

LCR-Messbrücke

An dieser Stelle wurde kürzlich eine alte LCR-Messbrücke vorgestellt. Ich habe den Aufbau und die Funktion des Geräts näher untersucht und möchte die Ergebnisse hier beschreiben.

Verwiesen sei auch auf einen schon vorhandenen Beitrag zu diesem Thema:

www.elektronik-labor.de/HF/LCR.html

Widerstandsmessung (R-Messung)

Widerstandsmessungen kann man einfach und genau mit jedem Digitalmultimeter durchführen. In diesem Messbereich lässt sich aber das Prinzip einer Messbrücke besonders verständlich erläutern.

In Bild 1 wurden die wichtigen Teile der Schaltung des Geräts übersichtlicher herausgezeichnet.

Eine Messbrücke besteht aus zwei Zweigen, die parallel geschaltet sind. Jeder Zweig ist ein Spannungsteiler. Wenn die Widerstandsverhältnisse in beiden Zweigen gleich sind, wird die Querspannung null, das eingezeichnete Voltmeter zeigt also null. Der verstellbare Widerstand R3 wird also so eingestellt, dass das Voltmeter null anzeigt, die Brücke ist damit „abgeglichen“. An einer angebrachten Skala kann man die Stellung des Widerstands ablesen. Man kann die Beschriftung so machen, dass der Wert des zu messenden Widerstands Rx direkt abgelesen werden kann, gegebenenfalls mit einem Messbereichsfaktor multipliziert.

Um R3 möglichst genau zu kennen, wird in dem Industriegerät eine schaltbare Widerstandskette (Dial) verwendet. Es können damit drei signifikante Ziffern ermittelt werden, eine vierte ist abschätzbar.

Wer als Bastler den Aufwand scheut, kann auch ein normales Potentiometer verwenden und den Widerstandswert mit einem Multimeter ausmessen. Dieser Tipp gilt natürlich besonders für die folgenden L- und C-Messungen.

Für die R-Messung kann die Brücke auch mit Gleichspannung gespeist werden. Für die folgenden Messungen ist aber Wechselspannung nötig. In diesem Fall muss das Instrument Wechselspannungen anzeigen können. In dem Industriegerät wird die Querspannung mit einem Wechselspannungsverstärker verstärkt, ehe sie gleichgerichtet und dem Drehspulinstrument zugeführt wird. Es ist selbstverständlich auch möglich, hier ein Multimeter mit einem ausreichend kleinen Wechselspannungs- oder Strommessbereich zu verwenden, um möglichst genau auf null abgleichen zu können.

