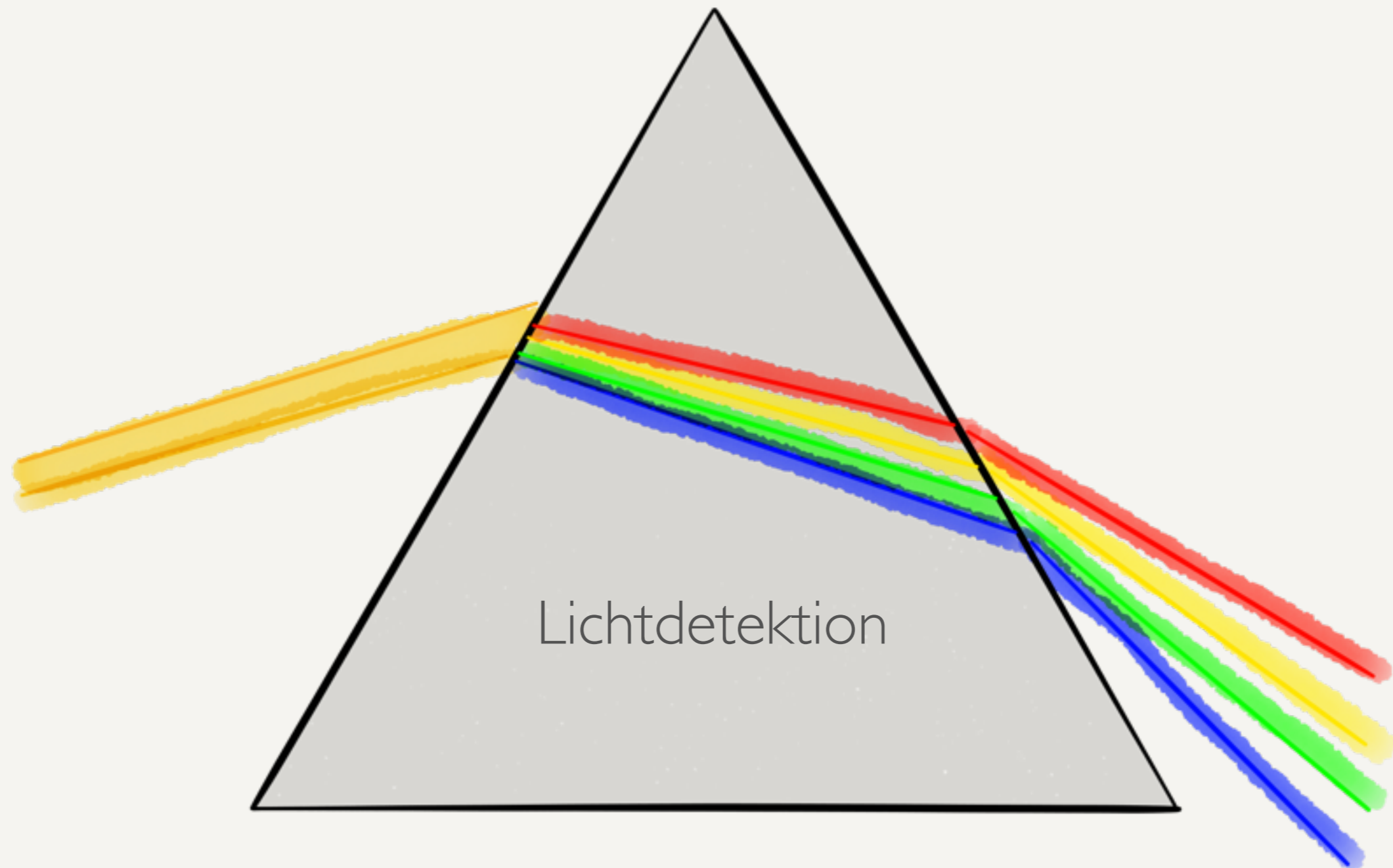


Photonik

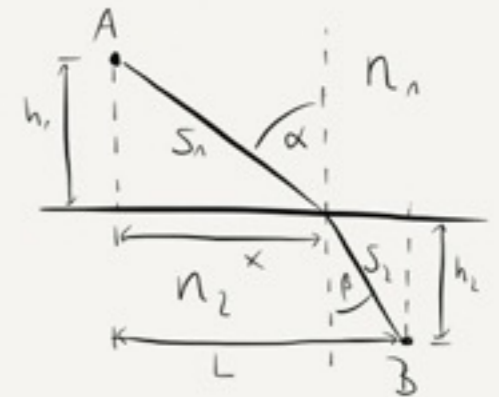
Technische Nutzung von Licht



Wiederholung Optik Grundlagen I

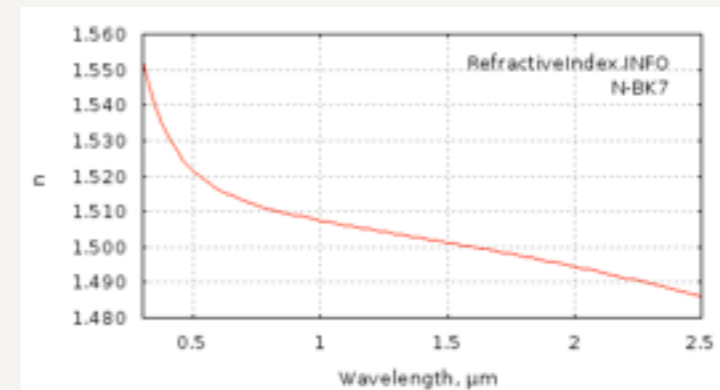
- Lichtstrahlen
 - Fermat'sches Prinzip
 - Reflexion und Brechung (Snellius'sches Gesetz)

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta$$

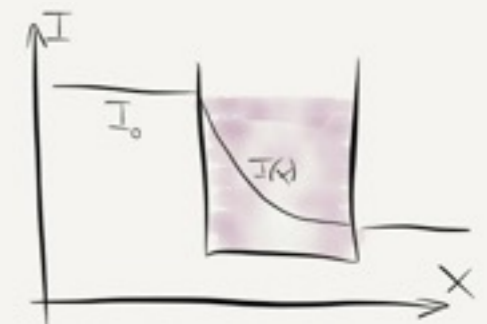
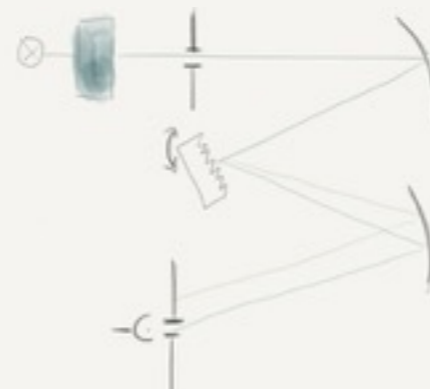


- Eigenschaften optische Medien

- Dispersion
- Absorption



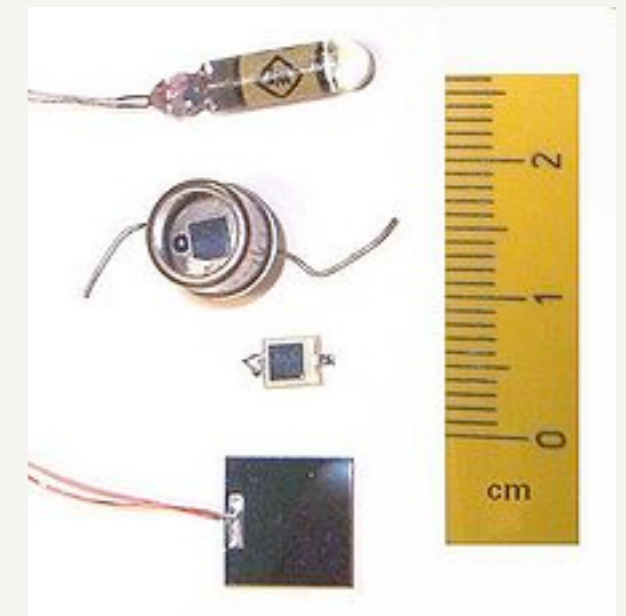
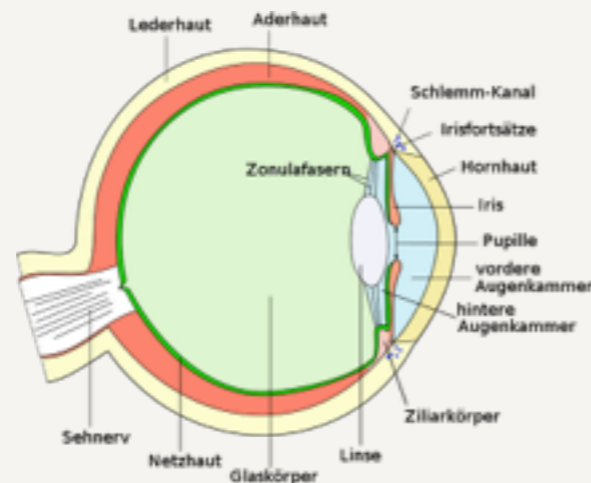
- Messtechnik:
Prismenspektralapparat
- Modernes Spektrometer



Überblick für Heute: Lichtdetektion

- Photoelektrischer Effekt
 - Äußerer P.E. : Photokathoden und -zellen
 - Innerer P.E. : Halbleiter (p-n-Dioden)
- Photodiode und -transistor
- Bolometer
- Radiometrische und photometrische Messgrößen

Lichtempfänger



- Auge
- Photographischer Film
- Photoelektrischer Effekt (Metalle, Halbleiter)
- Bolometer (Wärmebildkamera)

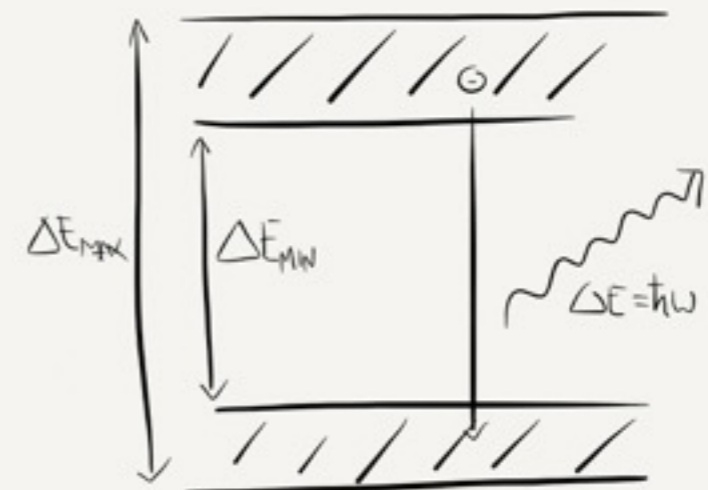


Photoelektrischer Effekt

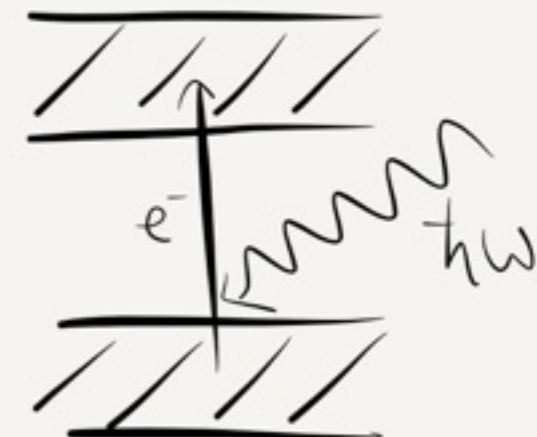
Photoelektrischer Effekt

- Halbleiter in Vorlesung I:
Strom wird zu Licht
- Hier: Licht wird zu Strom.
- Äußerer Photoeffekt:
Elektronen ‚fliegen raus‘ aus
dem Material
- Innerer Photoeffekt:
Elektronen-Lochpaare
werden im Material gebildet

LED: Strom wird zu Licht



Photodiode: Licht wird zu Strom



Photokathode

Äußerer photoelektrischer Effekt

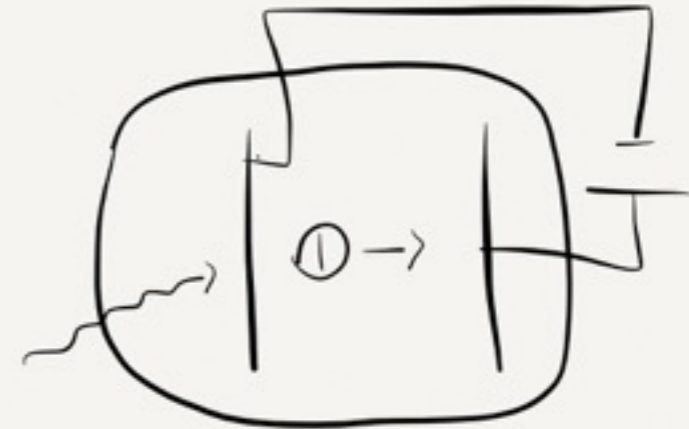
- Elektronen werden durch die Energie des Lichts aus dem Metall (Halbleiter) heraus ‚geschlagen‘. Sie überwinden dabei die Austrittsarbeit

$$W_A = eU_A$$

- Überschüssige Energie des Photons E_P wird in kinetische Energie des Elektrons umgewandelt.

$$E_{\text{kin}} = E_P - W_A$$
$$\Rightarrow \frac{1}{2}mv^2 = h\nu - eU_A$$

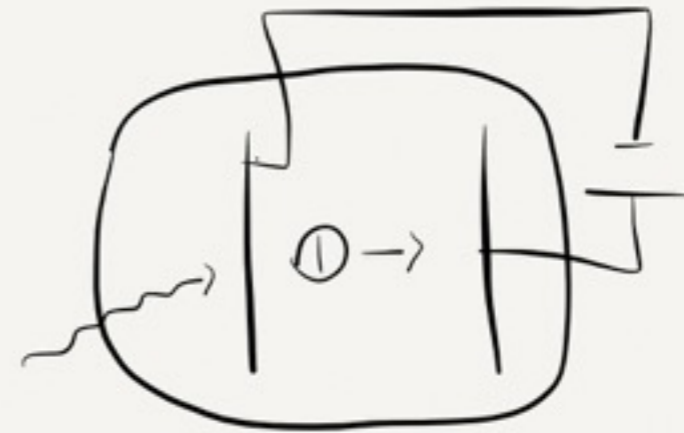
- In evakuierten Photokathoden werden die austretenden Elektronen durch eine Spannung beschleunigt.
- Photokathoden werden in Photozellen, Photomultiplier und Bildverstärkern eingesetzt
- Zur Messung der Austrittsarbeit wird die Photokathode mit Gegenspannung betrieben.



Photokathode

Äußerer photoelektrischer Effekt

- Aufgabe: ein Photon setzt aus einem Metall, dessen Austrittsarbeit 2 eV beträgt, ein Photoelektron mit der kinetischen Energie 2 eV frei. Wie groß muss die Energie dieses Photons mindestens sein?

