

Gall, D.

**„Möglichkeiten und Grenzen  
beim Einsatz  
von LED  
in der Beleuchtungstechnik“**

## Pressestimmen zur LED :

-Die „ultrahellen Chips“, die sich nun mit ihren 100 000 Betriebsstunden anschicken, die ... Glühlampe abzulösen.

*(Welt am Sonntag)*

-Vor der Lichtrevolution „Verglichen mit der Effizienz von LED sind Glühlampen nichts weiter als Heizkörper, die noch wenig leuchten.“

*(Siemens Heft – Herbst 2003)*

– „In 10 bis 20 Jahren werden die LED's die Führung in der Haus- und Industriebeleuchtung übernehmen“.

*(MORAN, R. 2003)*

## Pressestimmen zur LED :

-„Die LED's sind nach der Glühlampe und Leuchtstofflampe die dritte große Revolution in der Beleuchtung“.

*(HAITZ, R.)*

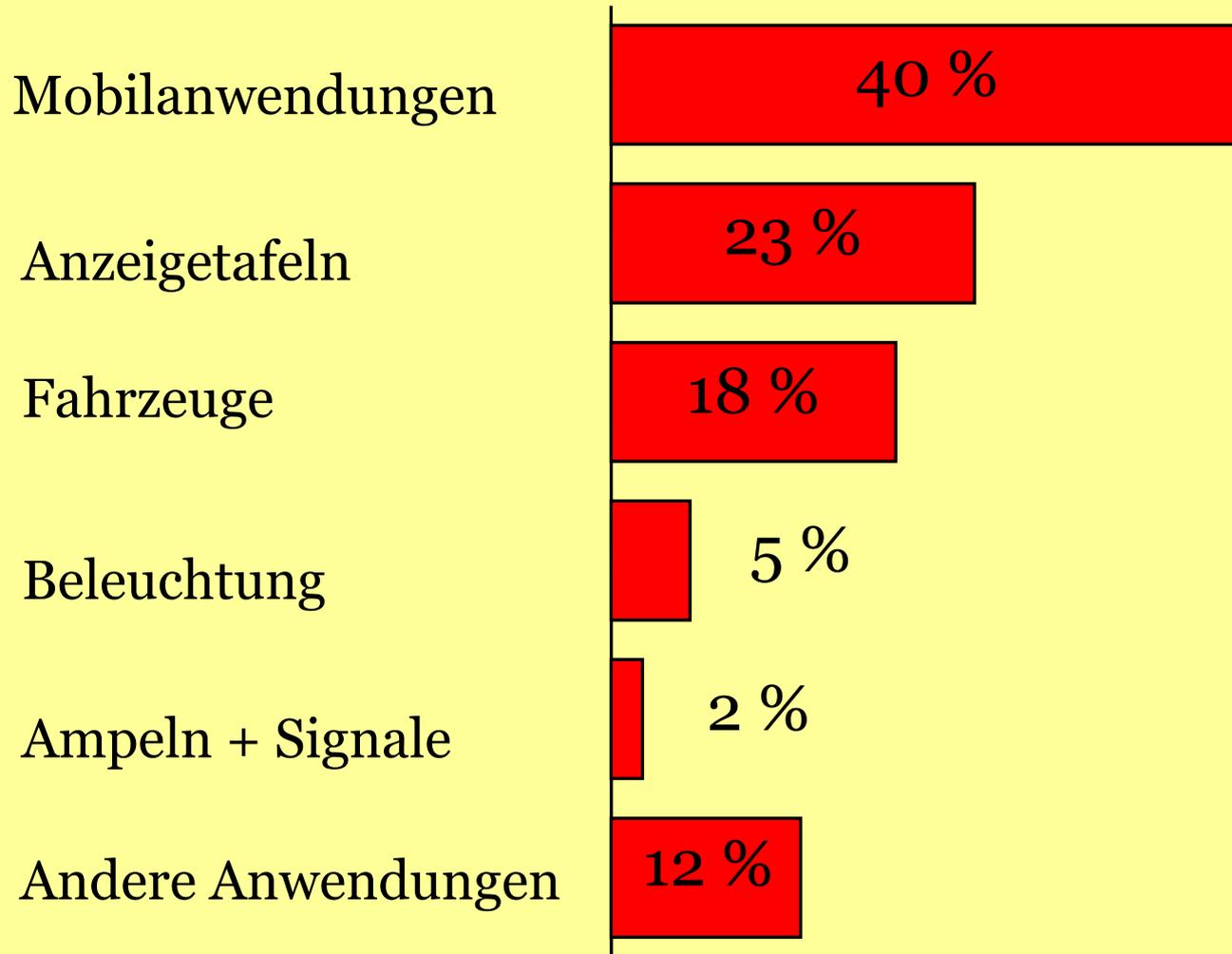
-„Mit LED's könnten bis zum Jahr 2020 in den USA Energieeinsparungen von 0,6 Tera-Watt-Jahren realisiert werden. Das entspricht 113 Mrd. € oder 600 Mio. Tonnen Steinkohle.“

·  
·  
·

-Die alten Beleuchtungstechnologien werden in der Zukunft aber zurückschlagen. Die alten Technologien werden uns noch lange begleiten.“

*(BERGH, A. 2003; Präs. Der optoelektronischen Industrie der USA)*

# Anwendungsbereiche von LED



# Lichterzeugungsprinzipien

			<b>Beispiele</b>
I Festkörper	a	kalt	LED, Leuchtstoffe
	b	warm	Glühlampe, IR-Strahler
II Plasma	a	kalt	Niederdrucklampen (Leuchtstoff-, Excimer- lampen u.a.)
	b	warm	Mittel-, Hoch- u. Höchst- drucklampen

