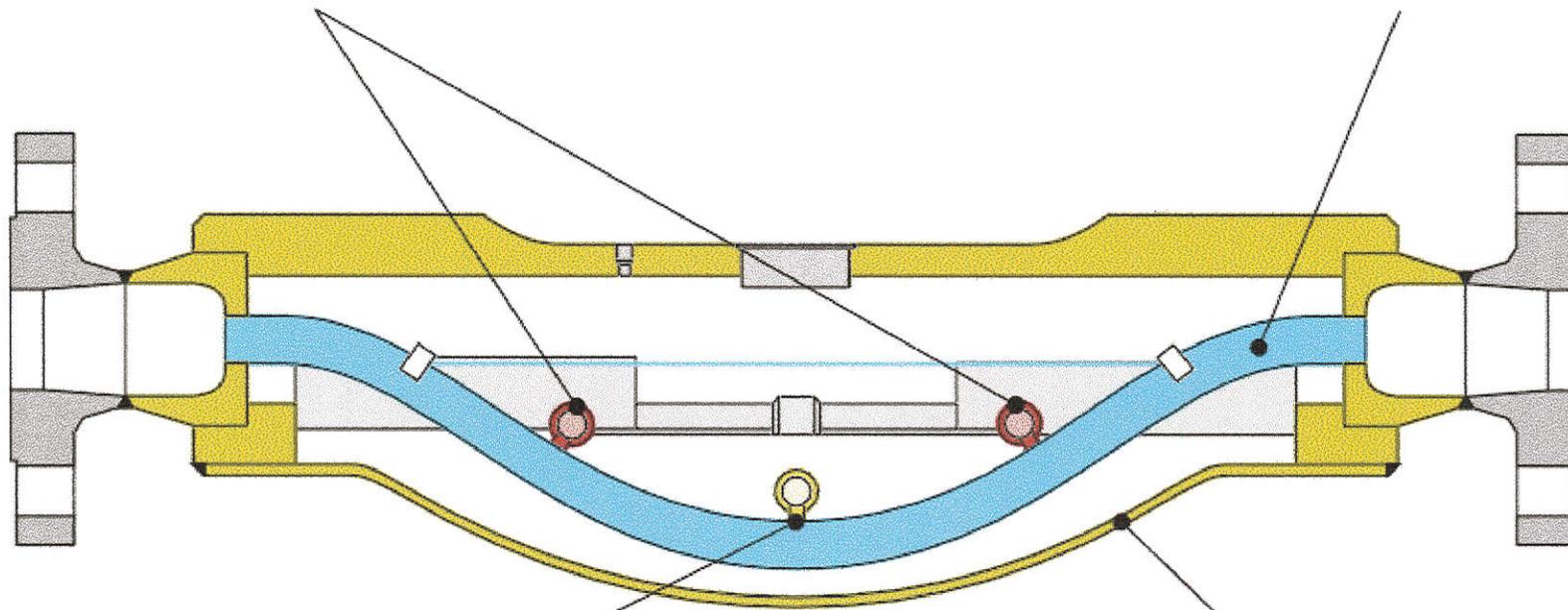


# ► Aufnahme Design

Promass F

Elektrodynamische Sensoren

Meßrohr



Erreger

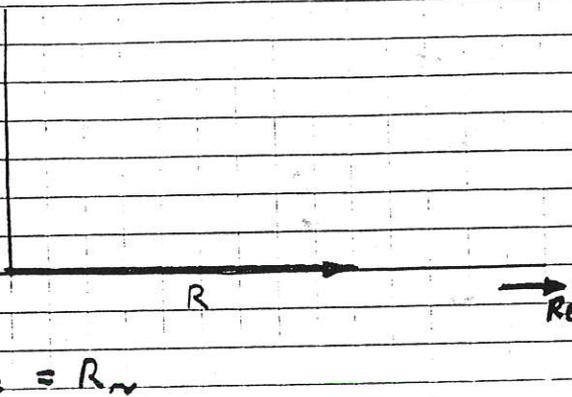
Sicherheitsbehälter

**MESSUNGEN VON IMPEDANZEN  
MESSMETHODEN**

FÜR DEN  
FALL

Messung von Impedanzen

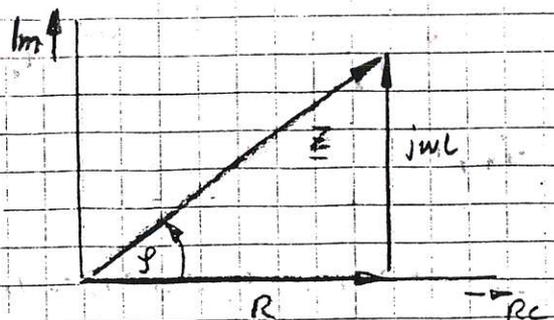
$\Rightarrow \underline{Z} = R \quad \text{Im} \uparrow$



- 1.) R kann zB: überstromrichtige spannungsrichtige Messung bestimmt werden
- ↳ Meßbrücke " "
- ↳ Widerstandsmessgerät "
- ↳ Verstärker-Meßverfahren "

