

Wasserentkeimung mit UV:
Potenziale von LEDs

Dr. M. Peil, H. Maiweg, Dr. S. Schalk
Heraeus Noblelight GmbH

Überblick

- **Speziallichtquellen von Heraeus Noblelight**
- **Wasserentkeimung mit UV Licht:**
 - Motivation, Prinzipien, Anforderungen, aktuelle Technologien
- **UV LEDs:**
 - Aufbau, Eigenschaften, Stand der Technik UV-C
- **Herausforderungen und Potenziale in Hinblick auf die Wasserentkeimung mit UV-C LEDs**
- **Zusammenfassung und Perspektive**

Heraeus Noblelight – Zahlen und Fakten

- **Weltweit einer der Markt- und Technologieführer bei der Herstellung von Speziallampen und -lichtquellen.**
- **Entwicklung, Fertigung und Vertrieb von kundenspezifischen Infrarot- und Ultraviolettstrahlern für Anwendungen z.B. in Produktion, Umweltschutz, Medizin, Kosmetik und Analytik.**
- **Weltweit anerkannte Labors zur Messung und Anwendung von UV- und IR-Strahlung.**
- **Umsatz: 90 Mio. € im Jahr 2007**
- **Mitarbeiter: weltweit 666 zum Jahresende 2007**

Wer wir sind: Unsere Geschäftsbereiche



Heraeus Noblelight GmbH mit weltweiten Tochtergesellschaften

Industrielle Prozess- technik	Optik und Analytik	Oberflächen- und Umwelttechnik	Laser Lampen	Amba Lampen	Optoelektronik
IR- und UV- Strahler und Systeme	UV-Lampen	UV-Lampen und Module	Kontinuierliche Lampen und Puls Lampen	UV-Lampen	LED Lampen

UV Wasserentkeimung:
Prinzipien, Anforderungen
und aktuelle Technologie

Warum Wasserentkeimung?

- **Weniger als 1% des verfügbaren Wassers ist Trinkwasser**
 - **Weltweiter Bedarf an Trinkwasser wächst kontinuierlich**
 - **>1 Mrd. Menschen haben keinen Zugang zu Trinkwasser**
 - **Verschmutztes Trinkwasser ist Ursache von Krankheiten oft mit Todesfolgen**
 - **Die Verfügbarkeit von reinem Wasser ist auch essenziell für Haushalts- und Industrieanwendungen, Ackerbau, Wasserwirtschaft, ...**
- ⇒ **Wachsender Bedarf an ökologischen und ökonomischen Methoden zur Wasseraufbereitung**

Etablierte Methoden zur UV Wasserentkeimung

- Chlorung (~0,5 Eurocent/m³)
- Ozon-Behandlung (~2 ct/m³)
- Mikro- und Ultrafiltration (~40 ct/m³)

- **UV Entkeimung:** (~1 ct/m³)
 - **Zerstörung von DNA / RNA**
 - „Advanced Oxidation“:
 - Direkte Wasser-Photolyse
 - UV + Ozon
 - VUV + Wasserstoffperoxid

⇐ Fokus

Chlorung

Pro:

- **Einfach** anzuwendende Methode
- **Sehr kostengünstig**
- **Chlor-Rückstände** im Verteilungssystem **verhindern Rekontamination**
- **Flexible Dosierung mögl.**
- **Schädliche Geruchsspuren können beseitigt werden**

Kontra:

- Gefährdende **Beiprodukte**
- **Inhärente Toxizität**
 - Sicherheitsmaßnahmen
 - teure Entchlorung
- **Überdosierung mögl.**
- **Resistenzen** (z.B. *Cryptosporidium*)
- **Veränderter Geschmack, Geruch und pH-Wert**

Ozon-Behandlung

Pro:

- Effektiver als Chlor bei der Zerstörung von Viren und Bakterien
- Schneller Abbau
- Nur geringe Entwicklung gefährdender Beiprodukte
- Erzeugung vor Ort: keine Transport- und Abfertigungsprobleme

Kontra:

- Komplexere Methode
- Aggressives chem. Verhalten bedarf korrosionsbeständiger Materialien
- Gesundheitsrisiko bei Gasaustritt
- Relativ teure Technologie
- Keine Rückstände zur Effizienzermittlung

Mikro- und Ultrafiltration

Pro:

- **Verbesserung** der **Gesamt-Wasserqualität**
- **keine** gefährdenden **Beiprodukte**
- **Überdosierung** nicht mögl.
- **Geschmack, Geruch** und **pH-Wert** unverändert