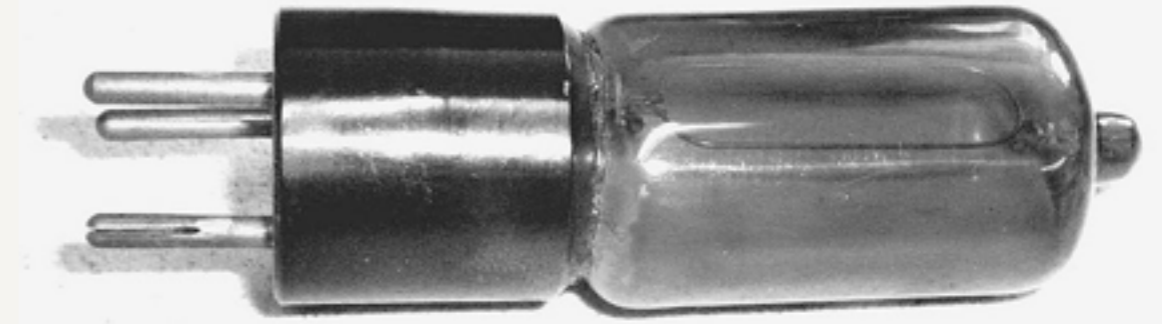


$$W_A = eU_A$$

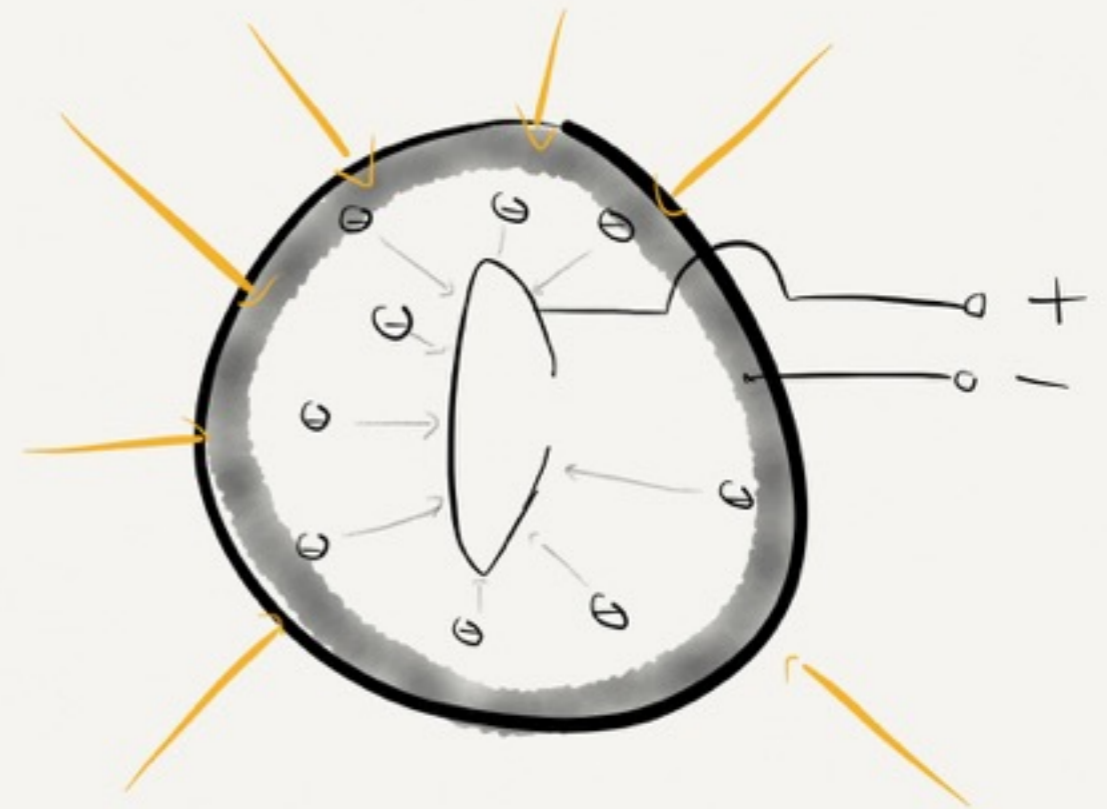
$$E_{\text{kin}} = E_P - W_A$$

$$\Rightarrow \frac{1}{2}mv^2 = h\nu - eU_A$$

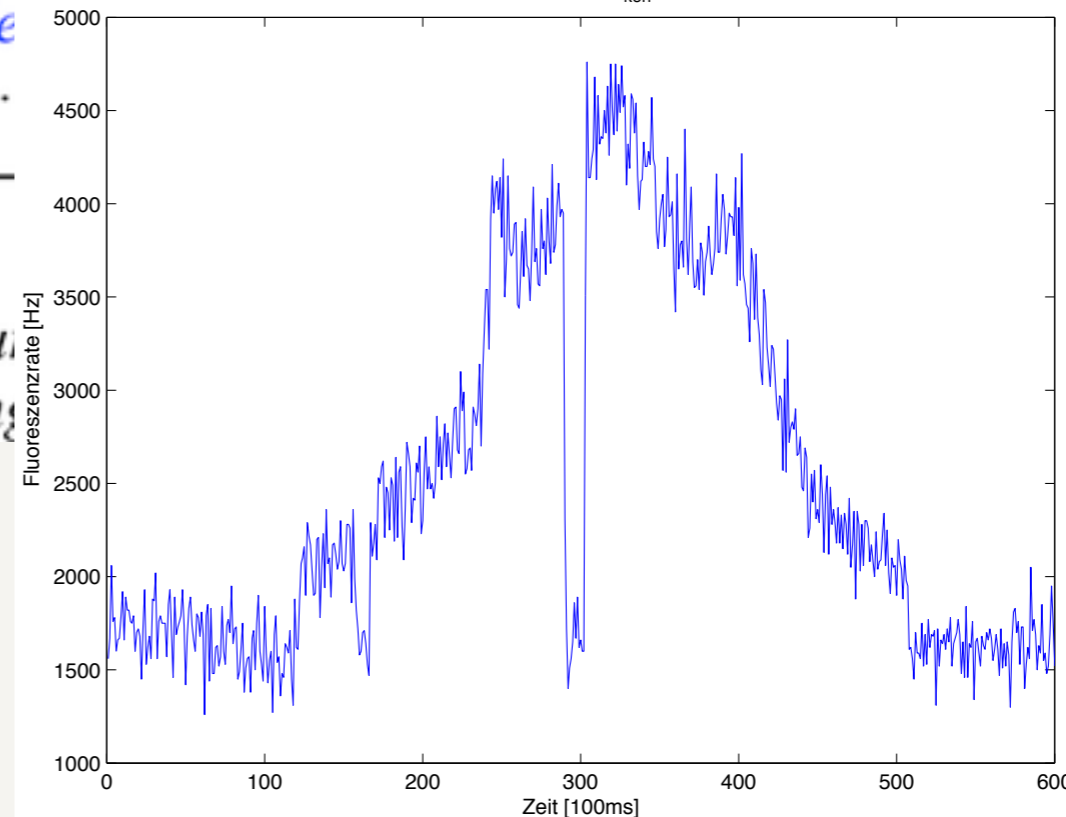
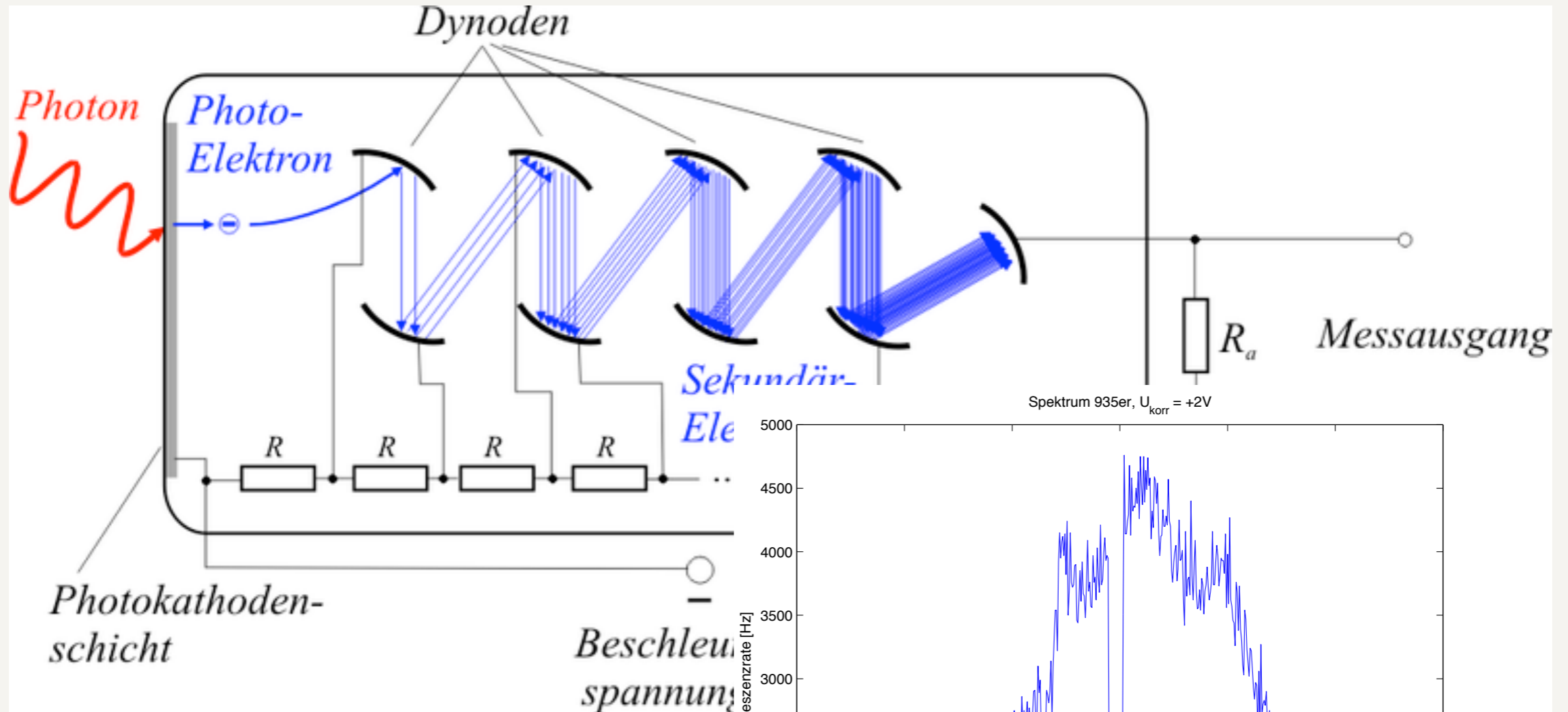
Photozelle



- Innenseite des Glaskolbens ist mit Photokathode aus Metall bedampft
- Anode ist Drahtbügel im Innern des Glaskolbens
- Spannung zwischen den Elektroden beschleunigt die Elektronen zur Anode: ein Strom fließt
- Strom geht in Sättigung

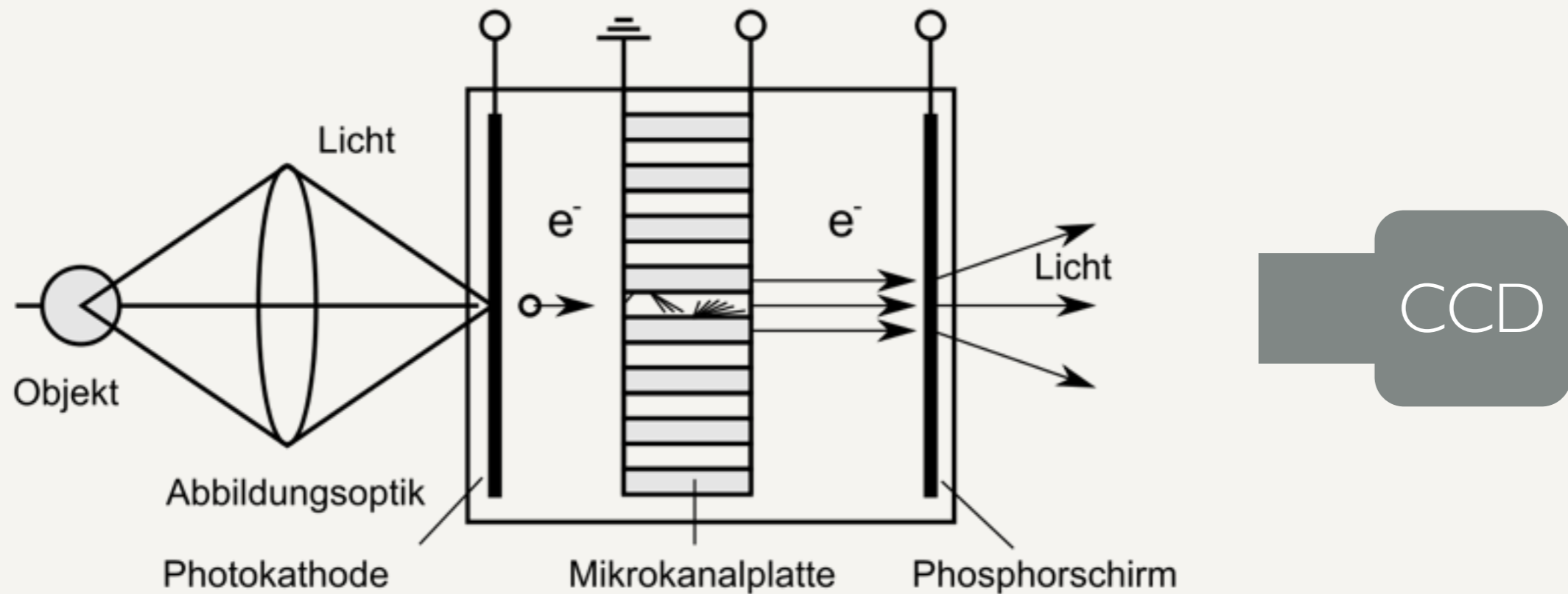


Photomultiplier Verstärker

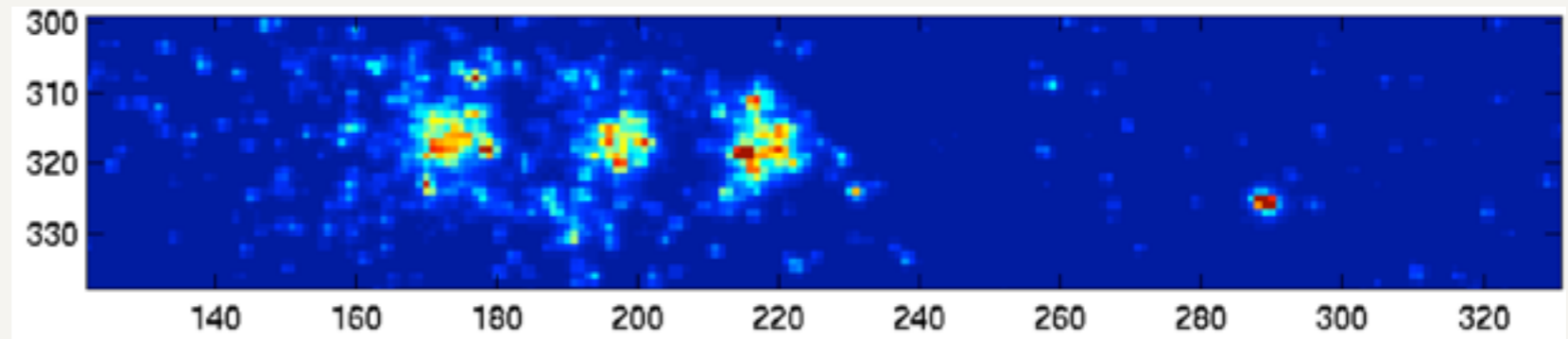


Bildverstärker

Verstärker mit räumlicher Auflösung



3 Ytterbium-Ionen
Skala in Pixel
Abstand zwischen zwei
Ionen ca. $10 \mu\text{m}$



Zusammenfassung

Äußerer photoelektrischer Effekt

- Elektronen werden aus der Kathode herausgelöst und erhalten einen Impuls vom Photon. Durch eine Spannung zwischen Anode und Kathode kann ein Strom fließen.
- Photomultiplier lösen durch Hochspannung eine Elektronenlawine aus, so dass einzelne Photonen detektiert werden können.
- Ein Bildverstärker benutzt auch Elektronenlawinen und fügt durch die Mikrokanalplatte eine räumliche Dimension hinzu.

