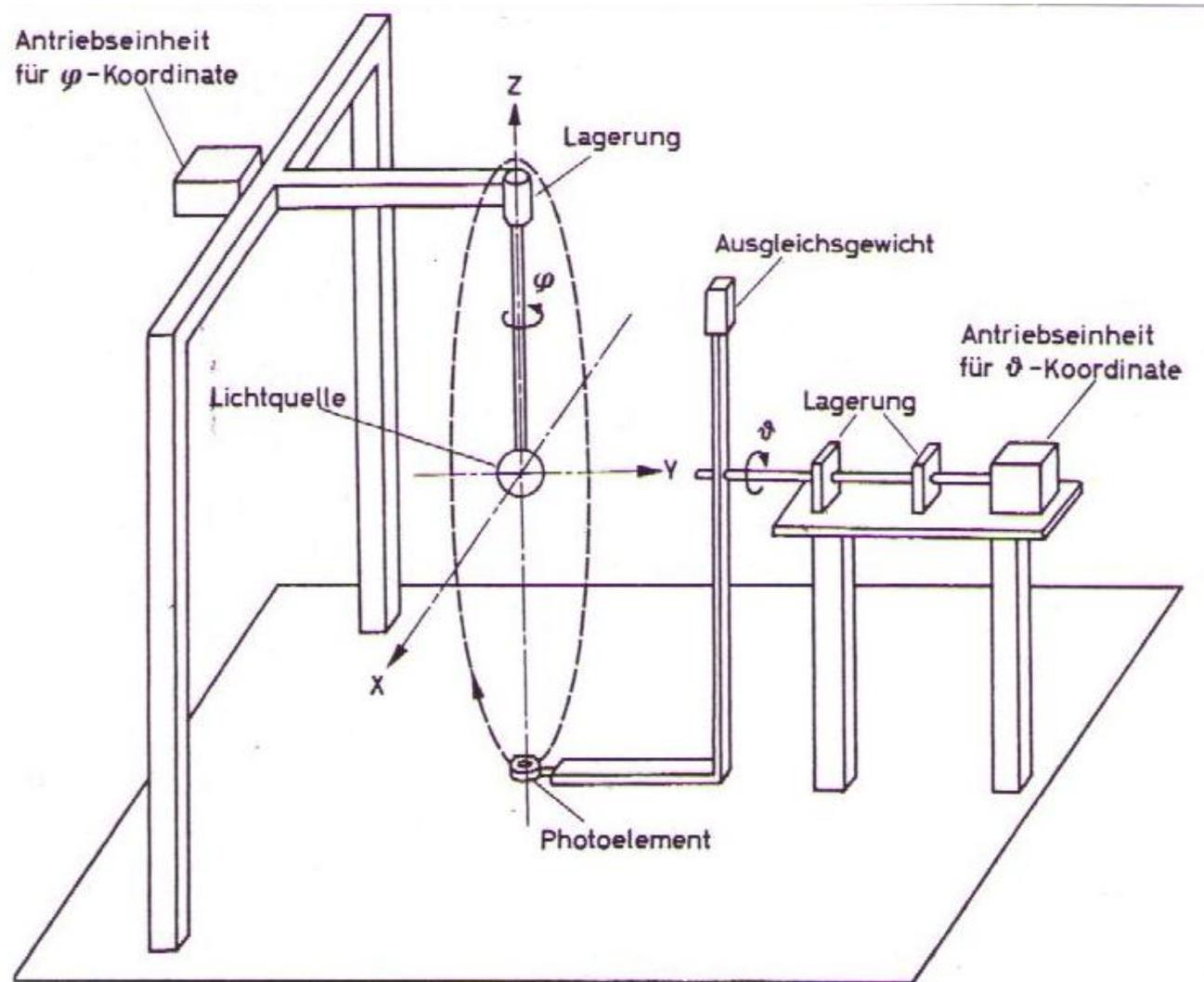
Mess-System für spektrale, farbmétrische und elektrische Parameter  
von LED-Lampen und LED-Leuchten

## **Lichtstrommessung mit dem Spiral-Abtastverfahren** **(Elektronische U-Kugel)**

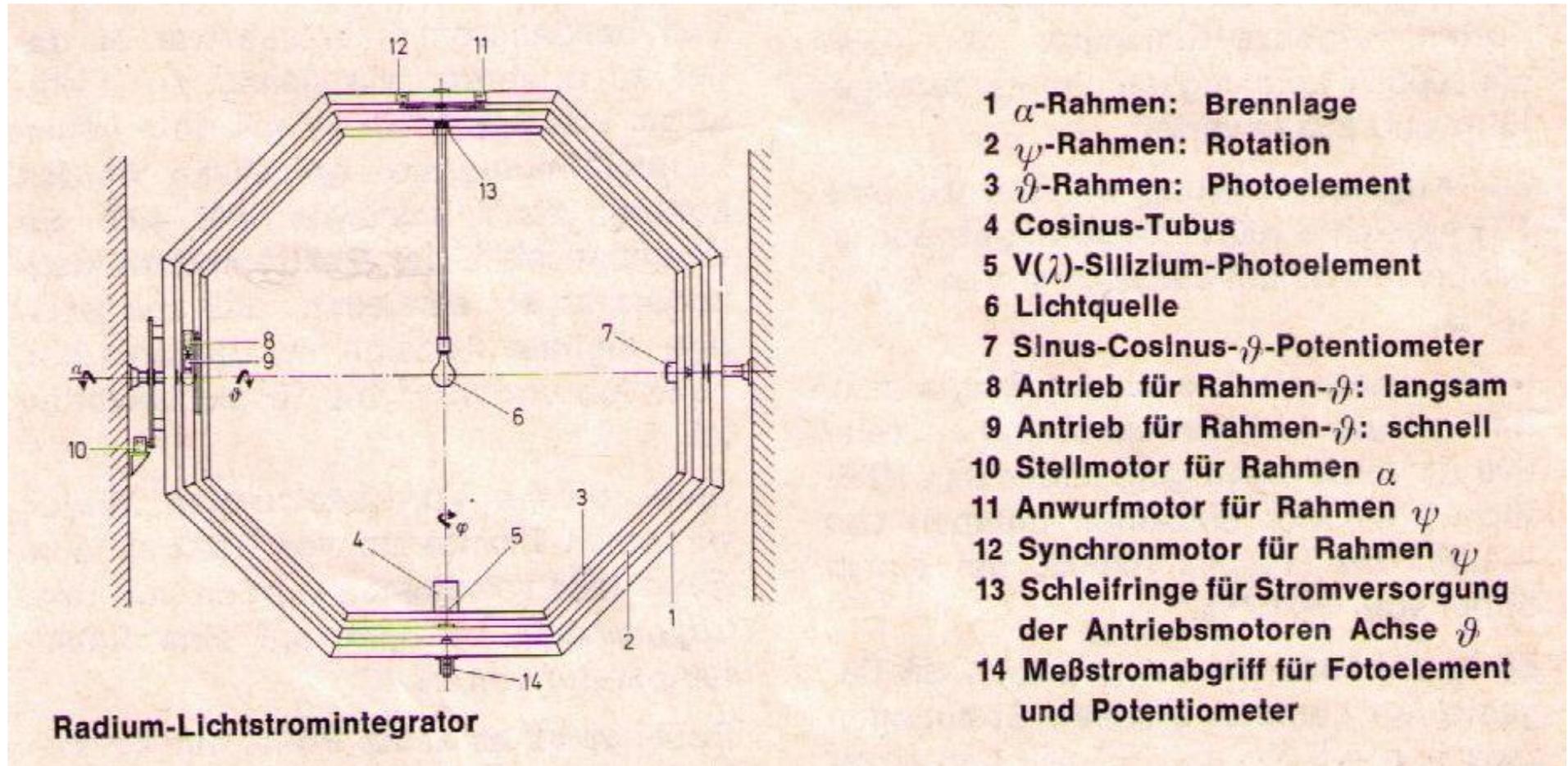
Hierbei werden die Lichtquelle und der photometrische Empfänger mit Cosinus- und  $V(\lambda)$ -Anpassung oder Arrayspektrometer simultan bewegt und somit die Lichtquelle auf einer Spiralbahn kontinuierlich fortlaufend abgetastet. Vorteile: Absolut-Lichtstrommessung, es werden keine Lichtstromnormale benötigt, hohe Auflösung durch geringe Winkelschrittweiten  $\Delta \varphi$  und  $\Delta \vartheta$  und geringe Messzeit (wenige Minuten).



## Spiral-Abtastverfahren (Elektronische U-Kugel)



**Spiral-Abtastmechanik für die elektronische U-Kugel**



## Kardan-Spiral-Abtastmechanik für die elektronische U-Kugel

(Anwendung in der PTB und bei der RADIUM GMBH)

## Formeln für das Abtast-Spiralverfahren

Für den Lichtstrom gilt

$$\Phi \approx r^2 \Delta \varphi \Delta \vartheta \sum_{i=1}^{M-1} E(\varphi_i, \vartheta_i) \sin \vartheta_i$$

Zahl der Spiralwindungen  $z = \frac{180^\circ}{\Delta \vartheta}$

Zahl der abgetasteten Messwerte auf der Spiralbahn  $M = \frac{z \cdot 360^\circ}{\Delta \varphi}$

Inkrementierter Messwinkel:  $\vartheta_i = \frac{i \cdot 180^\circ}{M}$

## Rechen-Beispiel:

Winkelintervalle  $\Delta \varphi = \Delta \vartheta = 5^\circ \triangleq 0,087266$  (im Bogenmaß)

Zahl der Spiralwindungen  $z = 36$

Messwertanzahl  $M = \frac{z \cdot 360^\circ}{\Delta \varphi} = 2592$  Messwerte

inkrementierter Meßwinkel:  $\vartheta_i = \frac{i \cdot 180^\circ}{M} = i \cdot 0,06944^\circ$

Radius der abgetasteten Kugel  $r = 1$  m

Damit erhält man die sehr einfache Formel zur Lichtstrombestimmung:

$$\Phi \approx (1m)^2 \Delta\varphi \cdot \Delta\vartheta \sum_{i=1}^{2591} E_i \sin \vartheta_i$$

mit  $\Delta\varphi \cdot \Delta\vartheta = 5^\circ \cdot 5^\circ \triangleq 0,007615$  (im Bogenmaß)

folgt für die Spiralphotometer-Formel

$$\Phi[lm] \approx 1 \cdot m^2 \cdot 0,007615 \cdot \sum_{i=1}^{2591} E_i[lx] \cdot \sin(0,06944^\circ \cdot i)$$

**Zahlenbeispiel:** Der Lichtstrom eines idealen Kugelstrahlers mit der Lichtstärke 1 cd beträgt exakt

$$\Phi = \int_{4\pi \text{ sr}} I(\vartheta, \varphi) d\omega$$

$$\Phi = I \cdot 4\pi = 1 \text{ cd} \cdot 4\pi = 12,5664 \text{ lm}$$

Die numerische Berechnung mit der Spiralphotometer-Formel liefert mit  $E=1 \text{ lx}$ ,  $r=1 \text{ m}$ :

Matlab: `S=0; for j = 1 : 2591; S = S + sin(j * (pi / 180) * 0.06944) end;`

$$\mathbf{S = 1650,2}$$

mit  $\Delta \varphi \cdot \Delta \vartheta = 0,007615$  (Bogenmaß) folgt

$$\mathbf{\Phi \approx 1650.2 \times 0,007615 = 12,5663 \text{ lm}}$$

Der relative Lichtstrom-Integrationsfehler ist extrem gering!

$$\mathbf{F} = \frac{12,5663 - 12,5664}{12,5664} = - \mathbf{0,0008 \%}$$

Wenn z.B. 10 Abtastwerte  $E_i$  pro Sekunde gemessen werden, benötigt man  $2592/10 = 259,2$  Sekunden = 4,32 Minuten für eine vollständige Absolut-Lichtstromintegration! Bei dieser Abtastfrequenz liegen 100 ms zwischen zwei Abtastungen, d.h. es bleibt dazwischen noch genügend Zeit für eine automatische Bereichsumschaltung, womit die Genauigkeit der Messung erheblich gesteigert werden kann.

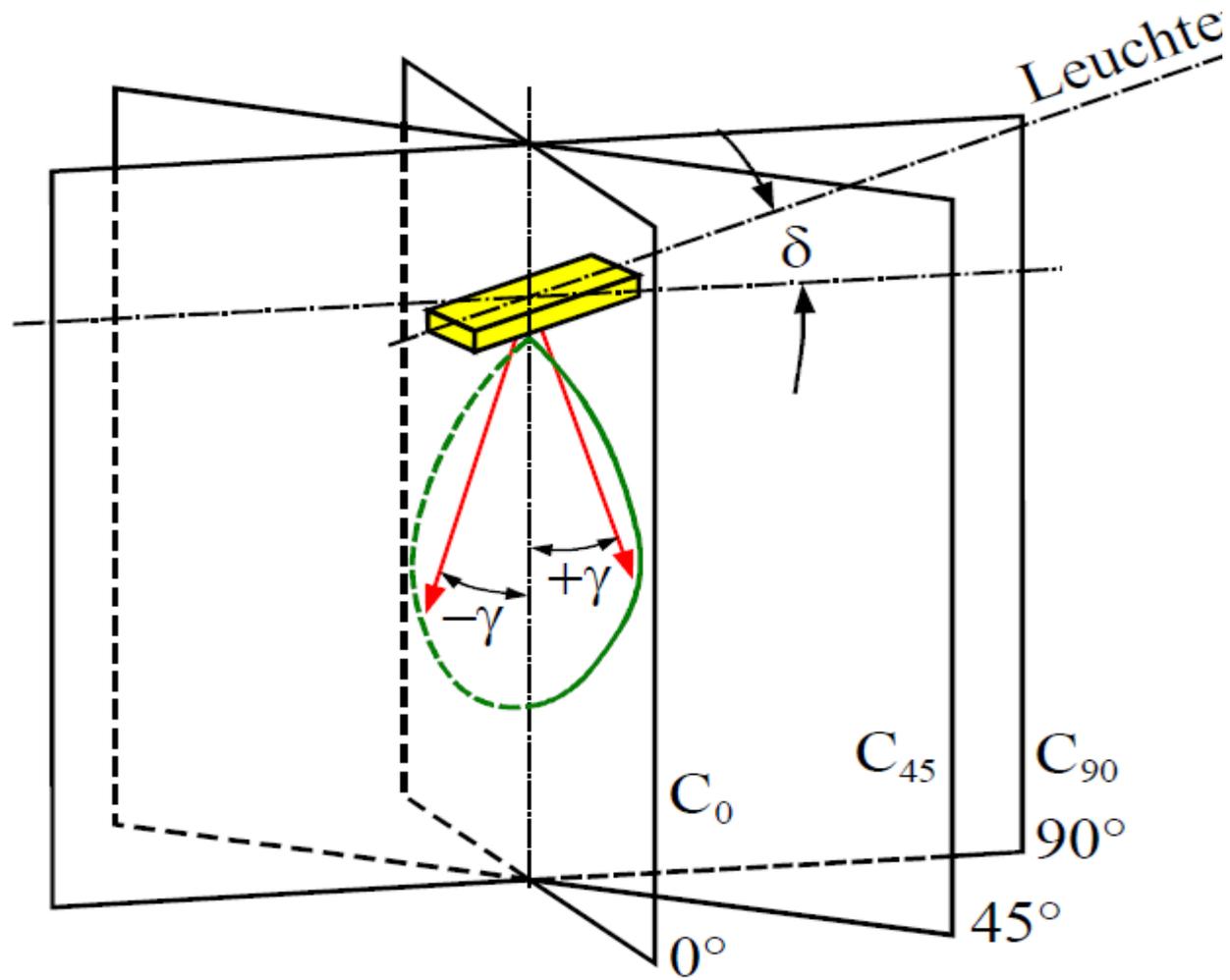
## **Lichtstärkemessung**

Die Lichtstärkeverteilungskurven werden im Allgemeinen in ausgewählten Ebenen dargestellt (A-, B- und C-Ebenen).

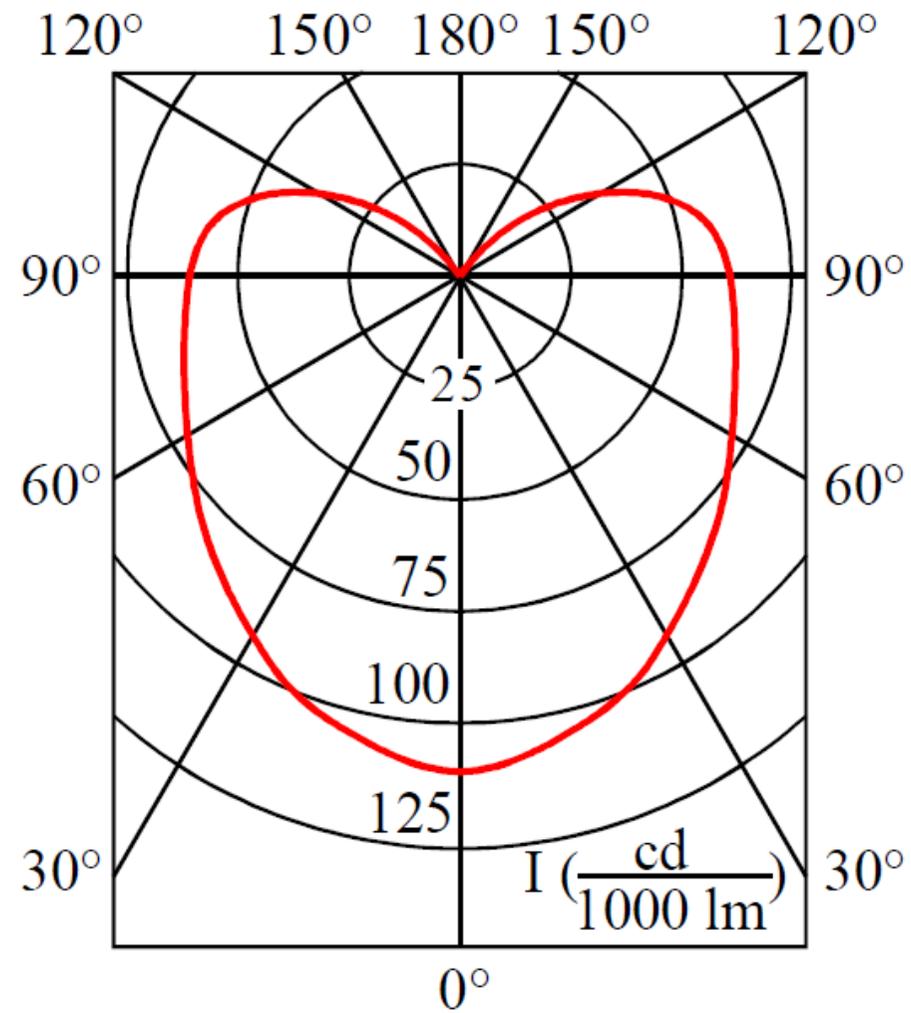
A-Ebene: Die Schnittgerade steht senkrecht und horizontal zur Leuchtenachse.

B-Ebene: Die Schnittgerade geht durch die Leuchtenachse.

C-Ebene: Die Schnittgerade steht senkrecht und vertikal zur Leuchtenachse.



