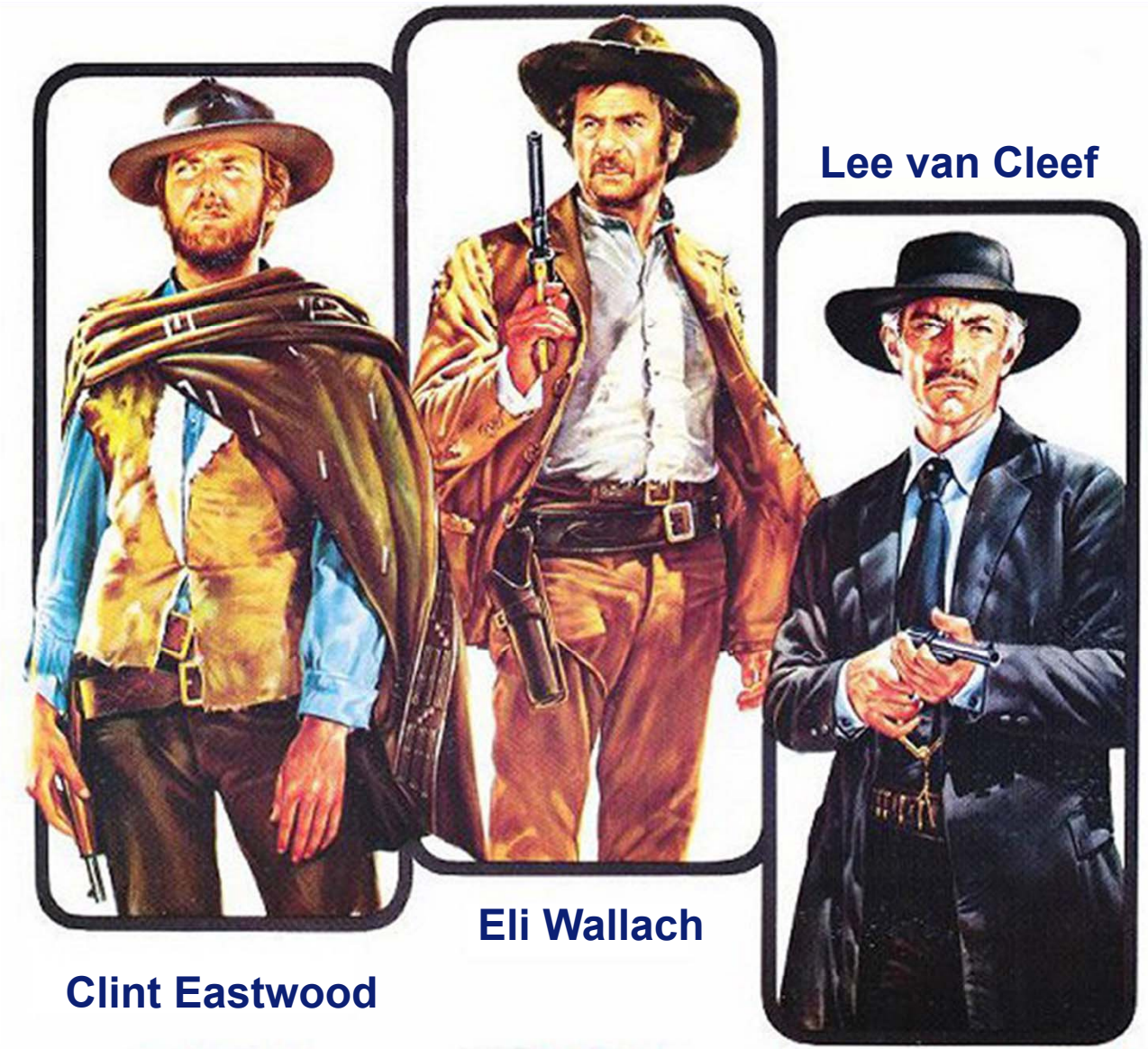
Die drei Gesichter der UV-Strahlung –

The Good, the Bad and the Ugly

Thomas Jüstel
Institut für Optische Technologien
Fachbereich Chemieingenieurwesen
tj@fh-muenster.de
www.fh-muenster.de/juestel

FH Münster
Campus-Fest

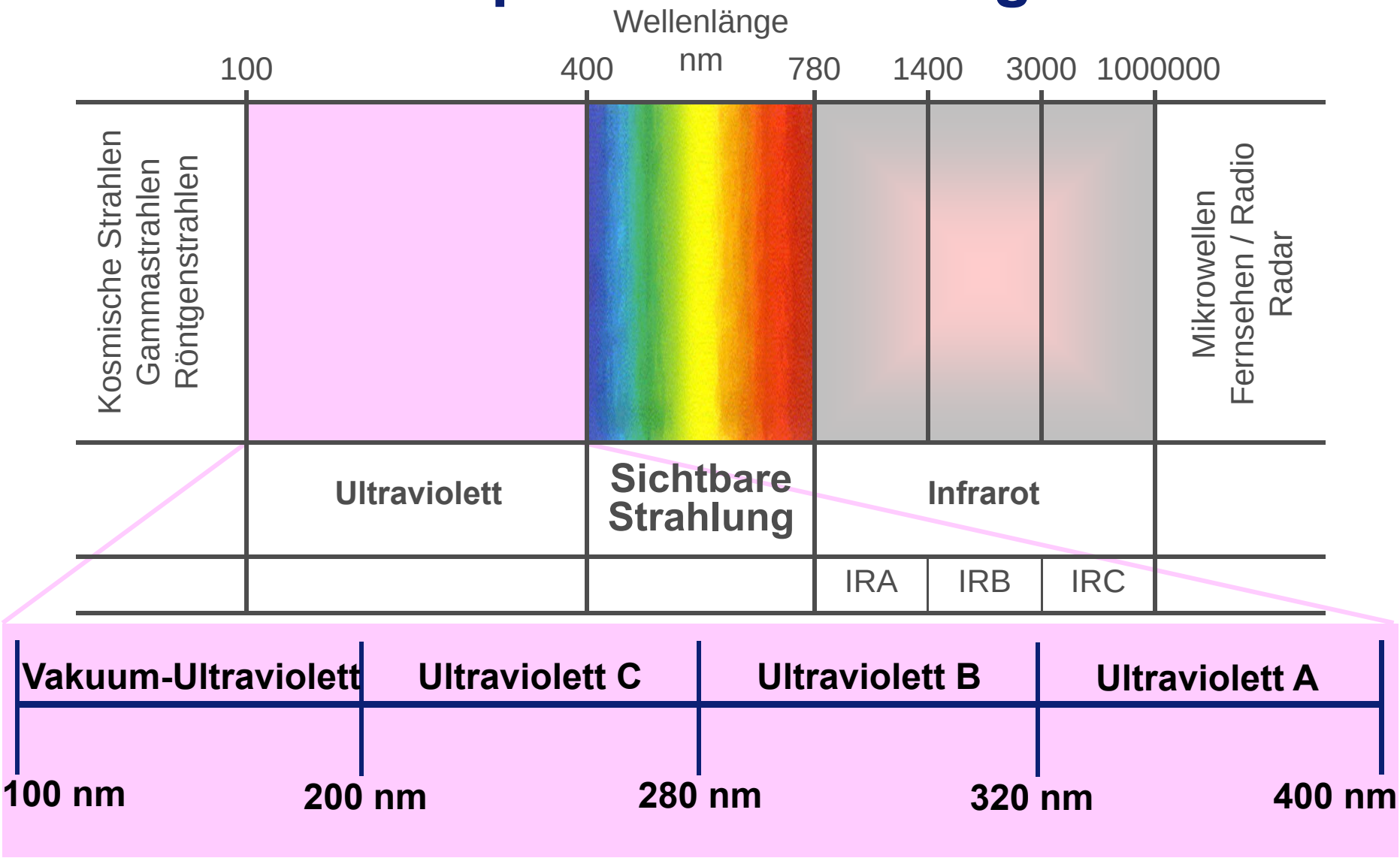
07. Juni 2017


Lee van Cleef
Eli Wallach
Clint Eastwood
THE GOOD
THE BAD
AND THE UGLY

Inhalt

1. Optische Strahlung
2. Eindringtiefe und Wirkungen
3. Strahlungsquellen
4. Photobiologie mit UV-Strahlung
5. Photomedizin mit UV-Strahlung
6. Photochemie mit UV-Strahlung
7. Zukünftige Entwicklungen
8. Literatur und Internet-Adressen