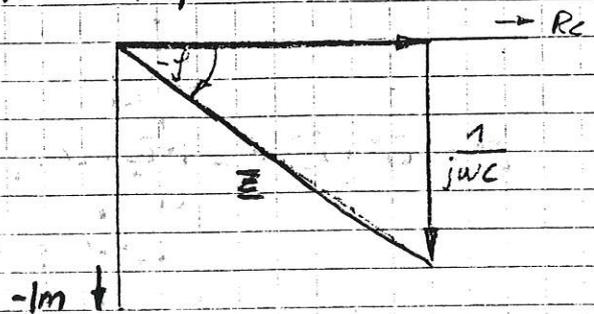
2) Ohm'sche - induktive Impedanzen

$\underline{Z} = R + j\omega L$



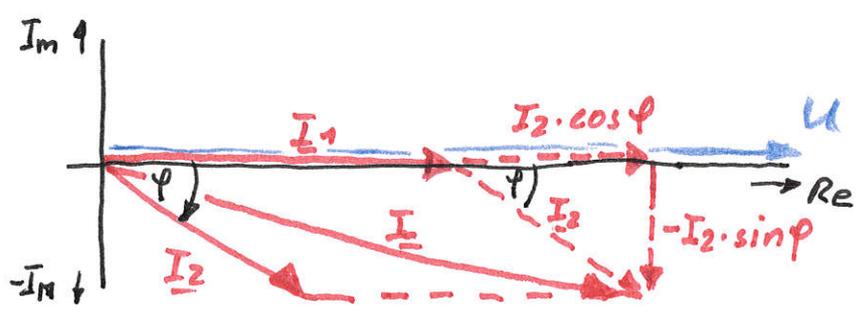
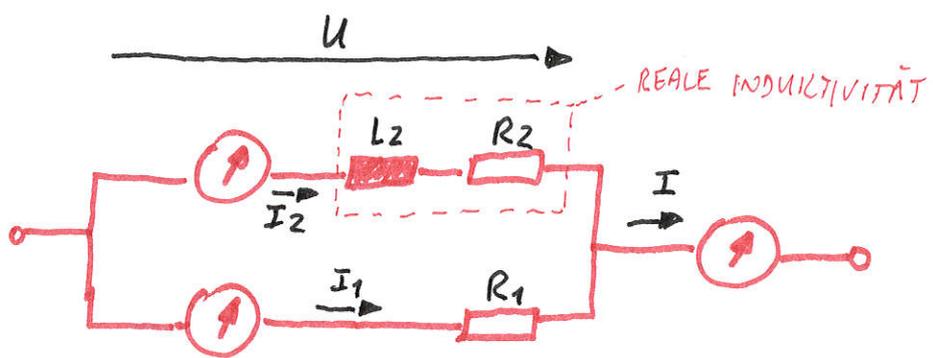
3) Ohm'sche - kapazitive Impedanzen

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



# IMPEDANZBESTIMMUNG NACH DEM VERFAHREN DER 3 STROMMESSER

$I_1 ; I_2 ; I$  = ANGEZEIGTE MESSWERTE  
 $R_1$  = GENAU BEKANNTER WIDERSTAND



$$\underline{I}_2 = \frac{U}{R_2 + j\omega L_2}$$

DER STROM EILT DER SPANNUNG NACH

$$I_1 \approx U$$

LÖSUNGSANSATZ = COSINUS-SATZ:

$$\textcircled{1} \quad I^2 = I_1^2 + I_2^2 + 2 I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi$$

$$\downarrow \quad \downarrow$$

$$I_1 = \frac{U}{R_1}$$

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 + \frac{2U \cdot I_2 \cdot \cos \varphi}{R_1}$$

$$\downarrow \quad \downarrow$$

$$I_2 \cdot \cos \varphi = I_2 \cdot \text{wirk}$$

$$\downarrow$$

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 + \frac{2 \cdot U \cdot I_2 \cdot \text{wirk}}{R_1}$$

$$\downarrow \quad \downarrow$$

$$P_2 = U \cdot I_2 \cdot \text{wirk}$$

$$\downarrow$$

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 + \frac{2 \cdot P_2}{R_1}$$

$$U = R_1 \cdot I_1 \quad \textcircled{2}$$

$$\Downarrow$$

$$Z_2 = \frac{U}{I_2}$$


---


$$X_{L_2} = \sqrt{Z_2^2 - R_2^2} \quad \text{BLINDANTEIL} \quad \textcircled{3}$$


---


$$\frac{Z_2}{R_2} = \frac{1}{\cos \varphi} \Rightarrow \frac{Z_2}{R_2} = \frac{1}{\cos \varphi} \quad \textcircled{4}$$

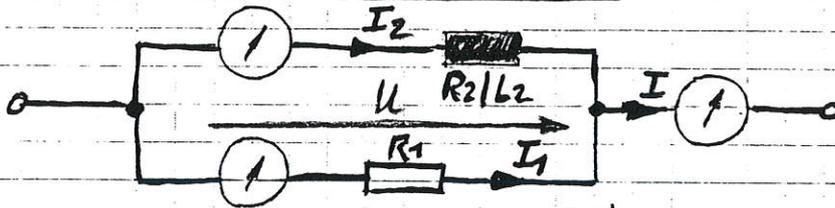
PHASENVERSCHIEBUNG

$$\downarrow$$

$$P_2 = R_1 \frac{I^2 - I_1^2 - I_2^2}{2} \quad \text{OPER} \rightarrow P_2 = I_2^2 \cdot R_2 \Rightarrow R_2 = \frac{P_2}{I_2^2} \quad \text{REALTEIL}$$

MESSWERTE UND  $R_1$  BEKANNT

Vorfahren der 3-Strommessung

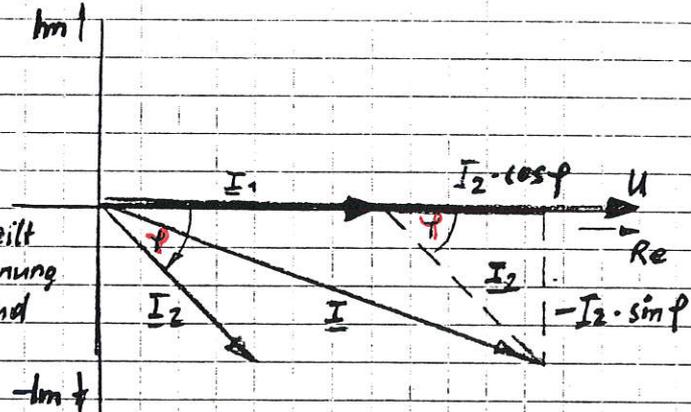


$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2$$

Zeigebild der Ströme:

$$\underline{I}_2 = \frac{U}{R_2 + j\omega L_2}$$

Strom eilt  
der Spannung  
nach und  
 $I_1 \approx U$



(cosinus - satz)