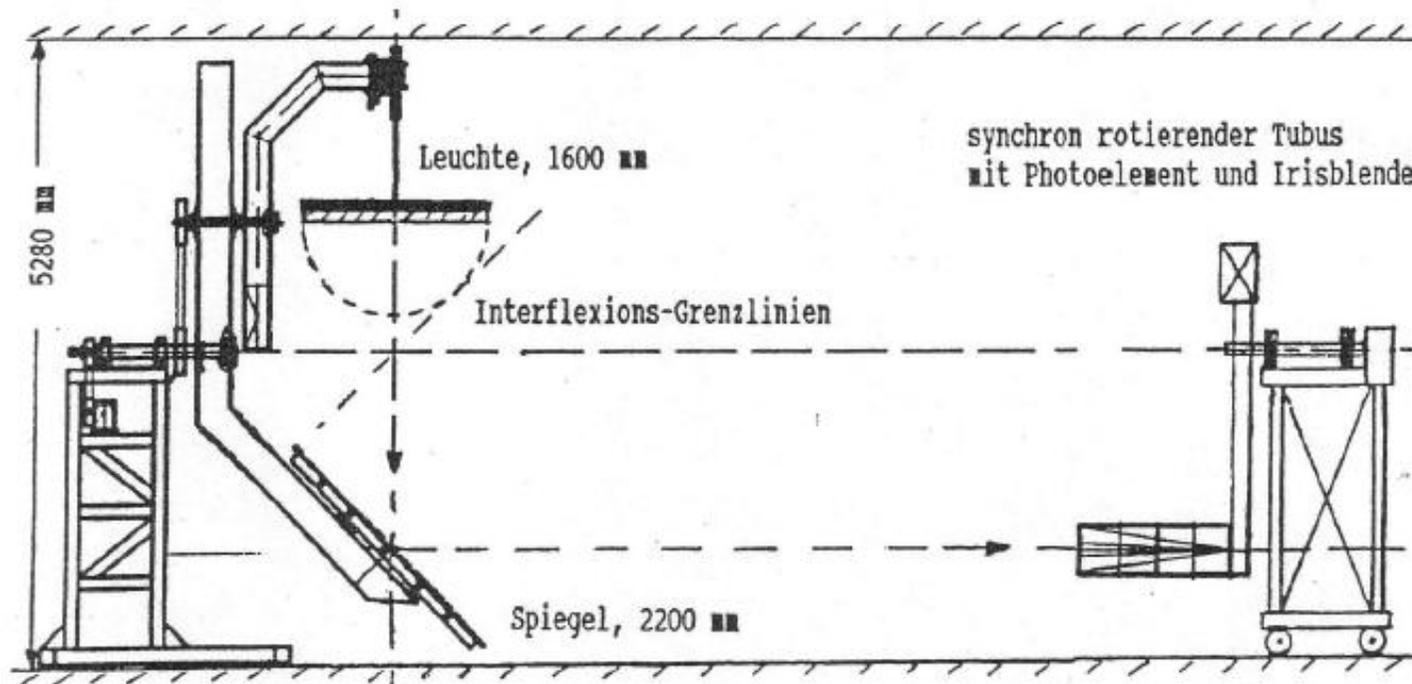
In Lichtstärkeverteilungskurven werden oft nicht absolute sondern relative, auf 1000 Lumen bezogene Lichtstärkewerte angegeben.



Lichtstärke-Polardiagramm

## Messung mit Goniophotometern

Spiegelgoniophotometer und Leuchtenwender dienen zur Bestimmung von Lichtstärkeverteilungskurven (LVK), Lichtstrom, Lichtausbeute und Leuchtenwirkungsgrad.



Exzenter-Drehspiegel-Goniophotometer mit reduzierter Bauhöhe ( $h=5000$  mm)

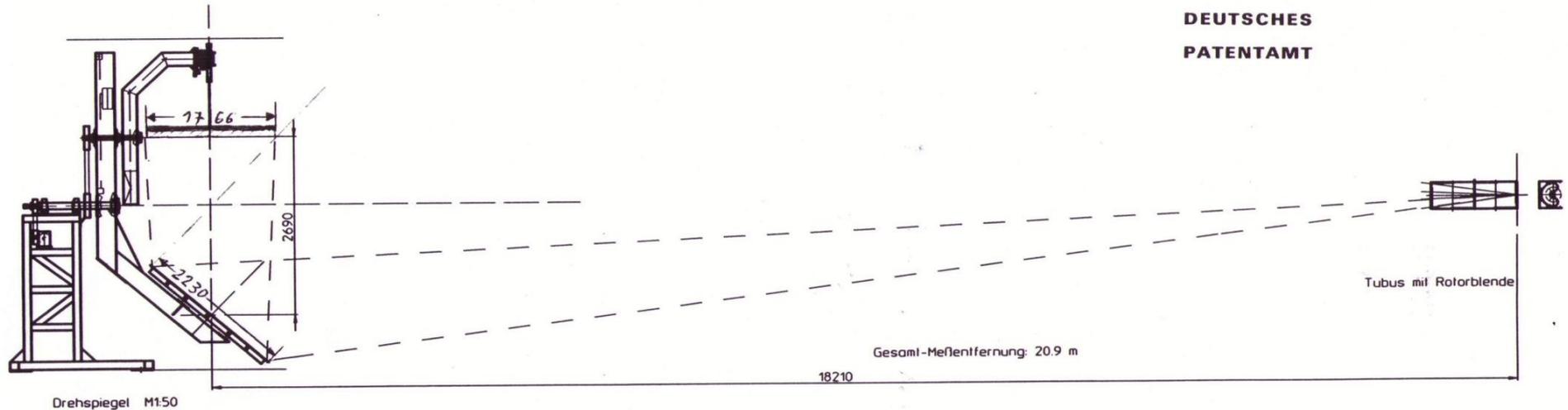
A NEW ECCENTRIC MIRROR GONIOPHOTOMETER  
FOR OPTIMAL ROOM UTILIZATION

GERMAN-PATENT-N°: P 38 02 115.3 / 1995  
PATENT-OWNER: PROF. DR.-ING. PETER MARX

BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT



MANUFACTURER:

***MX-ELEKTRONIK***

Prof. Dr.-Ing. Peter Marx

Am Kleinen Wannsee 12 J

D-14109 BERLIN (GERMANY)

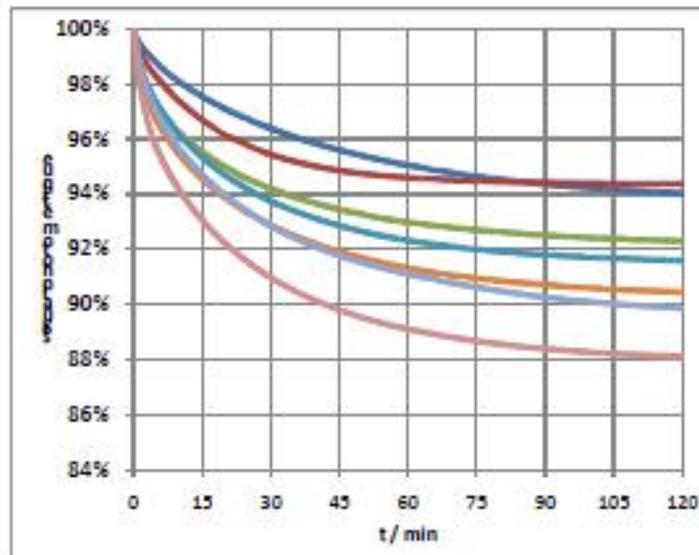
PHONE: 030-8051980 // 030-45042315

FAX: 030-4504-2284

TELEX: 1631

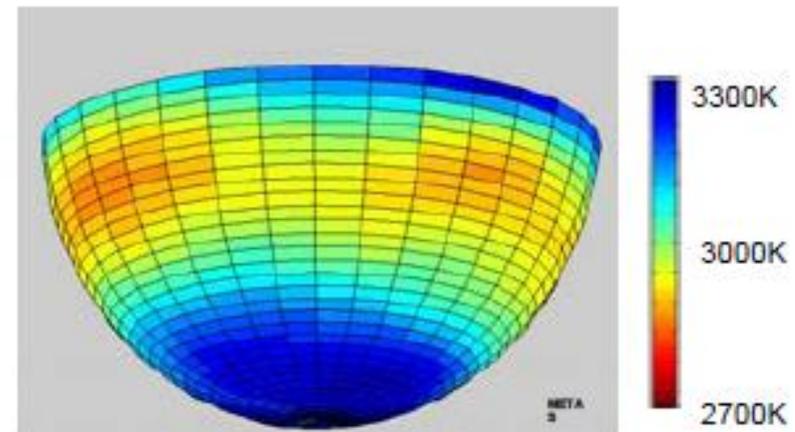
## LED Photometrie: Ein paar Hinweise

Stabilisationszeit (bevor die Messung gestartet wird)



prEN 13032-4:  
Letzten 15 Minuten Änderung  
kleiner 0.5% (Max zu Min).

u.U. richtungsabhängige Farbkoordinaten



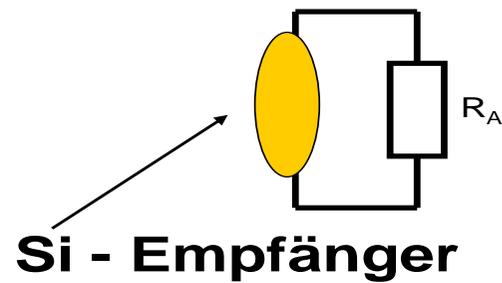
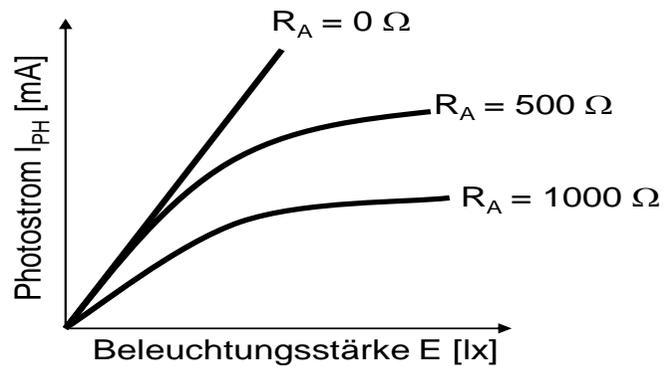
prEN 13032-4:  
-Entlang einer deklarierten Richtung  
-Als Verteilung (Goniokolorimeter)  
-Als Mittelwert (Ulbricht Kugel oder Integration)



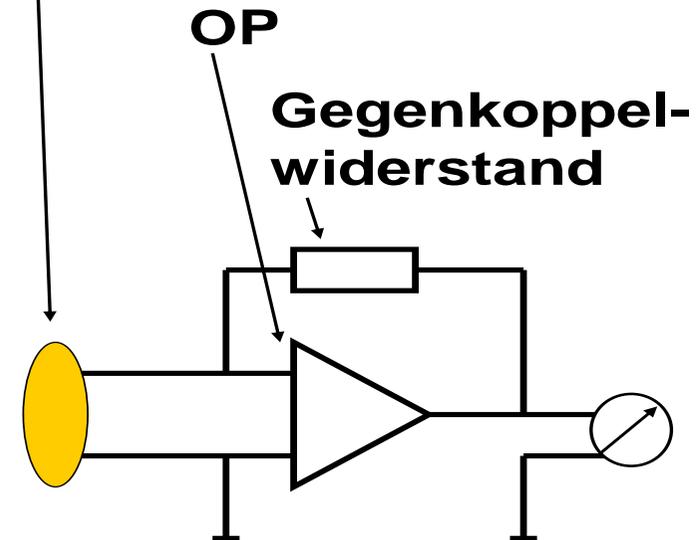
Modernes Drehspiegel-Goniophotometer

## Beleuchtungsstärkemessung

### Silizium - Empfänger, elektrische Beschaltung

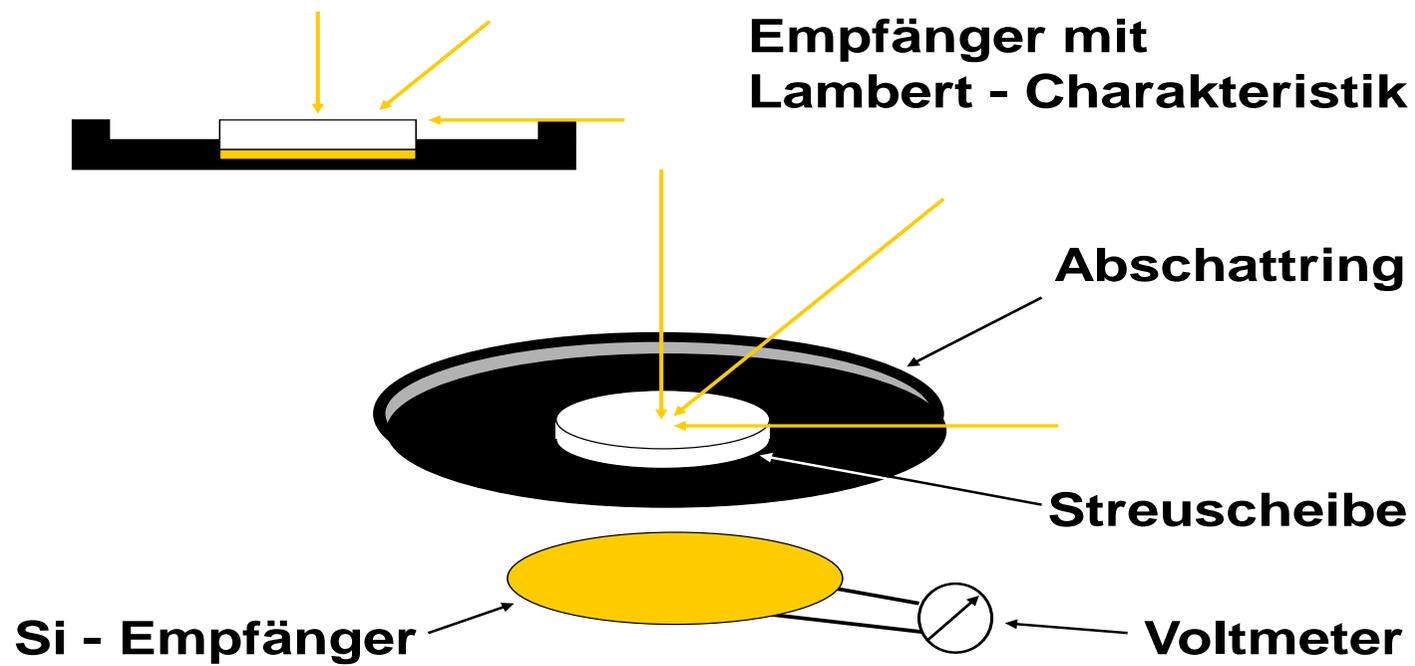


### Si - Empfänger

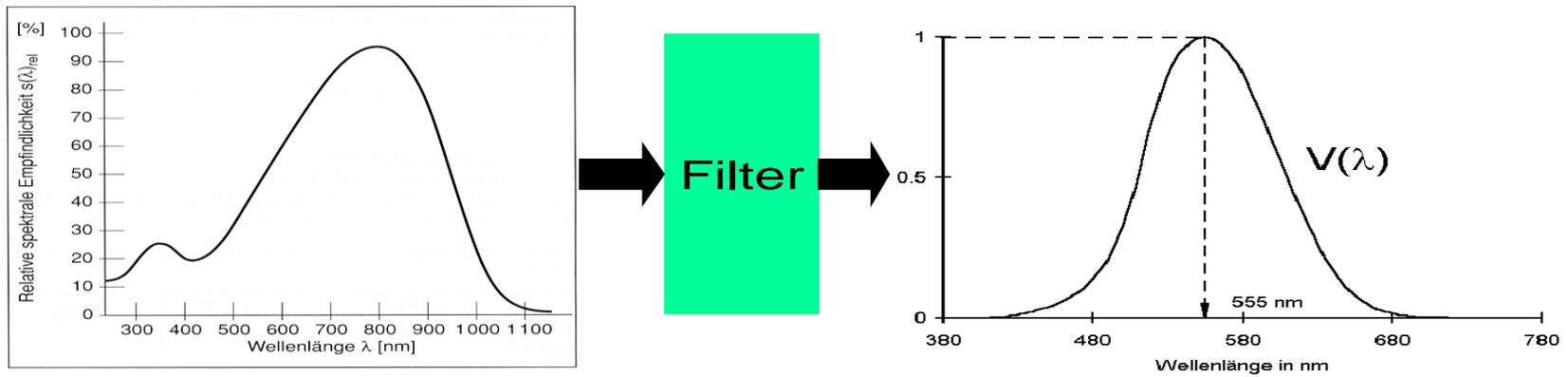


## Cosinus - Anpassung

---



## Silizium - Empfänger, Filterung

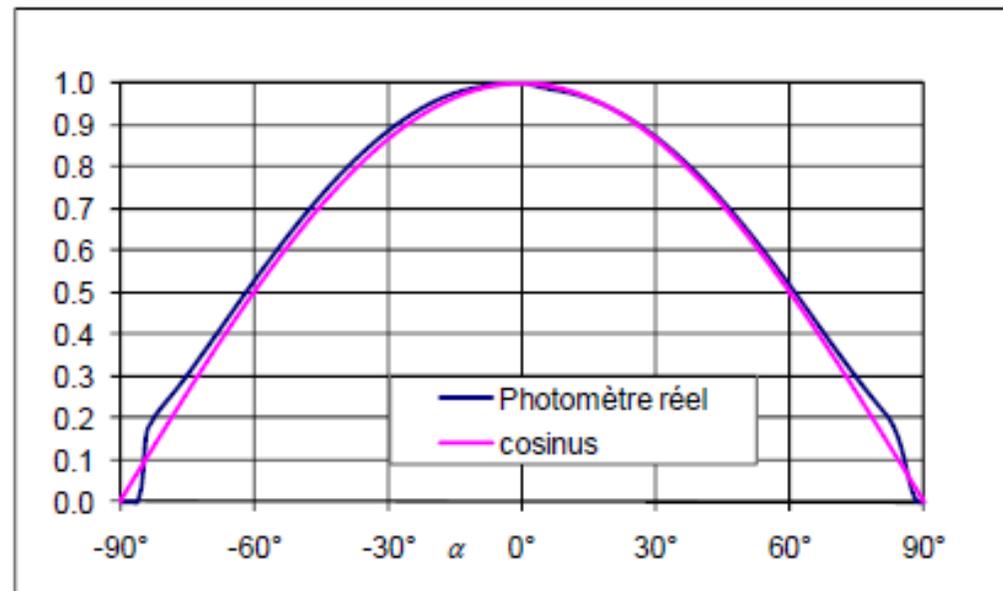


## Weitere Fehlerquellen: Geometrische Eigenschaften von Photometern

Luxmeter:



Kosinus-Anpassung



CIE-Qualitätsparameter:  $f_2$

## Qualitätsparameter für die spektrale Anpassung: $f_1'$

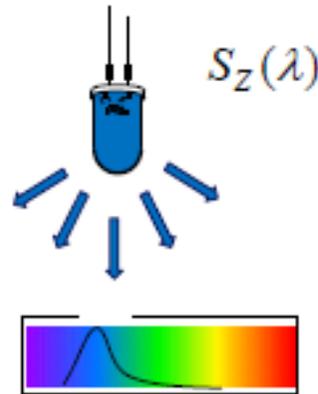
(CIE 69:1987, CIE DS023:2012)

| $f_1'$               | Klasse<br>(DIN 5032-7) | Qualität | Applications  |
|----------------------|------------------------|----------|---|
| <1.5%                | L                      | Höchste  | Labormessungen, Referenzgerät für die Kalibrierung von Photometern (Bezugsnormal) |
| $1.5\% < f_1' < 3\%$ | A                      | Hoch     | Präzisionsmessung   |
| $3\% < f_1' < 6\%$   | B                      | Mittlere | Orientierungsmessung  |
| $6\% < f_1' < 9\%$   | C                      | Gering   | Relativmessungen  |
| Ohne Angabe          |                        |          | Nicht verwenden   |

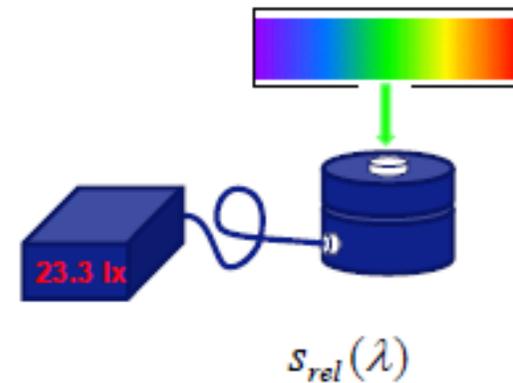
$f_1'$  ist nicht der Fehler oder die Messunsicherheit sondern nur ein Qualitätsindikator

# Korrektur von Messwerten

## 1.) Spektrale Verteilung der Lichtquelle



## 2.) Spektrale Empfindlichkeit des Messgerätes



Formel (CIE 69:1987, CIE DS023:2012):

$$F(Z) = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_R(\lambda) \cdot s_{rel}(\lambda) d\lambda}{\int_{360 \text{ nm}}^{\lambda_{\max}} S_R(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \quad / \quad \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_Z(\lambda) \cdot s_{rel}(\lambda) d\lambda}{\int_{360 \text{ nm}}^{\lambda_{\max}} S_Z(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}$$

Nur für Messgerät von genügender Empfindlichkeit möglich!!