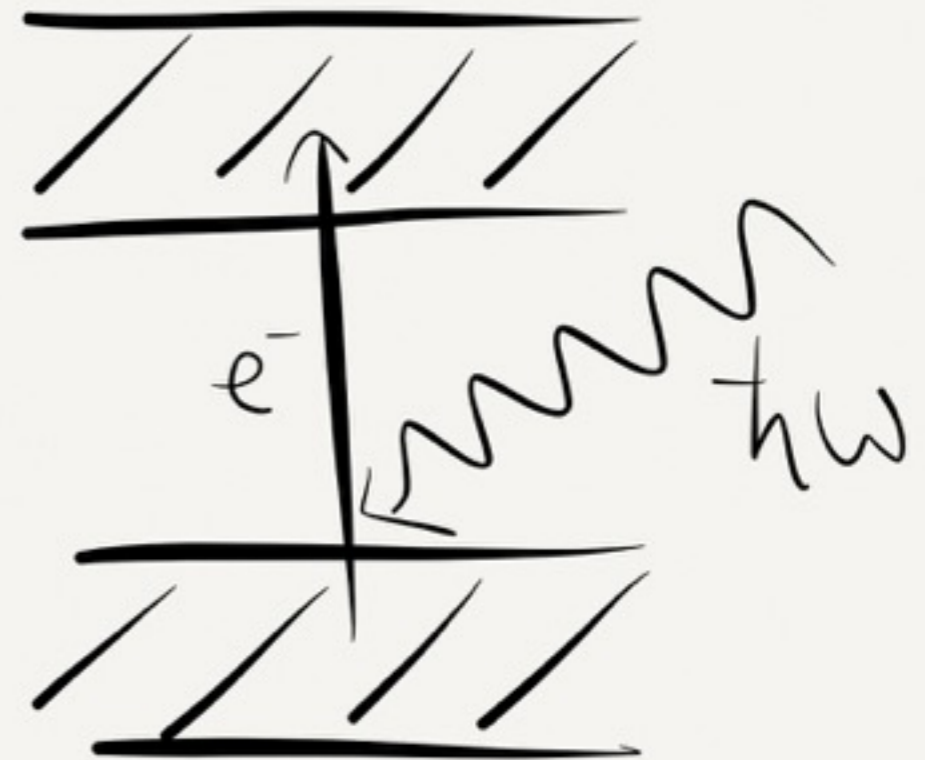
Photodiode

Innerer photoelektrischer Effekt

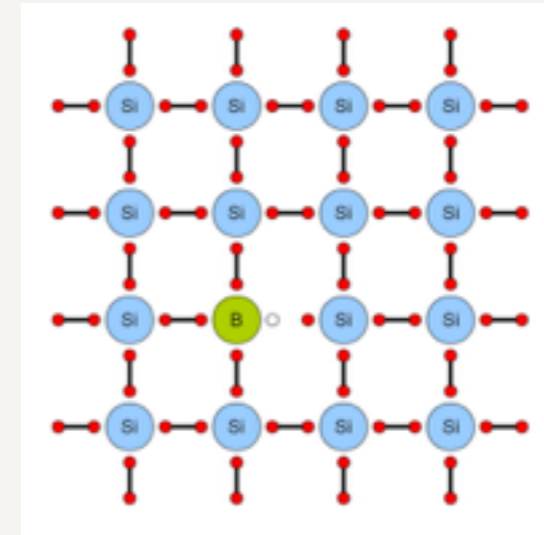
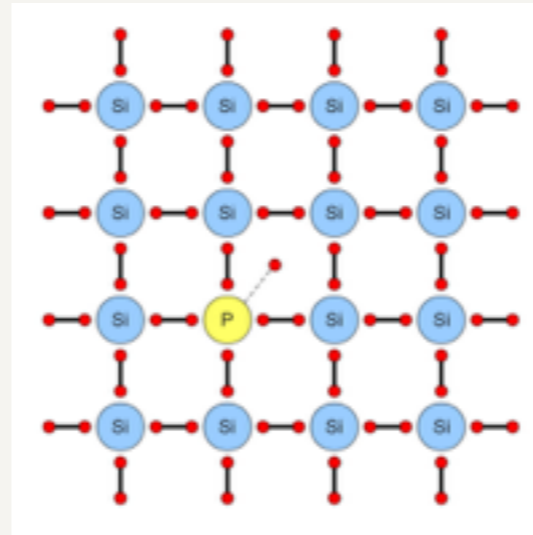
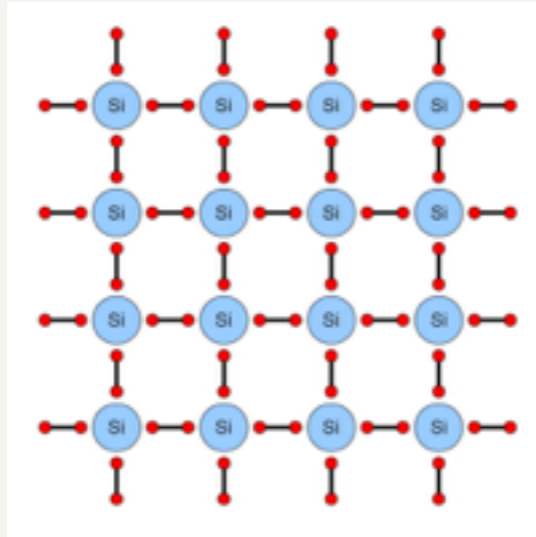
Photodiode

Innerer photoelektrischer Effekt

- Eine Photodiode besteht aus einem p-n-Übergang zweier verschieden dotierter Halbleiter(-Bereiche)
- Durch den inneren photoelektrischen Effekt wird ein Elektron-Loch-Paar in der Raumladungszone erzeugt.
- Durch geeignete Beschaltung können die erzeugten Elektron-Loch-Paare zur Stromerzeugung genutzt oder detektiert werden.

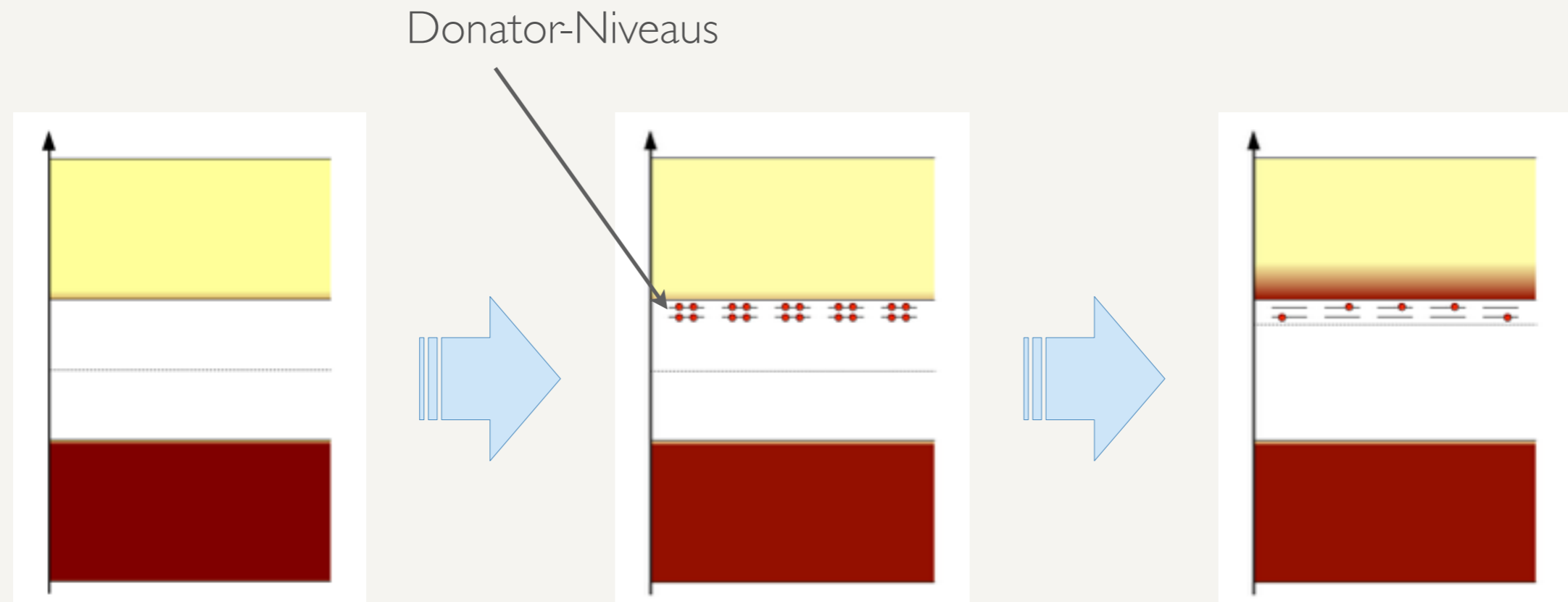


Dotierung von Halbleitern



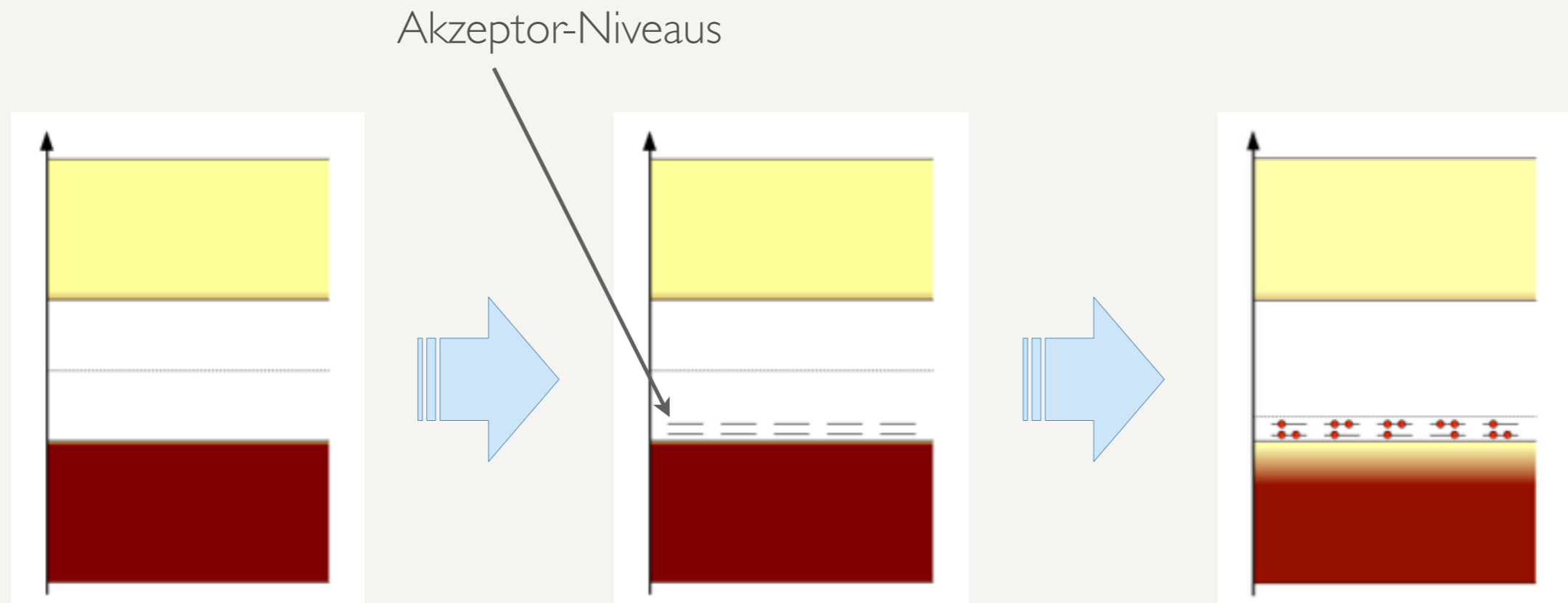
- Als Dotieren bezeichnet man das Einbringen von Fremdatomen in einen Kristall.
- Beim Dotieren mit Elementen der 5. Hauptgruppe (P, As, oder Sb) spricht man von n-Dotierung. Das Fremdatom ist ein Elektronen-Donator.
- Beim Dotieren mit Elementen der 3. Hauptgruppe (B, Al oder Ga) spricht man von p-Dotierung. Das Fremdatom ist ein Elektronen-Akzeptor.
- **Der Kristall bleibt immer elektrisch neutral, auch wenn ein Elektron ‚fehlt‘ oder ‚zuviel ist‘.**

n-Dotierung im Bändermodell



- Im nicht dotierten Kristall sind nur wenige freie Ladungsträger vorhanden
- Durch Hinzufügen von Elektronen-Donatoren werden zusätzliche Energieniveaus erzeugt, die dicht unterhalb der Kante des Leitungsbandes liegen. Diese sind zunächst voll besetzt.
- Durch thermische Anregung werden Elektronen von diesen Donator-Niveaus in das Leitungsband angehoben. Es kommt zur ‚n-Leitung‘.

p-Dotierung im Bändermodell



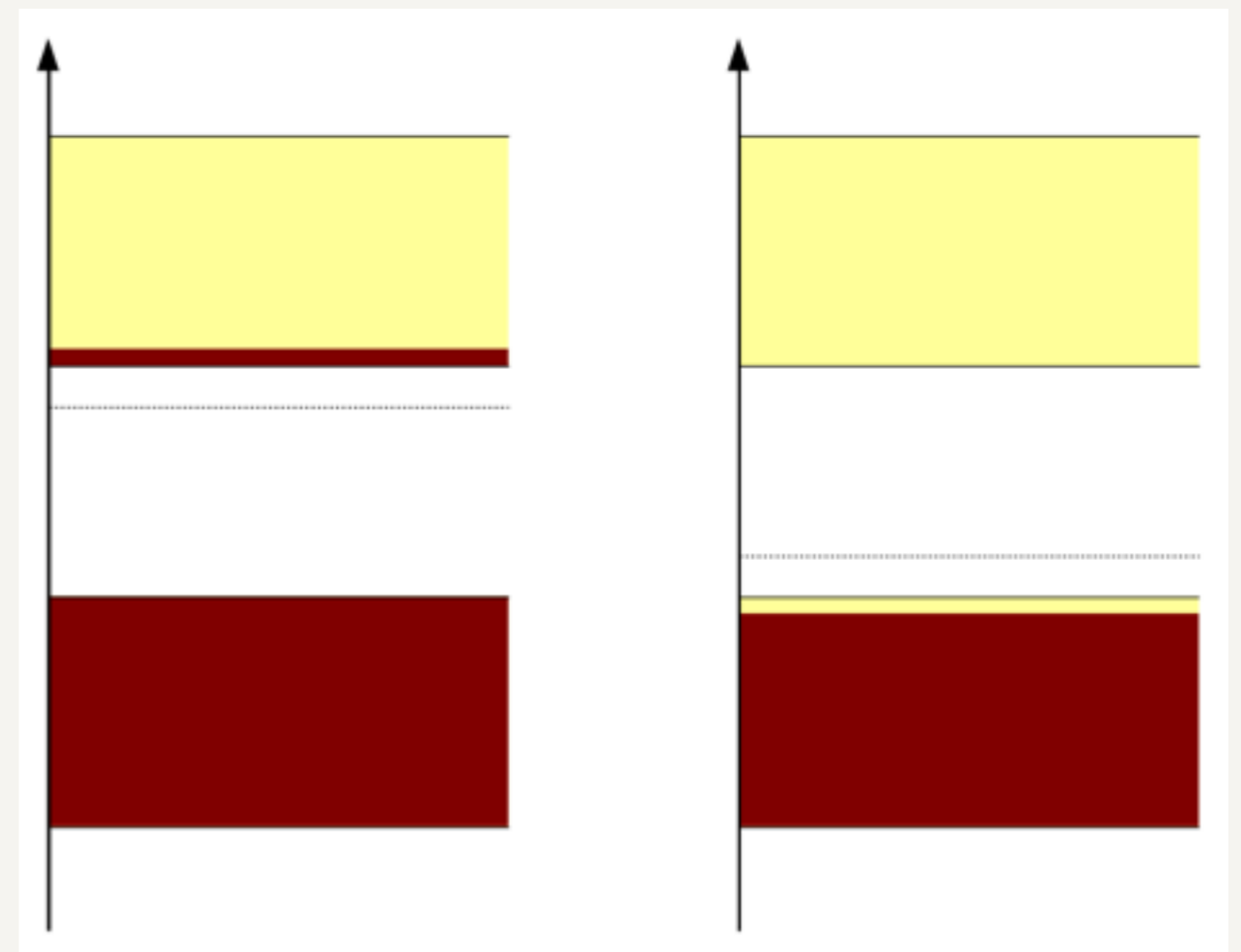
- Im nicht dotierten Kristall sind nur wenige freie Ladungsträger vorhanden
- Durch Hinzufügen von Elektronen-Akzeptoren werden zusätzliche Energieniveaus erzeugt, die dicht oberhalb der Kante des Valenzbandes liegen. Diese sind zunächst voll unbesetzt.
- Durch thermische Anregung werden Elektronen vom Valenzband in diese Akzeptor-Niveaus angehoben. Dadurch werden frei bewegliche Fehlstellen erzeugt. Es kommt zur ‚p-Leitung‘.

