

Verbindungshalbleiter- Bauelemente

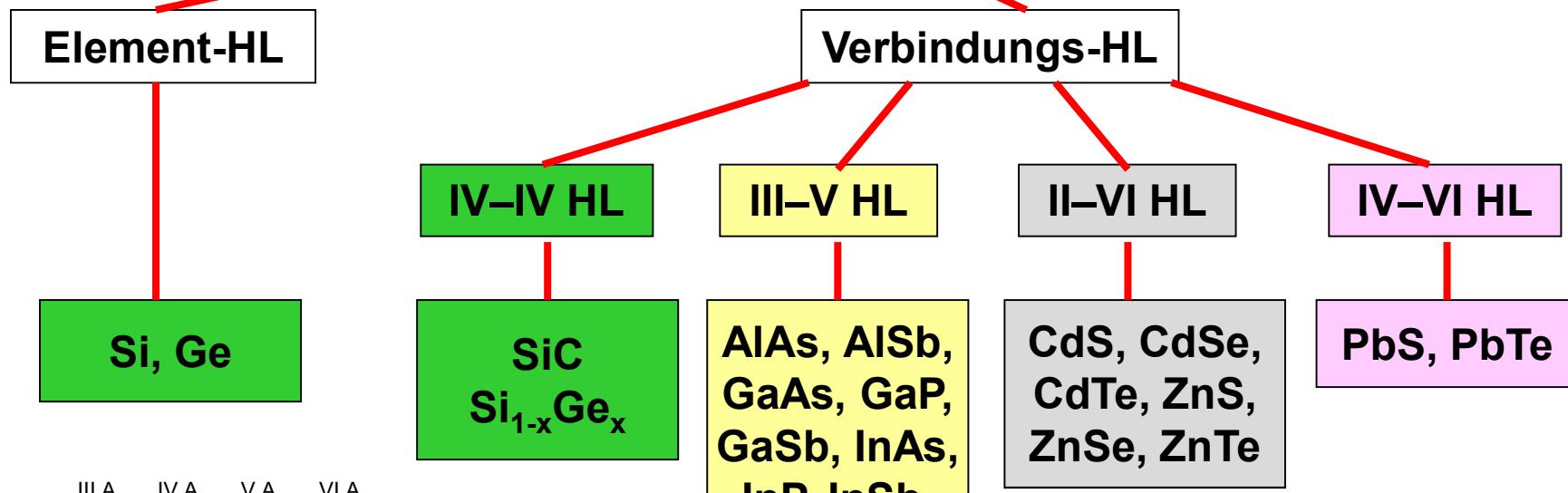
H. Jörg Osten

**Institut für Materialien und Bauelemente
der Elektronik
- MBE -**

**Leibniz Universität Hannover
Schneiderberg 32, 30167 Hannover**

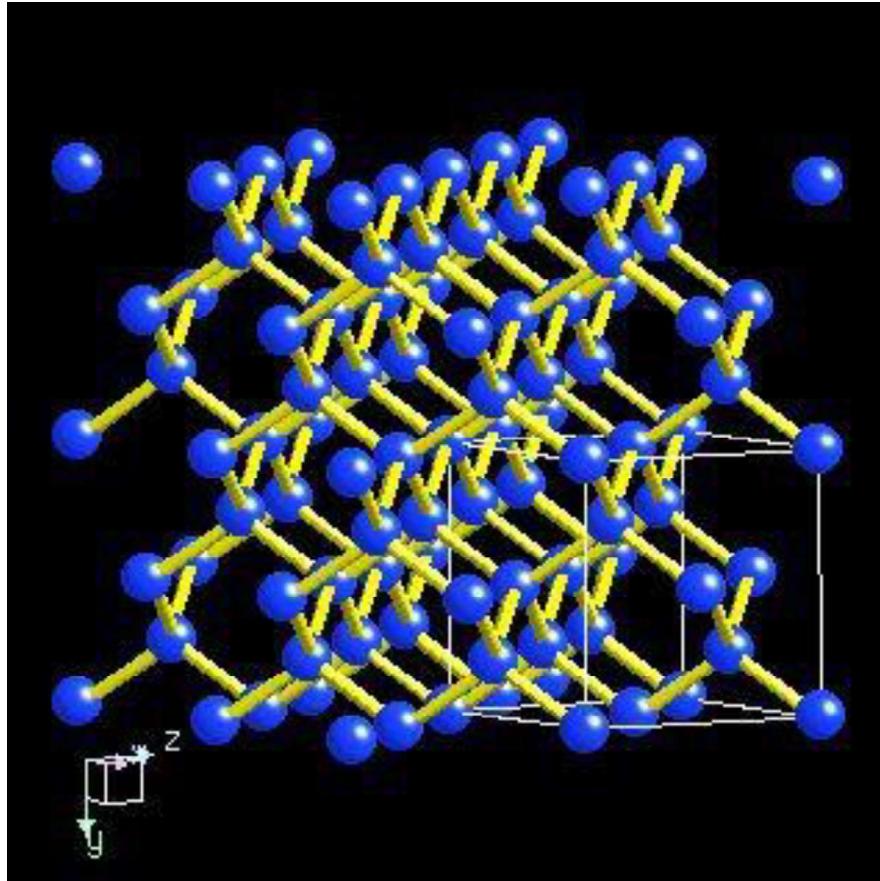
nur für den LUH-internen Gebrauch

Halbleiter

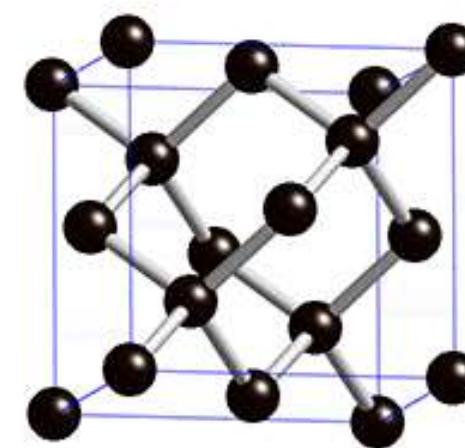


	III A	IV A	V A	VI A
II B	5 B	6 C	7 N	8 O
	13 Al	14 Si	15 P	16 S
31 Zn	32 Ga	33 Ge	34 As	35 Se
49 Cd	50 In	51 Sn	52 Sb	53 Te
80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po

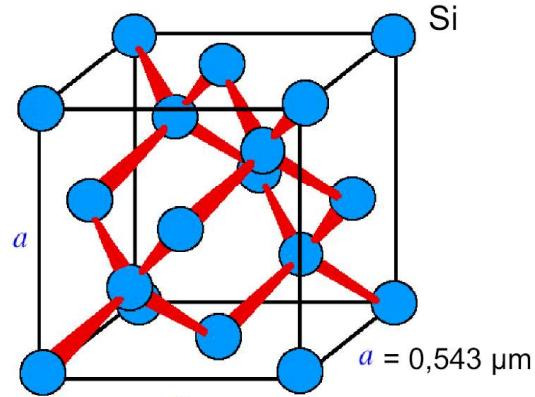
Kristallstruktur von Silizium: Diamantstruktur



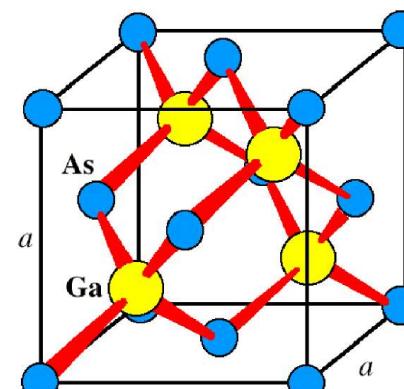
**Kubisches Gitter,
vier Nachbarn
pro Si Atom**



Kristallstruktur einiger wichtiger Halbleiter



Diamantgitter (Si, Ge, C)



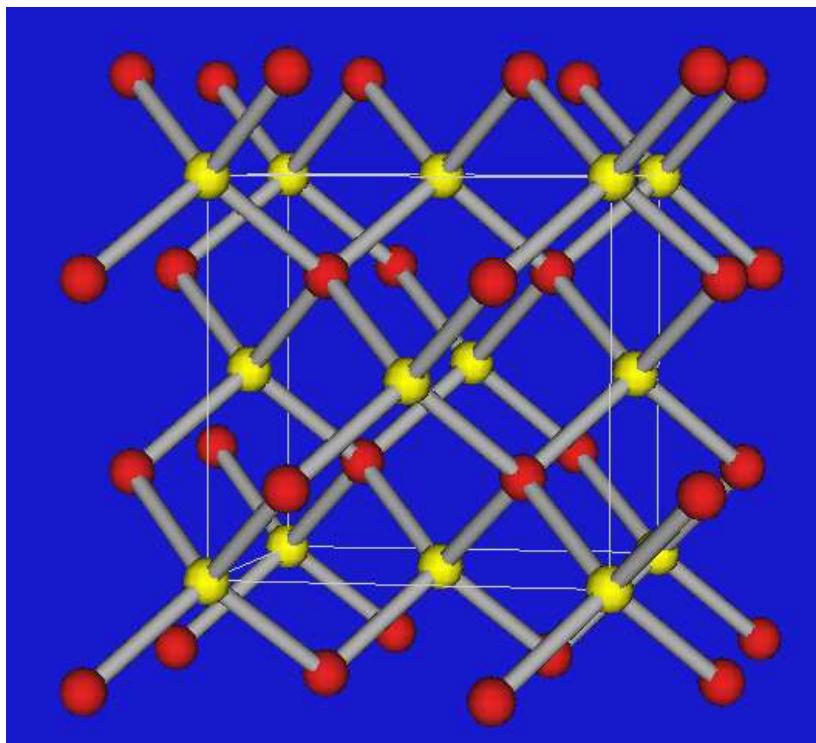
Zinkblendegitter (GaAs, AlAs, InP)

Im Siliziumkristall sind die Atome tetraedrisch angeordnet, wobei sich jeweils an den Ecken und im Zentrum des Tetraeders ein Si-Atom befindet

Diese Struktur tritt auch in verschiedenen Verbindungs-halbleitern auf

Gitter mit zwei Atomsorten: Zinkblende-Struktur

- Namensgeber: ZnS (Zinkblende)
- verschiedene Halbleiter (II-VI- und III-V-Halbleiter)
- Wichtigster Vertreter: Galliumarsenid (GaAs)

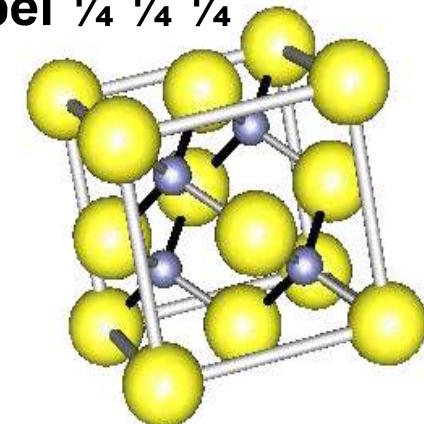


Raumgitter:

- Kubisch flächenzentriert

Basis:

- Zn-Atome bei 000
- S-Atome bei $\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}$



Verbindungshalbleiter: Beispiel GaAs

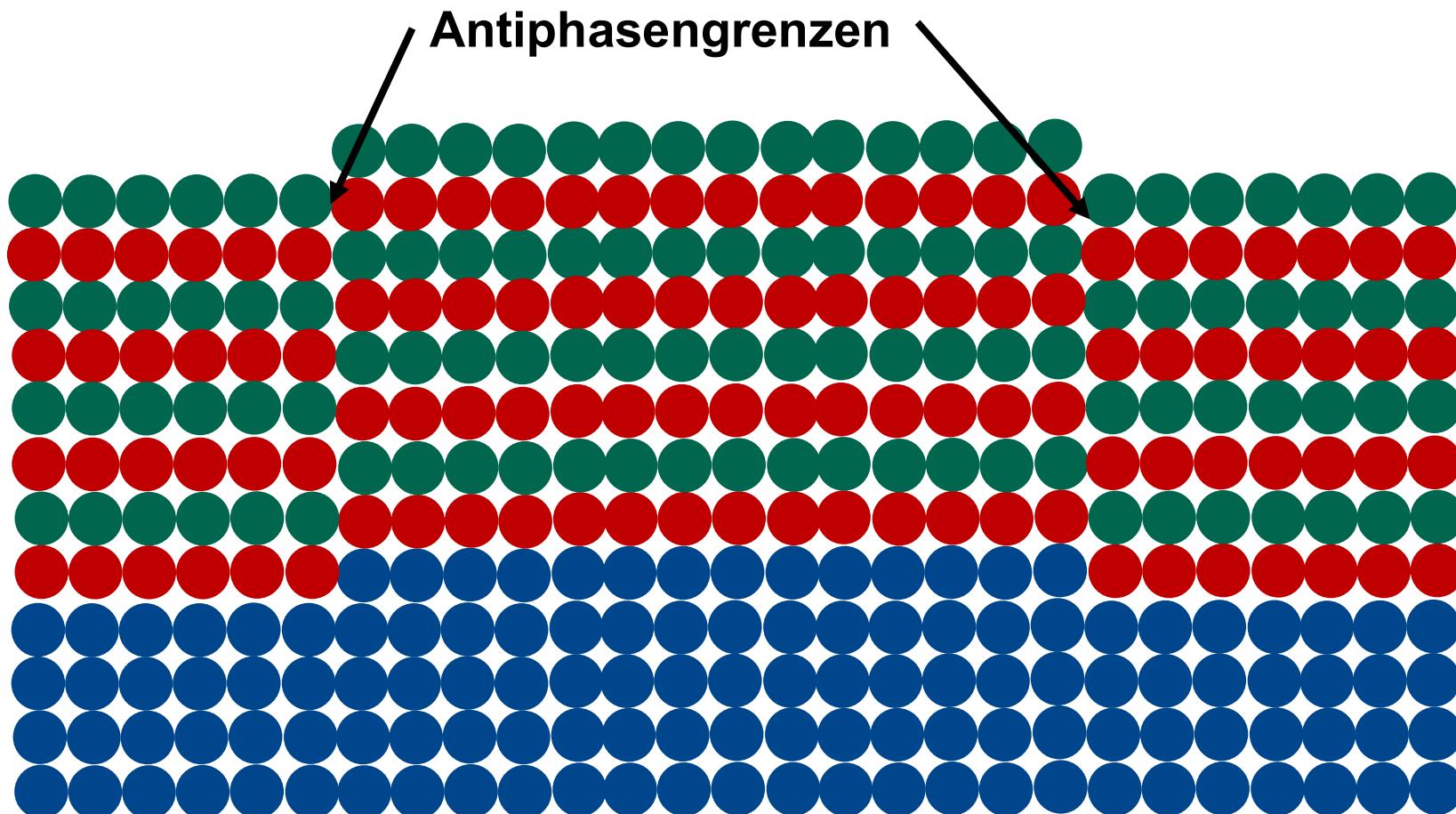
- ein Element der III.-Hauptgruppe (Ga, EN = 1,6) und ein Element der V.-Hauptgruppe (As, EN = 2,0)
Zinkblende-Struktur
leicht polare Bindungen
- Dotierelemente: Atome der IV.-Hauptgruppe
Typisch Si oder C
Si ersetzt Ga: Donator → n-Dotierung
Si ersetzt As: Akzeptor → p-Dotierung
→ technisch schwierig
einfacher: kleinere Atome ersetzen größere Atome
→ C-Dotierung für p-Typ
Allgemein: p-Typ Dotierung von III-V Halbleitern ist oftmals schwierig
- Neuer Defekttyp: Antiphasengrenzen

Antiphasengrenzen: GaAs auf Si(001)

Silizium

Gallium

Arsen



Vergleich der Materialparameter

Eigenhalbleiter - Metall

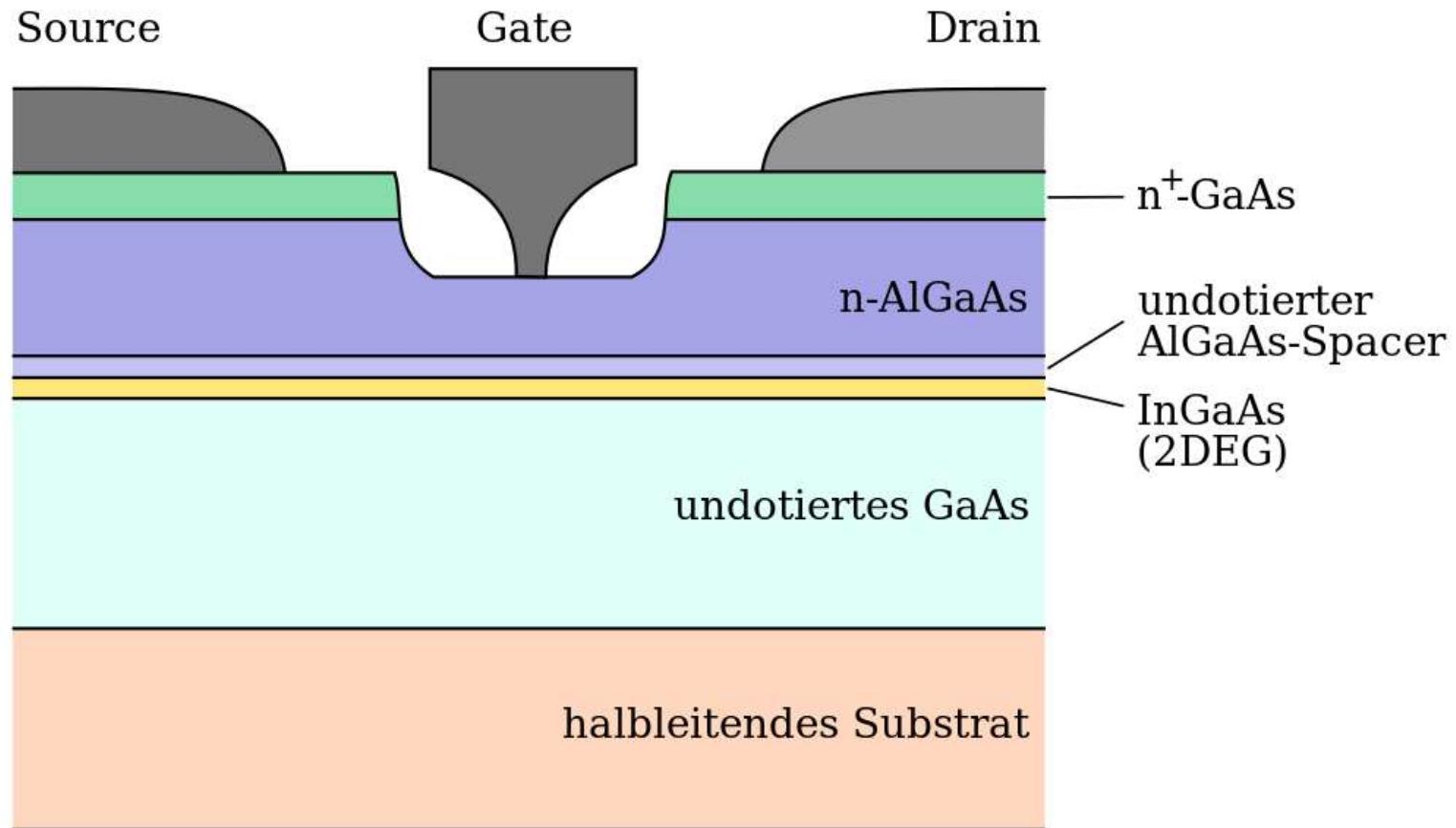
	n_i [cm ⁻³]	μ_n [cm ² /Vs]	μ_p [cm ² /Vs]	ρ [Ωcm]	E_g [eV]
Si	$1.5 \cdot 10^{10}$	1430	505	$2.3 \cdot 10^5$	1.10
Ge	$2.4 \cdot 10^{13}$	3900	1900	45	0.66
GaAs	$1.8 \cdot 10^6$	8000	400	$4.5 \cdot 10^8$	1.42
Cu	$8.5 \cdot 10^{22}$	32	-	$1.7 \cdot 10^{-6}$	-

- unterschiedliche Beweglichkeiten von Löchern und Elektronen
- exzellente Elektronenbeweglichkeiten in GaAs im Vergleich zu Si
- schlechte Löcherbeweglichkeit in GaAs

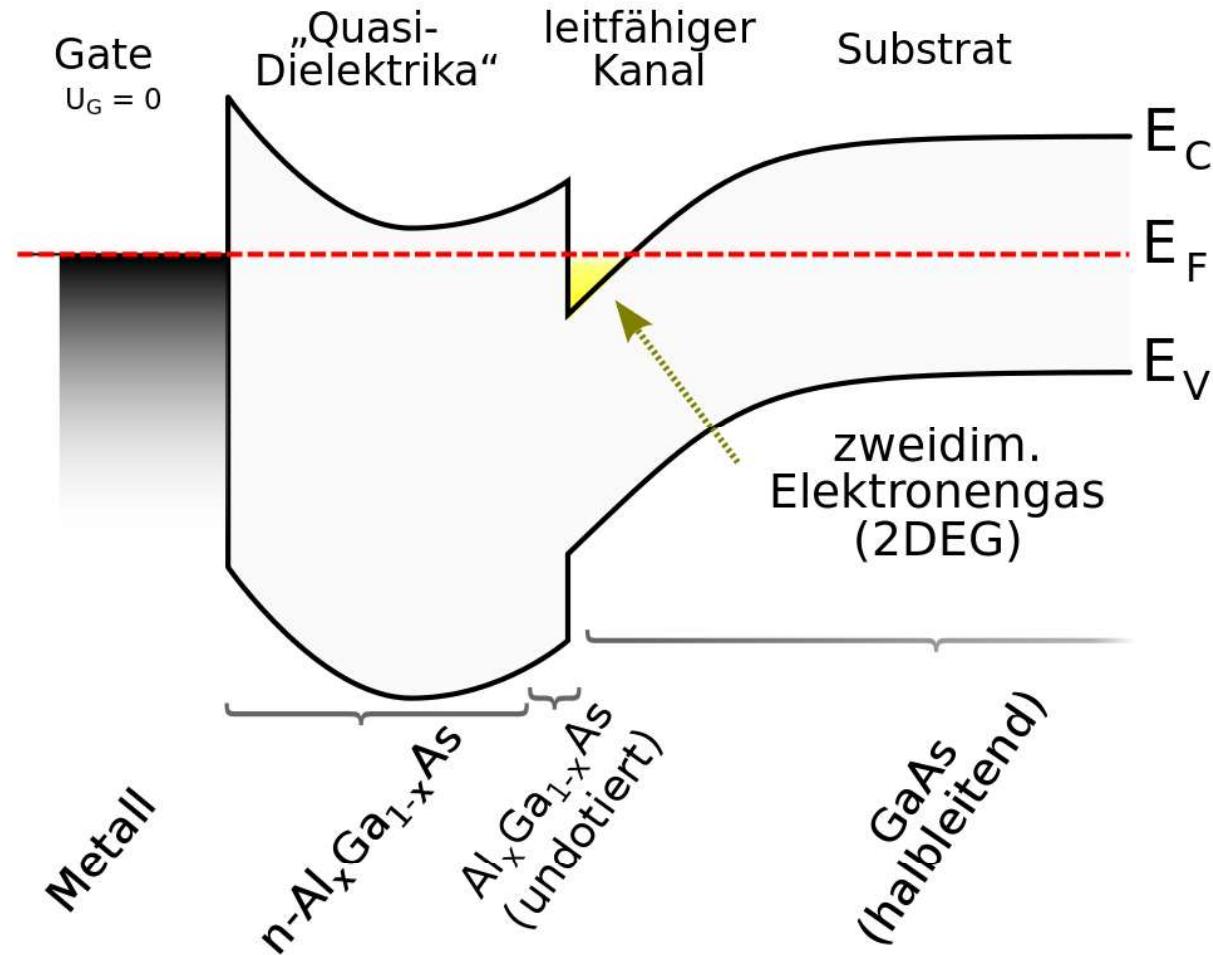
III-V High Electron Mobility Transistor (HEMT)

- andere Bezeichnungen:
 - modulation-doped field-effect transistor (MODFET)*
 - two-dimensional electron-gas field-effect transistor (TEGFET)*
 - selectively-doped heterojunction transistor (SDHT)*
 - heterojunction field-effect transistor (HFET)*
- Er besteht aus mehreren dünnen, übereinander-liegenden Schichten aus Halbleitern wie GaAs, GaN oder Indiumphosphid InP mit unterschiedlichen Bandabständen.
- Entscheidend ist die räumliche Trennung von Elektronen und Donatoren
 - Elektronen stoßen nicht mehr mit den Donatorionen
 - sind in einer Ebene vollkommen frei beweglich
 - HEMTs sind extrem schnell und äußerst rauscharm

III-V High Electron Mobility Transistor (HEMT)



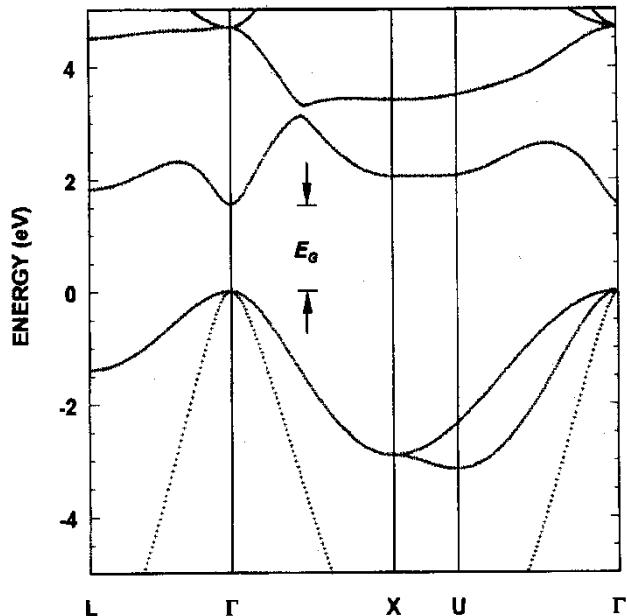
Bandstruktur eines modernen HEMT's



High Electron Mobility Transistor (HEMT)

- Elektronengas dient als leitfähiger Kanal
 - hohe Elektronenbeweglichkeit (→ nur n-Kanal)
 - extrem rauscharm
- Einsatzgebiete
 - Hochfrequenzanwendungen, z.B. Satelliten-Transponder
 - Mikrowellenverstärker
 - Millimeterwellen-HEMTs mit hoher Leistungsdichte (mit Betriebsspannungen von etwa 50 V; bei 30 GHz ist eine Ausgangsleistung von mehreren Watt erreichbar)
 - schnelle Leistungsschalter mit enorm hohen Durchbruchspannungen von mehreren Kilovolt

