

Desinfektion mit UV-Strahlung - Status Quo und zukünftige Entwicklungen

Thomas Jüstel & Florian Baur

Institut für Optische Technologien

Fachbereich Chemieingenieurwesen, FH Münster

e-mail: tj@fh-muenster.de

web: www.fh-muenster.de/juestel

skype: thomasjuestel

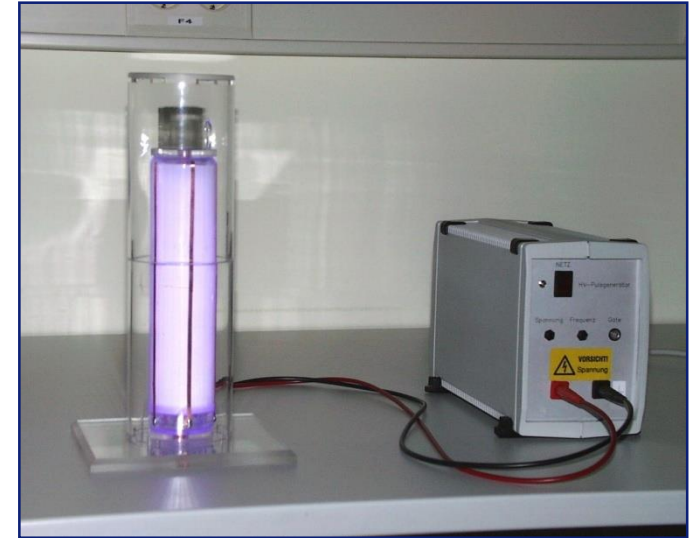


Zoom-Konferenz am 02.09.2020

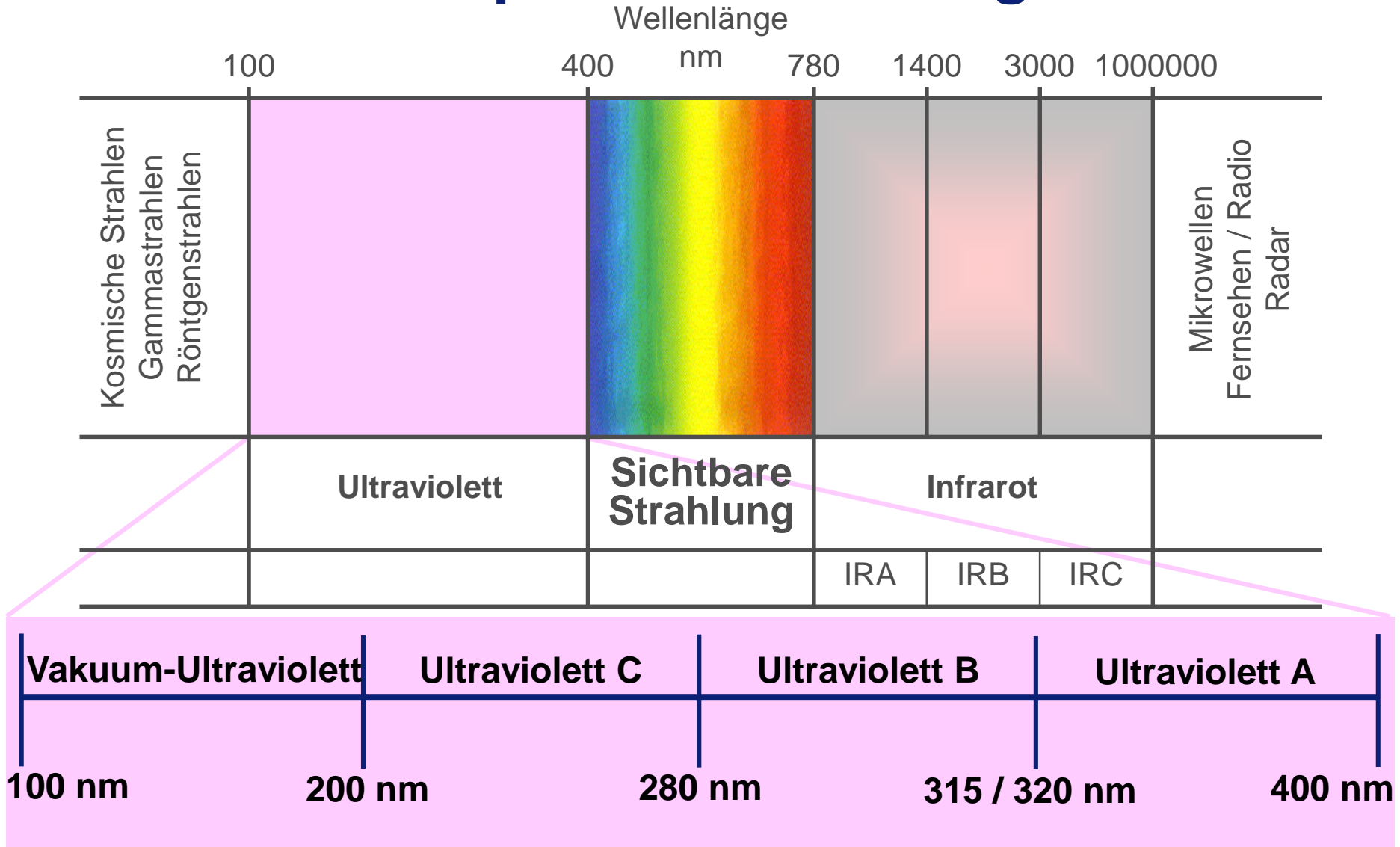


Inhalt

1. **Optische Strahlung**
2. **Eindringtiefe und Wirkungen**
3. **UV-Strahlungsquellen**
4. **UV-Desinfektion**
5. **Rezente Entwicklungen**
6. **Schlussfolgerungen**
7. **Ausblick**
8. **Literatur und Internet-Adressen**



1. Optische Strahlung



2. Eindringtiefe und Wirkungen

In die Atmosphäre

Vakuum-UV

Photolyse von Wasser,
Stickstoff, Sauerstoff, ...
Ozonbildung

UV-C

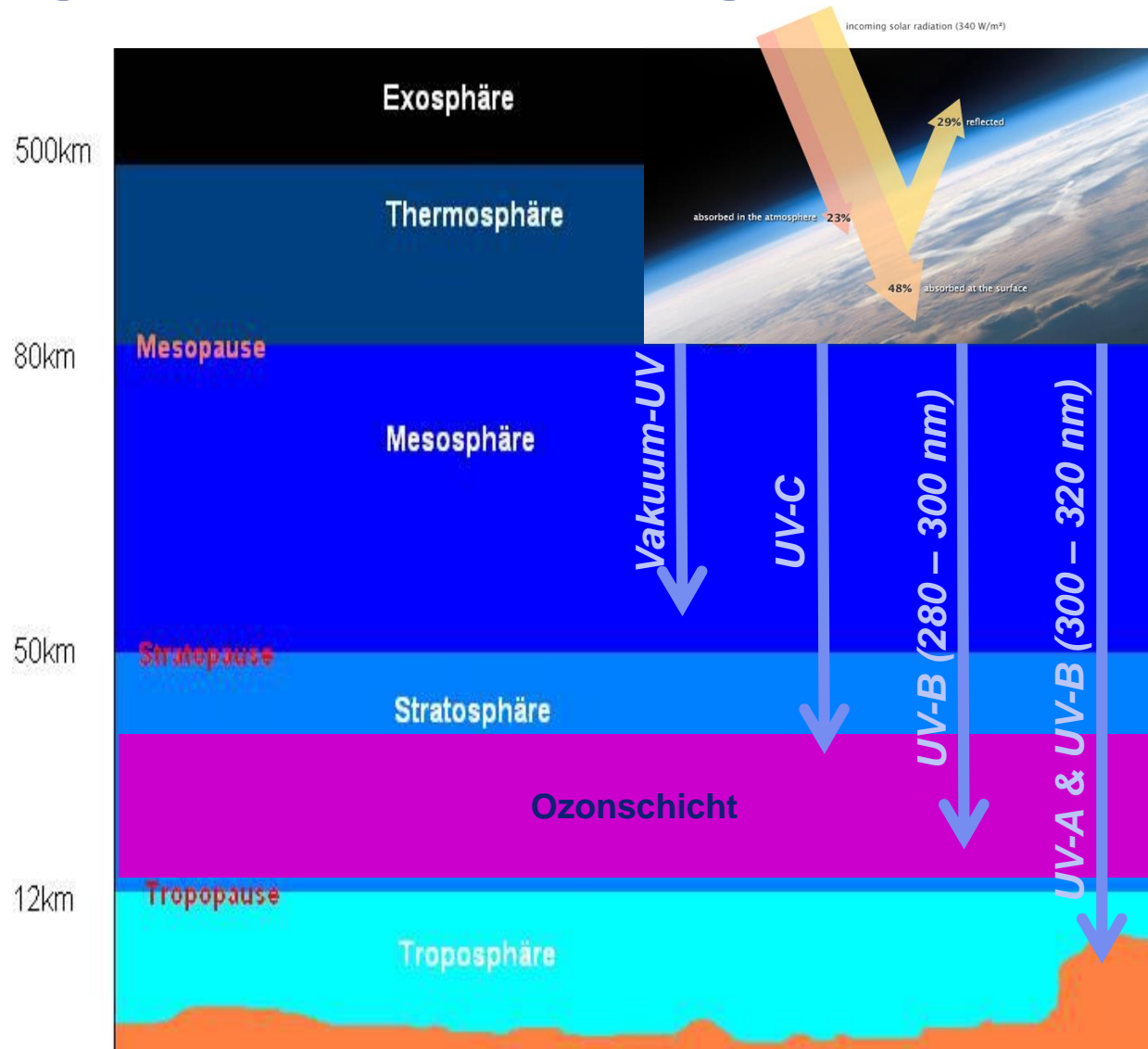
Ozonspaltung

UV-B (280 – 300/320 nm)

Ozonspaltung

Luftbestandteile:

- Stickstoff ~ 78%
- Sauerstoff ~ 21%
- Edelgase, H₂O, CO₂,
CH₄, N₂O, ... ~ 1%

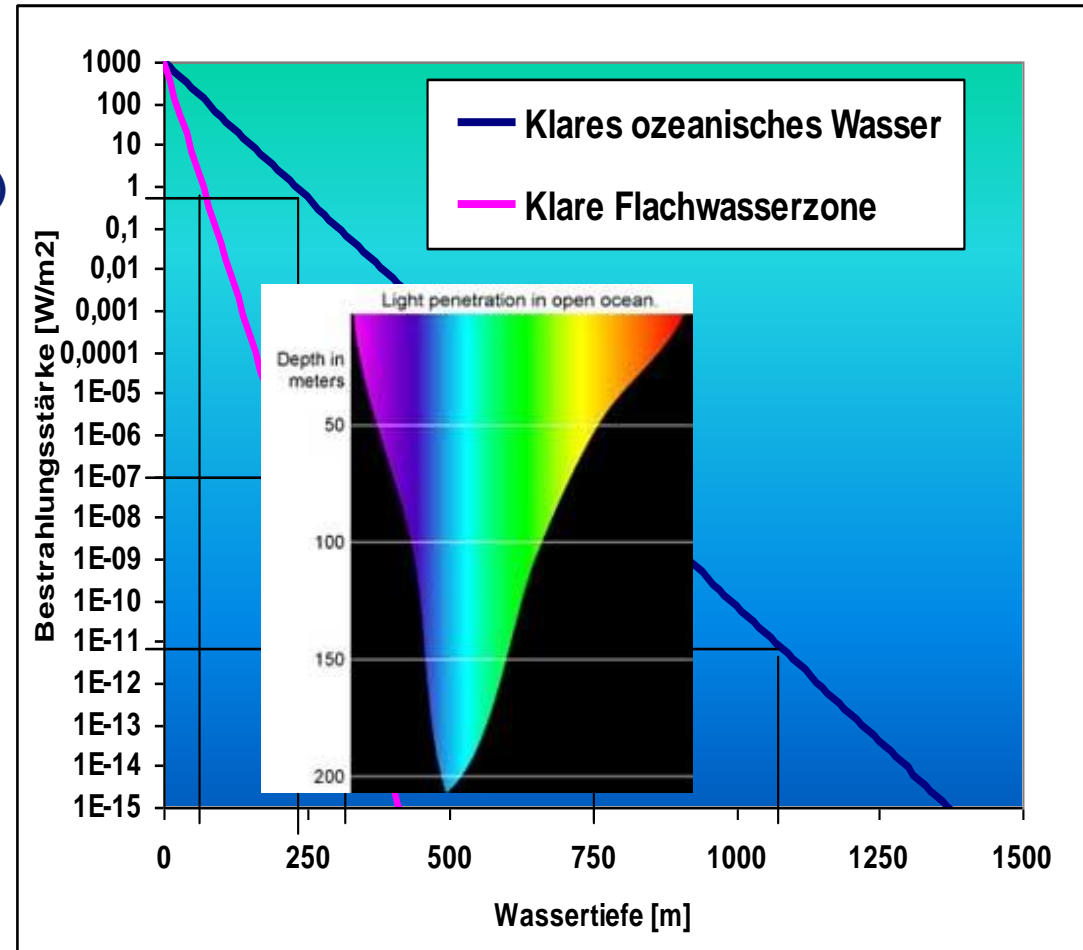
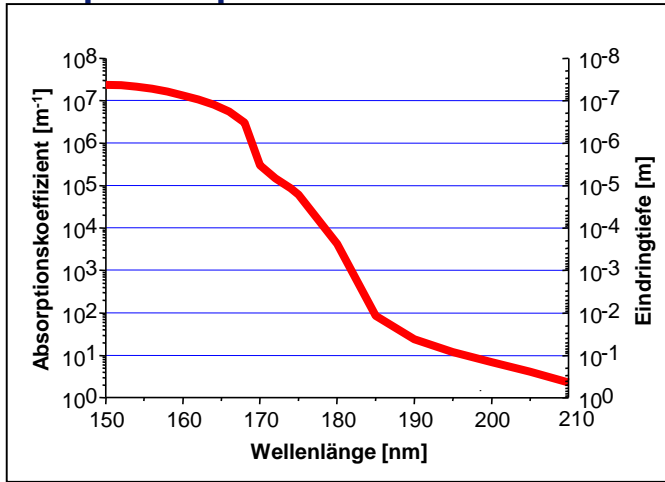


2. Eindringtiefe und Wirkungen

In Wasser

- Wasseroberfläche ~ 1000 W/m²
- Photosynthese ~ 1 - 10 W/m²
- Phototaxis planktischer Crustaceen:
10⁻⁷ - 10⁻⁸ W/m² (Vollmond ~ 5·10⁻³ W/m²)
- Lichtwahrnehmung
Tiefseefisch ~ 10⁻¹¹ W/m²
Mensch SW-Bildsehen ~ 10⁻⁷ W/m²
Wahrnehmungsgrenze ~ 10⁻¹² W/m²
(~ Stern 6. Größenordnung)

Absorptionsspektrum von Reinstwasser



Eindringtiefe der UV-Strahlung in H₂O hängt sehr vom Verschmutzungsgrad ab!

2. Eindringtiefe und Wirkungen

In Gewebe

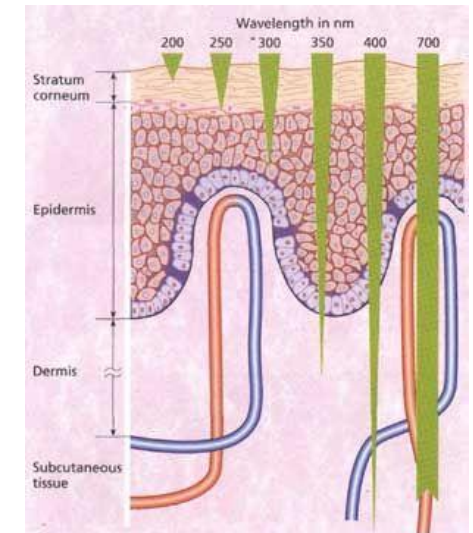
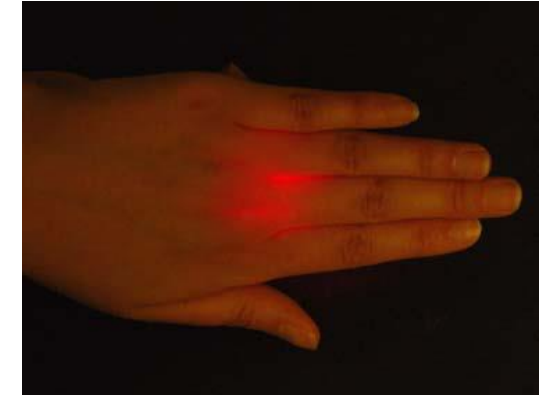
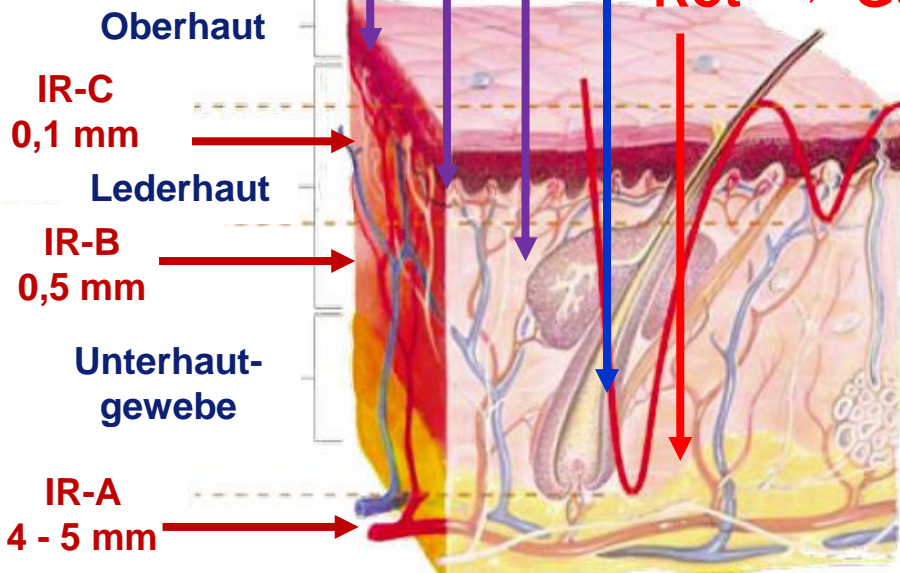
UV-C → Erbgutschäden