n-p-Übergang

Für einen n-p-Übergang werden zwei n- und p-dotierte Halbleiter in Kontakt gebracht

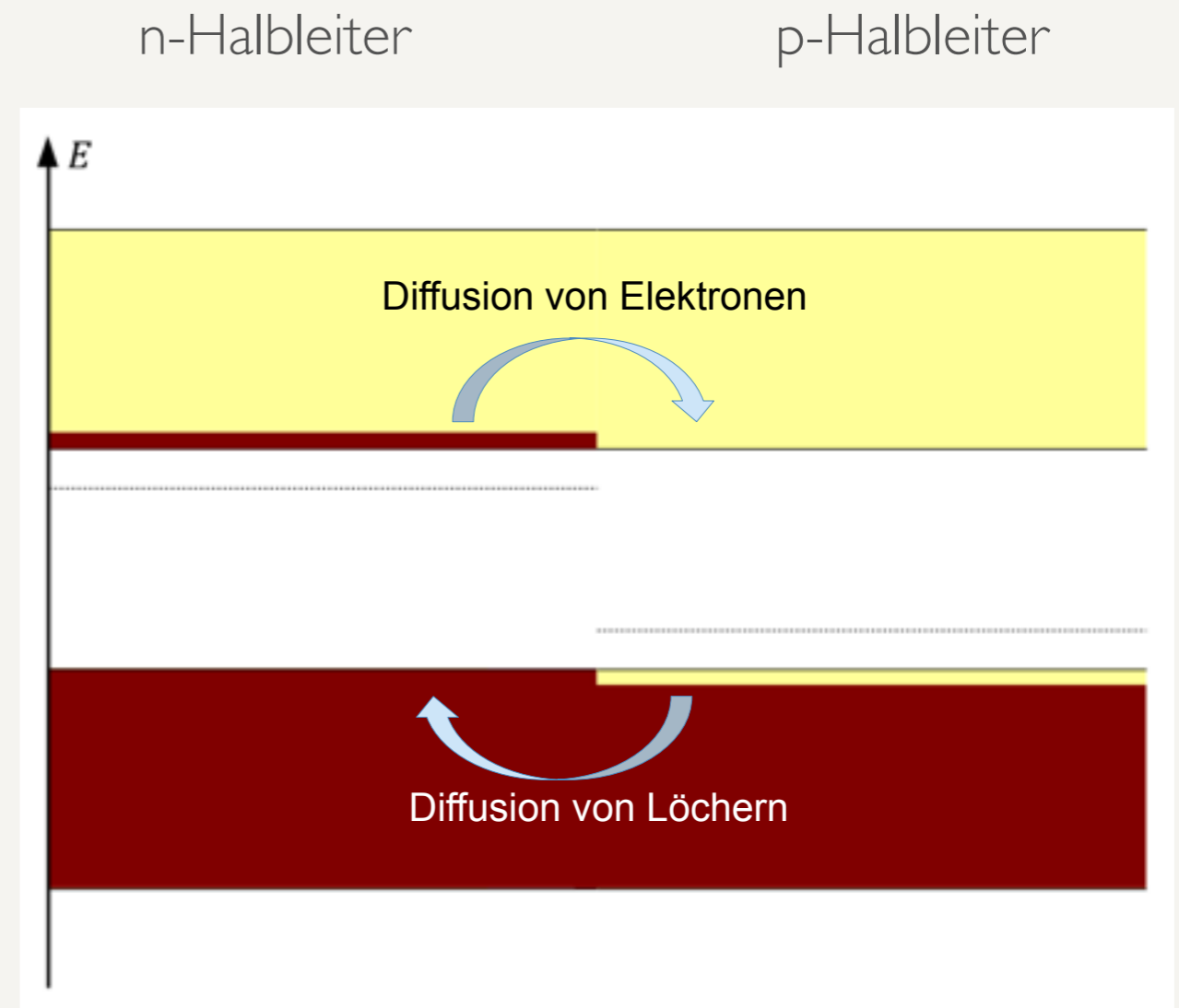
n-Halbleiter

p-Halbleiter



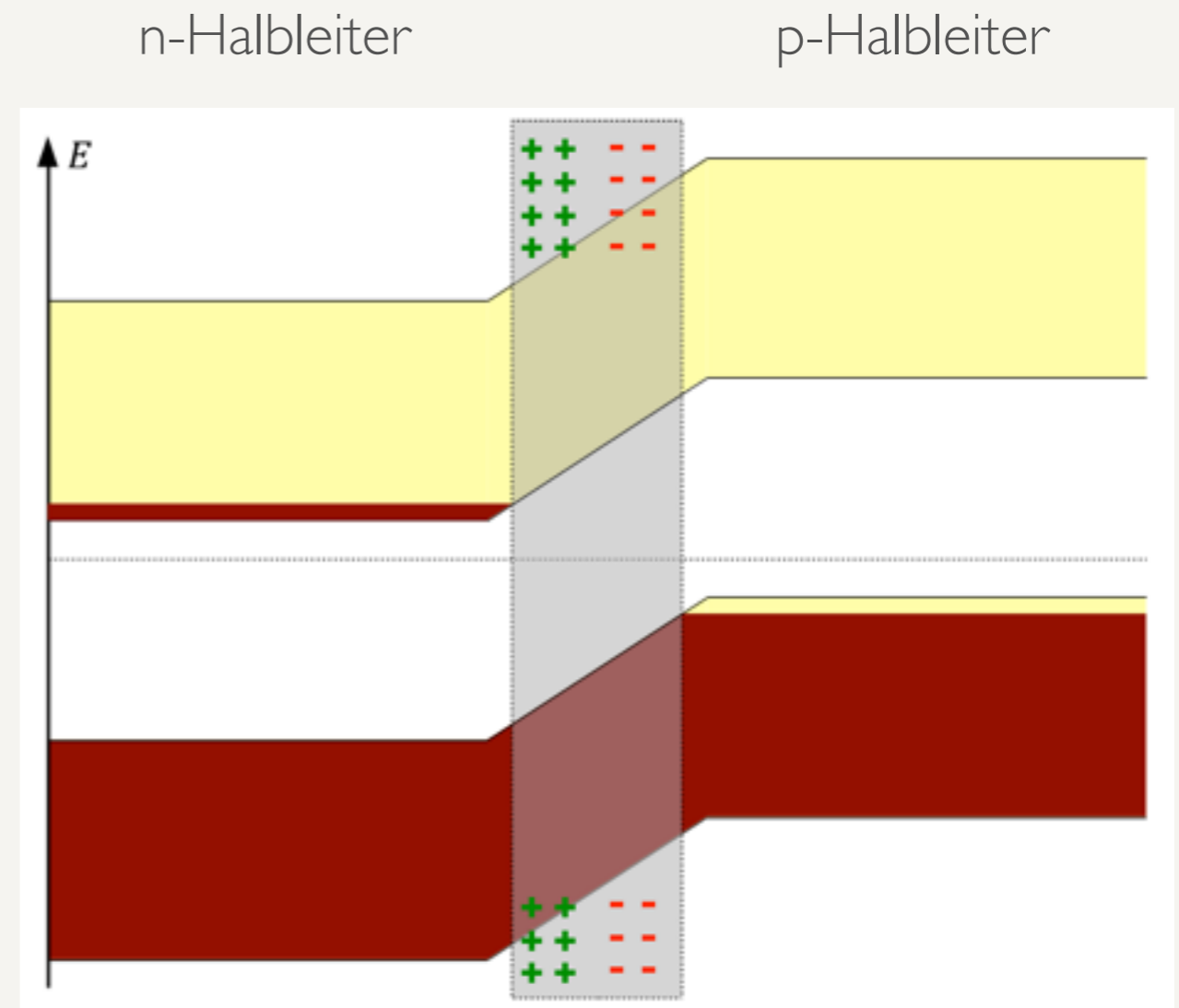
Konzentrationsausgleich der Ladungsträger

- An der Grenzschicht herrscht ein Konzentrationsgefälle der Majoritätsladungsträger.
- Durch Diffusion wandern die Elektronen in den p-Bereich und die Löcher in den n-Bereich
- In der Grenzschicht rekombinieren die Elektronen und Löcher



Ausbildung der Raumladungszone

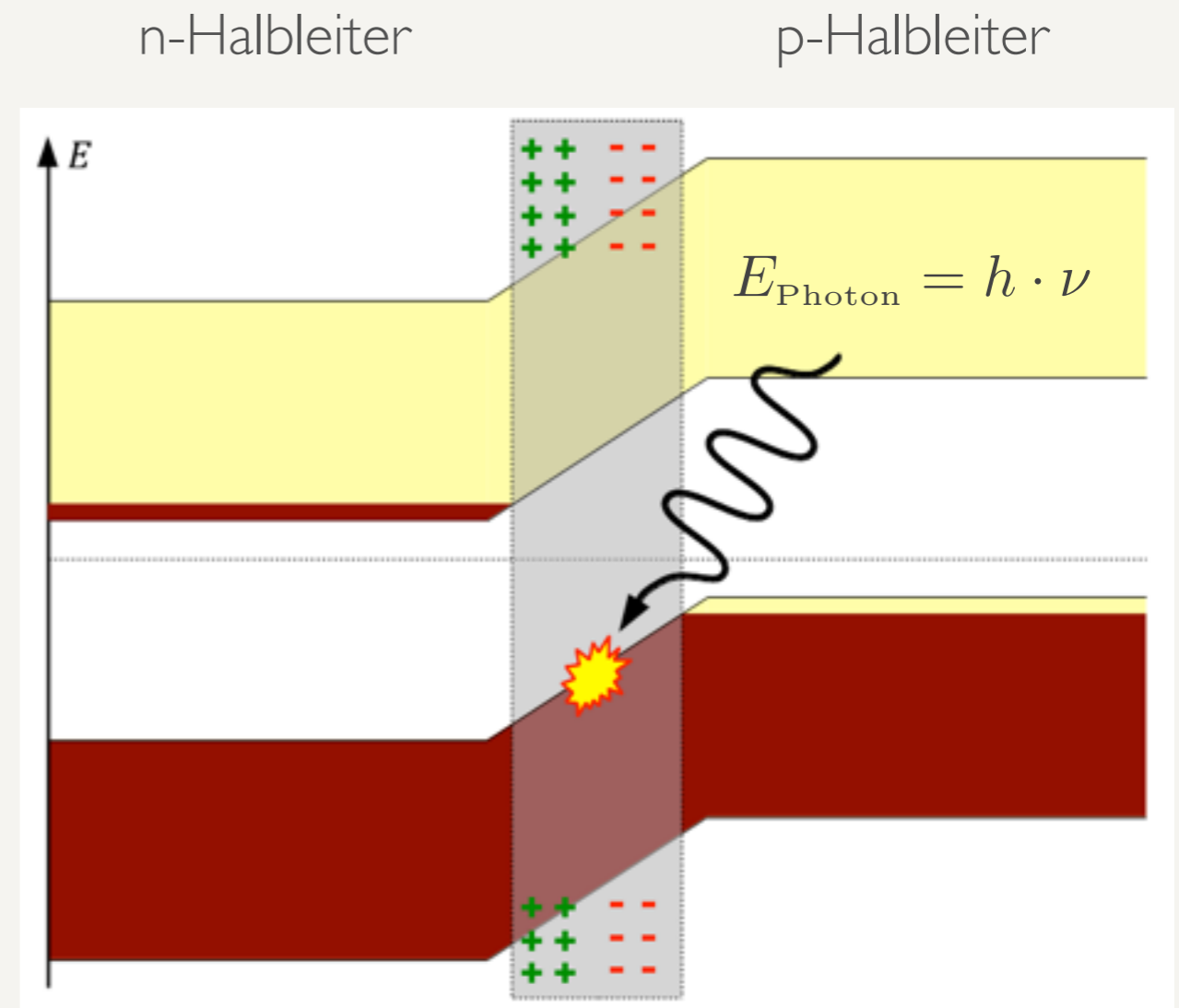
- Im Gleichgewicht hat sich eine Raumladungszone gebildet.
- Im Bereich der Raumladungszone ist das Material an Ladungsträgern verarmt.
- Die Bänder im p-Halbleiter werden energetisch angehoben, die im n-Bereich abgesenkt.



Einfallendes Photon

- Ein Photon wird in der Raumladungszone absorbiert.
- Es trägt die Energie

$$E_{\text{Photon}} = h \cdot \nu$$

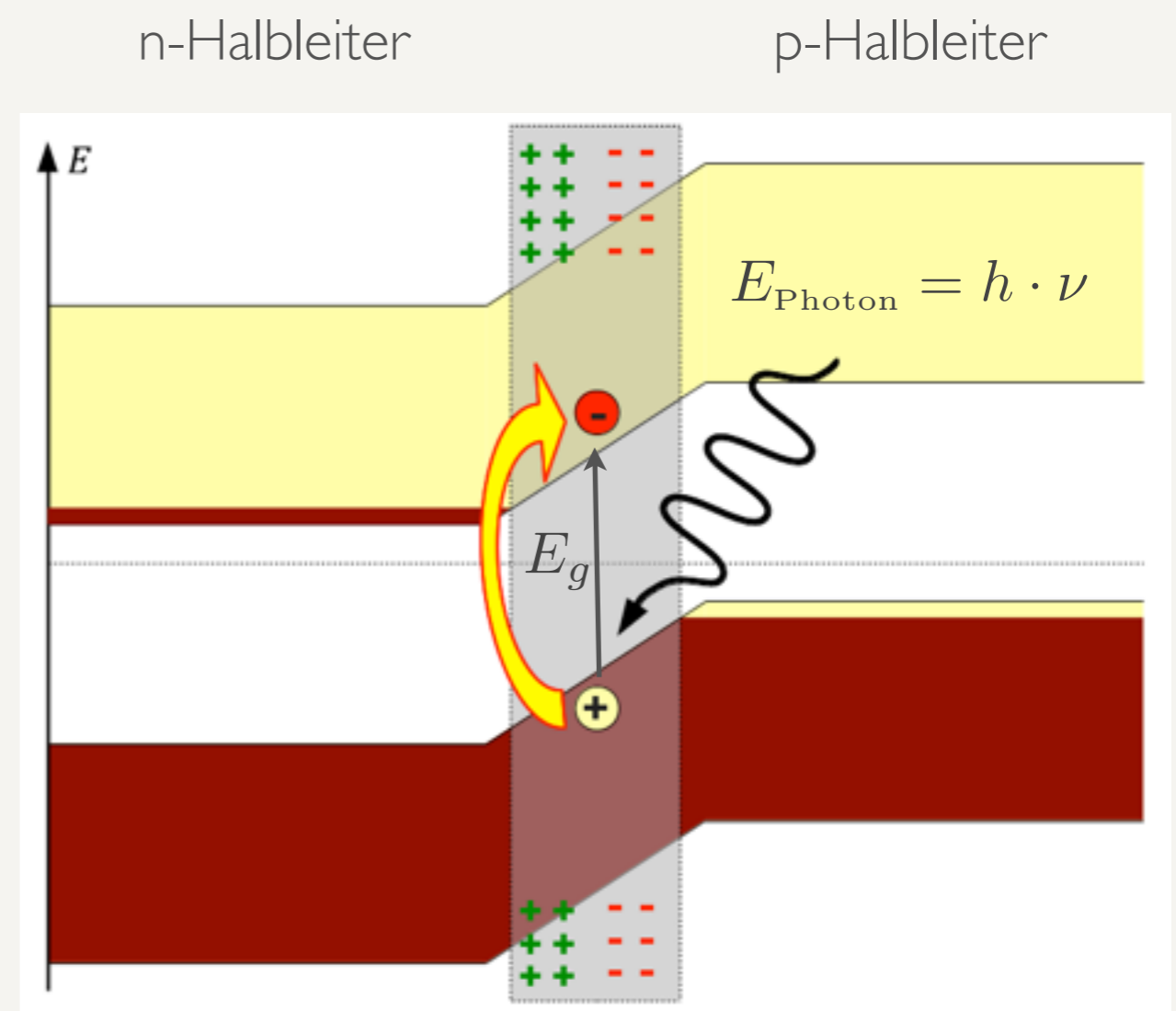


Innerer photoelektrischer Effekt

- Wenn die Energie des Photons größer ist als die Bandlücke des Halbleiters kann ein Elektron aus dem Valenz- in das Leitungsband gehoben werden.