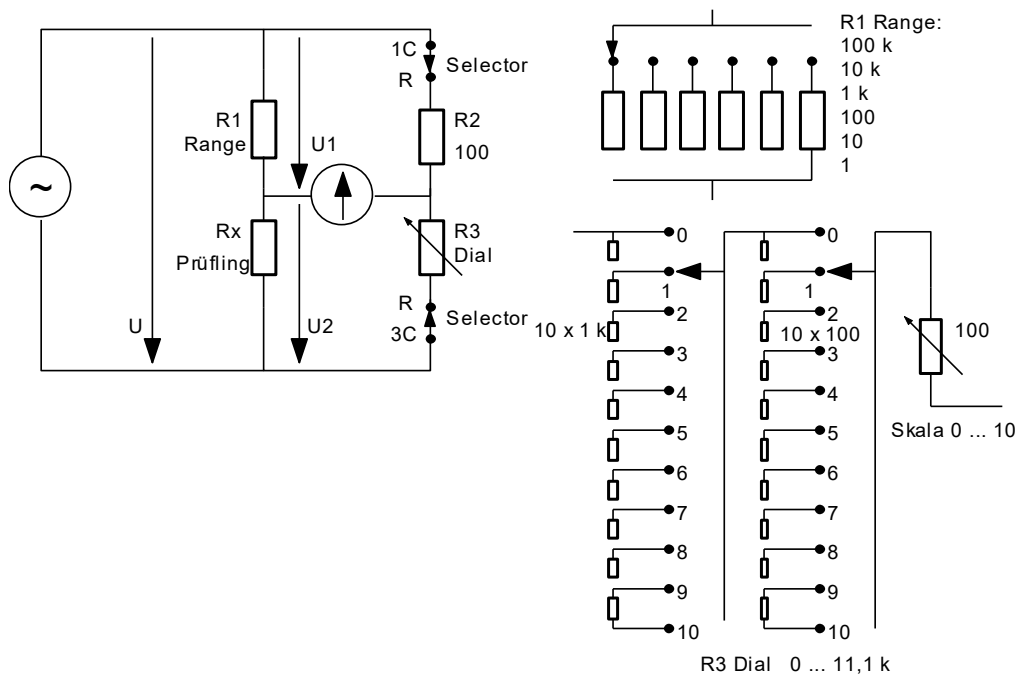


Bild 1: AC Bridge BR-8S. Prinzipschaltplan für Widerstandsmessung. Die Messbereiche (Range) sind im Foto zu erkennen.

Berechnung:

Die beiden Brückenweige liegen an der gemeinsamen Spannung U . Diese Spannung wird in die Teilspannungen U_1 und U_2 aufgeteilt. Bei abgeglicherer Brücke gilt das für beide Zweige. Es ist somit:

$$U_1/U_2 = R_1/R_x = R_2/R_3 \text{ oder } R_x = R_1 \cdot R_3/R_2$$

Weil R_1 und R_2 Konstanten sind, ist R_x proportional zu R_3 .

Kapazitätsmessung (C-Messung)

Zur Kapazitätsmessung befindet sich in beiden Zweigen eine Reihenschaltung eines Widerstands und eines Kondensators, man nennt dies auch ein RC-Glied. Es ist leicht einzusehen, dass die Brücke abgeglichen ist, wenn in beiden Zweigen die Widerstände und die Kapazitäten gleich sind. Die Brücke ist aber auch abgeglichen, wenn z. B. C_1 doppelt so groß wie C_x ist und wenn die Widerstände im rechten Zweig dann halb so groß sind. Dann fließt nämlich im rechten Zweig der doppelte Strom und der Spannungsabfall an R_2 ist wieder gleich dem an R_1 und der Spannungsabfall an R_3 ist gleich dem an R_x .

Es ist also: $C_x / C_1 = R_2 / R_1$ oder $C_x = R_2 \cdot C_1 / R_1$

und $R_x / R_3 = R_1 / R_2$ oder $R_x = R_1 \cdot R_3 / R_2$

Weil R_2 und R_3 variabel sind, muss man beide Widerstände bedienen, um die Brücke abzugleichen und R_x kann auch nicht direkt an einer Skala bei R_3 abgelesen werden.

Was hat es nun mit R_x auf sich?

Reale Kondensatoren sind keine reinen Kapazitäten, denn durch den ständigen Polaritätswechsel entsteht im Dielektrikum Wärme, also eine Wirkleistung. Im Ersatzschaltbild wird das durch einen Wirkwiderstand dargestellt. Der Kondensator verhält sich also wie ein RC-Glied, die Frequenz spielt aber beim Abgleich der Brücke keine Rolle. Die Betriebsspannung muss somit auch keine reine Sinusspannung sein, weil die höherfrequenten Oberwellen die gleiche Wirkung wie die Grundwelle haben. Die Angaben zu den Kondensatoren beziehen sich aber üblicherweise auf 1 kHz.

Der Vergleichskondensator C_1 ist natürlich auch keine reine Kapazität. Sein Verlustwiderstand muss also zu R_3 addiert werden. Wenn der Vergleichskondensator eine ähnliche Qualität wie C_x hat, erhält man $R_3 = 0$ und $R_x = 0$, was aber nicht stimmt.