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 + 2 I_1 I_2 \cos \varphi$$

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 + 2 \frac{U I_2 \cos \varphi}{R_1} \quad \left( I_1 = \frac{U}{R_1} \right)$$

$$P_2 = U \cdot I_2 \cos \varphi$$

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 + \frac{2}{R_1} P_2$$

$$\Rightarrow P_2 = R_1 \frac{I^2 - I_1^2 - I_2^2}{2}$$

$I_1, I_2, I$  : angezeigte Größen

$R_1$  : istigene Werte

$$P_2 = I_2^2 \cdot R_2 \Rightarrow R_2 = \frac{P_2}{I_2^2}$$

$$U = R_1 I_1$$

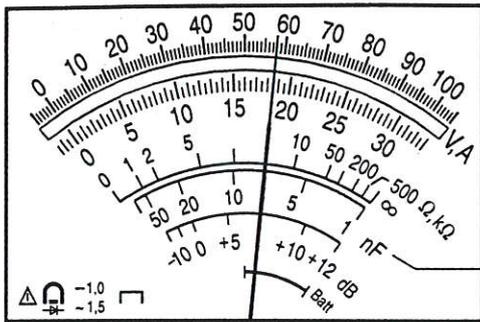
$$\Rightarrow Z_2 = \frac{U}{I_2}$$

$$X_{L_2} = \sqrt{Z_2^2 - R_2^2}$$

$$\text{arc cos } \varphi = \frac{Z_2}{R_2} \Rightarrow \varphi$$

**Induktivitäts- und Kapazitätsmessung**

Beispiel: Analog-Multimeter



Skale für die Kapazitätsmessung  
Meßbereich in Zehnerschritten einstellbar  
z.B.: x 1  
x 10  
x 100

- Mit Analog- und Digital-Multimetern kann meist auch die Kapazität von Kondensatoren gemessen werden

**Direkte Messung mit Multimetern**

Die für den Anwender bequemste Meßmethode ist die direkte Messung der unbekanntenen Größe mit Hilfe eines allgemein verwendeten Multimeters. Die Messung der Kapazität von Kondensatoren ist nach derzeitigem Stand der Technik sowohl mit guten Digital- als auch mit Analogmeßgeräten möglich. Die Meßbereiche liegen bei digitaler Messung zwischen 10 pF und 30 µF, bei analoger Messung zwischen 1 nF und 10 µF. Die Meßgenauigkeit ist geringer als bei der Messung von ohmschen Widerständen.

Die Induktivität von Spulen kann mit handelsüblichen Multimetern nicht direkt gemessen werden.

∇ MESSEN VON L NICHT MÖGLICH

0 MESSEN VON C MIT DIGITAL-MULTI.  
" " C " ANALOG-MULTI.

10 pF - 30 µF  
1 nF - 10 µF

} GENAUIGKEIT  
GERINGER ALS BEI  
R-MESSUNG

**Wechselstrom-Abgleichbrücke**

**Prinzip**

Die Arbeitsweise einer mit der Wechselspannung  $\underline{U}_0$  gespeisten, die vier Scheinwiderstände  $\underline{Z}_1$  bis  $\underline{Z}_4$  enthaltenden Brücke (Bild 4.7) ist ähnlich der im Abschnitt 3.2 besprochenen Brücke mit ohmschen Widerständen. Die Bedingung für den Brückenabgleich, bei dem die Diagonalspannung  $\underline{U}_d$  zu null wird, ist

$$\underline{Z}_2 \underline{Z}_3 = \underline{Z}_1 \underline{Z}_4 \quad \text{Für } \underline{U}_d = 0 \text{ (ALSO IM ABGLEICH)} \quad (4.20)$$

Die Scheinwiderstände können in der Komponenten- oder Polarform dargestellt werden. Für den ersten Fall geht (4.20) über in

$$(R_2 + j X_2)(R_3 + j X_3) = (R_1 + j X_1)(R_4 + j X_4).$$

Um diese Gleichung zu erfüllen, müssen auf jeder Seite Real- und Imaginärteil gleich sein:

$$R_2 R_3 - X_2 X_3 = R_1 R_4 - X_1 X_4 \quad (4.21)$$

$$X_2 R_3 + R_2 X_3 = X_1 R_4 + R_1 X_4. \quad (4.22)$$

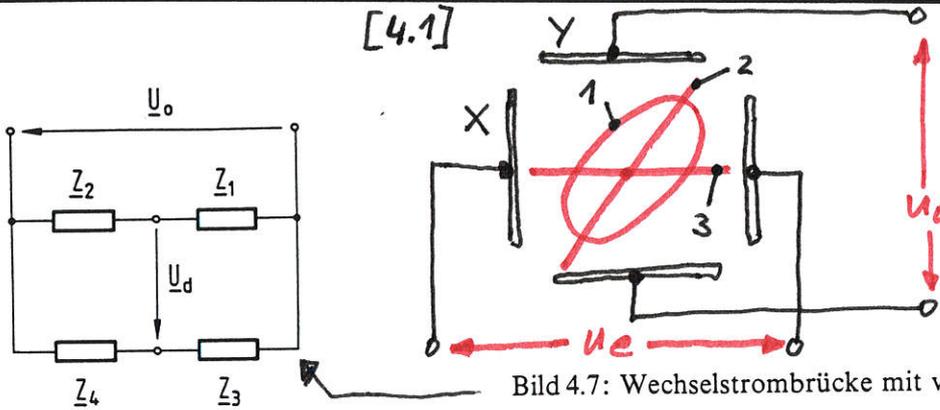


Bild 4.7: Wechselstrombrücke mit vier Scheinwiderständen

1. UNABGLEICHTENER ZUSTAND
2. 1. ABGLEICH BIS  $\varphi = 0$
3. ABGLEICH DER BRÜCKE  $U_d = 0$

DIE LÄNGE DER GERADEN IST EIN MASS FÜR DIE SPITZE-SPITZE-SPANNUNG.

