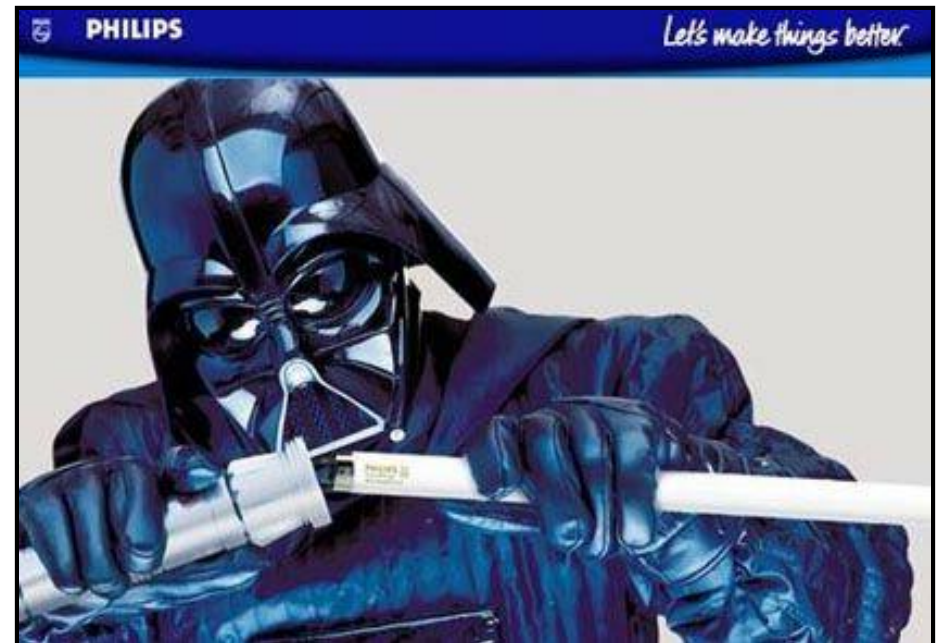


5. Niederdruckentladungslampen

Inhalt

- 5.1 Klassifizierung von Gasentladungslampen
- 5.2 Historische Entwicklung
- 5.3 Prinzip der Fluoreszenzlampen
- 5.4 Die Hg-Niederdruckentladung
- 5.5 Energiebilanz
- 5.6 Typische Abmessungen
- 5.7 Komponenten von Fluoreszenzlampen
- 5.8 Der Ballast
- 5.9 Elektroden und Emitter
- 5.10 Lampenglas
- 5.11 Die Beschichtung
- 5.12 Hg-Verbrauch
- 5.13 Energiesparlampen
- 5.14 Induktiv betriebene Lampen
- 5.15 Na-Niederdruckentladungslampen

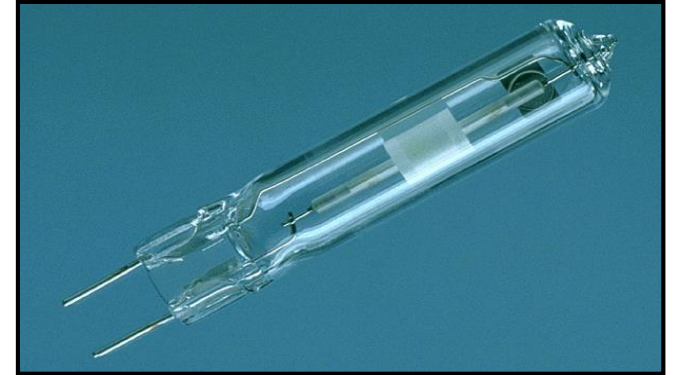


5.1 Klassifizierung von Gasentladungslampen

Niederdruck-Gasentladungslampen



Hochdruck-Gasentladungslampen



Druck = 10 μ bar bis 10 mbar

> 1 bar

Länge = ca. 1 m

ca. 1 cm

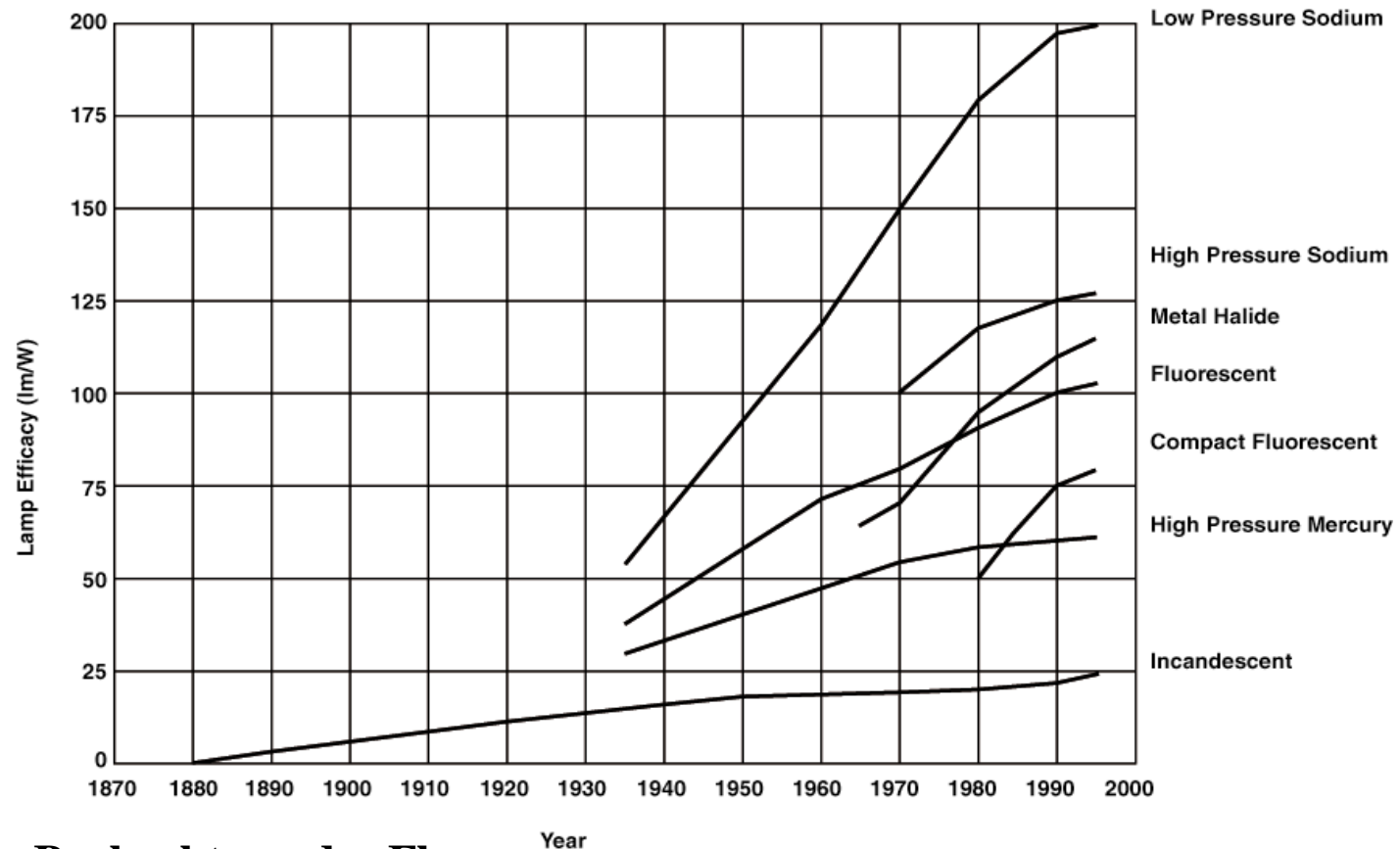
Leistung = 4 – 58 W (200 W)

100 – 2000 W

5.1 Klassifizierung von Gasentladungslampen

Quecksilber		Natrium	Edelgase	Schwefel
Niederdruck $p < 10$ mbar	Hochdruck $p > 1$ bar	Niederdruck	Niederdruck	Hochdruck
Hg/Ar Hg/Ne	Hg/Ar	Na/Ar/Ne	Ne	S ₂
185 + 254 nm	Breitbandspektrum	589 nm	74 nm	Breitband- spektrum
(Kompakt-) Fluoreszenz lampen	Linienemitter NaX / TiX / InX, X = I, Br Multi-Linienemitter NaX / TiX / LnX ₃ (Ln = Dy, Ho, Tm, Sc) SnX ₂	Hochdruck	Mitteldruck	
bzw.		Na/Hg/Xe	Xe/Ne	
Leuchtstoff- lampen	Metallhalogenidlampen	Natrium- dampf- lampen	147 + 172 nm	
			Plasma- bildschirme	

5.2 Historische Entwicklung



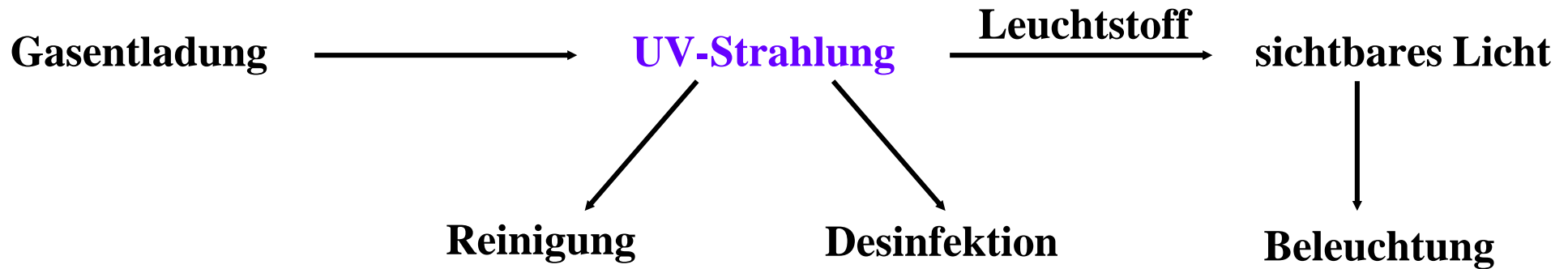
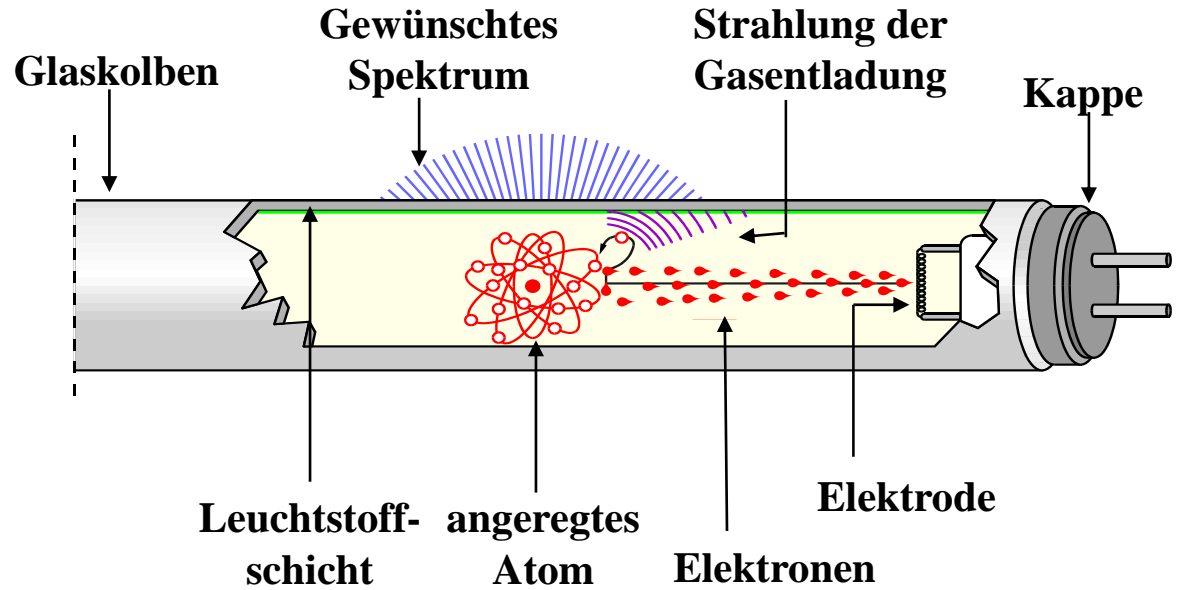
1852 Stokes: Beobachtung der Fluoreszenz

1938 General Electric: Erste Fluoreszenzlampe, Leuchtstoff = $(\text{Zn,Be})_2\text{SiO}_4:\text{Mn}$ (40 lm/W)

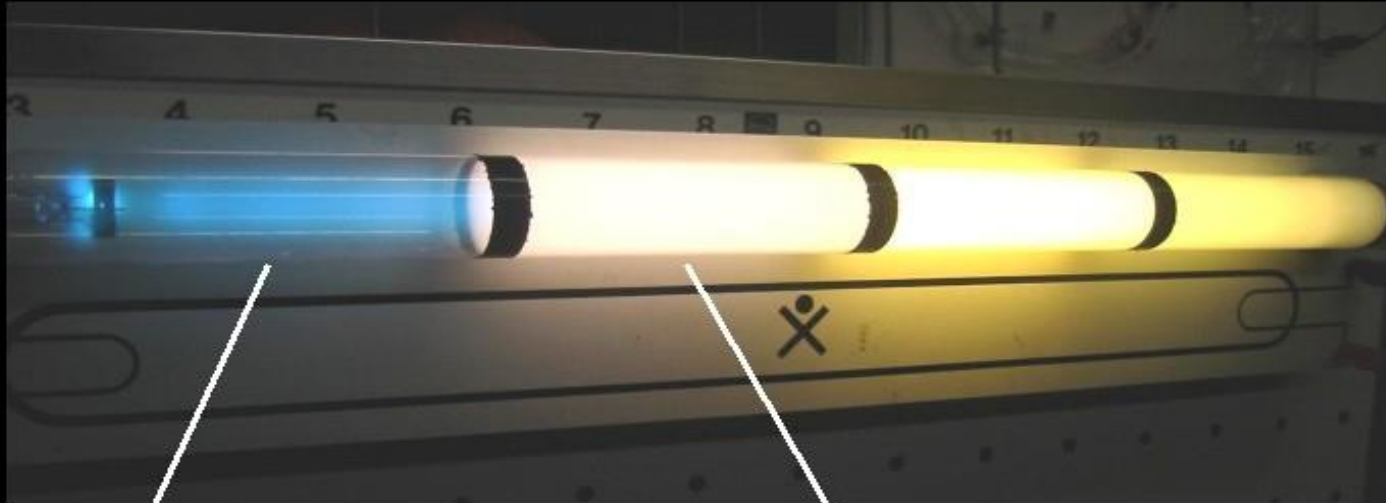
1942 Fluoreszenzlampen mit Halophosphat: 60 lm/W