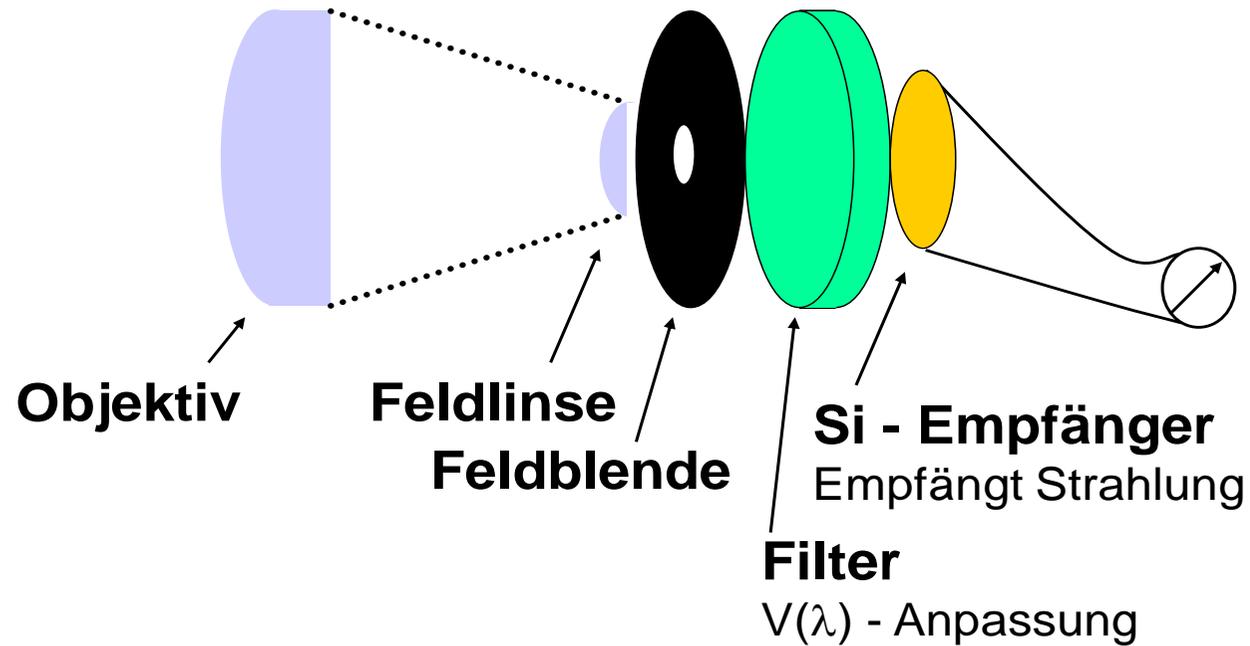


MINILUX-Geräte. Silizium-Photoelement mit  $V(\lambda)$ - und Kosinus-Korrektur gemäß DIN 5032, Klasse B

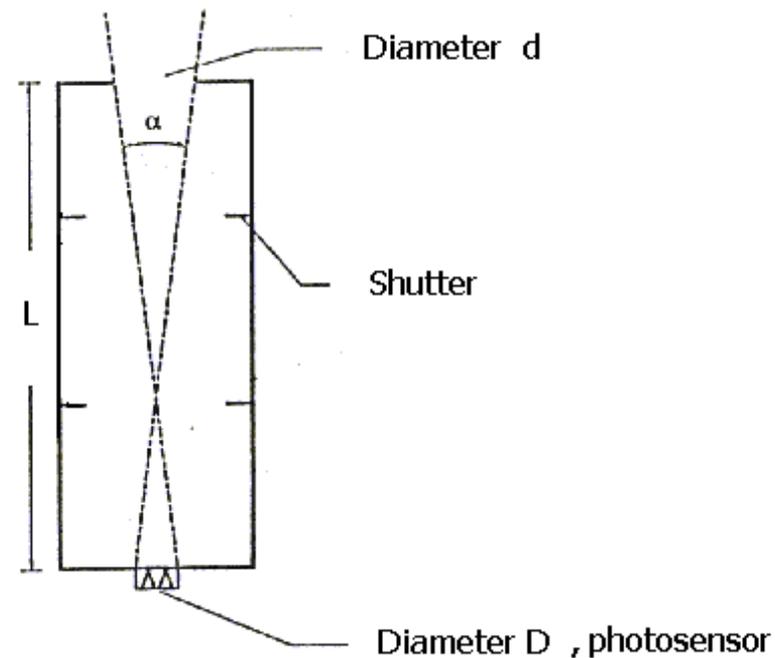
# Leuchtdichtemessung

## Leuchtdichtemessgerät

---



## Leuchtdichtemessung mit Vorsatztube

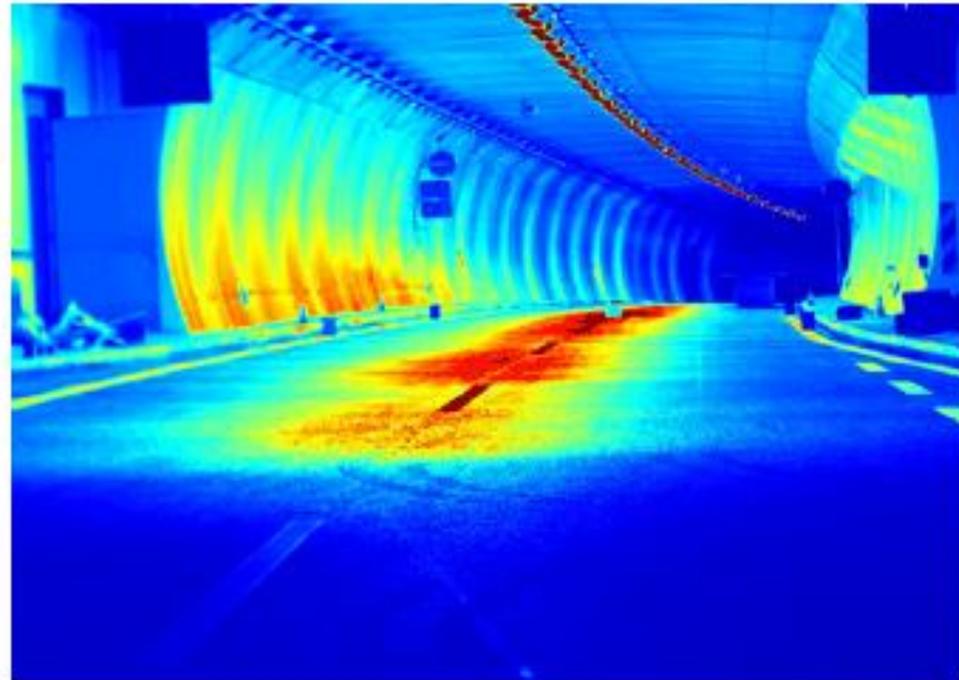


Die Geometrie des Tubus ist so berechnet, dass der Zusammenhang zwischen Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke sehr einfach ist.

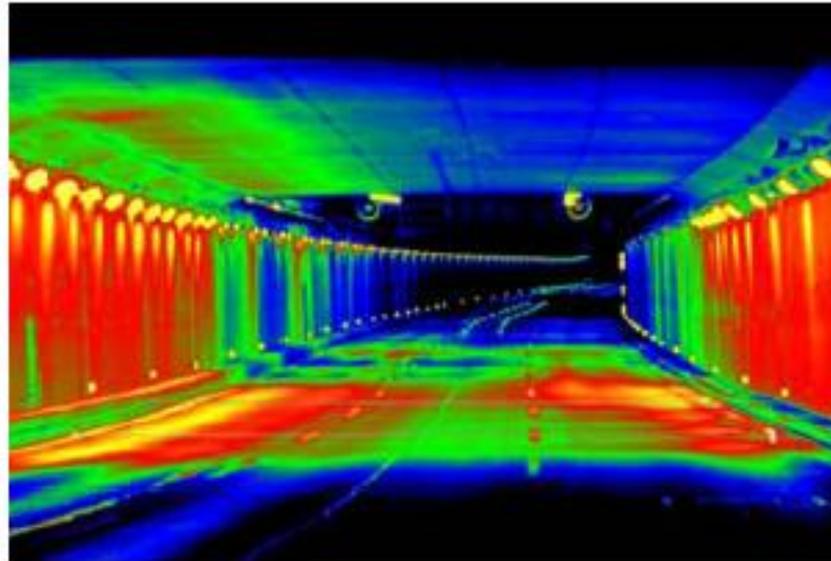
$$L = 100 \times E \quad \text{mit } E \text{ in lx folgt } L \text{ in cd/m}^2$$

Die angezeigte Beleuchtungsstärke in Lux wird mit dem Faktor 100 multipliziert und liefert die Leuchtdichte in  $\text{cd/m}^2$ .

# Leuchtdichtemesskameras (LMKs)



## Leuchtdichtemesskameras (LMKs)



- Eine einfache Digitalkamera ist kein Messgerät
- Der Qualitätsparameter  $f_1'$  ist auch für LMKs wichtig

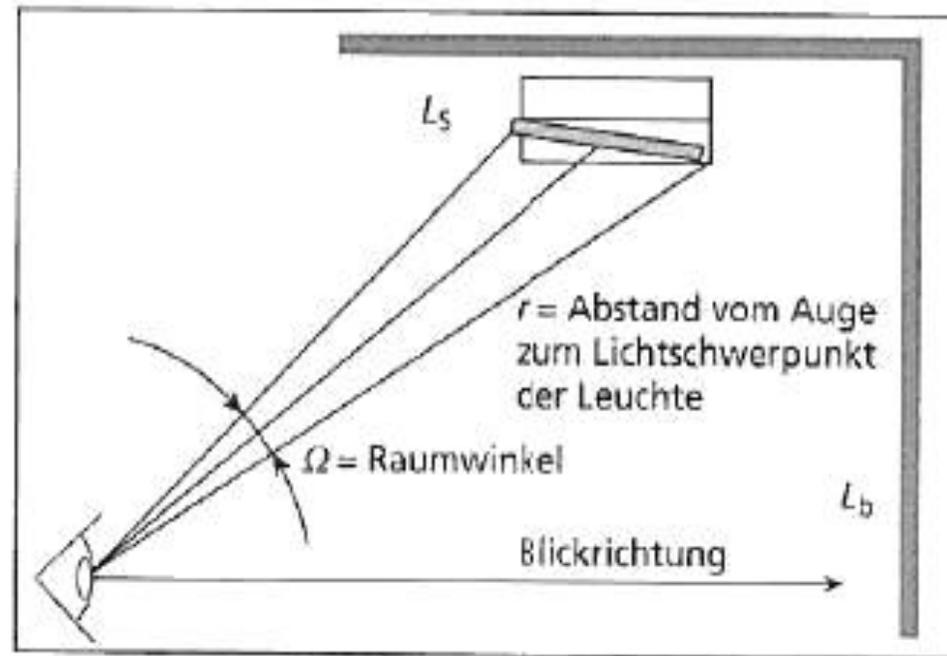
## Leuchtdichtewerte im Alltag:

|                               |       |                                   |
|-------------------------------|-------|-----------------------------------|
| Mond                          | $L =$ | $2\,500 \text{ cd/m}^2$           |
| Kerze                         | $L =$ | $8\,000 \text{ cd/m}^2$           |
| Leuchtstofflampe              | $L =$ | $10\,000 \text{ cd/m}^2$          |
| 100-W-Glühlampe (Opalglas)    | $L =$ | $60\,000 \text{ cd/m}^2$          |
| 100-W-Glühlampe (Klarglas)    | $L =$ | $15\,000\,000 \text{ cd/m}^2$     |
| Sonne                         | $L =$ | $1\,600\,000\,000 \text{ cd/m}^2$ |
| Weißes Papier bei 500 lx      | $L =$ | $150 \text{ cd/m}^2$              |
| Umweltschutzpapier bei 500 lx | $L =$ | $100 \text{ cd/m}^2$              |

Die Leuchtdichte  $L$  hat im Zusammenhang mit der Blendung eine große Bedeutung. Die Leuchtdichte eines Sehobjekts ist von der Sehdistanz unabhängig.

**Direktblendung  
hängt ab von:**

- mittlerer  
Leuchtdichte  $L_s$
- gesehener  
leuchtender  
Fläche  
(Raumwinkel  $\Omega$ )
- Anordnung  $p$   
der Leuchten  
zur Blickrichtung
- Umfeld,  
Leuchtdichte  $L_b$



$$UGR = 8 \log \frac{0,25}{L_b} \sum \frac{L_s^2 \omega}{p^2}$$

## Normen

---

DIN 13032 oder 5032 Lichtmessung

DIN 5033 Farbmessung

DIN 6169 und CIE 13.2 Farbwiedergabe

### **Genauigkeitsklassen für Beleuchtungsstärkemessgeräte:**

| <b>Klasse</b> | <b>Gesamtfehler</b> |
|---------------|---------------------|
| L             | 3 %                 |
| A             | 5 %                 |
| B             | 10 %                |
| C             | 20 %                |

## Reflexions-, Transmissions- und Absorptionsgrad

Reflexionsgrad:  $\rho = \frac{\Phi_{\rho}}{\Phi}$

Transmissionsgrad:  $\tau = \frac{\Phi_{\tau}}{\Phi}$

Absorptionsgrad:  $\alpha = \frac{\Phi_{\alpha}}{\Phi}$

$\Phi_{\rho}$ ,  $\Phi_{\tau}$ ,  $\Phi_{\alpha}$  reflektierter, transmittierter, absorbierter Lichtstrom,  
 $\Phi$  auftreffender Lichtstrom.

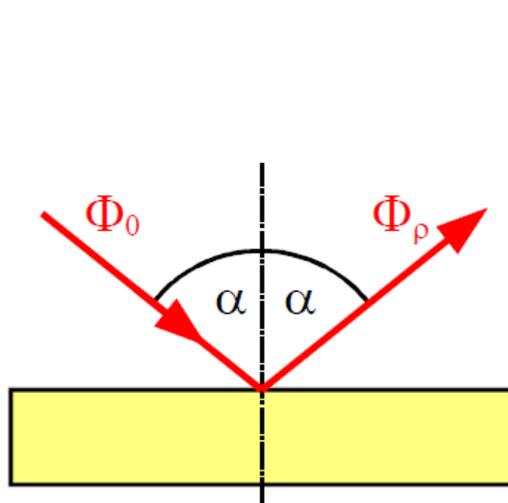
Erfolgt keine Emission im beleuchteten Stoff, so gilt aus Energieerhaltungsgründen:

$$\rho + \tau + \alpha = 1$$

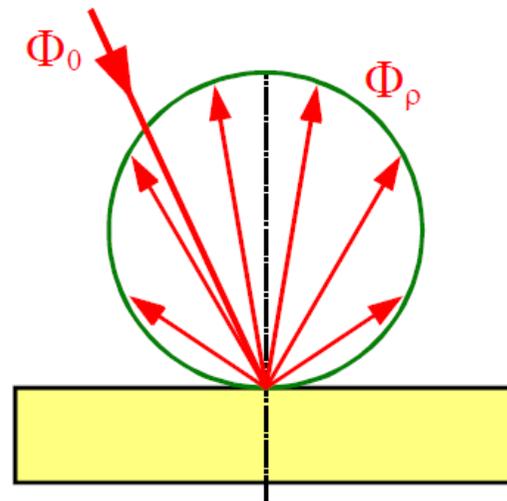
## Reflexions- und Transmissionsgrade einiger Materialien:

|                           |                          |                          |
|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Aluminium, hochglänzend   | $\rho = 0,80 \dots 0,85$ |                          |
| Aluminium, matt           | $\rho = 0,55 \dots 0,75$ |                          |
| Papier, weiß              | $\rho = 0,70 \dots 0,85$ |                          |
| Schnee                    | $\rho = 0,60 \dots 0,70$ |                          |
| Erde                      | $\rho = 0,07$            |                          |
| Haut                      | $\rho = 0,45$            |                          |
| Klarglas, 1 ... 4 mm      | $\tau = 0,90 \dots 0,92$ | $\rho = 0,06 \dots 0,08$ |
| Trübglas, 2 ... 3 mm      | $\tau = 0,36 \dots 0,66$ | $\rho = 0,31 \dots 0,54$ |
| Kunststoff, weiß, getrübt | $\tau = 0,40 \dots 0,60$ | $\rho = 0,20 \dots 0,40$ |

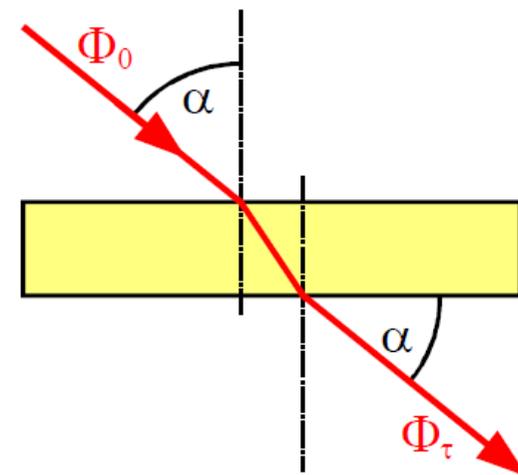
Das Streuverhalten lichttechnischer Materialien liegt zwischen keiner Streuung (gerichtete Reflexion bzw. Transmission) und der gleichmäßigen Abstrahlung in alle Richtungen (diffuse Reflexion bzw. Transmission).



