

## Technisches System: Auto -> Sensoren (Meßgrößen)

Motor/ Antrieb:	Drehzahl, Kühlwasser-/ Öltemperatur/ -füllstand/ -druck, Luftmenge/ -temperatur, Klopfen, Abgaszusammensetzung, Drehmoment
Sicherheit:	Beschleunigung (Airbag, Gurtstraffer, Überrollbügel), Drehzahl der Räder (ABS, ...), Lenkwinkel, Alarmanlage, Abstandssensoren, Außentemperatur
Komfort:	Aschaltkontrolle, Temperatur (innen), Regensensor, Innengeräusch (Radio), Füllstand des Treibstoffs, Öffnung von Türen..., Besetzungssensor
Kommunikation:	Navigation, (Telefon)
Fahrweg:	Federweg, Niveaueusgleich

## 1. Einleitung

### 1.1. Begriffe, Definitionen, Analogien

#### Biologisches System:

- 5 Sinne:
  - Gefühl Temperatur  
Druck
  - Gesicht Intensität  
Energie/ Wellenlänge
  - Gehör Frequenz Energie/ Frequenz  
Lautstärke  
Richtung/ Phase
  - Geschmackssinn süß  
sauer
  - Geruchssinn Luftbestandteile
- sehr empfindlich
- nicht quantitativ
- schnell

#### Technisches System:

- Sensor
- Verarbeitung
- quantitativ
- empfindlich
- langsam → schnell → extrem schnell

### 1.3. Meßgrößen/ Einheiten

Meßgröße:  $X = x \times N$  (x: Maßzahl; N: Einheit)  
↑  
bel. phys. Größe

3 Bedingungen für den Meßvorgang:

- 1. Fundamentalvoraussetzung (Meßgröße muß eindeutig definiert sein)
- 2. Fundamentalvoraussetzung (Maßnormal)
- Repräsentativität

1.3.1. Basisgrößen, Basiseinheiten

1.3.2. Abgeleitete Basisgrößen und ihre Einheiten

1.3.3. Vorsätze und Vorsatzzeichen

## 2. Physikalische Grundlagen und Effekte


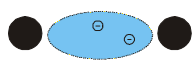

Stoffe: fest: Gestaltfestigkeit, Kristall/ amorph, (Fernordnung)  
flüssig: Wechselwirkung, keine feste Bindung zum Nachbarn/ Fernordnung (amorph)  
gasförmig: keine Bindungskräfte, nur elastischer Stoß → ideales Gasgesetz, lange freie Weglänge ( $p \times V = mRT$ ), füllen jedes Volumen lückenlos

### 2.1. Kristall

Festkörper (solid state):

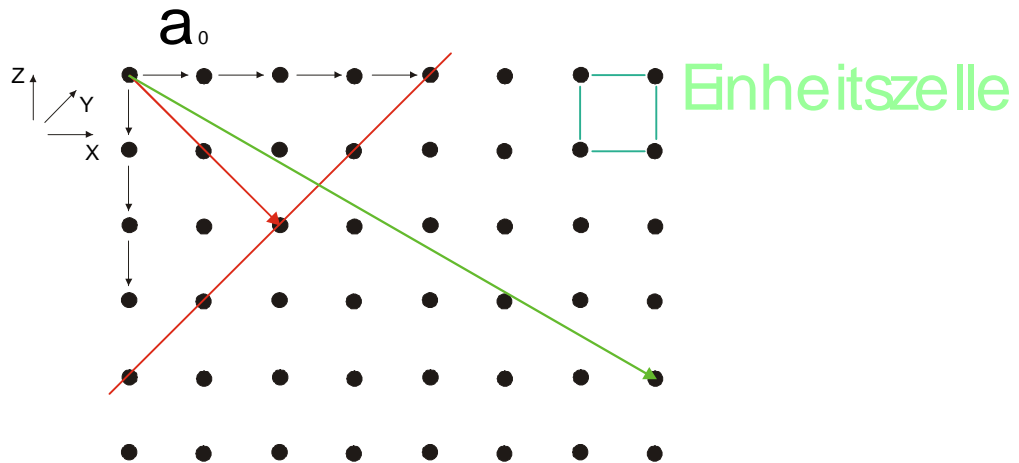
- Fernordnung
- Gestaltfestigkeit → phys. Eigenschaften:
  - mechanische Eigenschaften
  - elektrische Eigenschaften
  - Magnetismus
  - optische Eigenschaften
  - thermische Eigenschaften
- Anordnung: Abstand (Bindungslänge), Winkel (Bindungswinkel)
- Raumgitter und Basis → Kristall

Bindungsverhältnisse in einem Kristall:

- |    |   |   |   |
|----|---|---|---|
| 1. |  | Elektronenpaarbindung: ionisch, heteropolar<br>Coulomb – WW (z.B.: NaCl)  | <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border-left: 1px solid black; height: 100px; margin-right: 10px;"></div> <div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="margin-bottom: 20px;">lokalisiert,<br/>isolierend</div> <div style="margin-bottom: 20px;">↓</div> <div>frei,<br/>stark leitend</div> </div> </div> |
| 2. |  | Elektronenpaarbindung: homopolar<br>Bindung durch „gemeinsame“ Elektronen |   |
| 3. |  | Metallische Bindung<br>Van der Waals Bindung und freie Elektronen         |   |

Aufbau eines kubischen Raumgitters, Orientierung (Richtung), Kristallflächen [Flächennormale]

reales Gitter:



$a_0$ : Gitterabstand, Gitterkonstante ( $\sim 0,5\text{nm}$ )

$$\begin{matrix} (2\ 0\ 2) & (7a_x, 0a_y, -4a_z) \\ [2\ 0\ 2] = [1\ 0\ 1] \end{matrix}$$

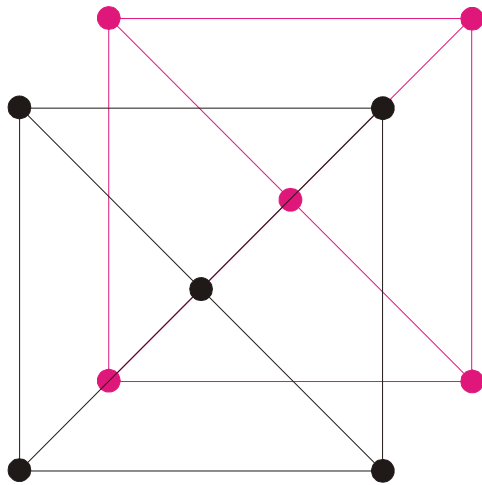
Gitterfaktor:  $T = (h \times a_x + k \times a_y + l \times a_z) \rightarrow$  Richtung  
Miller'sche Indizes im „reziproken“ Gitter

niedrig indizierte Flächen:	$[1\ 0\ 0], [0\ 0\ 1], [-1\ 0\ 0], \dots$	$\Sigma = 6$
	$[-1\ 0\ 1], [1\ 1\ 0], [0\ -1\ 1], \dots$	$\Sigma = 12$
	$[1\ 1\ -1], [1\ -1\ -1], [1\ 1\ 1], \dots$	$\Sigma = 8$

- $\Rightarrow$
- höchste Atomdichte
  - ausgeprägte Bindungsverhältnisse
  - ausgeprägte physikalische Eigenschaften

halbleitende Festkörper:

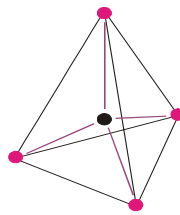
- Diamantstruktur (1 chem. Element)
- Zinkblendstruktur (2 chem. Elemente)



um  $\frac{1}{4}$  Randdiagonale verschoben, 2. Gitter fcc

Besetzung beider Untergitter:

- gleich  $\Rightarrow$  Diamantstruktur (C)
- ungleich  $\Rightarrow$  Zinkblendenstruktur (NaCl)



## 2.2. Elektrische Eigenschaften

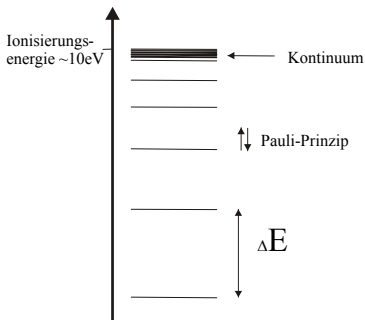
el. Grundgrößen: Stromstärke [A], Spannung [V], Widerstand [ $\Omega$ ]

- Nichtleiter:  $T \uparrow \Rightarrow R \downarrow$ ,  $\rho = 10^6 \dots 10^{20}$   
 $\rho$ :  $n = f(T) \uparrow$ ,  $\mu = f(T) \downarrow$  auf sehr niedrigem Niveau

- Halbleiter:  $T \uparrow \Rightarrow R \downarrow$ ,  $\rho = 10^{-4} \dots 10^6$   
 $\rho$ :  $n = f(T) \uparrow$ ,  $\mu = f(T) \downarrow$

- Leiter:  $T \uparrow \Rightarrow R \uparrow$ ,  $\rho = 10^{-25} \dots 10^{-4}$   
 $\rho$ :  $n = \text{const.}$ ,  $\mu = f(T) \downarrow$   
 Leitfähigkeit  $\sigma = 1/\rho$   
 spezifischer Widerstand  $\rho = f(n, \mu)$

Borsches Atommodell:



- Schalenmodell
- Elektron als Welle
- Aufenthaltswahrscheinlichkeit
- „scharf“ definierte Energien  $\rightarrow$  diskrete Elektronenzustände
- bei Annäherung der Atome  $\rightarrow$  Kristall
- quasikontinuierliche Energiebänder in Festkörper

Anzahl der Si – Atome pro  $\text{cm}^3$ :

