



Konzept → messbares Signal

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 $I = 100 \text{ mA}$

Typischer Strahlstärke $I_e = 550 \text{ mW sr}^{-1}$ bei $I = 100 \text{ mA}$



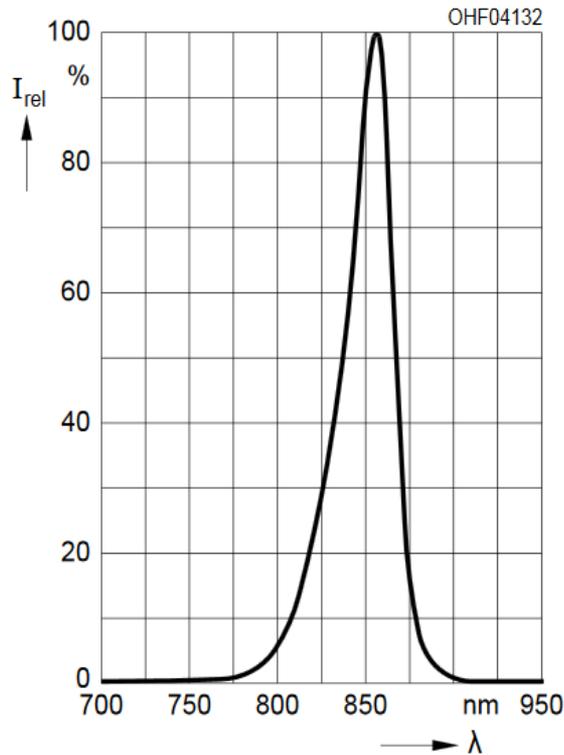
„-“ Kathode (langes Beinchen)

„+“ Anode

Infrarot LED SFH 4554 von Osram OS

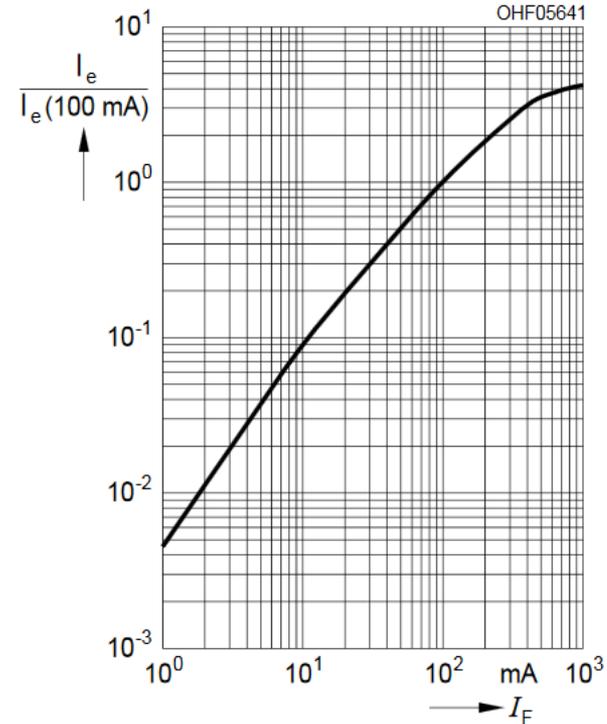
Relative Spectral Emission ^{2) page 8}

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



Radiant Intensity ^{2) page 8}

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

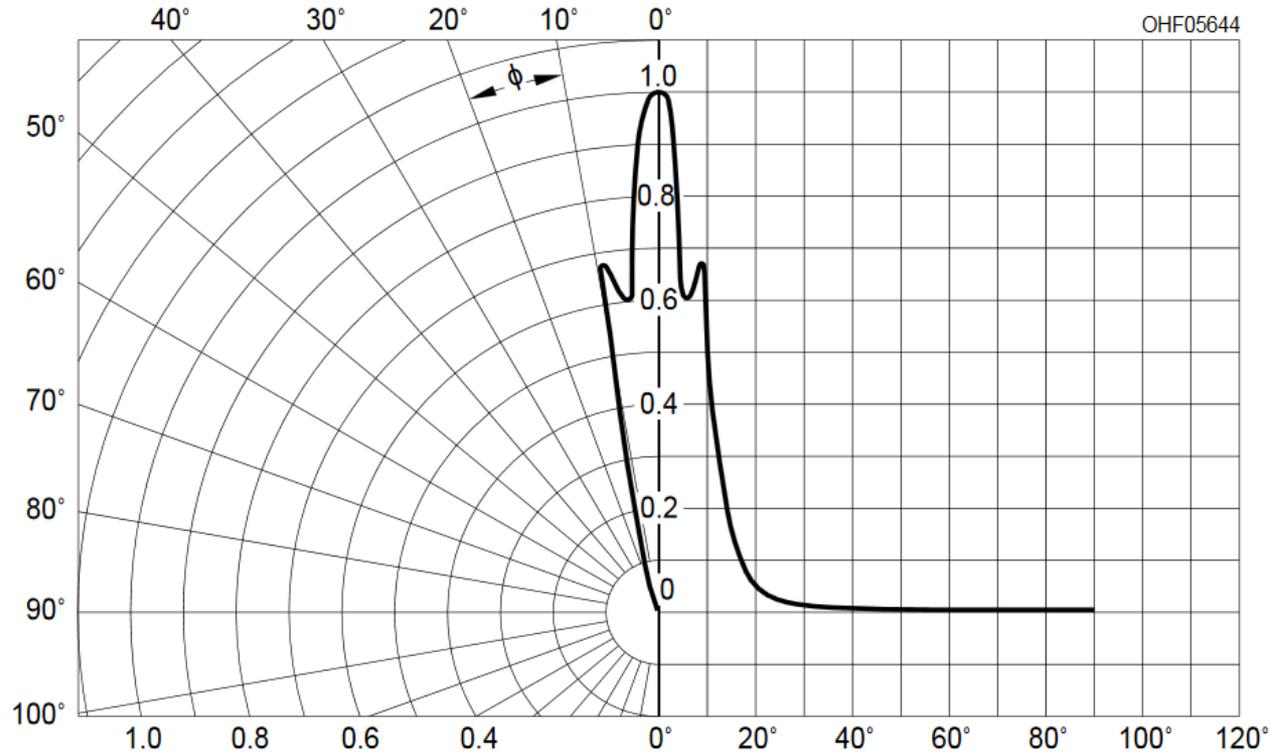


Quelle: http://www.osram-os.com/Graphics/XPic7/00239544_0.pdf/SFH%204554.pdf

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

Raumwinkel

Fläche der Kugelkalotte / Radius²

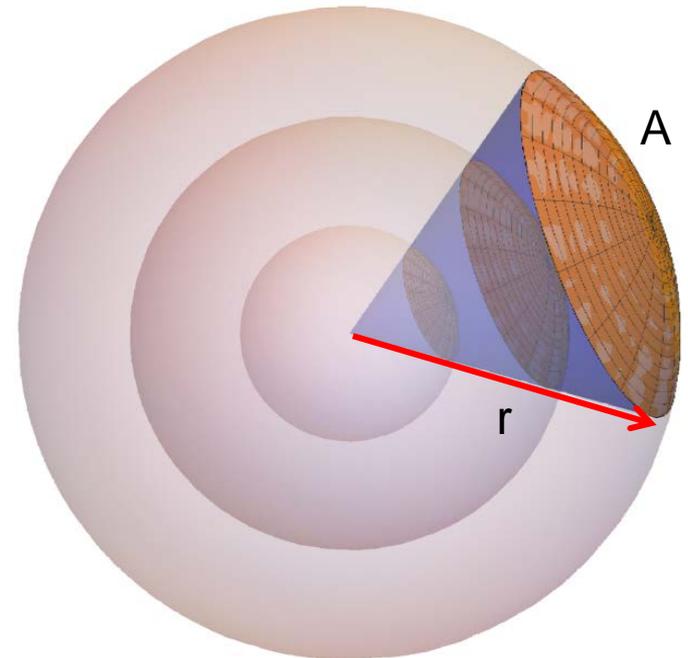
$$\Omega = \frac{A}{r^2} \text{ sr}$$

Einheit: Steradian [sr]

Gesamtoberfläche der Kugel: $\Omega = 4 \pi \text{ sr}$

Für eine radial abstrahlende Punktlichtquelle im Ursprung der Kugel ist die Leistung pro Steradian konstant (unabhängig vom Radius).

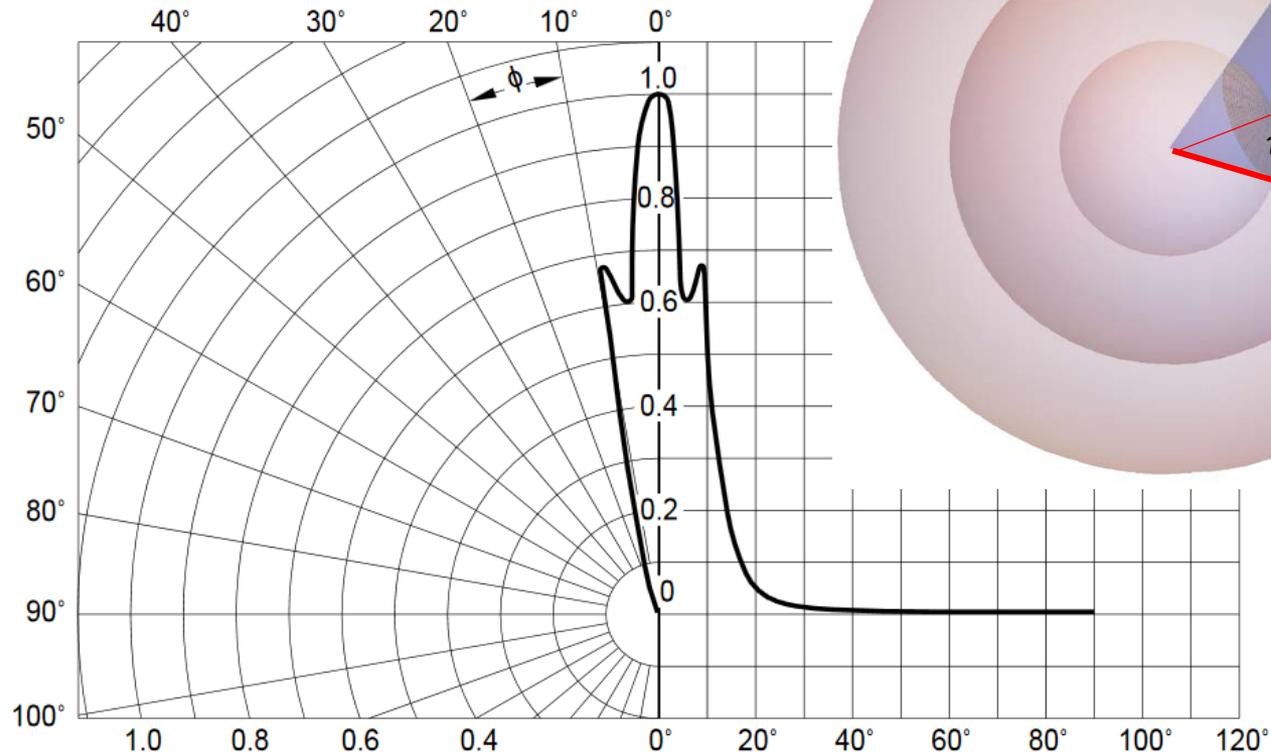
Die Intensität (Leistung pro Fläche) fällt mit $1/r^2$ ab.



