



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

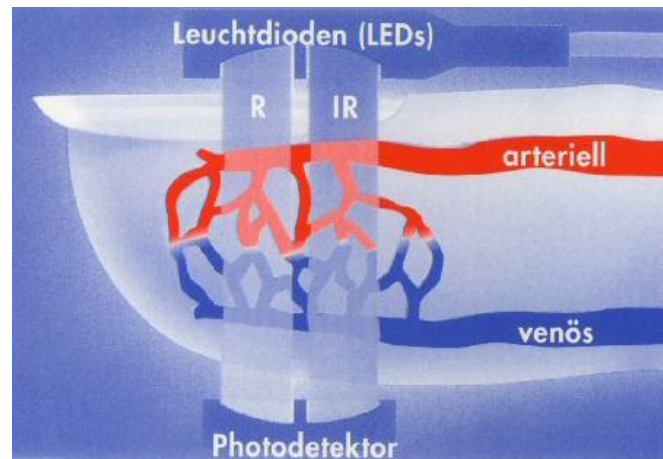
Physik und Sensorik

Photodetektoren

Optische Sensoren

Z.B. Transmission durch Gewebe

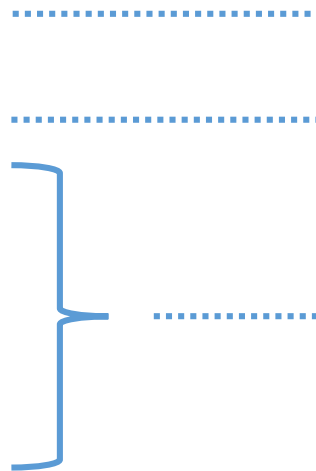
Lichtquelle → Gewebe → Photodetektor → Verstärker → ...



Bildquelle: <http://www2.hs-esslingen.de/~johiller/pulsoximetrie/pics/po06.jpg>

Photodetektoren

- Volumen-Absorber
- Photomultiplier
- Photowiderstände
- Photodioden
- Phototransistoren
- CCD/CMOS Detektoren



Funktionsweise

Temperaturänderung

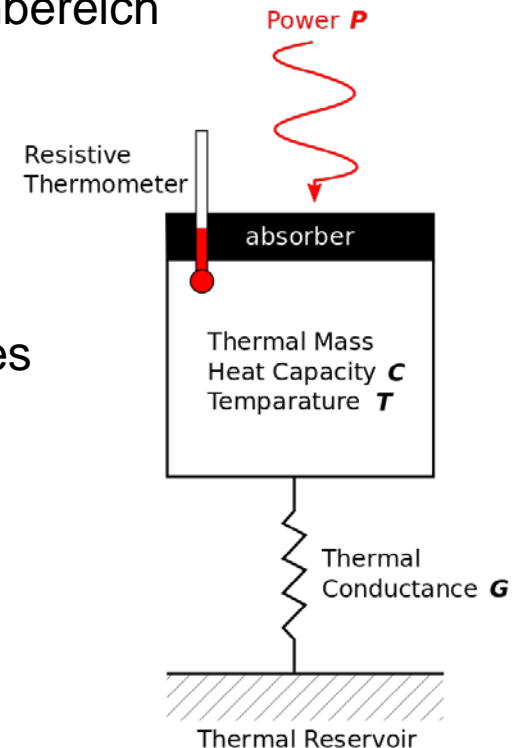
Äußerer Photoeffekt

Innerer Photoeffekt,

HL-Bauelemente

Volumenabsorber (“Bolometer”)

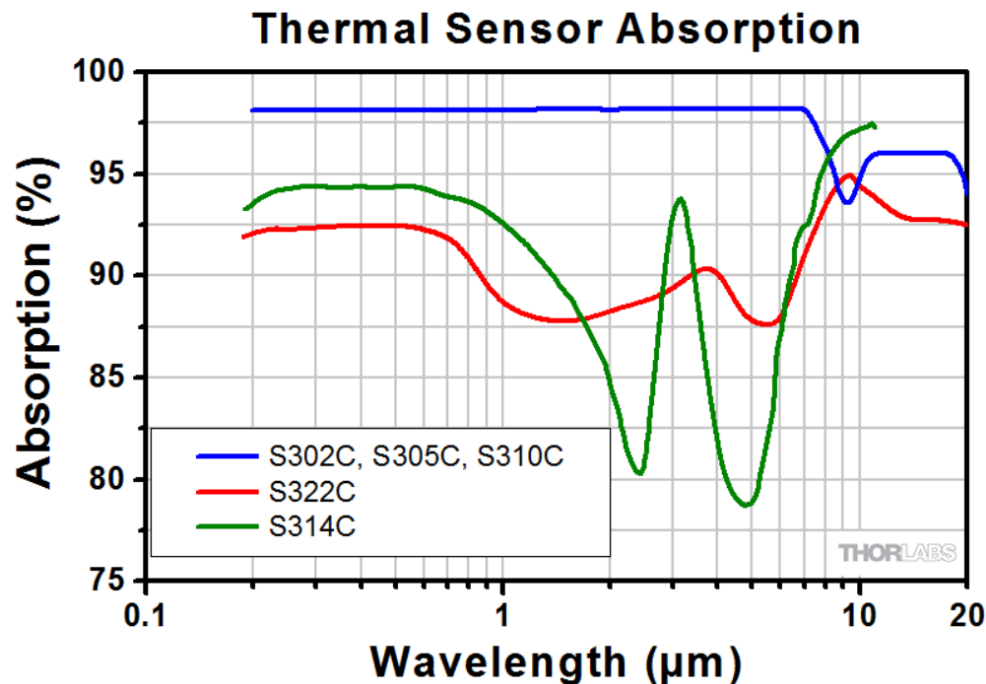
- Absorption der Lichtleistung in mattschwarzem Körper
- Messung der Temperaturänderung (Erwärmung)
- Konstante Empfindlichkeit über großen Wellenlängenbereich (Ultraviolett (UV) bis mittleres Infrarot (IR))
- Hohe Empfindlichkeit $\approx 50 \text{ V/W}$
- Träge (=langsam)
- Geringe Detektivität D^* (Ursache ist hohes thermisches Rauschen)



Quelle: Wikimedia

Volumenabsorber ("Bolometer")

- Konstante Empfindlichkeit über großen Wellenlängenbereich (Ultraviolett (UV) bis mittleres Infrarot (IR))

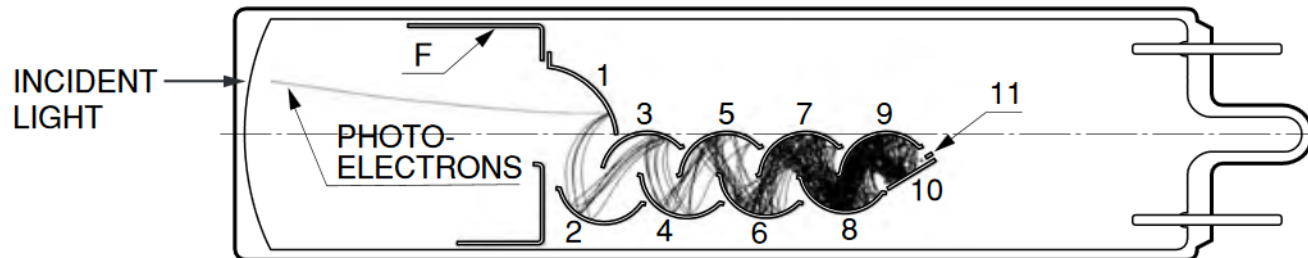


Quelle: Thorlabs

Photomultiplier

- Licht regt Elektronen aus der Photokathode ins Vakuum an (äußerer Photoeffekt)
- Elektronen werden über hohe elektrische Felder beschleunigt
- An Dynoden werden weitere Elektronen angeregt
- Strom-Verstärkung, Elektronenlawine
- Photostrom an der Anode ist proportional zur Anzahl der Photonen