Bandstruktur: GaAs

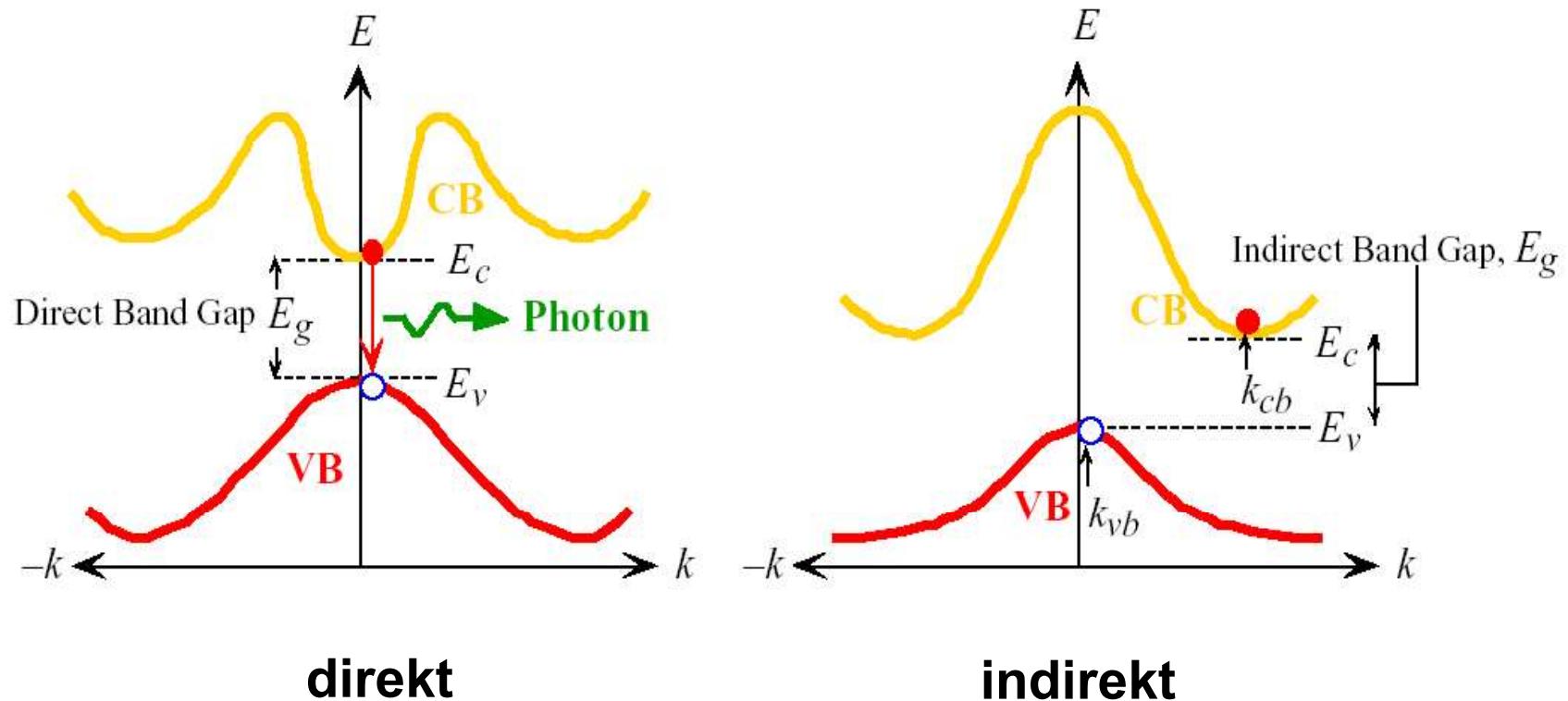


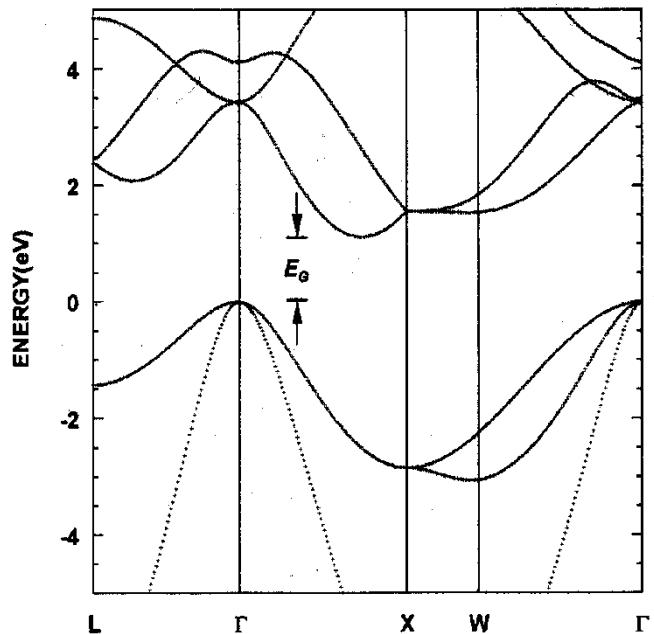
Das Minimum des LB und das Maximum des VB liegen beim selben k-Wert

→ Beim Übergang muss ein Elektron des Valenzbandes die Energie $E_g = E_{LB} - E_{VB}$ aufnehmen, um in das Leitungsbandminimum beim selben k-Wert zu gelangen

- Das Elektron ändert seinen Impuls ($p = 2\pi\hbar k$) dabei nicht!
- Ein derartiger Übergang ist energetisch einfach
- Wir sprechen vom DIREKTEN Halbleiter

Direkter vs. Indirekter Übergang (schematisch)





Das Minimum des LB und das Maximum des VB liegen beim verschiedenen k-Werten im Impulsraum

→ Beim Übergang muss man dem Elektron des Valenzenbandes neben der Energie $E_g = E_{LB} - E_{VB}$ auch noch einen Impuls $\Delta p = 2\pi h (k_{LB} - k_{VB})$ zuführen, um in das Leitungsbandminimum zu gelangen

- Das Elektron muss seinen Impuls ändern!
- Ein derartiger Übergang ist energetisch wenig wahrscheinlich
- Wir sprechen vom INDIREKTEN Halbleiter

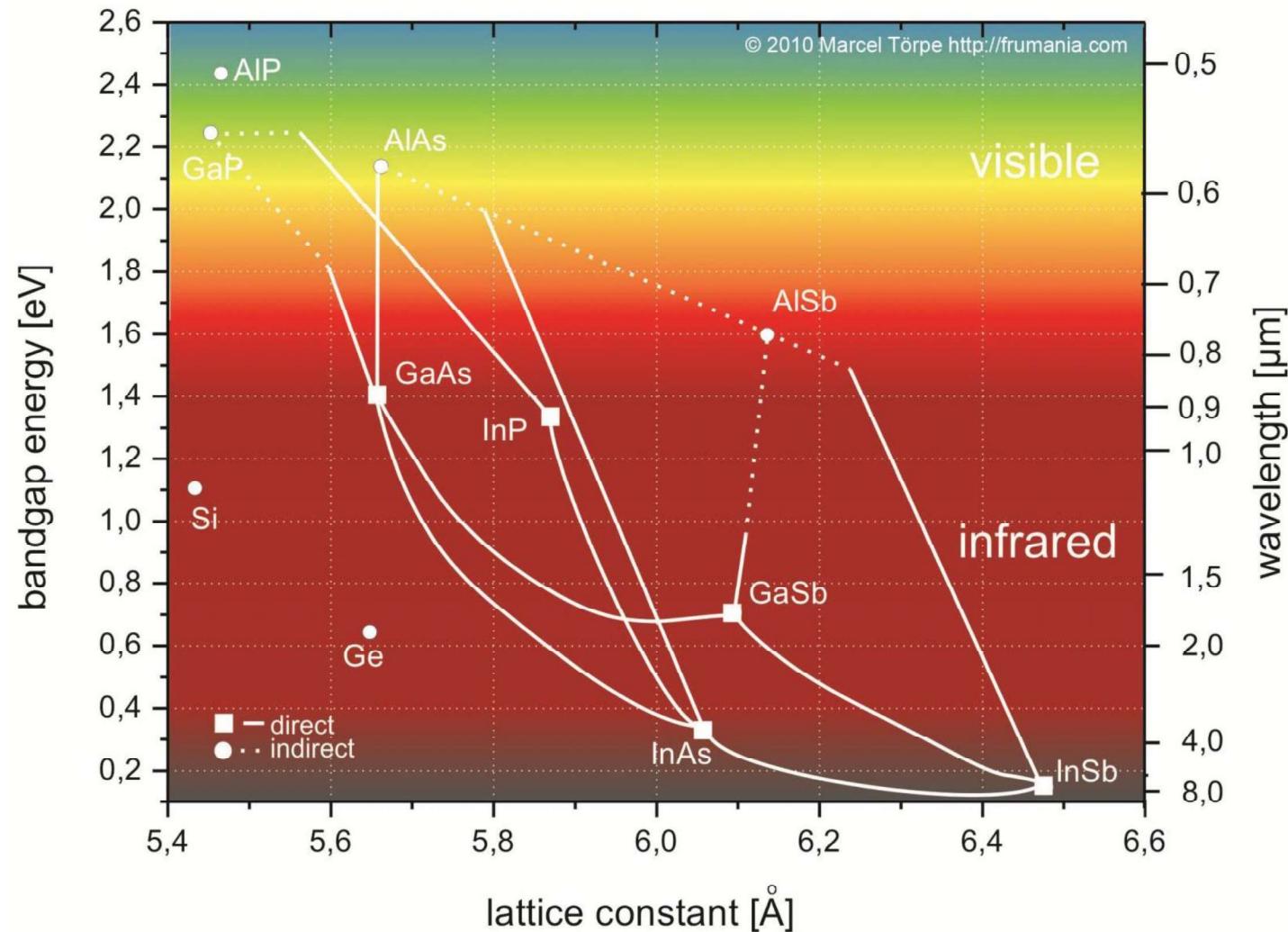
Indirekter Halbleiter und Optik: Beispiel Si

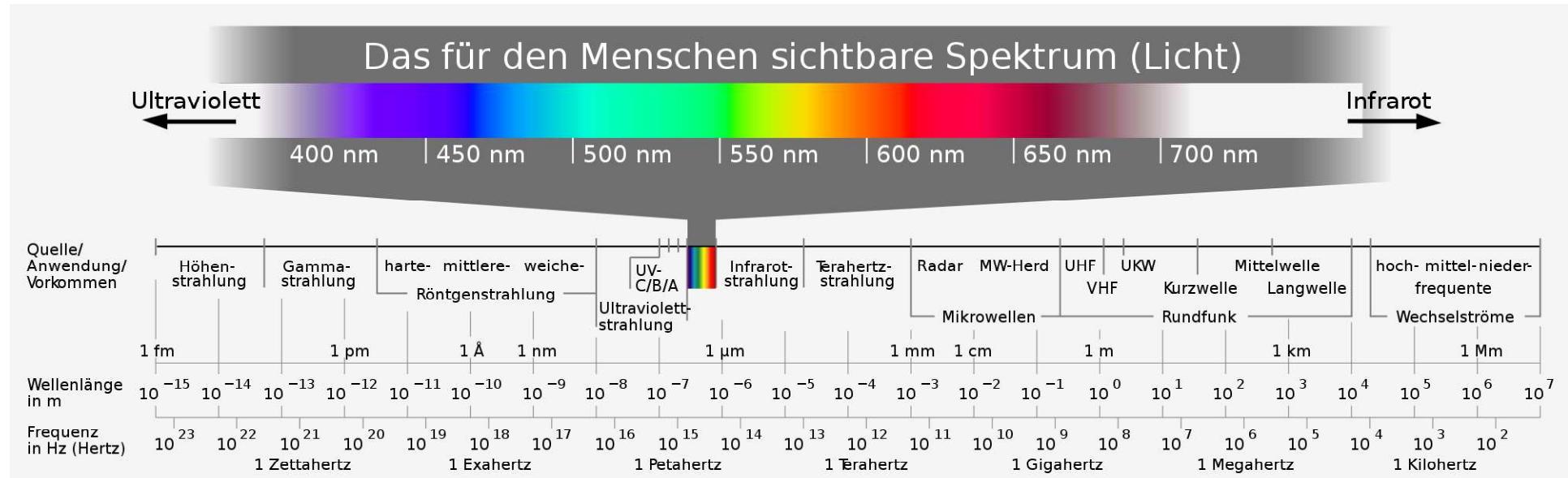
- $E_g = 1.12 \text{ eV}$ (bei RT)
- Licht der Energie $h\nu > E_g$
 - Licht $< 1.1 \mu\text{m}$ wäre nötig um ein Valenzelektron ins Leitungsband zu heben
aber
- der zusätzlich notwendige Impuls beträgt
 $\Delta p = h 0.85/a$ (a - Gitterkonstante = $5.43 \times 10^{-10} \text{ m}$)
Impuls des Photonen: $p_{\text{phot}} = h/\lambda$
für $\lambda = 1.1 \mu\text{m}$: $p_{\text{phot}}/\Delta p = 0.0006$ $\Delta p \sim 1700 p_{\text{phot}}$
 - Die Absorption eines Photons reicht nicht aus für einen Übergang zwischen VB und LB.
 - Indirekte Halbleiter sind optisch nicht aktiv!

Direkter vs. Indirekter Halbleiter

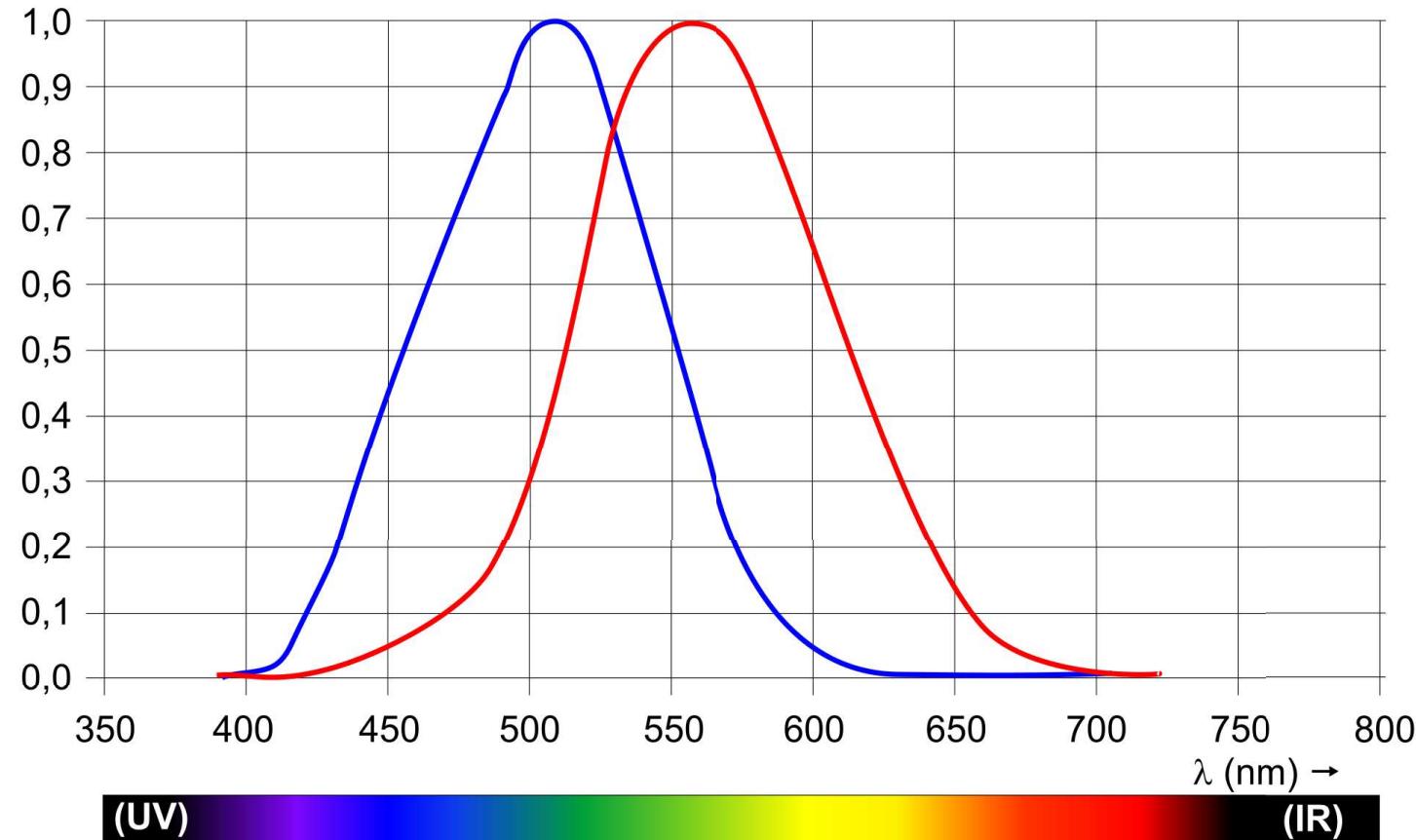
	Direkt	Indirekt
$E_{VB(max)}$ und $E_{LB(min)}$ bei	gleichem k	verschiedenen k
Impulsänderung beim Übergang	nein	notwendig
Übergangs- und damit Rekombinationswahrscheinlichkeit	hoch	niedrig
Lebensdauer angeregter Ladungsträger	kurz	lang
Optoelektronik (LED, Laser usw.)	ja	nein
Vertreter	Verbindungs-halbleiter	Si, Ge

Direkte und indirekte Verbindungshalbleiter





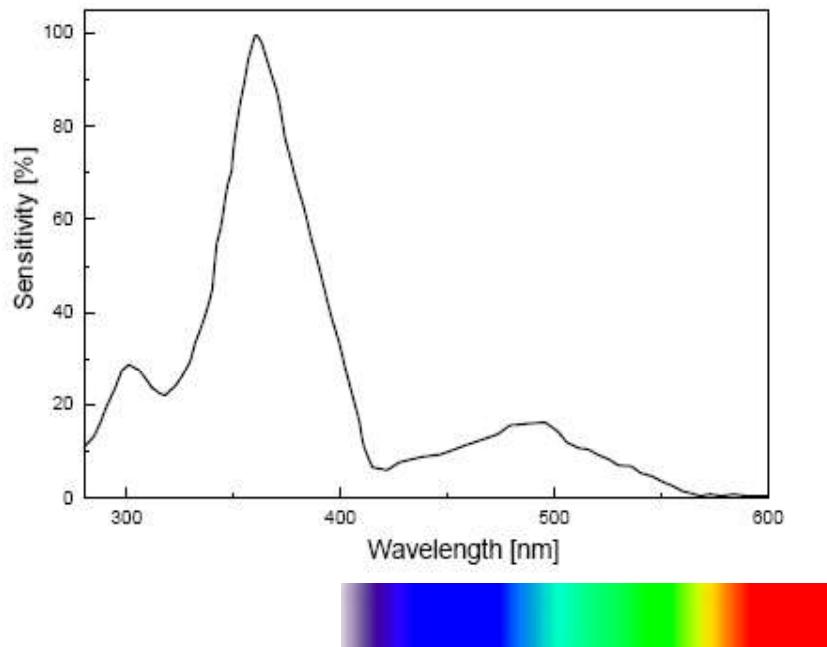
Spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges



Empfindlichkeitskurven: Tagsehen (rot) und Nachtsehen (blau)

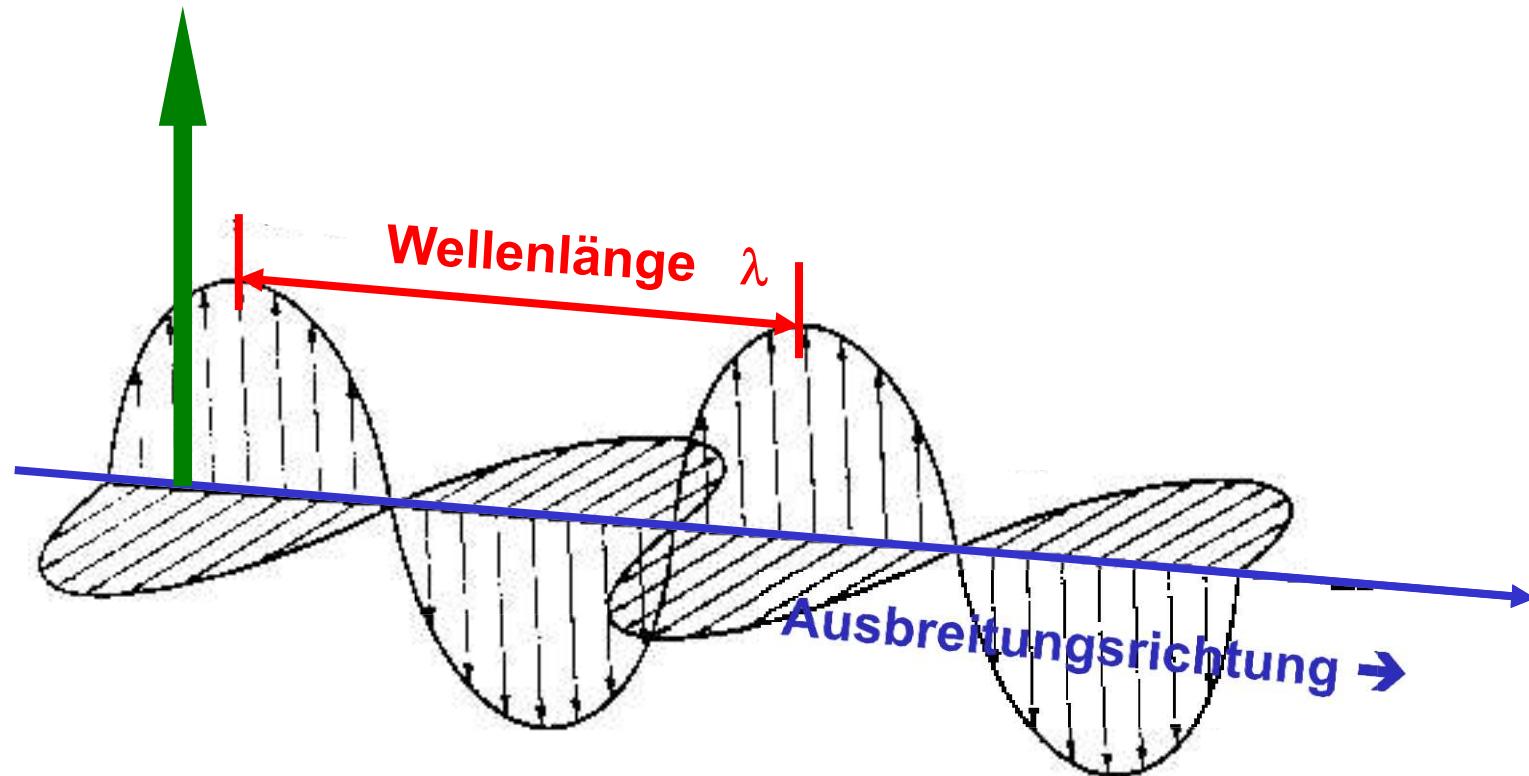
Spektrale Empfindlichkeit

Spektrale Empfindlichkeit von Insektenaugen (Facettenaugen)

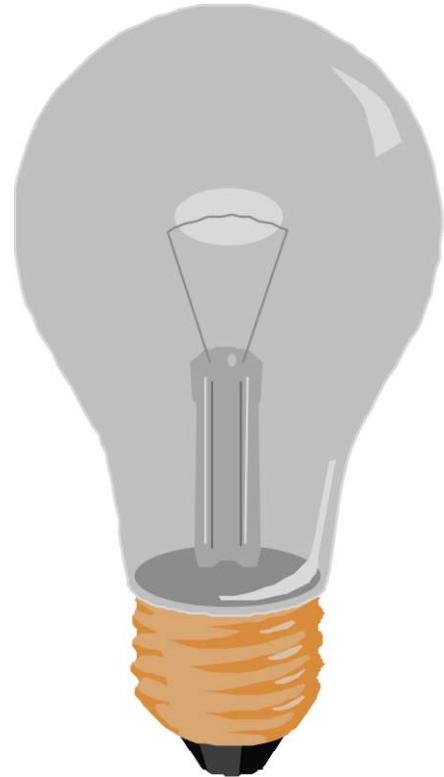


- maximale Empfindlichkeit bei 350 nm (UV-A)
- viele Insekten können nicht im gelb-roten Spektralbereich sehen, sondern im UV-Bereich
z.B. Lichtquellen mit hohem UV- oder Blauanteil ziehen Insekten an, gelbe und rote Lichtquellen dagegen nicht

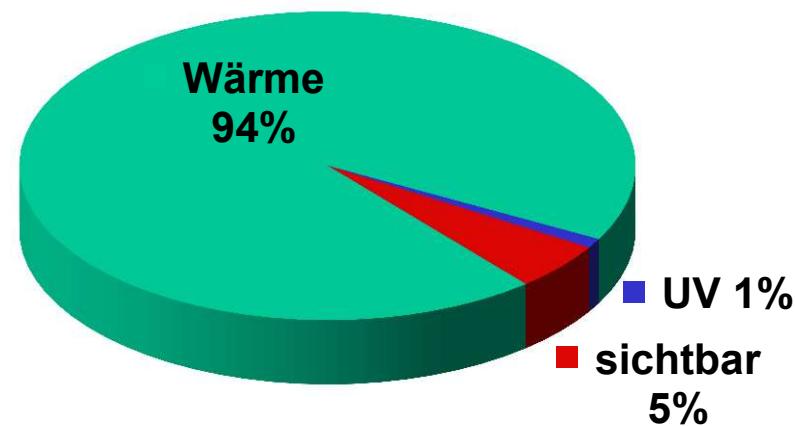
Polarisation



Energiebilanz einer typischen Glühlampe



Wärme: 94 %
sichtbares Licht: 5 %
UV: 1%



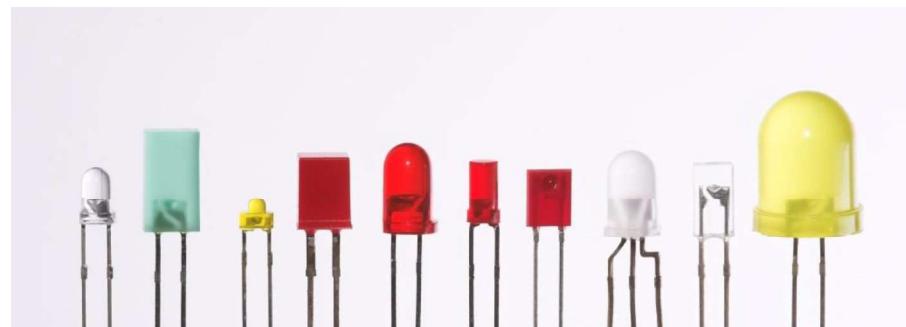
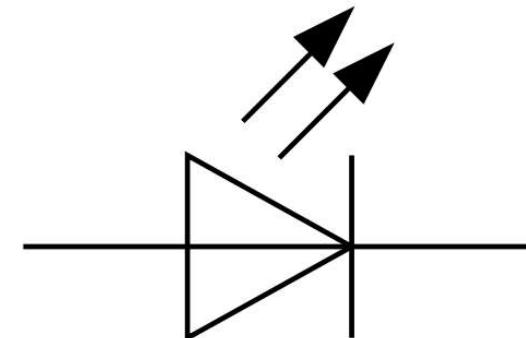
Einige Definitionen

- **Monochromatisch:**
Licht/Strahlung mit nur einer Wellenlänge („einfarbig“)
- **Kohärent:**
alle Wellen sind in Phase
- **Kollimiert:**
alle Wellen sind parallel
- **„gewöhnliche“ thermische Lichtquellen:**
geringe Kohärenzlänge
nicht monochromatisch
geringe Intensität und Energiedichte
→ die meiste Energie geht als Wärmeabstrahlung verloren