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

Raumwinkel

Fläche der Kugelkalotte

$$A = 2\pi r^2(1 - \cos \vartheta)$$

$$\Omega = \frac{2\pi r^2(1 - \cos \vartheta)}{r^2} \text{ sr} = 2\pi(1 - \cos \vartheta)$$

Beispiel SFH4554:

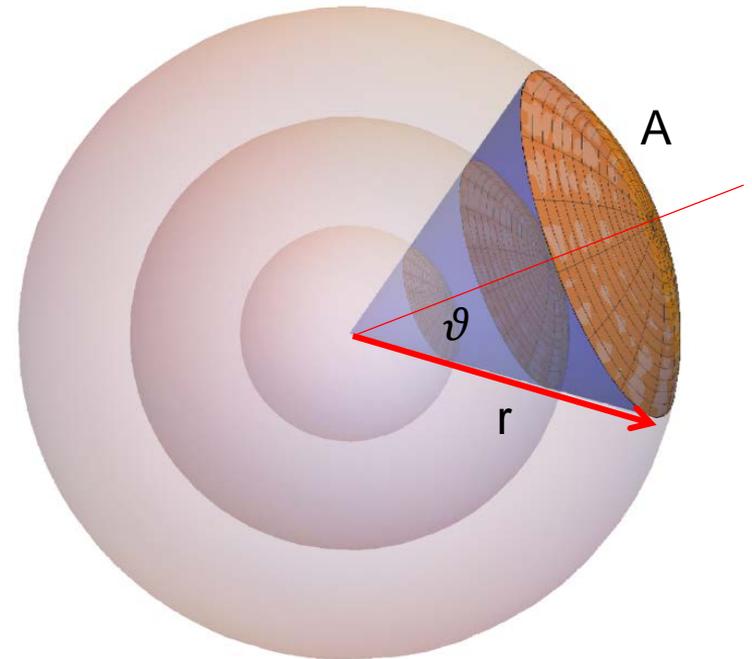
Typischer Strahlstärke $I_e = 550 \text{ mW sr}^{-1}$

Halber Öffnungswinkel: $\vartheta = 10^\circ$

→ $\Omega = 0.0955 \text{ sr}$

Abschätzung Gesamtstrahlungsfluss:

$$\Phi_e = 550 \text{ mW sr}^{-1} \cdot 0.0955 \text{ sr} = 53 \text{ mW}$$



Rote LED

LSG6SP von Osram OS



Flächenemitter: Lambertscher Strahler

Lambertsches Cosinus-Gesetz: $I(\theta) = I_{max} \cos \theta$

Gesamtstrahlungsfluss $\Phi_e = 220 \text{ mW}$ bei $I_F = 140 \text{ mA}$

Maximale Strahlstärke $I_e = 70 \text{ mW sr}^{-1}$

Für Lambertschen Strahler gilt $\Phi_e = \pi \text{ sr } I_e$

Rote LED

LSG6SP von Osram OS

Radiation Characteristics ^{6) page 20}

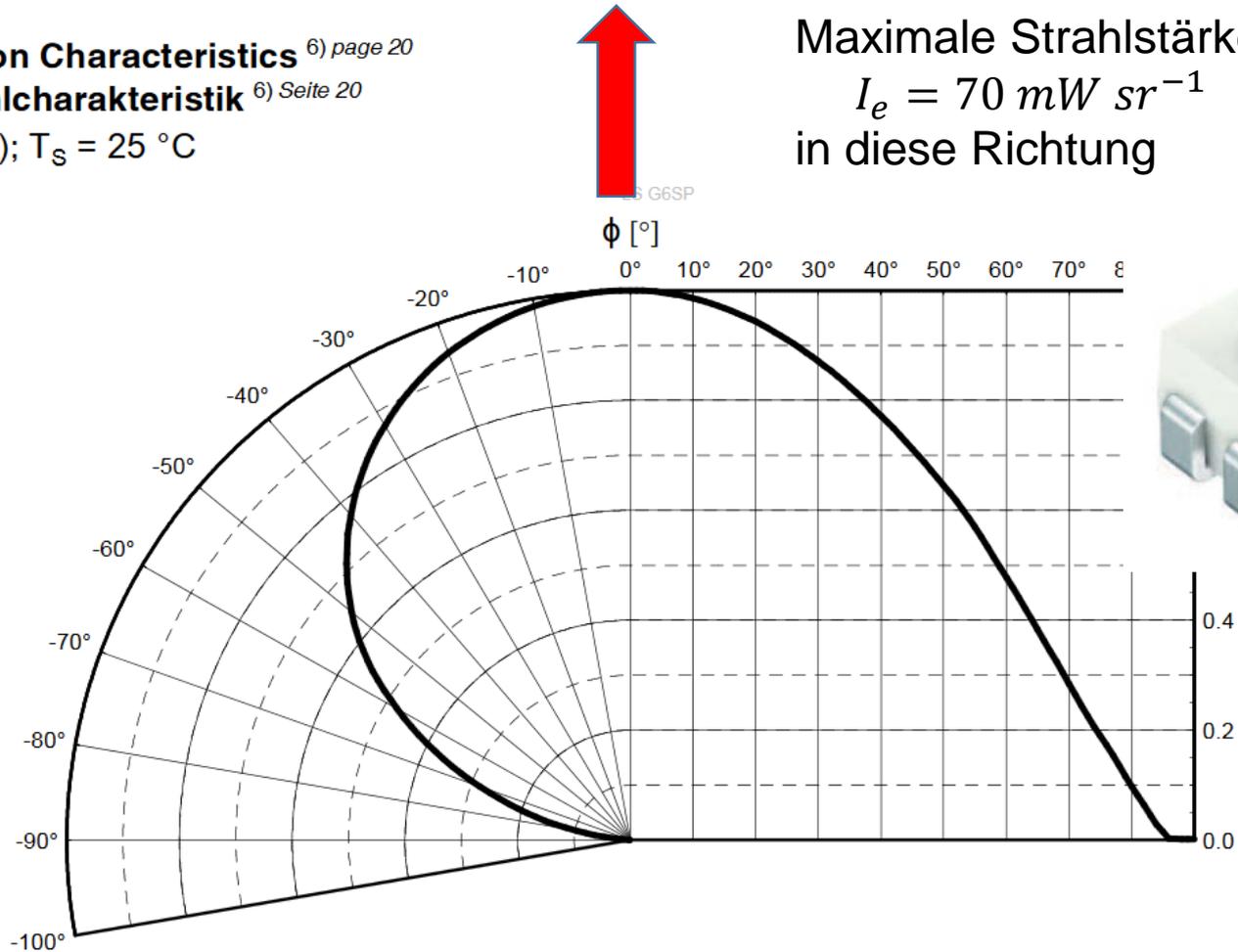
Abstrahlcharakteristik ^{6) Seite 20}

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

Maximale Strahlstärke

$$I_e = 70\text{ mW sr}^{-1}$$

in diese Richtung



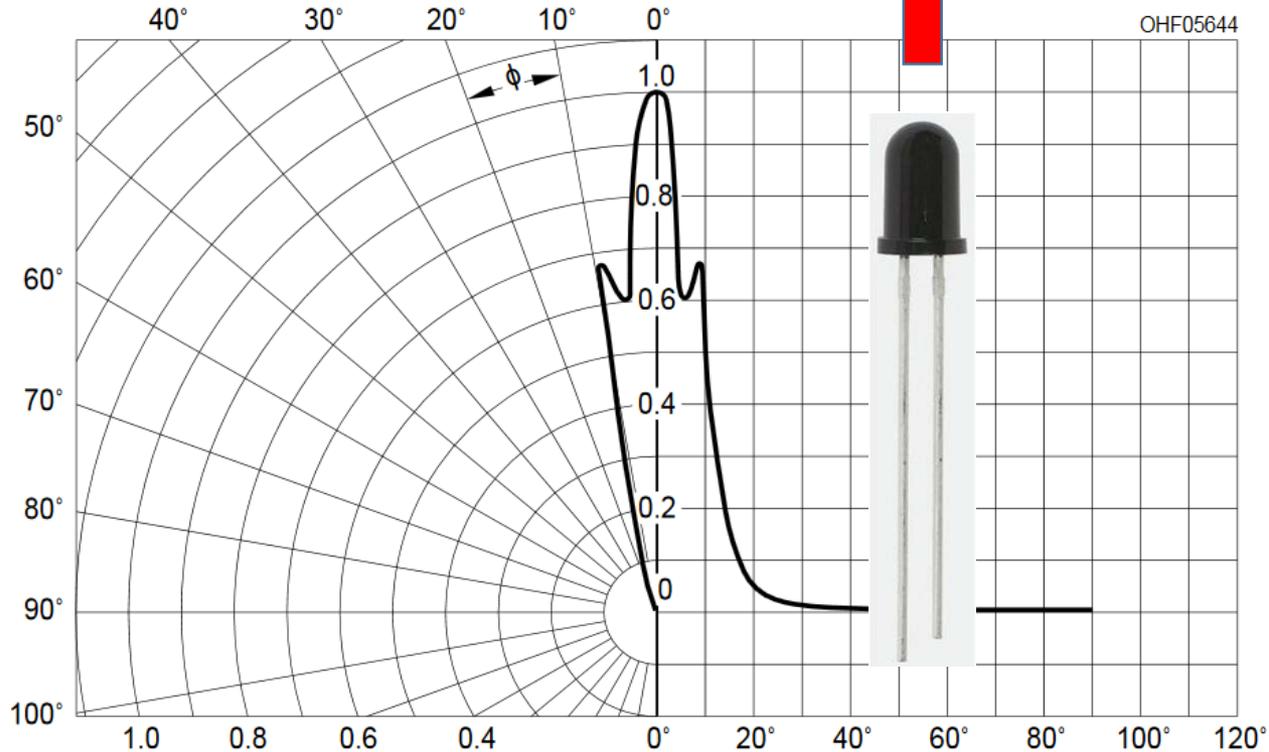
Quelle: http://www.osram-os.com/Graphics/XPic1/00149818_0.pdf/LS%20G6SP%20-%20Advanced%20Power%20TOPLED.pdf

Infrarot LED SFH 4554 von Osram OS

Maximale Strahlstärke
 $I_e = 550 \text{ mW sr}^{-1}$
in diese Richtung

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

Infrarot LED SFH 4554 von Osram OS

Strahlstärke und Strahlungsfluss etwa proportional zum Strom

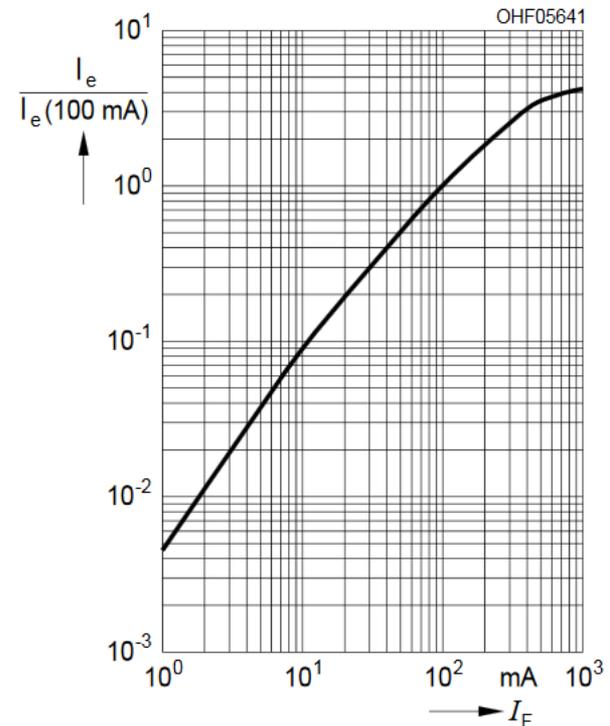
$$I_e = 550 \text{ mW sr}^{-1} \frac{1.5 \text{ mA}}{100 \text{ mA}} = 8.2 \text{ mW sr}^{-1},$$

$$\Phi_e = 75 \text{ mW} \frac{1.5 \text{ mA}}{100 \text{ mA}} = 1.1 \text{ mW}$$

bei $I = 1.5 \text{ mA}$

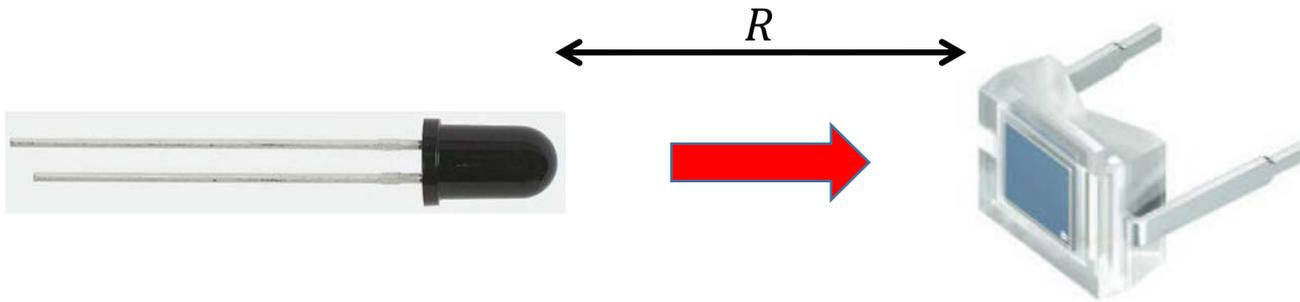
Radiant Intensity ^{2) page 8}

$I_e / I_e(100 \text{ mA}) = f(I_F)$, 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