1971 Trichromatische Fluoreszenzlampen: 100 lm/W

5.3 Prinzip der Fluoreszenzlampen



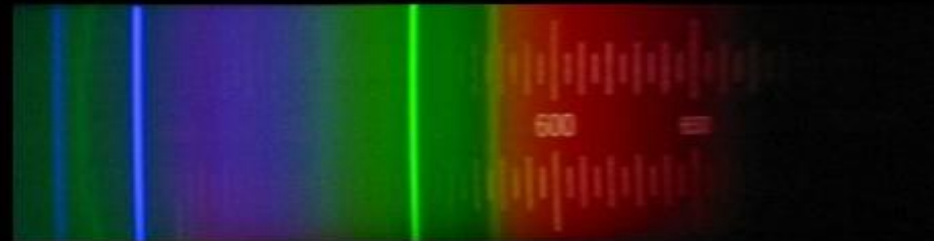
5.3 Prinzip der Fluoreszenzlampe



ohne Leuchtstoff:



mit Leuchtstoff:



5.4 Die Hg-Niederdruckentladung

In Gasentladungslampen wird Licht primär durch ein elektrisch angeregtes Plasma erzeugt

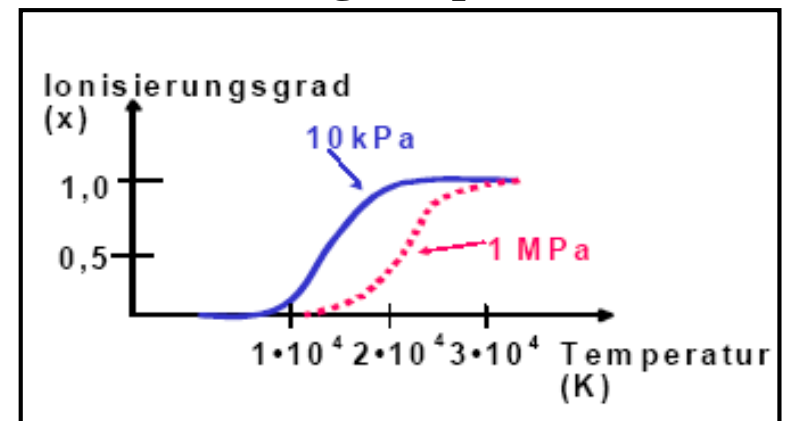
Definition Plasma

Gemisch aus Elektronen, Ionen und Neutralteilchen in verschiedenen Anregungszuständen und mit starker Wechselwirkung untereinander

- a) **Isothermes Plasma:** Alle Teilchen im thermodynamischen Gleichgewicht (Hochtemperaturplasmen: Sterne)
- b) **Nicht-isoth. Plasma:** Nur Elektronen im thermodynamischen Gleichgewicht (Elektrisch erzeugte Plasmen: Gasentladungslampen)

In Gasentladungslampen sind die Gasatome faktisch nicht ionisiert.

Eine signifikante Ionisierung tritt erst bei Temperaturen oberhalb von 4000 K auf



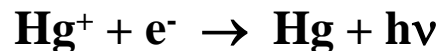
5.4 Die Hg-Niederdruckentladung

Das Spektrum einer Gasentladung entsteht durch mehrere physikalische Prozesse

1. **Linienstrahlung (Fluoreszenz)**



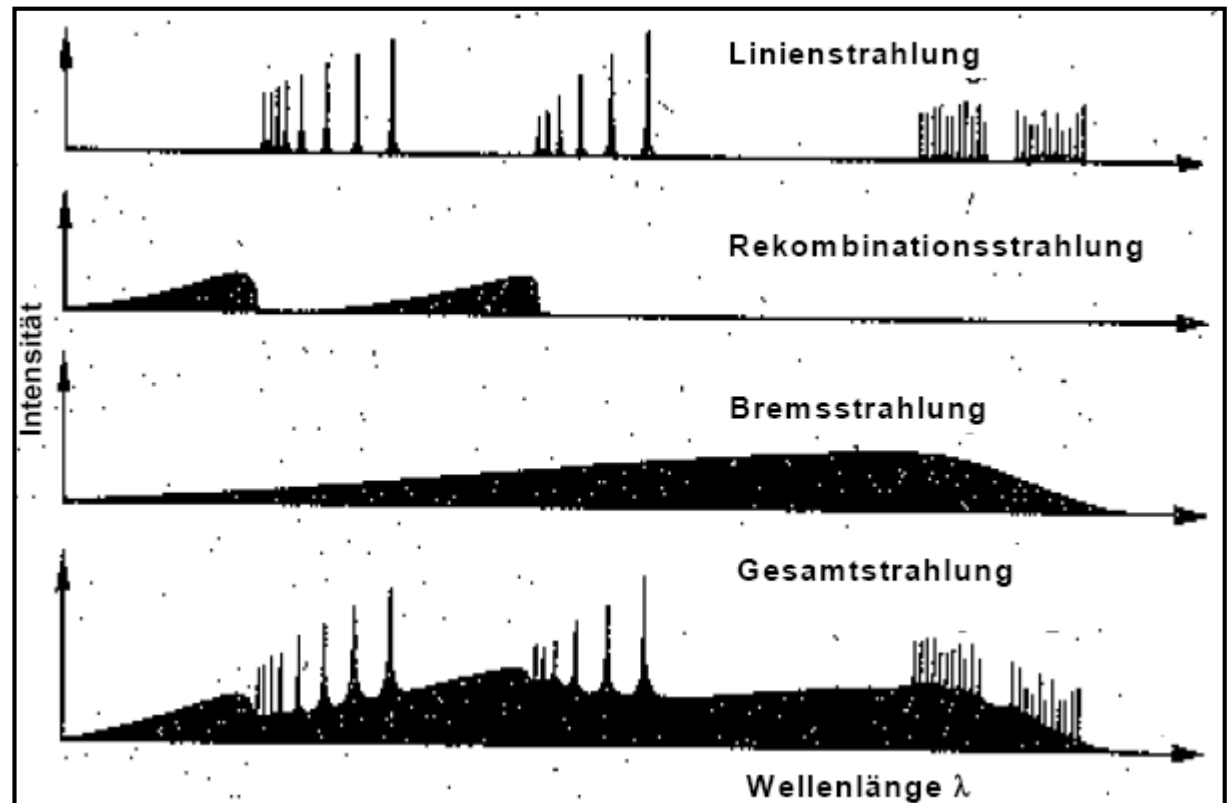
2. **Rekombinationsstrahlung**



3. **Bremsstrahlung**
Thermalisierung der
Elektronen

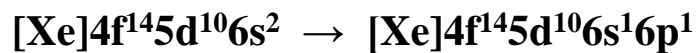
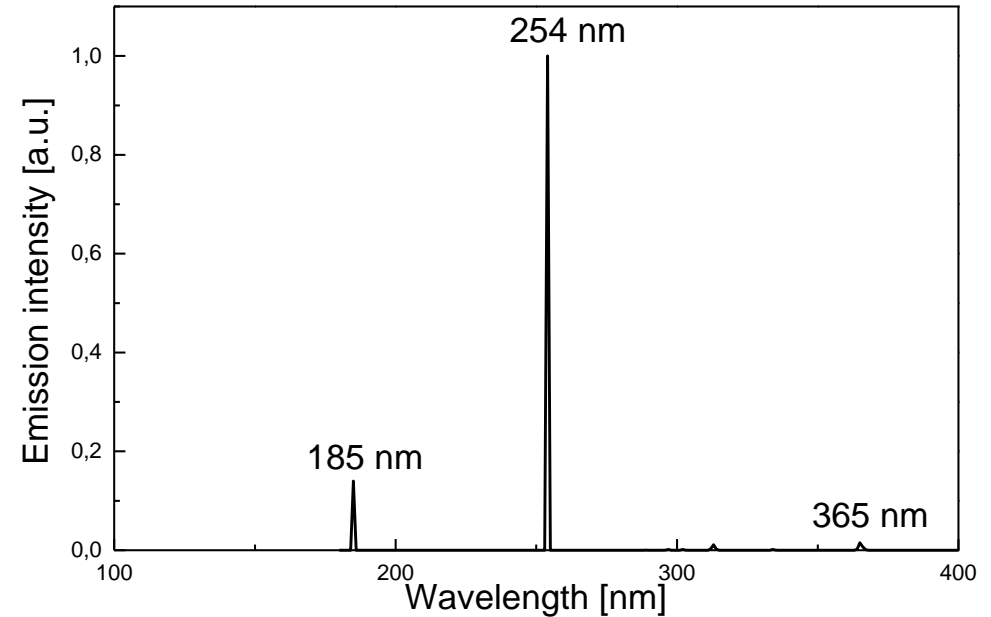
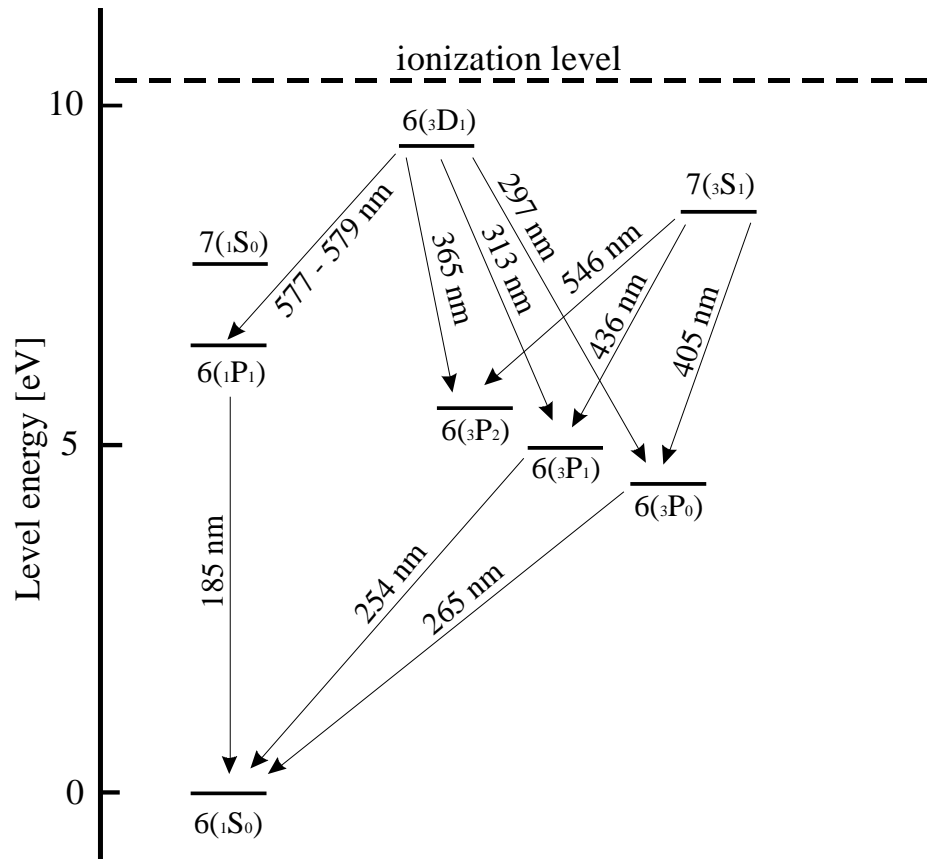
Zusätzlich:

- **Excimerstrahlung**
- **Leuchtstoffemission**
- **Emission einer LnX_3 -
Füllung**



5.4 Die Hg-Niederdruckentladung

Termschema Hg-Atom und Emissionsspektrum einer Hg-Niederdruckgasentladung



Grundzustandsterm: $1S_0$ (alle Schalen gefüllt)

