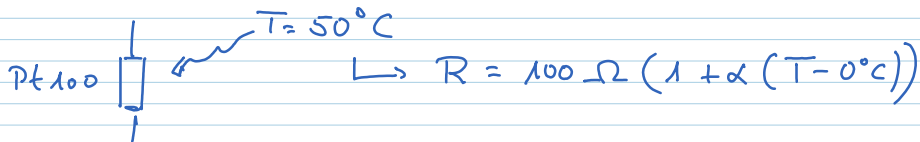


6.10.2017, Einführung: Einsatz von Sensortechnik, basiert auf Skript "Sensortechnik Bd II"

20.10.17 2. Einführung

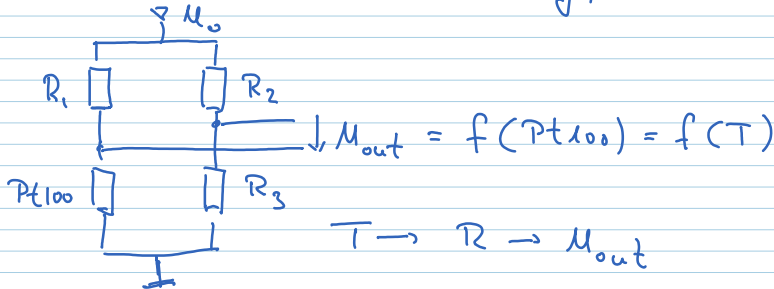
### 2.3. Umwandlungsketten

Def. Sensor: Ein Ding, das eine Messgröße in eine elektrische Größe umwandelt.



aus  $T$  wird  $R(T)$

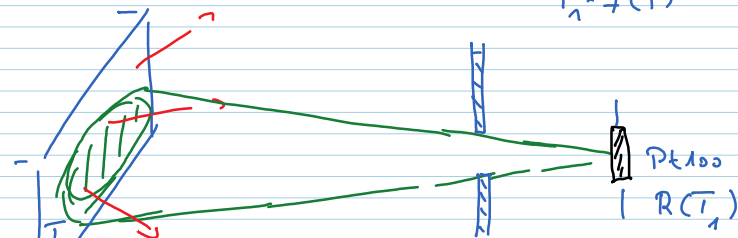
Baue Pt100 in Brückenschaltung;



Interessant wird die Umwandlung auf der Mess-Seite:

Beispiel: Pyrometer, berührungslose Temperaturmessung.

Wand mit Temp  $T$  Temp. Sensor  $T_1 = f(T)$



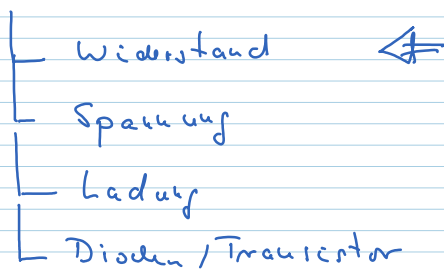
elm. Strahlung  
 Planck'sche Strahlung  
 Spektrum und Absolutwerte  
 $= f(T)$

Kette:  
 Temp.  $T$   
 $\Rightarrow$  elm. Spektrum  
 $\Rightarrow$  wird vom Sensor absorbiert, erwärmt auch  $T_1$   
 $\Rightarrow$  über Pt100  
 $R(T_1)$

### 3. Temperaturmessung

Sehr viele Verfahren.

- Elektrische Verfahren



- Optische Verfahren

#### 3.1. Metallische Widerstandssensoren

Grundlage:  $R(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2)$

$R_0$ : Widerstand bei  $T_0$ .

oft reicht:  $R(T) = R_0 (1 + \alpha(T - T_0))$

Cu:  $\alpha = 3,9 \cdot 10^{-3} \frac{1}{K}$

Ni:  $\alpha = 6,7 \cdot 10^{-3} \frac{1}{K}$

Pt:  $\alpha \approx 3,9 \cdot 10^{-3} \frac{1}{K}$

Anforderung an Material für Sensoren:

- Langzeitstabil
  - verarbeitbar
  - (Preis)
- } historisch Platin

Für Pt-Sensoren gibt es Normen, die Genauigkeit usw. spezifizieren. Meist verwendet:

Pt100,  $R_0 = 100 \Omega$  bei  $T_0 = 0^\circ C$

Pt1000  $R_0 = 1000 \Omega$  bei  $T_0 = 0^\circ C$

$\Rightarrow$  Pt100 bei  $100^\circ C$  hat  $R(100^\circ C) =$

$R(T) = R_0 (1 + \alpha(T - T_0))$   $T_0 = 0^\circ C$

$R(T=100^\circ C) = 100 \Omega \cdot \left[ 1 + \frac{3,9 \cdot 10^{-3} \cdot (100^\circ C - 0^\circ C)}{K} \right]$   $T = 100^\circ C$   
 $\alpha = 3,9 \cdot 10^{-3} \frac{1}{K}$

$= 139 \Omega$

Früher aus Draht gewickelt. Heute meist in Dünnschichttechnik. Einfach, preisgünstig und genau herstellbar.

Dadurch weitere Materialien verwendbar. Oft Nickel  
 Also Ni100 oder Ni1000 Sensoren.

### 3.2. Halbleiter-Sensoren

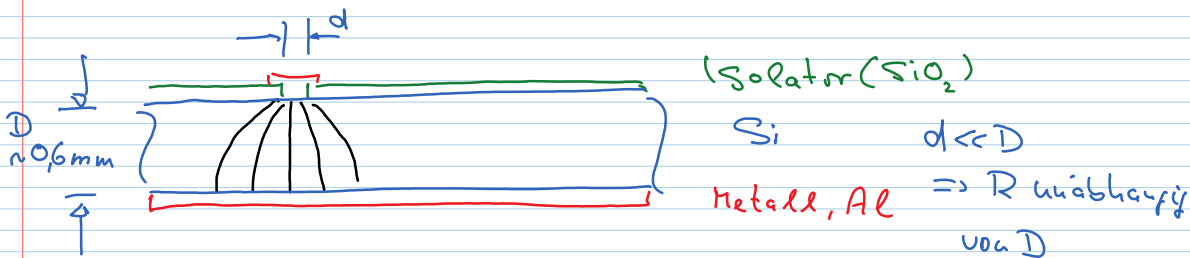
Widerstand aus Si als Temp.-Sensor.

Je nach Dotierung: niedrige Dotierung: je höher T desto mehr ELP, desto kleiner R.

hohe Dotierung: viele Elektronen, aber Gitteratome schwingen umso stärker je größer T, also umso größer R.

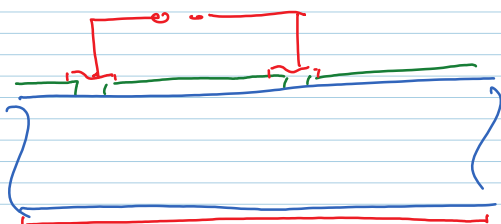
(wie beim Metall)

Als Aufbau wird der "Spreaded Resistance"-Aufbau benutzt.



Es gilt  $R = \frac{\rho}{\pi \cdot d}$   $\rho$ : spez Widerstand

Damit man beide Anschlüsse auf einer Seite, verdoppelt den Aufbau:

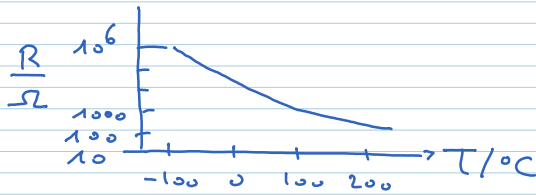


### 3.3. Heiß- und Kaltleiter

Es gibt Oxyd-Keramiken, die zwar nicht elektronisch leiten, aber die Ionenleitung aufweisen. Bei denen z.B.  $O^-$  Ionen durch die Keramik wandern.

Deren Beweglichkeit wächst sehr mit der Temperatur, also: je höher  $T$ , desto kleiner  $R$ .

Problem: schwierig reproduzierbar herzustellen.

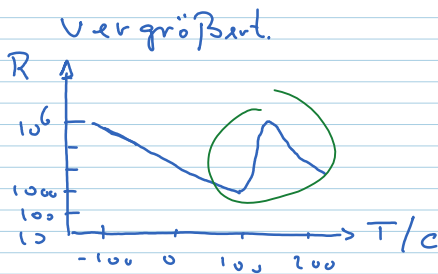


"Heißleiter."

Negativer Temperaturkoeffizient

NTC

Manche Keramiken ändern bei einer Sprungtemp.  $T_c$  ihre innere Struktur, wodurch sich  $R$  stark



Vergrößert.

"Kaltleiter"

Positive Temp. Coefficient PTC

Gelegentlich für Überwachungsaufgaben eingesetzt.

### 3.3. a. Vergleich

	Keramik	Hl.	Ni <sub>100</sub>	Pt <sub>100</sub>
Genauigkeit	niedrig	hoch		
Preis		hoch		

Integrierbarkeit: Kann der Sensor als Bauteil in eine integrierte Schaltung eingebracht werden?

Kann der Sensor ein Teil eines ICs sein?

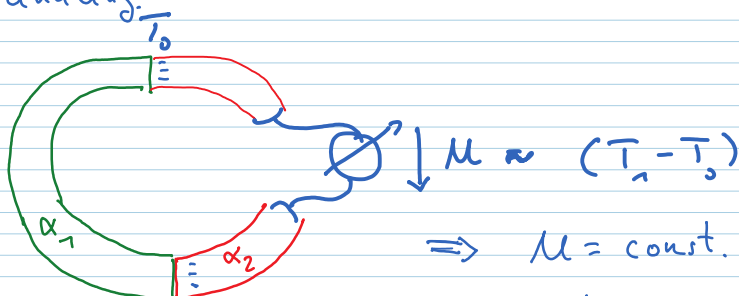
Hl-Sensor: Ja.

Pt / Ni : im Prinzip, zusätzlicher Fertigungsschritt  
 PTC / NTC : nein

### 3.4. Thermoelemente

Beruhet auf thermoelektrischem Effekt:

Berühren sich 2 Metalle, so gehen Elektronen aus dem Metall mit niedriger Elektronenbindung zu dem mit höherer Elektronenbindung. Über der Kontaktstelle entsteht eine Spannung.



$$\Rightarrow U = \text{const.} \cdot (T_1 - T_0)$$

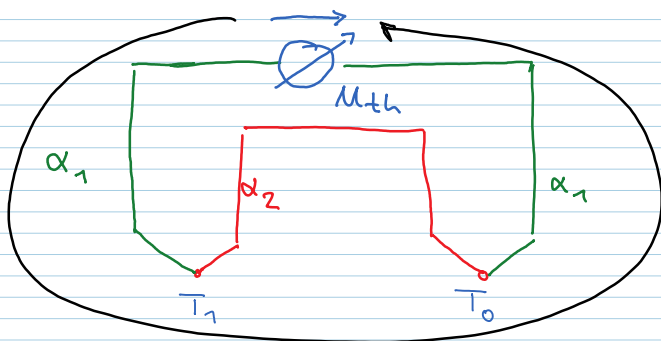
Mann kann zeigen, dass die const. von zwei Materialparametern,  $\alpha_1, \alpha_2$

Schwache Elektronenbindung.

Starke Bindung.

Wie hängt const. von  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  ab?

Dazu folgender Aufbau mit Rezept.



$$U_{th} =$$

$$+ \alpha_1 \cdot T_1$$

$$- \alpha_2 \cdot T_1$$

$$+ \alpha_2 \cdot T_0$$

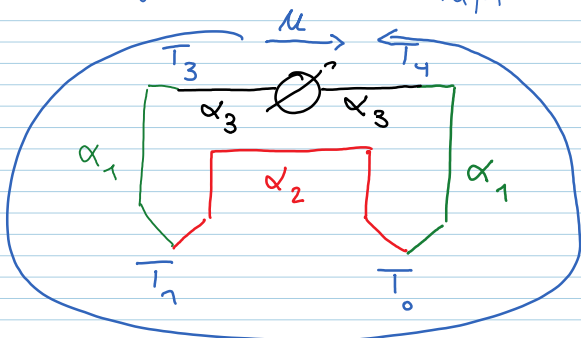
$$- \alpha_1 \cdot T_0$$

$$U_{th} = (\alpha_1 - \alpha_2) T_1 - (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot T_0$$

$$U_{th} = (\alpha_1 - \alpha_2) (T_1 - T_0)$$

Zwei praktische Beispiele:

- Standardaufbau mit  $\alpha_1, \alpha_2$ , dabei wird der Voltmeter mit Kupferkabeln angeschlossen



$$U = \alpha_3 \cdot T_3 - \alpha_1 \cdot T_3$$

$$+ \alpha_1 \cdot T_1 - \alpha_2 \cdot T_1$$

$$+ \alpha_2 \cdot T_0 - \alpha_1 \cdot T_0$$

$$+ \alpha_1 \cdot T_4 - \alpha_3 \cdot T_4$$

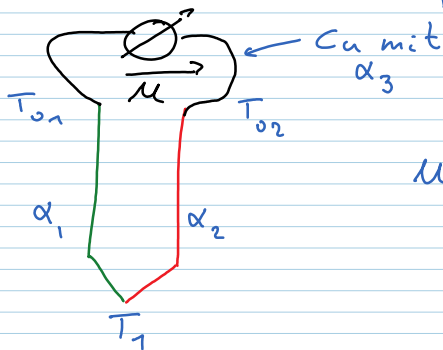
$$U = \underbrace{(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot (T_1 - T_0)}_{\text{"Messung"}} + \underbrace{(\alpha_3 - \alpha_1)(T_3 - T_4)}_{\text{"Störung"}}$$

Wann wird die Störung "klein", bzw. 0?

2 Möglichkeiten:  $\alpha_3 = \alpha_1$  : Material von  $\alpha_3$  muss gleichen thermoelektrischen Koeff. haben wie  $\alpha_1$

oder  $T_3 = T_4$  : Die Stellen, an die das Voltmeter angeschlossen ist, müssen gleiche Temperatur haben, welche Temperatur ist gleichgültig.

② Das bisher behandelte Thermoelement hat zwei Kontakte und 3 Drähte. Reale Thermoelemente haben meist nur 2 Drähte und 1 Kontakt. Wie sieht deren Temp.- Gleichung aus?



$$U = \alpha_3 \cdot T_{01} - \alpha_1 \cdot T_{01} + \alpha_1 \cdot T_1 - \alpha_2 \cdot T_1 + \alpha_2 \cdot T_{02} - \alpha_3 \cdot T_{02}$$

$$U = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot T_1 + \alpha_3 \cdot T_{01} - \alpha_1 \cdot T_{01} + \alpha_2 \cdot T_{02} - \alpha_3 \cdot T_{02}$$

Nun rufe durch geeigneten Aufbau dafür, dass  $T_{01} = T_{02} = T_0$

$$\Rightarrow U = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot T_1 - (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot T_0 = (\alpha_1 - \alpha_2) (T_1 - T_0)$$

Der gleiche Zusammenhang wie beim bisherigen Aufbau.

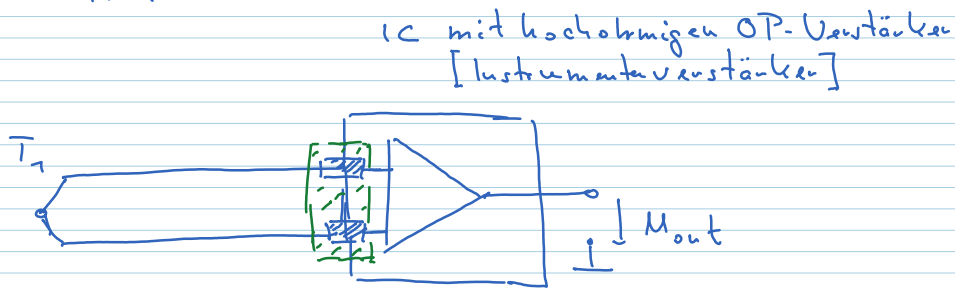
Mit Thermoelement kann nur eine Temp.- Differenz gemessen werden.

In der Grundlagenphysik wird oft ein Kontakt in Eiswasser gesteckt. Das ist in der Praxis schwierig.

Lösung: Halte die beiden Kontaktstellen zum Voltmeter auf gleicher Temperatur  $T_0$  und messe diese Temperatur mit weiterem Sensor.

Damit kann dann  $T_1$  bestimmt werden

## Typischer Aufbau:



(isolierten)

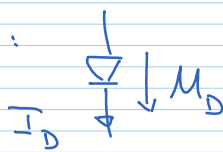
Anschlüsse aus dickem Kupfer auf einer Kupferunterlage, so dass beide Anschlüsse gleiche Temperatur haben. An der Unterlage ist ein Hl.-Temp-Sensor, der  $T_0$  misst und den Verstärker entsprechend korrigiert.

Dies alles in einem IC, der die Korrektur usw. enthält.

## 3.5. Dioden und Transistoren als Temperatursensoren

Bei Dioden und Transistoren ist die Kennlinie temperaturabhängig. Kann also zur Temp.-Messung ausgenutzt werden.

bei Dioden:



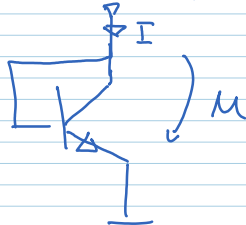
$$I_D = I_0 \left[ e^{\frac{e M_D}{k_B T}} - 1 \right]$$

↑ T-abhängig

Oft wird ein konstanter Strom durch die Diode geschickt. Dann ist  $M_D = f(T)$

Bei Dioden große Exemplarschwankungen.

Kein Problem bei Transistoren



bei  $I = \text{const}$  wird

$$M = f(T)$$

So wird oft die Temperatur in ICs oder CPUs gemessen.

## 3.6. Optische Methoden zur Temperaturmessung

Viele optische Effekte zeigen eine Temp.-Abhängigkeit.