## Anforderungen an die Lampen

	<b>Anforderungen/ Wünsche</b>
1.	große Lichtstrompakete
2.	hohe Effizienz der Lichtwirkung
3.	angepasste Lichtfarbe + Farbwiedergabe
4.	geringe Strahlungs- und Lichtbelastung
5.	zeitlich stabile Lichtemission
6.	hohe Lebensdauer
7.	niedriger Lampenpreis
8.	ökologische Verträglichkeit

# Effizienzanforderungen

Zielparameter	Funktion		
	Beleuchtungszwecke	Leuchtzwecke	optische Zwecke
Lichtstrom, Beleuchtungsstärke	groß	untergeordnet	untergeordnet
Leuchtdichte	untergeordnet	angepasst	sehr groß
Lichtausbeute	groß	groß	untergeordnet

# Anforderungen an Lichtfarbe und Farbwiedergabe

	<b>Lampenzweck</b>		
	Beleuchtungs- zwecke	Leucht- zwecke	optische Zwecke
Lichtfarbe	weiß	variabel	weiß
Farbwieder- gabe	gut	nicht relevant	gut
Spektrum	aufgefüllt	selektiv	<b><u>Projektor:</u></b> aufgefüllt <b><u>Beamer:</u></b> selektiv

# Anforderungen an die Lampen

	<b>Anforderungen/ Wünsche</b>
1.	große Lichtstrompakete
2.	hohe Effizienz der Lichtwirkung
3.	angepasste Lichtfarbe + Farbwiedergabe
4.	geringe Strahlungs- und Lichtbelastung
5.	zeitlich stabile Lichtemission
6.	hohe Lebensdauer
7.	niedriger Lampenpreis
8.	ökologische Verträglichkeit

# Lampenlichtströme im Vergleich zu LEDs

Lampenart	P [W]	N [lm]	LED-Anzahl bzw. Leistung
Allgebrauchsglühlampe	100	1 400	70
Leuchtstofflampe	58	5 000	250
Hg-Hochdruck-Lampe	125	6 200	310
Na-Hochdruck- Lampe	250	26 000	1 300
Na-Niederdruck-Lampe	35	4 800	240

Parameter:  $N_{\text{LED}} = 20 \text{ lm} / O_v = 20 \text{ lm/W}$

# Erforderliche Lichtströme für Beleuchtungsanlagen

Anwendungsfall	Parameter	Erforderlicher Lichtstrom ( $\phi_{La}$ )
2 Mann-Büro	$E = 500 \text{ lx}; \eta_B = 0,3,$ $A_2 = 20 \text{ m}^2$	33 000 lm
Schreibtisch	$E = 750 \text{ lx}; \eta_B = 0,1,$ $A_2 = 0,5 \text{ m}^2$	3 800 lm
Strassenbeleuchtung	$E = 10 \text{ lx}; \eta_B = 0,5,$ $A_2 = 30 \times 8,5 \text{ m}^2$ $= 255 \text{ m}^2$	5 100 lm

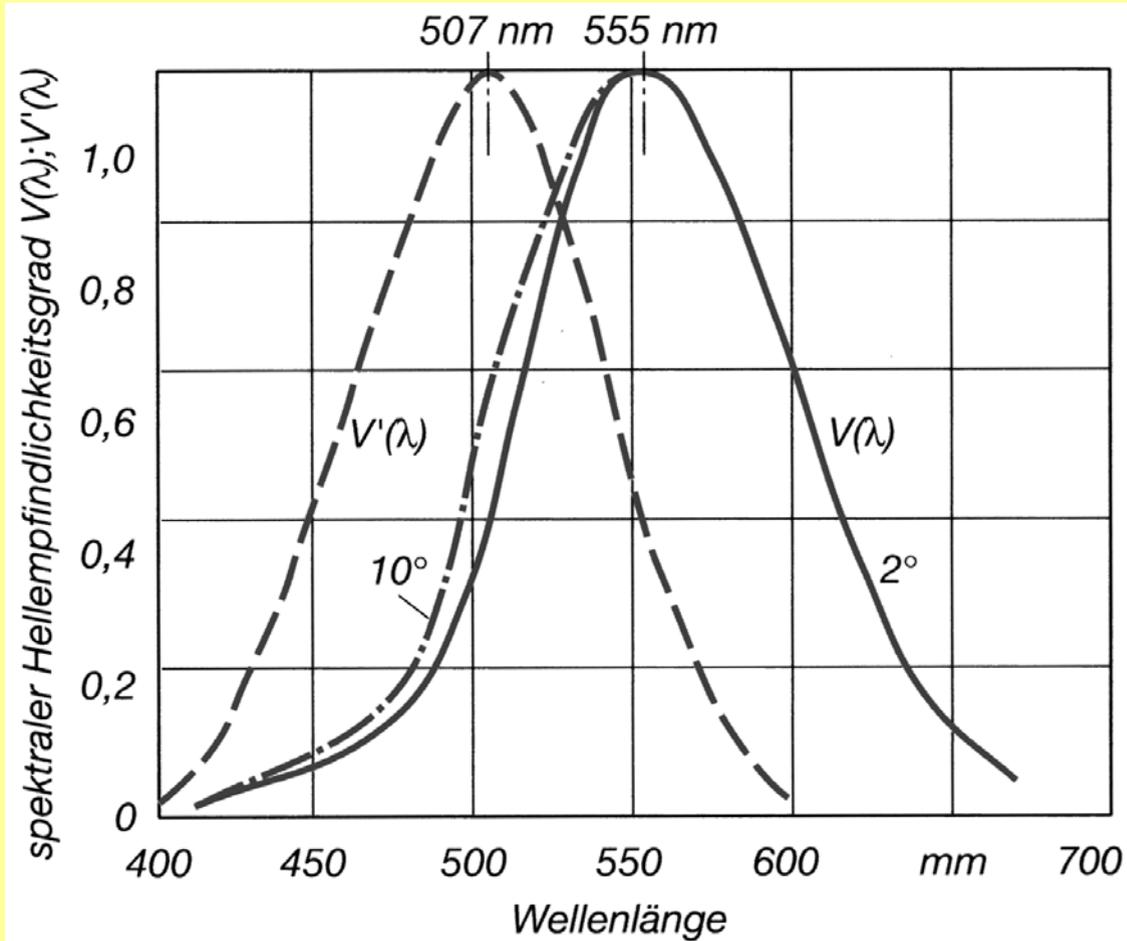
Berechnungsformel: 
$$\phi_{La} = \frac{E \cdot A_2}{\eta_B}$$

