

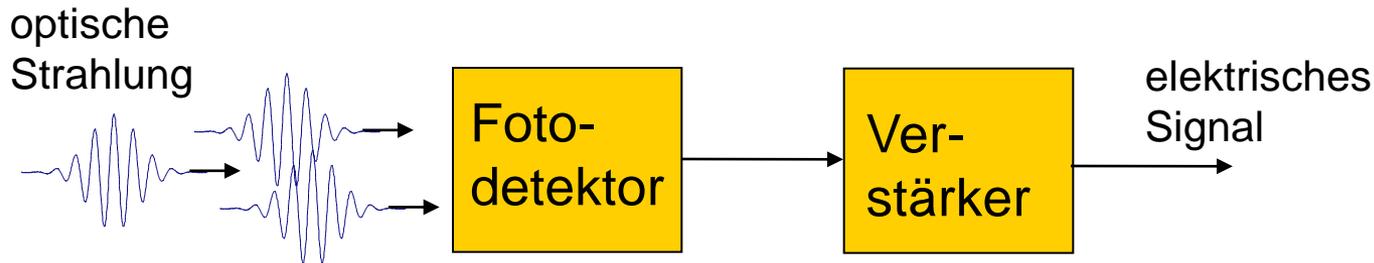
8 Fotodetektoren

Einführung und Überblick

- Grundlagen Fotodetektoren
- Fotowiderstand
- pn-Übergang zur Erzeugung elektrischer Energie bei Strahlungseinfall
- pn-Fotodiode
- pin-Fotodiode
- Avalanche- (Lavinen-) Fotodiode
- Andere Fotodetektoren
 - Quadranten-Fotodioden
 - CCD als integriert optischer Empfänger
 - Fototransistor

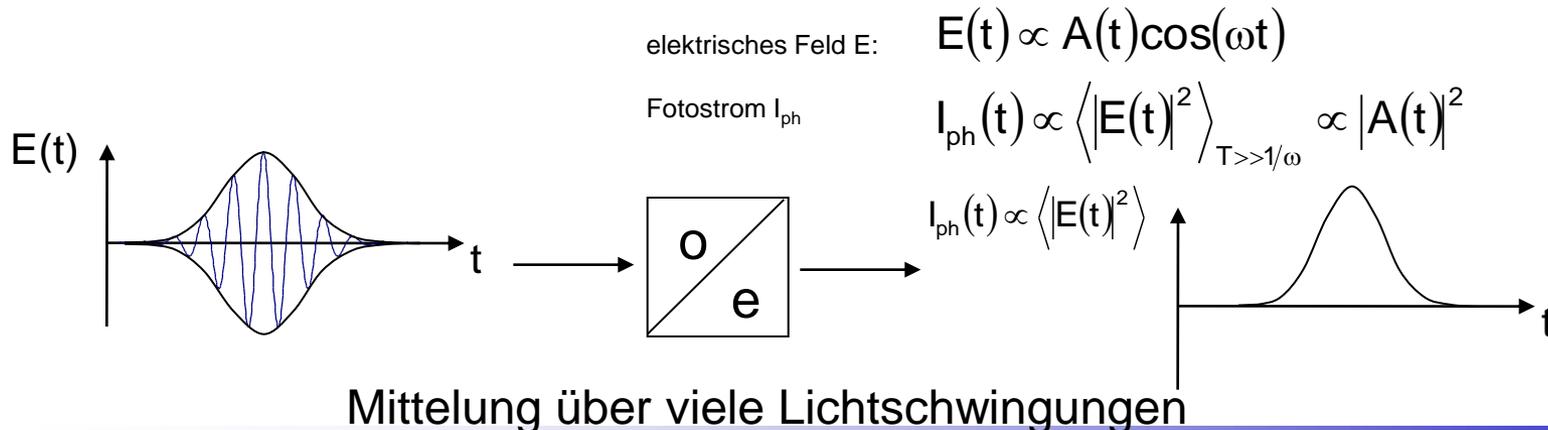
Überblick Fotodetektoren

optisch-elektrische (Signal-) Wandlung

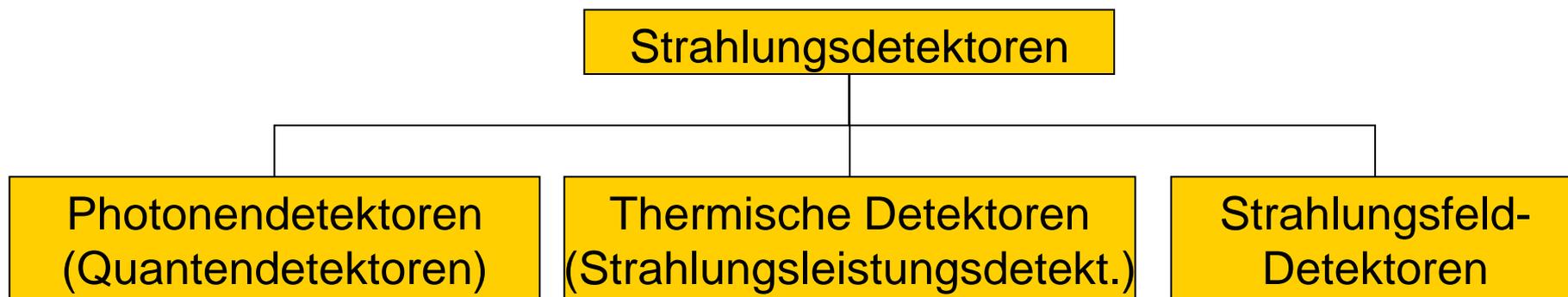


Signalinformation (im Wellenbild!): Intensität, Phase, Frequenz oder/und Polarisation

einfache Empfänger messen Bestrahlungsstärke:



Strahlungsdetektoren



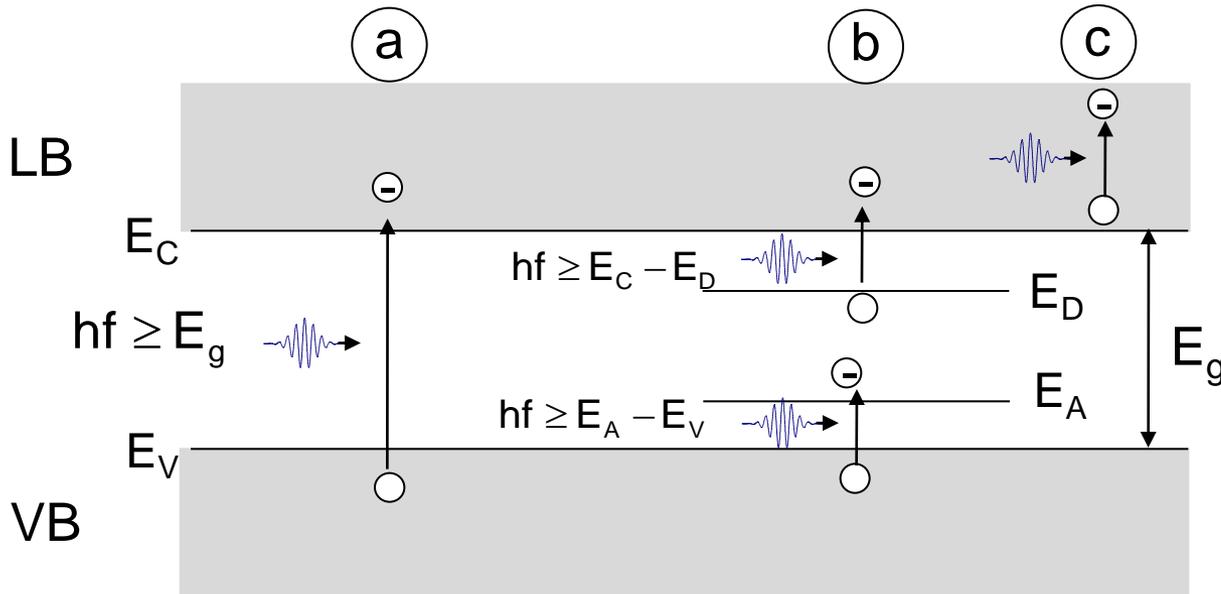
-äußerer Lichtelektrischer Effekt
-innerer Lichtelektrischer Effekt

- thermisch
(Bolometer-Detektor)

- z.B. nichtlineare
optische Effekte

weitere Detektoren zur Aufnahme von räumlich verteilter optischer Information
(segmentierte Empfänger, ein-, zweidimensional, CCD-Zeilen, CCD-Arrays
CMOS – „active pixel sensors“)

Absorption im Halbleiter



- a) innerer Fotoeffekt (intrinsisch)
- b) innerer Fotoeffekt (extrinsisch, Störstellen)
- c) intra-Band-Absorption

(a) Fundamental-Absorption:

$$\lambda \leq \lambda_g = \frac{hc}{E_g} = \frac{1240 \text{ eVnm}}{E_g [\text{eV}]}$$

Absorptionsgesetz

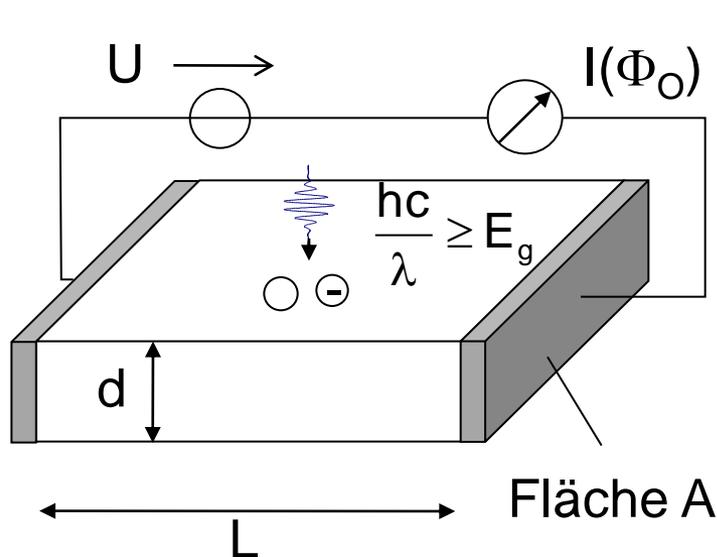
$$\Phi_e(x) = \Phi_e(0)e^{-\alpha x}$$

Fotowiderstand

einfachster Fotoempfänger (kein pn-Übergang)