UV-B → Vitamin D Bildung

UV-A → Melaninoxidation

Blau → Bilirubinabbau, NO-Bildung,

Rot → Gefäßerweiternde Wirkung



3. UV-Strahlungsquellen

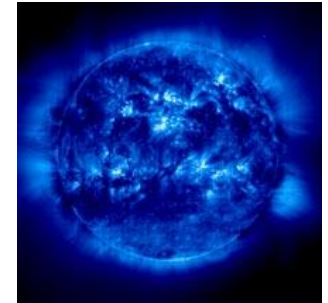
Solarstrahlung

> 300 nm

Hg-Entladungslampen

- Niederdruck
- Amalgam
- Mitteldruck

185, 254 nm
185, 254 nm
200 – 400 nm

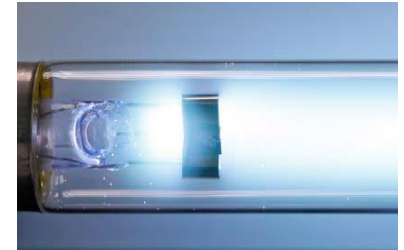


Xe/Hg--Entladungslampen

230 – 800 nm

D₂-Entladungslampen

110 – 400 nm



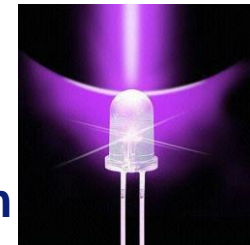
ArF*-Excimer-Laser

193 nm

Excimerstrahler, z.B. Dielectric Barrier Discharge (DBD)

- XeCl*
- XeBr*
- KrCl*
- Xe₂*
- Xe₂* + UV-Leuchtstoff → FL DBD

308 nm
282 nm
222 nm
172 nm
200 – 400 nm



(Al,Ga)N UV LEDs

210 – 365 nm

(In,Ga)N LEDs

365 – 400 nm

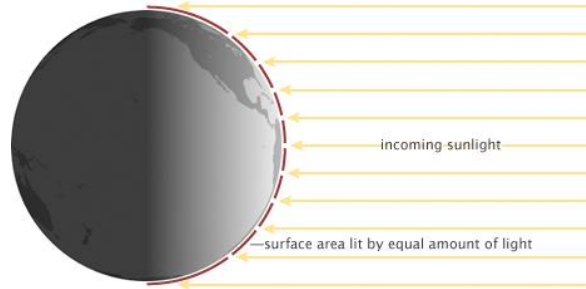
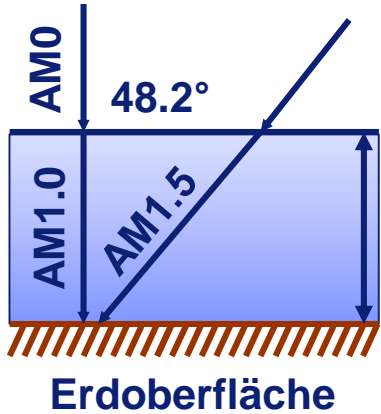


Röntgen-/e-Strahlung + UV-Leuchtstoff

200 – 400 nm, z.B. Y₂SiO₅:Pr³⁺

3. UV-Strahlungsquellen

Die Sonne - Strahlungsspektrum



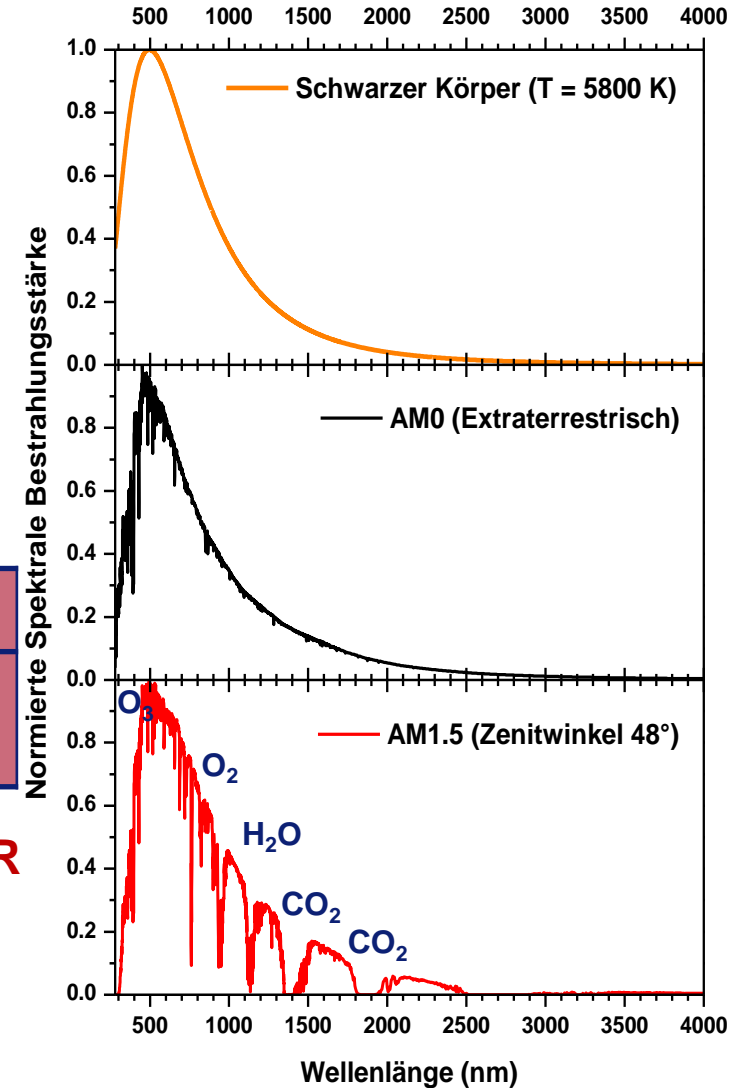
<400	400-500	500-600	600-700	>700
37.8 W/m ²	130.4 W/m ²	144.6 W/m ²	134.0 W/m ²	269.2 W/m ²
5.3%	18.2%	20.2%	18.7%	37.6%

~ 5% UV

~ 60% VIS

~ 35% IR

Das solare Spektrum hängt von Tages- & Jahreszeit, Luftdruck, Bewölkung, Staubgehalt usw. ab

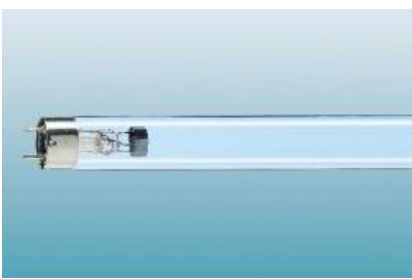

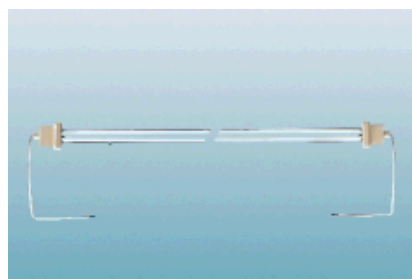


3. UV-Strahlungsquellen

Quecksilberdampf Lampen - Übersicht

Höhen-
sonne
ab 1904
zur
Rachitis-
Therapie

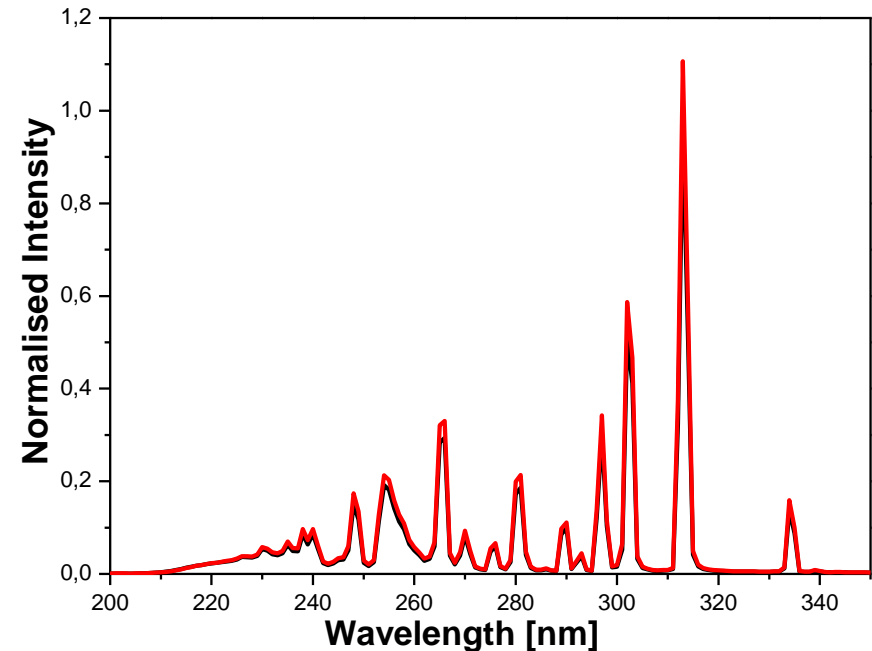


	Niederdruck-Hg	Amalgam	Mitteldruck-Hg
			
Wellenlängenbereich	254 nm	254 nm	200 - 280 nm
Leistungsaufnahme	4 ... 100 W	100 ... 300 W	1 ... 17 kW
Effizienz	< 40%	30 ... 35%	10 ... 15%
Entkeimungswirkung	85%	85%	80%
UV Leistungsdichte	0,2 W / cm	0,7 W / cm	15 W / cm
Wandtemperatur	40 °C	100 °C	600 - 800 °C

⇒ Auswahl abhängig von Anwendung und Betriebskosten

3. UV-Strahlungsquellen

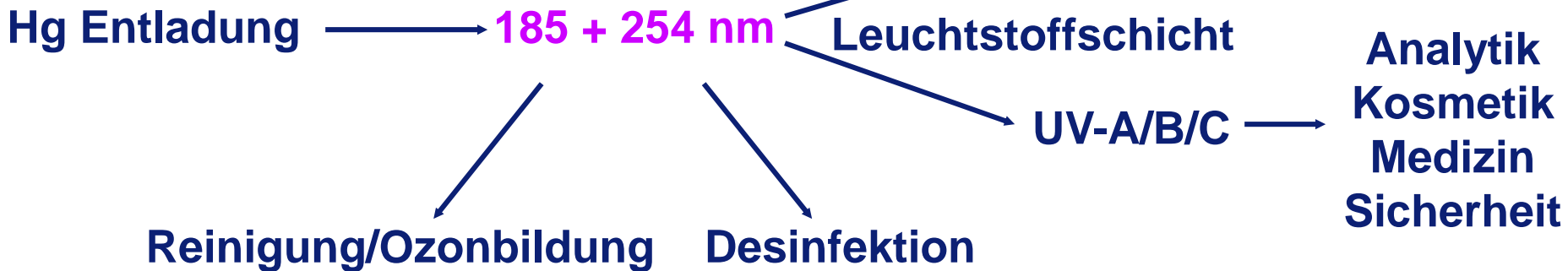
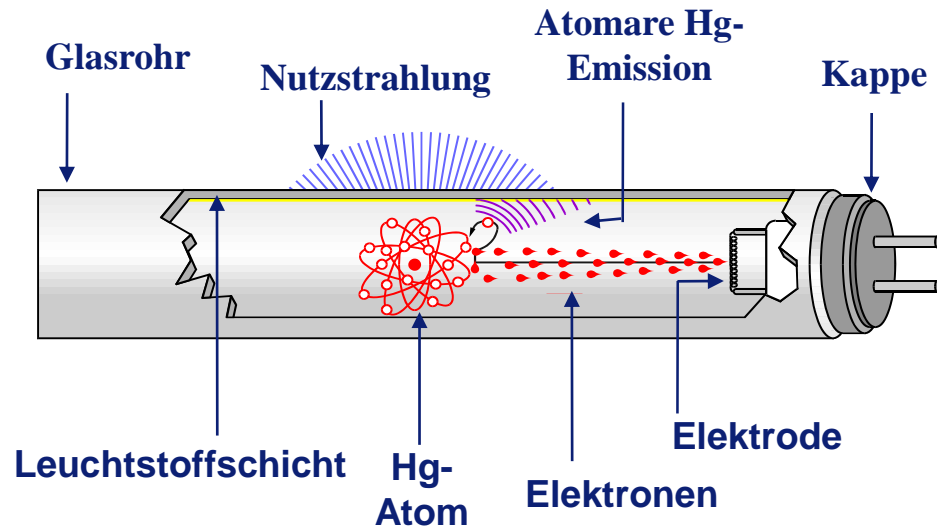
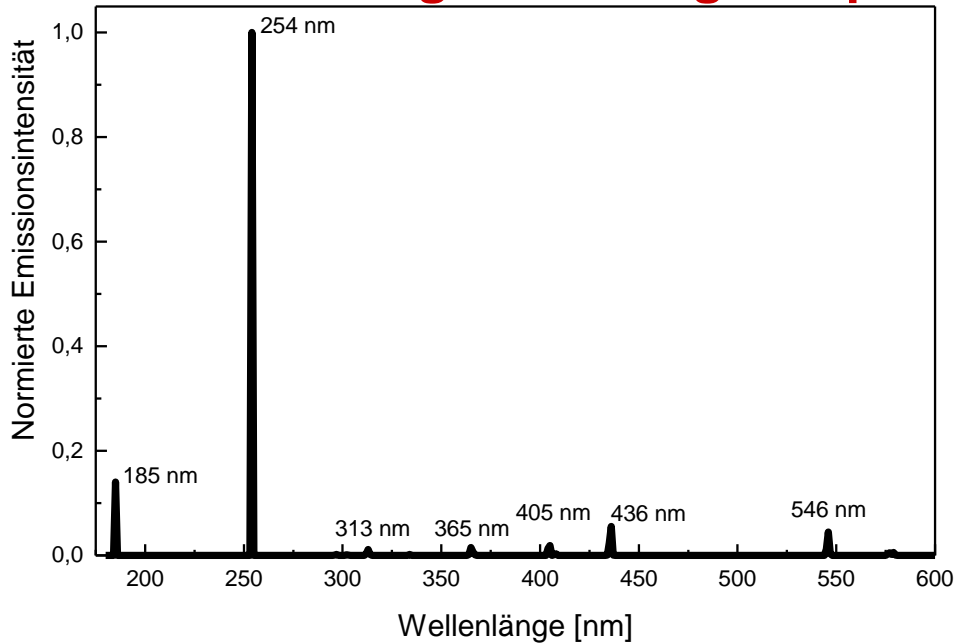
Mitteldruck-Hg Entladungslampen



- Hauptemission liegt im UV-A/UV-B und sichtbaren Bereich
- Quasi-kontinuierlich im UV-C Bereich
- Betriebstemperatur: 600 – 800 °C
- Hohe Leistungsdichte + kompaktes Design ⇔ geringere Effizienz
- Hohe Temperaturabhängigkeit

3. UV-Strahlungsquellen

Niederdruck-Hg Entladungslampen



3. UV-Strahlungsquellen

Niederdruck-Hg Entladungslampen für kosmetische Anwendungen

1. Generation

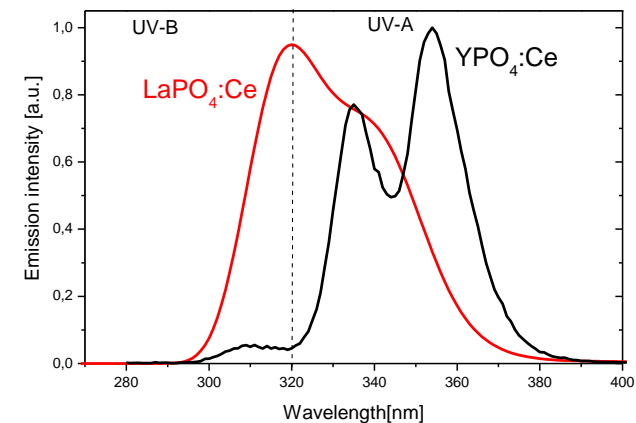
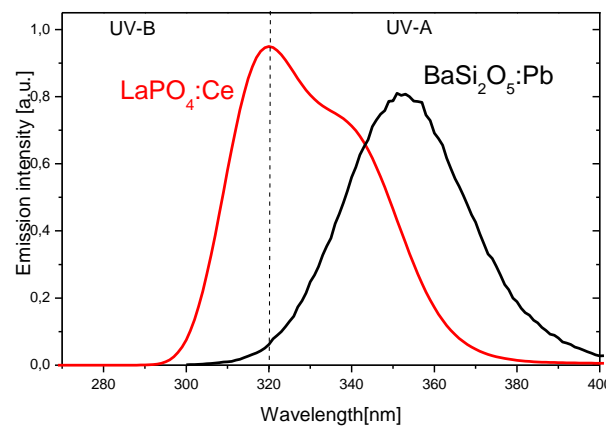
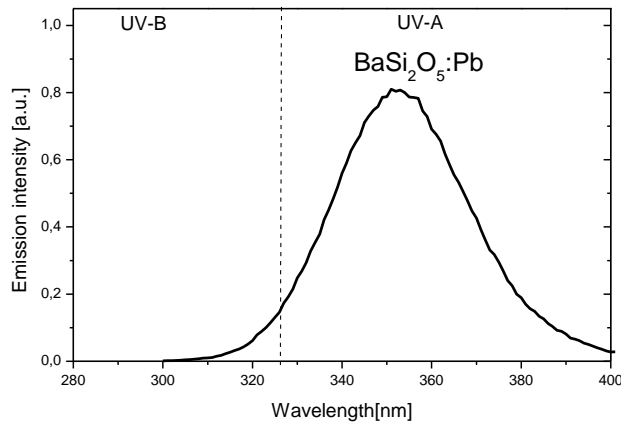
$\text{BaSi}_2\text{O}_5:\text{Pb}$
oder $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:\text{Pb}$