- es gibt "Thermochrome", Materialien, bei denen sich die Farbe mit der Temp. ändert.  
einige reversibel, einige irreversibel.
- bei manchen Wachsarten ist die Schmelztemperatur  $T_s$  gut definiert: unterhalb  $T_s$  fest und undurchsichtig  
oberhalb  $T_s$  flüssig und durchsichtig
- bei manchen Materialien kann man einen Fluoreszenz-  
zustand mit Lebensdauer im Bereich Millisekunde  
anregen. Diese Lebensdauer ist stark von  $T$  abhängig

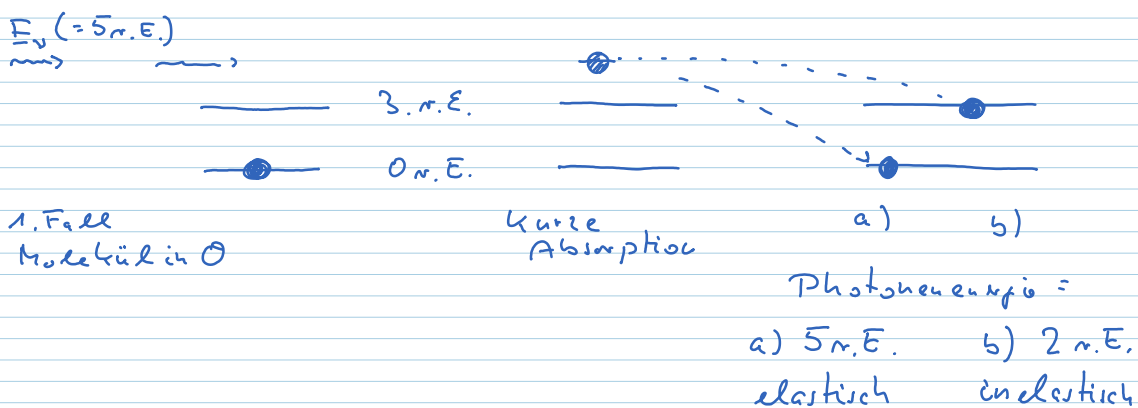
### 3.6.1. Ortsaufgelöste Raman-Temperaturmessung

Beruhet auf dem Raman-Effekt: elastischer/inelastischer Stoß eines Photons mit einem Molekül.

Beim "normalen" Stoß eines Photons mit einem Stoßpartner muss die Photonenenergie genau der Energiedifferenz von Zuständen entsprechen, damit es absorbiert werden kann.

Was geschieht, wenn dies nicht der Fall ist?

Betrachte ein Molekül, dessen Grundzustand einen nah benachbarten Zustand hat und weiter mit großem Abstand.

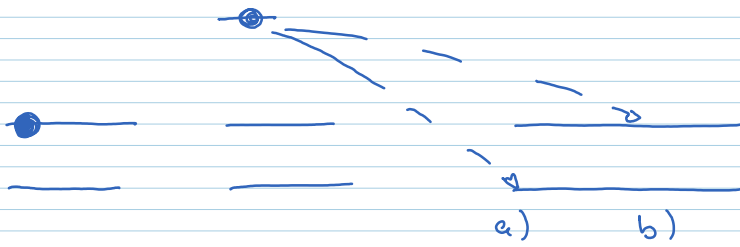


2. Fall Molekül in dem "oberen Grundzustand", das erfordert aber  
eine Temperatur  $T > 0K$



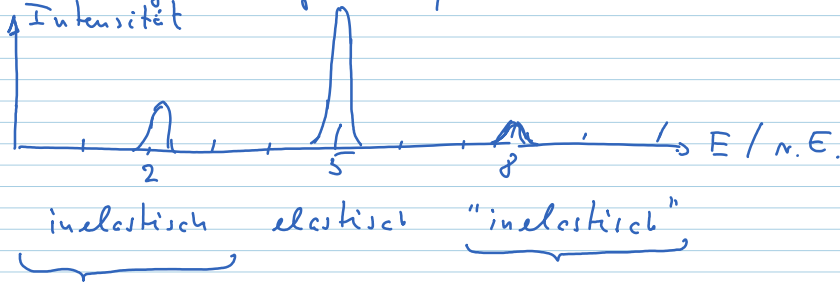


$$E_p = 5n \cdot E$$



Photonenergie =  
 a)  $(5+3)n \cdot E$     b)  $5n \cdot E$ .

Dies ergibt folgendes Spektrum:



Stokes-Linien  
 wenig temp. abhängig

Anti-Stokes-Linien  
 sehr temperaturabhängige Intensität.

$$\Rightarrow \frac{\text{Intensität (Anti-Stokes)}}{\text{Intensität (Stokes)}} = f(T) \quad \leftarrow \text{gut geeignet}$$

$$\frac{\text{Intensität (Anti-Stokes)}}{\text{Intensität (elastisch)}} = f(T, \text{andere Bestandteile, Grenzschichten})$$

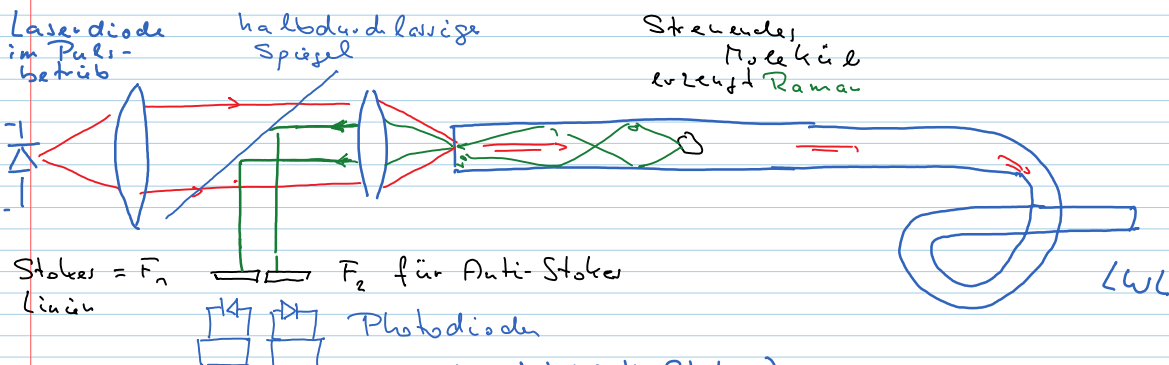
↑ schlecht geeignet

Stokes- und Anti-Stokes-Linien sowie die elastische Linie sind meist eng benachbart. Sie müssen daher entweder spektroskopisch oder durch sehr schmale Filter getrennt werden.

Da Raman-Streuung an jedem Molekül auftreten kann, kann dies universell eingesetzt werden.

Zum Beispiel auch an Lichtwellenleitern.

Typischer Aufbau:



$$\frac{\text{Intensität (Anti-Stokes)}}{\text{Intensität (Stokes)}} = f(T)$$

Nun wird der Laserstrahl als Puls ausgelöst. Misst man dann

$\frac{I(\text{Anti-Stokes})}{I(\text{Stokes})}$  als Funktion der Zeit, erhält man die Temperatur als Funktion des Ortes auf dem LWL.

So sind orts aufgelöste Temperaturmessungen möglich.

### 3.7. Statisches und dynamisches Ansprechverhalten

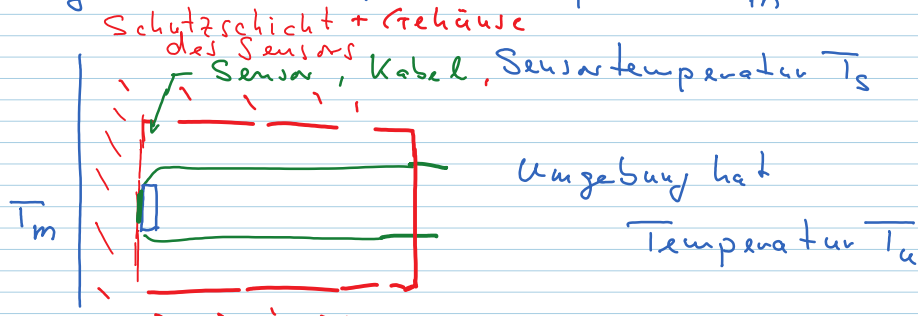
Zwei wichtige Einflüsse müssen bei T-Messungen berücksichtigt werden:

- ① **Statisch**: Wie hängen die Temperatur des Sensors und die der interessierenden Stelle zusammen.  
Betrachte die Wärmeübergangswiderstände  $R_{th}$
- ② **Dynamisch**: Wie schnell reagiert der Sensor auf T-Änderungen?  
Betrachte  $R_{th}$  und Wärmekapazität.

#### 3.7.1. Statisch

Betrachte ein einfaches Modell:

Messung einer Oberflächentemperatur  $T_m$

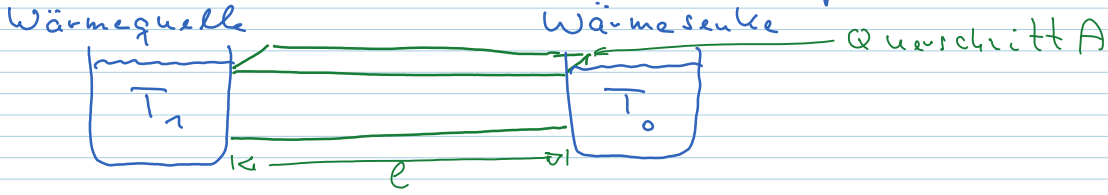


Also: Wärmeleitung vom Messobjekt zum Sensor und vom Sensor zur Umgebung.

Ganz einfaches Modell: eindimensionale Wärme-

Leitung.

Theorie zur 1-dimensionalen Wärmeleitung



Die pro Zeit fließende Wärmeenergie P

$$P \sim (T_1 - T_0) \quad P \sim A \quad P \sim \frac{1}{l}$$

$$\Rightarrow P \sim \frac{A}{l} \cdot (T_1 - T_0)$$

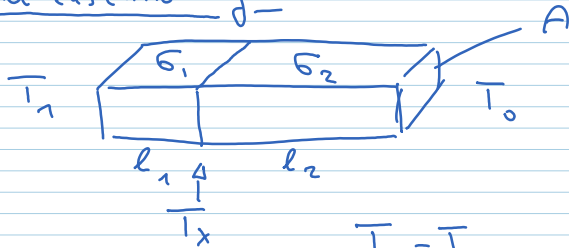
$$\Rightarrow T_1 - T_0 \sim \frac{l}{A} \cdot P$$

Das Material wird charakterisiert durch die Wärmeleitfähigkeit  $\sigma$

$$\Rightarrow (T_1 - T_0) = \frac{l}{\sigma \cdot A} \cdot P$$

Wärme Widerstand  $R_{th} = \frac{l}{\sigma \cdot A}$

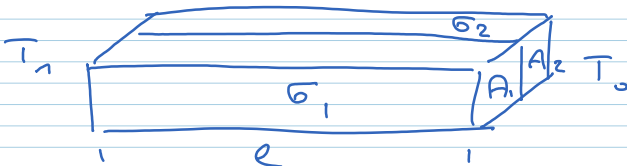
Reihenschaltung:



$$\frac{T_x - T_0}{T_1 - T_0} = \frac{R_{th2}}{R_{th1} + R_{th2}}$$

$$R_{th, ges} = R_{th1} + R_{th2}$$

Parallelschaltung

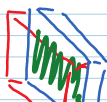


$$\frac{1}{R_{th, ges}} = \frac{1}{R_{th1}} + \frac{1}{R_{th2}}$$

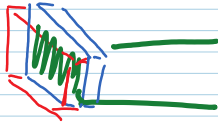
Anwendung auf obigen Sensor

Querschnitt-Pt100 / Schutzschicht =  $10 \text{ mm}^2$

Dicke der Schutzschicht:  $1 \text{ mm} = d_s$



2 Zuleitungen, Länge  $10 \text{ mm}$



2 Zuleitungen, Länge 10 mm  
 Querschnitt  $0.01 \text{ mm}^2$

Wärmeleitfähigkeit Kunststoff  $\approx 1 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$

Metall  $\approx 400 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$

$R_{th}$  für die Schutzschicht:  $R_{th,1} = \frac{1 \text{ mm}}{1 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \cdot 10 \text{ mm}^2}$

$$R_{th,1} = \frac{1 \text{ mm} \cdot \text{m} \cdot \text{K}}{10 \text{ W} \cdot \text{mm}^2} = 0,1 \cdot 1000 \frac{\text{K}}{\text{W}} = 100 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$R_{th}$  für Zuleitungen:

$$1 \text{ Zuleitung } R_{th} = \frac{10 \text{ mm}}{400 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \cdot 0,01 \text{ mm}^2} = 2,5 \frac{\text{mm} \cdot \text{m} \cdot \text{K}}{\text{W} \cdot \text{mm}^2}$$

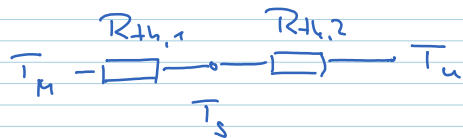
$$R_{th} = 2,5 \cdot 1000 = 2500 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

2 Zuleitungen, parallel  $R_{th,2} = 1250 \frac{\text{K}}{\text{W}}$

Nun sei: die zu messende Temperatur  $T_M = 100^\circ\text{C}$

Umgebungstemperatur  $T_u = 20^\circ\text{C}$

Sensortemperatur  $T_s$



$$\frac{T_s - T_u}{T_M - T_u} = \frac{R_{th,2}}{R_{th,1} + R_{th,2}}$$

$$= \frac{1250}{1350} = 0,93$$

$$T_s = 20^\circ\text{C} + 0,93 \cdot 80^\circ\text{C} = 94,7^\circ\text{C}$$

Abweichung von der zu messenden Temperatur 5,3%

$\Rightarrow$  Die sehr gute Wärmeleitung von metallischen Zuleitungen kann eine Temperaturmessung drastisch verschlechtern.

### 3.7.2. Dynamische Temperaturmessung

Einfaches Modell:

Ein Sensor mit Wärmeübergangswiderstand  $R_{th}$

vom Gehäuse zum Sensorelement und einer Wärmekapazität  $C_{th}$  hat die Temperatur  $T_0$  und wird plötzlich in eine Umgebung mit  $T_1$  gebracht.

Dann wird sich der Sensor in der Zeit erwärmen, umso langsamer, je kleiner die Temperaturdifferenz zwischen Sensor und  $T_1$  ist. Dies führt für  $T_s$  zu einer DGE, die so aussieht wie der Auf-/Entladen eines Kondensators

$$\frac{T_s(t) - T_0}{T_1 - T_0} = 1 - e^{-t/\tau} \quad \tau = R_{th} \cdot C_{th}$$

$\tau$  wird oft im Datenblatt des Sensors angegeben.

ACHTUNG:  $R_{th}$  hängt vom Umgebungsmedium, also auch  $\tau$

$\Rightarrow \tau$  ist unterschiedlich bei Messungen in Luft oder z.B. in Wasser.

Bei kleinen und damit "schnellen" Sensoren

liegt  $\tau$  im Bereich von Sekunden.

Typische Sensoren haben oft  $\tau$  im Bereich mehrere 10 Sekunden.

Um genau zu messen, muss man oft mehrere  $\tau$  lang messen.

### 3.7.3. Selbsterwärmung

Widerstandssensoren wie Pt100 benötigen einen Messstrom und <sup>eine</sup> Messspannung  $I$  und  $U$ , um den Widerstandswert  $R(T)$  zu bestimmen.

Dadurch wird aber im Sensor eine Verlustleistung

$$P = U \cdot I \text{ erzeugt, die den Sensor erwärmt.}$$

Der Sensor wird dadurch um eine Temperatur  $\Delta T$  erwärmt. Das verfälscht die Temperaturmessung.

Wenn man eine maximal akzeptable Erhöhung vorgibt, kann man den zulässigen Messstrom ermitteln. Dazu muss der Wärmeübergangswiderstand  $R_{th}$  bekannt sein.

Beispiel: Pt100, soll bis zu  $200^\circ\text{C}$  messen,  
 zulässige Selbsterwärmung sei  $0,5\text{K}$ ,  
 $R_{th} = 100 \frac{\text{K}}{\text{W}}$

$$\Rightarrow \Delta T = R_{th} \cdot P \Rightarrow P = \frac{0,5\text{K} \cdot \text{W}}{100\text{K}} = 5\text{mW}$$

$$P = U \cdot I \quad U = R \cdot I \quad \Rightarrow P = R \cdot I^2$$

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} \quad R(T=200^\circ\text{C}) \approx 180\ \Omega$$

$$I = \sqrt{\frac{5 \cdot 10^{-3}\text{W}}{180 \cdot 10^{-2}\ \Omega}} \approx \sqrt{3 \cdot 10^{-5}}\ \text{A} = \sqrt{30 \cdot 10^{-6}}\ \text{A} \\ \approx 5,5 \cdot 10^{-3}\ \text{A}$$

$$I \leq 5,5\ \text{mA}$$

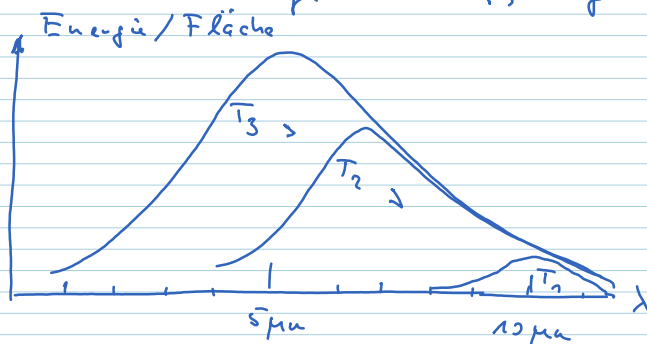
### 3.8. Berührunglose Temperaturmessung - "Pyrometrie"

Basis ist das Planck'sche Strahlungsgesetz.

