

Kapazitive Aufnehmer

Die Kapazität eines Plattenkondensators hängt von der elektrischen Feldkonstanten ϵ_0 , der Dielektrizitätszahl ϵ_r , der Plattenfläche A und dem Plattenabstand a ab:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{a} \tag{4.55}$$

Eine Änderung des Plattenabstands, der Plattenfläche oder der Dielektrizitätszahl führt zu einer Änderung der Kapazität. Damit lassen sich über eine Kapazitätsmessung alle die Effekte überwachen, die eine oder mehrere der drei genannten Größen beeinflussen.

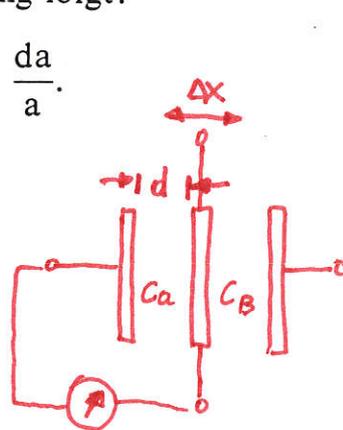
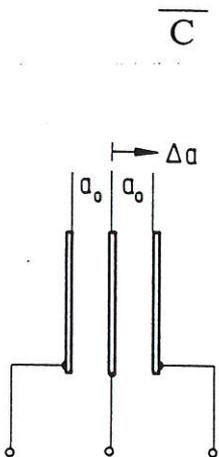
Änderung des Plattenabstands

Die Kapazität eines Kondensators ist umgekehrt proportional zum Plattenabstand. Wird er verkleinert, so wird die Kapazität vergrößert und umgekehrt. Die entsprechende Empfindlichkeit E eines Kondensators ist

EMPFINDLICHKEIT: $E = \frac{dC}{da} = - \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{a^2} = - \frac{C}{a}$ (4.56)

Sie ist also besonders groß bei kleinen Plattenabständen. Aus einer Umstellung der letzten Gleichung folgt:

$$\frac{dC}{C} = - \frac{da}{a} \tag{4.57}$$



$Q = C \cdot U$ $Q = \text{LADUNG}$

$$U_A = \frac{Q}{C} = \frac{Q (d \pm \Delta x)}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}$$

Bild 4.23: Differential-Kondensator. Die mittlere Platte ist verstellbar.

Ähnlich Gl.(4.42) ist jetzt die relative Kapazitätsänderung proportional der relativen Abstandsänderung.

Die Kapazität eines Kondensators nimmt bei einer Vergrößerung des Plattenabstands um Δa von $C_0 = \epsilon_0 \epsilon_r A/a_0$ auf $C = \epsilon_0 \epsilon_r A/(a_0 + \Delta a)$ ab. Wird sie in einer Viertelbrücke mit

$$X_2 = \frac{-1}{\omega C} = \frac{-(a_0 + \Delta a)}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r A}; \quad X_1 = \frac{-1}{\omega C_0} = \frac{-a_0}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r A}$$

bestimmt, so ist nach Gl.(4.32) die Diagonalspannung \underline{U}_d nur ungefähr der Änderung des Plattenabstands proportional,

$$\underline{U}_d = \frac{\underline{U}_0}{2} \frac{\Delta a}{2a_0 + \Delta a} \approx \frac{\underline{U}_0}{4a_0} \Delta a. \quad \text{DESHALB} \quad (4.58)$$

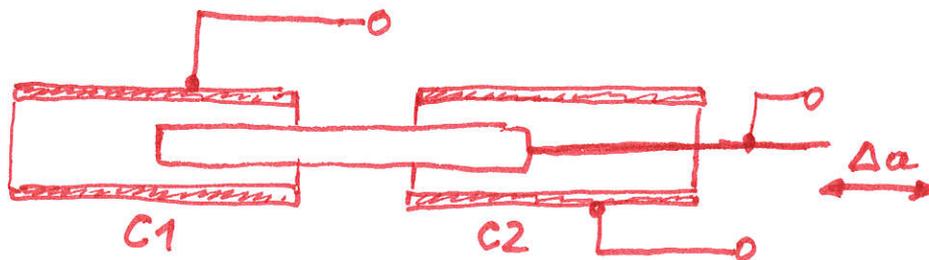
Diese Nichtlinearität verschwindet beim **Differential-Kondensator**, der zwei Kondensatoren mit einer gemeinsamen, beweglichen Mittelplatte darstellt (Bild 4.23). Wird diese Mittelplatte von a_0 ausgehend um Δa verschoben, so vergrößert sich der Abstand des einen Plattenpaares, der des anderen nimmt ab:

$$X_1 = \frac{-1}{\omega C_1} = \frac{-(a_0 - \Delta a)}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r A}; \quad X_2 = \frac{-1}{\omega C_2} = \frac{-(a_0 + \Delta a)}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r A}$$

Werden die beiden Hälften des Differential-Kondensators in die diagonalen Zweige einer Brücke gelegt, so ist nach (4.32) die Diagonalspannung \underline{U}_d streng proportional zur Änderung des Plattenabstands Δa :

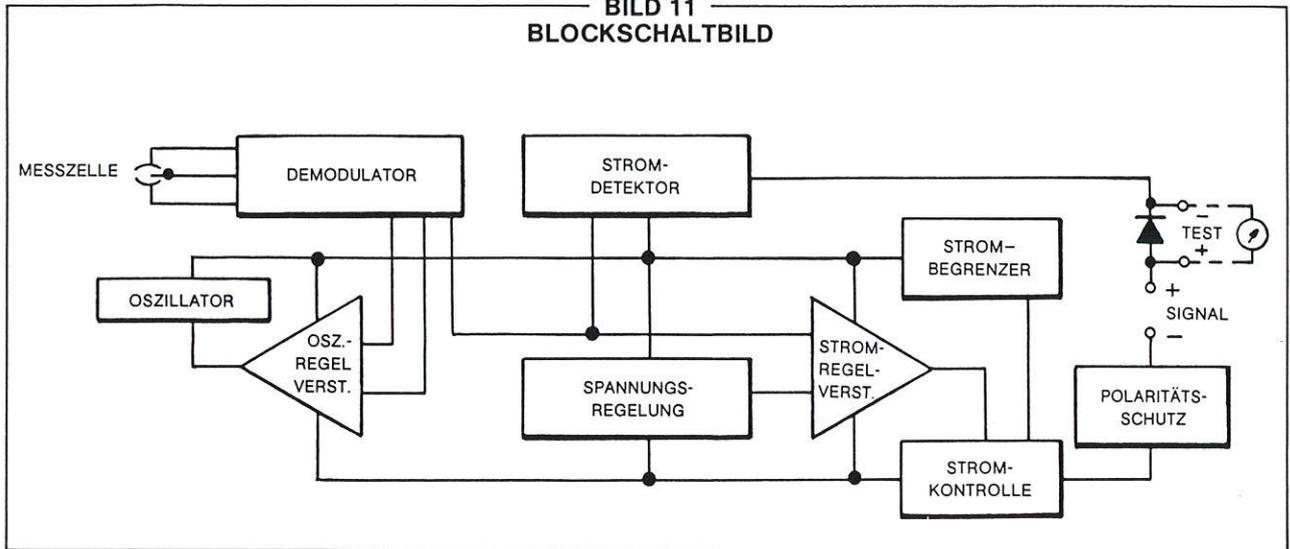
$$\underline{U}_d = \frac{\underline{U}_0}{2a_0} \Delta a. \quad (4.59)$$

Kondensatoren mit verschiebbaren Elektroden werden ähnlich wie induktive Geber zu Weg- und Winkelmessungen benutzt. Nach dem gleichen Prinzip arbeiten die Kondensatormikrophone, die Schallschwingungen in elektrische Signale umformen [4.6].



ARBEITSWEISE

BILD 11
BLOCKSCHALTBIKD



ALLGEMEINES

Das Blockschaltbild des elektrischen Meßumformers ist in Bild 11 dargestellt. Der Stromlaufplan befindet sich im Abschnitt «Zeichnungen und Schaltpläne» dieser Bedienungsanleitung.

Als Meßelement des elektrischen Meßumformers dient die Meßzelle (δ -Zelle, Bild 12). Diese Meßzelle arbeitet nach dem Prinzip des Differentialkondensators. Bei Auslenkung der Meßmembrane wird die entsprechende Differenzkapazität elektronisch in das Signal 4–20 mA in Zweileitertechnik umgeformt.

Dieser Vorgang beruht auf folgenden Gegebenheiten:

$$I. \quad P = K \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}$$

- P = Prozeßdruck
- K = Konstante
- C₁ = Kapazität zwischen Hochdruckseite und Meßmembrane
- C₂ = Kapazität zwischen Niederdruckseite und Meßmembrane

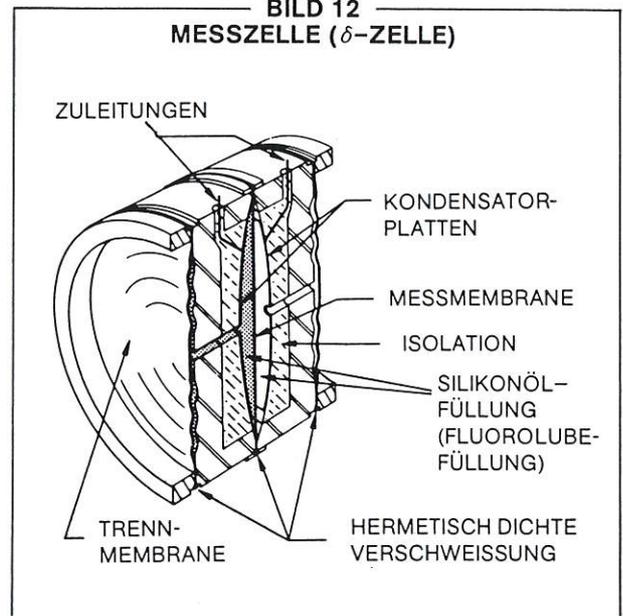
$$II. \quad I_{diff} = f \cdot V_{pp} (C_1 - C_2)$$