1. Optische Strahlung



2. Eindringtiefe und Wirkungen

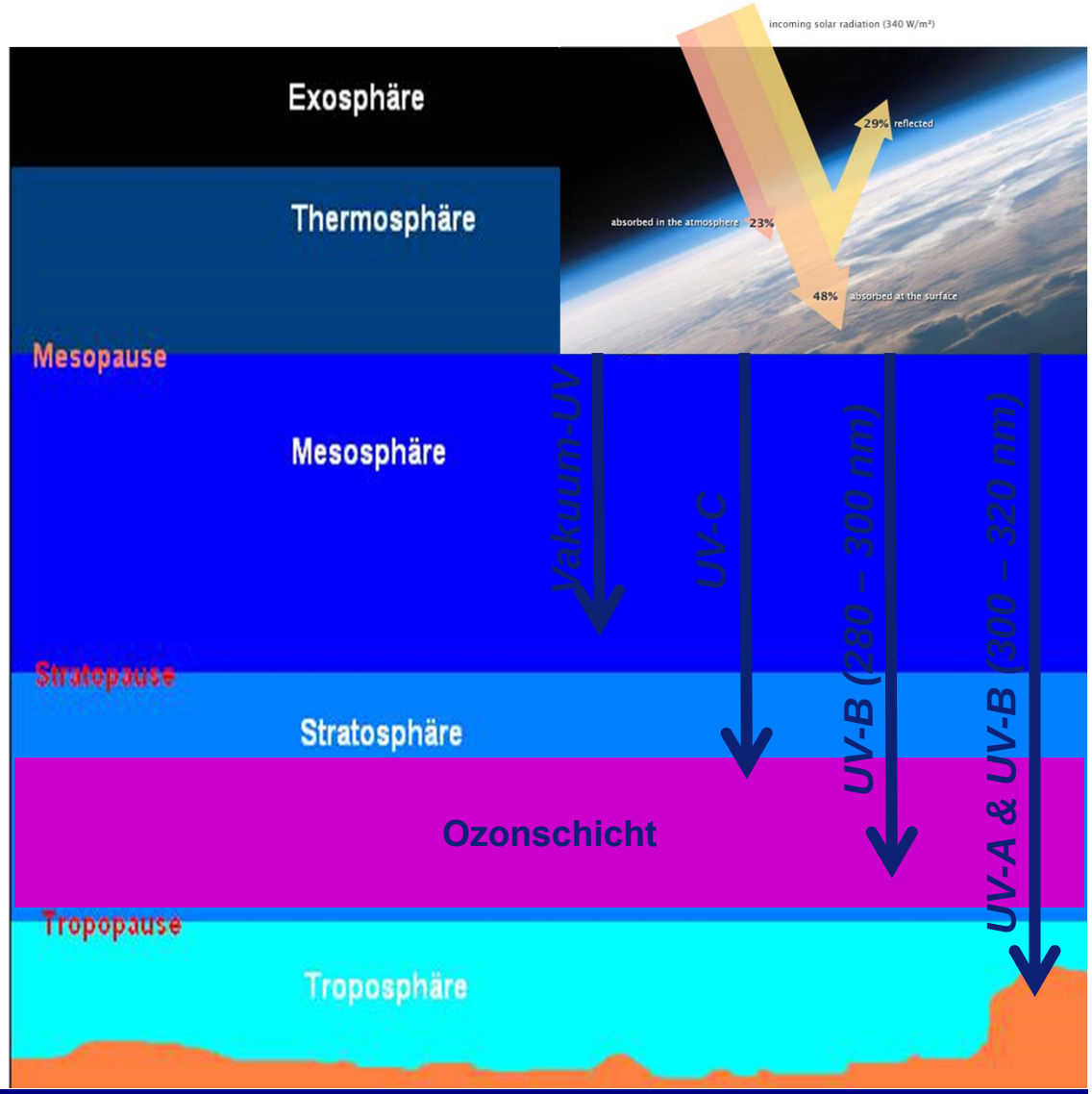
In die Atmosphäre

Vakuum-UV
Photolyse von Wasser, Stickstoff, Sauerstoff, …
Ozonbildung

UV-C
Ozonspaltung

UV-B (280 – 300 nm)
Ozonspaltung

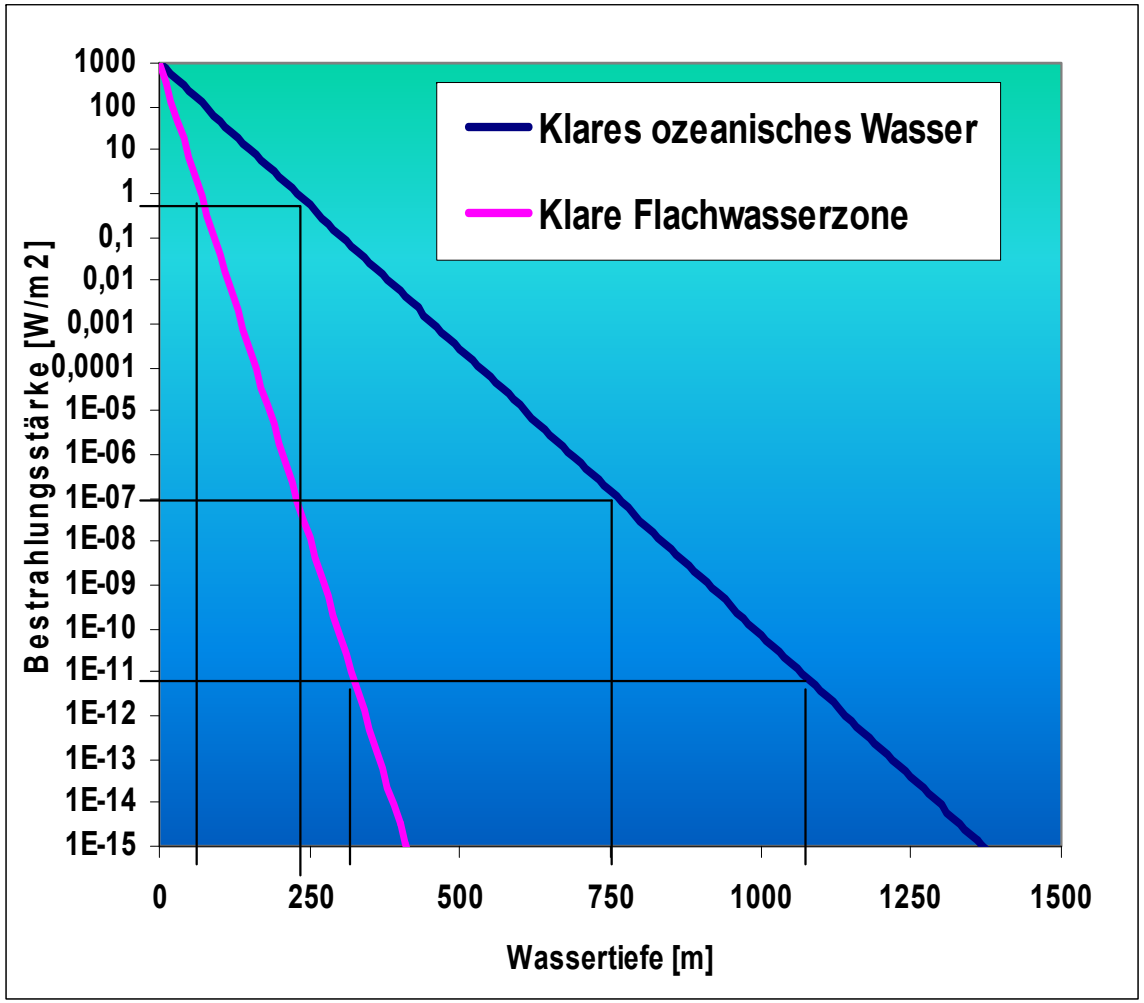
Luftbestandteile:
- **Stickstoff ~ 78%**
- **Sauerstoff ~ 21%**
- **Edelgase, H_2O, CO_2, CH_4, N_2O: ~ 1%**



2. Eindringtiefe und Wirkungen

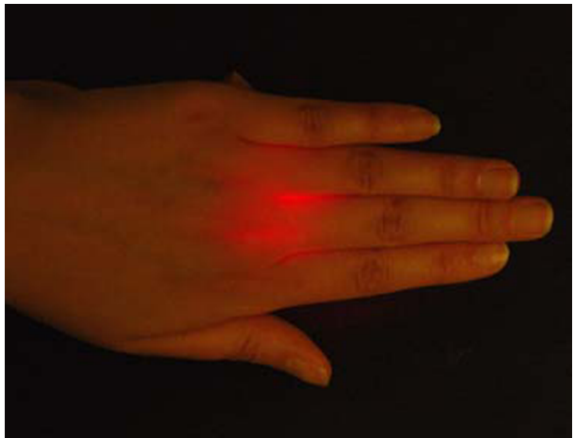
In Wasser

- Oberfläche: 1000 W/m^2
- Photosynthese: 1 – 10 W/m^2
- Phototaxis planktischer Crustaceen: 10^{-7} – 10^{-8} W/m^2 *(Vollmond ca. 5 x 10^{-3} W/m^2)*
- Lichtwahrnehmung Tiefseefisch 10^{-11} W/m^2 Vergleich: Schwarz-weiß Bildsehen Mensch 10^{-7} W/m^2 aber Wahrnehmungsgrenze bei etwa 10^{-12} W/m^2 (~ Stern 6. Größenordnung)



2. Eindringtiefe und Wirkungen

In den menschlichen Körper



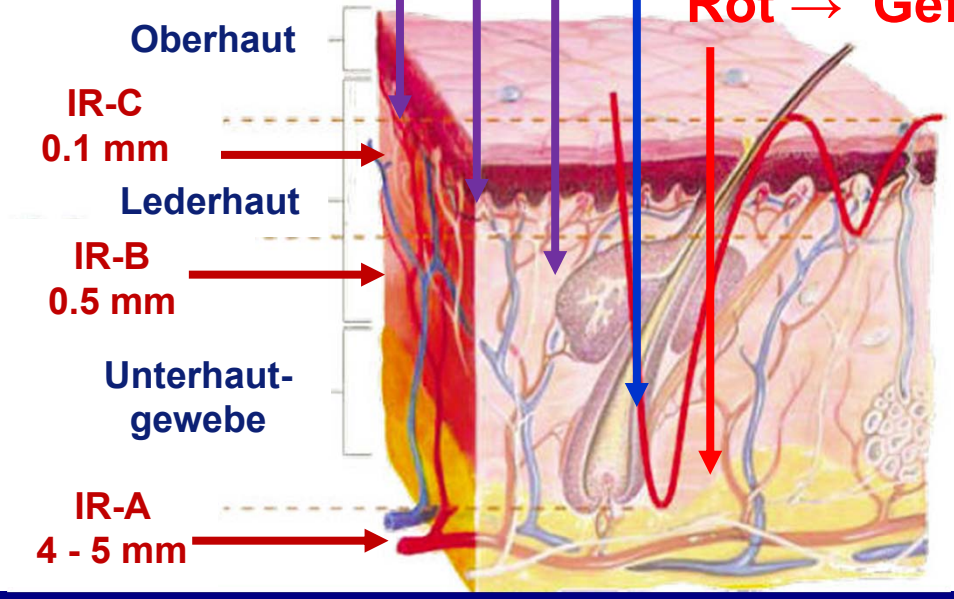
UV-C → Erbgutschäden

UV-B → Vitamin D Bildung

UV-A → Melaninoxidation

Blau → Bilirubinabbau, NO-Bildung

Rot → Gefäßerweiternde Wirkung



UV-Strahlung wirkt an der Oberfläche

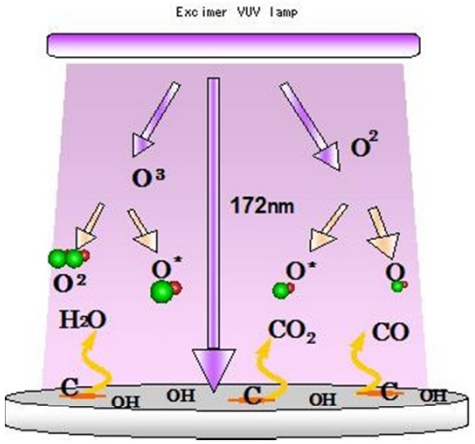
Rotes Licht & IR-Strahlung zeigt zudem Tiefenwirkung

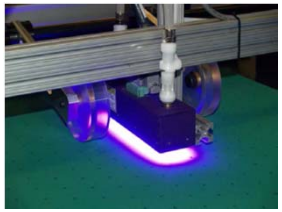
2. Eindringtiefe und Wirkungen

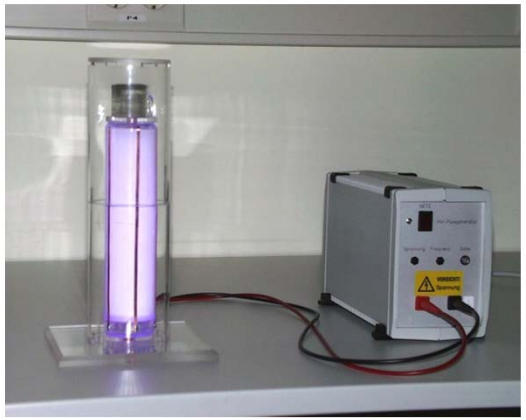
Vakuum-UV	UV-C	UV-B	UV-A

100 nm 200 nm 280 nm 320 nm 400 nm

Eindringtiefe in Materie ↑

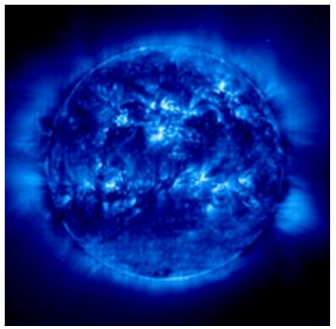


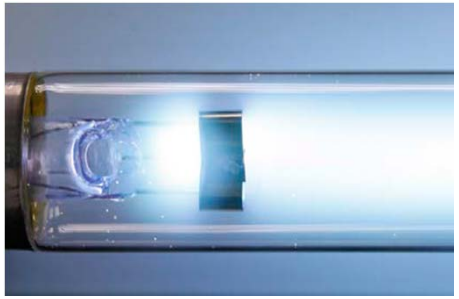


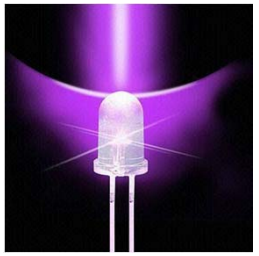


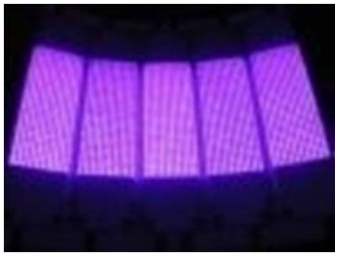
3. Strahlungsquellen

Sonne	**> 300 nm**
Hg-Entladungslampen	
• Niederdruck	185, 254 nm
• Amalgam	185, 254 nm
• Mitteldruck	200 – 400 nm
Xe-Entladungslampen	**230 – 800 nm**
D_2-Entladungslampen	**110 – 400 nm**
Excimer-Laser	**193 nm**
Excimer-Entladungslampen	
• Xe_2*	172 nm
• KrCl*	222 nm
• XeBr*	282 nm
• XeCl*	308 nm
(Al,Ga)N LEDs	**205 – 365 nm**
(In,Ga)N LEDs	**365 – 400 nm**





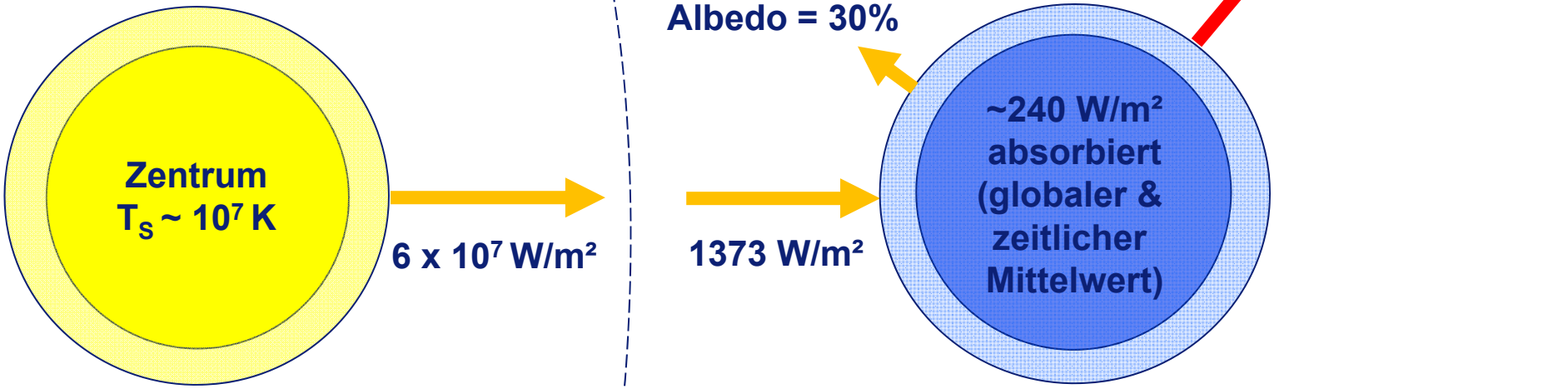




3. Strahlungsquellen

Die Sonne - Strahlungsbilanz

Sonnenoberfläche $T_S \sim 5800$ K

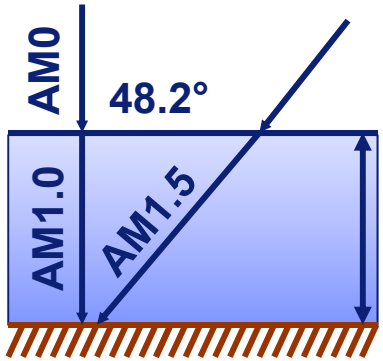


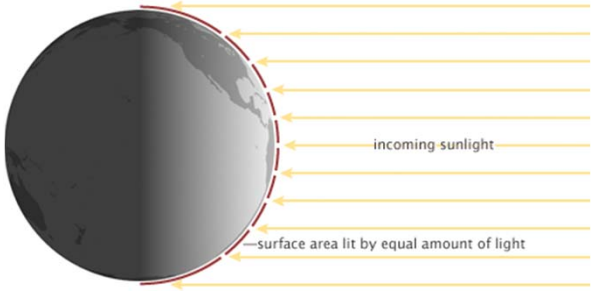
Leistung	$3.8 \cdot 10^{26}$ W	$1.3 \cdot 10^{17}$ W
Energiefluss	$1.2 \cdot 10^{34}$ J/a	$4.1 \cdot 10^{24}$ J/a