2. Generation

$\text{BaSi}_2\text{O}_5:\text{Pb}$
& $\text{LaPO}_4:\text{Ce}$

3. Generation

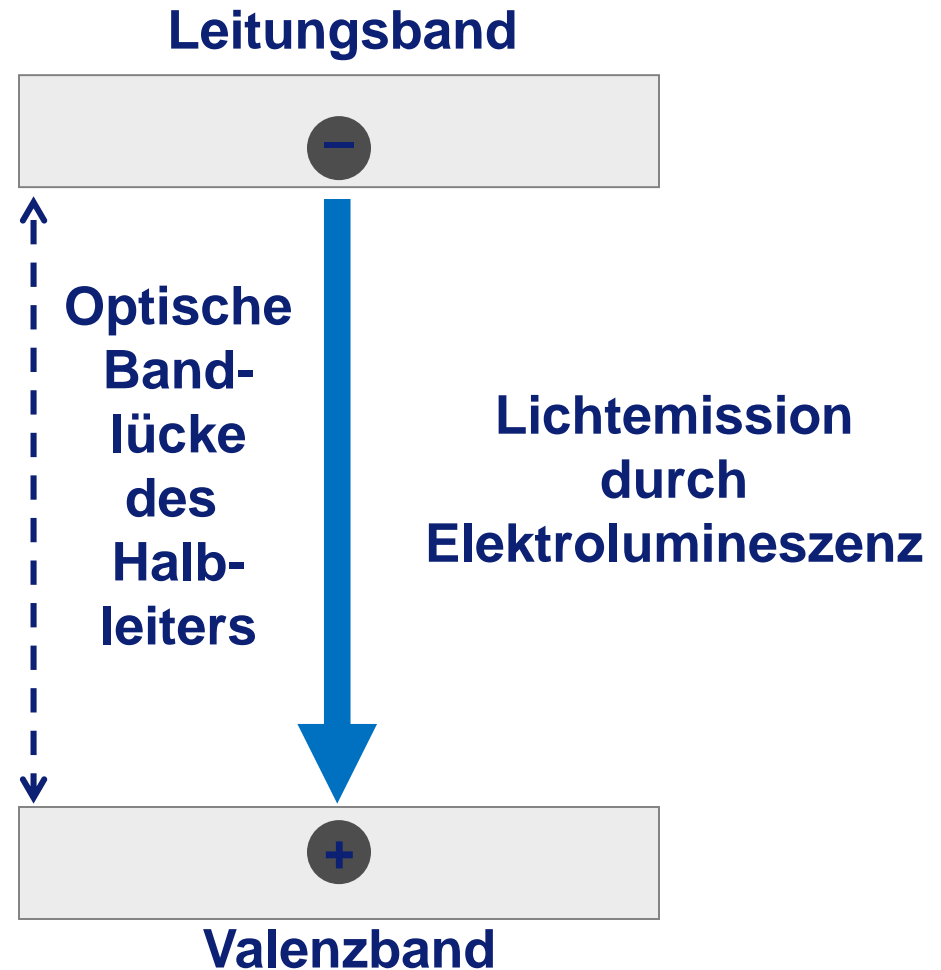
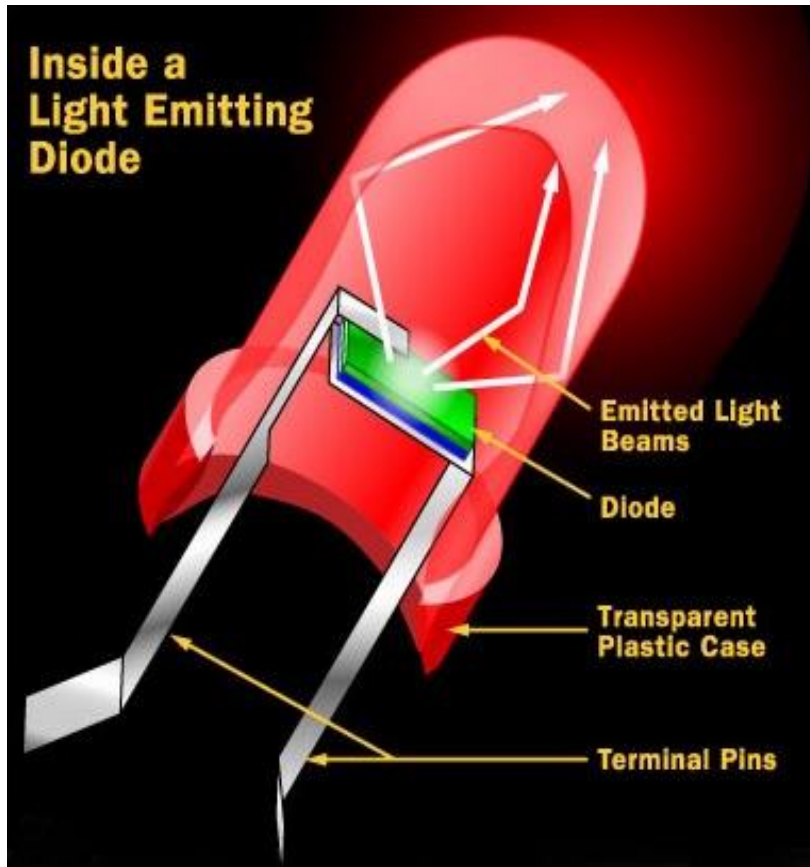
$\text{YPO}_4:\text{Ce}$
& $\text{LaPO}_4:\text{Ce}$



Heute: Fast nur noch UV-A Strahlung, d.h. $\text{Ba}_2\text{SiO}_5:\text{Pb}$ oder $\text{YPO}_4:\text{Ce}$

3. UV-Strahlungsquellen

Licht emittierende Dioden (LED)



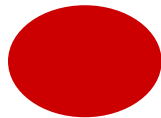
3. UV-Strahlungsquellen

LED - Materialien

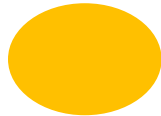
Anorganische LED

III – V Halbleiter
Al, Ga, In N, P, As, Sb

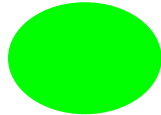
(Al,Ga)As



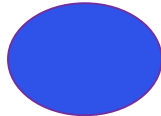
(Al,Ga,In)P



(Al,Ga)P



(Ga,In)N



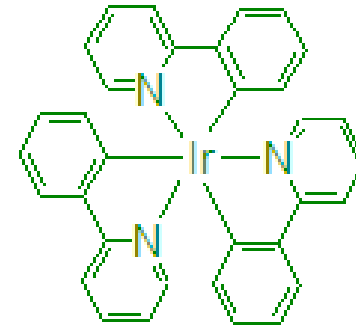
(Al,Ga)N



} UV-Strahlung

Organische LED (OLED)

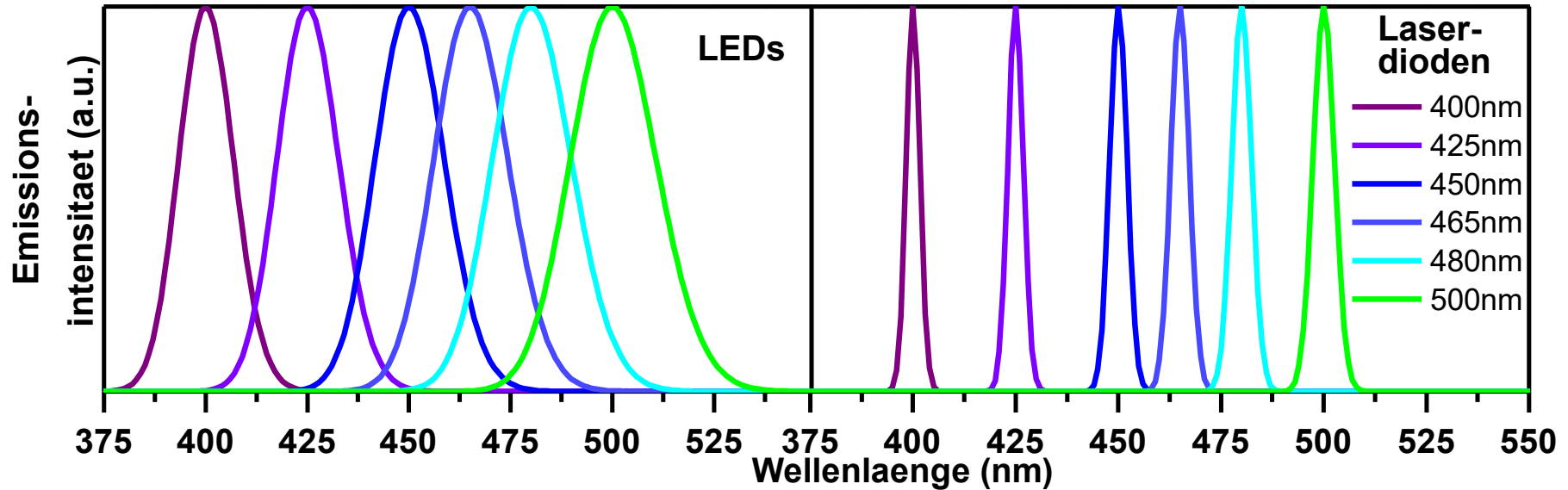
Metall-Komplexe, z.B. Ir³⁺



Keine UV-Strahlung!

3. UV-Strahlungsquellen

LEDs und Laserdioden



„LED Plattform“

- 465 nm LEDs Beleuchtung
- 410 nm LEDs Vollkonversion
- 365 nm LEDs Schwarzlicht
- 265 nm LEDs Desinfektion

„Laserdioden Plattform“

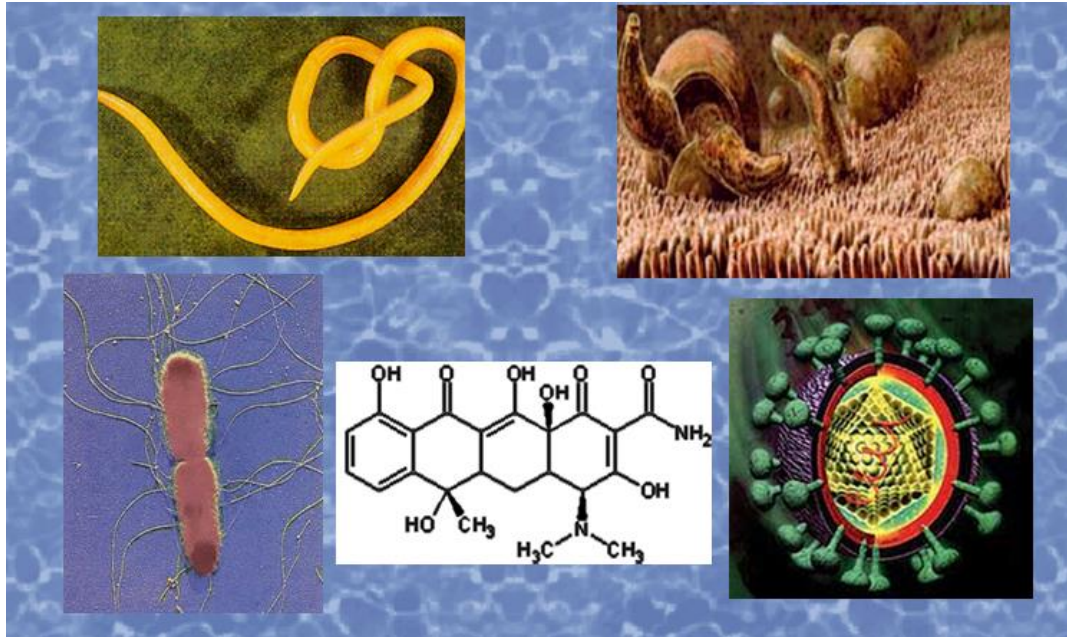
- 940 nm Fernbedienungen
- 785 nm CD
- 655 nm DVD
- 405 nm Blue ray DVD

4. UV-Desinfektion

Anwendung: Trink-, Prozess- und Abwasser sowie Luft und Oberflächen

Desinfektion: Inaktivierung von Mikroorganismen UV-C Strahlung

Photooxidation: Abbau organischer Materie, d.h. Mikroorganismen, Mikroschadstoffe etc.



Vakuum-UV

UV-C/B und Ozon

UV-C und Wasserstoffperoxid

UV-A und Photokatalysator

Oxidativ aktive Spezies (ROS)

Singulett-Sauerstoff



Ozon



Hydroxylradikale



Superoxidradikale



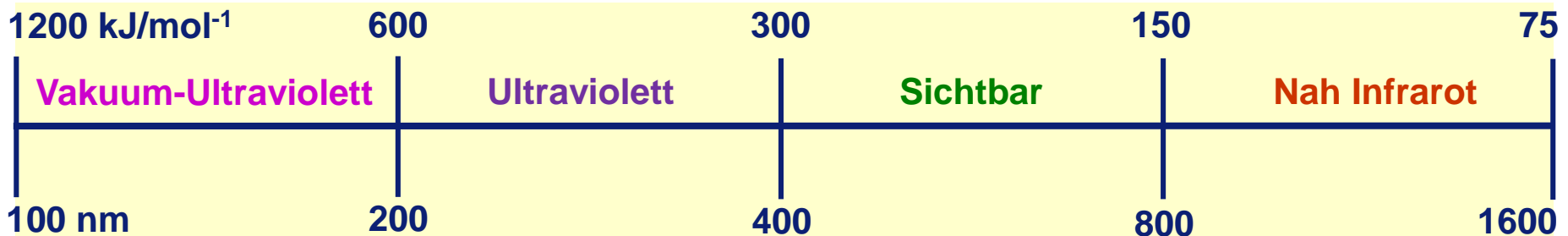
4. UV-Desinfektion

Photochemischer oxidativer Abbau (Mineralisation)

Energie chemischer Bindung:
E ~ 10 - 1000 kJ/mol

Energie optischer Strahlung:
 $E = N_A hc / \lambda = 119226 / \lambda \text{ kJ/mol}$
(1 eV = 8065 cm⁻¹ = 96.2 kJ/mol)

E-E	100 – 500 kJ/mol	H-H	436 kJ/mol
		C-C	348 kJ/mol
E=E	400 – 700 kJ/mol	O=O	498 kJ/mol
		C=C	648 kJ/mol
E≡E	800 – 1100 kJ/mol	N≡N	946 kJ/mol
		C≡C	839 kJ/mol
H-Brücken	10 - 160 kJ/mol	H...F > H...O > H...N	
	138 kJ/mol	in HO-H...OH ₂	
Van-der-Waals	0.5 - 5 kJ/mol		



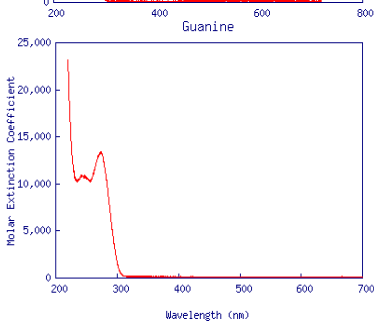
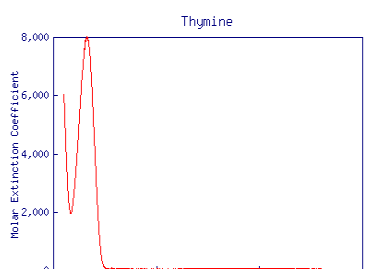
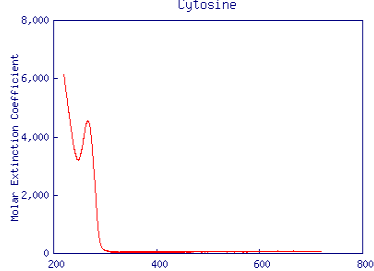
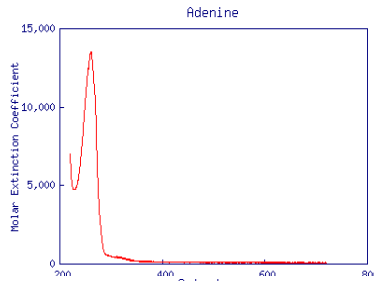
(V)UV Strahlung spaltet chem. Bindungen ⇒ Reaktion mit oxidativen Spezies

4. UV-Desinfektion

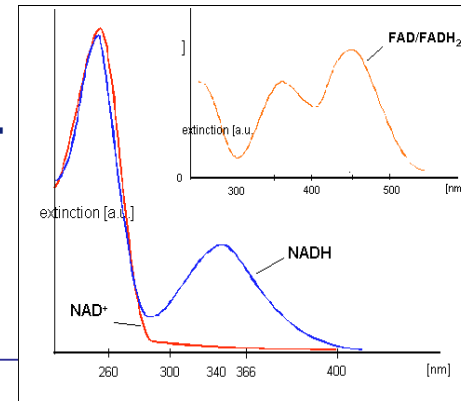
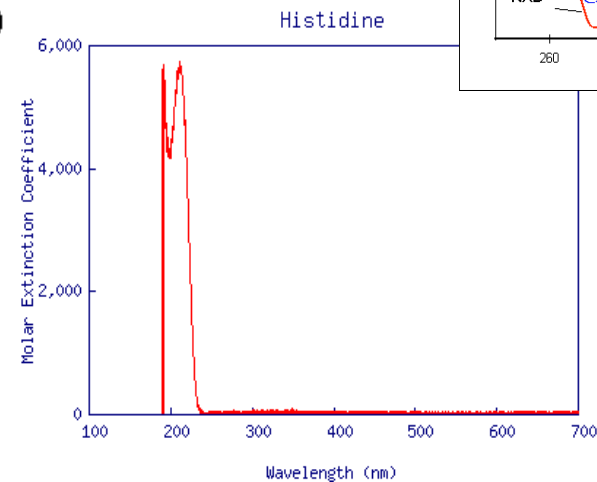
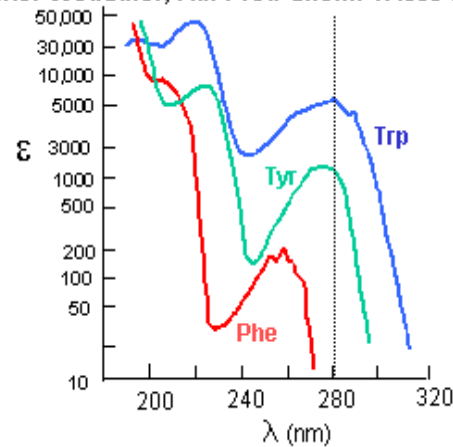
Nukleobasen zeigen starke Absorptionsbanden bei 265 nm (A, C, T, G) and bei 240 nm (G)