$E$  – Beleuchtungsstärke ( $\frac{\text{lm}}{\text{m}^2} = \text{lx}$ )  
 $A_2$  – beleuchtete Fläche  
 $\eta_B$  – Beleuchtungswirkungsgrad

## Anforderungen an die Lampen

	<b>Anforderungen/ Wünsche</b>
1.	große Lichtstrompakete
2.	hohe Effizienz der Lichtwirkung
3.	angepasste Lichtfarbe + Farbwiedergabe
4.	geringe Strahlungs- und Lichtbelastung
5.	zeitlich stabile Lichtemission
6.	hohe Lebensdauer
7.	niedriger Lampenpreis
8.	ökologische Verträglichkeit

# Die Hellempfindlichkeitskurven



(VOLKENAND 2002)

# Lichtausbeute u. Lebensdauer einiger Lampenarten

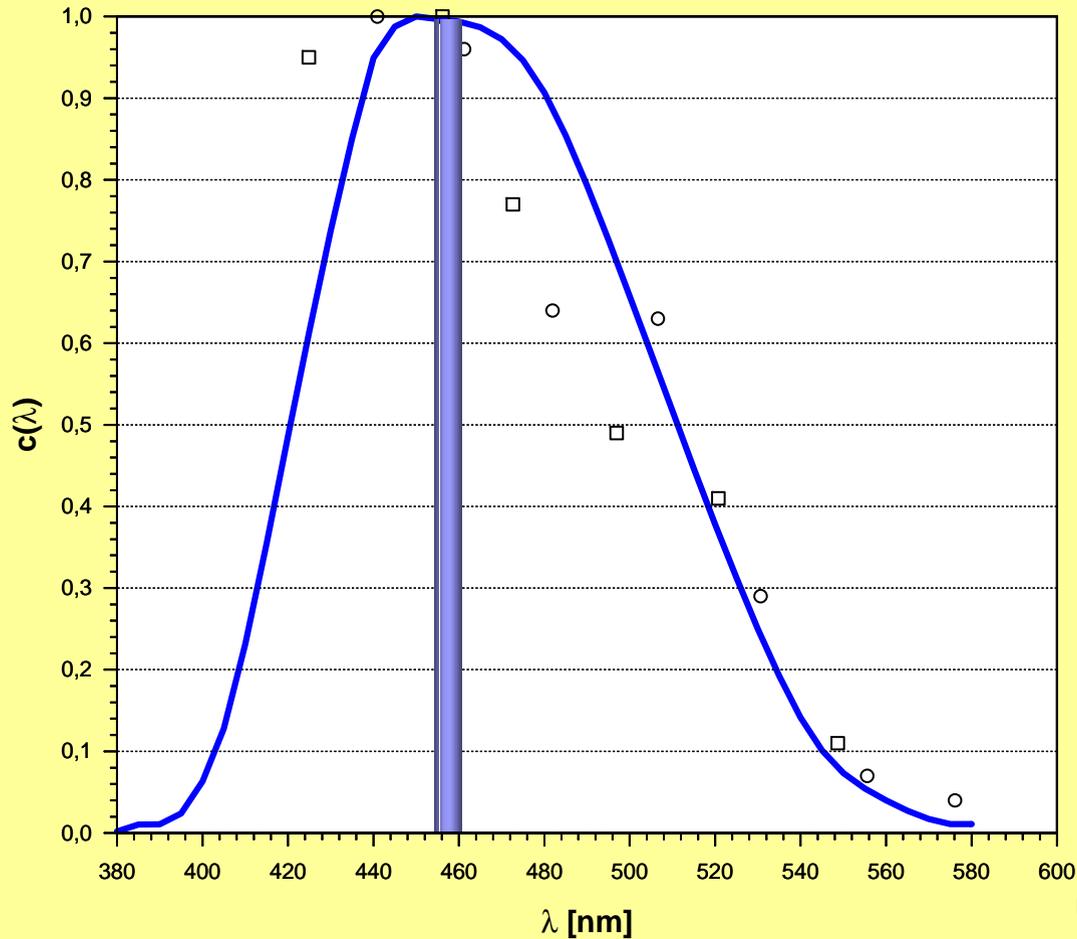
Lampenart	Lichtausbeute lm/W	Mittlere Lebens- dauer (Std)
Glühlampen	10 - 15	1000
Halogen-glühlampen	15 - 25	bis 4000
Kompaktleuchtstoff- lampen	60 - 80	bis 12 000
Stabförmige Leuchtstoff- lampen	60 - 104	bis 16 000
Halogen - Metall dampflampen	60 - 100	bis 15 000
Natrium - Hochdrucklampen	100 - 150	bis > 24 000
Quecksilberdampfhochdruck- Lampen	40 - 60	bis > 24 000
Natrium - Niederdrucklampen	150 - 200	24 000

## Unspezifische Lichtwirkungen (retino-hypothalamische Bahn)

- ➔ **-circadiane Rhythmik**
- ➔ **- Wachheitsgrad**
- ➔ **- SAD-Wirkung**
- ➔ **- Melatonin-Supression**