Widerstandsänderung (Leitfähigkeitserhöhung) durch Erzeugung von freien Ladungsträger

Erzeugung freier Ladungsträger durch inneren Fotoeffekt



Stromempfindlichkeit:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

$$\frac{1}{\rho} = \sigma = e(n\mu_n + p\mu_p)$$

$$\Delta I = U \Delta \left(\frac{1}{R} \right) = U \frac{eN}{L^2} \mu \tau$$

$$"G" = \frac{\Delta I}{eN} = \frac{U}{L^2} \mu \tau = \frac{\tau}{t_r}$$

$$s_i(\lambda) = \frac{\Delta I}{\Phi_e} = \frac{e}{hc} \lambda \eta_q "G"$$

„Gain“, Gewinn
(... 10^6),
 t_r : Driftzeit der
LTs durch den
Halbleiter

Fotowiderstand

- Vorteile:
- hohe Empfindlichkeit bei niedriger Beleuchtungsstärke
 - einfache Schaltungstechnik (Strommessung oder Spannungsmessung über Strom-Fühlwiderstand)
 - einfacher Aufbau
 - gute Eignung für Infrarot-Anwendungen

- Nachteile:
- schlechtes zeitliches Ansprechverhalten (Zeitkonstanten ms.. μ s Bereich)
 - großer Temperaturkoeffizient

Fotodiode

.. ist der wichtigste Fotodetektor

Eigenschaften:

- Arbeitswellenlängenbereich (spektrale Empfindlichkeit)
- Fotoempfindlichkeit (Ansprechvermögen)
- Zeitverhalten
- Eigenrauschen

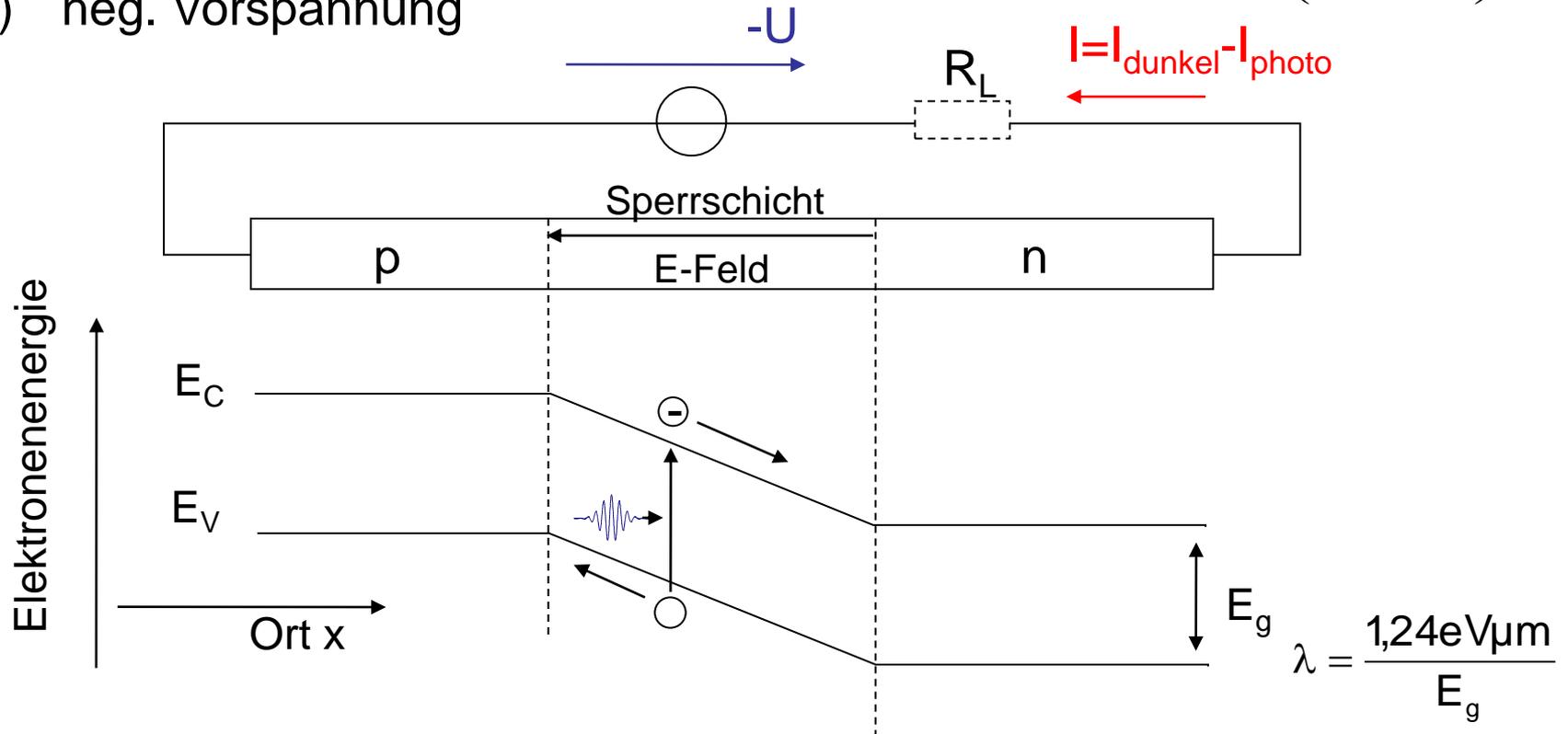
pn-Übergang und innerer Fotoeffekt: Sperrschicht-Fotoeffekt

pn-Übergang

- a) offen (Leerlauf)
- b) Kurzschluss
- c) neg. Vorspannung

$$I(U) = I_{\text{dunkel}}(U) - I_{\text{ph}}$$

$$I(U) = I_s \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right) - I_{\text{ph}}$$



Sperrschicht-Fotoeffekt

Kennlinienformel: $I(U) = I_{\text{dunkel}}(U) - I_{\text{ph}}$

$$I(U) = I_S \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right) - I_{\text{ph}}$$

Kurzschluss ($U=0$): $I(U=0) = -I_{\text{ph}}$

Leerlauf ($I=0$): $U_{\text{ph}}(I=0) = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{I_{\text{ph}}}{I_S} + 1 \right)$

$$(U_{\text{ph}} \leq U_D)^*$$

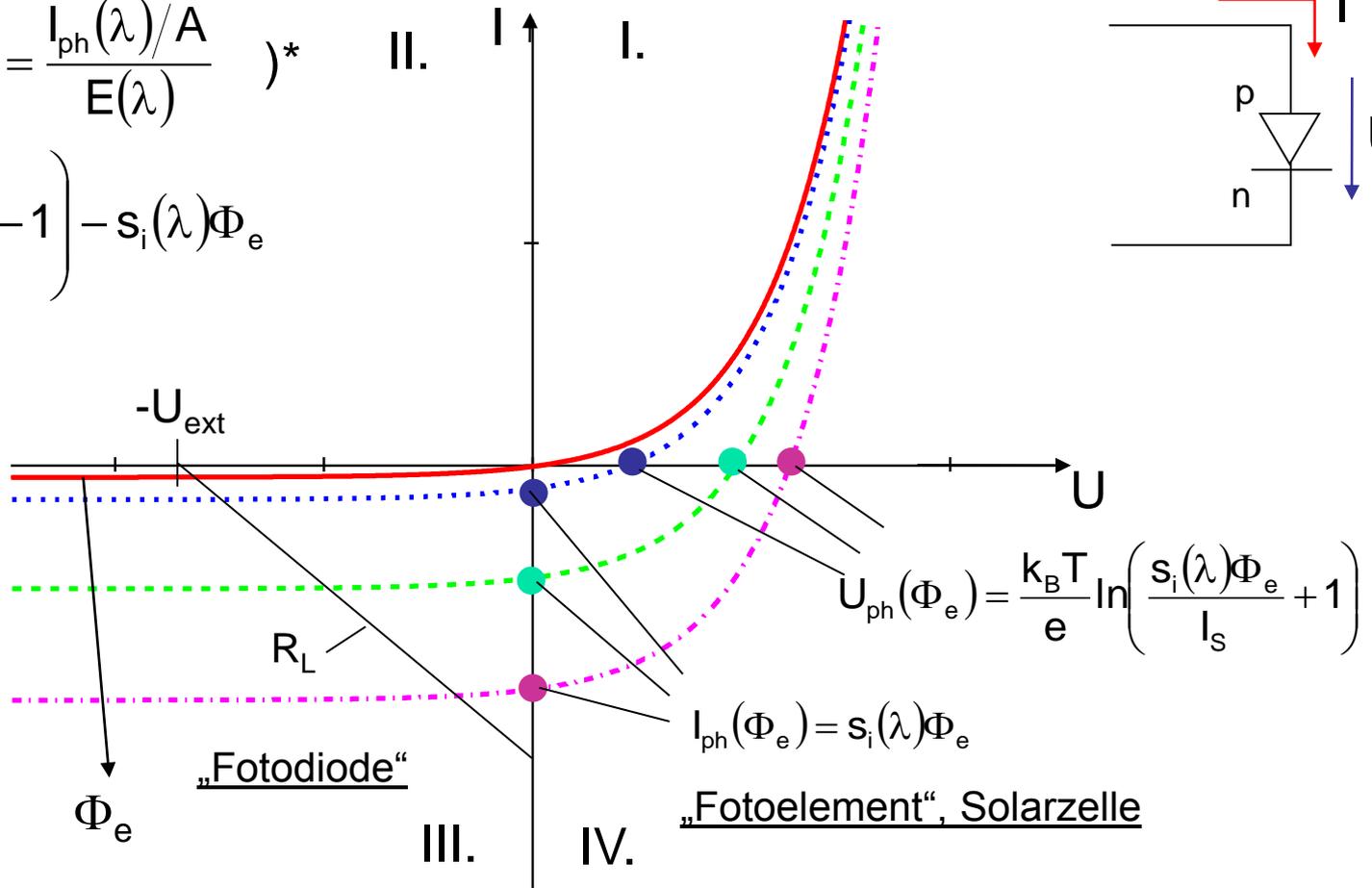
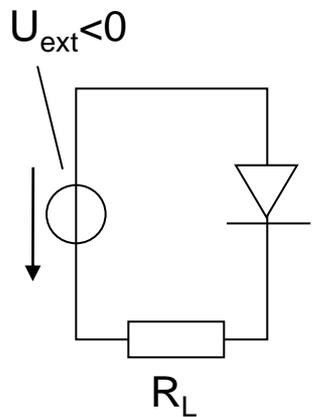
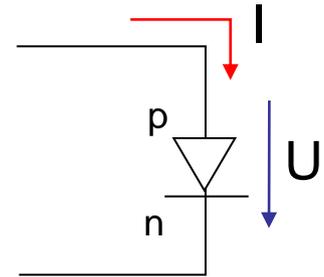
U_D : „eingebaute“ Diffusionsspannung am pn-Übergang