Weitere Linien im sichtbaren Bereich

bei 405, 436, 546, 579 nm

⇒ Plasma erscheint bläulich-weiß

5.4 Die Hg-Niederdruckentladung

Prozesse in der Gasentladung

1. Thermische Emission von Elektronen

Kathode $\rightarrow e^-$

2. Elastische Streuung an Hg und Ar

$e^- + \text{Hg} \rightarrow e^- + \text{Hg}$

$e^- + \text{Ar} \rightarrow e^- + \text{Ar}$

3. Anregung von Hg-Atomen

$e^- + \text{Hg} \rightarrow e^- + \text{Hg}^* ({}^3\text{P}_1)$

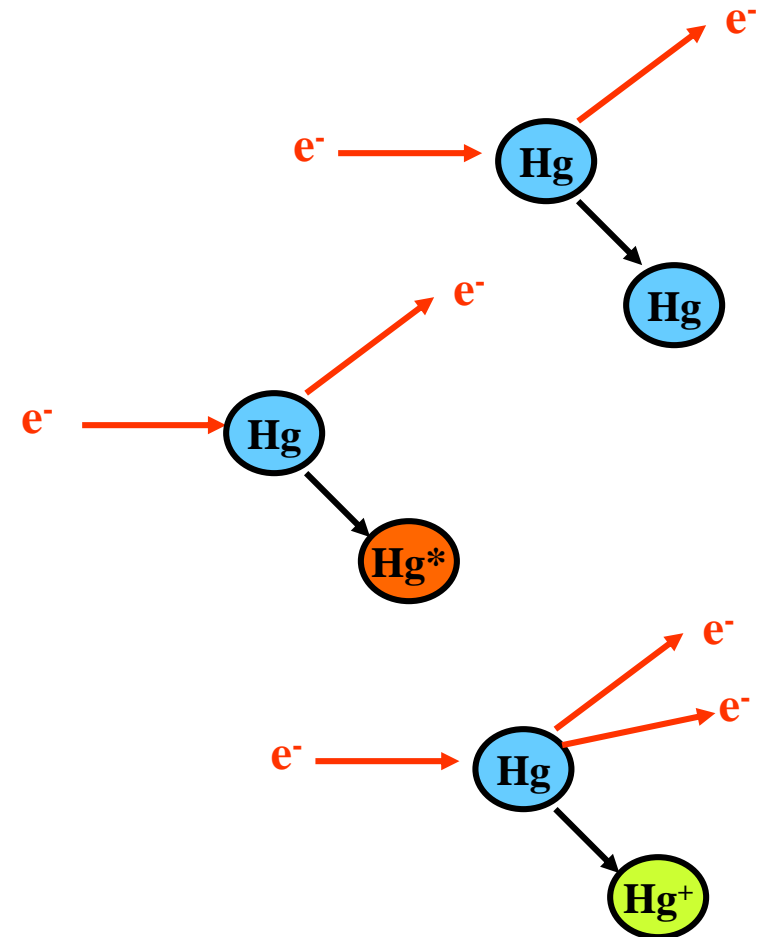
$e^- + \text{Hg} \rightarrow e^- + \text{Hg}^* ({}^1\text{P}_1)$

4. Ionisation von Hg-Atomen

$e^- + \text{Hg} \rightarrow 2 e^- + \text{Hg}^+$

5. Relaxation angeregter Hg-Atome

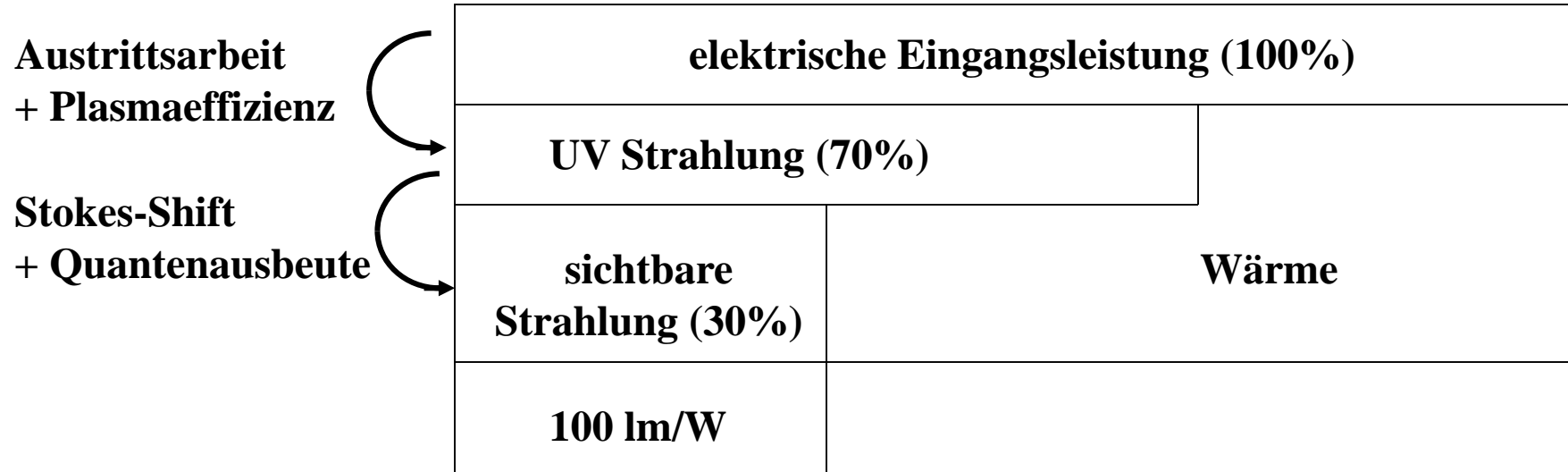
$\text{Hg}^*({}^3\text{P}_1, {}^1\text{P}_1, \dots) \rightarrow \text{Hg} + h\nu_{\text{UV}}$



Bei einer Hg-Niederdruckentladung wird ca. 70% der elektrischen Eingangsleistung in UV-Strahlung umgewandelt

5.5 Energiebilanz

Verlustprozesse in Fluoreszenzlampen



$\epsilon_{\text{dis}} = \text{Plasmaeffizienz}$

$$\epsilon = \epsilon_{\text{dis}} * \text{QD} * \text{QA}$$

Quanten-Defizit (Stokes-Shift) = $[\lambda_{\text{Plasma}} / \lambda_{\text{Leuchtstoff}}] = 0.46$

Quantenausbeute = $N_{\text{emit. Photonen}} / N_{\text{abs. Photonen}} \sim 0.9$

Fluoreszenzlampen, Leuchtstoffröhren (TL)

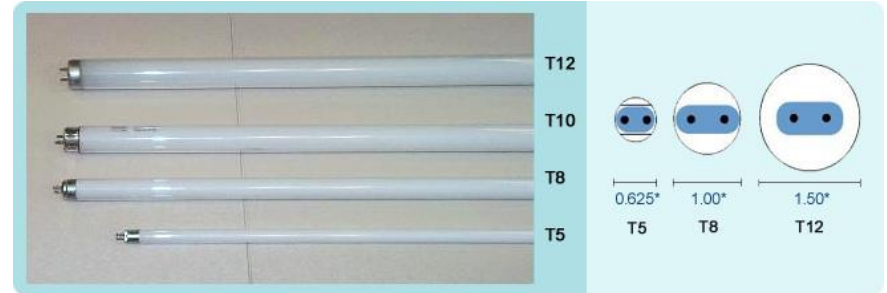
$\epsilon_{\text{dis}} = 70\% \Rightarrow \epsilon = 30\% (\sim 100 \text{ lm/W})$

Kompaktfluoreszenzlampen, Energiesparlampen (CFL)

$\epsilon_{\text{dis}} = 40\% \Rightarrow \epsilon = 18\% (\sim 60 \text{ lm/W})$

5.6 Typische Abmessungen

Leuchtstoffröhren



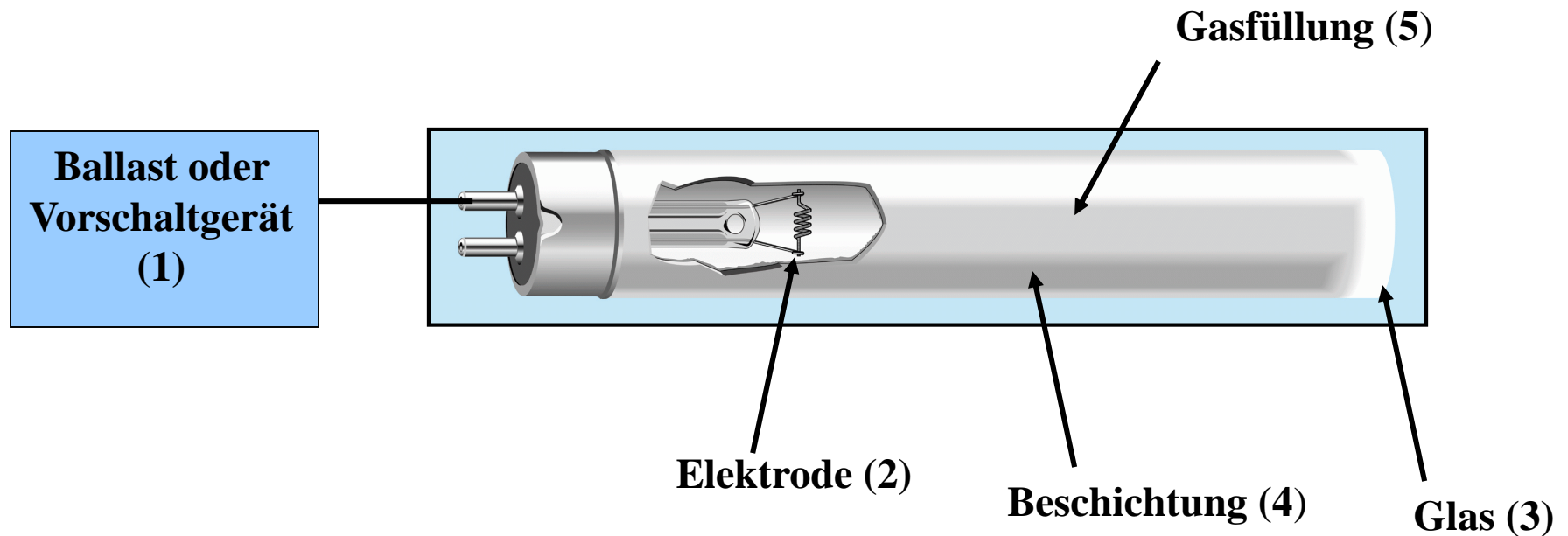
Leistung	Länge	Durchmesser	Typ
18 W	0.6 m	T8	T8 = 8/8 inch = 2.54 cm
36 W	1.2 m	T8	
58 W	1.5 m	T8	
4 W	0.14 m	T5	T5 = 5/8 inch = 1.59 cm
6 W	0.21 m	T5	
8 W	0.30 m	T5	
13 W	0.50 m	T5	

**T12 → T8 → T5 → T4 → T3 → T1 (0.32 cm): Steigende Wandbelastung!
 Heute: LED Retrofitlampen**

5.7 Komponenten von Fluoreszenzlampen

Funktionelle Bestandteile

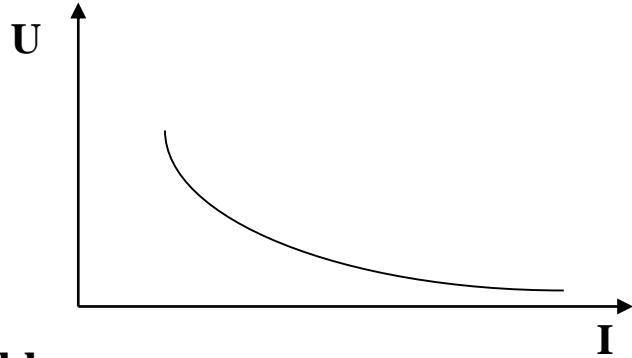
1. Ballast oder Vorschaltgerät sowie Starter
2. Elektroden und Emitter
3. Glas
4. Beschichtung = Vorbeschichtung + Leuchtstoff
5. Gasfüllung



5.8 Der Ballast

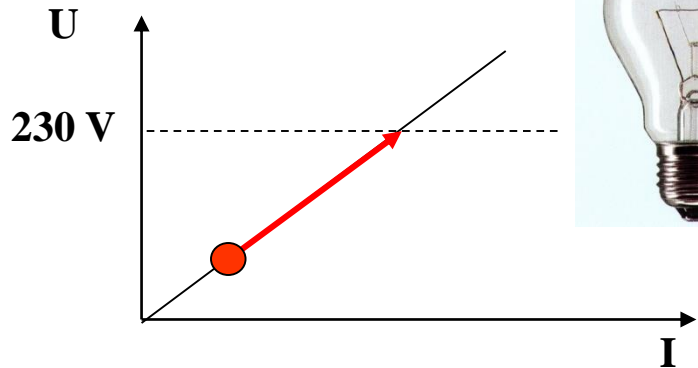
Warum wird ein Ballast benötigt?