Zum Vgl.: Globaler Primärenergieverbrauch: $5.2 \cdot 10^{20}$ J/a

3. Strahlungsquellen

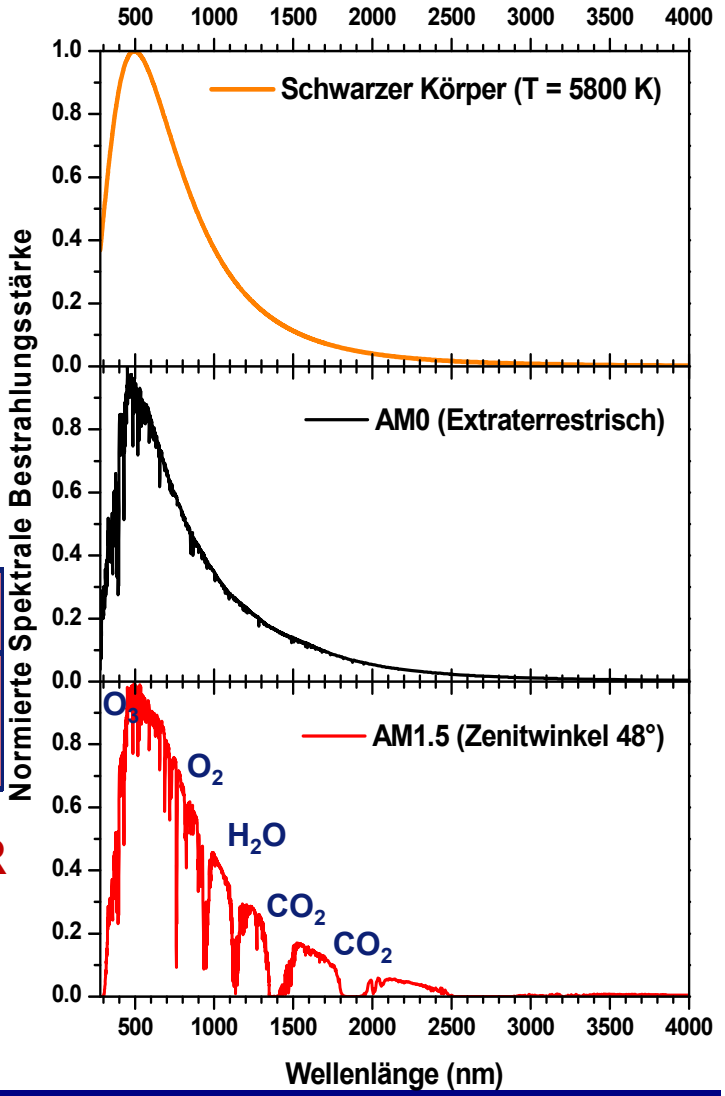
Die Sonne - Strahlungsspektrum





<400	400-500	500-600	600-700	>700
37.8 W/m²	130.4 W/m²	144.6 W/m²	134.0 W/m²	269.2 W/m²
5.3%	18.2%	20.2%	18.7%	37.6%

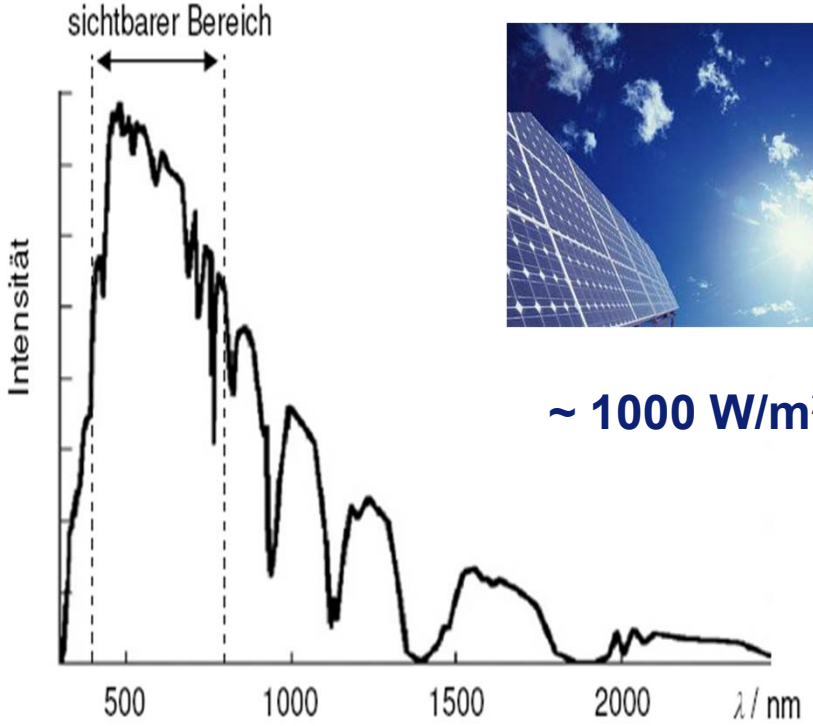
~ 5% UV ~ 60% VIS ~ 35% IR



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

3. Strahlungsquellen

Die Sonne - Direktstrahlung

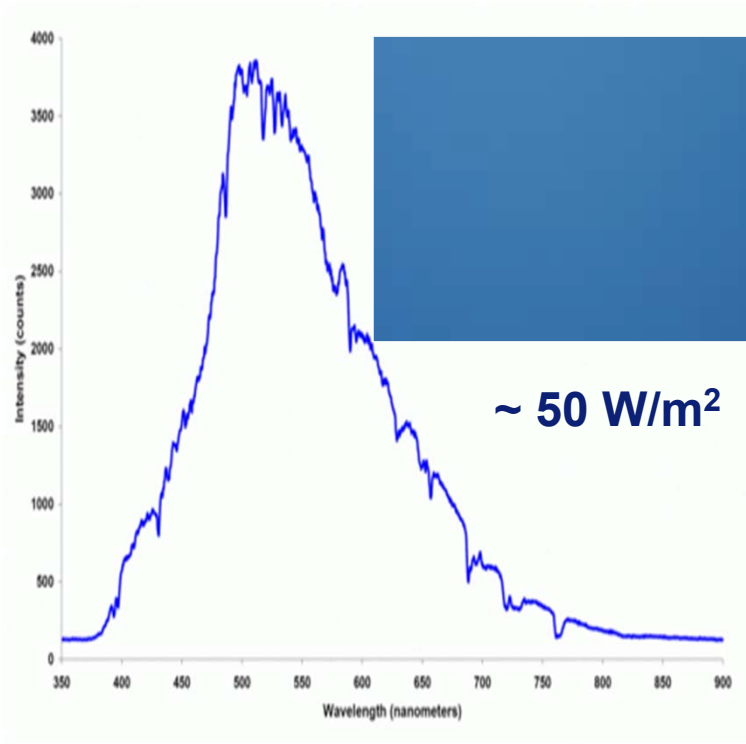


~ 1000 W/m²

Farbtemperatur = 5500 - 6500 K

5 W/m² UV und 0.1 W/m² UV-B

Diffuse Strahlung „Der blaue Himmel“



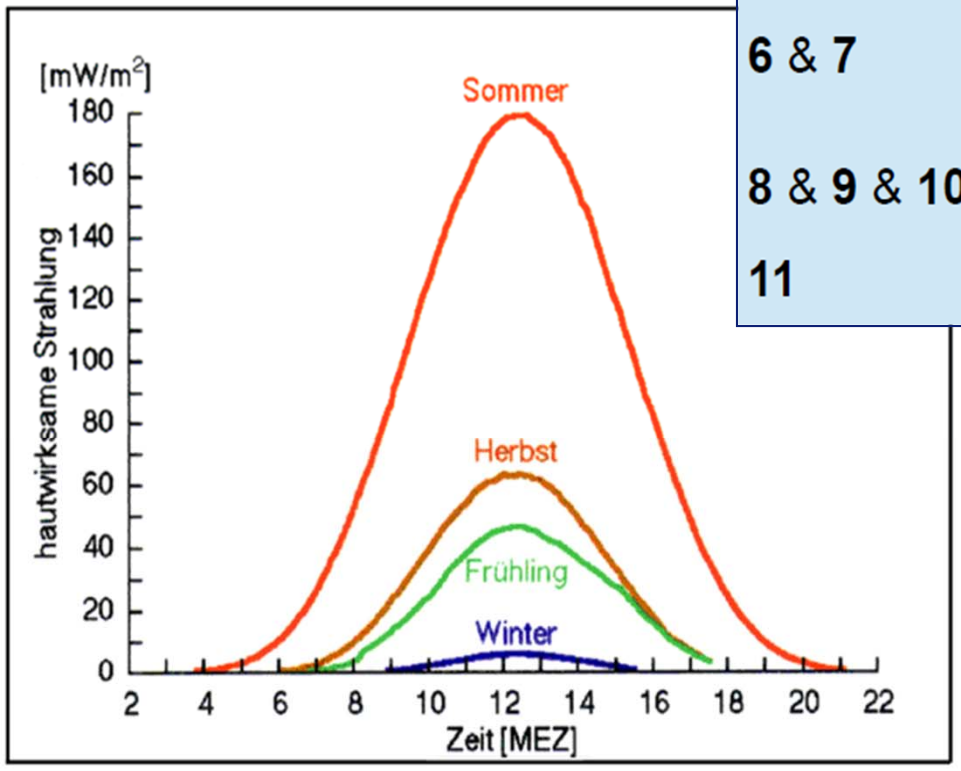
~ 50 W/m²

Farbtemperatur = 10600 K

Fast kein UV!

3. Strahlungsquellen

Die Sonne - Jahreszeitlicher Verlauf hautwirksamer Strahlung (Mitteleuropa)

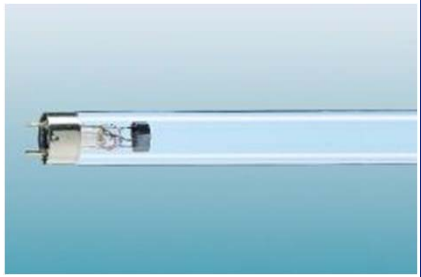
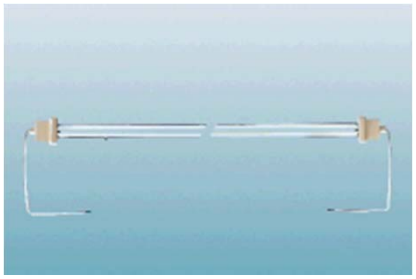


UV-Index	Bestrahlungs-stärke [W/m2]	Stärke	Notwendiger Schutz
1 & 2	0.05 (UVI: 2)	Schwach	Kein Schutz erforderlich
	0.125 (UVI: 5)	Mittel	Hut, T-Shirt, Sonnenbrille, Sonnencreme
6 & 7	0.175 (UVI: 7)	Hoch	Hut, T-Shirt, Sonnenbrille, Sonnencreme
8 & 9 & 10	0.25 (UVI: 10)	Sehr hoch	Aufenthalt im Freien möglichst vermeiden
11	0.275 (UVI: 11)	Extrem	Aufenthalt im Freien möglichst vermeiden

3. Strahlungsquellen

Quecksilberdampflampen - Übersicht

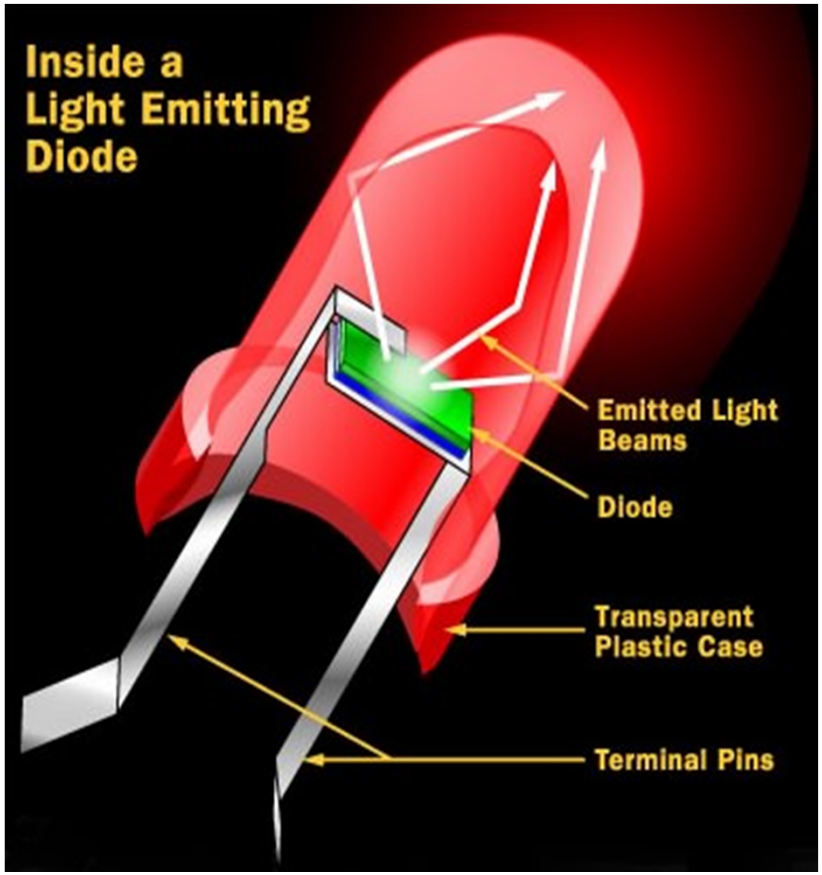
Höhen-sonne ab 1904 zur Rachitis-Therapie