Energie in einem kleinen Frequenzbereich  $d\nu$  um die Frequenz  $\nu$  pro Fläche ist:

$$\frac{8\pi \cdot h \cdot \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k \cdot T}} - 1} d\nu$$

Trägt man dies nicht gegen die Frequenz  $\nu$ , sondern gegen die Wellenlänge  $\lambda$  auf, ergibt sich



Aus der obigen Gleichung kann man unter anderem ableiten, wie groß ist die Gesamtenergie, die pro pro Fläche abgestrahlt wird:

$$\frac{E_{\text{ges}}}{A} = \sigma \cdot T^4$$

$$E_{\text{ges}} = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

Man kann auch ableiten, wie die Wellenlänge des Maximums von  $T$  abhängt

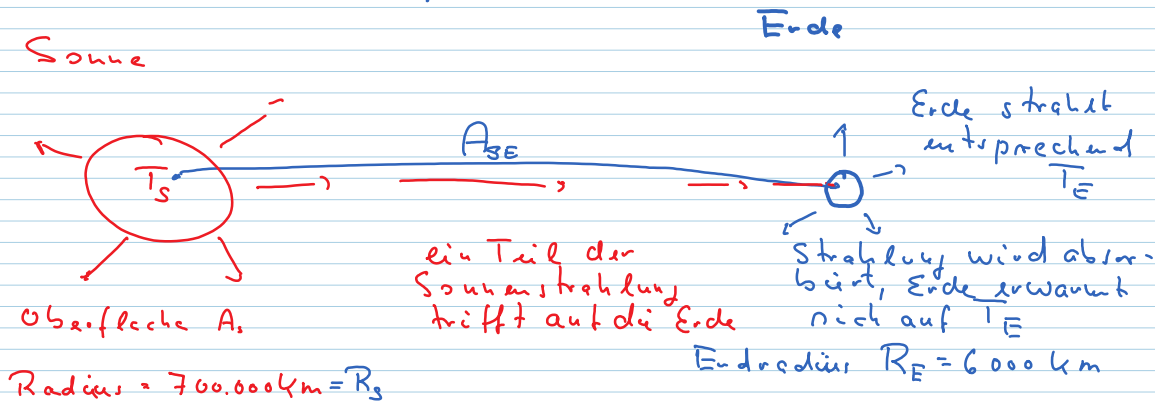
$$\lambda_{\text{max}} \cdot T \approx 3000 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad \text{Wien'sches Verschiebungsgesetz}$$

Das Wien-Gesetz wird in der Astronomie benutzt, um Sterntemperaturen zu bestimmen.

In der Pyrometrie wird oft das andere Gesetz  $\sigma \cdot A \cdot T^4$  benutzt. Wi2

Abspeicher in die Planetenphysik:

Berechne die Temperatur der Erde:



Einfaches Modell. Sonne und Erde sind schwarze Strahler

Die Sonne strahlt:  $E_s = \sigma \cdot 4 \cdot \pi \cdot R_s^2 \cdot T_s^4$

Davon trifft auf die Erde:

Abstand Sonne Erde =  $A_{SE} = 149 \cdot 10^6 \text{ km}$

Also wird  $E_s$  auf  $4 \pi \cdot A_{SE}^2$  gleichmäßig

verteilt. Die Erde zeigt der Sonne einen Querschnitt von  $\pi \cdot R_e^2$

e

Also trifft auf die Erde

$$E_s \cdot \frac{\pi \cdot R_e^2}{4 \cdot \pi \cdot A_{sE}} = E_s \cdot \frac{R_e^2}{4 A_{sE}}$$

Wenn die Erde sich auf  $T_e$  aufheizt, strahlt sie ab:

$$E_e = \sigma \cdot 4 \pi \cdot R_e^2 \cdot T_e^4$$

Dann muss gelten:

$$\cancel{\sigma} \cdot \cancel{4 \pi} \cdot \cancel{R_e^2} \cdot T_e^4 = \frac{R_e^2}{4 A_{sE}} \cdot \cancel{\sigma} \cdot \cancel{4 \pi} \cdot R_s^2 \cdot T_s^4$$

$$T_e^4 = T_s^4 \cdot \frac{R_s^2}{4 \cdot A_{sE}}$$

$$T_e = T_s \cdot \sqrt{\frac{R_s}{2 A_{sE}}} = T_s \cdot \sqrt{\frac{0,7 \cdot 10^6 \text{ km}}{2 \cdot 149 \cdot 10^6 \text{ km}}}$$

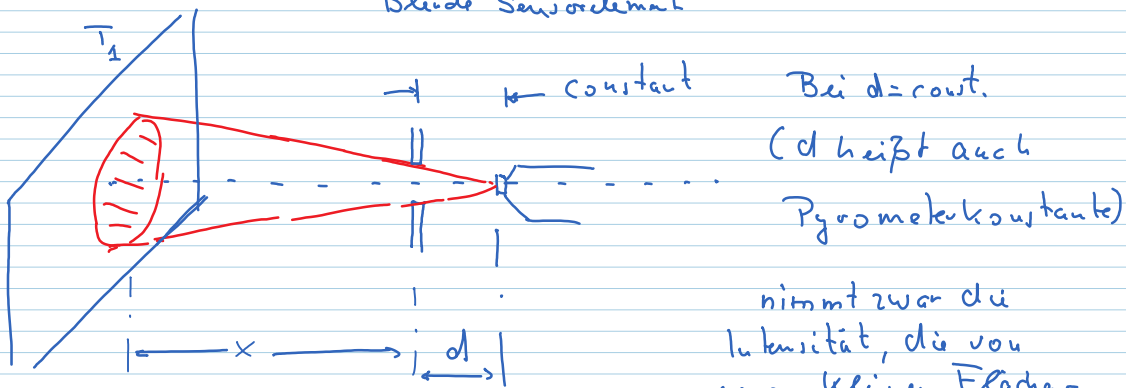
$$= T_s \cdot \sqrt{\frac{0,7}{300}} = 6000 \text{ K} \cdot 0,05 = 289 \text{ K} = 16^\circ \text{C}$$

Man sieht, dass  $T_e \sim T_s$  ist, aber auch vom Abstand  $A_{sE}$  abhängt.

In der industriellen Messtechnik darf dieser Abstand aber keine Rolle spielen.

Dazu dient folgender Aufbau:

Bleende Sensoranordn.



Bei  $d = \text{const.}$   
( $d$  heißt auch  
Pyrometerkonstante)

nimmt zwar die  
Intensität, die von  
einem kleinen Flächenelement

des Strahlers aus auf den Detektor fällt, mit  $\frac{1}{x^2}$  ab, andererseits nimmt die Strahlerfläche, die der Detektor durch die Blende sieht, mit  $x^2$  zu.

$\Rightarrow$  Die Gesamtintensität, die auf den Detektor fällt, ist unabhängig von  $x$ .



⇒ Die Temperatur des Detektors hängt eindeutig von der Temp. des Strahlers ab.

Achtung: Im Grunde genommen wird eine Art mittlere Temperatur der (im Bild roten) Messfläche ermittelt.

Insbesondere muss man darauf achten, dass die Messfläche nicht größer wird als das Objekt!

Ein Pyrometer aus Detektor und Blende heißt oft Loch- oder Blendepyrometer.

Man kann die Blende auch durch eine Linsenoptik ersetzen. Damit lassen sich kleine Messflächen erzeugen.

Bei Pyrometern müssen in der Praxis einige Punkte beachtet werden:

- ① Emissionskoeffizient  $\varepsilon$  der strahlenden Oberfläche
- ② Mögliche Absorption der Strahlung zwischen Strahler und Detektor.

### Emissionskoeffizient $\varepsilon$ .

Aus der Wärmelehre weiß man, dass schwarze Körper, die auftretende Strahlung vollständig absorbieren, den Absorptionskoeffizienten  $\alpha = 1$  haben, wobei die Wärmelehre zeigt:  $\alpha = \varepsilon$

Das Planck'sche Gesetz gilt für schwarze Körper mit  $\varepsilon = 1$ . Ist  $\varepsilon < 1$ , so muss man auf die

Planck'sche Formel noch  $\varepsilon$  multiplizieren.

Ist  $\varepsilon$  des Strahlers unbekannt, so kann man aus der Detektortemperatur nicht auf die des Strahlers schließen.

Lösung: a) für viele technische Oberflächen

ist  $\varepsilon$  näherungsweise bekannt.  
Dieser Wert kann dann bei manchen  
Pyrometern eingegeben werden.

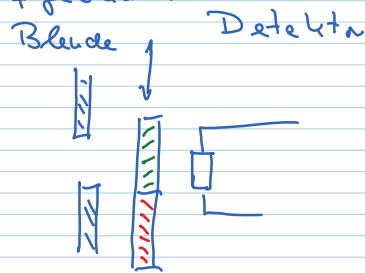
b) Messe gleichzeitig  $\varepsilon$  und  $T$ . Wie?

Messe die Intensitäten in 2 Wellenlängenbereichen,  
beide Intensitäten hängen von  $T$  ab, aber  $\varepsilon$  ist  
bei beiden eine multiplikative Konstante.

Das Verhältnis von zwei Intensitäten in verschiedenen  
 $\lambda$ -Bereichen hängt nur von  $T$ , nicht mehr von  $\varepsilon$   
ab. [Problem, wenn  $\varepsilon(\lambda)$  nicht konstant ist].

"Zweistrahlpymeter"

Diese werden gelegentlich mit beweglichen  
Filtern aufgebaut:



② Absorption (siehe Skript 106)

Viele Bestandteile der Atmosphäre absorbieren  
elektromagnetische Strahlung in verschiedenen  $\lambda$   
Bereichen, z. B. Wasser bei  $\lambda \approx 2,5 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 5-8 \mu\text{m}$

Damit hängt die auf den Detektor auftretende  
Intensität von der Luftfeuchte ab.

Lösung: Messe in  $\lambda$ -Bereichen, wo Wasser usw.  
nicht absorbieren.

"Einstrahlpymeter"

Man kann natürlich auch beim Zweistrahlpymeter  
entsprechende  $\lambda$ -Bereiche wählen, in denen keine  
atmosphärische Absorption stattfindet.

Welche Sensoren können als Detektoren verwendet werden?

Im Grunde genommen jeder Temperatursensor. Wobei dessen Oberfläche oft geschwärzt wird, um maximale Absorption zu erreichen. Oft werden Thermoelemente benutzt, die recht schnell sind. Eine besonders interessante Lösung sind „Bolometer“, die oft aus Si-Thermoelementen bestehen.

Siehe S 31 Band 2.

Gelegentlich werden spezielle Photodioden zur Registrierung der IR-Strahlung verwendet. Dabei muss das Band-Gap des Materials berücksichtigt werden.

So können Photodioden aus Si nur  $\lambda \leq 1.1 \mu\text{m}$  nachweisen, aus Ge bis  $\lambda \leq 1.8 \mu\text{m}$ . Damit ist der messbare Temp.-Bereich eingeschränkt.

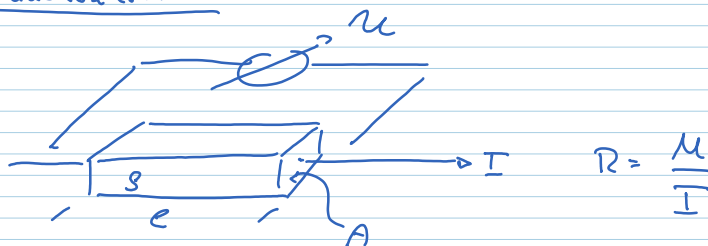
Es gibt aber (sehr teure) PD mit Nachweisgrenzen bis zu etwa  $10 \mu\text{m}$ , so dass auch bei Raumtemp. gemessen werden kann.

Photodioden haben den Vorteil sie erzeugen ein Signal wenn ein IR-Photon auftrifft. Sie müssen sich nicht erwärmen.

⇒ Sehr schnelle Messungen möglich.

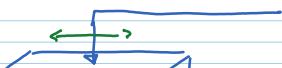
#### 4. Widerstandssensoren

Prinzip:

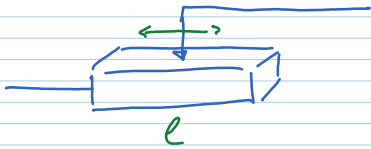


$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

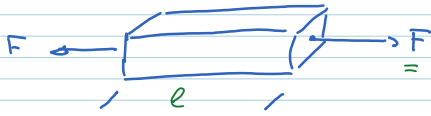
was kann man ändern?



was man nun ändern.



$l \rightarrow$  Potentiometer



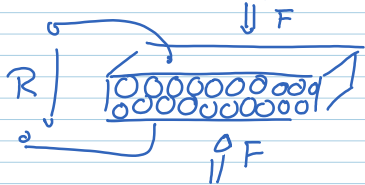
$l = f(F)$  Dehnungs-  
messstreifen



durch Temperatur  
durch mechanischen  
Druck

### 4.1. Drucksensoren / Mikrofon

Bette leitende kleine Kugeln / Pulver in eine Matrix,  
z. B. Kunststoff.



Der Übergangswiderstand von einem  
Bestandteil zum nächsten ist  
druckabhängig.  $R = f(F)$

Damit sind großflächige Sensoren einfach machbar.

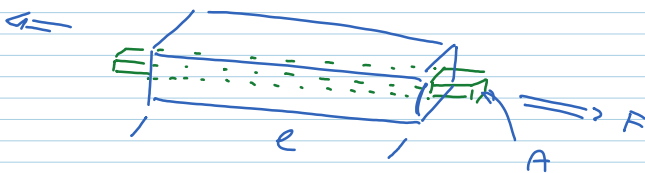
Beispiel:

Erkennung Sitzbelegung im Auto.

Mit Kohlekörnern in einer Kapsel mit dünner Membran  
ergibt "Kohlemikrofon".

### 4.2. Potentiometer

### 4.3. Dehnungsmessstreifen



$$l \rightarrow l + \Delta l$$

$$A \rightarrow A - \Delta A$$

$\Rightarrow$  beides erhöht den  
Widerstand

$$\Rightarrow R \sim F$$

Tatsächlich wird auch  $\rho$  geändert, vor allem bei  
Widerständen aus Halbleitern.

DMS gibt es als einzelne Sensoren für viele  
"größentechnische Anwendungen".

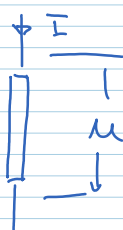
Und es gibt sie als integrierte Sensoren in vielen Sensor-ICs.

Beispiele  $\rightarrow$  Skript.

#### 4.4. Anemometer

Misst Luftgeschwindigkeit.

Grundlage:  
Luft  
 $\Rightarrow$   
Geschwindigkeit  
 $v$



$$R = \frac{M}{I} = R(T)$$

$P = M \cdot I$ , Verlustleistung  
führt zu Temperaturerhöhung

$$\Delta T = R_{th} \cdot P$$

$R_{th}$ : thermische Übergangswiderstand Sensor-Umgebung

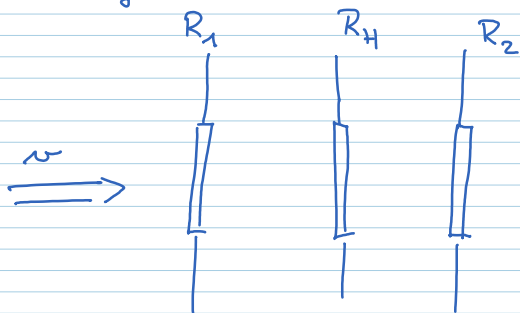
Clou:  $R_{th}$  hängt davon ab, ob die Luft nach bzw. von ihrer Geschwindigkeit

$\Rightarrow$  bei festem  $P = M \cdot I$  sinkt  $T$  (also  $R(T)$ ) mit zunehmendem  $v$  ab.

$\Rightarrow$  aus  $R$  und  $P$  kann man  $v$  ermitteln

Problem: Richtung der Geschwindigkeit nicht feststellbar.

Lösung: 3 Widerstände



Prinzip:

Erzeuge Wärmeleistung

$P$  in  $R_H$ .

Da  $R_1$  und  $R_2$  in gleichem Abstand von  $R_H$ ,

Beide werden durch  $R_H$  erwärmt.

In ruhender Luft ist  $R_1 = R_2$

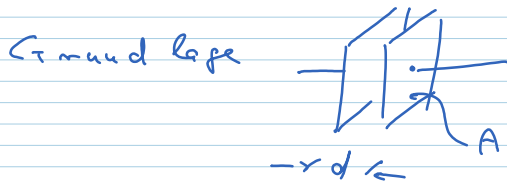
Jetzt Luft mit  $v$  von links nach rechts:

$R_1$  wird gekühlt,  $R_2$  wird wärmer.

$\Rightarrow$   $v$  und Richtung bestimmbar.

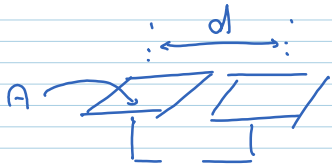
Heute meist in Dickschichttechnik. Versionen in Silizium sind die Zukunft.

## 5. Kapazitive Sensoren



$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

Oft wird in der Sensortik die Geometrie geändert:



$$C = f(\epsilon_r, d, A)$$



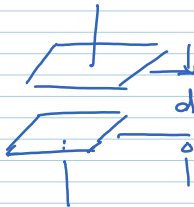
Koaxiale Anwendung

Was kann man ändern?  $C = f(\epsilon_r, d, A)$

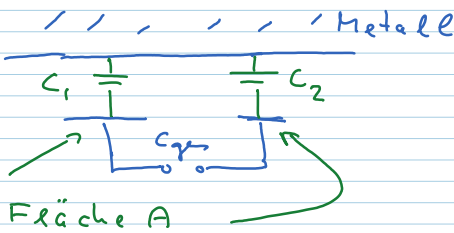
$\epsilon_r$  : Grundlage für chemische und biologische Sensoren, aber auch für Füllstandsmessung

$d, A$  : viele Anwendungen.

Betrachte folgende Aufbauten:



$$C = (\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A) \cdot \frac{1}{d} \Rightarrow \text{Abstandsmessung.}$$



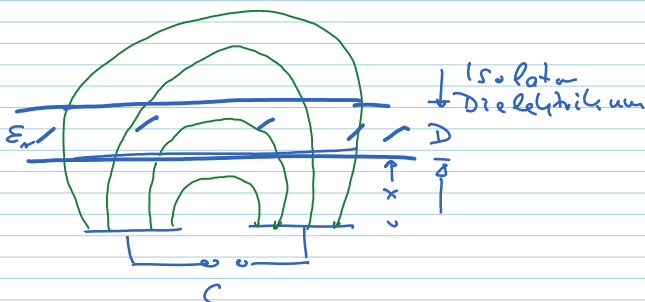
In guter Näherung

$$C_1 = C_2 = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

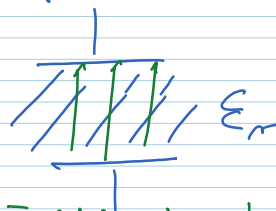
$$\Rightarrow C_{ges} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

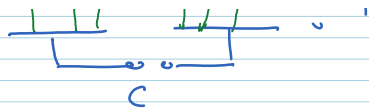
unabhängig von der Art des Metalls.

Abstandsmessung



vgl. mit Standardgeometrie.

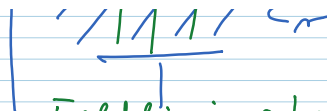




$C$  hängt ab vom Abstand  $d$ , von der Dicke  $D$  des Dielektrikums und von  $\epsilon_r$ .

=> Grundlage für Abstandsmessungen (bei bekanntem  $\epsilon_r$ ) oder zur Messung der Foliendicke  $D$

weitere Anwendungen: => Skript.