1. Gitterabstand:  $0,5\text{nm} \rightarrow (2 \times 10^7)^3 = 8 \times 10^{21}$
2. Molgewicht Si:  $28,086\text{g}$ ;  $N_A = 6,022 \times 10^{23}$ ; Dichte:  $2,33\text{g/cm}^3$   
 $N_{\text{Si}} = 2,33 / 28,086 \times 6,022 \times 10^{23} \text{cm}^{-3} \approx 5 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$

Bandstruktur: energetisches Bandsystem für die Besetzung der Elektronen:

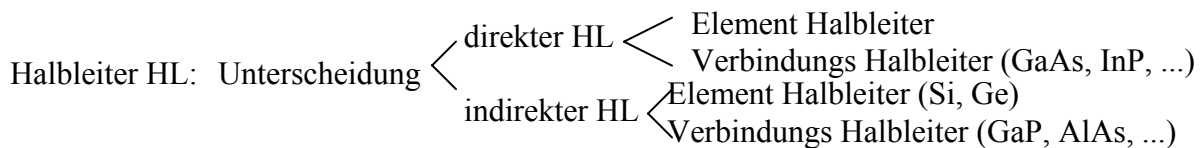
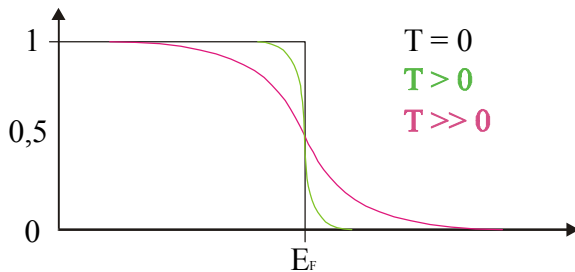
- |   |   |  |
|---|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. volles Band</li> <li>2. teilweise besetztes Band</li> <li>3. leeres Band</li> </ol> | } | Energielücken $\Delta E = E_g$<br>zwischen Bändern |
|---|---|--|

Statistische Funktion zur Beschreibung der Besetzungsverteilung: Fermi – Dirac

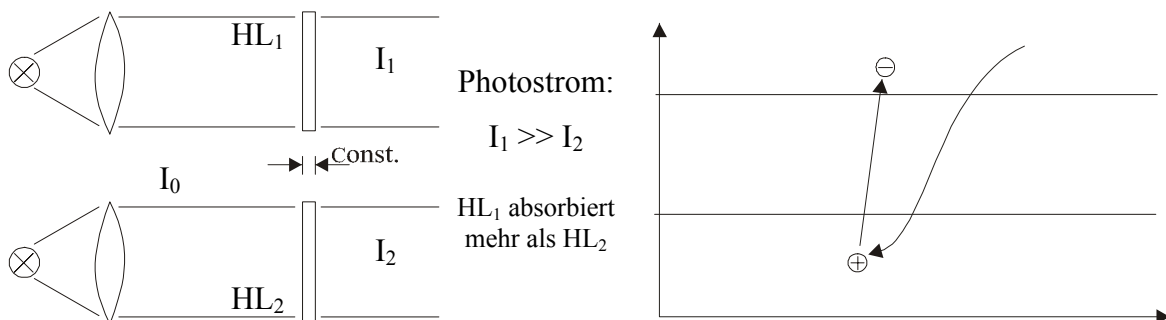
- Beschreibung der Verteilung von geladenen Teilchen
- Fermi – Energie:  $E_F$ ;  $E > E_F \Rightarrow$  Zustände leer  
 $E < E_F \Rightarrow$  Zustände voll

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/KT} + 1}$$

K: Boltzmannkonstante; T: absolute Temperatur



Gedankenexperiment: (HL<sub>1</sub>: Si, HL<sub>2</sub>: GaAs)



Wechselwirkungen Licht – Festkörper: - Reflexion<sup>1)</sup>  
 - Transmission<sup>2)</sup>  
 - Absorption<sup>2)</sup> } 100% keine WW  
 WW mit Elektronen

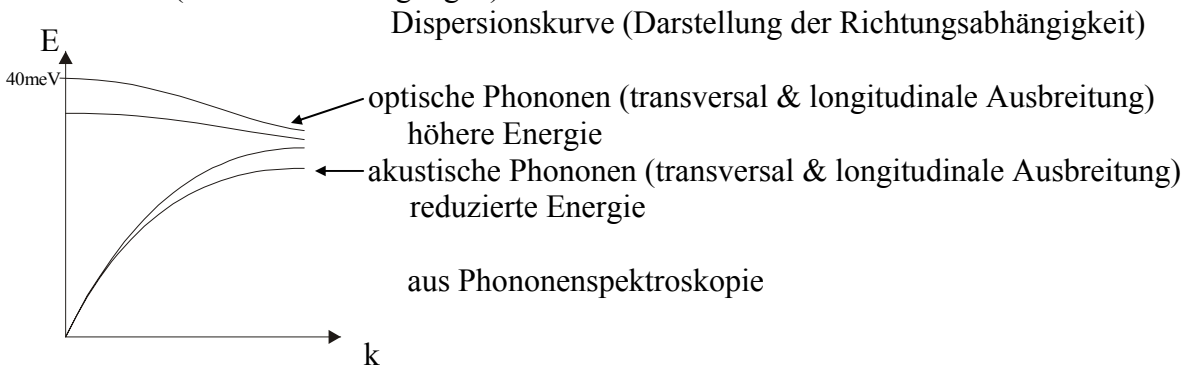
- 1) passiert an der Oberfläche
- 2) passiert im Volumen

Hilfsbetrachtung: kinetische Energie freier Elektronen

Klassische Mechanik:  $E_{kin} = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} p^2/m$   
 mit  $p = mv$

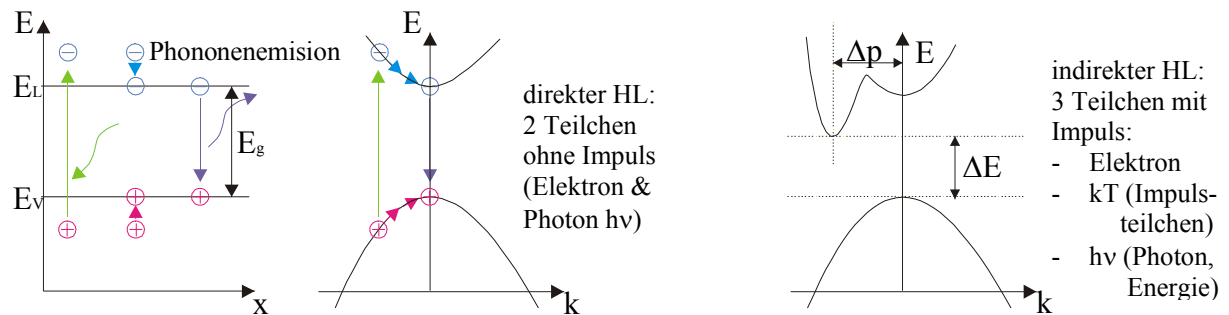
Quantenmechanik:  $p = \hbar k = \frac{h}{2\pi} k$   $k$ : Wellen-/ Ausbreitungsvektor  
 z.B.: Wellenfunktion eines Elektrons:  $\psi = \psi_0 e^{ikr}$   
 $\Rightarrow E_{kin} = \frac{1}{2} \frac{\hbar^2 k^2}{m_e^*}$   $m_e^*$ : effektive Masse (WW mit Gitter)  
 Bewegung im Kristall! Mit Gitter periodischem Potential

Phononen (elementare Anregungen):



Phononen entstehen, wenn freie Energie nicht in Strahlung umgesetzt wird.

Typische Zeitkonstanten (Relaxation):



- Interband Übergang (zw. den Bändern; LB  $\rightarrow$  VB)
- Intraband Übergang (in den Bändern)

Fundamentalübergang im Valenzband  
 Endzustand im Leitungsband

Interband:  $\left\{ \begin{array}{l} \text{direkt } (\mu\text{s} \dots \text{ns}) \\ \text{indirekt } (\text{ms} \dots \mu\text{s}) \end{array} \right.$

Intraband  $\sim$  ps

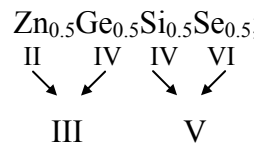
typische Phononenenergien sind kleiner als 40meV

Energieumrechnungen:  $E \text{ [eV]} = h\nu$   $c = v\lambda \Rightarrow v = c/\lambda$   
 $E = hc / \lambda = \frac{1,23983}{\lambda[\mu\text{m}]}$  mit  $hc/e_0$ , da  $h\nu$  in [eV]  
 sichtbarer Bereich optische Strahlung (Licht):  $\lambda: 380\text{nm} \dots 780\text{nm}$   
 $E: 3,26\text{eV} \dots 1,59\text{eV}$   
 $E_{\text{th}} \text{ [kT]}: 1\text{meV} \hat{=} 11,6\text{K}$   
 Umgebungstemperatur:  $\sim 300\text{K} \hat{=} \sim 30\text{meV}$

Halbleiter:  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Element Halbleiter (Si, Ge)} \\ \text{chemische Verbindung; Verbindungs- HL (III - V, II - VI; binär)} \end{array} \right.$

Periodisches System der Elemente:

IIa	III	IV	V	VI	
	B	C	N	O	Isolator
	Al	Si	P	S	Halbleiter
					Metal
Zn	Ga	Ge	As	Se	Element HL: 2xSi: 2x4 Valenzelektronen
Cd	In	Sn	Sb	Te	2xGe: 2x4 „
Hg	Tl	Pb	Bi	Po	binäre HL: GaAs: 3+5 „
					ZnSe: 2+6 „
					ternäre HL (GaAs): $\text{Zn}_{0,5}\text{Ge}_{0,5}\text{As}$ ; $\text{GaGe}_{0,5}\text{Se}_{0,5}$
					$\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ ; $\text{GaAs}_v\text{P}_{1-v}$

quaternäre HL (GaAs):  $\text{Zn}_{0,5}\text{Ge}_{0,5}\text{Si}_{0,5}\text{Se}_{0,5}$ ;  $\text{Ga}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$   
  