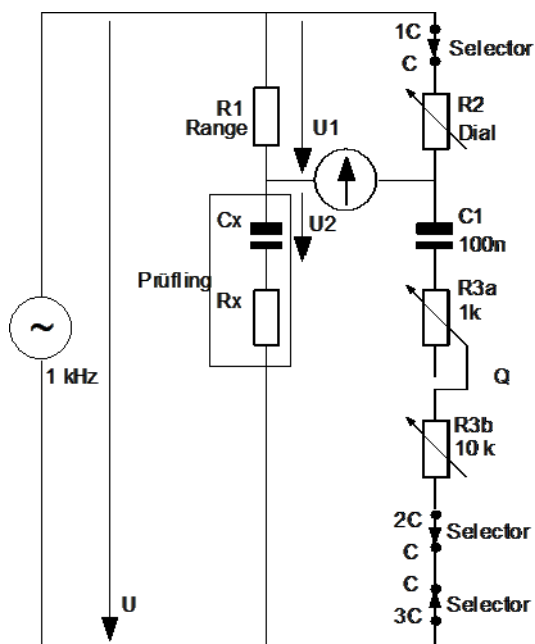


Bild2: AC Bridge BR-8S. Prinzipschaltplan für Kapazitätsmessung

Der Verlustwinkel bei Kondensatoren

In Kondensatoren entstehen Verluste im Dielektrikum und im Ohm'schen Widerstand der Kondensatorfolien. Im Ersatzschaltbild findet man deshalb neben der Kapazität C auch einen Wirkwiderstand. Dieser wird wahlweise in Reihe oder parallel zu C gezeichnet.

Bei der Reihenschaltung fließt in beiden Bauteilen derselbe Strom. Die Spannung an R_r ist in Phase zum Strom. Die Spannung an C eilt dem Strom um 90° nach. Die geometrische Summe der beiden Spannungen ist die Gesamtspannung. Diese eilt – frequenzabhängig – dem Strom um den Phasenwinkel ϕ nach. An Stelle der Zeiger für die Spannungen kann man auch die Widerstände zeichnen. Der kapazitive Widerstand ist $X_c = 1 / (\omega C)$.

ω ist die „Kreisfrequenz“. Es ist $\omega = 2\pi * f$. Dabei ist f die Frequenz in Hertz (Hz).

Wie man in dem Zeigerbild sieht, ist der Verlustwinkel: $\tan \delta = R_r * \omega C$.

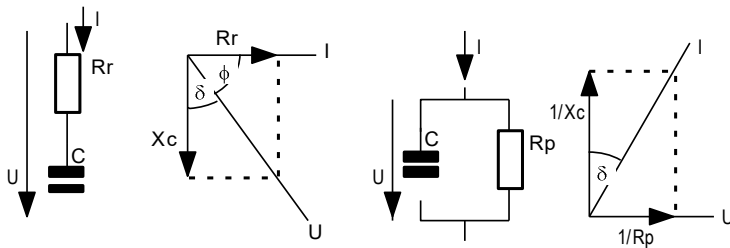
R_r ist proportional zu $\tan \delta$ und man kann somit an der Skala von R_3 den Wert von $\tan \delta$ anschreiben.

Mit den oben gefundenen Gleichungen für C_x und R_x erhält man:

$$\tan \delta = \omega C_1 * R_3 \quad (R_r \equiv R_x, C \equiv C_x)$$

Im Falle der Parallelschaltung liegen beide Bauteile an derselben Spannung und die Ströme sind phasenverschoben. Die Ströme durch C und R_p addieren sich geometrisch zum Gesamtstrom. An Stelle der Ströme kann man auch die Leitwerte zeichnen. Der Leitwert ist der Kehrwert des Widerstands.

Es ist somit: $\tan \delta = 1 / (R_p * \omega C)$



Weil man das Ersatzschaltbild so oder so zeichnen kann, kann man analog auch im rechten Brücken-zweig den variablen Widerstand R_3 in Reihe oder parallel zum Vergleichskondensator schalten (der Prüfling bleibt natürlich immer der gleiche, unabhängig vom Ersatzschaltbild).