Schierz 2002

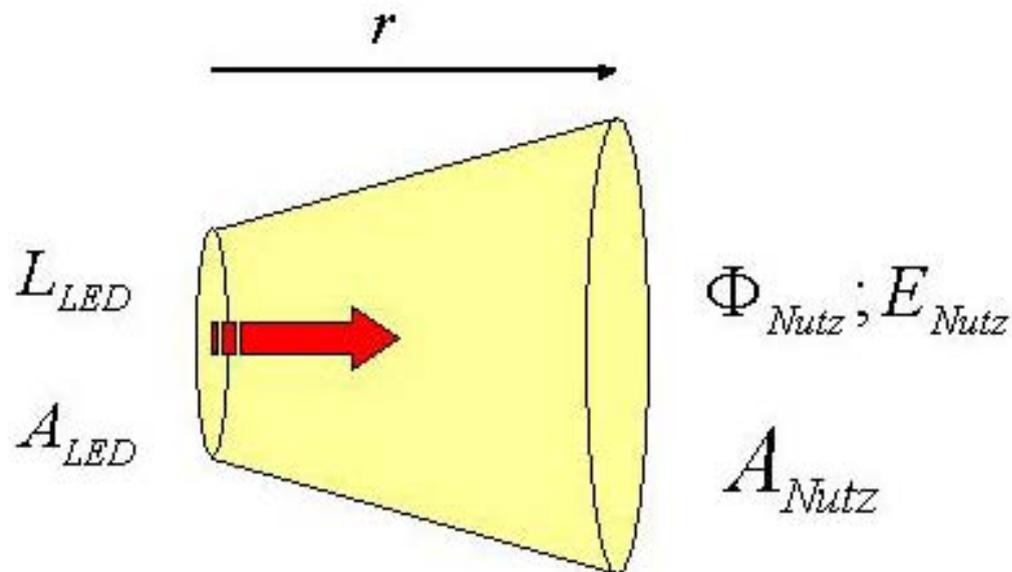
# gemittelte circadiane Wirkungskurve $c(\lambda)$



□ Thapan u.a. (2001)

○ Brainard u.a. (2001)

# Photometrisches Grundgesetz



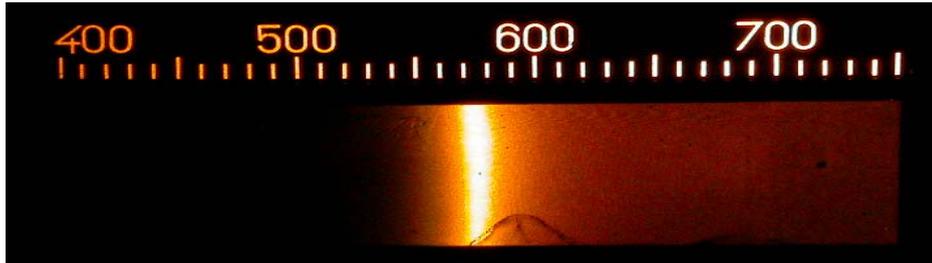
$$\Phi_{Nutz} = L_{LED} * A_{LED} * A_{Nutz} * \frac{1}{r^2} * \Omega_0$$

## Leuchtdichten einiger Lampen (Lampen hoher Leuchtdichte)

<b>Lampe</b>	<b>Leuchtdichte Mcd/m<sup>2</sup></b>
<b>Sonne</b>	<b>1 500</b>
<b>Glühlampe</b>	<b>10 – 50</b>
<b>Xe-Höchstdruck</b>	<b>200 – 2 600</b>
<b>Hg-Höchstdruck</b>	<b>300 – 1 700</b>
<b>D<sub>2</sub>-Autolampe (Xe-Hg)</b>	<b>65</b>
<b>Halogenmetalldampf- lampe</b>	
<b>HMI; HTI (MSI; HSR)</b>	<b>30 – 400</b>
<b>Kurzbogenlampe VIP/UHP</b>	<b>20</b>
<b>Keramiklampe</b>	<b>300 – 1 000</b>
<b>Luminszenzdiode (weiß)</b>	<b>0,3 - 3</b>

## Anforderungen an die Lampen

	<b>Anforderungen/ Wünsche</b>
1.	große Lichtstrompakete
2.	hohe Effizienz der Lichtwirkung
3.	angepasste Lichtfarbe + Farbwiedergabe
4.	geringe Strahlungs- und Lichtbelastung
5.	zeitlich stabile Lichtemission
6.	hohe Lebensdauer
7.	niedriger Lampenpreis
8.	ökologische Verträglichkeit