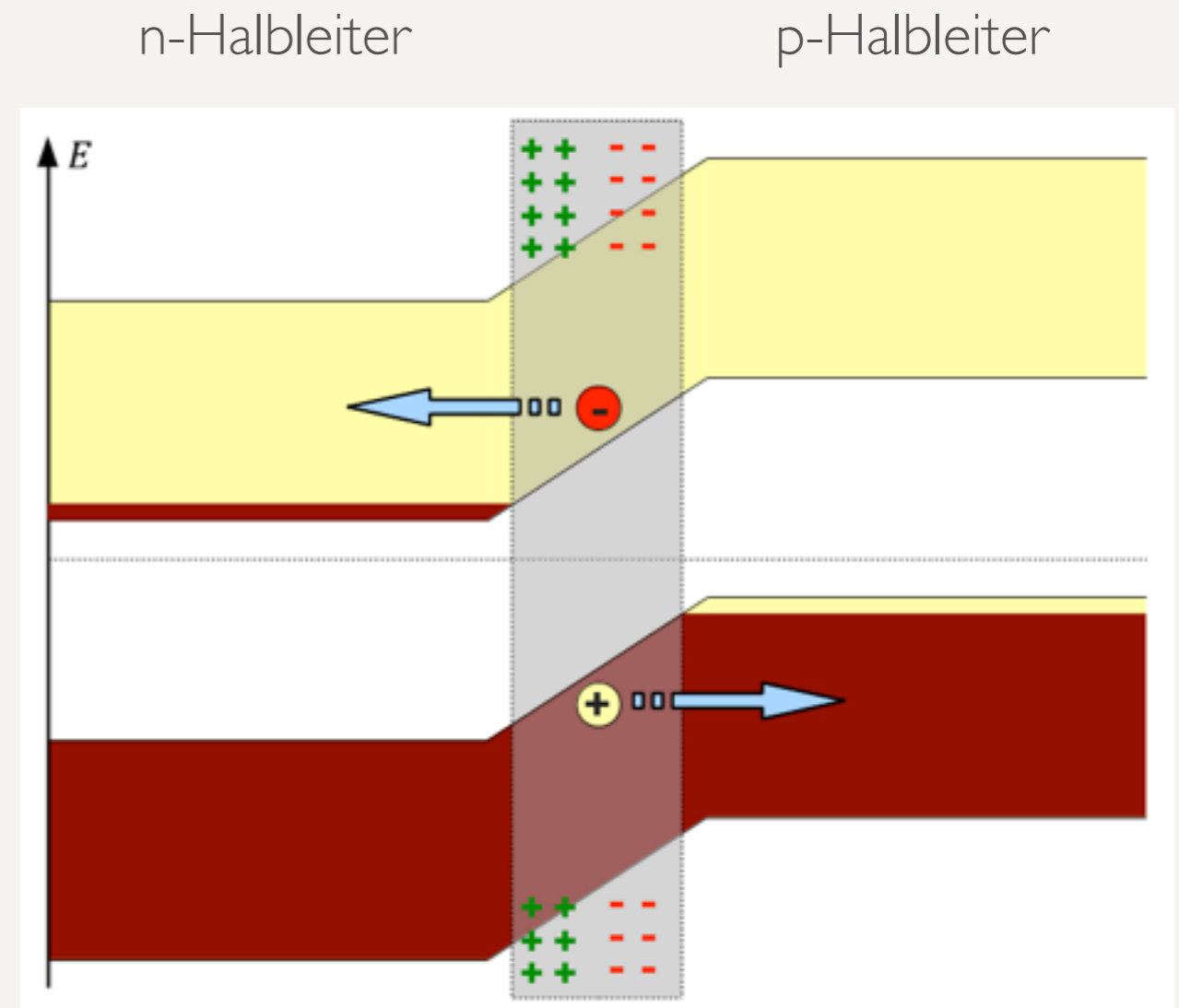
$$E_{\text{Photon}} > E_g$$

- Im Leitungsband entsteht ein Elektron, im Valenzband ein Loch



Ladungstrennung

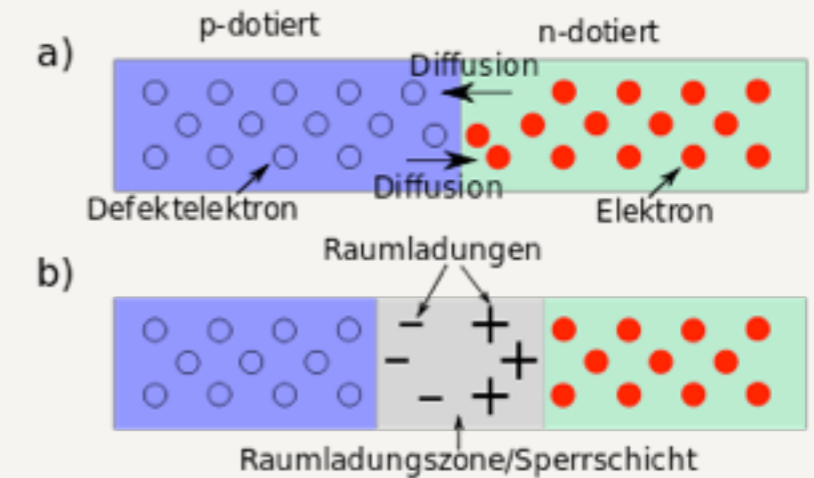
- Durch das elektrische Feld in der Raumladungszone werden die Ladungsträger heraus beschleunigt
- Es kommt zur Ladungstrennung. Der p-Bereich wird positiv geladen, der n-Bereich negativ.



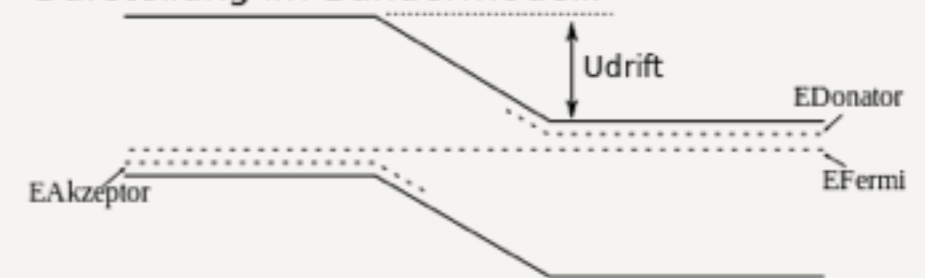
Zusammenfassung

Innerer photoelektrischer Effekt

- Durch unterschiedliche Dotierung eines Halbleiters wird ein Überschuss der Majoritätsladungsträger erzeugt.
- Bei Kontakt entsteht ein Konzentrationsgradient, der durch Diffusion ausgeglichen wird.
- Die Diffusion erzeugt ein elektrisches Feld, dass der Diffusion entgegenwirkt.
- Es entsteht eine Raumladungszone, auch genannt Sperrschicht, in der ein elektrisches Feld herrscht.



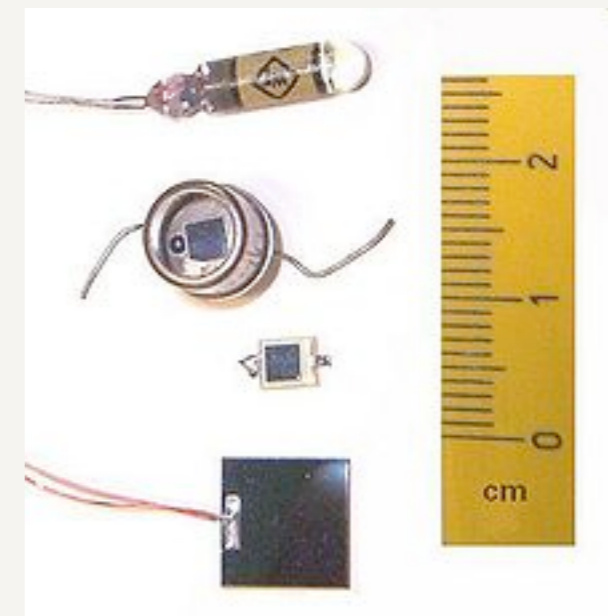
Darstellung im Bändermodell:



Photodiode

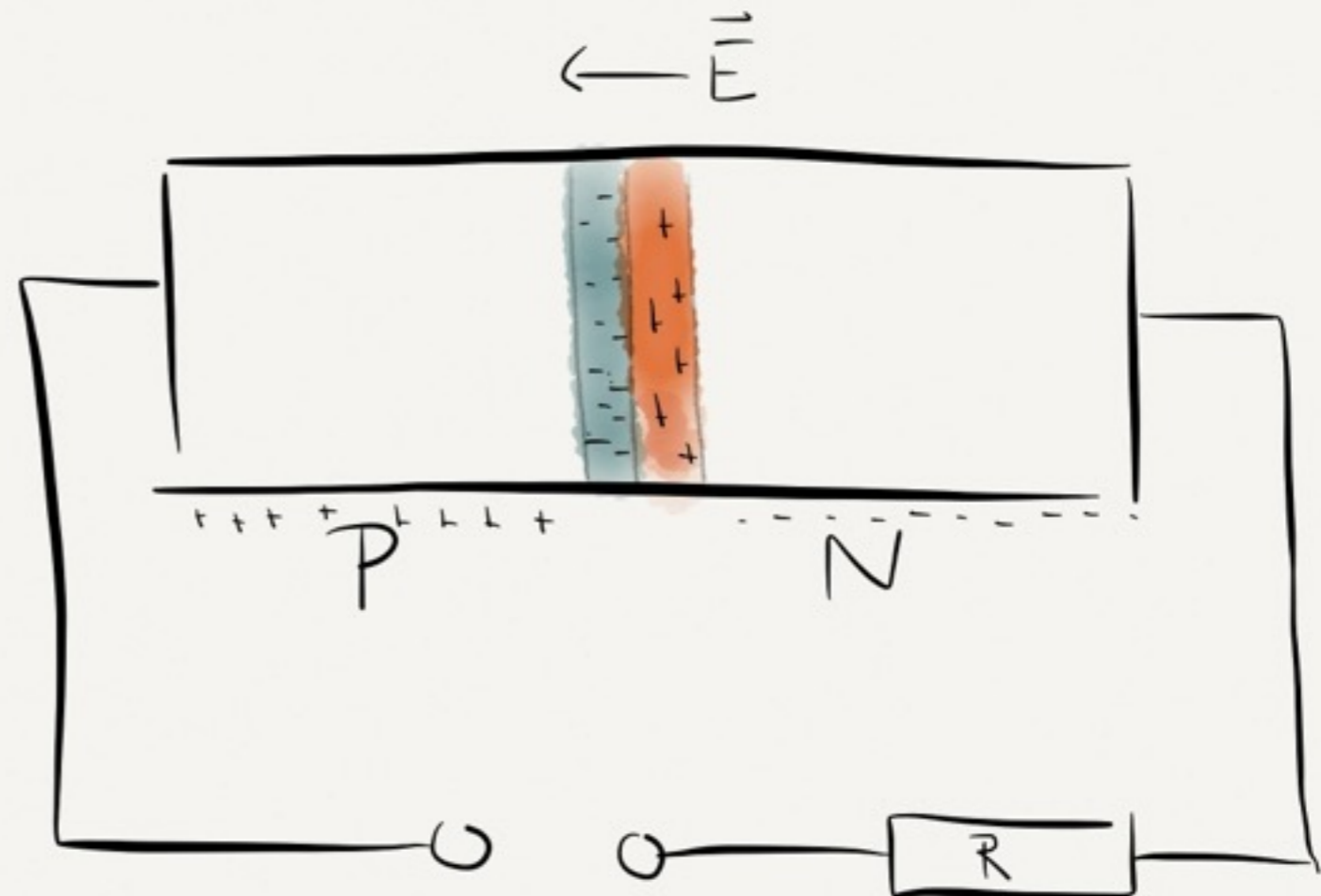
Betriebsarten

- $U > 0$: Photoelement
(Solarzelle)
- $U < 0$: Photodiode
(Lichtdetektion)



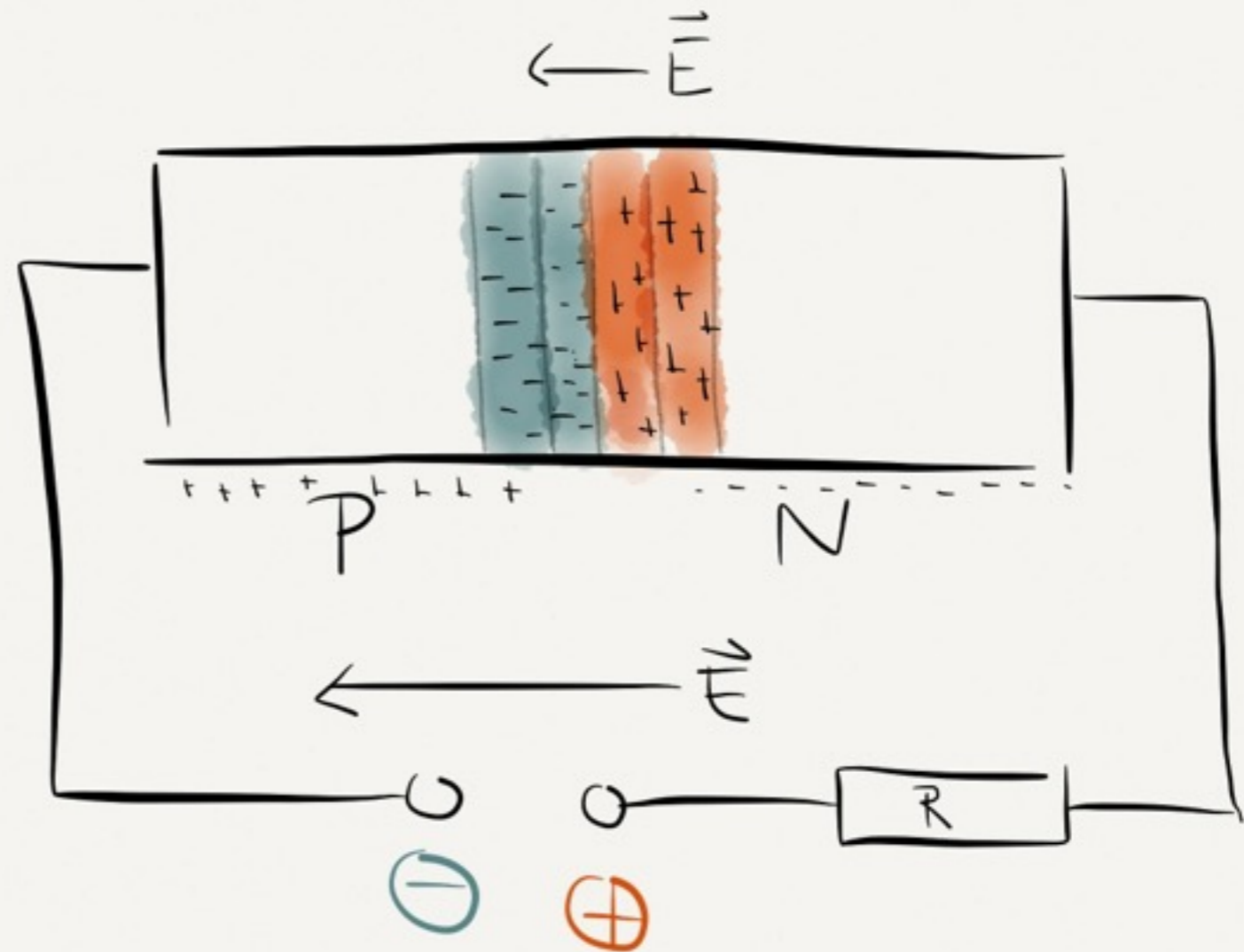
Photodiode Sperrspannung

- Ohne Spannung baut sich die Raumladungszone auf.



