

Versuchsprotokoll zum Versuch Nr. 302

Brückenschaltungen

Johannes Kollek Jean-Marco Alameddine
johannes.kollek@udo.edu jean-marco.alameddine@udo.edu

Durchführung: 10.11.2015

TU Dortmund – Fakultät Physik

1 Zielsetzung

Das vorliegende Experiment dient dem Ziel, die Messung unbekannter Widerstände, Induktivitäten und Kapazitäten mithilfe von Brückenschaltungen anhand mehrerer Beispiele durchzuführen.

2 Theorie

2.1 Grundlagen der Brückenschaltungen

Bei einer Brückenschaltung können im Allgemeinen unbekannte Größen bei Kenntnis ausreichend vieler Größen, insbesondere der Speisespannung U_s sowie der Brückenspannung U_b , mit Hilfe der Kirchhoffschen Regeln bestimmt werden.

Die erste Kirchhoffsche Regel ist dabei die Knotenregel (1). Diese folgt direkt aus der Ladungserhaltung und besagt, dass in jedem Knotenpunkt einer Schaltung die Summe aller eingehenden und ausgehenden Ströme verschwinden muss:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0. \quad (1)$$

Beispielsweise gilt für Abbildung 1

$$I_1 = I_2 + I_3 \quad (2)$$

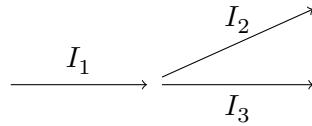


Abbildung 1: Maschenregel.

Die zweite Kirchhoffsche Regel ist die Maschenregel (4). Sie folgt aus dem Induktionsgesetz im Vakuum

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (3)$$

und besagt, dass in jeder geschlossenen Masche der Schaltung die Summe der Spannungen null ergeben muss:

$$\sum_{i=1}^n U_i = 0. \quad (4)$$

Beispielsweise gilt für Abbildung 2

$$U_s = I \cdot R_3 + I \cdot R_2 + I \cdot R_1 \quad (5)$$

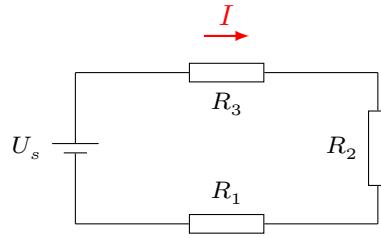


Abbildung 2: Maschenregel.

Um nun eine unbekannte Größe zu messen, sieht eine allgemeine Brückenschaltung wie in Abbildung 3 beschrieben aus.

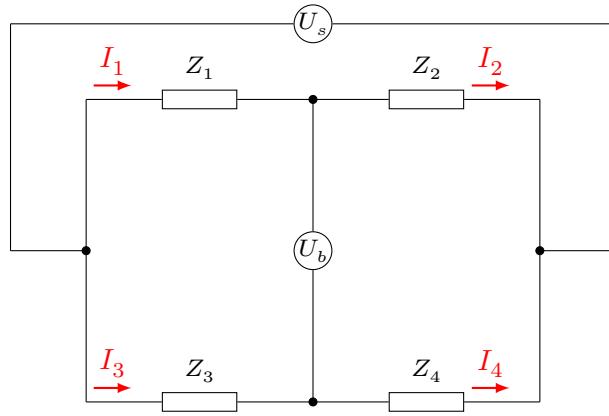


Abbildung 3: Allgemeine Brückenschaltung.

Damit die folgenden Formeln, auch wenn für U_s ein Wechselstrom angelegt wird, gelten, wird die Impedanz

$$Z = R + iX \quad (6)$$

genutzt. Hierbei steht R für den Wirkwiderstand und X für den Blindwiderstand.

Wenn der Innenwiderstand des Voltmeters von U_b so gewählt wird, dass er keinen Strom durchlässt, ergibt sich nach der Anwendung der Knotenregel und der Maschenregel für das Verhältnis von U_b zu U_s