Na-Niederdruck-  
lampe



Dreibanden-  
Leuchtstofflampe



Tageslicht



*Natrium-Niederdrucklampe*

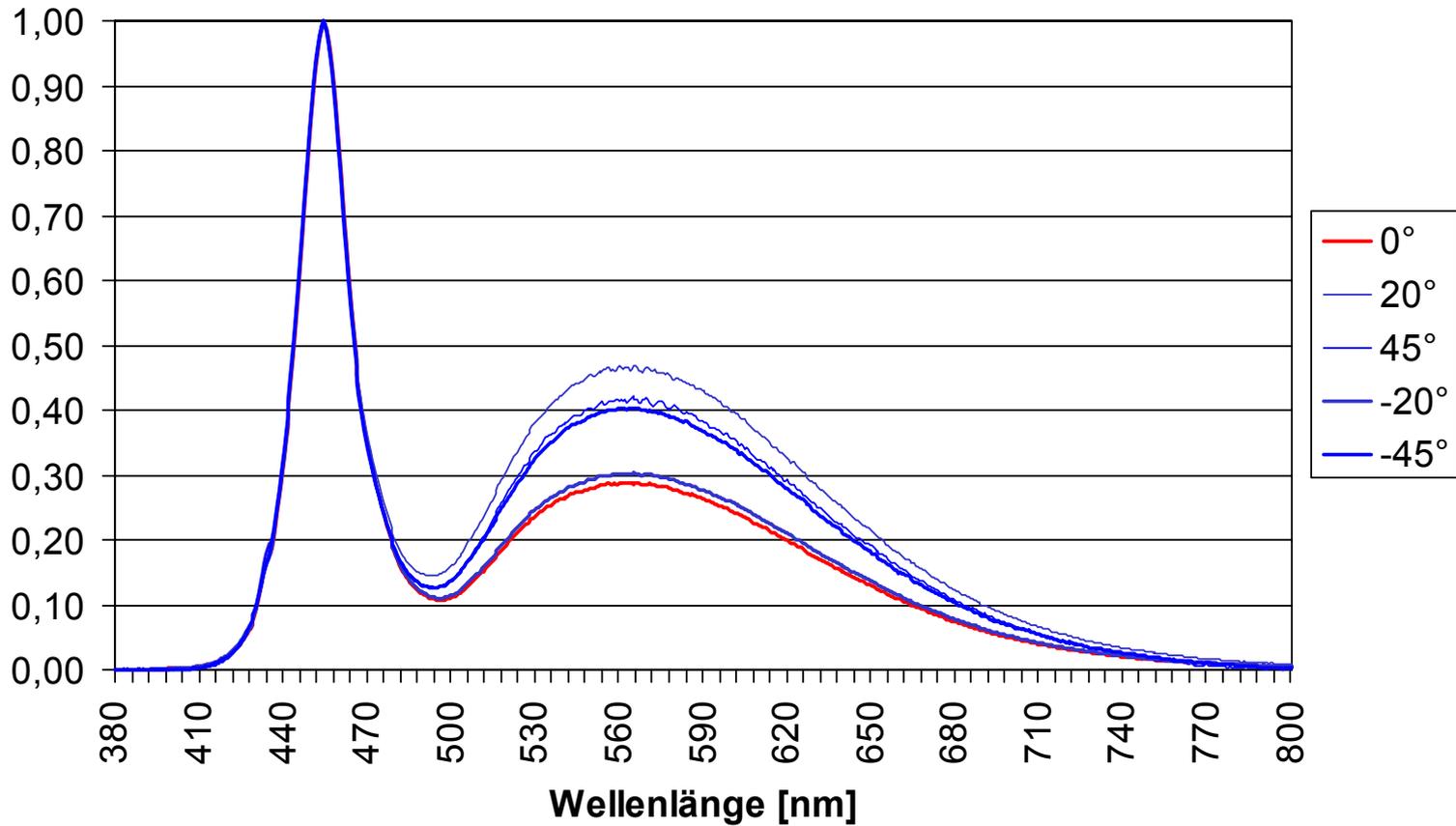


*Tageslicht*

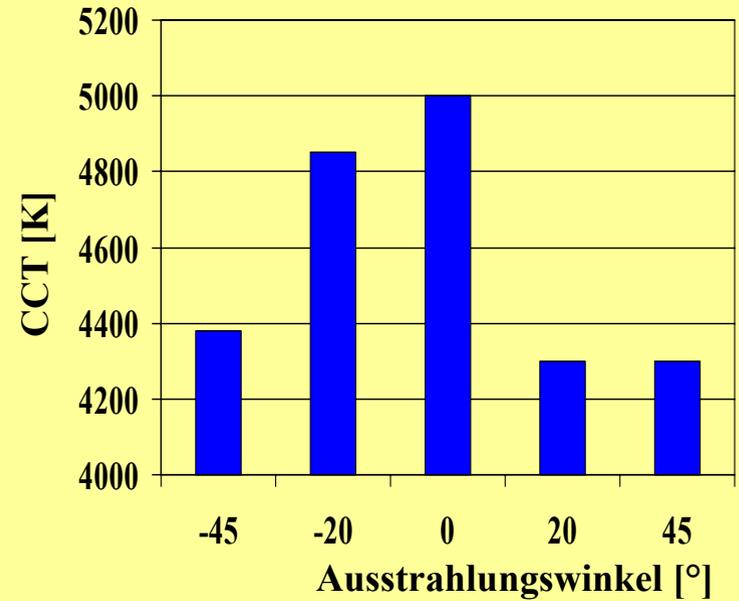
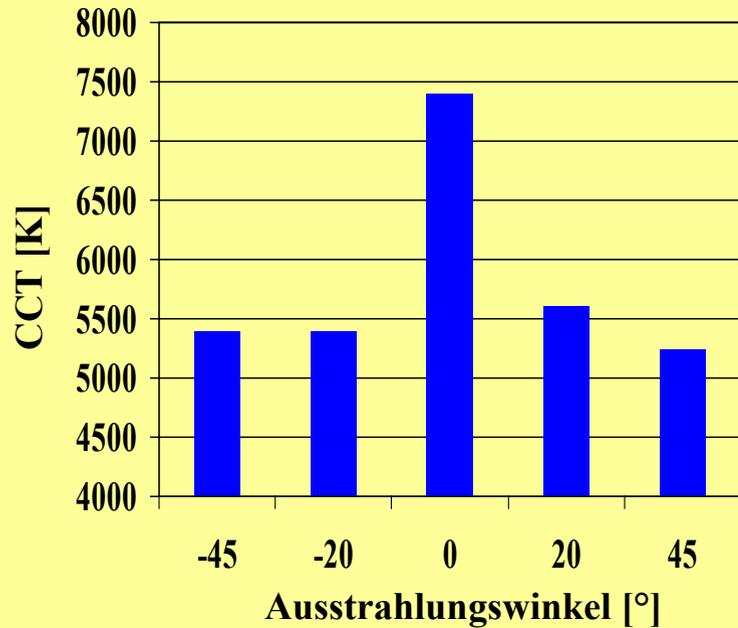
*Farbwiedergabe*