**gerichtete Reflexion**



**diffuse Reflexion**



**Transmission mit Brechung**

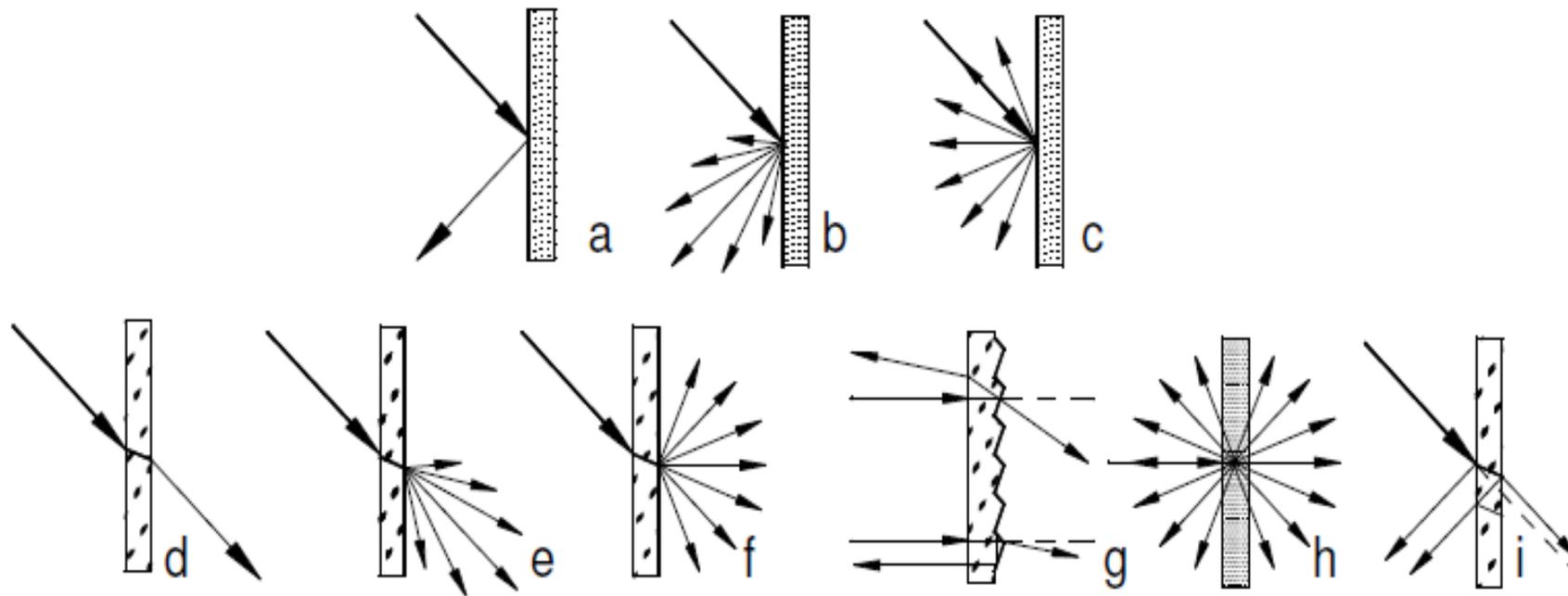
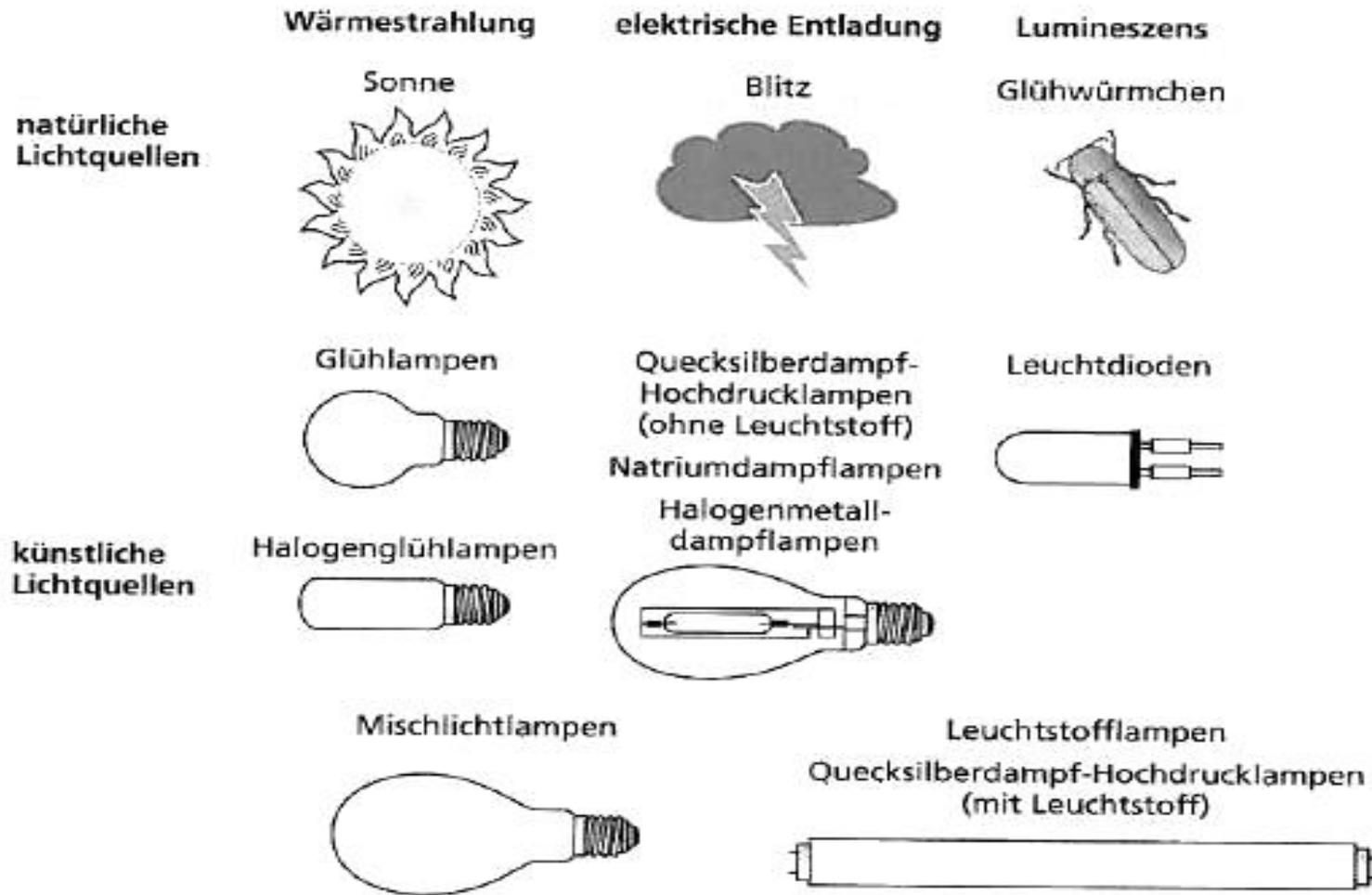


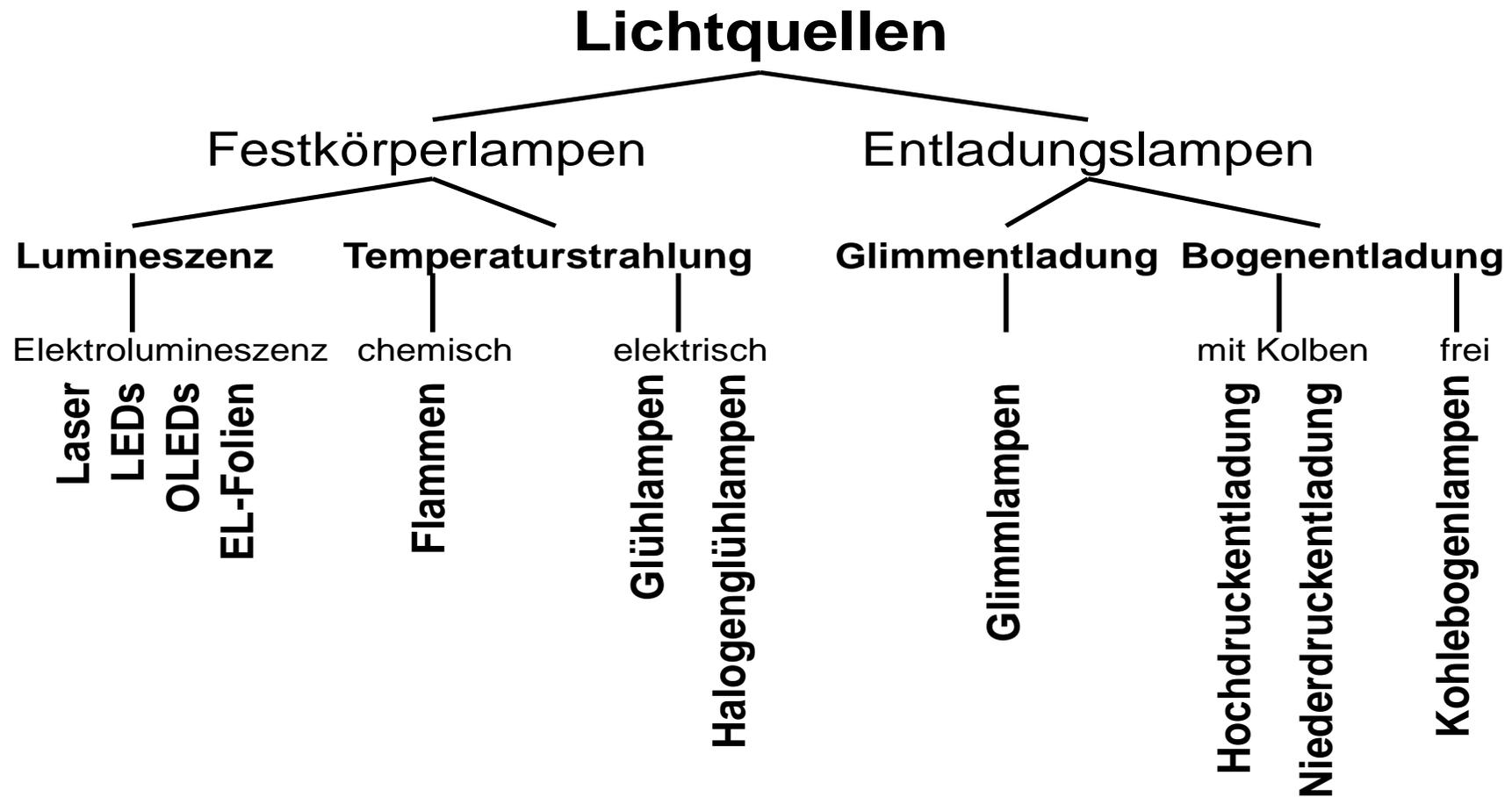
Bild 2: Reflexions- Transmissionstypen: a) ideale gerichtete Reflexion (Spiegel), b) Mischung aus diffuser und gerichteter Reflexion, c) ideal diffuse Reflexion (Lambertscher Strahler), d) gerichtete Transmission für dünne Proben, e) Mischung aus gerichteter und diffuser Transmission, f) vollkommen gestreute Transmission, g) komplexe Geometrie mit Transmission/Reflexion und Totalreflexion (Übergang vom optisch dichteren Medium ins dünnere), h) volumenstreuende Probe und i) Mehrfachreflexion an dickeren Proben.

# Lichtquellen

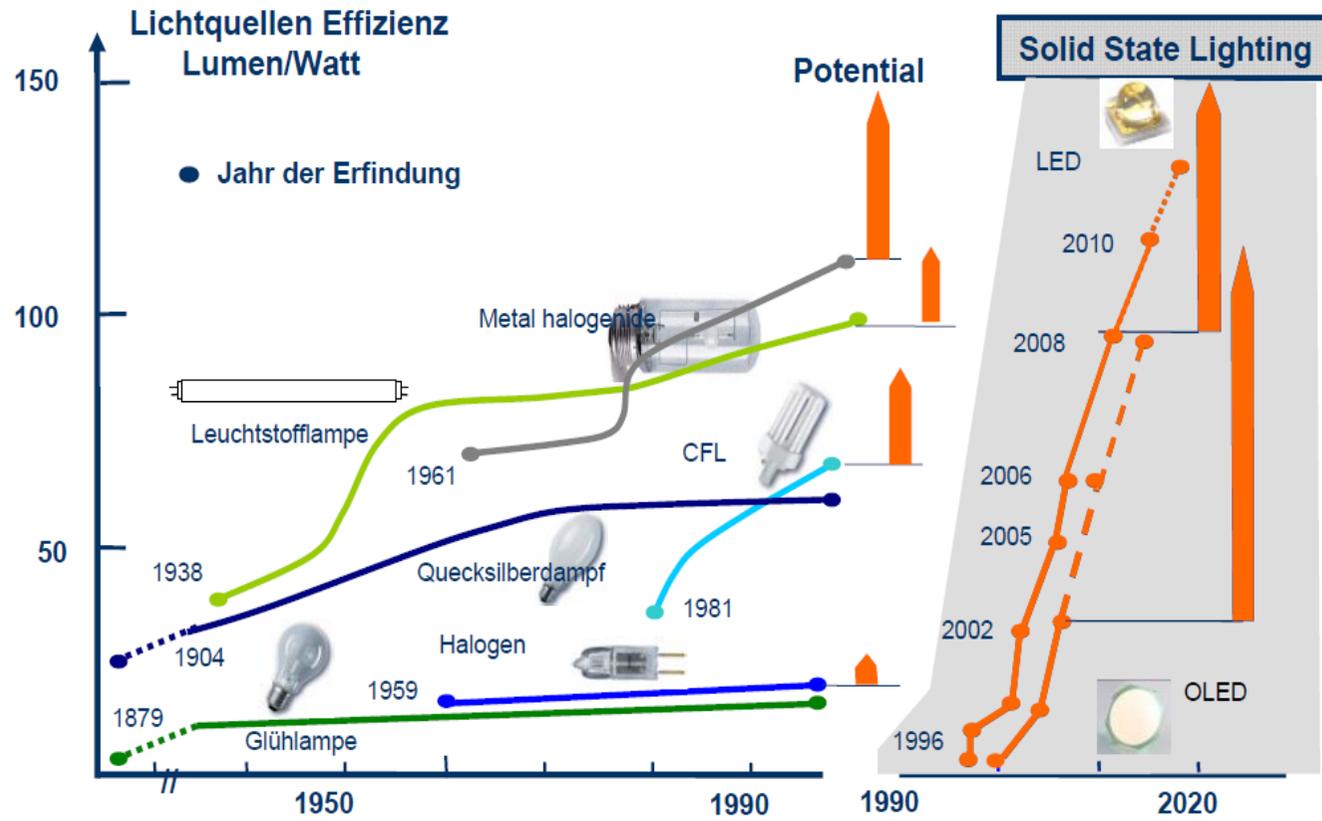


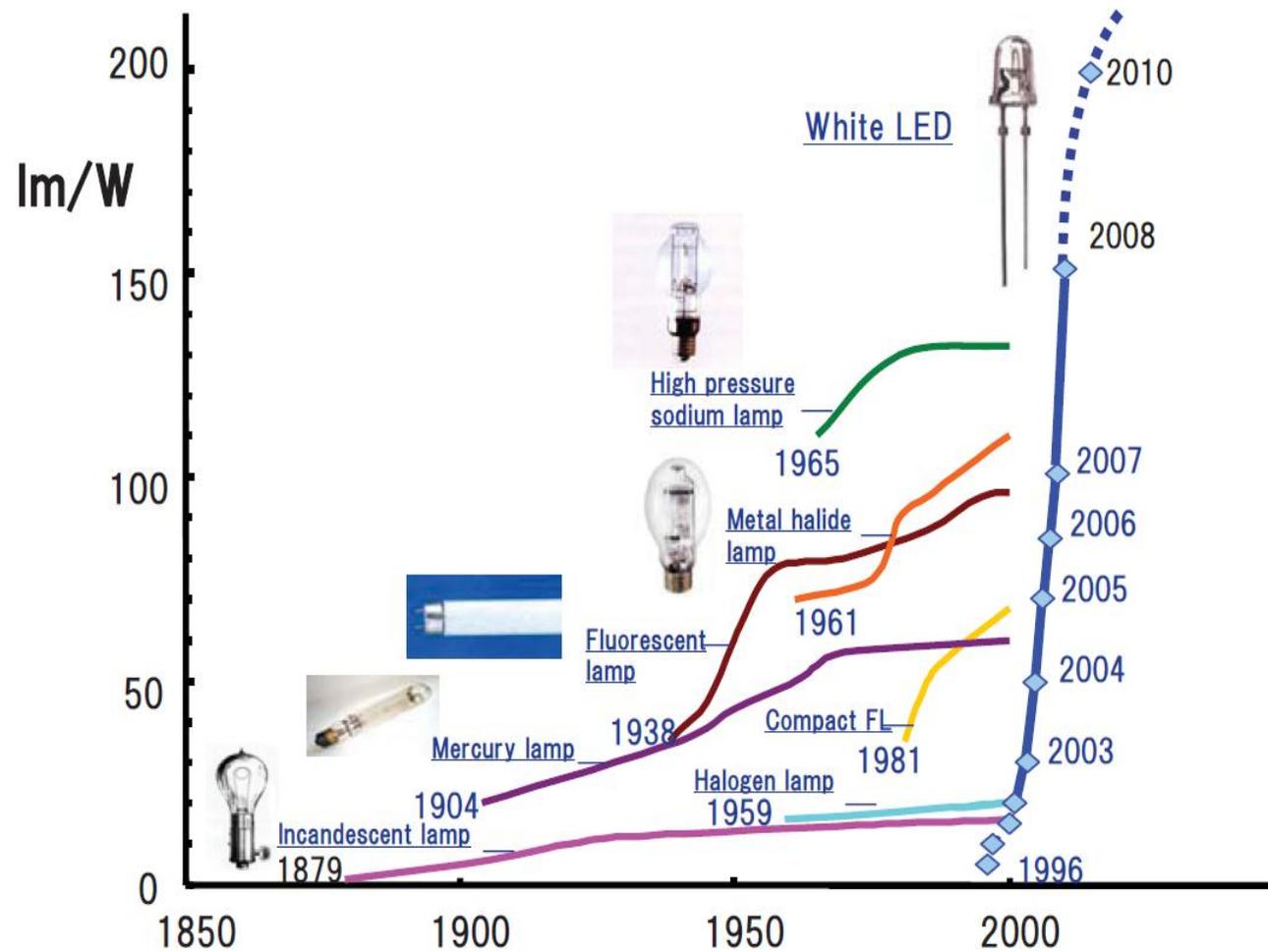
# Lichtquellen

---

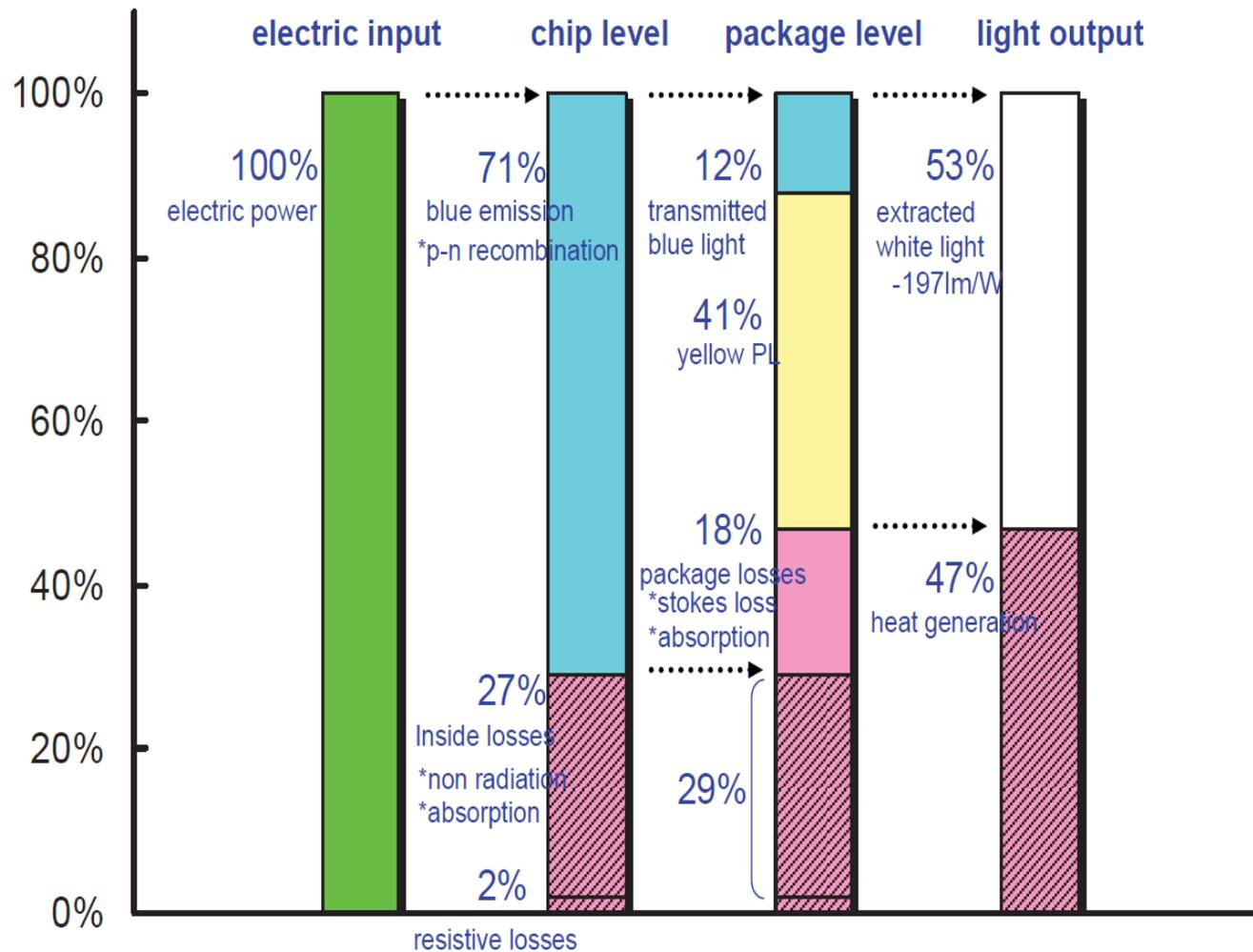


# Effizienz von SSL gegenüber klassischen Technologien





Entwicklung der Lichtausbeute weißer LEDs und herkömmlicher Weißlichtquellen



Energiekonversion einer weißen InGaN/YAG LED (Nichia)