Aufbau einer Photomultiplier-Röhre



Quelle: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v3aE.pdf

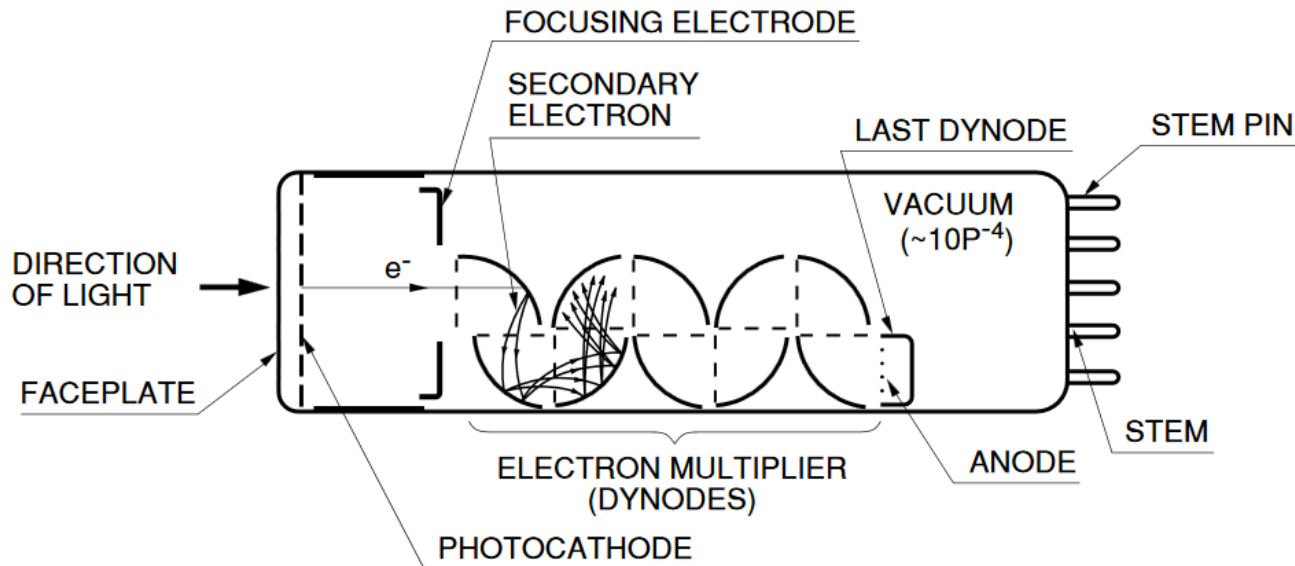
Photomultiplier



Quelle: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v3aE.pdf

Photomultiplier

Aufbau einer Photomultiplier-Röhre

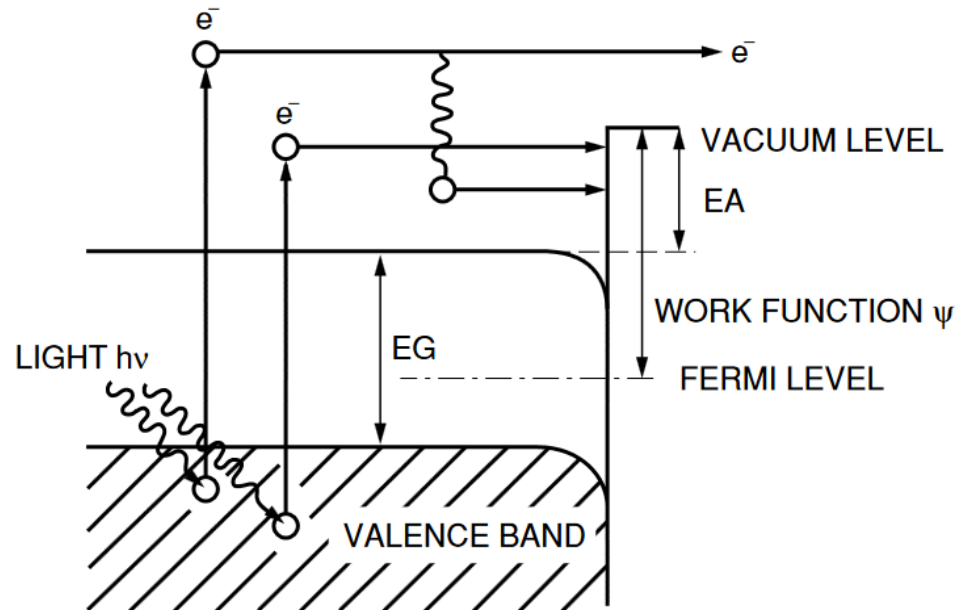


Quelle: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v3aE.pdf

Photomultiplier

Externer Photoeffekt

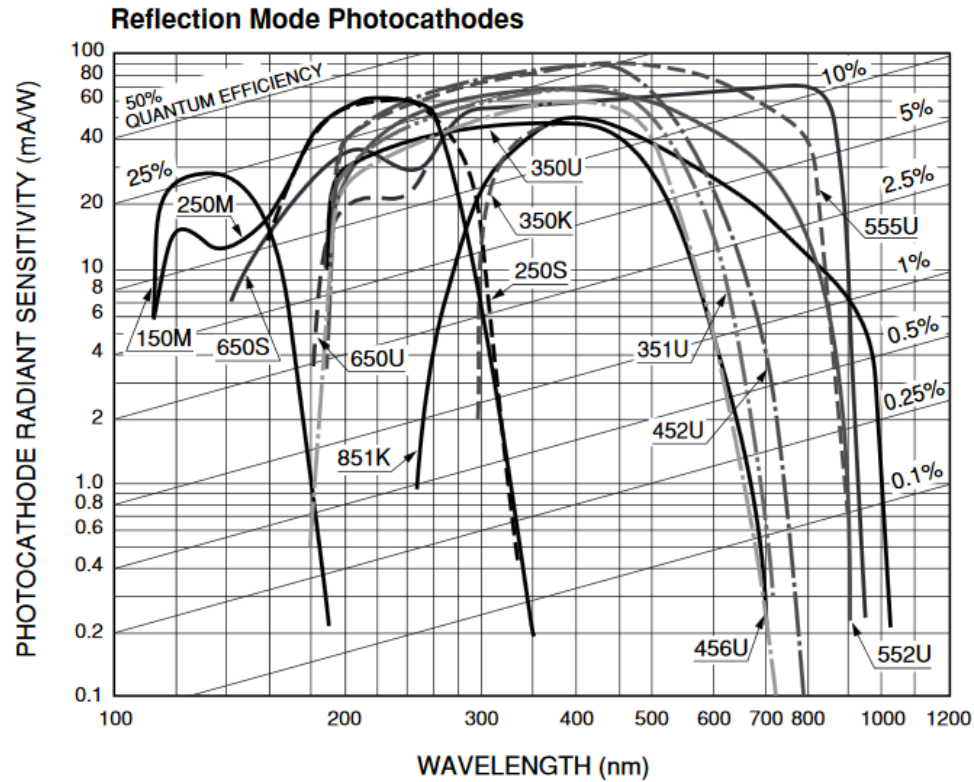
Energieschema für eine Alkali-Metall Photokathode (z.B. Sb-Cs)



Quelle: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v3aE.pdf

Photomultiplier

Spektrale Empfindlichkeit



Quelle: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v3aE.pdf

Photomultiplier

Eigenschaften

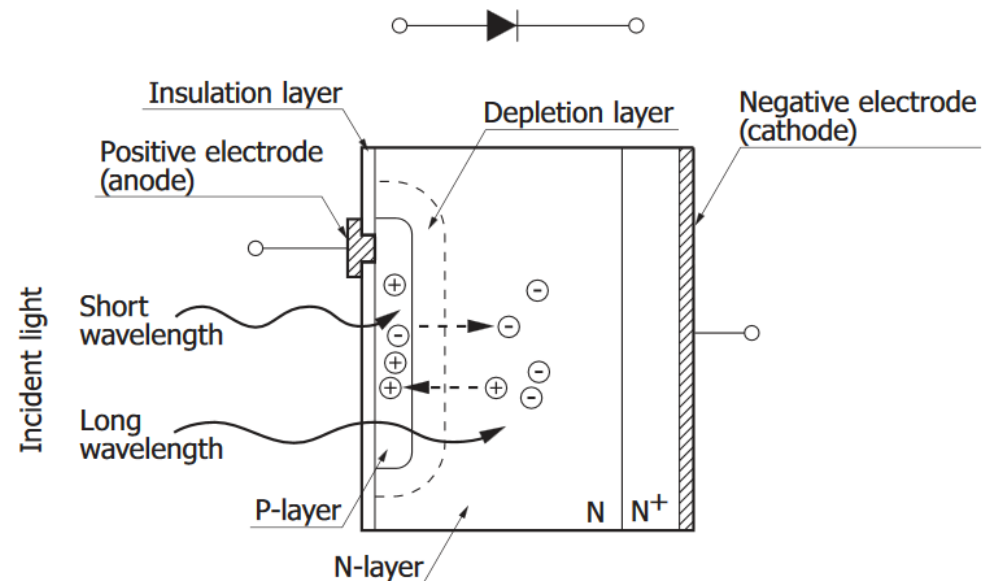
- Sehr hohe Verstärkung $g \approx 10^6$
- Sehr hohe Empfindlichkeit $\approx 10^5 \dots 10^6 \frac{A}{W}$ oder $> 2000 A/lm$
- Sehr geringer Dunkelstrom $I_{dark} \approx 10 nA$
- Sehr schnell $t_{rise} \approx 2 ns$

- Benötigt Hochspannung (1 kV)
- Meist groß und stoßempfindlich (Glas)

Quelle: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v3aE.pdf

Photodioden

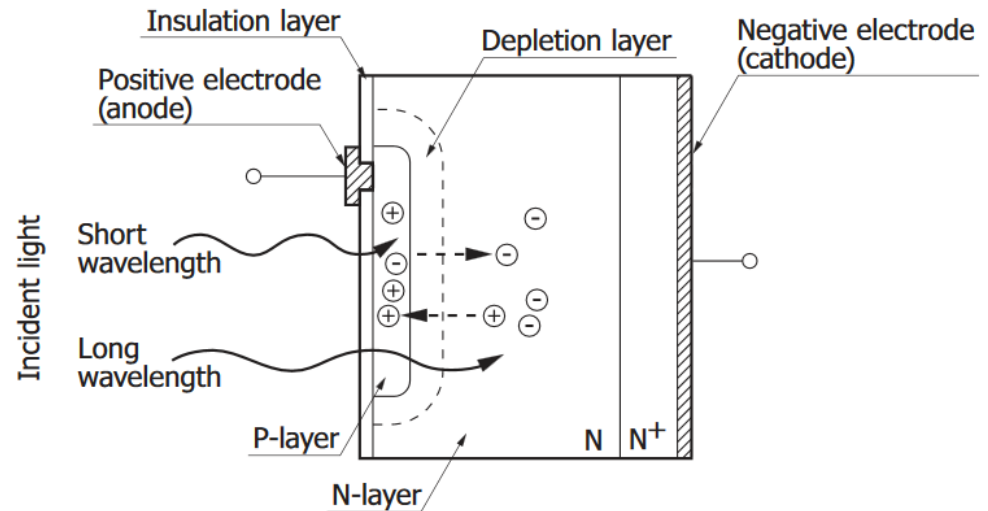
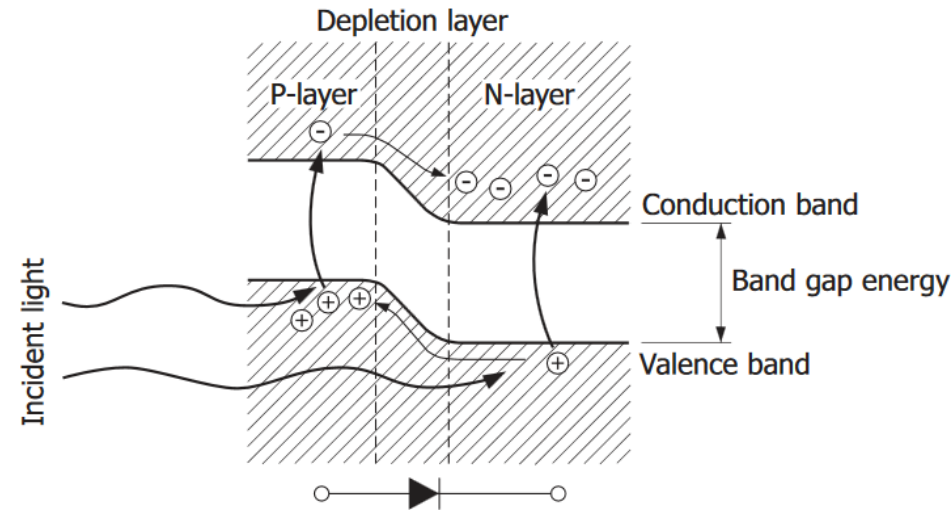
- Elektronen werden im Halbleiter vom Valenzband ins Leitungsband angeregt (innerer Photoeffekt)
- Elektronen werden über elektrische Felder im Halbleiter beschleunigt
- Der Photostrom durch die Photodiode ist proportional zur Anzahl der Photonen