Kontra:

- **Aufwendige Methode**
- **Rekontamination** möglich
- **Sehr teuer** da hohe **Energiekosten**
- **Wartungsintensiv**
- **Rückwaschprozess** bedarf **hohe Wassermengen**
- **Bio-Faulung** der **Filter**

UV Entkeimung

Pro:

- **Wirksam gegen chlor-resistente Pathogene:** (z.B. Cryptosporidium)
- **Sehr kostengünstig**
- **Einfacher Betrieb**
- **Keine bekannten gefährdenden Beiprodukte**
- **Sichere, wissenschaftlich fundierte Technologie**

Pro:

- **Schnelle Durchlaufzeiten** ⇒ kleinere Reaktoren
- **Keine Überdosierung mögl.**
- **Keine Gefahrenstoffe**
- **Geschmack, Duft und pH-Wert unbeeinflusst**
- **Effizienz unabhängig von pH-Wert und Wassertemperatur**

UV Entkeimung

Kontra

- **Rekontamination möglich**
- **Effizienz von der Qualität (Trübung) des einlaufenden Wassers abhängig**
- **Reinigung der Hüllrohre notwendig**
- **UV Dosis muss kontinuierlich überwacht werden**

**Gesamtheit ⇒
UV Entkeimung
~1/3 Marktanteil
des Entkeimungs-
equipments**

Technologien der UV Wasser-Aufbereitung

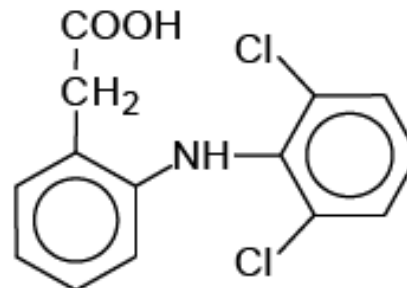
— Entkeimung

- Bakterien
- Viren
- Parasiten
- Pilze



— „Advanced Oxidation“

- Endokrin wirksame Stoffe
- Pharmazeutika
- Körperpflegeprodukte
- Pestizide
- Herbizide
- 1,4-Dioxane
- Treibstoffe und Additive