Entladungslampen zeigen negative Strom-Spannungs-Charakteristik ($S = 1/R = \text{Leitfähigkeit}$)

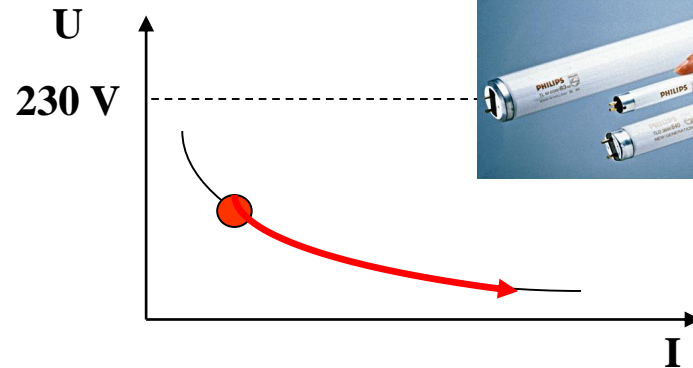


$$U = R \cdot I \Rightarrow U = \frac{I}{S} \sim \frac{n_e}{\text{steigt stärker als linear mit } n_e}$$

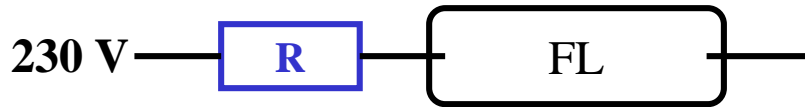
Glühlampen



Entladungslampen



5.8 Der Ballast

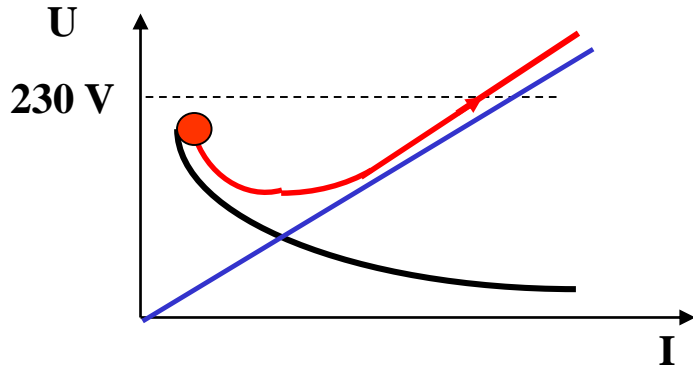


36 W FL: $U = 100 \text{ V}$, $I = 0.36 \text{ A}$

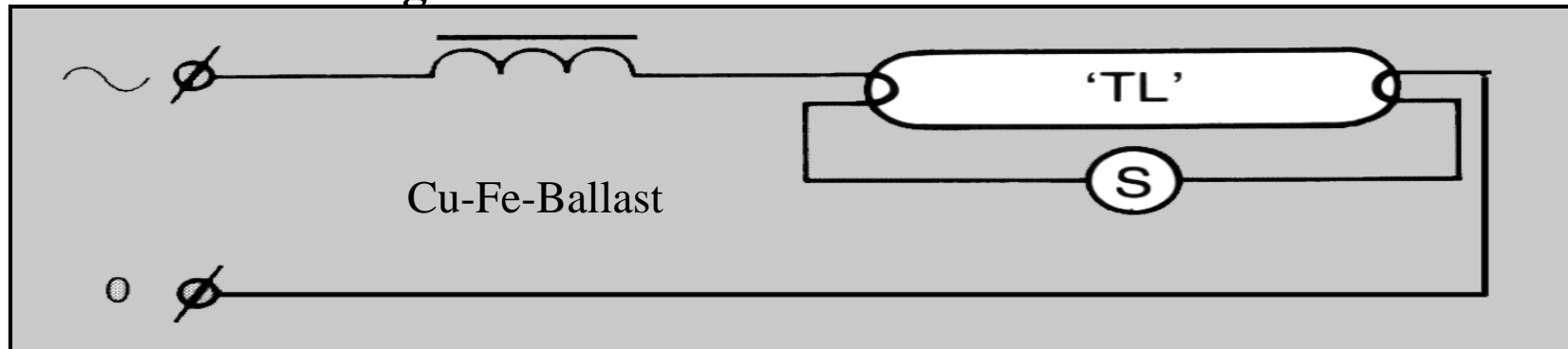
R: $U_R = 130 \text{ V}$, $I_R = 0.36 \text{ A} \Rightarrow R = 360 \Omega$

$\Rightarrow 130/230 = 56\%$ der Leistung wird in R verbraucht

$\Rightarrow \eta = 100 \text{ lm/W} * 44\% = 44 \text{ lm/W}$



Ausweg: mit Spule (Induktivität) oder Kondensator (Kapazität) „ballastieren“
 \Rightarrow in L und C sind Strom und Spannung um 90° phasenverschoben
 \Rightarrow keine Leistung wird verbraucht

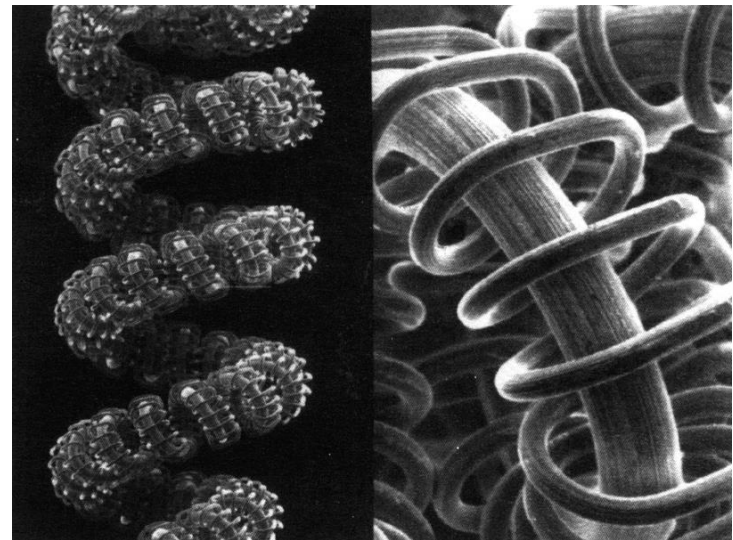
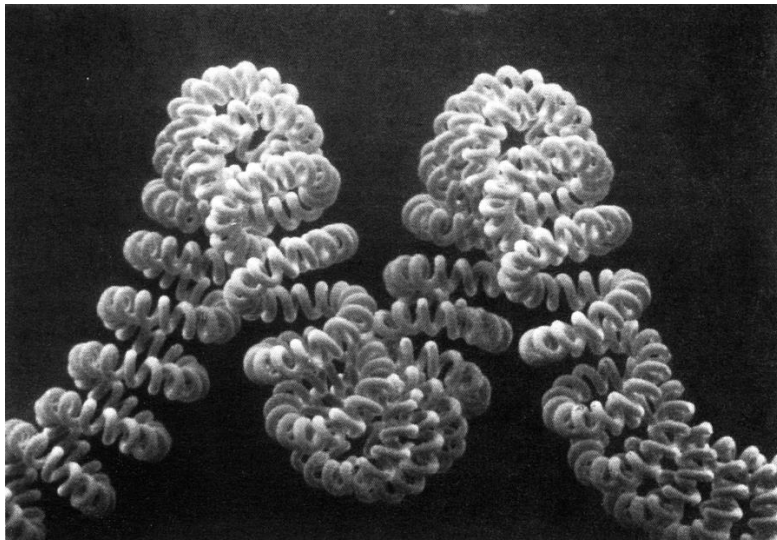


5.9 Elektroden und Emitter

Die Elektroden geben durch thermische Emission Elektronen in die Gasphase ab

Material: Wolfram (Elektronenemission ab ca. 2000 °C)

Typischer Aufbau: Doppelwendel



5.9 Elektroden und Emitter

Die thermische Glühemission von Elektroden wird durch das Richardson-Gesetz beschrieben

$$I = \text{Fläche} \cdot A \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{W_A}{kT}}$$

A = Richardsonkonstante = 60 A/cm²K²

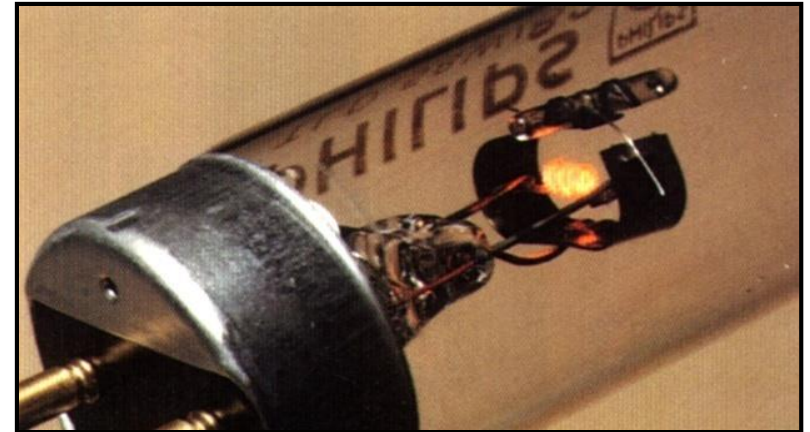
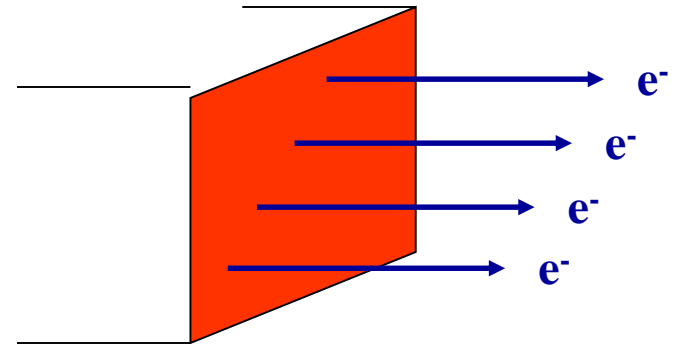
W_A = Austrittsarbeit (4.54 eV für Wolfram)

kT = thermische Energie [J]

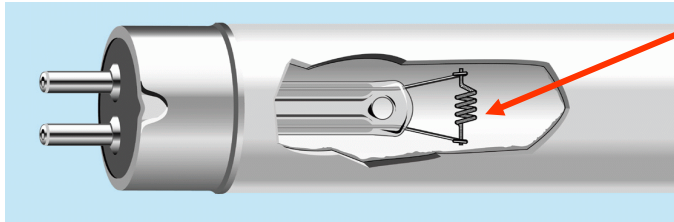
k = Boltzmannkonstante = 1.38·10⁻²³ J/K

$e^{-\frac{W_A}{kT}}$ Wahrscheinlichkeit, dass ein Elektron die Oberfläche verlässt

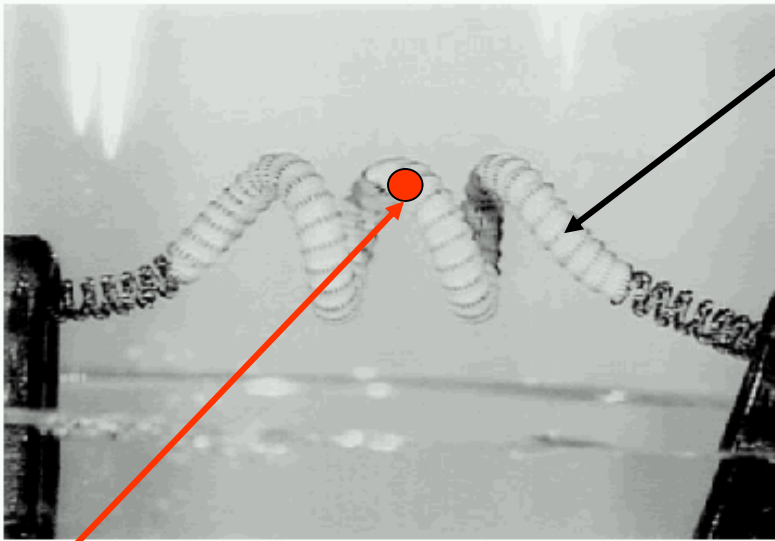
heiße Oberfläche



5.9 Elektroden und Emitter



Elektrode aus Wolfram \Rightarrow Richardson: $I = 0.5 \text{ A}$
 $\Rightarrow T_W = 3100 \text{ K}$
 \Rightarrow kostet Energie
 \Rightarrow Effizienz sinkt



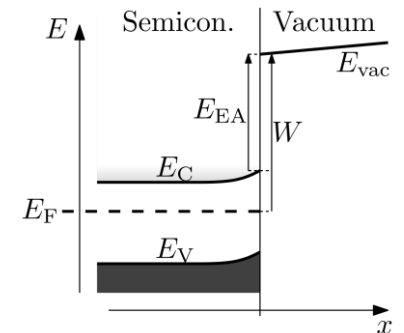
Ausweg

Elektrode wird mit einem Emitter beschichtet

Emitter = Material mit niedriger Austrittsarbeit

Material	W_A [V]
W	4.3 – 5.2
Ba	2.5 \longrightarrow
Sr	2.6
Ca	2.9
BaO	1.0 – 1.7
SrO	1.3 – 1.6
CaO	1.6 – 1.9
Y_2O_3	2.0 – 3.9

$I = 0.5 \text{ A}$ schon bei
 $T_{Ba} = 1350 \text{ K}$



Bogen setzt auf ca. 1 mm^2
 großer Fläche an

5.9 Elektroden und Emitter

Eingesetzte Emittermaterialien

Y_2O_3

Na-Hochdrucklampen

BaO/SrO/CaO

Na/Hg-Niederdrucklampen

Anwendung als stabile Carbonate „Triple mix“

1. Tauchbeschichtung der Elektrode mit einer Suspension des „Triple mix“

2. Aktivierung in der Lampe: $\text{MeCO}_3 \rightarrow \text{MeO} + \text{CO}_2$ (Me = Ca, Sr, Ba)

3. Betrieb der Lampe: $\text{W} + 6 \text{BaO} \rightarrow \text{Ba}_3\text{WO}_6 + 3 \text{Ba}$ (Emitter)

5.10 Lampenglas

Allgemeine Anforderungen

- Preiswert (< 1 ct/Lampe)
- Hohe Transparenz
- Strahlungsstabilität (geringe Solarisation)
- Thermische Stabilität