pn-Fotodioden

Kennlinie und spektrale Empfindlichkeit

$$s_i(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{\Phi_e(\lambda)} = \frac{I_{ph}(\lambda)/A}{E(\lambda)} \quad *)$$

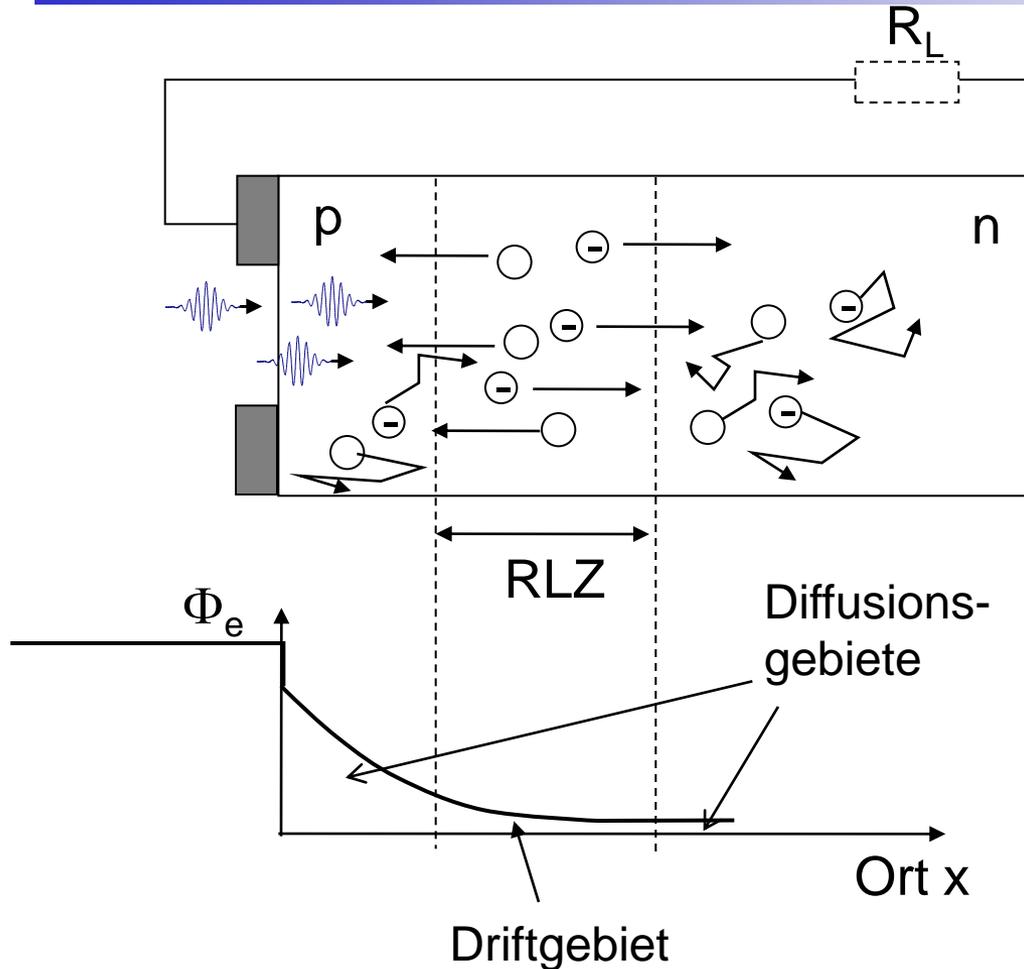
$$I(U) = I_s \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right) - s_i(\lambda) \Phi_e$$



R_L : niederohmig ! $\rightarrow U_{R_L} \sim I_{Ph}$

*) A: Detektorfläche
E: Bestrahlungsstärke

Aufbau und Wirkungsweise pn-Fotodiode



$$I_{ph} = I_{ph}^{drift} + I_{ph}^{diff}$$

Erzeugung in RLZ:

- Driftstrom → Fotostrom

Erzeugung außerhalb:

- Diffusion in RLZ → Fotostrom
 - Rekombination außerhalb
 → kein Beitrag zum Fotostrom

Wichtige Kenngrößen

1. Quantenwirkungsgrad („externe Quantenausbeute“)

$$\eta_{\text{ext}} = \frac{\text{Anzahl der in die RLZ gelangenden} * LT / \Delta t}{\text{Anzahl der auf die Oberfläche der Diode treffenden Photonen} / \Delta t}$$
$$\eta_{\text{ext}} = \frac{I_{\text{ph}}/e}{\Phi_e/hf} = \frac{hc}{e \lambda} \frac{1}{\Phi_e(\lambda)} I_{\text{ph}}(\lambda)$$

hoher Wirkungsgrad wird erreicht durch:

- kleine Reflektivität der Lichteintrittsfläche
- pn-Übergang dicht unter der Eintrittsfläche (Absorption !)
- Breite der RLZ möglichst groß (negative Vorspannung groß !)

2. Spektrale Empfindlichkeit (Ansprechvermögen)

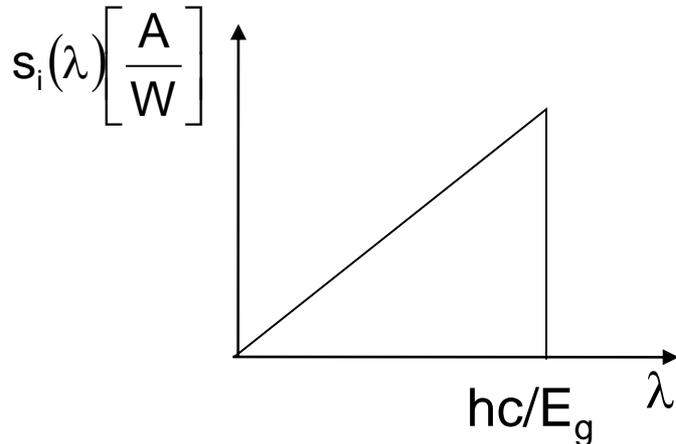
$$I_{\text{ph}}(\lambda) = \frac{e}{hc} \lambda \eta_{\text{ext}} \Phi_e(\lambda)$$
$$s_i(\lambda) = \frac{I_{\text{ph}}(\lambda)}{\Phi_e(\lambda)} = \frac{e}{hc} \eta_{\text{ext}} \lambda$$

* LT in RLZ erzeugt oder eindiffundiert

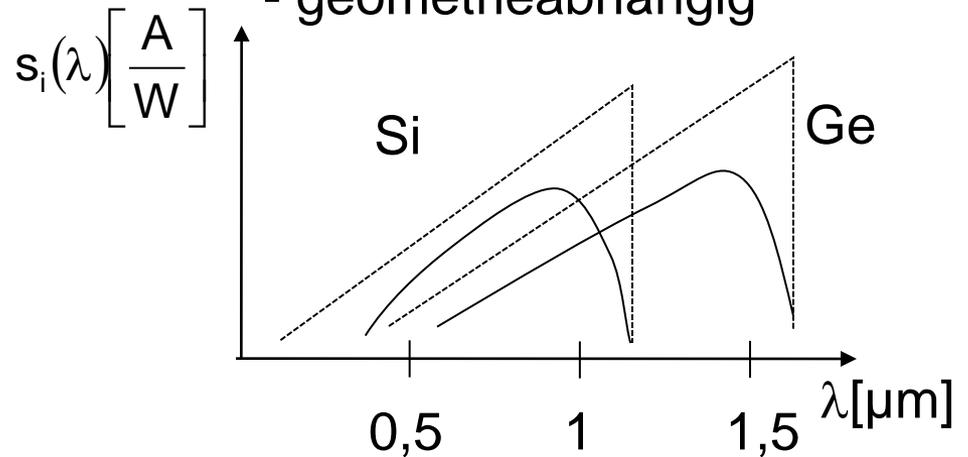
Spektrale Empfindlichkeit

$$s_i(\lambda) = \begin{cases} \frac{e}{hc} \eta_{\text{ext}} \lambda & \text{für } \lambda \leq \lambda_g = \frac{hc}{E_g} = \frac{1,24 \text{ eV} \mu\text{m}}{E_g} \\ 0 & \text{für } \lambda > \lambda_g \end{cases}$$

ideale Diode ($\eta_{\text{ext}}=1$)



reale Dioden ist η_{ext}
 - materialabhängig
 - geometrieabhängig



Ansprechzeit - Demodulationsbandbreite

moduliertes optisches Signal: $\Phi_e(t) = \Phi'_e + \hat{\phi}_e \sin(\omega t)$

resultierender Fotostrom: $I_{ph}(t) = I'_{ph} + \hat{i}_{ph}(\omega) \sin(\omega t + \varphi)$

Amplituden-
übertragungsfunktion: $\hat{i}_{ph}(\omega) = \hat{i}_{ph}(\omega = 0) H(\omega)$

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \quad \text{Tiefpass !}$$

Ansprechzeit: $\tau^2 = \tau_{diff}^2 + \tau_{drift}^2 + \tau_{RC}^2$

optische 3dB Bandbreite: $\omega_{3dB}^{opt} = \sqrt{3}/\tau$, für $H(\omega_{3dB}^{opt}) = 1/2$

elektrische 3dB Bandbreite: $\omega_{3dB}^{el} = 1/\tau$, für $H(\omega_{3dB}^{el}) = 1/\sqrt{2}$

, weil: optische Leistung wird nach der Fotodiode \rightarrow elektrischer Strom

Betrieb in Sperrrichtung

notwendig für den Betrieb in der optischen Nachrichtentechnik, weil..