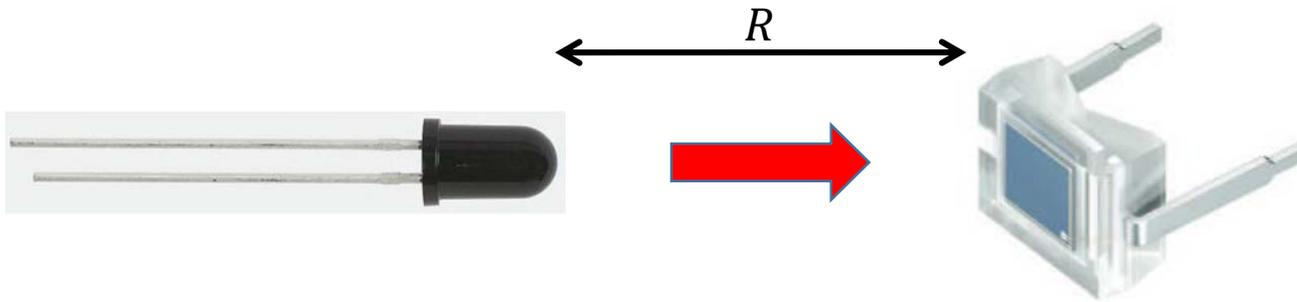
$$I_e = 8.2 \text{ mW sr}^{-1}$$

Aktive Fläche: $A_{PD} = 7.02 \text{ mm}^2$

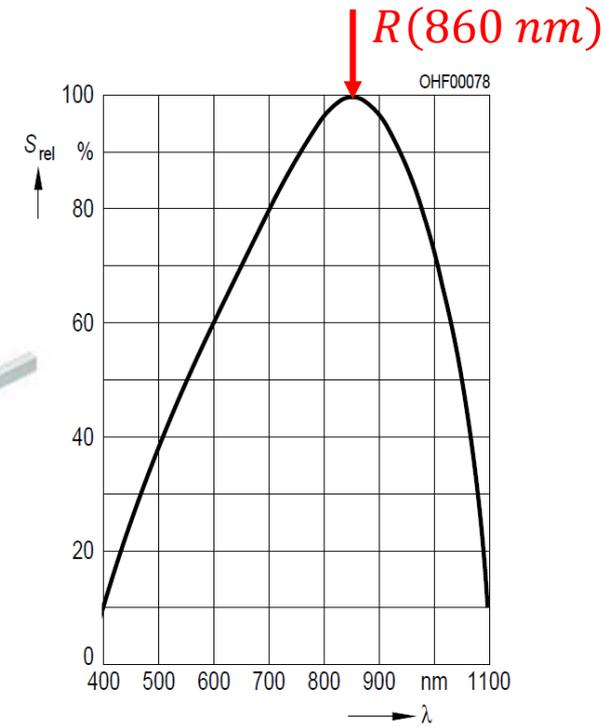
Einfallende Leistung auf der Fläche der Photodiode im Abstand $R = 10 \text{ mm}$:

$$\Phi_e = 8.2 \text{ mW sr}^{-1} \frac{A_{PD}}{R^2} \text{ sr} = 8.2 \text{ mW sr}^{-1} \frac{7.02 \text{ mm}^2}{100 \text{ mm}^2} = 0.0702 \text{ mW}$$

Photostrom



$$I_e = 8.2 \text{ mW sr}^{-1}$$



Einfallende Leistung auf der Fläche der Photodiode im Abstand $R = 1 \text{ cm}$:

$$\Phi_e = 8.2 \text{ mW sr}^{-1} \frac{A_{PD}}{4 \pi R^2} = 8.2 \text{ mW sr}^{-1} \frac{7.02 \text{ mm}^2}{100 \text{ mm}^2} = 0.070 \text{ mW}$$

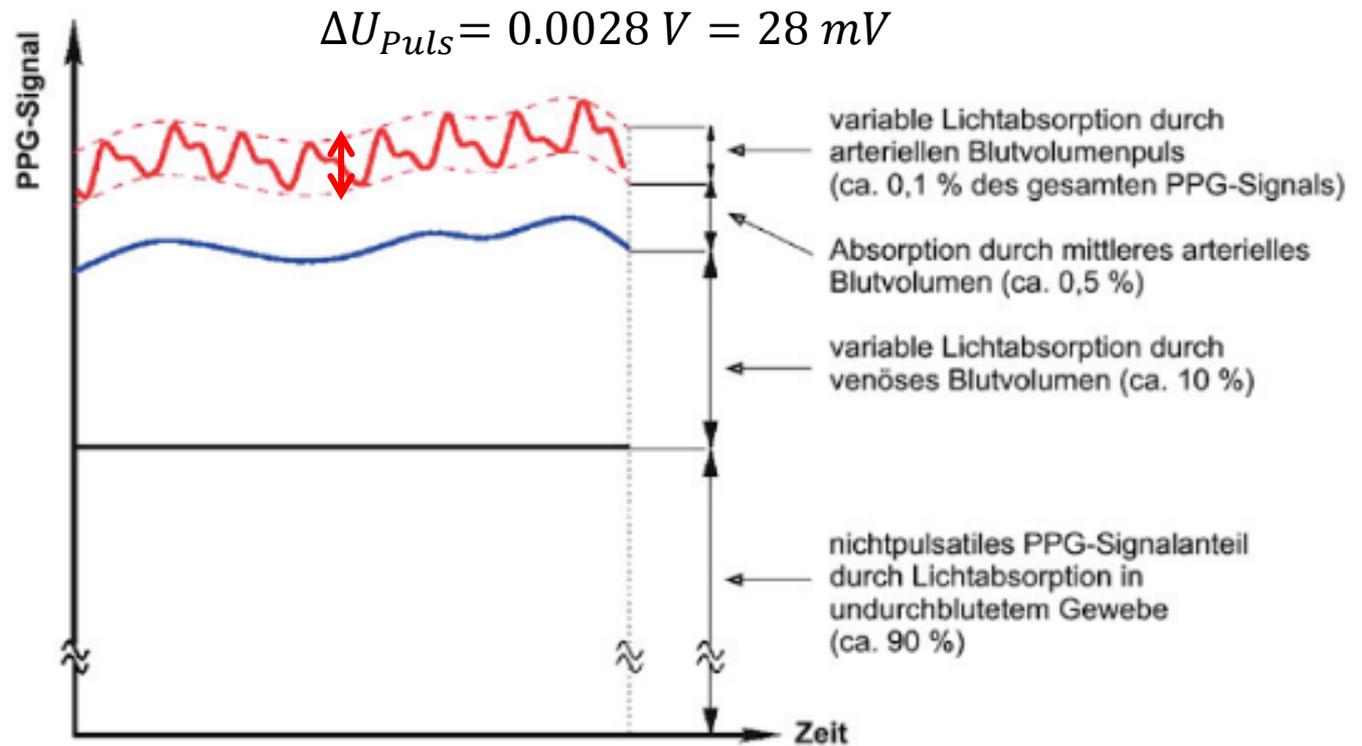
Photostrom = Responsivität x einfallende Lichtleistung

$$I_{PD} = 0.62 \frac{\text{A}}{\text{W}} \times 70 \mu\text{W} = 43 \mu\text{A}$$

Detektion der Puls-Frequenz: Messung eines kleinen oszillierenden Signals auf einem großen Hintergrund

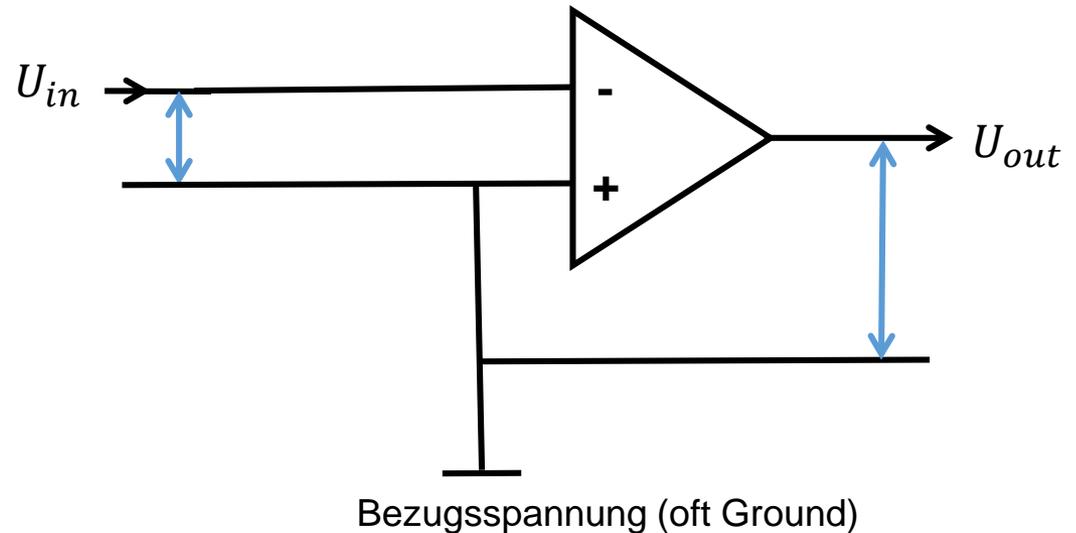
z.B.

$$U_{out} = 2.8 V$$



Operationsverstärker (OpAmp)

„Idealer“ Verstärker: die Differenz der beiden Eingänge „+“ und „-“ wird sehr hoch ($\approx 10^6$ -fach) verstärkt.