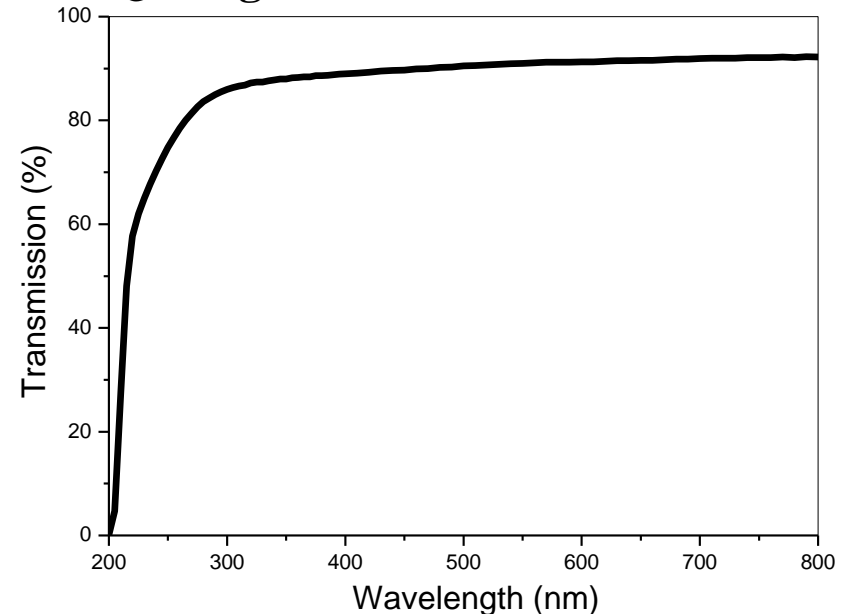
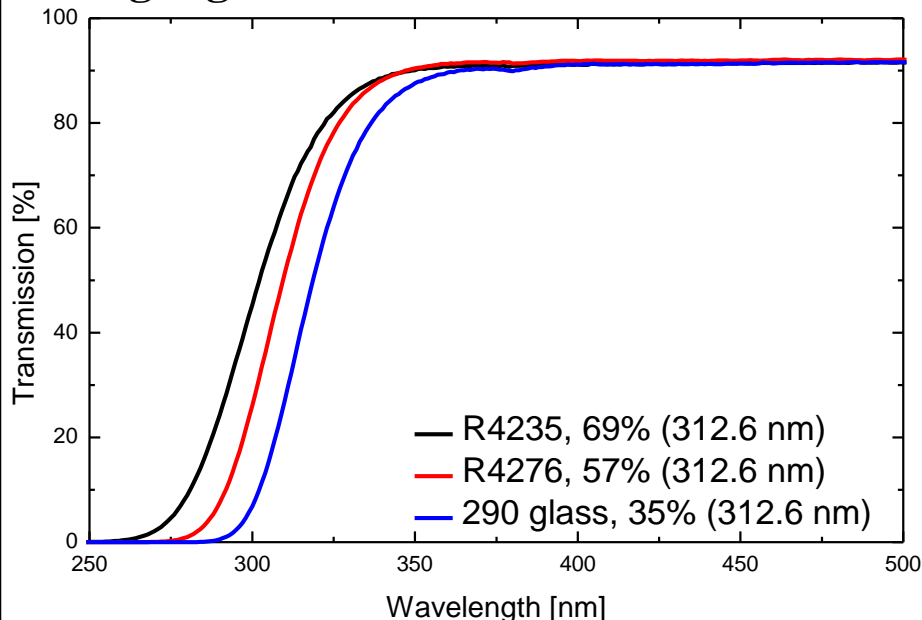
Zusammensetzung von Lampengläsern

Komposition [%]	Natriumsilikat	Bleisilikat	Borsilikat	Aluminosilikat	Aluminoborat	Quarz
SiO ₂	73	64	75	63	8	100
Na ₂ O	16	8	4		14	
K ₂ O	1	6	2			
CaO	5			9	6	
MgO	4					
Al ₂ O ₃	1	2	1	16	24	
PbO		20				
B ₂ O ₃			18		48	
Anwendung in	Glühlampen Fluor- eszenzlampen	Glühlampen Fluor- eszenzlampen	Hg-Hoch- drucklampen	Halogenlampen	Na-Nieder- drucklampen	UV-C Lampen

5.10 Lampenglas

Transmission von Lampengläsern

Lampenanwendung	Absorptionskante [nm]	Glastyp
Beleuchtung	320	Natriumsilikatglas
Sonnenbänke	300	modifiziertes Natriumsilikatglas
Desinfektion	220	modifiziertes Natriumsilikatglas
Reinigung	170	Quarzglas

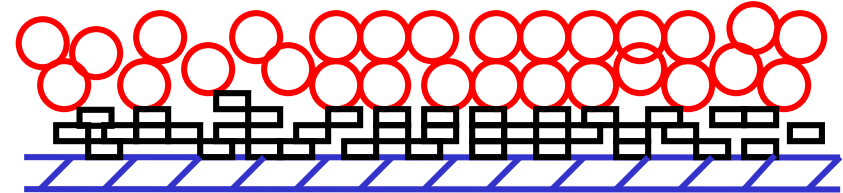


5.11 Die Beschichtung

Prinzipieller Aufbau

- Leuchtstoffschicht (Leuchtstoff + Füller)
- Vorbeschichtung (Al_2O_3 , Y_2O_3 , MgO)

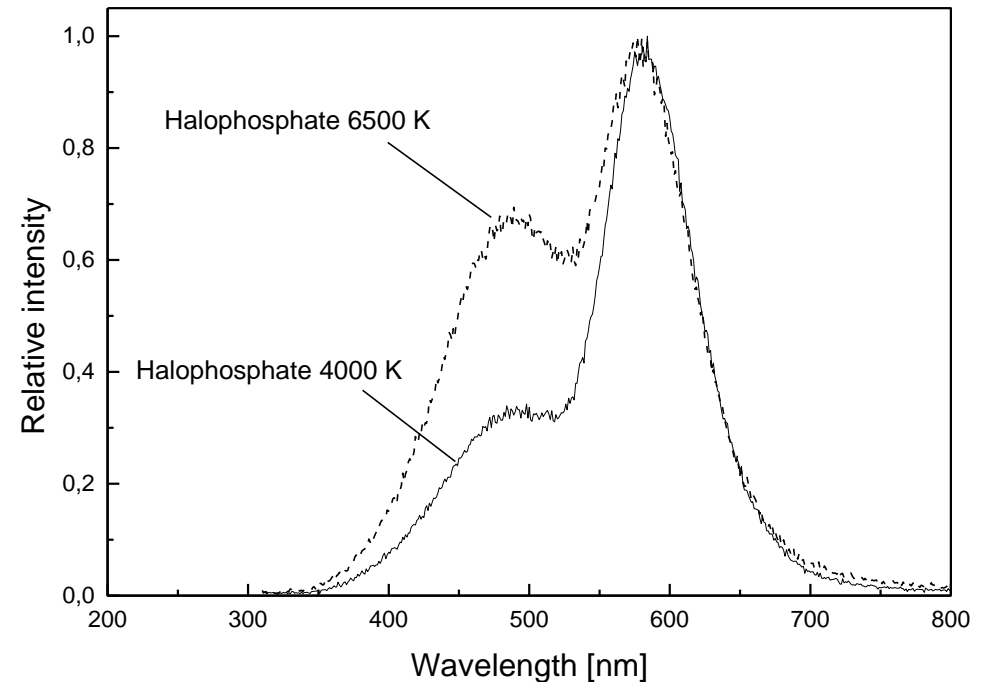
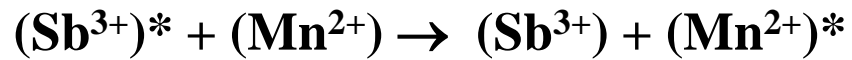
Schematischer Aufbau



<u>Dispersionsmedium</u>	<u>Butylacetat</u>	<u>Destilliertes Wasser</u>
Binder	Nitrocellulose	Polyethylenoxid
Leuchtstoff(mischung)	Halophosphate	Halophosphate
	Farbe 80 Leuchtstoffe	Farbe 80 Leuchtstoffe
	Farbe 90 Leuchtstoffe	Farbe 90 Leuchtstoffe
	UV-Leuchtstoffe	
Haftungsmittel	Alon-c (Al_2O_3)	$\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$ oder $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7$
Dispersionsmittel	2-Methoxy-1-propanol	Polyacrylsäure

5.11 Die Beschichtung

Mit dem Leuchtstoff Halophosphat (Apatit)



- **Sb/Mn Massenverhältnis bestimmt die effektive Farbtemperatur**
- **Lichtausbeute = 75 - 80 lm/W_{el}**
- **Farbwiedergabe CRI = 60**

5.11 Die Beschichtung

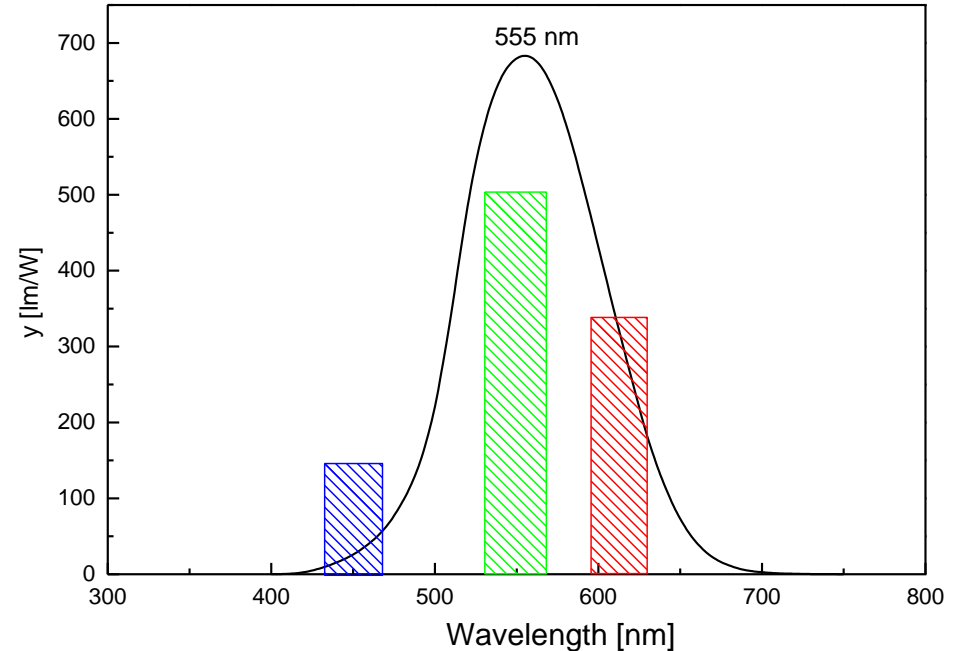
Mit einer Dreikomponenten-Leuchtstoffmischung (Rot-Grün-Blau RGB)

Erforderliche Positionen der Emissionsbanden

Blau 440 - 460 nm **Eu²⁺**

Grün 540 - 560 nm **Tb³⁺**

Rot 590 - 630 nm **Eu³⁺**

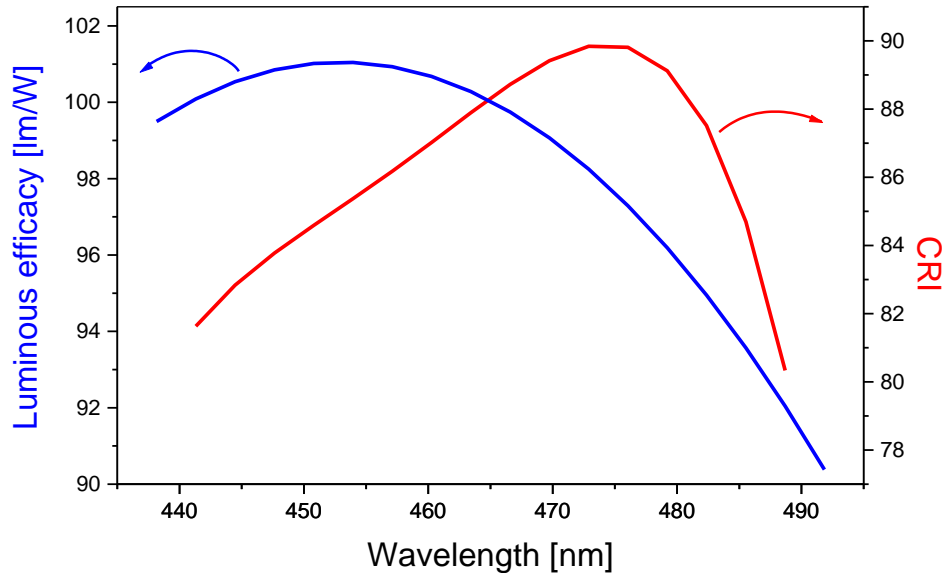


- **Lichtausbeute = 100 lm/W_{el}**
- **Farbwiedergabe CRI = 80 – 85**
- **Lebensdauer L70 > 10000 h → keine Fluoride, Silikate, Titanate oder Zirkonate**

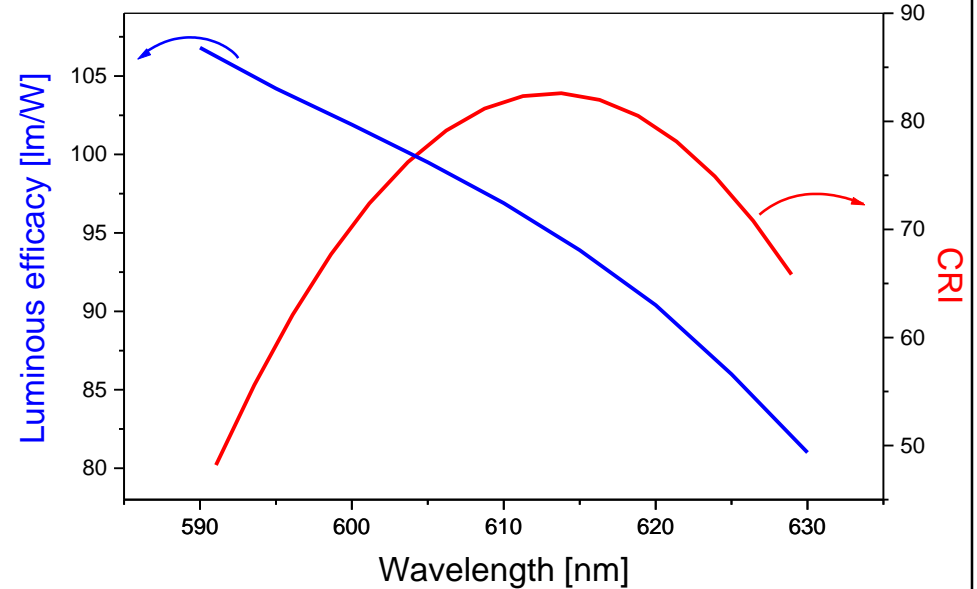
5.11 Die Beschichtung

Lumenausbeute von Dreibandlampen (trichromatische Lampen)