 → Einstellung der Bandlücke  $E_g$   
 → Einstellung der Gitter konstante  $a_0$

Beweglichkeit  $\mu$ : Geschwindigkeitszunahme je Kraft

- elektrisches Feld [V/cm]
- Beschleunigung [ $\Delta\text{cm/s}$ ] (Geschwindigkeitsänderung pro Feldstärkenänderung)

→ Elektronenleitung in HL → n – Typ HL → Donatoren;  $N_D$ : Donatordichte [ $\text{cm}^{-3}$ ]  
 frei einstellbar von  $10^8 \dots 10^{11} \text{cm}^{-3}$   
 ionisierter Donator:  $N^+$

Elektronen sind Majoritätsträger;  
 Löcher sind Minoritätsträger  $\Rightarrow n \gg p$

→ Löcherleitung in HL → p – Typ HL → Akzeptoren;  $N_A$ : Akzeptordichte [ $\text{cm}^{-3}$ ]  
 frei einstellbar von  $10^{19} \dots 10^{14} \text{cm}^{-3}$

Elektronen sind Minoritätsträger;  
 Löcher sind Majoritätsträger  $\Rightarrow n \ll p$

Flache Störstellen tragen der Ladungsträgervermehrung/ zu höheren Leitfähigkeit bei

Tiefe Störstellen tragen meist als Leitungsträgerfallen/ zu niedriger Leitfähigkeit bei

### 2.3. Optische Effekte

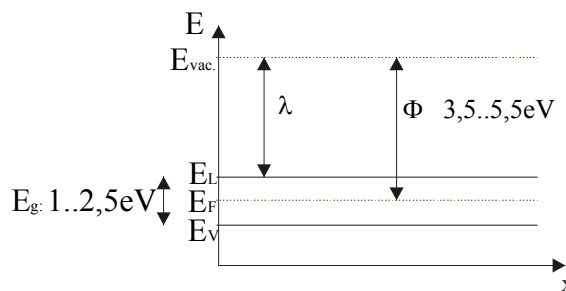
- optische Effekte
- Photoeffekte:
  - Wechselwirkungen zwischen Werkstoff und Licht
  - Übertragung der Photoenergie  $h\nu$  auf ein Elektron

1. Elektron verläßt Festkörper: Photon hat  $h\nu \geq \Phi$   $\Rightarrow$  äußerer Photoeffekt
2. Elektron verläßt Festkörper nicht: Photon hat  $h\nu < \Phi$   $\Rightarrow$  innerer Photoeffekt

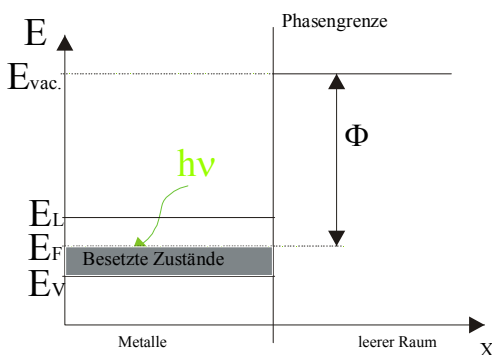
#### 2.3.1. Äußerer Photoeffekt

Grundlegende Gleichung:  $E = \frac{1}{2}mv^2 = h\nu - \Phi$

Labels in the diagram:  
 - Masse des freien Elektrons  
 - Geschwindigkeit des freien Elektrons  
 - Energie des anregenden Photons  
 - Austrittsarbeit:  $E_{vac} - E_F$



a) Metalle:



Austrittsarbeiten/ Grenzwellenlängen:  $\lambda_0$

Li:	2,90eV	$\hat{=}$	427,5nm
Na:	2,75eV	$\hat{=}$	450,9nm
Ka:	2,3eV	$\hat{=}$	539,1nm
Ru:	2,16eV	$\hat{=}$	574nm
Cs:	2,14eV	$\hat{=}$	579,4nm
GaAs-Cs:	0,55eV	$\hat{=}$	2,254 $\mu$ m
Cs <sub>3</sub> Sb:	0,45eV	$\hat{=}$	2,755 $\mu$ m
Na <sub>2</sub> KSb-Cs:	0,55eV	$\hat{=}$	2,254 $\mu$ m

(S-20 Photokathode)

- Einsatzmöglichkeit:
- Vakuumphotozelle
  - Bildwandlerröhre
  - Photovervielfacher
  - Gassensoren

Typischer Wirkungsgrad:  $\eta = \frac{n_e}{n_p(h\nu \geq \Phi)}$  ( $n_p$ : absorbierte Photonen)

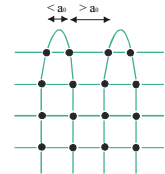
3Stufen des Auslösungsprozesses:

1. Absorption des Photons  $\rightarrow$  Energietransfer von Photonen zu Elektronen
2. Bewegung der Elektronen auf die Oberfläche zur Phasengrenze
3. Auslösung der Elektronen über die Potentialbarriere

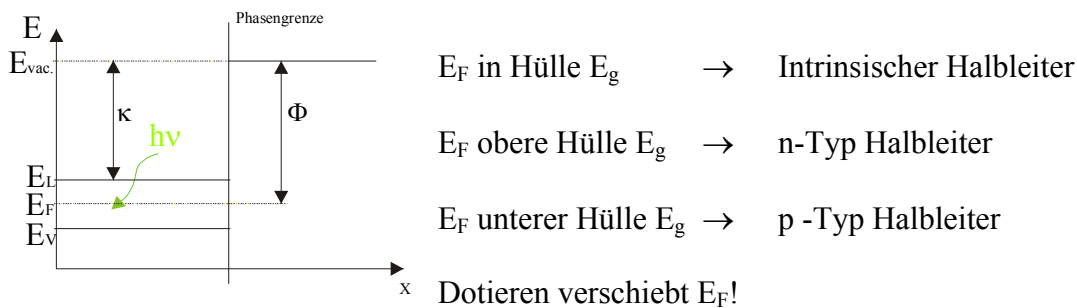


Verlustmechanismen:

- Transmission (keine Absorption), Reflexion (keine Absorption)
- Elektronenstreuung (Wechselwirkung der angeregten Elektronen mit all den anderen nicht angeregten freien Elektronen im Leitungsband)
- Phononenstreuung (Stöße mit den Gitterschwingungen)
- Unregelmäßigkeiten an der Oberfläche (Störungen → Rauigkeit und Bandstruktur)



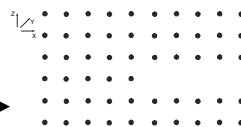
b) Halbleiter:



1.  $h\nu < E_g \Rightarrow$  kein Übergang
2.  $h\nu \geq E_g \Rightarrow$  Übergang möglich; freies Elektron-/ Löcherpaar im Kristall
3.  $\Phi > h\nu \geq E_g \Rightarrow$  Übergang möglich; freies Elektron-/ Löcherpaar im Kristall
4.  $h\nu \geq \kappa + E_g \Rightarrow$  Übergang in freien Raum möglich; freies Elektron außerhalb des Kristalls  
 $h\nu + \Delta h\nu \rightarrow \Delta h\nu = \frac{1}{2}mv^2$   
 $\kappa + E_g \Rightarrow$  Photoemission des freien Elektrons

Verlustmechanismen wie bei Metallen:

- reduzierte Bedeutung Elektronenstoß (geringen Dichte freier Elektronen)
- starker Verlust durch Phononen
- starker Verlust durch Kristallstörungen:
  - Störstellen (Donatoren, Akzeptoren) hoch
  - Störstellen tief
  - Leerstellen (vacancy)
  - Zwischengitteratome
  - Versetzungen



- Anwendungen:
- Vakuumphotozellen
  - Photovervielfacher (S-20)
  - Bildwandlerröhren (höhere Energien)

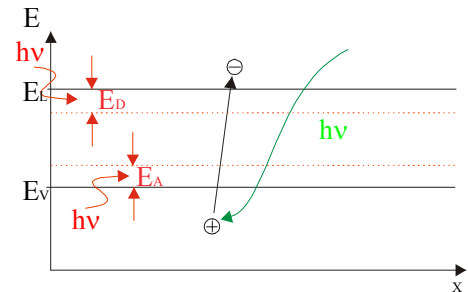
### 2.3.2. Innerer Photoeffekt

Elektron verläßt den Kristall nicht!

Interessant nur im Halbleiter, wegen starker Änderung der elektrischen Eigenschaften;  
z.B.: Ladungsträgerdichte  $n_e; n_n$  ( $n_n; n_p$ ) ( $\sigma = e_0(n_e\mu_e + n_n\mu_n)$ )

Einstrahlung:  $h\nu \geq E_g = E_L - E_V$

- ⇒ freie Elektronen im Leitungsband
- ⇒ freie Löcher im Valenzband
- ⇒ Erhöhung der Leitfähigkeit (Photoleitfähigkeit)



**Wichtig:** direkte Halbleiter starker Effekt  
indirekte Halbleiter reduzierter Effekt

Grenzwellen:  $h\nu \geq E_g$  } Eigenhalbleiter (intrinsischer Halbleiter)  
 $h\nu \geq E_A$  }  
 $h\nu \geq E_D$  } Störstellenhalbleiter (extrinsischer Halbleiter)

Anwendungen: Photoleiter (Photowiderstände)

### 2.3.3. Sperrschicht - Photoeffekt

Kombination von innerer Photoeffekt und Ladungsträgertrennung

- Anwendungen:
- Photodioden (1 pn – Übergang), Solarzellen
  - Phototransistor (2 pn – Übergänge)
  - Photofeldeffekttransistor
  - Phototyristoren (3 & mehr pn – Übergänge)

**Wichtig:** Ladungsträgertrennung  $n \rightarrow n$ -Typ Halbleiter (Majoritätsträgerbereich)  
 $p \rightarrow p$ -Typ Halbleiter (Majoritätsträgerbereich)  
 2 Stromteile über die Phasengrenze