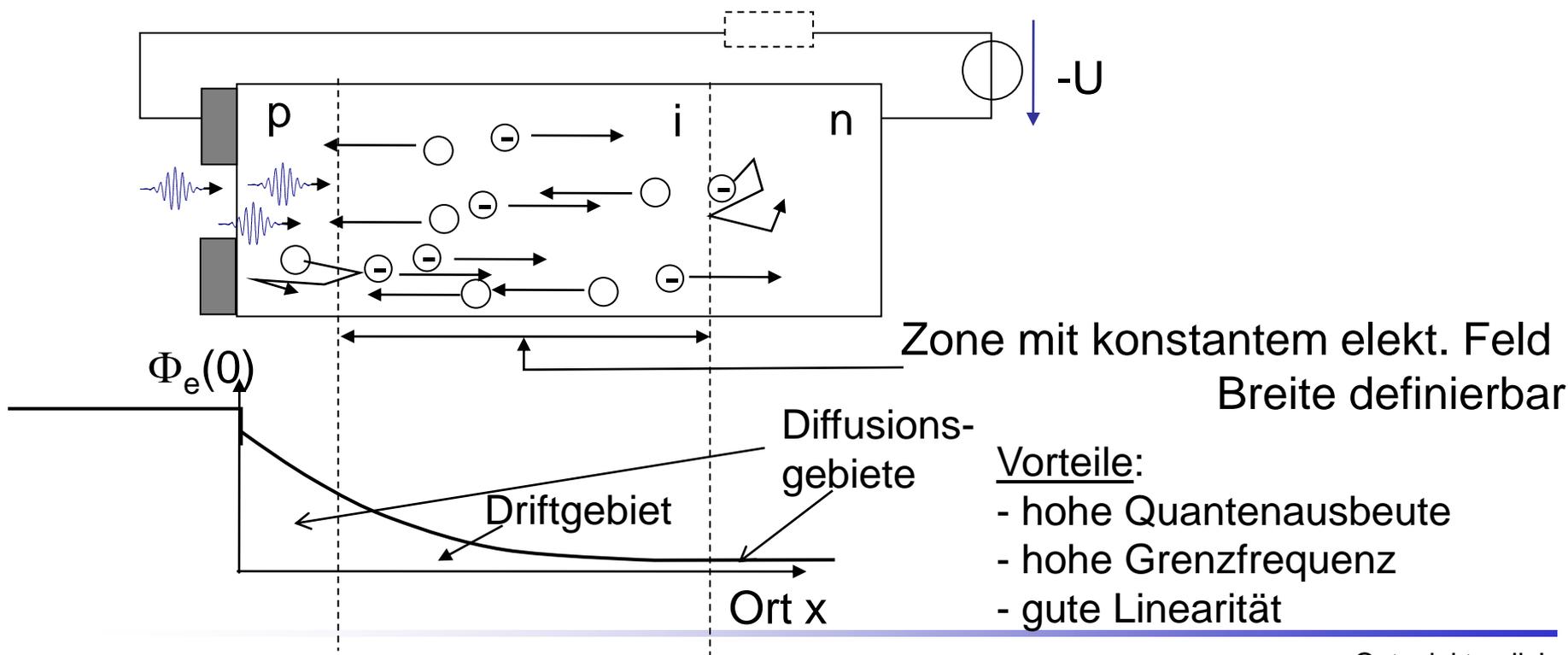
- ... große Sperrspannung \rightarrow hohes elektrisches Feld, hohe Driftgeschwindigkeit, Transitzeit in der RLZ wird gesenkt
- ... mit der Sperrspannung wächst die Dicke der RLZ \rightarrow Kapazität der Diode wird gesenkt \rightarrow Ansprechzeit sinkt
- ... RLZ wird dicker \rightarrow größerer Bereich in dem die LTs zum I_{drift} beitragen \rightarrow Empfindlichkeit wächst
- ... hohe Sperrspannung führt zu höherer Linearität der Abhängigkeit I_{ph} von Φ_e

pin-Fotodiode

- pn-Diode: - Empfindlichkeit groß, wenn Diffusionsstrom zugelassen
 - Diffusionsstrom verlängert Ansprechzeit

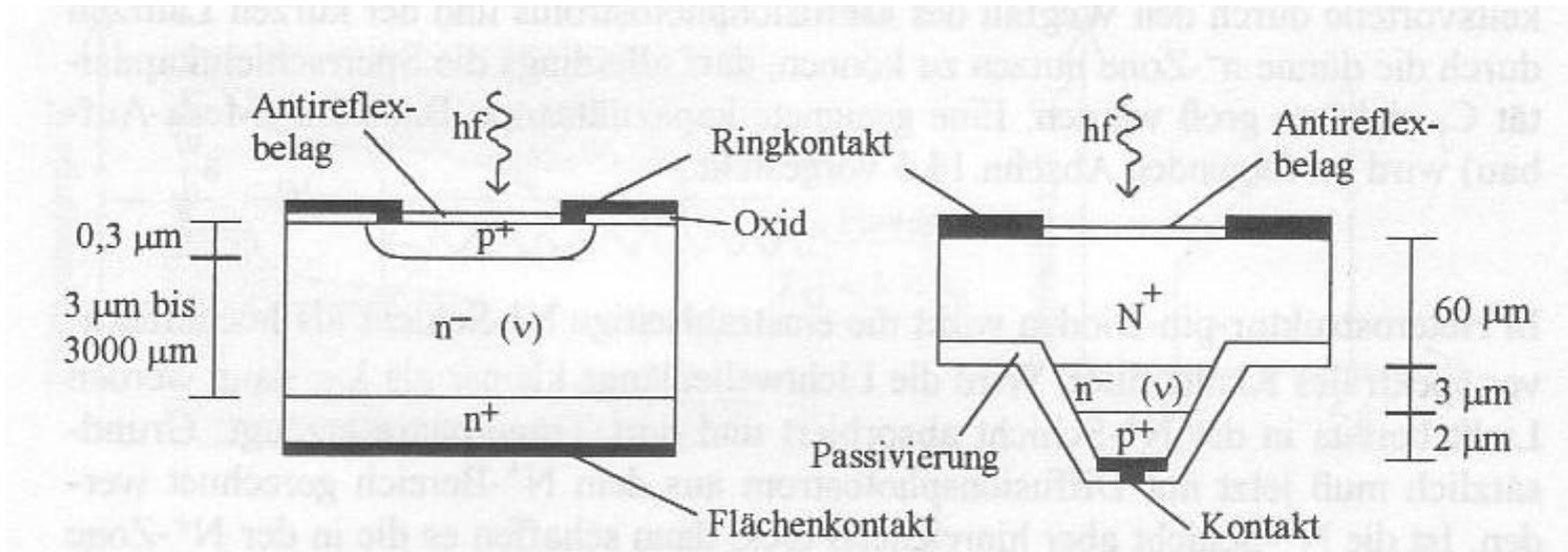
Abhilfe: pin-Diode

„i“ für intrinsisch, eigenleitend, undotiert



- Vorteile:
- hohe Quantenausbeute
 - hohe Grenzfrequenz
 - gute Linearität

Bauformen



Mesa-Struktur: Verringerung der Fläche des pn-Übergangs →
Verkleinerung der Eigenkapazität →
Verbesserung des Frequenzverhaltens

Heterostrukturen: Fenstereffekt (keine Absorption im Bahngebiet)

Beispiel

Siemens BPX60



Kennwerte ($T_A = 25\text{ °C}$, Normlicht A, $T = 2856\text{ K}$)
Characteristics ($T_A = 25\text{ °C}$, standard light A, $T = 2856\text{ K}$)

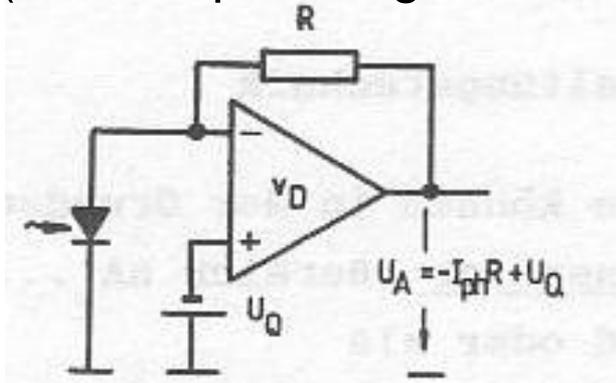
Bezeichnung Description	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Fotoempfindlichkeit, $V_R = 5\text{ V}$ Spectral sensitivity	S	70	nA/lx
Wellenlänge der max. Fotoempfindlichkeit Wavelength of max. sensitivity	$\lambda_{\ominus \max}$	850	nm
Spektraler Bereich der Fotoempfindlichkeit $S = 10\%$ von S_{\max} Spectral range of sensitivity $S = 10\%$ of S_{\max}	λ	350 ... 1100	nm
Bestrahlungsempfindliche Fläche Radiant sensitive area	A	7.45	mm ²
Abmessung der bestrahlungsempfindlichen Fläche Dimensions of radiant sensitive area	$L \times B$ $L \times W$	2.73 × 2.73	mm
Abstand Chipoberfläche zu Gehäuseoberfläche Distance chip front to case surface	H	1.9 ... 2.3	mm
Halbwinkel Half angle	φ	± 55	Grad deg.
Dunkelstrom, $V_R = 10\text{ V}$ Dark current	I_R	7 (≤ 55)	nA