- I_{diff} = Differenzstrom, hervorgerufen durch C₁ und C₂
- V_{pp} = Oszillatorspannung (Spitze – Spitze)
- f = Oszillatorfrequenz

$$III. \quad f \cdot V_{pp} = \frac{I_{ref}}{C_1 + C_2}$$

- I_{ref} = Referenzstrom aus Konstantstromquelle

BILD 12
MESSZELLE (δ -ZELLE)



Durch Zusammenfassung der Gleichungen I bis III ergibt sich:

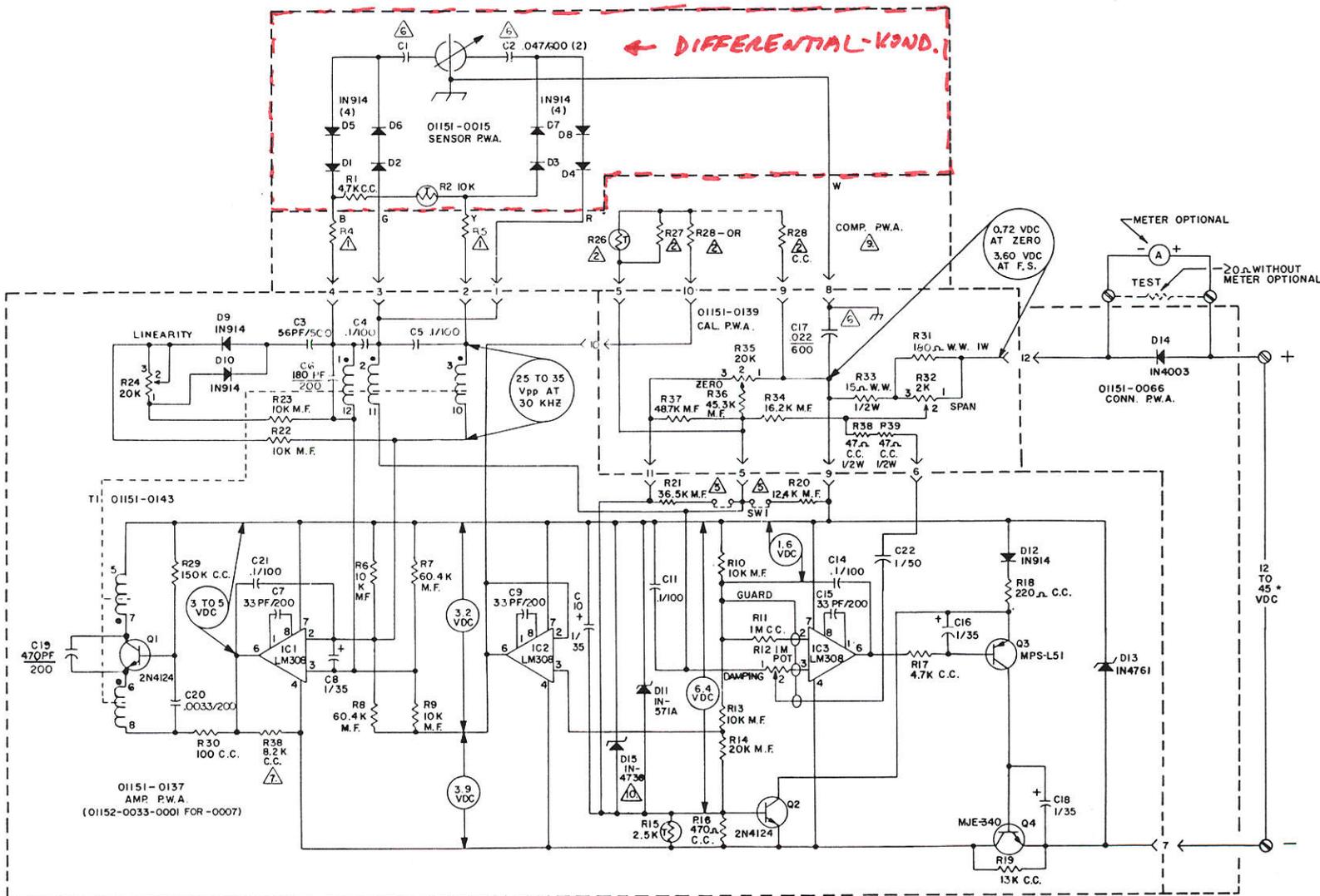
$$P = K \cdot I_{diff} = I_{ref} \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}$$

ERLÄUTERUNG DER ARBEITSWEISE DER E-ELEKTRONIK (4–20 mA)

DIE MESSZELLE

Der Prozeßdruck wird über die eine Trennmembrane und die Silikonfüllung als Druckmittler auf die eine Seite der Meßmembrane übertragen, wodurch die Meßmembrane ausgelenkt wird. Der Referenzdruck wird an die auf der anderen

Schaltplan E-Elektronik (Signal 4-20 mA)
(Zeichnung 1151-135, Rev. K)



- NOTES:
- ⚠ R38 USED ON -0007 ONLY.
 - ⚠ C1, C2, AND C17 HAVE BEEN TESTED TO WITHSTAND 500 VAC FOR 10 MIN. WITHOUT FAILURE BY ELECTRICAL RESEARCH ASSOCIATION OF ENGLAND.
 - ⚠ R20 OR R21 IS SWITCHED TO PIN 5 FOR SPECIAL CALIBRATIONS.
 - 4. ALL CAPACITORS ARE MICROFARADS/VOLTAGE RATING UNLESS NOTED.
 - 3. ALL M.F. RESISTORS ARE 1/10 WATT, ALL C.C. RESISTORS ARE 1/4 WATT, ALL POTS ARE 3/4 WATT, UNLESS NOTED.
 - ⚠ R26, R27, AND R28 ARE FOR ZERO TEMPERATURE COMPENSATION AND ARE 10K MINIMUM.
 - ⚠ R4 AND R5 ARE FOR SPAN TEMPERATURE COMPENSATION AND ARE 0R MINIMUM, 300R MAXIMUM.

⚠ D 15 NUR AUF PLATINE G 01151-0137-0001

⚠ COMP PWA IS PART OF SENSOR MODULE ASSEMBLY.
8. THE END PRODUCT THIS SCHEMATIC DESCRIBES HAS BEEN SUBMITTED FOR INTRINSIC SAFETY APPROVAL. ANY CHANGES IN DESIGN, COMPONENT TYPE, COMPONENT VALUE, COMPONENT RATING OR BOARD LAYOUT MAY AFFECT APPROVAL AND REQUIRE RESUBMITTAL.

* MAX. 27 V-
FÜR EIGENSICHEREN BETRIEB

Änderung der Plattenfläche

Neben dem Plattenabstand läßt sich besonders einfach die Überdeckung, d.h. die wirksame Fläche der Kondensatorplatten, ändern (Bild 4.24). Befinden sich Platten mit der Breite b_0 und der Länge l_0 im Abstand a_0 einander gegenüber,

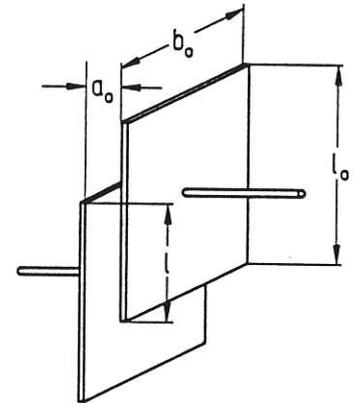


Bild 4.24: Parallelverschiebung der Kondensatorplatten

so hat dieser Kondensator eine maximale Kapazität C_0 von

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 b_0 l_0}{a_0}$$

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{a} \quad b_0 \cdot l_0 = A_0 \quad (4.60)$$

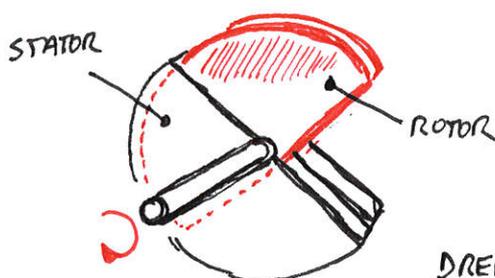
Wird nun die eine Kondensatorplatte so an der anderen vorbeigeschoben, daß beide sich nur noch teilweise mit der Länge l überdecken, so nimmt die Kapazität von C_0 auf C ab:

$$C = \frac{\epsilon_0 b_0 l}{a_0} = \frac{C_0 l}{l_0}$$

(4.61)

Sie ist der Länge l proportional. Damit ist auch dieser Kondensator für Wegmessungen geeignet.

Die Kondensatorplatten müssen bei ihrer Bewegung exakt geführt werden, um ihren Abstand genau einzuhalten. Anderenfalls würden Kapazitätsänderungen aufgrund von Abstandsänderungen das Meßergebnis verfälschen. Weniger empfindlich gegen diesen störenden Einfluß sind die Bauformen, die eine bewegliche Mittelelektrode enthalten (Bild 4.25).