In Polarform lautet die Abgleichbedingung (4.20)

$$Z_2 Z_3 e^{j(\varphi_2 + \varphi_3)} = Z_1 Z_4 e^{j(\varphi_1 + \varphi_4)}$$

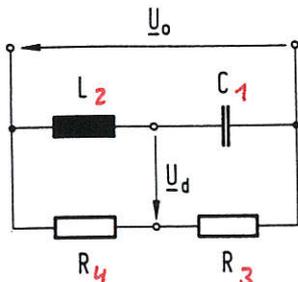
Dafür müssen das Produkt der Beträge und die Summe der Winkel gleich sein:

$$Z_2 Z_3 = Z_1 Z_4 \quad \left. \begin{array}{l} \text{FÜR DEN ABGLEICH MÜSSEN} \\ \text{BEIDE BEDINGUNGEN ERFÜLLT} \\ \text{SEIN} \end{array} \right\} \quad (4.23)$$

$$\varphi_2 + \varphi_3 = \varphi_1 + \varphi_4 \quad (4.24)$$

Bei dem Abgleich einer Wechselstrombrücke sind also zwei Bedingungen zu erfüllen. Die Brücke braucht dementsprechend mindestens zwei unabhängige Eingriffsmöglichkeiten, zwei einstellbare Komponenten. Diese sind in der Regel abwechselnd zu betätigen. Der Abgleich wird oft anhand eines Oszilloskops als Nullinstrument verfolgt [4.1].

Nicht jede mögliche Zusammenschaltung von insgesamt vier Widerständen, Spulen oder Kondensatoren führt zu einer abgleichbaren Brücke. Eine Kontrolle läßt sich schnell anhand der Phasenbeziehungen vornehmen. So kann z.B. die Schaltung Bild 4.8 nicht abgestimmt werden. Die Winkel  $\varphi_1$  und  $\varphi_2$  haben ein entgegengesetztes Vorzeichen, die Winkel  $\varphi_3$  und  $\varphi_4$  sind null, so daß die Gl. (4.24) nicht zu erfüllen ist.



$$\left. \begin{array}{l} \varphi_3 \text{ und } \varphi_4 = 0 \\ -\varphi_1 \\ +\varphi_2 \end{array} \right\} \varphi_2 + \varphi_3 = \varphi_1 + \varphi_4 \quad \text{IST NICHT ERFÜLLT}$$

Bild 4.8: Beispiel einer nicht abgleichbaren Brückenschaltung

**Kapazitätsmeßbrücke nach Wien**

Mit der in Bild 4.9 dargestellten Brücke können verlustbehaftete Kondensatoren vermessen werden. Gesucht sind z.B. der Blindwiderstand  $C_2$  und der Wirkwiderstand  $R_2$  eines Kondensators, der in seiner Parallelersatzschaltung dargestellt ist. Einstellbar sind die Kapazität  $C_1$  und der (oft auch in Reihe zu  $C_1$  angeordnete) Widerstand  $R_1$ . Die Brücke ist abgeglichen für

$\tan \delta = \frac{1}{R_2 \cdot \omega \cdot C_2}$  VERLUSTFAKTOR

IMPEDANZ  
DER KAPA-  
ZITÄT

$Z = R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}$

VERLUSTBEH.  
KONDENSATOR

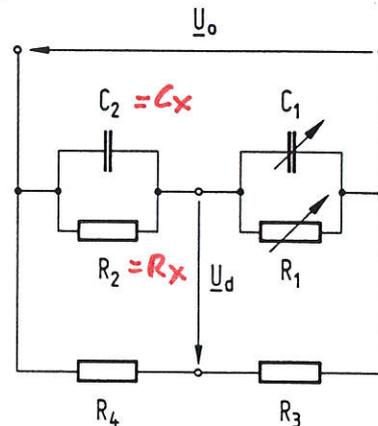


Bild 4.9: Kapazitäts-Meßbrücke nach Wien

$\frac{R \cdot R}{R+R} = RE$

$$\frac{\frac{R_2}{j\omega C_2}}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}} R_3 = \frac{\frac{R_1}{j\omega C_1}}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} R_4$$

$$\left(\frac{R_3 R_2}{j\omega C_2}\right) \left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}\right) = \left(\frac{R_4 \cdot R_1}{j\omega C_1}\right) \left(R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}\right)$$

$$\frac{R_3 \cdot R_2 \cdot R_1}{j\omega C_2} + \frac{R_2 \cdot R_3}{j\omega C_2 \cdot j\omega C_1} = \frac{R_4 \cdot R_1 \cdot R_4}{j\omega C_1} + \frac{R_1 \cdot R_4}{j\omega C_1 - j\omega C_2}$$

$$\frac{R_2 R_3 + j\omega R_1 R_2 R_3 C_1}{j\omega C_2 \cdot j\omega C_1} = \frac{R_1 R_4 + j\omega R_1 R_2 R_4 C_2}{j\omega C_2 \cdot j\omega C_1}$$

$$R_2 R_3 + j\omega R_1 R_2 R_3 C_1 = R_1 R_4 + j\omega R_1 R_2 R_4 C_2$$

Die Gleichsetzung des Realteils liefert die Bedingung

$$R_2 = \frac{R_4}{R_3} R_1, \tag{4.25}$$

die durch eine Verstellung des Widerstands  $R_1$  zu erfüllen ist. Der aus dem Imaginärteil entstehenden Forderung

$$C_2 = \frac{R_3}{R_4} C_1 \tag{4.26}$$

kann durch eine Änderung der Kapazität  $C_1$  entsprochen werden.

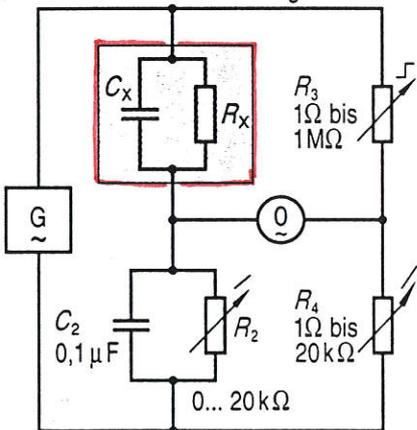
Der Verlustfaktor  $\tan \delta$  der beiden Kondensatoren ist gleich und beträgt

$$\tan \delta_1 = \frac{1}{\omega C_1 R_1} = \frac{1}{\omega C_2 R_2} = \tan \delta_2. \quad (4.27)$$

Wird eine aus zwei Widerstandsaufnehmern und zwei konstanten ohmschen Widerständen aufgebaute Brücke an eine Wechselspannung gelegt (Trägerfrequenzmeßbrücke), so sind bei den Widerstandsaufnehmern in der Regel Erdungs- und Leitungskapazitäten vorhanden. Die Widerstandsaufnehmer ( $R_1, R_2$ ) haben also eine Blindkomponente ( $C_1, C_2$ ) und können durch eine Parallelersatzschaltung beschrieben werden. Dieses Vorgehen führt zu der in Bild 4.9 dargestellten Brücke. Daraus ist ersichtlich, daß die Trägerfrequenzmeßbrücke auch bei ohmschen Widerständen hinsichtlich des Wirk- und des Blindwiderstandes abzugleichen ist.