Quelle: http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/e02_handbook_si_photodiode.pdf

Photodioden

- Elektronen werden im Halbleiter vom Valenzband ins Leitungsband angeregt (innerer Photoeffekt)



Quelle: http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/e02_handbook_si_photodiode.pdf

Photodioden

BPW 34 von Osram OS



Silizium PIN Photodiode

Wellenlängenbereich: 400 nm bis 1100 nm

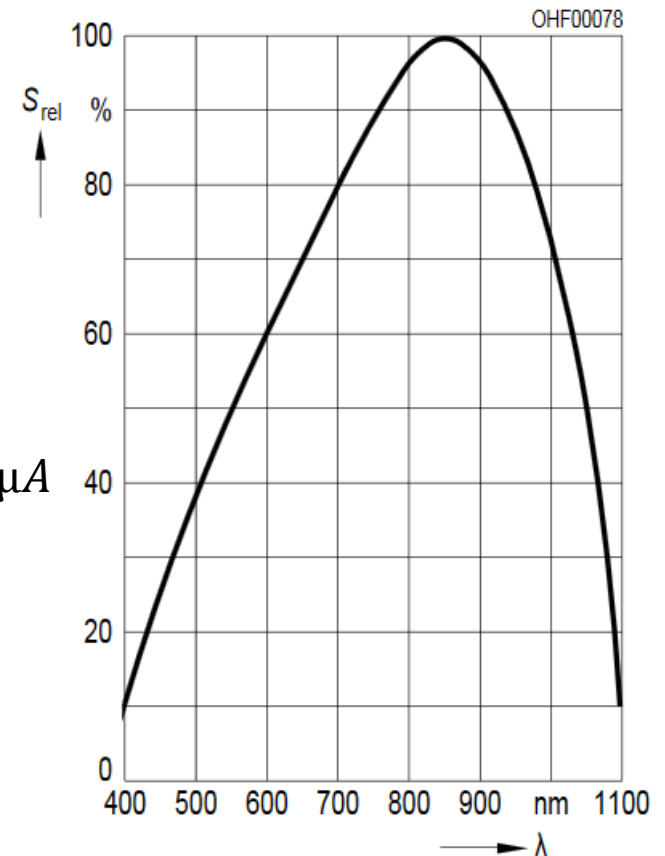
Spektrale Empfindlichkeit bei 850 nm: $0.62 \frac{A}{W}$

Photostrom bei 1000 lx Standardbeleuchtung: $80 \mu A$

Dunkelstrom: $2 nA$

Anstiegs- und Abfallszeit: $20 ns$

Relative spektrale Empfindlichkeit



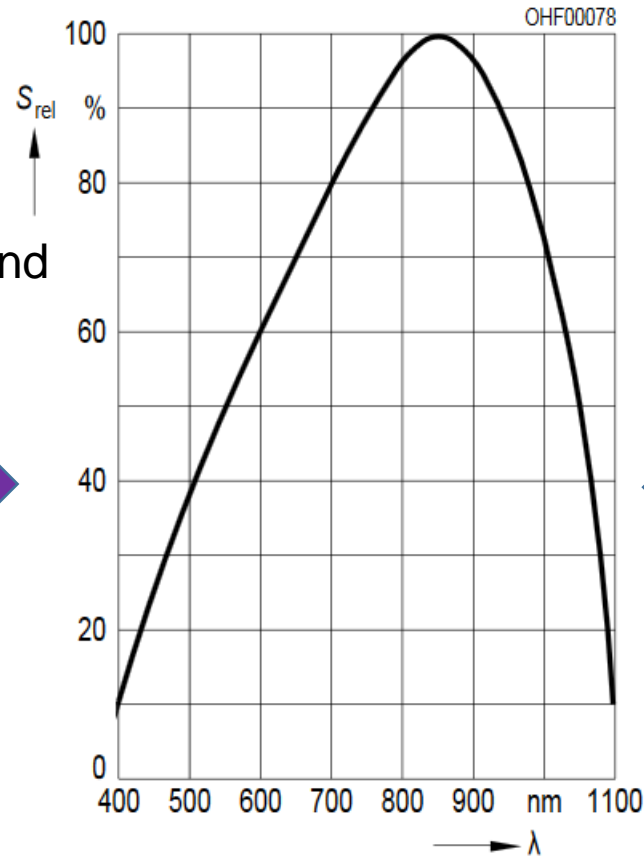
Quelle: http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/e02_handbook_si_photodiode.pdf

Photodioden

Relative spektrale Empfindlichkeit

Ultraviolett:
Hochenergetische
Photonen werden in
Deckschicht absorbiert und
erreichen nicht den p-n-
Übergang der Diode

Infrarot:
Energie eines Photons
reicht nicht aus, um eine
Elektron über die
Bandlücke anzuregen



Quelle: http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/e02_handbook_si_photodiode.pdf

Photodioden

Eigenschaften

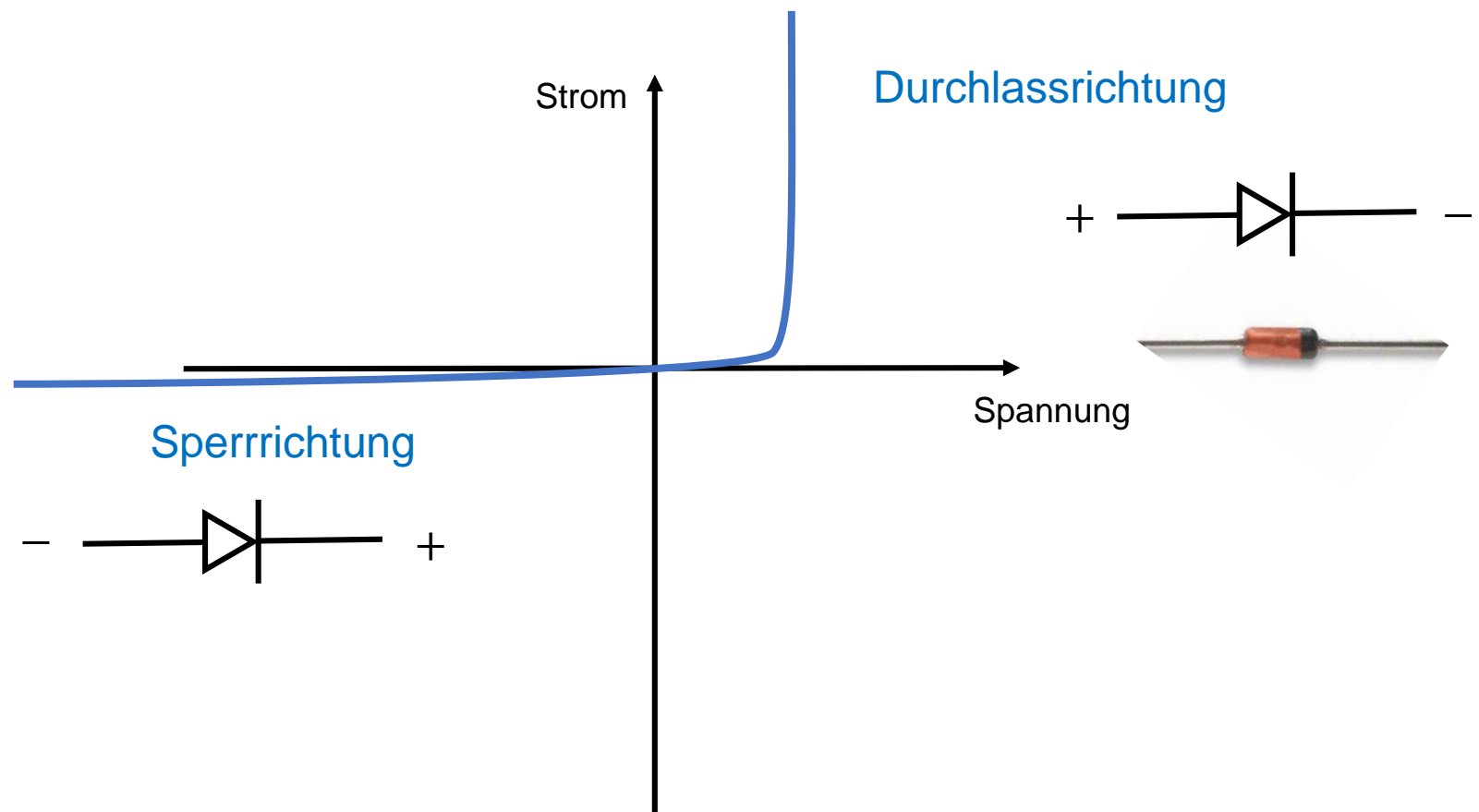
- Empfindlichkeit $0.5 \frac{A}{W}$
- Keine Verstärkung (*)
- Sehr geringer Dunkelstrom $I_{dark} \approx 1 pA \dots 200 pA \dots 10 nA$
- Sehr schnell $t_{rise} \approx 2 ns$

- Kompakt, robust, billig

(*) Phototransistor und Avalanche Photodiode (APD): geringe Verstärkung $g \approx 100$