DREHKONDENSATOR

Die Abhängigkeit der Kapazität von der Plattenoberfläche wird z.B. bei den bekannten Drehkondensatoren ausgenutzt. In der Verfahrenstechnik wird auf-

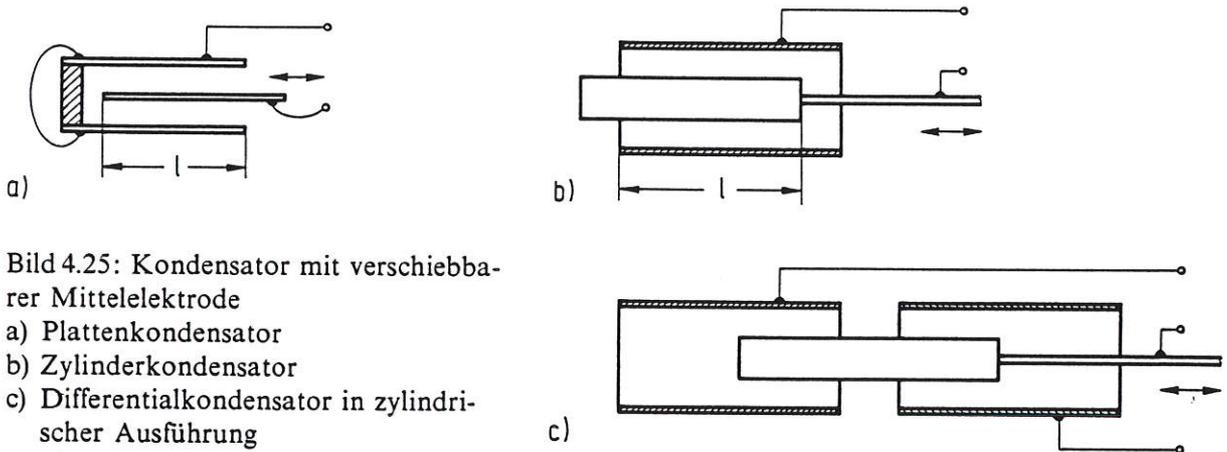
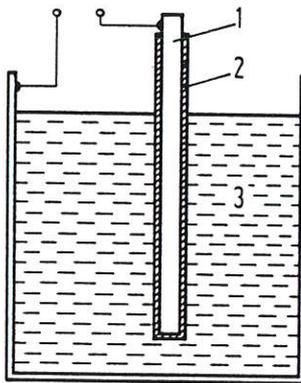


Bild 4.25: Kondensator mit verschiebbarer Mittelelektrode

- a) Plattenkondensator
b) Zylinderkondensator
c) Differentialkondensator in zylindrischer Ausführung



=> (SIENE SEITE 217) =>

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

grund dieses Effekts der Füllstand von elektrisch leitenden Flüssigkeiten gemessen. In die Flüssigkeit wird eine Elektrode mit einem isolierenden Überzug eingetaucht (Bild 4.26). Die Elektrode und die umgebende elektrisch leitende Flüssigkeit stellen einen Kondensator mit der Isolationsschicht als Dielektrikum dar. Die Kondensatorfläche und damit die Kapazität der Anordnung ist um so größer, je höher der Behälterfüllstand ist.

Geometrische Änderung des Dielektrikums

Geschichtete Dielektrika. Der in Bild 4.27a dargestellte Kondensator enthält zwei verschiedene Dielektrika mit den Dielektrizitätszahlen ϵ_{r1} und ϵ_{r2} und den Dicken a_1 und a_2 . Beide Dielektrika füllen den Raum zwischen den Kondensatorplatten völlig aus, $a_1 + a_2 = a_0$. Die Anordnung kann als eine Hintereinanderschaltung von zwei Kapazitäten C_1 und C_2 aufgefaßt werden, deren Gesamtkapazität C zu bestimmen ist. Für die vorliegende Serienschaltung gilt:

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

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{a_1/\epsilon_{r1} + a_2/\epsilon_{r2}} \quad (4.62)$$

Ist die Dielektrizitätszahl des ersten Dielektrikums gleich der der Luft ($\epsilon_{r1} = 1$), so ist die gesuchte Gesamtkapazität C

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{a_1 + a_2/\epsilon_{r2}} = \frac{\epsilon_0 A}{a_0 - a_2 + a_2/\epsilon_{r2}} \quad (4.63)$$

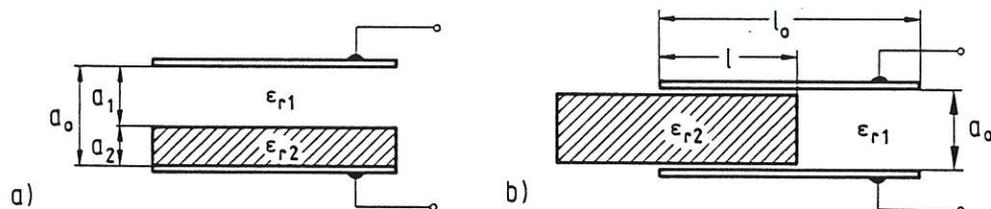


Bild 4.27: Kondensator mit geschichtetem (a) und eingeschobenem (b) Dielektrikum

abhängig von der Dielektrizitätszahl ϵ_{r2} und der Dicke a_2 des zweiten Dielektrikums. Ist eine dieser Größen bekannt, so kann die andere aus einer Messung der Kapazität ermittelt werden.

Diese Methode wird zur berührungslosen Schichtdickenmessung angewendet. Papier- und Kunststoff-Folien, synthetische Fasern und Fäden, deren Dicke zu bestimmen ist, werden zwischen zwei Kondensatorplatten hindurchgezogen. Die Dielektrizitätszahl der untersuchten Stoffe ist bekannt, so daß aus der gemessenen Kapazität die Dicke des Materials bestimmt werden kann.

Dielektrika mit variablen Eintauchtiefen. Anders als in den vorausgegangenen Überlegungen wird jetzt angenommen, daß das Dielektrikum 2 unterschiedlich tief in den Kondensator eintaucht. Dies führt zu der im Bild 4.27b gezeigten Anordnung, die sich als eine Parallelschaltung von Kondensatoren verstehen läßt. Die Gesamtkapazität setzt sich aus den Teilkapazitäten C_1 (Dielektrizitätszahl ϵ_{r1} , Plattenfläche $b_0(l_0 - l)$) und C_2 (Dielektrizitätszahl ϵ_{r2} , Plattenfläche $b_0 l$) zusammen:

$$\begin{aligned} C &= C_1 + C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r1} b_0 (l_0 - l)}{a_0} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r2} b_0 l}{a_0} \\ &= \frac{\epsilon_0 b_0}{a_0} [\epsilon_{r1} (l_0 - l) + \epsilon_{r2} l]. \end{aligned} \quad (4.64)$$

Die letzte Gleichung wird etwas übersichtlicher, wenn als Dielektrikum 1 wieder Luft unterstellt ($\epsilon_{r1} = 1$) und die Kapazität C_0 des leeren, luftgefüllten Kondensators (Gl. (4.60)) eingeführt wird. Die durch den Eintritt des Dielektrikums 2 verursachte relative Kapazitätsänderung $\Delta C/C_0$ wächst proportional zur Eindringtiefe l :

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{C - C_0}{C_0} = \frac{l_0 - l}{l_0} + \frac{\epsilon_{r2} l}{l_0} - 1 = \frac{\epsilon_{r2} - 1}{l_0} l. \quad (4.65)$$

Dieses Prinzip wird zur Füllstandsmessung bei elektrisch nichtleitenden Flüssigkeiten und Schüttgütern angewendet. In das zu kontrollierende Medium werden zwei Kondensatorplatten eingeführt (Bild 4.28), die mit zunehmender Füllung mehr und mehr überdeckt werden. Die gemessene Kapazität ist dann nach Gl. (4.65) ein Maß für die gesuchte Füllhöhe l .

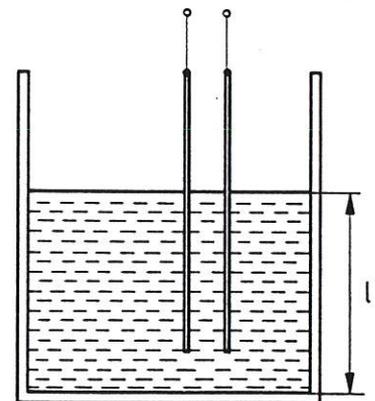


Bild 4.28: Kapazitive Füllstandsmessung bei nichtleitenden Flüssigkeiten oder Schüttgütern

Vergleich der induktiven und der kapazitiven Längenaufnehmer

Randbedingungen. Induktive und kapazitive Längenaufnehmer sind sich insofern ähnlich, als sie im Unterschied zu den potentiometrischen Aufnehmern kontaktlos und verschleißfrei arbeiten. Bezüglich dieser Eigenschaft sind sie für die Meßaufgaben gleich gut geeignet. Um zu sehen, ob sich die induktiven und kapazitiven Aufnehmer in anderen Punkte unterscheiden und damit eigene, spezifische Anwendungsgebiete haben, werden ein Queranker-Aufnehmer und ein Plattenkondensator verglichen (Bild 4.30). Die Luftspaltbreite a des Queranker-Aufnehmers und der Plattenabstand a des Kondensators werden gleich groß angenommen. Dagegen soll die Kondensatorfläche A_C das Zehnfache der Querschnittsfläche A_L der Polschuhe betragen, womit auch das Volumen des elektrischen Feldes V_C zehnmal so groß wie das des magnetischen Feldes V_L ist, $A_C = 10 A_L$.