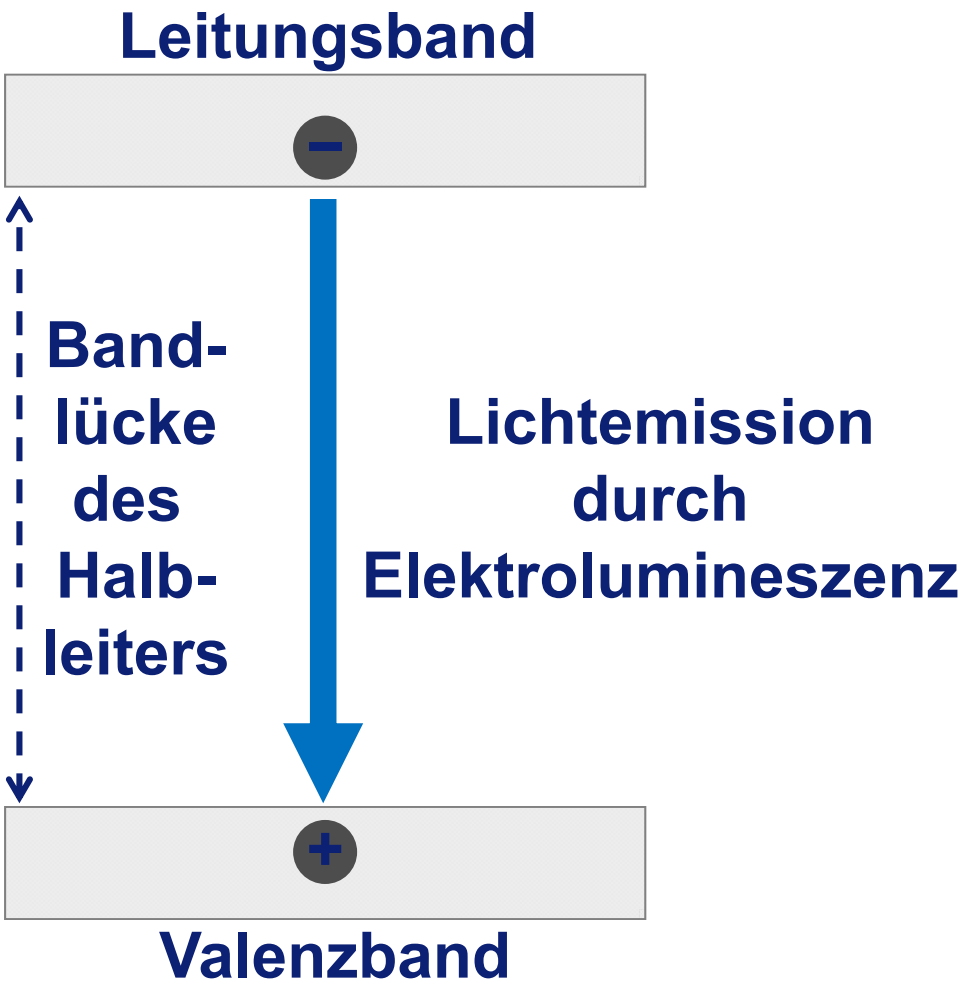
	Niederdruck-Hg	Amalgam	Mitteldruck-Hg
			
Wellenlängenbereich	254 nm	254 nm	200 - 280 nm
Leistungsaufnahme	4 ... 100 W	100 ... 300 W	1 ... 17 kW
Effizienz	< 40%	30 ... 35%	10 ... 15%
Entkeimungswirkung	85%	85%	80%
UV-C Leistung	0.2 W / cm	0.7 W / cm	15 W / cm
Wandtemperatur	40 °C	100 °C	600 - 900 °C

⇒ **Auswahl abhängig von Anwendung und Betriebskosten**

3. Strahlungsquellen

Licht emittierende Dioden (LED)





3. 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

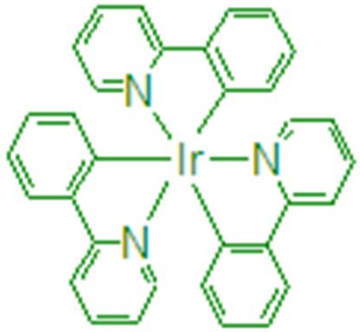
(Ga,In) N

(Al,Ga) N

210 – 400 nm

Organische LED (OLED)

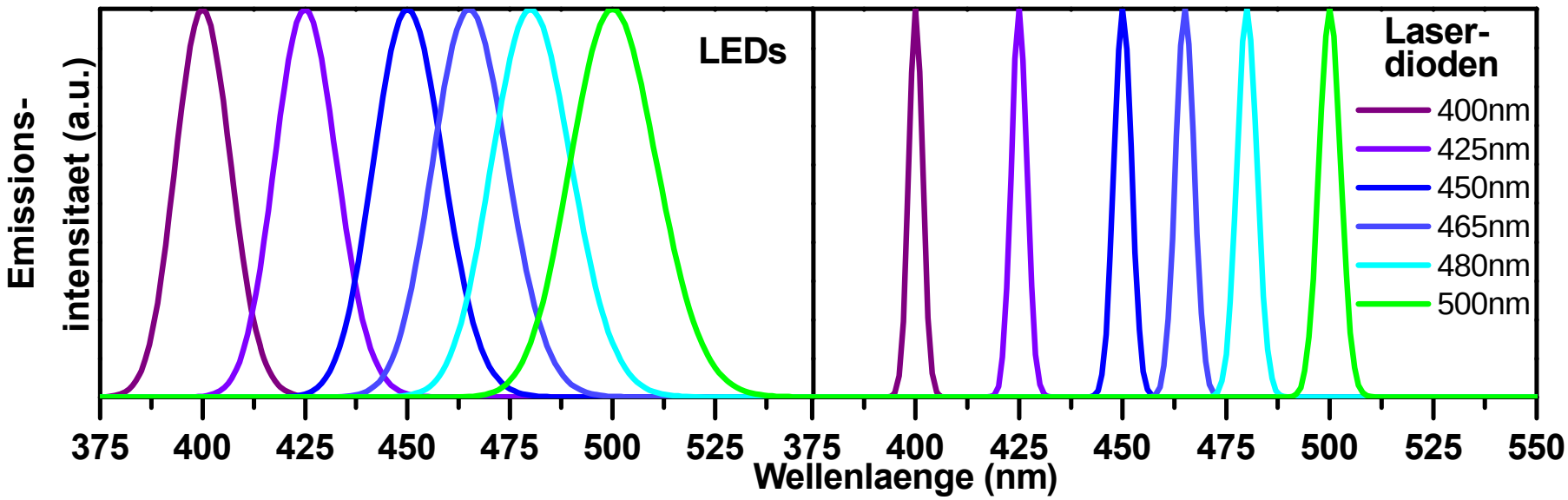
Komplexe



Keine UV-Strahlung!

3. Strahlungsquellen

LED und Laserdioden



„LED Plattform“		„Laserdioden Plattform“	
465 nm LEDs	Beleuchtung	940 nm	Fernbedienungen
410 nm LEDs	Vollkonversion	785 nm	CD
365 nm LEDs	Schwarzlicht	655 nm	DVD
265 nm LEDs	Desinfektion	405 nm	Blue ray DVD

4. Photobiologie - Wirkung von UV

Biopositiv „The Good“

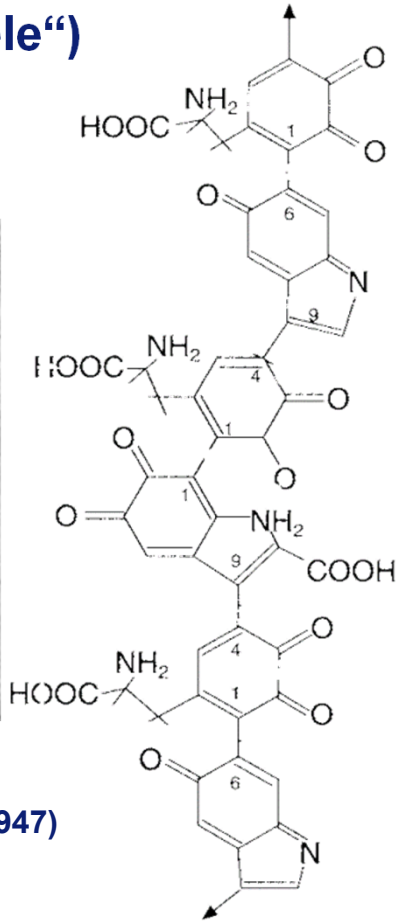
- Hautbräunung (Pigmentbildung und -dunkelung)
- Hautadaptation (Aktivierung des Eigenschutzes „Lichtschwiele“)
- Provitamin D Synthese
- Therapeutische Wirkungen in der Dermatologie
- Desinfektionswirkung
- Psychisch aufhellende Wirkung

Bionegativ „The Bad and the Ugly“

- UV-Erythem (Hautrötung & Sonnenbrand)
- Phototoxische / -allergische Reaktionen
- Vorzeitige Hautalterung (Photoaging)
- Bildung von freien Radikalen
- Folsäureabbau
- Photokarzinogenese (BCC, SCC, MM)

Kinder mit Rachitis, 1920
Quelle: B. Harrow,
Textbook of Biochemistry (1947)

Ausschnitt aus dem Melanin



4. Photobiologie - Wirkung von UV

UV-A (320 - 400 nm)

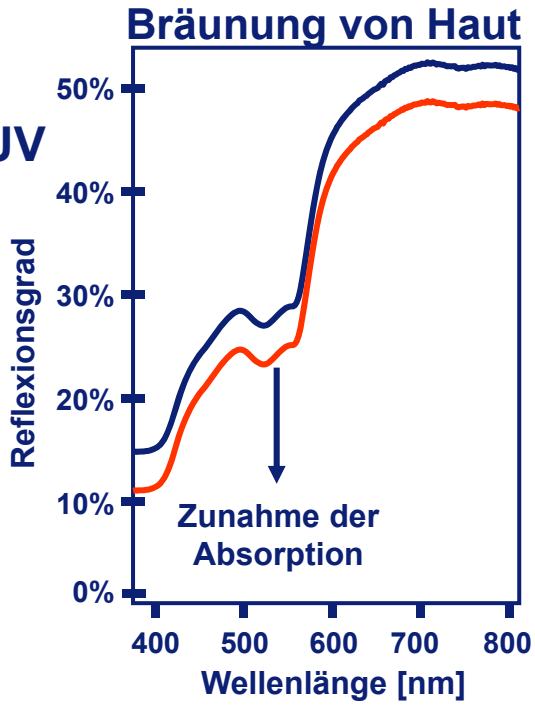
Ca. 95% vom Tageslicht-UV

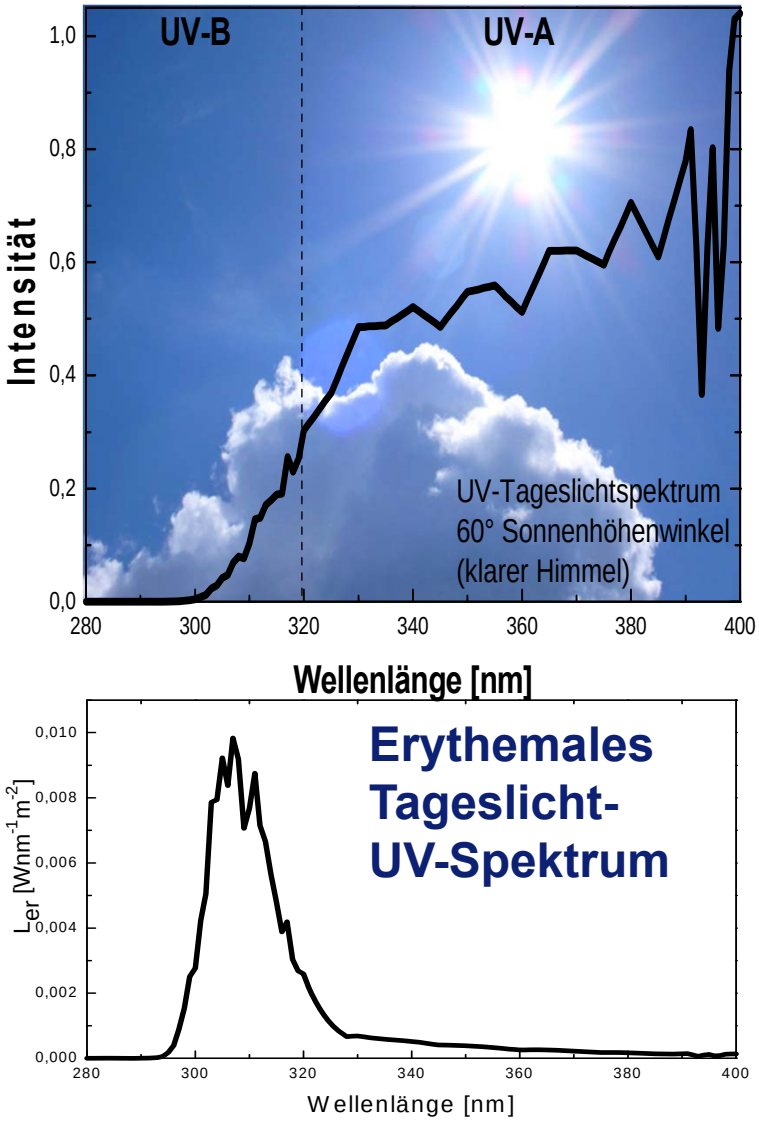
- **Bräunung**
  - → **schnell**
  - → **Kurzzeiteffekt**

UV-B (280 – 320 nm)

Ca. 5% vom Tageslicht-UV

- **Bräunung**
  - → **nach 2-3 Tagen**
  - → **Langzeiteffekt**
  - → **Hautrötung**
  - → **Sonnenbrand**