## Lichtausbeute $\eta$

Die Lichtausbeute  $\eta$  ist ein Maß für die Effektivität einer Lampe; sie ist definiert als Quotient aus Lichtstrom  $\Phi$  und elektrischer Leistung  $P_{el}$ . Der theoretische obere Grenzwert der Lichtausbeute beträgt 683 lm/W.

$$\eta = \frac{\Phi}{P_{el}} \quad (1.19)$$

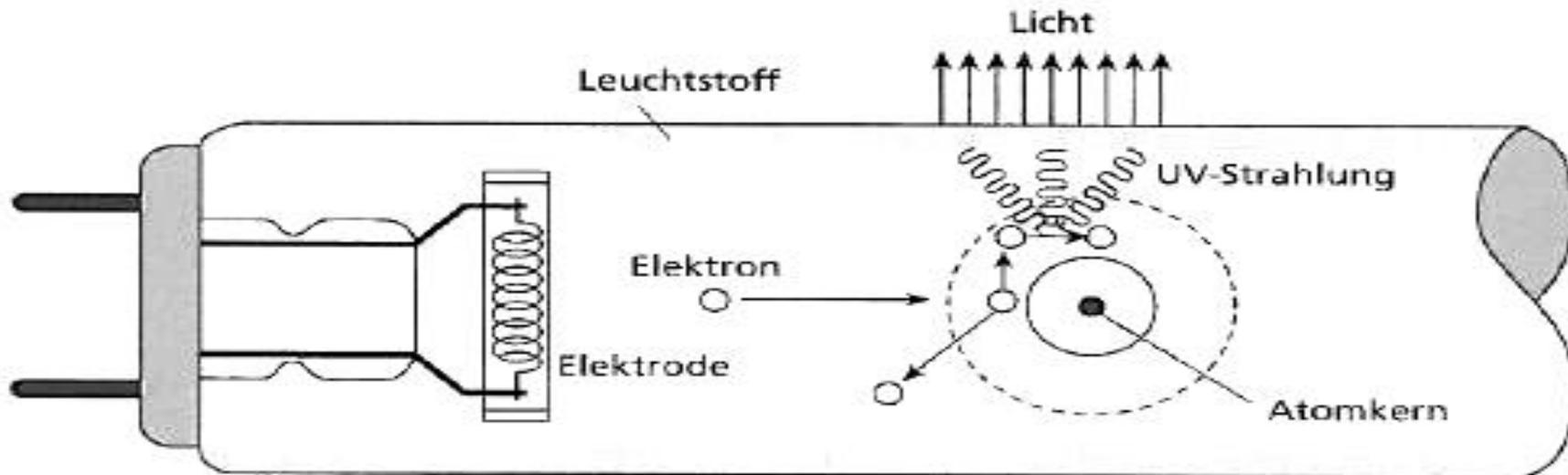
Lichtausbeute verschiedener Lampen:

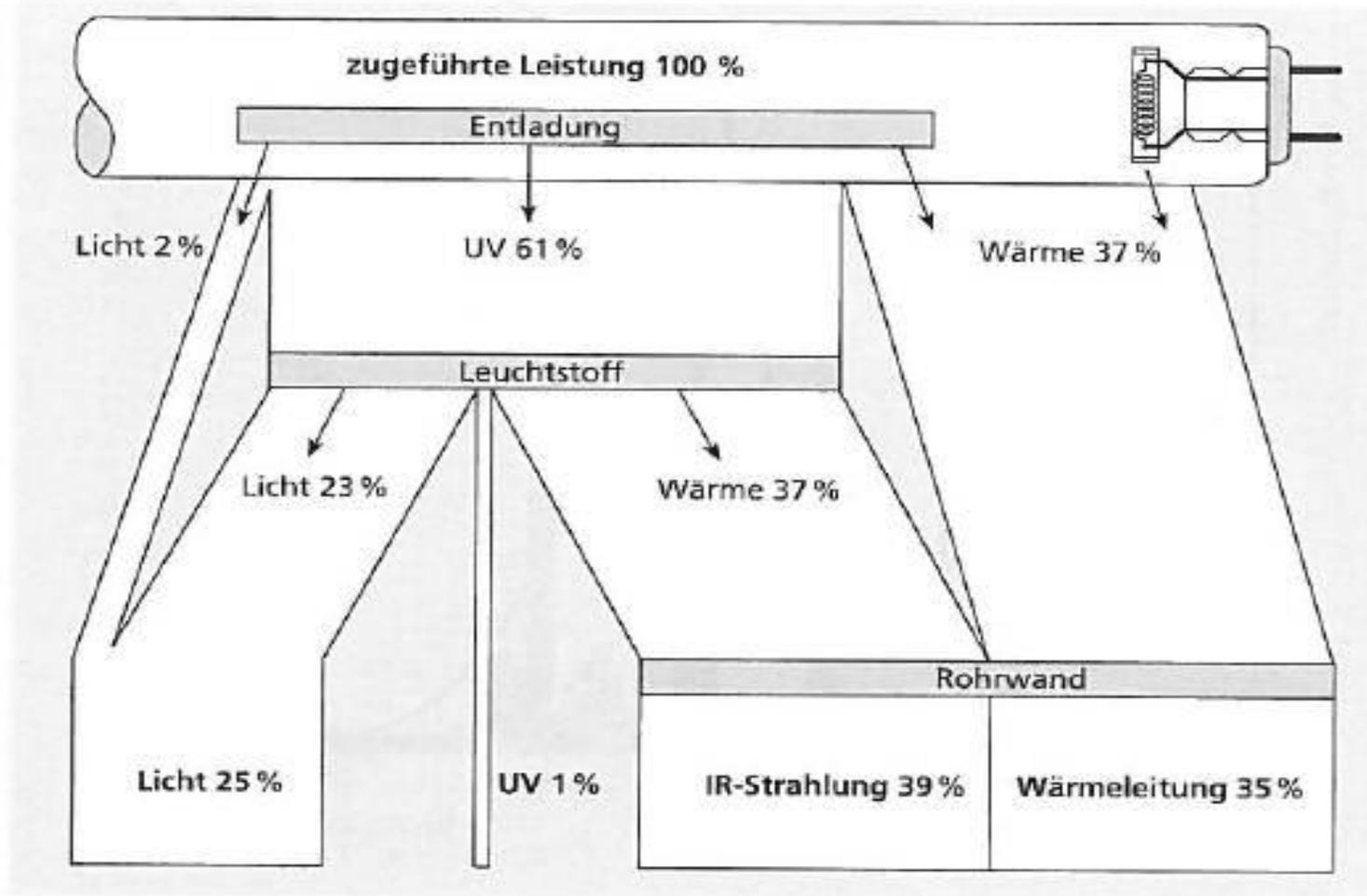
|                                  |                                       |
|----------------------------------|---------------------------------------|
| Glühlampen                       | $\eta = (10 \dots 15) \text{ lm/W}$   |
| Halogenglühlampen                | $\eta = (15 \dots 25) \text{ lm/W}$   |
| Leuchtstofflampen                | $\eta = (60 \dots 100) \text{ lm/W}$  |
| Quecksilberdampf-Hochdrucklampen | $\eta = (40 \dots 55) \text{ lm/W}$   |
| Halogen-Metalllampen             | $\eta = (60 \dots 100) \text{ lm/W}$  |
| Natriumdampf-Niederdrucklampen   | $\eta = (150 \dots 200) \text{ lm/W}$ |

**LED:** Realistisch ist aktuell eine Systemlichtausbeute von ca. 140 lm/W (CREE)

Im NICHIA-Forschungs-Lab in Japan wurde bei weißen 1W-LEDs eine Lichtausbeute von **247 lm/W** erreicht, CREE meldete den Lab-Wert **208 lm/W**. Die Grenze für weißes Licht liegt bei etwa **300 lm/W**.

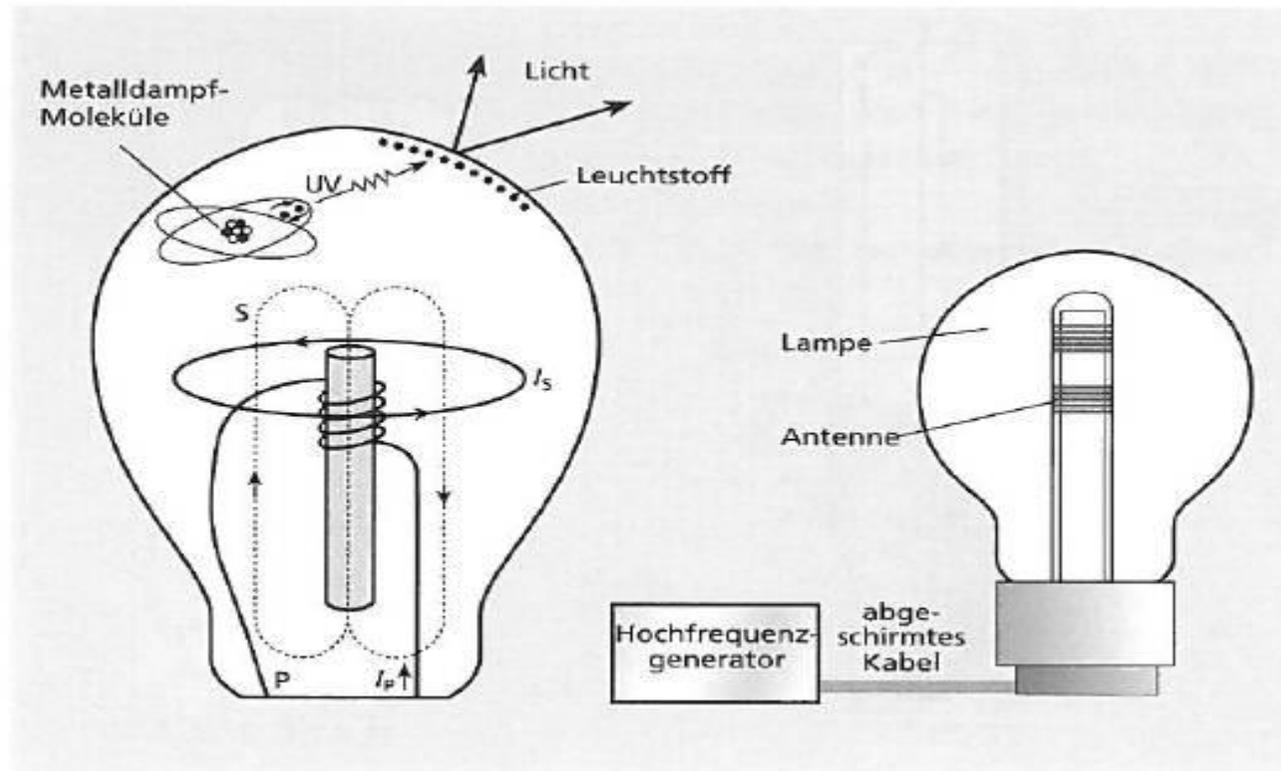
## Prinzip der Leuchtstoff-Lampe

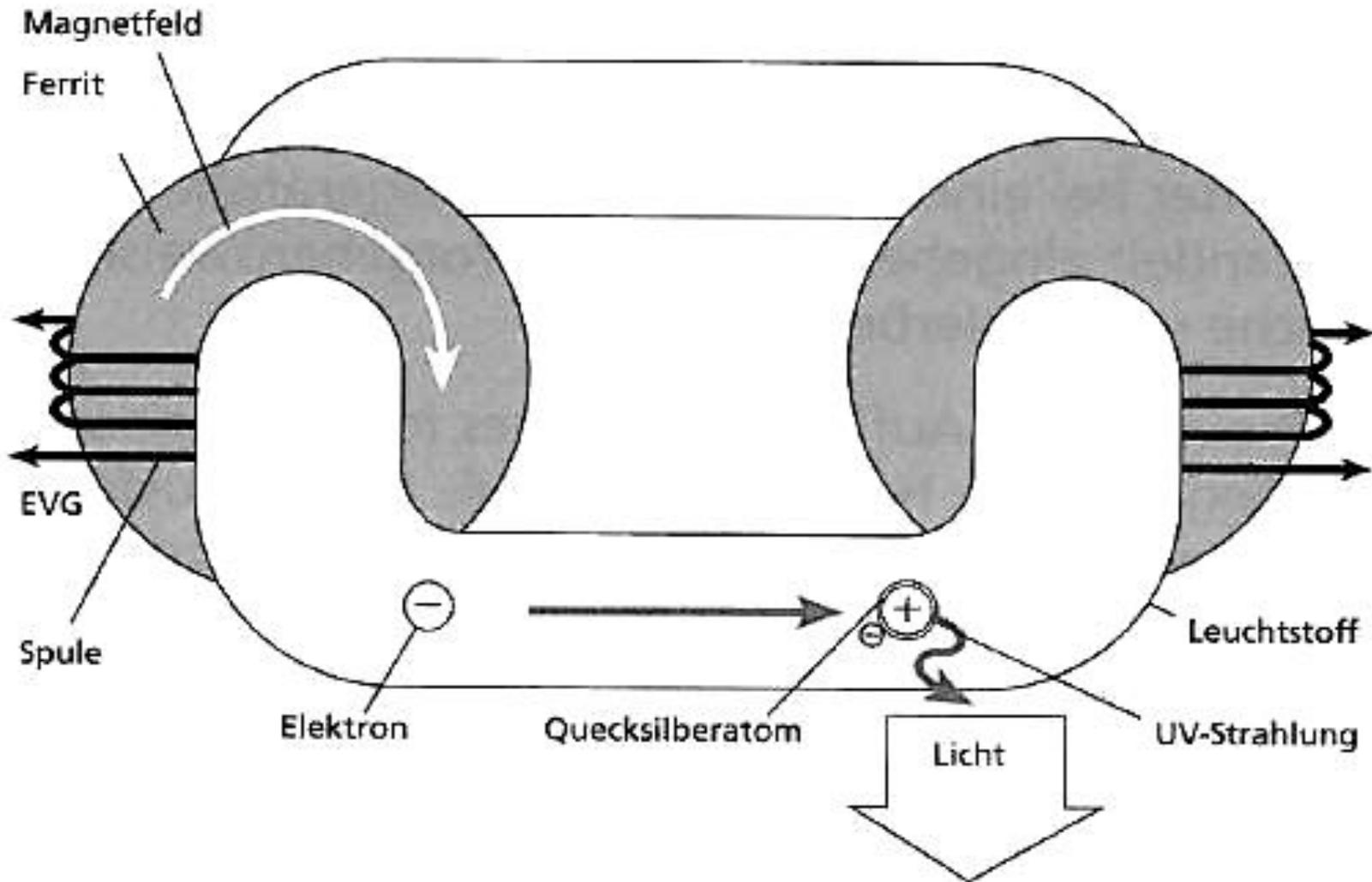




**Energiebilanz der Leuchtstofflampe**

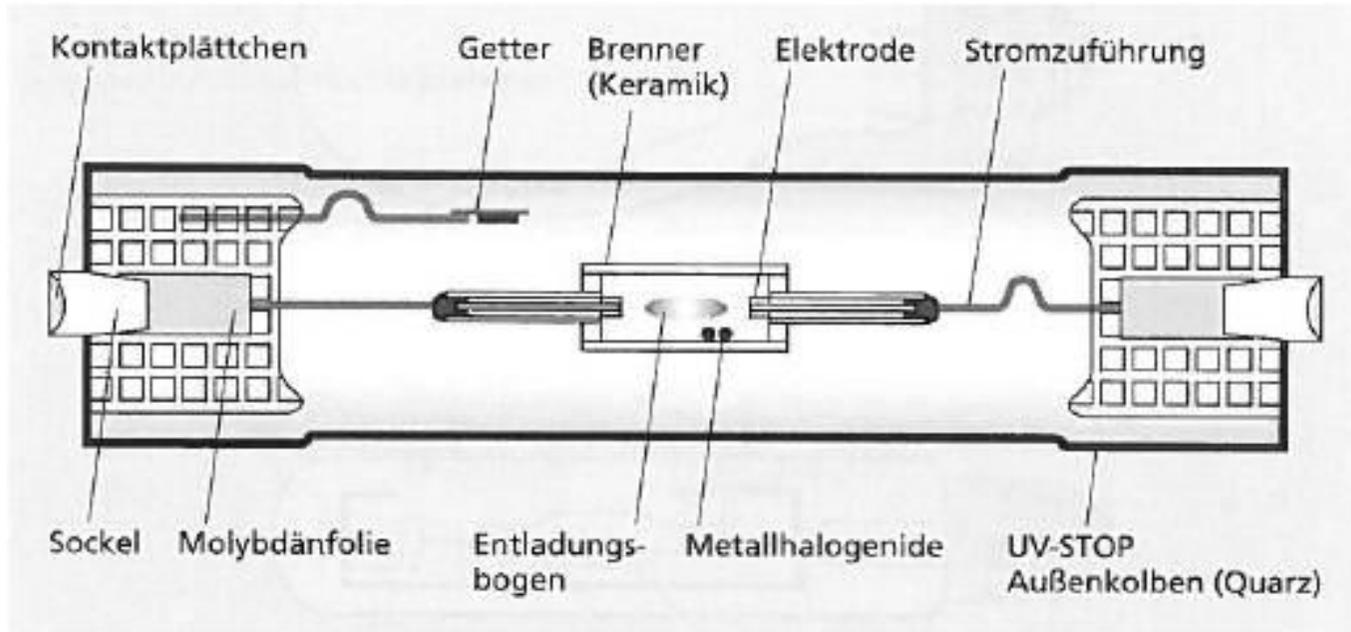
## QL-Induktionslampe, 2,65 MHz, 55W -150W, 70 lm/W

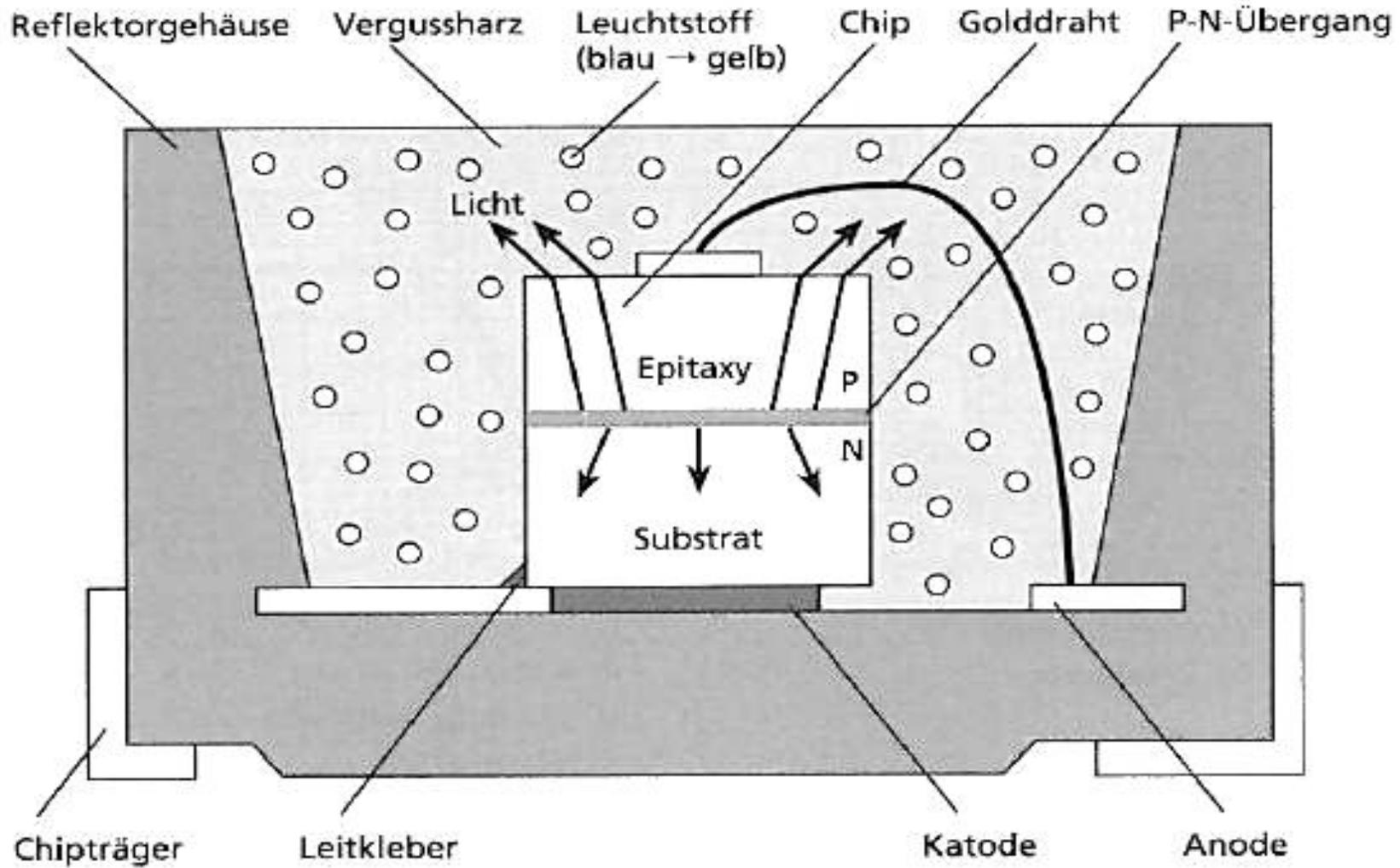




**Elektrodenlose Hochleistungsleuchtstofflampe, 250 kHz, 70W – 150W, 80 lm/W**

## Halogen-Metaldampf Lampe, 20W – 150W





**Leuchtdiode – LED**

## Lichtlabor

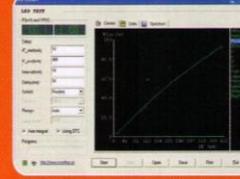
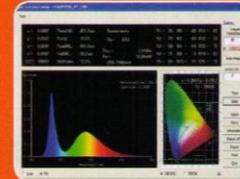
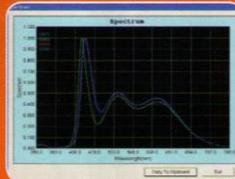
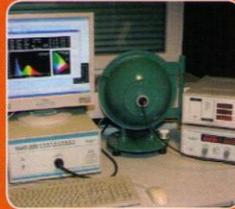
### Nutzen Sie unser modernes Lichtlabor

Neueste Lichtmesstechnik entsprechend den Anforderungen nach CIE

- Hochauflösendes Spectroradiometer
  - CCD Array 1024 x 128
  - Wellenlängen Messbereich: 350 - 1100nm (UV- / sichtbar- / IR-Bereich)
  - Integrationszeit 9ms - 60s

Messgrößen:

- Farbort (x, y / u', v') / Farbtemperatur
- CRI (Ra, Ri (i= 1 - 14))
- Relative spektrale Lichtverteilung P(λ)
- Lichtstrom, Lichtleistung
- 30cm Ulbricht Kugel
- Licht- und Strahlungs-Messeinrichtung zur Messung der Lichtstärke in cd bzw. mW/sr entsprechend den Anforderungen nach CIE 127
- Goniophotometer zur Vermessung der Abstrahlcharakteristik von LEDs und Optiken
  - Winkelauflösung 0.1°
  - Lichtstärke von 10mcd - 200cd mit einem CIE Klasse A Photometer messbar

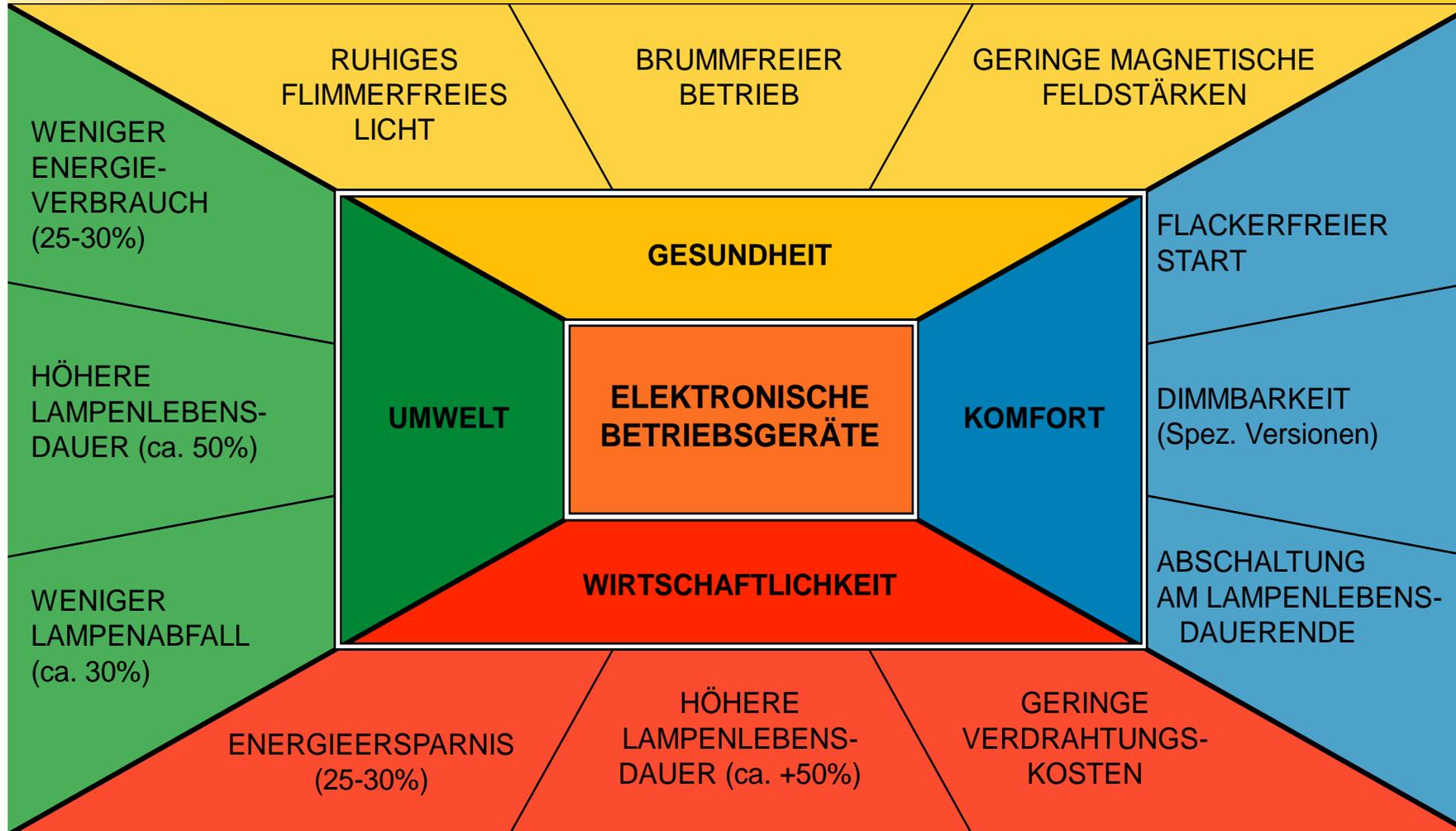


Das Lichtlabor wurde geliefert über:

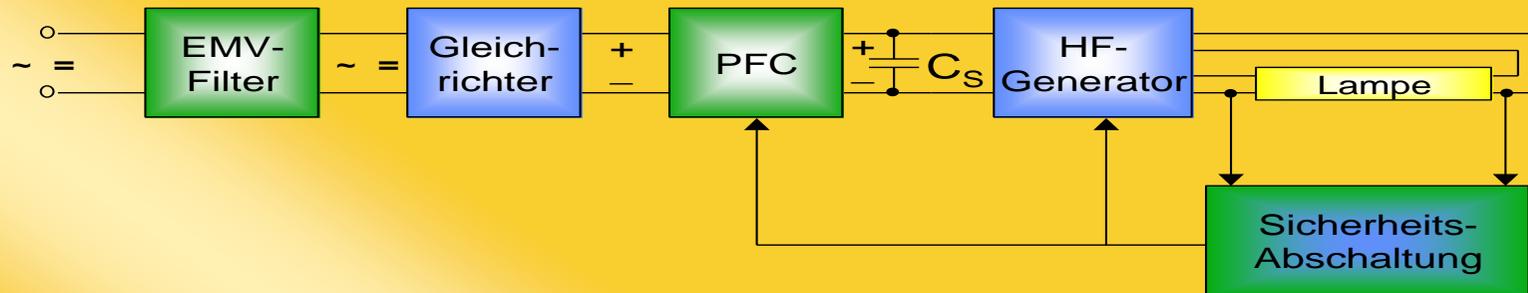
[www.mx-electronic.com](http://www.mx-electronic.com) / Prof. Dr.-Ing. Peter Marx, Berlin

## Glossar

# Vorteile elektronischer Betriebsgeräte



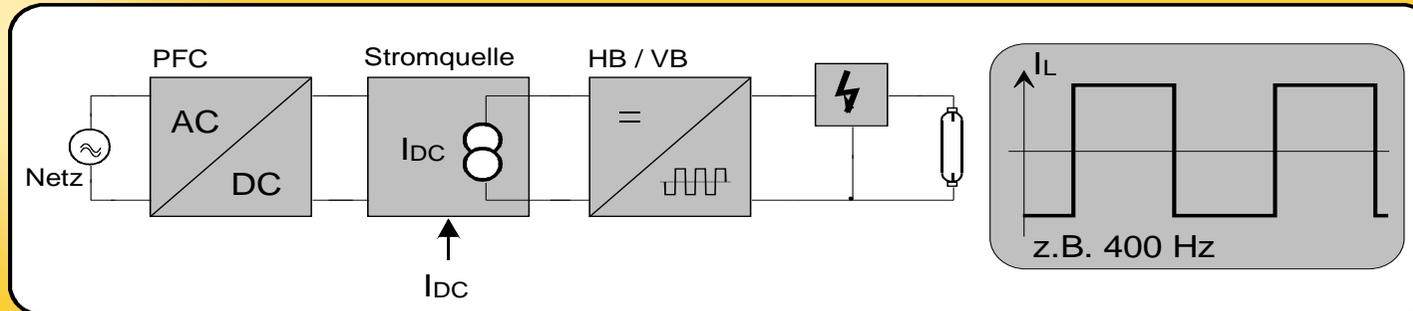
## Komponenten eines Standard-EVG für LL



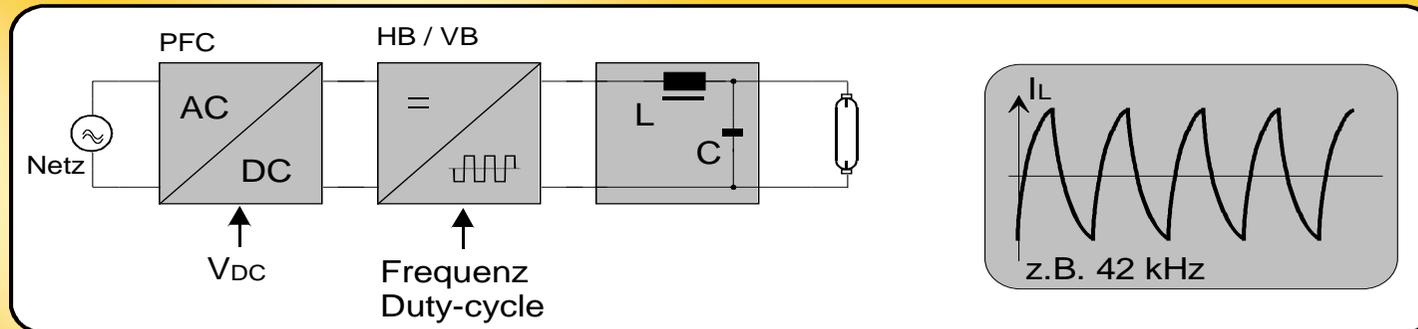
- EMV-Filter für HF-Störungen von 9 kHz bis 30 MHz
- Power Factor Correction: Korrektur der Netzstromoberwellen
- HF-Halbbrückengenerator (40kHz-50kHz) mit Resonanzkreis
- Sicherheitsabschaltung incl. „End of Life“-Detektion
- $C_S$ : Speicherkondensator

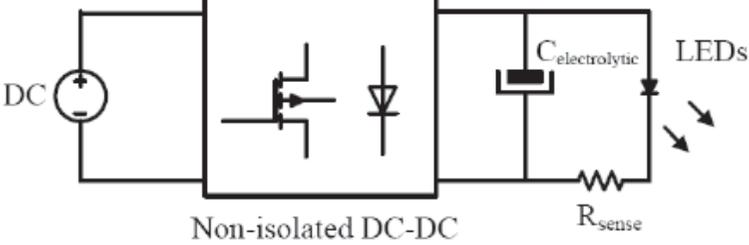
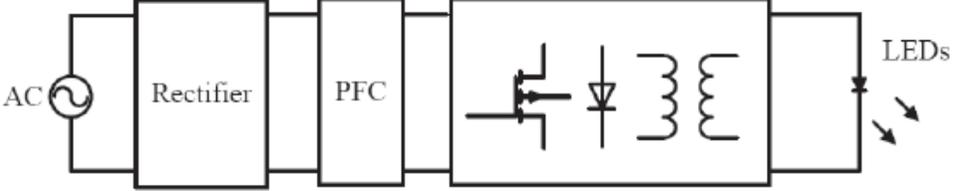
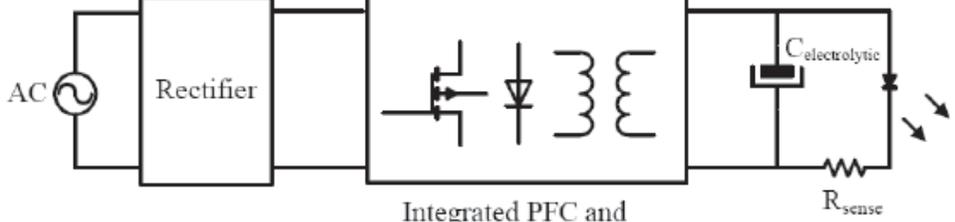
# EVG-Schaltungskonzepte I

## Niederfrequenter Rechteckbetrieb

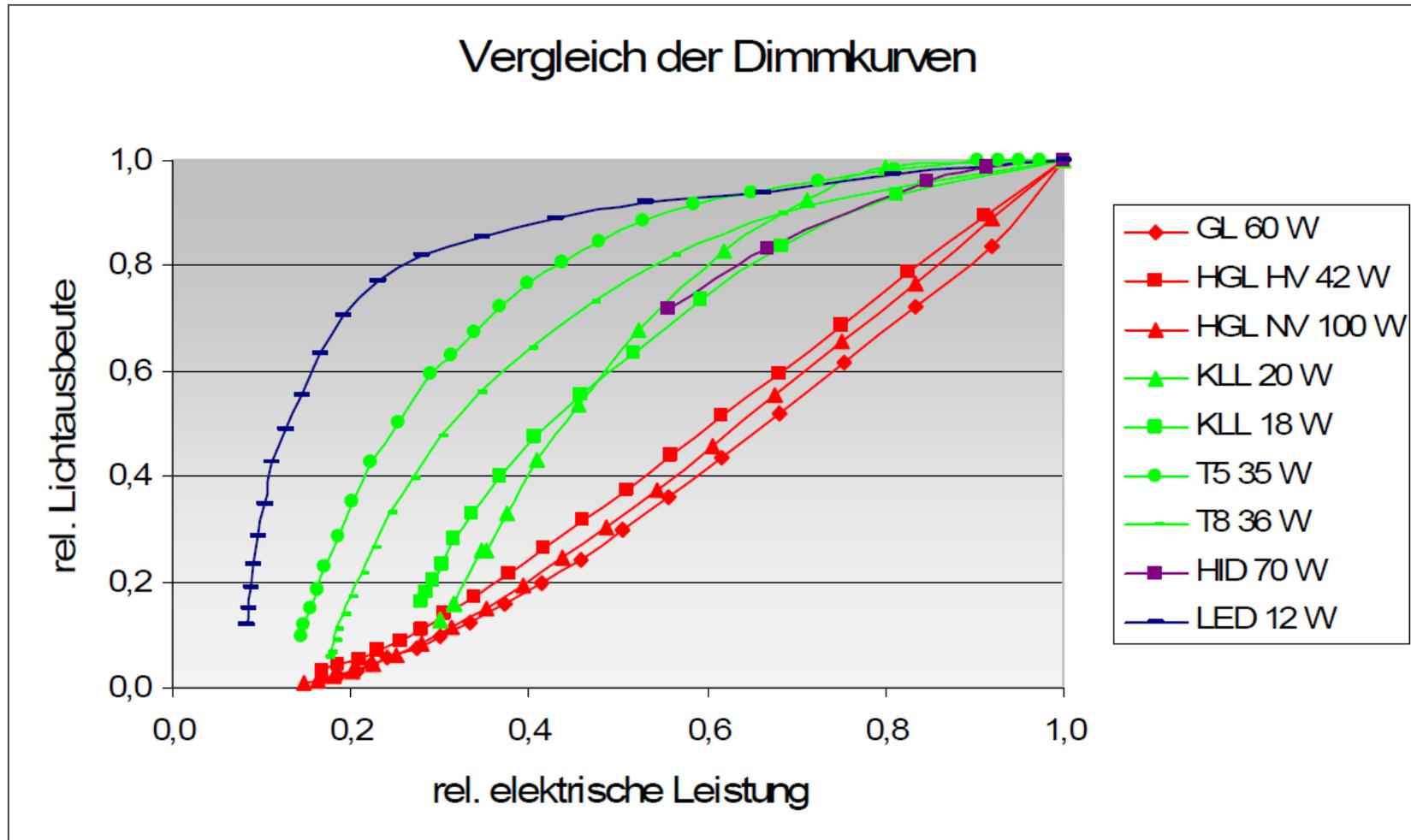


## Hochfrequenter Drosselbetrieb



| Table 3 LED Lamp Electronic Driver Architectures                  |  |
|---|--|
| <p>Non isolated LED Driver<br/>(Buck, Boost, Buck-Boost, Cuk)</p> |  <p>Non-isolated DC-DC converter</p>                 |
| <p>Isolated LED Driver<br/>(Flyback, series resonant)</p>         |  <p>Isolated DC-DC converter</p>                     |
| <p>Integrated LED Driver<br/>(Integrated Buck-Flyback)</p>        |  <p>Integrated PFC and Isolated DC-DC converter</p> |

## LED-Konverter-Prinzipien

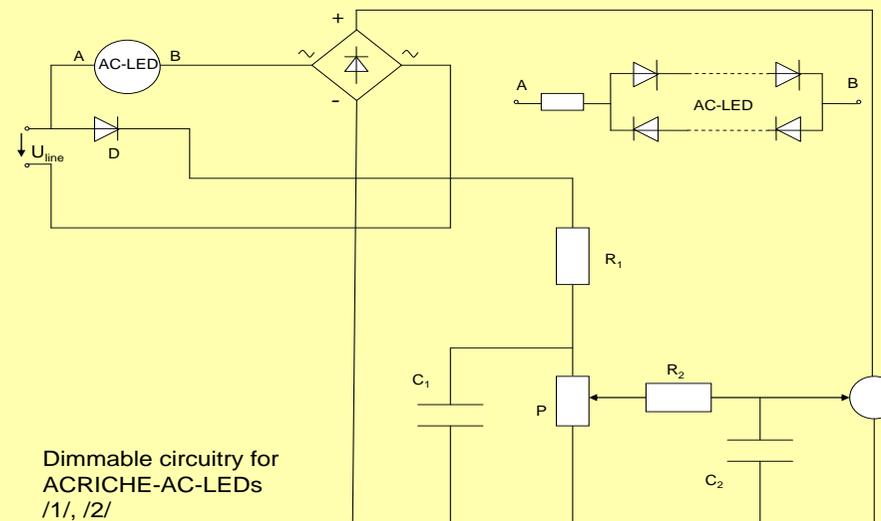


Beim Dimmen ist der Rückgang der System-Lichtausbeute bei LEDs am geringsten (blaue Kurve)

## Einfache Dimmschaltung für Wechselstrom-LEDs (z.B. ACHRICHE)

### Simple and low cost dimming-design

- The drawing shows the simple and low cost circuit-design (announced to patent pending)



- The current through the AC LEDs can be controlled e.g. by means of a MOS-FET-Transistor S, which is connected over a bidirectional rectifier in row with the AC LED.
- Dimming is possible by changing the gate-voltage by means of a voltage divider, consisting of the resistance R1 and the potentiometer P.