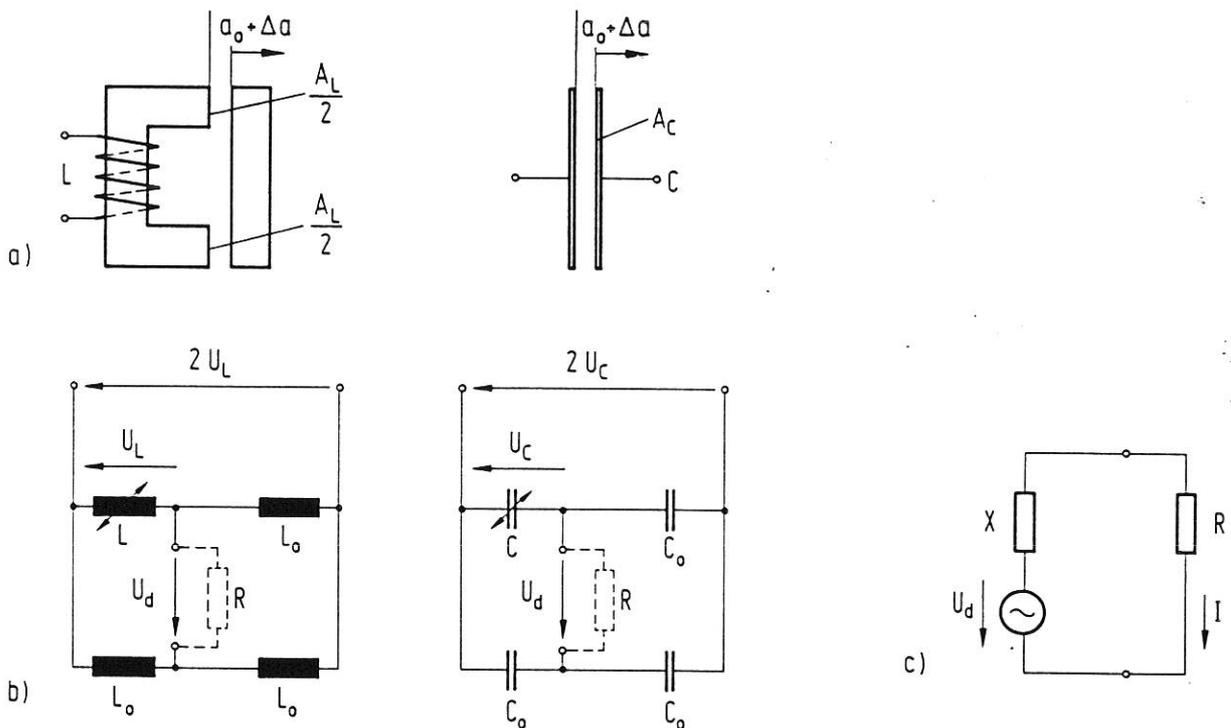


Bild 4.30: Vergleich eines induktiven Querankeraufnehmers mit einem kapazitiven Aufnehmer

- a) Aufnehmer
- b) Brückenschaltung
- c) Ersatzspannungsquelle

Die Energie des magnetischen Feldes ist um Zehnerpotenzen größer als die des elektrischen. Dieser Sachverhalt ist für die Anwendungsfälle bedeutsam, in denen die Diagonalspannung der verwendeten Brückenschaltung nicht im Leerlauf, sondern mit einer bestimmten Stromentnahme gemessen wird, für die Fälle also, in denen die Brücke belastet wird.

Der induktiven Brücke ist also eine wesentlich größere Leistung als der kapazitiven zu entnehmen. Die induktiven Aufnehmer liefern damit die leistungsstärkeren Signale. Diese werden weniger durch Einstreuungen und durch Rauschen gestört und sind sicherer zu verarbeiten. Bei der induktiven Brücke kann in vielen Fällen auf Meßverstärker verzichtet werden. Anzeige- und Registriergeräte lassen sich direkt anschließen. Dieser Vorteil überwiegt die Nachteile der induktiven Aufnehmer wie die schwierigere Herstellung, die Temperaturabhängigkeit des Wicklungswiderstandes und die schlechtere Linearität, so daß induktive Geber zur Zeit häufiger als kapazitive eingesetzt werden.

$\epsilon =$ PERMITTIVITÄT (DIELEKTIZITÄTSKONSTANTE)

$$\epsilon = \frac{|D|}{|E|}$$

D = ELEKTRISCHE FLUSSDICHTE

E = ELEKTRISCHE FELDSTÄRKE

$$D = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot E$$

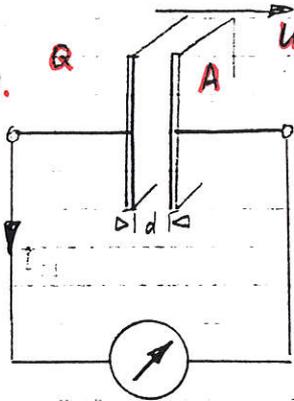
$\epsilon_0 =$ ELEKTRISCHE FELD KONSTANTE

$\epsilon_r =$ RELATIVE DIELEKTIZITÄTSKONSTANTE

Kapazitive Längenmessung

1. $C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \frac{A}{d} \leftarrow l$

ALLGEMEINE
GLEICHUNG
DES PLATTENK.



Möglichkeiten zur Bestimmung von l :

1. Veränderung des Plattenabstände
2. Veränderung der Plattenflächen
3. Veränderung von ϵ_r (Niraxmessung)

(SIEHE S. 208 ff.)

$Q = C \cdot U$

$Q = C \cdot U$

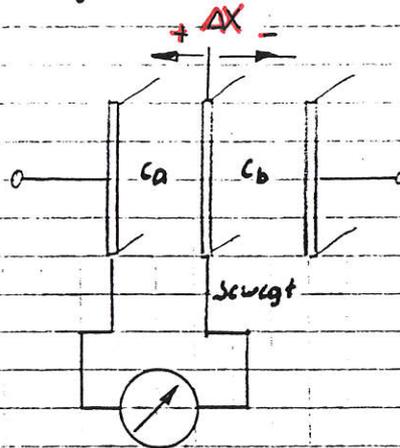
eine direkte Kapazitätsmessung oder Spannungsmessung am Kondensator bei Gleichspannung ist nicht relevant, da es dabei immer zu einer Entladung des Kondensators kommt.

Eine gute Methode ist die Ermittlung mit Wechselstrommeßbrücken.

$X_C = \frac{1}{\omega C} = \text{BLINDWIDERSTAND}$

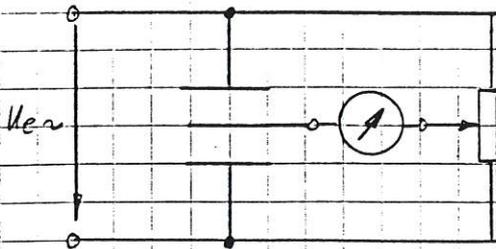
2. Differenzialkondensator :

$U_a = \frac{Q}{C} = \frac{Q (d \pm \Delta x)}{\epsilon_0 \epsilon_r \cdot A}$



$C_{ges} = \frac{C_a \cdot C_b}{C_a + C_b}$

C_{ges} ist konst. !



Mit dieser Meßanordnung ist es zu jeder Zeit möglich die maximale Empfindlichkeit einzustellen. Die Einzelkapazitäten ändern sich, aber die Gesamtkapazität bleibt gleich.

Der Kondensator

$$C = \frac{Q}{U}$$

Permittivitätszahl ϵ_r

$$1 \frac{As}{V} = \frac{1 As}{1V} = 1 F$$

Stoff	ϵ_r
Luft, Vakuum	1
Papier	1.8...2,6
Glas	2,0...16
Glimmer	4,0...8,0
Pertinax	4,8
Condensa	40...80
Titanoxid	110
Ferroxcube	1000000

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{s}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$$

- C Kapazität
- Q Elektrizitätsmenge
- U Spannung
- ϵ_0 elektrische Feldkonstante
- ϵ_r Permittivitätszahl
- A Plattenfläche
- s Plattenabstand

Beispiel
 $\epsilon_r = 8; A = 5 \text{ cm}^2; s = 1 \text{ mm}$
 $C = ? F$

Lösung:
 $C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{s}$
 $= 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm} \cdot 8 \cdot \frac{5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2}{10^{-3} \text{ m}}$
 $C = 35,4 \text{ pF}$

C_1, C_2 Einzelkapazitäten
C Gesamtkapazität

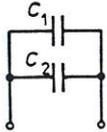
Beispiel 1:
 $C_1 = 20 \text{ nF}; C_2 = 70 \text{ nF}$
Parallelschaltung $C = ? F$

Lösung:
 $C = C_1 + C_2 = 20 \text{ nF} + 70 \text{ nF} = 90 \text{ nF}$

Beispiel 2:
 $C_1 = 1 \mu F; C_2 = 3 \mu F$
Reihenschaltung $C = ? F$
 $C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{1 \mu F \cdot 3 \mu F}{1 \mu F + 3 \mu F} = 0,75 \mu F$

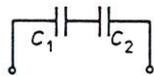
Parallelschaltung von Kondensatoren

$$C = C_1 + C_2 + \dots$$



Reihenschaltung von Kondensatoren

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$$

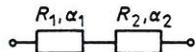


für 2 Kondensatoren

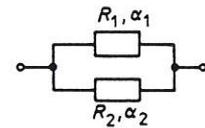
$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

Temperaturkompensation mehrerer Widerstände

Reihenschaltung:



$$\alpha_R = \frac{\alpha_1 \cdot R_1 + \alpha_2 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

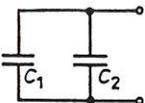


Parallelschaltung:

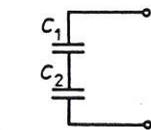
$$\alpha_P = \left(\frac{\alpha_1 \cdot R_2 + \alpha_2 \cdot R_1}{R_1 + R_2} \right)$$

- α_R Gesamttemperaturbeiwert der Reihenschaltung
- α_1, α_2 Temperaturbeiwerte der Widerstände
- R_1, R_2 Ohmsche Widerstände
- α_P Gesamttemperaturbeiwert der Parallelschaltung

Temperaturabhängigkeit von Kondensatoren



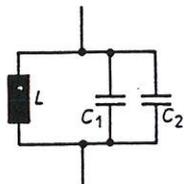
$$\alpha_P = \frac{C_1 \cdot \alpha_1 + C_2 \cdot \alpha_2}{C_1 + C_2}$$



$$\alpha_S = \frac{C_1 \cdot \alpha_2 + C_2 \cdot \alpha_1}{C_1 + C_2}$$

- α_P Temperaturkoeffizient der Parallelschaltung
- α_1, α_2 Temperaturkoeffizienten der Kondensatoren C_1 und C_2
- C_1, C_2 Kapazität
- α_S Temperaturkoeffizient der Reihenschaltung

TK von Resonanzkreisen



$$\alpha_k = -\frac{1}{2}(\alpha_C + \alpha_L)$$

α_k Temperaturkoeffizient
des Kreises

Bei Ausgleich ist
 $\alpha_C = \alpha_L$

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{\alpha_L + \alpha_1}{\alpha_L - \alpha_2}$$

oder

$$\frac{C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\alpha_L + \alpha_1}{\alpha_1 - \alpha_2}$$

(α_L und α_1 gleiches Vorzeichen)