$$U_b = \frac{Z_2 Z_3 - Z_1 Z_4}{(Z_3 + Z_4)(Z_1 + Z_2)} U_s. \quad (7)$$

Wenn der Zähler dieses Ausdruckes nun 0 wird, also das Verhältnis

$$Z_2 Z_3 - Z_1 Z_4 = 0 \iff Z_2 = \frac{Z_1 Z_4}{Z_3} \quad (8)$$

gilt, so wird die Brückenspannung bei anliegender Speisespannung 0. Dieses Nullmethode genannte Verfahren kann genutzt werden, um eine unbekannte Impedanz Z_2 bei ansonsten bekannten Impedanzen zu berechnen. Handelt es sich um reelle Impedanzen, d.h. die Blindwiderstände sind 0, kann dieses Verhältnis direkt genutzt werden. Dabei wird einer der bekannten Widerstände variiert bis $U_b = 0$ ist. Handelt es sich um komplexe Widerstände, müssen sowohl die Realteile als auch die Imaginärteile 0 ergeben. Das bedeutet, dass die beiden Gleichungen

$$R_1 R_4 - X_1 X_4 = R_2 R_3 - X_2 X_3 \quad (9)$$

$$R_1 X_4 + R_4 X_1 = R_2 X_3 + R_3 X_2 \quad (10)$$

simultan erfüllt sein müssen. Beim Nullabgleich müssen dementsprechend zwei bekannte Werte variiert werden, so dass die Brückenspannung 0 wird.

2.2 Impedanzen bekannter elektrischer Bauelemente

Die Impedanzen eines ohmschen Widerstandes R , einer Induktivität L sowie einer Kapazität C sind gegeben durch

$$Z_R = R, \quad (11)$$

$$Z_L = i\omega L \quad (12)$$

sowie

$$Z_C = \frac{-i}{\omega C}. \quad (13)$$

[1]

3 Wheatstonebrücke

3.1 Durchführung

Abbildung 4 zeigt den systematischen Aufbau einer Wheatstonebrücke.

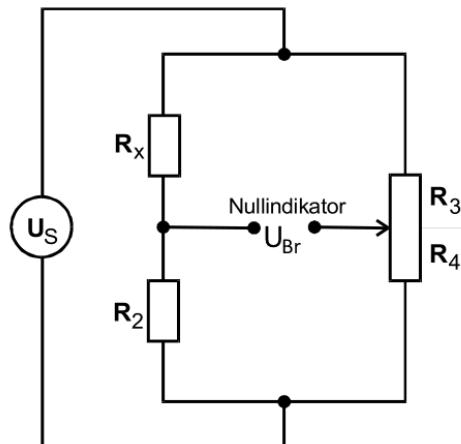


Abbildung 4: Wheatstonebrücke [1]

Sie besteht aus jeweils zwei parallel zueinander geschalteten Widerständen R_x und R_3 , und R_2 und R_4 . Es wird die Potentialdifferenz U_{br} zwischen den beiden Punkten nach jeweils dem ersten Widerstand abgegriffen. Bei dieser mit Wechselstrom betriebenen Schaltung wird das Verhältnis von R_3 zu R_4 nun solange variiert bis die Brückenspannung U_{Br} ihr Minimum erreicht hat. Somit kann R_x bestimmt werden. Es werden zwei unbekannte Widerstände R_x mit jeweils drei verschiedenen R_2 ermittelt.

3.2 Auswertung

Die gemessenen Daten sind in den Tabellen 1 für Wert 14 und 2 für Wert 11 abgebildet. Der relative Fehler vom Verhältnis $\frac{R_3}{R_4}$ beträgt 0.5%, der relative Fehler von R_2 0.2%. [1]

Tabelle 1: Messdaten für $R = \text{Wert } 14$

$R_2[\Omega]$	$\Delta R_2[\Omega]$	$\frac{R_3}{R_4}$	$\Delta \frac{R_3}{R_4}$
332.0	0.7	2.75	0.01
500	1	1.817	0.009
1000	2	0.905	0.005

Tabelle 2: Messdaten R = Wert11

$R_2[\Omega]$	$\Delta R_2[\Omega]$	$\frac{R_3}{R_4}$	$\Delta \frac{R_3}{R_4}$
1000	2	0.495	0.002
500	1	0.988	0.005
332.0	0.7	1.488	0.007

Über den in der Theorie genannten Zusammenhang 8 ergibt sich für den unbekannten Widerstand

$$R_x = R_2 \frac{R_3}{R_4}. \quad (14)$$

Somit errechnen sich die jeweiligen Messwerte zu R_{14} und R_{11} zu

$$\begin{aligned} R_{14,1} &= (911 \pm 5) \Omega & R_{11,1} &= (495 \pm 3) \Omega, \\ R_{14,2} &= (908 \pm 5) \Omega & R_{11,2} &= (494 \pm 3) \Omega, \\ R_{14,3} &= (905 \pm 5) \Omega & R_{11,3} &= (494 \pm 3) \Omega. \end{aligned}$$

