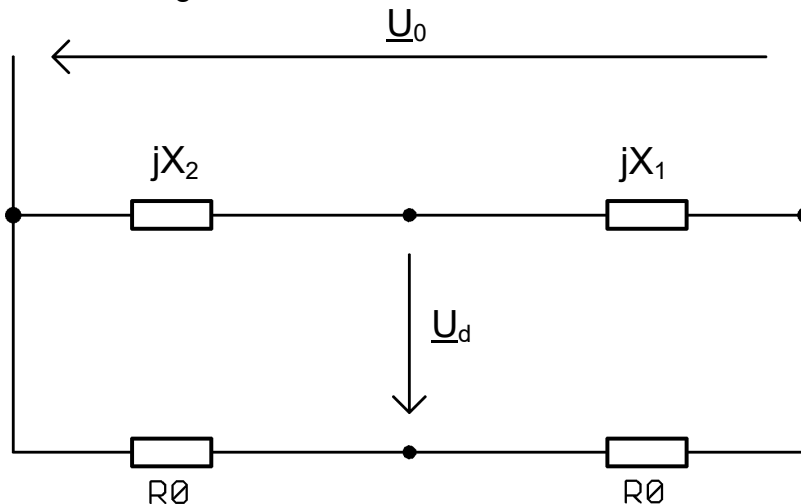


Wechselspannungs-Ausschlagbrücke¹:

Impedanz Änderungen von induktiven und kapazitiven Aufnehmer werden oft in Ausschlagbrücken gemessen.

Dabei werden die Wirkwiderstände der Aufnehmer als konstant angesehen und vernachlässigt → nur die Blindwiderstände werden untersucht.



Brücke mit Blindwiderständen (X_1 , X_2) und Wirkwiderständen (R_0).

Aus der Gleichspannungsmessbrücke mit den Widerständen R_1 , R_2 , R_3 und R_4 ist bekannt:

$$U_3 - U_d - U_1 = 0 \rightarrow$$

$$U_d = U_3 - U_1 = U_0 \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) = U_0 \frac{R_3 \cdot R_2 - R_1 \cdot R_4}{(R_3 + R_4) \cdot (R_2 + R_1)}$$

Setzt man nun für $R_3 \triangleq R_0$ und $R_4 \triangleq R_0$ ebenso für $R_1 \triangleq jX_1$ und $R_2 \triangleq jX_2$ ein und multipliziert dies aus so ergibt sich die Diagonalspannung der Wechselspannungsmessbrücke zu

$$U_d = U_0 \frac{R_0 \cdot jX_2 - jX_1 \cdot R_0}{(R_0 + R_0) \cdot j(X_2 + X_1)} = U_0 \frac{R_0 \cdot (X_2 - X_1)}{2R_0 \cdot (X_2 + X_1)} = \frac{U_0}{2} \cdot \frac{(X_2 - X_1)}{(X_2 + X_1)}$$

Daraus folgt für die Viertelbrücke mit $X_1 = X_0$ und $X_2 = X_0 + \Delta X$ die Diagonalspannung zu

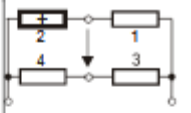
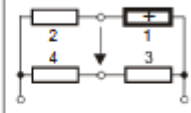
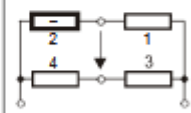
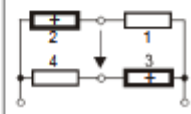
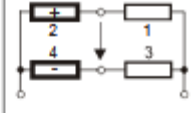
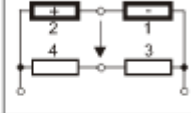
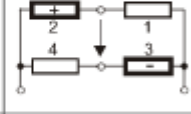
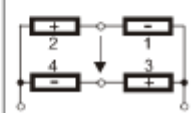
$$U_d = \frac{U_0}{2} \cdot \frac{(X_0 + \Delta X - X_0)}{(X_0 + \Delta X + X_0)} = \frac{U_0}{2} \cdot \frac{\Delta X}{2X_0 + \Delta X}$$

für $\Delta X \ll X_0$ kann ΔX im Nenner vernachlässigt werden und wir erhalten $U_d \approx \frac{U_0}{4} \frac{\Delta X}{X_0}$

→ Die Diagonalspannung steigt ungefähr proportional mit ΔX

¹ Schröder, Elmar/ Reindl, Leonhard/ Zagar, Bernhard: Elektrische Messtechnik. München, 10. Auflage 2014, S.259 ff.

Viertel-, Halb-, und Vollmessbrücke mit einer Versorgungsspannung U_V

Viertelbrücke	1		$\approx \frac{U_V}{4} \frac{\Delta R}{R}$
	2		$\approx -\frac{U_V}{4} \frac{\Delta R}{R}$
	3		$\approx -\frac{U_V}{4} \frac{\Delta R}{R}$
Halbbrücke	4		$\approx \frac{U_V}{2} \frac{\Delta R}{R}$
	5		$\approx \frac{U_V}{2} \frac{\Delta R}{R}$
	6		$= \frac{U_V}{2} \frac{\Delta R}{R}$
	7		$\approx -\frac{U_V}{4} \left(\frac{\Delta R}{R} \right)^2$
Vollbrücke	8		$= U_V \frac{\Delta R}{R}$

2

² http://www.schruefer-messtechnik.de/EMT-Uebungen/Loesungen/3.4-bruecke_dms-02b.pdf;
13.10.2017

Kapazitive Aufnehmer

Die Kapazität C eines Plattenkondensators berechnet sich zu $C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{a}$, wobei a der Plattenabstand, A die Plattenfläche, ϵ_r die relative Permittivität und ϵ_0 die elektrische Feldkonstant ($8,85 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$) ist.

Funktionsweise:

Eine Änderung des Plattenabstands, der Plattenfläche oder der Permittivität führt zu einer Änderung der Kapazität

Wenn man nur eine Komponente in der Formel verändert, dann kann man aufgrund der Kapazitätsänderung auf den Wert der Komponente zurückrechnen.

Änderung von Plattenabstand a

Die Kapazität C ist indirekt proportional zum Plattenabstand a .

Die Empfindlichkeit E eines Kondensators ist:

$$E = \frac{dC}{da} = \frac{d\left(\frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{a}\right)}{da} = \frac{d(\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A \cdot a^{-1})}{da} = -\frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{a^2} = -\frac{C}{a} \quad \text{durch Umformen} \quad \frac{dC}{C} = -\frac{da}{a}$$

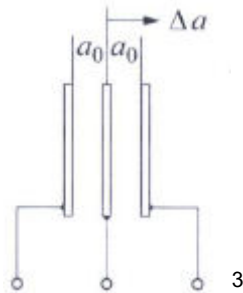
Die relative Änderung der Kapazität ist proportional zur relativen Abstandsänderung.

Die Kapazität nimmt bei einer Vergrößerung des Plattenabstands von a_0 um Δa auf den Wert $C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{a_0 + \Delta a}$ ab

Wird diese Änderung mit einer Viertelbrücke gemessen so ergibt sich eine

$$\text{Diagonalspannung } U_D = \frac{U_0}{2} \cdot \frac{\Delta a}{2a_0 + \Delta a} \approx \frac{U_0}{4} \cdot \frac{\Delta a}{a_0}$$

Die Nichtlinearität verschwindet bei einem Differentialkondensator.



Ein Differentialkondensator stellt 2 Kondensatoren mit einer gemeinsamen, verstellbaren Mittelplatte dar.

Wird die Mittelplatte um Δa verschoben, so vergrößert sich der Abstand des einen Plattenpaares, der Abstand des anderen nimmt ab.

Werden die beiden Hälften des Differentialkondensators in die diagonalen Zweige einer Brücke gelegt so ist die Diagonalspannung streng proportional zur Änderung des Plattenabstands

$$U_D = \frac{U_0}{2} \cdot \frac{\Delta a}{a_0}$$

Kondensatoren mit verschiebbaren Elektroden werden zur Weg- und Winkelmessung genutzt.

³ Schröfer, Elmar/ Reindl, Leonhard/ Zagar, Bernhard: Elektrische Messtechnik. München, 10. Auflage 2014, S. 269.

Änderung von Plattenfläche A

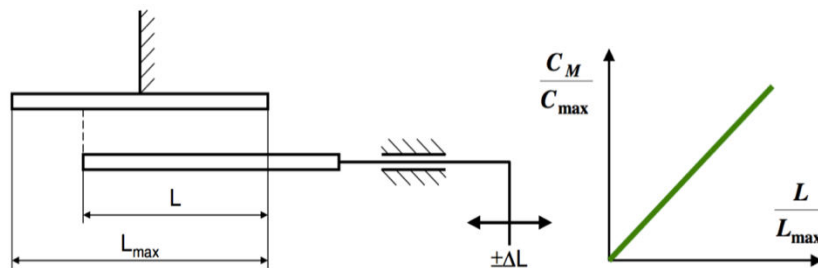
Eine weitere Methode ist die Änderung der Überdeckung, d.h. der wirksamen Fläche der Kondensatorplatten.

Wird eine Kondensatorplatte an der anderen vorbeigeschoben, sodass sie sich nur mehr teilweise mit der Länge L überdecken, so nimmt die Kapazität ab.