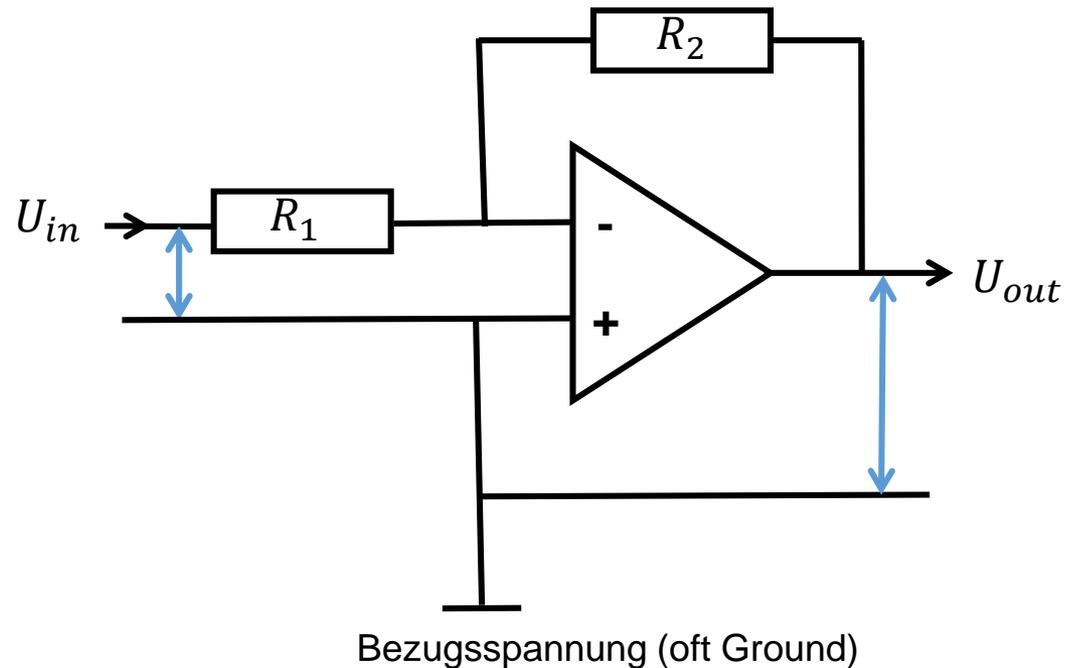


Operationsverstärker (OpAmp)

Rückkopplung ist notwendig, um eine sinnvolle und stabile Verstärkung einzustellen.

Grundschtung invertierender Verstärker

Verstärkung $\frac{U_{out}}{U_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$



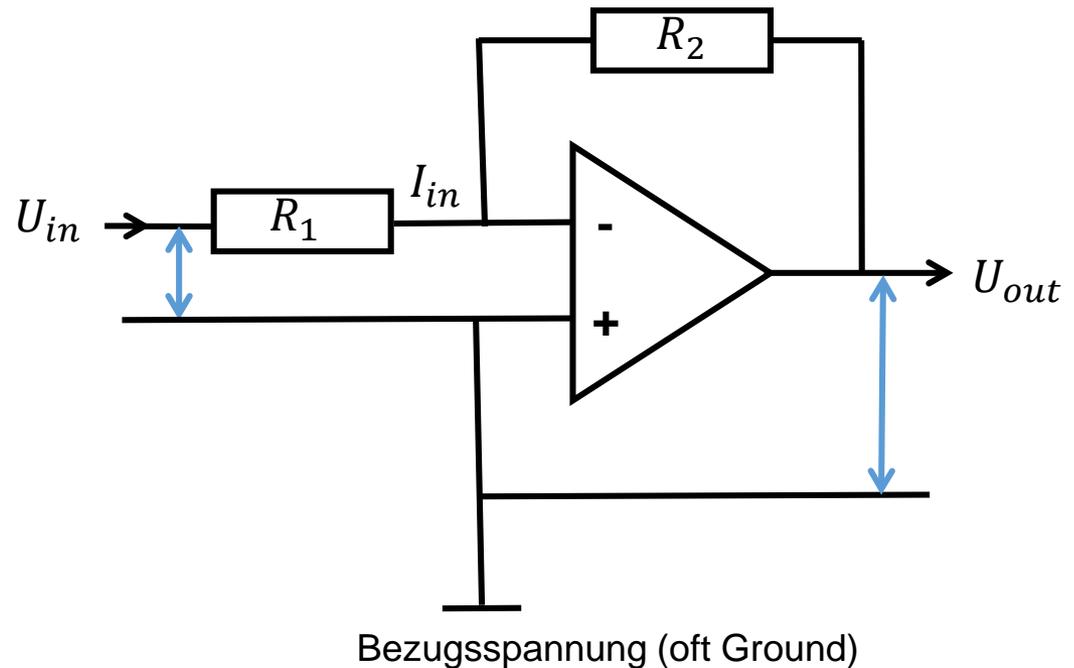
Operationsverstärker (OpAmp)

Transimpedanzverstärker: Strom \rightarrow Spannung
 Abgeleitet aus invertierendem Verstärker.

Verstärkung
$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Mit
$$I_{in} = \frac{U_{in}}{R_{in}}$$

folgt
$$U_{out} = -R_2 I_{in}$$



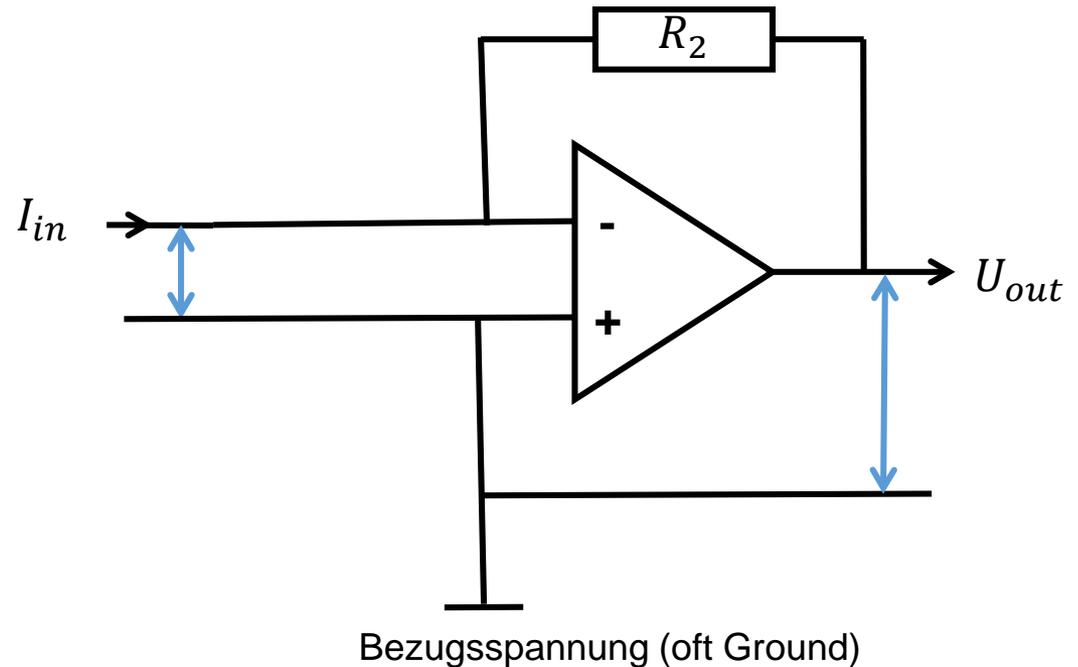
Operationsverstärker (OpAmp)

Transimpedanzverstärker: Strom \rightarrow Spannung
 Abgeleitet aus integrierendem Verstärker.

Verstärkung $\frac{U_{out}}{U_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$

Mit $I_{in} = \frac{U_{in}}{R_{in}}$

folgt $U_{out} = -R_2 I_{in}$



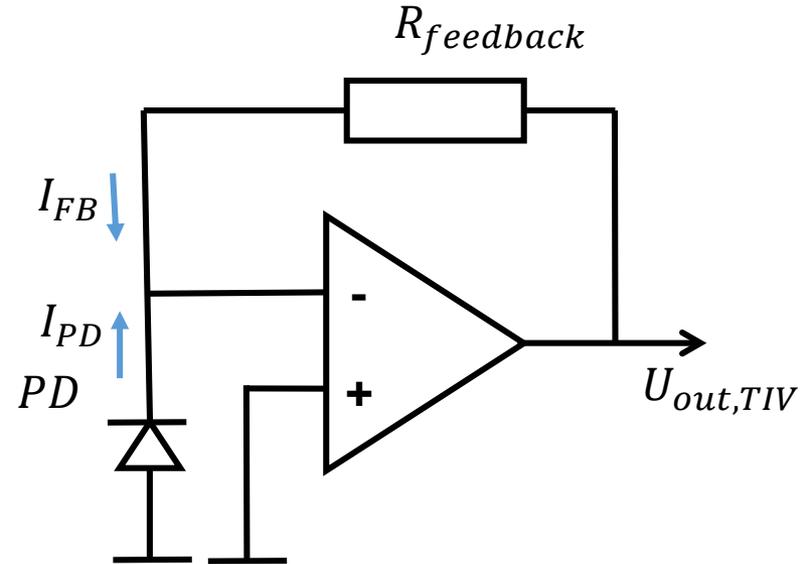
Transimpedanzverstärker

Rückkopplungs-Widerstand $R_{Feedback}$ in Ω

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

Licht-Intensität $I(\lambda)$ in W

Wellenlänge λ in nm



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

Photostrom $I_{PD} = 28 \mu A$

$$U_{out} = 100 \text{ k}\Omega \times 43 \mu A = 4.3 \text{ V}$$

$$U_{out} = 1 \text{ M}\Omega \times 43 \mu A = 43 \text{ V} \quad \text{⚡ } V_{DD} = 5 \text{ V}$$

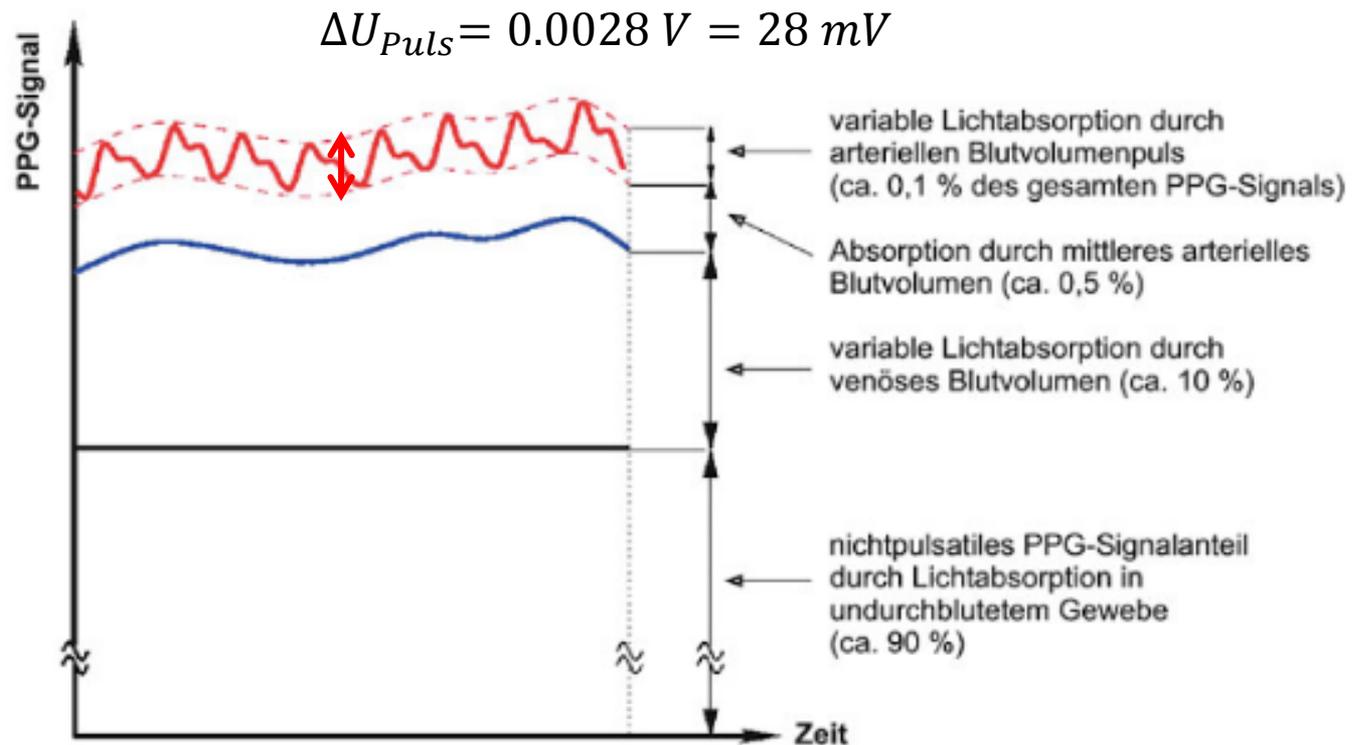
Zu große Verstärkung \rightarrow Verstärker in „Sättigung“ (d.h. $U_{out} \approx V_{DD}$)