4. Photobiologie - Wirkung von UV

Minimal erythemale Dosis (MED) - Hautrötung

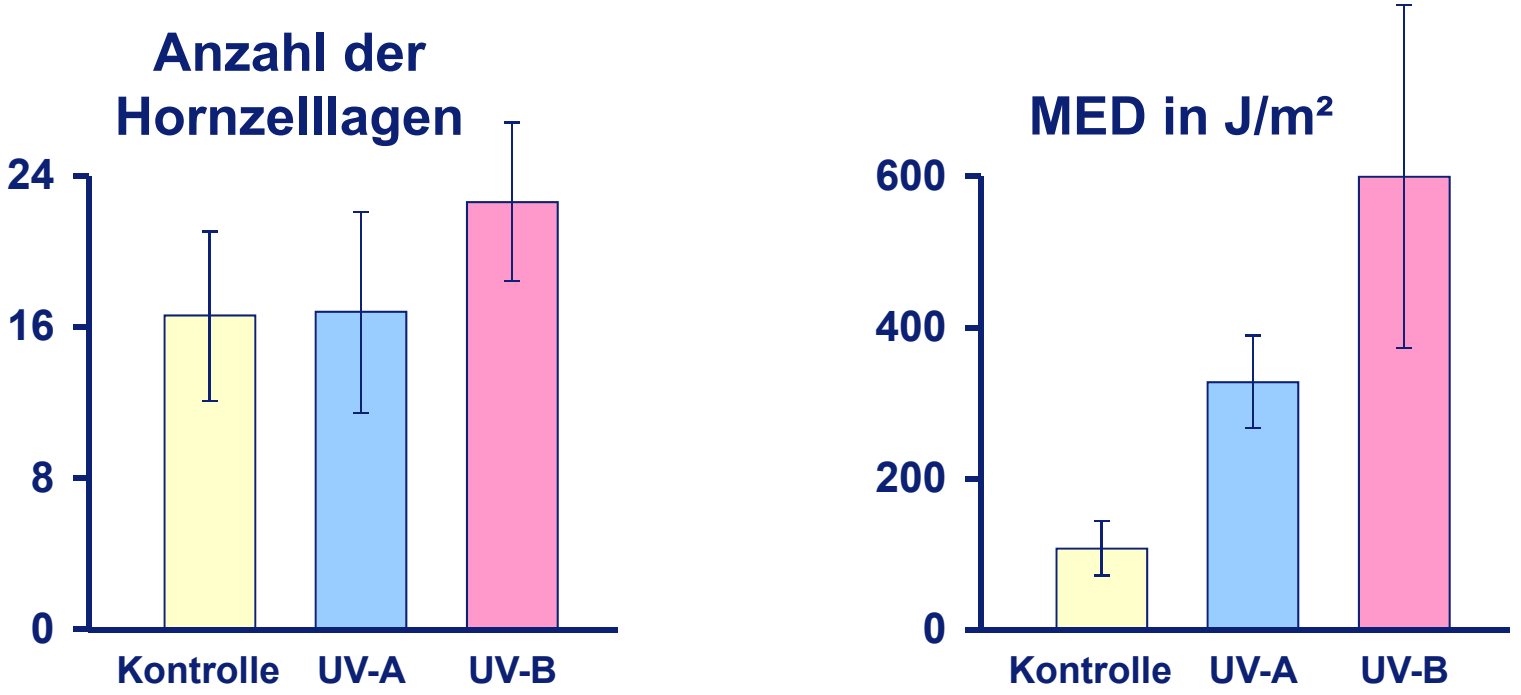
Haut-typ	Beispiel	MED [J/m²]	Eigenschutzzeit in Minuten bei UV-Index 8 (~ 0.2 W/m²)
I	Nordeuropäer	150 - 300	10
II	Mitteleuropäer	250 - 400	20
III	heller Südeuropäer	300 - 500	30
IV	dunkler Südeuropäer	450 - 600	50
V	Südasiat	600 - 900	> 60
VI	Afrikaner	900 - 1500	> 60

4. Photobiologie - Wirkung von UV

Hautadaptation nach UV-Bestrahlung

Neun Expositionen innerhalb von drei Wochen (n = 26):

- **UV-A mit 100 J/cm² oder**
- **UV-B mit 1,5 MED pro Bestrahlung**

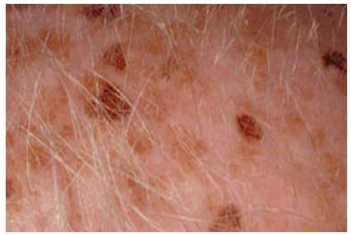


4. Photobiologie - Wirkung von UV

Chronische Hautschäden

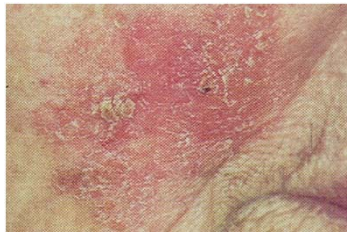
Vorzeitige Hautalterung

Elastose



Pigmentflecken

Hautkrebs



Aktinische Keratose

Plattenepithelkarzinom

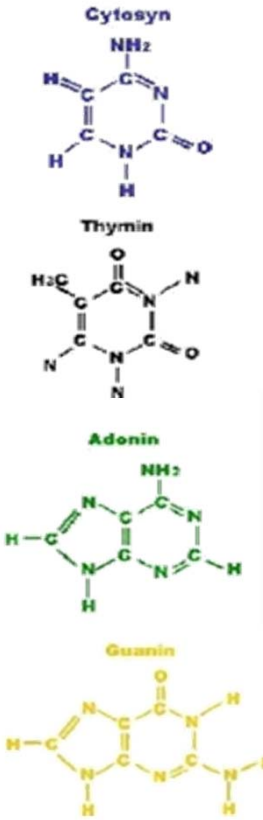
Ulzerierendes Basalkarzinom

Superfiziell spreitendes malignes Melanom

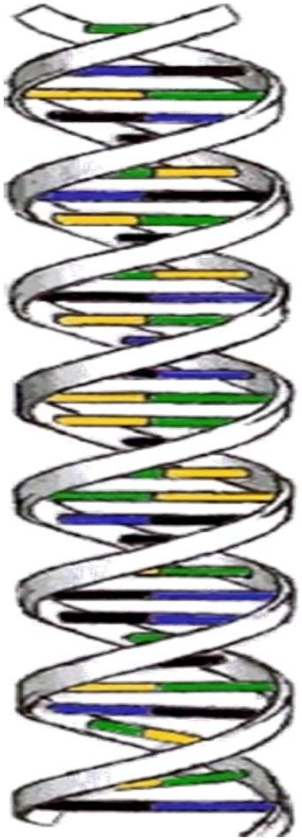
4. Photobiologie - Wirkung von UV

UV-C (200 - 280 nm)

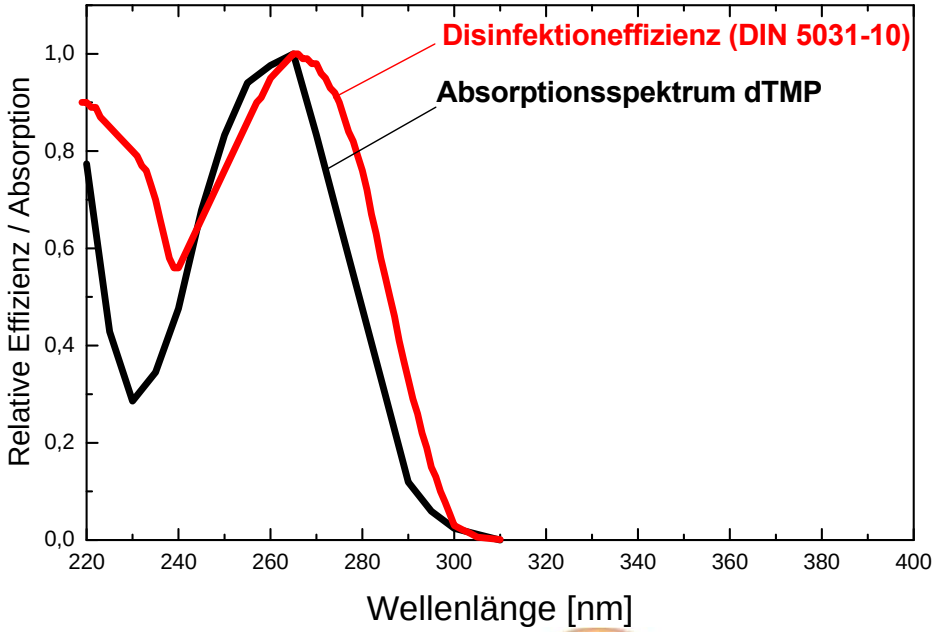
Basen

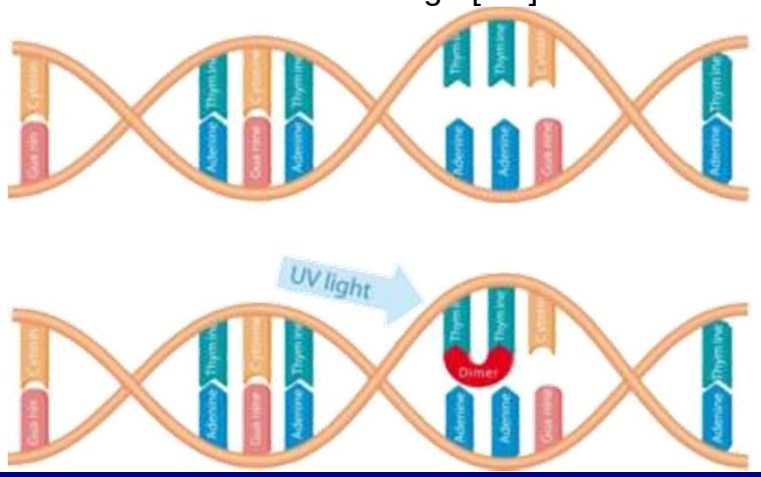


Doppelhelix



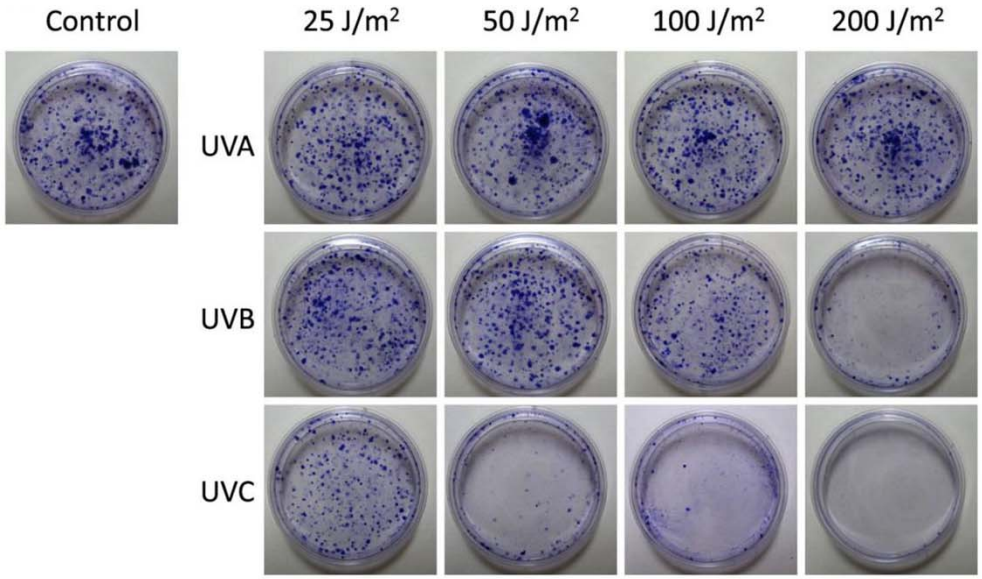
DNS = Basen + Zucker + Phosphateinheiten