Feldlinien gehen durch das Dielektrikum

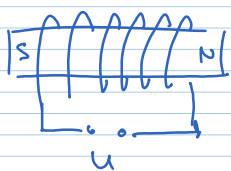
## 6. Induktive Sensoren

Hier gibt es 2 unterschiedliche Ansätze:

- Induktionsgesetz: Bewegung im/vom Magnetfeld erzeugt Strom / Spannung
- Wirbelstromverluste.

### 6.1. Induktionsgesetz:

Sensor ist Spule mit Magnet



Zahnrad aus Eisen

Die bewegten Zähne ändern das  $B$ -Feld, eine Spannung  $U$  wird induziert

=> Anzahl Zähne/Zeit kann bestimmt werden

=> Drehzahlmessung.

Abänderung: Spule ohne Magnet, dafür ist das zu messende Teil magnetisch.

### 6.2. Wirbelstromprinzip

Erzeuge ein hochfrequentes elektromagnetisches Feld,

Dieses erzeugt in einer Metallfläche in der Nähe

elektrische Ströme: Wirbelströme.

Es wird ein elektromagnetisches Wechselfeld mit einer Spule erzeugt. Dies würde in einer

benachbarten Spule einen entsprechenden Wechselstrom bewirken. Steht nun statt einer Spule eine Metallplatte in der Nähe, werden ebenfalls in dieser Platte Kreisströme erzeugt.

Je nach spezifischem Widerstand erzeugen die Kreisströme Spannungen, also Leistung, die in Wärme umgewandelt wird (Prinzip Induktionsherd). Diese Leistung entstammt der Spule. Über die Leistung, die der Spule zugeführt wird, kann man auf die Leistung in der Platte schließen.

Nun hängt die Stärke der Wirbelströme, also auch die Leistung, natürlich vom Abstand Spule-Platte ab.  $\Rightarrow$  eine Abstandsmessung wird möglich. Da die Verlustleistung vom spez. Widerstand abhängt, ist die Abstandsmessung materialabhängig. Und funktioniert nur bei leitfähigen Materialien.

Es gibt eine weitere Anwendung von Wirbelströmen in der Sensorik.

Die Wirbelströme werden nur in einer dünnen Schicht an der Oberfläche erzeugt, wobei die Eindringtiefe von der Frequenz abhängt.

$$\text{Eindringtiefe} \sim \frac{1}{\text{Frequenz}}$$

$\Rightarrow$  Oberflächefehler / Risse können die Wirbelströme stark behindern.

$\Rightarrow$  Durch Risse an der Oberfläche wird die Verlustleistung reduziert.

$\Rightarrow$  Wirbelstromverfahren zur Erkennung von Rissen in Metalloberflächen.

## 7. Herstellertechniken von Sensoren



## 7.1. Photolithographie

siehe Skript

## 7.2. Leiterplatten

Übersicht über verschiedene Technologien

Leiterplatte	<ul style="list-style-type: none"><li>- Cu-Folie auf Kunststoffsubstrat</li><li>- u.U. mehrfach übereinander (bis zu 30)</li></ul>	Strukturen ab $\sim 0.5 \text{ mm}$ $\geq \frac{1}{40}'' = 0.635 \text{ mm}$
Dickschicht-Technik	<ul style="list-style-type: none"><li>- Strukturen werden durch Siebdruck auf Keramik hergestellt</li><li>- mehrere Schichten möglich</li></ul>	Strukturen ab $\sim 0.5 \text{ mm}$
Dünnschicht-Technik	<ul style="list-style-type: none"><li>- Metalle werden auf das Substrat aufgedampft (Schichtdicke <math>\leq 1 \mu\text{m}</math>)</li><li>- mehreren Schichten möglich</li></ul>	Strukturen $\geq \mu\text{m}$ (alle Flachbildschirme)
Si-Technik	extrem fein, sehr komplex und benötigt sehr teures Equipment.	

## Leiterplattentechnik

$\Rightarrow$  siehe Skript

Es gibt einen Sensor zur Winkelpositions-/Positionsmessung, der nur in Leiterplattentechnik aufgebaut ist.

## Dickschichttechnik (7.4.)

Im Siebdruckverfahren werden Pasten auf ein

Keramiksubstrat gedruckt. Diese Pasten enthalten z.B. Cu oder Materialien mit geringerer Leitfähigkeit oder nur Isolatoren.

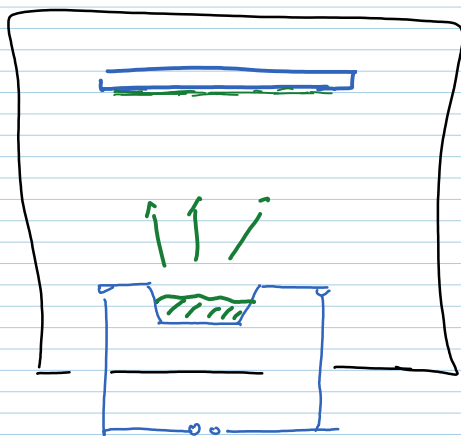
Die pastösen Schichten werden im Ofen getrocknet und dann bei hohen Temperaturen aufgeschmolzen. So entstehen sehr widerstandsfähige Schichten und Verbindungen. Kann mehrfach gemacht werden. Widerstände (und Kondensatoren) können so integriert werden.

## Dünnschichtschaltungen

Dünne Schichten werden auf ein Substrat im Vakuum aufgebracht. Metalle, Halbleiter, Nichtleiter sind möglich. Bei anschließender Photolithographie sind Strukturen ab etwa  $\mu\text{m}$  erreichbar.

Verschiedene Techniken zum Aufbringen von dünnen Schichten.

### a) thermisches Aufdampfen



Vakuumkammer

Substrat + dünne  
Dampf Schicht

Aufdampfmaterial

"Schiffchen"  
wird durch Strom  
aufgeheizt

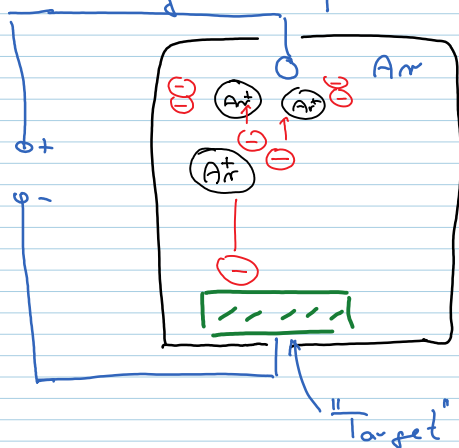
### b) Elektronenstrahl-Aufdampfen.

Statt Erhitzen durch elektrischen Strom wird ein Elektronenstrahl erzeugt und mit "hoher" Energie auf das Material geschossen, das dann lokal erhitzt und verflüssigt wird.

Größere Materialauswahl als bei a).

## c) Sputtern

Man erzeugt eine Gasentladung zwischen dem aufzu dampfenden Material und einer weiteren Elektrode (ähnlich wie Neonlampe oder Hg-Dampf-lampe)



Elektron wird  
ausgelöst

wird beschleunigt,  
trifft auf Ar-Atom,  
schlägt Elektron heraus  
=> weiteres Elektron  
und Ar<sup>+</sup>-Ion

=> die Elektronen werden  
wieder beschleunigt.  
... "Elektronenlawine"  
entsteht.

die Ar<sup>+</sup>-Ionen prallen auf  
das Target und lösen Elektronen  
aus.

=> es folgen weitere Lawinen, die  
Gasentladung brennt stabil.

Allerdings können die Ar<sup>+</sup>-Ionen  
auch Targetatome heraus schlagen

(Sputtern)

Diese gesputterten Atome können sich auf  
einem Substrat in der Nähe  
niederschlagen und bilden eine dünne  
Schicht.

## Mikrostrukturtechnik in Silizium

Baut auf der elektronischen Si-Technik auf.

Beinhaltet auch Dünnschichttechnik mit Photolithographie  
für elektrische Verbindungen.

Aber zusätzlich wird das Si mit III- bzw. V-wertigen  
Atomen dotiert, um p- bzw. n-leitendes Si zu erzeugen.

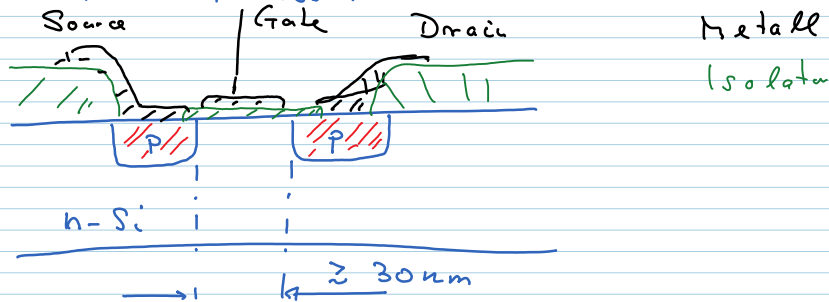
Diese Dotierung erfolgt oft durch "Kerophysik".

Die Dotierungsatome werden durch einen Beschleuniger

beschleunigt und auf das markierte Si geschossen.

⇒ Durch Dotierung und Beschichtung mit Strukturierung von Isolatoren bzw. Leitern lassen sich dann beliebige elektronische Schaltungen herstellen.

z.B. PMOS-Transistor



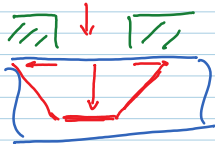
Zur Herstellung von Sensoren werden 2 Unterschiede

- wichtig:
- Sensorstrukturen sind größer, also muss man nicht so hochintegriert arbeiten
  - man muss <sup>oft</sup> dreidimensionale Strukturen erzeugen

Dazu 2 wichtige Techniken:

- anisotrope Ätzen

normales Ätzen ist isotrop, die Maske wird unterätzt.



⇒ enge, tiefe Strukturen nicht herstellbar

anisotropes Ätzen nutzt aus, dass manche Ätzflüssigkeiten bei Kristallen unterschiedliche Ätzgeschwindigkeit in verschiedenen Kristallrichtungen haben.

⇒ tiefe, enge Strukturen herstellbar.

- Arbeiten mit Opferschichten.

⇒ Skript

## 8. Piezoelektrische Sensoren

Bei manchen Stoffen erzeugt ein mechanischer Druck eine Oberflächenladung.

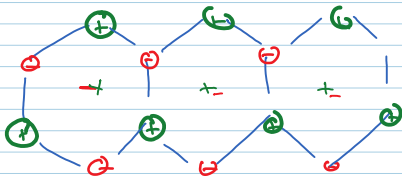
Und zwar bei

- ferroelektrische Materialien
- Quarz

## 8.1. Grundlagen beim Quarz

Quarz ist ein Kristall aus  $\text{SiO}_2$ . Aus dem Kristall lassen sich Scheiben in verschiedenen Kristallrichtung herauschneiden.

Bei einer bestimmten Richtung gibt es den Piezoeffekt. Dann liegen die Atome folgendermaßen.

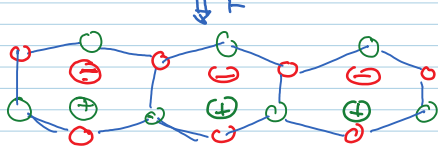


pos. und neg. Ladungsschwerpunkt in der Mitte

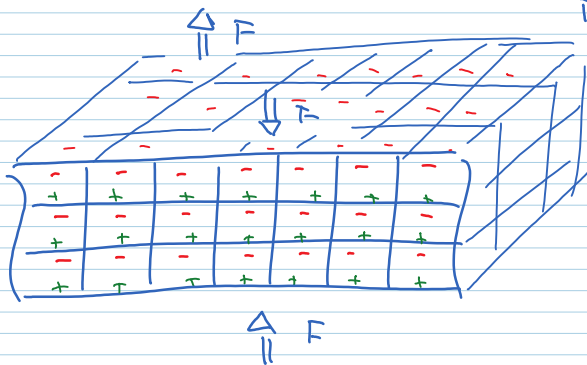
nun über Druck aus:

$\Rightarrow$  die  $\ominus$  werden im Bild nach oben, die  $\oplus$  nach unten gedrückt

$\Rightarrow$  die Ladungsschwerpunkte werden getrennt



} es entsteht ein elektrische Dipol. Dipolmoment proportional zum Druck



oben und unten entsteht eine Oberflächenladung

dabei gilt: Oberflächenladung  $\sim$  Druck

$$\frac{\text{Ladung } Q}{\text{Fläche}} \sim \frac{\text{Kraft } F}{\text{Fläche}}$$

$$Q \sim F$$

$$\Rightarrow \left| \begin{array}{l} Q = d \cdot F \quad d: \text{piezoelektrische Konstante} \\ \text{Quarz: } d = 2,3 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}}{\text{N}} \end{array} \right|$$



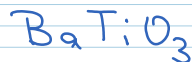
$$U = \frac{10^{-9} \text{ Cb}}{0.4 \cdot 10^{-12} \text{ F}} = \frac{10^3}{0.4} \text{ V} = 2,5 \text{ kV}$$

$$\approx 400 \cdot \frac{10^{-12} \text{ F mm}^3}{10^3 \text{ mm}} = 0.4 \cdot 10^{-12} \text{ F}$$

## 8.2. Piezoelektrische Keramiken

Benutzen ferroelektrische Materialien,

z. B.

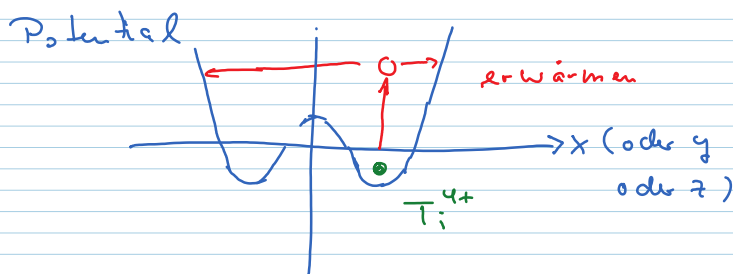


Struktur der Elementarzelle  $\rightarrow$  Skript

Dabei sitzt das  $\text{Ti}^{4+}$  nicht in der Zellenmitte, sondern in einem von 6 Potentialtöpfen in  $+x$ ,  $+y$ ,  $+z$ -

Richtung. Eine Zelle zeigt also ein Dipolmoment in einer Richtung. Makroskopisch sind die Momente aller Zellen statistisch verteilt, also kein makroskopisches Dipolmoment.

Man erfährt das  $\text{Ti}^{4+}$ -Ionen in jeder Richtung folgende



Man wird das Material so weit erwärmt, dass die Energie des  $\text{Ti}^{4+}$  oberhalb des Peaks in der Mitte ist.

Dann kann es sich im ganzen Ionenraum bewegen.

Dann wird elektrisches Feld angelegt, z. B.  $\ominus$  an der  $+x$  Seite. Dann werden alle  $\text{Ti}^{4+}$ -Ionen zur  $+x$  Seite gezogen. Die Temperatur wird abgeschaltet.

Alle  $\text{Ti}^{4+}$ -Ionen sitzen im gleichen Topf in ihrer Zelle.

$\Rightarrow$  Alle Dipolmomente zeigen in die gleiche Richtung.

$\Rightarrow$  Das Material zeigt Oberflächenladung.

Aber dies nur im Vakuum!

(UHV)

In Normalatmosphäre wird diese Oberflächenladung durch Ladungen in der Luft sofort neutralisiert.

Aber Änderungen der Oberflächenladung sind messbar. D.h. bei diesen Stoffen ist die gemessene Ladung  $Q$  eigentlich die Ladungsänderung zum Zustand ohne äußere Kräfte. Aber auch hier gilt

$$Q \sim F$$

Da die Dipolmomente der Zellen durch den

Polarisierungsvorgang (Erhitzen, Spannung, Abkühlen) ausgerichtet werden, müssten die Zellen nicht mehr regelmäßig angeordnet sein. Statt als Einkristall kann man sie als Keramik herstellen.

Vorteil: - einfacher + billiger herzustellen

- Form des Sensors kann problemangepasst werden.

Nachteil: Werden die Sensoren wieder so erwärmt dass die Ti-Ionen über "den Peak" gelangen verschwindet der makroskopische Piezo effekt.

8.6

## 8.6. MS-Sensoren für Schall und Ultraschall.

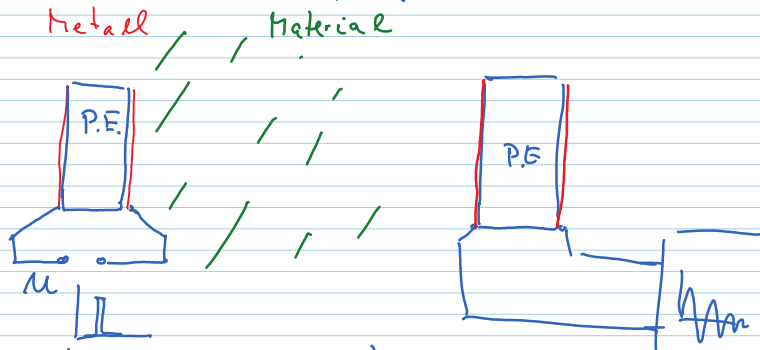
Ein Körper aus p.e.-Material hat eine Resonanzfrequenz, die durch Geometrie und Material bestimmt



wird. Wird er durch einen kurzen Spannungspuls angeregt, schwingt er in dieser Resonanzfrequenz, je nach Dämpfung unterschiedlich lang.

Trifft eine Druckwelle mit dieser Resonanzfrequenz auf den Körper, schwingt er besonders stark.

Also kann man folgenden Aufbau realisieren:



Schwingt in Resonanzfrequenz erzeugt eine Druckwelle detektiert die Druckwelle.

Nun ist  $M$  eine Druckwelle, die sich in einem Körper ausbreitet. Bei Inhomogenitäten im Material wird die Welle z.T. reflektiert, z.T. transmittiert.

Wichtig ist dabei die akustische Impedanz  $Z$

$$Z = \text{Schallgeschwindigkeit} \cdot \text{Dichte} = c \cdot \rho$$

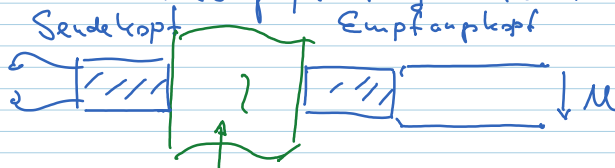
Sind an einer Grenzfläche die akustischen Impedanzen sehr unterschiedlich, wird kaum transmittiert, mehr reflektiert. Je ähnlicher die  $Z$ , desto mehr Transmission.