Quelle: Thorlabs

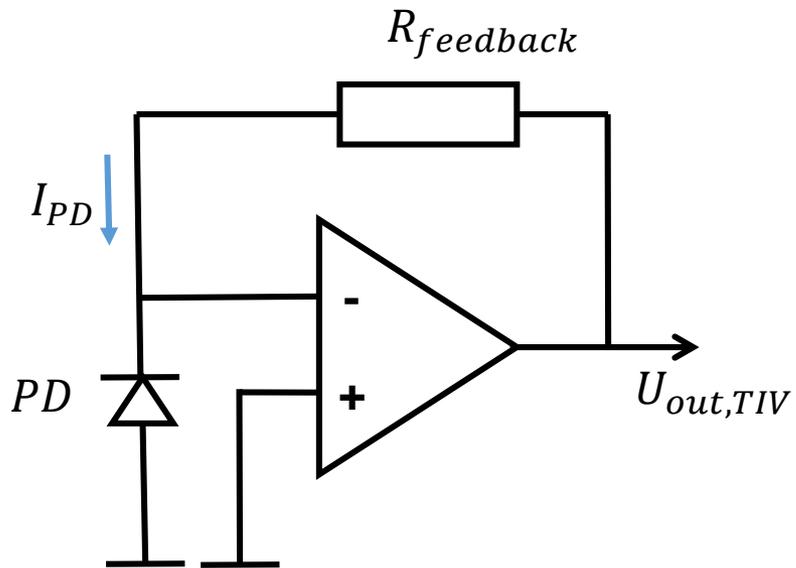
Separierung von statischem und zeitabhängigem Signal

z.B.

$$U_{out} = 2.8 V$$



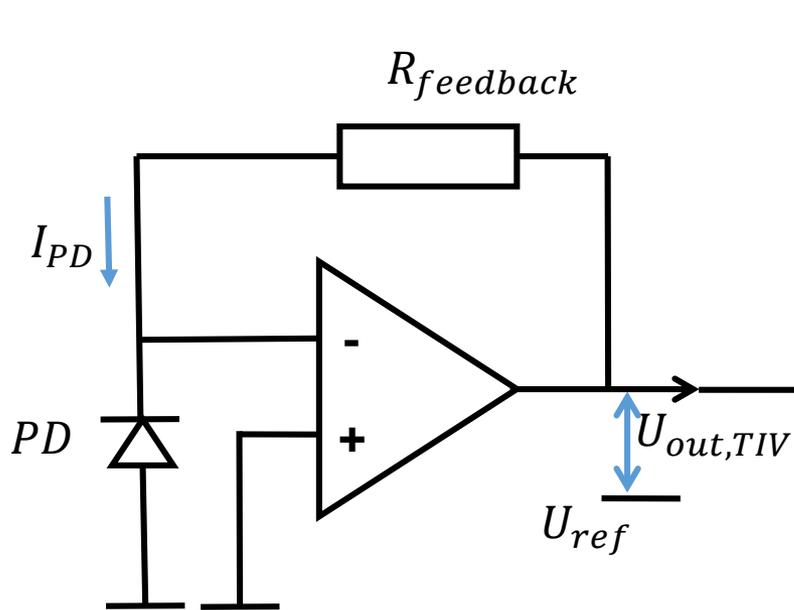
Transimpedanz-Verstärker



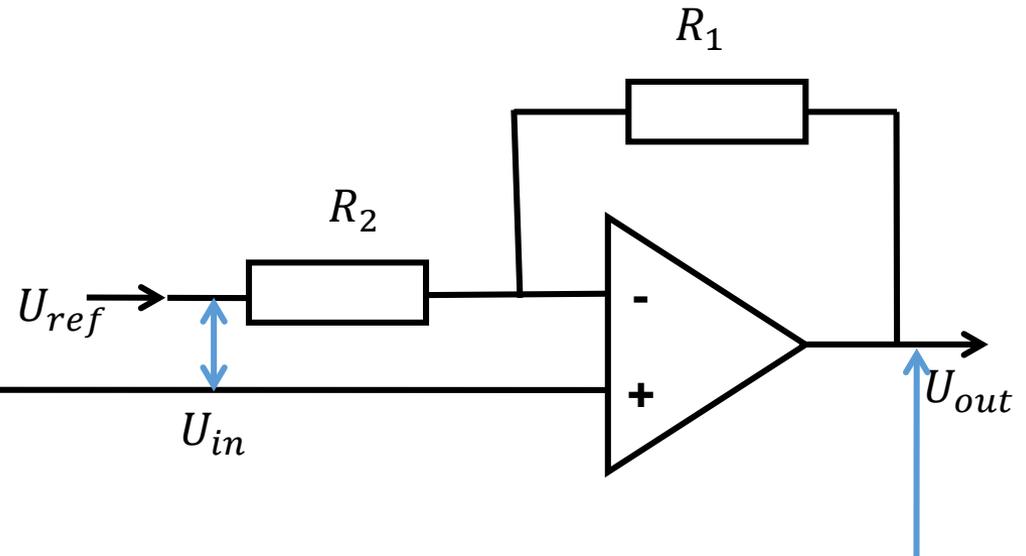
Transimpedanz-Verstärker

Verstärker

Transimpedanzverstärker



(Nicht invertierender) Verstärker



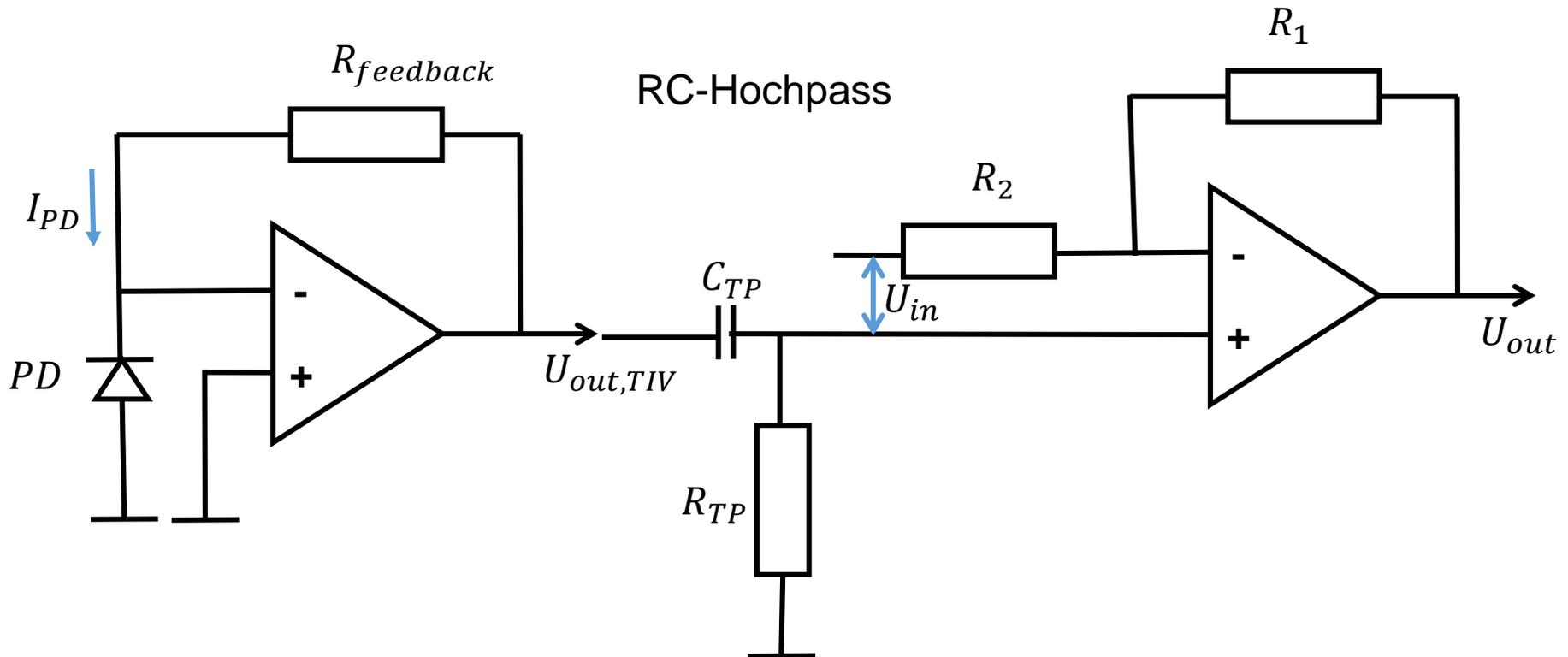
Verstärkung

$$U_{out} = U_{in} \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

Transimpedanz-Verstärker + Hochpass-Filter + Verstärker

Transimpedanzverstärker

(Nicht invertierender) Verstärker



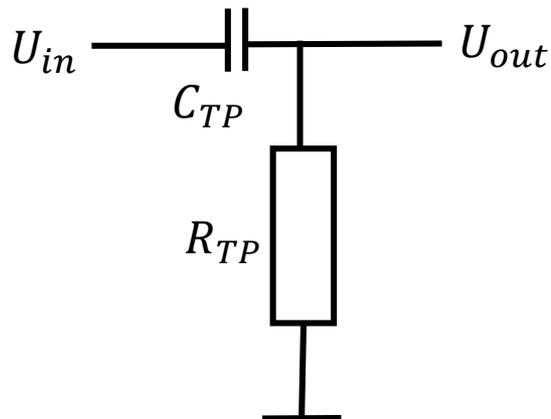
Hochpass

3 dB Grenzfrequenz ($U_{out} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{in}$)