Blau + 545 nm + 610 nm



450 nm + 545 nm + Rot

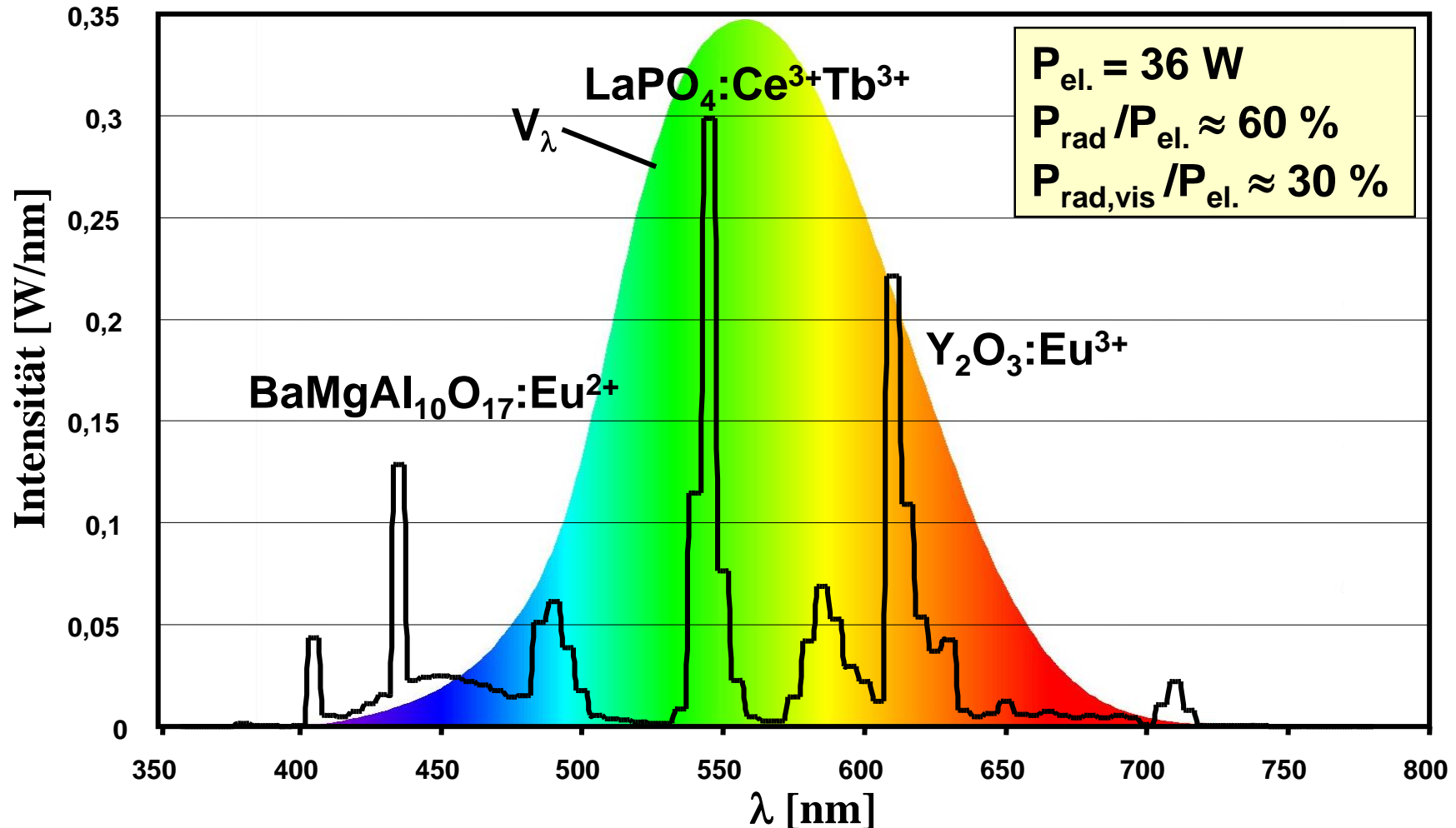


Optimum bei etwa

- **Lichtausbeute $100 \text{ lm/W}_{\text{el}}$**
- **CRI = 80 - 85 (\Rightarrow Farbe 80 Lampen)**

5.11 Die Beschichtung

Spektrum von Dreibandlampen (trichromatische Lampen)



5.11 Die Beschichtung

Farbpunkte von Farbe 80 Dreibandlampen (trichromatische Lampen)

Farbtemperatur

2700 - 6500 K

Nur grüner und roter Leuchtstoff

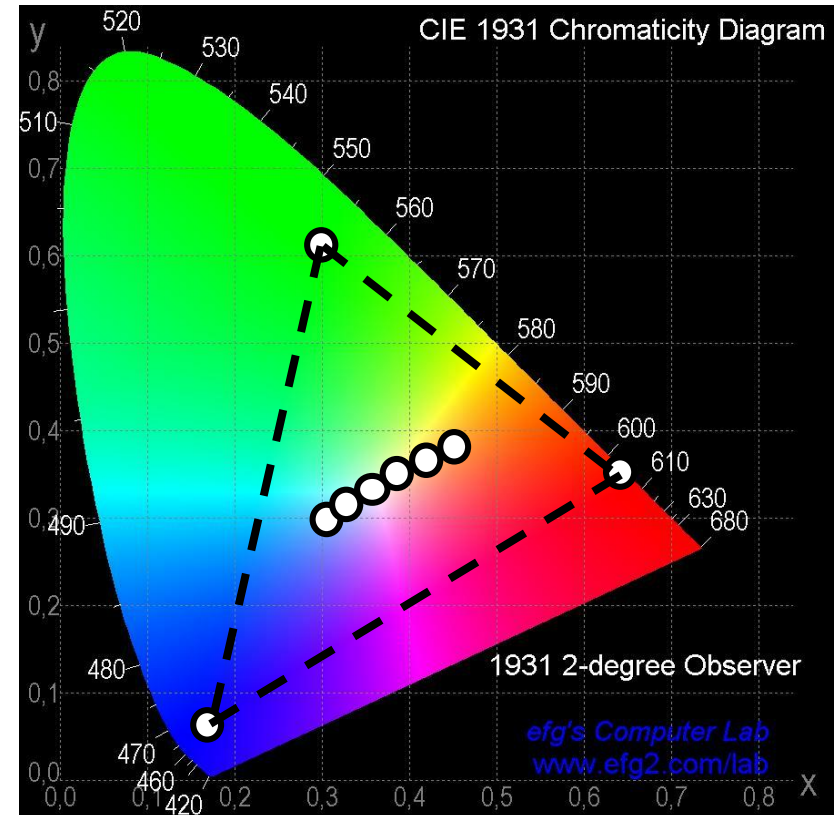
2700 K

RGB Leuchtstoffmischung

2700 - 6500 K je nach Mischungsverhältnis

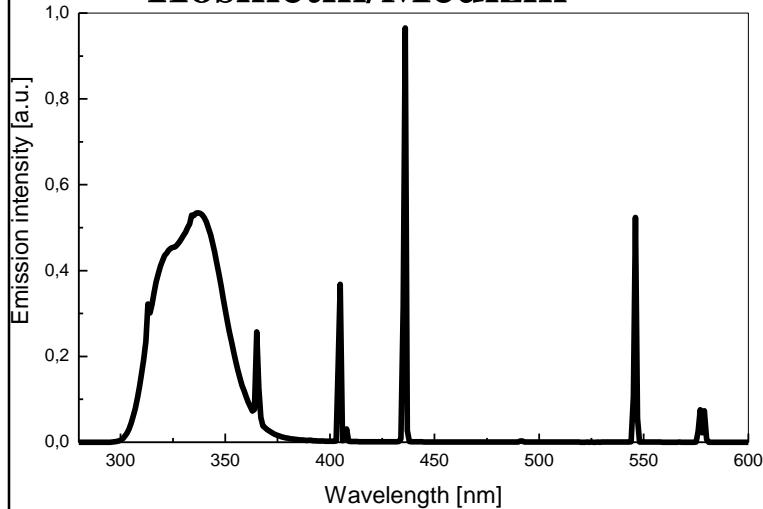
Farbpunkt

Wird so eingestellt, dass er möglichst nahe der Black-Body-Line liegt

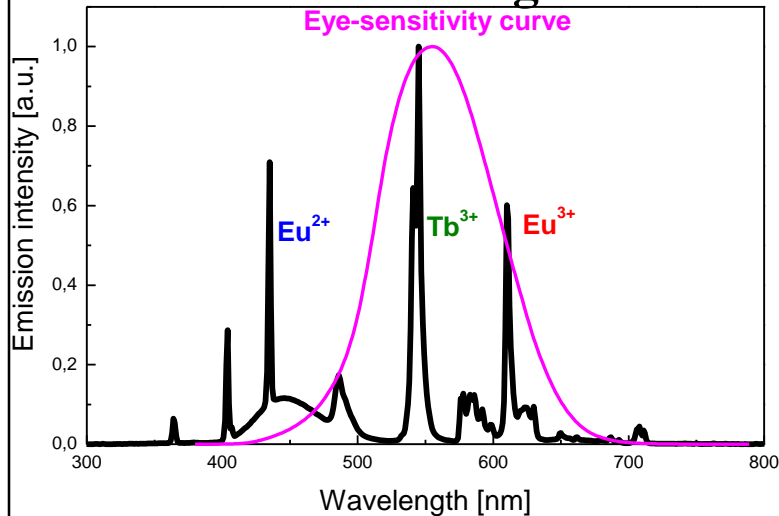


5.11 Die Beschichtung

Kosmetik/Medizin



Beleuchtung



Lanthanoidionen

Ce^{3+}
 $LaPO_4:Ce$
 $YPO_4:Ce$

Eu^{2+}
 $Sr_5(PO_4)_3(F,Cl):Eu$
 $BaMgAl_{10}O_{17}:Eu$

Tb^{3+}
 $LaPO_4:Ce,Tb$
 $CeMgAl_{11}O_{19}:Tb$
 $LaMgB_5O_{10}:Ce,Tb$

Eu^{3+}
 $Y_2O_3:Eu$
 $(Y,Gd)(V,P)O_4:Eu$

s^2 - oder $\ddot{U}M$ -Ionen

Pb^{2+}
 $Sr_2MgSi_2O_7:Pb$
 $BaSi_2O_5:Pb$

Sb^{3+}
 $Ca_5(PO_4)_3(F,Cl):Sb$

Mn^{2+}
 $BaMgAl_{10}O_{17}:Eu,Mn$
 $Zn_2SiO_4:Mn$
 $Ca_5(PO_4)_3(F,Cl):Sb,Mn$
 $LaMgB_5O_{10}:Ce,Tb,Mn$

Mn^{4+}
 $Mg_4GeO_{5.5}F:Mn$

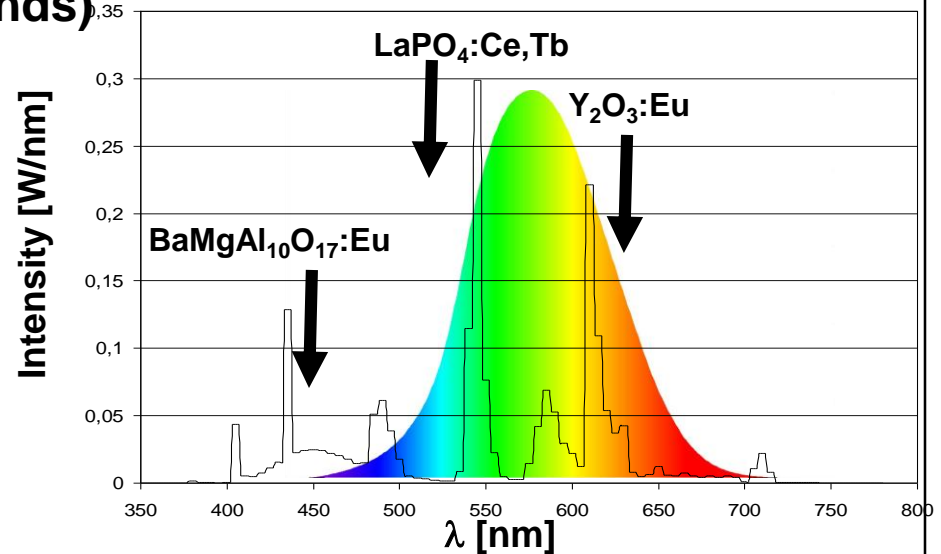
5.11 Die Beschichtung

Color rendering (trichromatic phosphor blends)