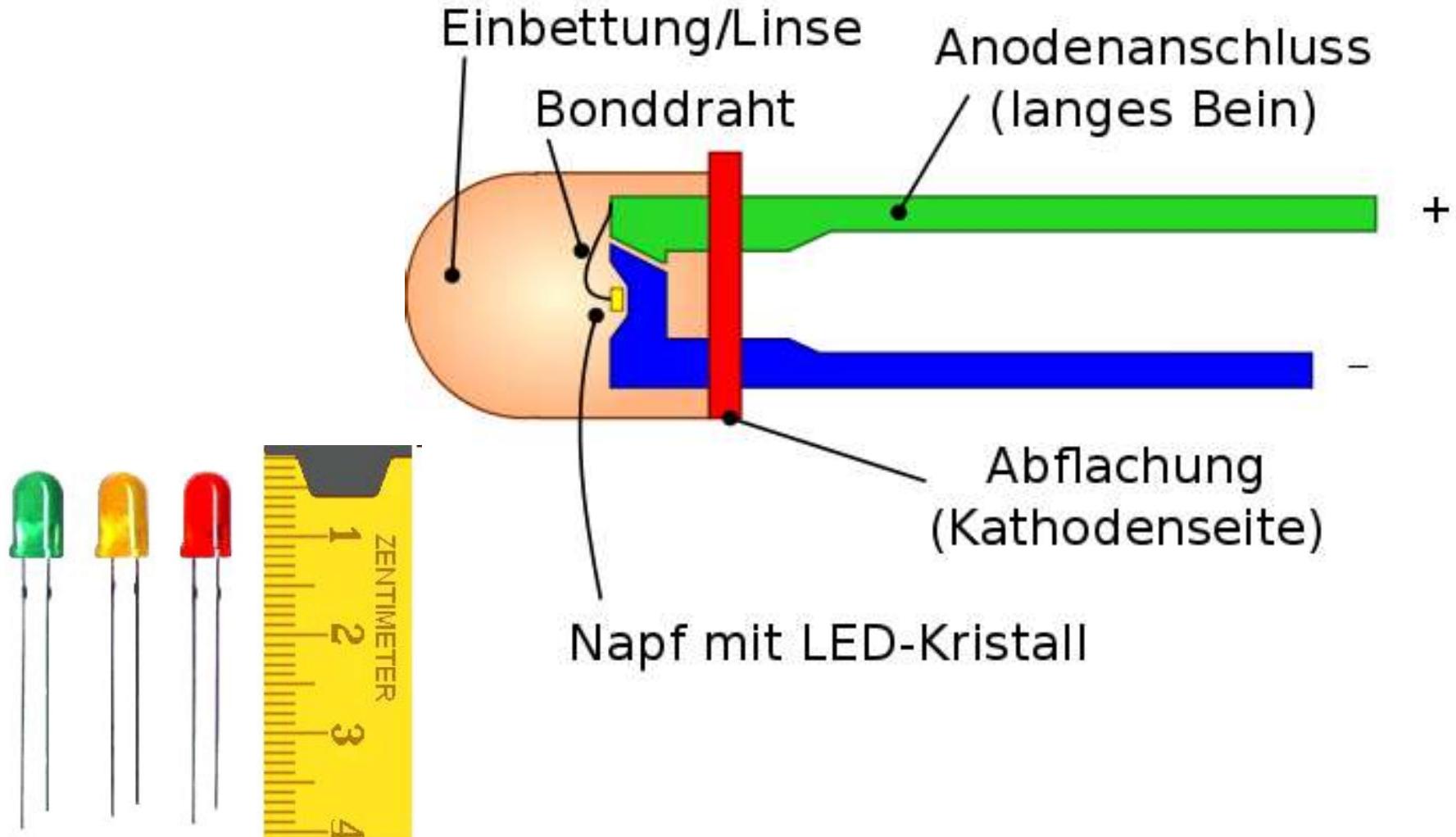
Definition

- LED = *Ligth Emitting Diode* (Leuchtdiode)
- ein elektronisches Halbleiter-Bauelement (Diode), das Licht aussenden kann, wenn ein Strom durch sie in Durchflussrichtung fließt
- Lichtstrahlung in einem schmalen Bereich
→ Es ist nahezu monochromatisch

Symbol



LED: Schematischer Aufbau



Aufbau

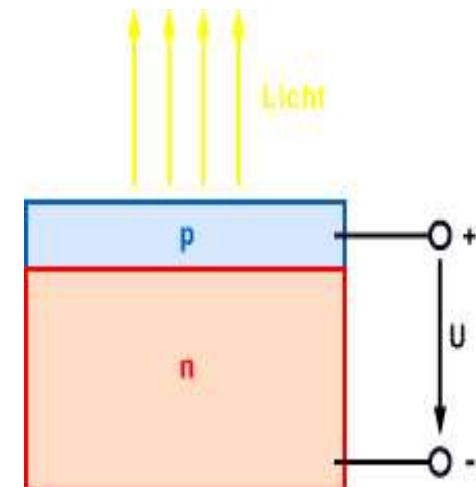
- Der prinzipielle Aufbau einer LED entspricht dem einer pn-Diode
LEDs besitzen daher die gleichen Grundeigenschaften wie pn-Dioden
- Ein großer Unterschied besteht in dem verwendeten Halbleitermaterialien
nichtleuchtende Dioden: Silizium
LED: Verbindungshalbleiter mit direktem Übergang

Funktionsprinzip

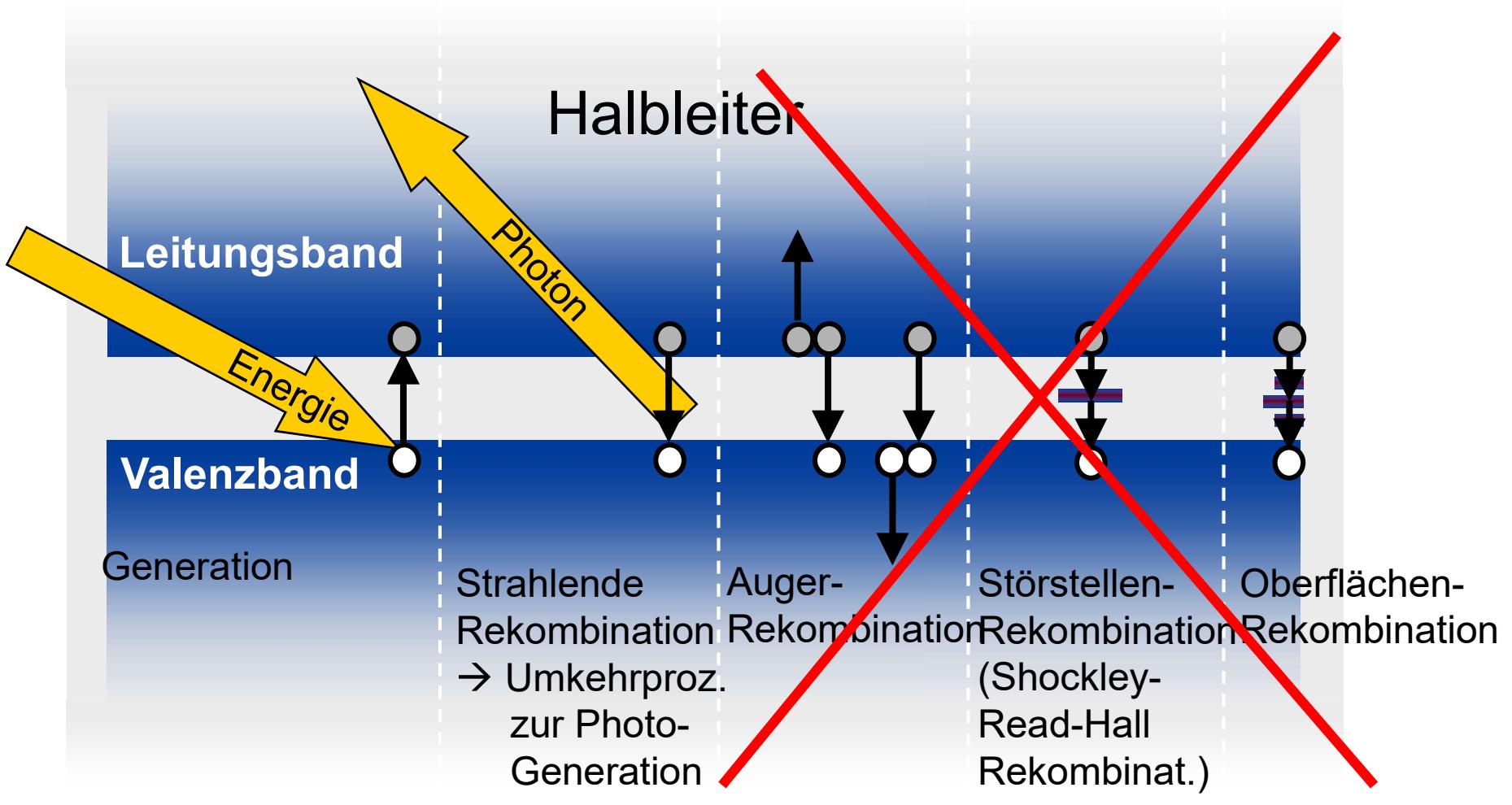
- Bestandteile der LED:
 - n- leitende Halbleiterschicht
 - p- leitende Dünnschicht mit großer Löcherdichte
- für die gewünschten Leuchteffekte schaltet man die Diode in Durchlassrichtung
- Ist die Spannung groß genug, um die Bandlücke zu überwinden, kommt es zur Überschwemmung der Grenzschicht mit freien Ladungsträgern

→ strahlende Rekombination

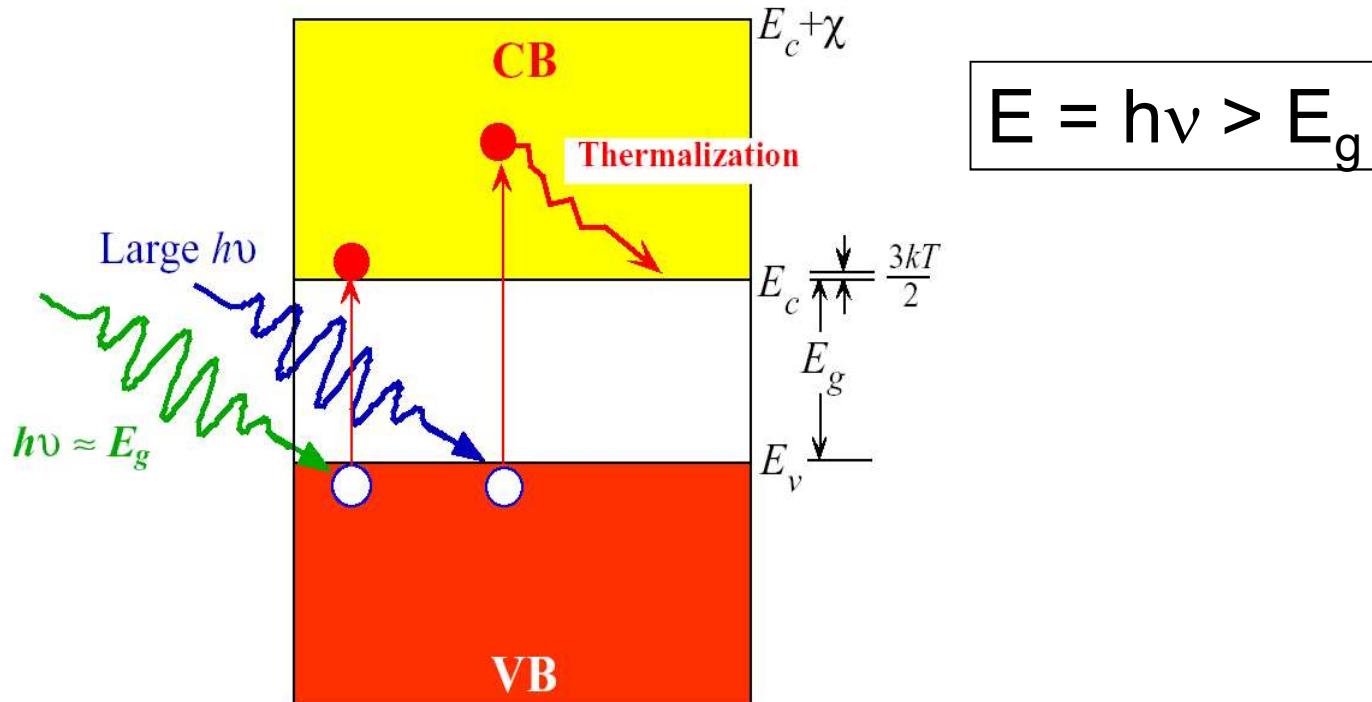
→ jedes Elektron-/Lochpaar
generiert ein Lichtquant (Photon)



Rekombination in direkten Halbleitern



Photogeneration/strahlende Rekombination



- Bei der strahlenden Rekombination wird immer Licht mit der Energie E_g freigesetzt
- monochromatische Lichtquelle

Funktionsweise einer LED

- Die Stromstärke I ist ein Maß für die Leuchtkraft der LED
- Die Helligkeit einer LED wächst mit der Leistungsaufnahme
 - Bei konstanter HalbleiterTemperatur ist die Zunahme annähernd proportional
 - Der Wirkungsgrad sinkt mit steigender Temperatur, deshalb sinkt die Lichtausbeute an der Leistungsgrenze je nach Art der Kühlung ab
- eine LED kann ausfallen, wenn die Temperatur des Halbleiters ein Maximum übersteigt

Zusammenfassung: Funktionsprinzip

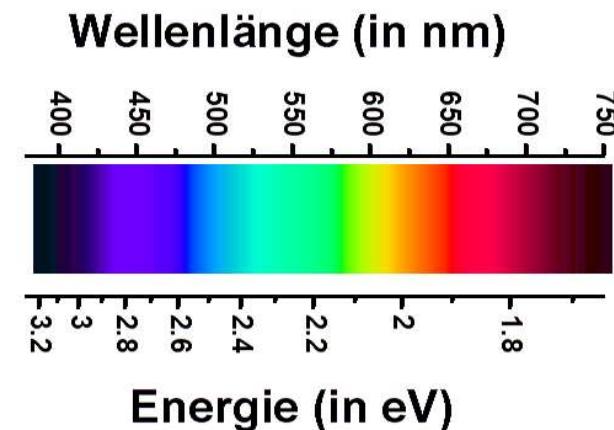
- Eine LED besteht aus einer Halbleiter-pn-Diode

Durch Anlegen einer äußeren Spannung in Durchlassrichtung wandern Elektronen zur Rekombinationsschicht an seinem p-n-Übergang.
Auf der n-dotierten Seite bevölkern sie das Leitungsband, um nach Überschreiten der Grenzfläche auf das energetisch günstigere p-dotierte Valenzband zu wechseln.
 - Bei Silizium-Dioden erfolgt der Übergang strahlungslos
 - Direkte Halbleiter hingegen können leuchten
- Die Größe der Energielücke E_g bestimmt die Farbe des ausgesandten Lichts

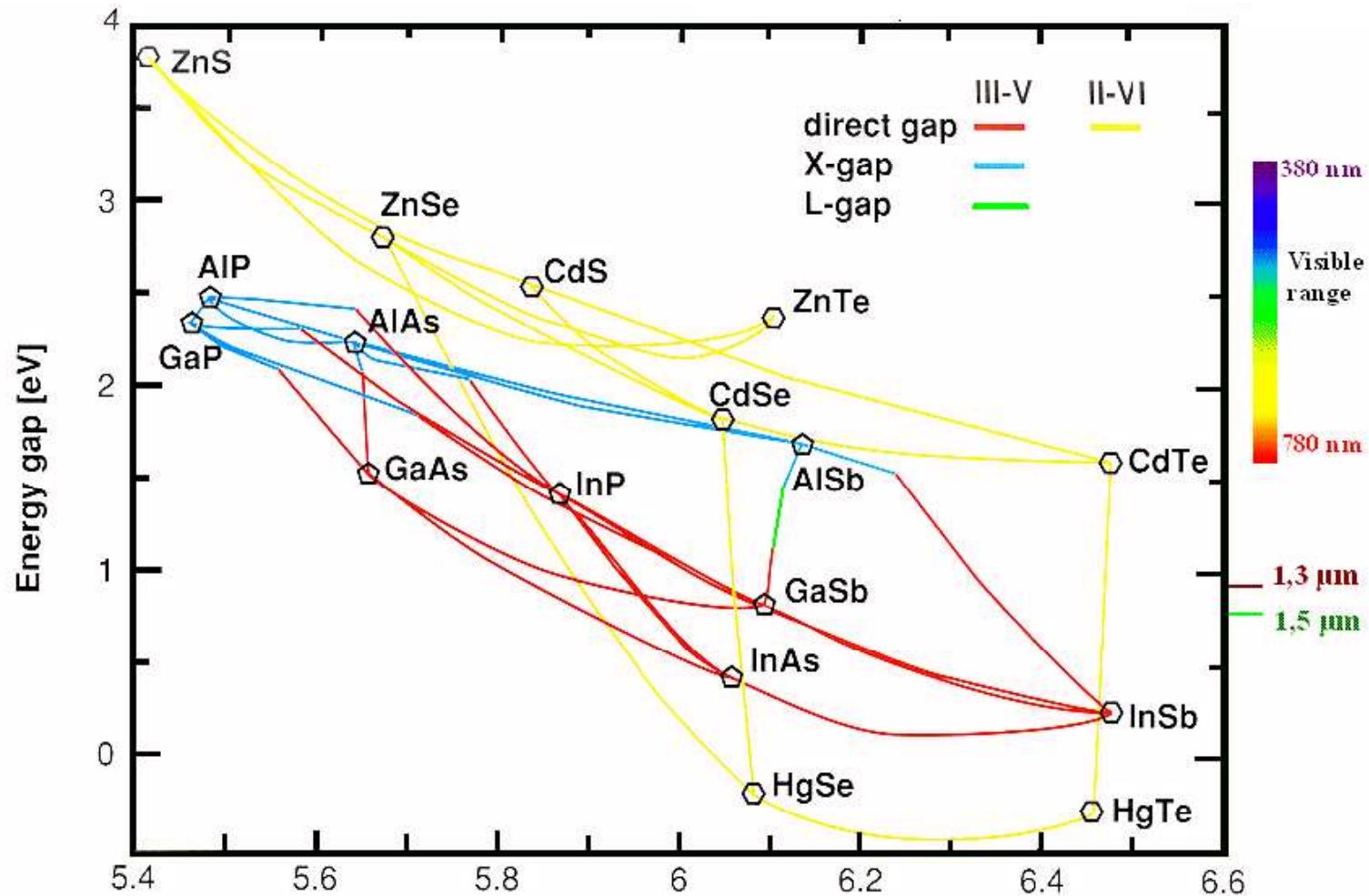
Wellenlänge

$$\lambda(E_g) = \frac{hc}{E_g} = \frac{1240\text{nm}}{E_g(\text{eV})}$$

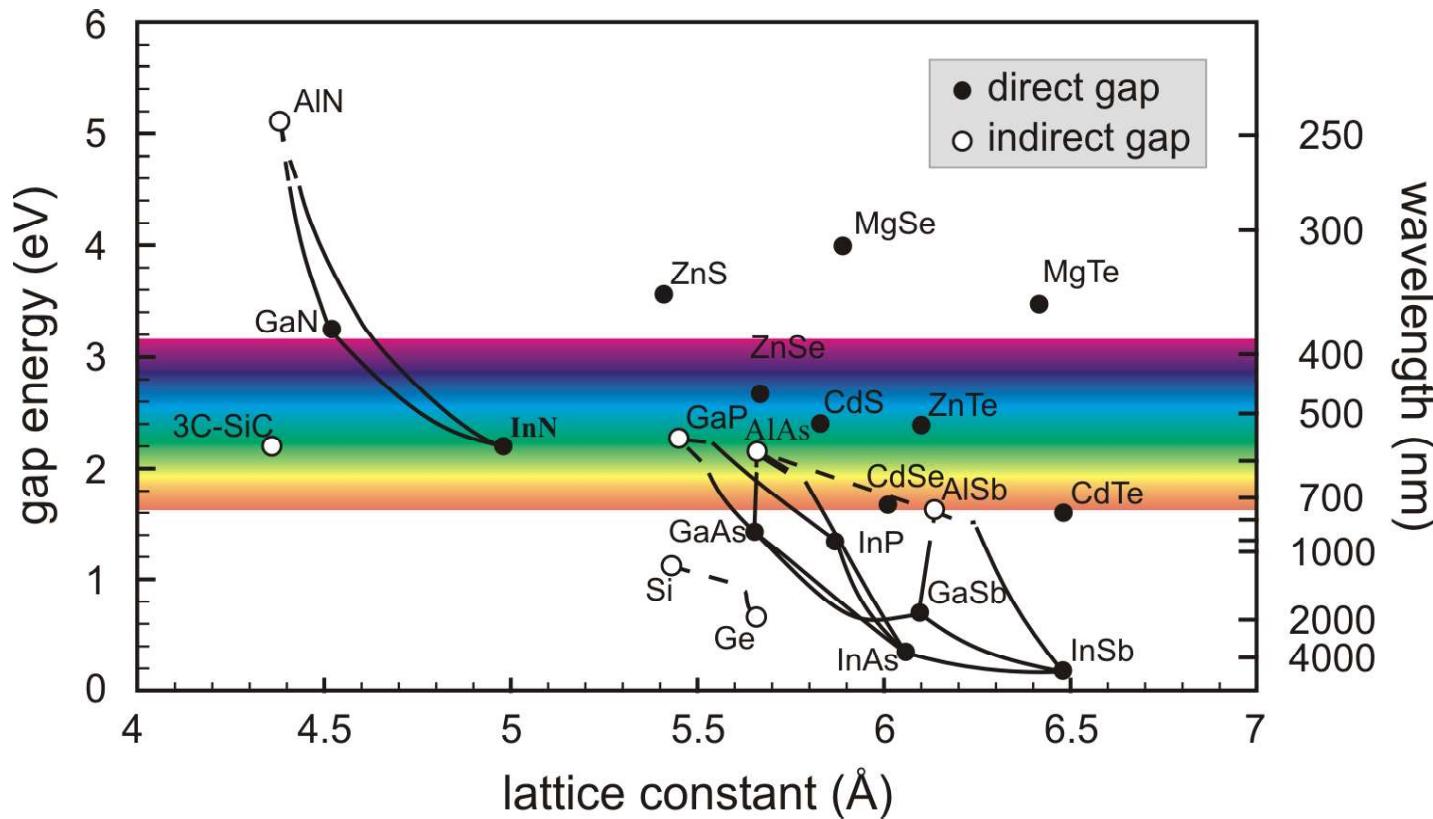
- $\lambda(E_g)$: Wellenlänge des emittierten Lichtes
- h : Plancksches Wirkungsquantum
- c : Lichtgeschwindigkeit
- E_g : Bandlücke, abhängig vom Halbleitermaterial



Bandlücken von verschiedenen Halbleitern



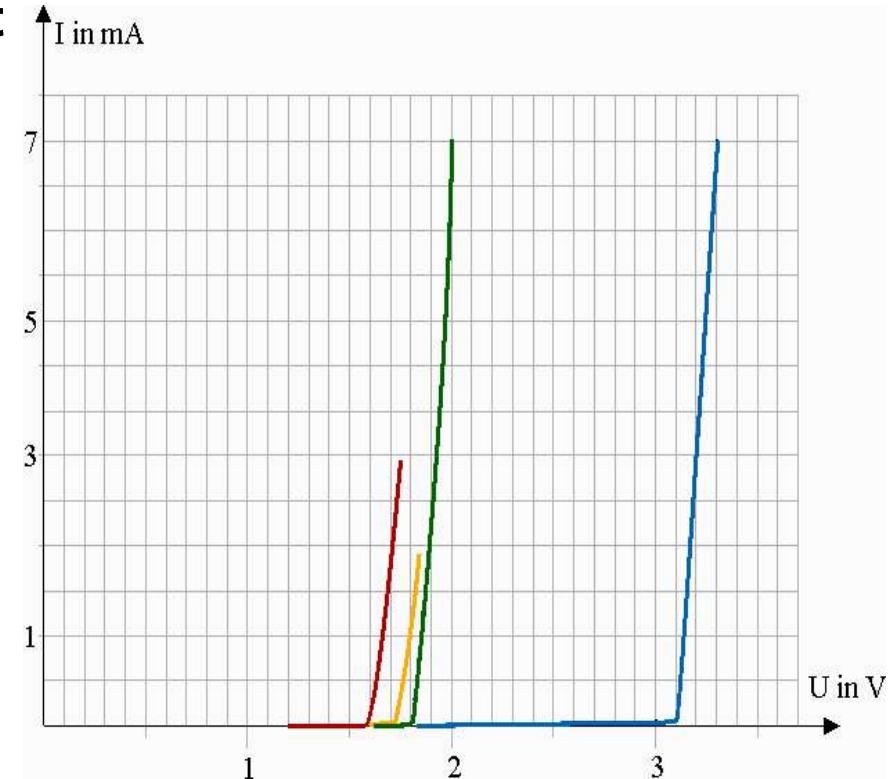
Bandlücke und Gitterkonstante



→ mit ternären Verbindungen kann ein breites Spektrum an Bandlücken für direkte Halbleiter realisiert werden

Schwellenspannung

- Die nötige Spannung um die Bandlücke zu überwinden (LED leuchtet) nennt man Schwellenspannung
- je nach Bandlücke (und damit Schwellenspannung) werden Lichtquanten bestimmter Farben (Wellenlängen) emittiert



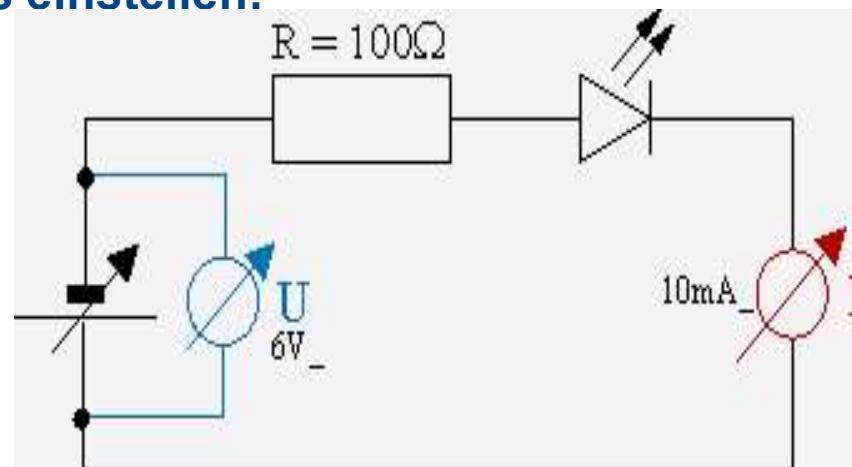
Betrieb einer LED

- Die einfachste Möglichkeit der Versorgung einer LED an einer Spannungsquelle ist, in Reihe zu ihr einen Vorwiderstand zu schalten

Der Wirkungsgrad ist prinzipiell nicht schlechter als bei einer linear geregelten Konstantstromquelle

Wird diese Anordnung mit einer Spannungsquelle betrieben, deren Spannung U_0 unter Last (Nennstrom I) bekannt ist, so lässt sich der gewünschte Strom I über die Wahl des Widerstandes einstellen:

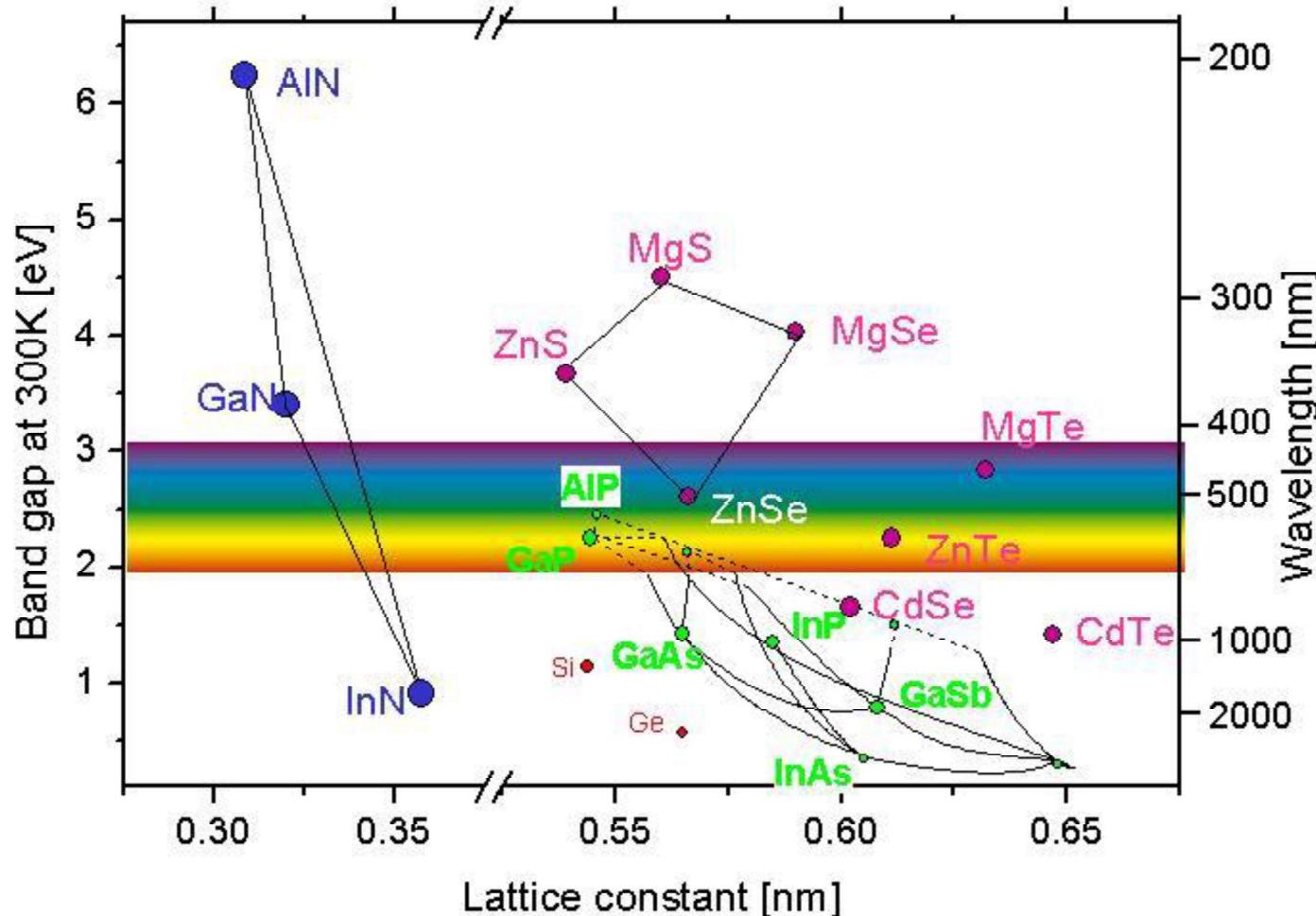
$$R = \frac{U_0 - U_{LED}}{I}$$



LED: Eigenschaften

- Monochromes Licht im begrenzten Spektralbereich
- Lebensdauer
 - Definierte als die Zeit in der die Lichtausbeute auf die Hälfte des Anfangswertes gesunken ist
 - Hängt von den Halbleitermaterialien und Betriebsbedingungen ab
 - bis zu über 100000 Stunden möglich
- Drastische Verkürzung der Lebensdauer durch Temperaturerhöhung

Bandlücken und Farben



Farben

- Variieren des Lichtes durch Halbleitermaterialien und Dotierung

Aluminiumgalliumarsenid (AlGaAs) – rot (665 nm) und infrarot bis 1000 nm Wellenlänge

Galliumarsenidphosphid (GaAsP) und

Aluminiumindiumgalliumphosphid (AlInGaP) – rot, orange und gelb

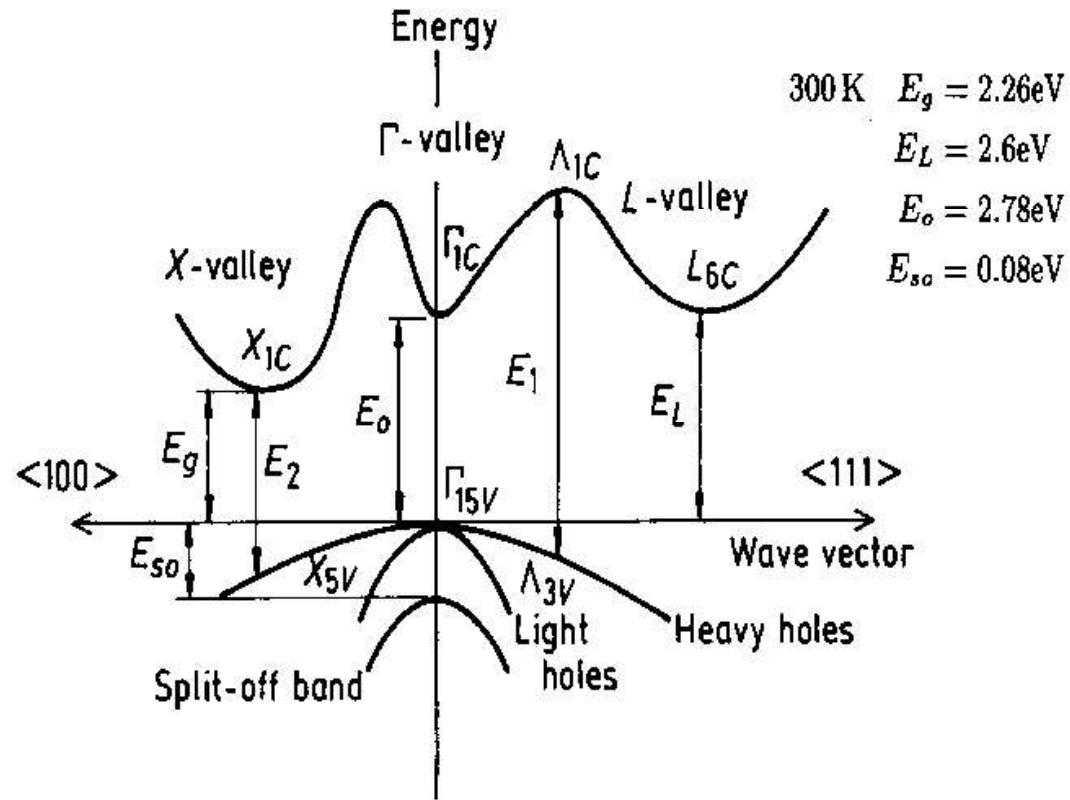
Gallumphosphid (GaP) – grün

Siliziumkarbid (SiC) – erste kommerzielle blaue LED; geringe Effizienz

Zinkselenid (ZnSe) – blauer Emitter, der jedoch nie die kommerzielle Reife erreichte

Indiumgalliumnitrid (InGaN)/Galliumnitrid (GaN) – Ultraviolett, Violett, blau und grün

Galliumphosphid (GaP)



Eigentlich ein indirekter Halbleiter

→ Trotzdem ist GaP optisch aktiv

Galliumphosphid (GaP)

- Reine GaP LEDs emittieren grünes Licht mit einer Wellenlänge von 555 nm
- Schwefel oder Tellur werden zur n-Typ Dotierung benutzt
- Zink wirkt als Akzeptor (p-Typ Halbleiter)
- Stickstoff-dotiertes GaP emittiert gelb-grün (565 nm), Zinkoxid dotiertes GaP leuchtet rot (700 nm).

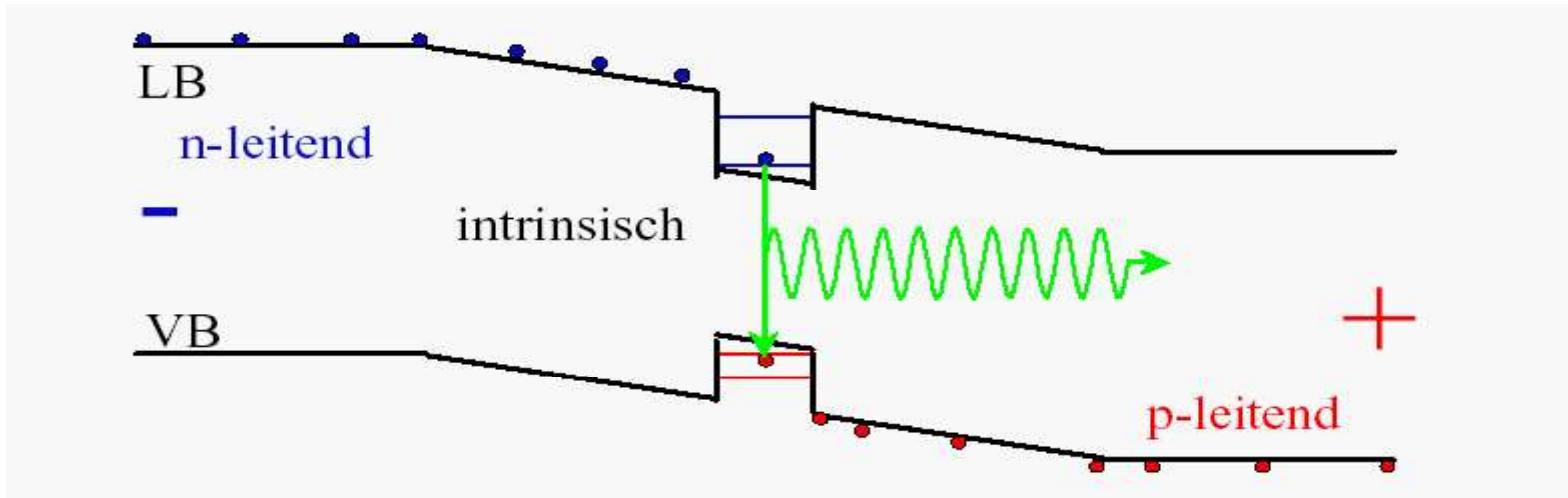
Aktuelle Materialauswahl für alle Farben

Farbe	Wellenlänge	Materialien
Infrarot	$\lambda > 760$	GaAs, AlGaAs
Rot	$610 < \lambda < 760$	AlGaAs, GaAsP, AlGaNp, GaP
Orange	$590 < \lambda < 610$	GaAsP, AlGaNp, GaP
Gelb	$570 < \lambda < 590$	GaAsP, AlGaNp, GaP
Grün	$500 < \lambda < 570$	InGaN, GaN, GaP, AlGaNp, AlGaP, ZnO (in Entwicklung)
Blau	$450 < \lambda < 500$	ZnSe, InGaN, SiC, (ZnO)
Violett	$400 < \lambda < 450$	InGaN
Ultraviolett	$230 < \lambda < 400$	Diamant, AlN, AlGaN, AlGaN ^[4]

Geschichte der LEDs

- Ab 1957 konzentrierte man sich bei der Erforschung der Lichterzeugung ganz auf die Halbleiter
Besonders die Lichtemission im sichtbaren Bereich auf der Basis von Galliumarsenid (GaAs) und Galliumphosphid (GaP) war von Bedeutung.
Andere Quellen schreiben die Erfindung der Leuchtdiode allerdings Nick Holonyak zu und datieren sie auf 1962
- seit den ersten LEDs 1962, wurde die Lichtausbeute um ungefähr drei Größenordnungen von unter 0,1 Lumen/Watt auf über 100 Lumen/Watt gesteigert
immer besseren Qualität der Halbleiterschichten (geringere Defektdichten, weniger Verunreinigungen)
Einsatz von Heterostrukturen und niederdimensionalen Strukturen (Quantentöpfe)
transparente Substrate, verbesserte Lichtauskopplung

Aufbau einer LED



- Ladungsträger-Lokalisation (*confinement*)
- Verstärkung der strahlenden Rekombination

Geschichte der LEDs

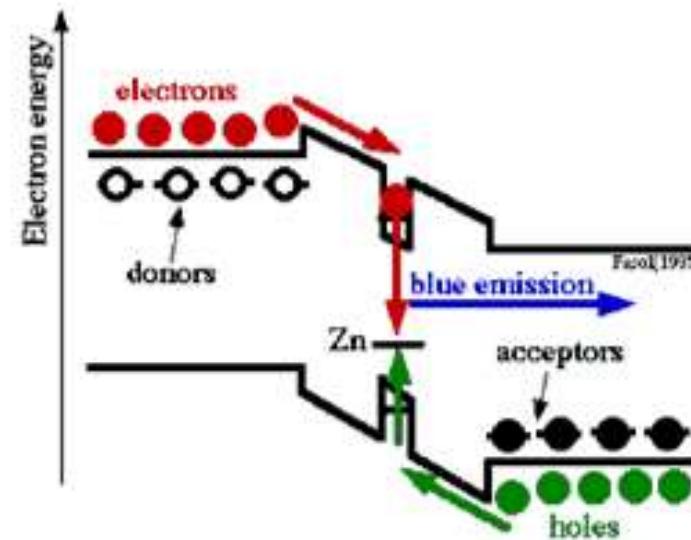
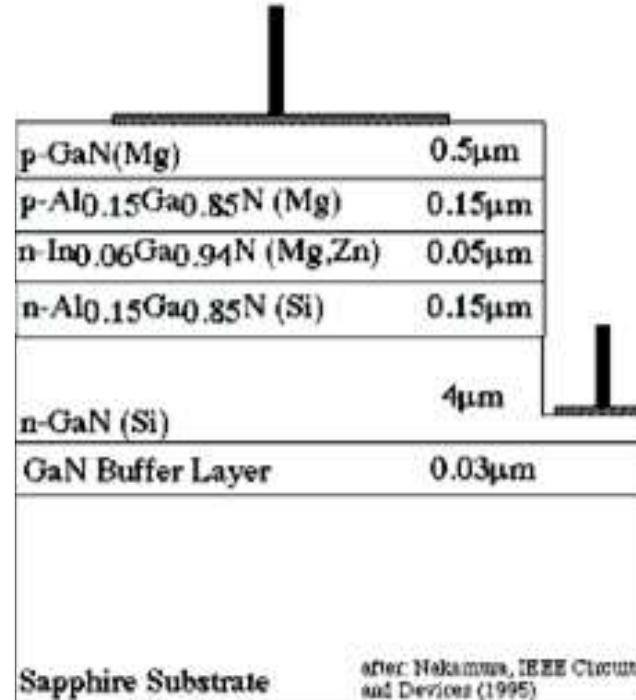
- Ausgehend von GaAs/AlAs (1960er Jahre, rot-gelb), wurden neue Halbleitermaterialien wie GaP (1970er Jahre, grüne LEDs) und GaN (1980er/1990er Jahre, grün bis UV) entwickelt, so dass es heute LEDs in nahezu allen Farben des Spektrums (bis auf eine Lücke im grün-gelb-Bereich) gibt
- Insbesondere nach Halbleitern, die Licht im kurzweligen Bereich (blau, UV) effizient erzeugen, wurde lange gesucht

Hauptproblem war lange Zeit das Dotieren eines p-leitenden Bereichs von geeigneten breitlückigen Halbleitern, das erstmals 1988 bei GaN der Gruppe von Akasaki in Japan gelang

1992 entwickelte Shuli Nakamura einen anderen Ansatz, der zur ersten kommerziellen blauen LED auf GaN-Basis führte, die seit 1993 von *Nichia* vertrieben werden.

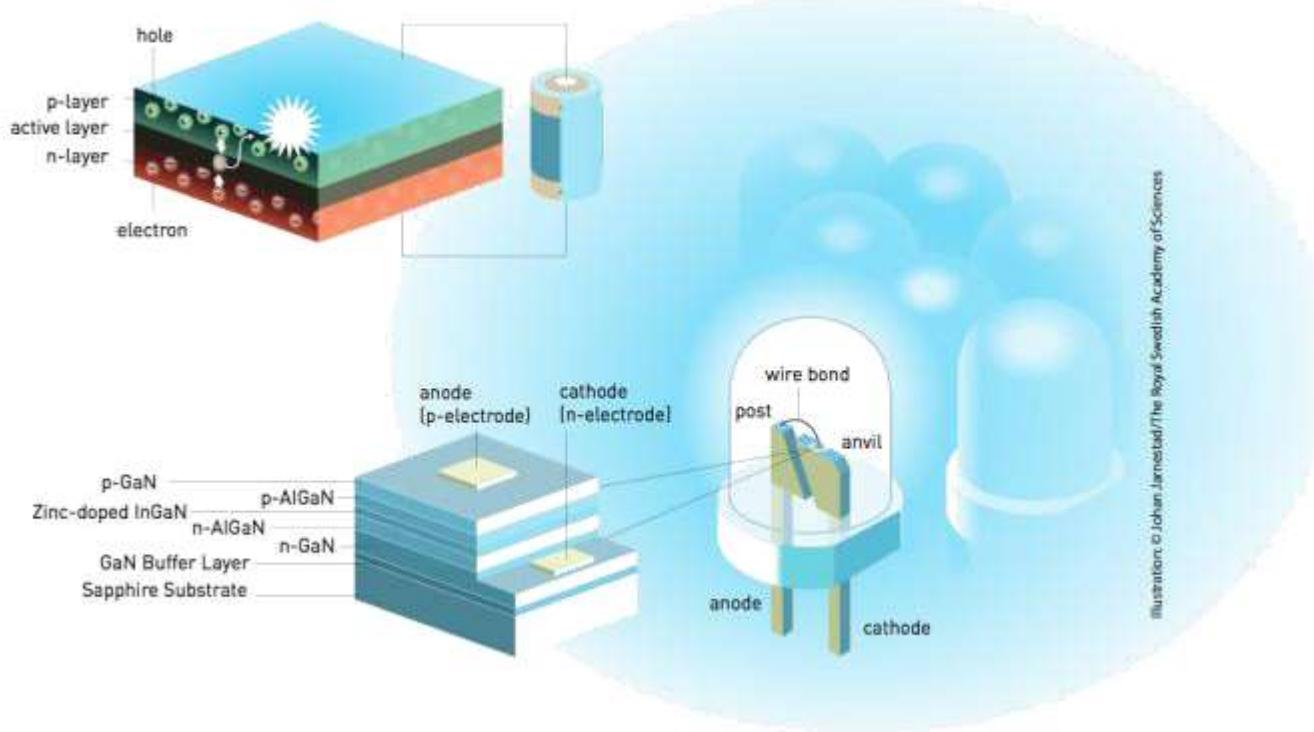
Bis dahin basierten blaue LEDs auf dem Material Siliziumkarbid, das als indirekter Halbleiter für effiziente Lichtemission schlecht geeignet ist.

Eine blaue LED auf GaN-Basis



Shuji Nakamura 1992

Blaue LEDs

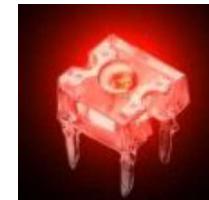


**Die Erfinder der blauen Leuchtdiode
Isamu Akasaki, Hiroshi Amano und Shuji Nakamura
erhielten den Nobelpreis für Physik 2014**

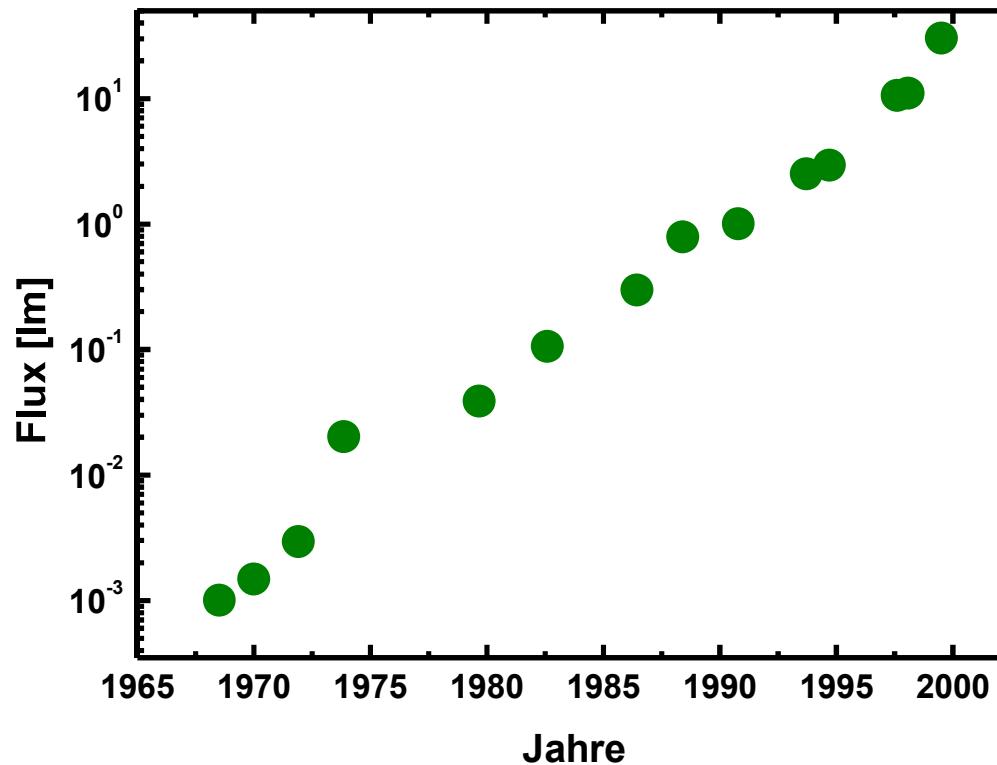


Entwicklung

- Im Entwicklungslauf wurde die Lichtausbeute der LED gesteigert
- Halbleitermaterialien wurden entwickelt, so dass LED in nahezu allen Farben des Spektrums leuchten
Insbesondere welche die Licht im kurzwelligen Bereich (blau, UV) effektiv erzeugen.



- LED-Hersteller arbeiten intensiv an der Erhöhung des Wirkungsgrades
Liegt dieser deutlich über Halogenlampen, steht einer breiten Anwendung nichts mehr entgegen
Schon jetzt hat die LED die Glühlampe in sehr vielen Bereichen verdrängt



Entwicklung des maximalen Lichtstroms kommerziell erhältlicher LEDs.

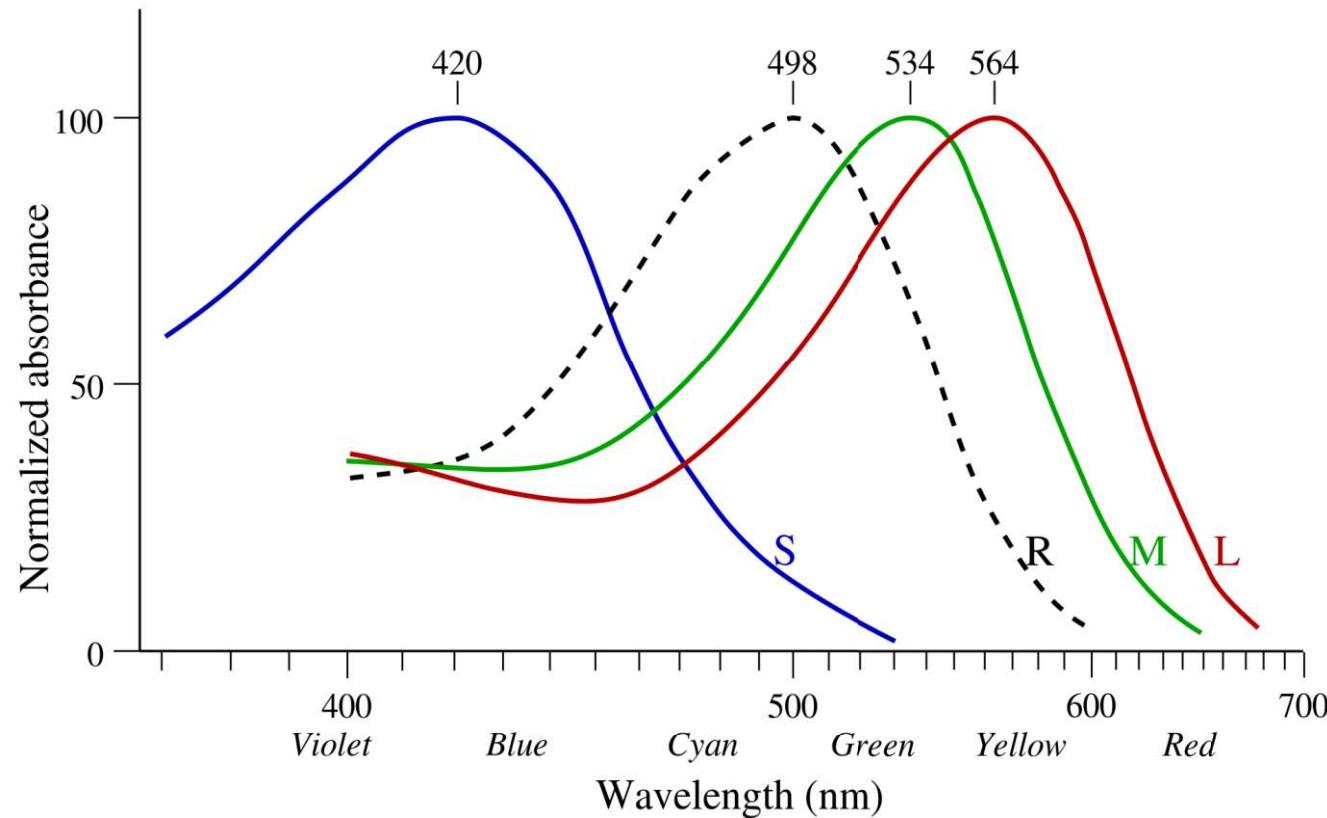
LEDs heute

- **weiterer Entwicklungen**
Die Steigerung der Effizienz und preiswertere Herstellung
- **Die Bonddrähte (elektrische Leitungen zum Halbleiterchip) decken einen Teil der aktiven Fläche ab**
Gegenwärtig wird besonders daran gearbeitet, sowohl transparente Trägermaterialien und Halbleiter-Materialien als auch transparente elektrische Zuleitungen herzustellen
- **Ein anderer aktueller Forschungsgegenstand sind organische Leuchtdioden, sogenannte „OLEDs“.**