Anwendung: Prozess- und ultrareines Wasser



Anwendung: Wasser- und Abwasser Behandlung

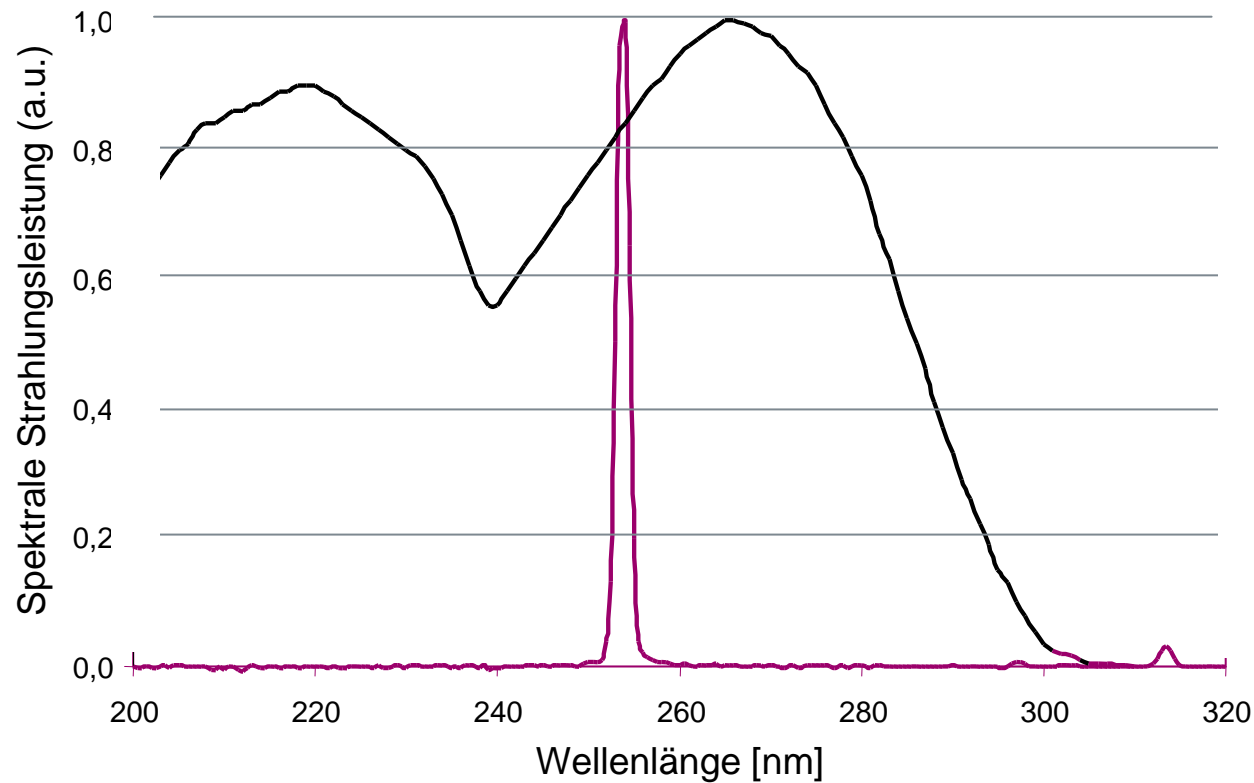
Trinkwasser Desinfektion



Abwasser Aufbereitung

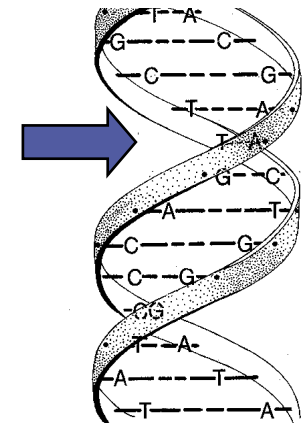


Prinzip der UV Entkeimung



— Spektrum Niederdrucklampe — Zellen-Inaktivierung (Beisp: Coli-Bakterie)