Für die Fehlerrechnung wird bei der vorliegenden Rechnung und bei allen folgenden Rechnungen das Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n\right)^2} \quad (15)$$

für eine Funktion $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, bei der die Größen x_1, x_2, \dots, x_n voneinander unabhängig sind, verwendet. Dementsprechend berechnet sich der Fehler von R_x zu

$$\Delta R_x = \sqrt{\frac{R_3^2}{R_4^2} \cdot \Delta R_2^2 + R_2^2 \cdot \left(\Delta \frac{R_3}{R_4}\right)^2}. \quad (16)$$

Die daraus errechneten Mittelwerte ergeben

$$\begin{aligned} R_{14} &= (908 \pm 2) \Omega, \\ R_{11} &= (494.0 \pm 0.5) \Omega. \end{aligned}$$

Bei dieser und allen folgenden Berechnungen des Mittelwerts berechnet sich der Fehler des Mittelwerts zu

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (17)$$

wobei N den Stichprobenumfang und \bar{x} den Mittelwert bezeichnet.

4 Kapazitätsmessbrücke

4.1 Durchführung

Mit der Kapazitätsmessbrücke kann die Kapazität und der Widerstand eines unbekannten Kondensatorelementes berechnet werden. Die Abbildung 5 zeigt eine solche Schaltung.

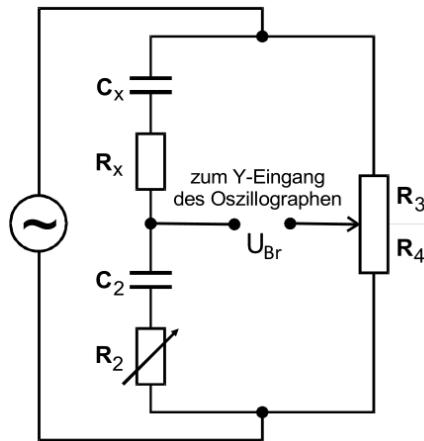


Abbildung 5: Kapazitätsmessbrücke [1]

Sie unterscheidet sich von der Wheatstonebrücke nur darin, dass hier anstelle von R_x eine unbekannte RC-Kombination oder eben ein unbekannter verlustbehafteter Kondensator eingebaut und betrachtet wird. Zusätzlich wird mit einem festen Kondensator C_2 und einem variablen Widerstand R_2 abgeglichen. Es werden nun R_2 und das Verhältnis von R_3 und R_4 solange nacheinander variiert, bis das Minimum der Brückenspannung U_{Br} auf dem Oszilloskop beobachtet wird. Auf diese Weise werden die Kapazitäten und Widerstände einer RC-Kombination, sowie von zwei unbekannten verlustbehafteten Kondensatoren bestimmt. Es wird jeweils dreimal mit verschiedenen Kondensatoren C_2 gemessen.

4.2 Auswertung

Die gemessenen Daten sind in Tabelle 3 für die RC-Kombination 8, in der Tabelle 4 für den Kondensator 3 und in der Tabelle 5 für den Kondensator 1 angegeben. Der relative Fehler von C_2 beträgt 0.2%, der relative Fehler von $\frac{R_4}{R_3}$ beträgt 0.5% und der relative Fehler von R_2 beträgt 3%. [1]

Tabelle 3: Messdaten R/C = Wert 8

$C_2[\text{nF}]$	$\Delta C_2[\text{nF}]$	$R_2[\Omega]$	$\Delta R_2[\Omega]$	$\frac{R_4}{R_3}$	$\Delta \frac{R_4}{R_3}$
750	2	238	7	0.397	0.002
597	1	292	9	0.490	0.002
399.0	0.8	431	13	0.727	0.004

Tabelle 4: Messdaten C = Wert 3

$C_2[\text{nF}]$	$\Delta C_2[\text{nF}]$	$R_2[\Omega]$	$\Delta R_2[\Omega]$	$\frac{R_4}{R_3}$	$\Delta \frac{R_4}{R_3}$
399	0.8	0	0	1.045	0.005
750	2	0	0	0.558	0.003
597	1	0	0	0.698	0.003