Grundsaltungen

- a) Diode als Stromquelle
(nA...µA, sehr kleiner Lastwiderstand)
- b) Diode als Spannungsquelle
(sehr großer Lastwiderstand ...MΩ)

Beispiele

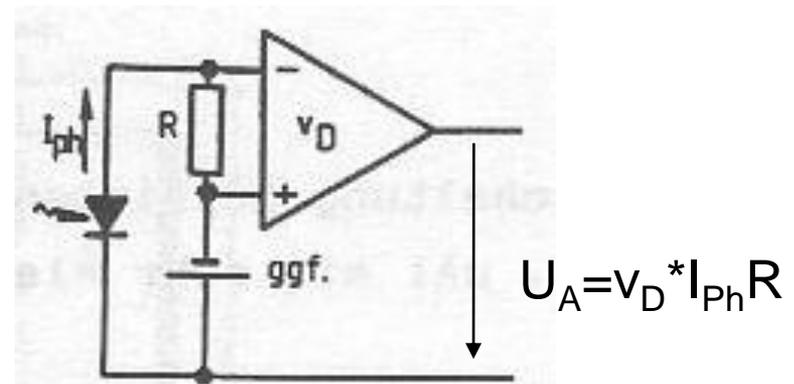
Transimpedanzverstärker
(Strom-Spannungs-Wandler)



$$s_U(\lambda) \left[\frac{V}{W} \right] = g \left[\frac{V}{A} \right] s_i \left[\frac{A}{W} \right]$$

g: Transimpedanz-Verstärkung

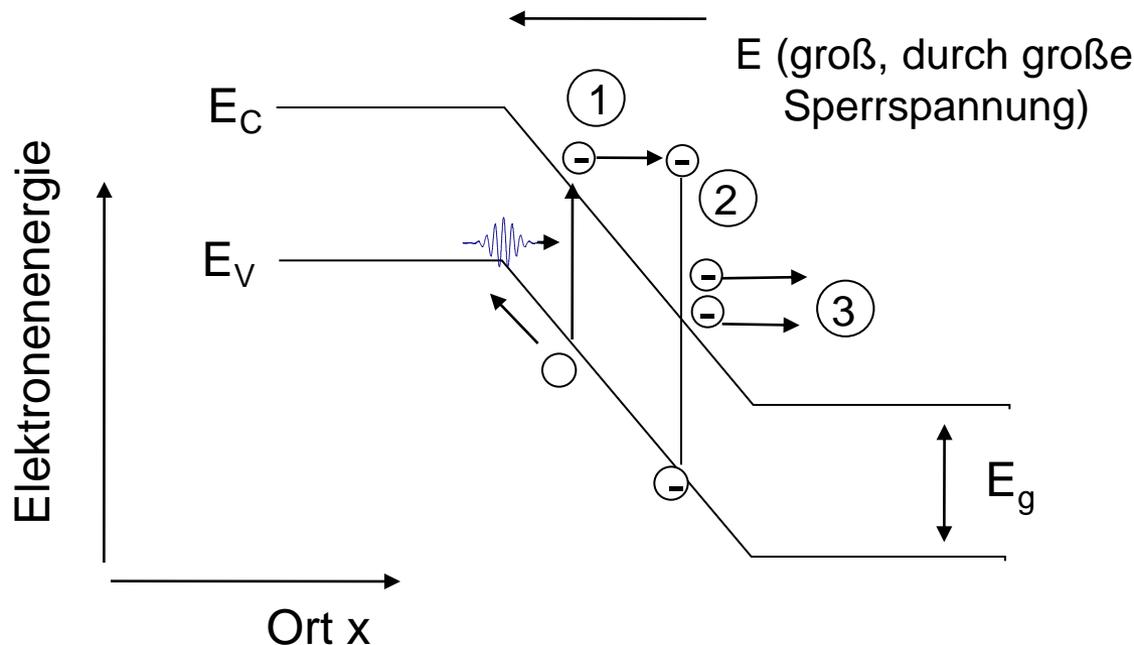
Spannungsverstärker



Avalanche-Fotodioden

Avalanche-Fotodioden = „Lawinen“-Fotodioden („APD“)

Grundprinzip: Feldstärke durch Sperrspannung so hoch, dass erzeugte Ladungsträgerpaare so stark beschleunigt werden, dass Stoßionisation stattfindet → Verstärkung



$$I_{ph} = M I_{ph,prim}$$

$$I_{ph,prim} = S_{i,prim} \Phi_e$$

$$S_i(M) = M S_{i,prim}$$

$$\eta_{ext}(M) = \frac{hf}{e} M S_{i,prim}$$

Vorteile:

- hohe Empfindlichkeit
- hohe Bandbreite

Nachweisgrenzen von Fotodioden

Rauschen

Nachweisgrenze bedingt durch Rauschen; wird beschrieben durch

Rauschstrom

$$i_{\text{rausch}}(t) = i(t) - \overline{i(t)}$$

Rauschleistung

$$\overline{P_{\text{rausch}}} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} R i_{\text{rausch}}^2(t) dt$$

Effektivwert des Rauschstroms

$$i_{\text{rausch,eff}}^2 = \frac{\overline{P_{\text{rausch}}}}{R} = \int_0^{\infty} Z^2(\nu) d\nu$$

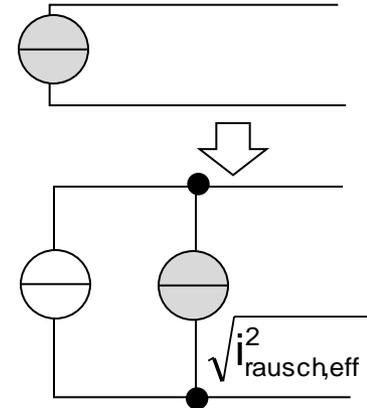
spektrale Rauschstromdichte

$$Z(\nu) \left[\frac{A}{\sqrt{\text{Hz}}} \right]$$

spektrale Rauschleistungsdichte (des Rauschstromes i)

$$Z^2(\nu) R$$

Rauschersatzmodell:



Nachweisgrenze

Rauschen

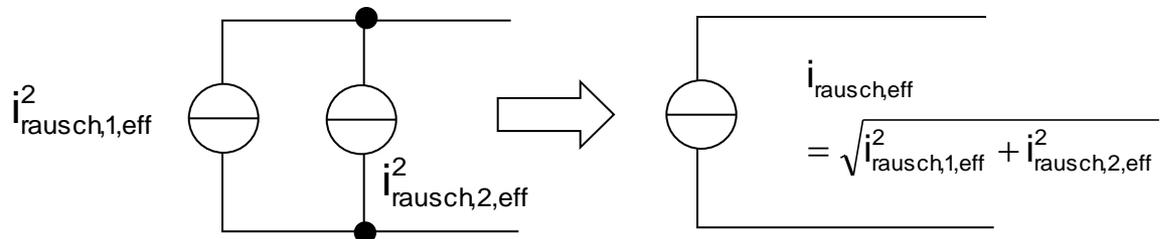
Rauschstromdichte wird in einem Frequenzintervall $\Delta\nu$ oft als konstant betrachtet ($\Delta\nu$ gegeben durch begrenzende Filter in der Schaltung):

$$i_{\text{rausch,eff}}^2 = \int_0^{\infty} Z^2(\nu) d\nu = \int_{\nu_1}^{\nu_2} Z^2(\nu) d\nu = Z^2 \cdot (\nu_2 - \nu_1) = Z^2 \Delta\nu$$

= Schmalbandrauschen

unterschiedliche, nicht miteinander korrelierte Rauschbeiträge:

$$i_{\text{rausch,eff}}^2 = i_{\text{rausch,1,eff}}^2 + i_{\text{rausch,2,eff}}^2$$



Rauschprozesse

(elektrisches) Schrotrauschen
Fluktuationen der
Anzahl der Ladungsträger / Δt

$$Z_{\text{schrot}} = \sqrt{2e|I|} \Rightarrow i_{\text{schrot,eff}}^2 = 2e|I|\Delta\nu$$

(optisches) Schrotrauschen
Fluktuationen der
Anzahl der Photonen / Δt

$$Z_{\text{quant}} = \sqrt{2e|I_{\text{ph}}|} \Rightarrow i_{\text{quant,eff}}^2 = 2e|I_{\text{ph}}|\Delta\nu$$

$$I_{\text{ph}} = s_i(\lambda)\Phi_e$$

Intensitätsrauschen der Lichtquelle

vernachlässigen wir hier.

thermisches Rauschen
von Widerständen

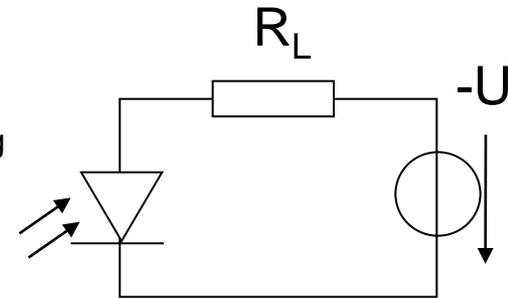
$$Z_{\text{therm}} = \sqrt{\frac{4k_B T}{R}} \Rightarrow i_{\text{therm,eff}}^2 = \frac{4k_B T}{R} \Delta\nu$$

Rauschprozesse im optischen Empfänger

Signal-zu-Rausch-Verhältnis

Annahme: pn / pin Diode, keine Avalanche-diode

optisches Signal: $\phi_e(t) = \Phi_e + \hat{\Phi}_e \sin(2\pi f_{\text{mod}} t) + \Phi_e^{\text{bg}}$



elektrisches Signal: $i(t) = I_{\text{dunkel}} - \left[I'_{\text{ph}} + \hat{i}_{\text{ph}} \sin(2\pi f_{\text{mod}} t) + I_{\text{ph}}^{\text{bg}} \right]$