⇒ Transmission in Luft ist schwach.

⇒ Will man US vom Strahler in einen Festkörper einbringen, darf keine Luftschicht dazwischen sein. Also entweder aufkleben oder benutze Koppel Flüssigkeit, z.B. Koppelgel oder Wasser.

Aufbau des Senders → Skript

Durchschallungsprüfung: Aufbau

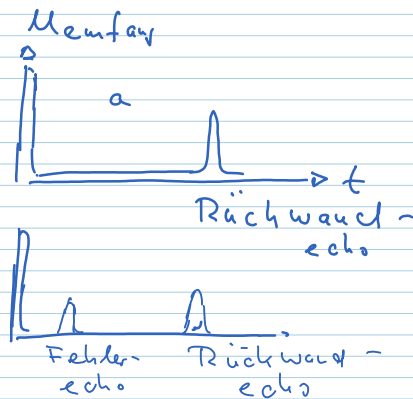
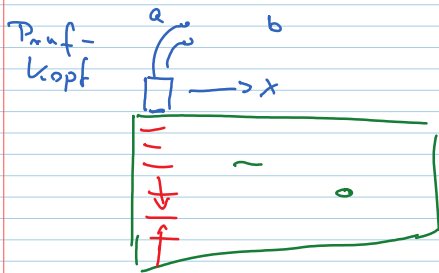


Prüfling mit z.B. Lücken Riss, reflektiert die US-Welle teilweise

transmittierte US-Intensität nimmt durch den Riss ab.

Wenn Sender + Empfänger auf gleiche Seite (u.U. als ein Schwinger), gibt es das Puls-Echo-Verfahren

Man misst die Laufzeit zwischen Auslöser Sendepuls und reflektierten Signalen.

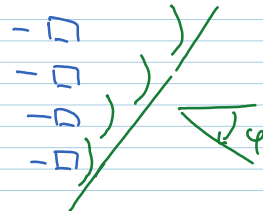
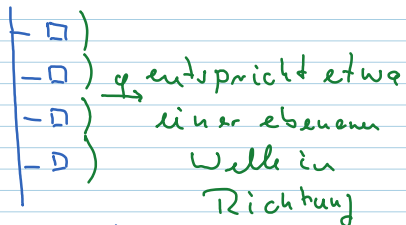


Intensität =  $f(\text{Zeit})$  an einer Stelle: A-Scan

Trägt man 2-dimensional Intensität =  $f(t, x)$   
B-Scan

Dazu werden heute meist Prüfköpfe verwendet, bei denen

- die Piezoschwinger im Gehäus mechanisch verbunden werden
- oder bei denen mehrere Schwinger mit verschiedenen Phasen angeregt werden.



Ansteuerung mit gleicher Phase

$$\varphi = 0$$

Ansteuerung mit Phasenverschiebung

Damit kann man sehr schnell die Ausbreitungsrichtung ändern.

Wird ein Prüfling entlang einer Achse vermessend erhält man einen 2-dimensionalen Schnitt, den B-Scan

Bei Bewegung in 2 Dimensionen erhält man das

3-dimensional Innere des Prüflings: C-Scan.

In der medizinischen Ul-Technik hat man das Problem, dass unterschiedliche Gewebearten sich nur wenig unterscheiden

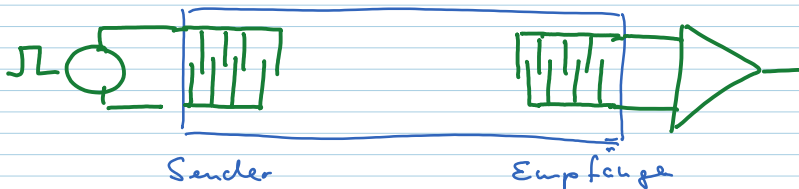
best. Dichte und Schallgeschwindigkeit, wo dass die akustische Impedanzen ähnlich sind. Deshalb wird im Körper an Grenzschichten wenig reflektiert.  
=> Kontrast der Aufnahmen ist gering.

## 8.7. Oberflächenwellensensoren

Surface Acoustic Wave SAW-Sensoren.

Grundlage für viele chemische / biologische Sensoren.

Prinzip: Auf einer piezoelektrischen Platte werden 2 Interdigital-Elektroden aufgebracht:



Ein Puls an die Senderelektroden erzeugt eine Oberflächenwelle. Wenn diese durch die Empfängerelektroden läuft, erzeugt sie dort einen Spannungspuls.

Aus der Zeit zwischen Sendepuls und Empfangspuls und bekanntem Abstand erhält man die Schallgeschwindigkeit.

Beklebt sich nun ein sensorisch aktives Material (z.B. hygroskopisch) zwischen Sender und Empfänger, dann wird die Schallgeschwindigkeit geändert.

Im Beispiel würde das hygroskopische Material Wasser aufnehmen entsprechend der Luftfeuchte.

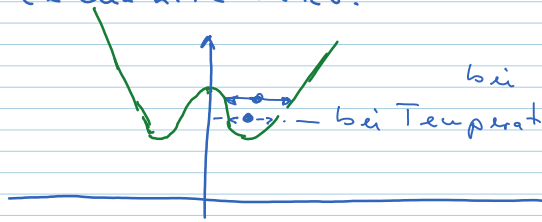
=> Aus der Laufzeit kann auf die Luftfeuchte geschlossen werden.

## 9) Pyroelektrische Sensoren

Alle piezoelektrischen Stoffe außer Quarz sind pyroelektrisch: Ihre Oberflächladung ändert sich mit der Temperatur.

Warum? Betrachte z.B.  $\text{BaTiO}_3$ , bei dem

das  $Ti$ -Ion in einem Potentialminimum neben der Zellmitte nicht:



Durch "Hochsteigen" im Potential topf bei zunehmender Temperatur verändert sich die mittlere Position der positiv geladenen  $Ti$ -Ionen

Damit ändert sich das Dipolmoment der Zelle, und damit die Oberflächenladung.

Bei einer Temperaturänderung um  $\Delta T$  erhält man die Ladung  $Q$

$$Q = p \cdot \Delta T \cdot A$$

$A$ : Fläche

$p$ : pyroelektrische Konstante.

→ Skript  $BaTiO_3$   $p = 4 \cdot 10^{-4} \frac{Cb}{m^2 \cdot K}$

Diese Sensoren werden oft in einfachen Bewegungsmeldern eingesetzt.

Problem: Piezo- und Pyro-Effekt treten (bis auf Quartz) gemeinsam auf.

Bei Druckmessungen stört der Pyroeffekt  
Bei Temp. — — — — — Piezoeffekt.

Durch Aufbau der Sensoren muss die Störung minimiert werden.

Also müssen Pyrosensoren möglichst spannungsfrei aufgebaut werden.

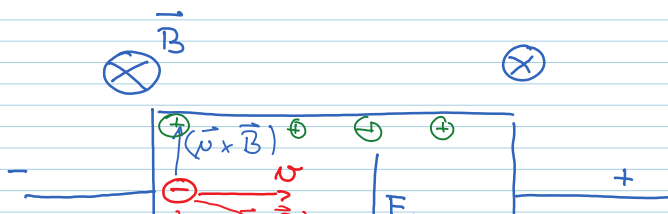
Bei Piezosensoren muss evtl. die Temperatur zusätzlich gemessen und korrigiert werden.

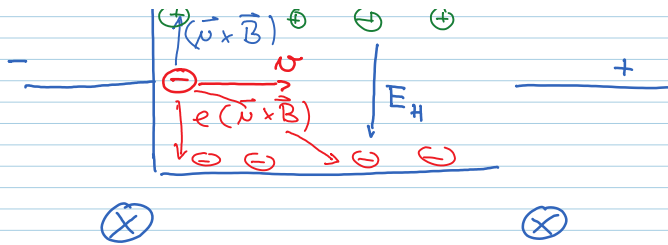
## 10. Magnetfeldmessung mittels Hall-Effekt

Hall Effekt beruht auf Ablenkung bewegter Elektronen im Magnetfeld, durch die Lorentzkraft.

magnetische Anteil:

$$F = e (\vec{v} \times \vec{B})$$





Durch  $F_L$  werden die Elektronen nach „unten“ abgelenkt, es entsteht „unten“ ein Elektronenüberschuss, entsprechend „oben“ (da der ganze Aufbau elektrisch neutral ist) ein Elektronenmangel. Also entsteht ein E-Feld, oben  $\oplus$  und unten  $\ominus$ .

Dadurch werden neuankommende Elektronen vom B-Feld nach unten gezogen, vom neu entstandenen E-Feld wieder abgestoßen. Im Ergebnis sammeln sich „unten“ gerade so viel Elektronen, dass sich die Kräfte durch B-Feld und E-Feld gerade aufheben. Die Elektronen bewegen sich wieder geradlinig, aber es ist ein E-Feld von oben nach unten entstanden. Damit gilt für die Gesamtkraft auf ein Elektron:

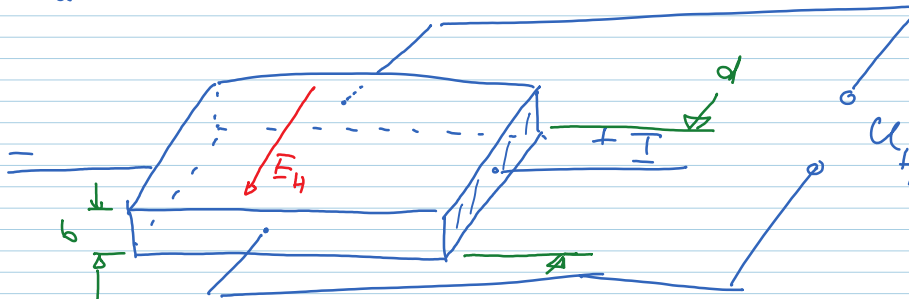
$$\vec{F}_L = e \cdot \vec{E}_H + e(\vec{v} \times \vec{B}) = 0$$

wir betrachten nur die senkrechte Komponente

$$e E_H + e \cdot v \cdot B = 0$$

$$\Rightarrow E_H = -v \cdot B$$

Versuche nun,  $E_H$  und  $v$  aus gut messbaren Größen abzuleiten.



$$\frac{U_H}{d} = E_H, \text{ aus E-Technik: Stromdichte } j = \frac{\text{Ladung}}{\text{Geschwindigkeit}}$$

$$j = e \cdot n \cdot v$$

n: Elektronendichte

andererseits

$$j = \frac{I}{b \cdot d}$$

$$\frac{I}{b \cdot d} = e \cdot n \cdot v$$

$$b \cdot d \quad , \quad \overline{b \cdot d} = e \cdot n \cdot \nu$$

$$\Rightarrow \nu = \frac{I}{e \cdot n \cdot b \cdot d}$$

aus  $E_H = -\nu \cdot B$  wird also  $\frac{M_H}{d} = -\frac{I}{e \cdot n \cdot b \cdot d} \cdot B$

$$\Rightarrow \boxed{M_H = -\frac{1}{e \cdot n \cdot b} (I \cdot B)}$$

Für die Sensoren wird folgendes gewählt

- niedrige Elektronendichte  $n$   
(führt zu Temperaturabhängigkeit)
  - kleines  $b$
  - Konstantstromquelle
  - Verstärkung von  $M_H$
- } gut in Halbleitertechnik in Si machbar
- in Si-Technik machbar
- " -

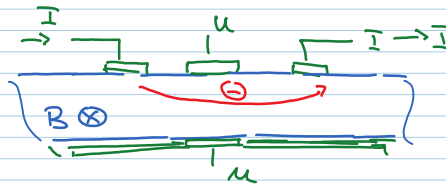
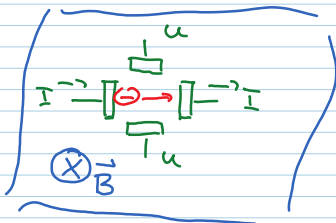
$\Rightarrow$  Hall-Sensoren sind sehr gut als Komplettsysteme in Si als integrierter Sensor machbar, dann lassen sich auch Temperatur- und andere Störeffekte leicht kompensieren

Moderne Weiterentwicklung: Hall-Sensor für 3 Raumrichtungen des B-Feldes

Prinzip:

herkömmlich, auf Oberfläche des Si Chips

neu, als Schnitt durch den Baustein



Mit dieser und zweimal dieser (um 90° verdreht) Struktur  
3 B-Feldkomponenten messbar.

B-Feld in Richtung Oberfläche messbar.

10.2. Feldplatten: entfällt!

## 10.3. Anwendungen $\Rightarrow$ Skript

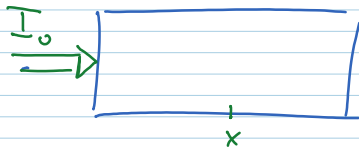
### 11. Optische Sensoren

#### 11.1. Absorption von Licht

Wenn Licht auf einen Körper trifft, kann es an der Grenzfläche reflektiert werden bzw. in den Körper eindringen, in dem es dann absorbiert wird.

Die Reflexion wird hier nicht betrachtet.

Die Absorption der Lichtintensität gehorcht einem Exponentialgesetz:



$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x}$$

$\alpha$ : Absorptionskoeffizient

$$[\alpha] = \frac{1}{\text{cm}}$$

Statt  $\alpha$  benutzt man gern die Absorptionlänge  $d$  mit  $d = \frac{1}{\alpha}$

$$I(x) = I_0 e^{-\frac{x}{d}}$$

Anschaulich: nach einer Eindringtiefe von  $x = d$  sinkt die Intensität auf  $\frac{1}{e}$  ab.

$\alpha$  in  $1/\text{cm}$

$\lambda / \mu\text{m}$	0,4	0,6	0,8	1,0
Si	20.000	5000	1000	$\sim 0$
Ge	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^4$	15.000

$d$  in  $\mu\text{m}$

Si	0,5	2	10	$\sim \infty$
Ge	0,002	0,02	0,2	0,67

#### 11.2. Grundlage der Absorption in Halbleitern

Licht kann im Halbleiter Elektronen aus einer Bindung

lösen und so ein ELP erzeugen. Damit steht ihnen elektrische Ladung zum Stromtransport bereit.

Dies funktioniert nur, wenn die Photonenenergie größer ist als die Gapenergie  $E_g$ .

⇒ Absorption nur möglich, falls

$$E_\nu \geq E_g \quad E_\nu = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$\Rightarrow \frac{h \cdot c}{\lambda} \geq E_g \quad \Rightarrow \quad \boxed{\lambda \leq \frac{h \cdot c}{E_g} = \frac{1,24 \text{ eV} \cdot \mu\text{m}}{E_g}}$$

bei Si  $E_g \sim 1,1 \text{ eV} \quad \Rightarrow \quad \lambda \leq \frac{1,24 \text{ eV} \cdot \mu\text{m}}{1,1 \text{ eV}} \approx 1,1 \mu\text{m}$

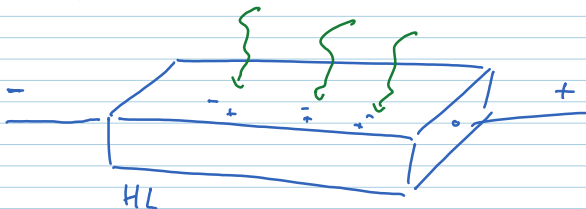
bei Ge  $E_g \sim 0,7 \text{ eV} \quad \lambda \leq 1,8 \mu\text{m}$

Mit dem sogenannten Quantenwirkungsgrad  $\eta$  bezeichnet man das Verhältnis aus einfallenden Photonen zu erzeugten ELP.

$$\eta = \frac{\text{Anzahl erzeugte ELP}}{\text{Anzahl eintreffender Photonen}}$$

### 11.3. Photoleiter / Photo Widerstand

Ein Photo Widerstand besteht aus einem homogenen Halbleiter, der auch dotiert sein kann.



① Wieviel ELP werden im HL erzeugt, wenn eine bestimmte Lichtleistung absorbiert wird?

Der HL wird mit Lichtleistung  $P_{\text{opt}}$  [in Watt] bestrahlt.

Das Licht habe Wellenlänge  $\lambda$ . Dann hat ein Photon die Energie  $E_\nu = h \cdot \nu = \frac{hc}{\lambda}$ . In der Lichtleistung  $P_{\text{opt}}$  sind also

$$\frac{\text{Anzahl Photonen}}{\text{sec}} = \frac{P_{\text{opt}}}{E_\nu} = \frac{P_{\text{opt}}}{h \cdot \nu}$$

Diese Photonen werden alle absorbiert und erzeugen wieviel ELP?

$$\frac{\text{Anzahl ELP}}{\text{sec}} = \eta \cdot \frac{P_{\text{opt}}}{h \cdot \nu}$$

$$= \eta \cdot \frac{P_{\text{opt}} \cdot \lambda}{h \cdot c}$$

in guter Näherung

$$\eta = 1 \quad \text{falls } \lambda < \frac{1,24 \text{ eV} \cdot \mu\text{m}}{E_g}$$

$$\eta = 0 \quad \text{falls } \lambda > \dots$$



Die Anzahl ELP/sec kann in eine Art Strom umgerechnet werden, der Strom, der direkt durch Absorption erzeugt wird, die Ladung, die pro Zeit erzeugt wird.  
 Sie wird oft "primärer Photostrom" genannt

$$I_{\text{primär}} = \frac{e \cdot \eta \cdot P_{\text{opt}} \cdot \lambda}{h \cdot c}$$

Dies ist aber noch NICHT der Strom, der bei Anlegen einer Spannung durch den Leiter fließt. Denn:

Fließen die Elektronen und Löcher bei Anlegen einer Spannung durch den Halbleiter, können sie aufeinander treffen und rekombinieren. Dies kann durch eine 'mittlere Lebensdauer'  $T_r$  (Rekombinationszeit) beschrieben werden. Andererseits benötigen die Ladungen eine bestimmte Zeit, um sich durch den HL zu bewegen, die Driftzeit  $T_{\text{drift}}$ .

Ist  $T_r < T_{\text{drift}}$ , dann werden vom primären Photostrom viele ELP rekombinieren, bevor sie den HL durchqueren haben.

Ist  $T_r \gg T_{\text{drift}}$ , dann werden während des Durchlaufes weitere ELP produziert.