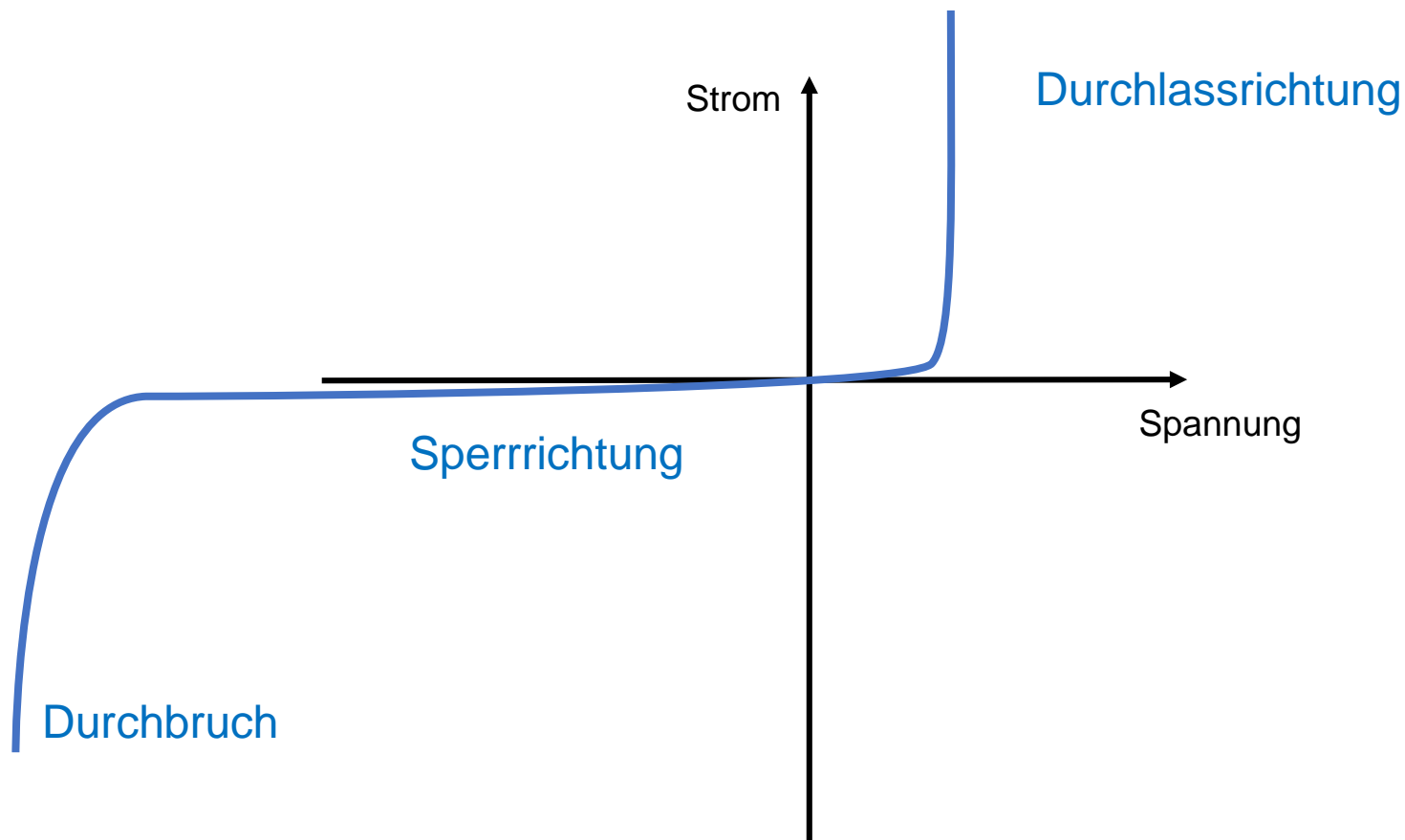
Dioden

Strom-Spannungs-Kennlinie einer Diode (Gleichrichter)



Dioden

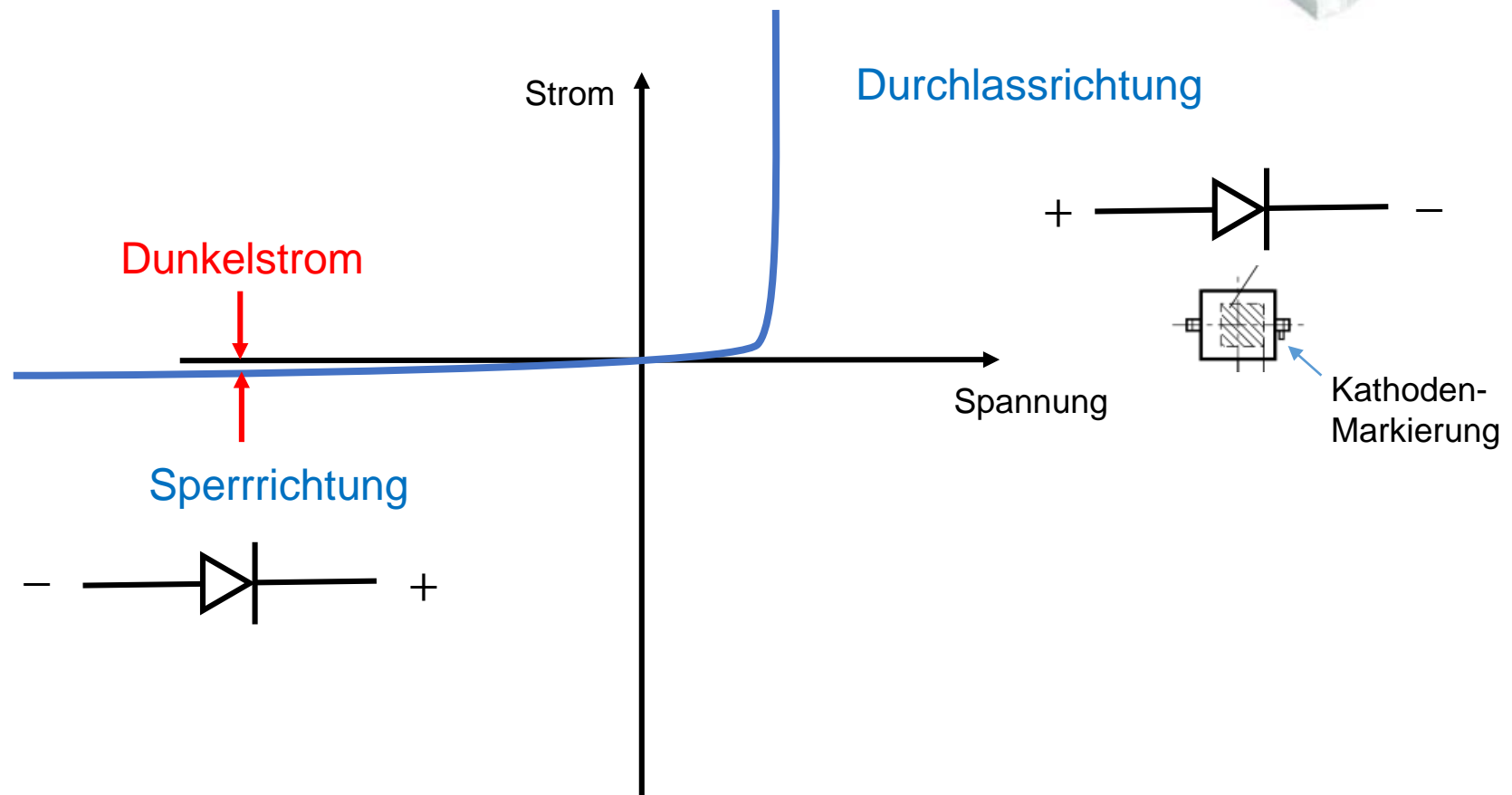
Strom-Spannungs-Kennlinie einer Diode (Gleichrichter)



Photodioden

Strom-Spannungs-Kennlinie einer Photodiode (Gleichrichter)

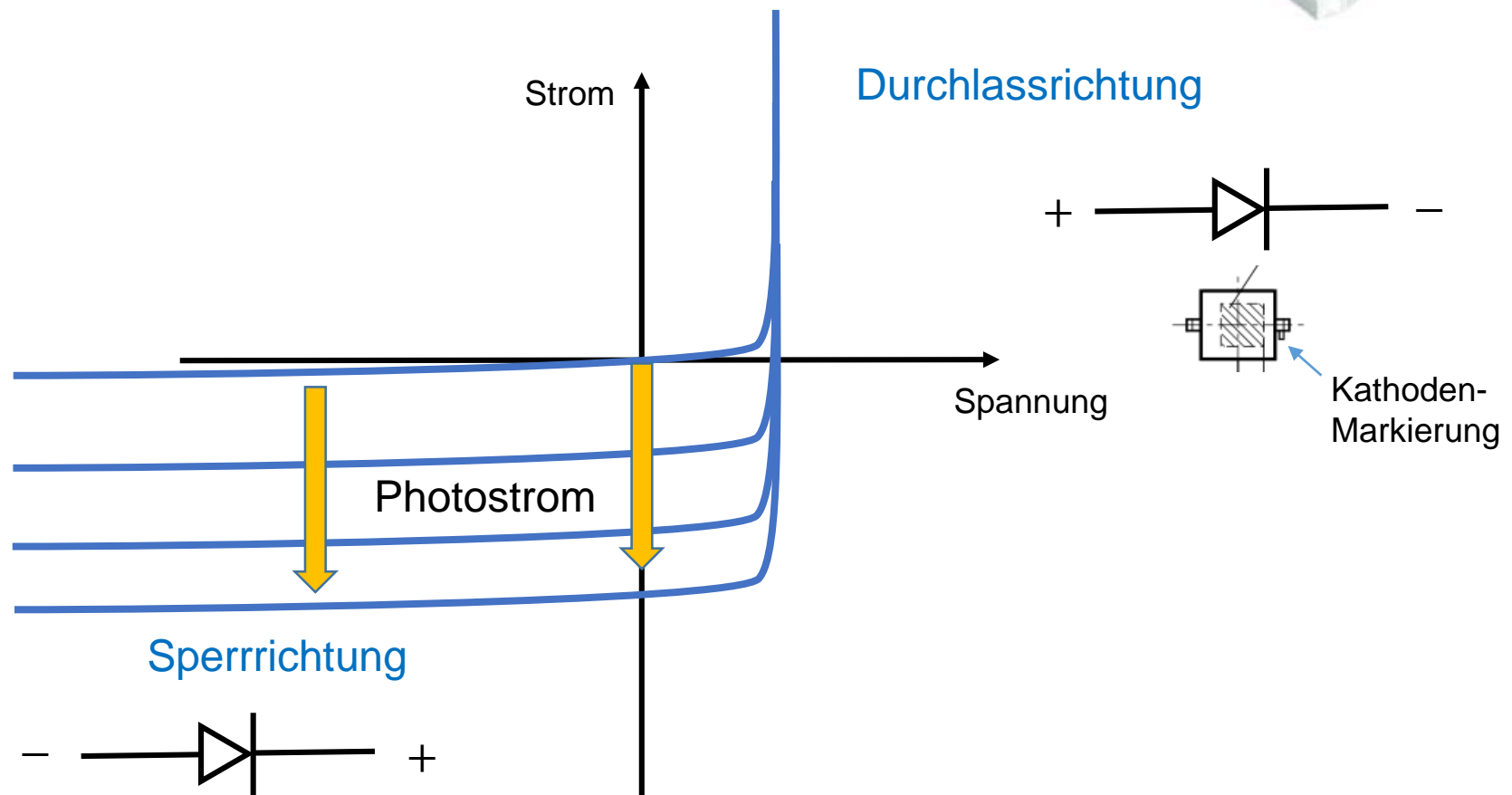
Dunkelkennlinie



Photodioden

Strom-Spannungs-Kennlinie einer Photodiode (Gleichrichter)