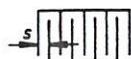
Beispiel:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 30 \cdot 10^{-6} \\ \alpha_2 &= -50 \cdot 10^{-6} \\ \alpha_L &= 45 \cdot 10^{-6} \\ \frac{C_2}{C_1} &= ?\end{aligned}$$

Lösung:

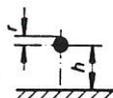
$$\begin{aligned}\frac{C_2}{C_1} &= \frac{\alpha_L + \alpha_1}{\alpha_L - \alpha_2} \\ &= \frac{45 + 30}{45 - (-50)} \cdot 10^{-6} \\ &= 0,8 \\ C_2 &= 0,8 \cdot C_1\end{aligned}$$

Drehkondensator



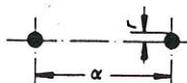
$$C = (n - 1) \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{s}$$

n Anzahl der Platten

Kapazität eines Leiters
gegen Masse

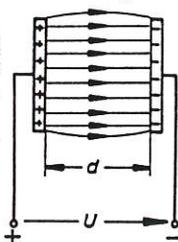
$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot 2\pi \cdot l}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)}$$

Kapazität einer Doppelleitung



$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \pi \cdot l}{\ln\left(\frac{a}{r}\right)}$$

Elektrisches Feld



$$E = \frac{U}{d}$$

$$1 \frac{\text{V}}{\text{m}} = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ m}}$$

E elektrische Feldstärke
 U angelegte Spannung
 d Abstand der Platten

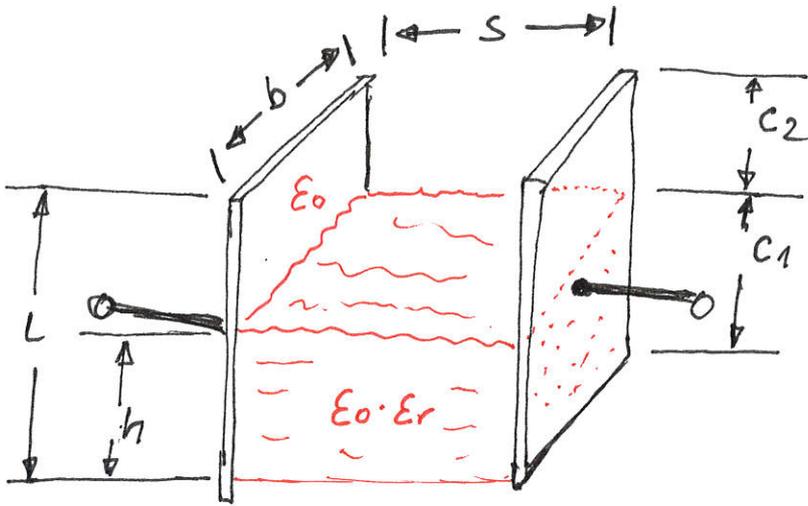
Beispiel

$$U = 1000 \text{ V}; d = 1 \text{ cm}; E = ? \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

Lösung:

$$E = \frac{U}{d} = \frac{1000 \text{ V}}{0,01 \text{ m}} = 10^5 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

FÜLLSTAND IM PLATTEN-
KONDENSATOR

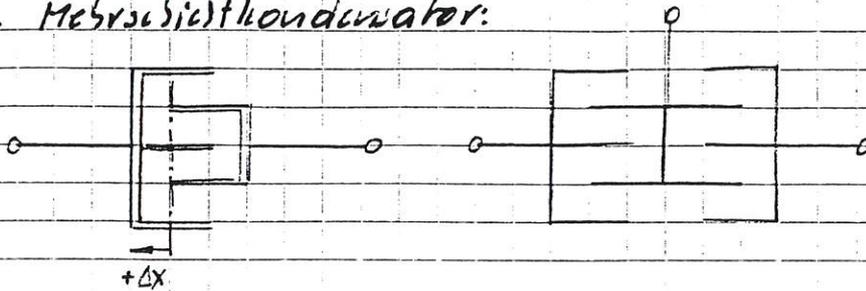


$$C_g = C_1 + C_2$$

$$C_1 = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{b \cdot h}{s} \quad , \quad C_2 = \epsilon_0 \frac{(L-h) \cdot b}{s}$$

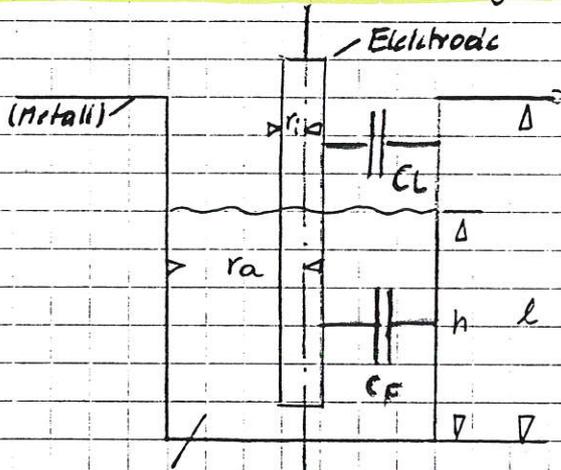
C

3. Mehrschichtkondensator:



Hiermit könnte man die gleiche Mißanordnung wie oben aufbauen.

Kapazitive Füllstandsmessung



$$C_{ges} = C_L + C_F$$

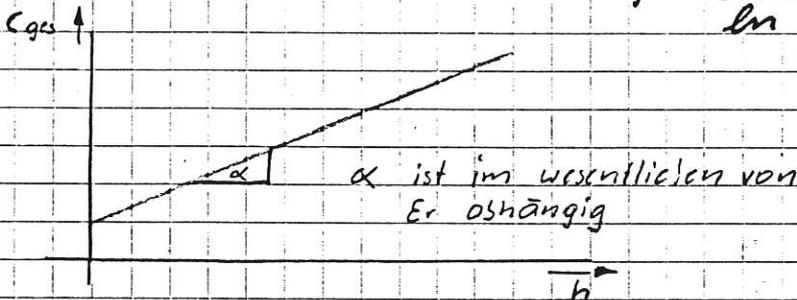
$$C_{ZYL.} = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{l}{\ln \frac{r_a}{r_i}}$$

ALLGEMEIN GILT FÜR DEN ZYL.-KOND.

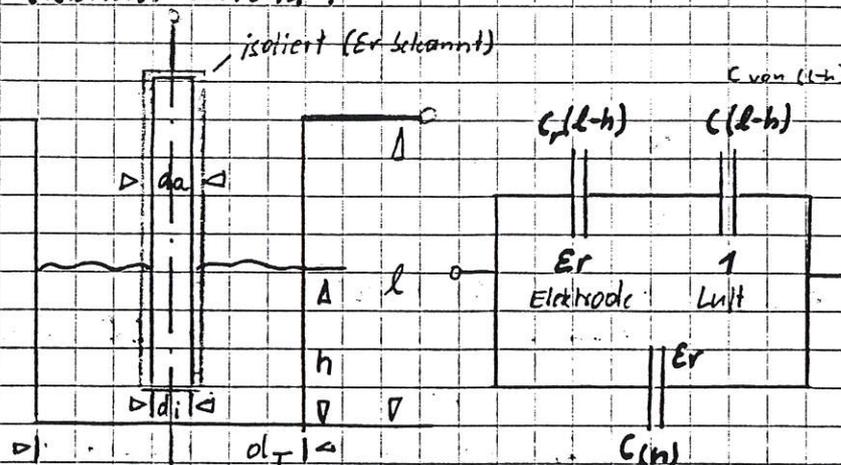
$$C_{ges} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}{\ln \frac{r_a}{r_i}} \left[(l-h) + (\epsilon_r \cdot h) \right]$$

Fallstoff mit bekanntem ϵ_r

$$C_{ges} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}{\ln \frac{r_a}{r_i}} \left[l + h (\epsilon_r - 1) \right]$$



Füllstoff elektrisch leitend:



das Füllmaterial wird als idealer Leiter (Kurzschluß) angesehen.

Kapazitive Standmessung

Höhenstandsmessung bei isolierenden Medien

Bei isolierenden Flüssigkeiten taucht man einen Zylinderkondensator mit blanken Elektroden in den Behälter ein. Wie im Bild dargestellt, dringt die Flüssigkeit in das Rohr des Zylinderkondensators ein und wirkt zwischen den Elektroden als Dielektrikum.

Da die Dielektrizitätskonstante der isolierenden Flüssigkeit größer als die von Luft ist, vergrößert sich die Kapazität des Zylinderkondensators bei steigendem Füllstand. Die Größe der Kapazität wird in der Meßschaltung erfaßt und ist ein Maß für das Niveau der Flüssigkeit.

Höhenstandsmessung bei leitenden Medien

Im Gegensatz zur Höhenstandsmessung bei isolierenden Flüssigkeiten muß bei leitenden Flüssigkeiten die Zentralelektrode isoliert ausgeführt werden. Als Gegenelektrode dient die leitende Flüssigkeit, deren Potential an der Behälterwand abgegriffen werden kann. Der Behälter muß isoliert aufgestellt werden, damit die zu messende Kapazität erdfrei wird. Auch hier vergrößert sich die Meßkapazität mit steigendem Füllstand.

Bei chemisch aggressiven Flüssigkeiten, z. B. Flußsäure, muß der ganze Tank isoliert werden, damit er nicht angegriffen wird. Als Isoliermaterial kann z. B. Polyäthylen verwendet werden.

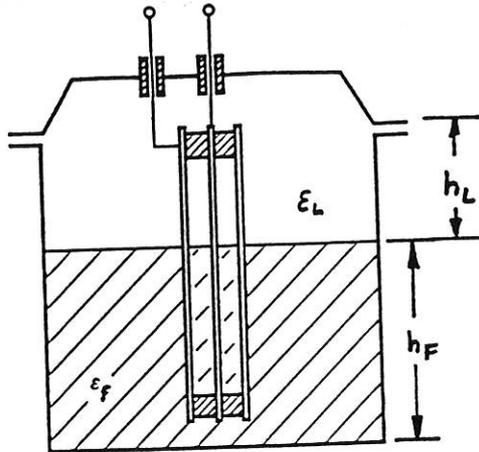
Meßschaltung

Die Messung des Höhenstandes beruht bei leitenden und isolierenden Flüssigkeiten auf einer Kapazitätsmessung, die mit der Meßschaltung erfaßt wird. Das Hauptproblem in der Meßschaltung besteht in der Eliminierung veränderlicher Störkapazitäten gegen Erde.