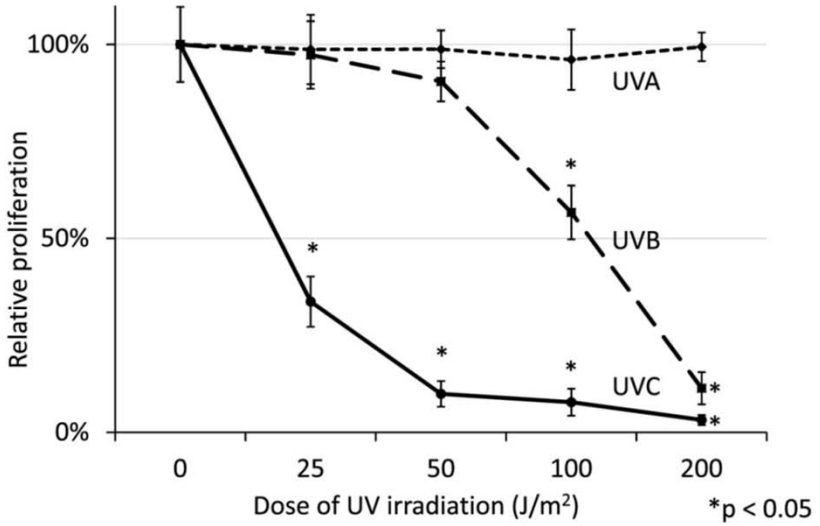




4. Photobiologie - Wirkung von UV

Entkeimung mit UV-C Strahlung





Literatur: S. Miwa et al., 2013

4. Photobiologie - Wirkung von UV

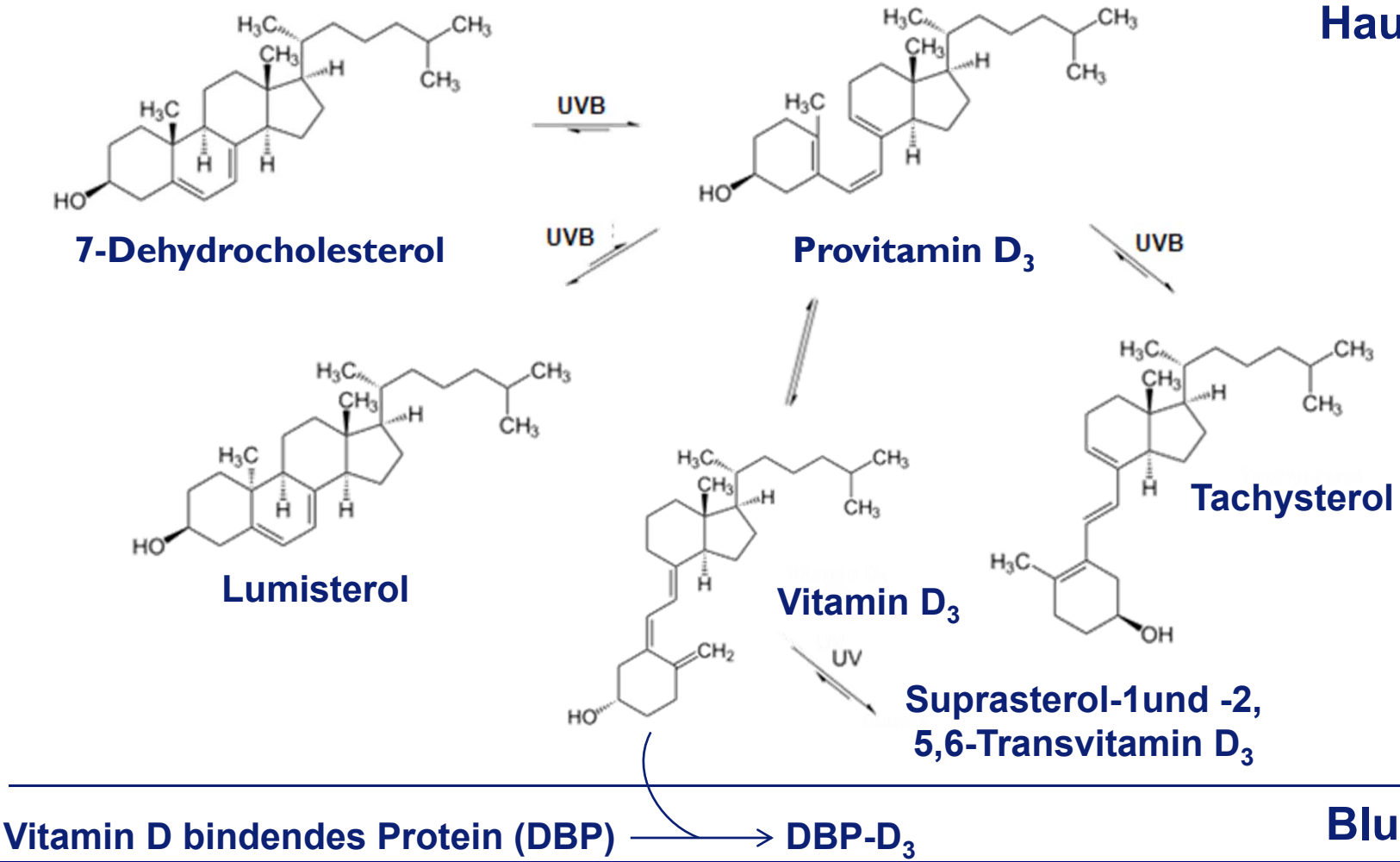
Trinkwasseraufbereitung mit UV-C Strahlung

Ort: Bad Tölz, Bayern
Wasserfluss: 200 … 2000 m³/h
UV-Leistung: 18 kW
Anzahl UV-Strahler: 144

Ort: Manukau, Neuseeland
Wasserfluss: 50400 m³/h
UV-Leistung: Mind. ~ 320 kW
Anzahl UV-Strahler: ~ 2500