**Wien-Brücke, Beispiel**

Das Meßobjekt wird als Parallelschaltung einer Kapazität mit einem Verlustwiderstand aufgefaßt



**Abgleichbedingungen**

Realteil

$$R_x = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4} \quad 2.$$

Imaginärteil

$$C_x = C_2 \cdot \frac{R_4}{R_3} \quad 1.$$

Daraus folgt für den Verlustfaktor

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega \cdot C_2 \cdot R_2}$$

- Mit der Wien-Brücke kann die Kapazität und der Verlustfaktor ( $\tan \delta$ ) eines Kondensators bestimmt werden

**Wechselstrommeßbrücken**

Zur genauen Bestimmung von Kapazitäten und Induktivitäten werden üblicherweise Meßbrücken eingesetzt.

**Wien-Meßbrücke**

Zur Kapazitätsmessung eignet sich insbesondere die nach dem deutschen Physiker Wilhelm Wien (1864 bis 1928) benannte Wien-Meßbrücke. Diese Brückenschaltung ermöglicht die Messung der Kapazität und des Verlustwiderstandes von Kondensatoren. Bei der Messung wird üblicherweise der zu bestimmende Kondensator als Parallelschaltung einer idealen Kapazität mit einem Verlustwiderstand aufgefaßt.

Der Brückenabgleich erfolgt in 2 Stufen:

1. Zur Bestimmung von  $C_x$  (Imaginärteilabgleich) wird  $R_3$  stufenweise (Grobabgleich) und anschließend  $R_4$  stufenlos verstellt, bis der Nullindikator ein Minimum anzeigt.
2. Zur Bestimmung von  $R_x$  (Realteilabgleich) wird  $R_2$  stufenlos bis zum Nullabgleich verstellt.  $R_3$  und  $R_4$  dürfen dabei nicht mehr verändert werden.

**Induktivitätsmeßbrücke nach Maxwell**

Verlustbehaftete Induktivitäten können mit der Brücke nach Maxwell gemessen werden (Bild 4.10). In unserem Beispiel seien  $L_2$  und  $R_2$  die gesuchten Größen.  $L_1$  ist eine bekannte Vergleichsinduktivität und  $R_1$  und  $R_3$  sind bekannte, einstellbare Widerstände. Die Brücke ist abgeglichen für

$$(R_2 + j\omega L_2) R_3 = (R_1 + j\omega L_1) R_4.$$

Daraus folgen für den Real- und Imaginärteil die Bedingungen

$$R_2 = \frac{R_4}{R_3} R_1; \quad L_2 = \frac{L_1 R_4}{R_3}$$

denen durch die Verstellung der Widerstände  $R_1$  und  $R_3$  zu genügen ist.

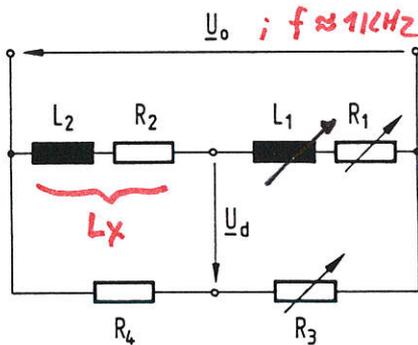


Bild 4.10: Induktivitäts-Meßbrücke nach Maxwell

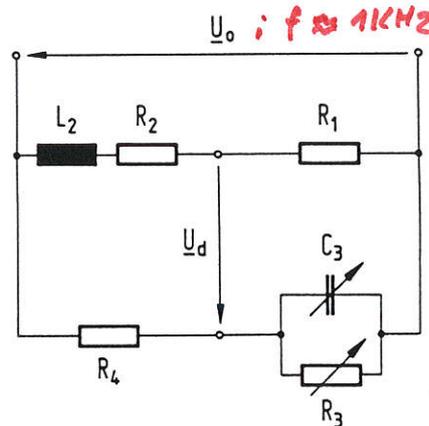


Bild 4.11: Induktivitäts-Meßbrücke nach Maxwell-Wien

$$Z = R + j\omega L$$

IMPEDANZ DER INDUKTIVITÄT

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

VERLUSTFAKTOR

DIE HERSTELLUNG EINER REFERENZINDUKTIVITÄT IST SCHWIERIGER ALS DIE EINES KONDENSATORS =>

STATT MAXWELL-BRÜCKE => MAXWELL-WIEN-BRÜCKE

**Induktivitätsmeßbrücke nach Maxwell-Wien**

Die in Bild 4.11 gezeigte Brücke ist eine Kombination der beiden zuletzt erläuterten Schaltungen. Sie ermöglicht die Bestimmung einer unbekannt, verlustbehafteten Induktivität (in unserem Beispiel  $L_2$  und  $R_2$ ) mit Hilfe eines Kapazitätsnormals ( $C_3, R_3$ ), das leichter als eine Referenzinduktivität herzustellen ist. Aus der Abgleichbedingung

$$(R_2 + j\omega L_2) \left( \frac{\frac{R_3}{j\omega C_3}}{R_3 + \frac{1}{j\omega C_3}} \right) = R_1 R_4$$

folgen für den Real- und Imaginärteil die beiden Gleichungen

$$L_2 = R_1 R_4 C_3;$$

$$R_2 = \frac{R_1 R_4}{R_3}$$

die durch die einstellbare Kapazität  $C_3$  und den einstellbaren Widerstand  $R_3$  zu erfüllen sind.