# Spektralverlauf (normiert)

weiße LED



# Richtungsbedingte Lichtfarbenvariation von weißen LED



CCT – ähnlichste Farbtemperatur

# Ergebnisse der Helligkeitsvergleiche bei benachbarten Quadraten

## Grenzwerte der maximal tolerierten Leuchtdichteunterschiede (in Prozent ausgedrückt %)

Blaue Quadrate		Gelbe Quadrate		Grüne Quadrat.		Rote Quadrate		Weiße Quadrate		
9,5		4,8		5,8		6,1		5,3		
Aufgeteilt in Felder mit einer Leuchtdichte (cd/m <sup>2</sup> ) von:										
12-11	<11	120-110	110-100	90-80	80-70	>31	31-30	<30	>120	<120
11,5	4,6	7,4	3,5	5,5	6,4	5	9,5	9,5	5,8	3,5

(VOLKENAND 2002)

# Ergebnisse

- Einstellung auf gleiche Helligkeit gelingt mit einer mittleren Genauigkeit von 0,2%-10,5%.
- Bei Überprüfung auf Erkennbarkeitsschwelle keine Bestätigung der Ergebnisse.
- Leuchtdichteunterschiede von ca. 10% wurden nicht erkannt!
- Leuchtdichteunterschiede bis zu ca. 20%-30% wurden noch toleriert.

(VOLKENAND 2002)

# Farbwiedergabe-Index (Ra) von Lampen

Lampe		Farbwiedergabe-Index ( Ra )
LED	RGB – (Low)	25
	RGB – (High)	60
	weiß	80
Glühlampe		98
Quecksilberhochdrucklampe		40 – 60
Halogen-Metall dampflampe		80 - 90
Natriumdampflampe	Niederdruck	
	Hochdruck	20 – 40
Leuchtstofflampe	Kompakt	80 – 90
	weiß – de Luxe	80 – 95
	Dreibanden (weiß)	80 – 95
	Universalweiß	60 - 80

# Einschätzung der Farbwiedergabe-Eigenschaften (allgemein)

Lampe	Ra	CCT	FWG-Präferenz (allgemein)
RGB-LED	25	4270	0,5
RGB-LED	63	4140	1,1
LED-"Amber Weiß"	81	4120	0,6
LED-"Weiß"	83	5031	0,05
Halogenleuchte	98	2840	- 0,4
Glühlampe	98	2640	- 1,4

200 lx

CCT – ähnl. Farbtemperatur in Kelvin

Ra – allg. Farbwiedergabeindex

(NARENDRAN u.a. 2002)

# Einschätzung der Farbwiedergabe-Eigenschaften der Haut

Lampe	Ra	CCT	FWG-Präferenz der Hautfarbe
RGB-LED	25	4270	+ 0,8
RGB-LED	63	4140	+ 0,6
LED-"Amber Weiß"	81	4120	- 0,25
LED-"Weiß"	83	5031	- 0,4
Halogenleuchte	98	2840	- 0,5
Glühlampe	98	2640	- 1,2

200 lx

CCT in Kelvin (ähnl. Farbtemperatur)

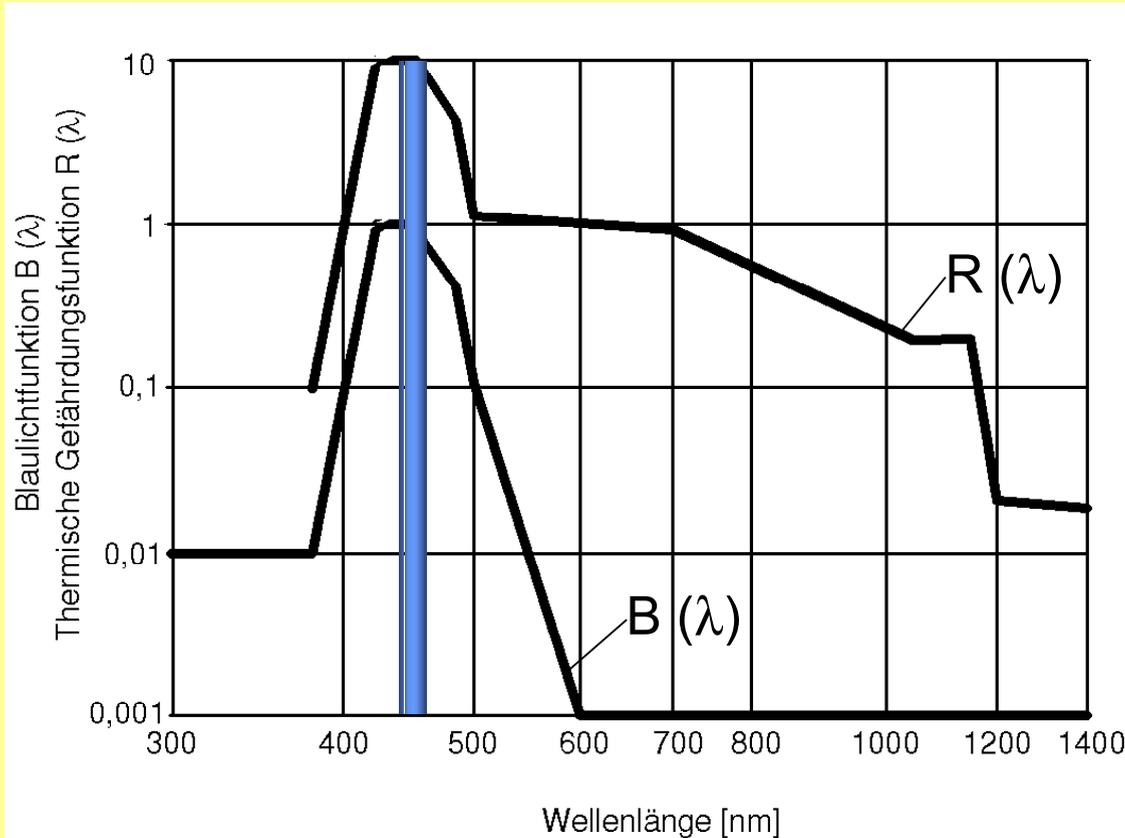
Ra – allg. Farbwiedergabeindex

(NARENDRAN u.a. 2002)