Tabelle 5: Messdaten C = Wert 1

$C_2[\text{nF}]$	$\Delta C_2[\text{nF}]$	$R_2[\Omega]$	$\Delta R_2[\Omega]$	$\frac{R_4}{R_3}$	$\Delta \frac{R_4}{R_3}$
597	1	3.00	0.09	1.092	0.005
750	2	0.0	0	0.880	0.004
399.0	0.8	1.00	0.03	1.646	0.008

Aus der Gleichung 9 ergibt sich sofort der Zusammenhang

$$R_x = R_2 \frac{R_3}{R_4} \quad (18)$$

sowie aus Gleichung 10 der Zusammenhang

$$C_x = C_2 \frac{R_4}{R_3} \quad (19)$$

für die abgeglichene Wechselstrombrücke. Es folgen somit für die Kapazitäten und Widerstände der Kondensatoren aus den einzelnen Messungen

$$C_{8,1} = (297 \pm 2) \text{nF} \qquad R_{8,1} = (600 \pm 18) \Omega$$

$$C_{8,2} = (293 \pm 2) \text{nF} \qquad R_{8,2} = (596 \pm 18) \Omega$$

$$C_{8,3} = (290 \pm 2) \text{nF} \qquad R_{8,3} = (593 \pm 18) \Omega$$

$$C_{3,1} = (417 \pm 2) \text{nF} \qquad R_{3,1} = (0 \pm 0) \Omega$$

$$C_{3,2} = (418 \pm 2) \text{nF} \qquad R_{3,2} = (0 \pm 0) \Omega$$

$$C_{3,3} = (417 \pm 2) \text{nF} \qquad R_{3,3} = (0 \pm 0) \Omega$$

$$C_{1,1} = (652 \pm 4) \text{ nF}$$

$$R_{1,1} = (2.75 \pm 0.08) \Omega$$

$$C_{1,2} = (660 \pm 4) \text{ nF}$$

$$R_{1,2} = (0 \pm 0) \Omega$$

$$C_{1,3} = (657 \pm 4) \text{ nF}$$

$$R_{1,3} = (0.61 \pm 0.02) \Omega$$

Die Fehler bestimmen sich analog zu der in Gleichung 25 angegebenen Fehlerformel. Als Mittelwerte ergeben sich somit

$$C_8 = (293 \pm 3) \text{ nF}$$

$$R_8 = (596 \pm 3) \Omega$$

$$C_3 = (417.0 \pm 0.5) \text{ nF}$$

$$R_3 = 0 \Omega$$

$$C_1 = (656 \pm 3) \text{ nF}$$

$$R_1 = (1 \pm 1) \Omega$$

für die Kapazitäten und Widerstände der jeweiligen Bauteile.

5 Induktivitätsmessbrücke

5.1 Durchführung

Die Induktivitätsmessbrücke, dargestellt in Abbildung 6, funktioniert analog zur Kapazitätsmessbrücke in Abbildung 5.

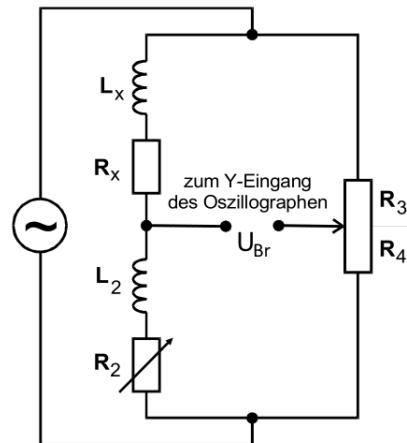


Abbildung 6: Induktivitätsmessbrücke [1]

Anstelle der Kondensatoren werden hier jedoch die Spule L_2 und eine LR-Kombination eingebaut. Es gilt dasselbe Messverfahren wie bei der Kapazitätsmessbrücke, um diesmal die Werte von nur einer unbekannten LR-Kombination zu ermitteln. L_2 wird dabei zweimal variiert.