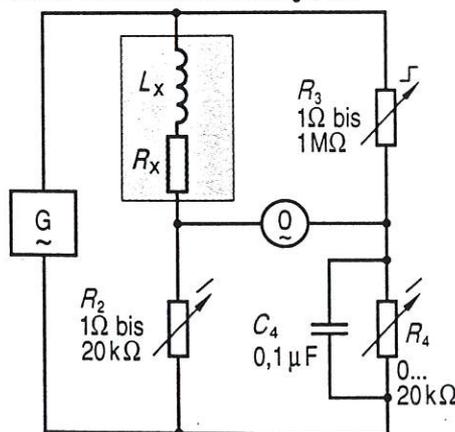
PARALLSCHER =>  
BEISPIEL S.231

WIEN !?  
↓

WIEN !?  
↓

**Maxwell-Brücke, Beispiel**

Das Meßobjekt wird als Reihenschaltung einer Induktivität mit einem Verlustwiderstand aufgefaßt



Abgleichbedingungen

Realteil

$$R_x = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}$$

Imaginärteil

$$L_x = C_4 \cdot R_2 \cdot R_3$$

Daraus folgt für den Verlustfaktor

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega \cdot C_4 \cdot R_4}$$

- Mit der Maxwell-Brücke kann die Induktivität und der Verlustfaktor ( $\tan \delta$ ) einer Spule bestimmt werden

**Maxwell-Meßbrücke**

Zur Induktivitätsmessung eignet sich insbesondere die nach dem englischen Physiker J. C. Maxwell (1831 bis 1879) benannte Maxwell-Meßbrücke. Diese Schaltung ermöglicht die Messung der Induktivität und des Verlustwiderstandes bzw. der Güte von Spulen. Die Spule wird dabei normalerweise als Reihenschaltung einer idealen Induktivität mit einem Verlustwiderstand aufgefaßt. Als Vergleichsnormale dient auch hier ein Kondensator. Der Abgleich erfolgt wie bei der Wien-Brücke. Betriebsmeßbrücken können normalerweise von Kapazitätsmessung auf Induktivitätsmessung umgeschaltet werden (Wien-Maxwell-Meßbrücke).

Zur Speisung von Wechselstrommeßbrücken eignen sich sinusförmige Spannungen im NF-Bereich, z. B. 1 kHz. Als Nullindikator werden im Tonfrequenzbereich hauptsächlich Kopfhörer eingesetzt; das menschliche Ohr wirkt dann als sehr empfindlicher Indikator. Auch Zeigerinstrumente und Oszilloskope sind verwendbar.

**Phasenschieberbrücke**

Neben den hier vorgestellten Brücken gibt es noch viele andere, so daß in Abhängigkeit von dem Wertebereich der zu messenden Größe die jeweils am besten geeignete Schaltung ausgewählt werden kann [4.1]. Des weiteren gibt es Brücken, die nur für eine bestimmte Frequenz (früher oft zur Frequenzmessung benutzt) oder überhaupt nicht abgleichbar sind. Als Beispiel für die letzte Gruppe wird die Phasenschieberbrücke Bild 4.12 besprochen, die aus einer Kapazität C, einem verstellbaren Widerstand R und zwei festen Widerständen  $R_0$  besteht.

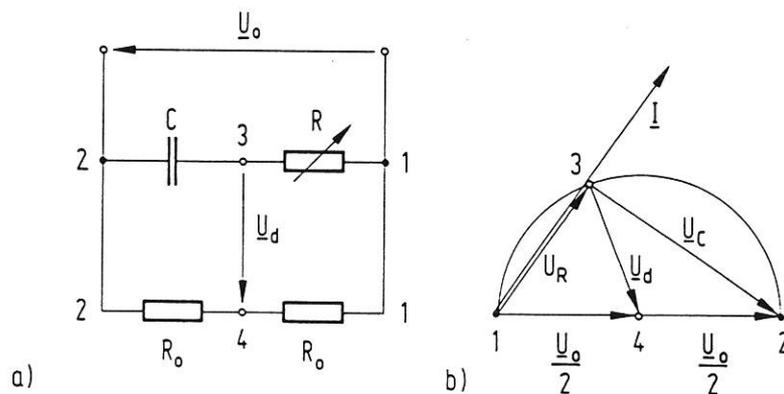


Bild 4.12: Phasenschieberbrücke mit Schaltung (a) und Zeigerdiagramm (b)

Die Brücke wird mit der Wechselspannung  $\underline{U}_0$  versorgt, die an dem ( $R_0:R_0$ )-Spannungsteiler im Verhältnis 1:1 geteilt wird. Zwischen den Punkten 1-4 und 4-2 liegt jeweils die Spannung  $\underline{U}_0/2$ . Im Brückenzweig mit dem Kondensator führt die angelegte Spannung zu einem der Spannung voreilenden Strom  $\underline{I}$ . Die am einstellbaren Widerstand R abfallende Spannung  $\underline{U}_R$  hat die Richtung dieses Stromes (Punkte 1-3). Dagegen ist die Spannung  $\underline{U}_C$  am Kondensator gegenüber dem Strom um  $90^\circ$  phasenverschoben (Punkte 3-2) und bildet mit  $\underline{U}_R$  immer einen rechten Winkel. Wird der Widerstand R geändert, so ändert sich die Größe der Spannungen  $\underline{U}_R$  und  $\underline{U}_C$ , ihr Phasenwinkel bleibt aber konstant und der Anschlußpunkt 3 verschiebt sich längs eines über  $\underline{U}_0$  geschlagenen Halbkreises. Damit liegt in der Brückendiagonalen (Punkt 3-4) immer die Spannung  $\underline{U}_0/2$ . Der Phasenwinkel zwischen  $\underline{U}_d$  und  $\underline{U}_0$  ist am Widerstand R einstellbar und die Brücke wird benutzt, um die Phase einer Spannung verändern zu können.