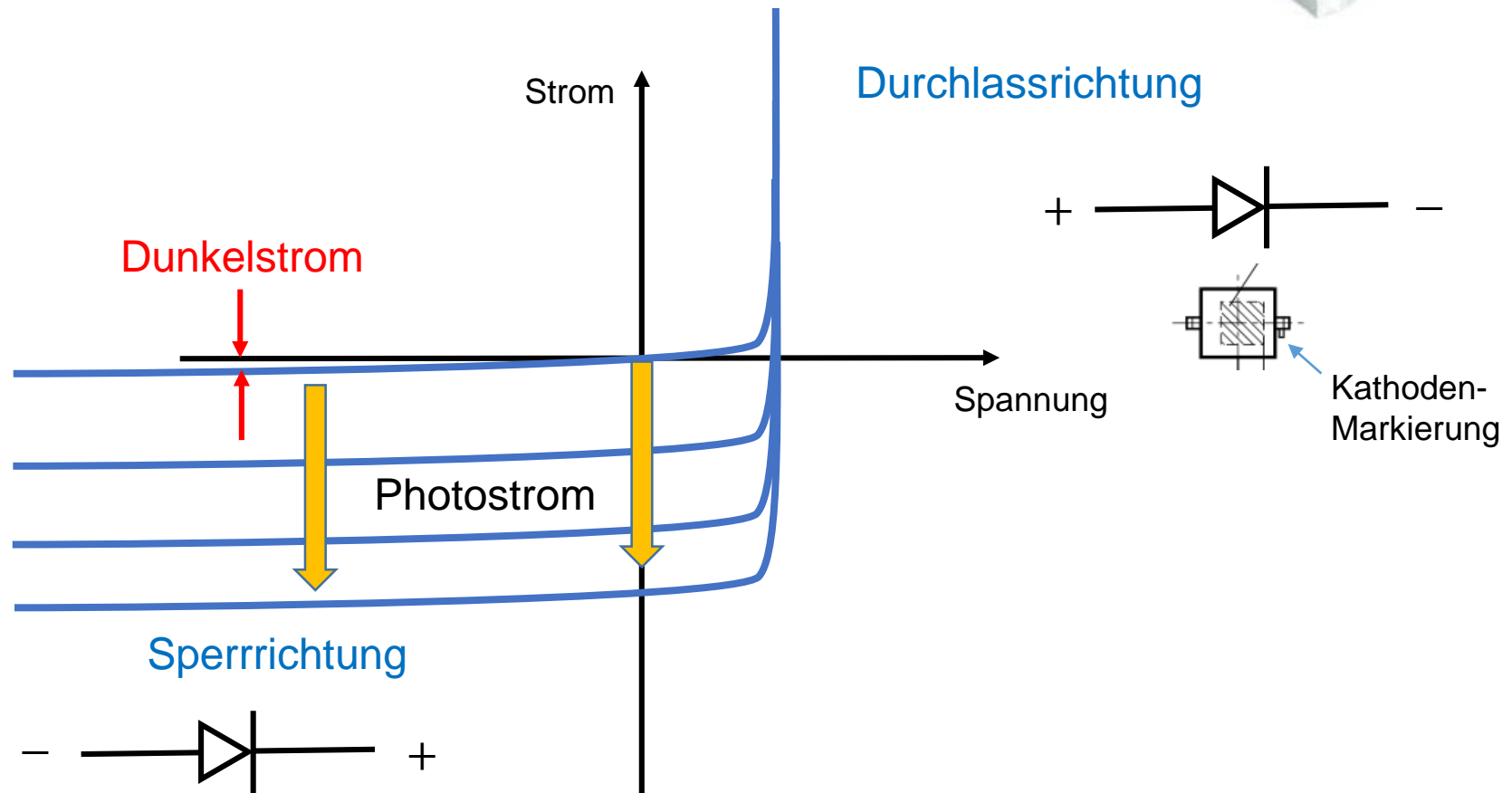
Dunkelkennlinie



Photodioden

Photodiode wird bei 0 V oder in Rückwärtsrichtung betrieben

Strom = Photostrom + Dunkelstrom



Photodioden

Photodiode wird bei 0 V oder in Rückwärtsrichtung betrieben

Strom = Photostrom + Dunkelstrom

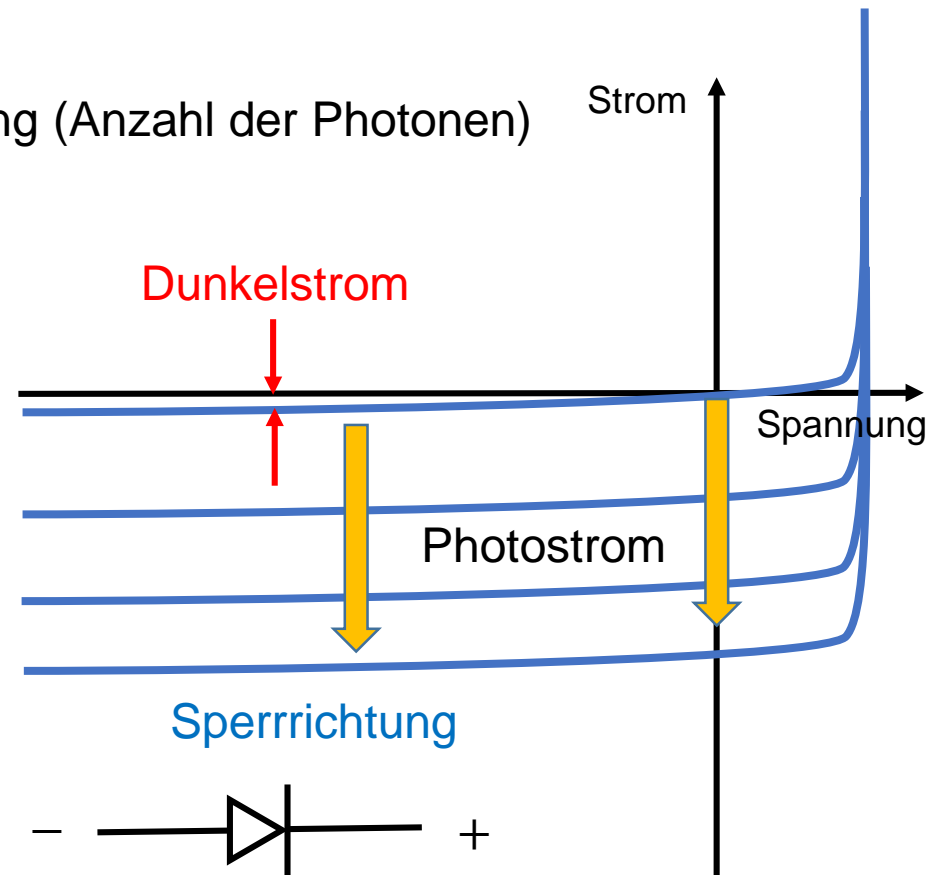
Photostrom ist proportional zur Lichtleistung (Anzahl der Photonen)

Rückwärtsrichtung, z.B. $U_{bias} = -5 V$

- Hohes internes Feld
- Photodiode ist schnell

Keine Spannung $U_{bias} = 0 V$

- Kein Dunkelstrom
- Bestes Signal-Rausch-Verhältnis



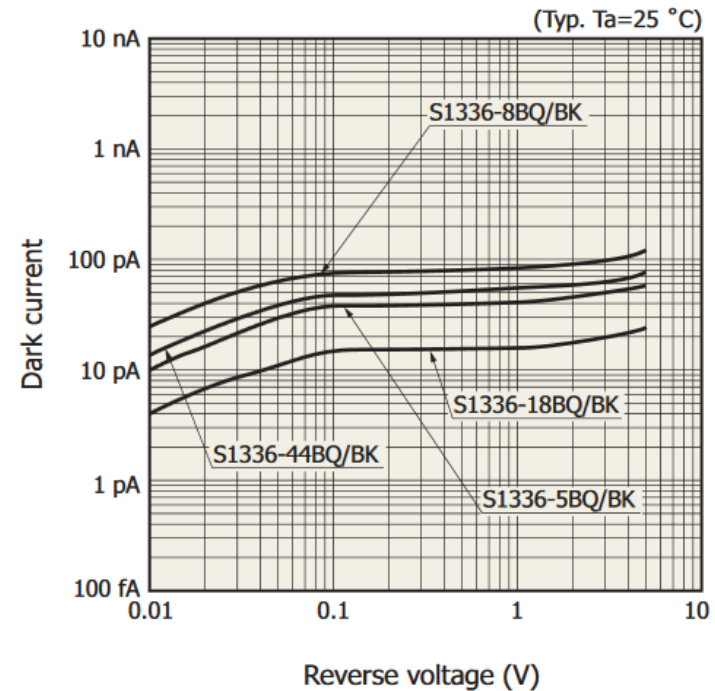
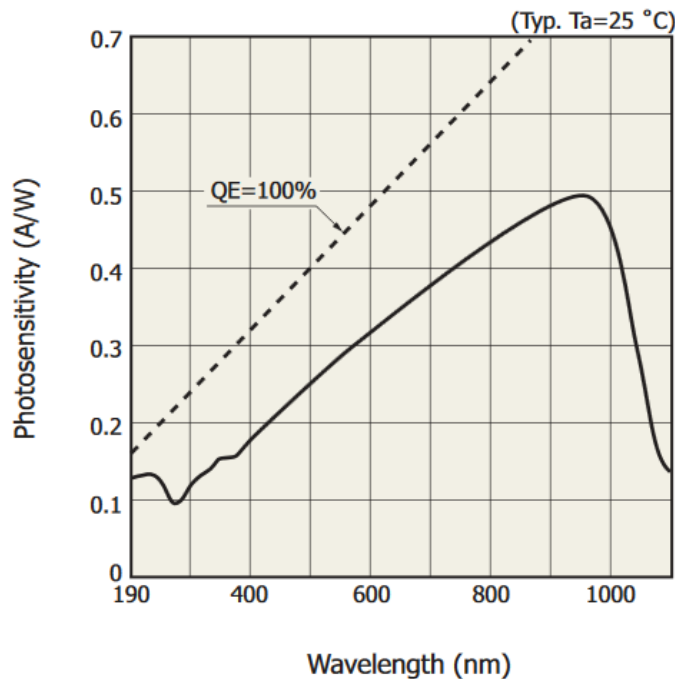
Photodioden