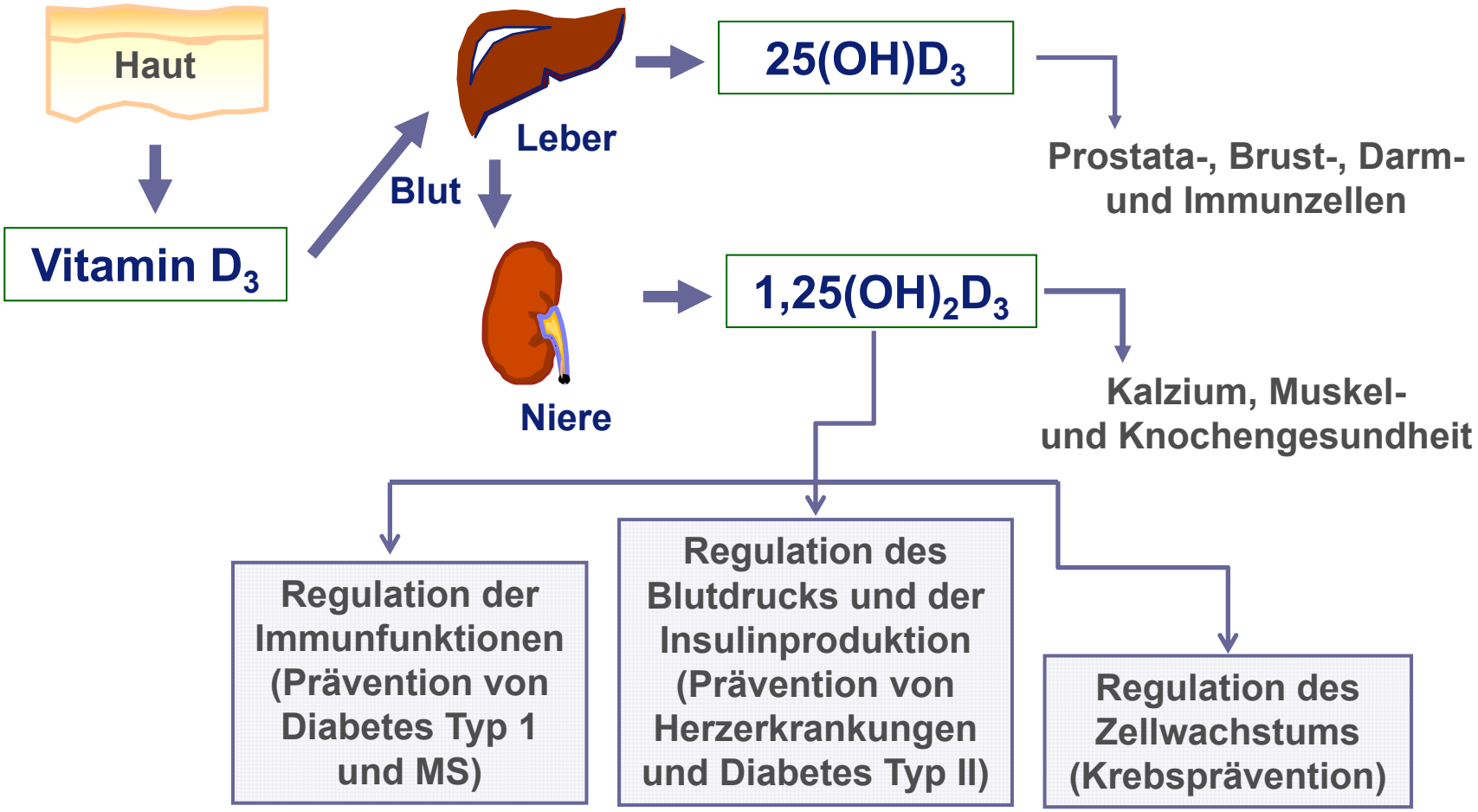
4. Photobiologie - Wirkung von UV

Prävitamin D_3-Bildung in der Haut



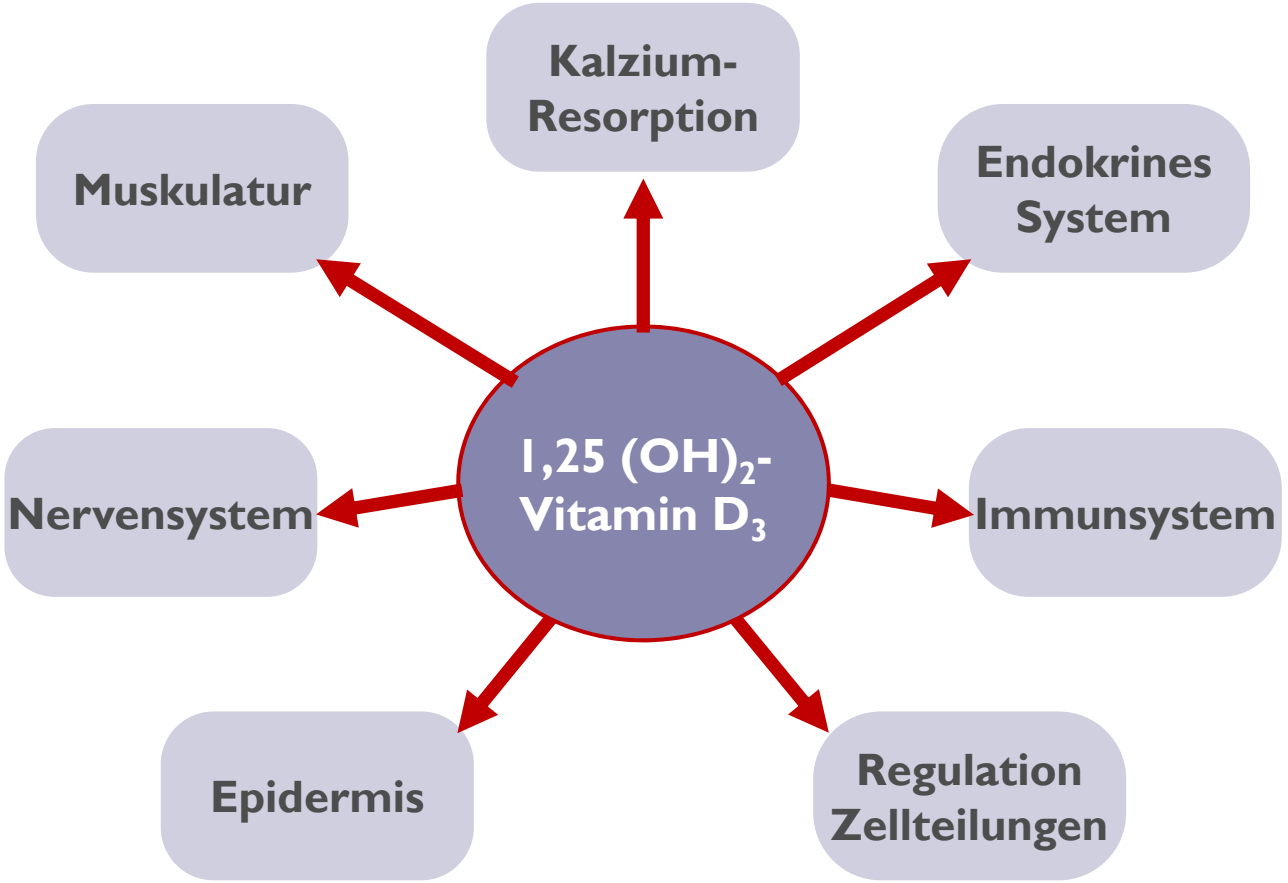
4. Photobiologie - Wirkung von UV

Wirksubstanzen des Vitamin D_3



4. Photobiologie - Wirkung von UV

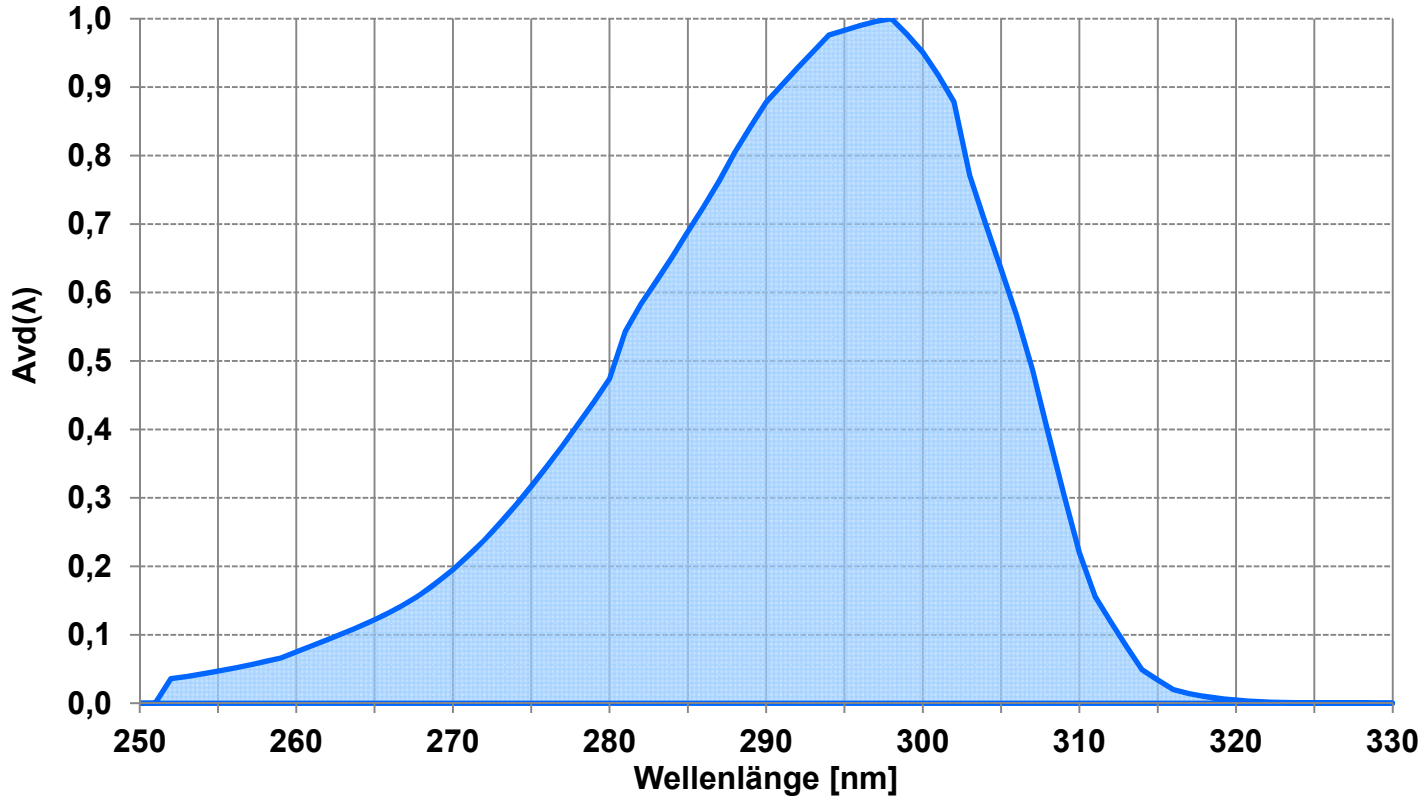
Systemische Wirkungen der UV-Strahlung



→ Vitamin D: „Das Superhormon“

4. Photobiologie - Wirkung von UV

Wirkungsspektrum für die Provitamin D_3-Bildung in humaner Haut



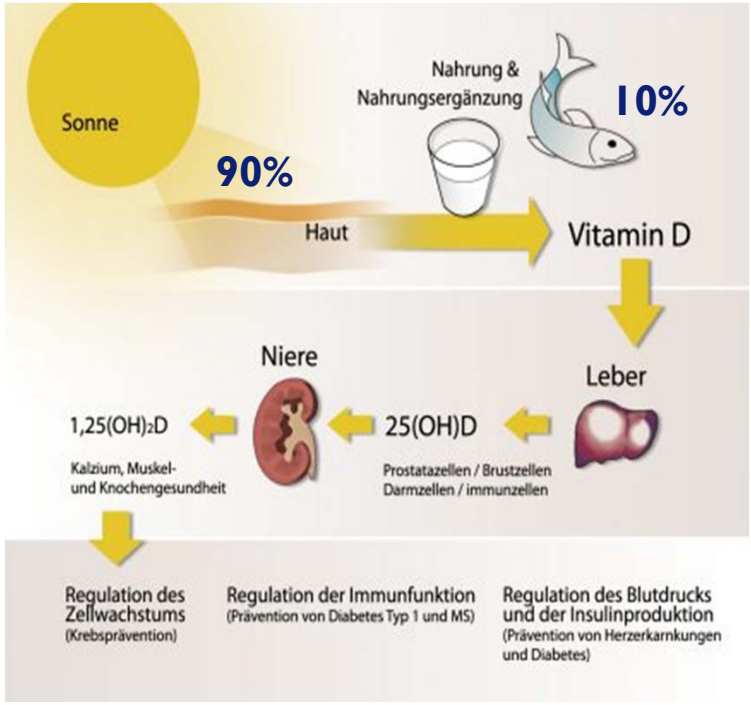
5. Photomedizin - Wirkung von UV

Behandlung von

- Tuberkulose (Schwindsucht) seit ca. 1895
- Rachitis seit etwa 1920

→ Sanatorien in Davos, Braunwald usw.
→ Anwendung von Sonnenlicht

Effekt: Bildung von Vitamin D_3
- hocheffektiv in der Haut
- via UV-B Strahlung
- Verbesserung der Immunreaktionen!



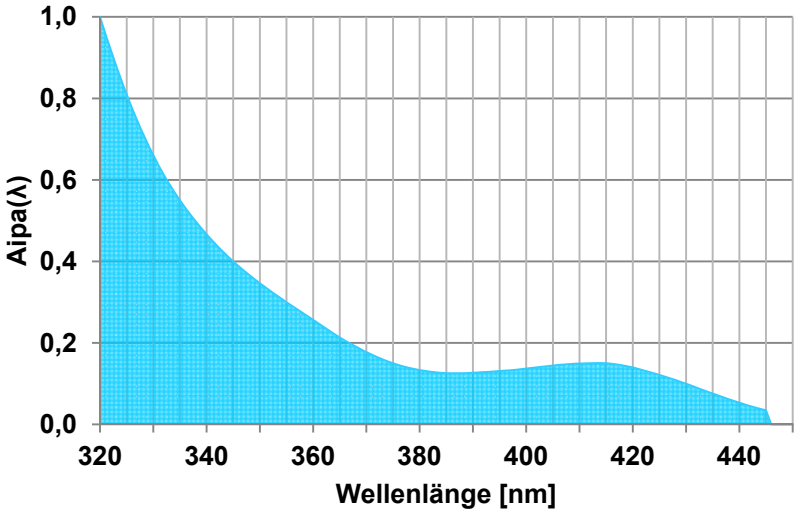
Vitamin D_3-Konzentration im Blutserum
- Mangel: < 20 ng/ml
- Optimal: 30 - 100 ng/ml
- Intoxikation: > 150 ng/ml

5. Photomedizin - Wirkung von UV

Indikationen in der modernen Dermatologie

- Psoriasis (Schuppenflechte)
- Lichtdesensibilisierung (PLE, „Sonnenallergie“)
- Atopische Dermatitis (Neurodermitis)
- Vitiligo (Weißfleckenkrankheit)
- Seborrhoisches Ekzem
- Akne

Wirkungsspektrum der Inaktivierung von Proprioni Acnes Bakterien



5. Photomedizin - Wirkung von UV

Hautkrankheiten, die mit UV-B behandelt werden

- Psoriasis
- Atopische Dermatitis (Ekzeme)
- Seborrhoeische Dermatitis
- Vitiligo (Weißfleckenkrankheit)

UV-Bestrahlungskammer (Waldmann Typ UV100) Emission bei 311 nm

Bestrahlungskammer mit 8 Hg-Niederdruck-entladungslampen mit UV-B Leuchtstoff (GLBB)

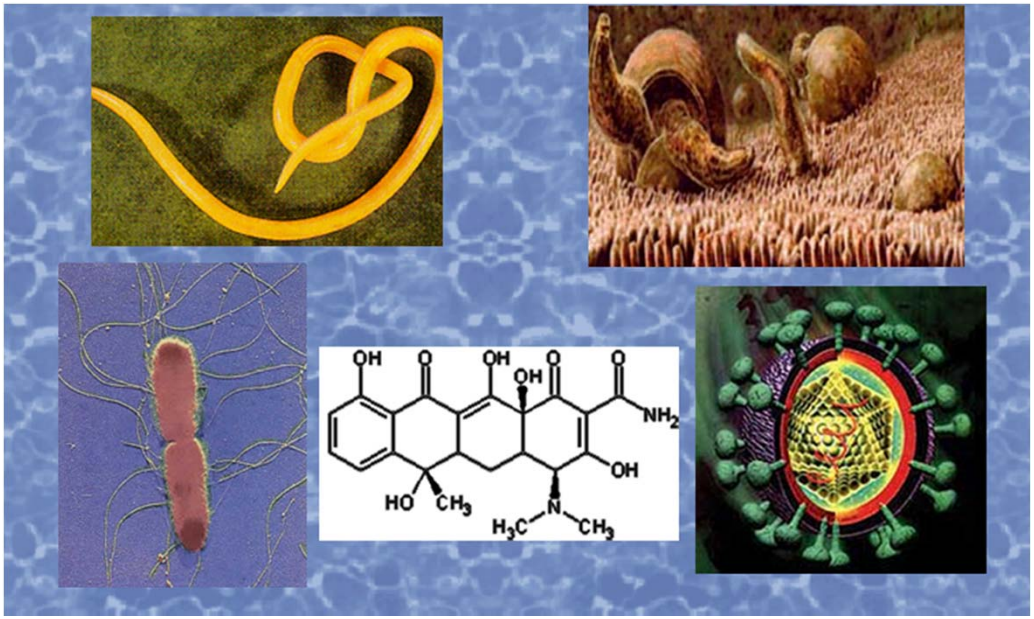
Verbesserung der Psoriasis durch eine UV-B-Therapie

6. Photochemie - Wirkung von UV

Aufbereitung von Trink-, Prozess- und Abwasser

Desinfektion (Inaktiv. von Mikroorganismen)

Oxidation (Abbau von Mikroschadstoffen),
z.B. Hormone, Medikamente, Herbizide etc.

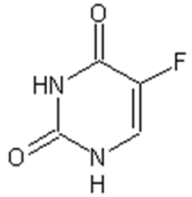


UV-C Strahlung

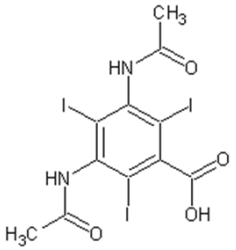
Vakuum-UV
UV-C und Ozon
UV-C und Wasserstoffperoxid
UV-A und Photokatalysator

6. Photochemie - Wirkung von UV

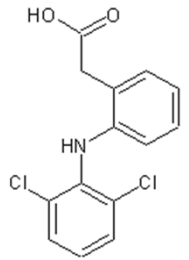
Einige kritische Pharmazeutika im Oberflächenwasser



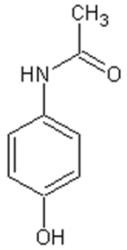
5-Fluorouracil – Zytostatikum



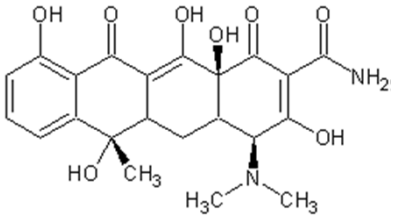
Natriumamidotrizoat – Röntgenkontrastmittel



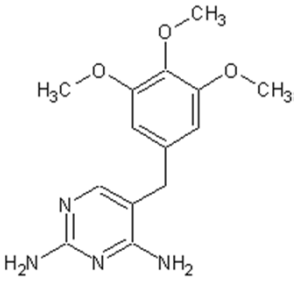
Diclofenac – Analgetikum



Paracetamol – Analgetikum



Tetracyclin – Antibiotikum



Trimethoprim – Antibiotikum

Staat / Verbindung	Deutschland 2000	Deutschland 2001	Österreich 1997	England 2000	Schweiz 2004	Australien 1998	Dänemark 1997	Frankreich 1999
Paracetamol [t/Jahr]	641.86	621.65	35.08	390.9	95.20	295.9	0.24	2294

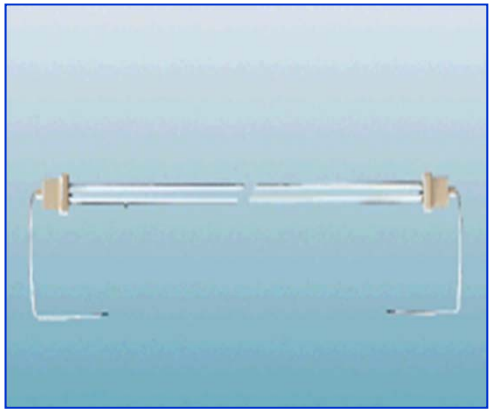
6. Photochemie - Wirkung von UV

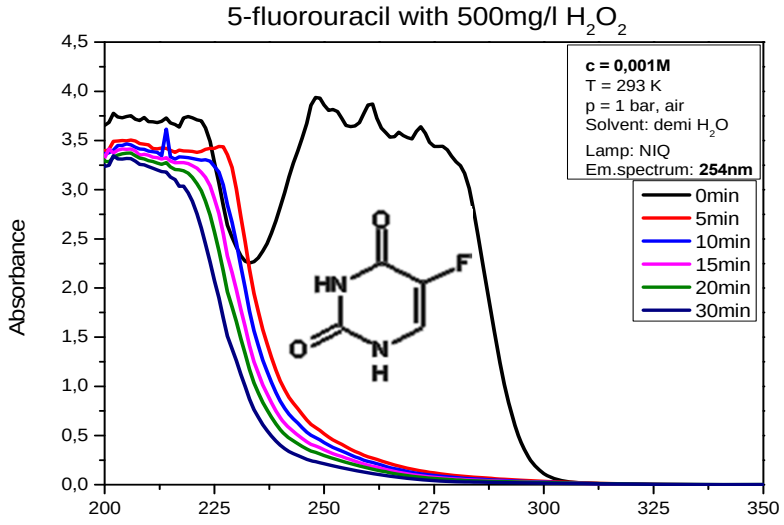
Aufbereitung von Trink-, Prozess- und Abwasser

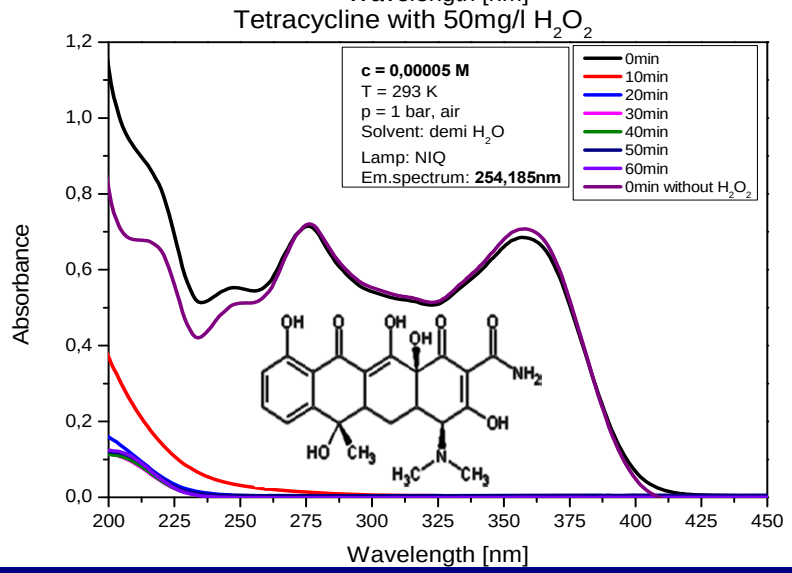
→ **Mineralisation von Mikroschadstoffen**

Geeignete UV-Strahlungsquellen

- **Quecksilberdampflampen**
- **UV LED**
- **Xe-Excimerstrahler**







7. Zukünftige Entwicklungen

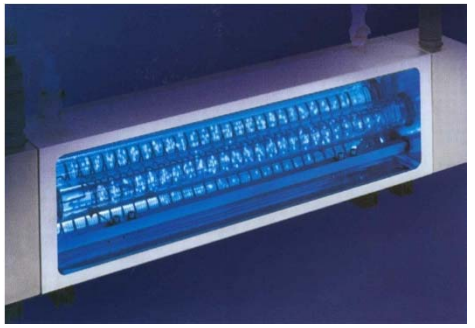
Quellen auf Basis einer Excimerentladung (Sauerstoff oder Xenon)