$\Rightarrow T_r < T_{\text{drift}}$ , dann fließt durch den HL ein Strom, der viel kleiner ist als  $I_{\text{primär}}$

$T_r \gg T_{\text{drift}}$ , durch den HL fließt ein größerer Strom als  $I_{\text{primär}}$

Man kann zeigen: durch den HL fließt

$$I = \eta \cdot e \cdot \frac{P_{\text{opt}} \cdot \lambda}{h \cdot c} \cdot \left( \frac{T_r}{T_{\text{drift}}} \right)$$

Elementarladung

Nebenbemerkung: Nun ist  $T_{\text{drift}}$  umso kleiner, je höher die angelegte Spannung  $U$  ist.

In guter Näherung  $T_{\text{drift}} \sim \frac{1}{U}$  oder  $T_{\text{drift}} = \frac{a}{U}$

$a$  ist eine Proportionalitätskonstante, die von Geometrie und Material abhängt.

$$\Rightarrow I = \eta \cdot e \cdot \frac{P_{\text{opt}} \cdot \lambda}{h \cdot c} \cdot \frac{T_r \cdot U}{a}$$

$$\Rightarrow \frac{U}{a} = \frac{1}{h \cdot c \cdot a} \quad | \quad \frac{1}{a} = R \quad |$$

$$\Rightarrow \frac{M}{I} = \left( \frac{h \cdot c \cdot a}{\eta \cdot e \cdot \lambda \cdot T_r} \right) \cdot \frac{1}{P_{opt}} = R_{Photo} \sim \frac{1}{P_{opt}}$$

Durch  $(T_r / T_{drift})$  kann man die Empfindlichkeit des

Photowiderstandes beeinflussen:

Für Photowiderstände werden HL mit langer Rekombinationszeit verwendet, z.B.

CdSe Cadmium-Selenid

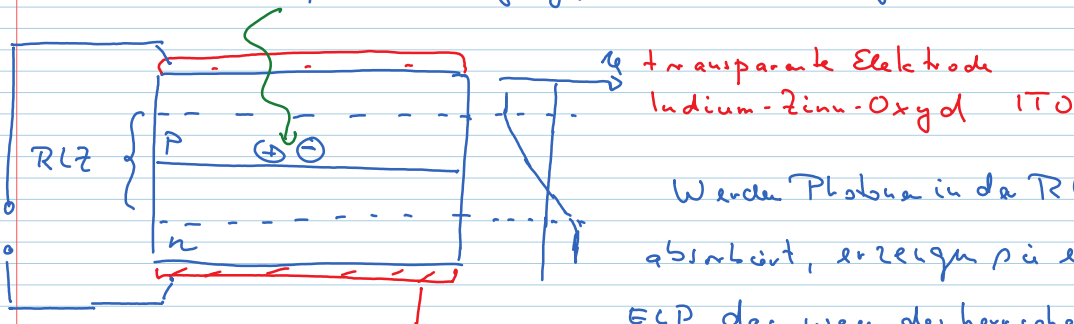
CdS Cadmium-Sulfid

Typische Eigenschaften:

- Sehr empfindlich wegen:  $\frac{T_r}{T_{drift}}$  ist groß
- langsam, Intensitätsänderungen kürzer als  $T_r$  sind nicht mehr nachweisbar  
 $\Rightarrow$  niedrige Grenzfrequenz.  
 (typisch im Bereich 100 Hz bis einige kHz)
- Einfach und preisgünstig auch für größere Flächen herstellbar.

## 11.4. Photodioden

Photodioden sind nicht <sup>unbedingt</sup> anders aufgebaut als "normale" Dioden, ein p-n-Übergang, mit Raumladungszone.

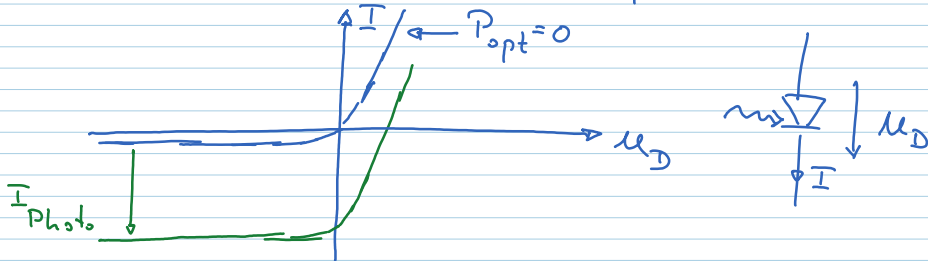


Wenn Photonen in der RLZ absorbiert, erzeugen sie ein ECP, das wegen des herrschenden E-Feldes, sofort auseinander gerissen wird, das Elektron bewegt sich zum n-Bereich, das Loch zum p-Bereich. Es entsteht dadurch bei Absorption einer optischen Leistung

$P_{opt}$  ein Strom, der gleich dem primären Photostrom ist  
 Dabei stimmt die Bewegungsrichtung von Elektron und Loch mit der des Sperrstroms einer Diode überein.  
 $\Rightarrow$  der Photostrom erhöht den Sperrstrom der Diode.

Photostrom  $I_{Photo} = \frac{q \cdot e}{h \cdot c} \cdot P_{opt} \cdot \lambda$

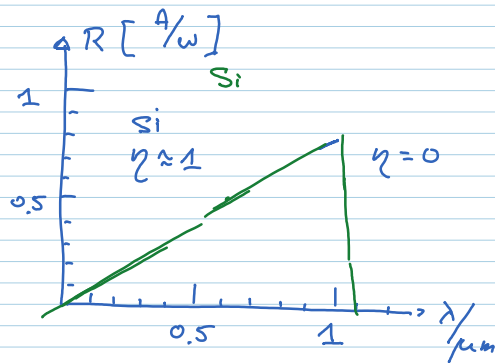
Dieser Photostrom erhöht den Sperrstrom der Diode



$$I_{Photo} = \left( \frac{q \cdot e}{h \cdot c} \cdot \lambda \right) \cdot P_{opt}$$

R responsivity

$$R = \frac{q \cdot e}{h \cdot c} \cdot \lambda = \frac{\lambda}{1,24 \mu m} \frac{A}{W}$$



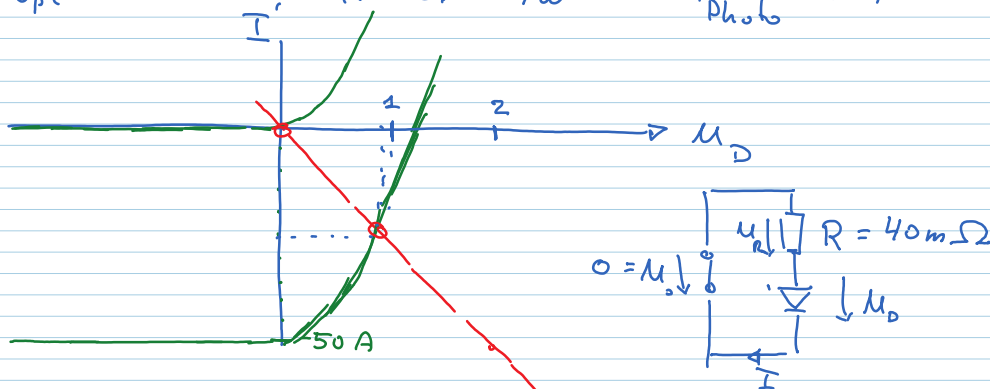
für  $\lambda \approx 633 \text{ nm} \Rightarrow R = 0.5 \frac{A}{W}$

Ausflug in die Solar Technik:

betrachte Photodiode mit Fläche  $1 \text{ m}^2 \hat{=} \text{Solarzelle}$

Wievil Lichtleistung trifft auf  $1 \text{ m}^2$  (am Äquator)  $\approx 1 \text{ kW}$

$P_{opt} \approx 100 \text{ W}$   $R \approx 0.5 \text{ A/W} \Rightarrow I_{Photo} = 50 \text{ A}$



AP-Bestimmung:  $U_o = U_R + U_D = R \cdot I + U_D$

$$I = - \frac{U_D}{R}$$

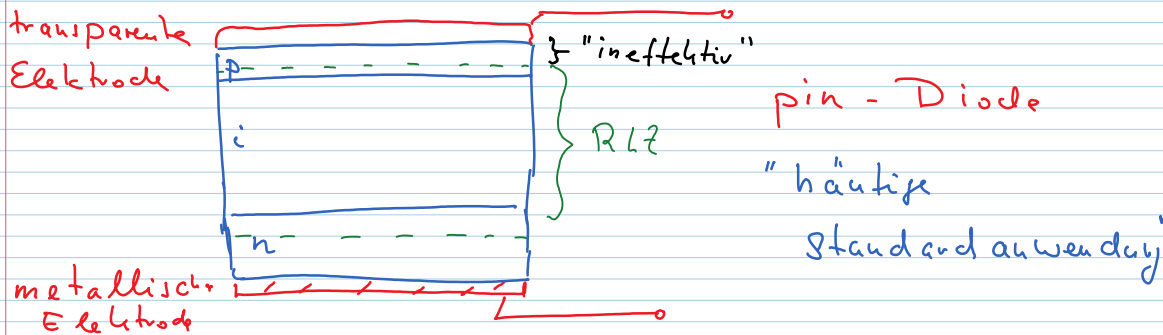
Es stellt sich ein:  $U_D \approx 1 \text{ V}$   $I = -25 \text{ A}$   $P_D = -25 \text{ W}$   
 am Widerstand ist:

$$I = -25 \text{ A} \quad U_R = -1 \text{ V}$$

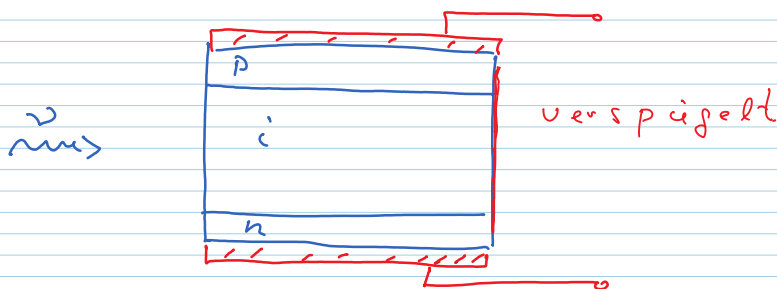
$$P_R = 25 \text{ W}$$

## Pin-Dioden

Zur Erhöhung der "Umwandlungseffektivität" möchte man die RLZ möglichst groß machen. Dazu fügt man zwischen p und n Bereich einen undotierten Bereich ein, also einen intrinsischen Bereich.



Der Bereich bis zur RLZ liefert aber immer noch keinen Beitrag zum Photostrom. Sollte dies ungewünscht sein, gibt es noch eine, selten verwendete Geometrie:



Aufwändiger, teurer Aufbau, daher selten eingesetzt.

Die "Standard"-pin-Dioden können mit Dicken von einigen mm bis cm aufgebaut werden und dienen dann als Detektoren für Röntgenstrahlung. Sind sie aus Si aufgebaut, werden sie im Bereich  $\sim 10$  keV verwendet. Für höherenergetische x-ray oder  $\gamma$ -Strahlung benutzt man Detektoren aus Ge.

## Lawinen-Dioden / Avalanche-Dioden

Sie nutzen den Lawinen-Effekt (der auch bei Zenerdioden genutzt wird).  
Dazu nimmt man eine Diode mit langer RLZ (z.B.

pin) und legt eine sehr hohe Sperrspannung an.

Wird dann ein ELP erzeugt, werden die Elektronen zum + Anschluss beschleunigt und können, bei genügend hoher angelegte Spannung, beim Stoß mit einem Kristallatom ein weiteres Elektron freisetzen. Die beiden Elektronen werden wieder beschleunigt, stoßen, ionisieren usw.

Eine Elektronenlawine entsteht.

⇒ Bei Absorption eines einzigen Photons wird ein verstärkter Strom erzeugt.

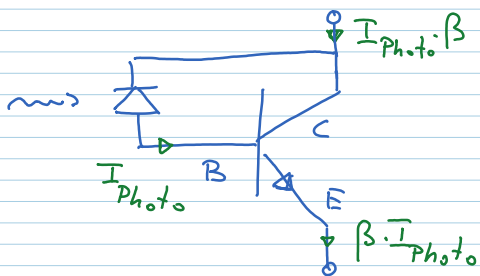
⇒ Einzelne Photonen können nachgewiesen werden.

⇒ Lawinen-Dioden werden bei lichtschwachen Objekten eingesetzt.

Nachteil: - Man braucht hohe Spannungen von einigen 100 V.  
- Der Multiplikationsfaktor hängt stark von der angelegte Spannung ab. Sie muss daher sehr gut stabilisiert sein

### Phototransistoren

Eine Verstärkung (im Sensor) kann auch mit Phototransistoren erreicht werden. Hier wird bei einem Transistor die BC-Diode als Photodiode benutzt. Ein Ersatzschaltbild wäre dann.



Allerdings sind Phototransistoren deutlich langsamer als Photodiode, Darüber hinaus ist bekanntlich  $\beta$  bei Transistoren stark exemplarabhängig.

### 11.5. Verstärkerschaltungen für Photodiode

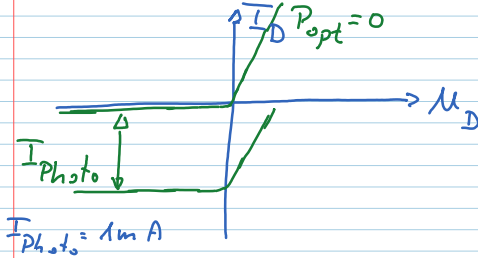
Die Standardschaltung für PD ist der Transimpedanzwandler.

Kennlinie der PD

$U = D \cdot I$

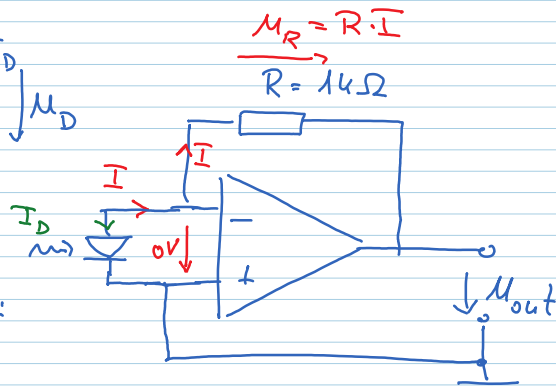
Wandler.

Kennlinie der PD



$I_{Photo} = 1 \text{ mA}$

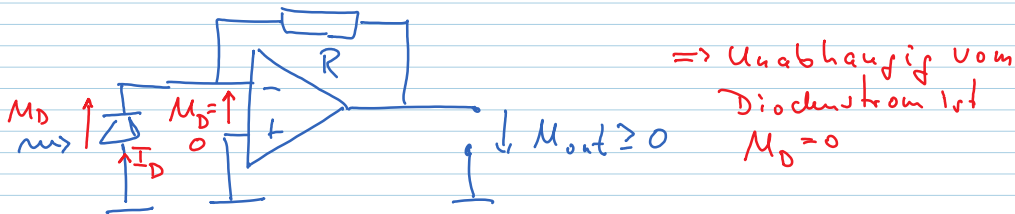
Versuche nun folgende Schaltung:



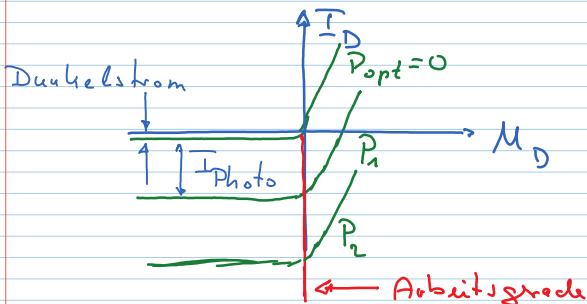
$$I = -I_D \quad I_D = -1 \text{ mA} \Rightarrow I = +1 \text{ mA} \quad U_{out} + M_R = 0 \quad U_{out} = -R \cdot I$$

$$U_{out} = -1 \text{ V}$$

Möchte man positive Ausgangsspannung, wird die Diode "umgedreht". Also folgende Schaltung:



Was sieht nun die Arbeitsgerade in der Kennlinie aus?



$\Rightarrow$  Die PD wird mit Spannung 0 V betrieben, es fließt kein Dunkelstrom, nur der Photostrom.

Da kein Dunkelstrom fließt und andererseits  $I_{Photo} \sim P_{opt}$  ist, ist auch die Ausgangsspannung des Transimpedanzwandlers proportional zur auftretenden Lichtleistung.

### Photodiode mit Vorspannung

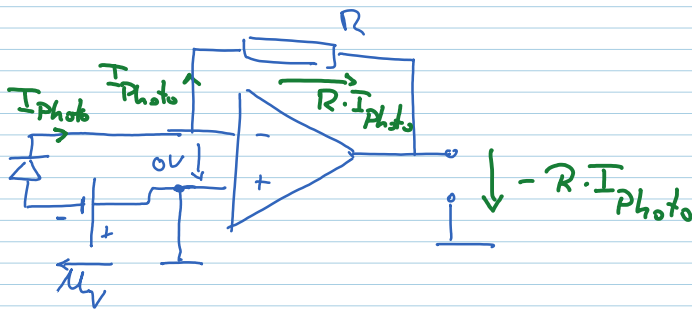
Legt man an eine Diode eine Sperrspannung, wird die Diodekapazität kleiner, damit wird die Grenzfrequenz größer. Gleichzeitig bewegen sich Ladungen schneller.

$\Rightarrow$  Die Photodiode erreicht eine höhere Grenzfrequenz.

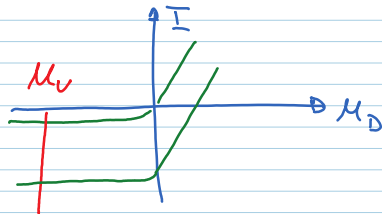
Wie erreicht man das?



Wie erreicht man das?



$U_V$  liegt in Sperrrichtung an, also im Diagramm:



Vorteil: PD schneller

Nachteil: Dunkelstrom fließt

## 12. Bildwandler

Auf HL-Basis zwei Prinzipien: CCD-Kameras  
und CMOS-Kameras.