Photodiode wird bei 0 V oder in Rückwärtsrichtung betrieben

Strom = Photostrom + Dunkelstrom

Photostrom ist proportional zur Lichtleistung (Anzahl der Photonen)

Dunkelstrom steigt mit Rückwärtsspannung



Photodioden

Photodiode liefert Strom

Meist wird Spannung gemessen (z.B. Analog-Digital-Wandler)

Transimpedanz-Verstärker: Strom-Spannungs-Wandler & Verstärker

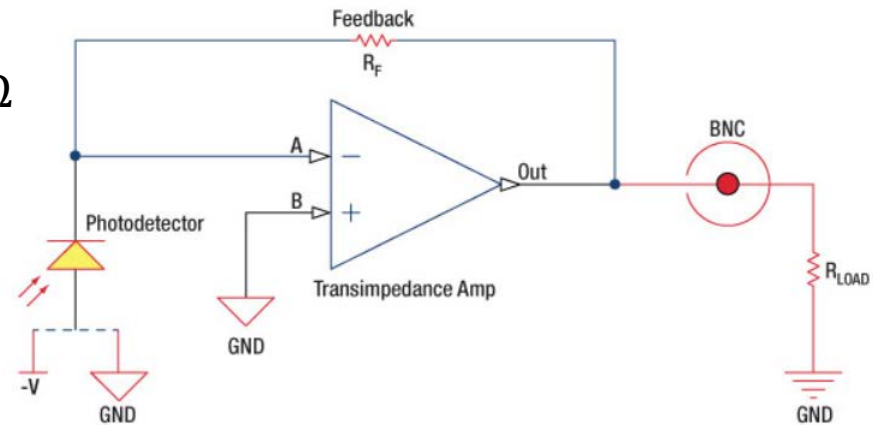
$$U_{out} = R_{Feedback} I_{PD} = R_{Feedback} \times R(\lambda) \times I(\lambda)$$

Rückkopplungs-Widerstand $R_{Feedback}$ in Ω

Responsivity $R(\lambda)$ in A/W

Licht-Intensität $I(\lambda)$ in W

$$\begin{aligned} U_{out} &= 1 \text{ M}\Omega \times 0.46 \frac{A}{W} \times I(\lambda) \\ &= 4.5 \times 10^5 \frac{V}{W} \times I(\lambda) \end{aligned}$$

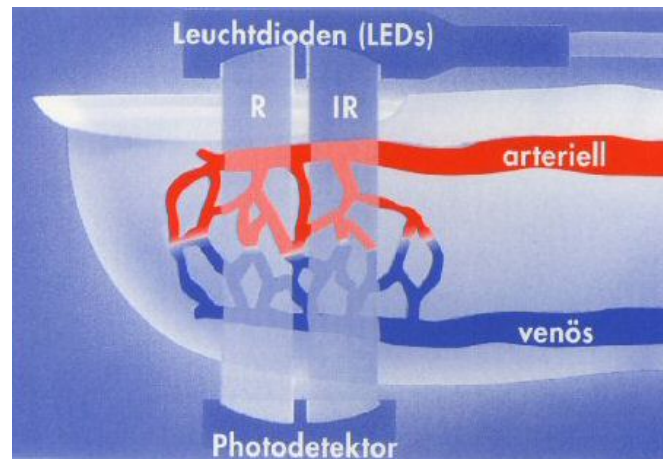


Quelle: Thorlabs

Optische Sensoren

Z.B. Transmission durch Gewebe

Lichtquelle → Gewebe → Photodetektor → Verstärker → ...

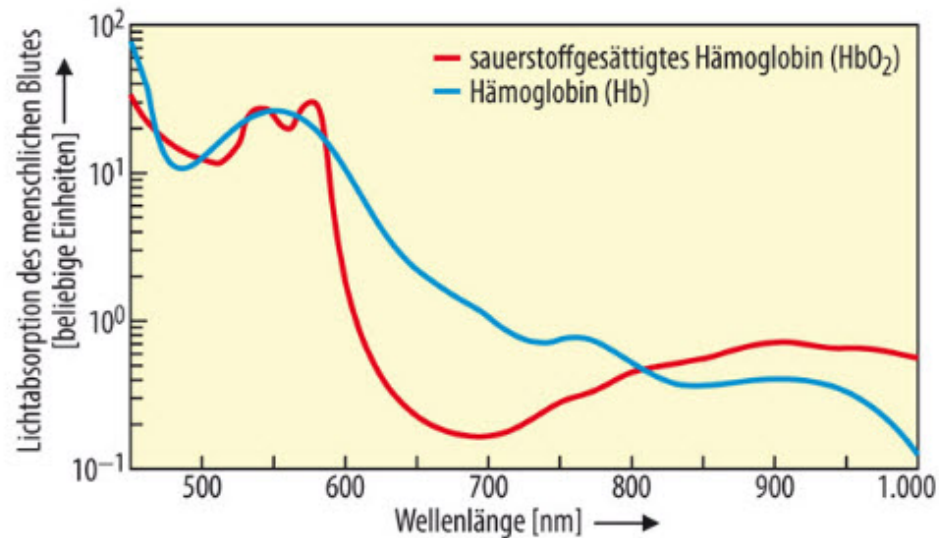


Bildquelle: <http://www2.hs-esslingen.de/~johiller/pulsoximetrie/pics/po06.jpg>

Optische Sensoren

Z.B. Transmission durch Gewebe

Lichtquelle → Gewebe → Photodetektor → Verstärker → ...



Bildquelle: <http://www2.hs-esslingen.de/~johiller/pulsoximetrie/pics/po06.jpg>

Leuchtdioden (LEDs)

Halbleiter-Lichtquellen

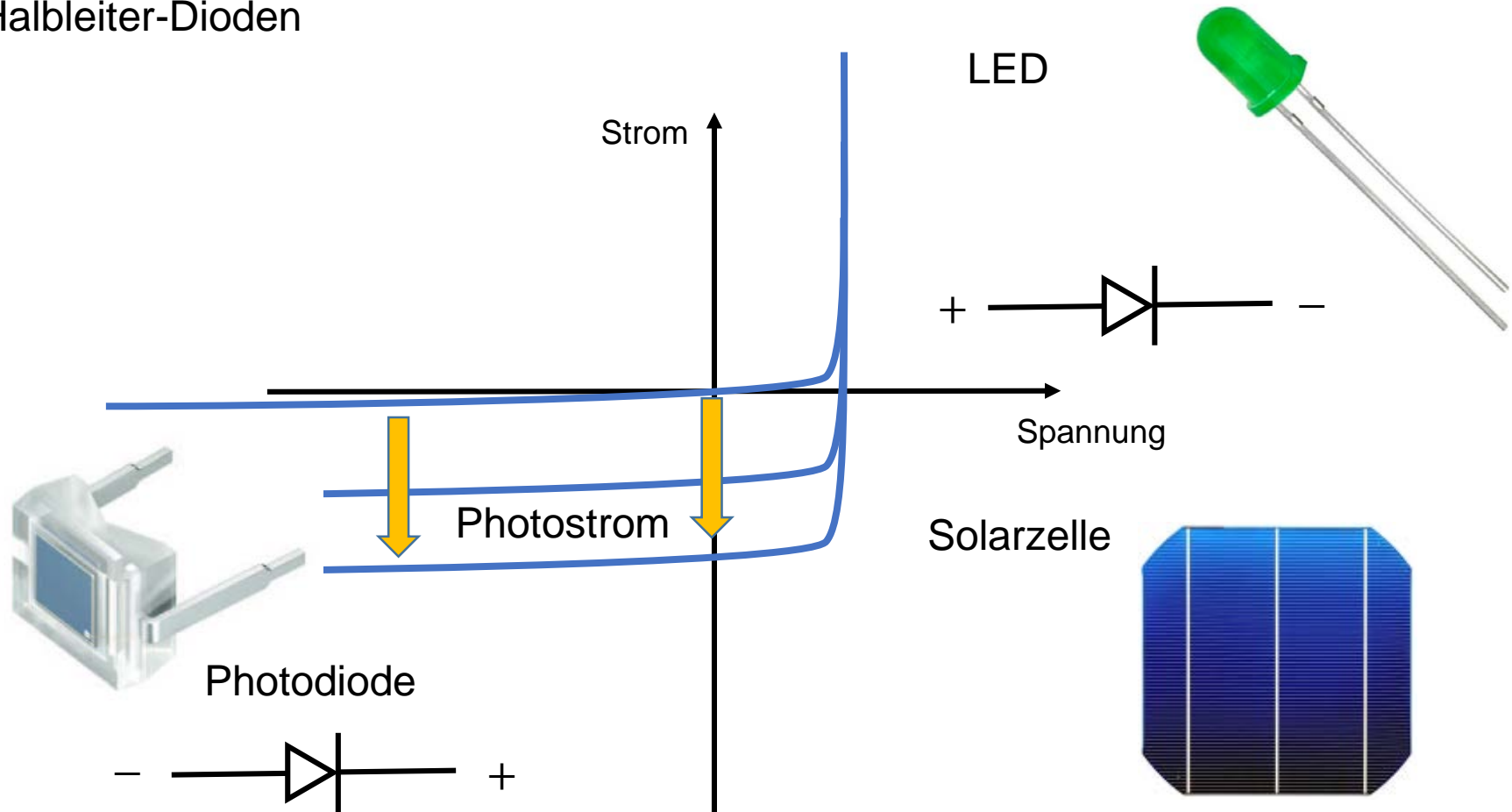
Elektron relaxiert von Leitungsband in Valenzband (Elektron-Loch-Rekombination)