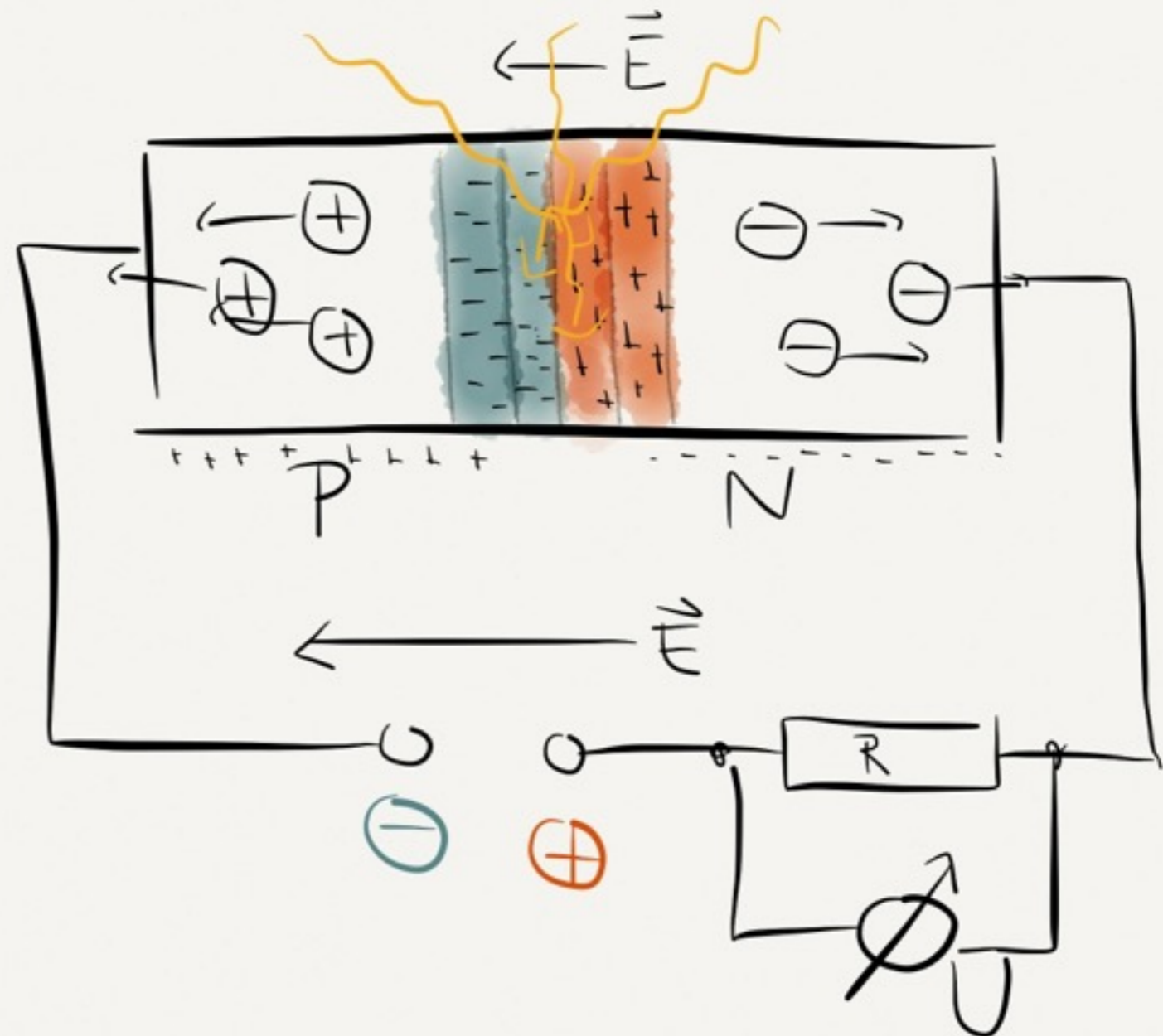
Photodiode Sperrspannung

- Eine angelegte Spannung in Sperrrichtung verbreitert die RLZ.



Photodiode Sperrspannung

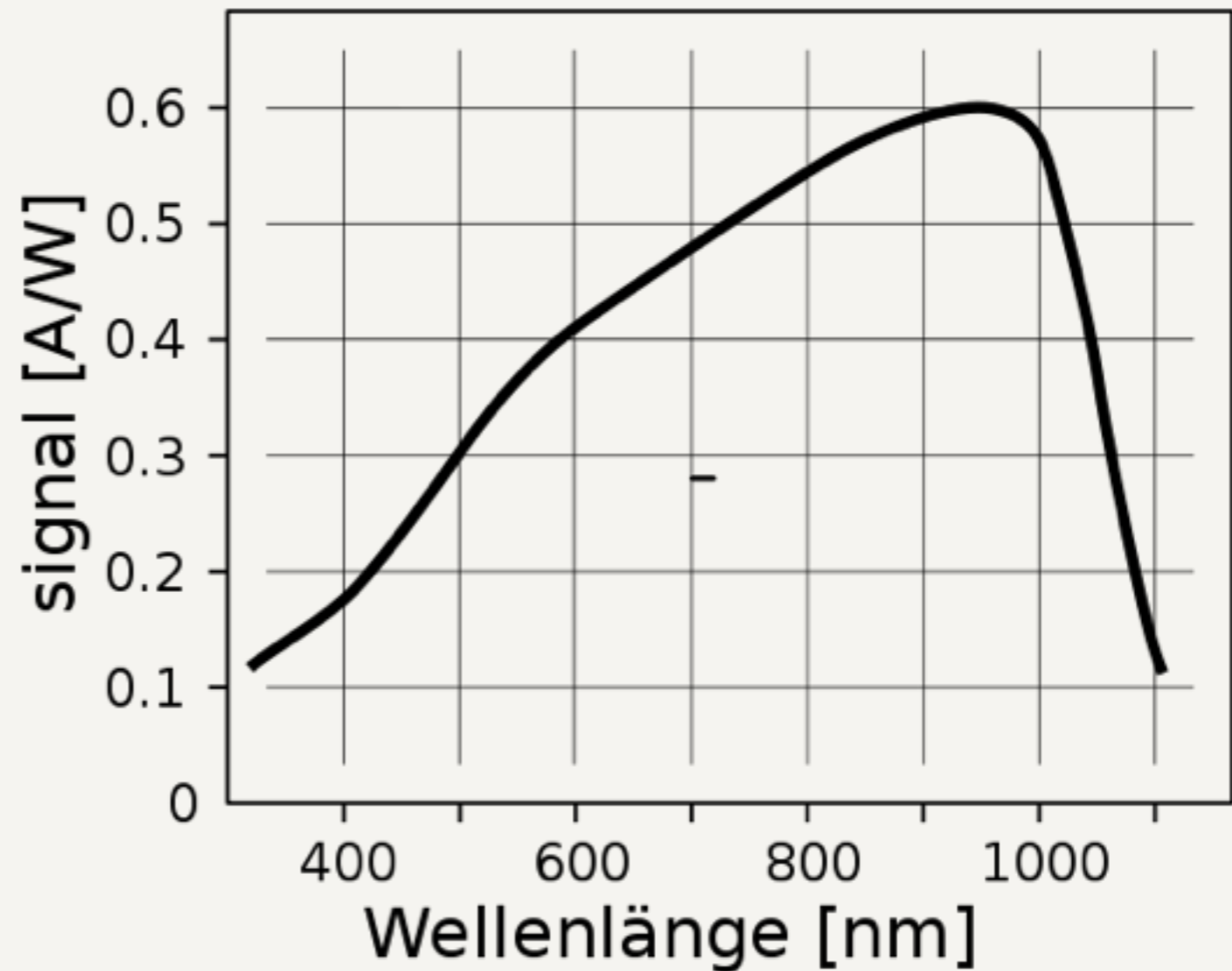
- Photonen können in der RLZ Elektronen-Lochpaare erzeugen.
- Durch das Feld der RLZ werden die Ladungsträger zur jeweiligen Seite beschleunigt.
- Die angelegte Spannung führt zum Stromfluss.



Photodiode

Spektrale Empfindlichkeit

Silizium



- Bandlücke
- Quantenausbeute

Photodiode

Dunkelstrom

- Durch thermische Anregung können auch bei Dunkelheit in der RLZ Elektronen-Loch-Paare erzeugt werden.
- Durch das Feld der RLZ werden die Elektronen zur n-Schicht, die Löcher zur p-Schicht beschleunigt.
- Es fließt ein Strom, der **Dunkelstrom**.
- Die Größe des Dunkelstroms ist stark temperaturabhängig.
- Beim Betrieb in Sperrrichtung ist der Dunkelstrom auch von der angelegten Spannung abhängig.

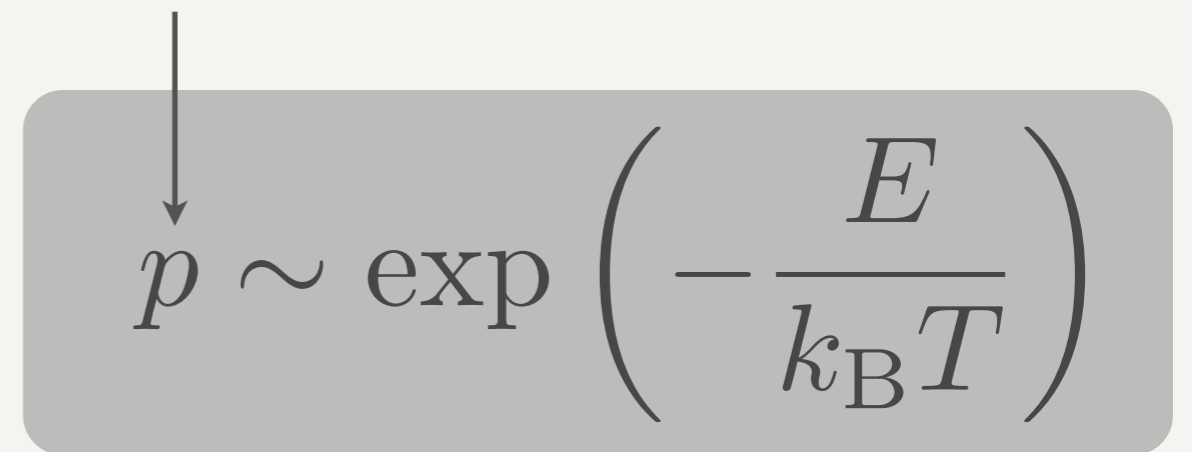
Aufgaben

- Der Mensch kann mit bloßem Auge gelbes Licht wahrnehmen, wenn die Netzhaut eine Lichtleistung von $1.8e-18W$ empfängt. Die Wellenlänge des gelben Lichts beträgt ca. $600nm$. Wie viele Photonen treffen je Sekunde auf die Netzhaut?
- Welchen elektrischen Strom produziert eine Silizium-Photodiode bei dieser Lichtleistung? Vergleichen Sie dies mit einem typischen Dunkelstrom der Photodiode von $10pA$. Gebrauchen Sie hierzu die spektrale Empfindlichkeit von Silizium.
- Nehmen Sie an, eine Photodiode generiert einen Photostrom von $10nA$ bei Bestrahlung mit obigem gelbem Licht. Wie vielen Photonen pro Sekunde entspricht dies?

Boltzmann-Faktor

- Wird aus der statistischen Mechanik hergeleitet.
- Grundidee: der Boltzmann-Faktor gibt die Wahrscheinlichkeit für ein Teilchen mit Temperatur T in einem Zustand der Energie E zu sein.
- Das Teilchen ist Teil eines Viel-Teilchen-Systems im thermodynamischen Gleichgewicht.

Wahrscheinlichkeit

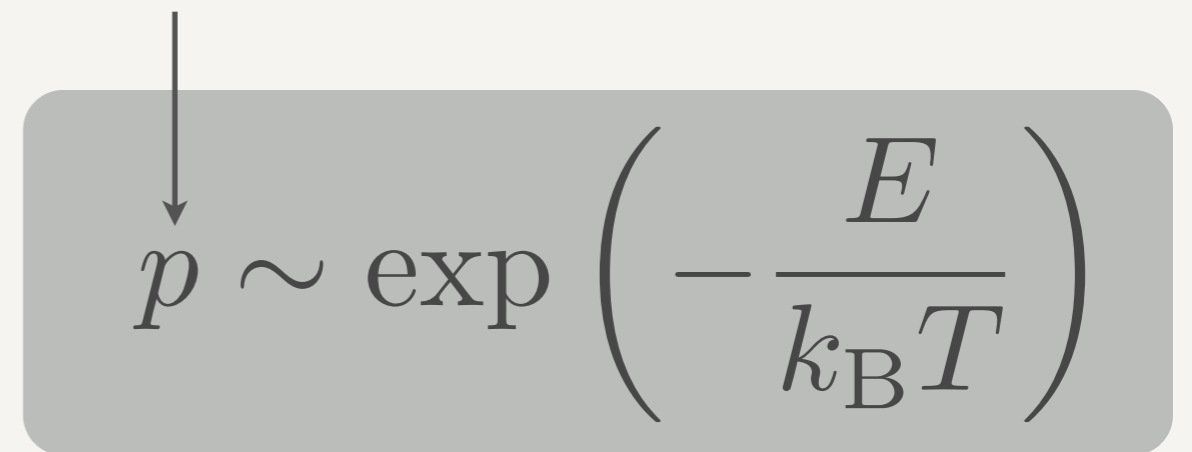

$$p \sim \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right)$$

Boltzmann-Faktor

Boltzmann-Faktor

- Aufgabe: Berechnen Sie die Anregungswahrscheinlichkeit, dass in einer Photodiode ein Elektron durch thermische Anregung ins Valenzband gehoben wird.