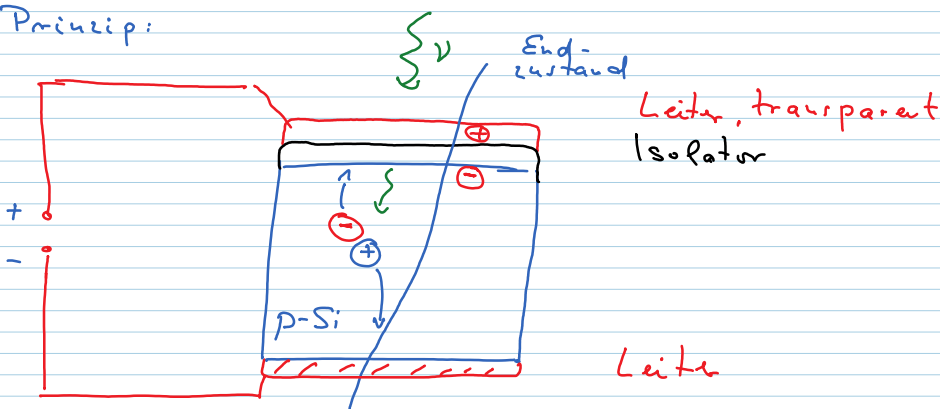
CMOS-Chips beruhen auf Photodioden.

CCD-Chips nicht!

### 12.1. CCD-Bildwandler

Beruhem auf der MOS-Kapazität.

Prinzip:



Ein durch Absorption erzeugtes ELP lässt das Elektron unter den Isolator wandern, eine positive Ladung erscheint über der transparenten Elektrode.

Der Kondensator aus Isolator, transparenter Elektrode, p-Si wird also mit 1 Elementarladung geladen, und zwar

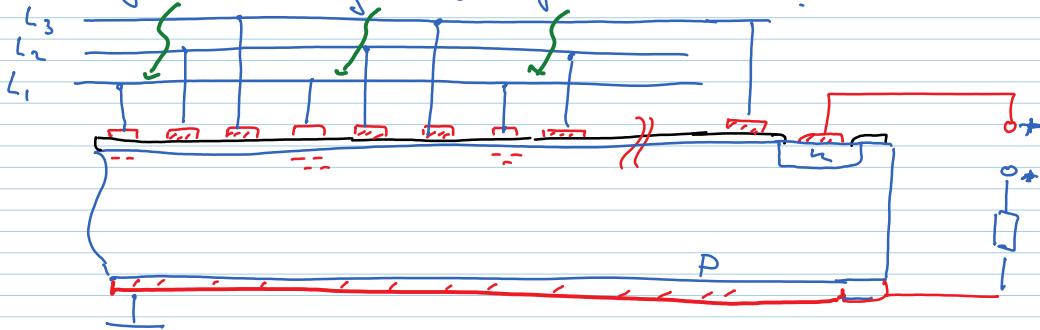
pro absorbierten Photon.

Die Anzahl Elementarladungen auf dieser Kapazität ist  $n \approx 1 \cdot n \cdot n$  absorbierte Photonen.

Die Anzahl Elementarladungen auf dieser Kapazität ist gleich der Anzahl absorbierte Photonen.  
 Je länger Ladungen gesammelt werden, desto größer die Ladung auf der Kapazität.

Damit können sehr lichtschwache Objekte bei entsprechend langer Messzeit nachgewiesen werden.  
 Anwendung in der Astronomie.

Wie kann man nun viele MOS-Kapazitäten mit möglichst wenig Leitungen auslesen?



Abblauf: Spannung (z.B. +5V) an:

	$L_1$	$L_2$	$L_3$	
①	5V	0	0	Unter den transparenten Elektroden wird Licht absorbiert, Elektronen werden gesammelt.
②	5V	5V	0	Die Elektronen können sich unter den transparenten Elektroden und den rechten Nachbarn aufhalten.
③	0V	5V	0	Elektronen nur noch unter "rechten Nachbarn"
4	0	5V	5V	} die Elektronen werden weiter noch rechts verschoben. usw.
5	0	0	5V	
	usw.			

Am rechten Ende ist in das p-Si noch ein n-Bereich eingebettet. Diese Diode wird in Sperrrichtung betrieben. Ihre RLZ reicht bis an die letzte CCD-Zelle.

Elektronen in dieser Zelle werden durch das anziehende Potential der RLZ angezogen und fließen heraus.

Durch die Pulsfolge an  $L_1, L_2, L_3$  werden die Elektronenpakete nacheinander aus der CCD-Zeile ausgelesen.



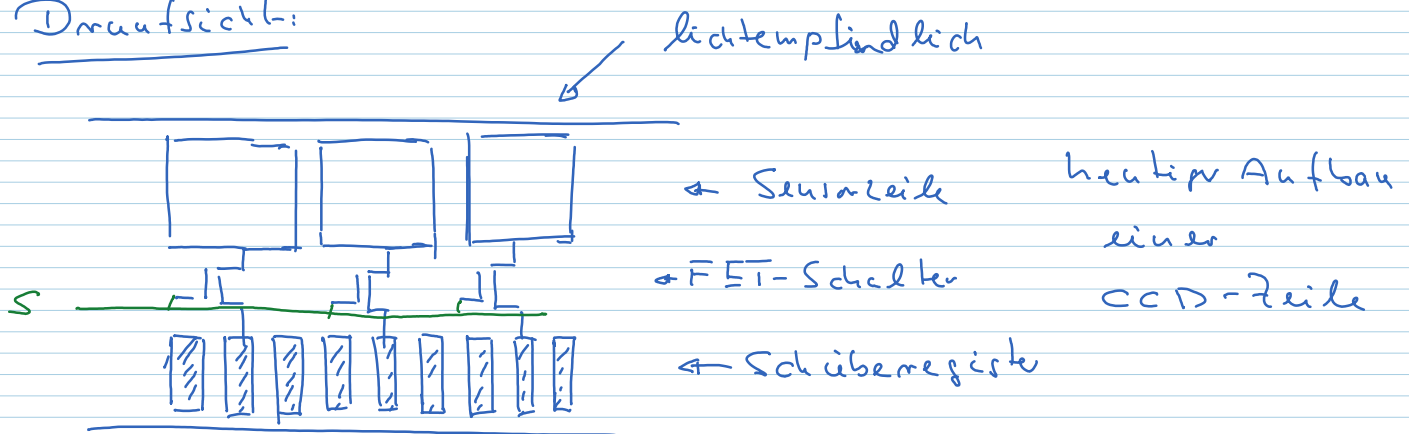
Mit 5 Leitungen werden also tausende Pixel ausgelesen.

Problem: Ladungen werden durch beleuchtete Zellen transportiert und evtl. verändert

Lösung: - mechanischer Shutter vor dem Sensor.

- weiterentwickelter Aufbau:

Draufsicht:



In der Sensorzeile wird Licht in ELP gewandelt. Dabei sind die FET-Schalter offen. Nach der Belichtungszeit werden die FETs geschlossen und die Ladungen in die entsprechenden Zellen des Schieberregisters geschoben. Dann werden die FETs wieder geöffnet. Im Schieberregister werden die Ladungen ausgelesen und gleichzeitig kann wieder Licht detektiert werden.

- Vorteile:
- In der beleuchteten Sensorzeile steht die ganze Fläche für Detektion zur Verfügung  
⇒ Empfindlichkeit erhöht
  - während des Transports kann gemessen werden  
⇒ schneller
  - kein Transport durch beleuchtete Zellen  
⇒ keine Verfälschung der Ladungs-information

Baut man viele dieser Strukturen untereinander auf,

erhält man ein CCD-Array: 2D-CCD-Chip  
(→ Skript)

Sog. Interline-CCD-Chip

Nachteil: etwa 50% der beleuchteten Fläche wird für Transport-CCDs benötigt, also nur 50% für Detektion.

Es gibt "Full-Frame-CCDs", bei denen alle Sensor-Zellen zusammen liegen und alle Transport-Zellen auf der 2. Hälfte des Chips. Nach der Belichtung werden die Ladungen sehr schnell in die Transporthälften geschoben, allerdings durch die Sensorzellen hindurch.

Diese Full-Frame-CCDs sind also empfindlicher. Während des Transportes müssen die Chips aber durch Ladung

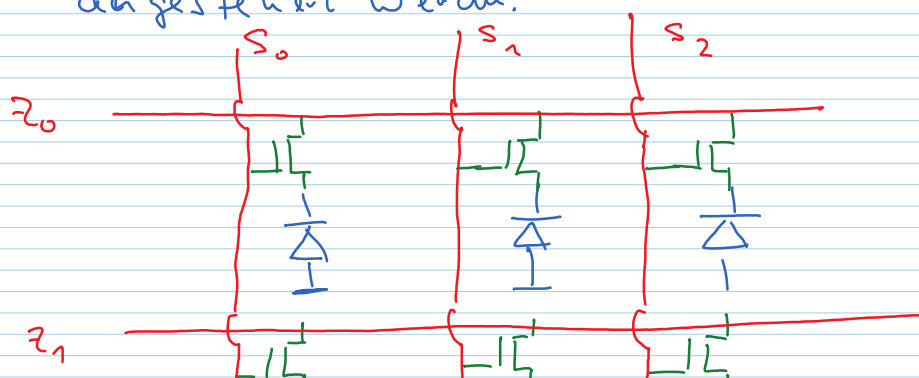
einen mechanischen Shutter abgedeckt werden.

Der Chip-Aufbau ist auch wesentlich komplizierter und teurer.

⇒ Meist werden Interline-CCD's benutzt.

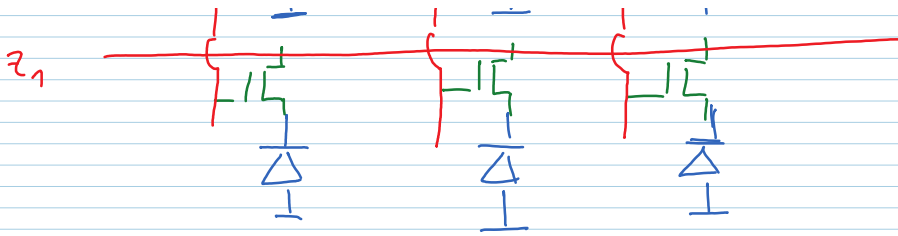
## 12.2. CMOS-Kameras

Beruhem auf Photodioden, die durch eine FET-Matrix angesteuert werden.



Nachteil von CMOS:  
rauschen stärker als CCD.

Vorteile:



Vorteile:  
- Herstellung kompatibel mit CMOS-Technik.

⇒ preisgünstig

- bei entsprechender Zeilen- und Spaltenansteuerung können Zellen wahlfrei angesprochen. Man muss also z.B. nicht den ganzen Chip auslesen, wenn man nur an Teilbereichen interessiert ist.

Ebenso kann man weitere Elektronik auf dem Chip unterbringen.

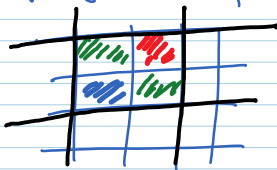
⇒ Sehr leistungsfähige, schnelle Systeme möglich.

### 12.3. Farbkameras

① Aufspaltung des Lichtweges durch dichroitische Filter / Prismen und 3 Chips.

Siehe Skript

② Ein-Chip-Farbsensor. Hier werden die Sensorzellen mit Farbfiltren bedruckt z.B. im "Bayer"-Muster so dass 4 Zellen zu einem Farbpixel zusammengefasst werden.



Beim Bayer-Sensor hat also eine Kamera mit z.B. 18 Mill. Pixel tatsächlich  $4 \cdot 18$  Mill = 72 Mill. Sensorzellen.

## 13. Chemische Sensoren

Ziel: bestimme die Konzentration von Stoffen in Flüssigkeiten oder Gasen.

Unterschiedliche Methoden:

- elektrochemische Verfahren, bei denen die Reaktion eines gesuchten Stoffes mit einem bekannten Material zu einem Strom, einer Spannung oder einer Ladung führt.
- man kann auch bei manchen Reaktionen die Wärme bestimmen, die bei der Reaktion entsteht und die dann ein Maß für die Konzentration des gesuchten Reaktionspartners ist.
- Es gibt Stoffe, die andere Stoffe "anziehen".  
Beispiel: hygroskopischer Sensor für Luftfeuchtemessung. Dann kann die Massenbelegung ein Maß für die Feuchte sein.

⇒ - optische Sensoren, die (IR-) Absorption ausnutzen.

### 13.1. Sensoren mittels IR-Absorption

Besonders für gasförmige Bestandteile:

- Luftfeuchte
- Schadstoffe im Abgas
- usw.

Grundlage: Gasmoleküle können je nach Aufbau um verschiedene Achsen rotieren bzw. in verschiedene Richtungen vibrieren.

Diese Rotationen und Vibrationen sind quantisiert, können also nur bei bestimmten Frequenzen stattfinden.

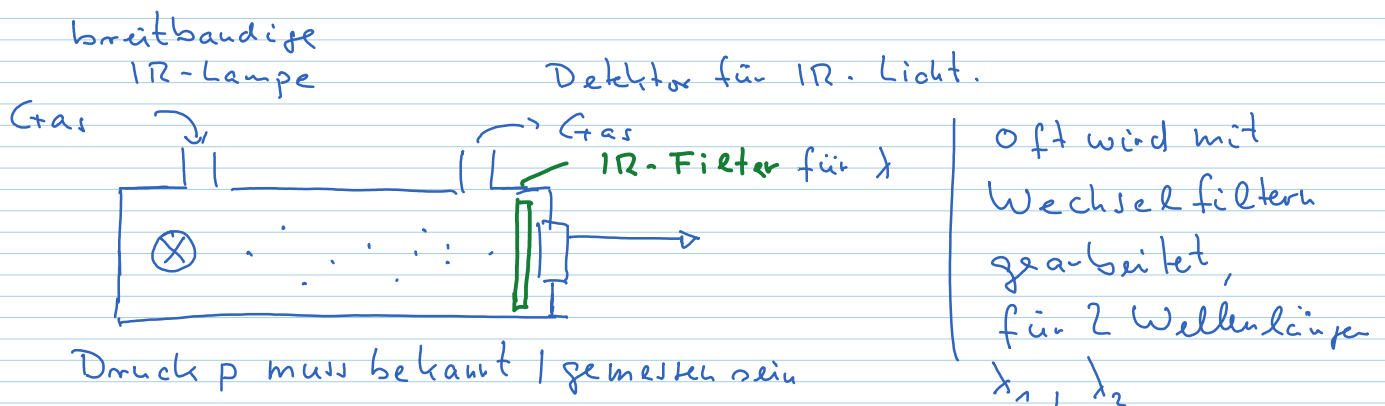
⇒ diese Frequenzen charakterisieren das Gasmolekül.

Wie lassen sich diese Frequenzen feststellen?

z.B. durch Absorption von Licht!

Daher haben alle Gasmoleküle charakteristische Absorptionsspektren (→ Skript)

Messe also die Absorption eines Gasgemisches, in dem das gesuchte Gas enthalten ist, bei der/den charakteristischen Wellenlänge(n).



Dabei wird  $\lambda_1$  so gewählt, dass beim gesuchten Bestandteil stark absorbiert wird,  
 $\lambda_2$  ————— nicht

Ist  $I(\lambda_1)$  die Detektorintensität, die von der Gaskonzentration und von der Beleuchtungsstärke abhängt

und  $I(\lambda_2)$  hängt nur von Beleuchtungsstärke ab.

⇒ bei geeigneter Verstärkung:  $\frac{I(\lambda_1)}{I(\lambda_2)}$  = Maß für die Gaskonzentration.

Der Aufbau kann modifiziert werden:



Wenn man Glück hat, findet man eine schmalbändige Lichtquelle (LED), die bei einer Absorptionswellenlänge des Gases emittiert. Dann braucht man kein zusätzliches Filter.

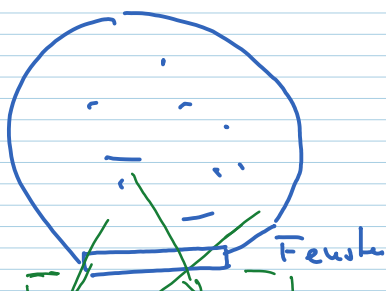
**↑ Nicht dispersive IR  
NDIR**

Die eleganteste Lösung ist: man verwendet eine breitbandige IR-Quelle und analysiert das absorbierte Licht mit Spektrometer.



DIR: dispersive IR-Messung.

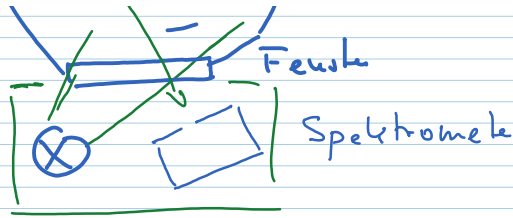
Man kann auch „in Reflektion“ messen:



Feuchtegehalt im  
Mais, Weizen:

Man strahlt von der  
gleichen Seite ein, aus der

IR -  
Lampe



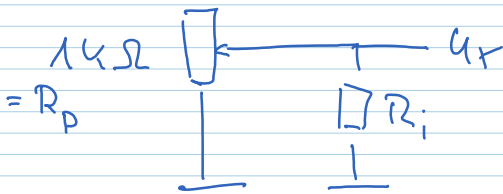
Man strahlt von der  
gleichen Seite ein, aus der  
man auch beobachtet.

## Übungen

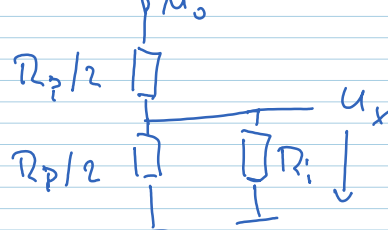
$$U_0 = 10V$$

(1.) Ideal  $R_i = \infty$

$$U_x^{id} = U_0 / 2 = 5V$$



(2.)  $R_i < \infty$



$$U_x = U_0 \left[ \frac{\frac{1}{\frac{R_p}{2} + \frac{1}{R_i}}}{\frac{R_p}{2} + \frac{1}{\frac{1}{\frac{R_p}{2} + \frac{1}{R_i}}}} \right] = U_0 \left[ \frac{\left( \frac{1}{2} R_p \cdot R_i \right) / \left( \frac{R_p}{2} + R_i \right)}{\frac{R_p}{2} + \frac{\frac{1}{2} R_p \cdot R_i}{\left( \frac{R_p}{2} + R_i \right)}} \right]$$

$$= U_0 \cdot \frac{\frac{1}{2} R_p \cdot R_i}{\frac{R_p}{2} \left( \frac{R_p}{2} + R_i \right) + \frac{R_p}{2} \cdot R_i}$$

$$= U_0 \cdot \frac{R_p \cdot R_i}{\frac{1}{2} R_p^2 + 2 R_p R_i} = U_0 \cdot \frac{R_i}{\frac{R_p}{2} + 2 R_i}$$

$$U_x = U_0 \cdot \frac{R_i}{\frac{R_p}{2} + 2 R_i} = \boxed{U_0 \cdot \frac{1}{2 + \frac{R_p}{2 R_i}} = U_x}$$

Check:  $R_i \rightarrow \infty \quad U_x = \frac{U_0}{2}$

Check:  $R_i \rightarrow \infty \quad M_x = \frac{M_0}{2}$  Stimmt!