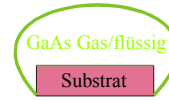
1. Diffusionsstrom aufgrund Konzentrationsgradient
2. Diffusionsstrom aufgrund eines inneren elektrischen Feldes ( $N_{D^+}; N_{A^-}$ )

	pn – Homoubergang	pn - Heteroubergang
Werkstoff	gleich	ungleich
Banddicke	$E_{gp} = E_{gn}$	$E_{gp} \neq E_{gn}$
Affinität	$\kappa_p = \kappa_n$	$\kappa_p \neq \kappa_n$
Austrittsarbeit	$\Phi_p > \Phi_n$	$\Phi_p \neq \Phi_n$
Fermienergie	$E_{Fp} \neq E_{Fn}$	$E_{Fp} \neq E_{Fn}$

Einschub:

Epitaxie (einkristalline Schichten auf Substraten):

- LPE: Flüssigkeitsphasenepitaxie (LiquidPhaseEpitaxy)
  - VPE: Gasphasenepitaxie (VapourGasEpitaxy)
    - Ga-Verbindungen
    - As-Verbindungen
  - MBE: Molekularstrahlepitaxie (MolecularBeamEpitaxy)
- Über Substrat werden Gase angelagert und dann gespalten (atomweiser Aufbau/ ebene Struktur)
- Variante: MOVPE (MetalOrganicVPE) ← Quantenabmessungen sind möglich
- gezielter Aufbau von einzelnen Atomen auf das Gitter bei  $\sim 10^{-9}$ hPa



$I = I_p + I_h$  mit Abhängigkeit der Störstellendichte  $N_A, N_D$

$I_n = I \cdot \frac{N_A}{N_D + N_A}$  typische Breiten sind einige nm

$I_p = I \cdot \frac{N_D}{N_D + N_A}$  typische Breiten sind einige  $\mu\text{m}$

Differenzspannung:

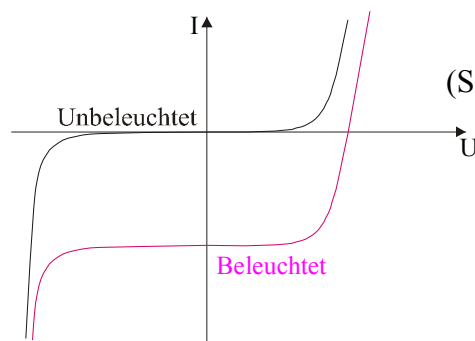
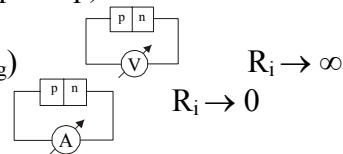
$$U_D = -\frac{kT}{e_0} \cdot \ln \frac{n_n p_p}{n_i^2} = 1/e \cdot (\Phi_p - \Phi_n)$$

$n_i$ : Ladungsträgerdichte intrinsisch  
 $n_n$ : Ladungsträgerdichte n - Dotiert  
 $p_p$ : Ladungsträgerdichte p - Dotiert

Sperrschicht Photoeffekt:

- Erzeugung freier Ladungsträger n, p der Phasenabsorption
- Trennung der freien Ladungsträger
  - Elektronen laufen ins n-Gebiet (Majoritätsprinzip)
  - Löcher laufen ins p-Gebiet (Majoritätsprinzip)
- Signale:

- Photospannung ( $U_{OC} < U_D \leq 1/e \times E_g$ )  $R_i \rightarrow \infty$
- Photostrom ( $I_{SC} = f(n_{\text{Photonen}})$ )  $R_i \rightarrow 0$



(Solarzelle: Bandlücke  $\sim 1,4\text{eV}$ )

## 2.4. Thermische Effekte

Temperatur erzeugt/ verändert elektrische Größe

$$\left\{ \begin{array}{l} R = f(T) \\ U = f(T) \\ I = f(T) \end{array} \right.$$

Temperatur ist ein Maßstab für:

- den Wärmehalt eines Körpers
- die kinetische Energie der Masseteilchen (ungerichtete Bewegung)
- den Phasenübergang von fest ↔ flüssig ↔ gasförmig → T = const.

gasförmige Körper: ideale Gasgleichung (Fundamental - Thermometer)

flüssiger Körper: Volumenausdehnung in einer Kapillare (z.B.: Hg/ Alkohohle)

fester Körper: ~ Widerstandsänderung verschiedener Werkstoffe:

- Metalle (z.B.: Pt)
- Keramiken (z.B.: NTC, PTC)
- ~ thermoelektrischer Effekt:
  - Seebeck – Effekt (Thermoelement)
  - Peltier – Effekt (Kühler)

### 2.4.1. Seebeck – Effekt

- zwei verschiedene Metalle
- scharfe Phasengrenze
- Kontaktspannung
- Thermospannung (~10µV/K)
- Thermostrom

⇒ Peltier – Effekt (T-Differenz durch eingepprägten Strom)

### 2.4.2. Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands

$$R = f(A, l, \rho) = \rho l/A$$

$\rho$ : spezifischer Widerstand =  $1/\sigma$ ;  $\sigma$ : Leitfähigkeit

$$j = \sigma \cdot E$$

j: Stromdichte

Abhängigkeit von  $\rho = 1/\sigma$ :

$$\sigma = \underbrace{e_0 \cdot n \cdot \mu_n}_{\sigma_n} + \underbrace{e_0 \cdot p \cdot \mu_p}_{\sigma_p}$$

Metall:

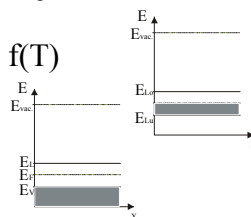
$n = \text{const.};$

$\mu_n = f(T)$

Halbleiter/

Isolator:

$n, \mu_n, p, \mu_p = f(T)$



⇒ T- Abhängigkeit des Widerstands R

Nicht Leiter	T↑ ⇒	R↓, ρ↓, σ↑, μ <sub>n</sub> ↓, μ <sub>p</sub> ↑, n, p↑,	ρ = 10 <sup>6</sup> .. 10 <sup>20</sup>
Halbleiter	T↑ ⇒	R↓, ρ↓, σ↑, μ <sub>n</sub> ↓, μ <sub>p</sub> ↑, n, p↑,	ρ = 10 <sup>-6</sup> .. 10 <sup>6</sup>
Leiter	T↑ ⇒	R↑, ρ↑, σ↓, μ <sub>n</sub> ↓, μ <sub>p</sub> ↑, n = const.,	ρ = 10 <sup>-25</sup> .. 10 <sup>-4</sup>

← gleiche Verhältnisse bei Metallen ρ nur abhängig von μ<sub>n</sub>

1. T – Abhängigkeit bei Metallen

2. Einfluß der Temperatur auf die Leitfähigkeit bei Halbleitern

Ladungsträgerdichte: σ = e<sub>0</sub>nμ<sub>n</sub> + e<sub>0</sub>pμ<sub>p</sub>      n, p, μ<sub>n</sub>, μ<sub>p</sub>: Abhängig von T!

Störleitung (Reserve):

$$n(T) = \frac{N_D - N_A}{N_A} \cdot \left(\frac{2m_n^*kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_D}{kT}}$$

$$p(T) = \frac{N_A - N_D}{N_D} \cdot \left(\frac{2m_p^*kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_A}{kT}}$$

Eigenleitung (n = p):

$$\frac{2(2\pi k)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \times (m_n^* \times m_p^*)^{\frac{3}{4}} \times T^{\frac{3}{2}} \times e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

Wichtige Größen:

- Ionisierungsenergien (E<sub>D</sub>, E<sub>A</sub>, E<sub>g</sub>)
- Störstellendichte (N<sub>A</sub>, N<sub>D</sub>)
- effektive Massen (m<sub>n</sub><sup>\*</sup>, m<sub>p</sub><sup>\*</sup>)

Beweglichkeiten:

$$\mu_n = \frac{\sigma_n}{e_0 n} = \frac{e_0 E_n}{m_n^*}$$

$$\mu_p = \frac{\sigma_p}{e_0 p} = \frac{e_0 E_p}{m_p^*}$$

σ<sub>n</sub>: Leitfähigkeit  
 E<sub>n,p</sub>: mittlere Lebensdauer der Ladungsträger  
 m<sub>n</sub><sup>\*</sup>: effektive Elektronenmasse  
 m<sub>p</sub><sup>\*</sup>: effektive Löchermasse

Streuungen akustischer/ optischer Phononen: ~ T<sup>-3/2</sup> m<sup>\*-1/2</sup>

Streuungen geladener Störstellen: ~ T<sup>+3/2</sup> m<sup>\*-1/2</sup>

Streuungen Polaronen ( quantenmechanische Polarisationswellen): ???