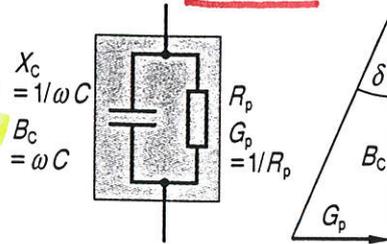
**Verlustbehaftete Bauteile**

Kondensatoren und Spulen nehmen zusätzlich zu ihrer kapazitiven bzw. induktiven Blindleistung immer auch Wirkleistung (Verlustleistung) auf. Bei Kondensatoren beruht die Verlustleistung vor allem auf der ständigen Umpolarisierung des Dielektrikums, bei Spulen sind es hauptsächlich Kupferverluste und Ummagnetisierungsverluste im Eisenkern. Die verlustbehafteten Bauteile können durch eine Ersatzschaltung aus dem idealen Bauteil und einem Verlustwiderstand dargestellt werden. Als Ersatzschaltung kann sowohl eine Reihen- als auch eine Parallelschaltung dienen. Aus praktischen Gründen wird beim Kondensator eine Parallelschaltung aus C und R, bei der Spule eine Reihenschaltung aus L und R bevorzugt. Für die Umrechnung äquivalenter Schaltungen siehe Kap. 5.11.

Das Verhältnis von Wirk- zu Blindwiderstand wird durch den Verlustfaktor bzw. die Güte gekennzeichnet.

**Ersatzschaltungen**

Verlustbehafteter Kondensator



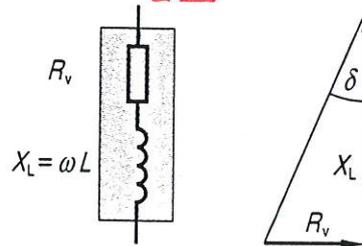
Verlustfaktor  $d = \tan \delta$

$$d = \frac{G_p}{B_c} = \frac{1}{R_p \omega C}$$

Gütefaktor  $Q = 1/d$

$$Q = \frac{R_p}{X_c} = R_p \omega C$$

Verlustbehaftete Spule



Verlustfaktor  $d = \tan \delta$

$$d = \frac{R_v}{X_l} = \frac{R_v}{\omega L}$$

Gütefaktor  $Q = 1/d$

$$Q = \frac{X_l}{R_v} = \frac{\omega L}{R_v}$$

SIEHE S.196

=> S.222

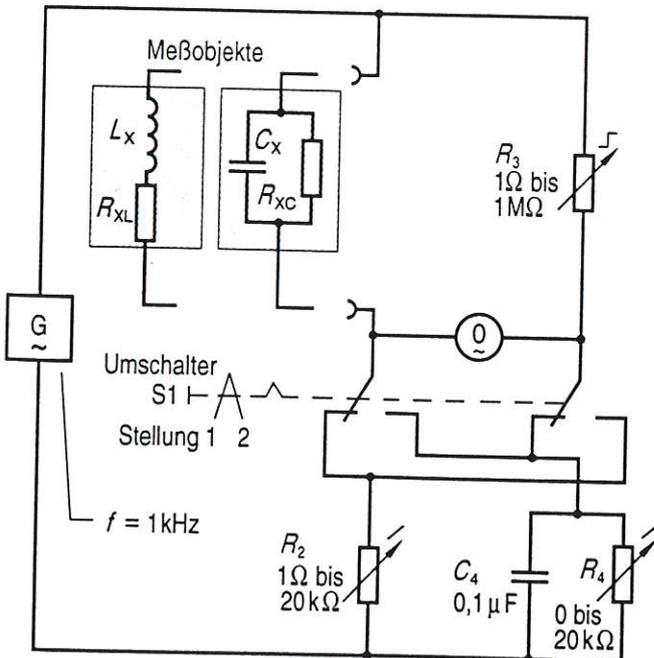
**Wechselstrom-Meßbrücken**

In der Praxis hat sich die Kombination von Wien- und Maxwell-Meßbrücke (Wien-Maxwell-Brücke) als universelles Meßgerät zur Bestimmung von Kondensator- und Spulenwerten durchgesetzt. Der Abgleich ist frequenzunabhängig, falls die Meßobjekte selbst frequenzunabhängig sind. Nachteilig ist allerdings, daß ein zweifacher Abgleich, nämlich ein Betrags- und ein

Phasenabgleich erforderlich ist. Dies macht die Bedienung der Brücke kompliziert und zeitaufwendig. Zur Vereinfachung wurden elektronische Schaltungen entwickelt, die nur den Abgleich des Kapazitäts- bzw. Induktivitätswertes erfordern, der zweite Abgleich erfolgt automatisch durch das Meßgerät. Derartige Brücken heißen halbautomatische Meßbrücken.

**Maxwell-Wien-Brücke**

Gegeben ist folgende umschaltbare Brückenschaltung:



SCHALTERSTELL. 1 = MAXWELL-BRÜCKE  
SCHALTERSTELL. 2 = WIEN-BRÜCKE

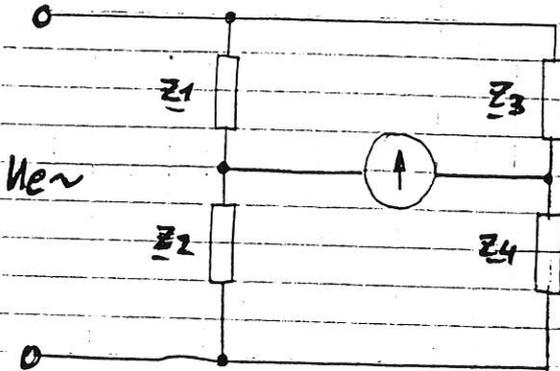
ABGLEICH FÜR WIEN-BRÜCKE

Cx | 1. R3 GROBVERSTELL.  
2. R2 FEINABGLEICH BIS 0  
EIN MINIMUM ANZEIGT

RxC | 1. R4 VERSTELLEN BIS 0  
NULL ANZEIGT

R3 UND R2 DÜRFEN NICHT MEHR VERSTELLT WERDEN !