UV
Photon

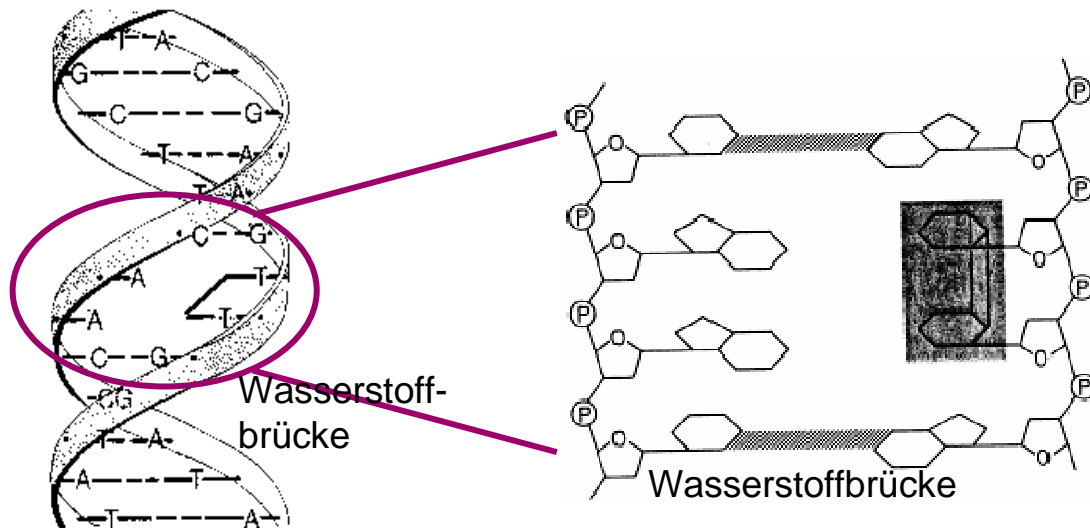


254 nm UV Licht
hat ausreichend
Energie zur
Inaktivierung von
z.B. Bakterien

Schädigung von DNA mit UVC

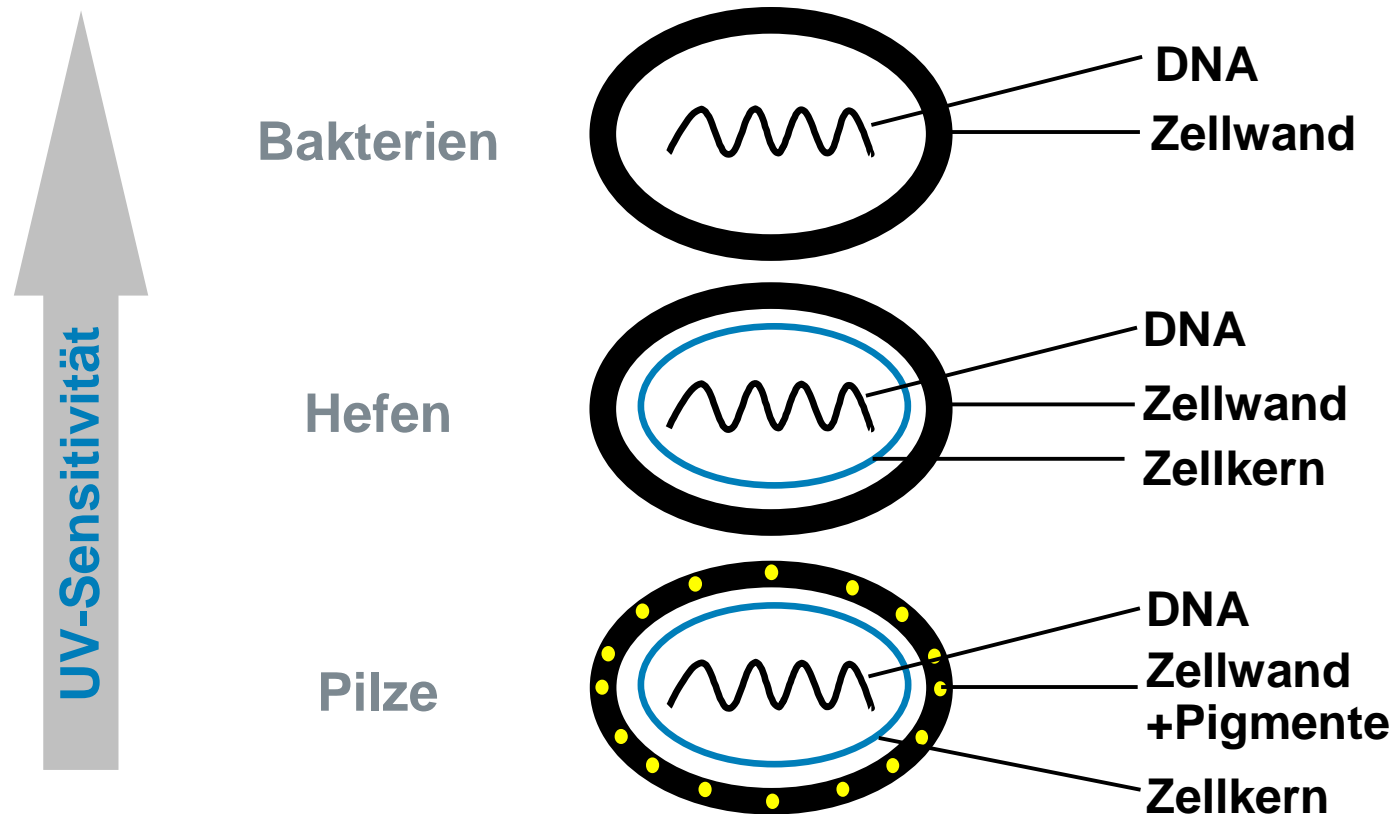
DNA Doppelhelix

Thymin-Dimer-Bildung
der wichtigste der
UVC-Schäden



Nokleotid:
Desoxiribose und
Phosphorsäure als
Grundgerüst + Base

UV-Sensitivität verschiedener Mikroorganismen



Typen der erweiterten Oxidation mit UV

— Direkte Photolyse

- Hoch-energetische VUV Strahlung bricht direkt chemische Verbindungen

— UV / Ozon

- Ozon wird dem Wasser zugesetzt und wird durch UV aktiviert
- VUV Strahlung erzeugt Ozon das dem Wasser zugeführt wird
 $O_2 + hv (185 \text{ nm}) = O + O$; $O_2 + O + M = O_3 + M$
- Ozon ist ein stark oxidierender Wirkstoff im Wasser

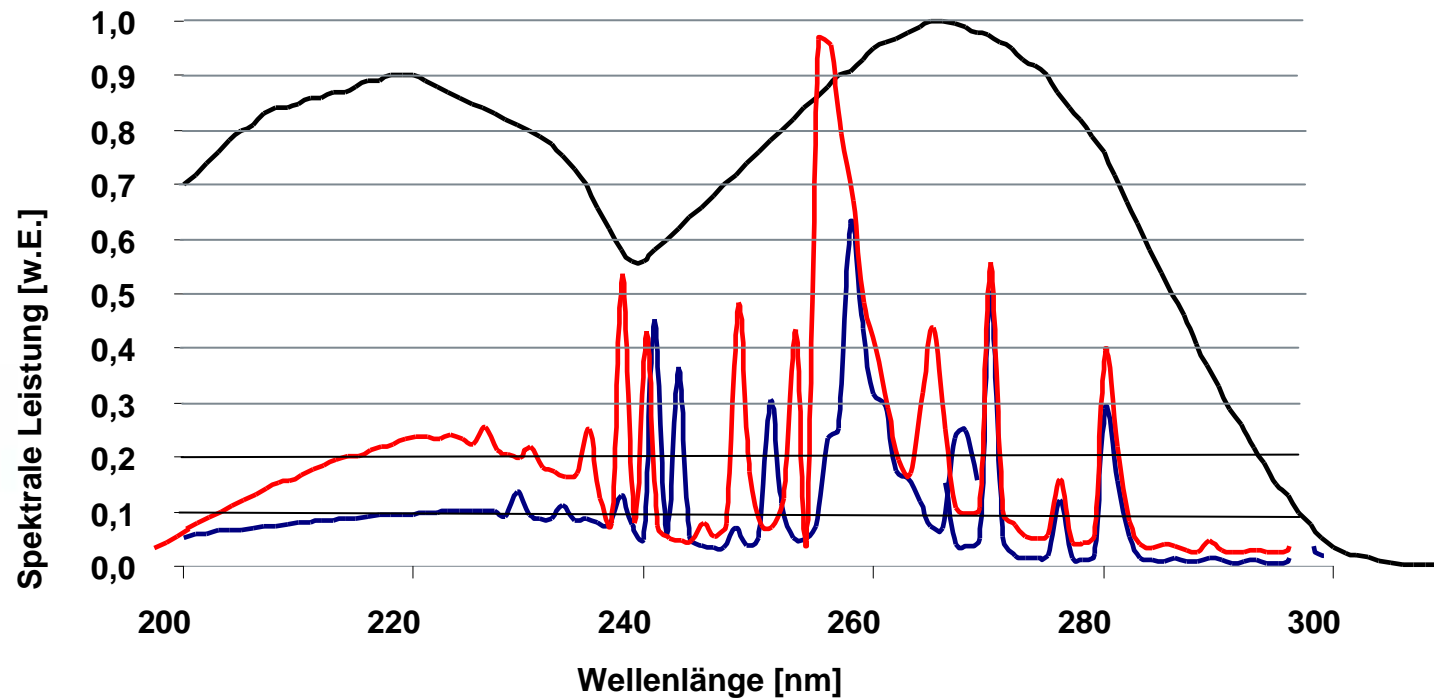
— VUV in Verbindung mit Wasserstoffperoxid (H_2O_2)

- H_2O_2 wird Wasser zugeführt, das durch ein UV System fließt
- UV photolysiert H_2O_2 zu Hydroxyl-Radikalen
 $H_2O_2 + hv (185 \text{ nm}) = HO\bullet$
eines der stärksten Oxidationsmittel im Wasser

Vorteile der unterschiedlichen UV Lampen

	Standard Niederdruck	Hochleistungs- Niederdruck	Mitteldruck	Amalgam langlebig
UV Emission	185nm, 254nm	185nm, 254nm	polychromatisch	185nm, 254nm
Wandtemperatur (°C)	30-50	> 50	500 - 950	90 -120
Strom (A)	0.3 - 0.4	0.8 - 1.3	5 - 20	1.2 - 6.0
Elektrische Leistung (W)	5 - 80	10 - 150	400 - 60,000	40 - 600
Spezifische el. Leist. (W/cm)	0.3 - 0.5	0.5 - 1.0	50 - 250	1.0 - 4.0
Spezif. UVC Fluss (mW/cm)	< 200	< 350	< 35,000	< 1000
UVC Effizienz, 254nm (%)	30 - 40	25 - 35	5 - 15	35
Einfluss T _{Umgebung}	hoch	hoch	niedrig	niedrig
Lebensdauer	8000	>5000	5000	16000

Spektrale Eigenschaften von Mitteldrucklampen



— Zell-Inaktivierung Mitteldruck: — Standard — Hochleistung

Entkeimung mit UV-C Lampen

- **Trinkwasser** (Häuser, Kommunen, Städte), **Abwasser**, **Oberflächen-, Prozess- und Ballastwasser ...**
 - Sehr diversifizierter Markt: Systemleistung und -Geometrie
- **Essenzieller Spektralbereich: 250 nm – 285 nm**
- **Minimale Dosis $\sim 40 \text{ mWs/cm}^2$ \Rightarrow 99,9 %-ige Inaktivierung von Bakterien, vieler Hefen und mancher Pilze**
- **Typ. Mitteldrucklampe:**
 - $P_{\text{elektr}} = 300 \text{ W}$
 - **Effizienz:** $P_{\text{UV-C}} / P_{\text{el}} \sim 10 \%$
 - **Kosten:** $\sim 1 \text{ €/Watt optisch}$