Signal-zu-Rausch-Verhältnis:

$$\frac{S}{N} = \frac{\text{elektrische Leistung des Signals an } R}{\text{elektrische Leistung des Rausches an } R} = \frac{R}{R} \frac{i_{\text{sig,eff}}^2}{i_{\text{rausch,eff}}^2} = \frac{i_{\text{sig,eff}}^2}{i_{\text{rausch,eff}}^2}$$

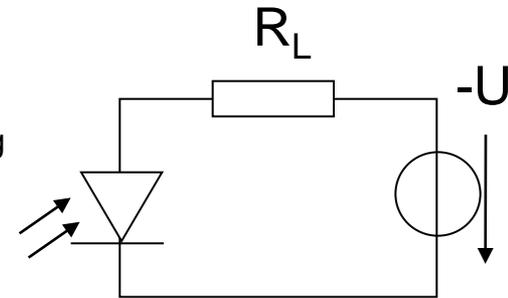
$$\text{SNR}_{[\text{dB}]} = 10 \log \left(\frac{S}{N} \right) \text{dB}$$

Rauschprozesse im optischen Empfänger

Signal-zu-Rausch-Verhältnis

Annahme: pn / pin Diode, keine Avalanche-diode

optisches Signal: $\phi_e(t) = \Phi_e + \hat{\Phi}_e \sin(2\pi f_{\text{mod}} t) + \Phi_e^{\text{bg}}$



$$\frac{S}{N} = \frac{i_{\text{sig,eff}}^2}{i_{\text{schrot,eff}}^2 + i_{\text{therm,eff}}^2}$$

$$\frac{S}{N} = \frac{(1/2) \hat{i}_{\text{ph}}^2}{2e \left(|\Delta v| + 4k_B T / (R_S + R_L) \Delta v \right)}$$

$$\frac{S}{N} = \frac{\hat{i}_{\text{ph}}^2}{4e \left(|i_{\text{ph}}| + |i_{\text{bg}}| + |i_{\text{dunkel}}| \right) + 8k_B T / (R_L) \Delta v} \cdot 1$$

$$\frac{S}{N} = \frac{\left[s_i \hat{\Phi}_e \right]^2}{4e \left(s_i (\Phi_e + \Phi_e^{\text{bg}}) + |i_{\text{dunkel}}| \right) + 8k_B T / (R_L) \Delta v} \cdot 1$$

" $\frac{S}{N}$ " groß, wenn

- Dunkelstrom klein
- Fremdlichteinstrahlung klein
- Temperatur klein
- R_L groß
- Δv klein

v : Frequenz der Rauschströme !

Δv : Bandbreite (der Modulation, des Messverstärkers) Optoelektronik I

Nachweisgrenzen von Fotodioden

NEP und Detektivität

NEP: noise equivalent power, rauschäquivalente optische Leistung:

$$\text{NEP} = \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{\Phi}_e \Big|_{\text{"S/N"}=1}$$

manchmal in Datenblätter auch:

$$\text{NEP}_0 = \text{NEP} / \sqrt{\Delta\nu}$$

$$[\text{NEP}] = \text{W}$$

$$[\text{NEP}_0] = \text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$$

... Effektivwert der optischen Leistung (100% moduliert), die einen Signalstrom erzeugt, dessen elektrische Leistung gleich der elektrischen Leistung aller Rauschbeiträge ist (S/N=1).

Detektivität
(Nachweisgrenze)

$$D(\lambda) = \frac{1}{\text{NEP}} \quad \left[\frac{1}{\text{W}} \right]$$

Detektivität - Stern
(„bezogene“, „spezifische“
Nachweisgrenze)

$$D^*(\lambda) = \frac{\sqrt{\Delta\nu} \sqrt{A}}{\text{NEP}} \quad \left[\frac{\text{cm}\sqrt{\text{Hz}}}{\text{W}} \right]$$

Praktische Formeln

NEP für die Bandbreite $\Delta\nu$: $NEP = NEP_0 \sqrt{\Delta\nu}$

Mindeststrahlungsleistung für ein $S/N > 1$: $\Phi_e = NEP \sqrt{S/N}$

S/N (thermisches Rauschen vernachlässigt):

$$\frac{S}{N} = \frac{\left[s_i \hat{\Phi}_e \right]^2}{4e \left(s_i (\Phi_e + \Phi_e^{bg}) + |I_{dunkel}| \right) \Delta\nu} \cdot 1$$

NEP (thermisches Rauschen vernachlässigt):

$$NEP = \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{\Phi} = \frac{1}{s_i(\lambda)} \sqrt{2e(I_0 + I_{dunkel} + I_{bg}) \Delta\nu}$$

NEP (Signal klein gegenüber Hintergrund):
Lichtschanke (Tag), Freistrahübertragung

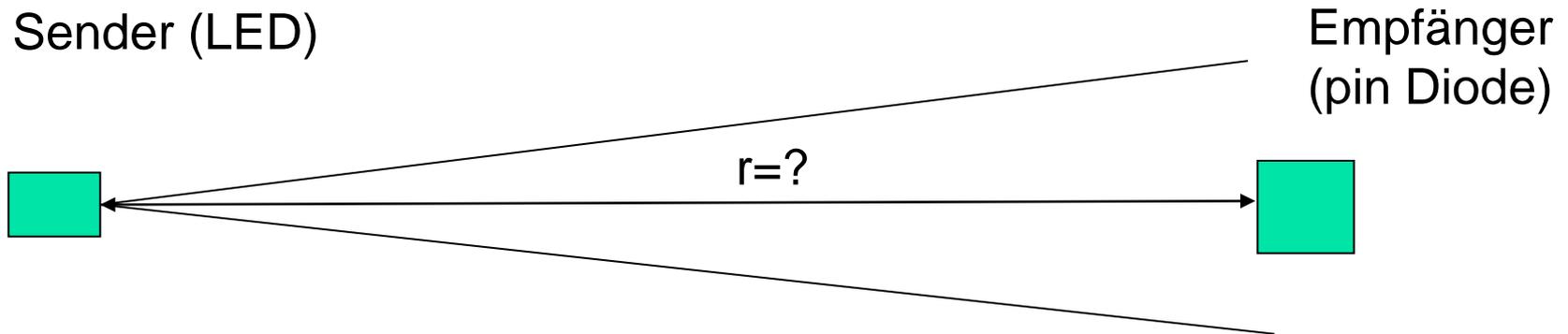
$$NEP = \frac{1}{s_i(\lambda)} \sqrt{2e(I_{bg}) \Delta\nu} \quad (I_0, I_{dunkel} \ll I_{bg})$$

NEP (Signal groß gegenüber Hintergrund, 100% Modulation):
Lichtschanke, Freistrahübertragung (Nacht, Faserübertragung)

$$NEP = \frac{1}{s_i(\lambda)} 4e \Delta\nu \quad (I_0 = \hat{i}_{ph} \gg I_{bg})$$

Anwendung: Berechnung der Reichweite

Reichweite einer Lichtschranke / optischen Übertragungsstecke
bei vorgegebenen Soll-Signal-zu-Rausch-Verhältnis



Daten des Senders:

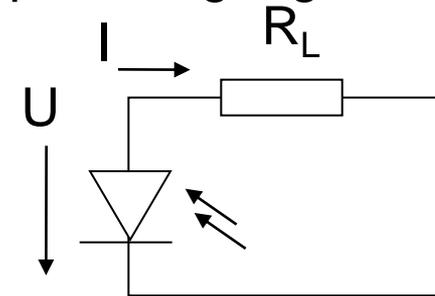
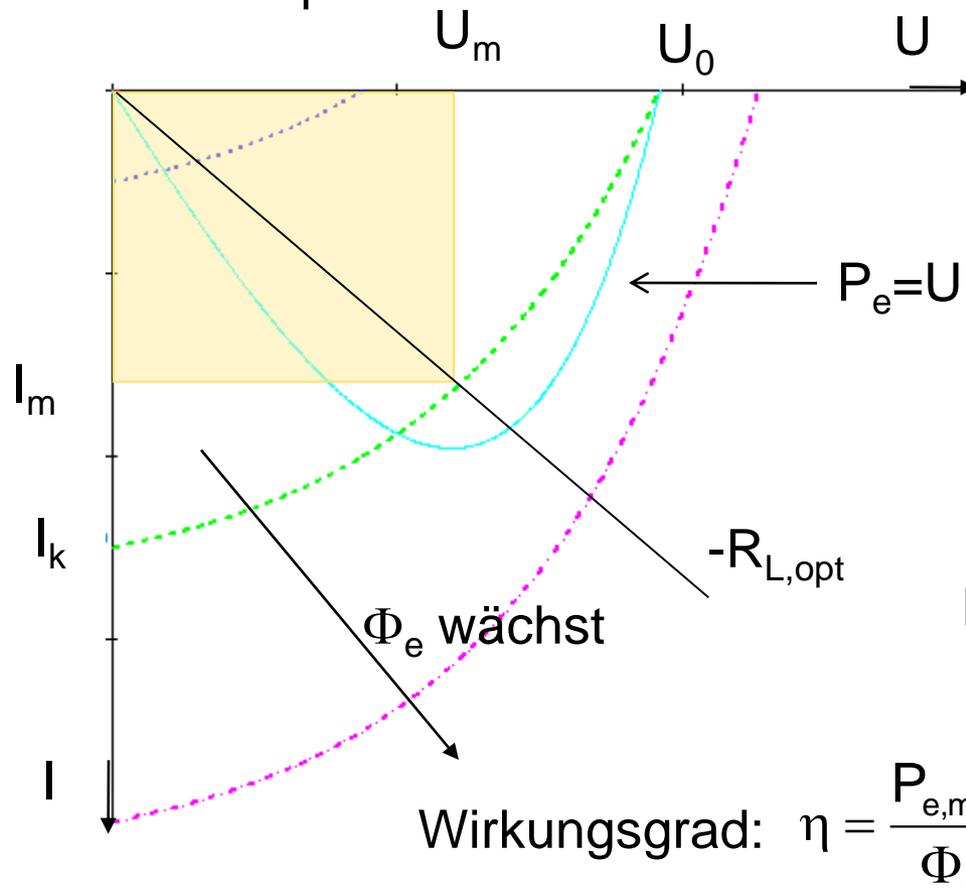
- Strahlstärke $I_{e,0}$
- räuml. Abstrahlcharakteristik $I_e(\theta)$
- Wellenlänge λ
- Modulationsfrequenz $\Delta\nu$
(- Bandbreite)