Wesentliches Merkmal dieser Schaltung ist die Erdung der Mittelanzapfung der Sekundärwicklung des Transformators. Die Störkapazität C_{K1} liegt parallel zu einer Sekundärwicklung des Transformators, also parallel zur Spannungsquelle und beeinflusst deshalb die Messung in keiner Weise. Die Störkapazität C_{K2} liegt parallel zum Verstärkereingang und geht deshalb nicht in die Abstimmung der Brücke durch die Kapazität C_n ein.

Praktisch ausgeführt wird die Schaltung für eine Meßkapazität von z. B. 200 ... 250 pF; eine Kabelkapazität von maximal 2000 pF ist zulässig.

Höhenstandsmessung
bei isolierenden Flüssigkeiten



$$\epsilon_L = 1$$

$$C_g = K(h_L \cdot 1 + h_f \cdot \epsilon_f)$$

$$h_L = h - h_f$$

$$\frac{C_g}{K} = h - h_f + h_f \cdot \epsilon_f$$

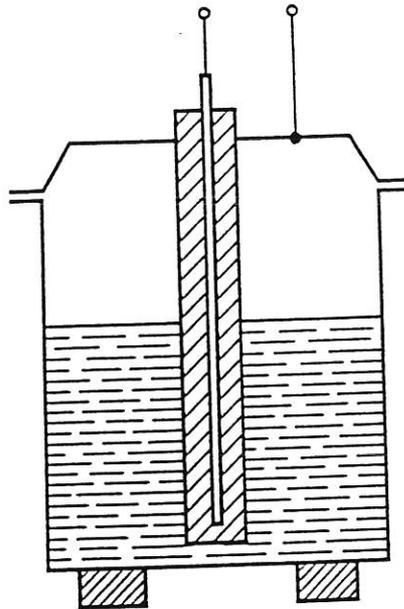
K: ENTHÄLT ALS KONST. ALLE AB-
MESSUNGEN UND GRÖSSEN, DIE
SICH NICHT ÄNDERN

h_L : HÖHE DES LEERTEILS

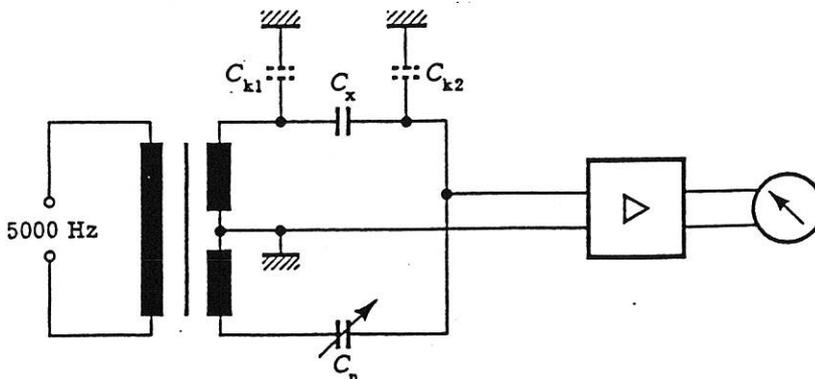
h_f : HÖHE DER FÜLLUNG

ϵ_f : DIELEKTRIZITÄTSKONSTANTE
DER FÜLLUNG

Höhenstandsmessung
bei leitenden Flüssigkeiten



$$h_f = \frac{1}{\epsilon_f - 1} \left(\frac{C_g}{K} - 1 \right)$$



Meßschaltung zur kapazitiven Höhenstandsmessung

. Kapazitive Meßverfahren⁶

Kapazitive Füllstandmeßgeräte werden im wesentlichen dort eingesetzt, wo die herkömmlichen Meßverfahren nur unbefriedigend arbeiten oder sogar versagen, wie dies u.U. bei zähflüssigem, körnigem oder staubförmigem Füllgut der Fall sein kann. Sie können sowohl zur Grenzwertüberwachung als auch zur kontinuierlichen Standmessung verwendet werden, wobei sich im zweiten Fall die relative Dielektrizitätskonstante des Füllgutes nicht ändern darf.

Gemessen wird die Kapazitätsänderung eines Kondensators in Abhängigkeit von der Füllhöhe. Der Kondensator wird durch eine in das Füllgut ragende Meßsonde und die Behälterwand gebildet. Bei Behältern aus nichtleitenden Materialien muß eine entsprechend dimensionierte Gegenelektrode vorgesehen werden. Die Kapazitätsänderung wird durch die unterschiedlichen relativen Dielektrizitätskonstanten der Behälteratmosphäre und des Füllgutes hervorgerufen. Als relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r eines Stoffes bezeichnet man das Verhältnis der Kapazität eines ganz mit diesem Stoff gefüllten Kondensators zu seiner Kapazität im Vakuum. Sie ist — im Gegensatz zur absoluten Dielektrizitätskonstanten des Vakuums — eine dimensionslose Größe und ist in der Tabelle in Abb. 7.28 für einige Stoffe wiedergegeben⁷. Für Luft beträgt $\epsilon_r = 1$.

Material	Dielektrizitätskonstante	Material	Dielektrizitätskonstante	Material	Dielektrizitätskonstante
Glas	5–10	Nitrobenzol	37 (15 °C)	Luft	1,000576 (0 °C, 760 Torr)
Schwefel	3,6–4,3	Äthylalkohol	25,8 (20 °C)	Wasserstoff	1,000264 (0 °C, 760 Torr)
Hartgummi	2,2–3,5	Wasser	81,1 (18 °C)	SO ₂	1,0099 (0 °C, 760 Torr)
Quarzglas	3,7	Petroleum	2,1 (18 °C)	N	1,000606 (0 °C, 760 Torr)

Abb. 7.28. Dielektrizitätskonstanten verschiedener Stoffe

In Abb. 7.29 sind schematisch die Verhältnisse an einem Plattenkondensator dargestellt, dessen Dielektrikum teilweise aus Luft und teilweise aus Füllgut besteht, und der als Parallelschaltung zweier Einzelkondensatoren mit den Kapazitäten C_1 und C_2 betrachtet werden kann. Für diese Teilkapazitäten gilt:

$$C_1 = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \frac{b \cdot h}{s} \quad (7.9) \quad \text{und} \quad C_2 = \epsilon_0 \frac{b(L-h)}{s} \quad (7.10)$$

Hierin sind:

- ϵ_0 = absolute Dielektrizitätskonstante des Vakuums,
- ϵ_r = relative Dielektrizitätskonstante,
- h = Füllhöhe,
- b = Plattenbreite,
- L = Plattenhöhe,
- s = Plattenabstand.

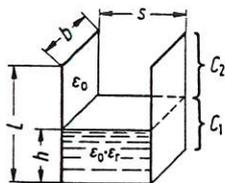


Abb. 7.29. Plattenkondensator mit Dielektrikum bestehend aus Luft und Füllgut

⁷ Gerthsen, Chr.: Physik. 6. Aufl. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1960.

Durch Umstellung ergibt sich aus den Gln. (7.9) und (7.10) die Gesamtkapazität zu:

$$C = C_1 + C_2 = \underbrace{\varepsilon_0 \frac{L \cdot b}{s}}_{C_0} + \underbrace{\varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) \frac{b}{s} \cdot h}_{\Delta C} \quad (7.11)$$

Aus Gl. (7.11) folgt, daß sich diese Gesamtkapazität aus einer konstanten Anfangskapazität C_0 bei leerem Behälter und einer Kapazitätsänderung ΔC bei steigendem Füllgut zusammensetzt, die der Füllstandshöhe h proportional ist. Entsprechende Überlegungen gelten für einen Zylinderkondensator, wie er in Abb. 7.30 dargestellt ist, und dessen Plattenanordnung in vielen Anwendungsfällen den tatsächlichen Gegebenheiten bei der Füllstandsmessung nahe kommt. Für seine Gesamtkapazität, die sich ebenfalls aus zwei Teilkapazitäten zusammensetzt, gilt:

$$C = \underbrace{\frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln(D/d)} \cdot L}_{C_0} + \underbrace{\frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln(D/d)} (\varepsilon_r - 1) \cdot h}_{\Delta C} \quad (7.12)$$

mit

D = Durchmesser des äußeren Kondensatorbelages,
 d = Durchmesser des inneren Kondensatorbelages.

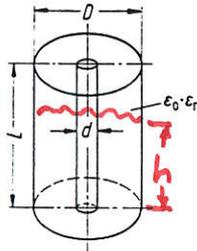


Abb. 7.30. Kapazität eines Zylinderkondensators

In der Praxis wird man jedoch selten Einbauverhältnisse vorfinden, die eine zentrische Sondenanordnung mit idealem Feldlinienverlauf gestatten. In den Abb. 7.31 bis 7.34 ist dargestellt, mit welchen baulichen Gegebenheiten in Wirk-

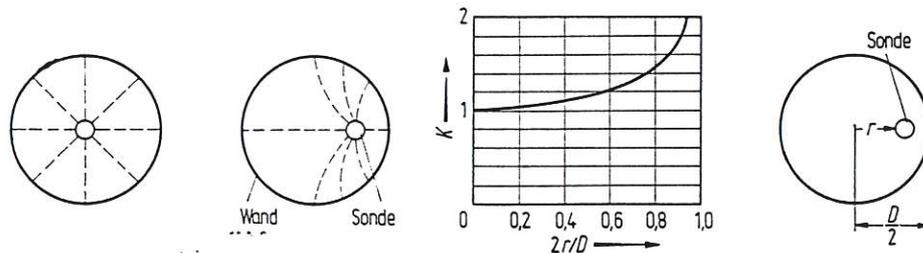


Abb. 7.31. Korrekturfaktor bei exzentrischem Sondereinbau.

$$\Delta C_{\text{exzentrisch}} = K \cdot \Delta C_{\text{zentrisch}}$$

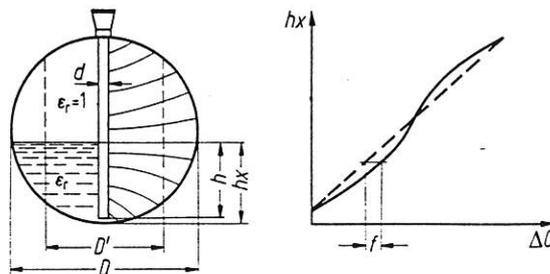


Abb. 7.32. Kapazitätsberechnung bei einem liegenden zylindrischen Behälter.