Einsatzbereiche

- Heute: Displays (TV, Handy usw.)
- Zuerst: Leuchtmittel, um Glühlampen zu ersetzen
- Laufschriftanzeigen zur Informationsübermittlung
- Statusanzeigen bei Geräten aller Art, insbesondere dort, wo die Dunkeladaptation des Auges nicht beeinträchtigt wird (Cockpits, Schiffsbrücken, Militär usw.)
- Signallampen im Straßenverkehr
- Fahrradbeleuchtung als Rücklicht und Scheinwerfer
- Display-Hinterleuchtung z.B. in Mobil-Telefonen
- Mobile Beleuchtungsanwendungen, wie Taschenlampen oder im Auto
- Integriert in Bewegungs-Sensoren oder Lichtschranken
- Im Medizinbereich z. B. UV-LED in der Zahntechnik
- Tageslichtfähige TV-Grossdisplays in Stadien etc.
- RGB-Effektbeleuchtung mit fließend änderbarem Licht

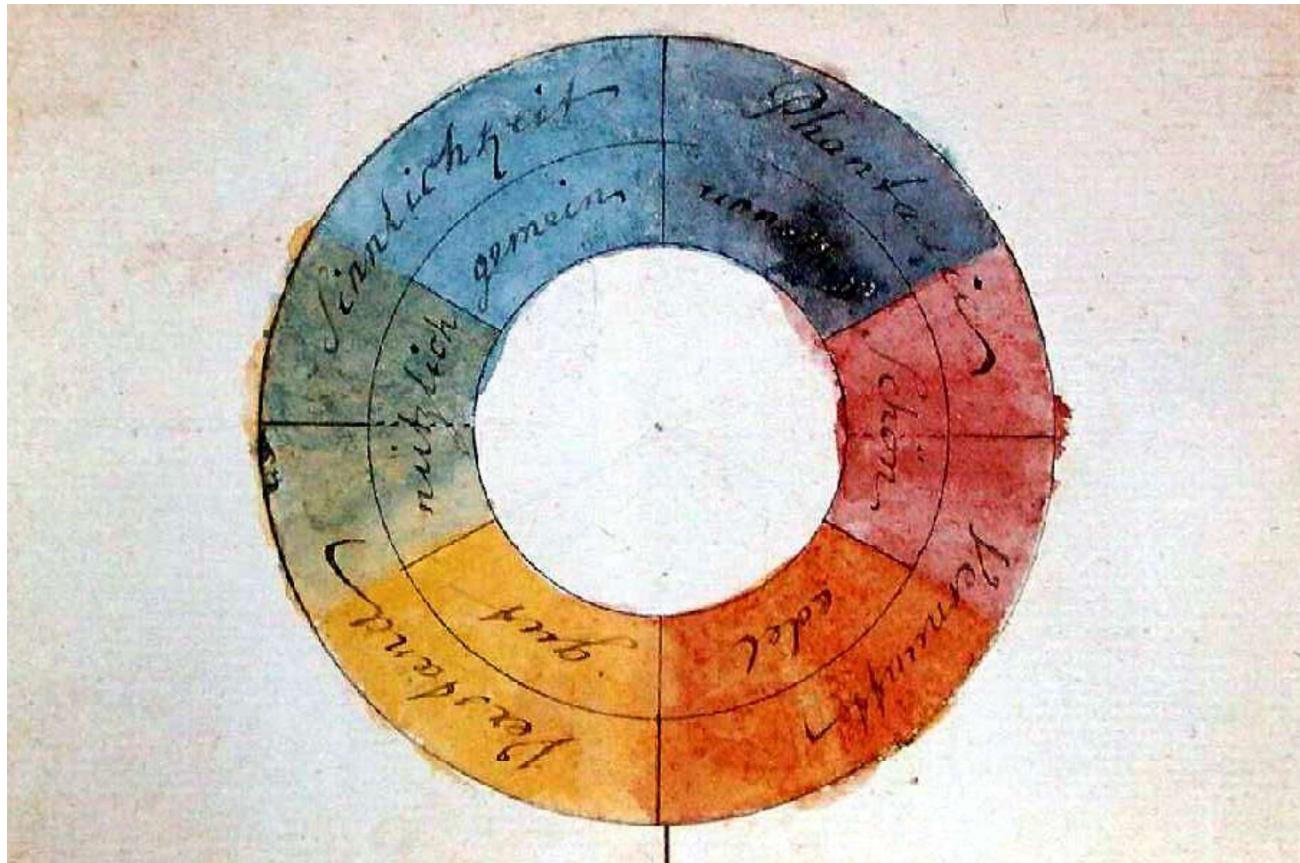




drei Zapfen (S,M,L) mit verschiedenen spektralen Empfindlichkeiten
die Stäbchen (Rods) liefern nur Helligkeitsinformationen

Johann Wolfgang von Goethe

Zur Farbenlehre (2 Bände) Tübingen 1810



Farbenkreis von Goethe (Original: Frankfurter Goethe-Museum)

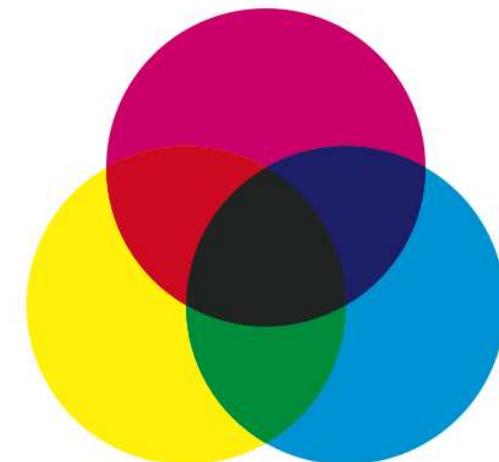
Farbmischungen

- **Subtraktive Farbmischung (Lichtabsorption):**

Typisch sind die Grundfarben Cyan, Magenta und Yellow (dt. gelb), kurz als CMY bezeichnet. Meist kommt noch Schwarz hinzu.

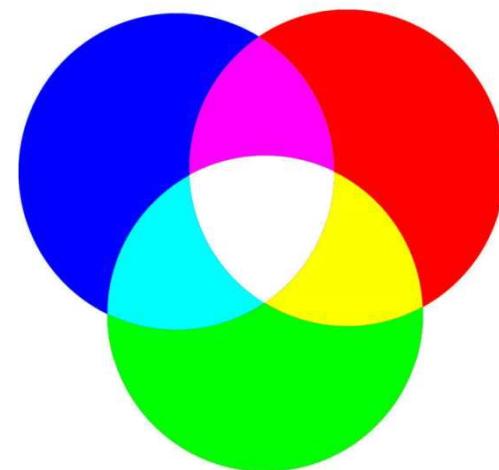
Ausgehend von Weiß (alle Grundfarben auf Null Prozent) wird die Ergebnisfarbe dunkler, je mehr Grundfarbe hinzugegeben wird

Wenn alle Grundfarben je zu 100 % hinzugefügt werden, ist die resultierende Farbe Schwarz
- **Beispiele: Drucker, Maler**

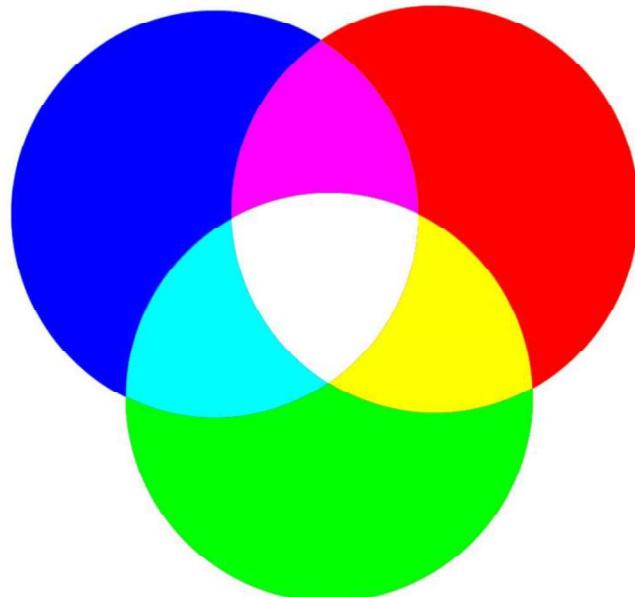


Farbmischungen

- **Additive Farbmischung (Lichtquellen):**
Typischerweise wird rot, grün und blau in unterschiedlichen Anteilen gemischt (RGB).
Ausgehend von Schwarz (Alle Grundfarben fehlen, also jeweils 0 %) wird die Ergebnisfarbe heller, je mehr Grundfarbe hinzu gegeben wird.
Wenn alle Grundfarben zu 100 % hinzugefügt sind, ist das Ergebnis hell-weiß.
- **Beispiele: Beleuchtung, Displays**

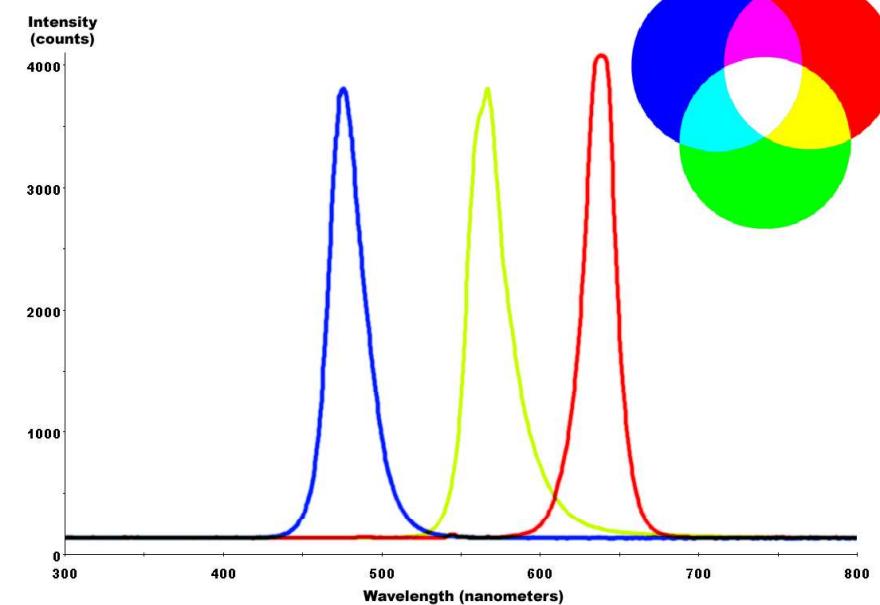
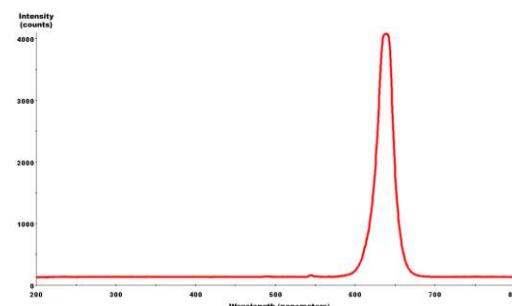
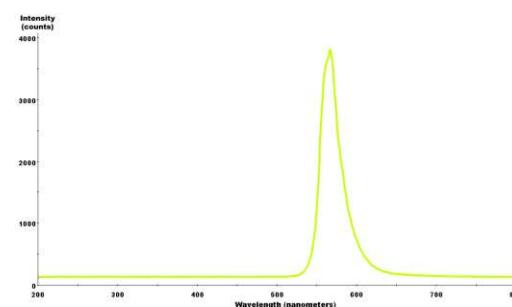
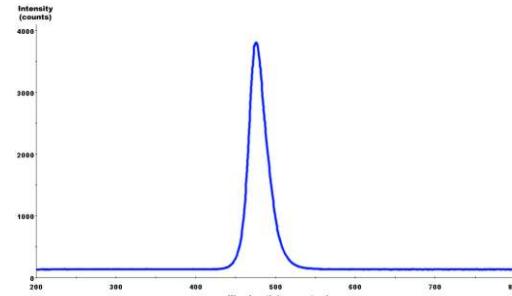


Additive Farbmischung (RGB-Prinzip)



- Grundfarben: Rot, Grün, Blau
- Die additive Farbmischung kann nur durch Lichtquellen erreicht werden.
- Zwei Grundfarben:
 - Blau + Rot = Magenta/Purpur
 - Blau + Grün = Cyanblau
 - Grün + Rot = Gelb
- Werden alle drei Grundfarben übereinander projiziert kann weißes Licht entstehen

Anwendung der additiven Farbmischung



In Abhängigkeit der relativen Intensitäten kann jede Farbe erhalten werden

RGB-LEDs: drei HL-LEDs in einem Gehäuse



Die benötigte Flussspannung hängt von der Lichtfarbe (Bandlücke) ab und liegt zwischen 1,3 V und etwa 4 V

→ Modulation der Farben

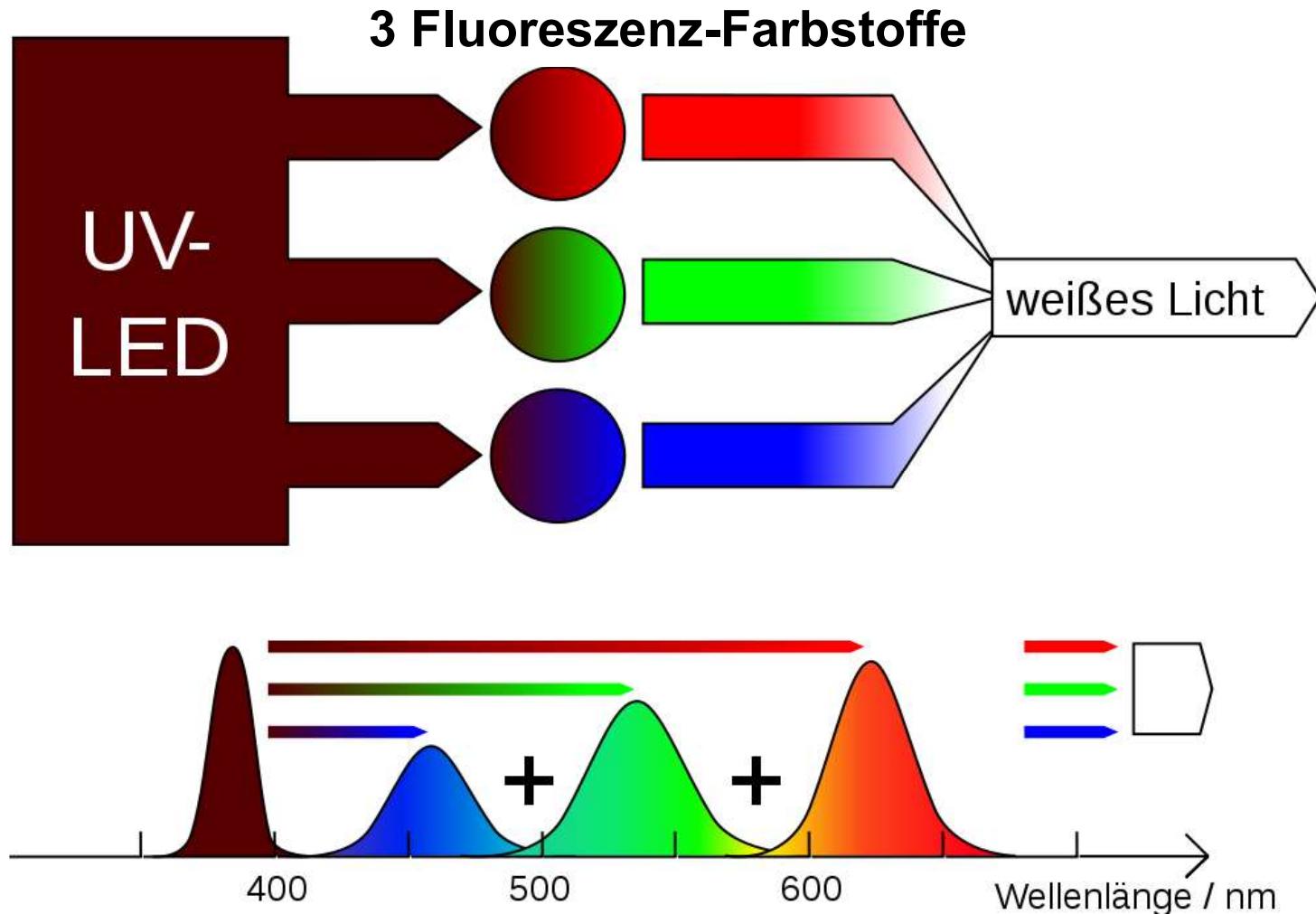
Weisse LEDs

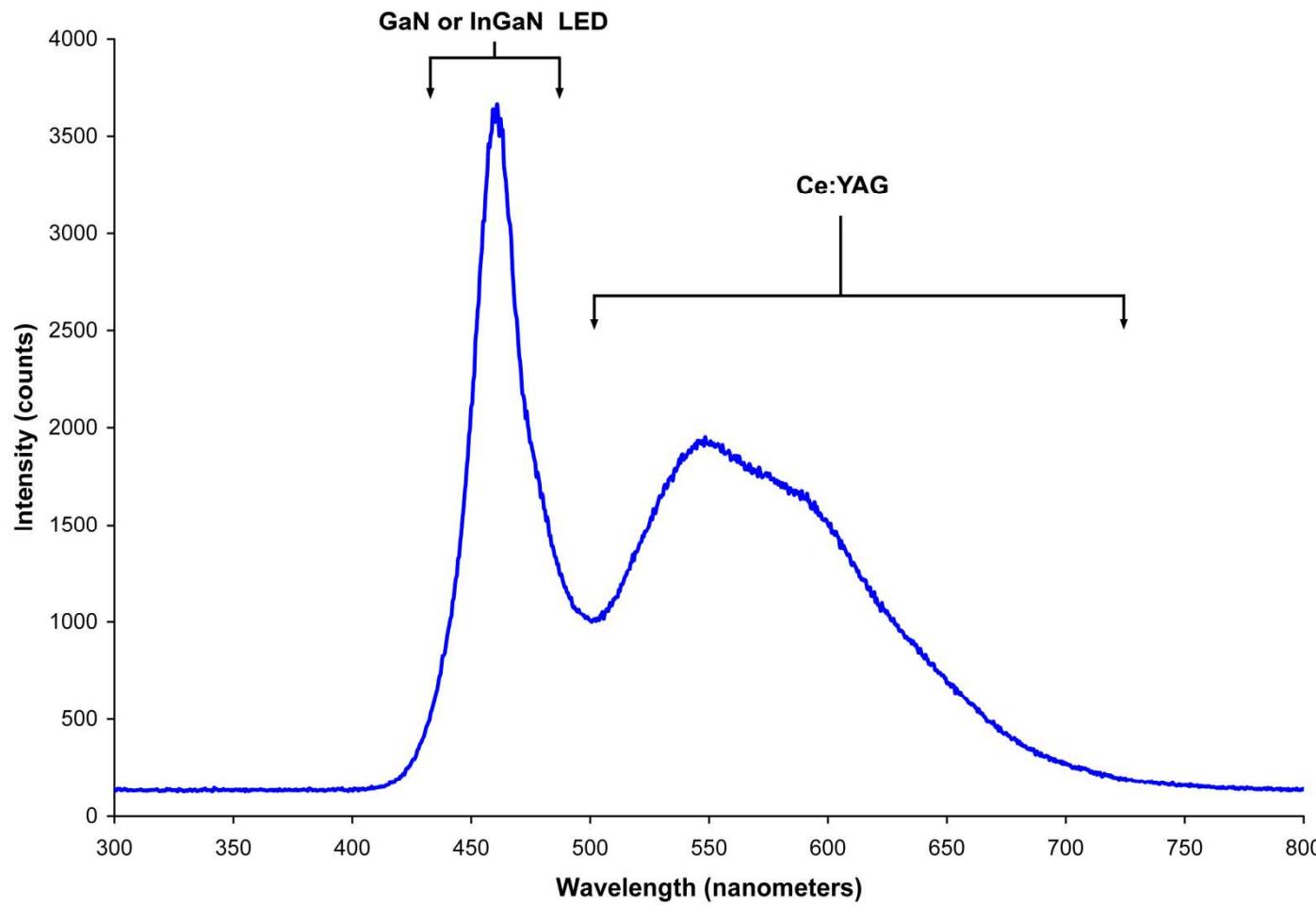
- Um mit Leuchtdioden weißes Licht zu erzeugen, kommen verschiedene Verfahren zur **additiven Farbmischung** zum Einsatz:
- **Verschiedene Chips (selten verwendet)**
Leuchtdioden verschiedener Farben, oft Blau und Gelb (in zwei LEDs) oder Rot, Grün und Blau (RGB), werden so kombiniert, dass sich ihr Licht gut mischt und damit als weiß erscheint.
Zur besseren Lichtmischung sind meist zusätzliche optische Komponenten erforderlich.
Es ist daher vorteilhaft, die LEDs räumlich nahe beieinander zu platzieren.
Aus praktischen Gründen werden die verschiedenfarbigen LED-Chips oft in einem Bauteil integriert.

Die weiße Standard-LED (Luminiszenz)

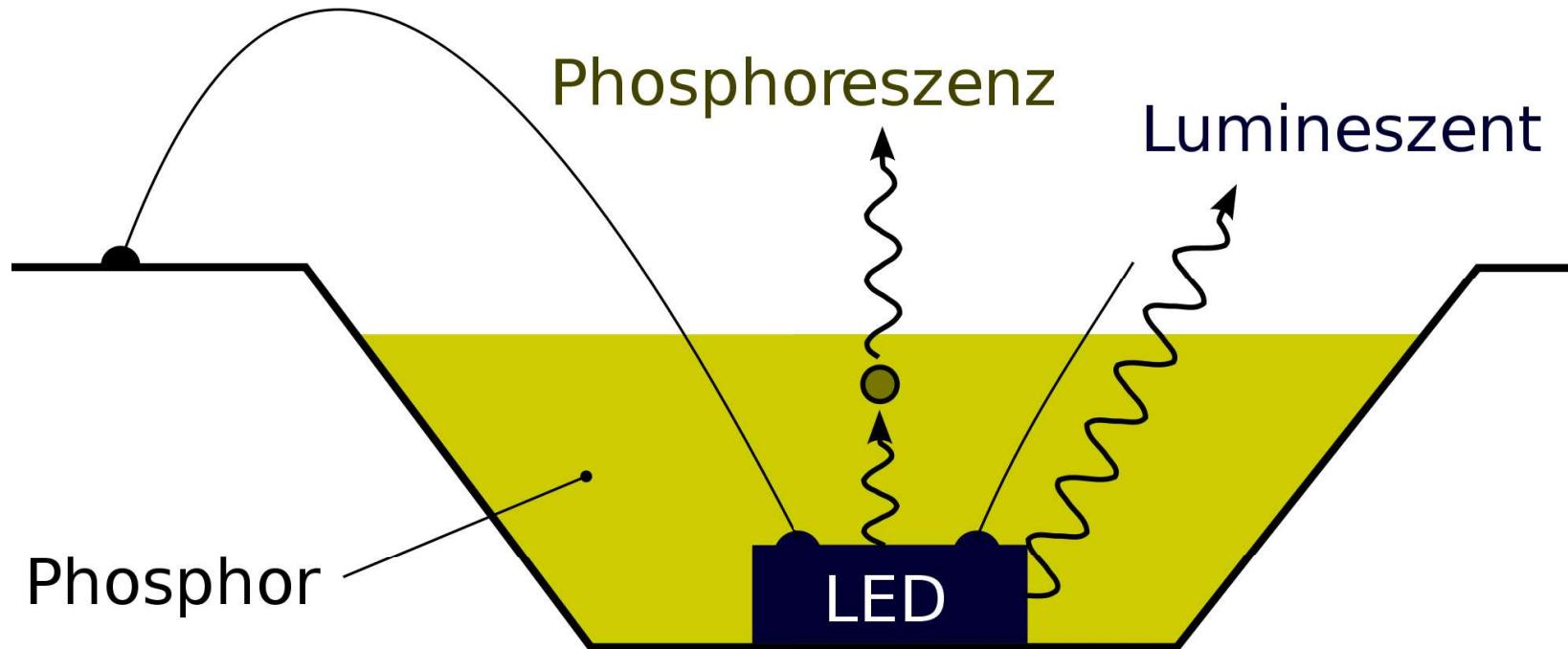
- Eine blaue LED wird mit photolumineszierendem Material (Fluoreszenzfarbstoff, Leuchtstoff) kombiniert
- Ähnlich wie auch in Leuchtstoffröhren kann so kurzwelliges, höher energetisches Licht (blaues Licht und Ultravioletstrahlung) in langwelliges, niedriger energetisches Licht umgewandelt werden
- Die Wahl der Leuchtstoffe kann variieren
 - häufiger eine blaue LED mit nur einem einzigen Leuchtstoff (gelb, meistens Cer-dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat) in Kombination
 - Seltener wird eine UV-LED mit mehreren verschiedenen Leuchtstoffen (rot, grün und blau) kombiniert

Die weiße Standard-LED (Luminiszenz)



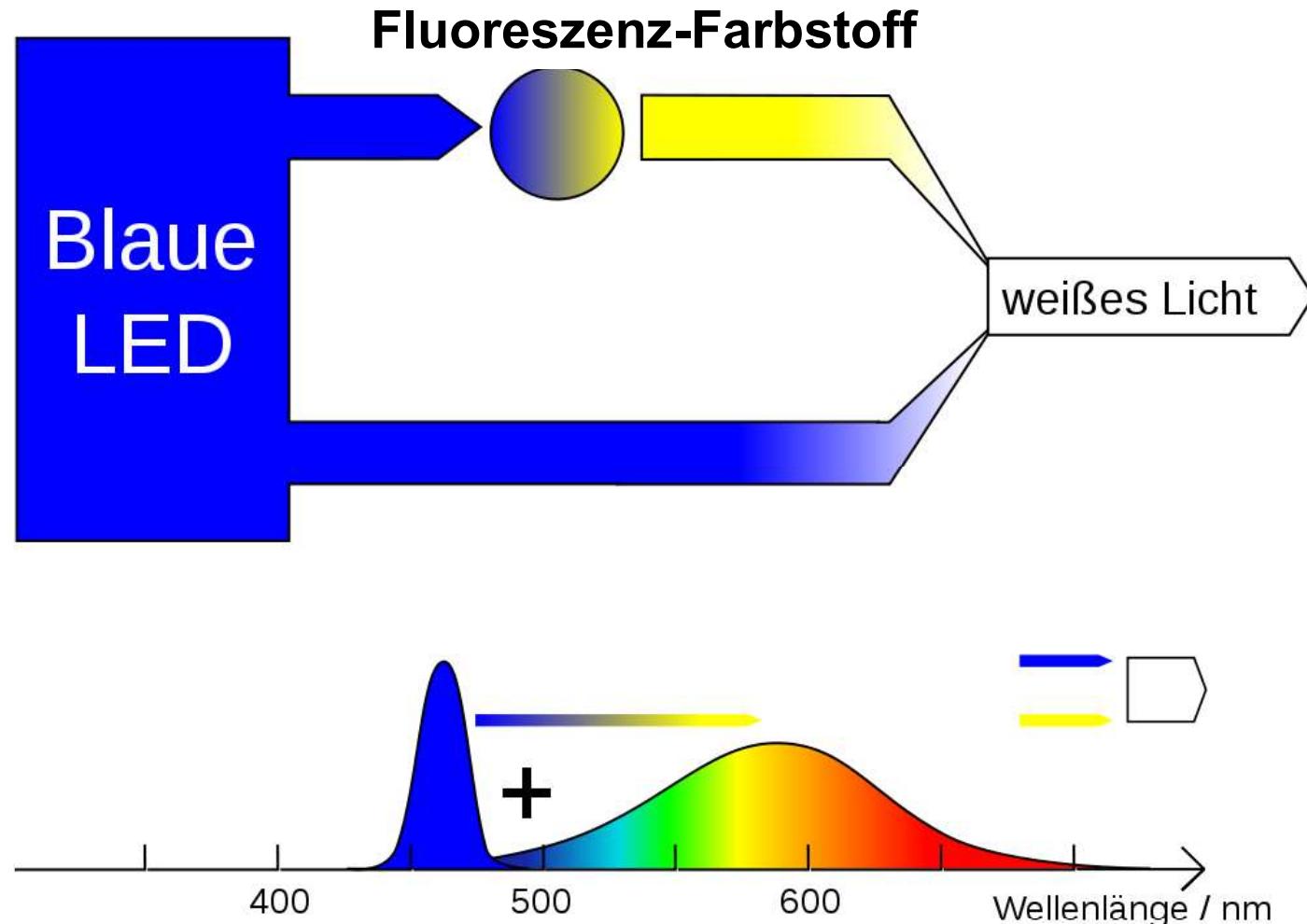


Die weiße Standard-LED



blaue LED mit Leuchtstoff enthaltendem Einbettungsmaterial zur Erzeugung weißen Lichtes

Die weiße Standard-LED (Luminiszenz)



Andere Farbtöne (Pastellfarben)

- für die Tastaturbeleuchtung von Mobiltelefonen und anderen Trend-Produkten
- im wesentlichen wie bei weißen LEDs

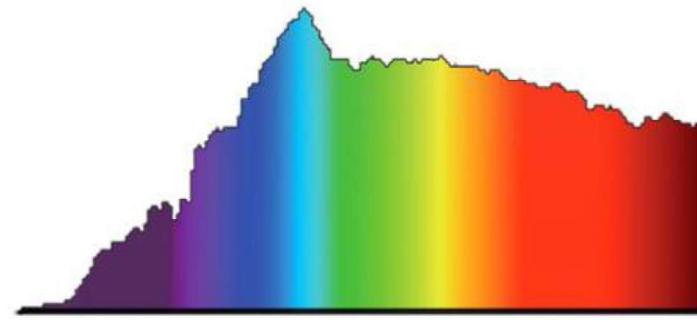
Rosa (Pink): die Fluoreszenzschicht, die über den blau leuchtenden LED-Chip gelegt wird, ist nicht gelblich, sondern rötlich

Pastellblau: die gelbliche Schicht ist etwas dünner als bei weißen LEDs, so dass ein höherer Blauanteil durchdringt das gleiche auch mit grünen LEDs als Anregung möglich.

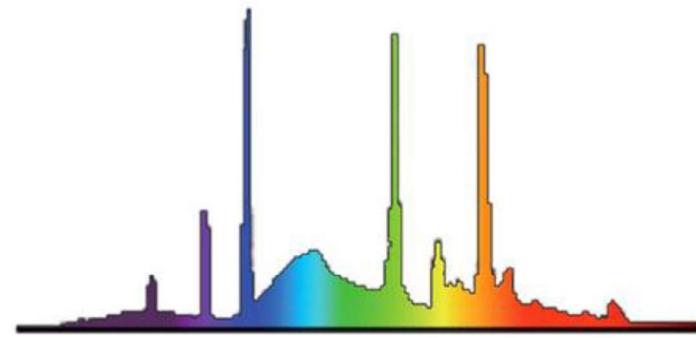
Da nur Licht hoher Frequenz einen fluoreszierenden Stoff niedrigerer Frequenz zum Leuchten anregen kann, ist es nicht möglich, mit einer roten LED einen blau fluoreszierenden Stoff anzuregen

→ für pastellfarbene LEDs können nur Chips in den „Farben“ UV, Blau und Grün verwendet werden.

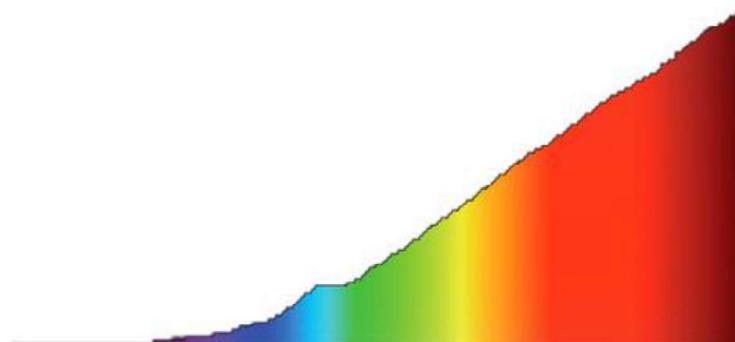
Verschiedene Lichtquellen im Vergleich



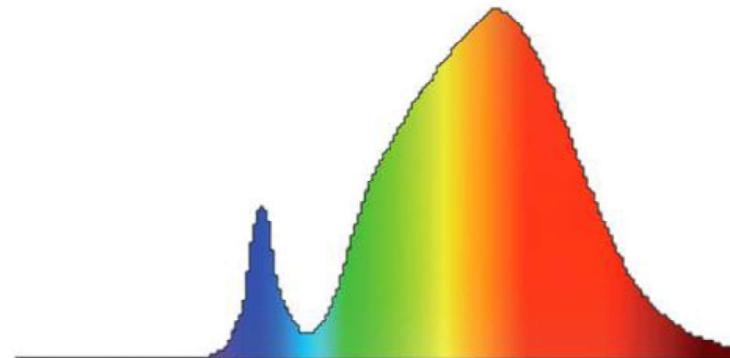
Tageslicht



Leuchtstofflampe



Glühlampe

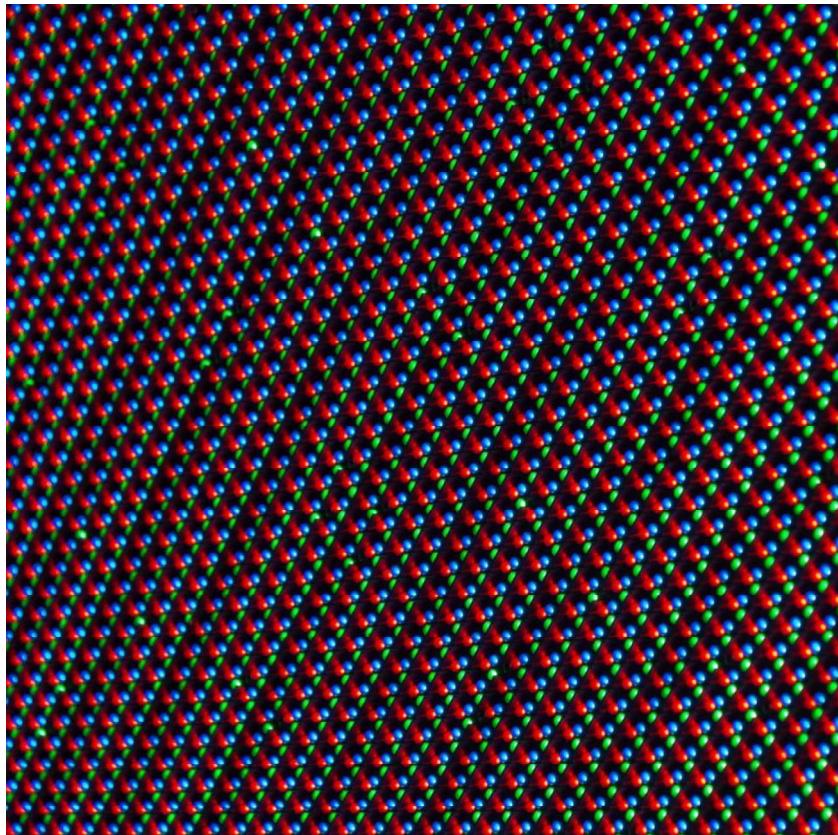


weiße LED

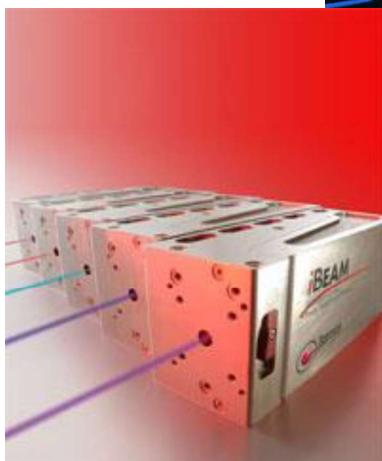
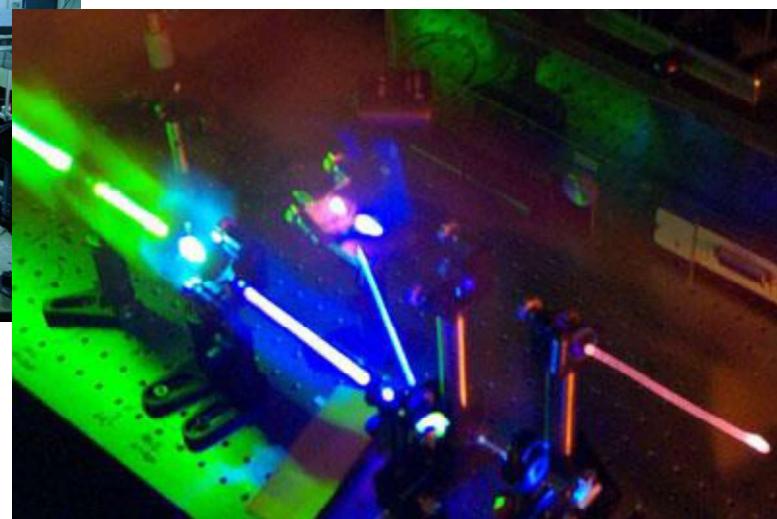
LED-Anwendungen



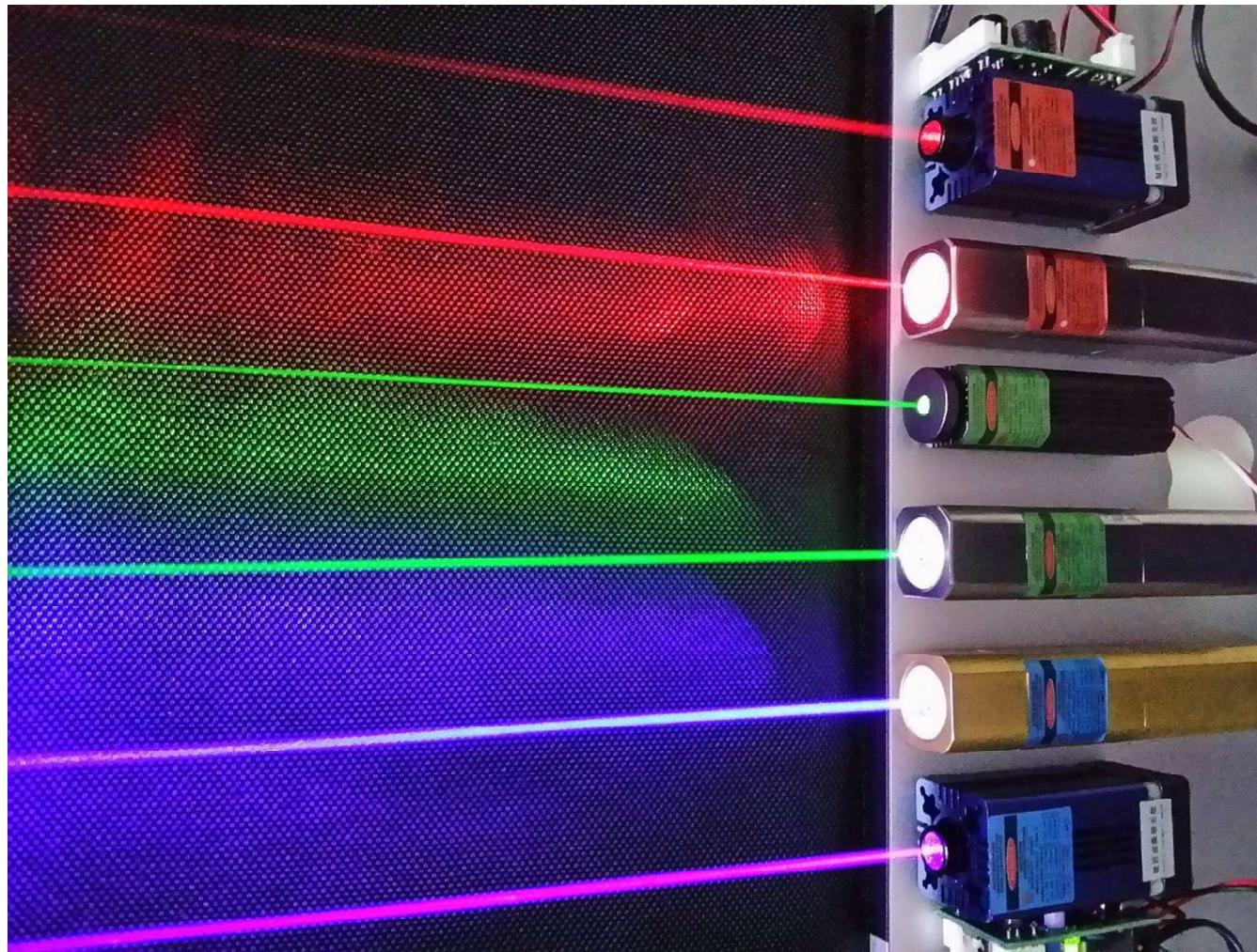
Details eines LED Displays



Der Laser

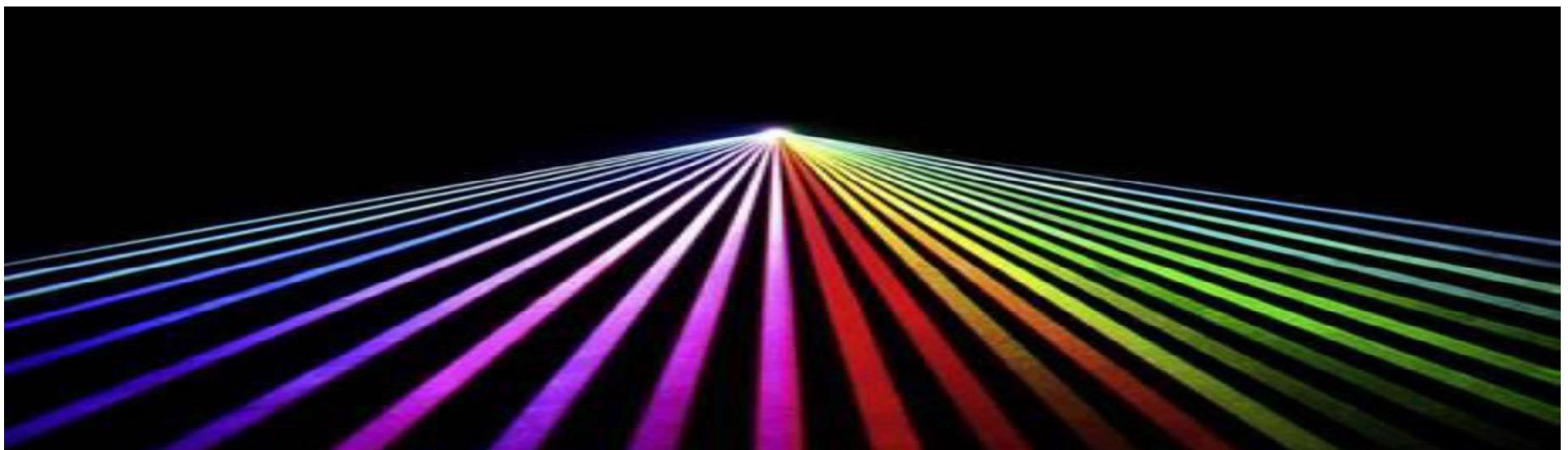


Der Laser



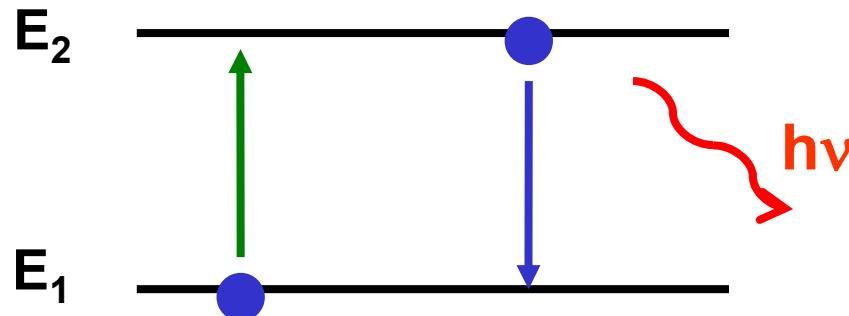
Laserlicht

- LASER = *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung)
- Laserlicht hat drei Eigenschaften, die bei anderem Licht (z.B. Sonnenlicht, Licht einer Glühlampe) fehlen:
 - Laserlicht ist nahezu einfarbig ("monochromatisch")
 - Laserlicht ist kohärent (alle Wellen in Phase!)
 - Laserlicht ist stark kollimiert (alle Wellen parallel!)



Der historische Weg zum Laser

- 1917: Publikation der Quantentheorie der Strahlung durch A. Einstein
- 1954: Townes/Gordon/Zeiger entwickeln MASER
Maser = *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*
die dem Laser entsprechende Strahlungsquelle für den Mikrowellenbereich
- 1958: Theoretische Beschreibung eines Lasers bzw. eines optischen Maser
- 1960: Rubinlaser als erster, gepulster und sichtbarer Laser durch T. Maiman
- 1961: Javan: Prinzip des Gaslasers (kontinuierlich)
- 1962: Betreiben der bekanntesten sichtbaren Laserlinie im He-Ne-Laser durch A. White und J. Rigden
- 1962: Halbleiter-Laser



Anregung des Elektrons
(z.B. *Absorption* von Licht)

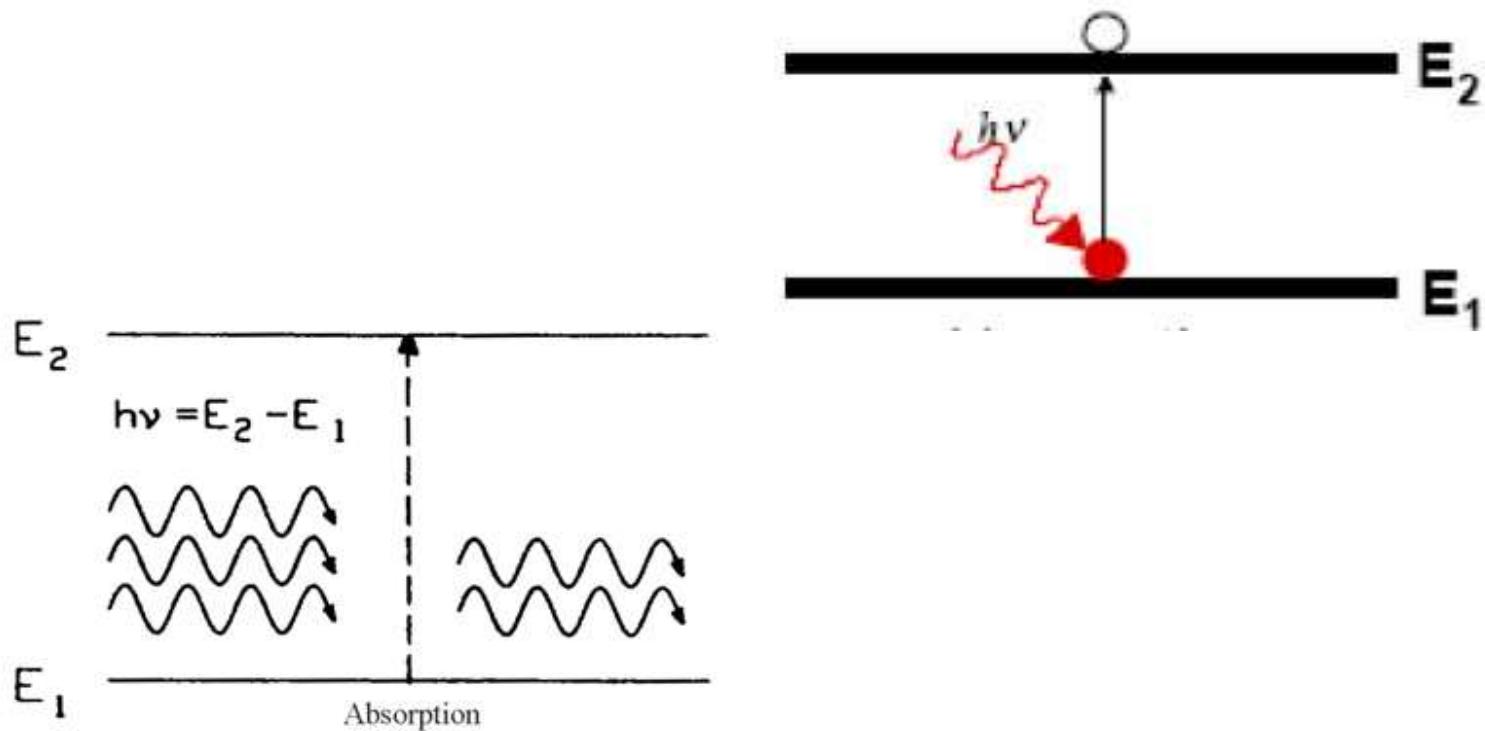
Rückkehr des Elektrons nach E_1 unter
spontaner Emission von Licht $h\nu = E_2 - E_1$

Emission dauert $t_c < 10^{-8}$ s:

→ kohärente Wellenzüge der Länge $l_c = t_c/c < 1m$

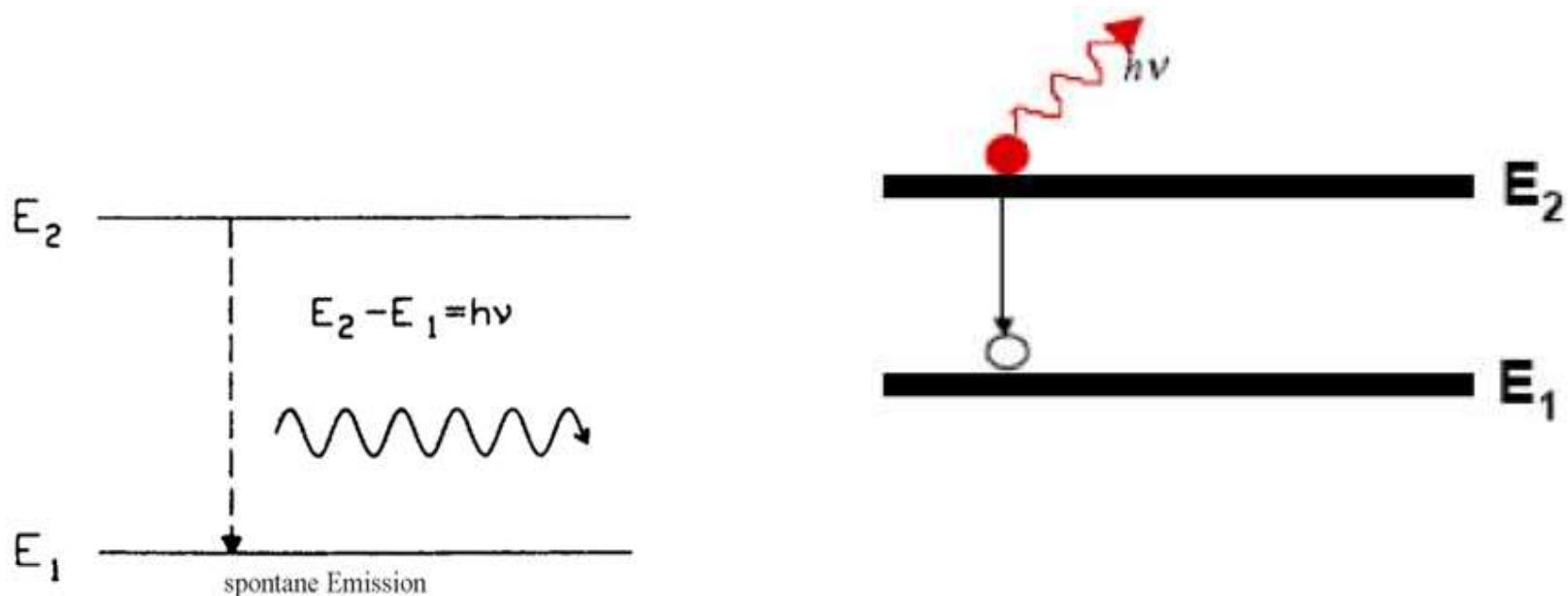
Absorption

- Energiezufuhr (optisch in Form von Licht)
- Photon stimuliert Elektronentransfer von E_1 nach E_2
- Absorption führt zur Besetzung von E_2



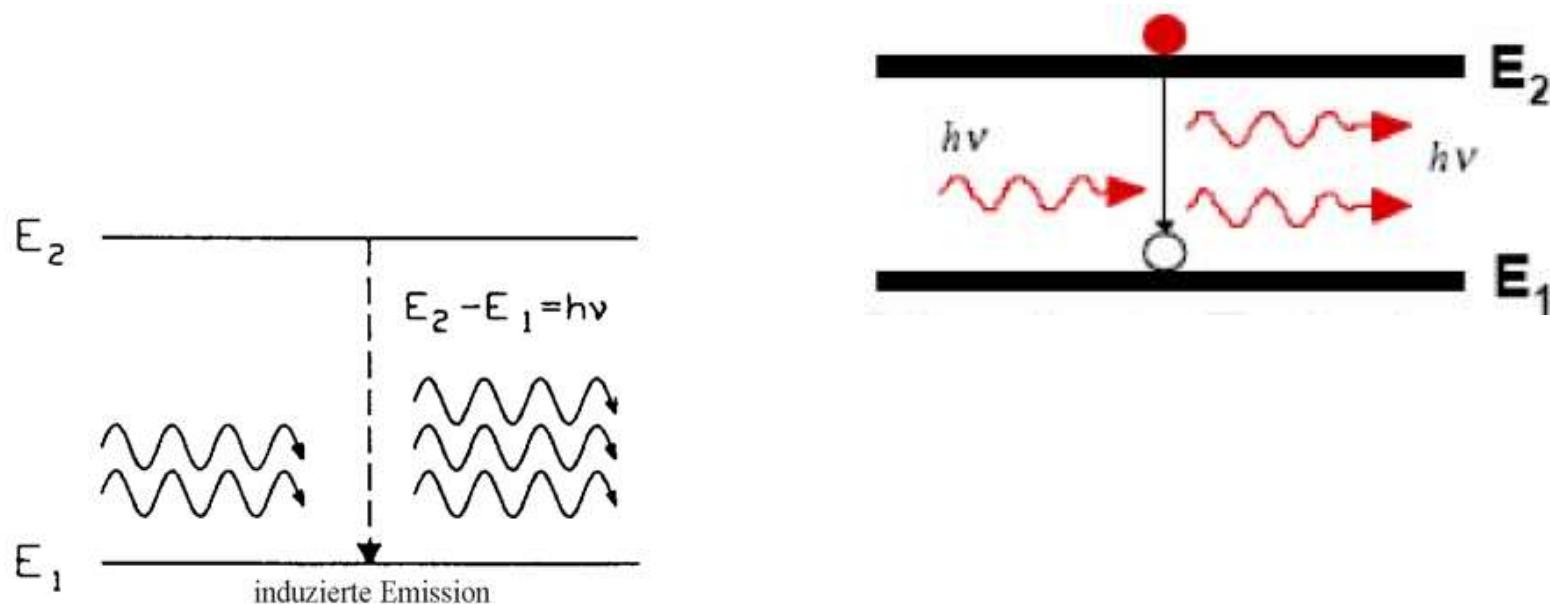
Spontane Emission

- Zustand E_2 instabil
- spontaner Übergang nach E_2 unter Aussenden eines Photons
- Photon mit beliebiger Aussendungsrichtung



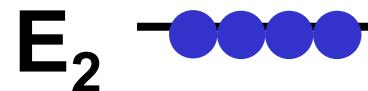
Induzierte (stimulierte) Emission

- erzwungener Übergang nach E_2 durch äußeres Feld
- Emission eines Photons gleicher Energie und damit gleicher Frequenz
- Photonen gleicher Phase und Richtung → Kohärenz



Die Grundidee des Lasers

$$h\nu = E_2 - E_1$$



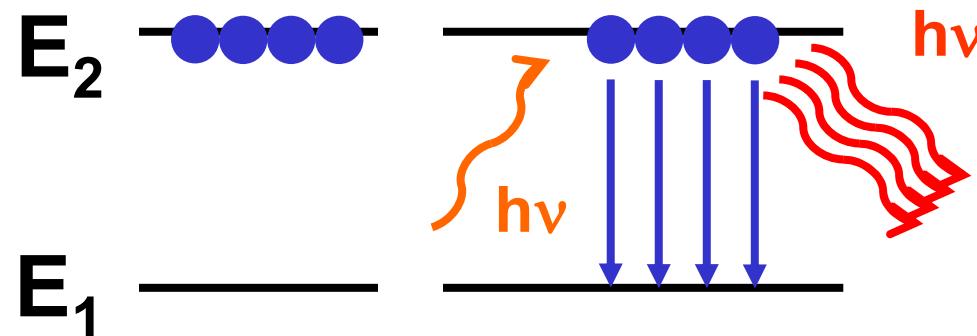
- **Stimulierte Emission:**

Wenn viele Elektronen auf E_2 sind werden sie durch Einstrahlen der Frequenz $h\nu = E_2 - E_1$ zur stimulierter Emission von Licht der Frequenz $h\nu$ veranlasst

→ Inversion der Besetzung von E_1 und E_2 nötig

Die Grundidee des Lasers

$$h\nu = E_2 - E_1$$



wie gelangen die Elektronen nach E_2 ?

→ (optisches) Pumpen

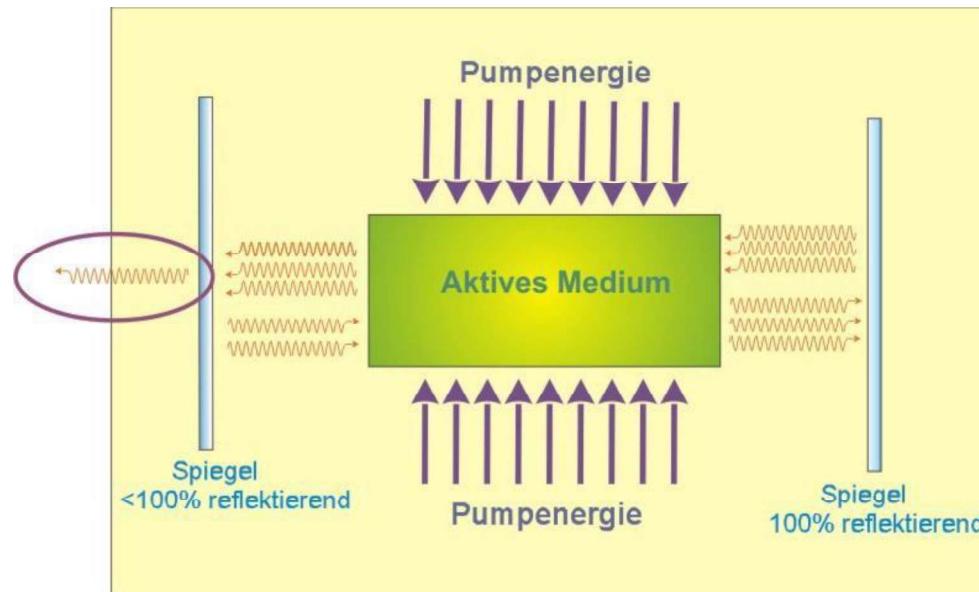
wie erzeugt man das stimulierende Licht und koppelt das Laserlicht kontrolliert aus?

→ optischer Resonator

→ kohärentes monochromatisches Licht !!

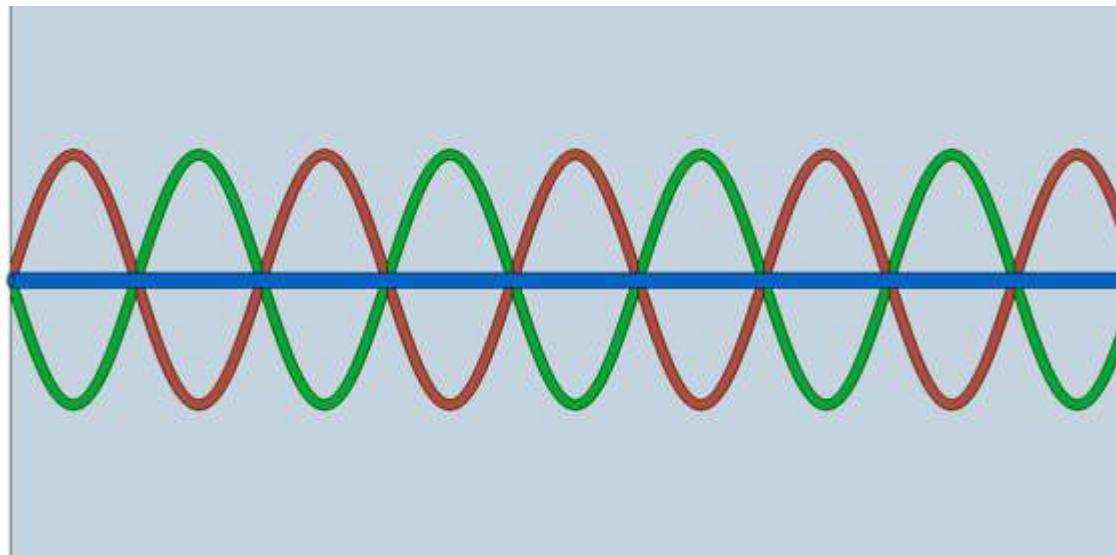
Bausteine des Lasers

- Aktives Medium
Festkörper, Halbleiter, Flüssigkeit, Gas,...
- (optisches) Pumpen
Energiezufuhr: Licht, anderer Laser, Stöße im Gas,...
- optischer Resonator
Verstärkung für stimulierte Emission



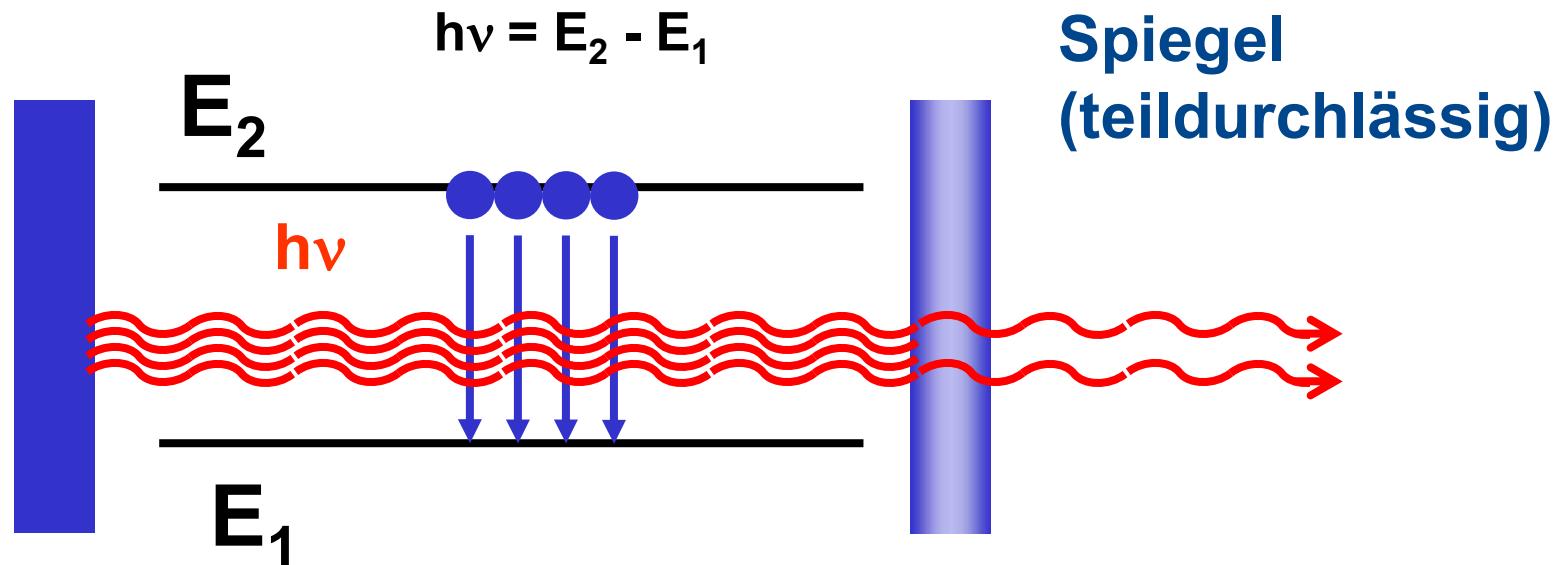
Stehende Welle für optisches Pumpen

→ Feste Positionen für „Maximal-Ausschläge“ und für „Null-Stellen“



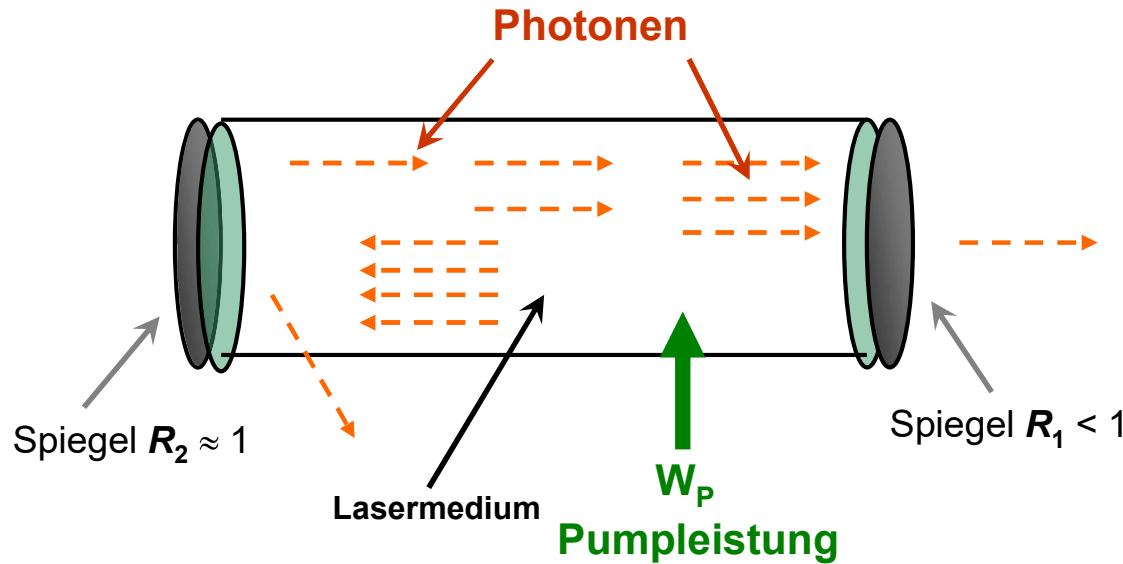
Eine stehende Welle (im engeren Sinne) entsteht aus der Überlagerung zweier gegenläufiger fortschreitender Wellen gleicher Frequenz und gleicher Amplitude.

Optischer Resonator



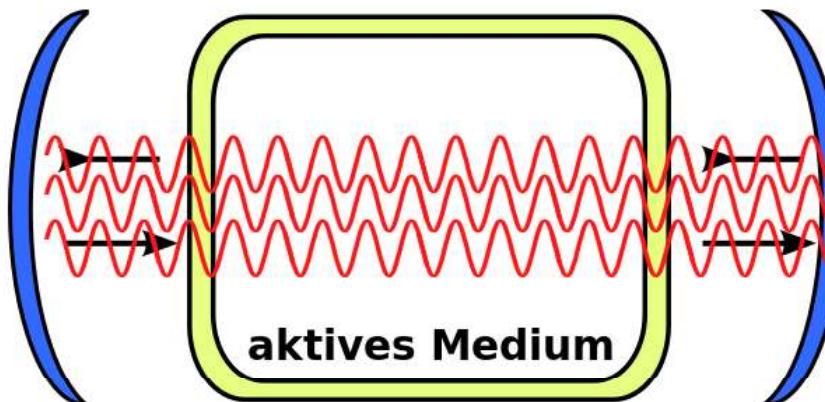
- es muss eine stehende Welle entstehen
genaue Justierung der Spiegel essentiell
- Beispiel: He-Ne Laser:
Genauigkeit der Spiegelposition bei 1m Abstand
von $\Delta L=10^{-6}$ m (= 1 μm) nötig

Praktischer Aufbau eines Lasers



- Das Lasermedium der Länge d hat an beiden Enden einen Spiegel
 - links einen perfekten Spiegel mit dem (Intensitäts-) Reflektionskoeffizienten $R_2 \approx 1$
 - rechts einen teildurchlässigen Spiegel mit dem Reflektionskoeffizienten $R_1 < 1$.

Endspiegel

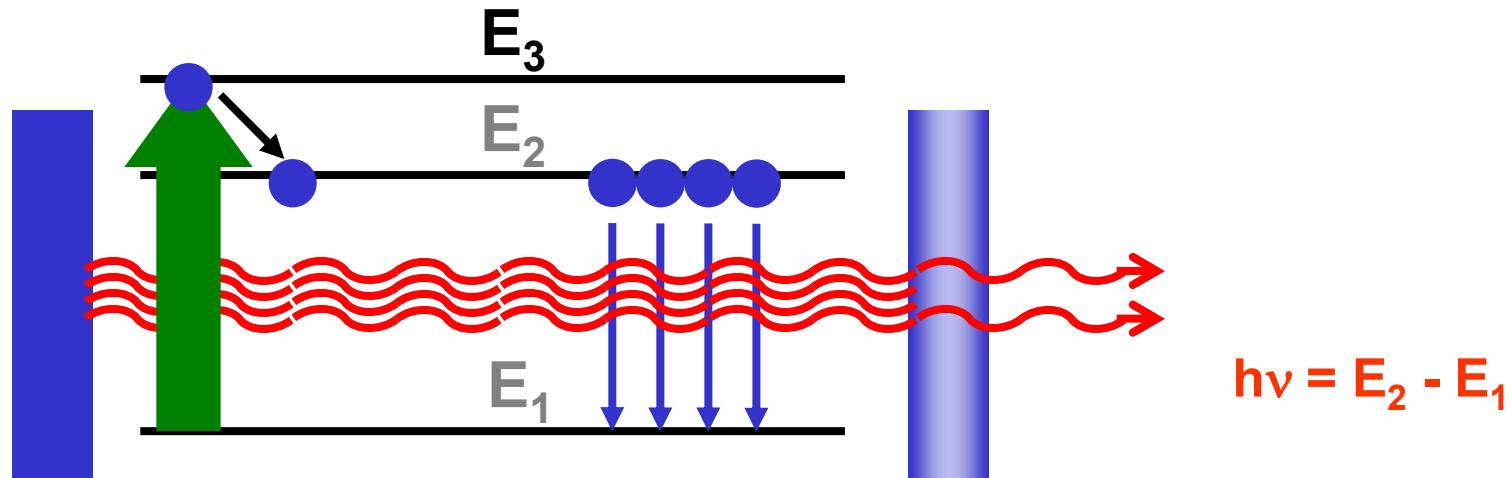


Auskoppelspiegel



Pumpleistung

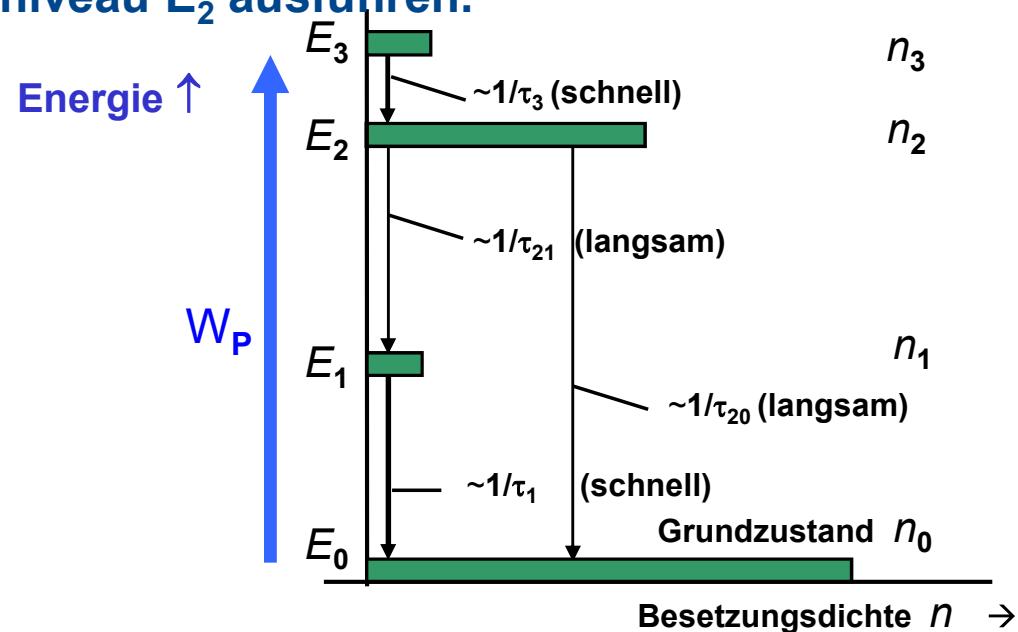
(Optisches) Pumpen



Übergang E_1-E_3 wird gepumpt, um
nicht den Laserübergang E_1-E_2 zu stören.

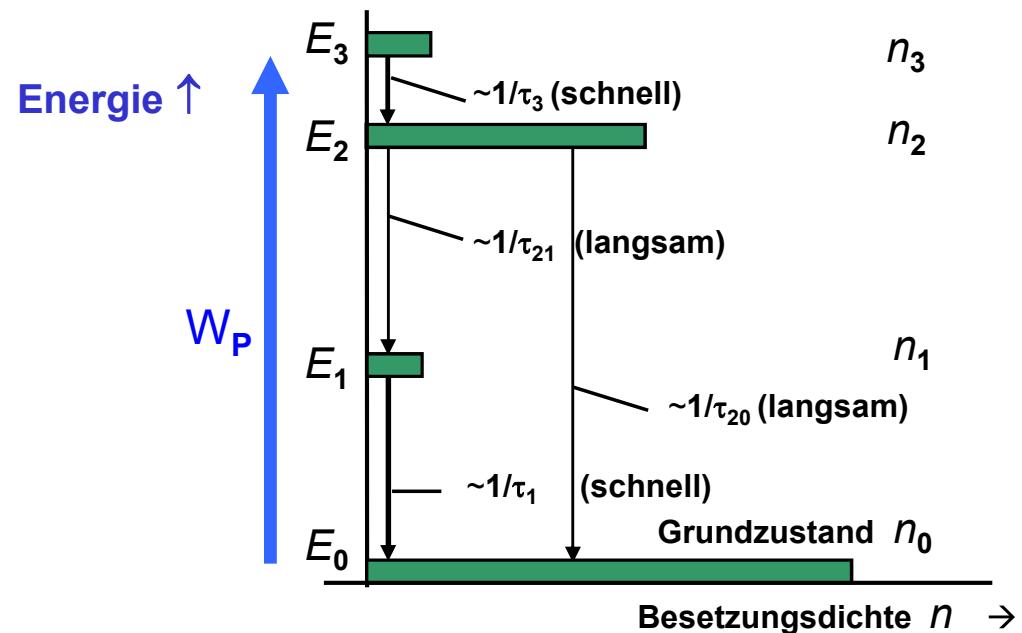
Vierniveausystem

- Zum Bau eines praktischen Lasers benötigt man mindestens drei, meistens vier Energiezustände
 Aus dem Grundzustand E_0 wird in das oberste Niveau E_3 mit der Pumprate W_P gepumpt
 dieses Niveau E_3 soll eine sehr kurze Lebensdauer τ_3 besitzen und praktisch sofort einen spontanen Übergang in das obere Laserniveau E_2 ausführen.

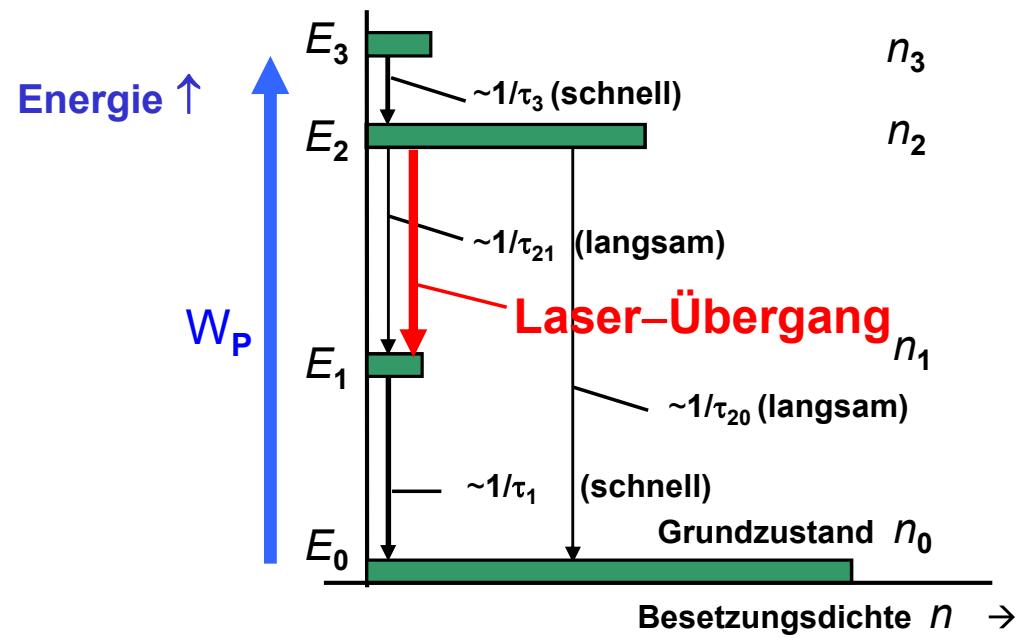


Vierniveausystem

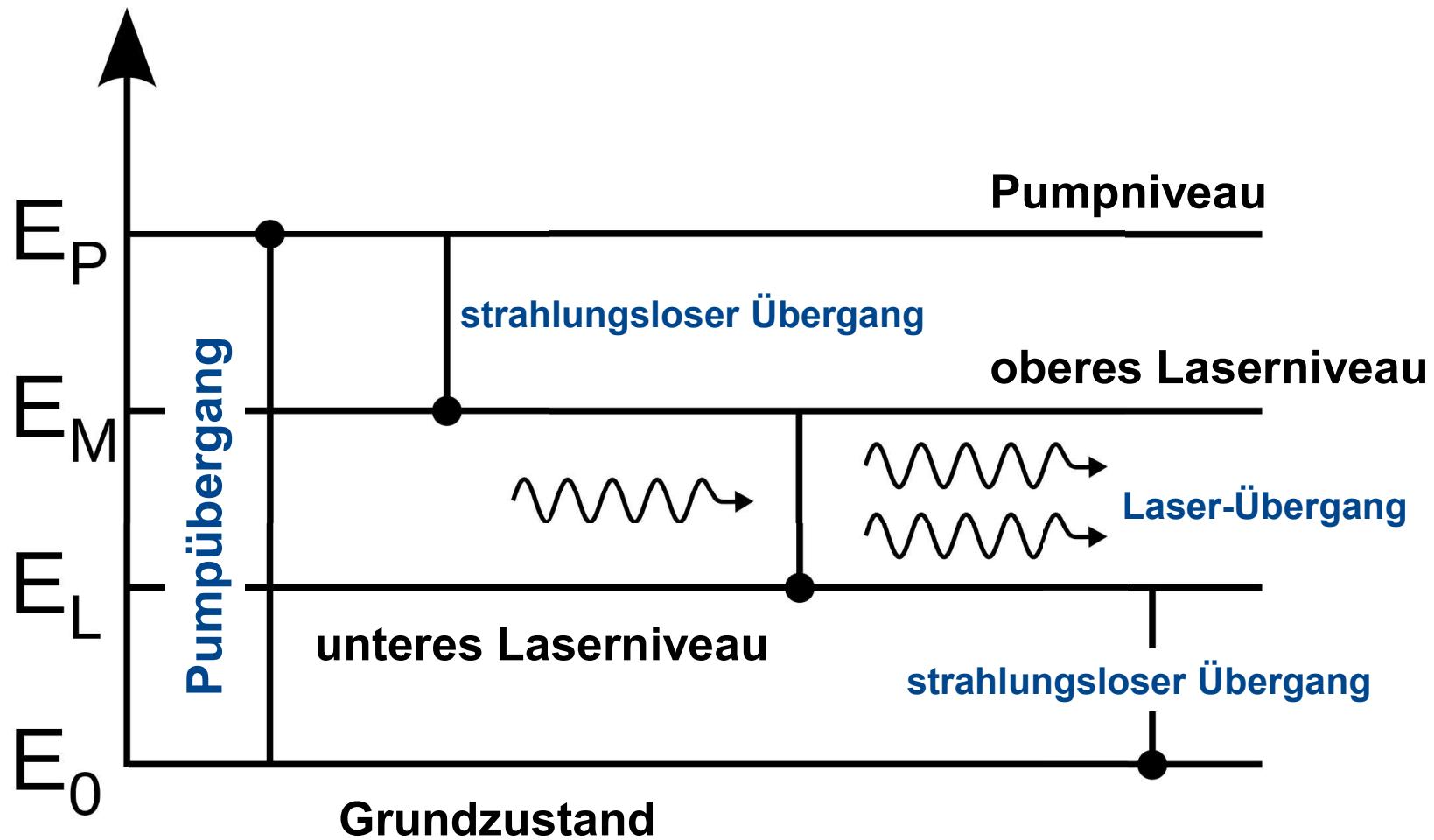
- Das Laserniveau E_2 hat eine relative lange Lebensdauer $\tau = [1/\tau_{21} + 1/\tau_{20}]^{-1}$ und bleibt länger bevölkert
- dies erlaubt den Aufbau einer starken Bevölkerungsinversion $n_2 > n_1$ gegenüber dem unteren Laserniveau E_1 , das selbst schnell in den Grundzustand übergeht.



→ Im stationären Zustand ist die momentane Bevölkerung praktisch nur in E_2 und im Grundzustand E_0 vorhanden.



Stimulierte Emission in einem Vierniveausystem



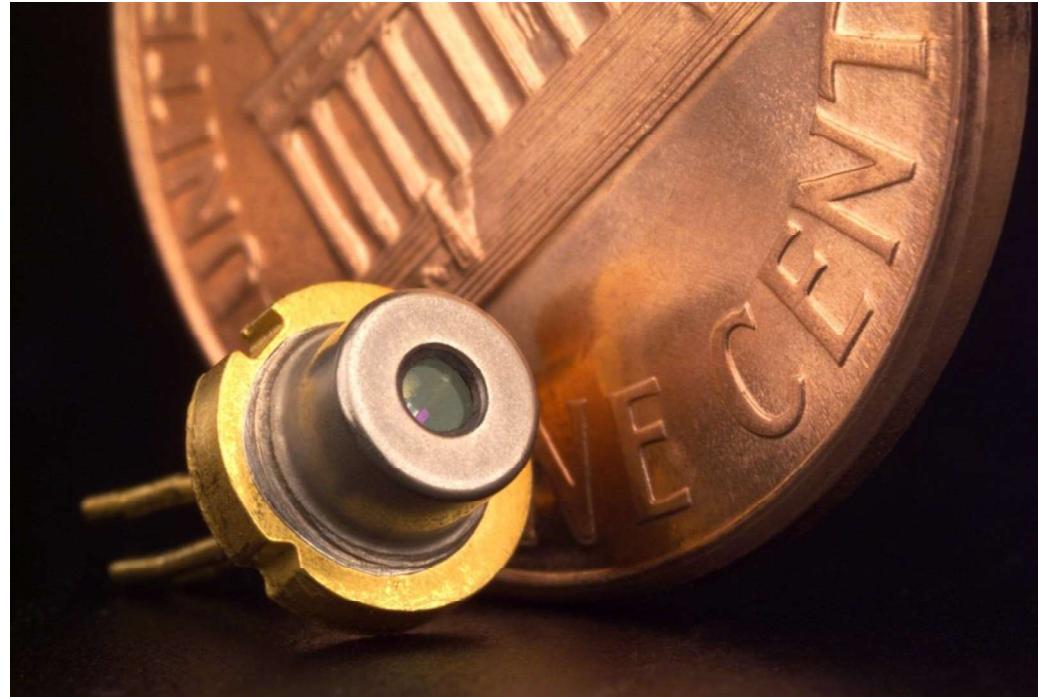
Lasertypen

- **Gasentladungslaser**
 - UV-Molekülllaser (N_2 -Laser, Excimerlaser)**
 - Ionenlaser (Argonlaser, Kryptonlaser, Metallionenlaser)**
 - Neutralatomlaser (He-Ne-Laser, Jodlaser, Metalldampflaser)**
 - Infrarot-Molekülllaser (CO_2 -Laser, CO-Laser, HF-Laser)**
- **Festkörperlaser**
 - Neodym-YAG-Laser, Rubinlaser, Glaslaser**
- **Elektronen- und Röntgenlaser**
- **Farbstofflaser**
 - z.B.: Rhodamin 6G**
- **Halbleiterlaser**
 - GaAlAs-Laser, InGaAsP-Laser**

Laserdioden (Halbleiterlaser)

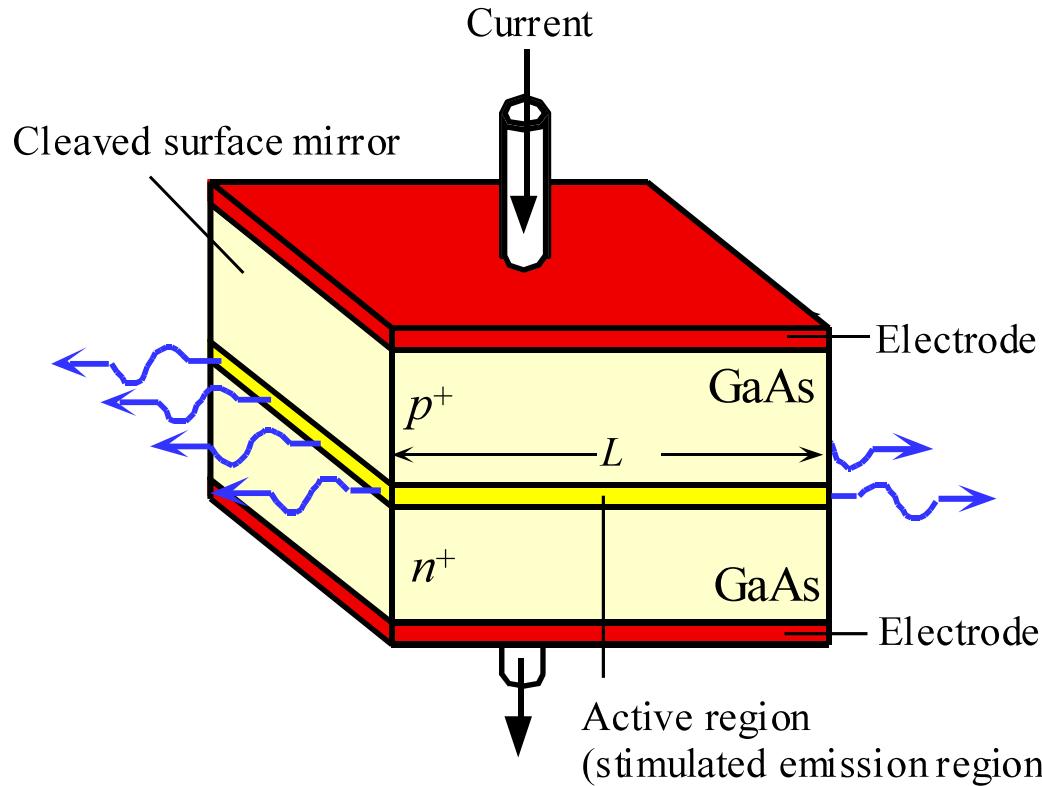
- Die Emission von Licht entsteht durch Rekombinations-Prozesse am Übergang zwischen p- und n-dotiertem Bereich
- Die Endflächen des Bauelements sind teilreflektierend sie bilden einen optischen Resonator, in dem sich eine stehende Lichtwelle ausbilden kann
- Liegt eine Besetzungsinversion vor, kann die induzierte Emission zum dominierenden Strahlungsprozess werden.
→ Die Laserdiode emittiert Laserstrahlung
- Das Erzeugen der Besetzungsinversion geschieht in Laserdioden durch elektrisches Pumpen.
Der Pumpstrom, bei dem der Laserbetrieb einsetzt, wird auch als Laserschwelle oder Schwellstrom I_{th} bezeichnet.

Einfache Laserdioden



Laserdiode im 5,6-mm-Gehäuse, wie es unter anderem in CD-Laufwerken verwendet wird
(Größenvergleich: US-amerikanische 1-Cent-Münze)

Einfachste Laserdiode



A schematic illustration of a GaAs homojunction laser diode. The cleaved surfaces act as reflecting mirrors.

© 1999 S.O. Kasap, *Optoelectronics* (Prentice Hall)

Distributed Bragg-Reflector (DBR)

- planare DBR-Spiegel sind aus Schichten mit abwechselnd niedriger und hoher Brechzahl aufgebaut
- Jede Schicht hat jeweils eine optische Weglänge d von einem Viertel der Laserwellenlänge im Material

$d = \lambda/(4n)$ mit n = Brechzahl des Mediums

$$n_1 d_1 + n_2 d_2 = \frac{\lambda}{2}$$

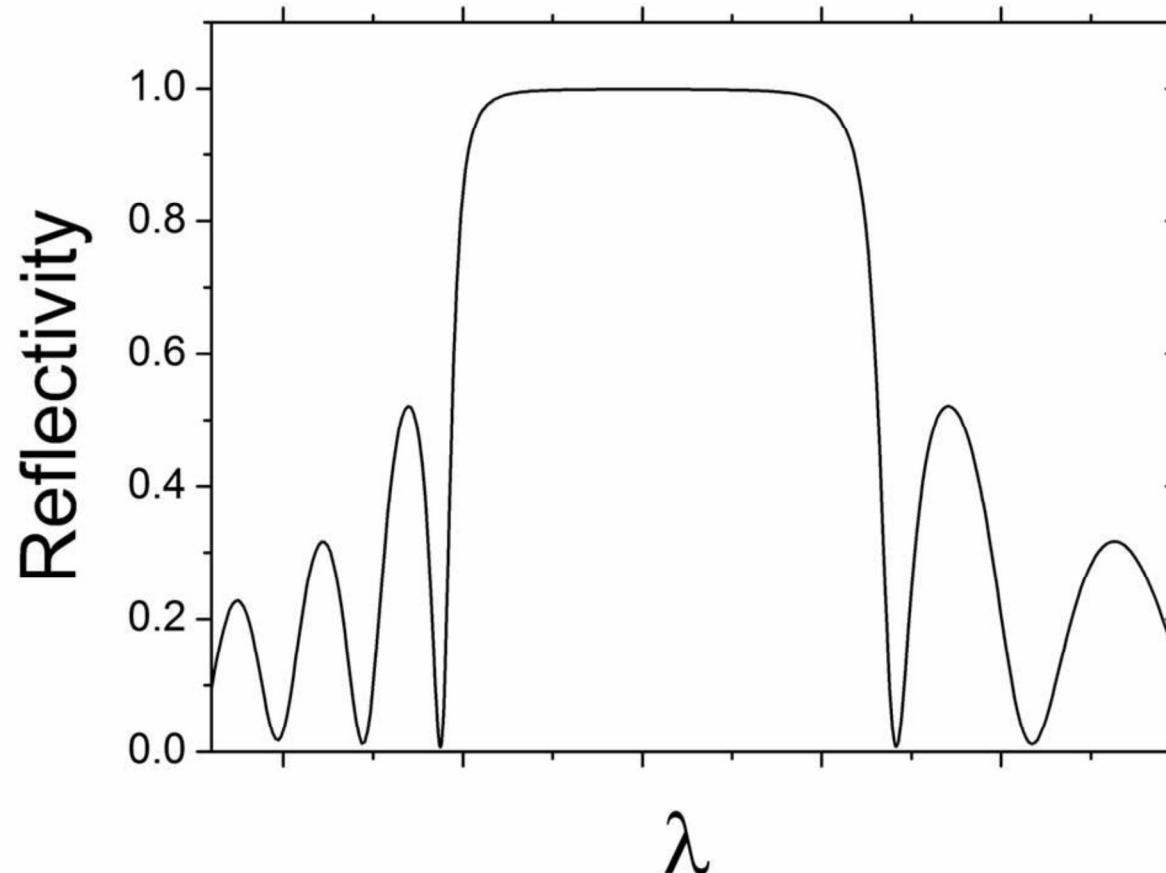
- Dadurch können die erforderlichen Intensitätsreflektivitäten von über 99 % realisiert werden

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \longrightarrow R = \left[\frac{n_0(n_2)^{2N} - n_s(n_1)^{2N}}{n_0(n_2)^{2N} + n_s(n_1)^{2N}} \right]^2$$

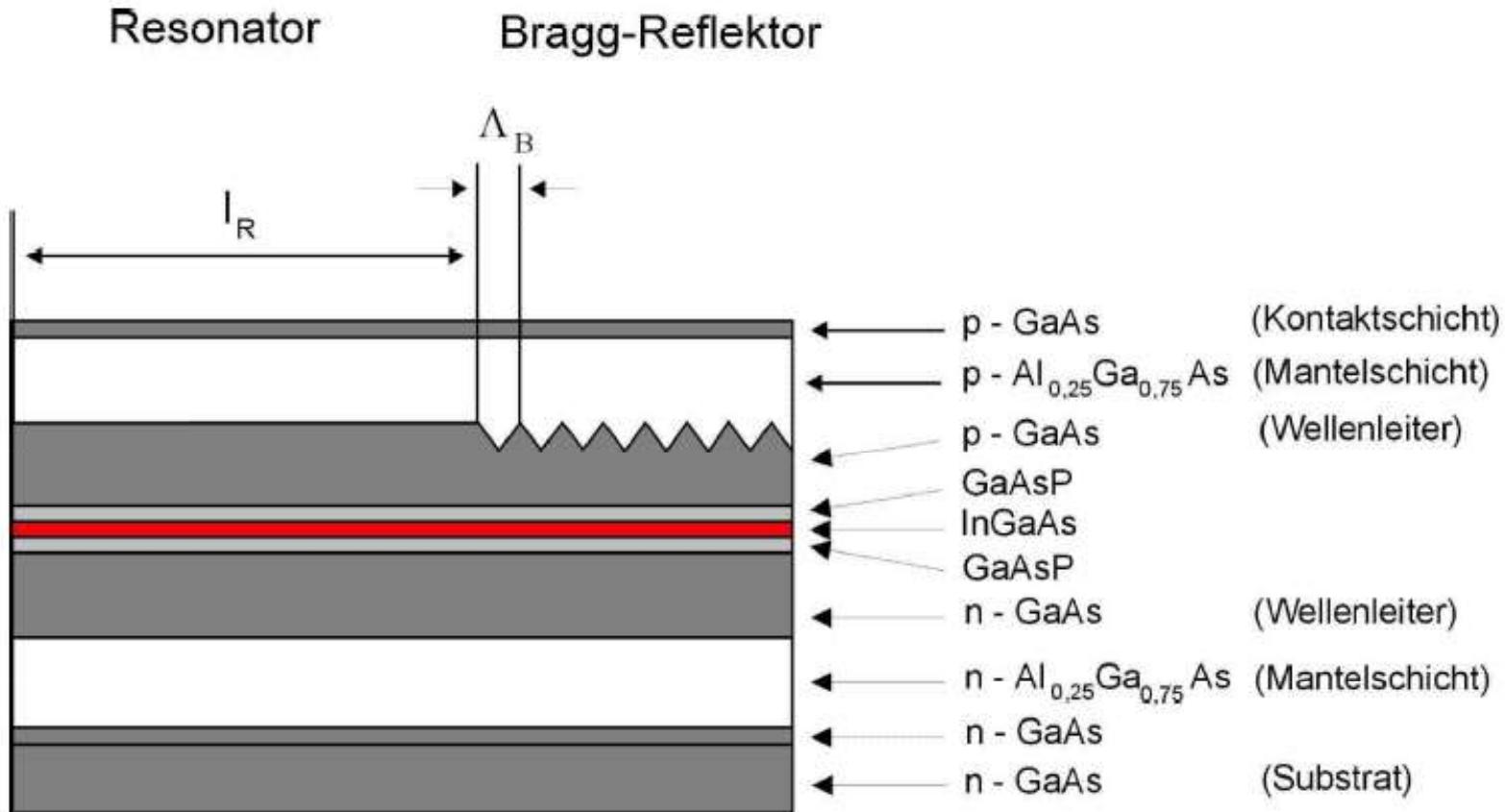
n_0, n_s – Brechungsinex der Luft und des Substrats

n_1, n_2 – Brechungsindex der Materialien 1 und 2

N – Anzahl der Doppelschichten



DBR – Laserdioden (Distributed Bragg-Reflector)

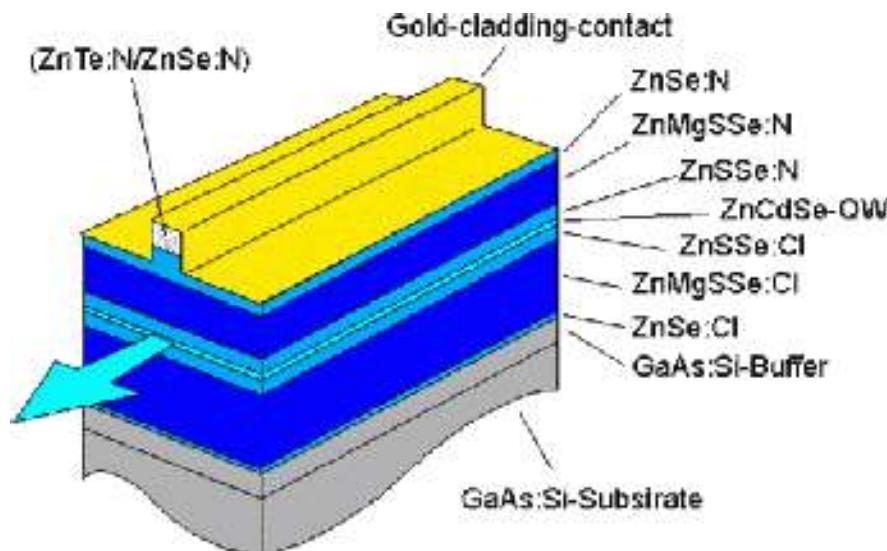


Schichtaufbau (Heterostruktur) einer DBR-Diode

Quelle: FBH Berlin

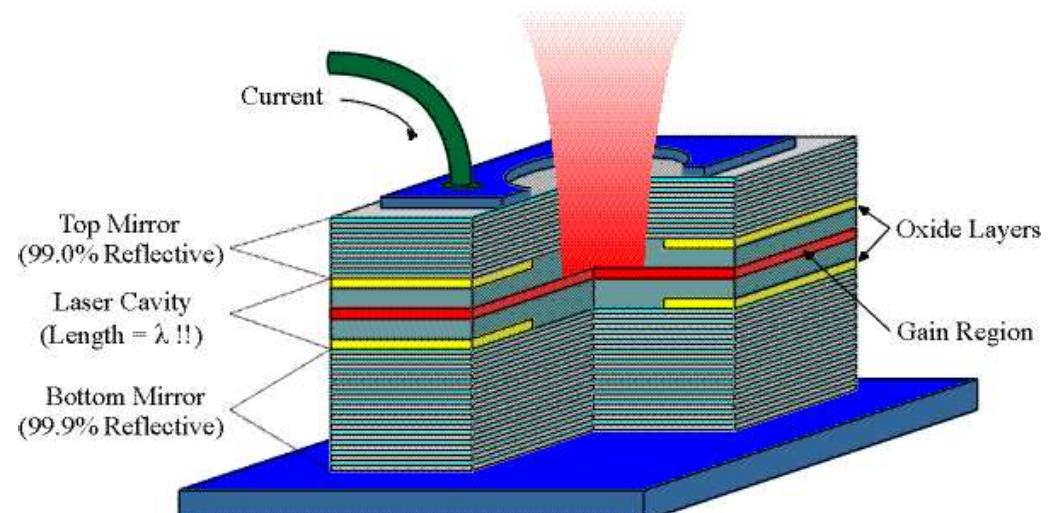
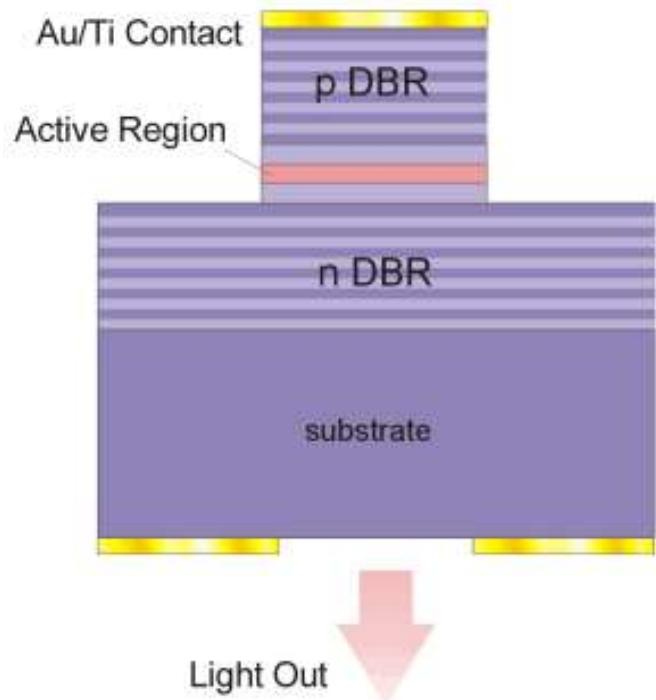
Halbleiterlaser: Beispiele

Schematischer Aufbau einer Laserdiode.
Die mittlere ZnCdSe ("Quantenwell")-Schicht emittiert die Laserstrahlung.



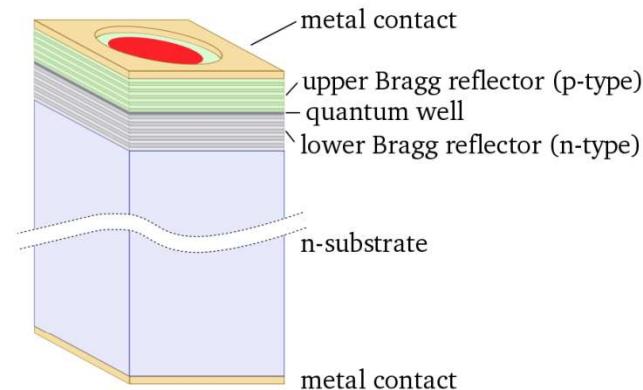
Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL)

- Halbleiterlaser, bei dem das Licht senkrecht zur Ebene des Halbleiterchips abgestrahlt wird, im Gegensatz zum herkömmlichen Kantenemitter, bei dem das Licht an ein oder zwei Flanken des Chips austritt.



Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL)

- Der Laserresonator wird durch zwei parallel zur Ebene des Wafer angeordnete DBR-Spiegel gebildet, zwischen denen eine aktive Zone (üblicherweise mit zweidimensionalen Quantentöpfen, auch Quantenfilm genannt) für die Erzeugung des Laserlichts eingebettet ist.
- Aufgrund der kleinen Abmessungen des eigentlichen Lasers von nur wenigen Mikrometern in jeder Richtung haben VCSEL kleinere Ausgangsleistungen im Vergleich zu Kantenemittern.



Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL)

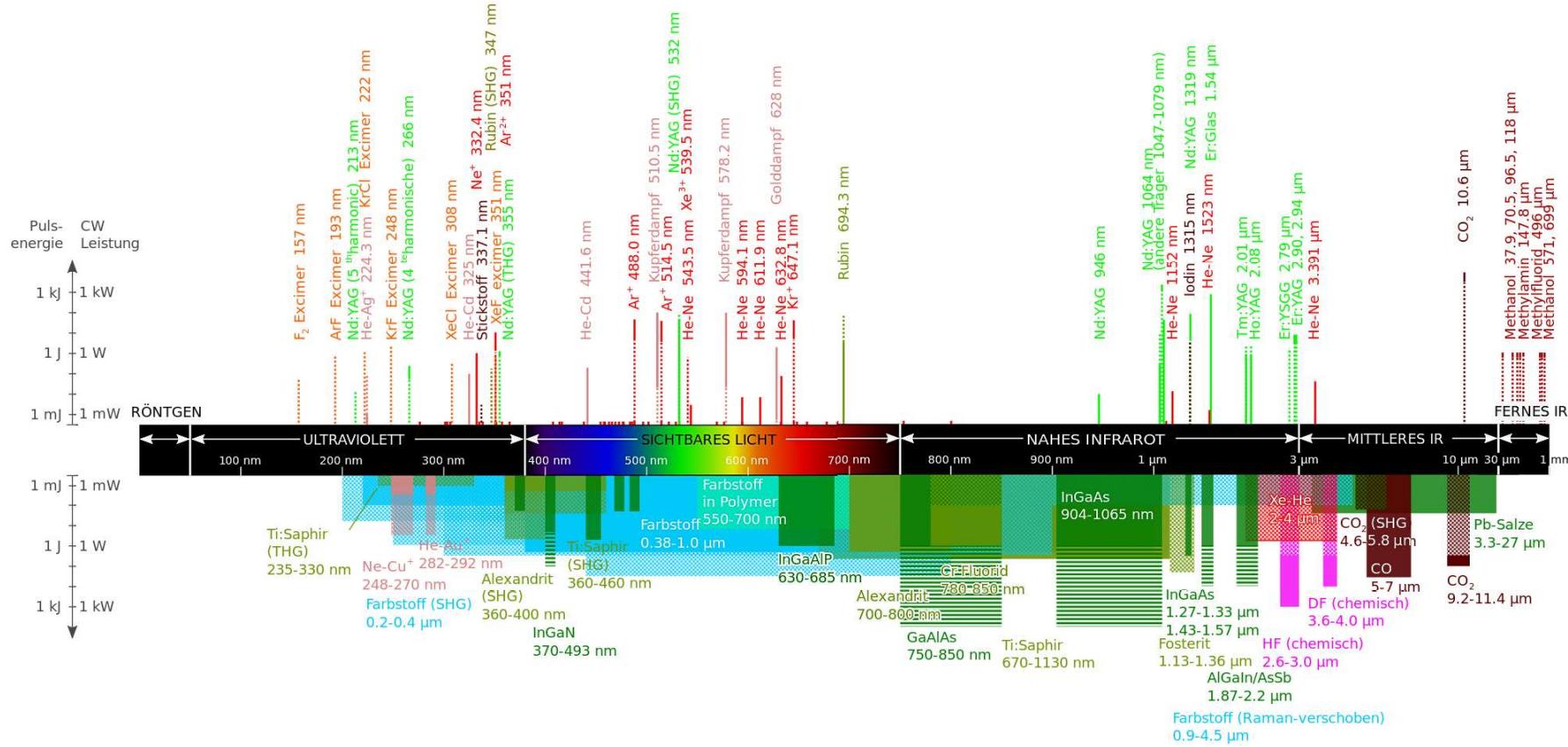
- Man unterscheidet optisch gepumpte VCSEL, bei denen die aktive Zone von außen mit Licht kürzerer Wellenlänge zum Strahlen angeregt wird, und elektrisch gepumpte VCSEL, die eine *p-i-n*-Diode darstellen.
- VCSEL für Wellenlängen zwischen 650 nm und 1300 nm basieren praktisch ausschließlich auf GaAs, während bei Wellenlängen zwischen 1300 nm und 2000 nm (langwellige VCSEL) zumindest die aktive Zone auf InP oder GaInAsN basiert

Kommerzielle Halbleiterlaser

Wellenlänge	Halbleiter	Anwendungen
405 nm	Indiumgalliumarsenid	Blu-ray, HD-DVD-Laufwerke
445 nm	InGaN u.a.	Beamer
515 nm	Indiumgalliumnitrid	in Entwicklung
531 nm	Nd:YAG-Laser	Laserpointer (grün)
635 nm	z.B. AlGaAs	Laserpointer (rot), LIDAR
650 nm	AlGaAs, GaAsP o.ä.	DVD-Laufwerke
670 nm	AlGaAs, GaAsP	Barcodelesegeräte
780 nm	GaAs	CD-Laufwerke, Laserdrucker, Lichtschranken

LIDAR = *Light detection and ranging* ist eine dem Radar sehr verwandte Methode zur optischen Abstands- und Geschwindigkeitsmessung

Kommerzielle Laser



Wichtige Begriffe

- Element- und Verbindungshalbleiter
 - Direkte und indirekte Halbleiter
 - Dotieren von Verbindungshalbleitern
 - Ladungsträgerbeweglichkeiten
- Welleneigenschaften
 - Monochromatisch, kohärent, kollimiert
- Leuchtdioden
 - Funktionsprinzip
 - Verschiedene Farben
 - Weisse Dioden
- Laser
 - Funktionsprinzip (stimulierte Emission, Pumpen, beteiligte Energieniveaus, ...)
 - Resonatoren
 - Halbleiterlaser (Prinzipieller Aufbau, VCSEL, ...)