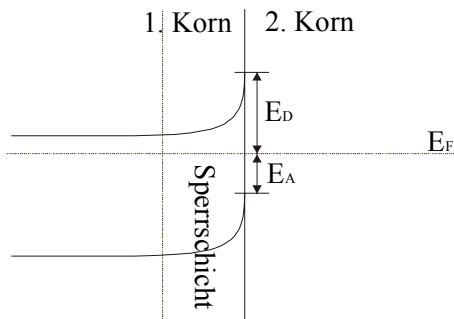
3. Heißeleiter (NTC):

- Materialien: polykristalline Mischungen aus gesinterten Metalloxiden, z.B.:  
     Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Spinell), Zn<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub>, MgCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, TiO<sub>2</sub>, NiO & CoO mit Li<sub>2</sub>O  
     (Sintertemperatur: 1000 .. 1400°C)
- Effekt Korngrenzen mit Beschränkung der Beweglichkeiten  
     → mit zunehmender Temperatur ⇒ Erhöhung der Beweglichkeit μ

Anwendung bis ca. 400°C

4. Kaltleiter (PTC) ( $T \uparrow \Rightarrow R \uparrow$ ):

Materialien: polykristalline halbleitende ferro elektrische Keramiken  
 z.B.: BaTiO<sub>3</sub> (aus BaCO<sub>3</sub> & Titanoxiden)  
 Sintertemperatur: 1000 .. 1400°C



An den Korngrenzen bilden sich Sperrschichten aus  
 ab Currie – Temperatur  $T_c$  Reduzierung der Sperrschichten

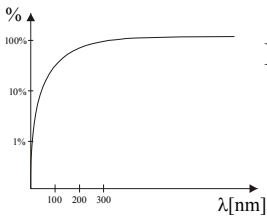
2.4.3. Temperaturübergang des pn - Übergangs

Bandlücke  $E_g$  hängt von der Temperatur ab  $T \downarrow \Rightarrow E_g \uparrow$

2.4.4. Schwarzer Strahler; Wärmestrahlung

Beschreibung durch:

- Stefan Boltzmann Gesetz: Gesamtstrahlungsleistung:



$$P = \int_0^{\infty} P'(\lambda) = \sigma AT^4$$

$$\text{mit } \sigma = \frac{c_1}{15} \times \left(\frac{\pi}{c_2}\right)^4 = \frac{2\pi^5 k^4}{15 h^3 c_0^2} = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

- Planck'sches Strahlungsgesetz: Spektrale Strahlungsleistung:

$$P'(\lambda) = dP/d\lambda = \frac{c_1 A}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)}$$

$$\text{mit } c_1 = 2\pi c_0 = 3,7414 \cdot 10^{-16} \text{ W/m}^2$$

$$c_2 = c_0/hK = 14,3879 \cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$$

- Wien'scher Verschiebungssatz:

$$\lambda_{\text{max}} = a/T$$

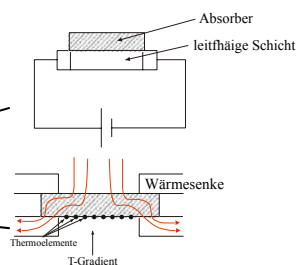
$$(P'(\lambda)/A)_{\text{max}} = bT^5$$

$$\text{mit } a = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$$

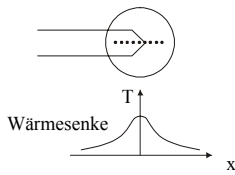
$$\text{mit } b = 12,816 \cdot 10^{-6} \text{ W/m}^3\text{K}^5$$

Messen der Strahlung durch:

- innerer Photoeffekt (intrinsisch, extrinsisch; Photowiderstand PR)
- Sperrschicht Photoeffekt (Photodiode PD)
- Abhängigkeit der Leitfähigkeit von T (Bolometer)
- T – Gradient in Absorber (Thermokette)
- pyroelektrischer Effekt (Oberflächenladung abhängig von  $\Delta T$ )

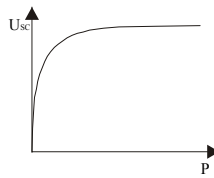
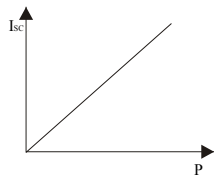
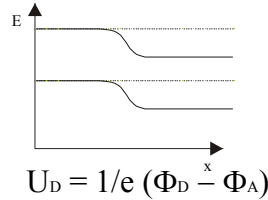
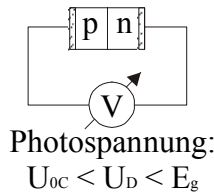
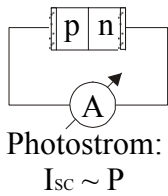


Thermokette (Thermosäule):



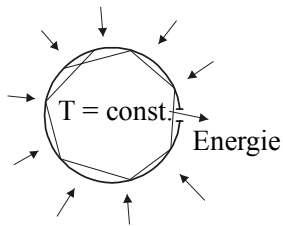
$$U_{th} = k_{th} \underbrace{(T - T_0)}_{\Delta T}$$

Photodioden:

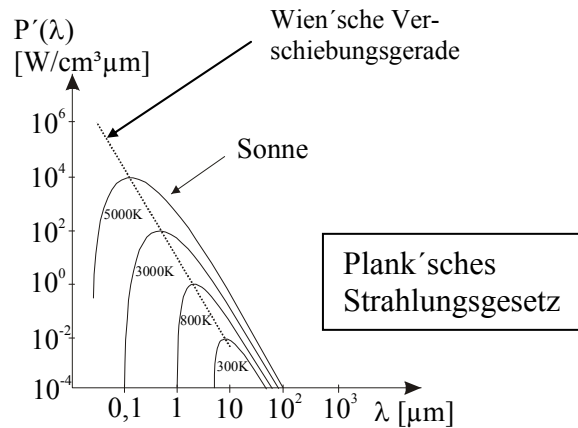


$U_D = f(N_D, N_A)$

Schwarzer Strahler:



„idealer“ schwarzer Strahler (Hohlraumstrahler)



- Emissionsvermögen  $\epsilon$
- Absorptionsvermögen  $\alpha$

$\epsilon < 100\%$   
→ absoluter schwarzer Strahler  $\alpha = 1$

→  $\epsilon/\alpha = \text{const.} \mid_{T,\lambda}$

Technische Oberflächen:

Metalle, blank & poliert	$\epsilon = 3\%$
Alublech, roh	$\epsilon = 7\%$
Nickel, matt	$\epsilon = 11\%$
Messing, matt	$\epsilon = 22\%$
Stahl, blank	$\epsilon = 24\%$
Stahlblech mit Walzhaut	$\epsilon = 77\%$
Stahl stark oxidiert	$\epsilon = 85\%$

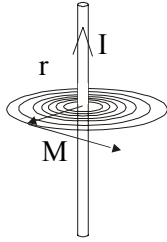
Wasser, Eis:  $\epsilon = 96\%$

- verschiedene Körper mit unbekanntem  $\epsilon$ :
- T-Meßproblem\*
  - Sender → Medium → Empfänger
- ⇒ Meßunsicherheit!!!

\*: da unbekannte Emission von allen beteiligten Elementen

## 2.5. Magnetische Effekte

Magnetfeldstärke:  $\vec{H} = C \frac{\vec{I}}{r}$  [H] 1. Maxwell'sche Gleichung



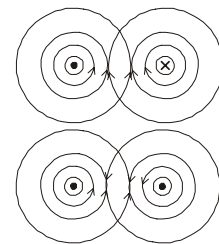
Alle Magnetfeldlinien haben:

- kein Ende
- keinen Anfang
- sind immer geschlossen

mehrere Leiterwicklungen → Spule:  $\sim$  homogene Feldbereiche im Zentrum der Spule  
 $\sim \vec{H} = \vec{I} \cdot n$

Vergleich von stromdurchflossenen Leitern:

- gegensinniger Strom: Abstoßung (Verdichtung der Feldlinien)
- gleichsinniger Strom: Anziehung (Verdünnung der Feldlinien)



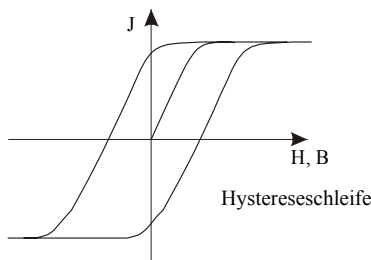
Kraft:  $F = \mu_0 \frac{I^2 l}{2\pi r}$  l: Länge des Leiters  
 r: Abstand vom Leiter  
 $\mu_0$ : Induktionskonstante/ magnetische Feldkonstante

Induktionsgesetz:  $U_{\text{ind}} = d\phi/dt$  2. Maxwell'sche Gleichung  
 $\phi = B \cdot A$   $\phi$ : Magnetischer Fluß, Induktionsfluß [Wb] = [Vs]  
 B: magnetische Induktion/ (magnetische) Flußdichte  
 A: von Feldlinien durchsetzte Fläche

für den leeren Raum:  $B = \mu_0 H$  [Wb/m<sup>2</sup>] = [Vs/m<sup>2</sup>] = [T]

für den Fall eines Werkstoffes:  $B = \mu \mu_0 H$   $\mu = \mu_r$ : relative Permiabilität

Magnetisierung:  $J = \kappa H$   $\kappa$ : magnetische Suszeptibilität  
 $\mu = 1 + \kappa$



Einteilung der Stoffe:

- diamagnetische Stoffe:  $\kappa < 0$ ;  $\mu < 1$
- paramagnetische Stoffe:  $\kappa > 0$ ;  $\mu > 1$
- ferromagnetische Stoffe:  $\kappa > 0$ ;  $\mu \gg 1$

Übergang von Ferromagnetismus → Paramagnetismus bei  $T > T_C$  ( $T_C$ : Currie – Temperatur)

Eisen:  $T_C = 774^\circ\text{C}$   
 Kobalt:  $T_C = 1131^\circ\text{C}$   
 Nickel:  $T_C = 372^\circ\text{C}$



Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter:

$$F = B \cdot I \cdot l$$

$$I = n \cdot e_0 \cdot A \cdot u$$

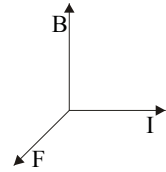
$n$  : Elektronendichte

$e_0$ : Elementarladung

$A$ : Leiterquerschnitt

$u$ : (mittlere) Geschwindigkeit

$$F = B \cdot l \cdot n \cdot e_0 \cdot A \cdot u$$

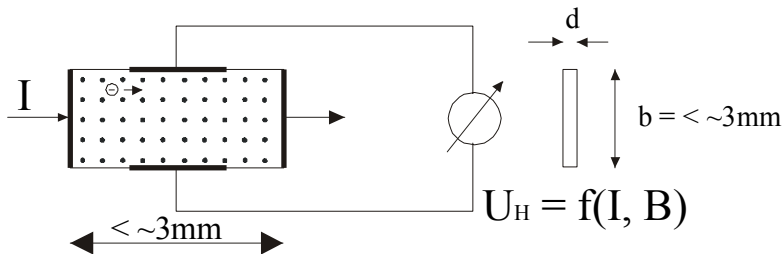


pro Leiterstück sind  $n \cdot A \cdot u$  Elektronen vorhanden

$$f = -e_0 \cdot u \cdot B$$

Kraft/ Elektron im Magnetfeld: Lorentzkraft

### 2.5.1. Hall – Effekt



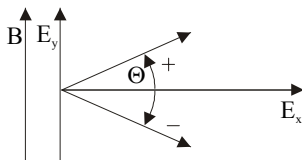
$$U_H = R_H \cdot I \cdot B / d = R_H \cdot b/A \cdot I \cdot B$$