Aromatische Aminosäuren zeigen Absorptionsbanden bei 280 nm (Trp, Tyr), bei 250 nm (Phe) oder bei 210 nm (His)

Einige andere Biomoleküle absorbieren auch im nah UV oder im blauen Spektralbereich, z.B. Bilirubin, Riboflavin, NAD(P)H oder FADH₂



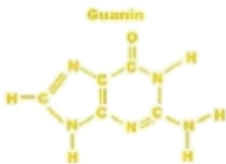
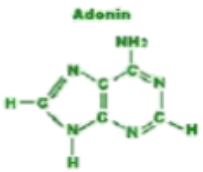
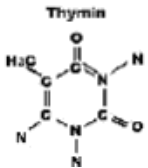
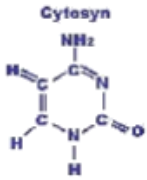
after Wetlaufer, Ad. Prot. Chem. 17:303 (1962)



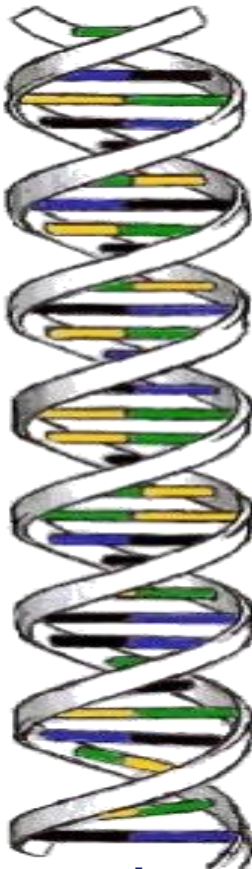
4. UV-Desinfektion

Im DNA-Strang
benachbarte Thyminbasen

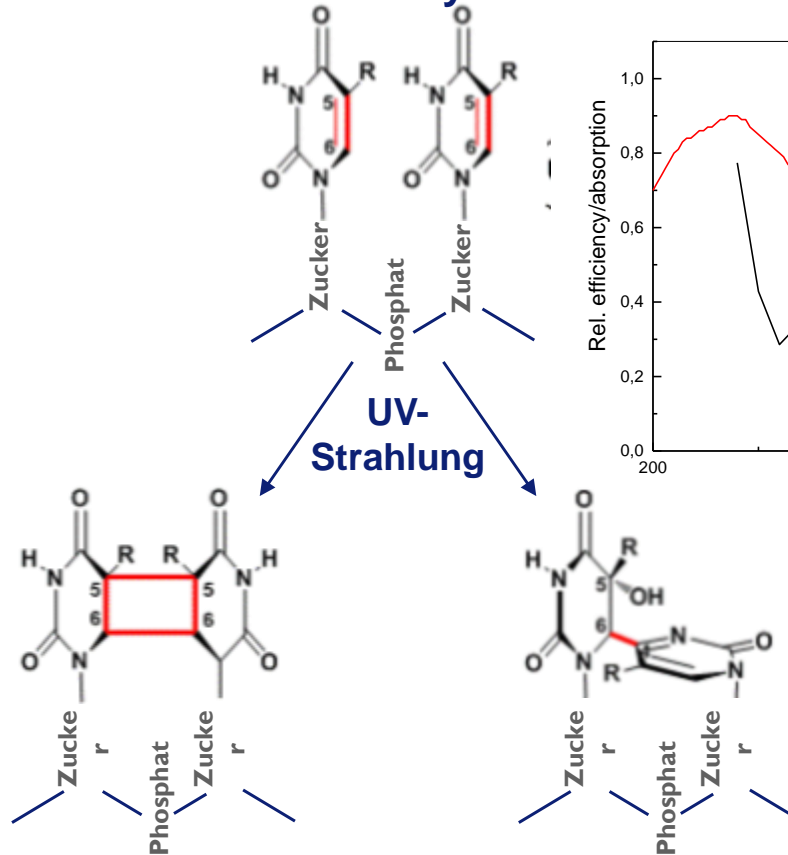
Basen



Doppelhelix

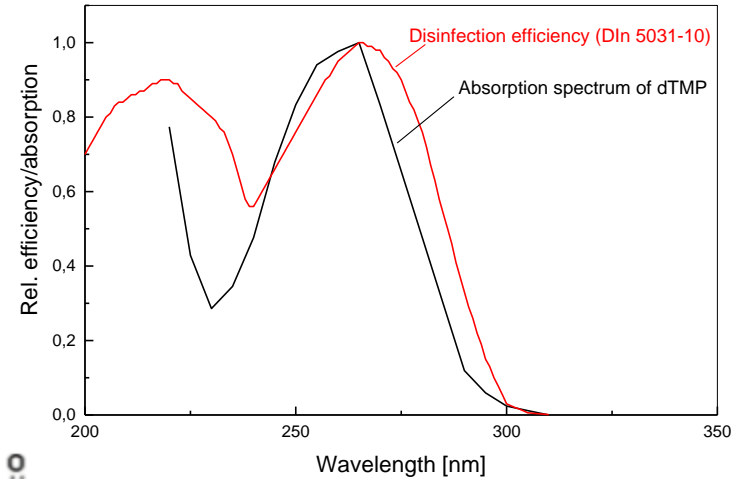


Zucker- und
Phosphateinheits



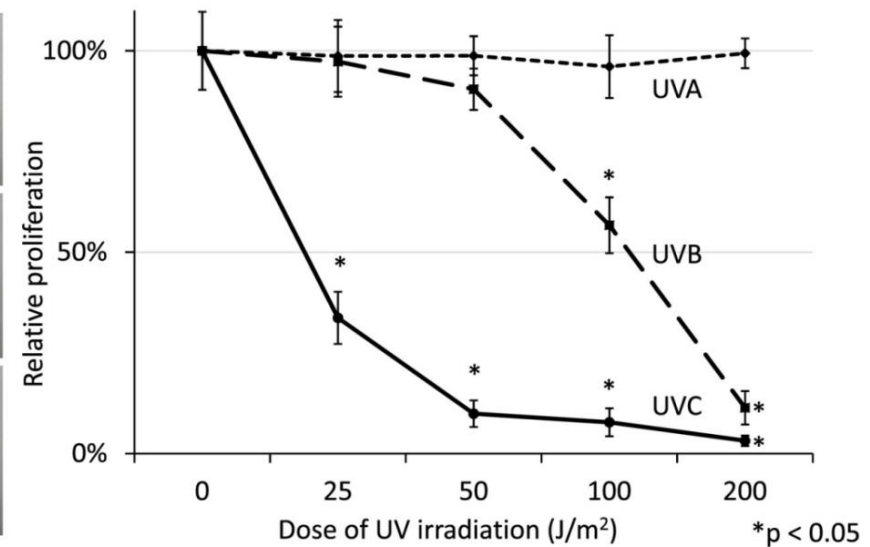
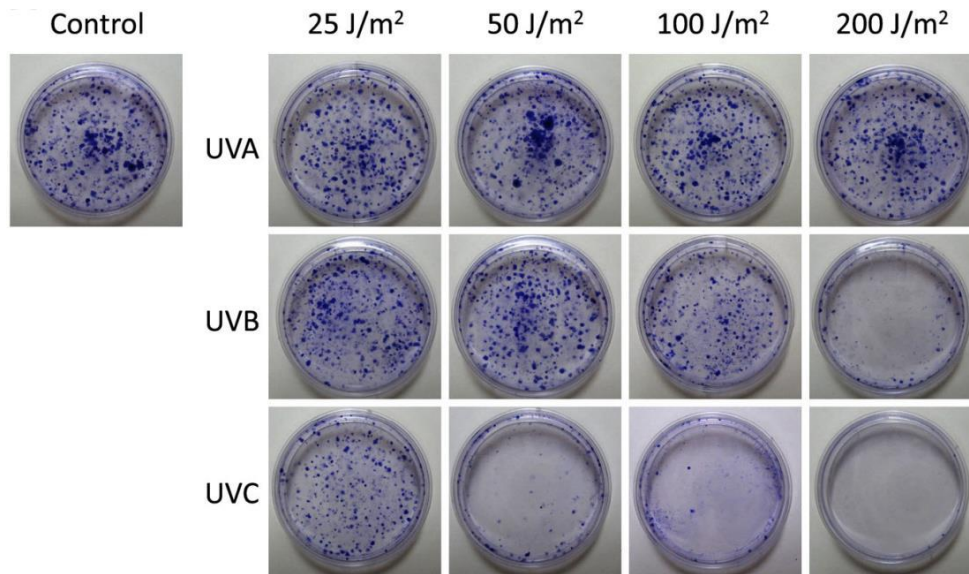
Cyclobutan-
Pyrimidindimer
(CPD) 70-80%

Pyrimidin-Pyrimidon-
Photoprodukt (64PP)
20-30%



4. UV-Desinfektion

Wirkung von UV-R Strahlung

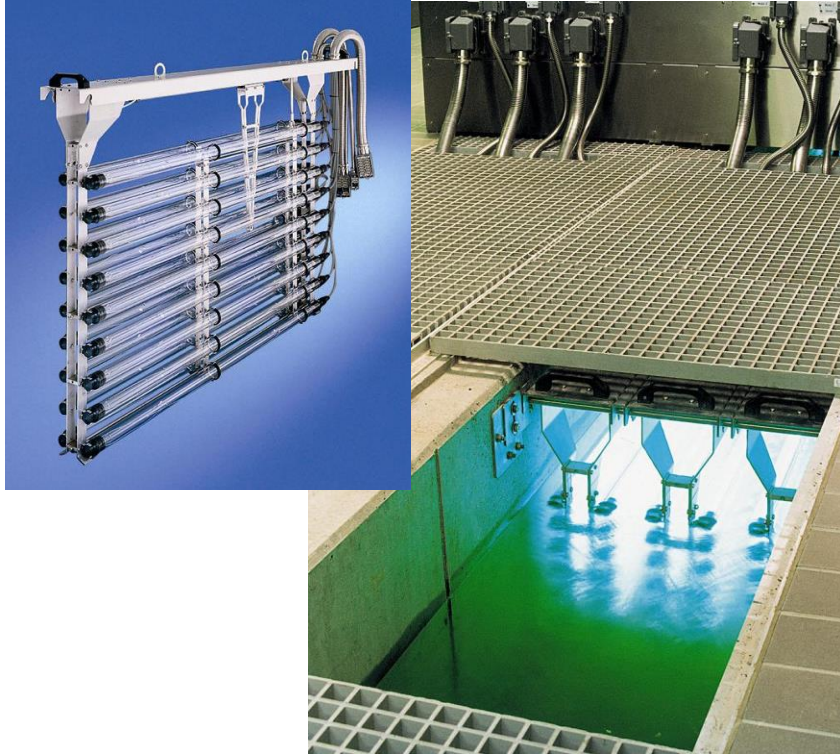


Typische Eindringtiefe von UV-C ~ 40 µm!

Lit.: S. Miwa et al., J. Cellular Biochemistry 114 (2013) 2493

4. UV-Desinfektion

Trinkwasseraufbereitung mit UV-C Strahlung



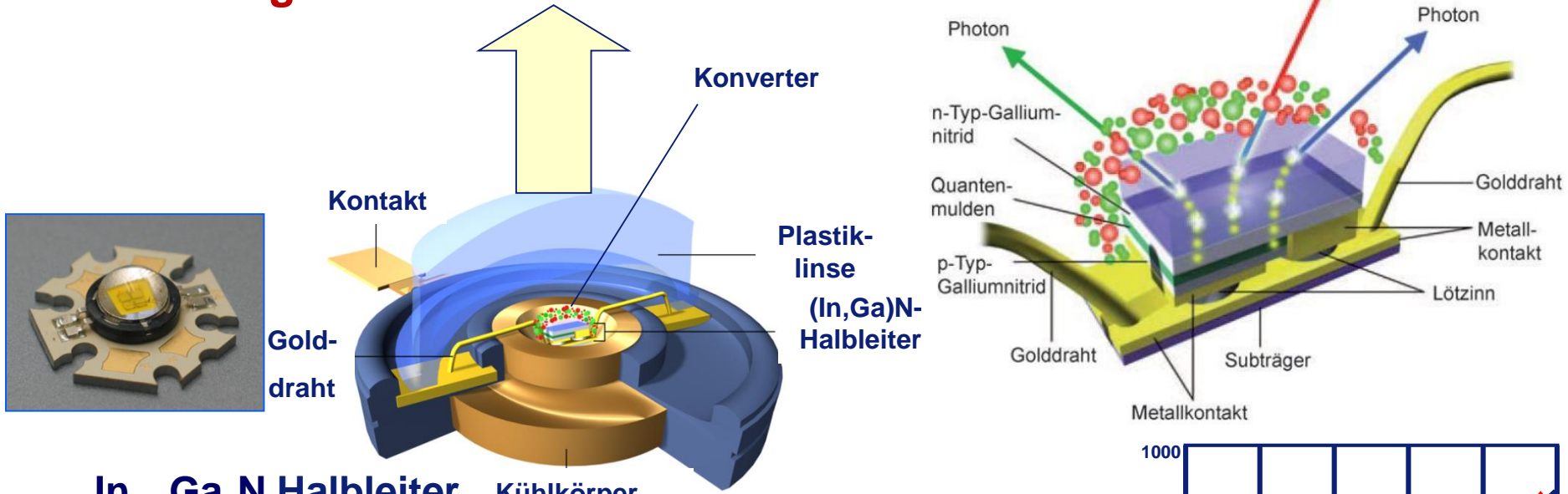
Ort: Bad Tölz, Bayern
Wasserfluss: 200 ... 2.000 m³/h
UV-Leistung: 18 kW
Anzahl UV-Strahler: 144



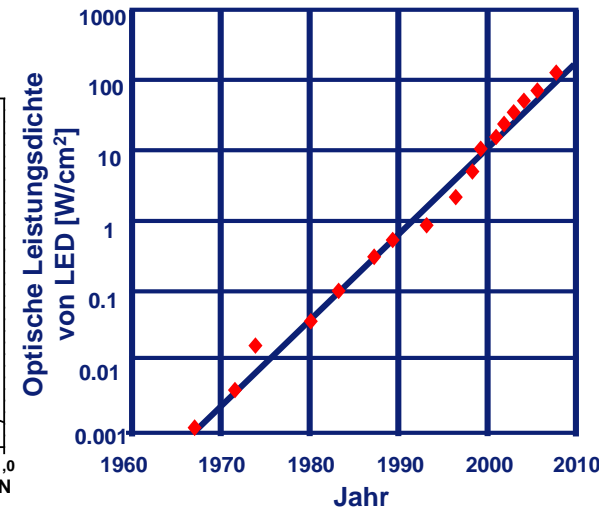
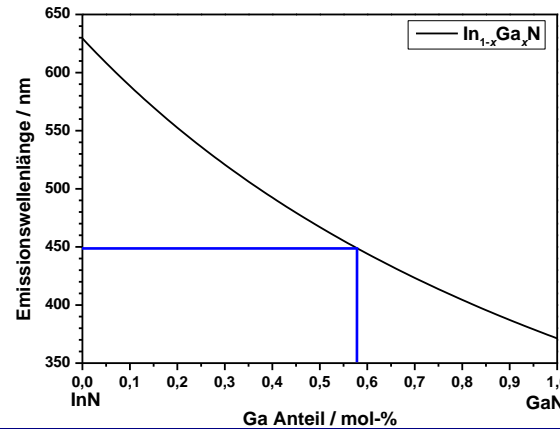
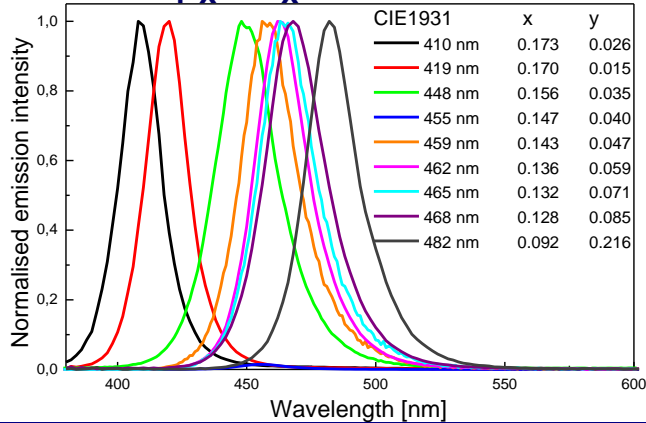
Ort: Manukau, Neuseeland
Wasserfluss: 50.400 m³/h
UV-Leistung: Mind. ~ 320 kW
Anzahl UV-Strahler: ~ 2.500

5. Rezente Entwicklungen: LED

Hochleistungs-LED

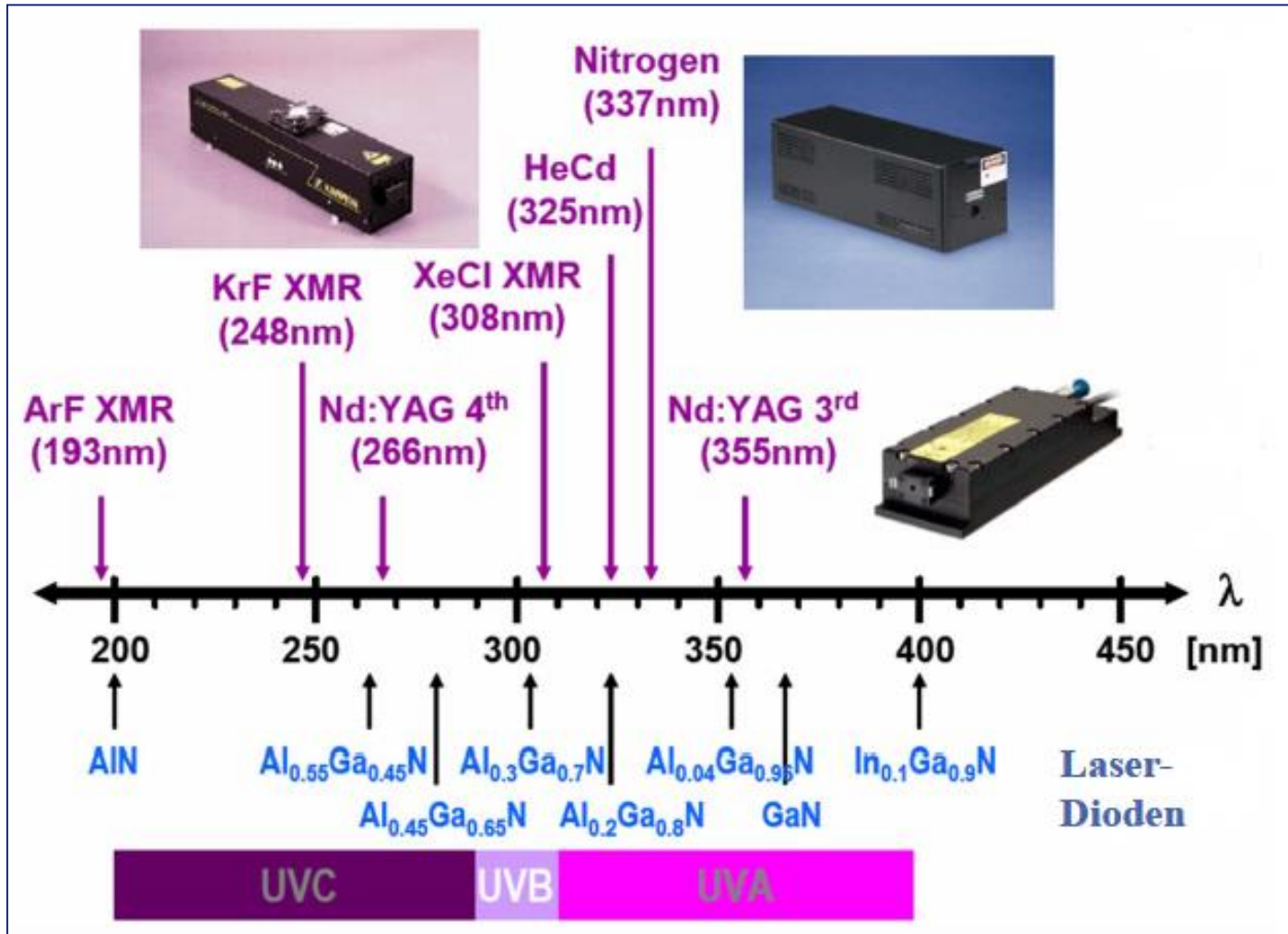


In_{1-x}Ga_xN Halbleiter Kühlkörper (Cu)



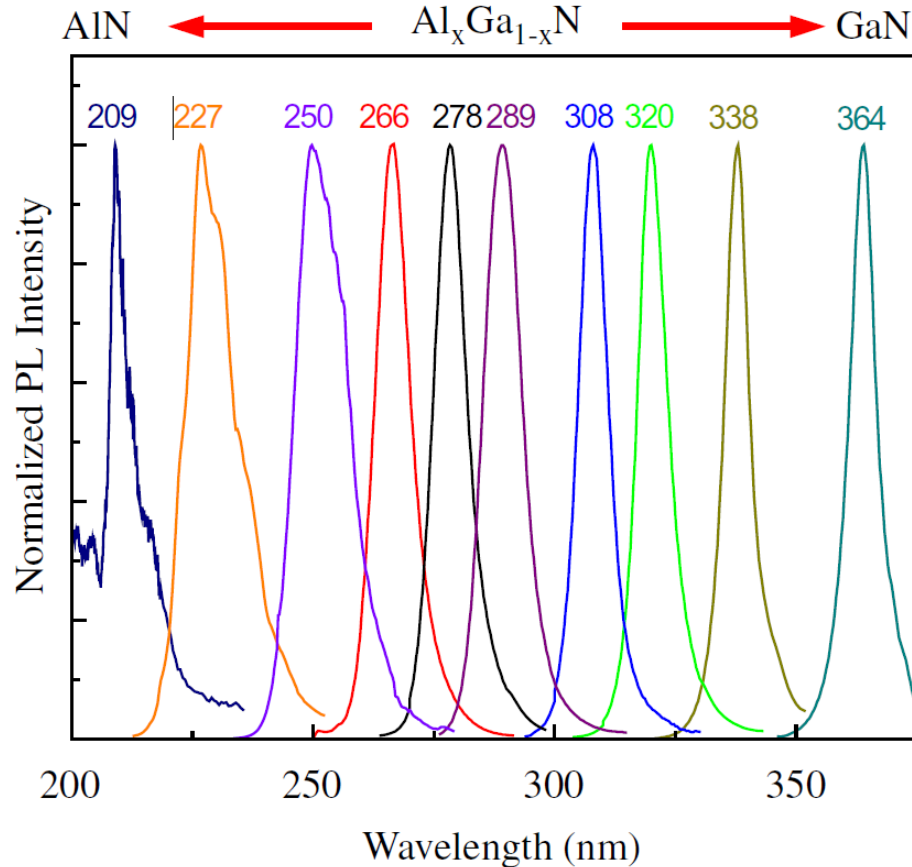
5. Rezente Entwicklungen: LED

UV emittierende LED / Laserdioden

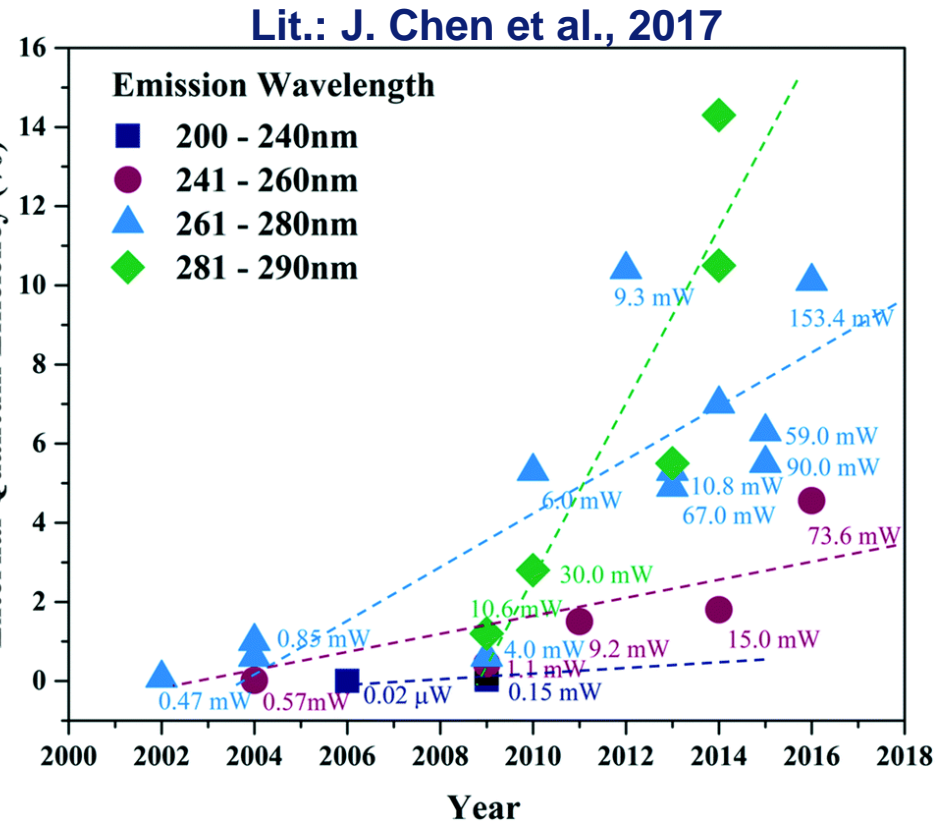


5. Rezente Entwicklungen: LED

UV emittierende LED - (Al,Ga)N Halbleiter



UV-Spektren von (Al,Ga)N Halbleitern



Entwicklung der externen Quantenausbeute und UV-Leistung von (Al,Ga)N LED zwischen 2000 und 2016

5. Rezente Entwicklungen: LED

UV-A LED: Anwendungen

- Photopolymerisation (UV-Härtung)
- Photokatalytischer Abbau von Mikroschadstoffen

Beispiel:

8 x 1 W 385 nm LEDs + TiO₂ zum Abbau von Methylrot



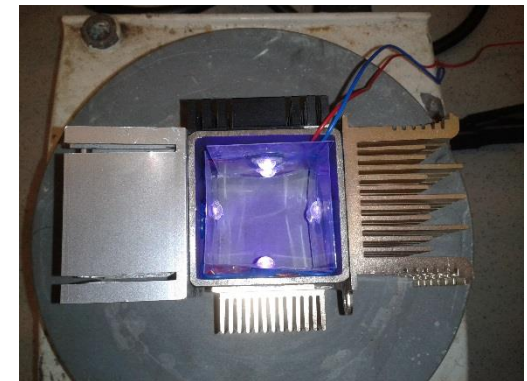
Start



Nach ca. 2 min



Nach ca. 6 min

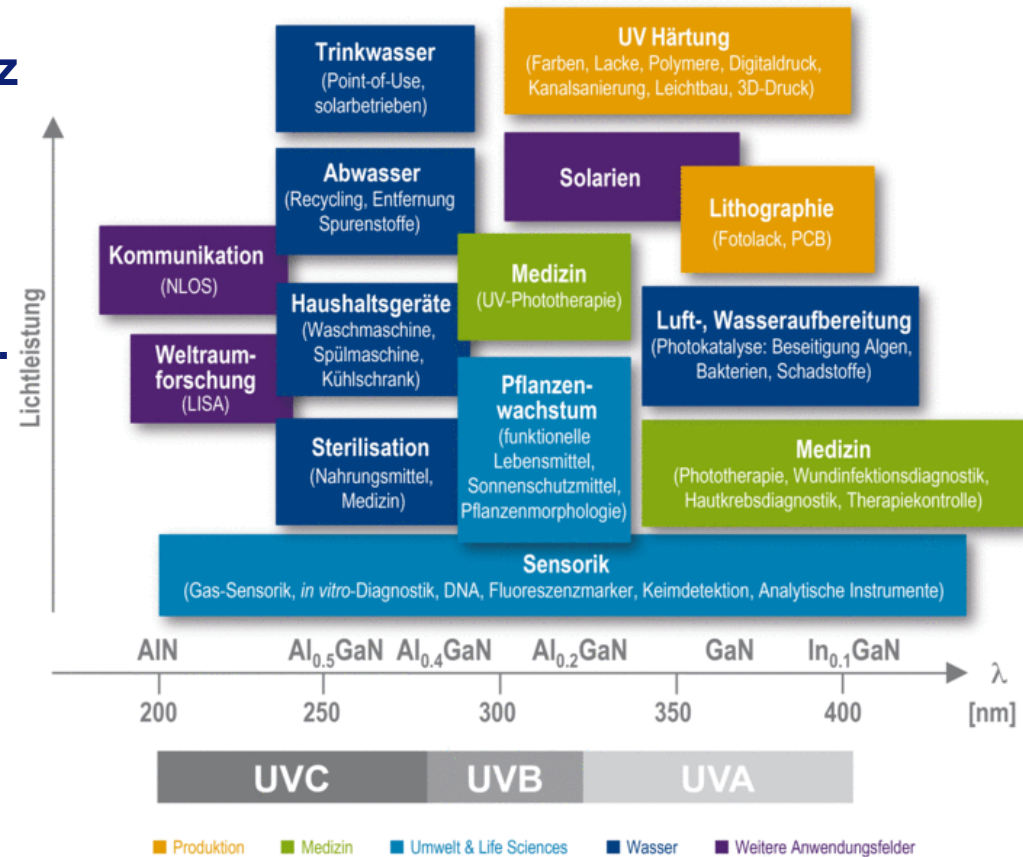


5. Rezente Entwicklungen: LED

UV emittierende LED - Status 2020

- UV-A emittierende (In,Ga)N LED (365 - 400 nm) mit hoher Effizienz weltweit am Markt
- UV-B bzw. UV-C emittierende (Al,Ga)N LEDs (210 – 320 nm) zeigen rasante Entwicklung bzgl. Effizienz und UV-Leistung
Hauptprobleme:
Lebensdauer und Verkapselung
- Aktuelle Entwicklungsziele
 - Interne Quantenausbeute ↑
 - Lichtauskopplung ↑
 - Leistungsdichte ↑
 - Lebensdauer ↑

UV-LED Anwendungen



5. Rezente Entwicklungen: LED

UV emittierende LED - Status 2020: WPE ~ 10%

Externe Quantenausbeute

$$\eta_{EQE} = \eta_{inj} * \eta_{rad} * \eta_{exit} = \eta_{IQE} * \eta_{exit}$$

„Wall-plug efficiency (WPE)“:

$$WPE = \frac{P_{out}}{I_{op} * V} = \eta_{EQE} \frac{\hbar\omega}{e * V} = \eta_{EQE} * \eta_{elect}$$

Optische Leistung:

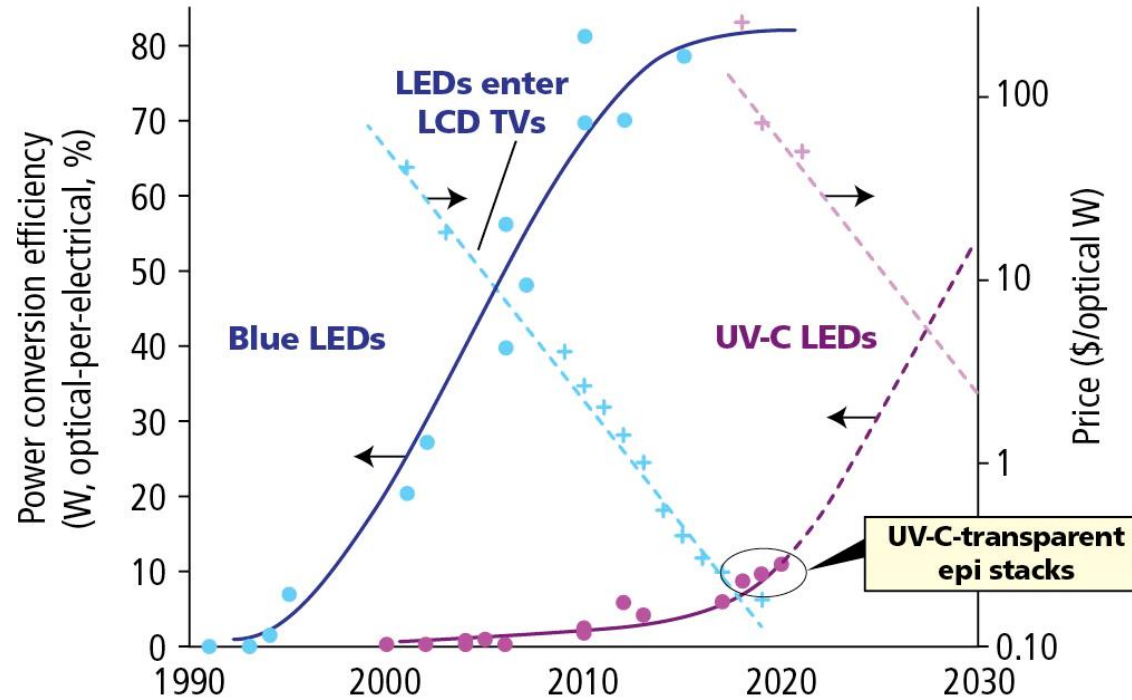
$$P_{out} = \eta_{EQE} \frac{\hbar\omega}{e} I_{op} = I_{op} * V * WPE$$

Maximale elektrische Leistung:

$$P_{el,max} = I_{op} * V = \frac{T_{jmax} - T_{h\alpha}}{R_{th} * (1 - WPE)}$$

Literatur:

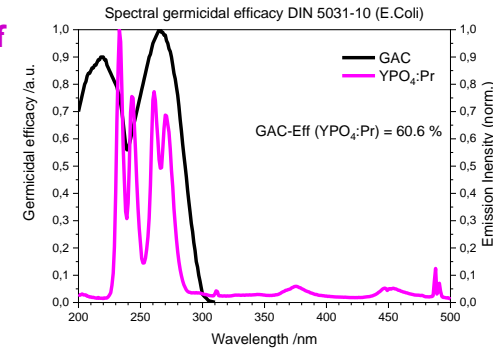
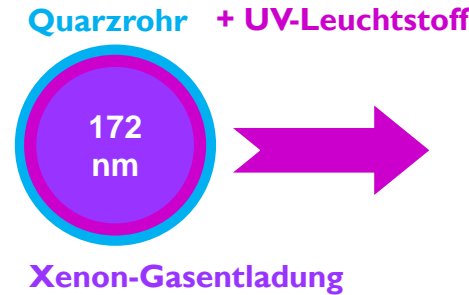
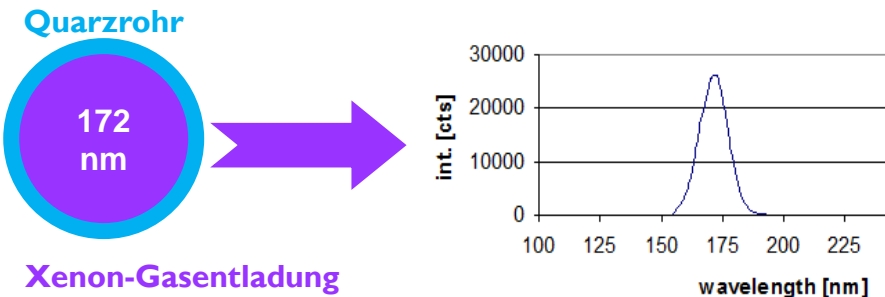
- a) M. Kneissl et al., Nature Photonics 13 (2019) 233
- b) LED Magazine, July 24th, 2020