Befinden sich Platten mit der Breite b_0 und der Länge l_0 im Abstand a_0 gegenüber, so hat der Kondensator die maximale Kapazität $C_0 = \frac{\varepsilon_0 \cdot b_0 \cdot l_0}{a_0}$

Wird nun eine Kondensatorplatte verschoben, sodass sich beide nur mehr mit der Länge L überdecken, so nimmt die Kapazität auf den Wert $C = \frac{\varepsilon_0 \cdot b_0 \cdot L}{a_0} = C_0 \frac{L}{l_0}$ ab

Die Kapazitätsänderung ist proportional zur Längenänderung.



Zu beachten ist, dass die Kondensatorplatten während ihrer Bewegung exakt geführt werden müssen, damit der Plattenabstand genau eingehalten wird.

Ansonsten würde die Kapazitätsänderung aufgrund der Abstandsänderung das Messergebnis verfälschen.

In der Verfahrenstechnik, wird die Abhängigkeit der Kapazität von der Plattenfläche zur Bestimmung von Füllständen elektrisch leitender Flüssigkeiten verwendet.

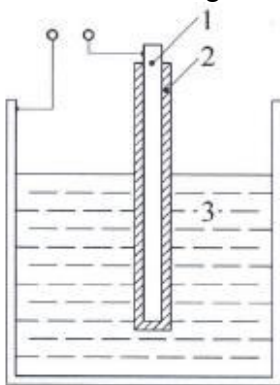


Bild 4.26 Kapazitive Füllstandsmessung einer leitenden Flüssigkeit mit isolierter Elektrode; 1 Elektrode, 2 Isolation, 3 Flüssigkeit

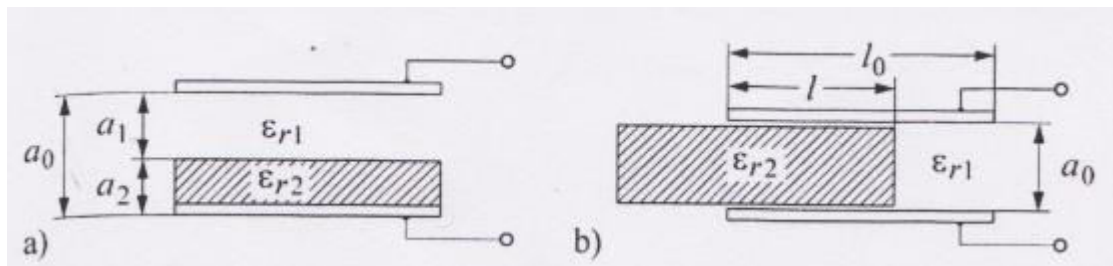
4

Eine Elektrode, die mit einer isolierenden Schicht umhüllt ist, taucht in die Flüssigkeit ein. Die isolierende Schicht stellt das Dielektrikum dar.

Je höher der Flüssigkeitsstand, desto höher die Kapazität.

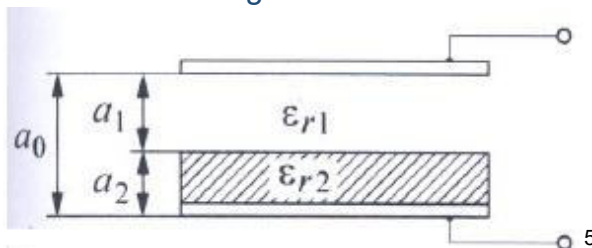
⁴ Schröfer, Elmar/ Reindl, Leonhard/ Zagar, Bernhard: Elektrische Messtechnik. München, 10. Auflage 2014, S. 270.

Schichtdicken- oder Füllstandsmessung mit einem Kondensator



Kondensator mit a) geschichtetem und b) eingeschobenem Dielektrikum

Kondensator mit geschichteten Dielektrikum



Der dargestellte Kondensator für die Schichtdickenmessung besteht aus zwei verschiedenen Dielektrika mit der jeweiligen Permittivitätszahl ϵ_{r1} und ϵ_{r2} . Die beiden Dielektrika zusammen füllen den Raum zwischen den Kondensatorplatten vollständig aus.

Die Schaltung der beiden Kondensatoren kann als Serienschaltung gesehen werden und für diese gilt die Formel:

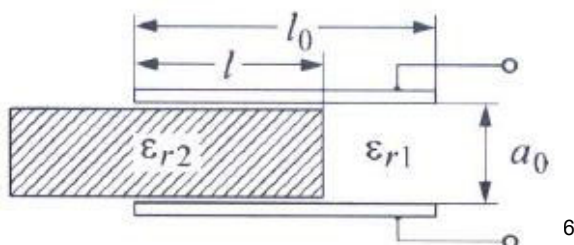
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{\epsilon_0 \cdot A} \left(\frac{a_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{a_2}{\epsilon_{r2}} \right)$$

Ist das erste Dielektrikum Luft, so ist die Gesamtkapazität nur abhängig von der Permittivitätszahl ϵ_{r2} und der Dicke d_2 .

Diese Methode wird verwendet um Schichtdicken von Folien, Fasern oder Papier berührungslos zu messen.

Die Dicke eines Stoffes (Folien, Papier, Fasern) wird bestimmt, indem man den Stoff zwischen zwei Kondensatorplatten durchzieht. Da die Permittivitätszahl des Stoffes bekannt ist, kann nach dem Messen der Kapazität die Dicke bestimmt werden.

Kondensator mit eingeschobenem Dielektrikum



Die Füllstandsmessung wird realisiert indem man das Dielektrikum 2 unterschiedlich tief in den Kondensator eintaucht. Dann hat man eine Parallelschaltung der Kondensatoren.

Die Gesamtkapazität berechnet sich zu:

⁵ Schrüfer, Elmar/ Reindl, Leonhard/ Zagar, Bernhard: Elektrische Messtechnik. München, 10. Auflage 2014, S. 271.

⁶ Schrüfer, Elmar/ Reindl, Leonhard/ Zagar, Bernhard: Elektrische Messtechnik. München, 10. Auflage 2014, S. 271.

$$C = C_1 + C_2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{r1} b_0 \cdot (l_0 - l)}{a_0} + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{r2} b_0 \cdot l}{a_0}$$

Wird hier wiederum Luft für das erste Dielektrikum verwendet, dann wächst die Kapazitätsänderung proportional mit der Eindringtiefe l :

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{C - C_0}{C_0} = (\varepsilon_{r2} - 1) \cdot \frac{l}{l_0} \quad C_0 \text{ ist die Kapazität des luftgefüllten Kondensators.}$$

Diese Art der Füllstandsmessung kann bei elektrisch nicht leitenden Schüttgütern und Flüssigkeiten verwendet werden. Die Kondensatorplatten in das zu messende Medium eingeführt und durch Messen der Kapazität kann dann auf die Füllhöhe l zurückgerechnet werden.

Feuchtigkeits- oder Temperaturmessung mit einem Kondensator⁷:

Die Permittivitätszahl von Wasser ($\varepsilon_r=81$) ist viel höher, als von vielen anderen Stoffen.

Daher nimmt mit steigendem Wassergehalt die Permittivitätszahl des Dielektrikums stark zu.

Daher eignet sich ein Kondensator sehr gut, um den Feuchtigkeitsgehalt in einem Stoff festzustellen.

Die Voraussetzung ist, dass der Stoff, in dem die Feuchtigkeit gemessen werden soll, nicht leitend ist (z.B. Getreide, Textilien, Holz oder Kohle).

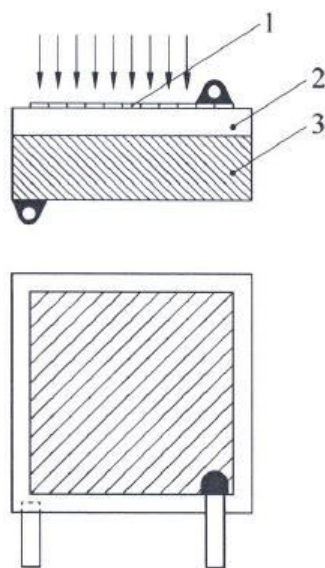
Ist die Feuchte in diesen Stoffen festzustellen, so werden diese durch die Platten eines Kondensators geführt.

Aus der gemessenen Kapazität kann auf den Wassergehalt zurückgeschlossen werden.

Bei speziellen Kunststoffen besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der relativen Feuchte in der Luft und dem vom Kunststoff aufgenommenen Wasser.

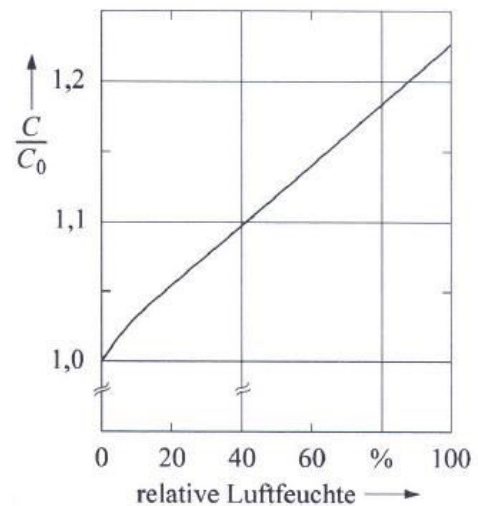
Wird ein derartiger Kunststoff als Dielektrikum verwendet, dann kann über die gemessene Kapazität auf die relative Luftfeuchte rückgeschlossen werden.

⁷ Schrüfer, Elmar/ Reindl, Leonhard/ Zagar, Bernhard: Elektrische Messtechnik. München, 10. Auflage 2014, S. 272



- 1...Durchlässige Gold-Elektrode
 2...feuchteempfindliches Dielektrikum
 3...Grundlektrode
 4...Anschlussklemmen

Durch die durchlässige Goldschicht kann die Feuchtigkeit in das feuchteempfindliche Dielektrikum durchdringen.



8

Induktive Aufnehmer

Bei dieser Art von Aufnehmern ist die zu messende elektrische Größe die Induktivität L .

Diese berechnet sich: $L = \frac{N^2 \mu_0 \mu_r A}{s} = \frac{N^2}{R_m}$

Die Induktivität hängt somit von Quadrat der Windungszahl und dem magnetischen Widerstand R_m der Spule ab.

Der magnetische Widerstand ergibt sich zu

$$R_m = \frac{s}{\mu_0 \mu_r A}$$

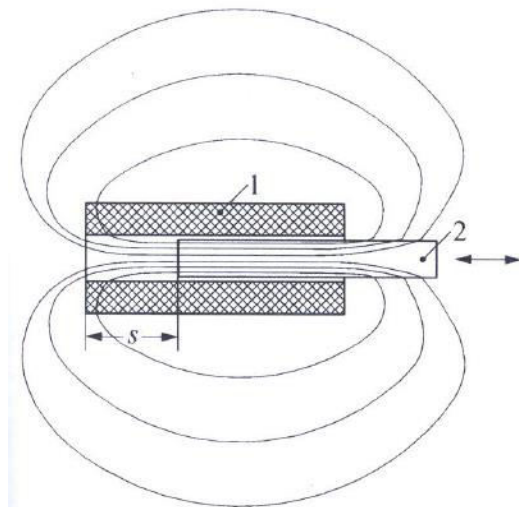
- s ...Weglänge der Feldlinien
- A ...Von den Feldlinien durchsetzte Fläche
- Magnetische Feldkonstante $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$
- Relative Permeabilität μ_r ...materialabhängig; für Luft $\mu_r \approx 1$)

Folgende, nichtelektrische Größen, können somit den induktiven Aufnehmer beeinflussen:

- die Weglänge s
- die materialabhängige relative Permeabilität μ_r

⁸ Schrüfer, Elmar/ Reindl, Leonhard/ Zagar, Bernhard: Elektrische Messtechnik. München, 10. Auflage 2014, S. 272

Tauchkern Aufnehmer zur Längenmessung



9

Die magnetischen Feldlinien laufen in drei verschiedenen Bereichen:

- Im Eisen (A_{Fe} , s_{Fe})
- In der Luft innerhalb der Spule (s , A)
- In der Luft außerhalb der Spule (s_a , A_a)

Spule(1) mit verschiebbarem Weicheisenkern(2)

Der Magnetische Widerstand der Tauchkernspule berechnet sich

$$R_m = \frac{s_{Fe}}{\mu_0 \mu_r A_{Fe}} + \frac{s}{\mu_0 A} + \frac{s_a}{\mu_0 A_a}$$

Diese Formel ist stark vereinfachbar!

- Der erster Term ist vernachlässigbar: μ_r von Eisen derartig hoch ($10^3 - 10^4$) → Term wird sehr klein
- Der dritter Term ist auch vernachlässigbar: Die für den Rückweg zur Verfügung stehende Querschnittsfläche A_a sehr viel größer als die Fläche A im Inneren der Spule → Term wird wieder sehr klein. Man könnte auch einen Mantel aus Weicheisen um die Spule legen → die Feldlinien verlaufen dann fast widerstandsfrei

Somit ist der magnetische Widerstand nur von der eisenfreien Strecke s im Inneren der Spule abhängig: $R_m = \frac{s}{\mu_0 A}$ und somit die Induktivität

$$L = \frac{N^2}{R_m} = \frac{N^2}{\left(\frac{s}{\mu_0 A}\right)} = \frac{\mu_0 A \cdot N^2}{s} = \frac{k}{s} \quad \text{wobei } k = \mu_0 \cdot A \cdot N^2$$

Aus der Gleichung $L = \frac{k}{s}$ lässt sich erkennen, dass der Wert der Induktivität zunimmt, je weiter der Eisenkern in die Spule eintaucht → Hyperbelförmiger Verlauf der Kennlinie.

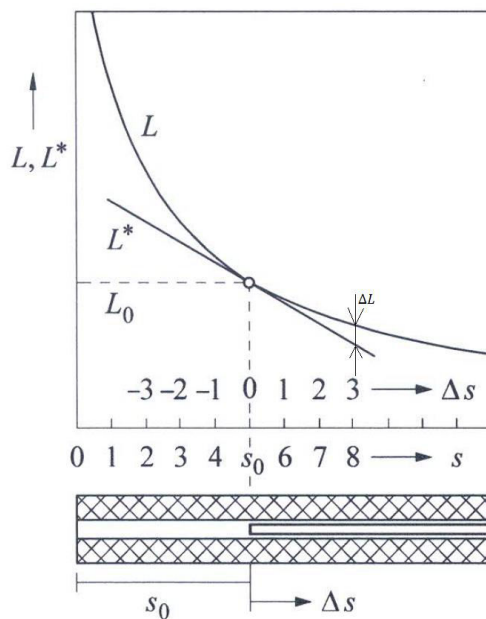
Die Empfindlichkeit

$$E = \frac{dL}{ds} = -\frac{\mu_0 A \cdot N^2}{s^2} = -\frac{L}{s} \left(\text{Ableiten der Formel } L = \frac{\mu_0 A \cdot N^2}{s} \text{ nach } s \right)$$

nimmt ebenfalls mit abnehmenden s zu.

Induktivität L eines Tauchankergebers in Abhängigkeit von der Verschiebung Δs des Tauchankers

⁹ Schröder, Elmar/ Reindl, Leonhard/ Zagar, Bernhard: Elektrische Messtechnik. München, 10. Auflage 2014, S. 261.



Damit der Messwert einfacher erfasst werden kann, wird die Kennlinie am Punkt (s_0, L_0) linearisiert, (Neuer Nullpunkt wird an s_0 angenommen)

Geradengleich für L^*
$$L^* = L_0 + L'_{(s_0)} \cdot \Delta s = L_0 - L_0 \frac{\Delta s}{s_0}$$

Wird der Tauchanker von der Stellung s_0 um Δs nach außen verschoben, nimmt die Induktivität ab.

Dabei ist zu beachten, dass die linearisierte Funktion bei steigendem Δs immer mehr vom Originalverlauf der Induktivität abweicht und somit der Fehler $\Delta L = L^*_{(s)} - L_{(s)}$ Immer größer wird.

Messung der Induktivität mit einer Viertelbrücke:

Es empfiehlt sich die Messung nur für kleine Messbereiche um s_0 durchzuführen, um den Linearisierungsfehler ΔL möglichst klein zu halten.

Die Diagonalspannung der Viertelbrücke ergibt $U_d = \frac{U_0}{2} \frac{\Delta s}{2s_0 + \Delta s} \approx \frac{U_0}{4} \cdot \frac{\Delta s}{s_0}$

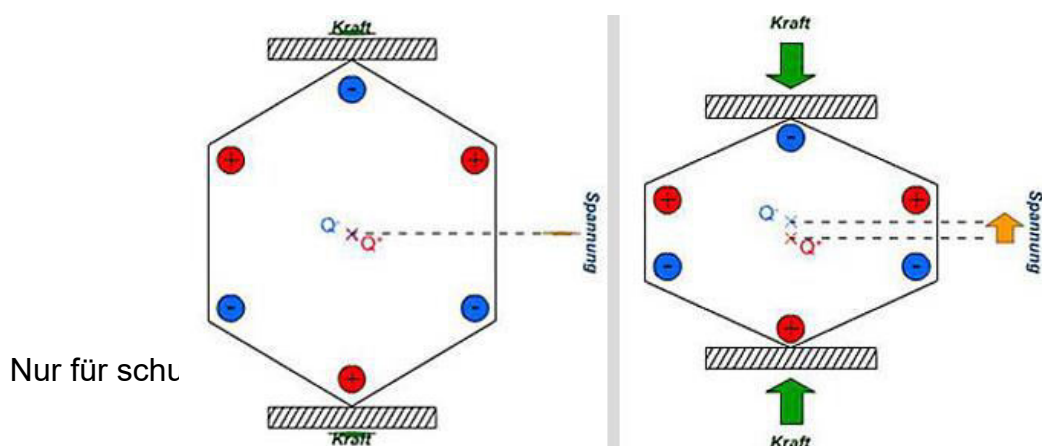
Piezo- und pyroelektrischer Effekt

1. Piezoelektrischer Effekt

Piezo kommt vom griechischen Wort für „drücken / pressen“.

Vereinfacht ausgedrückt entsteht durch Druckausübung auf einen Piezokristall eine Spannung, diese ist proportional zum ausgeübten Druck.

Der piezoelektrische Effekt ist umkehrbar. Wird ein dielektrischer Stoff in ein elektrisches Feld gebracht, so dehnt er sich etwas aus oder zieht sich zusammen.

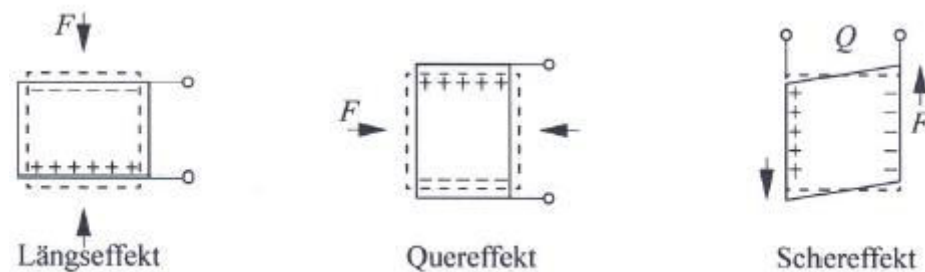


Nur für schu

Stoffe, die einen piezoelektronischen Effekt aufweisen, sind elektrisch polarisiert, das heißt, werden sie deformiert so ändern sich die Dipolmomente (räumliche Ladungstrennung).

Durch diese Änderung werden an der Oberfläche Ladungen freigesetzt. Durch diese Ladungen lässt sich der Druck messen.

Je nach Polarisationsrichtung des piezoelektrischen Materials können die Ladungen an den mechanischen belasteten Flächen (Längseffekt) oder quer dazu (Quereffekt) auftreten. Auch durch Schubspannungen wird die Polarisierung verändert (Schereffekt).



10

Die Ladung hängt einzig allein von der Deformation ab und nicht von der Geschwindigkeit oder der Beschleunigung, mit der diese erzeugt wird.

Ein häufig verwendetes Material ist Quarz mit einer piezoelektrischen Empfindlichkeit für den Längseffekt von ca. $2 \cdot 10^{-12} \frac{As}{N}$

2. Pyroelektrischer Effekt:

Die Polarisation des dielektrischen Körpers nicht nur bei Verformung andere Werte an, sondern auch bei einer Temperaturänderung. Es werden an der Oberfläche Ladungen frei, die als Maß für die Temperaturänderung dienen können.

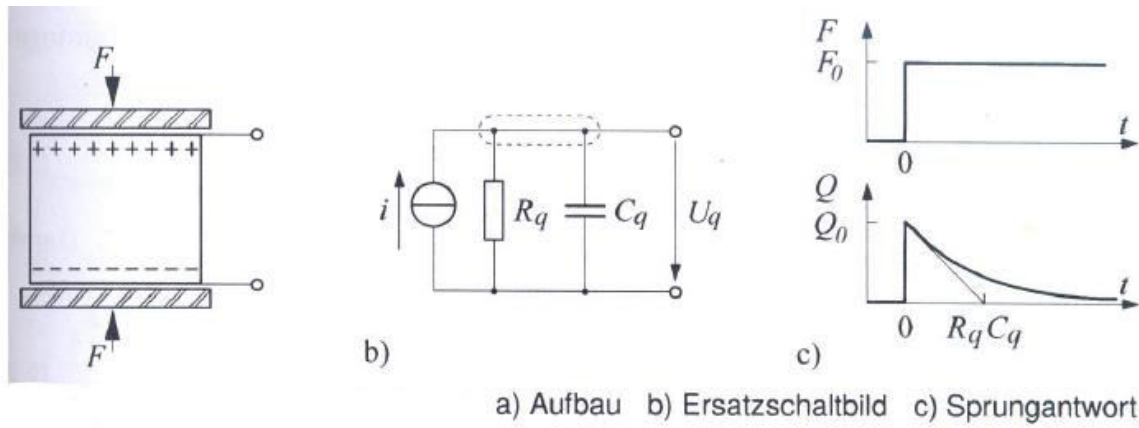
Ein häufig verwendetes Material ist: Bleizirkonat-Titanat_Keramik mit einer pyroelektrischen Empfindlichkeit von ca. $2 \cdot 10^{-4} \frac{As}{K} \cdot m^2$

3. Piezoelektrischer Kraftaufnehmer

Wirkt eine Kraft F auf die Quarzscheibe, so wird die Ladung $Q = k \cdot F$ frei.

Das Ersatzschaltbild eines derartigen Quarzes ist eine Stromquelle mit $i = \frac{dQ}{dt} = \frac{k \cdot dF}{dt}$ dem Innenwiderstand R_g und der Kapazität C_g .

¹⁰ Schröder, Elmar/ Reindl, Leonhard/ Zagar, Bernhard: Elektrische Messtechnik. München, 10. Auflage 2014, S. 172.



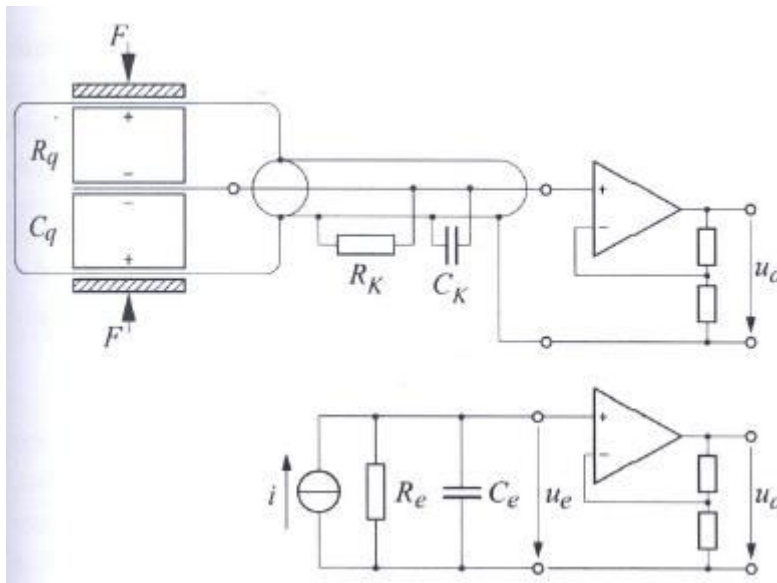
Der Widerstand und die Kapazität des Quarzes können aus den Abmessungen, der relativen Permittivitätszahl und dem spezifischen Widerstand des Quarzes berechnet werden.

Die Ausgangsspannung liefert den Wert $U_q = \frac{Q}{C_q}$

a. Aufnehmer mit entgegengesetzten Kristallen und Spannungsverstärker¹²

¹¹ Schröder, Elmar/ Reindl, Leonhard/ Zagar, Bernhard: Elektrische Messtechnik. München, 10. Auflage 2014, S. 175.

¹² Schröder, Elmar/ Reindl, Leonhard/ Zagar, Bernhard: Elektrische Messtechnik. München, 10. Auflage 2014, S. 177.



Werden zwei Quarzscheiben, die entgegengesetzte Ladung liefern zusammengeschaltet, so kann die entstehende Ladung von der gemeinsamen Mittelelektrode abgenommen werden.

Die beiden äußeren Elektroden lassen sich mit dem Schirm des Messkabels verbinden, wodurch der Aufnehmer allseitig abgeschirmt wird.

Jede Quarzscheibe liefert die Ladung Q , sodass insgesamt die Ladung $Q' = 2 \cdot Q$ zur Verfügung steht.

Im Bild erkennt man den Widerstand und die Kapazität des Sensors (R_q , C_q) und den Isolationswiderstand und die Kapazität des Koaxialkabels (R_k , C_k).

Diese sind alle parallel geschaltet und können zu einem Gesamtwiderstand R_e und zu einer Gesamtkapazität C_e zusammengefasst werden.

$$R_e = R_q || R_k; \quad C_e = C_q + C_k$$

Nachteile der Schaltung:

Der Isolationswiderstand des Kabels muss groß gegenüber dem Innenwiderstand des Quarzes sein. Daher müssen das Koaxialkabel und auch die Stecker hochwertig sein, um das Messergebnis nur geringfügig zu beeinflussen.

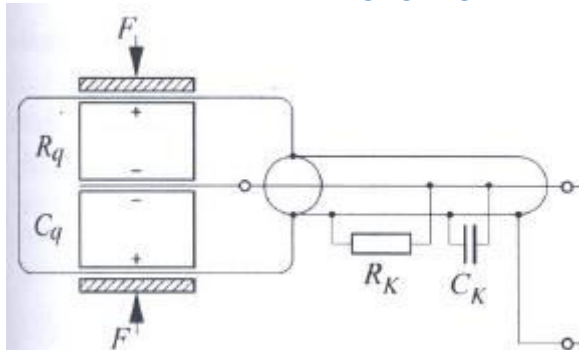
Die Kabelkapazität beeinflusst die Messung immer, daher muss das Messsystem für jedes Kabel kalibriert werden.

Außerdem sind hochohmige Eingangskreise anfällig gegen elektromagnetische Störungen.

Um diese Nachteile zu vermeiden, werden der Aufnehmer und der Spannungsverstärker oft zusammengebaut.

Piezelektrischer Kraftaufnehmer

Kraftaufnehmer mit entgegengesetzten Kristallen:



13

Der Sensor wird zur Messung einer Kraft F verwendet.

Der Quarzaufnehmer liefert eine Ladung, die am Sensor im Moment der Krafteinwirkung entsteht und verstärkt werden soll $Q_0 = k \cdot F_0$. Der Faktor k stellt hierbei eine Sensorkonstante dar.

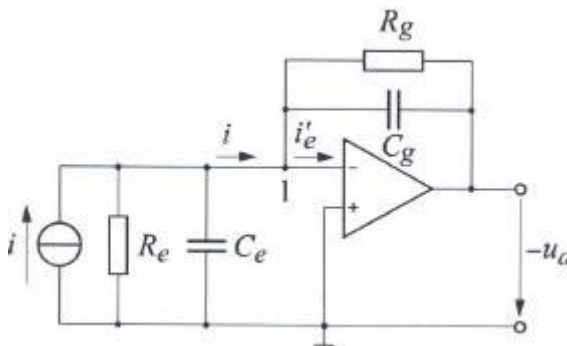
Im Bild erkennt man den Widerstand und die Kapazität des Sensors (R_q , C_q) und den Isolationswiderstand und die Kapazität des Koaxialkabels (R_k , C_k).

Diese sind alle parallel geschaltet und können zu einem Gesamtwiderstand R_e und zu einer Gesamtkapazität C_e zusammengefasst werden.

Ladungsverstärker

Ein Ladungsverstärker wandelt eine meist geringe Ladung in eine dazu proportionale Spannung um.

Wegen der unterschiedlichen Einheiten ist kein Verstärkungsfaktor definierbar, deshalb handelt es sich genau genommen um keinen Verstärker.



14

Der Widerstand R_g ist der interne Widerstand der Kapazität C_g , über den sich die Kapazität kontinuierlich entlädt.

Im Knoten 1 gilt:

$$i - i_{R_g} - i_{C_g} = 0$$

$$i + \frac{u_a}{R_g} + C_g \frac{du_a}{dt} = 0$$

➔ In der Formel sind keine sensor- und kabelspezifischen Parameter mehr enthalten.

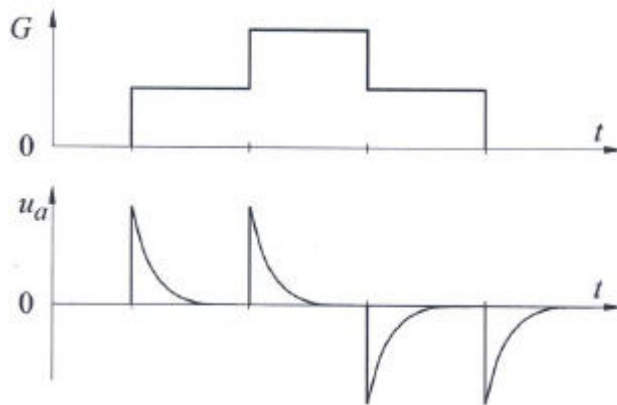
Nur mehr C_g und R_g sind für die Empfindlichkeit der Messeinrichtung maßgebend. Je kleiner der Widerstand R_g ist, desto schneller entlädt sich die Ladung des Kondensators C_g mit der Zeitkonstante $\tau = C_g \cdot R_g$.

Allgemein gilt, dass der Kondensator nach $5 \cdot \tau$ entladen ist.

¹³ Schröder, Elmar/ Reindl, Leonhard/ Zagar, Bernhard: Elektrische Messtechnik. München, 10. Auflage 2014, S. 177.

¹⁴ Schröder, Elmar/ Reindl, Leonhard/ Zagar, Bernhard: Elektrische Messtechnik. München, 10. Auflage 2014, S. 178.

Zeitlicher Verlauf der Ausgangsspannung bei einer sprungförmigen Änderung der Kraft.



Springt zum Zeitpunkt t_0 die Ladung von 0 auf F_0 , so entsteht die Ladung $Q_0 = k \cdot F_0$ und der Ladungsverstärker liefert die für $t > t_0$ die Ausgangsspannung

$$u_a = -\frac{Q_0}{C_g} * e^{-\frac{t}{R_g * C_g}}$$

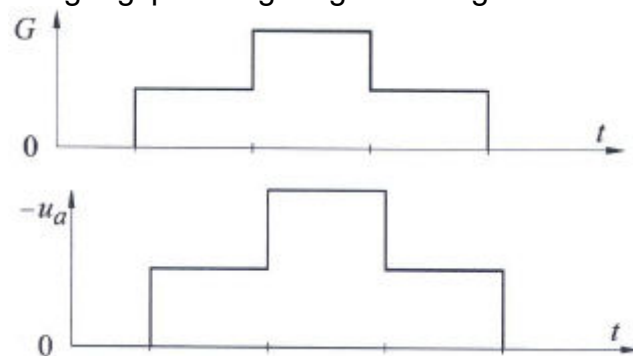
15

F_0 tritt immer auf, wenn G sich verändert. Also an den Flanken der Funktion $G(t)$. Am Spannungsverlauf kann man erkennen, dass ein kleiner Widerstand R_g vorhanden ist und τ somit zu klein ist.

-> Der Kondensator entlädt sich vollständig, bzw. die Ausgangsspannung geht auf 0 zurück, bevor der nächste Impuls eintritt.

In der Regel versucht man τ möglichst groß zu wählen.

Dazu verwendet man Kondensatoren mit möglichst großen Innenwiderstand, um die Ausgangsspannung möglichst lange konstant zu halten.



Ausgangsspannung des
Ladungsverstärkers für $R_g \rightarrow \infty$

Anwendung der piezoelektrischen Aufnehmer zur Druckmessung

Der Aufnehmer wird in ein, mit einer elastischen Membran verschlossenen Gehäuse eingebaut. Über die Membran wird der Druck übertragen und vom Sensor die Kraft $F = p \cdot A$ ($Kraft = Druck \cdot Fläche$) gemessen.

Derartige Aufnehmer sind besonders für die Messung schnell veränderliche Drücke und Druckstößen geeignet, da dann der Ladungsausgleich keine Rolle spielt.

Anwendungsgebiet ist z.B. die Messung von Kompressionsdrücken in Zylindern von Verbrennungsmotoren.

Erschütterungen am Einbauort stören die Messung

¹⁵ Schröder, Elmar/ Reindl, Leonhard/ Zagar, Bernhard: Elektrische Messtechnik. München, 10. Auflage 2014, S. 178.

Infrarotsensor

Infrarotsensoren haben eine spektrale Empfindlichkeit von 1 – 20 µm. Die Schichten von Infrarotsensoren werden oft mit Quecksilber, Cadmium oder Tellur dotiert.



Der Sensor befindet sich meist hinter einem geschwärzten Filterglas, um die Wellenlängen des sichtbaren Lichts zu filtern. Bei den Infrarot-Detektoren befindet sich der Sensor in einem metallischen Gehäuse um es gegen elektromagnetische Strahlung zu schützen.

Es gibt zwei verschiedene Arten von Infrarotsensoren:

Lichtempfindliche Sensoren

Diese lichtempfindlichen, optoelektronischen Bauelemente bestehen aus einem pn-Übergang.

An der Grenzsicht (Raumladungszone) gibt es normalerweise keine frei beweglichen Ladungsträger.

Wenn Infrarotstrahlung auf diese ladungsträgerverarmte Zone fällt, werden Ladungsträger angeregt, d.h. Elektronen werden aus ihrer Atombindung herausgerissen und somit frei beweglich wodurch ein Strom fließen kann.

Thermische Detektoren (Pyroelektrischer Sensor)¹⁶

Thermische Detektoren haben ein temperaturempfindliches Sensorelement aus Lithium-Tantalat (LiTaO₃), das auf Temperaturänderungen reagiert und dabei eine elektrische Spannung generiert.

Dieser Effekt der Pyroelektrizität tritt nur bei pyroelektrischen Kristallen auf.

Ein solcher Sensor besteht aus einem pyroelektrischen Plättchen mit metallisierter Ober- und Unterseite. Wenn Strahlung auf den Kristall trifft, ändert sich durch den durch Absorption hervorgerufenen Temperaturunterschied dessen Polarisation.

Trifft Infrarotstrahlung auf dieses Plättchen werden Ladungsträger frei

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

A...Fläche des Plättchens

k_Q...Ladungsempfindlichkeit

Das Plättchen mit der Dicke d und der Permittivitätszahl ϵ_r hat eine Kapazität

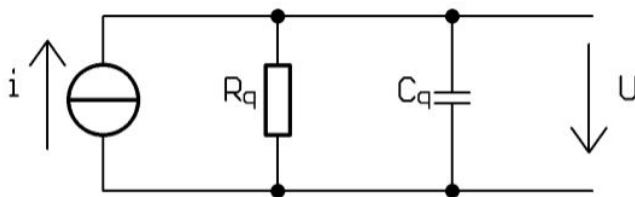
$C_q = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d}$, die, kombiniert mit der Ladung, zu einer Spannung ΔU führt:

$$\Delta U = \frac{\Delta Q}{C_q} = \frac{k_Q \cdot A \cdot \Delta T \cdot d}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A} = k_U \cdot d \cdot \Delta T$$

Ein 30µm dickes Plättchen aus LiTaO₃ liefert z.B. bei einer Temperaturänderung von 1K eine Spannung von 15V.

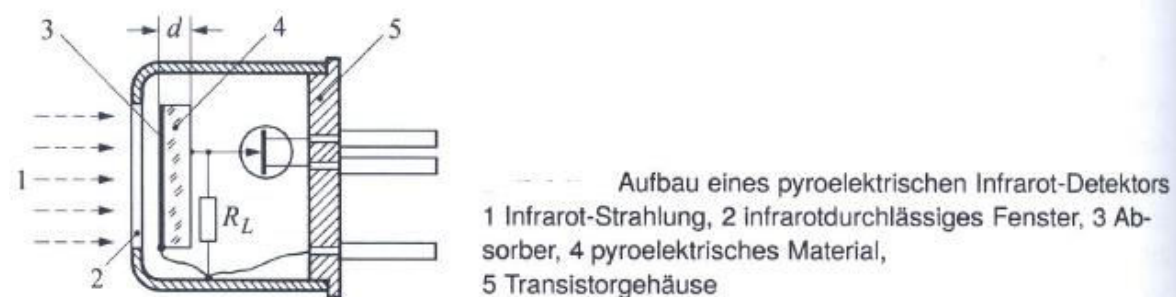
¹⁶ Schröder, Elmar/ Reindl, Leonhard/ Zagar, Bernhard: Elektrische Messtechnik. München, 10. Auflage 2014, S. 179 ff.

Ersatzschaltbild eines pyroelektrischen Sensors:



Das erhaltene elektrische Signal U kann mit einem Spannungs- oder Ladungsverstärker weiterverarbeitet werden.

Oft ist das pyroelektrische Plättchen zusammen mit einer FET-Stufe als Vorverstärker zusammengebaut. In diesem Fall ist ein Lastwiderstand an die Elektroden angeschlossen und die Spannung U_{RL} wird verstärkt.



17

Die eintreffende Strahlung (1) trifft auf ein infrarotdurchlässiges Fenster und wird gefiltert. Durch das pyroelektrische Material (4) wird eine Spannung erzeugt. Infolge des endlichen Widerstands R_L gleichen sich die entstandenen Ladungen wieder aus.

Vernachlässigt man den Widerstand R_q , so hängt die Zeitkonstante von der Kapazität des Sensors C_q und dem Ableitwiderstand R_L ab $\tau = R_L \cdot C_q$

Verwendet werden pyroelektrische Sensoren zur Messung der Infrarotstrahlung

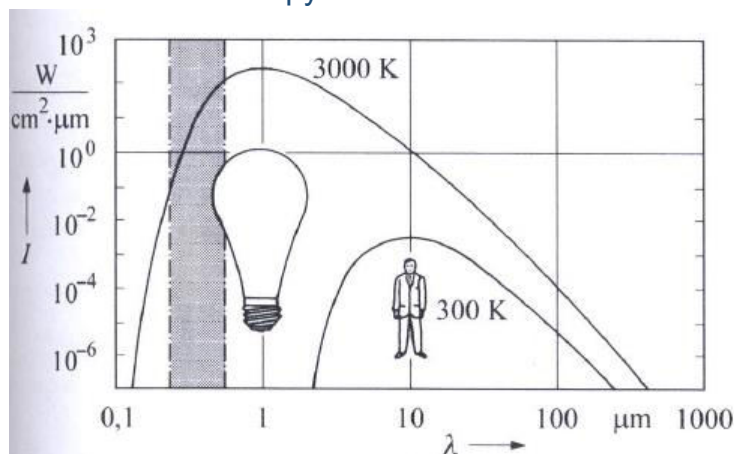


Bild 2.106 Strahlung eines Menschen (300 K) und einer Glühlampe (3000 K)
 I spektrales Emissionsvermögen in $W / (cm^2 \cdot \mu m)$,
 λ Wellenlänge in μm

18

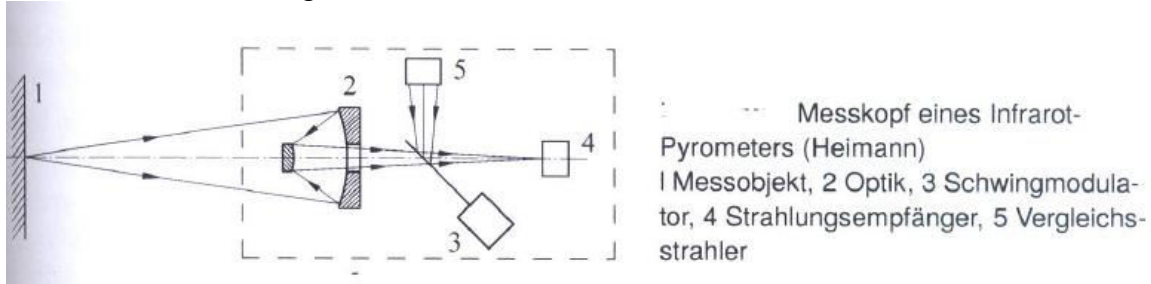
Pyroelektrische Sensoren können nur Strahlungsänderungen erfassen. Darum werden sie z.B. als Brand- oder Bewegungsmelder eingesetzt.

¹⁷ Schrüfer, Elmar/ Reindl, Leonhard/ Zagar, Bernhard: Elektrische Messtechnik. München, 10. Auflage 2014, S. 179.

¹⁸ Schrüfer, Elmar/ Reindl, Leonhard/ Zagar, Bernhard: Elektrische Messtechnik. München, 10. Auflage 2014, S. 180.

Ein weiteres Einsatzgebiet ist die berührungslose Temperaturmessung.

Dies funktioniert durch abwechselnde Messung eines Referenzsignals und der zu messenden Strahlung



19

Dadurch erhält man ein zur Objekttemperatur proportionales Signal.

Mit speziellen Linsen kann die Wärmestrahlung bis zu über 100m gemessen werden.

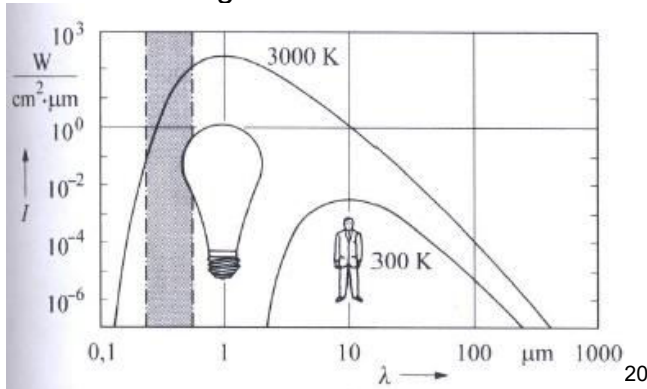
Fotodioden

Allgemeine Informationen

Fotodioden besitzen meist ein Glasfenster, mit dessen Hilfe spezielle Wellenlängen des Lichtes rausgefiltert werden können.

Das kann man am Beispiel bei der Fernsteuerung eines Fernsehers gut erkennen.

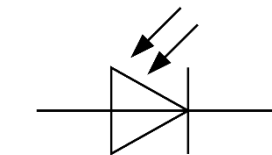
Bei der Fernsteuerung ist die dahinterliegende Fotodiode meist durch ein schwarzes Glas geschützt, um das Tageslicht herauszufiltern und somit hauptsächlich das Infrarot- Nutzsignal durchzulassen.



20

Bekannte Fotodioden sind unter anderem die BPW-21, oder die BPW-34.

Schaltsymbol



21

Reales Bauteil (z.B. BPW-21)

22



¹⁹ Schröder, Elmar/ Reindl, Leonhard/ Zagar, Bernhard: Elektrische Messtechnik. München, 10. Auflage 2014, S. 180.

²⁰ Schröder, Elmar/ Reindl, Leonhard/ Zagar, Bernhard: Elektrische Messtechnik. München, 10. Auflage 2014, S. 181.

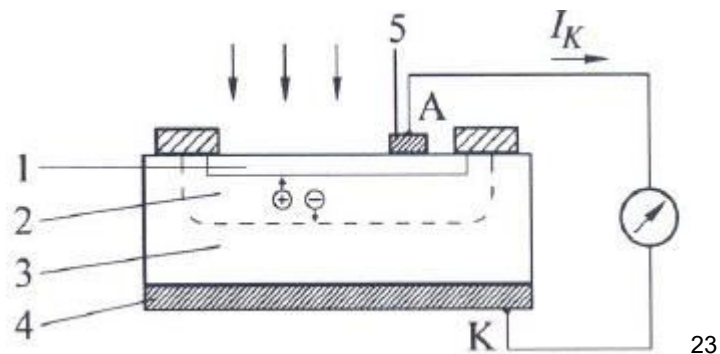
²¹ https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/37/Symbol_Phodiode.svg/1024px-Symbol_Phodiode.svg.png

²² https://cdn-reichelt.de/bilder/web/xxl_ws/A501/BPW21.png

Prinzipieller Aufbau

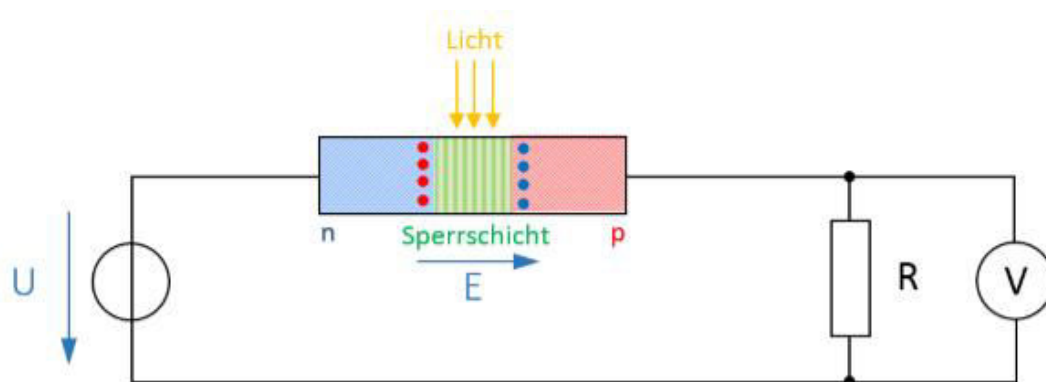
Si-Photoelement:

- 1...p-Zone
- 2...Sperrschicht
- 3...n-Zone
- 4 & 5...Kontaktierung



23

Funktionsweise²⁴



Man kann erkennen, dass die Fotodiode in Sperrrichtung geschaltet ist, wodurch ein sehr geringer Strom fließt.

Hierbei handelt es sich um den sogenannten Dunkelstrom I_{R0} .

Der Name kommt daher, weil der Strom auch fließt, wenn kein Licht auf die Fotodiode trifft.

Die Fotodiode wird meist in Sperrrichtung betrieben, da somit die relative Stromänderung sehr viel größer ist, als wäre die Diode in Durchlassrichtung geschaltet.

Wie auch bei anderen Halbleiterdioden, diffundieren die Ladungsträger des n-Si in das p-Si. Das p-Si wird dadurch negativ geladen. Zwischen dem positiv geladenen n-Si und dem nun negativ geladenen p-Si entsteht ein elektrisches Feld E .

Elektronen erfahren eine entgegengesetzt gerichtete Kraftwirkung. Die Grenzschicht verarmt an Ladungsträgern und sperrt.

Trifft nun Licht mit genügend hoher Energie auf die Raumladungszone (Sperrschicht), so schlagen die Photonen ein Elektron aus der Gitterstruktur und es entstehen sogenannte Elektronen-Loch Paare.

Durch das vorherrschende elektrische Feld erfahren die Elektronen eine zur n-Schicht gerichtete Kraftwirkung und werden dorthin beschleunigt.

Der, durch die Lichtteilchen erzeugte Photostrom I_{PH} ist, wie auch der Sperrstrom im μA -Bereich.

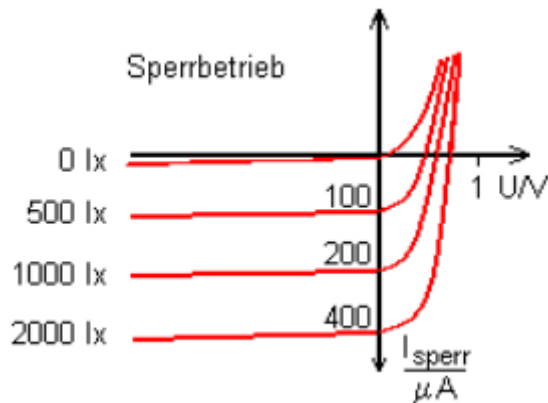
Somit ergibt sich der Gesamtstrom der Diode: $I_D = I_{PH} + I_{R0}$

²³ Schröfer, Elmar/ Reindl, Leonhard/ Zagar, Bernhard: Elektrische Messtechnik. München, 10. Auflage, 2014, S. 184.

²⁴ Nürmann, Dieter: Das große Werkbuch Elektronik. Ort, Auflage Datum.S. ff.

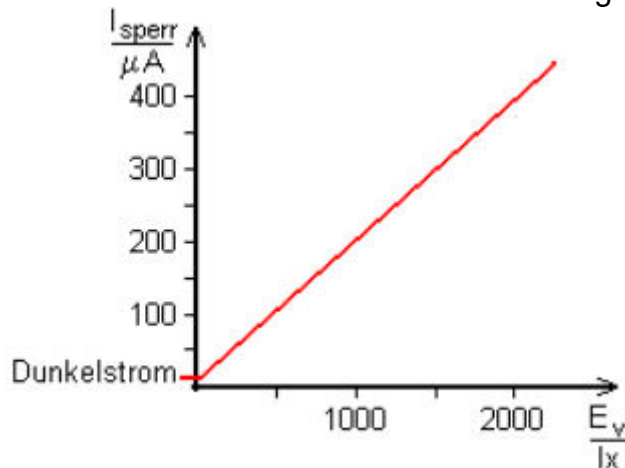
Da der Strom so gering ist, wird meist ein großer Lastwiderstand verwendet, um gut messbare Spannungen zu erreichen.

In der folgenden Abbildung²⁵ erkennt man die Diodenkennlinienschar.



Klar ersichtlich ist, dass im Sperrbetrieb ein, von der Beleuchtung abhängiger Sperrstrom fließt.

Die folgende Kennlinie veranschaulicht den linearen Zusammenhang zwischen dem Strom durch die Diode und der Beleuchtungsstärke E_v .



²⁵ <http://elektroniktutor.de/bauteilkunde/fotodiod.html>

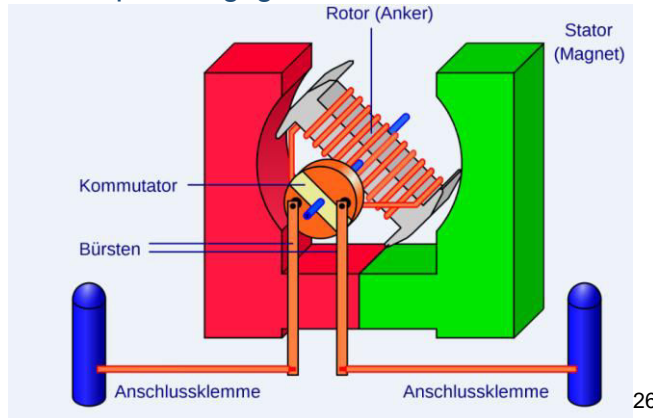
Drehzahlmessung

Die Drehzahlmessung bestimmt die Umdrehungsgeschwindigkeit eines Objekts mithilfe von digitalen oder analogen Messvorrichtungen.

Analoge Drehzahlmessung

Diese Sensoren liefern als Messsignal eine Ausgangsspannung.

Gleichspannungsgenerator



Ein Anker läuft im Feld eines Dauermagneten. Auf dem Anker befindet sich eine Spule. Dreht sich der Anker, so wird in der Spule des Ankers eine Spannung induziert $u_i = N \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$. Durch den Kommutator erhält man am Ausgang eine pulsierende Gleichspannung deren Amplitude proportional der Drehzahl ist.

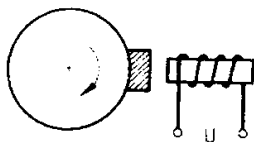
26

Digitale Drehzahlmessung²⁷

Die Messung erfolgt meist durch Zählen von sich vorbeibewegenden Markierungen auf Wellen.

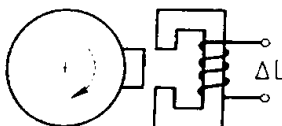
Die vom Drehzahlsensoren gelieferte Frequenz hängt dabei von der Drehzahl n und der Zahl m auf den Umfang verteilten Markierungen ab: $f = n \cdot m$

Induktionsaufnehmer



Magneten induzieren eine Spannung in eine Spule. Dieser Spannungsimpuls wird ausgewertet und so die Umdrehung gezählt (z.B. Fahrradtachometer).

Induktiver Drehzahlaufnehmer



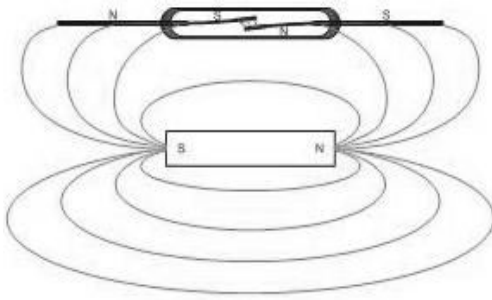
Induktive Drehzahlaufnehmer benutzen als feststehende Komponente eine Spule mit Eisenkern, deren magnetischer Widerstand durch den rotierenden Marker verändert wird. Gemessen die Induktivitätsänderungen ΔL . Mit einer Brückenschaltung können daraus Spannungsimpulse generiert werden, deren Höhe von der Drehzahl abhängig ist. Die Messgenauigkeit des Sensors kann erhöht werden, wenn mehrere Spulen eingesetzt werden.

²⁶ <https://de.wikipedia.org/wiki/Gleichstrommaschine>

²⁷ Schröder, Elmar/ Reindl, Leonhard/ Zagar, Bernhard: Elektrische Messtechnik. München, 10. Auflage 2014, S. 302 ff.

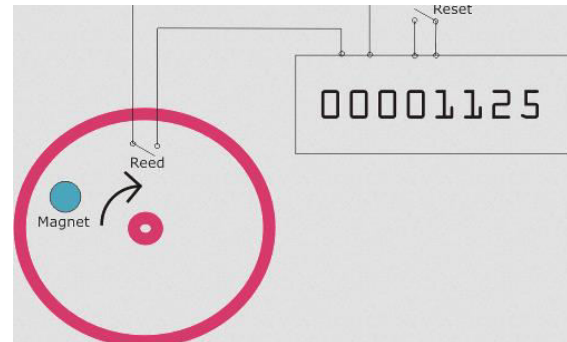
magnetischer Aufnehmer

Reedkontakt



In einem Glasrohr befinden sich zwei Drähte.

Diese Drähte können durch Magneten von außerhalb zusammengezogen werden.



28

MDR

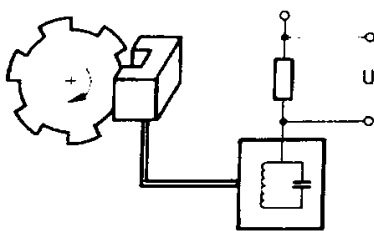
Sie reagieren auf Magnetfelder durch Änderung ihres elektrischen Widerstandes. Diesen Effekt nennt man auch *Gauß-Effekt* oder *Thomson-Effekt*.

Hallsonde

Wird ein Hall-Sensor von einem Strom durchflossen und in ein senkrecht dazu verlaufendes Magnetfeld gebracht, liefert er eine Ausgangsspannung, die proportional zum Produkt aus der magnetischen Feldstärke und dem Strom ist (Hall-Effekt).

Vorteil gegenüber einer Spule ist, dass auch ein Signal geliefert wird, wenn das Magnetfeld, in dem sich der Sensor befindet, konstant ist. Bei einer Spule muss sich ein Magnet bewegen um eine Spannung induzieren zu können.

Hochfrequenz Messkopf

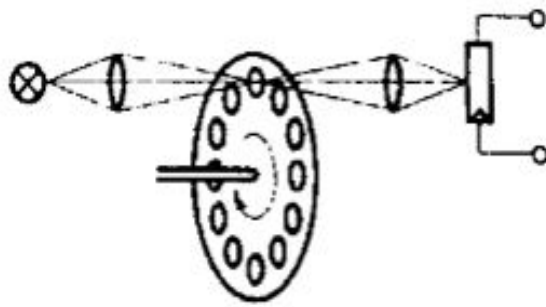


Hochfrequenz-Messköpfe sind ideal für Präzisionsmessungen geeignet, da der von ihnen ausgesendete Impuls stark fokussiert ist und dadurch das Risiko von außerhalb des Messbereichs liegenden Echos reduziert. Die hohe Frequenz und kürzere Wellenlänge bietet sich auch zum Messen dünner Materialien an.

Optischer Aufnehmer

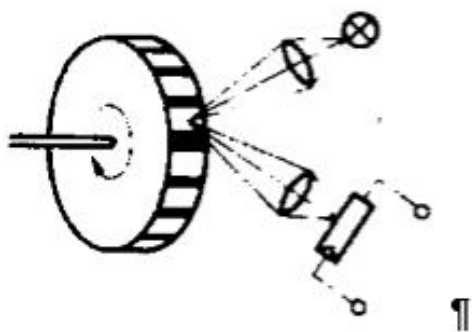
Man unterscheidet zwischen dem Durchlicht- und dem Reflexions- oder Streulicht-Verfahren.

²⁸ <http://www.degupedia.de/wiki/images/a/a2/Rundenzaehler-schema.gif>



Beim **Durchlicht-Verfahren** wird ein Lichtstrahl durch eine Lochscheibe, die fest mit der sich drehenden Welle verbunden ist, unterbrochen oder durchgelassen. Wenn eine offene Stelle vorbei kommt, wird der Lichtempfänger beleuchtet und liefert ein Ausgangssignal.

Als Lichtquellen können Glühlampen, Leuchtdioden im sichtbaren oder infraroten Bereich oder Laserdioden eingesetzt werden. Als Empfänger dienen Photodioden oder Phototransistoren.

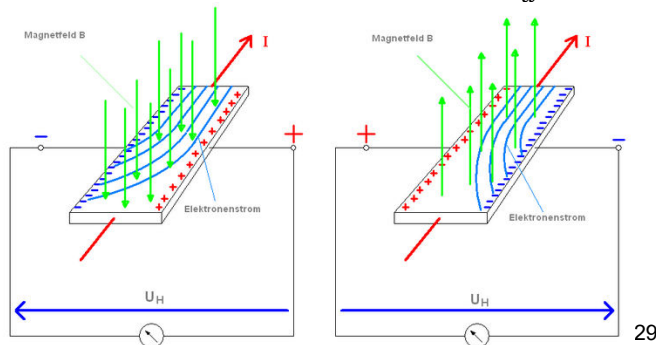


Beim **Reflexions-Verfahren** wird die Strahlung der Lichtquelle von auf dem umlaufenden Messobjekt angebrachten reflektierenden Markierungen zurückgestreut und aufgefangen. Es entsteht eine Lichtmodulation abhängig von der Anzahl der Markierungen pro Umdrehung. Die Markierungen auf der Welle können durch aufgeklebte helle oder dunkle Streifen realisiert werden.

Die optischen Verfahren sind für sehr kleine bis sehr hohe Drehzahlen einsetzbar. Der Anwendungsbereich wird praktisch nur durch die Verschmutzungsanfälligkeit optischer Systeme eingeschränkt.

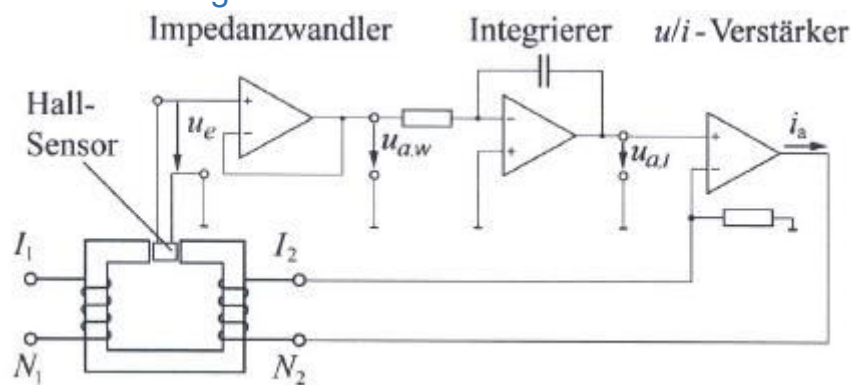
Hall-Effekt

Befindet sich ein stromdurchflossener Leiter in einem Magnetfeld, so werden die Elektronen im Leiter von der Lorentzkraft abgelenkt. Dadurch entsteht die sogenannte Hall-Spannung $U_h = R_h \frac{I \cdot B}{d}$



29

Strommessung³⁰:



Auf einem Eisenkern befinden sich zwei Spulen mit den Windungszahlen N_1 und N_2 . N_1 wird von I_1 und N_2 von I_2 , dem Kompensationsstrom, durchflossen.

Die zweite Spule wirkt dem Magnetfeld der ersten Spule entgegen. Die magnetische Induktion wird vom Hallsensor erfasst. Die Hallspannung geht auf einen Impedanzwandler und dessen Ausgang auf einen Integrierer. Dieser verändert über den u/i-Verstärker den I_2 ($I_2 = I_a$) so lange bis $N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2$ ist und somit die Hallspannung verschwindet und dadurch I_2 nicht mehr verändert wird. I_2 bleibt auch bei $U_e = 0$ konstant.

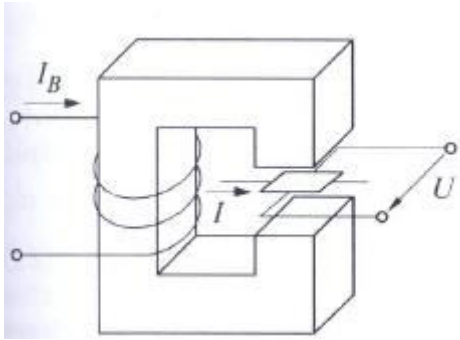
Dann lässt sich I_1 einfach berechnen.

Durch geeignete Wahl der Windungsverhältnisse können hohe Ströme gemessen werden.

Anwendung: Stromzangen, Tastkörper für Oszilloskopen

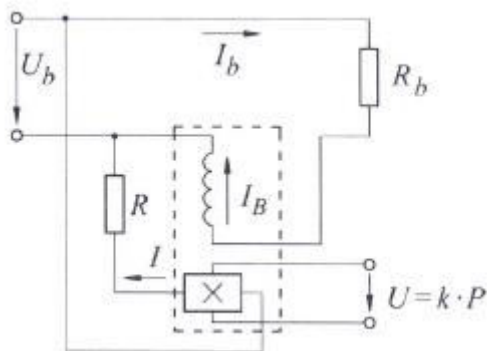
²⁹ <http://www.elektro-wissen.de/Elektrotechnik/Hall-Effekt.html>

³⁰ Schröder, Elmar/ Reindl, Leonhard/ Zagar, Bernhard: Elektrische Messtechnik. München, 10. Auflage 2014, S. 154.

Hall-Multiplizierer³¹:

Die Hallspannung ist proportional dem Steuerstrom I und der magnetischen Flussdichte B . Wird die Flussdichte von dem Strom I_B durchflossenen Elektromagneten erzeugt, steigt die Hallspannung mit dem Produkt der Ströme I (Steuerstrom) und I_B .

Hall-Multiplizierer werden zur Leistungsmessung verwendet.



Wenn der Steuerstrom proportional zu der Spannung U_b ist und der über den Verbraucher fließende Strom I_b gleich dem Strom, der das Magnetfeld erzeugt ist dann ergibt sich die Hallspannung zu $U = k * U_b \cdot I_b = k \cdot P$ und ist daher proportional zu der im Verbraucher umgesetzten Leistung P .

³¹ Schröder, Elmar/ Reindl, Leonhard/ Zagar, Bernhard: Elektrische Messtechnik. München, 10. Auflage 2014, S.155.