Wahrscheinlichkeit

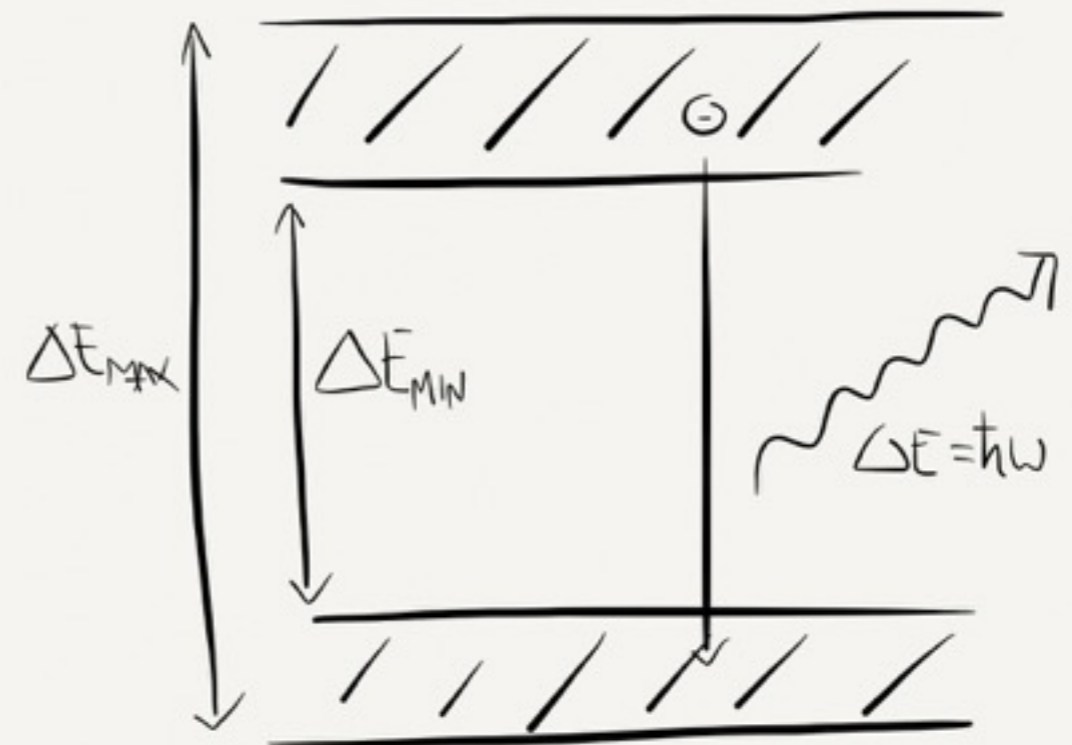

$$p \sim \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right)$$

Boltzmann-Faktor

Halbleiter

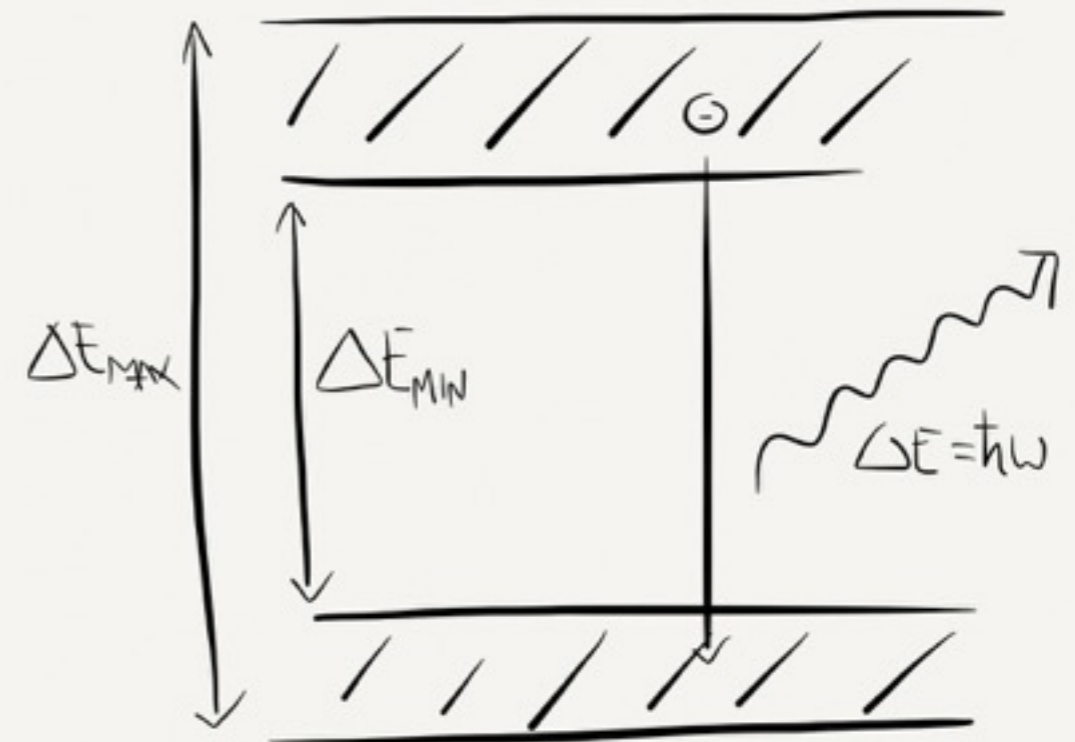
Lichtentstehung

- Aufgabe: Silizium wird als Photodiode oder Solarzelle gebraucht. Eine Photodiode aus Silizium erzeugt Strom bei Anregung mit Licht zwischen 400 - 1100nm.
- Wie groß ist ΔE_{min} ?



Aufgabe

- Berechnen Sie mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Elektron in einer Solarzelle den Sprung über die Bandlücke schafft.
- Überlegen Sie sich zwei sinnvolle Temperaturen für eine Solarzelle.
- Welche Temperatur ist nötig um eine Anregungswahrscheinlichkeit von 0.5 zu erreichen?



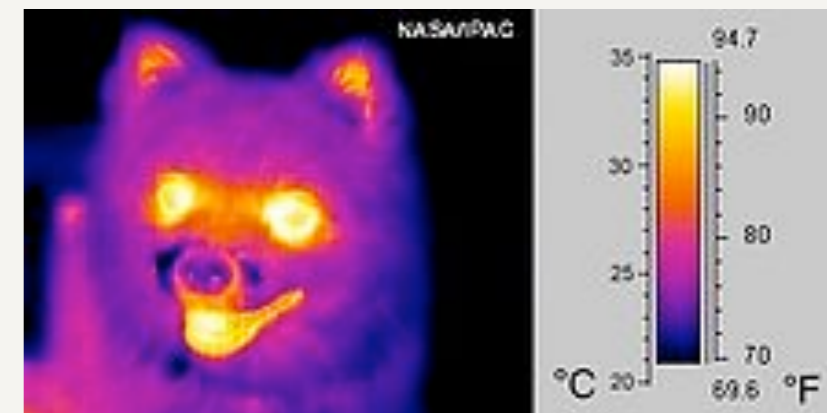
$$\Delta E_{\text{Si}} = 1.1 \text{ eV}$$

Bolometer

- (Ungekühlte) Photodioden können aufgrund ihres eigenen Temperatur-Rauschens keine Wärmestrahlung detektieren.
- Ein Bolometer ist ein Sensor, der Strahlung durch Anstieg seiner Temperatur detektiert.
- Die **Temperaturänderung** führt zu einer Widerstandsänderung (ähnlich wie Thermistor).
- Kann in Form eines Arrays von vielen kleinen Mikro-Bolometer als Bildaufnehmer konstruiert werden.
- Wird im IR-Bereich in Wärmebildkameras eingesetzt.

Energie der Wärmestrahlung

$$\Delta E = h\nu = \Delta Q$$

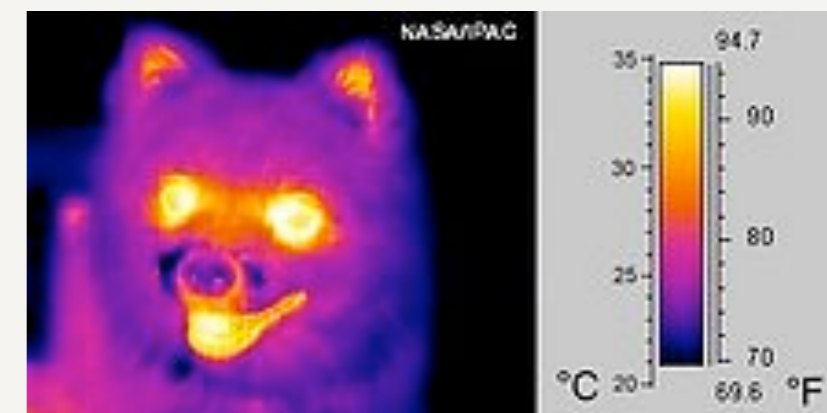


Bolometer

Energie der Wärmestrahlung

$$\Delta E = h\nu = \Delta Q$$

- Berechnen Sie die Bandlücke die ein Halbleiter-basierter Detektor für IR-Strahlung haben muss.
- Berechnen Sie wie zuvor die Anregungswahrscheinlichkeit für ein einzelnes Elektron durch thermische Anregung ins Valenzband zu gelangen und dadurch einen Dunkelstrom zu erzeugen.



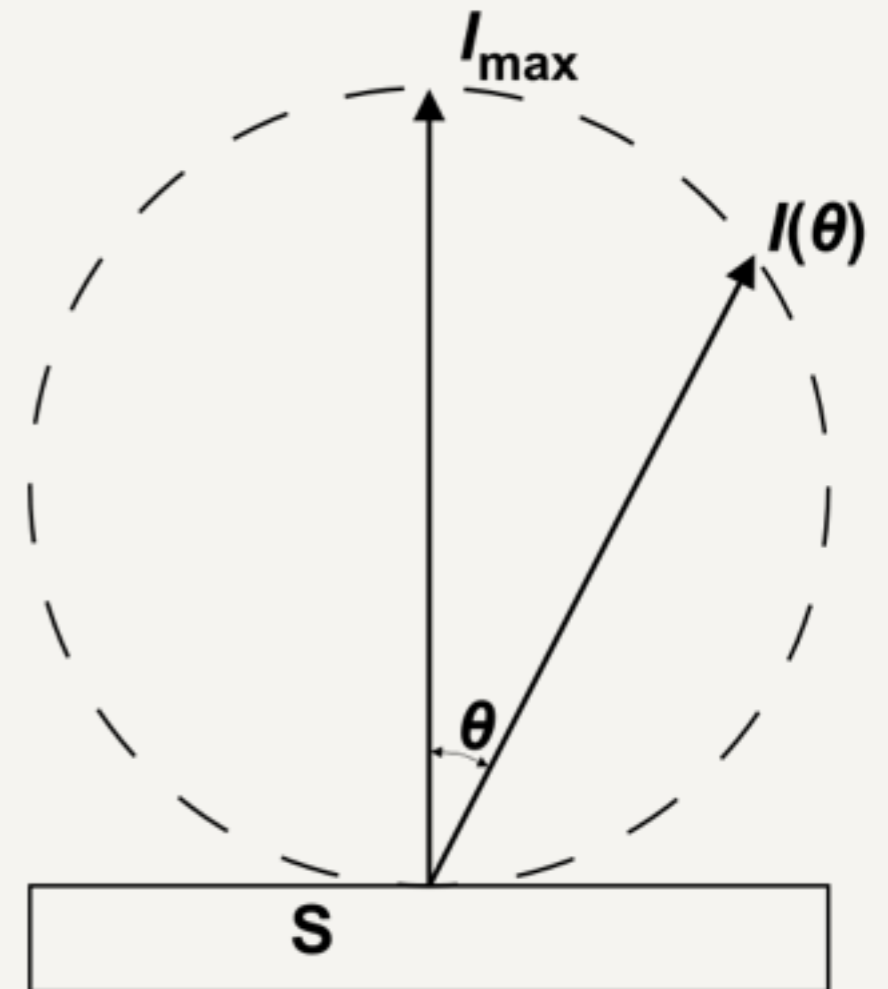
Ulbricht-Kugel

Lambert'scher Strahler

- Die Strahlstärke bzw. Lichtstärke des ausgestrahlten Lichtes ist proportional zum Winkel Θ :

$$I(\Theta) = L \cdot \cos \Theta$$

- Das betrachtete Flächenelement erscheint durch die seitliche Projektion um $\cos \Theta$ kleiner
- In Summe erscheint der Lambert'sche Strahler aus allen Richtungen gleich hell



Ulbricht-Kugel

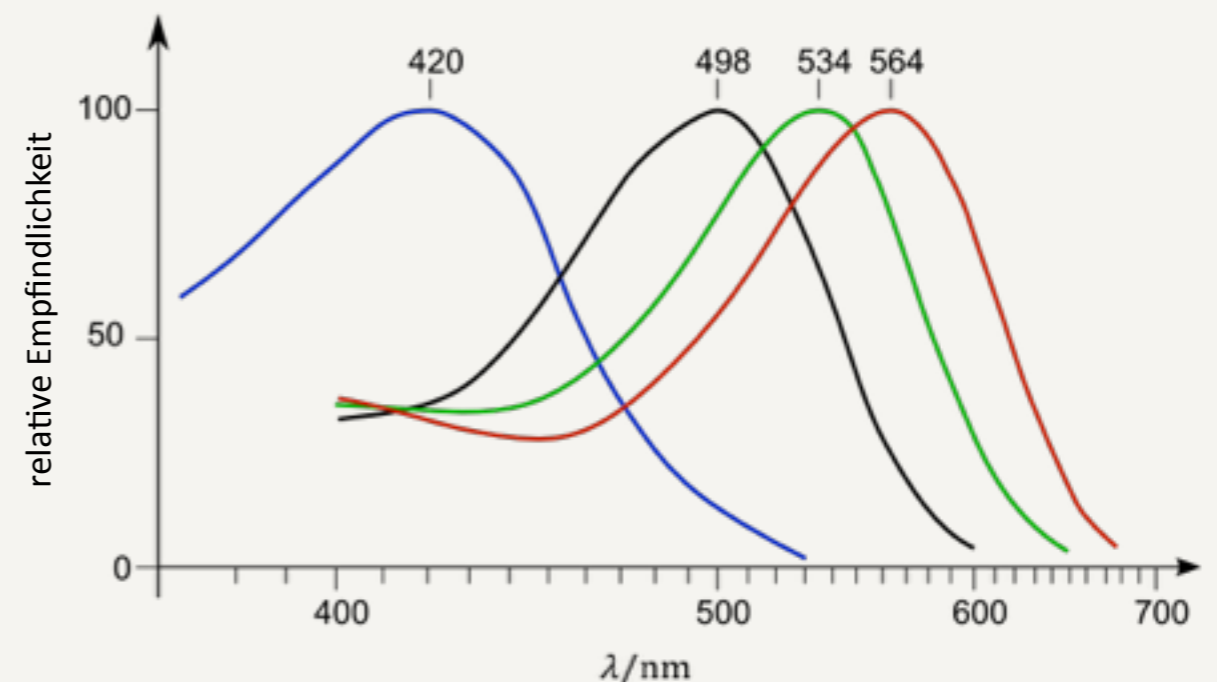
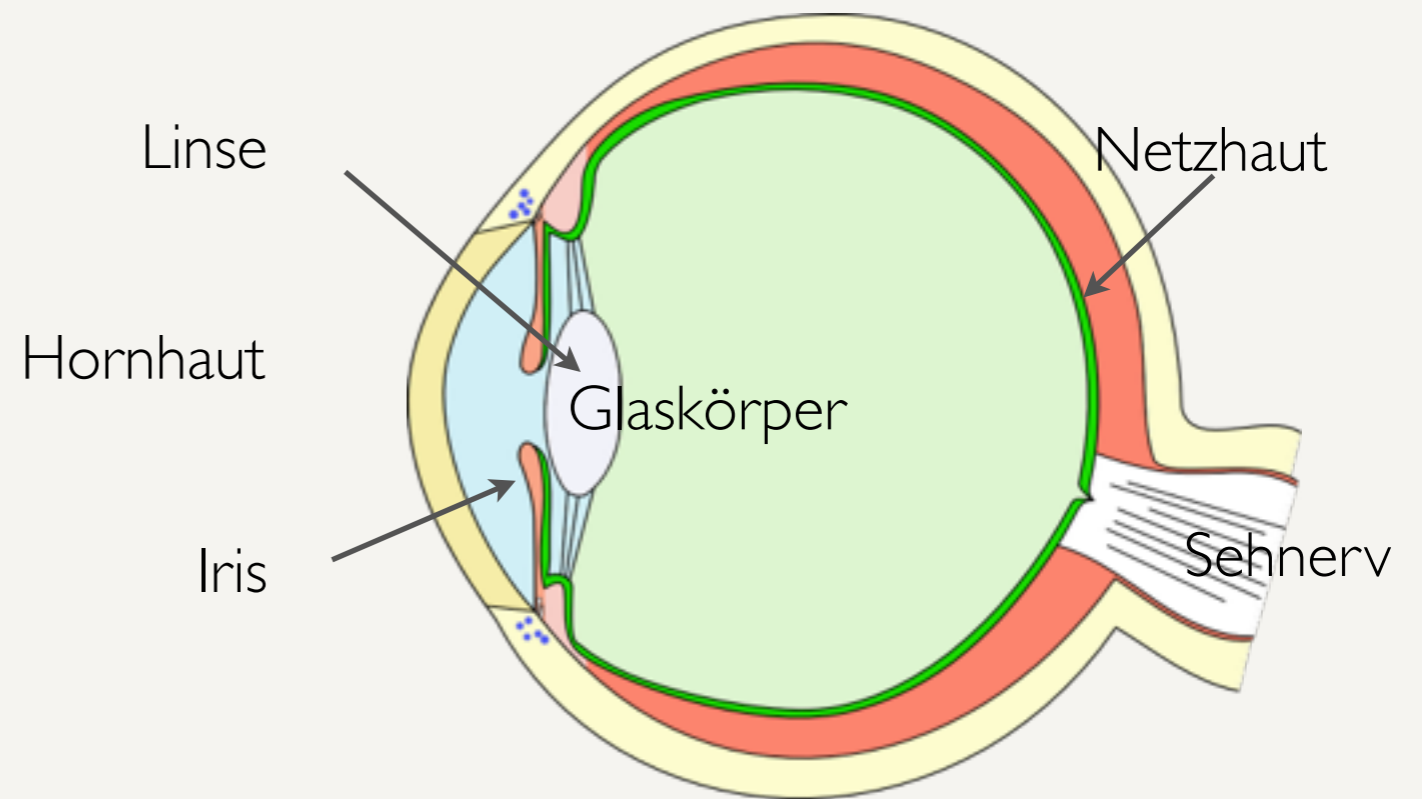
- Mittelt über räumliche Verteilung von Lichtausstrahlung
- Kann als Lichtquelle und als Lichtdetektor eingesetzt werden
- Im Innern fast perfekt diffuser Reflektor (Teflon, Bariumsulfat)
- Dadurch entfällt auf jedes Stück Fläche im Innern genau die gleiche Menge Licht.