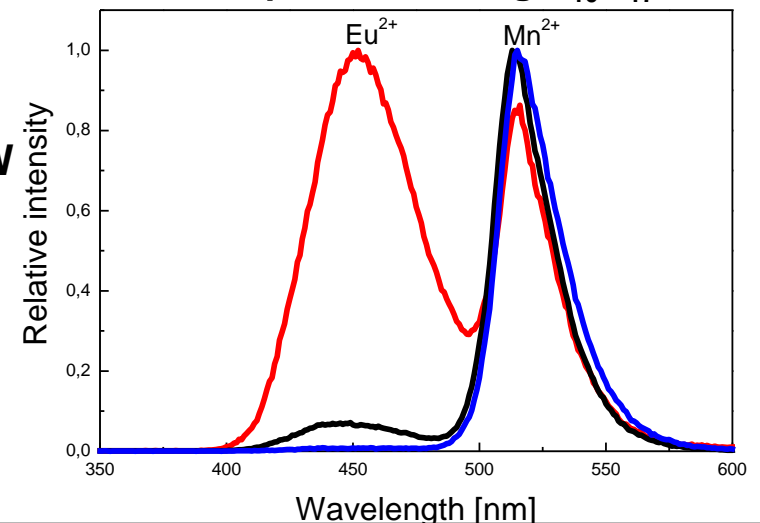
- Fairly good color rendering → $R_a = 80 - 85$
- Lack of radiation in the
 - cyan 500 – 535 nm
 - yellow 560 – 580 nm
 - deep red > 610 nm

Consequences

- Additional broad band phosphors
 - $\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}:\text{Eu}$
 - $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{Cl}):\text{Sb},\text{Mn}$
 - Modification of applied trichromatic phosphors
 - $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu} \rightarrow \text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu},\text{Mn}$
 - $\text{GdMgB}_5\text{O}_{10}:\text{Ce},\text{Tb} \rightarrow \text{GdMgB}_5\text{O}_{10}:\text{Ce},\text{Tb},\text{Mn}$
- $R_a \sim 88 - 98$, but luminous efficiency $\sim 60 - 80 \text{ lm/W}$



Emission spectra of $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu},\text{Mn}$



Typical blend (Osram Patent EP1306885)

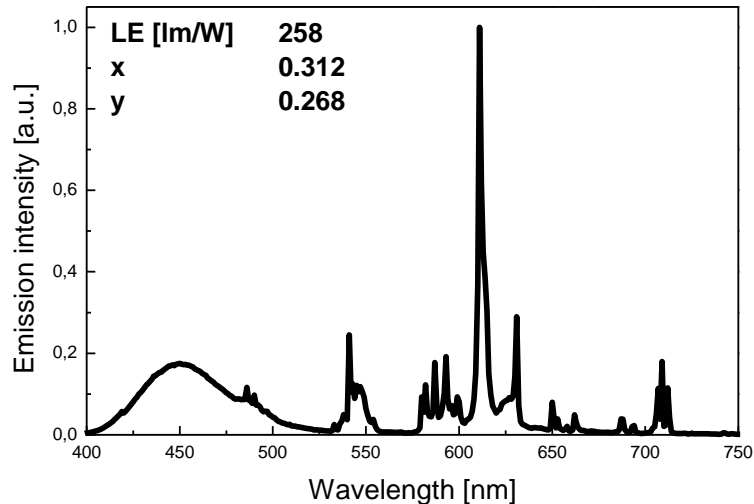
$\text{Sr}_4\text{Al}_{14}\text{O}_{25}:\text{Eu}$	28.5 wt-%
$(\text{Ce},\text{Gd})(\text{Zn},\text{Mg})\text{B}_5\text{O}_{10}:\text{Mn}$	28.5 wt-%
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{Cl}):\text{Sb},\text{Mn}$	26.9 wt-%
$\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}$	6.1 wt-%
$\text{CeMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Tb}$	10.0 wt-%

5.11 Die Beschichtung

Fluoreszenzlampen mit höherer Farbwiedergabe

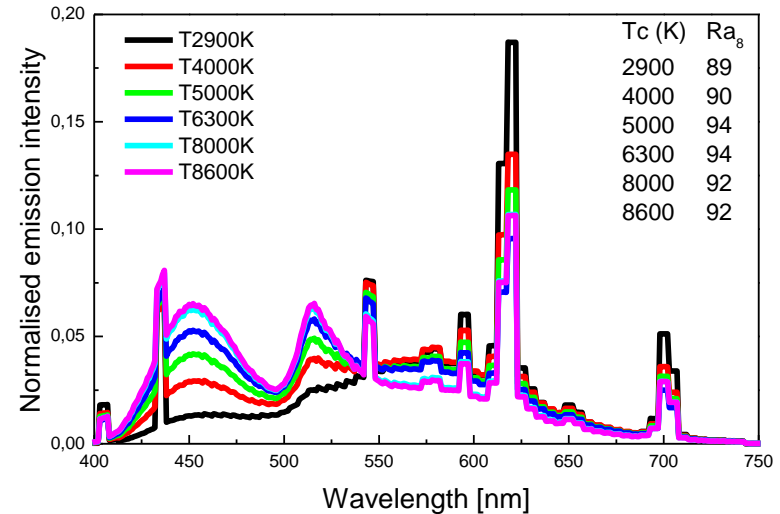
Verwendung von $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu},\text{Mn}$

Emissionsspektrum einer Mischung aus
 $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu},\text{Mn}$ + $\text{LaPO}_4:\text{Ce},\text{Tb}$ + $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}$
bei 254 nm Anregung



Ra ~ 88

Berechnete Emissionsspektren von
Fluoreszenzlampen mit einer Mischung aus
 $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu},\text{Mn}$ + $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ + $\text{YVO}_4:\text{Eu}$



Ra > 90

5.12 Hg-Verbrauch

Die Hg-Niederdruckentladung benötigt für den optimalen Betrieb ca. 50 µg Hg

Standarddosierung: 10 - 20 mg/Lampe

Ursache: Hg-Verbrauch in der Lampe

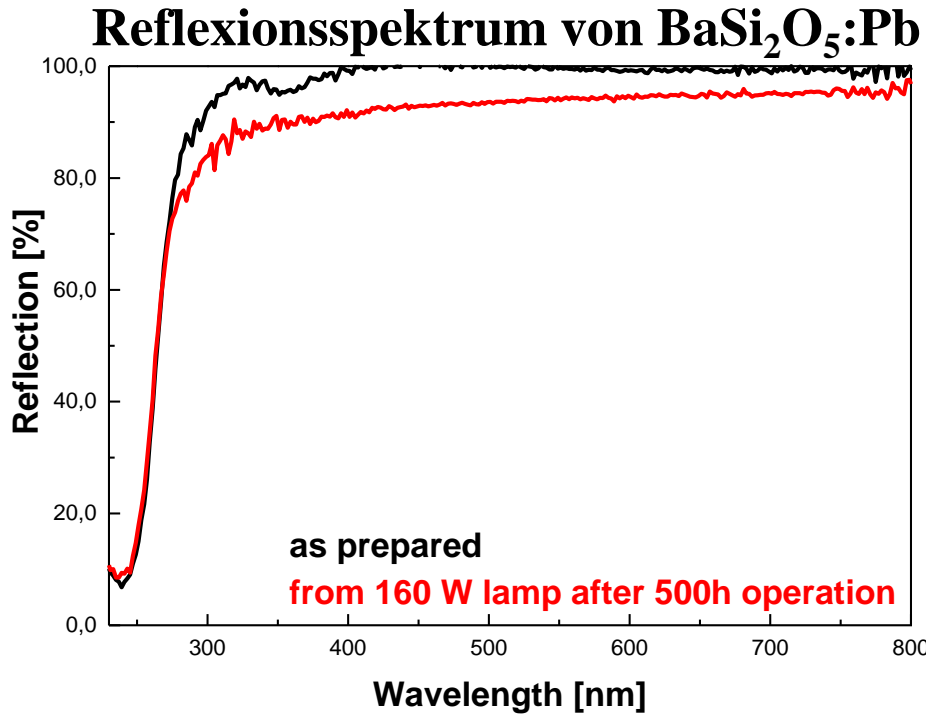
Lampenbestandteil Hg-Verbrauch in 10000 h (4 ft TL Lampe)

- **Glas** **5 mg**
- **Leuchtstoff** **0.1 - 2.0 mg**
- **Elektroden** **0.1 - 1.0 mg**

⇒ Hg wird höher dosiert, um den Verbrauch während der spezifizierten Lebensdauer zu kompensieren

5.12 Hg-Verbrauch

Hg-Adsorption durch Glas und Leuchtstoff führt zur Vergrauung des Leuchtstoffes und zur Reduktion der Entladungseffizienz



Material	IEP [pH]
WO ₃	2.0
SiO ₂ /Glass	3.0
BaSi ₂ O ₅	3.0
TiO ₂	5.6
ZrO ₂	6.0
LaPO ₄	7.8
Al ₂ O ₃	9.0
Y ₂ O ₃	9.0
ZnO	9.4
Yb ₂ O ₃	9.7
La ₂ O ₃	10.4
MgO	11.0

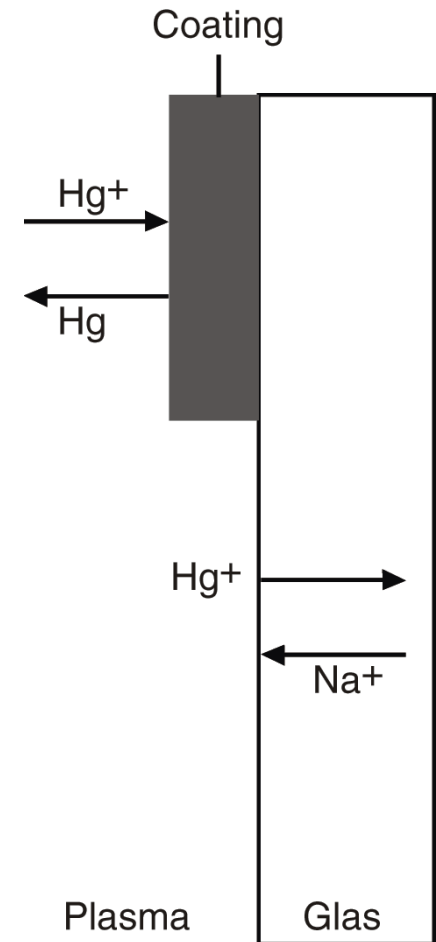
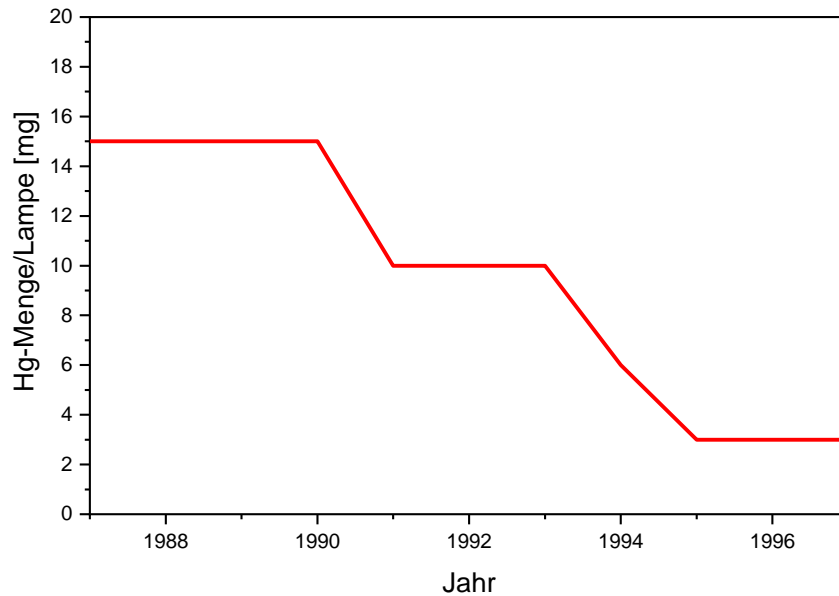
Die Hg/Hg⁺-Aufnahme nimmt mit der Elektronendichte der Anionen (Basizität) ab, d.h. mit der Zunahme der Reaktivität gegenüber elektrophilen Agenzien, wie CO₂, H⁺, Hg⁺

5.12 Hg-Verbrauch

Maßnahmen zur Hg-Verbrauchsreduktion

- Leuchtstoffbeschichtung (engl.: Particle Coating)
- Glasbeschichtung (engl.: Glass Coating)

mit Y_2O_3 oder Al_2O_3 (geringe Hg-Aufnahme)



**3 mg Hg/Lampe mit
 Y_2O_3 -Glasbeschichtung**

5.13 Energiesparlampen

Energiesparlampen sind Leuchtstoffröhren bestehend aus mehreren (gebogenen) Röhren und mit einem integrierten Vorschaltgerät