5. Rezente Entwicklungen: Excimerstrahler

Eigenschaften einer idealen UV-Strahlungsquelle

- Hocheffizient: $\eta(\text{UV}) > 20\%$ (minimale Betriebskosten)
- UV-C Strahlung: UV-Desinfektion: $\lambda \sim 260 \text{ nm}$ (max. GAC)
 H_2O_2 -Aktivierung: $200 \text{ nm} < \lambda < 300 \text{ nm}$
 Ozonbildung: $\lambda < 240 \text{ nm}$
- Kostengünstig
- Leistungsstark (wenige Strahler, minimale Investitionskosten)
- Hohe Lebensdauer (minimale Betriebs- bzw. Wartungskosten)
- Quecksilberfrei (UNEP Minamata Convention on Mercury 2017) → Xenon



Literaturauswahl:

- T. Jüstel, J. Dirscherl, H. Nikol, D.U. Wiechert, Device for Disinfection of Water with UV-C Discharge
 T. Jüstel, H. Nikol, J. Dirscherl, W. Busselt, EP00201427, US 6398970 B1
 T. Jüstel, H. von Busch, G. Heussler, W. Mayr, US 7298077 B2
 G.F. Gärtner, G. Greuel, T. Jüstel, W. Schiene, US 7687997 B2
 T. Jüstel, J. Meyer, W. Mayr, US 7808170 B2
 T. Jüstel, P. Huppertz, D.U. Wiechert, W. Mayr, H. von Busch, US 7855497 B2
 T. Jüstel, G. Greuel, J.M. Kuc, US 9334442 B2
 T. Jüstel et al., J. Lumin. 200 (2018) 1

5. Rezente Entwicklungen: Excimerstrahler

Quellen auf Basis einer Excimerentladung (Sauerstoff oder Xenon)

**Ozongenerator
(Wedeco AG)**

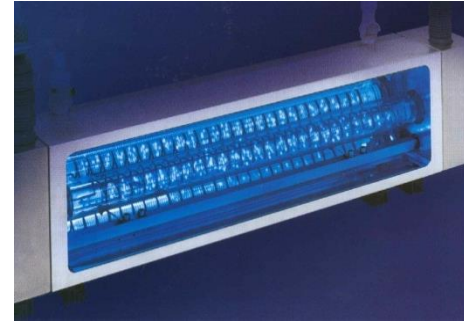


**Abgasbehandlung
(Siemens AG)**

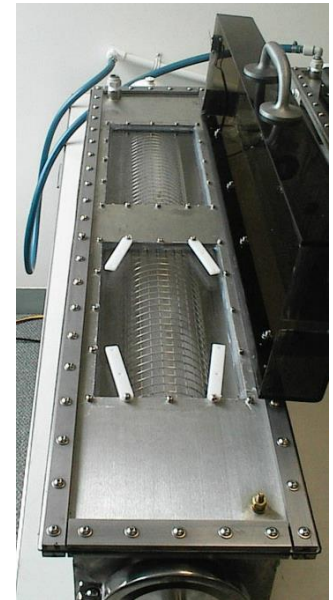


UV-Strahlungsquellen (Xenon)

Heraeus Noblelight



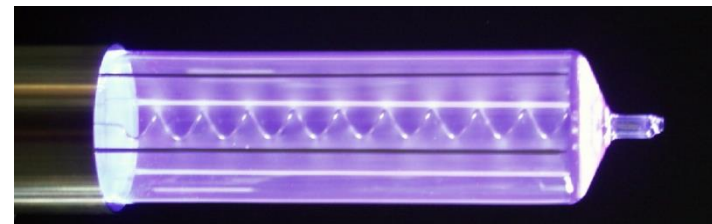
Triton



**Flachlampe
für LCD-
Bildschirme
(Osram AG)**

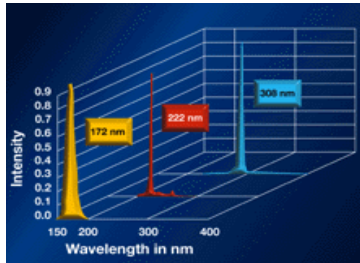


Osram Xeradex



5. Rezente Entwicklungen: Excimerstrahler

Excimerbildende Gase und Gasmischungen



	F	Cl	Br	I	Reine Edelgase
Reine Halogene	158 nm	258 nm	293 nm	342 nm	-
Ar	> 10% 193 nm	ca. 5% 175 nm	< 0.1% 161 nm	-	Ar* ₂ ~10% 126 nm
Kr	> 10% 248 nm	18% 222 nm	ca. 5% 207 nm	< 0.1% 185 nm	Kr* ₂ ~15% 146 nm
Xe	> 10% 351 nm	14% 308 nm	15% 282 nm	ca. 5% 253 nm	Xe* ₂ 30% 172 nm

5. Rezente Entwicklungen: Excimerstrahler

Alternative Technologie zu Hg-Dampflampen

Hg-Dampflampen

- **Aufwärmphase**
- **Begrenzte spektrale
Modulierbarkeit**
- **Begrenzte
Schaltbarkeit**
- **Enthält Hg**
- **Hohe Verfügbarkeit**
- **Einfaches EVG**
- **Preiswert**



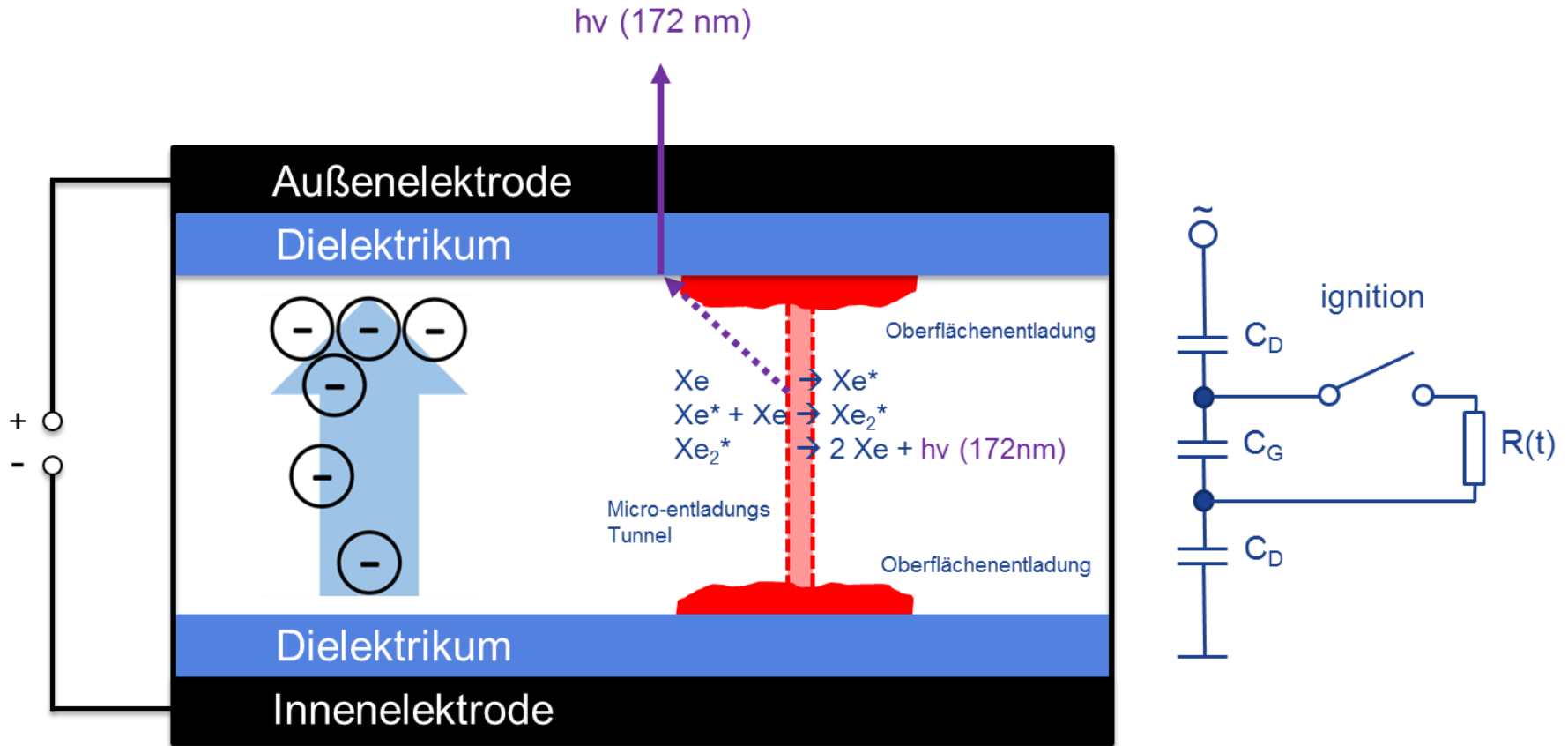
Xe-Excimerstrahler

- **“Instant-on”**
- **Einstellbares
Spektrum**
- **Gepulster Betrieb
möglich**
- **Schwermetallfrei**
- **Geringe Markt-
verfügbarkeit**
- **Anspruchvolles
EVG**
- **Hoher Preis**



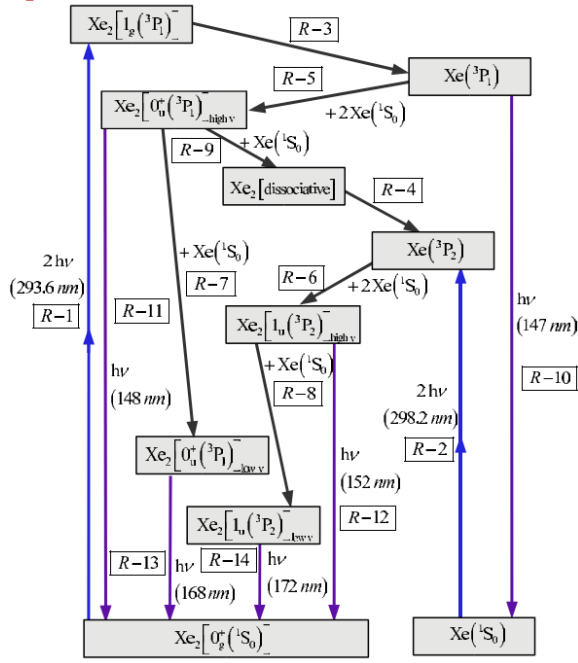
5. Rezente Entwicklungen: Excimerstrahler

Funktionsprinzip



5. Rezente Entwicklungen: Excimerstrahler

Spektrum und Konversion



Beispiel: Osram XERADEX L40/120/SB-S46/85

Elektrische Leistung = 20 W

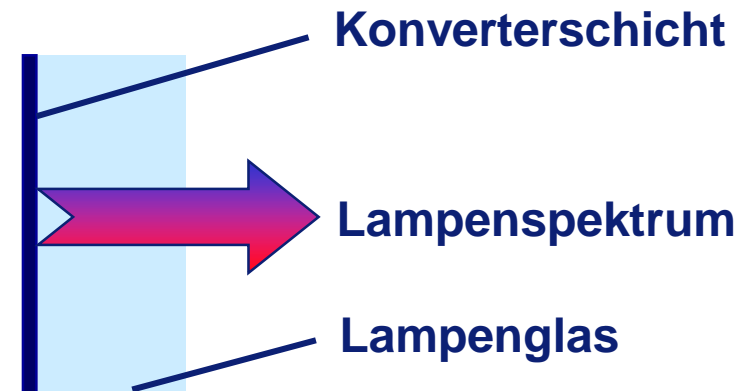
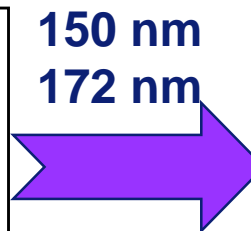
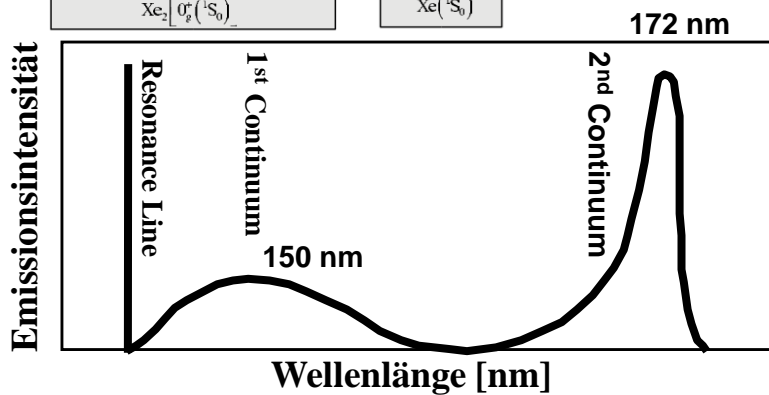
Durchmesser = 4 cm

Länge = 12 cm

Bestrahlungsstärke = 0.04 W/cm²

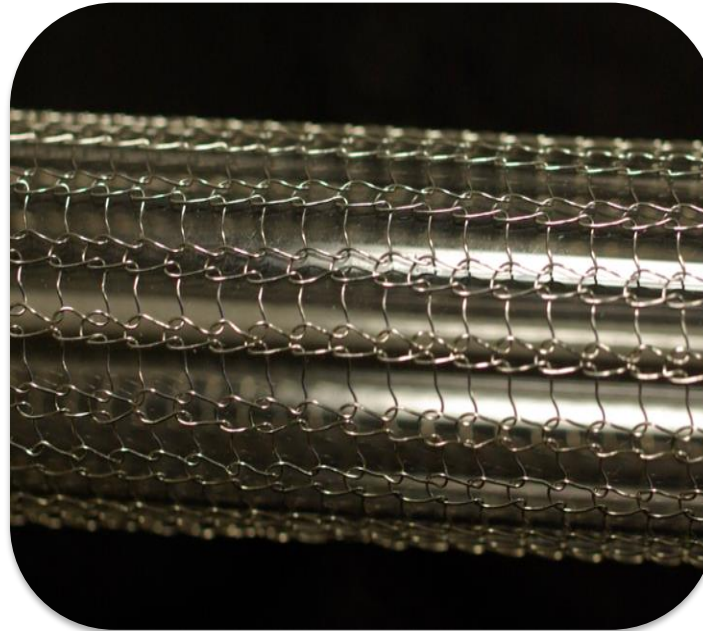
Optische Leistung = 6 W

Effizienz = ~ 30% (für 172 nm Strahlung)



5. Rezente Entwicklungen: Excimerstrahler

Ausführungsformen



Laboranwendung:
Photoreaktoren

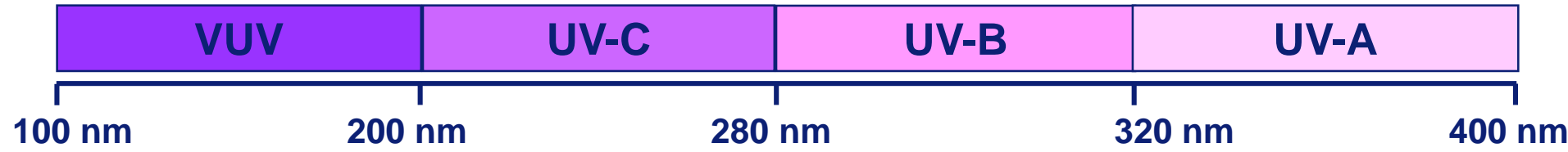
YPO₄:Bi beschichtete
Xe-Excimerstrahler
betrieben in H₂O