Maßstab: „Aktuelle“ Entkeimungssysteme für Wohnhäuser

— Endverbraucher

- Bedarf an Trinkwasser: 1 – 10 l/min
- System mit niedriger Lampenleistung: 6 - 20 W ($P_o \sim 0,6-2$ W)
- Geringe Systemkosten (SK) < 150 €

— Einspeisung in die Wasserversorgung

- 1 - 9 m³/h \Leftrightarrow < 150 l/min
(Städte bis > 10.000 m³/h mit > 20 kW UV Leistung)
- Reaktoren TUV-, G- und Amalgam-Lampen
- R-Can, Sterilight, 1 m³/h SK.: < 250 €
- R-Can, Sterilight, 4 m³/h SK.: < 700 €

⇒ **Realisierung mit LEDs?**

UV LEDs für die
Wasserentkeimung

Vorteile / Potenziale von LEDs

— VIS-LEDs:

- Robustheit
- Kompaktheit
- Gerichtete Emission möglich
- Definierte Wellenlänge
- Geringe Wärmeabstrahlung
- Schaltbarkeit
- Effizienz
- Lebensdauer
- Gleichstrombetrieb (Solarbetr.)
- Quecksilberfreie Technologie
- Kostengünstig

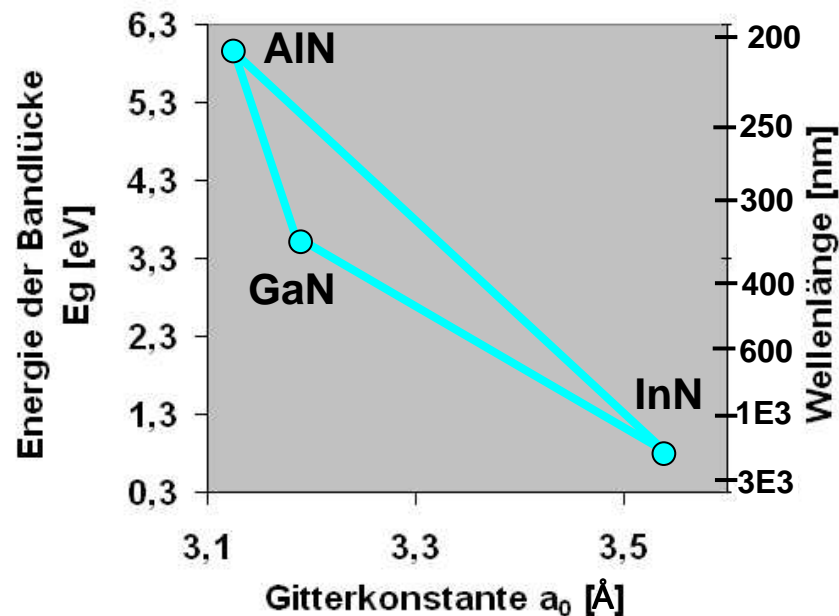
— UV-C LEDs:

- ✓
- ✓
- ✓
- ✓
- ✓
- ✓
- noch gering
- noch gering
- ✓
- ✓
- derzeit nicht



Potenziale
für
Entkeimung?