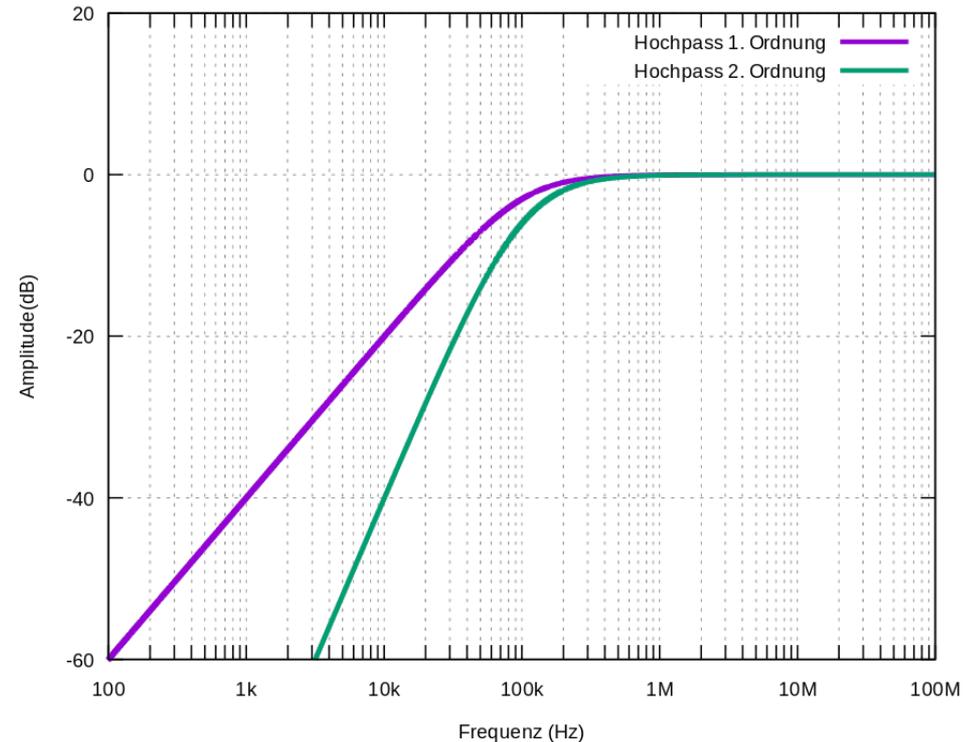
$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

z.B. $R = 22 \text{ k}\Omega$ und $C = 10 \mu\text{F}$

$$f_c = 0.72 \text{ Hz}$$

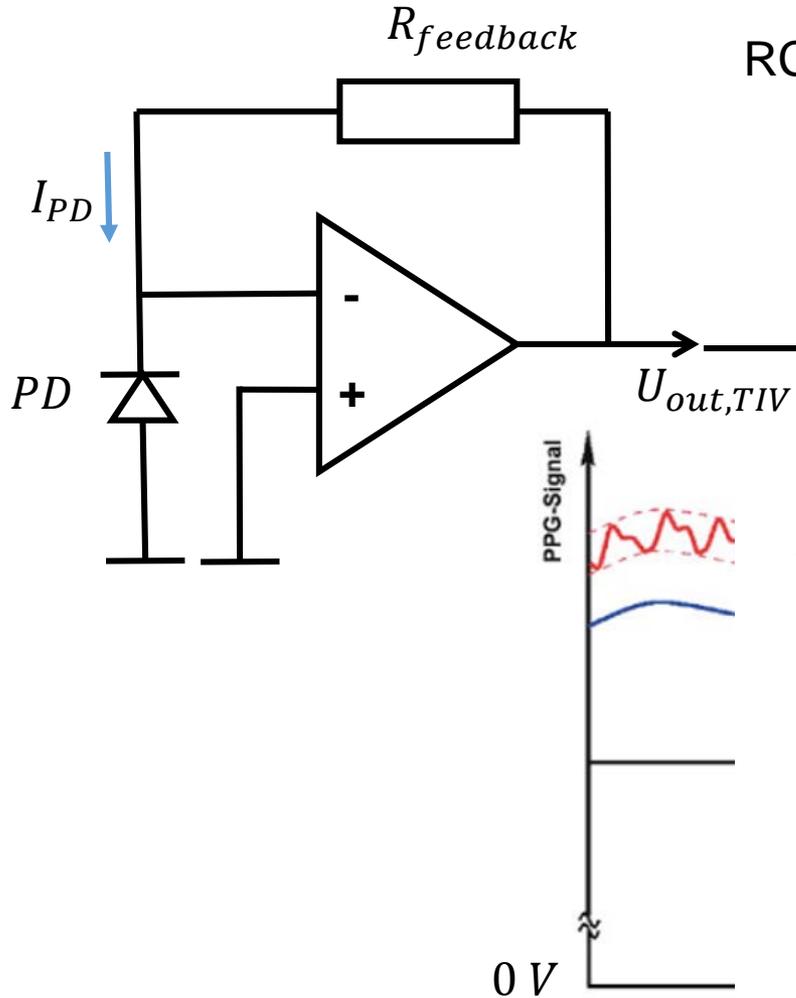


Frequenzabhängige Dämpfung der Amplitude

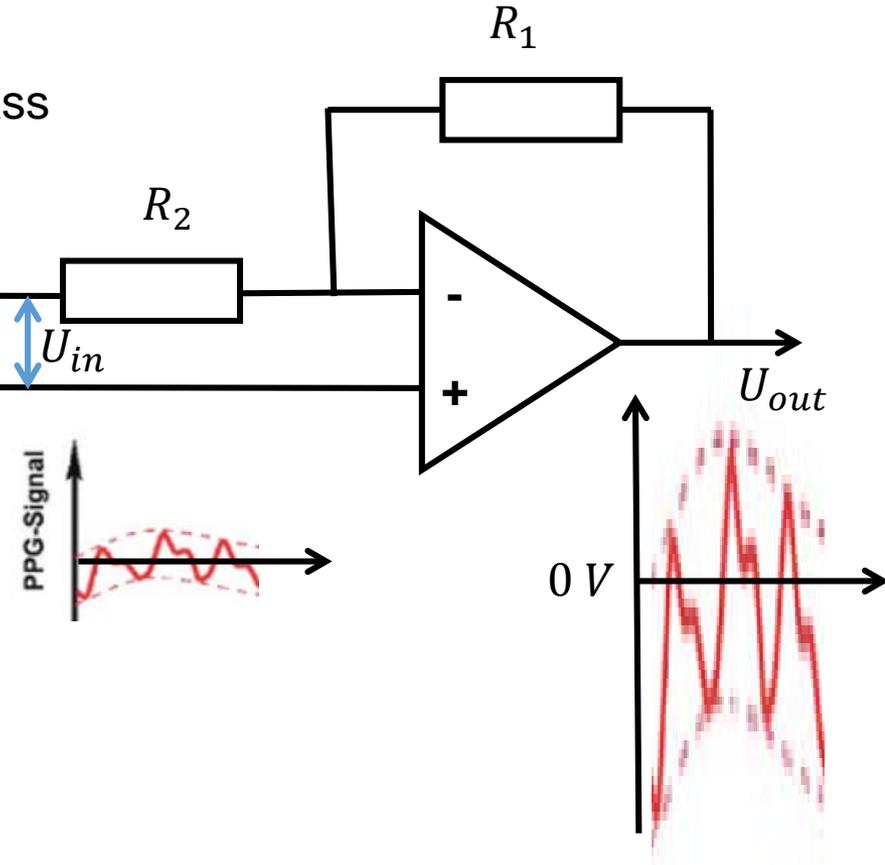


Quelle: Wikipedia

Transimpedanzverstärker



(Nicht invertierender) Verstärker



Rauschen wird auch verstärkt

Rauschen einer Photodiode:

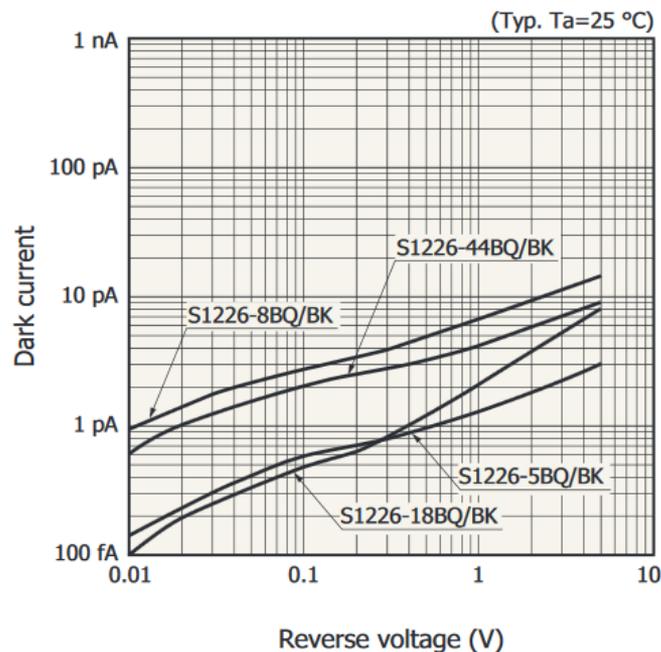
- Schrotrauschen (shot noise) des pn-Übergangs („einzelne Elektronen“)
- Schrotrauschen (shot noise) des Photostroms („einzelne Photonen“)
- Thermisches Rauschen (Johnson noise) der Photodiode (shunt resistance)

Rauschen wird auch verstärkt

Dunkelstrom hängt von Fläche, Güte und Temperatur der Photodiode ab

Sehr rauscharme Photodiode S1226

$$I_{dark} \approx 1 \text{ pA}$$

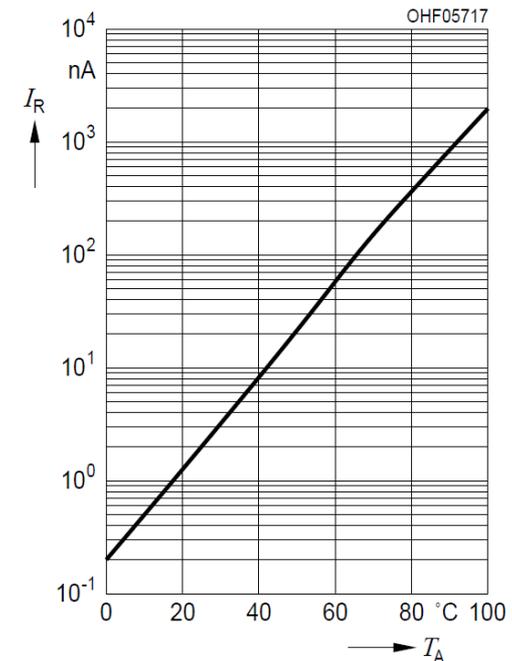


Standard-Photodiode BPW 34

$$I_{dark} \approx 1 \text{ nA} \dots 1 \text{ } \mu\text{A}$$

Dark Current ^{1) page 7}

$$I_R = f(T_A), V_R = 10 \text{ V}, E = 0$$



Bandbreiten-Abhängigkeit des Rausch-Signals

Die Amplitude des Rausch-Signals ist proportional zur Quadratwurzel der Bandbreite, über die das Rauschen aufgenommen wird.

Noise Equivalent Power (NEP): Die einfallende optische Leistung, die den gleichen Strom generiert, wie der vom Rauschen generierte Strom.