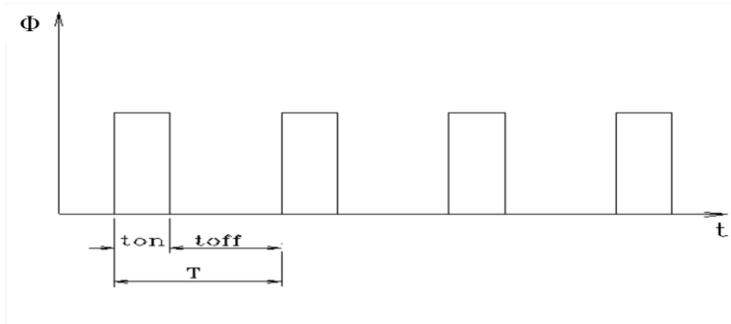
## Licht-Welligkeit W nach CIE

$$W = (\phi_{\max} - \phi_{\min}) / \phi_{\max} \quad \text{mit } (0 \leq W \leq 1)$$

Es gibt DC-Licht und (DC+AC)-Licht. Für **Glühlampen** ist  $W = 0,2$  bis  $0,3$ , für **Leuchtstofflampen**  $0,3$  bis  $0,8$  und für **Hochdrucklampen**  $0,6$  bis  $0,9$ .

Starke Lichtwelligkeit kann zu stroboskopischen **Effekten** führen. Werden Leuchtstofflampen und Hochdrucklampen mit EVGs betrieben, ist die Lichtwelligkeit sehr klein. Bei Dimmung von LEDs mit der üblichen Pulsweitenmodulation (PWM), gilt

$$W_{\text{LED}} = (\phi_{\max} - \phi_{\min}) / \phi_{\text{mittel}} \quad \text{mit } (1 \leq W_{\text{LED}} < \infty)$$



PWM-Verfahren, hierbei entsteht eine erhebliche Lichtwelligkeit

## Analog-Dimm-Verfahren

Das Analog-Dimm-Verfahren von LEDs vermeidet die i. A. störende Lichtwelligkeit, dieses Prinzip ist in der Lichtbranche noch weitgehend unbekannt!

Beim Analogdimmen werden die LEDs statt mit Pulsweitenmodulation (PWM) mit einem kontinuierlich regelbaren Konstant-Gleichstrom gedimmt, d.h. es entsteht keine Lichtwelligkeit!

## Vorteile des Analog-Dimm-Verfahrens:

1. Kein Flimmern, kein Stroboskopeffekt, keine Interferenzen mit anderen Lichtquellen wie z.B. Video-Bildschirmen, Vermeidung evtl. Probleme bei TV- Aufnahmen und Fotos mit Digitalkameras usw.
2. Verminderte Augenermüdung durch angenehmes Gleichlicht (DC-Licht), das natürliche Tageslicht ist auch ein langsam veränderliches Gleichlicht (DC-Licht)
3. Geringere Strombelastung der LED-Sperrschicht, dadurch geringere Sperrschichttemperatur, höhere Lichtausbeute, höhere Lebensdauer
4. Günstige EMV, da keine steilen Strom- und Spannungspulse auftreten, PWM-Pulse erzeugen dagegen ein breitbandiges Störspektrum!
5. Keine Gefahr evtl. wahrnehmbarer akustischer Geräusche

Beim Dimmen von Leuchtstofflampen mit entsprechenden EVGs wird wg. der relativ hohen Betriebsfrequenz bzw. bei Hochdrucklampen mit niederfrequentem

Rechteckbetrieb (das ist im Prinzip ein Gleichstrombetrieb mit alternierender Polarität, um z.B. akustische Resonanzen im Entladungsgefäß zu vermeiden) ein quasi konstantes Licht erzeugt (DC-Licht), der AC-Lichtanteil ist sehr gering.

## **Messung elektrischer LED-Größen**

### **Elektrische Größen:**

Vorwärtsstrom  $I_F$ , Vorwärtsspannung  $U_F$ , Sperrstrom  $I_R$ , Sperrspannung  $U_R$ ,  
Verlustleistung, Leistungsfaktor, Kurvenform des Netzstroms,

Netzspannungsbereich, Abhängigkeit des Lichtstroms von der  
Netzspannung, Konstant-Strom, Konstant-Spannung, elektrischer Wirkungsgrad  
( $> 90\%$ ), Tastverhältnis (PWM)

ESD-Festigkeit, z.B. bis 8 kV ( ESD = Electro-Static-Discharge).

Elektrostatische Ladungen und deren Feldstärke können mit einem Feldmeter ermittelt werden.

Netz-Transienten-Festigkeit bei Konvertern und LED-Modulen (> 4 kV), EMV (elektromagnetische Verträglichkeit, Störspektrum).

THD = Total Harmonic Distortion eine gebräuchliche Angabe, um die Größe der Anteile, die durch nichtlineare Verzerrungen eines elektrischen Signals entstehen, zu quantifizieren.

Der THD definiert sich über die Messung der Summe der harmonischen Anteile eines Signals im Verhältnis zur Grundschiwingung

$$THD = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}}{U_1}$$

## Messung elektrischer LED-Größen

Es gibt spezielle Mess- und Testgeräte zur Bestimmung der elektrischen Parameter von LEDs und LED-Konvertern.



Programmierbare Quelle für LED-Konstantströme und LED-Konstantspannungen sowie Einzelpulse und Pulsfolgen, Messung von  $U_F$ ,  $I_F$ ,  $U_R$ ,  $I_R$



Intelligentes Sinus-Netz-Speisegerät zum Test von LED-Konvertern



LED-Speisegerät mit Volt- und Amperemeter



Digitales Leistungsmessgerät für LED-Lichtquellen



ESD (Electrostatic Discharge) –Testgerät



Transienten Generator für EMS-Messungen an LED-Systemen (EMS = Elektromagnetische Störfestigkeit)



EMS Surge Generator (Surge = Flanke mit steilem Anstieg)

## Messung thermischer Größen

Verwendet werden z.B.: Kontaktthermometer (PT1000, Thermoelemente, Halbleiter-Sensoren), IR-Strahlungs-Thermometer und Wärmebildkameras. LED-Sperrschicht-Temperaturen  $T_j$  können nur indirekt gemessen werden.

Der absolute Wärmewiderstand  $R_{th}$  in  $^{\circ}\text{C}/\text{W}$  oder  $\text{K}/\text{W}$  ist eine spezifische Kennzahl eines Bauteils. Er wird u. a. zur Charakterisierung von Kühlkörpern oder Wärmeleitpads angegeben.

Für die in der Praxis relevante Junction-Temperatur  $T_j$  gilt:

$$T_j = R_{thja} \cdot P + T_a$$

$R_{thja}$  = Wärmewiderstand (junction / ambient)

$T_j$  = Junction Temperatur  
(Sperrschichttemperatur)

$T_a$  = Umgebungstemperatur ( ambient )

$P$  = Gesamtleistung der LED (  $I_f \cdot V_f$  )

### Beispiel für 1W-LED:

$$P = 3 \text{ V} \times 0,35 \text{ A} = 1,05 \text{ W}$$

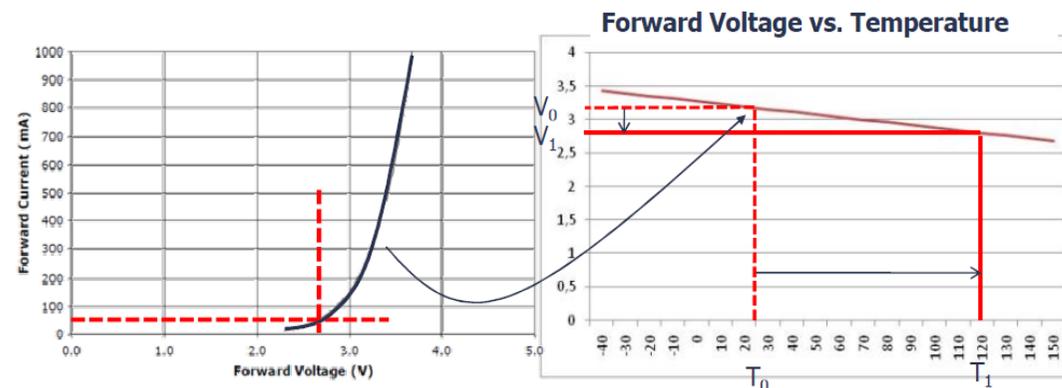
$$T_j = (30^{\circ}\text{C}/\text{W} \cdot 1.05 \text{ W}) + 50^{\circ}\text{C} = 81,5^{\circ}\text{C}$$



Elektronischer Analysator zur Messung von LED-Junction-Temperatur, thermischem Widerstand und elektrischen Parametern von LEDs

## Alternatives Verfahren zur Bestimmung von $T_j$

Die LED-Vorwärtsspannung  $U_F$  ist eine Funktion der Sperrschicht-Temperatur  $T_j$  und des LED-Stroms  $I_F$ . Typische Temperaturkoeffizienten für die Vorwärtsspannung bei konstantem LED-Strom liegen zwischen -1,5 bis -4 mV/K.



$$T_j = T_1 = T_0 + (U_1 - U_0) / -0.004 \text{ V/}^\circ\text{C}$$

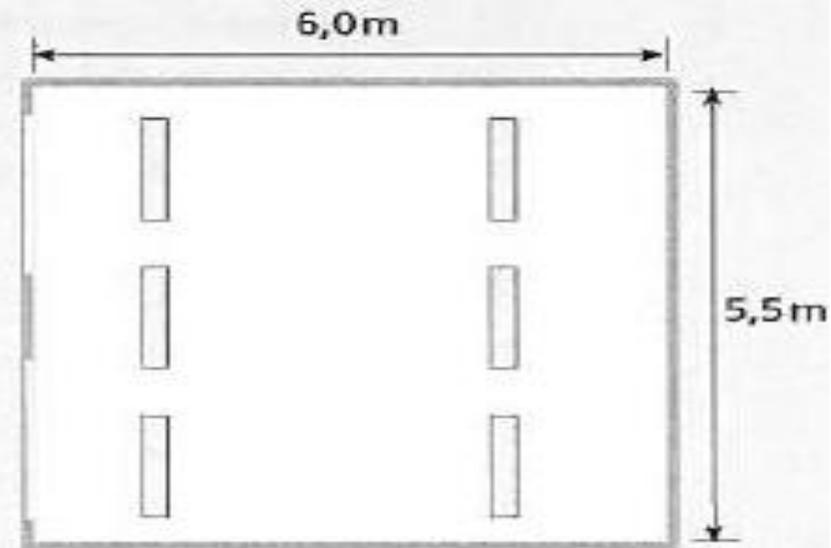
$$T_0 = 25^\circ\text{C}, U_0 = 3,20 \text{ V}, U_1 = 2,82 \text{ V}$$

$$T_j = 25^\circ\text{C} + (-0,38 \text{ V}) / -0.004 \text{ V/}^\circ\text{C} = 120^\circ\text{C}$$

Messungen mit gepulstem LED-Strom (z.B. 350 mA und 20 ms Strompulsdauer) verhindern die Eigenerwärmung der Sperrschicht und reduzieren die Messzeit.

## Wirkungsgradformel

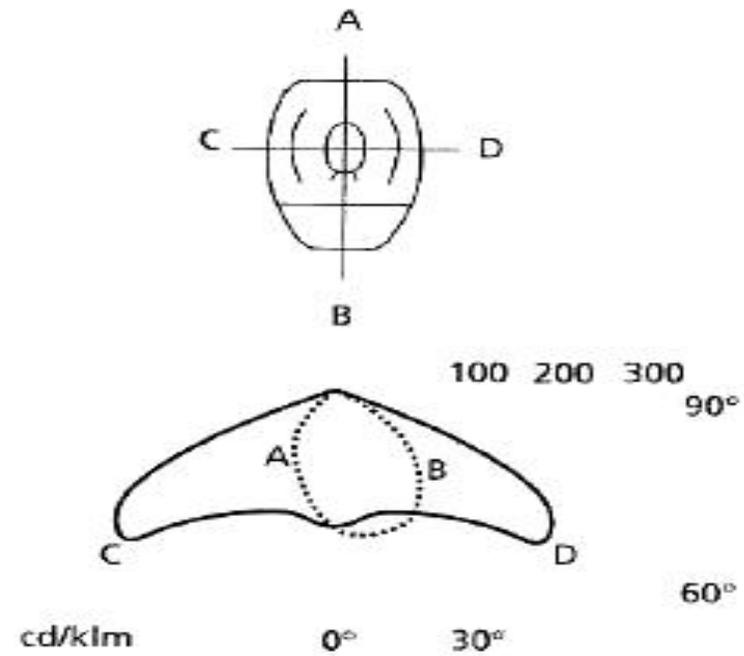
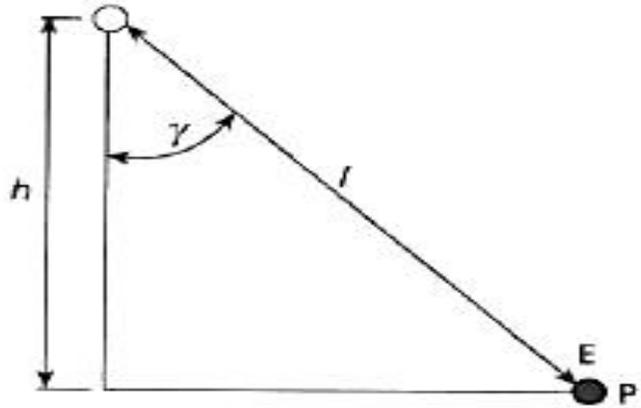
| Raum  |   | Leuchte   | Lampenlichtstrom             |
|---|---|---|------------------------------|
| Fläche  | $A = 5,5\text{ m} \cdot 6,0\text{ m} = 33\text{ m}^2$ | Spiegelrasterleuchte mit 2 Dreiband-Leuchtstofflampen 35W | $\Phi_{Lp} = 3300\text{ lm}$ |
| Lichtpunkthöhe  | $h = 1,9\text{ m}$                                    |   |                              |
| Raumindex   | $k = 1,5$   |   |                              |
| Reflexionsgrade   | $\rho = 0,5/0,5/0,3$                                  | Beleuchtungswirkungsgrad $\eta_B = 0,64$                  |                              |
| DIN EN 12464 fordert Beleuchtungsstärke $E = 500\text{ lx}$                       |   |   |                              |
| Erforderlicher Lichtstrom   |   |   |                              |
| $\Phi = \frac{E \cdot A}{0,7 \cdot \eta_B} = \frac{500 \cdot 33}{0,7 \cdot 0,64}$ |   |   |                              |
| $\Phi = 36830\text{ lm}$  |   |   |                              |
| Leuchtanzahl  |   |   |                              |
| $\frac{\Phi}{\Phi_{Lp}} = \frac{36830\text{ lm}}{3300\text{ lm}} = 11,2$          |   |   |                              |
| gewählt: 6 Leuchten   |   |   |                              |

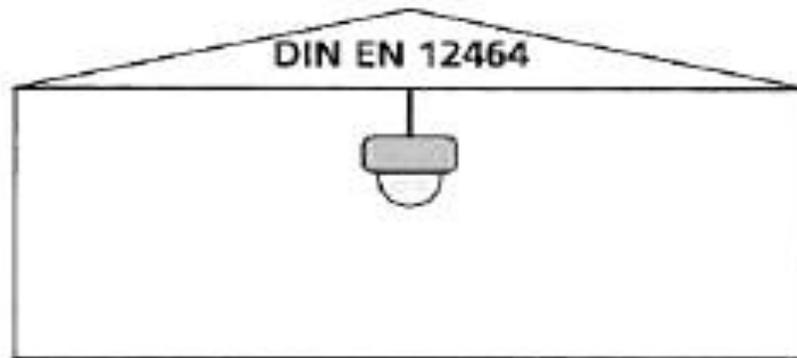


## Punktbeleuchtungsformel

$$E_h = \frac{I}{h^2} \cdot \cos^3 \gamma$$

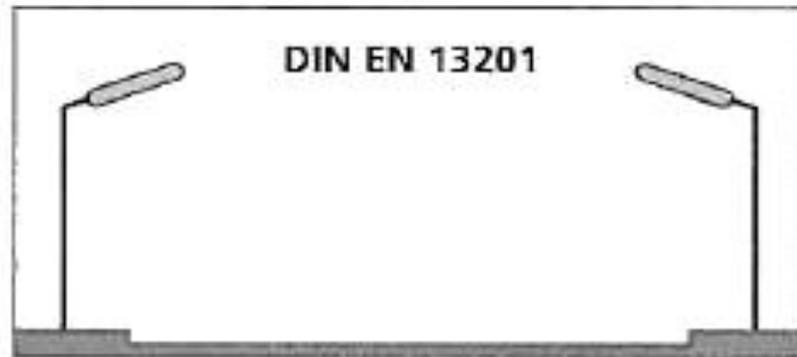
- $E_h$  horizontale Beleuchtungsstärke  
 $I$  Lichtstärke  
 $h$  Lichtpunkthöhe  
 $\gamma$  Ausstrahlungswinkel





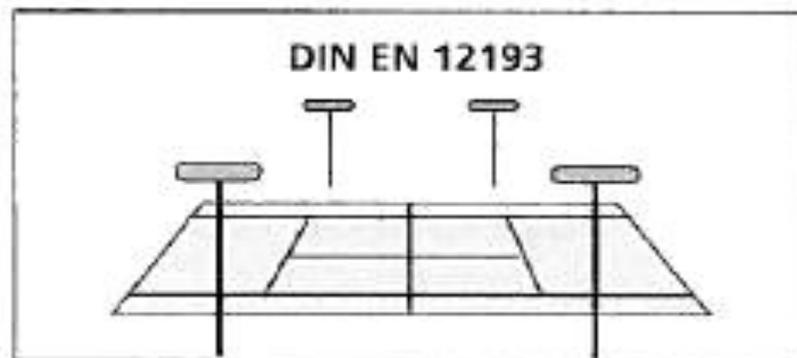
### Beleuchtung von Arbeitsstätten

|                     |            |
|---------------------|------------|
| Beleuchtungsstärke  | lx         |
| Lichtfarbe          | ww, nw, tw |
| Farbwiedergabe      | $R_a$      |
| Blendungsbegrenzung | UGR        |



### Straßenbeleuchtung

|                     |                  |
|---------------------|------------------|
| Leuchtdichte        | $\text{cd/m}^2$  |
| Gleichmäßigkeit     | längs und gesamt |
| Blendungsbegrenzung | $Tl$             |



### Sportstättenbeleuchtung

|                    |                                |
|--------------------|--------------------------------|
| Beleuchtungsstärke | lx                             |
| Gleichmäßigkeit    | $E_{\min} : E_{\text{mittel}}$ |

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | Überprüfung Sicherheit<br>Betriebsverhalten<br>durch VDE-Prüfstelle                            |  |
|  | Überprüfung Sicherheit<br>Betriebsverhalten<br>durch VDE-Prüfstelle oder TÜV                   |   |
|  | Konformitätserklärung des Herstellers  |   |
|  | Überprüfung Begrenzung<br>der Störstrahlung, Störspannung auf dem Netz<br>durch VDE-Prüfstelle |   |
| IP  | Schutzarten gegen Eindringen von<br>Fremdkörpern und Feuchte                                   |   |
| Schutzklassen   | Schutz gegen elektrischen Schlag   |   |
| I   | Schutzleiter   |   |
| II  |             | Zusätzliche Isolierung – kein Schutzleiter  |
| III   |             | Schutzkleinspannung max. 50V  |