Trends

- **Miniaturisierung**
- **Glühlampenform (Außenkolben mit Streuschicht)**

„incandescent look-a-like“



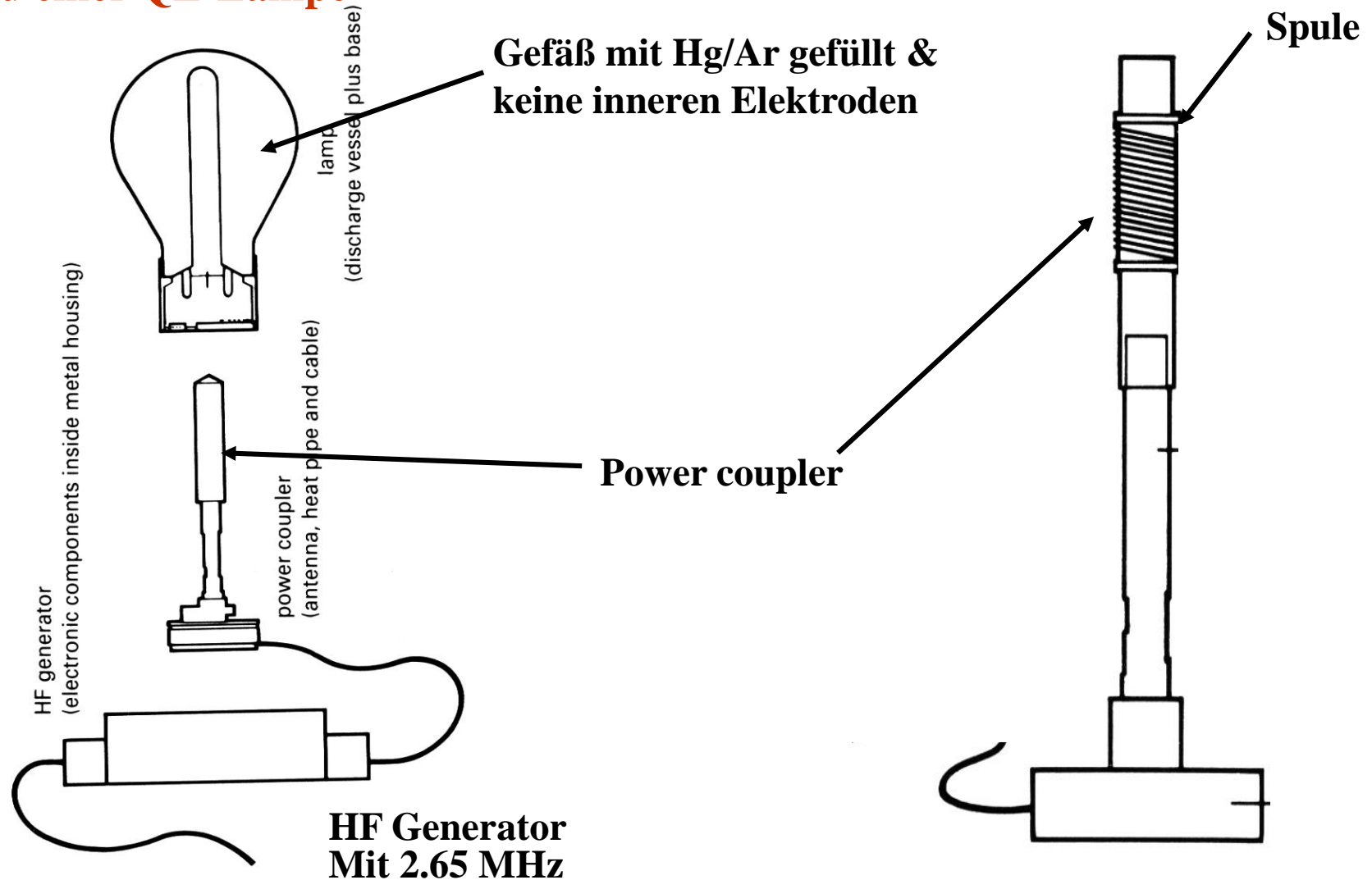
5.14 Induktiv betriebene Lampen

QL Lampen besitzen eine besonders lange Lebensdauer, weil innere Elektroden fehlen (Lichterzeugung genauso wie in üblichen Fluoreszenzlampen)



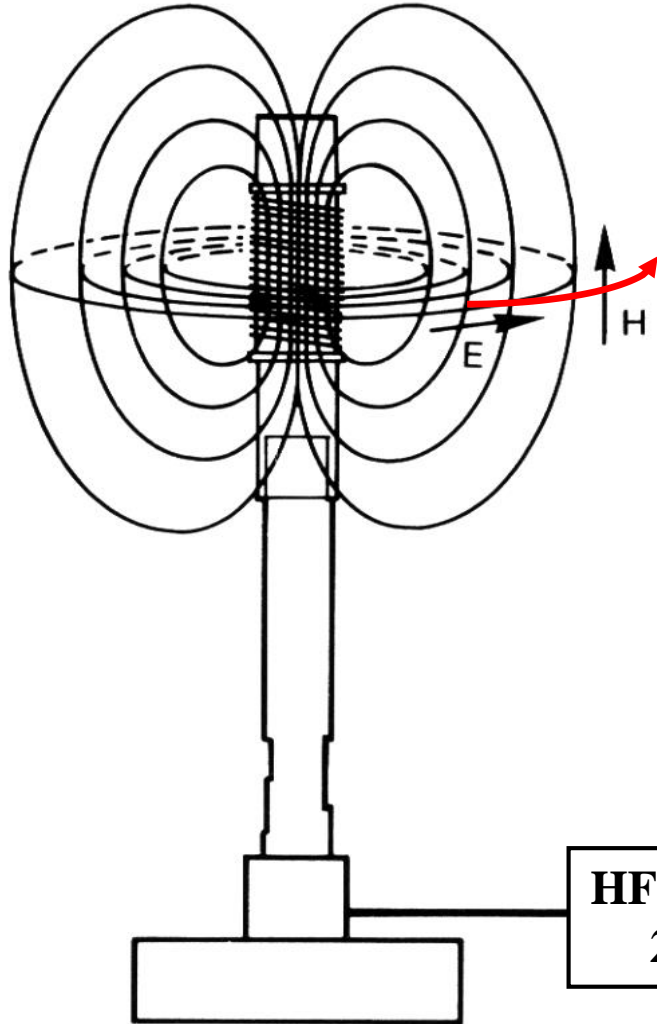
5.14 Induktiv betriebene Lampen

Aufbau einer QL-Lampe



5.14 Induktiv betriebene Lampen

Energieeinkopplung bei der QL-Lampe



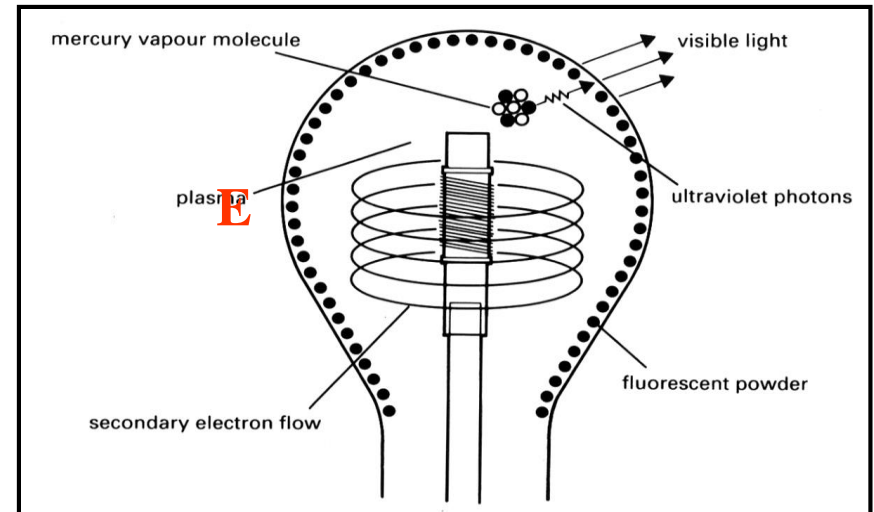
Spule

elektrisches Wechselfeld \Rightarrow magnetisches Wechselfeld (**H**)

magnetisches Wechselfeld (**H**) \Rightarrow elektrisches Wechselfeld (**E**)

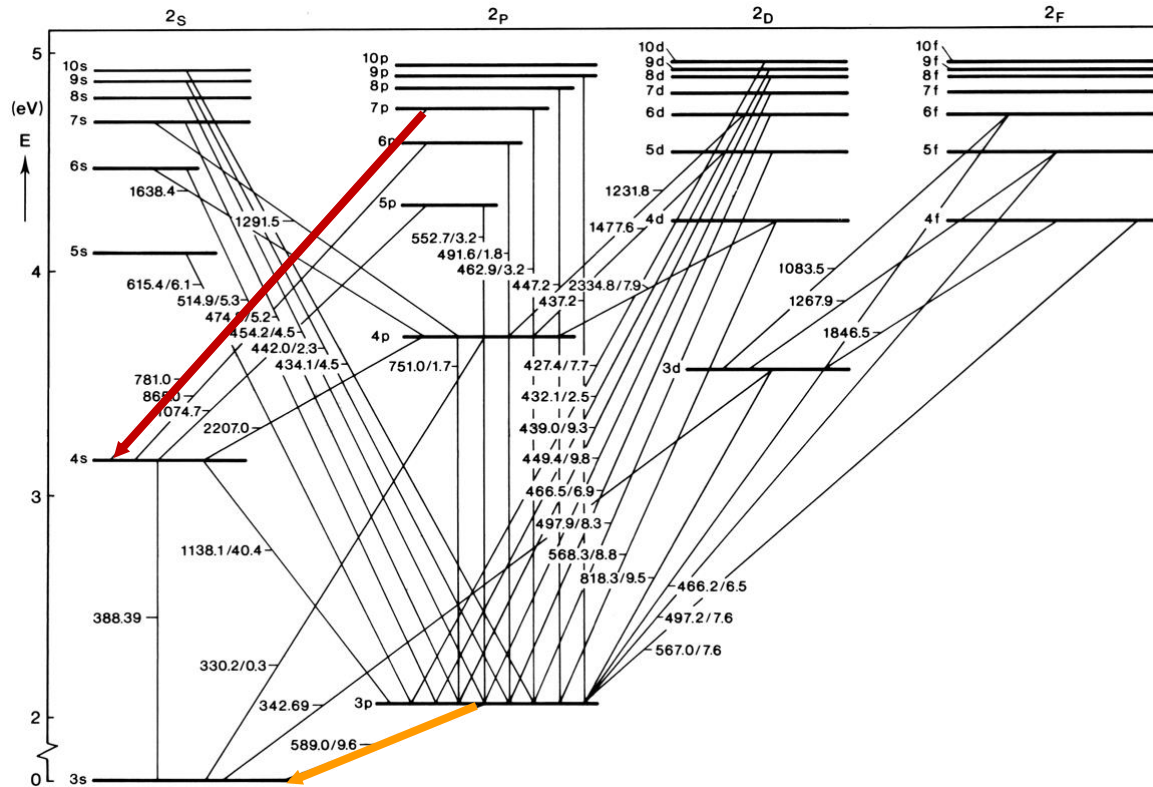
Elektronen werden in diesem Feld **E** beschleunigt

HF - Generator
2.65 MHz



5.15 Na-Niederdruckentladungslampen

Termschema des Na-Atoms

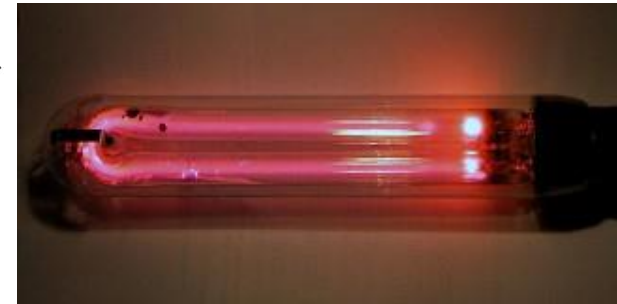


„Gelbe Na-D Linie“ (Fraunhoferlinien)

$[\text{Ne}]3p^1 ({}^2P_{1/2, 3/2}) - [\text{Ne}]3s^1 ({}^2S_{1/2})$

Interkonfigurations-Übergänge

Stärkste Na-Plasmalinien bei **589.0 nm**, **589.6 nm**, **781.0 nm**, **818.3 nm**



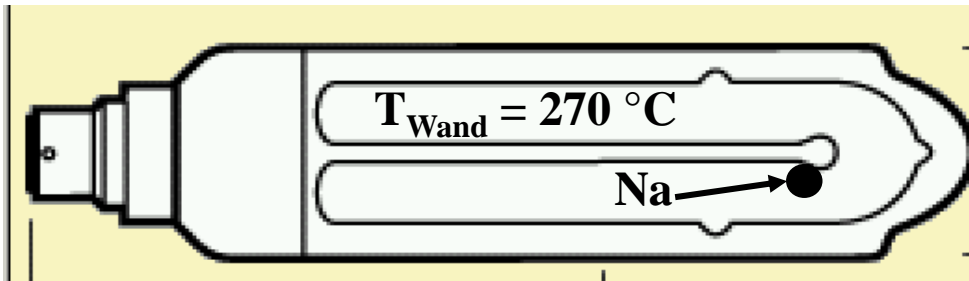
Zeit nach der Zündung (Sublimation des Na)

5.15 Na-Niederdruckentladungslampen

Allgemeiner Aufbau

- Füllelement Na mit Betriebsdruck 1 Pa
- Puffergas: Argon
- kein Leuchtstoff
- Innen- und Außenkolben

Hohe Lichtausbeute $\sim 200 \text{ lm/W}$
aber schlechte Farbwiedergabe $R_a = - 50$



Außenkolben mit wärmereflektierender Beschichtung ($\rightarrow \text{SnO}_2$)

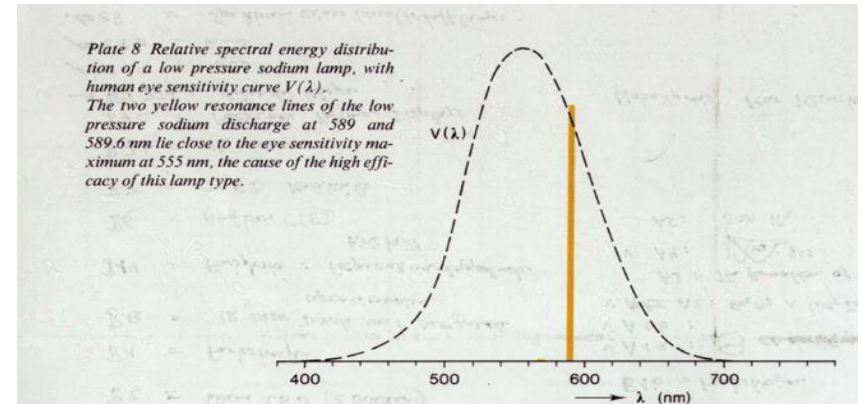


Plate 9 Motorway lighting with low pressure sodium lamps.



Plate 10 Colour photograph of illumination with a low pressure sodium lamp. Differences in colour are visible only as contrasts in grey.