Daten des Empfängers:

- Fläche A_d
- räuml. Empfangscharakteristik
- Empfindlichkeit s_i bzw. s_U
- NEP_0 , NEP
- Detektivität D , D^*

pn-Übergang im Solarzellenbetrieb

Betrieb in IV. Quadranten der Kennlinie des pn Übergangs
aktiver Zweipol



$$I(U) = I_S \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right) - I_{ph}$$

Leistungsanpassung für
bestimmte optische Leistung:

$$R_{L,opt} = U_m / I_m$$

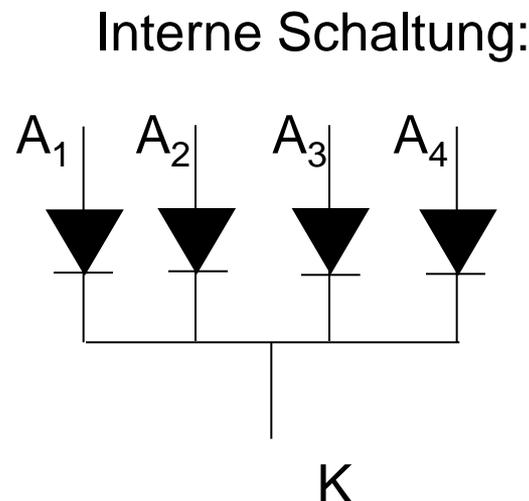
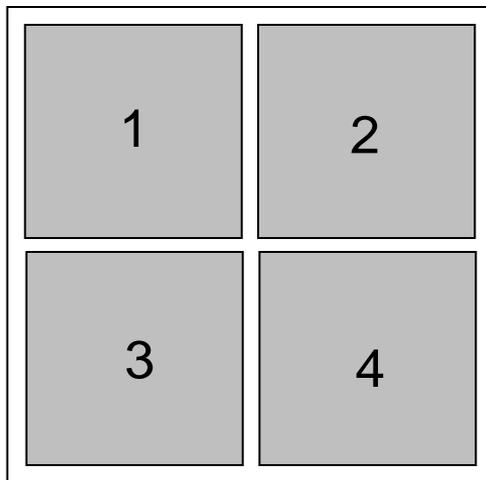
Füllfaktor: $FF = \frac{U_m I_m}{U_0 I_k}$

Fotodetektoren mit Ortsauflösung

Beispiel: Quadranten-Fotodiode

segmentierte Fotodiode: 4 (oder mehr) Segmente

Anwendung: Positionsmessung, Positionsregelung,
Laserstrahljustierung

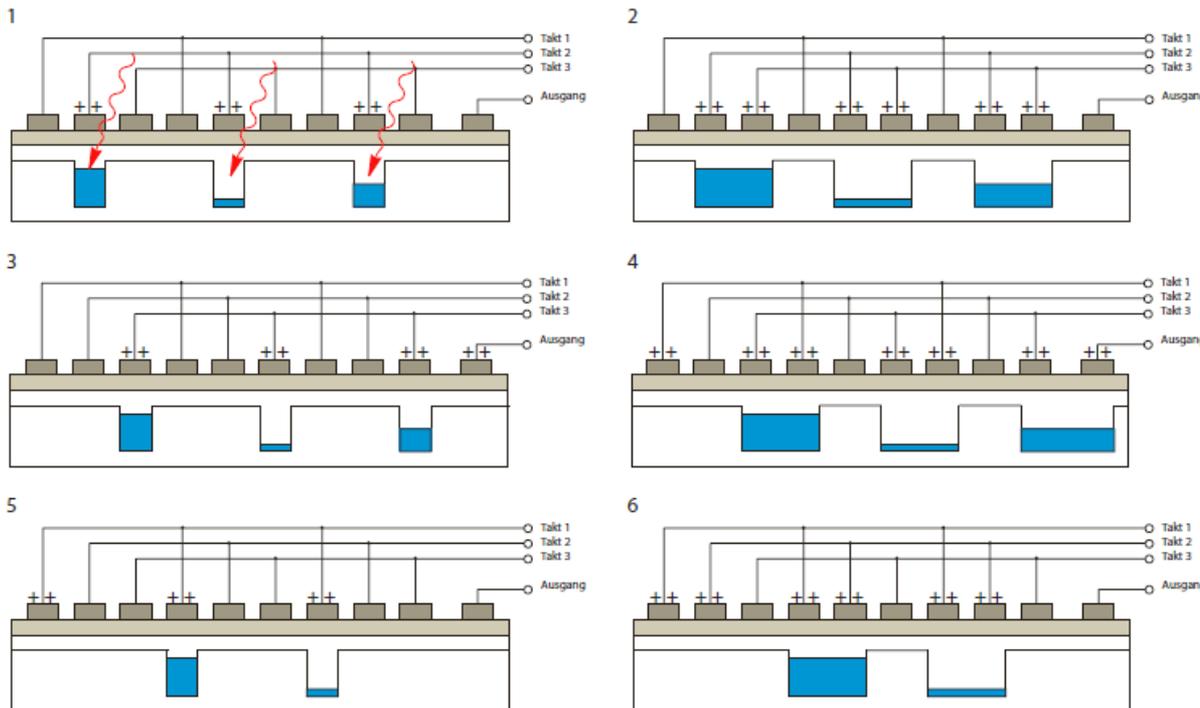


Fotodetektoren mit Ortsauflösung

Beispiel: CCD

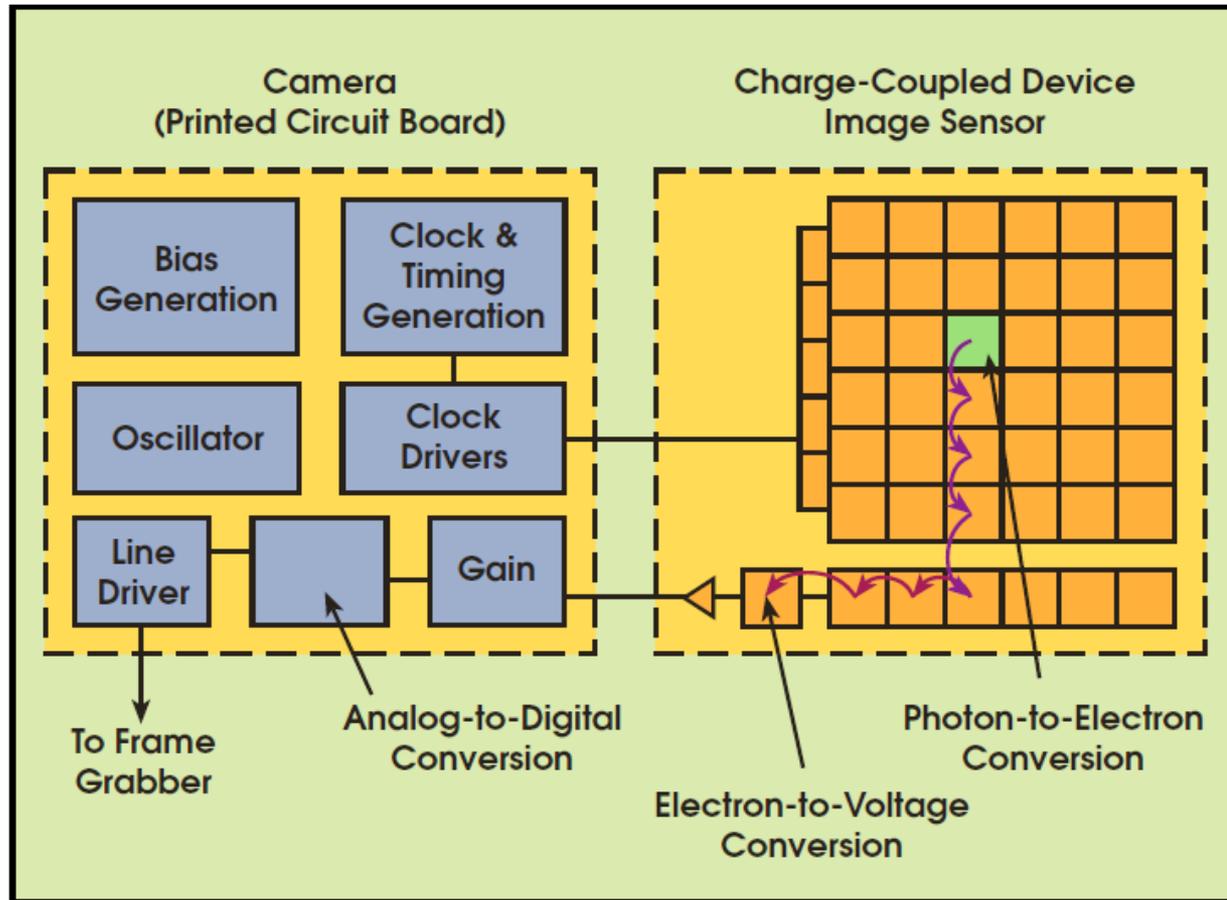
CCD: charge coupled device: Ladungsgekoppelte Schaltung
Massenprodukt zur zweidimensionalen Bildgebung (pixel: $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$)
beruht auf einem Metalloxid-Halbleiter-Übergang (MOS)
„Analoges Schieberegister für optische Information“