DIN EN 60529

**IP XY** (Ingress Protection)

Schutz gegen

**X**

Fremdkörper und Berührung

|          |                      |   |
|----------|----------------------|---|
| <b>0</b> | ungeschützt          |   |
| <b>1</b> | Fremdkörper > 50mm   |   |
| <b>2</b> | Fremdkörper > 12,5mm |   |
| <b>3</b> | Fremdkörper > 2,5mm  |   |
| <b>4</b> | Fremdkörper > 1,0mm  |   |
| <b>5</b> | staubgeschützt       |  |
| <b>6</b> | staubdicht           |  |
| <b>7</b> | -                    |   |
| <b>8</b> | -                    |   |

**Y**

Feuchte

ungeschützt

Tropfwasser senkrecht 

Tropfwasser schräg (15°)

Sprühwasser (60°)



Spritzwasser



Strahlwasser



Überflutung

Eintauchen

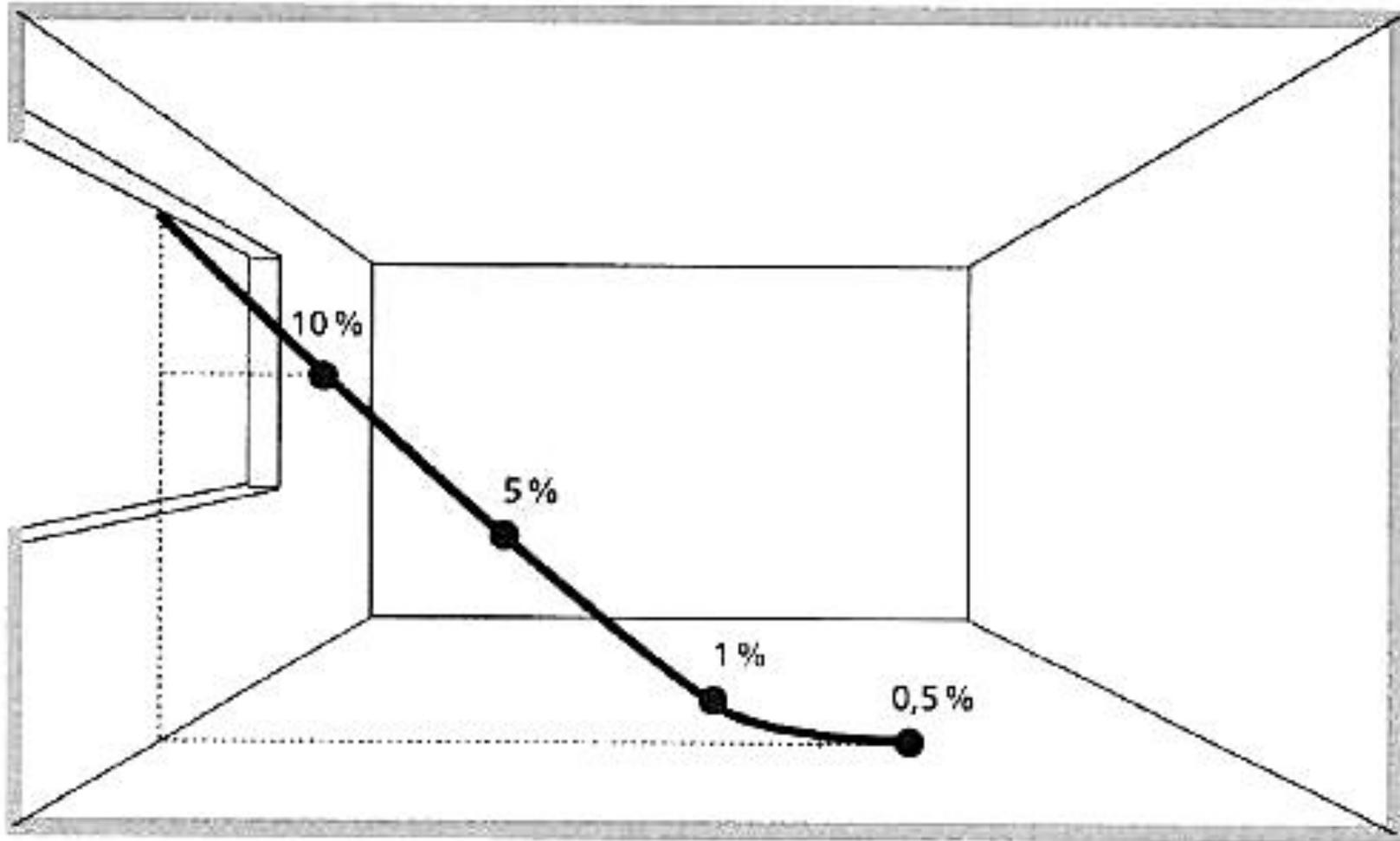


Untertauchen



.....m

$$\text{Tageslichtquotient} = \frac{\text{Beleuchtungsstärke innen}}{\text{Beleuchtungsstärke außen}} \times 100\%$$



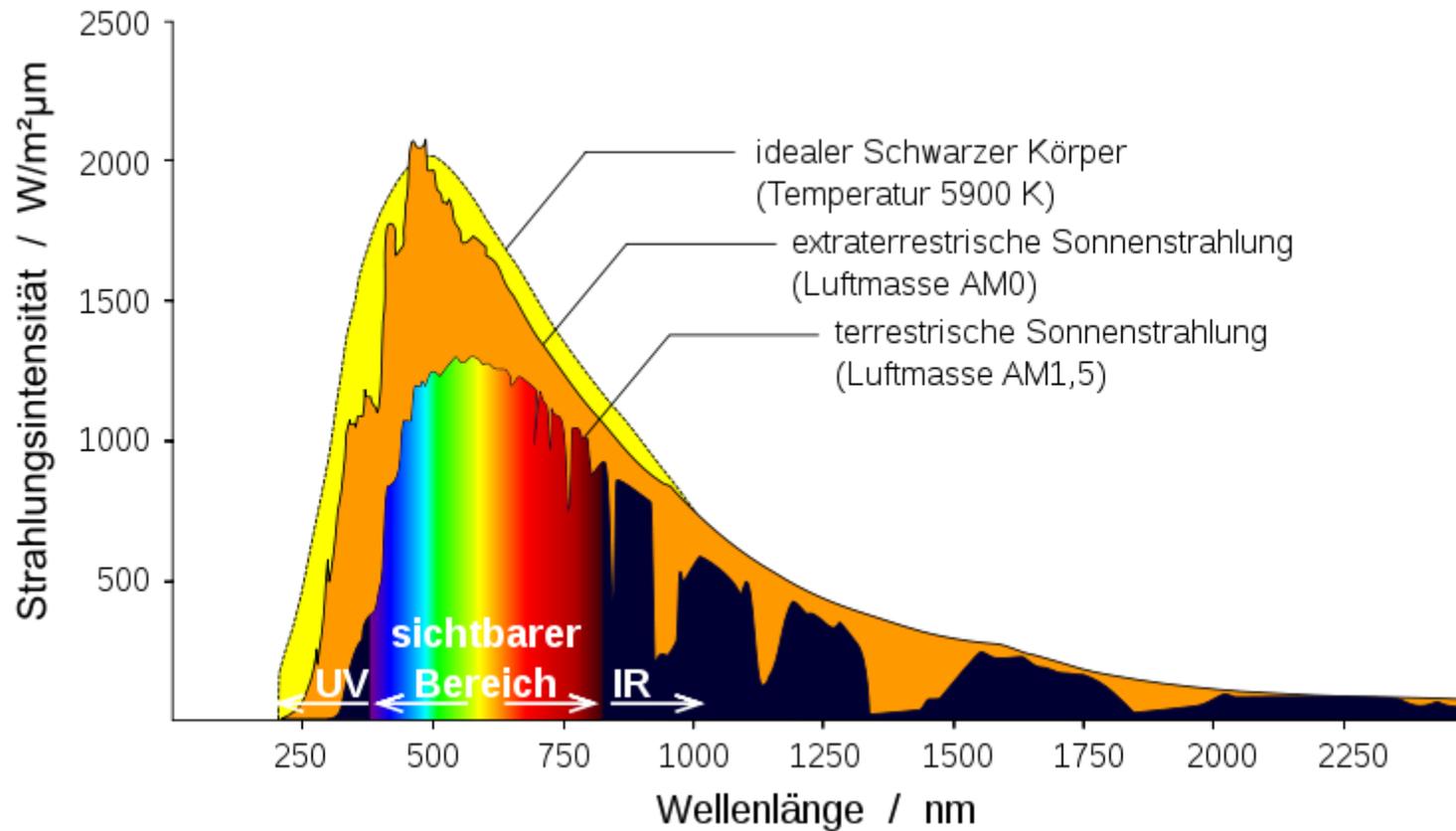
## Berechnung der Lichtausbeute der Sonne

Die Sonne ist unsere wichtigste Lichtquelle.

Physikalisch kann die Sonne annähernd als ein Schwarzer Strahler mit einer Oberflächentemperatur von 5.773 K und einer ausgesendeten Strahlungsleistung von 6,35 kW/cm<sup>2</sup> betrachtet werden. Oberhalb der Erdatmosphäre liegt entsprechend eine extraterrestrische Bestrahlungsstärke von 1350 W/m<sup>2</sup> vor.

Auf dem Weg durch die Atmosphäre wird die spektrale Verteilung der Sonnenstrahlung durch Absorption und Streuung verändert. Vor allem durch Wasserdampf, Sauerstoff und Kohlendioxid wird die meist selektive Absorption verursacht, woraus sich Bandlücken ergeben. Lediglich Ozon absorbiert in einem breiten Spektrum von 200 bis 700 nm und filtert somit einen großen Teil der UV-Strahlung aus.

Für den Betrieb von Solaranlagen ist die Globalstrahlung von Bedeutung. Sie ist die Summe aller direkter, diffuser und reflektierter Strahlung, die auf eine horizontale Ebene auftritt.



Die **Sonne** ist ein glühender Gasball von  $1,39 \cdot 10^6$  km Durchmesser und einer **Oberflächentemperatur von ca. 5773 K.**

Oberhalb der Erdatmosphäre beträgt die gesamte Strahlungsleistung der Sonne etwa  $1368 \text{ W m}^{-2}$ . Dieser Wert heißt auch Solarkonstante. Die Sonne hat bis heute 87 Erdmassen durch Kernfusion verloren!

| Bezugsobjekt   | Wert                              | Verhältnisse         | weiterer Vergleich |
|----------------|-----------------------------------|----------------------|--------------------|
| <u>Mond</u>    | $7,348 \cdot 10^{22} \text{ kg}$  | 1 Mondmasse          | ca. 1/81 Erdmasse  |
| <u>Erde</u>    | $5,9736 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ | 1 Erdmasse           | 81,2 Mondmassen    |
| <u>Jupiter</u> | $1,8986 \cdot 10^{27} \text{ kg}$ | 1 Jupitermasse       | 317,8 Erdmassen    |
| <u>Sonne</u>   | $1,9891 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ | <u>1 Sonnenmasse</u> | 332.942 Erdmassen  |

Physikalisch kann die Sonne annähernd als ein Schwarzer Strahler mit einer Oberflächentemperatur von 5.773 K und einer Strahlungsleistung von

6,35 kW/cm<sup>2</sup> betrachtet werden. Oberhalb der Erdatmosphäre liegt entsprechend eine extraterrestrische Strahlung von 1350 W/m<sup>2</sup> vor. Auf dem Weg durch die Atmosphäre wird die spektrale Verteilung der Sonnenstrahlung durch Absorption und Streuung verändert. Vor allem durch Wasserdampf, Sauerstoff und Kohlendioxid wird die meist selektive Absorption verursacht, woraus sich Bandlücken ergeben. Lediglich Ozon absorbiert in einem breiten Spektrum von 200 bis 700 nm und filtert somit, wie untenstehende Abbildung zeigt, einen großen Teil der UV-Strahlung (links des sichtbaren Bereichs) aus.

## Wie geht man vor bei der Berechnung der Lichtausbeute der Sonne

**Es gibt 3 Methoden:**

### A. Bestimmung über die Sonnenleuchtdichte und Kernfusion

Die extraterrestrische Leuchtdichte der Sonne beträgt

$$L_{\text{Sonne}} = 1,9 \times 10^9 \text{ cd/m}^2 \text{ (das ist also eine sehr starke Blendlichtquelle!)}$$

Mit der gesehenen (projizierten) Fläche der Sonnenoberfläche

$$A_{\text{Sonne, proj.}} = \pi \cdot R_{\text{sonne}}^2 = 3,14 \cdot (6,957 \cdot 10^8 \text{ m})^2 = 1,5197 \cdot 10^{18}$$

ergibt sich die sehr hohe Lichtstärke der Sonne

$$I_{\text{Sonne}} = L_{\text{Sonne}} \cdot A_{\text{Sonne, proj.}} = 2,887 \cdot 10^{27} \text{ cd}$$

Damit erhält man den von der Sonne ausgestrahlten Gesamtlichtstrom zu

$$\Phi_{\text{Sonne}} = 4 \pi \cdot I_{\text{Sonne}} = 4 \pi \cdot 2,887 \cdot 10^{27} \text{ cd} = 3,628 \cdot 10^{28} \text{ lm}$$

Durch Kernfusion werden in der Sonne pro Sekunde rd.  $657 \cdot 10^6$  Tonnen Wasserstoff in rd.  $653 \cdot 10^6$  Tonnen Helium umgewandelt, die Sonne ist somit gewissermaßen eine kontrollierte Wasserstoffbombe!

Die hierbei auftretende Massendifferenz  $\Delta m = 4,3 \cdot 10^6$  Tonnen wird nach der berühmten Formel von Einstein  $E = m \cdot c^2$  als äquivalente Strahlungsenergie pro Sekunde in den Weltraum abgestrahlt. Die Leistung der Sonne beträgt also:

$$P_{\text{Sonne}} = \Delta m \cdot c^2 = 4,3 \cdot 10^9 \text{ kg} \cdot (300.000 \text{ km/s})^2 = 3,87 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

Damit erhält man für die Lichtausbeute der Sonne

$$\eta_{\text{Sonne}} = \Phi_{\text{Sonne}} / P_{\text{Sonne}} = 3,63 \cdot 10^{28} \text{ lm} / 3,87 \cdot 10^{26} \text{ W} = 93,76 \text{ lm/W}$$

## B. Bestimmung aus der extraterrestrischen spektralen Bestrahlungsstärke

Für die extraterrestrische Beleuchtungsstärke  $E$  erhält man aus den gemessenen Werten der extraterrestrischen spektralen Bestrahlungsstärke  $E_{e\lambda}$  im Wellenlängen-Bereich von 370 nm bis 780 nm:

$$E = 683 \text{ lm} / \text{W} \cdot \sum_{\lambda=380\text{nm}}^{\lambda=780\text{nm}} E_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \Delta\lambda$$

$$E_{e\lambda} \text{ in } \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{nm}} \quad \Delta\lambda = 10 \text{ nm}$$

Die Auswertung mit den Zahlenwerten ergibt

$$E = 683 \text{ lm/W} \cdot 181,81 \text{ W/m}^2 = 124.176 \text{ lm/m}^2 = 124.176 \text{ lx}$$

Mit der bekannten extraterrestrischen Solarkonstante  $S = 1340 \text{ W/m}^2$  folgt

$$\eta_{\text{Sonne}} = 124.176 \text{ lm/m}^2 / 1340 \text{ W/m}^2 = 92,7 \text{ lm/W}$$

### C. Für Praktiker gibt es noch eine ganz einfache Berechnung:

1. Messung der Beleuchtungsstärke senkrecht zum Lichteinfall bei klarem Himmel am 21. Juni mittags auf einem hohen Berg, z. B. Zugspitze

$$E_{\text{gem}} = 125.000 \text{ lx} = 125.000 \text{ lm/m}^2$$

2. Division durch die bekannte extraterrestrische Solarkonstante  $S = 1340 \text{ W/m}^2$  ergibt

$$\eta_{\text{Sonne}} = 125.000 \text{ lm/m}^2 / 1340 \text{ W/m}^2 = 93,28 \text{ lm/W}$$

Die Mittelung der drei Rechenergebnisse liefert das Ergebnis

$$\eta_{\text{Sonne}} \approx \mathbf{93 \text{ lm/W}}$$

Die Lichtausbeute der Sonne liegt damit etwa im Bereich derjenigen von Leuchtstofflampen und deutlich unter dem der modernen Halbleiter-Lichtquellen (LED) und Hochdruck-Gasentladungslampen, diese sind somit lichttechnisch bereits effizienter als unsere gute alte Sonne!

Die Glühlampen mit ihren mageren 12 lm/W werden – wie bekannt - nach und nach verboten, weil die **EU** wegen dieser ineffizienten Edisonschen Lampen aus dem vorvorigen Jahrhundert bereits die Fassung verloren hat. Auch die Glühstrümpfe der etwa 40.000 Berliner Gas-Laternen mit der Technik aus dem 19. Jahrhundert und einer Lichtausbeute von weniger als 2 lm/W werden hoffentlich bald durch LED-Leuchten ersetzt mit dann über 100 lm/W!

Hinweis: OSRAM-Forscher und Entwickler haben im Labor einen neuen Effizienzrekord bei OLED erzielt. Das Labormuster erreicht 87 lm/W. Der bisherige Spitzenwert von 62 lm/W wurde damit um 40% deutlich übertroffen.

## Literatur und Normen

1. **„Beleuchtungstechnik für Praktiker“**  
von Hans Ris / VDE-Verlag, ISBN 3-8007-2163-5
2. **„Beleuchtungstechnik Grundlagen“**  
von Roland Baer / Verlag Technik Berlin, ISBN 3-341-01115-3
3. **„Beleuchtungstechnik für den Elektrofachmann“**  
von: Zieseniß, Lindemuth, Schmits  
Hüthig&Pflaum-Verlag, ISBN 978-3-8101-0273-73-7
4. **„Licht und Beleuchtung“**  
von H.-J. Hentschel / Hüthig&Pflaum-Verlag, ISBN 3-7785-0734-6
5. **„Grundlagen der Lichttechnik“**  
von Dietrich Gall / Pflaum Verlag, ISBN3-7905-0923-X

6. **„Handbuch für Beleuchtung“** , herausgegeben von den lichttechnischen Gesellschaften Deutschland, Schweiz und Österreich
  7. **„Betriebsgeräte und Schaltungen für elektrische Lampen“**  
von: Sturm, Klein / Siemens-Verlag, ISBN 3-8009-1586-3
- DIN 5031: „Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik“
- DIN 5032: „Lichtmessung“
- DIN 5033: „Farbmessung“
- DIN 5035: „Innenraumbeleuchtung mit künstlichem Licht“
- DIN 5044: „Ortsfeste Verkehrsbeleuchtung“
- CIE-Report 127/2007 „Measurement of LEDs“

Prof. Dr.-Ing. Peter Marx, MX-ELEKTRONIK, Am Kleinen Wannsee 12J

D-14109 Berlin, [info@mx-electronic.com](mailto:info@mx-electronic.com), [www.mx-electronic.com](http://www.mx-electronic.com)



### **Prof. Dr.-Ing. Peter Marx**

studierte Elektrotechnik und Lichttechnik an der TU seiner Geburtsstadt Berlin und schloss 1966 als Diplom-Ingenieur ab. Von 1967 bis 1973 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Lichttechnik der TU-Berlin. Ab 1977 Tätigkeit als Hochschullehrer im Fachbereich Elektrotechnik der Beuth-Hochschule für Technik Berlin – University of Applied Sciences. Er war Vorstandsmitglied der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft e.V. Seine Arbeitsgebiete heute sind die elektronische Messtechnik und die Lichttechnik (Sachverständiger).