LCR - Messbrücken (nach Maxwell)



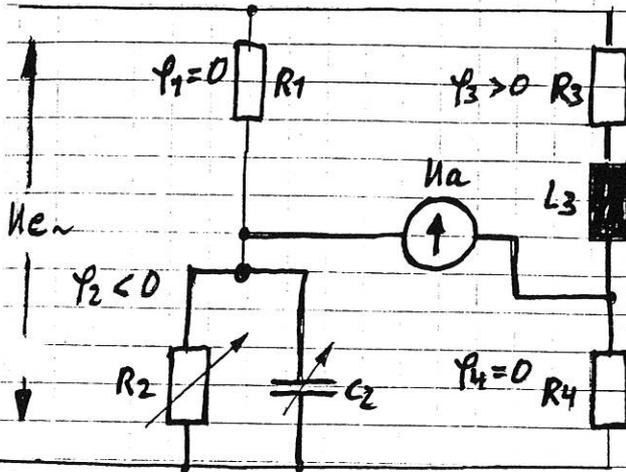
$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4}$$

allgemeine Abgleichbedingung (Sie beinhaltet den Abgleich für die Beträge und Winkel)

Beträge:  $\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4}$

Winkel:  $\varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_3 - \varphi_4$

Beispiel:



Verlustschaltete Induktivität gesucht

$$\frac{R_1}{\frac{1}{R_2} + j\omega C_2} = \frac{R_3 + j\omega \cdot L_3}{R_4}$$

$$R_1 \cdot R_4 \left( \frac{1}{R_2} + j\omega C_2 \right) = R_3 + j\omega \cdot L_3$$

Realteile und Imaginärteile separat betrachten.

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_3 - \varphi_4$$

$$\varphi_1 = 0 ; \varphi_4 = 0$$

$$-\varphi_2 = \varphi_3$$

$$|\varphi_2| = |\varphi_3|$$

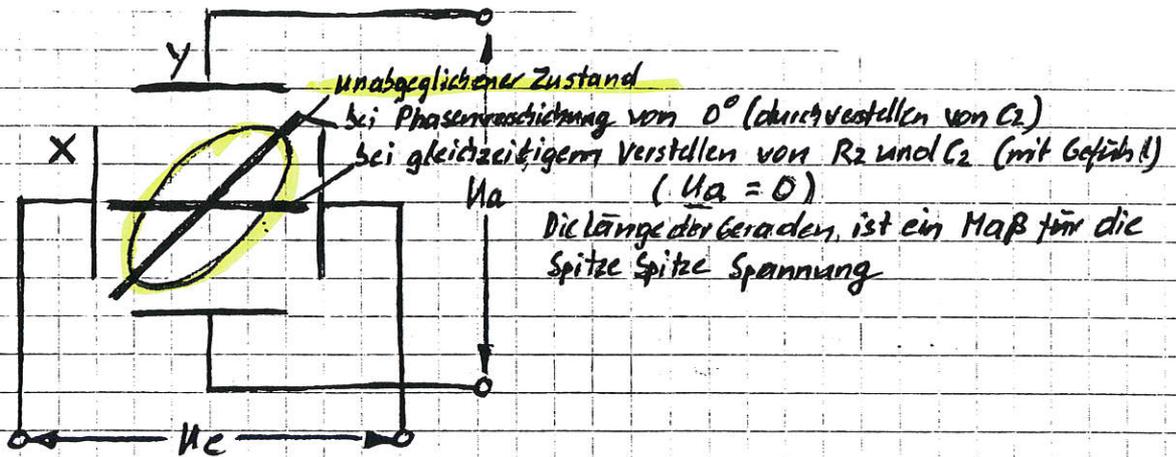
$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_4}{R_2}$$

$$L_3 = R_1 \cdot R_4 \cdot C_2$$

$$\tan \delta = \frac{R_3}{\omega L_3}$$

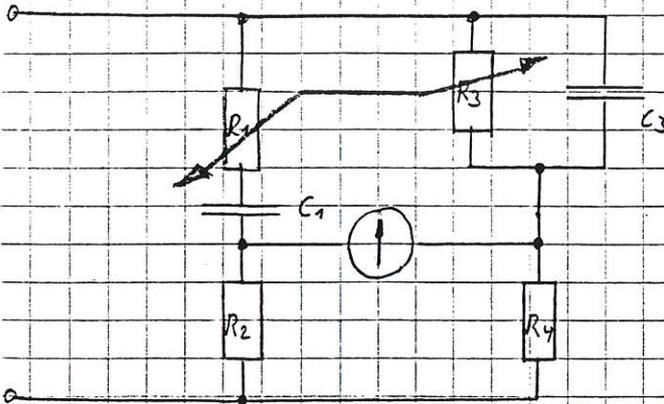
$$\tan \delta = \frac{R_1 \cdot R_4}{\omega \cdot R_2 \cdot R_1 \cdot R_4 \cdot C_2}$$

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega \cdot C_2 \cdot R_2}$$



Frequenzmeßbrücke nach Wien

SIEME S.277



Zu erzielen ist  $I_1 = I_3$

$$\frac{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}}{R_2} = \frac{1}{\sqrt{R_3 + j\omega C_3}} \cdot \frac{1}{R_4}$$

$(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}) (\frac{1}{R_3} + j\omega C_3) = \frac{R_2}{R_4}$  Damit die Gleichung erfüllt ist müssen sich die komplexen Anteile aufheben

$$\frac{R_1}{R_3} + \frac{C_3}{C_1} + \frac{1}{j\omega C_1 \cdot R_3} + j\omega R_1 \cdot C_3 = \frac{R_2}{R_4}$$

für eine bestimmte Frequenz kompensieren sie sich

$$\frac{1}{j\omega C_1 \cdot R_3} = j\omega R_1 \cdot C_3 \Rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{R_1 \cdot R_3 \cdot C_1 \cdot C_3}}$$

Daraus folgt für die Auslegung der Brücke

$C = C_1 = C_3$  z.B. fest (nicht einstellbar)

$R = R_1 = R_3$  Tandem - Dekade

$$\omega = \frac{1}{RC} \Rightarrow f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$