Leuchtstofffreie 172 nm
Xe-Excimerstrahler betrieben
in der Gasphase

Laboranwendung:
- Spektroskopie
- Ozongeneration
- Oberflächen-
aktivierung

5. Rezente Entwicklungen: Excimerstrahler

UV Leuchtstoffe – Geeignete Wirtsgitter und Aktivatorionen



Wirtsstruktur

Fluoride

Phosphate

Borate

Silicate

Aluminate

Aktivatorionen

Nd^{3+}

$\text{Tl}^+, \text{Pb}^{2+}, \text{Pr}^{3+}, \text{Bi}^{3+}$

$\text{Gd}^{3+}, \text{Bi}^{3+}, \text{Pr}^{3+}, \text{Ce}^{3+}$

$\text{Tm}^{3+}, \text{Pb}^{2+}, \text{Ce}^{3+}, \text{Eu}^{2+}$

5. Rezente Entwicklungen: Excimerstrahler

UV-Konverter für Xe-Excimerstrahler

1. Wasserspaltung / NO_x-Abbau

- YPO₄:Nd 193 nm

2. Mineralisation von Mikroschadstoffen: Pharmazeutika, Hormone, Herbizide, ...

- YPO₄:Bi 241 nm
- YPO₄:Pr 235 nm
- LaPO₄:Pr 225 nm
- CaSO₄:Pr,Na 218 nm

3. Desinfektion (Luft, Wasser, Oberflächen)

- YPO₄:Bi 241 nm
- CaLi₂SiO₄:Pr 252 nm
- YBO₃:Pr 265 nm
- Y₂Si₂O₇:Pr 275 nm

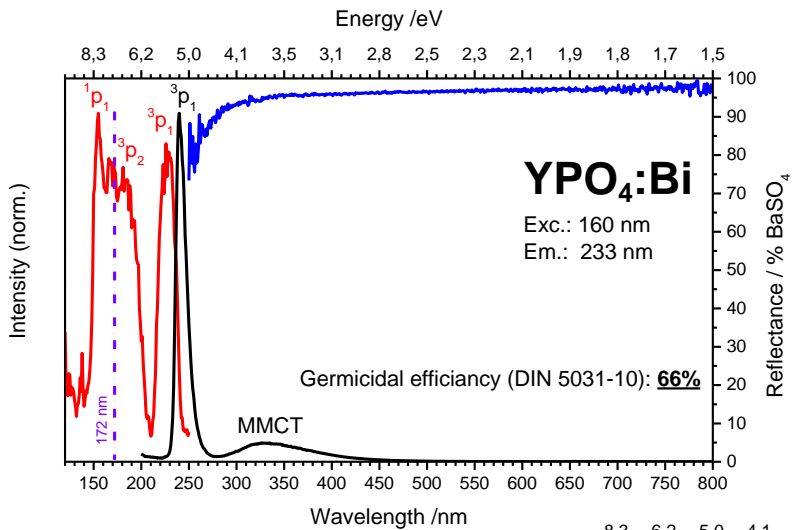


4. Photopolymerisation / UV-Härtung

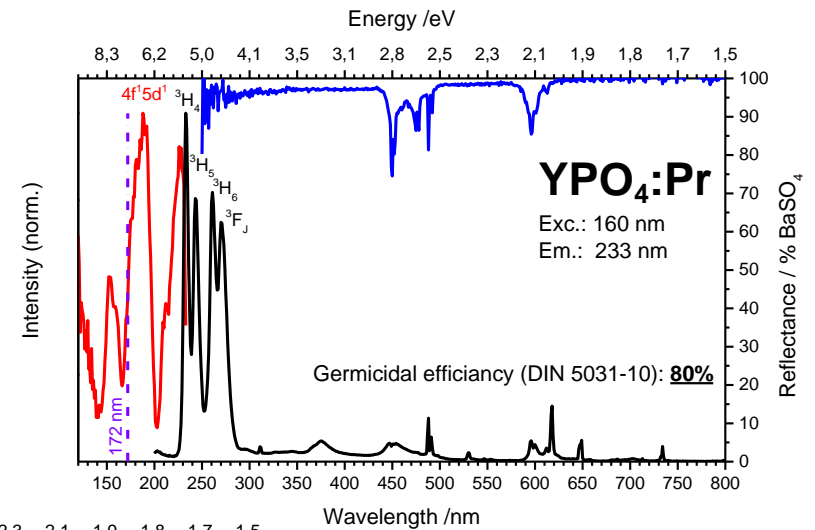
- Lu₃Al₅O₁₂:Gd 311 nm
- LaMgAl₁₁O₁₉:Gd 311 nm
- Y₃Al₅O₁₂:Pr 320 nm

5. Rezente Entwicklungen: Excimerstrahler

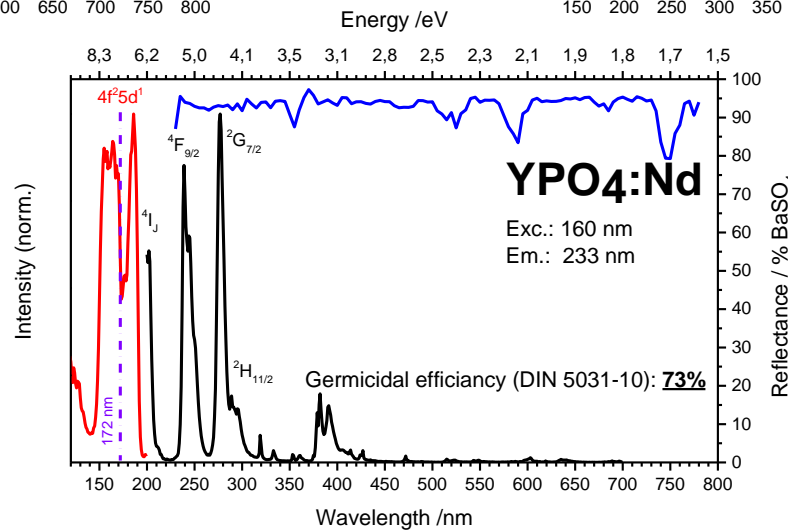
UV-Konverter für Xe-Excimerstrahler: Ortho-Phosphate



$\lambda_{\max}(\text{YPO}_4:\text{Bi}) = 241 \text{ nm}$



$\lambda_{\max}(\text{YPO}_4:\text{Pr}) = 235 \text{ nm}$



$\lambda_{\max}(\text{YPO}_4:\text{Nd}) = 190 \text{ nm}$

5. Rezente Entwicklungen: Excimerstrahler

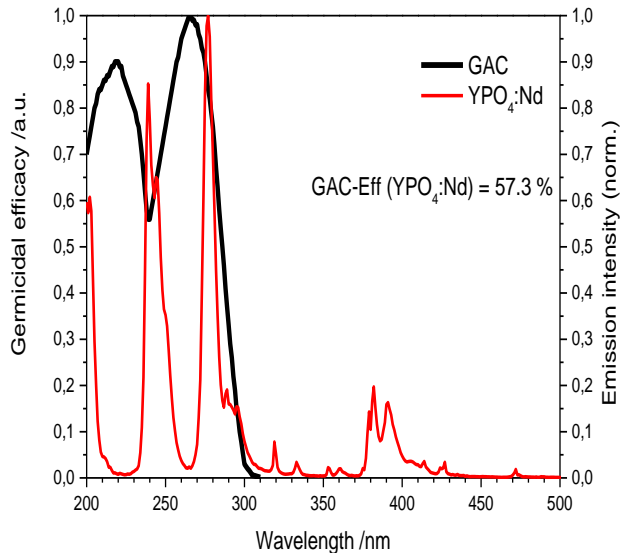
UV-Konverter für Xe-Excimerstrahler: Ortho-Phosphate

“Germicidal efficacy” (GAC)

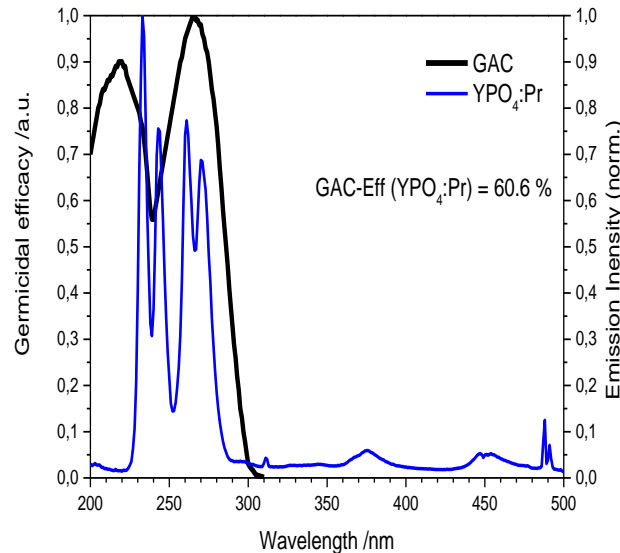
$$E_{GAC}(Phosphor) = \frac{\int (Em_{Phosphor} \times GAC)}{\int Em_{Phosphor}}$$

GAC: Wirksamkeit der
Inaktivierung von E. Coli
gemäß DIN 5031-10

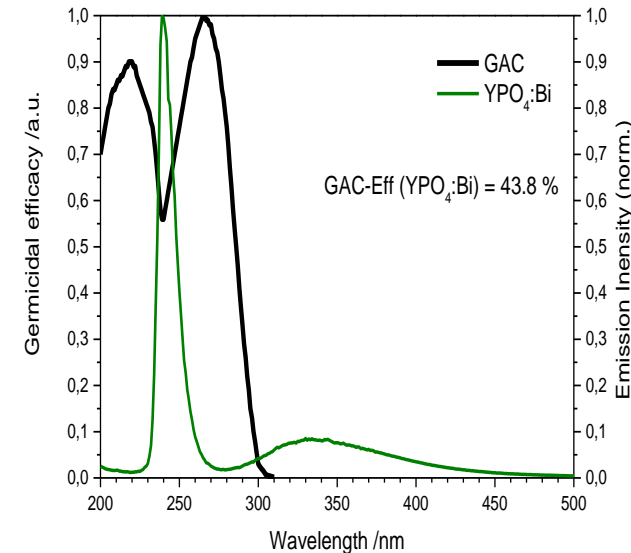
Spectral germicidal efficacy DIN 5031-10 (E.Coli)



Spectral germicidal efficacy DIN 5031-10 (E.Coli)



Spectral germicidal efficacy DIN 5031-10 (E.Coli)

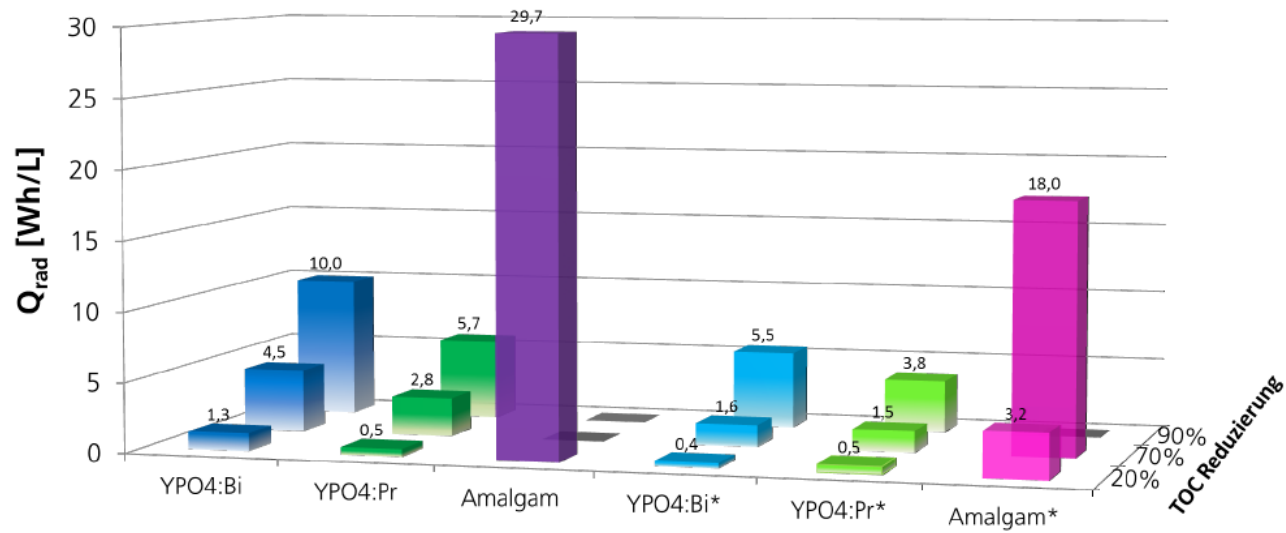


5. Rezente Entwicklungen: Excimerstrahler

Xe-Excimerstrahler mit UV-C Konvertermaterialien



Abbau von Sulfamethoxazol (Antibiotikum)

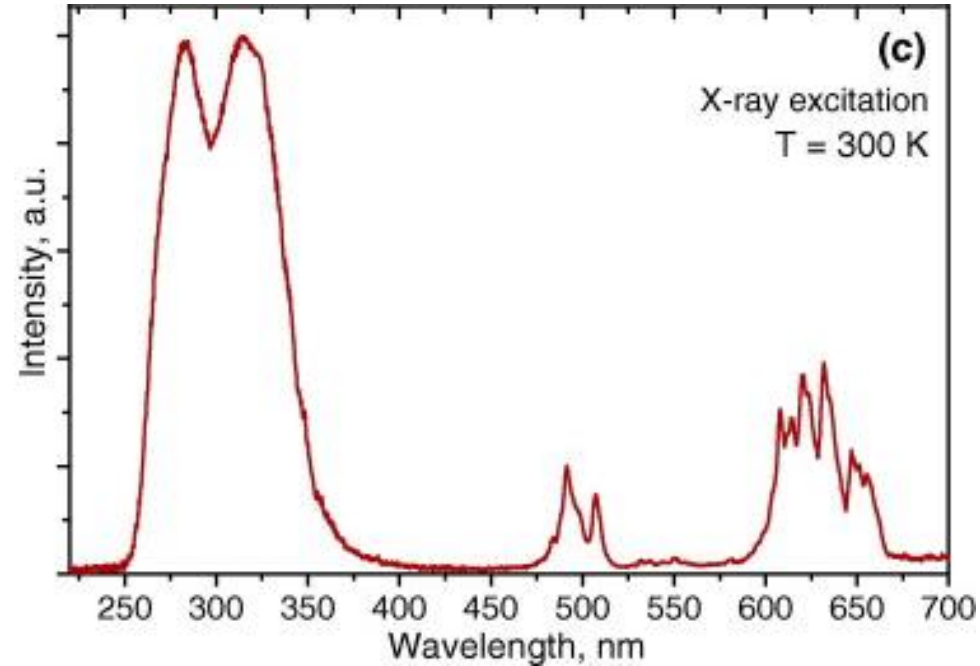
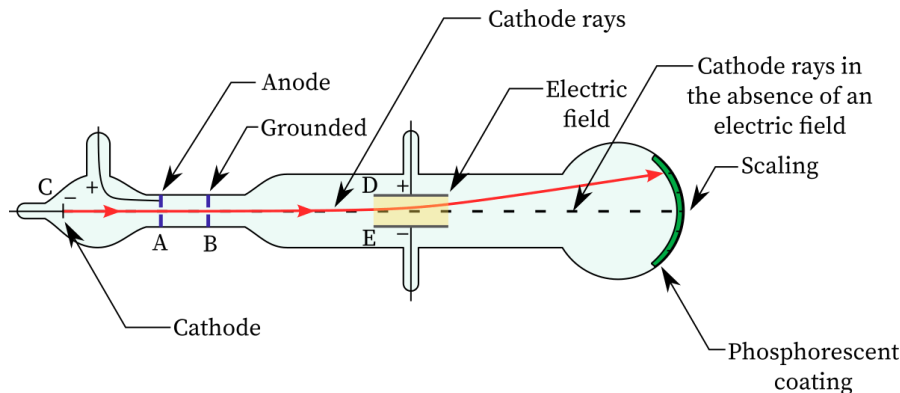


Quelle: A. Nietzsche, DLR

Photolyt. Abbau via Xe-Excimerstrahler mit einem 235 oder 241 nm Konverter erlauben eine Energieeinsparung von bis zu 95% gegenüber Amalgamstrahlern

5. Rezente Entwicklungen: Kathodolumineszenz

Kathodenstrahl- oder Röntgenröhre mit UV-C Konvertermaterialien



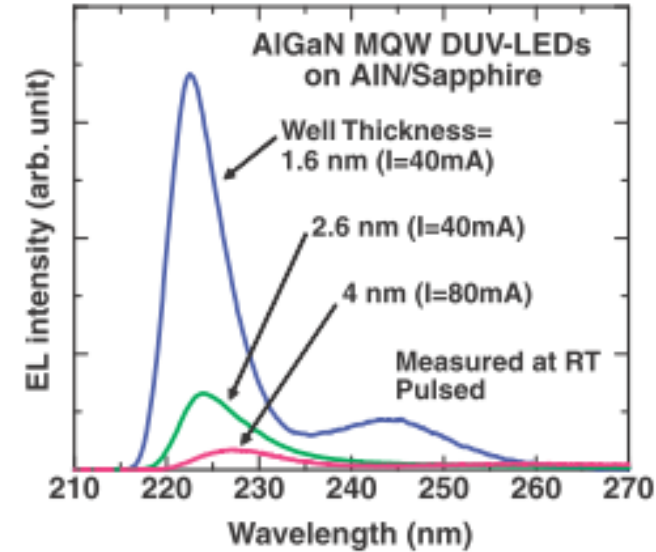
$\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Pr}^{3+}$ Emission
Lit.: Chem. Phys. Lett. 565 (2013) 80

1-10 keV Elektronen oder Röntgenphotonen treffen auf eine Leuchtstoffschicht und regen diese zur Emission an. Das Prinzip ähnelt dem eines CRT-Bildschirms

6. Zusammenfassung

UV emittierende LED / Laserdioden

- **Spektralbereich: Theoretische Grenze: 205 nm, experimentelle Grenze ~ 220 nm**
- **Wärmeabfuhr bestimmt Ausbeute & Lebensdauer**
- **Brechzahl steigt mit höherer Energie stark an**
- **DUV-LED → DUV Laserdioden: Anspruchsvoll!**
- **Einfaches EVG**



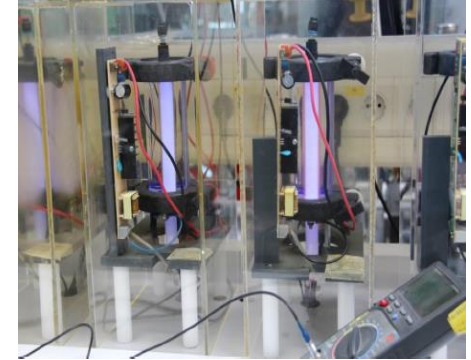
Zu lösende Probleme

- **UV Strahlungsfluss: EL-Quantenausbeute, Temperaturlöschung**
- **Energieeffizienz: Lichtauskopplung, Reabsorption**
- **Spektrale Konsistenz: Verkapselung, Halbleiterstabilität**
- **Massenproduktion: Preis & Zuverlässigkeit**

6. Zusammenfassung

Xe₂^{*}-Excimerstrahler

- **Primärspektrum: 147, 150, 172 nm**
- **Fluoreszenzspektrum: 190 – 380 nm**
- **Hg-frei, schnell schaltbar, hoher Formfaktor**
- **Probleme: EVG, Lebensdauer, Preis, Marktzugang**
- **Gasentladung und Konverter bestimmen Ausbeute & Lebensdauer**



Ziele: Erhöhung der Lebensdauer VUV Xe-Excimer Strahler

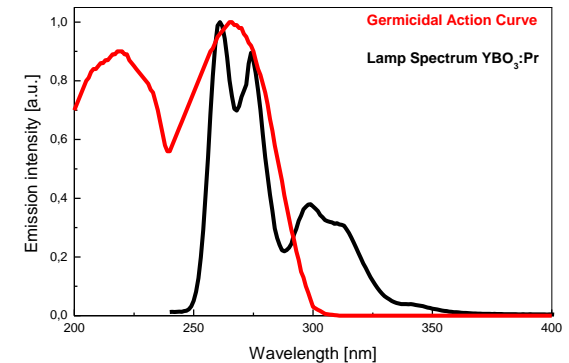
Markteinführung für spezielle Anwendungen