Emission von Photonen mit der Energie der Bandlücke

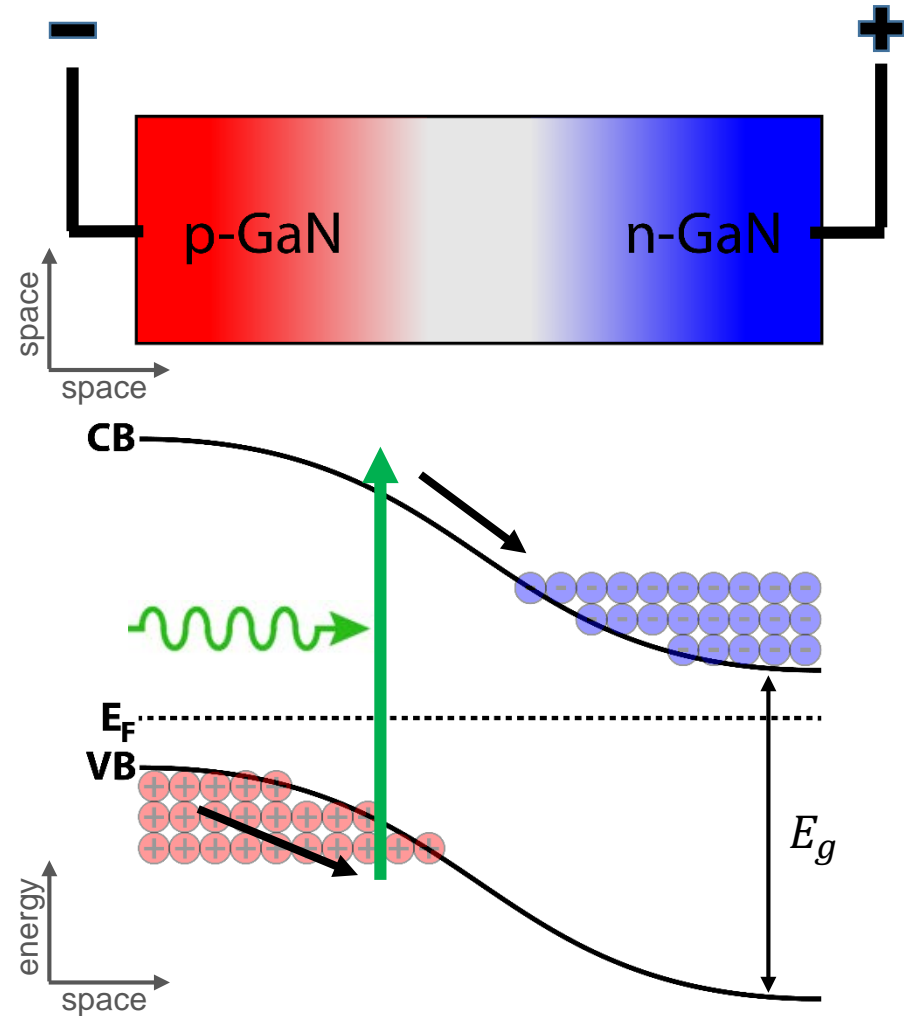
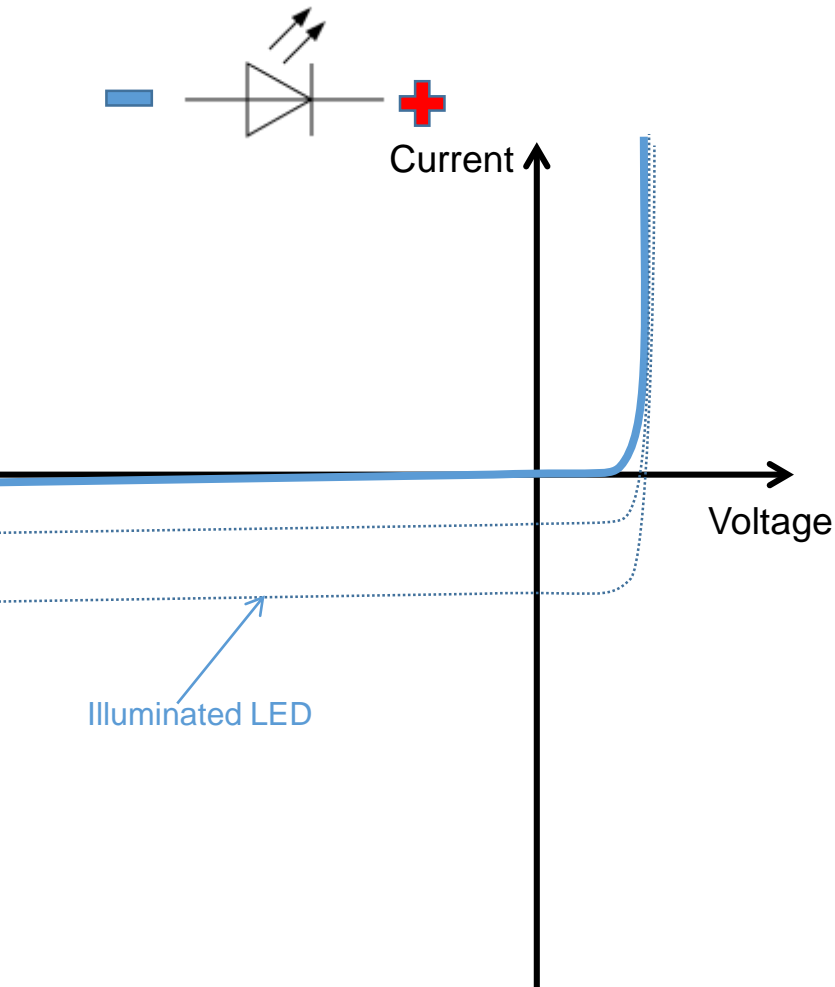
Wellenlängen je nach Halbleiter-Material (bzw. Bandlücke) von IR bis UV

Leuchtdiode – Solarzelle – Photodioden

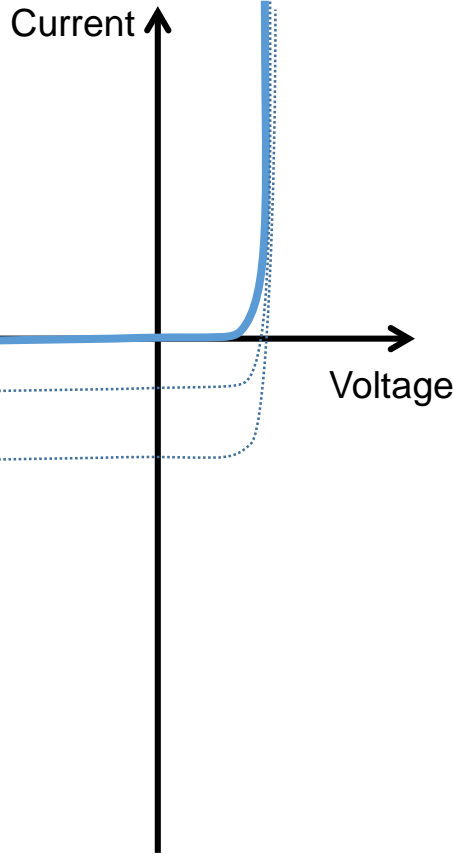
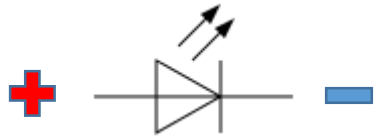
Halbleiter-Dioden



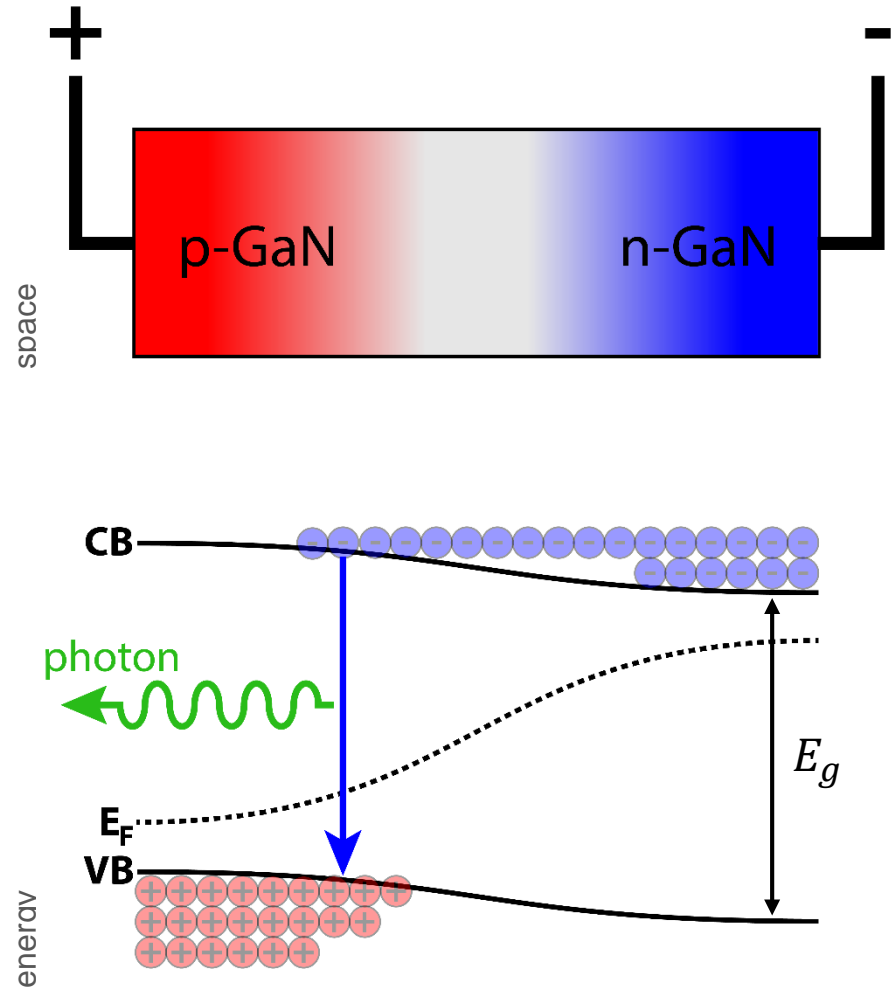
Photodiode



Leuchtdioden (LEDs)