In Gl. (7.12) für den zylindrischen (stehenden) Kondensator wird D durch D' ersetzt:

$$D' = 0,6 \cdot D$$

D = Innendurchmesser des Tanks

f = Fehler durch inhomogenen Feldlinienverlauf (etwa 4 %).

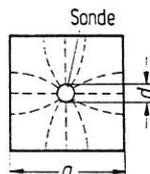


Abb. 7.33

Abb. 7.33. Korrekturfaktor bei quadratischem Behälterquerschnitt.

$$\Delta C \text{ quadratisch} = 0,96 \Delta C \text{ zentrisch}$$

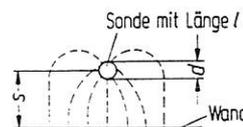


Abb. 7.34

Abb. 7.34. Kapazitätsberechnung bei wandnahe Einbau.

Für $s \gg d$ und $l \gg s$ wird die Kapazitätsänderung

$$\Delta C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(4s/d)} (\epsilon_r - 1) \cdot h$$

lichkeit zu rechnen ist und wie diese in Form von Korrekturfaktoren berücksichtigt werden müssen.

Die Gestaltung und Anbringung der Meßsonde spielt für eine einwandfreie Messung eine entscheidende Rolle, wobei im wesentlichen folgende Punkte zu beachten sind: Die Sondenisolierung gegenüber dem Behälter, die Form des Behälters, die Füllguttemperatur, die Körnung, die Abrasivität, die chemische Aggressivität, der Druck im Behälter, die Kondensat- und Schaumbildung, sowie die Viskosität des Füllgutes. Bei der Dimensionierung der Sonden und vor allem der Sondendurchführungen sind die teilweise erheblichen mechanischen Beanspruchungen durch die Füllgutbewegungen zu berücksichtigen.

Handelt es sich um elektrisch leitendes oder korrodierendes Füllgut, so muß die Meßsonde mit einem geeigneten Isolator wie Hartgummi, Glas, PVC oder anderen Kunststoffen verkleidet werden. Dies ist ebenfalls bei der Kapazitätsberechnung zu berücksichtigen, die wie bei einem geschichteten Kondensator erfolgen muß. Bei den Sondenausführungen unterscheidet man zwischen Stab-, Seil- und Plattensonden. In Abb. 7.35 sind Einbaubeispiele der verschiedenen Sondenarten dargestellt. Stabsonden eignen sich für Meßlängen bis zu etwa 3 m in ruhenden Flüssigkeiten. Größere Meßlängen beherrscht man mit flexiblen Seil-

sonden, die durch ein am Sondenende befestigtes Gewicht gestrafft werden. In Behältern mit feinkörnigen Schüttgütern verwendet man Seilsonden bis zu 20 m, die auf Grund ihrer Flexibilität den in Abb. 7.36 dargestellten Füllgutbewegungen folgen können. Diese Sonden müssen zeitweise erhebliche Zugkräfte aushalten, wenn z. B. durch das Füllgut gebildete Wände einstürzen. Aus diesem Grunde ist die Meßlänge kontinuierlich arbeitender, kapazitiver Meßsonden bei Schüttgütern durch die maximal auftretenden Zugkräfte begrenzt. Für die Grenzwertüberwachung kann man statt der längeren Stab- und Seilsonden kurze Stabsonden einsetzen, die seitlich in Höhe des zu überwachenden Niveaus in die Behälterwand eingebaut werden, sofern die Betriebsverhältnisse dies gestatten. Durch diese Einbauart erreicht man eine sehr genaue definierte Detektion, da die Sonde fast schlagartig vom Füllgut bedeckt wird. Allerdings sollte bei Schüttgütern die Füllguthöhe den Einbauort der Sonde nicht mehr als 4 m übersteigen, da sonst die mechanische Belastung bei den Füllgutbewegungen zu groß wird. Dieses Problem tritt nicht auf, wenn man Plattensonden verwendet, die bündig in die Behälterwand eingebaut werden und dem Füllgutfluß keinen mechanischen Widerstand entgegensetzen.

Die Kapazitätswerte der von den Meßsonden und Behälterwänden gebildeten Kondensatoren liegen im Piko-Farad-Bereich. Um einen genügend großen Meßeffect zu erzielen, ist die Verwendung von Hf-Spannung erforderlich, mit der in Resonanzschaltungen oder selbstabgleichenden Wechselstrombrücken ein der Kapazitätsänderung proportionales Gleichstromsignal erzeugt wird. Die Fre-

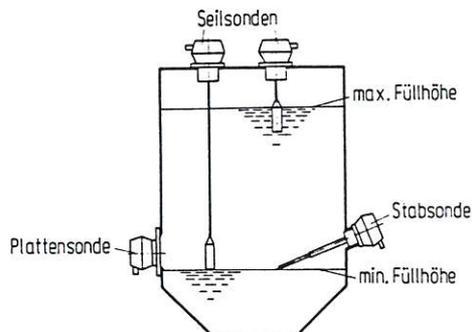


Abb. 7.35. Einbaubeispiele verschiedener Sondenformen

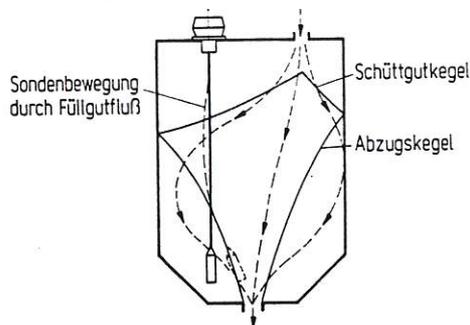


Abb. 7.36. Sondenbeanspruchung durch Füllgutbewegungen

quenzen dieser Hf-Spannungen liegen üblicherweise im Bereich von einigen zehn bis einigen hundert Kilohertz. Die an den Sonden liegende Meßspannung ist so niedrig und energiearm, daß die Sonden als Meßwertaufnehmer im allgemeinen die Bedingungen für eigensichere Stromkreise erfüllen und sich ohne weitere Schutzmaßnahmen in explosionsgefährdeter Umgebung verwenden lassen. Dagegen müssen die Auswertegeräte bei derartigen Betriebsverhältnissen entweder in explosionsgeschützter Ausführung hergestellt sein oder in einem Raum untergebracht werden, der nicht den Ex-Vorschriften unterworfen ist.

Wie bereits erwähnt, wird bei der kontinuierlichen, kapazitiven Füllstandmessung vorausgesetzt, daß die Dielektrizitätszahl des Füllgutes konstant ist. Änderungen des Mischungsverhältnisses, der Konzentration oder der Feuchtigkeit führen zu Änderungen des ϵ -Wertes und somit zu Fehlmessungen. Bei konstanten ϵ_r und einer sorgfältigen Sondenmontage lassen sich Meßgenauigkeiten von $\pm 2\%$ bezogen auf die jeweilige Meß-, d. h. Sondenlänge erreichen. Ein Nachteil des Verfahrens besteht darin, daß ein Vollabgleich nur bei gefülltem Behälter vorgenommen werden kann. Kapazitive Grenzscharter sind von Schwankungen der Dielektrizitätskonstanten unabhängig, da die Schaltung schon bei einer minimalen Kapazitätsänderung gegenüber Luft eintritt.

$$C_{ges} = \frac{C_{r(l-h)} \cdot C(l-h)}{C_{r(l-h)} + C(l-h)} + C(h)$$

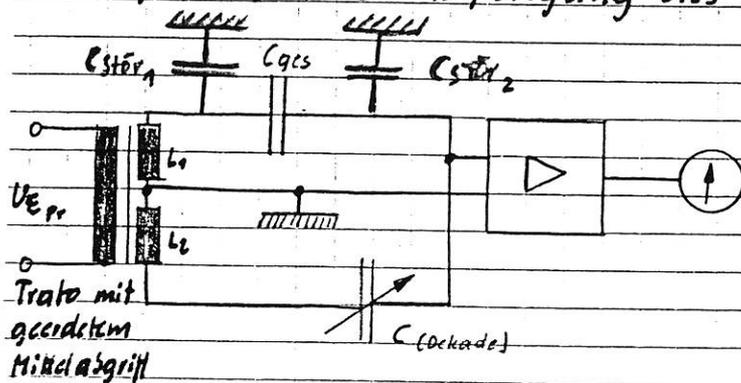
$$C_{ges} = \frac{(2\pi \cdot \epsilon_0)^2 \cdot \epsilon_r (l-h)^2}{\ln \frac{d_a}{d_i}} \cdot \frac{1}{\ln \frac{d_T}{d_a}} + \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r \cdot h}{\ln \frac{d_a}{d_i}}$$

$$2\pi \epsilon_0 \left(\frac{\epsilon_r (l-h)}{\ln \frac{d_a}{d_i}} + \frac{(l-h)}{\ln \frac{d_T}{d_a}} \right)$$

$$C_{ges} \approx (l-h) + \approx h$$

Meßtechnische Nutzen oder Probleme auf:

- Zwischen Elektroden und der Masse entstehen Störkapazitäten je nach Art der Befestigung des Tanks mit dem Untergrund.