Ozongenerator (Wedeco AG)

Abgasbehandlung (Siemens AG)

UV-Strahlungsquellen (Xenon)

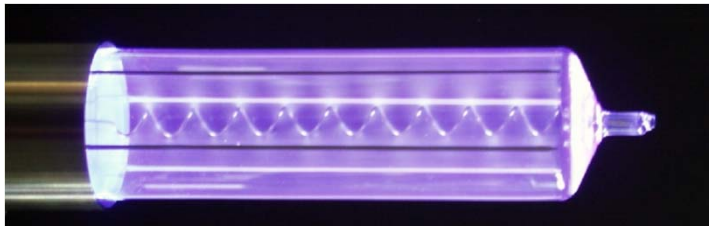
Heraeus Noblelight



Triton

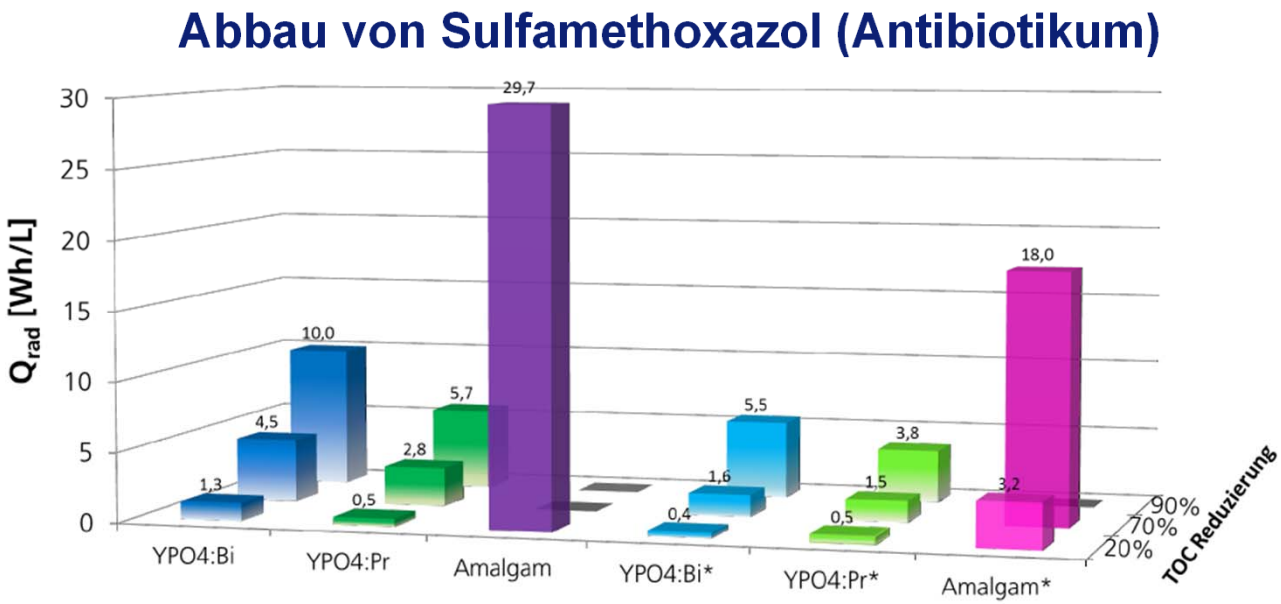
Flachlampe für LCD-Bildschirme (Osram AG)

Osram Xeradex



7. Zukünftige Entwicklungen

Xe-Excimerstrahler mit UV-C Konvertermaterialien

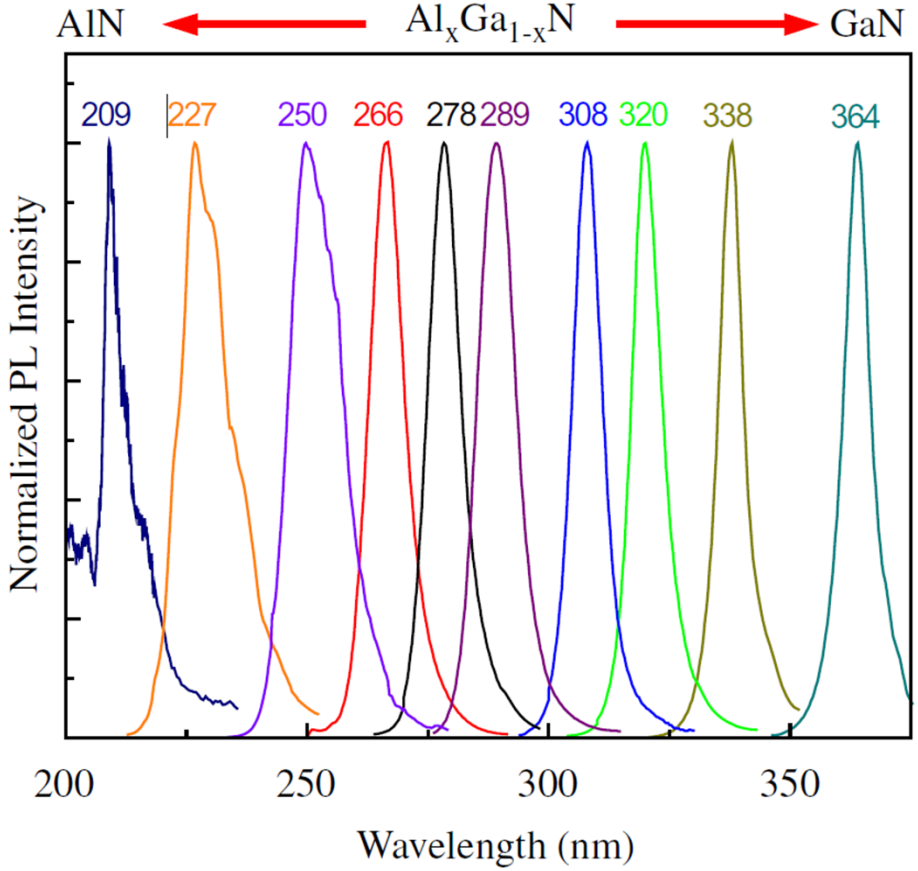


Quelle: A. Nietzsch, DLR

Photolyse mit Xenon-Excimerstrahlern mit einem 225 oder 235 nm Konverter erlauben eine Energieeinsparung von bis zu 95% gegenüber Amalgamstrahlern

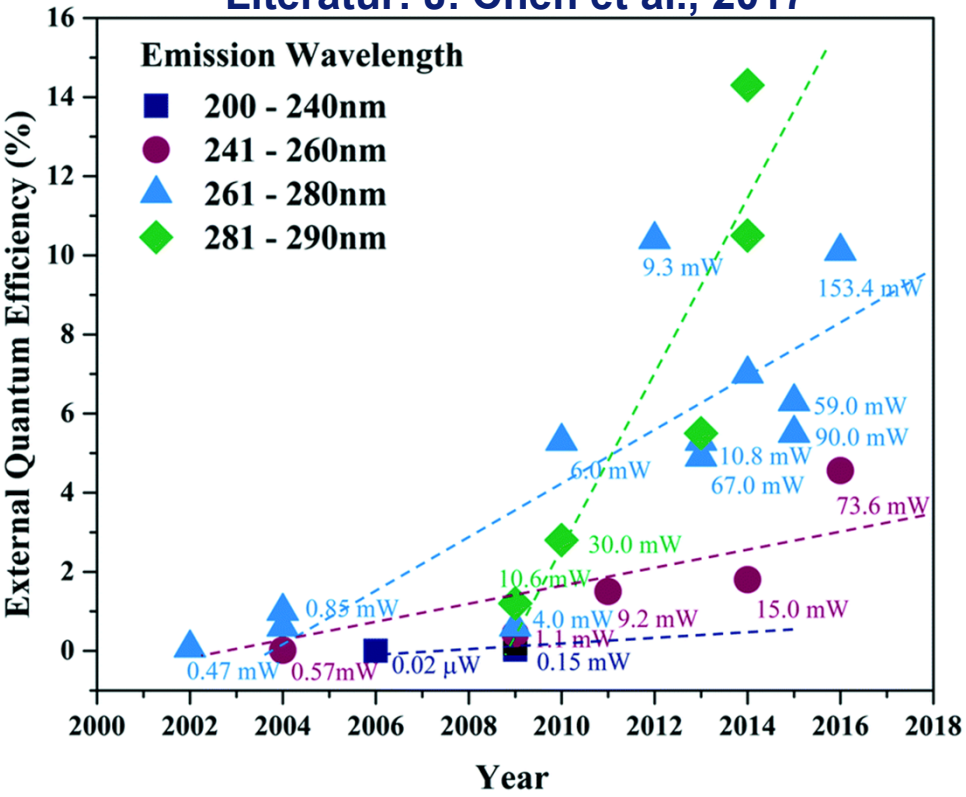
7. Zukünftige Entwicklungen

UV emittierende LED - (Al,Ga)N Halbleiter



UV-Spektren von (Al,Ga)N Halbleitern

Literatur: J. Chen et al., 2017



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

7. Zukünftige Entwicklungen

UV emittierende LED - Status 2017

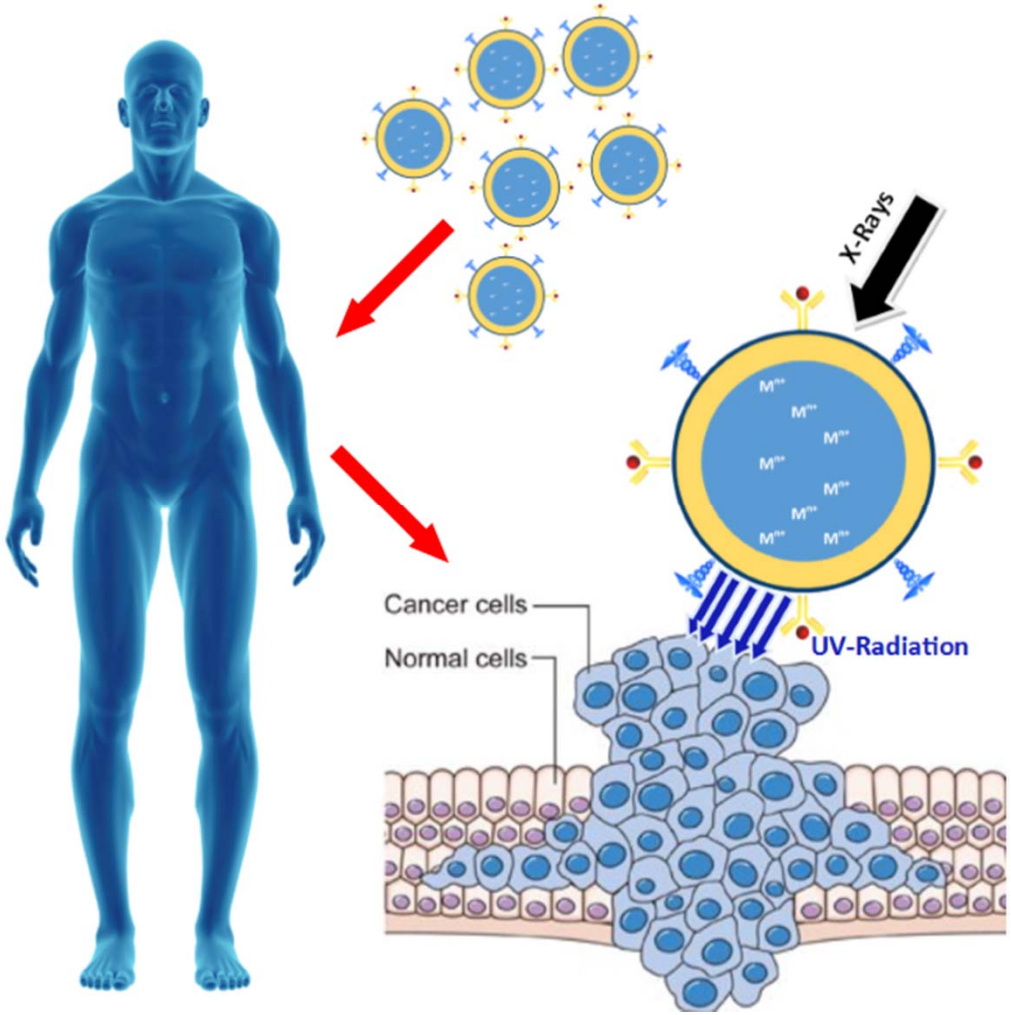
- UV-A emittierende (In,Ga)N LED (365 – 400 nm) mit hoher Effizienz weltweit am Markt

- UV-B bzw. UV-C emittierende (Al,Ga)N LEDs (210 – 320 nm) zeigen rasante Entwicklung bzgl. Effizienz und UV-Leistung
  Hauptproblem: Lebensdauer und Verkapselung

- Januar 2013: United Nations Environmental Program (UNEP) empfiehlt Hg-Verbot ab 2020

7. Zukünftige Entwicklungen

Neue Anwendung: UV-C Strahlung in der Strahlentherapie von Krebs



Ziel

Reduktion der Strahlenbelastung durch Konversion der Röntgen-strahlung in therapeutisch hoch-wirksame UV-C Strahlung mit Hilfe von Nanopartikeln

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
- J. Spitz, Superhormon Vitamin D, Gräfe und Unzer Verlag, 2011
- J. Chen, S. Loeb, J-H. Kim, LED Revolution: Fundamentals and Prospects for UV Disinfection Applications, Envir. Sci.: Water Res. Technol. 3 (2017) 188

Internet-Links

- Homepage T. Jüstel — www.fh-muenster.de/juestel
- 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
- Dt. Krebsforschungszentrum — www.dkfz.de
- Felix-Burda-Stiftung — www.darmkrebs.de

VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT!

FRAGEN?