$R_H$ : Hall – Konstante (abhängig von der Art des Ladungsträgers)  $\Rightarrow$  T-abhängig

Feldstärke:

$$E_x = j_x / \sigma$$

Ohm' sches Gesetz



$$E_y = U_H / b = R_H \cdot B_z \cdot j_x$$

mit  $j_x = I/A$  und  $\Theta$ : Hall-Winkel  $\Rightarrow$

$$E_y / E_x = R_H \cdot B_z \cdot \sigma = \tan \Theta$$

$B_z$ : Feldkomponente in z – Richtung

$$\tan \Theta = \mu_{nH} \cdot B_z$$

$\mu_{nH}$ : Hall – Beweglichkeit Elektronen

$$\tan \Theta = \mu_{pH} \cdot B_z$$

$\mu_{pH}$ : Hall – Beweglichkeit Löcher

$$\mu_{nH} = - R_n \cdot \sigma_n$$

$$\mu_{pH} = - R_p \cdot \sigma_p$$

$$(\sigma = \sigma_n + \sigma_p = e_0 n \mu_n + e_0 p \mu_p)$$

$\rightarrow$  Nachweis von Magnetfeldern (Homogenität, Feldstärke, ...)

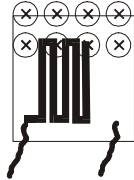
$\rightarrow$  Anwendung: Weg-, Drehzahl-, Winkelmessung, Positionsbestimmung

$\rightarrow$  Werkstoffe: Halbleiter, (Metalle, Effekte gering, da  $u$  klein)

### 2.5.2. Magnetische Widerstandsänderung/ Gauß - Effekt

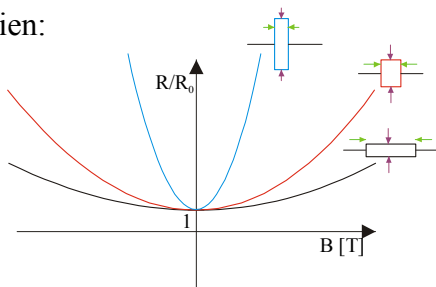
Werkstoffe: Halbleiter (mit großer Beweglichkeit, InSb)  
 Ferromagnetische Werkstoffe (Permalloy: 80% Ni, 20% Fe)

$B_z = 0$ : Ausgangswiderstand  $F_e = e \cdot E \rightarrow R_0$   
 $B_z > 0$ : Erhöhter Widerstand (aufgrund längerer Wege)  
 $F_m = -e \cdot u \cdot B_z \rightarrow R_0 + \Delta R = R_B$



$R_B = R_0(1 + k \cdot B^2)$       k: Geometriefaktor

Kennlinien:



Wichtig: Elektrodenabstand/ Elektrodenbreite

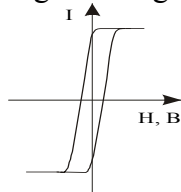
Empfindlichkeit:  $dR_B/dB = 2 R_0 k B$   
 $\rightarrow T$  – Empfindlichkeit (bis zu 2%/K)

Anwendungen: Weg-, Winkelaufnehmer  
 Drehzahlaufnehmer  
 Endschalter  
 Näherungsschalter

} Verschiebung von Paramagnet  
 und Feldplatte

### 2.5.3. Änderung der Magnetisierungsrichtung: Wigand – Effekt

- nicht kontinuierlich
- sprunghaft



Werkstoff: z.B. Vicalloy – Drahtspule (ca. 1300 Windungen, 15mm Länge,  $\varnothing = 0,3\text{mm}$ )

Änderung Magnetisierungsrichtung: Sprungimpuls  $\approx 20\mu\text{s}$ ; Impulshöhe  $\approx 2,5\text{V}$

- Vorteil:
- Verzicht auf eine Stromversorgung
  - Gute Signalhöhe
  - Einsatzbereich ( $200^\circ\text{C} < T < 175^\circ\text{C}$ )
  - hohe Sicherheit

## 2.6. Piezo - Effekt

- Drei verschiedene Effekte:
- piezoelektrischer Effekt
  - piezoresistiver Effekt
  - pyroelektrischer Effekt

### 2.6.1. Piezoelektrischer Effekt

Werkstoffe brauchen eine polare Achse (Vorzugsrichtung) im Kristall:

- Quarz,  $\text{SiO}_2$  (kristallin),  $k_p \downarrow$  aber  $T$  – Abhängigkeit  $\uparrow$ ;  $k_p = 2,3 \cdot 10^{-12}$  As/N;  $E = 8 \cdot 10^{10}$  N/mm<sup>2</sup>
- Metalloxide:  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiTaO}_3$ ,  $\text{BaTiO}_3$  ( $k_p = 2,5 \cdot 10^{-10}$  As/N,  $E < E_{\text{SiO}_2}$  (pyroelektrisch))  
Turmalin (Na, Ca)(Mg, Fe)<sub>3</sub>B<sub>3</sub>Al<sub>6</sub>Si<sub>6</sub>(O, OH, F)
- Piezopolymere

Vorteile Quarz:

- E – Modul  $\Rightarrow$  geringe Verformung bei Krafteinfluß  $\Rightarrow$  „Weglose“ Messung
- sehr gute Linearität ( $k_p = \text{const.}$ )
- sehr geringe  $T$  – Querempfindlichkeit
- sehr großer Meßbereich

Nachteil: kleiner Piezomodul  $\rightarrow$  kleines Signal (Elektrometermeßverstärker)

weitere Eigenschaften:

- Eigenkapazität:  $\sim 200 \text{pF}$
- Isolationswiderstand:  $\sim 10^{12} \Omega$
- Zeitkonstante der Entladung:  $0,5\%/s$

Anwendungen:

- Kraftmesser/ Druckmesser ( $< \sim 10^4 \text{Hz}$ )
- Taster ( $< \sim 10^2 \text{Hz}$ )
- Tonabnehmer ( $< \sim 10^4 \text{Hz}$ )
- Luftschall – Echolot ( $< \sim 10^6 \text{Hz}$ )
- Wasserschall – Echolot ( $< \sim 10^7 \text{Hz}$ , Fließgeschwindigkeit)
- Körperschall – Echolot ( $< \sim 10^8 \text{Hz}$ , akustisches Mikroskop)
- $T$  – Messung ( $T$  – Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von Piezowerkstoffen)

### 2.6.2. Piezo - Widerstandseffekt

keine Voraussetzungen (z.B. polare Achsen, ...), aber gering Leitfähigkeit

Effekt: bei Gitterformung (Kraft, mech. Spannung)

- $\rightarrow$  Änderung der Beweglichkeit der Ladungsträger (Zunahme spezifischer Widerstand)
- $\rightarrow$  Änderung der Bandlücke

Werkstoffe: Metalle/ Halbleiter: keine polaren Achsen

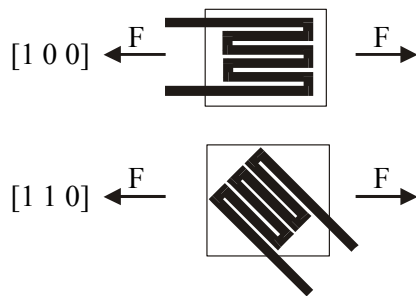
**$\rightarrow$  Meßtechnik DMS – Protokoll  $\leftarrow$**

!!! Taylor – Reihe !!!

( $k$  – Werte: konstant  $\approx 2$  (Metalle),  $k$  beliebig (Halbleiter))

Si:  $p$  - Txp:  $k > 0$   
n - Typ:  $k < 0$

Anwendung in Dehnungsmeßstreifen (DMS):



Werkstoffe: Halbleiter

Effekt ist stark abhängig von:

- Orientierung (Kraft bezogen auf Kristallorientierung)
- Dotierung
- Temperatur (als Störgröße)

zur Bestimmung von:

- Kraft (mechanische Spannung)
- Druck
- Drehmoment

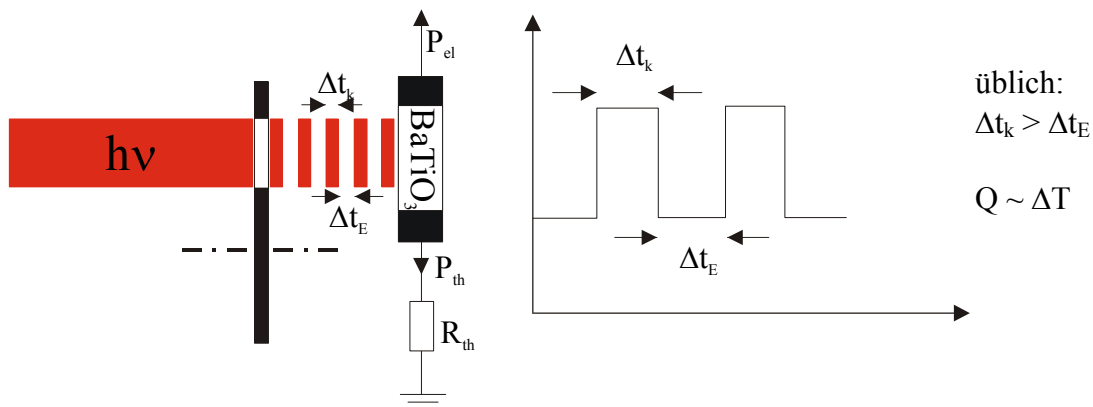
→ immer Verformung eines Aufnehmers und DMS (R – Änderung)

### 2.6.3. Pyroelektrischer Effekt

Beobachtung: Oberflächenladung bei Änderung der Temperatur des Werkstoffes  
 !!! nur T – Änderung liefert Effekt !!!