Photometrische Messgrößen

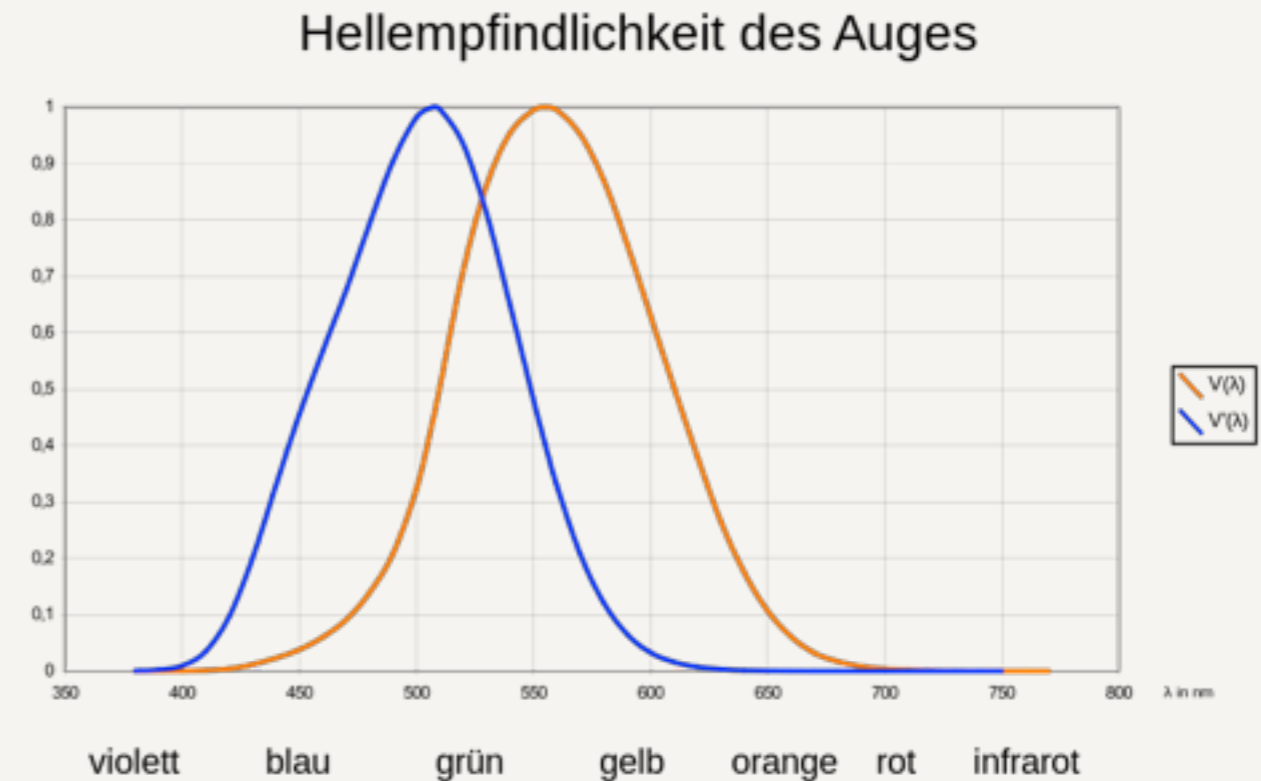
Das Auge

- Die Netzhaut enthält zwei Typen von Rezeptoren
- **Stäbchen** für das Hell-Dunkel-Empfinden
- **Zapfen** für das Farbempfinden
- Es gibt drei Sorten von Zapfen



Hellempfindlichkeit des Auges

- Die Hellempfindlichkeit des Auges kann spektral aufgelöst vermessen werden.
- Die Kurve wird „V-lambda“ genannt: $V(\lambda)$
- Es gibt zwei Kurven, eine für das auf helladaptierte Auge, eine für das dunkeladaptierte Auge.
- Die Kurve ist auf eins normiert.



Strahlungsfluss und Lichtstrom

- Der **Strahlungsfluss** gibt an, welche **Strahlungsleistung** insgesamt abgegeben wird.
- Der Lichtstrom ergibt sich aus der spektralen Gewichtung des Strahlungsflusses mit $V(\lambda)$

$$\Phi_V = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \frac{d\Phi(\lambda)}{d\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

- Die Proportionalitätskonstante heisst **photometrisches Strahlungsäquivalent** K_m
- Man unterscheidet zwischen

- **photopisches Sehen** $V(\lambda)$ $K_m = 693 \text{ lm/W}$

- **skotopischem Sehen** $V'(\lambda)$ $K'_m = 1691 \text{ lm/W}$

Messgrößen

	Radiometrische Größen	Fotometrische Größen
Leistung	Strahlungsfluss W	Lichtstrom <i>Lumen</i> lm
Leistung pro Richtung	Strahlstärke W / sr	Lichtstärke <i>Candela</i> lm / sr
Leistung pro Fläche	Bestrahlungsstärke / Intensität W / m^2	Beleuchtungsstärke <i>Lux</i> lm / m^2

Photometrisches Strahlungsäquivalent

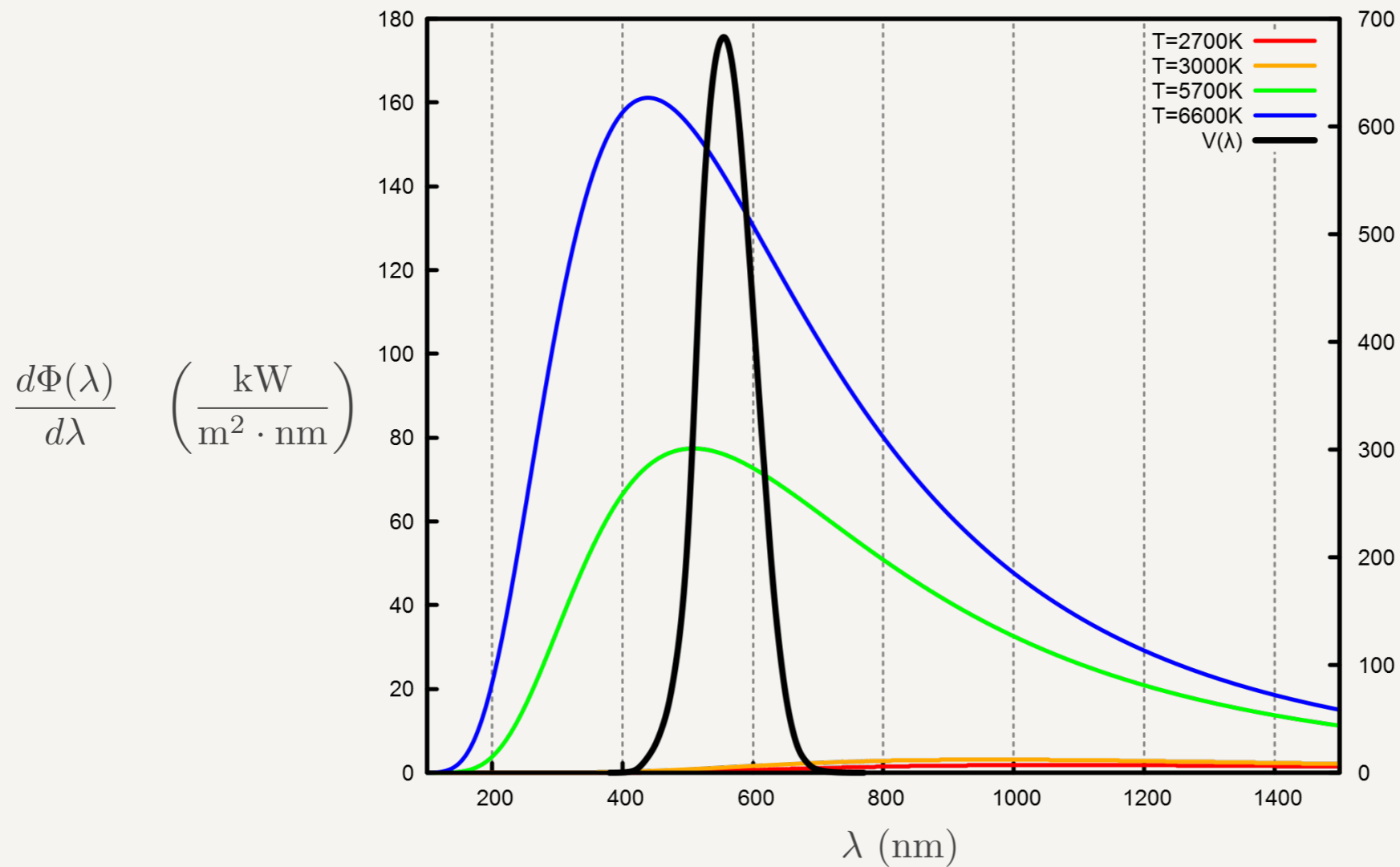
- Das photometrische Strahlungsäquivalent wird als Maß für die Effizienz einer künstlichen Lichtquelle gebraucht:

$$K = \frac{\Phi_V}{P_{el}}$$

- Bei den meisten thermischen Lichtquellen kann man davon ausgehen, dass die elektrische Leistung in guter Näherung der Gesamtstrahlungsleistung nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz entspricht:

$$P_{el} \approx A \cdot \sigma \cdot T^4$$

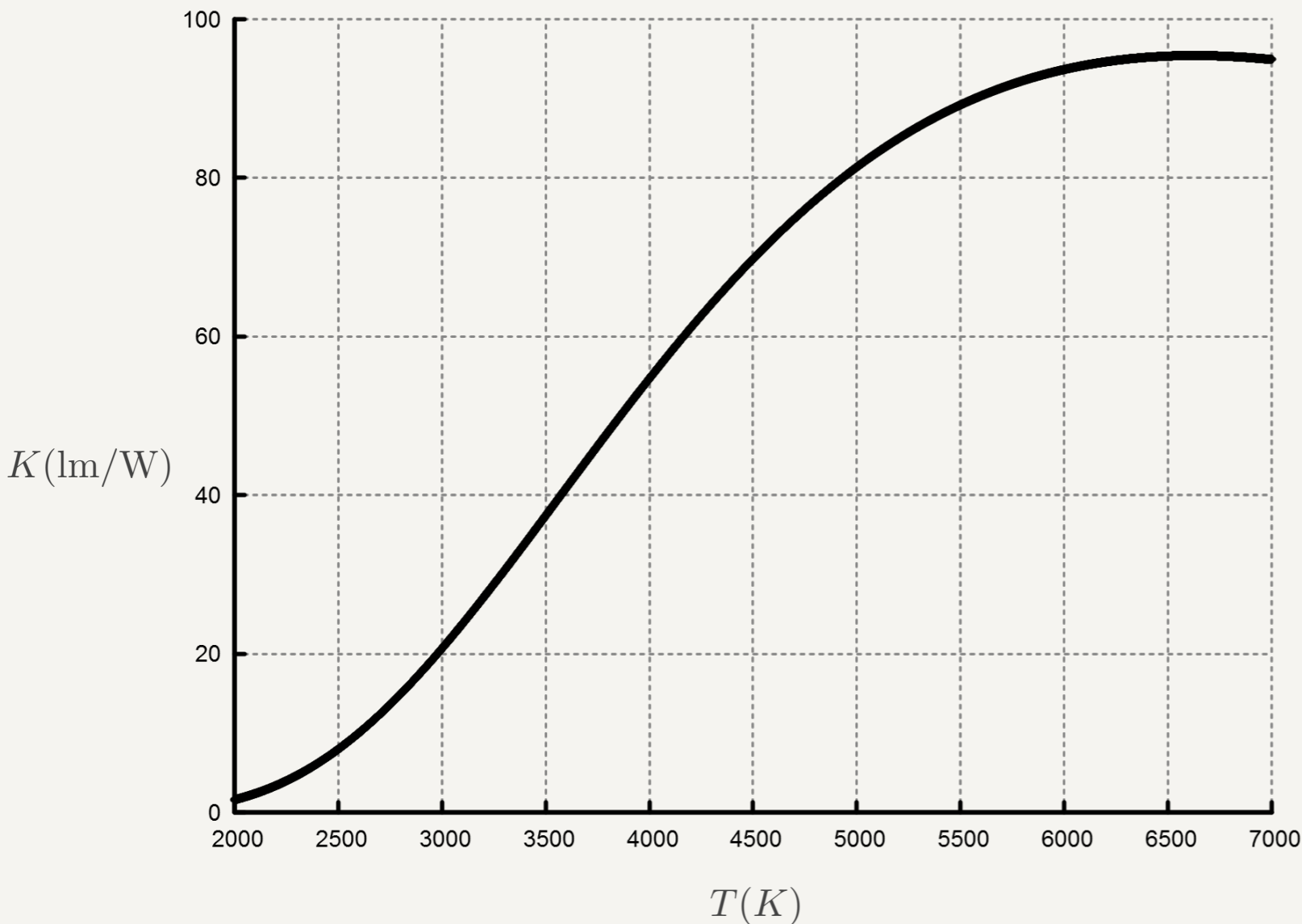
Phot. Strahlungsäquivalent schwarzer Strahler



$$K = \frac{1}{A \cdot \sigma \cdot T^4} \cdot K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \frac{d\Phi(\lambda)}{d\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

Photometrisches Strahlungsäquivalent

Beispiele



Lichtquelle	T / K	K / lm/W
Glühlampe	≈2700 K	≈12
Halogenlampe	≈3000 K	≈20
Sonne	5800 K	92
Opt. schwarzer Strahler	6628 K	95
LED (weiß)		65
Leuchtstofflampe		50 ... 70
Na-Hochdrucklampe		150