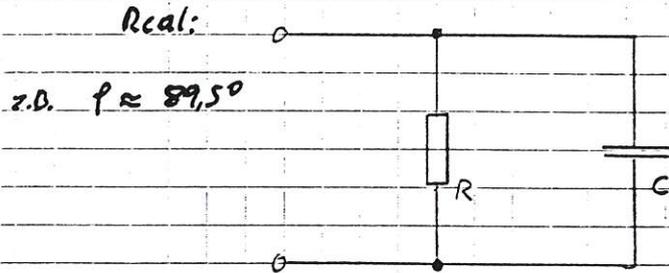
Mit dieser Schaltung werden die Einflüsse der Störkapazitäten ausgeschaltet.

Da L_1 parallel zur Spannungsquelle (genauer L_1) liegt, wird der induktive Spannungsteiler „ L_1 “ belastet, wodurch sich auf eine Wirkung auf L_2 einstellt (magn. Kopplung). Da die Flussänderung gleich ist sind auch die

Änderungen in L_1 und L_2 gleich. Hierbei durch die Belastung von L_1 die Spannung an L_1 fast Null wird, wobei $X_{Stoer1} \gg$ als X_{L1} sein muß. L_2 ist durch die Masselegung des Mittelzweiges ausgeschaltet

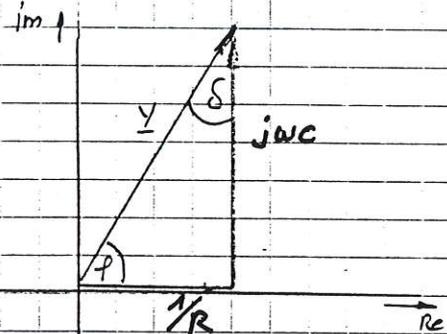
Ersatzschaltbild eines Kondensators

(SIEHE SEITE 231)



Über die Leitwerte schreibt:

$$Y = \frac{1}{R} + j\omega C$$



Eine ideale Kapazität hätte keinen Realteil (keinen Verlustf.) und würde auf der Im-Achse liegen.

Verlustfaktor : $d = \tan \delta = \frac{1}{\omega C R}$

$$d = \tan \delta = \frac{1}{R\omega C}$$

$\delta = \text{DELTA}$

Güte : $Q = \frac{1}{d} = R\omega C$

SIEHE S196 b) / d) !

z.B. für einen Thermoplast-Kond. folgt : $f = 10^6 \text{ Hz} : \tan \delta = 0,02$

$f = 10^8 \text{ Hz} : \tan \delta = 0,012$

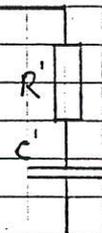
Beste Arbeitsweise (um kHz) für Kondensator. $\Rightarrow f = 10^5 \text{ Hz} : \tan \delta = 0,009$

Umwandlung von Parallelschaltung (R und Xc) in eine Reihenschaltung:

$$Y = \frac{1}{R} + j\omega C$$

$$Y = Y e^{j89,5^\circ}$$

$$\frac{1}{Y} = Z = \frac{1}{Y} e^{-j89,5^\circ} \Rightarrow Z = R' + \frac{1}{j\omega C'}$$

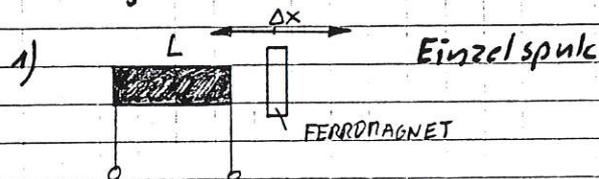


Induktive Längenmessung

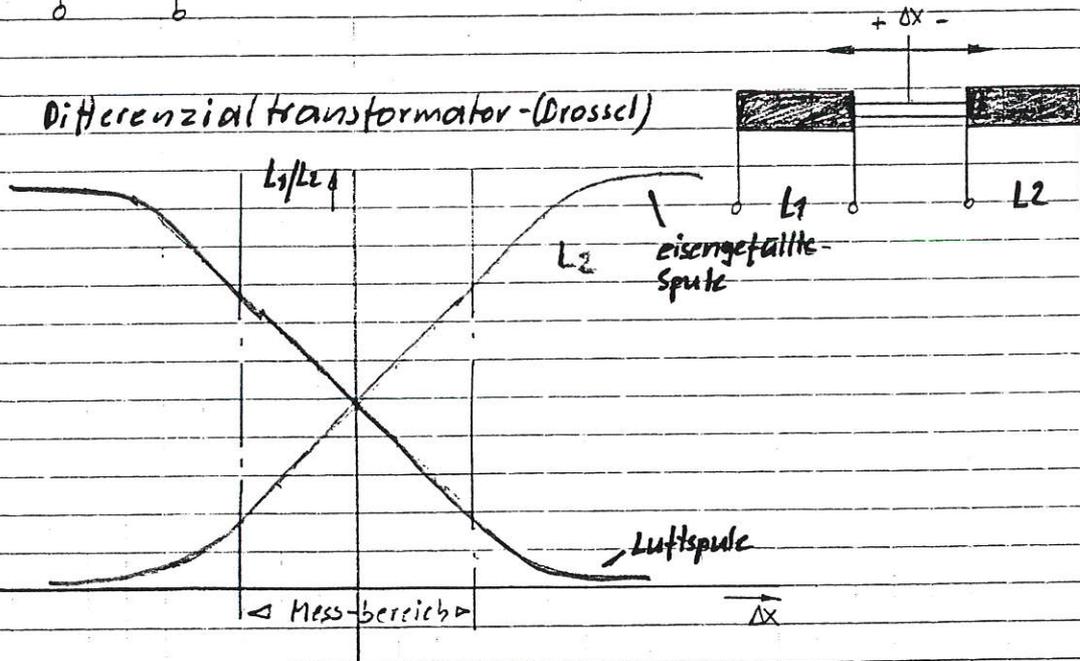
$$L = N^2 \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A}{l}$$

(SIEHE S. 198 ff) =>

μ_r ist die einzige Größe mit der Einfluß auf die Induktivität genommen werden kann.

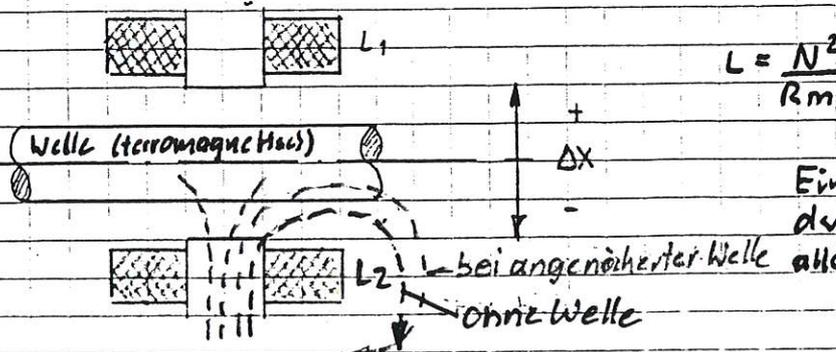


2) Differenzialtransformator-(Drossel)



Die Längenmessmethode ist die am meisten verbreitete Methode.

Anwendung zB. für Lagenspielmessung:

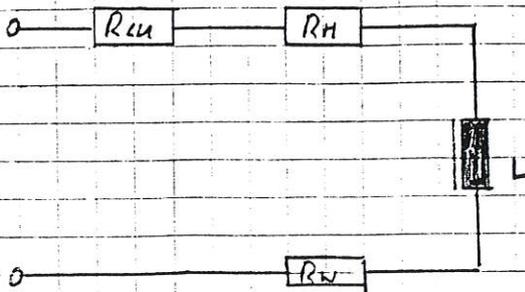


Eine magnetische Kopplung der beiden Spulen muß allerdings vorhanden werden

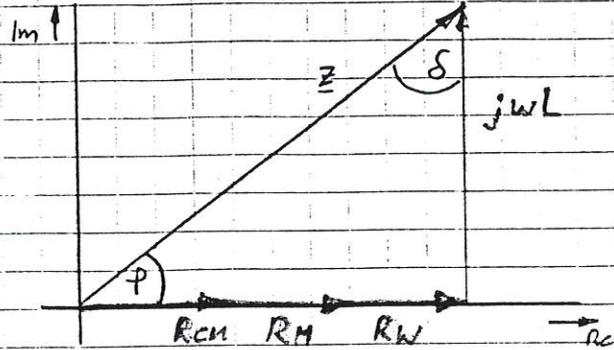
(GEHE ZU SEITE 202) =>

Reale Induktivität:

(SIEHE SEITE 231)



$$\underline{Z} = R_{cu} + R_H + R_W + j\omega L$$



Verlustfaktor:

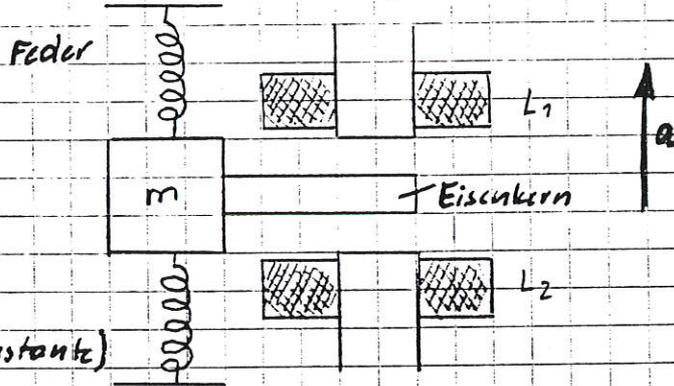
$$\tan \delta = \alpha = \frac{\sum R}{\omega \cdot L}$$

Güte : $Q = \frac{1}{\alpha} = \frac{\omega L}{\sum R}$

SIEHE SEITE 196 a) / c)

Die Annahme, das bei hohen Frequenzen die Güte sehr gut ist, ist nicht korrekt, denn R_H und R_W sind sehr frequenzabhängig!

Anwendung: Beschleunigungsaufnehmer



$$F = m \cdot a$$

$$F = D \cdot \Delta x$$

(D = Federkonstante)

$$m \cdot a = D \cdot \Delta x$$

$$a = \frac{D}{m} \cdot \Delta x$$