Der Verlustfaktor $d = \tan \delta$ ist vorwiegend abhängig vom Material des Dielektrikums. Nach Unterlagen der Firma WIMA kann man von folgenden Werten ausgehen (bei 1 kHz):

- Polyester: $< 8 * 10^{-3}$
- Polycarbonat: $< 3 * 10^{-3}$
- Polypropylen: $< 5 * 10^{-4}$
- Polyphenylensulfid (PPS): $< 15 * 10^{-4}$
- Papier: $< 13 * 10^{-3}$
- Keramik: $1 * 10^{-3} \dots 25 * 10^{-3}$

Hier noch Zahlenbeispiele, welche Werte R_r und R_p annehmen können ($\tan \delta = 5 * 10^{-3}$, $f = 1000$ Hz):

$C = 1 \mu\text{F}$:	$R_p = 32 \text{ k}\Omega$	$R_r = 0,79 \Omega$
$C = 100 \text{ nF}$:	$R_p = 320 \text{ k}\Omega$	$R_r = 7,9 \Omega$
$C = 1 \text{ nF}$:	$R_p = 32 \text{ M}\Omega$	$R_r = 790 \Omega$

Induktivitätsmessung (L-Messung)

Induktivitätsmessungen sind am interessantesten, weil Spulen das einzige Bauteil sind, das wir selbst herstellen können. Aber auch bei fertigen Spulen ist der Wert oft unbekannt.

Eigentlich müsste man im rechten Brückenarm eine Vergleichsinduktivität haben. Es geht jedoch auch mit einer Kapazität, denn die Induktivität ist der Kehrwert der Kapazität.

Das Ersatzschaltbild setzt sich wieder aus einer reinen Induktivität und einem Wirkwiderstand zusammen. In einer Spule entstehen Verluste durch den Drahtwiderstand und durch die Magnetisierungsverluste, wenn die Spule einen Eisenkern hat.

Die Verhältnisse sind hier nicht so leicht überschaubar, da kann die Mathematik helfen. Die Berechnung solcher LCR-Netzwerke erfolgt vorteilhaft mit komplexen Zahlen. In Wikipedia ist diese Methode unter dem Stichwort „Wechselspannungsbrücke“ an Beispielen gezeigt.

Hier sei nur das Ergebnis präsentiert:

$$L_x = R_1 \cdot C_1 \cdot R_2$$

$$R_x = R_1 \cdot R_2 / R_3$$

Weil R_1 und C_1 Konstanten sind, ist L_x proportional zu R_2 . R_x ist von R_2 und R_3 abhängig, es müssen also wieder beide Widerstände zusammen abgeglichen werden. Die Frequenz spielt auch hier keine Rolle.

Zur Kennzeichnung der Qualität einer Spule wird der sogenannte „Gütefaktor Q “ verwendet. Bei dem Industriegerät ist „ Q “ am entsprechenden Potentiometer angeschrieben. Wie hängt das mit R_x zusammen?

Bei einer Reihenschaltung werden beide Bauteile vom gleichen Strom durchflossen, an einer Induktivität eilt aber der Spannungsabfall dem Strom um 90° voraus, an einem Ohm'schen Widerstand sind beide in Phase. Die beiden Spannungen werden geometrisch addiert und man erhält eine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung, also den Phasenwinkel ϕ . Der Ergänzungswinkel auf 90° wird als Verlustwinkel δ bezeichnet.

Es ist:

$$\text{Verlustfaktor } d = \tan \delta = R_x / (\omega L_x)$$

$$\text{Gütefaktor } Q = 1 / d = \omega L_x / R_x$$

Setzt man für R_x und L_x die oben angegebenen Gleichungen ein, erhält man:

$$d = 1 / (\omega C_1 \cdot R_3)$$

$$Q = \omega C_1 \cdot R_3$$

Der Gütefaktor ist also proportional zu R_3 und man kann an die Skala die entsprechenden Zahlen anschreiben. ω ist die „Kreisfrequenz“. Es ist $\omega = 2\pi \cdot f$. Dabei ist f die Frequenz in Hertz (Hz). Der Gütefaktor ist also frequenzabhängig.

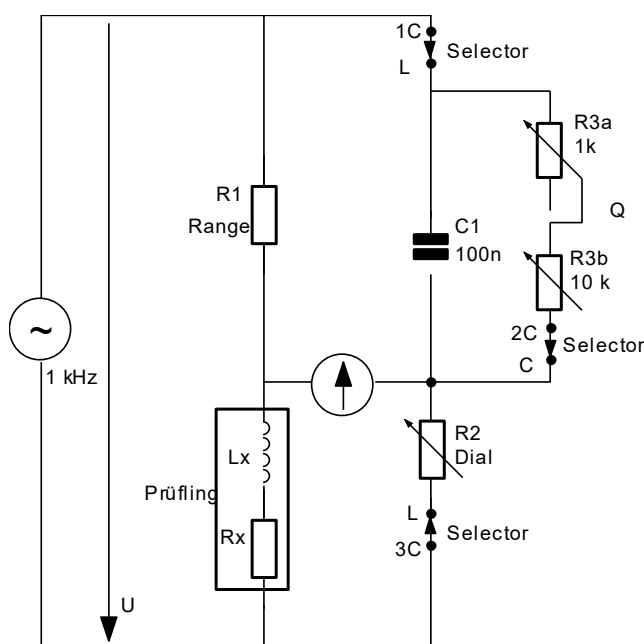


Bild 3: AC Bridge BR-8S. Prinzipschaltplan für Induktivitätsmessung

Windungsverhältnis (Ratio)

Als Besonderheit kann auch das Windungsverhältnis einer angezapften Spule ermittelt werden.

Normalerweise würde man einen Wechselstrom durch die Spule schicken und die Spannungen messen. Die Spannungen verhalten sich wie die Windungszahlen.

Hier ist die Sache aber trickreicher gelöst.

Der Strom i_1 führt zu einem magnetischen Fluss $\Phi_1 = c * n_1 * i_1$.

Der Strom i_2 führt zu einem magnetischen Fluss $\Phi_2 = c * n_2 * i_2$.

c ist eine Konstante, in der die Wirkungen der Spulengeometrie und des Eisenkerns zusammengefasst sind, n_1 und n_2 sind die Windungszahlen.

Wichtig ist, dass beide Teilspulen vom gleichen magnetischen Fluss durchströmt werden, die beiden Teilspulen sollten also übereinander gewickelt sein.

Φ_1 und Φ_2 wirken gegeneinander. Bei abgeglichenener Brücke heben sich beide auf und die Spule hat keine Induktivität ($\Phi_1 = \Phi_2$, $n_1 * i_1 = n_2 * i_2$). Es bleibt nur der Drahtwiderstand der Spulen. Der Drahtwiderstand ist normalerweise viel kleiner als R_1 und R_2 und kann vernachlässigt werden. Es ist dann:

$$i_1 = u/R_1 \text{ und } i_2 = u/R_2$$

$$i_1/i_2 = R_2/R_1 = n_2/n_1$$

Die Bereichsangaben stellen offensichtlich das Verhältnis von R_2/R_1 dar und somit auch das Windungsverhältnis.

Beispiel: $R_1 = 1 \text{ Ohm}$, $R_2 = 10 \dots 11100 \text{ Ohm}$ -> $R_2/R_1 = n_2/n_1 = 10 \dots 11100$

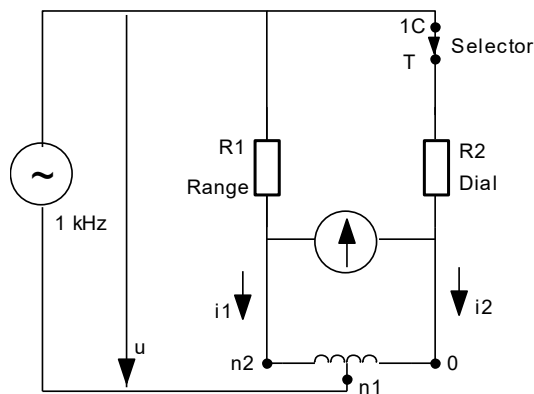


Bild 4: AC Bridge BR-8S. Prinzipschaltplan für Windungsverhältnis.