Illuminated LED



Infrarot LED

SFH 4554 von Osram OS

Halbleiter: Galliumarsenid (GaAs)

Peak-Wellenlänge: 860 nm

Spektrale Bandbreite: 30 nm

Halber Öffnungswinkel: $\pm 10^\circ$

Kurze Schaltzeiten: 12 ns

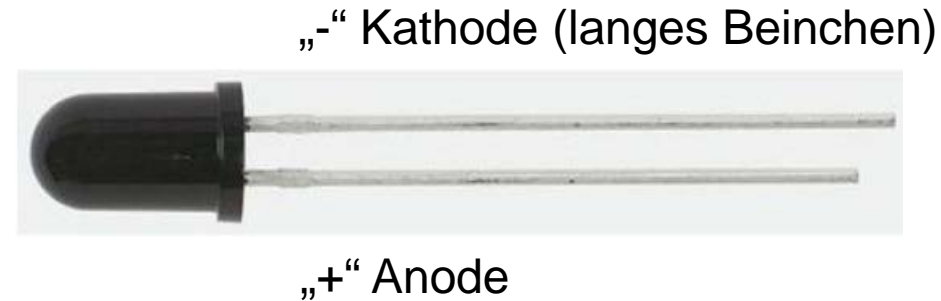
Durchlassspannung: $U = 1.7 \text{ V}$ bei $I = 100 \text{ mA}$

Maximaler Durchlassstrom (cw): $I = 100 \text{ mA}$

Kurze Strompulse bis $I = 100 \text{ mA}$

Typischer Strahlstärke $I_e = 550 \text{ mW sr}^{-1}$ bei $I = 100 \text{ mA}$, Pulslänge $t_p = 20 \text{ ms}$

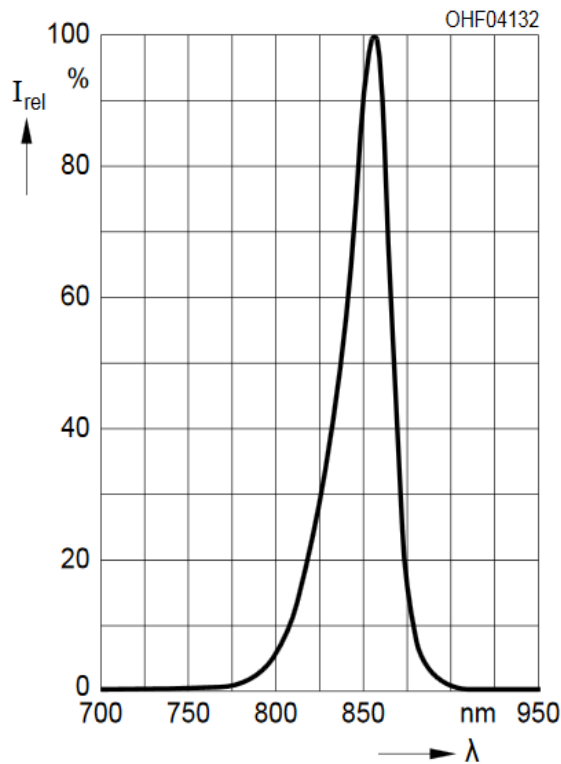
Gesamtstrahlungsfluss $\Phi_e = 75 \text{ mW}$ bei $I = 100 \text{ mA}$



Infrarot LED SFH 4554 von Osram OS

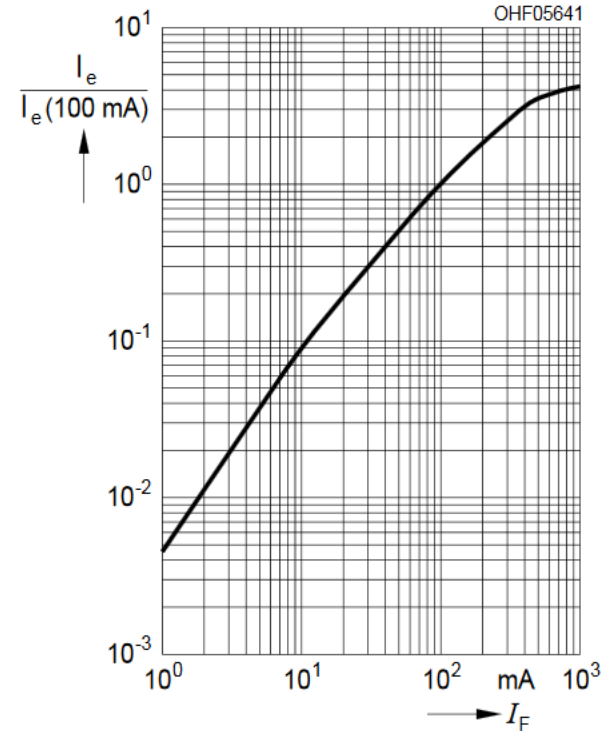
Relative Spectral Emission ^{2) page 8}

$$I_{\text{rel}} = f(\lambda), T_A = 25^\circ\text{C}$$



Radiant Intensity ^{2) page 8}

$$I_e / I_e(100 \text{ mA}) = f(I_F), \text{ single pulse, } t_p = 100 \mu\text{s}, T_A = 25^\circ\text{C}$$

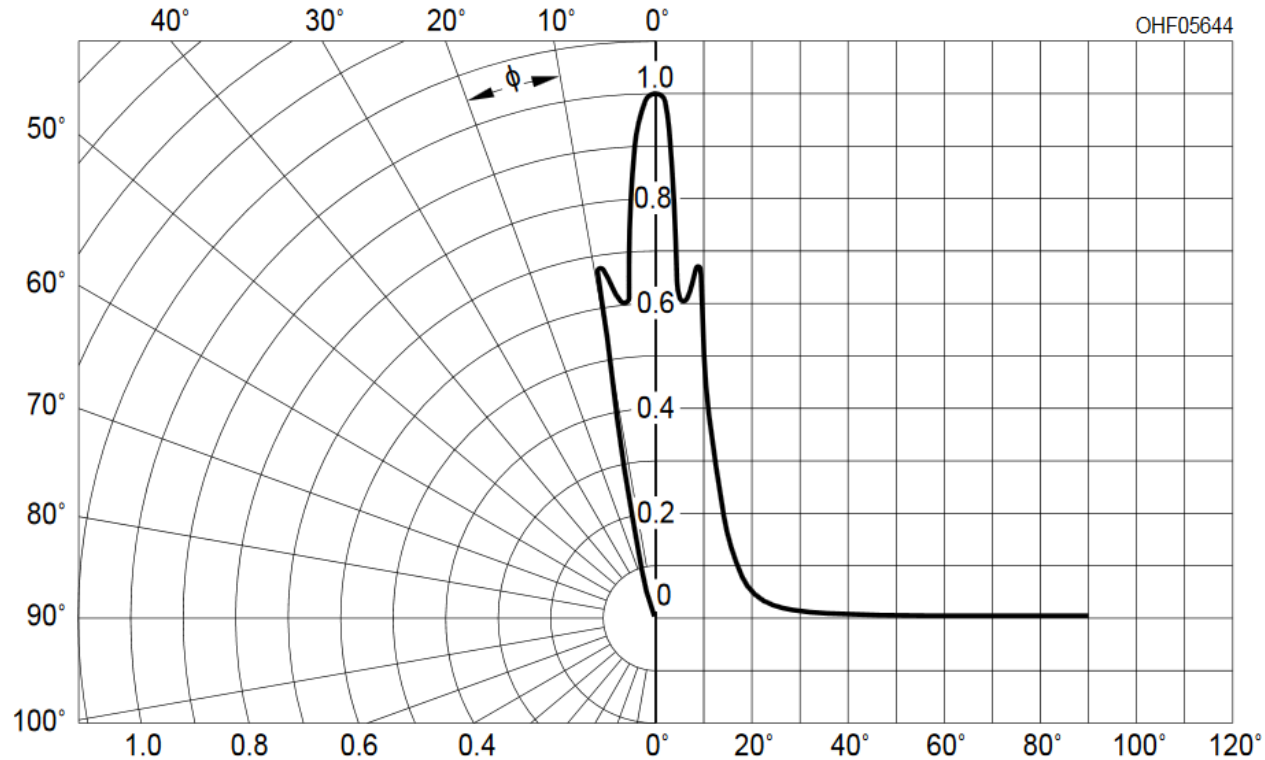


Quelle: http://www.osram-os.com/Graphics/XPic7/00239544_0.pdf/SFH%204554.pdf

Infrarot LED SFH 4554 von Osram OS

Radiation Characteristics ²⁾ page 8

$$I_{\text{rel}} = f(\phi), T_A = 25^\circ\text{C}$$



Quelle: http://www.osram-os.com/Graphics/XPic7/00239544_0.pdf/SFH%204554.pdf

Organisatorisches

Blockseminartermine:

- Montag, 8.1.2018
- Montag, 15.1.2018

Beide Termine ganztägig, mit Unterbrechung für das Seminar

Mailingliste:

Zum Abonnieren der Mailingliste genügt eine Mail ohne Inhalt.

An: ppg-request@tu-chemnitz.de

Betreff: subscribe

Danach noch die automatische Mail beantworten, um den Abo-Wunsch zu bestätigen.

Organisatorisches

Vorträge zu einzelnen Themen

- Marktanalyse Fitnessuhren
- Marktanalyse Finger-Clips / Überwachungssysteme
- Algorithmen für Puls-Auswertung
- Algorithmen für Sauerstoffsättigung
- Messverstärker
- Tiefpassfilter
- MAX30101 Smart Sensor
- MAX30101 Evaluation Board