5.2 Auswertung

Die Messdaten für die Bestimmung der unbekannten LR-Kombination 19 werden in Tabelle 6 angegeben. Der relative Fehler von L_2 beträgt 0.2%, der relative Fehler von $\frac{R_3}{R_4}$ beträgt 0.5% und der relative Fehler von R_2 beträgt 3%. [1]

Tabelle 6: Messdaten $LR = \text{Wert } 19$

$L_2[\text{mH}]$	$\Delta L_2[\text{mH}]$	$R_2[\Omega]$	$\Delta R_2[\Omega]$	$\frac{R_3}{R_4}$	$\Delta \frac{R_3}{R_4}$
20.10	0.04	91	3	1.336	0.007
14.60	0.03	68	2	1.857	0.009

Aus der Gleichung 9 ergibt sich sofort der Zusammenhang

$$R_x = R_2 \frac{R_3}{R_4} \quad (20)$$

sowie aus Gleichung 10 der Zusammenhang

$$L_x = L_2 \frac{R_3}{R_4} \quad (21)$$

für verschwindende Brückenspannung U_{Br} . Für die Induktivität sowie den Widerstand der Spule ergeben sich für die beiden Messungen jeweils

$$\begin{aligned} L_{19,1} &= (26.9 \pm 0.1) \text{ mH} & R_{19,1} &= (122 \pm 4) \Omega \\ L_{19,2} &= (27.1 \pm 0.1) \text{ mH} & R_{19,2} &= (126 \pm 4) \Omega \end{aligned}$$

wobei die Fehler analog zur Fehlerformel 25 bestimmt werden. Als Mittelwerte ergeben sich

$$L_{19} = (27.0 \pm 0.1) \text{ mH} \quad R_{19} = (124 \pm 2) \Omega.$$

6 Maxwell-Brücke

6.1 Durchführung

Da bei der Induktivitätsmessbrücke auf eine Spule zur Berechnung der unbekannten Induktivität zurückgegriffen wird, diese aber zumeist bei niedrigen Frequenzen hohe Verluste besitzt, ist es besser anstelle einer Spule einen möglichst verlustarmen Kondensator zu verwenden. Dies wird bei der Maxwell-Brücke, Abbildung 7, realisiert.

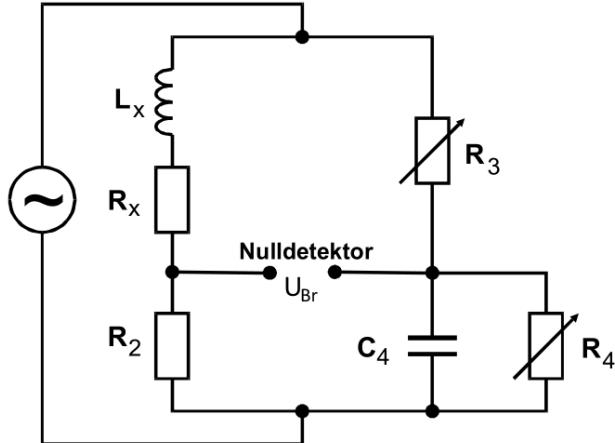


Abbildung 7: Maxwell-Brücke [1]

Die Abgleichelemente sind hier die variablen Widerstände R_3 und R_4 , wobei der Kondensator C_4 parallel zu R_4 geschaltet wird. Dabei soll dieselbe LR-Kombination 19 untersucht werden, indem R_3 und R_4 nacheinander variiert werden, sodass die Brückenspannung U_{Br} minimal wird. Es wird dreimal mit verschiedenen Widerständen R_2 gemessen.

6.2 Auswertung

Die Messwerte für die drei Messungen mit jeweils verschiedenen R_2 werden in Tabelle 7 angegeben. Der relativen Fehler von R_3 sowie R_4 betragen 3%, die Fehler von R_2 sowie C_4 betragen 0.2%. [1] Aus der Gleichung 9 folgt der Zusammenhang

Tabelle 7: Messdaten $\text{LR} = \text{Wert } 19$

$C_4[\text{nF}]$	$\Delta C_4[\text{nF}]$	$R_4[\Omega]$	$\Delta R_4[\Omega]$	$R_3[\Omega]$	$\Delta R_3[\Omega]$	$R_2[\Omega]$	$\Delta R_2[\Omega]$	$\frac{R_3}{R_4}$	$\Delta \frac{R_3}{R_4}$
450.0	0.9	556	17	69	2	1000	2	0.124	0.005
450.0	0.9	548	16	190	6	322.0	0.6	0.35	0.01
450.0	0.9	552	17	102	3	664	1	0.185	0.008

$$R_x = R_2 \frac{R_3}{R_4} \quad (22)$$

und aus der Gleichung 10 der Zusammenhang

$$L_x = C_4 R_3 R_2. \quad (23)$$

Aus der Gaußschen Fehlerfortpflanzung folgt für den Fehler von R_x

$$\Delta R_x = \sqrt{\left(\frac{R_3}{R_4} \cdot \Delta R_2\right)^2 + \left(\frac{R_2}{R_4} \cdot \Delta R_3\right)^2 + \left(\frac{R_2 R_3}{R_4^2} \Delta R_4\right)^2} \quad (24)$$

sowie für den Fehler von L_x

$$\Delta L_x = \sqrt{\left(R_3 R_2 \Delta C_4\right)^2 + \left(C_4 R_2 \Delta R_3\right)^2 + \left(C_4 R_3 \Delta R_2\right)^2}. \quad (25)$$

Hieraus ergeben sich aus den drei Messungen für die Induktivität sowie den Widerstand vom Wert 19

$$\begin{aligned} L_{19,1} &= (31.1 \pm 0.9) \text{ mH} & R_{19,1} &= (124 \pm 5) \Omega \\ L_{19,2} &= (27.5 \pm 0.8) \text{ mH} & R_{19,2} &= (112 \pm 5) \Omega \\ L_{19,3} &= (30.5 \pm 0.9) \text{ mH} & R_{19,3} &= (123 \pm 5) \Omega. \end{aligned}$$

Als Mittelwert für den Wert 19 folgt somit

$$L_{19} = (30 \pm 2) \text{ mH} \quad R_{19} = (119 \pm 5) \Omega.$$

7 Wien-Robinson-Brücke

7.1 Durchführung

Bei den obigen Schaltungen ist ein Abgleich bei beliebigen Frequenzen möglich. Bei der Wien-Robinson-Brücke, beschrieben in Abbildung 8, hingegen ist ein Abgleich nur bei einer bestimmten Frequenz möglich, die untersucht werden soll.

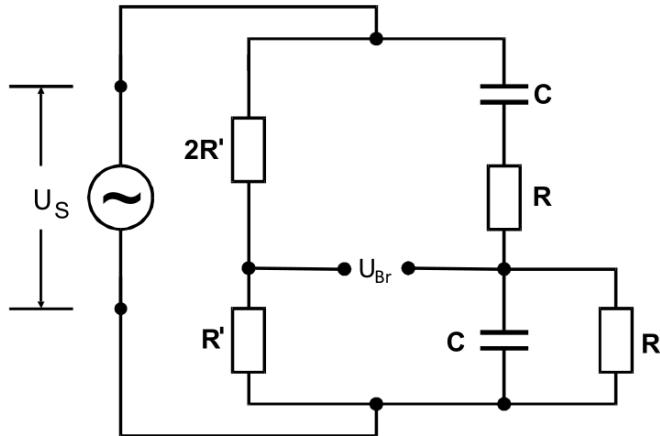


Abbildung 8: Wien-Robinson-Brücke [1]

Dabei wird die Frequenz v der Speisespannung U_S in um die Minimalbrückenspannung kleiner werdenden Abständen variiert und die jeweilige entstehende Brückenspannung U_{Br} notiert. Die Frequenz befindet sich in einem Bereich von 20 Hz bis 30 kHz. Zuletzt wird die Speisespannung U_S notiert.

7.2 Auswertung

Die verwendeten Schaltungselemente haben die Werte

$$\begin{aligned} R' &= 500 \Omega, \\ R &= 332 \Omega, \\ C &= \text{Wert } 3 = 417 \text{ nF}, \\ U_s &= 8.18 \text{ V}. \end{aligned}$$

Die gemessenen Spannungen sind in Tabelle 8 aufgetragen.

Tabelle 8: Messdaten Frequenzmessung.

v / Hz	U_{Br} / V	v / Hz	U_{Br} / V
20	2.5000	1400	0.3400
200	2.1800	1500	0.4400
400	1.6000	1700	0.6000
600	1.0400	1900	0.7760
800	0.5360	2100	0.8880
900	0.4160	2300	0.9920
950	0.3020	2500	1.0800
1000	0.1700	3000	1.2700
1050	0.0984	3500	1.4100
1075	0.0864	4000	1.5100
1100	0.0336	5000	1.6200
1125	0.0104	7000	1.8000
1150	0.0152	10000	1.7600
1175	0.0776	20000	1.7800
1200	0.1200	30000	1.8600
1300	0.2500		

Das Verhältnis der Brückenspannung U_{Br} und der Speisespannung U_s errechnet sich nach den Kirchhoffsschen Regeln zu der Formel

$$\frac{U_{\text{Br}}}{U_s} = \frac{1 - \omega^2 R^2 C^2}{1 - \omega^2 R^2 C^2 + 4i\omega RC}. \quad (26)$$