Werkstoff: polare Achse erforderlich (v.a. BaTiO<sub>3</sub>)

z.B.: Wärmestrahlung



- $h \cdot v = \text{const.}$  → choppen
- $h \cdot v \neq \text{const.}$  → kein choppen, schalten

### 3. Optische Sensoren

Werkstoffe: Halbleiter

Erfassung von optischen Parametern:

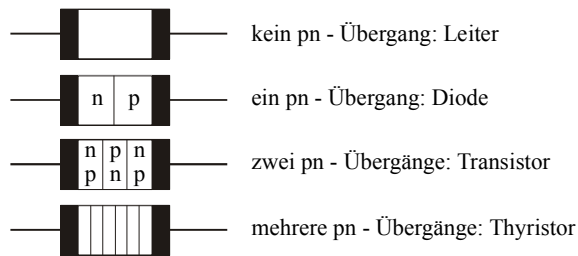
- Intensität (Helligkeit)
- Energie, Wellenlänge (Farbe)
- geometrische Verteilung der Intensität (örtliche Auflösung)
- zeitliche Verteilung der Intensität (Phasenlage, zeitliche Auflösung)

Effekte:

- innerer Photoeffekt
- Sperrschicht – Photoeffekt

#### 3.1. Opto – elektrische Sensoren

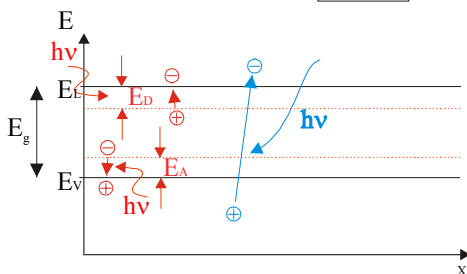
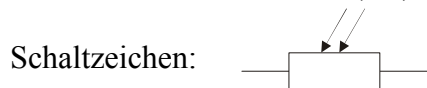
- Bauformen
- Gehäuse
- Werkstoffe
- Strukturen



Kombination von Elementen:

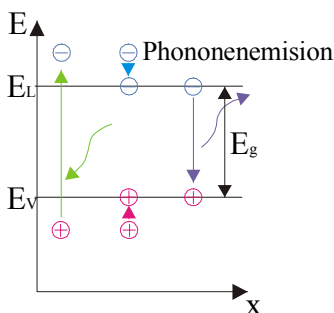
- zeilenförmig: Zeilen - Array
- flächenförmig: Flächen - Array

#### 3.1.1. Photo – Widerstand (PR), Photoleiter

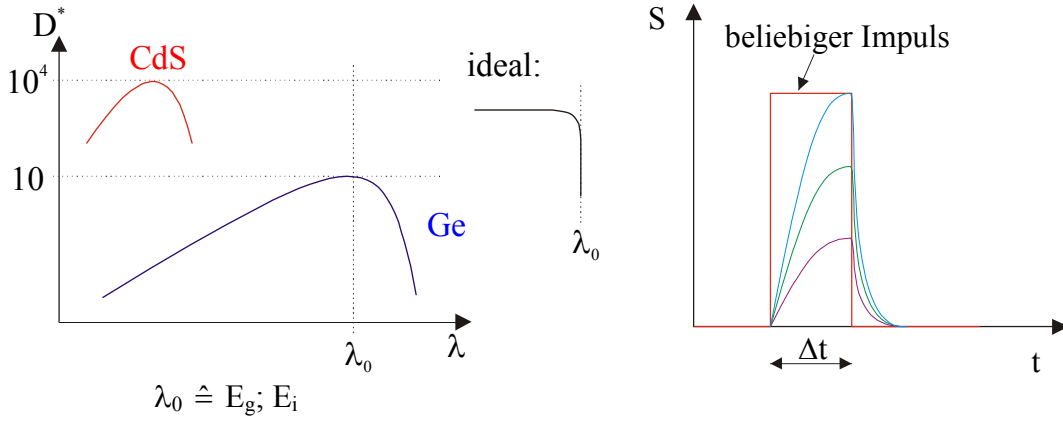


1. **intrinsischer Halbleiter**:  $h\nu \geq E_g$
2. **extrinsischer Halbleiter**:  $h\nu \geq E_D$ ; n – Typ Halbleiter  
 $h\nu \geq E_A$ ; p – Typ Halbleiter

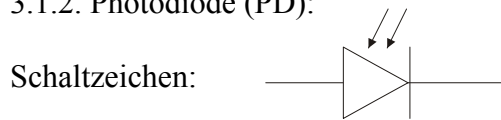
1. Halbleiter war PbS; immer noch wichtig



Phononen → „Rauschen“, Erwärmung  
 ⇒ Wahrscheinlichkeit nimmt mit zunehmender Energie ab  
 ⇒ „Grenze“ der Empfindlichkeit nach oben



3.1.2. Photodiode (PD):

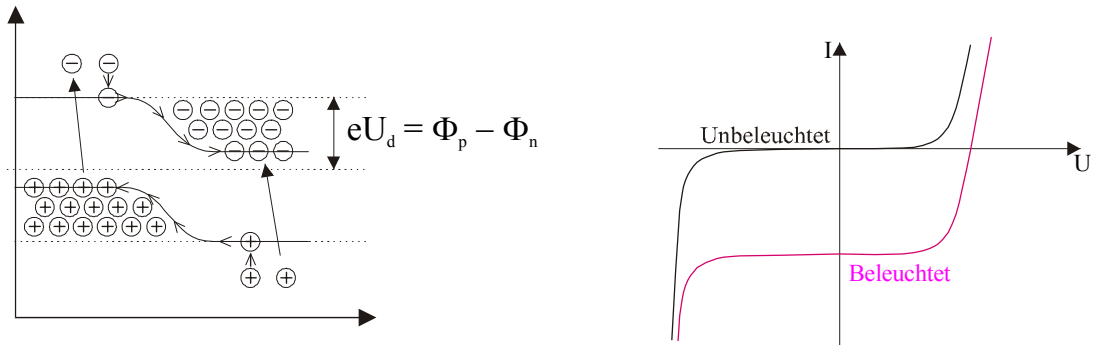


Signale:

- Photostrom (geschlossener Stromkreis):  $I_{SC} \sim P_{Licht}$   
 → Kurzschlußstrom (!in Richtung des Sperrstroms!)
- Photospannung (offener Stromkreis):  $U_{OC} \sim D_u$  (Diffusionsspannung  $< 1/e \cdot E_g$ )  
 → offene Klemmenspannung  $U$

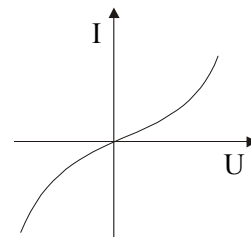
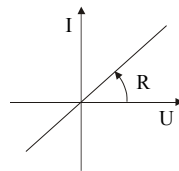
Effekt: Sperrschicht Photoeffekt

- n → n – Typ Halbleiter (Elektronen = Majoritätsträger)
- p → p – Typ Halbleiter (Löcher = Majoritätsträger)

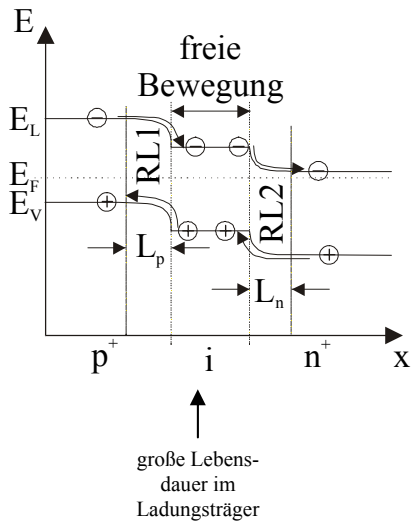


Kontakte in Halbleiter – Bauelementen:

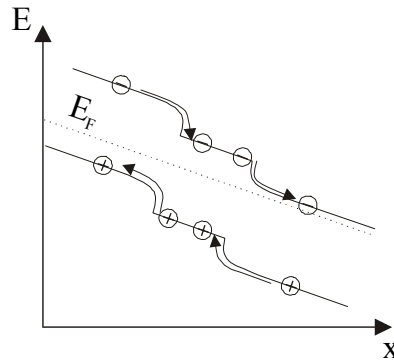
- Ohm'scher Widerstand (sperrfrei)
- Schottky – Kontakt
  - sperrend
  - Randschichten (Verarmungsrandschicht, Inversionsrandschicht, Anreicherungs-randschicht; Majoritätsträger)



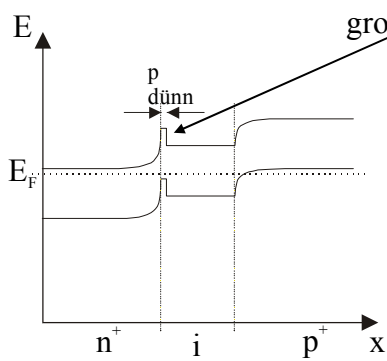
PIN – Diode:



bei Anlegung einer Rückwärtsspannung:



APD (AvalanchePhotoDiode), Lawinen PD:

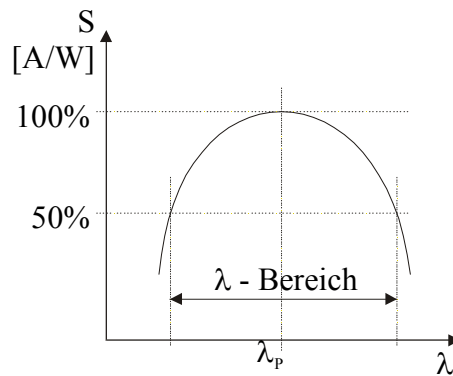


großer Widerstand:

- großer Spannungsabfall
- hohe Feldstärke
- hohe Beschleunigung
- hohe Ladungsträgergeschwindigkeit
- Stoßionisation zusätzliche Ladungsträger (bis zu Faktor 1000)

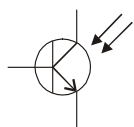
Einschub:

Spektrale Empfindlichkeit:

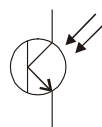


3.1.3. Photo – Transistor:

Schaltzeichen:



oder



### 3.2. Festkörper - Bildsensoren

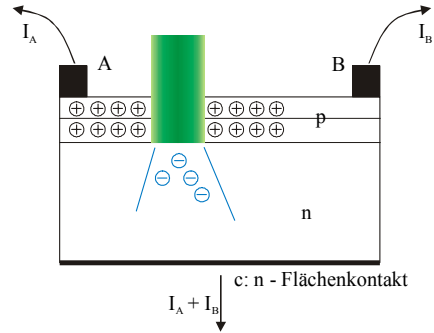
Zusätzlich: Ortsinformation (örtlich aufgelöste Strahlungsverteilung)

#### 3.2.1. Positions – Sensor, PSD (Position Sensing Device)

Bauelement Struktur: langgestreckte PIN – Photodiode

- Zeilenform
- Flächenform

Prinzip: Stromverteilung zwischen Kontakt A und Kontakt B:



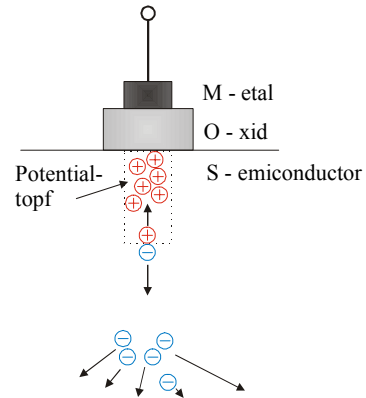
#### 3.2.2. Photodioden – Array, PD – Array:

auf einem Chip:

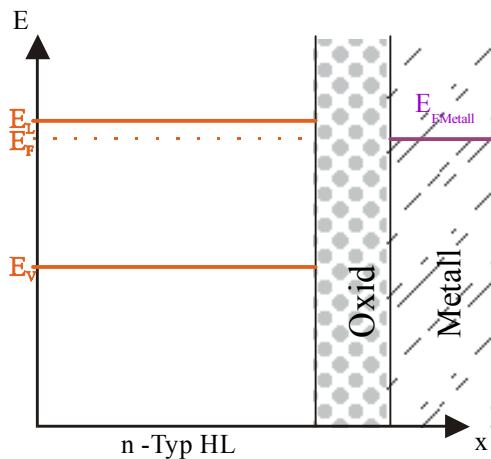
- Photodiode als Zeile
- Ansteuerung
- Schieberegister
- ...

#### 3.2.3. CCD, Change Coupled Device

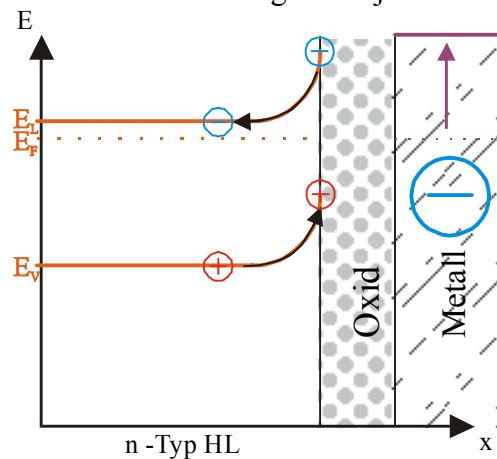
Randverbiegung durch angelegte Spannung: →



Potentialtopf → Verarmungsrandschicht:



+ Spannung ⇒  
Verarmung an Majoritätsträgern:





Typische Daten von CCD – Bausteinen:

	<b>Zeilen CCD</b>	<b>Flächen CCD</b>	
<b>Pixel</b>	< ~3456	~ 754 × 488	2048 × 2048
<b>Pixelgröße</b>	10,7µm × 10,7µm	11,5µm × 27µm	15µm × 15µm
<b>Dynamischer Bereich</b>	1000 : 1	60 : 1	
<b>Ladungsübertragung</b>	99,999%	99,995%	
<b>Belichtungszeit</b>	10ms	16,6ms	
<b>Transferrate</b>	50ns	50ns	
<b>Aktive Fläche</b>	40 × 3 mm <sup>2</sup>	12 × 8 mm <sup>2</sup>	

### 3.3. Anwendungsbereiche optoelektronischer Sensoren

3.3.1. Sicherungseinrichtungen: Lichtschranken, Taster

3.3.2. Datenübertragung: Optokoppler (PIN), Lichtwellenleiterkomponenten (APD)

3.3.3. Automatisierung:

- Zähler von Teilen oder Ereignissen (Lichttaster, -schranken)
- Prozeßkontrolle (Lichttaster, -schranken)
- Logistik (Strichcode – Taster)
- Robotik (Lichttaster, CCD – Kameras, inkrementale Weg-/ Winkelgeber)

3.3.4. Meßtechnik:

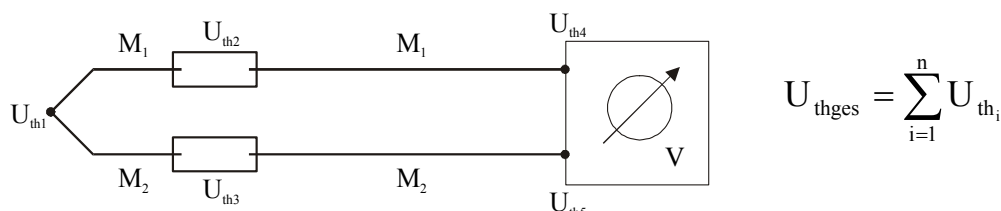
- Wegmessung/ -steuerung: Lichtschranke, Lichttaster, Positionsmesser, inkrementale Weg- / Winkelgeber, Dreipunkt – Entfernungsmesser (Triangulation), absolut Weg- /Winkelgeber
- Gas- /Wasseranalyse: Strömungsgeschwindigkeit, Bestandteile (gasförmig), Schwebstoffe

## 4. Thermische Sensoren

Effekte: Änderung elektrischen Eigenschaften (Leitfähigkeit, Spannung/ Thermospannung)

### 4.1. Thermoelemente

- Thermospannung:  $U_{th} = k_{th} \cdot (T - T_0)$   $T_0$ : Referenztemperatur
- Empfindlichkeit (Thermokraft):  $k_{th} = dU_{th}/dT$   $[\mu V/K]$



## 4.2. Metall - Widerstandsthermometer

Werkstoffe: Platin, Nickel

(siehe Meßtechnik)

!!! Systematischer Fehler: Erwärmung des stromdurchflossenen Leiters des Sensors !!!

## 4.3. Heißleiter

(siehe Meßtechnik)

( $B = 2500 \dots 5000\text{K}$ )

## 4.4. Kaltleiter

Anwendung: Schalter, da  $\Delta R \uparrow$  bei  $\Delta T \downarrow$

(Exponentialfunktion  $e^x$ , mit  $x \neq \text{const.}$ )

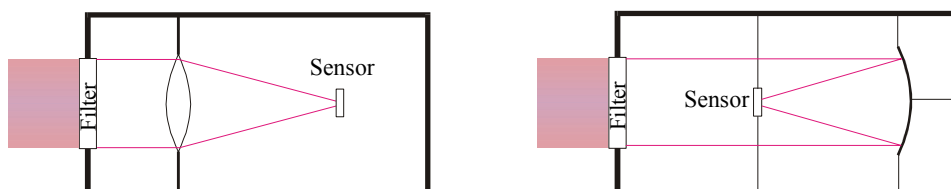
## 4.5. Silizium - Widerstandsthermometer

fast Punktkontakte

## 4.6. Berührungslose Thermometer

- Pyroelektrische Aufnehmer, Array
- Bolometer (siehe S. 14)
- Thermokette/ Thermosäule, träge (siehe S. 14/15)
- Photodioden

Aufbau in Kameras oder ähnlichen:



Optischer Strahlengang:

- Linse & Filter:  $\lambda$  - abhängig, da Transmission  $\rightarrow f = f(\lambda)$
- Hohlspiegel & Filter:  $\lambda$  - unabhängig, da Reflexion  $\rightarrow f \neq f(\lambda)$

Wärmebild – Kamera:

- Sensor – Flächenarray
- Sensor – Zeilenarray & ein Schwenkspiegel
- Punktsensor & zwei Schwenkspiegel (hochauflösend, aber langsamer)

## 5. Magnetische Sensoren

### 5.1. Reed – Diode

### 5.2. Induktive Aufnehmer

### 5.3. Näherungsmesser

### 5.4. Hall – Sensor

Anwendung: Beschleunigungsmesser  
träger Masse → Magnet → Hall – Sensor



### 5.5. Wiegand – Effekt (Ummagnetisierung)

Anwendung: Code – Karten, Geschwindigkeitsmessung

### 5.6. Magneto – Resistiver - Sensor

## 6. Piezoelektrische und piezoresistive Widerstände

- Piezoelektrischer Effekt: Oberflächenladung bei mechanischer Belastung
- Piezoresistiver Effekt: Änderung des spezifischen Widerstandes bei mechanischer Belastung

### 6.1. Piezoelektrische Sensoren

#### 6.1.1. Kraftsensor

#### 6.1.2. Drucksensor:

