

Univ.Prof. Dr.sc.techn. Georg Schitter
schitter@acin.tuwien.ac.at

Lösung Rechenübung 5

Physikalische Sensorik

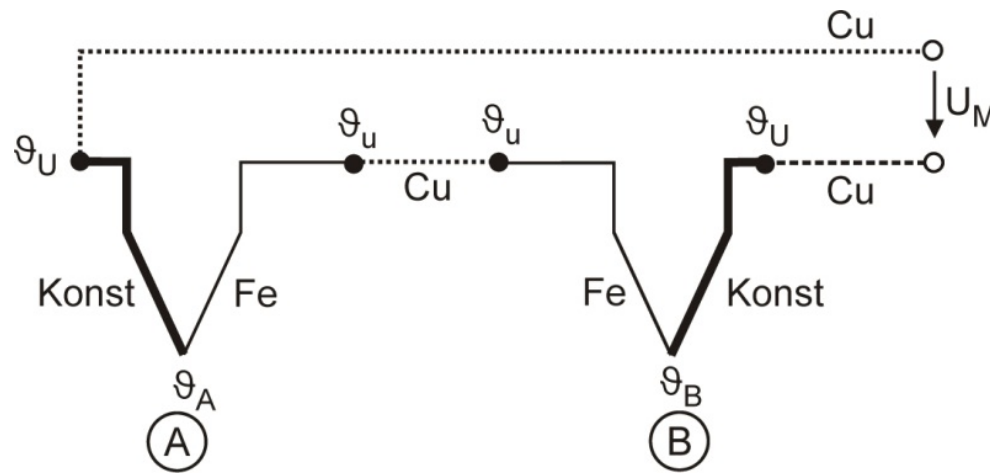
Messtechnik, VU 376.045 (3 SWS, 4 ECTS)
Sommersemester 2014

Beispiel 1 Thermoelemente

- Messung der Temperaturdifferenz $\vartheta_A - \vartheta_B$, alle Verbindungsstellen haben die Temperatur ϑ_U
- Die thermoelektrische Spannungsreihe für die beiden Materialien ist

$$K_{FePt} = +1,9mV/(100K)$$

$$K_{KonstPt} = -3,1mV/(100K)$$



Beispiel 1 Thermoelemente

- Wie groß ist die Empfindlichkeit $k_{FeKonst}$ der beiden Thermoelemente zahlenmäßig in mV/100 K?

- $k_{FeKonst} = k_{FePt} - k_{KonstPt} = \frac{1,9 \text{ mV}}{100 \text{ K}} - \frac{-3,1 \text{ mV}}{100 \text{ K}} = 5 \frac{\text{mV}}{100 \text{ K}}$

- Geben Sie die Messspannung U_M abhängig von der Empfindlichkeit $k_{FeKonst}$ der Thermoelemente und den gegebenen Celsius-Temperaturen an.

- $k_{CuKonst} \cdot \vartheta_U + k_{KonstFe} \cdot \vartheta_A + k_{FeCu} \cdot \vartheta_U + k_{CuFe} \cdot \vartheta_U + k_{FeKonst} \cdot \vartheta_B + k_{KonstCu} \cdot \vartheta_U - U_M = 0$

- mit $k_{xy} = -k_{yx}$ folgt $U_M = k_{KonstFe}(\vartheta_A - \vartheta_B)$

Beispiel 1 Thermoelemente

- Diskutieren Sie den Einfluss der Umgebungstemperatur ϑ_U auf die Messspannung U_M .
 - Durch die Differenzbildung der Temperaturen verschwindet der Einfluss der Umgebungstemperatur
- Gemessen wird eine Spannung von $U_M = 220\mu V$. Wie groß ist die Temperaturdifferenz $\vartheta_A - \vartheta_B$?

- $$\vartheta_A - \vartheta_B = \frac{U_M}{k_{KonstFe}} = \frac{220\ \mu V}{5,0 \frac{mV}{100\ K}} = 4,4\ K = 4,4\ ^\circ C$$

Beispiel 2 Kapazitive Aufnehmer

- Gegeben ist der dargestellte Plattenkondensator

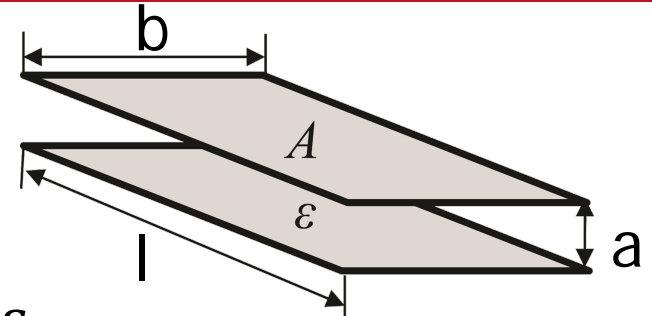
$$l = 10 \text{ mm}; b = 1 \text{ mm}; a = 1 \text{ mm}; \varepsilon = \varepsilon_0$$

Nehmen Sie eine homogene Feldverteilung an und vernachlässigen Sie Streufelder.

- Leiten Sie die Kapazität des Plattenkondensators in Abhängigkeit von A , a und ε her. Skizzieren Sie den Verlauf der Kapazität über den Plattenabstand im Bereich $a = 0,5 \dots 1,5 \text{ mm}$.

- Elektrisches Feld einer Punktladung $\vec{E} = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2} \vec{e}_r$

- Elektrische Flussdichte einer Punktladung $\vec{D} = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \vec{e}_r$

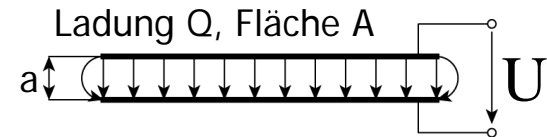


Beispiel 2 Kapazitive Aufnehmer

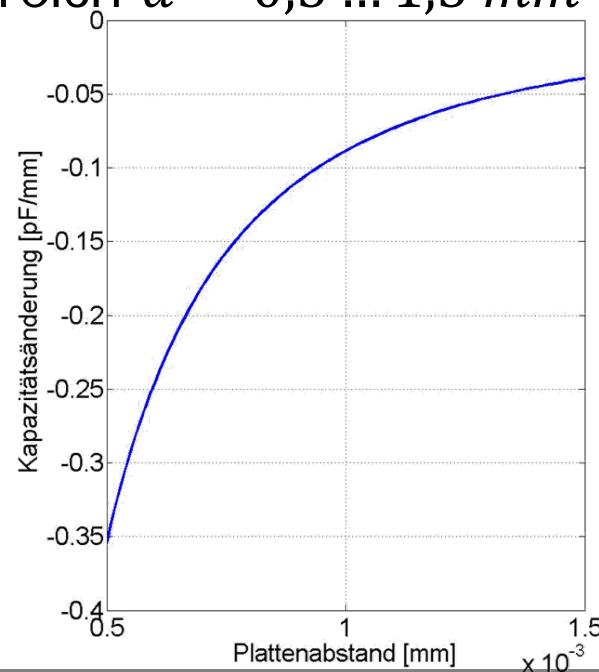
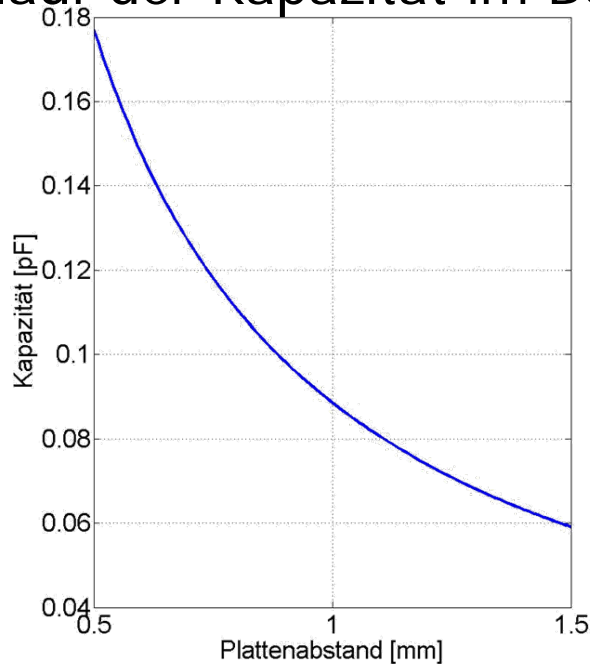
■ Es folgt $\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E}$

■ Bei einem Plattenkondensator

■ $D = \frac{Q}{A} = \varepsilon_0 \cdot \frac{U}{a} \rightarrow Q = \underbrace{\left(\frac{\varepsilon_0 \cdot A}{a}\right)}_C \cdot U$



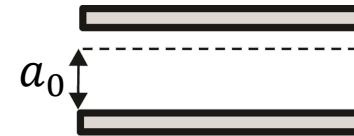
■ Verlauf der Kapazität im Bereich $a = 0,5 \dots 1,5 \text{ mm}$



Beispiel 2 Kapazitive Aufnehmer

- Berechnen Sie die Kapazität und die Empfindlichkeit in Abhängigkeit des Plattenabstands $a_0 + \Delta a$

- $$C = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{a} = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{a_0 + \Delta a} = \frac{\frac{\epsilon_0 \cdot A}{a_0}}{1 + \frac{\Delta a}{a_0}} = C_0 \cdot \frac{a_0}{a_0 + \Delta a}$$

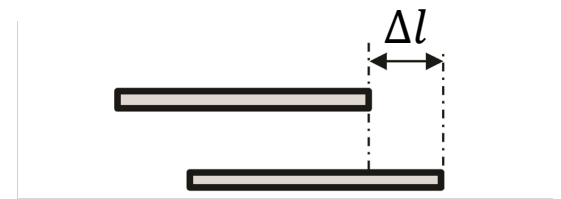


- $$E = \frac{dC}{d\Delta a} = -C_0 \cdot \frac{a_0}{(a_0 + \Delta a)^2} \text{ (Hyperbel } \rightarrow \text{ nichtlinear)}$$

- Berechnen Sie die Kapazität und die Empfindlichkeit in Abhängigkeit der Plattenüberlappung $l_0 + \Delta l$

- $$C = \frac{\epsilon_0 \cdot (l_0 - |\Delta l|) \cdot b}{a} = C_0 \cdot \left(1 - \frac{|\Delta l|}{l_0}\right)$$

- $$E = \frac{dC}{d\Delta l} = -\frac{C_0}{l_0} \text{ (konstant } \rightarrow \text{ linear)}$$

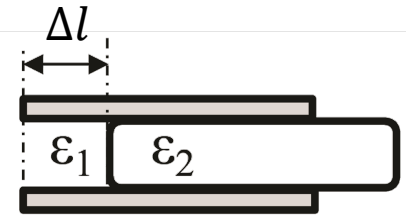
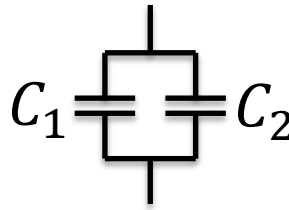


Beispiel 2 Kapazitive Aufnehmer

- Berechnen Sie die Kapazität und die Empfindlichkeit in Abhängigkeit der Position des Dielektrikums $l_0 + \Delta l$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0, \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_0 \cdot 1000$$

- Ersatzschaltbild



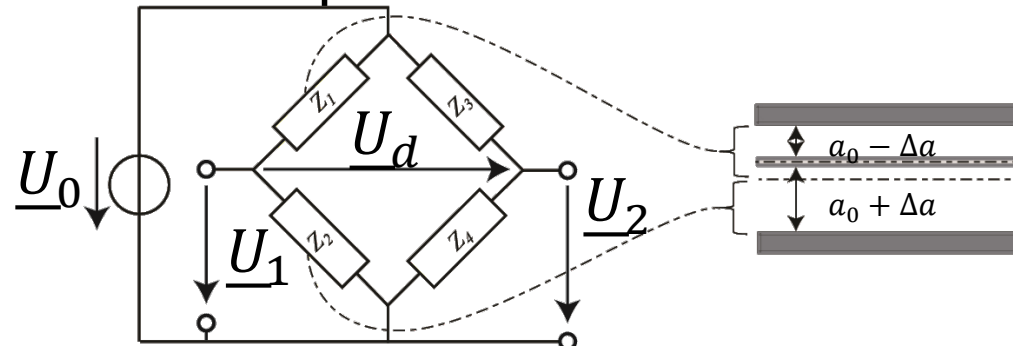
- $C = C_1 + C_2 = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1 \cdot \Delta l \cdot b}{a} + \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_2 \cdot (l_0 - \Delta l) \cdot b}{a} = C_0 \cdot (\varepsilon_2 + (1 - \varepsilon_2) \cdot \frac{\Delta l}{l_0})$

- $E = \frac{dC}{d\Delta l} = -C_0 \cdot \frac{\varepsilon_2 - 1}{l_0}$ (konstant \rightarrow linear)

Beispiel 2 Kapazitive Aufnehmer

- Wie kann die Nichtlinearität, die durch den veränderlichen Plattenabstand entsteht, unterdrückt werden? Berechnen Sie dafür die Abhängigkeit der Ausgangsspannung vom Plattenabstand und die Empfindlichkeit.

- Halbbrücke



- $$Z_1 = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_1} = \frac{a_0 + \Delta a}{j \cdot \omega \cdot C_0 \cdot a_0}, Z_2 = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_2} = \frac{a_0 - \Delta a}{j \cdot \omega \cdot C_0 \cdot a_0}, Z_3 = Z_4 = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_0}$$

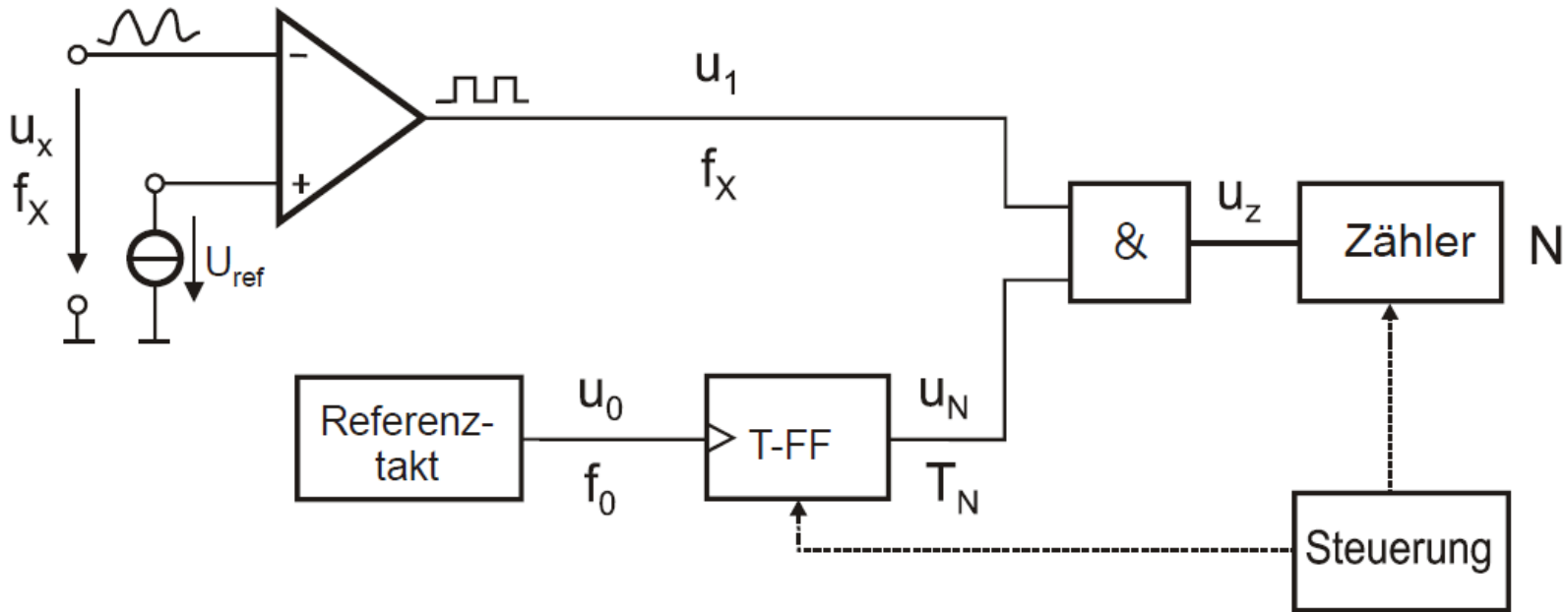
$$\underline{U}_d = \underline{U}_1 - \underline{U}_2 = \underline{U}_0 \cdot \left(\frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} - \frac{\underline{Z}_4}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4} \right) = -\underline{U}_0 \cdot \frac{\Delta a}{2 \cdot a_0}$$

$$E = \frac{d\underline{U}_d}{d\Delta a} = -\frac{\underline{U}_0}{2 \cdot a_0}$$

Beispiel 3 Digitale Geschwindigkeitsmessung

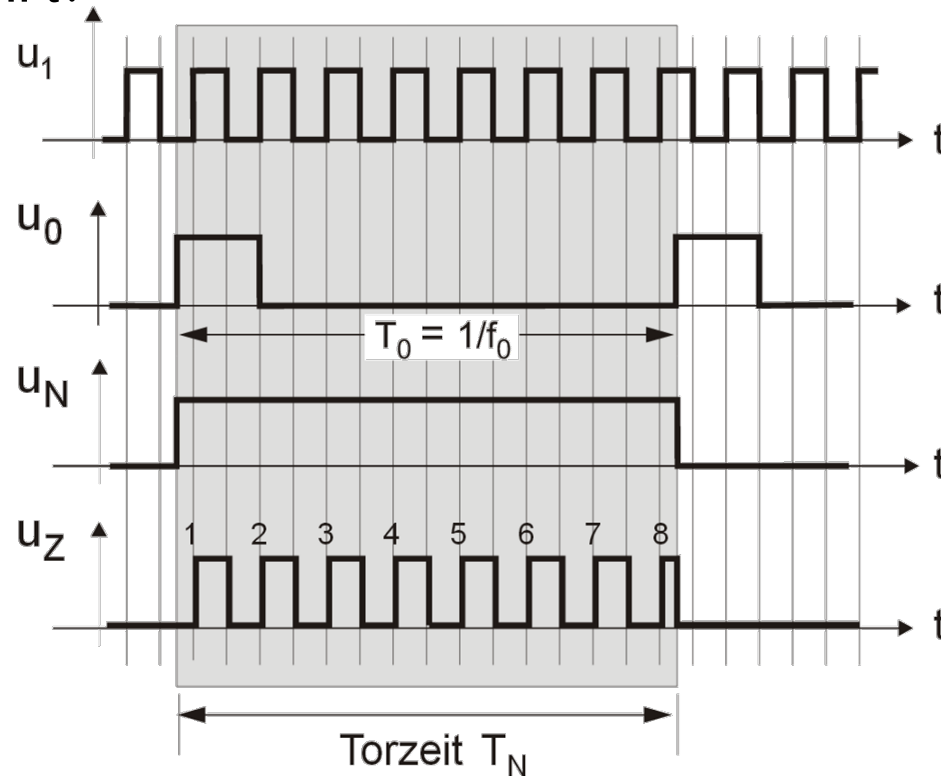
- Ein inkrementeller Glasmaßstab mit Markierungen im Abstand von d bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit v . Eine optische Abtastung liefert Impulse $u_x(t)$, die nach einer analogen Komparatorstufe als Rechteckimpulse $u_1(t)$ mit den logischen Pegeln "0" und "1" bei unveränderter Frequenz f_x zur Verfügung stehen.
- Die Geschwindigkeit v des Glasstabes soll nach dem Prinzip der Frequenzmessung bestimmt und auf einem Zähler, der die positiven Flanken zählt, als Zählerstand N angezeigt werden.

Beispiel 3 Digitale Geschwindigkeitsmessung



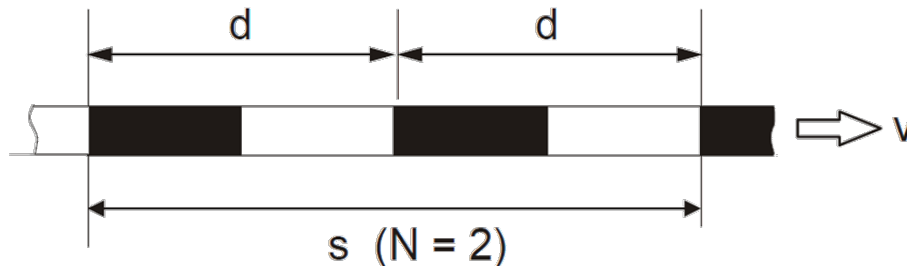
Beispiel 3 Digitale Geschwindigkeitsmessung

- Skizzieren Sie für eine konstante Geschwindigkeit v einen möglichen Spannungsverlauf von $u_0(t)$, $u_N(t)$ und $u_Z(t)$ für einen vollständigen Messzyklus, der zu einem Zählerstand von $N=8$ führt.



Beispiel 3 Digitale Geschwindigkeitsmessung

- Zeigen Sie durch Rechnung den Zusammenhang zwischen der Frequenz f_x , der Geschwindigkeit v und dem Markenabstand d .



s: zurückgelegter Weg

N: Zahl der im Abstand d abgetasteten Markierungen

- $x = N \cdot d$Zurückgelegter Weg

- $f_x = \frac{N}{T_N}$

- $v = \frac{x}{T_N} \rightarrow T_N = \frac{x}{v} \rightarrow T_N = \frac{N \cdot d}{v}$

- $f_x = \frac{N}{T_N} = \frac{N \cdot v}{N \cdot d} = \frac{v}{d}$

Beispiel 3 Digitale Geschwindigkeitsmessung

- Berechnen Sie den Zählerstand N abhängig von der Frequenz f_x und der Referenzfrequenz f_0 .

- $T_N = \frac{1}{f_0} \rightarrow N = f_x \cdot T_N = \frac{f_x}{f_0}$

- Welcher Zusammenhang besteht schließlich zwischen der zu messenden Geschwindigkeit v und dem Zählerstand N abhängig von d und f_0 ?

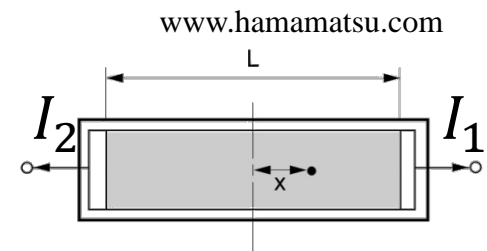
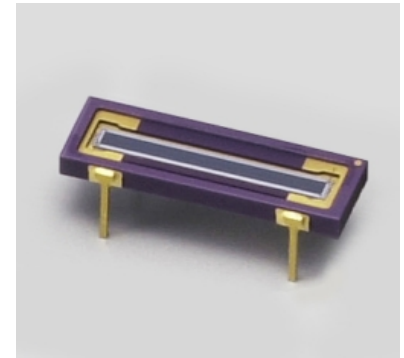
- $N = \frac{f_x}{f_0} = \frac{v}{d \cdot f_0} \rightarrow v = f_0 \cdot d \cdot N$

- Wie ist f_0 zahlenmäßig in Hz zu dimensionieren, damit v direkt in mm/s angezeigt wird? ($d = 10\mu m$)

- $f_0 = \frac{v}{d \cdot N} = \frac{N \cdot mm/s}{d \cdot N} = \frac{mm}{s \cdot 0,01mm} = 100Hz$

Beispiel 4 Optischer Aufnehmer

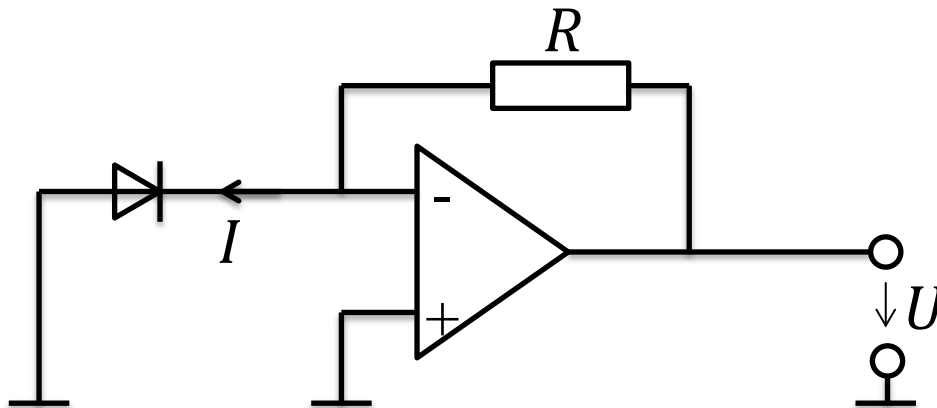
- Es soll mit einer lateralen Photodiode die Position eines Laserstrahls gemessen werden
- Entwickeln Sie eine Formel zur Berechnung der Position x des Laserstrahls in Abhängigkeit der Ströme I_1 und I_2 und der Länge L



- Wenn $x = \frac{L}{2} \rightarrow I_1 = I, I_2 = 0$
- Wenn $x = -\frac{L}{2} \rightarrow I_1 = 0, I_2 = I$
- $\rightarrow I_1(x) = I \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{x}{L}\right), I_2(x) = I \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{L}\right), I = I_1 + I_2$
- $\rightarrow x = L \cdot \frac{I_1 - I_2}{2 \cdot (I_1 + I_2)}$

Beispiel 4 Optischer Aufnehmer

- Wie würde Sie den Ausgangsstrom in ein äquivalentes Spannungssignal wandeln?
Der Messbereich des Spannungsmessgeräts beträgt $10V$.
Die Laserstrahlleistung beträgt 5 mW bei $\lambda = 920\text{ nm}$. Die restlichen Daten entnehmen Sie dem Datenblatt der Photodiode (S3931).
- Transimpedanzverstärker



Beispiel 4 Optischer Aufnehmer

General ratings / Absolute maximum ratings

Type No.	Package	Window material *1	Active area size (mm)	Absolute maximum ratings		
				Reverse voltage VR Max. (V)	Operating temperature Topr (°C)	Storage temperature Tstg (°C)
S3931	Ceramic	R	1 × 6	20	-10 to +60	-20 to +80
S3932		R	1 × 12			
S3270 *2		R (B)	1 × 37		-10 to +75	

Electrical and optical characteristics (Typ. Ta=25 °C, unless otherwise noted)

Type No.	Spectral response range λ (nm)	Peak sensitivity wavelength λ_p (nm)	Photo sensitivity S $\lambda=\lambda_p$ (A/W)	Interelectrode resistance Rie Vb=0.1 V			Position detection error *3 E VR=5 V light spot ϕ 200 μ m		Saturation photocurrent *4 VR=5 V RL=1 k Ω (μ A)	Dark current ID VR=5 V		Temp. coefficient of ID TCID (times/°C)	Rise time tr VR=5 V RL=1 k Ω (μ s)	Terminal capacitance Ct VR=5 V f=10 kHz (pF)	Position resolution *5 (μ m)
				Min. (k Ω)	Typ. (k Ω)	Max. (k Ω)	Typ. (μ m)	Max. (μ m)		Typ. (nA)	Max. (nA)				
S3931	320 to 1100	920	0.55	30	50	80	±30	±120	100	0.15	10	1.15	1.5	40	0.2
S3932							±60	±240		0.2	20				
S3270	700 to 1100	960	0.55	10	15	20	±100	±400	300	0.5	20		1.0	100	2.8

www.hamamatsu.com

Beispiel 4 Optischer Aufnehmer

- $I = S \cdot P = 0,55 \frac{\text{A}}{\text{W}} \cdot 0,005 \text{ W} = 2,75 \text{ mA}$

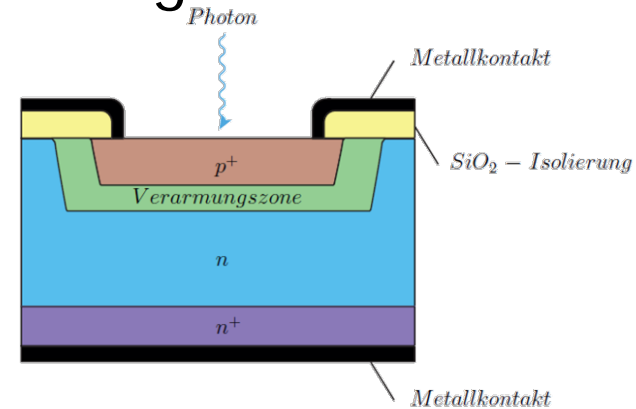
- $R = \frac{U}{I} = 3,64 \text{ k}\Omega$

- Diskutieren Sie wie die Empfindlichkeit der Messung erhöht werden kann: Erhöhung von R

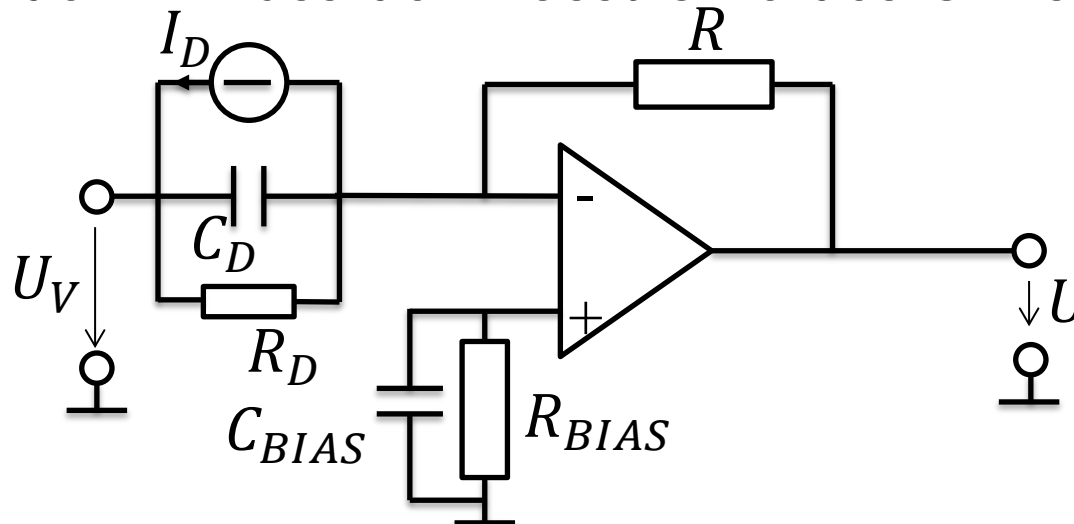
Beispiel 4 Optischer Aufnehmer

■ Wie kann die Diodenkapazität verringert werden?

- Vorspannen der Fotodiode
→ Verarmungszone wird größer

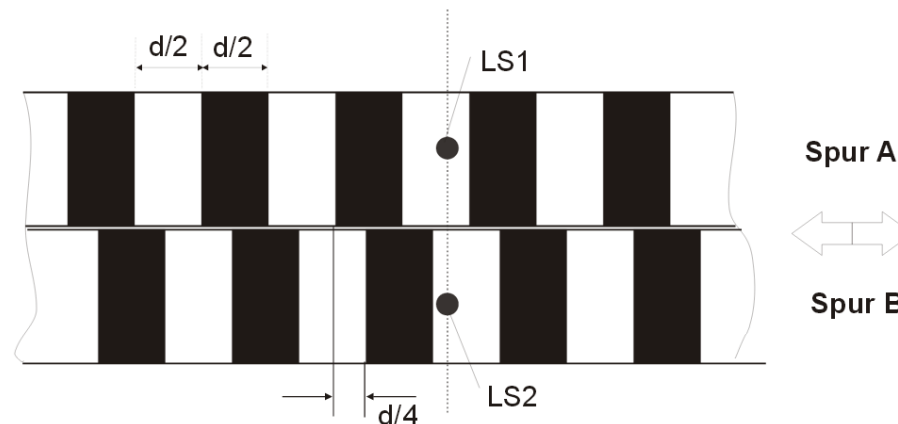


■ Wie kann der Einfluss der Biasströme des OPVs verringert werden?



Beispiel 5 Inkrementaler Längengeber

- Gegeben ist ein Glasmaßstab mit den Spuren A und B; die Marken sind im Abstand d aufgebracht und werden von 2 Lichtschranken LS1 und LS2 abgetastet. Mit Hilfe der (nicht eingezeichneten) Spur B soll eine Richtungsauswertung ermöglicht werden.
- Vervollständigen Sie den Maßstab um die Spur B und geben Sie die wesentlichen geometrischen Daten an.



Beispiel 5 Inkrementaler Längengeber

- Industrielle Längengeber besitzen nur 1 Spur, dafür aber eine entsprechend konstruierte Blende. Skizzieren und bemaßen Sie einen derartigen Aufbau.