## Anforderungen an die Lampen

	<b>Anforderungen/ Wünsche</b>
1.	große Lichtstrompakete
2.	hohe Effizienz der Lichtwirkung
3.	angepasste Lichtfarbe + Farbwiedergabe
4.	geringe Strahlungs- und Lichtbelastung
5.	zeitlich stabile Lichtemission
6.	hohe Lebensdauer
7.	niedriger Lampenpreis
8.	ökologische Verträglichkeit

# Wellenlängenabhängigkeit – Thermische Netzhautgefährdung



Wellenlängenabhängigkeit der thermischen Netzhautgefährdung  $R(\lambda)$  und der Photochemischen Netzhautgefährdung durch blaues Licht  $B(\lambda)$  [SUTTER]

## Anforderungen an die Lampen

	<b>Anforderungen/ Wünsche</b>
1.	große Lichtstrompakete
2.	hohe Effizienz der Lichtwirkung
3.	angepasste Lichtfarbe + Farbwiedergabe
4.	geringe Strahlungs- und Lichtbelastung
5.	zeitlich stabile Lichtemission
6.	hohe Lebensdauer
7.	niedriger Lampenpreis
8.	ökologische Verträglichkeit

# LED – Kostenvergleich mit Hochspannungsrohren („Neon“)

	Farbe	
	Rot	Grün
„Neon“ - Anlagen	1	1
LED – Anlagen	6,5	84
LED in 10 Jahren	0,65	8,4

(5 Jahre Nutzungszeit)

(nach THIELEN)

# LED für Beleuchtungszwecke

## Vor- und Nachteile

- Vorteil: großes  $t_N$ , flache Leuchten
- Nachteil:
  - kleine Lichtstrom-Pakete
  - thermische Probleme
  - FWG und Spektrum
  - hohe Lampenströme
  - Streuung der lichtt. Parameter

## Anwendungsfelder

- kleinflächige Beleuchtung (maschinelles Sehen)
- dekorative Akzentbeleuchtung
- farbige Beleuchtung
- Kfz-Innenbeleuchtung
- Sonderbeleuchtung (Vitrinen u. ä.)
- Notbeleuchtung
- flache und kleine Leuchten

# LED für optische Zwecke

## Vor- und Nachteile

- Vorteil: direkte Lichtfarbenerzeugung, gute Einkopplungsmöglichkeit in Lichtleiter, zeitliche Lichtvariabilität
- Nachteil: geringe Leuchtdichte, geringer Nutzlichtstrom