UV-C LEDs aus III-V Verbindungshalbleitern

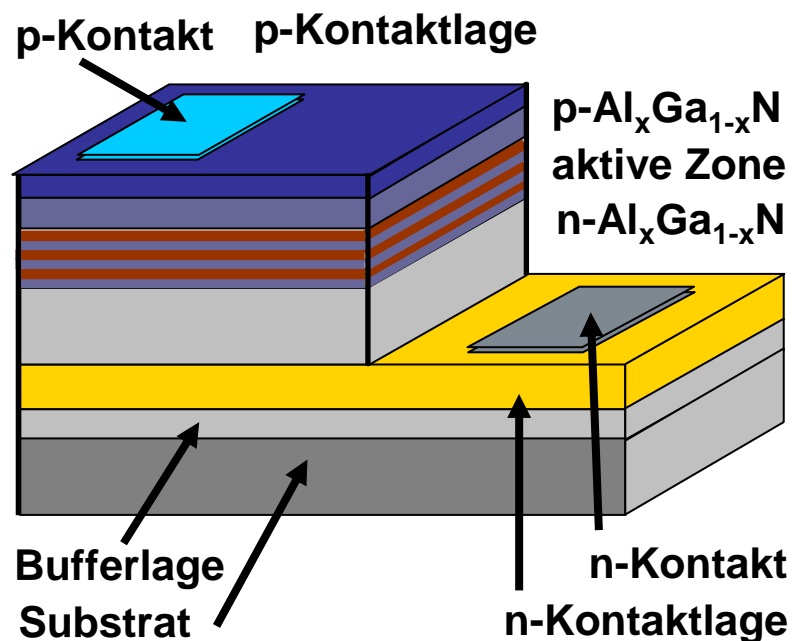


III-Nitride bieten:

- Direkten Bandübergang
- 250–280 nm mit AlGaN (AlInN)
- Ähnliches a_0 für $Al_xGa_{1-x}N$:
- Gute Elektronenbeweglichkeit
- Gute thermische Leitfähigkeit
- Chem. und therm. Stabilität

⇒ AlGaN attraktiver Halbleiter für UV-C LEDs

Struktur einer „typischen“ UV-C LED



Typische Struktur:

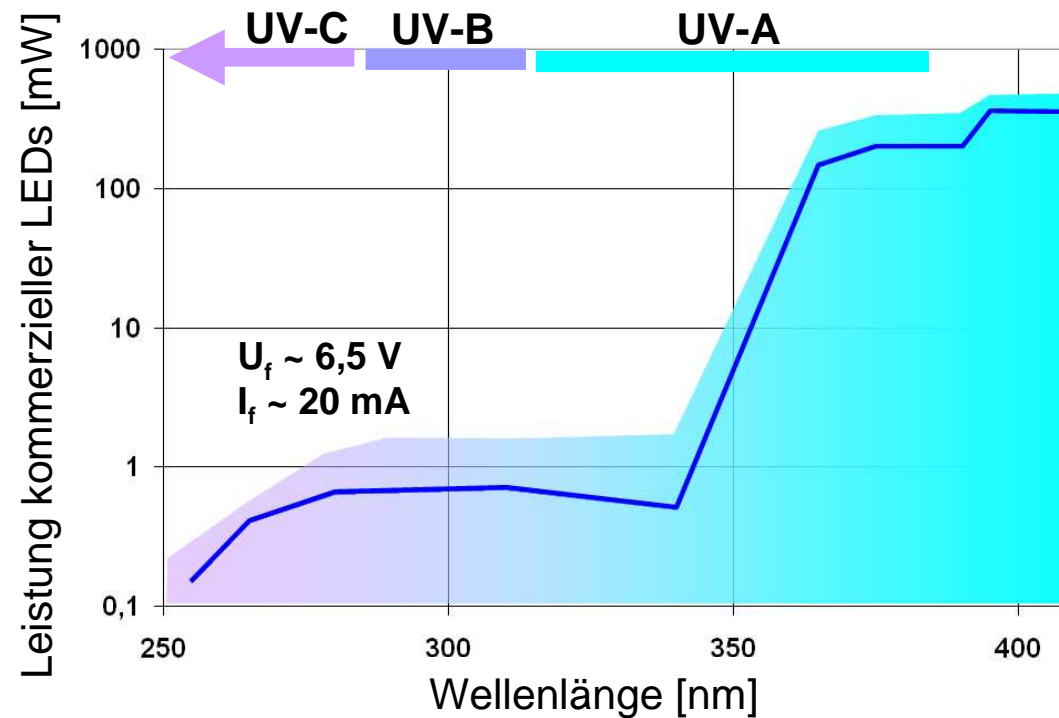
horizontal, p-Seite oben,
auf Si oder SiC Substrat

— Kritische Faktoren:

- Absorption: p-Schicht + Substrat
- „Current crowding“ Effekte
- Schlechte thermische Anbindung
- Hohe Defektdichten durch Gitter-Mismatch mit Substrat

⇒ **Keine optimale Effizienz
und Lebensdauer**

Leistungen kommerzieller UV LEDs



- Geringes P_o um 265 nm
- Gesamteffizienz typ. < 1 %
- Lebensdauer typ. < 1000 h
- Preis derzeit >> 10 €/mW