- **222 nm** **Desinfektion (augen- und hautsicher?)**
- **235 nm** **Mineralisation organischer Mikroschadstoffe**
- **241 nm** **Desinfektion & Mineralisation org. Mikroschadstoffe**
- **314 nm** **Photochemie/-medizin**

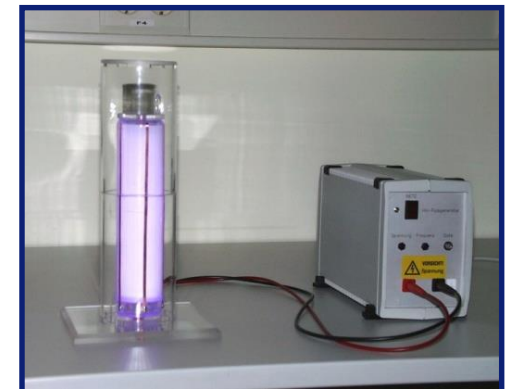
6. Zusammenfassung

UV emittierende Leuchtstoffe für Fluoreszente Xe-Excimerstrahler

- Potentiell viele Anwendungsfelder: **Desinfektion, Reinigung bzw. Abbau von μ -Schadstoffen**, Photochemie, NO_x Entfernung, Photomedizin, ...
- VUV \rightarrow UV Konverter: Emitter mit 190 – 380 nm verfügbar, z.B.
 - $(\text{Y,Lu})\text{PO}_4:\text{Nd}$
 - $\text{YPO}_4:\text{Bi}$
 - $\text{LaPO}_4:\text{Pr}$
 - $(\text{Y,Lu})\text{PO}_4:\text{Pr}$
 - $\text{YBO}_3:\text{Pr} \rightarrow$ hohe GAC-Überlappung \rightarrow
 - $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Gd}$

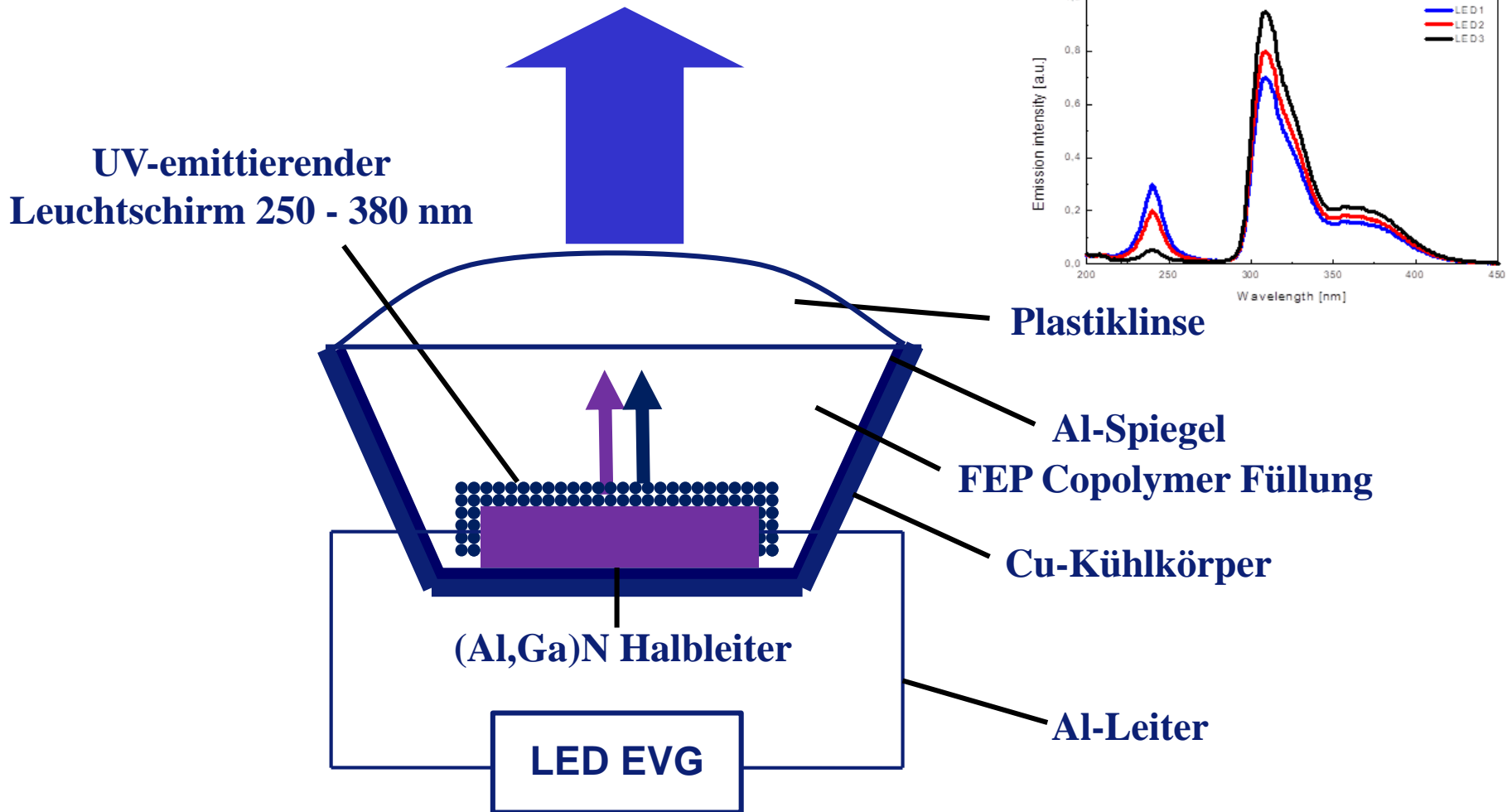


- Lampenlebensdauer < 1000 h
- Degradationsmechanismus $\text{YPO}_4:\text{Bi}$ geklärt
- Verbesserung der Stabilität der Konverter durch eine Partikelbeschichtung mit $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Saphir)
- Weitere Verbesserung der Lebensdauer notwendig



7. Ausblick

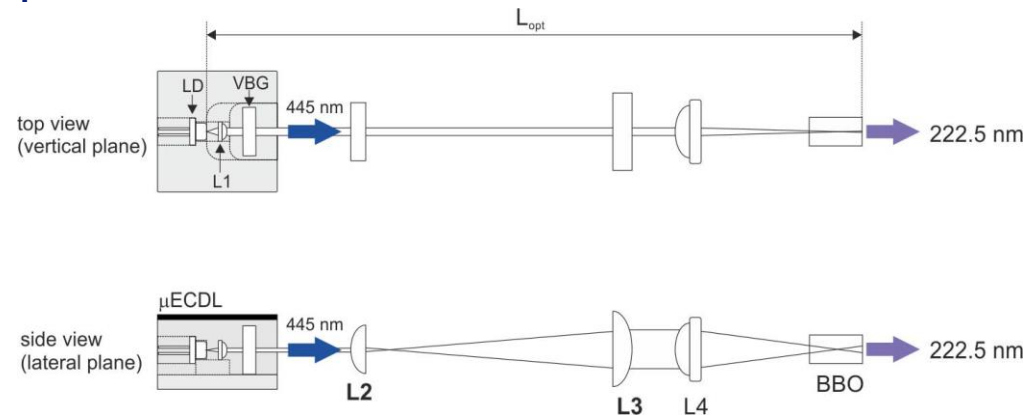
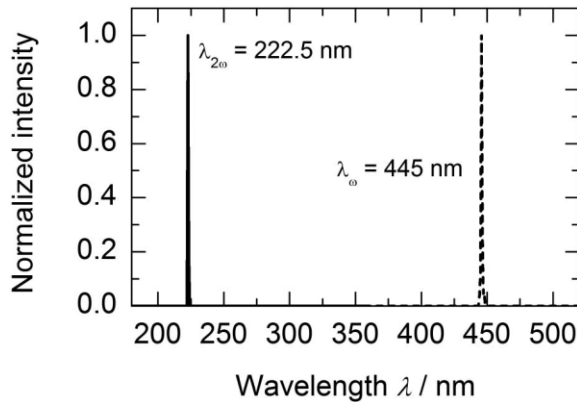
(Al,Ga)N / (In,Ga)N LEDs oder Laserdioden: UV-Down-Konversion



7. Ausblick

(Al,Ga)N / (In,Ga)N LEDs oder Laserdioden: UV-Up-Konversion

1. 445 nm Laserdiode + β -BaB₂O₄ NLO Kristall



2. 445 nm Laserdiode + up-Konverterkeramik

ABSTRACT: The objective of this study was to develop visible-to-ultraviolet C (UVC) upconversion ceramic materials, which inactivate surface-borne microbes through frequency amplification of ambient visible light. Ceramics were formed by high-temperature sintering of compacted yttrium silicate powders doped with Pr^{3+} and Li^+ . In comparison to previously reported upconversion surface coatings, the ceramics were significantly more durable and had greater upconversion efficiency under both laser and low-power visible light excitation. The antimicrobial activity of the surfaces under diffuse fluorescent light was assessed by measuring the inactivation of *Bacillus subtilis* spores, the rate of which was nearly 4 times higher for ceramic materials compared to the previously reported films. Enhanced UVC emissions were attributed to increased material thickness as well as increased crystallite size in the ceramics. These results represent significant advancement of upconversion surfaces for sustainable, light-activated disinfection applications.

Visible light

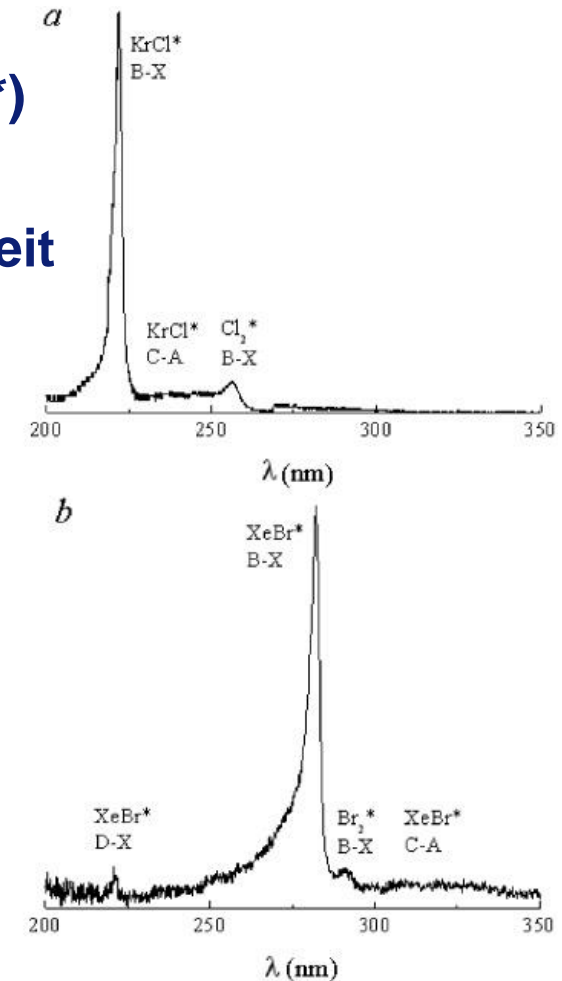
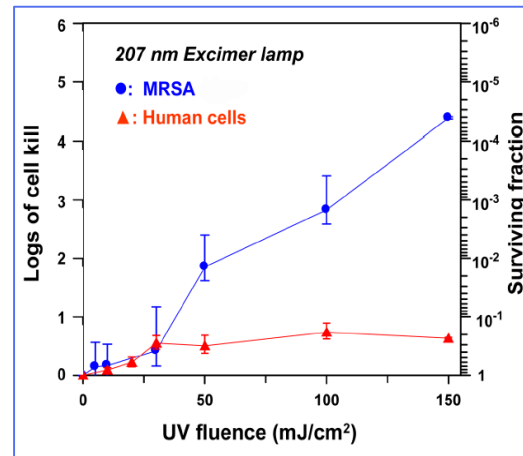
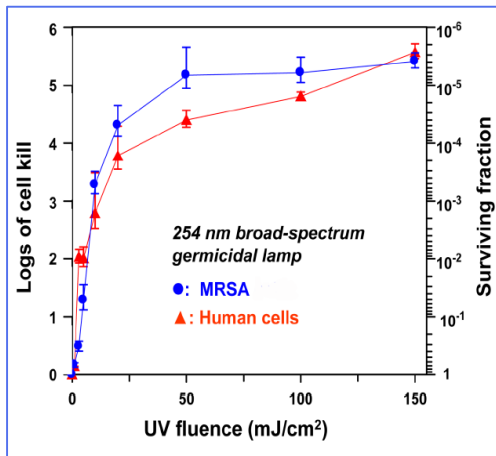
34x UVC

Wavelength (nm)

7. Ausblick

KrCl^{*}-Excimerstrahler: Haut- und augensicheres Strahlungsspektrum?

- Primärspektrum: 222 nm (KrCl^{*}) + 258 nm (Cl₂^{*})
- Bandpassfilter 200 – 230 nm erforderlich
- Probleme?: EVG, Lebensdauer, Preis, Sicherheit



Lit.: D.J. Brenner et al., Radiat. Res. 187 (2017) 483

Ushio Homepage: Care222 UV disinfection solutions

8. Literatur und Internetadressen

Literatur (LEDs)

- **External Quantum Efficiency: 10% @ 261 nm,**
Light Extraction Efficiency: 25.5%
(using highly transparent p-AlGaIn:Mg contact layer: 97% transmission)
Lit.: Proc. SPIE 10104 (2017) 101041P
- **External Quantum Efficiency: 20% @ 275 nm**
(highly transp. p-AlGaIn:Mg contact layer & Rh p-electr.)
Output Power (20 mA): 18.3 mW
Lit.: Appl. Phys. Express 10 (2017) 031002
- **Light Extraction Efficiency: 54.3% @ 280 nm**
(highly reflective electrode with $R > 90\%$)
Lit.: J. Appl. Phys. 121 (2017) 013105
- **Internal Quantum Efficiency: 78.2% @ 289 nm**
Output Power (180 mA): 50.92 mW
Power density: 83.7 W/cm² @ 326 nm
Wall-plug Efficiency: 1.55%
Lit.: Superlattices Microstruct. 104 (2017) 19

8. Literatur und Internetadressen

Literatur

- R. Heinz, Grundlagen der Lichterzeugung - Von der Glühlampe bis zum Laser, Highlight-Verlag, 2004
- M. Born, T. Jüstel, Elektrische Lichtquellen, Chemie in unserer Zeit 40 (2006) 294
- M. Broxtermann, T. Jüstel, Photochemically Induced Deposition of Protective Alumina Coatings onto UV Emitting Phosphors for Xe Excimer Discharge Lamps, Mat. Res. Bull. 80 (2016) 249
- J. Chen, S. Loeb, J-H. Kim, LED Revolution: Fundamentals and Prospects for UV Disinfection Applications, Envir. Sci.: Water Res. Technol. 3 (2017) 188
- M. Laube, T. Jüstel, On the Photo- and Cathodoluminescence of $\text{LaB}_3\text{O}_6:\text{Gd,Bi}$, $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$, $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Gd}$, $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$, and $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Gd}$, ECS J. SSST 7 (2018) R206
- M. Laube, T. Jüstel, Novel UV-A and -B Emitting Device for Medical Treatment, Photochemistry, and Tanning Purposes, ECS J. SSST 9 (2020) 065012

Internet-Links

- Homepage T. Jüstel www.fh-muenster.de/juestel
- EnviroChemie <https://envirochemie.com/de/home/>
- JW Holding <http://www.jw-holding.de>
- Nichia http://www.nichia.co.jp/about_nichia/index.html
- Osram Opto <http://www.osram.de/>
- Philips Lumileds <http://www.luxeon.com/>
- Robert-Koch-Institut www.rki.de
- Ushio www.ushio.com

Danksagung

Dr. Florian Baur
Dr. David Enseling
Ines Becker
Dr. Helga Bettentrup
Agata Blacha
Andre Bleise
Ewelina Broda
Dr. Michael Dierks
Dr. Danuta Dutczak
Dr. Tobias Dierkes
Emilie Goirand
Nadine Engbers
Linda Eickhoff
Jörg Exner
Joana Flottmann
Dr. Rolf Gerdes
Dr. Joanna Gondek
Dr. Benjamin Herden
Alexander Hoffmann
Torsten Hofmann
Marcel Hübner
Dr. Thomas Jansen
Dr. Arturas Katelnikovas
Dr. Ramunas Skaudzius

Heike Kätker
Beata Koziara
Tim Köcklar
Dr. Jagoda Kuc
Stephan Lippert
Maximilian Mäsing
Dr. Daniel Michalik
Dr. Monika Michalkova
Dr. Alexander Milbrat
Katarzyna Mocniak
Dr. Stephanie Möller
Dr. Matthias Müller
Jessica Peschel
Dr. Julian Plewa
Tatjana Rat
Carsten Schledorn
Dr. Simas Sakirzanovas
Carsten Schweder
Dr. Sebastian Schwung
Andrew Shamu
Lisa Siewert
Claudia Süsse Milch
Dr. Dominik Uhlich
Christine Vogel

Dr. Nils Wagner
Nele Schumacher
Natalie Pasberg
Dr. Beata Malysa
Antonio Lorusso
Stefan Fischer
Dr. David Böhnisch
Gökhan Öksüz
Heike Jenneboer
Anne Uckelmann
Dr. Sara Espinoza
Viktor Anselm
Dr. Mike Broxtermann
Dr. Simon Korte
Patrick Pues
Michael Laube
Dr. in spe Max Volhard
Jan-Niklas Keil
Jan Kappelhoff
Franziska Schröder
Tim Pier
Jury Rosenboom
Nils Kuprat
Elisa Lindfeld
Anne Westemeyer
Julia Exeler
Sven Reetz