## Anwendungsfelder

- in Kombination mit Lichtleitertechnik
- Kleinprojektoren

# LED für Leuchtzwecke

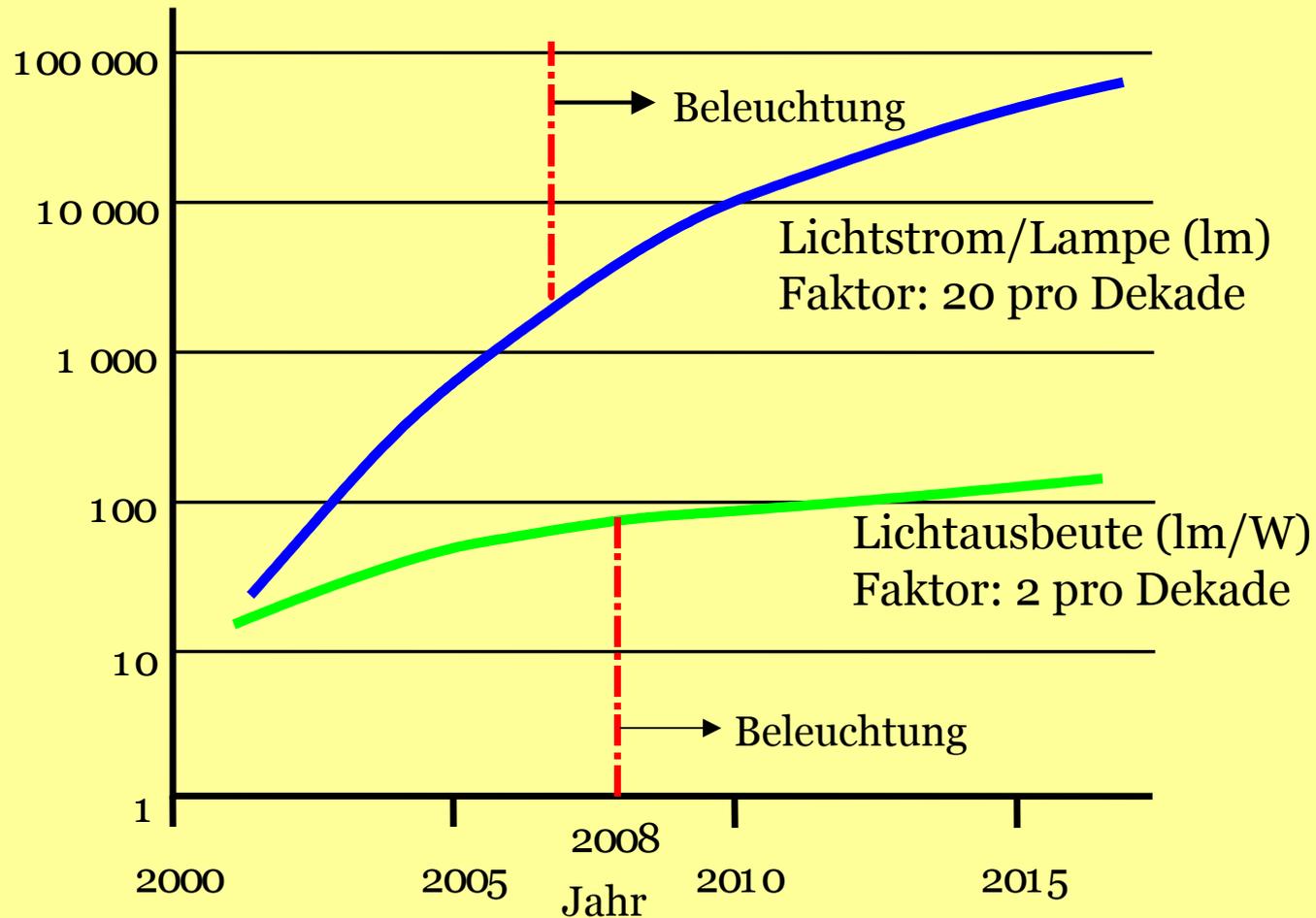
## Vor- und Nachteile

- Vorteil: großes  $t_N$ , Lichtfarbe einstellbar, Leuchtdichte anpassbar, gute zeitliche Variabilität, kleine Leuchtkörper
- Nachteil: thermische Probleme

## Anwendungsfelder

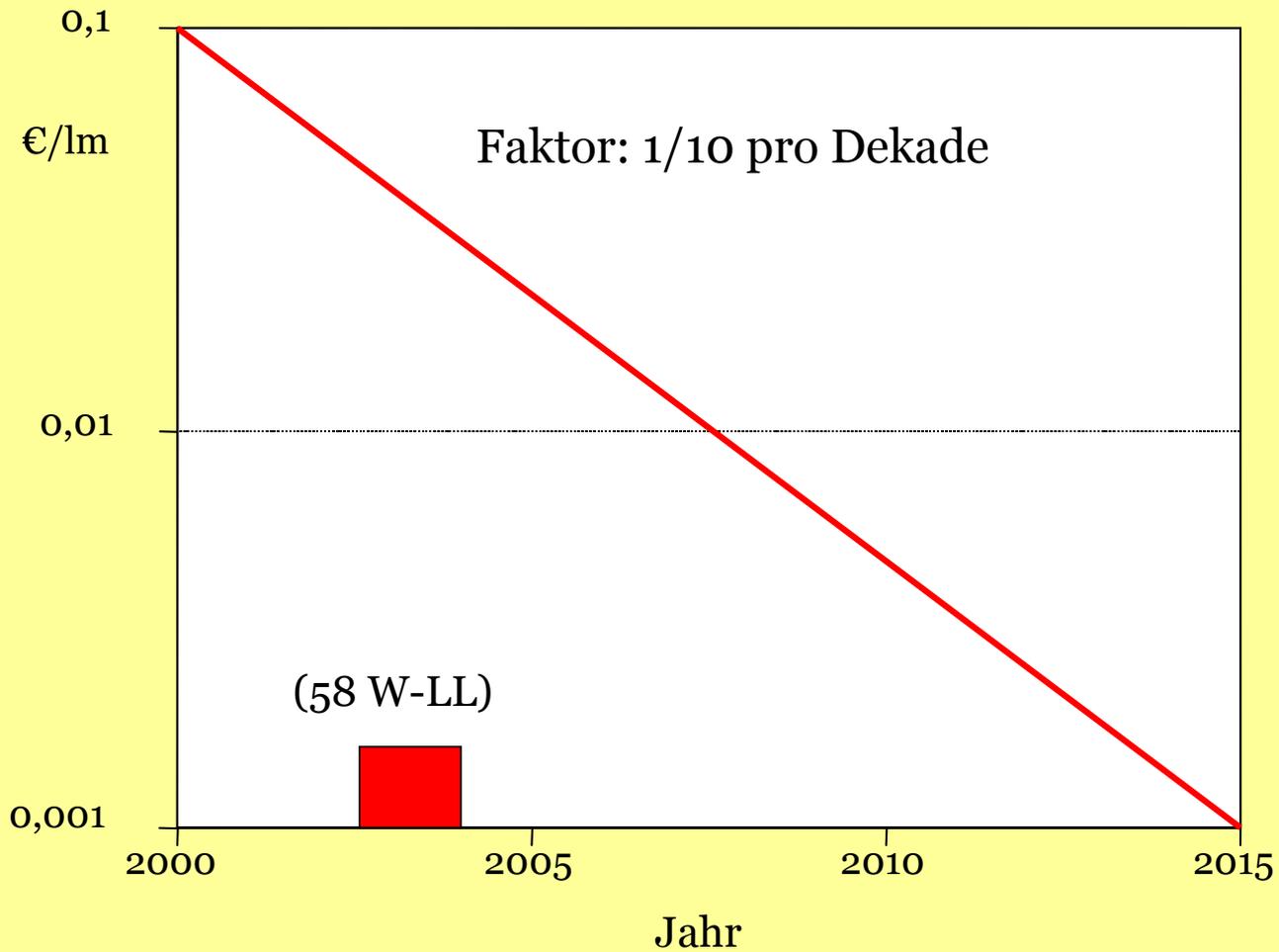
Displayanlagen, Signale, optische Sicherheitsleitsysteme, Piktogramme, Konturenbeleuchtung, Notbeleuchtungsschilder, adaptive Leuchtfelder, Orientierungsbeleuchtung, Orientierungsscheinwerfer, kleine oder mittlere Lichtwerbepanlagen

# LED (weiß) – Lichtstrom und Lichtausbeute (Prognose)



(Quelle: HEINZ, R. aus Siemens Heft 2003)

# LED (weiß) – Lichtstrom und Lichtausbeute (Prognose)



(Quelle: HEINZ, R. aus Siemens Heft 2003)