Herausforderungen

- **Entwicklung effizienter und langlebiger UV-C LEDs (Struktur, Materialien, Epitaxie, Verbindungstechnik)**
- **Optimale Nutzung des emittierten Lichtes im Reaktor (Mikro-Optiken, Reaktordesign, Beschaltung)**
- **Anpassung und Optimierung der Betriebsbedingungen der LED Lampen auf die Anwendung**
- ⇒ **Erschließung erster Anwendungen**
 - ⇒ **Begünstigung der Preisentwicklung (< 1k€/W bis 2013)**
 - ⇒ **Größere, leistungsstärkere Entkeimungsanlagen**

Aktuelle Anwendungspotenziale

UV-C LED Technologie noch sehr teuer und nicht ausgereift, aber Vorteile sind interessant für zeitnahe Anwendungen:

— **Betrieb von LEDs mit Batterien / Solarzellen möglich**

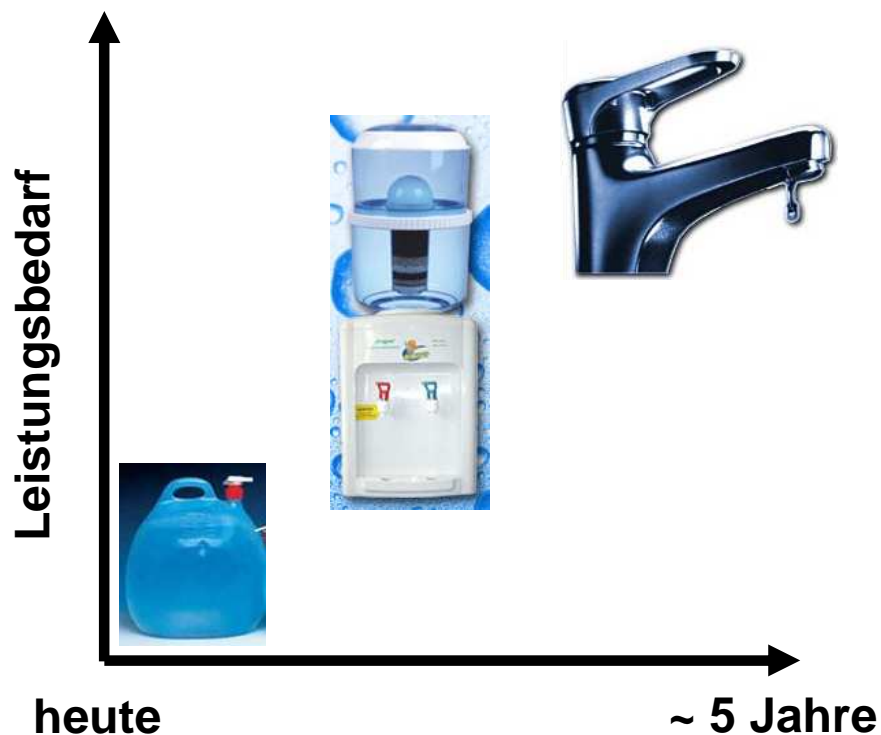
— **Kleinheit und Robustheit erlaubt Realisierung handlicher Entkeimungssysteme**

⇒ **Einsatz in schwer zugänglichen Gebieten ohne Netzstrom**

— **Quecksilberfreie Technologie**

⇒ **Einsatz in kritische Umgebungen, z.B. Krankenhäusern**

Potenziale: Perspektiven der Einsatzbereiche



— Aktuell:

- LEDs: geringe Effizienz, kurze Lebensdauer, sehr hoher Preis
- Batch-Anwendung: Entkeimung kleiner Mengen (Notversorgung, Outdoor)

— Zukunft:

- Verbesserte LEDs, angepasste Betriebsbedingungen und Reaktoren
- Erschließung erster Durchflussanwendungen
- Später: technologischer Fortschritt + günstige Preisentwicklung
⇒ leistungsstärkere Anwendungen

Zusammenfassung

Zusammenfassung und Perspektive

- **Wasserentkeimung mit UV-C LEDs prinzipiell möglich**
- **UV-C LEDs derzeit sehr teuer, ineffizient und kurzlebig, aber von Interesse für mobile, netzunabhängige Entkeimungssysteme**
- **Erschließung kommerzieller Anwendungen durch:**
 - **Entwicklung effizienter und langlebiger Hochleistungs UV-C LEDs**
 - **Wechselseitige Anpassung des LED Lampen- und Reaktor- Designs**
 - **Senkung der Kosten pro Watt ⇒ Marktzugang essentiell (Nischen)**
- ↳ **Realistisches Potenzial für LED Wasserentkeimungs-Anlagen für Konsumenten und Endverbraucher**

Vielen Dank!