Auslesevorgang:



bis 9000x9000 pixel
Quantenausbeute
bis 90%

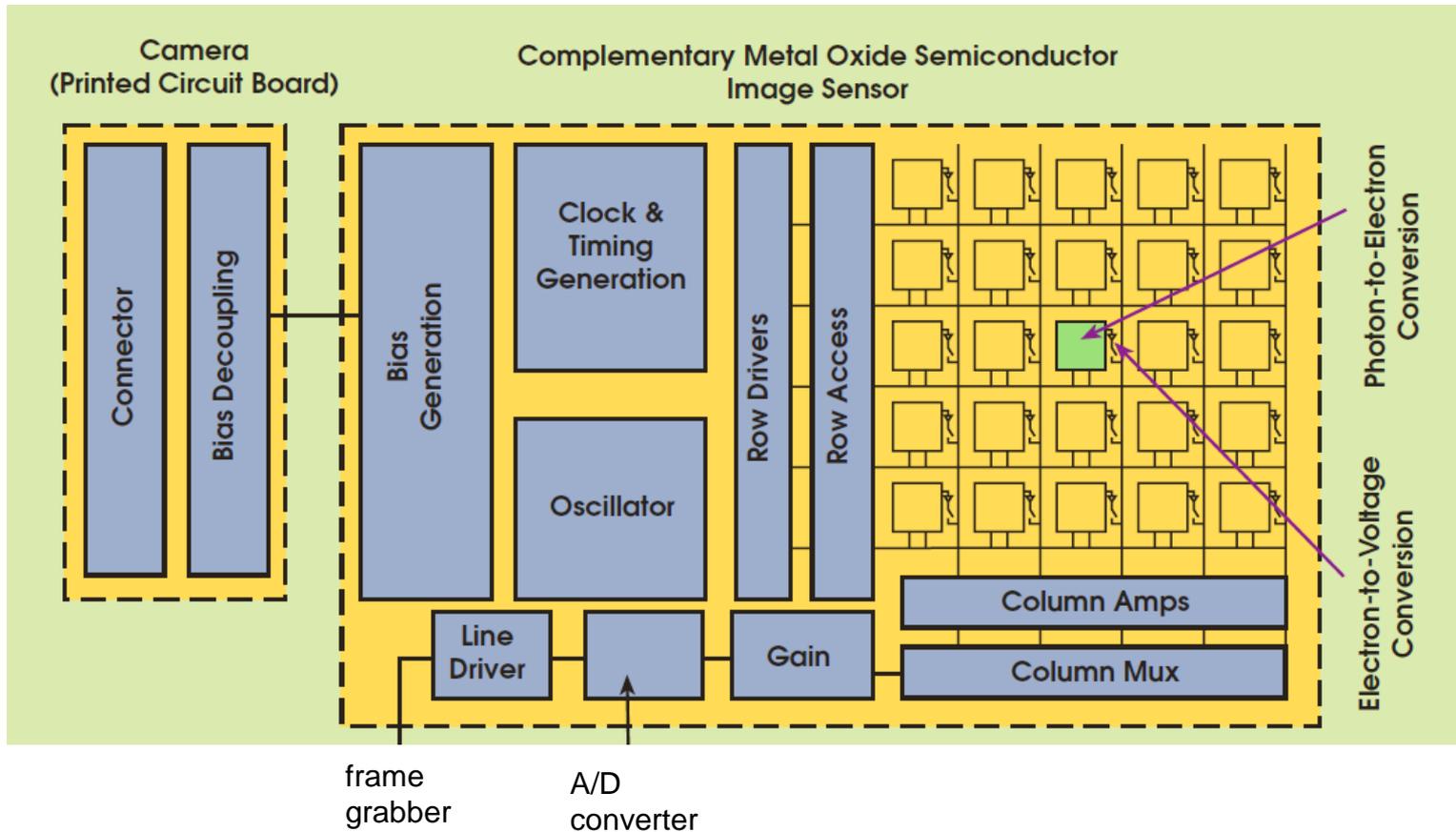
CCD



Bildgebende Detektoren

- CMOS-sensors (active pixel sensors)
 - Strom-Spannungsverstärker für jedes Pixel integriert
 - kein serielles Auslesen, kein shifting der Signale nötig
 - fill factor: light sensitive area / total chip area
 - kleinerer spektraler Empfindlichkeitsbereich als CCD
 - räumliche Auflösung vs. Chipsize vs. number of pixel vs. Auflösungsvermögen der Optik
- „Farb“-Auflösung bei CCD und CMOS
 - 3 Sensoren und Filter für RGB
 - Bayer filter, periodische Pixelfarbfiler
 - 3 stacked sensors übereinander (λ -abhängige Eindringtiefe)

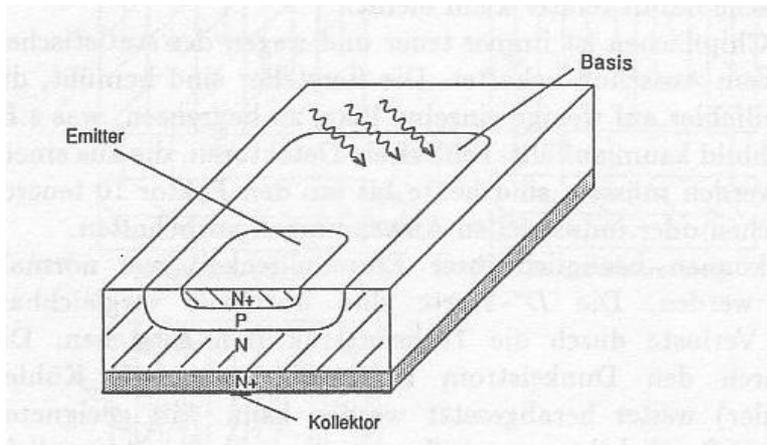
CMOS / active pixel sensor array



Fototransistor

Beispiel: bi-polarer npn-Transistor

Aufbau:

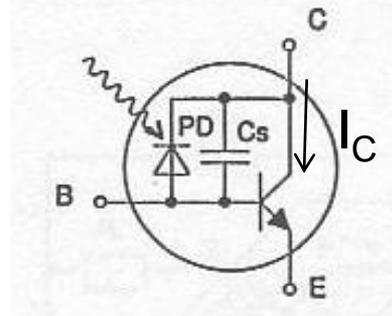


Kollektorstrom:

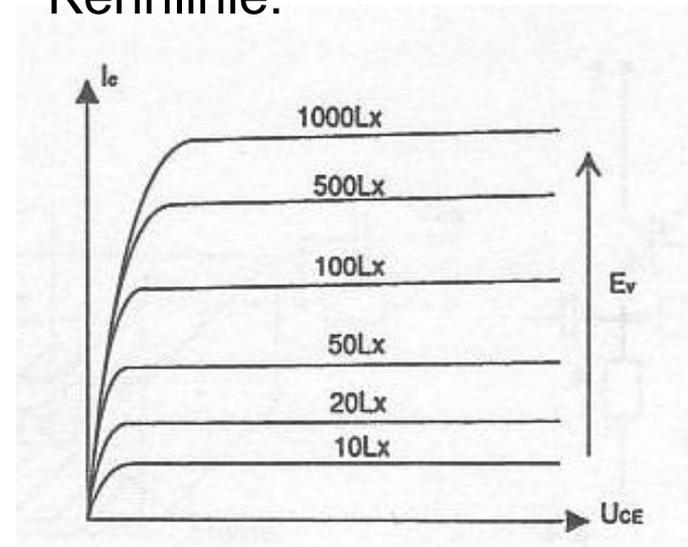
$$I_C = (B_N + 1)(I_{Ph} + I_{CB0})$$

B_N : Stromverstärkung, I_{CB0} : Dunkelstrom

Ersatzschaltbild:



Kennlinie:



Zusammenfassung

Kenngrößen von Fotodioden

- Zulässige Sperrspannung
- spektrale Empfindlichkeit (A/lx bzw. A/W)
- Spektralbereich der Fotoempfindlichkeit
- Quantenwirkungsgrad
- Wellenlänge der größten Empfindlichkeit
- Größe der bestrahlten / lichtempfindlichen Fläche
- Leerlaufspannung (bei bestimmter Bestrahlung)
- Kurzschlussstrom (bei bestimmter Bestrahlung)
- Dunkelstrom (in Abhängigkeit der Sperrspannung)
- Optische Richtcharakteristik (Abhängigkeit der Empfindlichkeit vom Einfallswinkel)
- Rauschäquivalente Strahlungsleistung (NEP)
- Detektivität

Fotodetektoren

Allgemeine Kenngrößen

- Empfindlichkeit, spektrale Empfindlichkeit
 - Umwandlung von Strahlung in elektrischen Strom

$$s_i(\lambda) = \frac{I_{el}}{\Phi_e} \left[\frac{A}{W} \right] \quad s^*(\lambda) = \frac{I_{el}}{E_e} \left[\frac{A}{W/m^2} \right] \quad I/U$$

$$s_i(\lambda) = \frac{I_{el}}{\Phi_v} \left[\frac{A}{lm} \right] \quad s^*(\lambda) = \frac{I_{el}}{E_v} \left[\frac{A}{lx} \right] \quad \text{Konversion:}$$

$$s_U(\lambda) = \frac{U}{\Phi_e} \left[\frac{V}{W} \right]$$

$$s_U(\lambda) = \frac{U}{\Phi_v} \left[\frac{V}{lm} \right]$$

- räumliche Empfangscharakteristik
- Grenzfrequenz, Ansprechverhalten
 - Definitionen identisch den Lichtquellen
- Nachweisvermögen, Detektivität

Lernziele Kapitel 8

- Fotodetektoren
- pn-Fotodiode
- pin-Fotodiode
- Avalanche-Fotodiode
- Quadranten-Fotodiode
- CCD
- CMOS
- Rauschen
- Kenngrößen von Fotodioden