Was heißt "Messwert wird verfälscht"?

$\hat{=}$  Wie groß ist der relative Fehler, relative Abweichung!  
Dazu berechnen

$$\varepsilon = \frac{M_x}{M_x^{\text{ideal}}} \quad M_0 = \frac{1}{2 + \frac{R_p}{2 R_i}}$$

$$\varepsilon = \frac{2}{2 + \frac{R_p}{2 R_i}} = \boxed{\frac{1}{1 + \frac{R_p}{4 R_i}} = \varepsilon}$$

①.  $R_p = 1k\Omega, R_i = 100k\Omega \quad \varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{1}{400}} = \frac{400}{401}$

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + 0,0025} = \frac{1}{1,0025} \approx 0,9975$$

$\Rightarrow$  Abweichung 2,5%

Wurde  $M_x$  mit einem 10Bit ADC gemessen, dann macht dies 2,5 Digitalisierungsstufen aus!

②.  $R_p = 1k\Omega, R_i = 1k\Omega$

$$\varepsilon = \frac{1}{1,25} \approx 0,75 \Rightarrow 25\% \text{ Abweichung}$$

③.  $R_p = 1k\Omega, R_i = 0,1k\Omega \quad \varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{1}{0,4}} = \frac{1}{3,5} \approx 28\%$

$\Rightarrow$  Abweichung 72%

---

Erkenne Stoffflaschen, leere Glasflaschen  
gefüllte Glasflaschen:

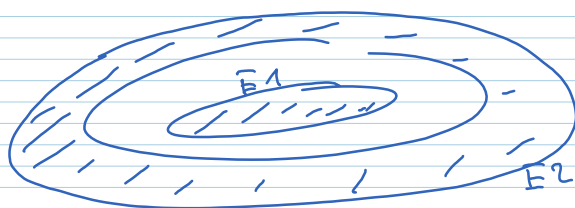
Zur Auswahl: Induktive und kapazitive Abstands-  
Sensoren



1. Induktive Abstandssensoren arbeiten durch Wirbelströme  
 $\Rightarrow$  erkennen metallische Prüflinge, keine Nichtleiter.  
 das Signal hängt von der Leitfähigkeit des Prüflings ab und vom Abstand.  
 $\Rightarrow$  bei konstantem Abstand Sensor - Prüfling ist eventuell sogar eine Unterscheidung verschiedener Metalle möglich.

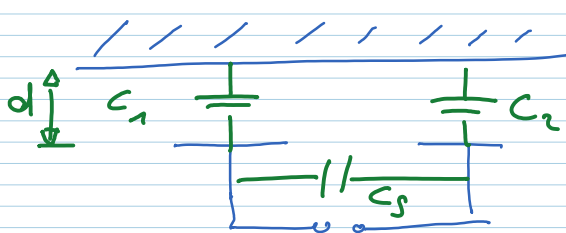
2. Kapazitive Abstandssensoren:  
 Unterschiedliche Arbeitsweise bei Leitern bzw. Nichtleitern:

Typische Sensorauf: Kreisscheibe in einem Ring.



Ersatzschaltbild:  $E_1$   $\parallel$   $\frac{1}{C_0}$   $\parallel$   $E_2$   
 $C_S$

Nun wird eine Metallplatte angezogen.



In Näherung gilt:

$$C_1 = \epsilon_0 \cdot \frac{A_1}{d}$$

$A_1 = \text{Fläche Elektrode 1}$

$$\frac{1}{C^*} = d \cdot \left( \frac{1}{\epsilon_0 A_1} + \frac{1}{\epsilon_0 A_2} \right)$$

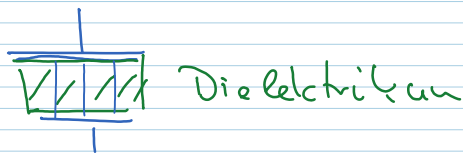
$$C_2 = \epsilon_0 \cdot \frac{A_2}{d}$$

$C_{ges} = C_S + C$  hängt nur von  $d$  ab, nicht von Material.

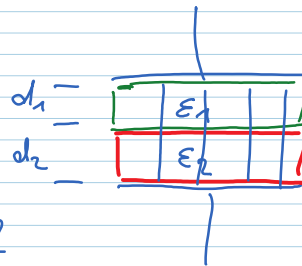
$\Rightarrow$  Metalle werden materialunabhängig erkannt.

② Kapazitive Sensoren bei Nichtleitern:

Elektrische Feldlinien gehen durch das Material hindurch.  
 herkömmlicher Kondensator:



bei 2 Dielektrika im Kondensator:



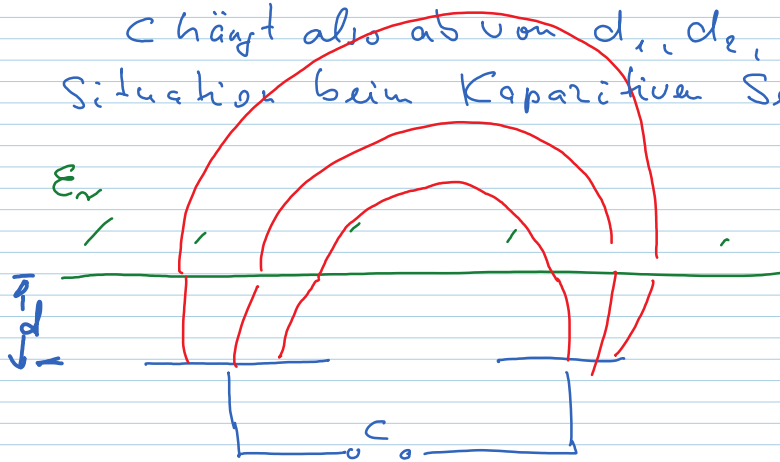
Feldlinien durchdringen beide.

Wie groß ist hier C?

C kann zusammengesetzt werden aus einem Kondensator mit  $d_1$  und  $\epsilon_1$  und einem mit  $d_2$  und  $\epsilon_2$ , da in Reihe geschaltet sind:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_1 \cdot \frac{A}{d_1}} + \frac{1}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_2 \cdot \frac{A}{d_2}} = \frac{d_1}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_1 \cdot A} + \frac{d_2}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_2 \cdot A}$$

C hängt also ab von  $d_1, d_2, \epsilon_1, \epsilon_2$   
 Situation beim Kapazitiven Sensor:



C hängt ab von  
 Abstand d und  
 von  $\epsilon_r$  des  
 Prüflings

⇒ Es können Abstände d gemessen, wobei C auch von Material des Nichtleiters abhängt. ⇒

Verschiedene Nichtleiter können unterschieden werden

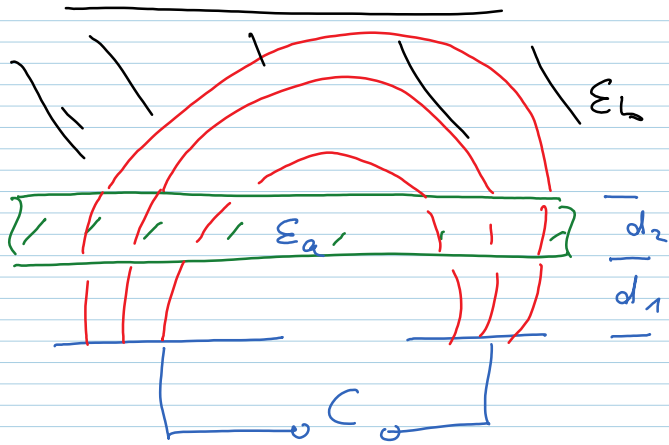
⇒ Kapazitive Sensoren messen Abstände zu

Metallen: material unabhängig

Nichtleitern: material abhängig.

Was geschieht, wenn das Dielektrikum "dünn" ist?

Was geschieht, wenn das Dielektrikum dünn ist:

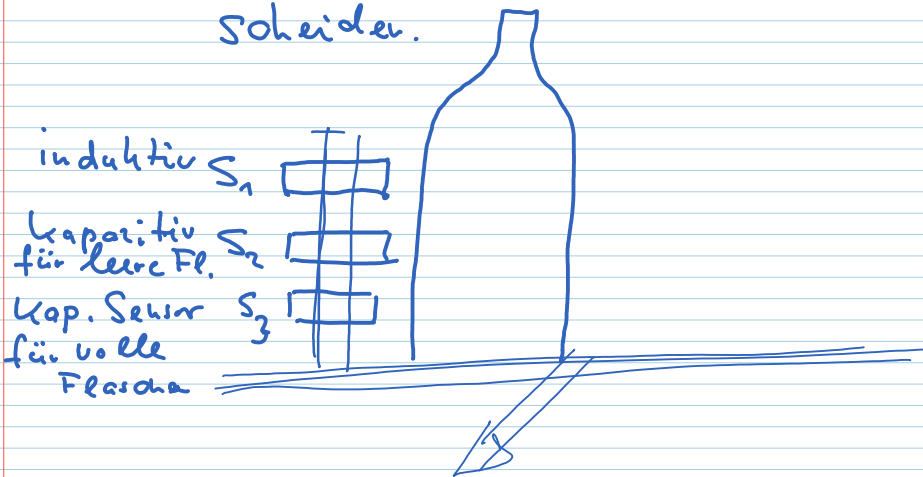


$C$  hängt ab von  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $\epsilon_a$  und  $\epsilon_b$ .

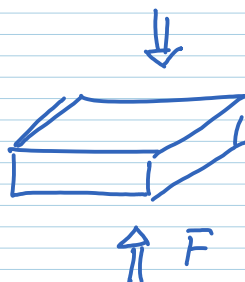
- Sind  $d_1$  und  $\epsilon_b$  bekannt (und  $\epsilon_a$ ), z.B.  $\epsilon_b = 1$ ,  
 $\Rightarrow$  Folienstärke  $d_2$  kann gemessen werden
- Dies ist auch die Basis, um festzustellen, ob sich hinter dem Dielektrikum noch ein weiteres Material

Sind  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $\epsilon_a$  bekannt, wird mit  $C$  festgestellt ob sich noch ein weiteres Material vorfindet.

$\Rightarrow$  Man kann leere und volle Glasflaschen unterscheiden.



Piezoeffekt:



$$Q = d F$$

$$d = 2,3 \cdot 10^{-12} \frac{C}{N}$$

Quarz

Durchmesser 10 mm  
 Dicke 1 mm  
 1 kg

$$F = m \cdot g = 10 \text{ N}$$

Quarz

$$\Rightarrow Q = 2,3 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Cb}}{\text{N}} \cdot 10 \text{ N}$$

$$= 2,3 \cdot 10^{-11} \text{ Cb}$$

Welche Spannung entsteht dadurch am Sensor?

Sensor hat Kapazität  $C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$

$$A \approx \pi \cdot r^2 \approx 80 \text{ mm}^2$$

$$\epsilon_r = 4,5$$

$$C = \frac{8,8 \cdot 10^{-12} \cdot 4,5 \cdot 80 \text{ mm}^2}{1 \text{ mm}} \frac{\text{F}}{\text{m}}$$

$$= \underline{\underline{3200 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-3} \text{ F}}}$$

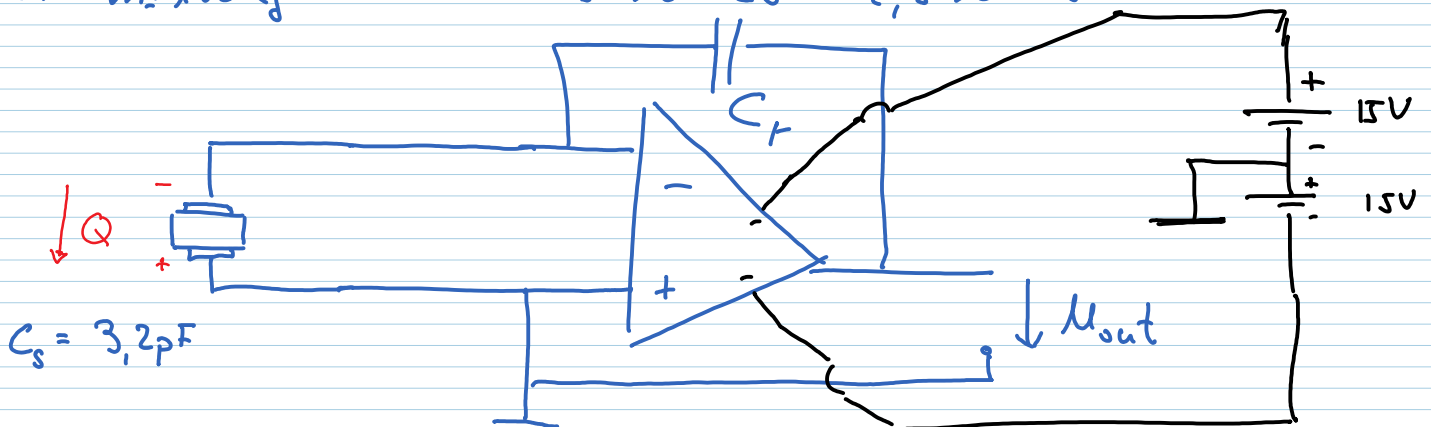
$$C = 3,2 \text{ pF}$$

$$U = \frac{1}{C} \cdot Q = \frac{2,3 \cdot 10^{-11} \text{ Cb}}{3,2 \cdot 10^{-12} \text{ F}} \approx 7 \text{ V}$$

Mit diesem Ergebnis konzipiere für diesen Sensor einen Ladverstärker sodass bei  $m = 100 \text{ kg}$  1V Ausgangsspannung entsteht.

$$m = 1 \text{ kg} \Rightarrow Q = 2,3 \cdot 10^{-11} \text{ Cb}$$

$$\Rightarrow m = 100 \text{ kg} \Rightarrow Q = 2,3 \cdot 10^{-9} \text{ Cb} = 2,3 \cdot 10^{-9} \text{ Cb}$$



$$M_{out} = \frac{1}{C_f} \cdot Q$$

$$1 \text{ V} = \frac{1}{C_f} \cdot 2,3 \text{ nCb} \Rightarrow C_f = \frac{2,3 \text{ nCb}}{1} = 2,3 \text{ nF}$$

$$\frac{1}{\phi} U = \frac{1}{C_r} \cdot 2,3 \mu C_6 \Rightarrow C_r = \frac{2,3 \mu C_6}{\frac{1}{\phi} U} = 0,23 \mu F$$

$$= 230 \text{ nF}$$

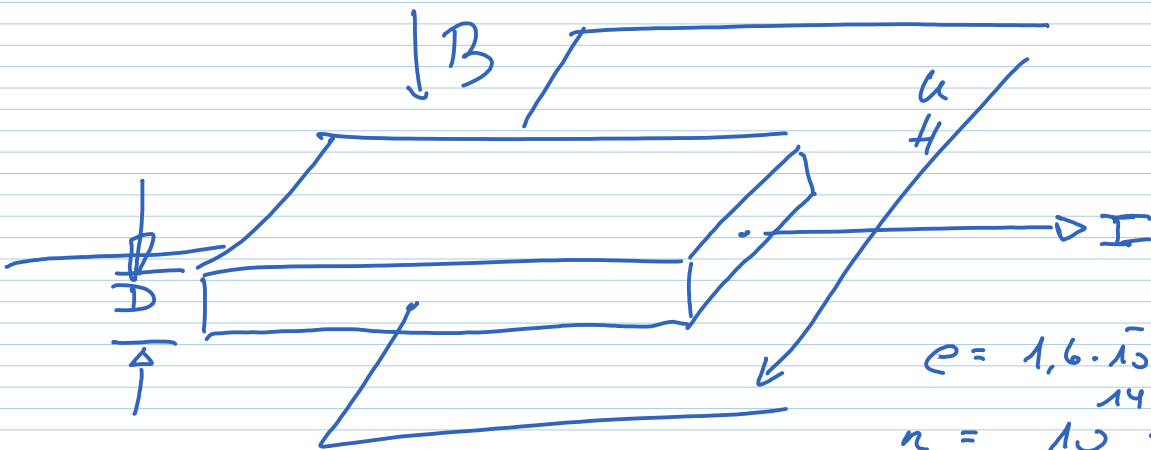
Welche Dehnung bei 10 mm Länge und  $U = 1000 \text{ V}$

$$\epsilon = d \cdot U$$

Quarz:  $2,3 \cdot 10^{-12} \frac{C_6}{N} \cdot 1000 \text{ V} = 2,3 \cdot 10^{-9} \frac{C_6 \cdot V}{N}$

$$\frac{C_6 \cdot V}{N} = \frac{A \cdot s \cdot V}{N} = \frac{W \cdot s}{N} = \frac{\frac{\text{Nm}}{s} \cdot s}{\text{N}} = \text{m}$$

$$\epsilon = 2,3 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 2,3 \text{ nm}$$



$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}_6$$

$$n = 10^{14} \frac{1}{\text{cm}^3}$$

$$M_H = - \frac{I \cdot B}{e \cdot n \cdot D} =$$

$$D = 0,5 \mu\text{m}$$

$$I = 1 \text{ mA} \quad B = 30 \mu\text{T}$$

$$= \frac{10^{-3} \cdot 30 \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{14} \cdot 0,5 \mu\text{m}} \frac{\text{cm}^3 \text{ AT}}{\text{C}_6}$$

$$= 3,75 \cdot \frac{10^{-9}}{10^{-5}} \frac{\text{cm}^3 \text{ AT}}{\text{mm C}_6}$$

$$= \frac{\text{cm}^3}{\text{mm}} = \frac{\text{cm}^2}{1,14}$$

$$= 3,75 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^2 \cdot \text{T}}{\text{S}}$$
$$= 3,75 \cdot 10^{-4} \text{ V} = 0,375 \text{ mV}$$

$$= \frac{\text{cm}^3}{10^{-4} \text{ cm}} = \frac{\text{cm}^2}{10^{-4}}$$
$$= 10^4 \text{ cm}^2$$
$$= 10^4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = \text{m}^2$$