Einheit von NEP ist $\frac{W}{\sqrt{Hz}}$, also Leistung pro Wurzel Herz

Bandbreiten-Abhängigkeit des Rausch-Signals

z.B. BPW 34: $NEP = 41 \times 10^{15} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$

Leistung in 1 MHz Bandbreite (z.B. Oszilloskop):

$$P_{NEP} = 41 \times 10^{-15} \frac{\text{W}}{\sqrt{\text{Hz}}} \times \sqrt{1 \text{ MHz}} = 41 \times 10^{-12} \text{ W} = 41 \text{ pW}$$

Leistung in 1 Hz Bandbreite:

$$P_{NEP} = 41 \times 10^{-15} \frac{\text{W}}{\sqrt{\text{Hz}}} \times \sqrt{1 \text{ Hz}} = 41 \times 10^{-15} \text{ W} = 41 \text{ fW}$$

Bandbreiten-Abhängigkeit des Rausch-Signals

z.B. BPW 34: $NEP = 41 \times 10^{-15} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$

Leistung in 1 MHz Bandbreite (z.B. Oszilloskop):

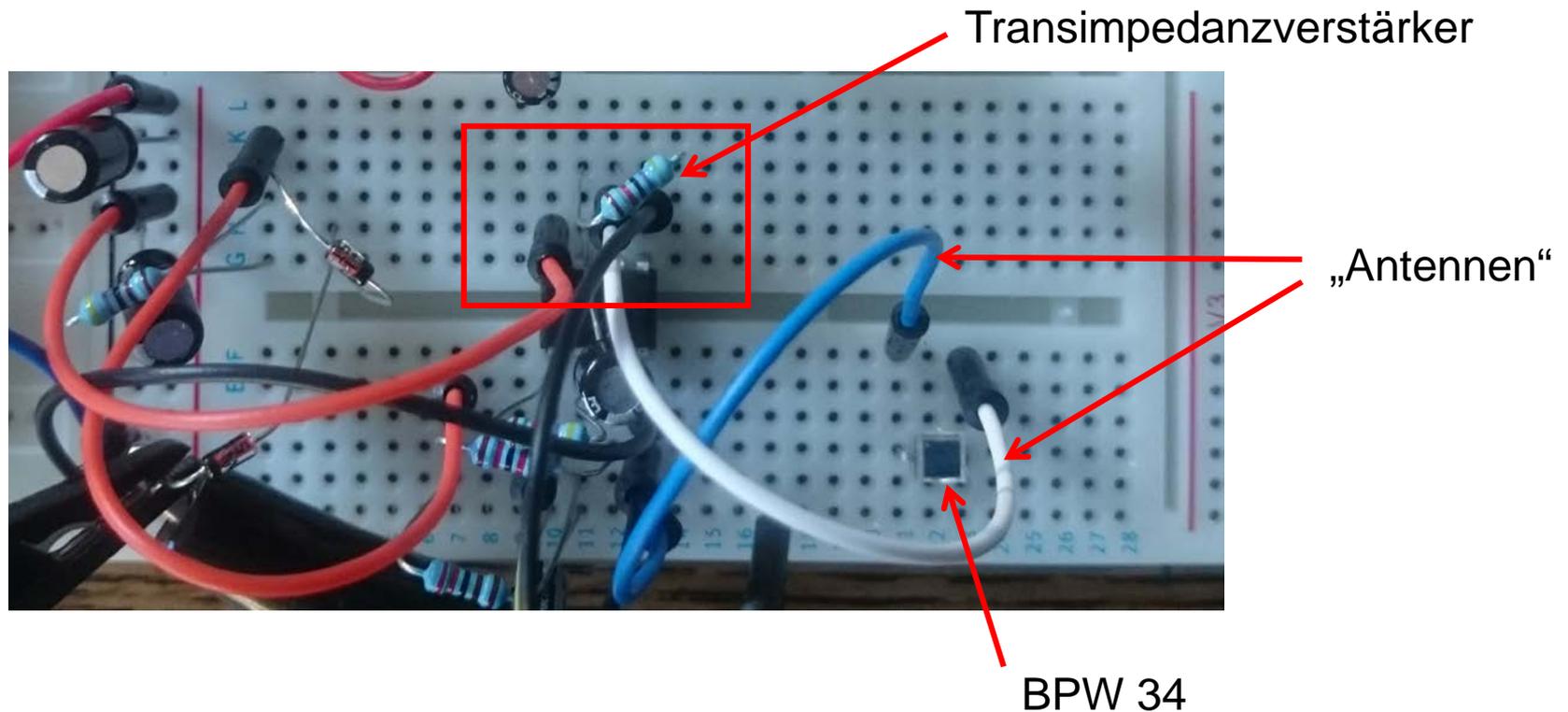
$$P_{NEP} = 41 \times 10^{-15} \frac{\text{W}}{\sqrt{\text{Hz}}} \times \sqrt{1 \text{ MHz}} = 41 \times 10^{-12} \text{ W} = 41 \text{ pW}$$

Beispiel IR LED:

Einfallende Leistung auf der Fläche der Photodiode im Abstand $R = 1 \text{ cm}$:

$$\Phi_e = 70 \mu\text{W} \gg 41 \text{ pW}$$

Rauschen der Elektronik



Rauschen der Elektronik

Es ist nicht trivial, das niedrige Rauschen von Photodioden in einer Schaltung umzusetzen.

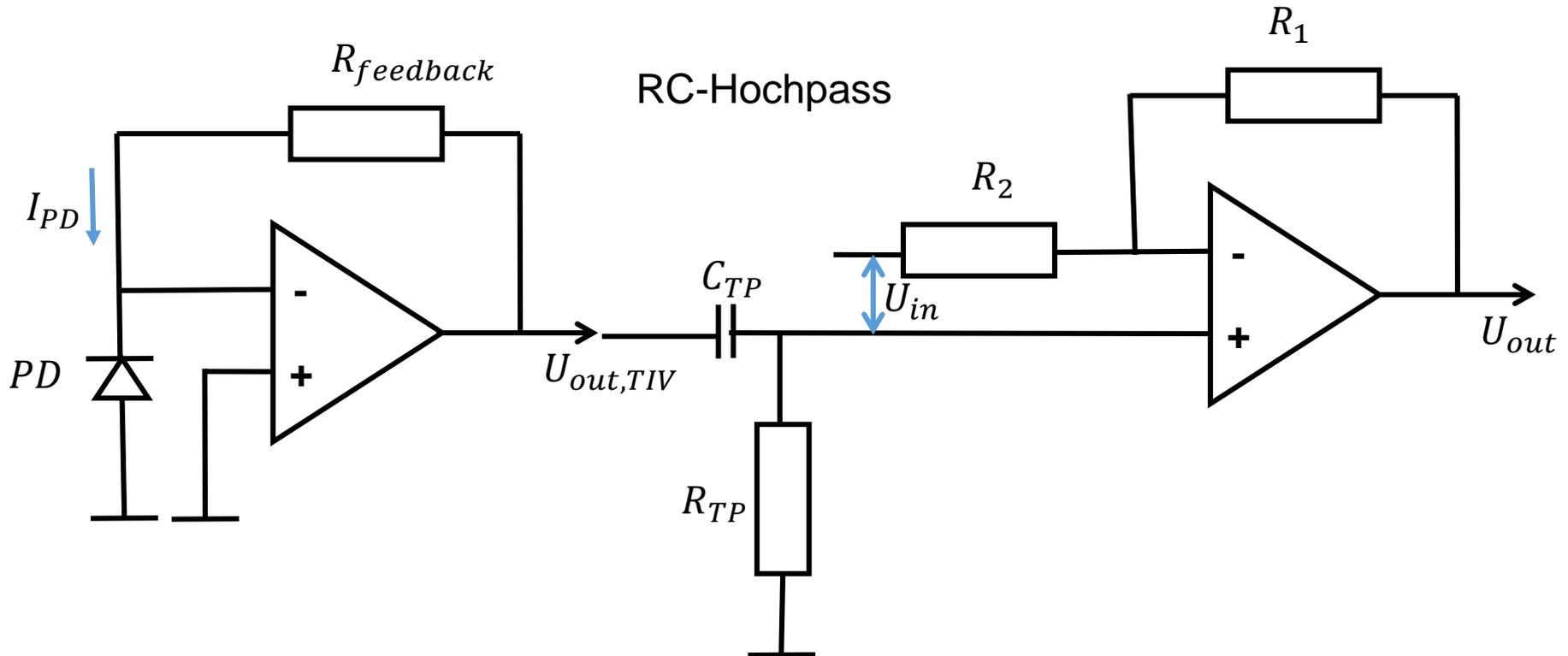
Verstärkt man ein verrauschtes Signal, wird das Rauschen mitverstärkt.

Eine Bandbreitenunterdrückung (Hoch-, Tief- und Band-Pass) reduzieren die Rauschamplitude.

Transimpedanz-Verstärker + Hochpass-Filter + Verstärker

Transimpedanzverstärker

(Nicht invertierender) Verstärker

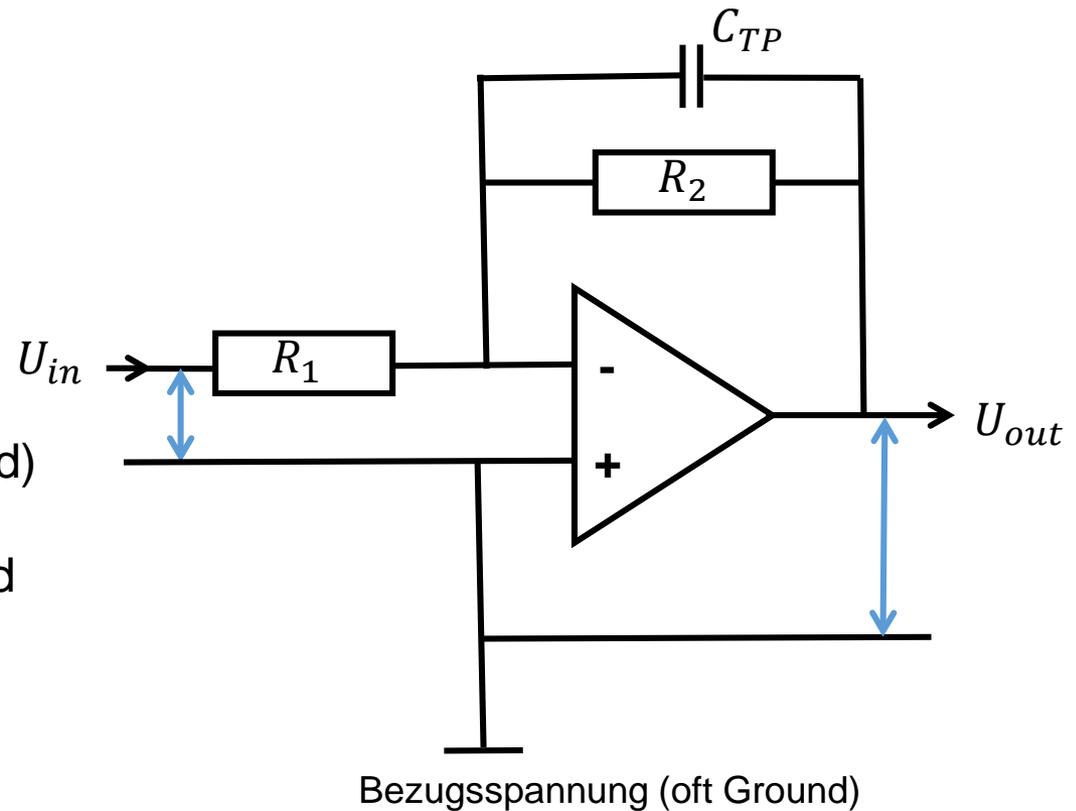


OpAmp als invertierender Verstärker & Tiefpass

Verstärkung $\frac{U_{out}}{U_{in}} = -\frac{Z_{RC}}{R_1}$

Impedanz (komplexer Widerstand) im Rückkopplungszweig ist Parallelschaltung von Widerstand und Kapazität:

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{R_2} + i\omega C$$

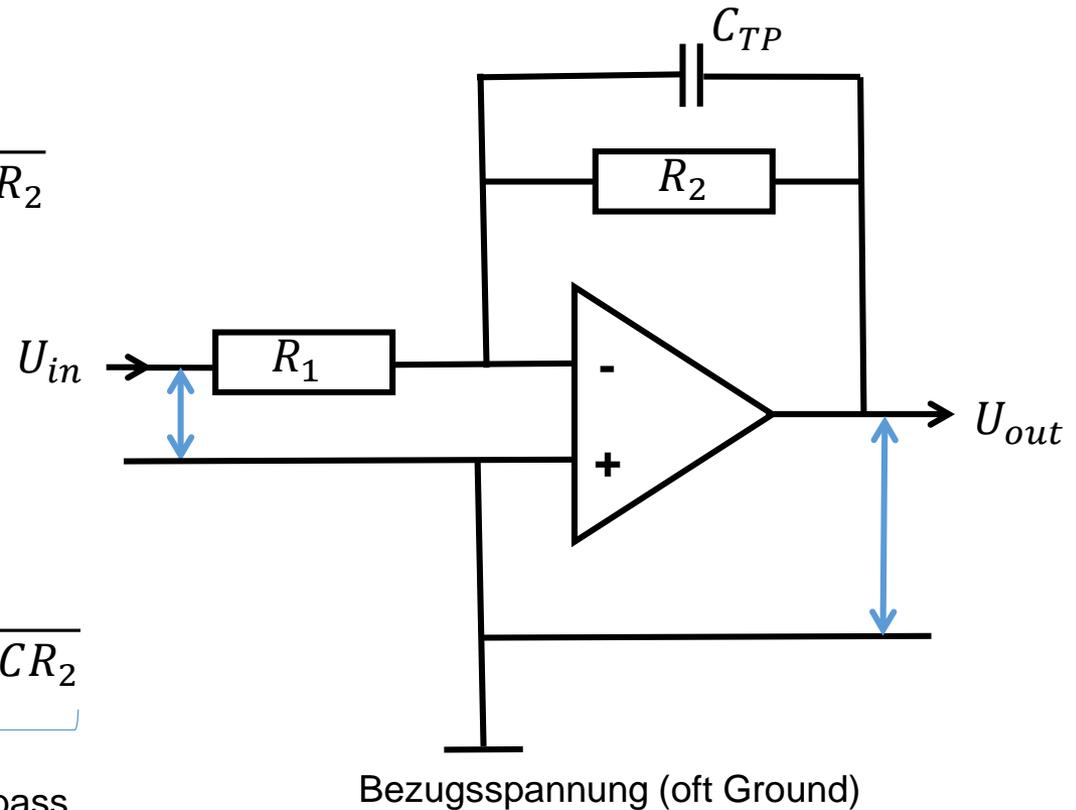


OpAmp als invertierender Verstärker & Tiefpass

$$Z_{RC} = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + i\omega C} = \frac{R_2}{1 + i\omega CR_2}$$

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = -\frac{Z_{RC}}{R_1} = -\frac{R_2}{R_1} \underbrace{\frac{1}{1 + i\omega CR_2}}$$

Verstärkung x Tiefpass



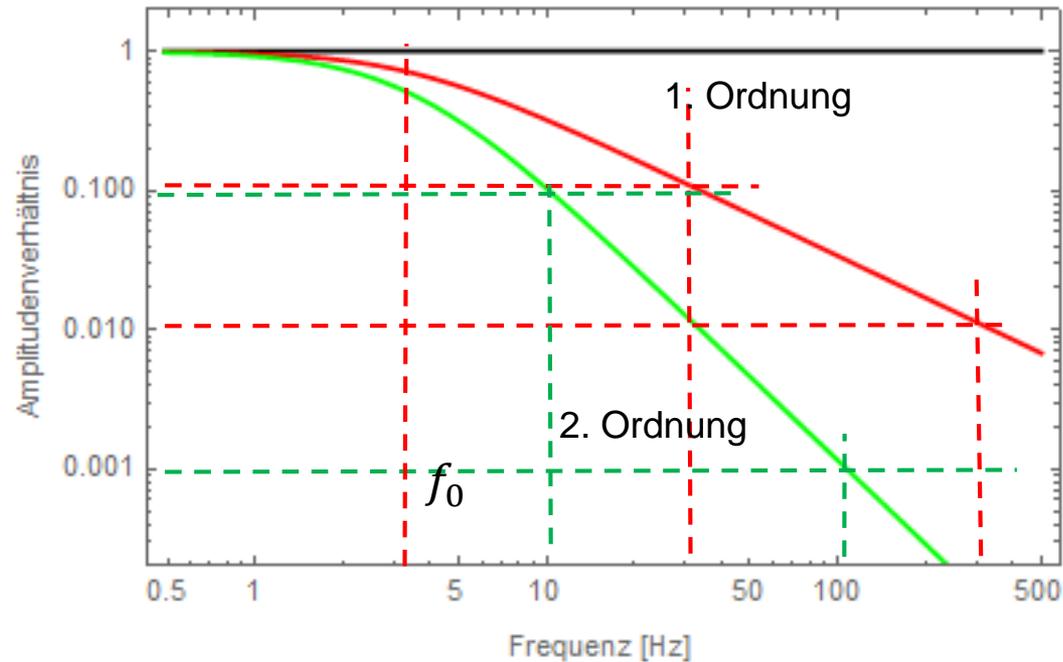
RC-Tiefpass 1. und 2. Ordnung

Kapazität $C = 1 \mu\text{F}$

Widerstand $R = 47 \text{ k}\Omega$

Grenzfrequenz: $f_0 = 3.4 \text{ Hz}$

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R C}$$

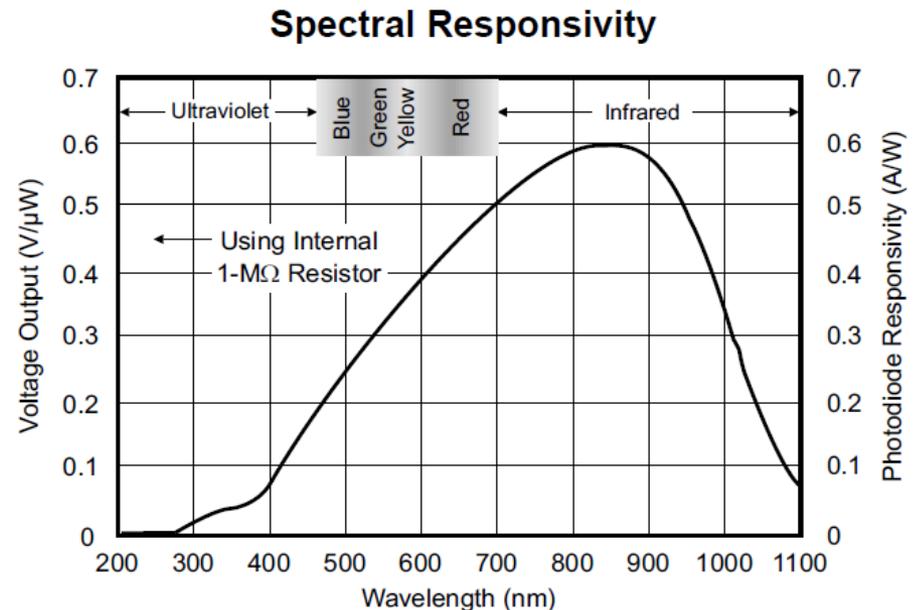
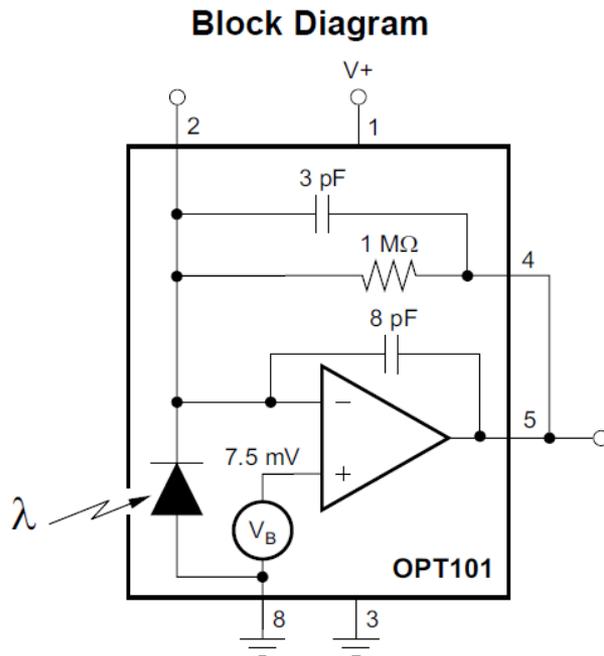


OPT101: Integrierte Photodiode mit Transimpedanzverstärker

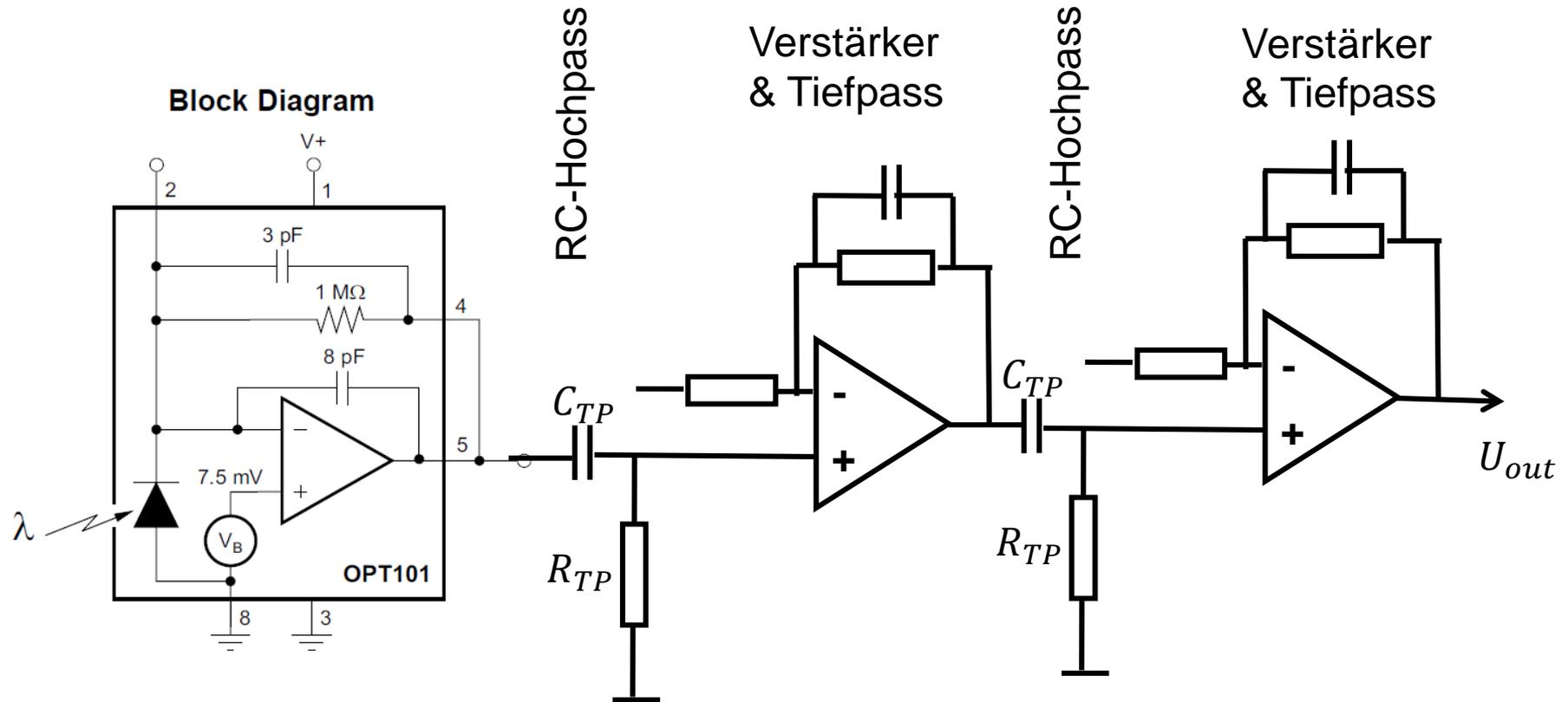
Verstärker optimal abgestimmt auf Photodiode

Optimale Ankopplung / geringe „Kabellänge“ (Antenne)

Integriertes Rückkoppel-Netzwerk (mit externen Bauelementen variierbar)



OPT101 + 2x Hochpass + 2x Verstärker/Tiefpass



Projekt / Blockveranstaltung

Fertigstellung von

- Projekt
- Dokumentation
- Präsentation

Vorstellung des Projekts

Begehung aller Projekte

Gemeinsame Diskussion

Zwei Tage, am besten mit 1 bis 2 Wochen dazwischen

Mögliche Termine: Do/Fr/Sa/So 10. bis 13. oder 17. bis 20. oder 24. bis 27. Januar 2019