Dabei ist zu erkennen, dass die Brückenspannung U_{Br} bei einer Frequenz von

$$v_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (27)$$

minimal wird. Nach dem Ziehen des Betrags und der Substitution

$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{v}{v_0} \quad (28)$$

folgt für das Verhältnis der Brückenspannung U_{Br} und der Speisespannung U_S die Funktion

$$f(\Omega) = \frac{U_{Br}}{U_S} = \sqrt{\frac{1}{9} \frac{(\Omega^2 - 1)^2}{(1 - \Omega^2)^2 + 9\Omega^2}}. \quad (29)$$

Dieses Verhältnis wird nun in Abbildung 9 halblogarithmisch dargestellt.

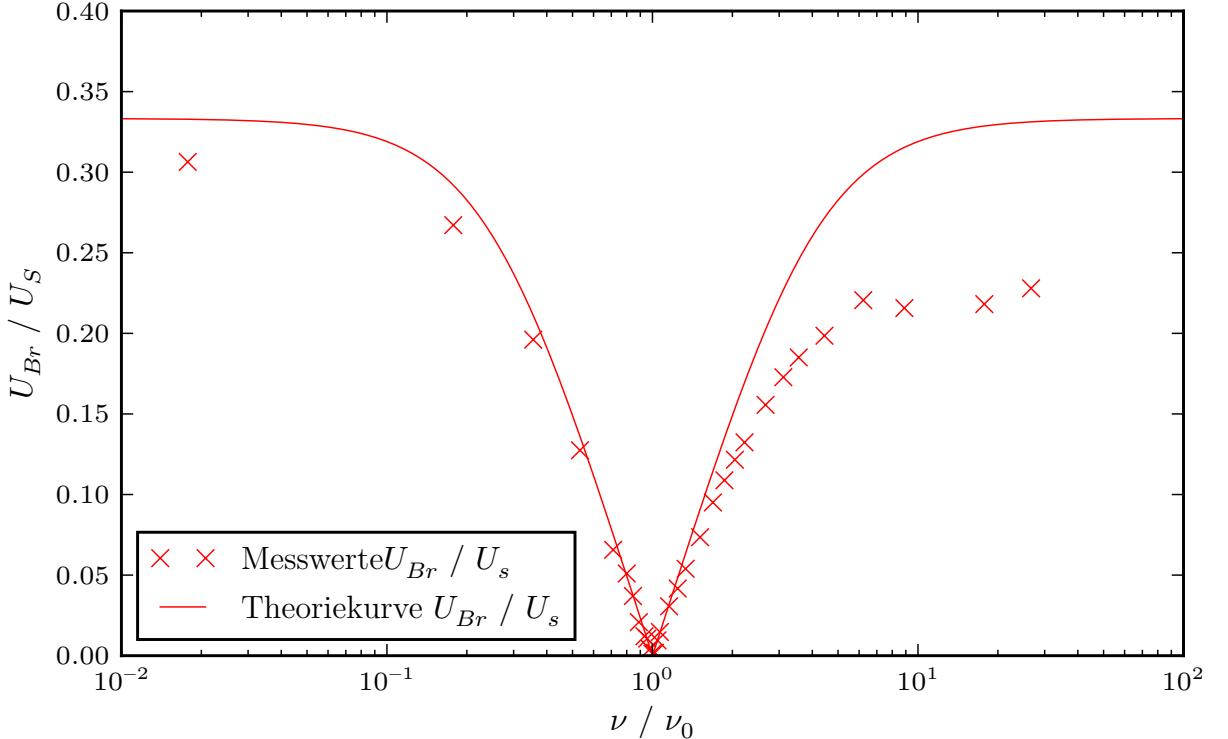


Abbildung 9: Frequenzmessergebnisse

Die gemessene Sperrfrequenz, welche für das Auftragen der Messwerte verwendet wird, beträgt $v_0 = 1125$ Hz. Die errechnete Sperrfrequenz, welche für das Plotten der Theoriekurve verwendet wird, beträgt nach Gleichung 27 jedoch $v_0 = 1149.6$ Hz. Der Grund dafür, dass die Brückenspannung nur minimal und nicht Null wird liegt an vom Generator unerwünscht erzeugten Oberwellen. Der Klirrfaktor k , für den

$$k = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots}}{U_1} \quad (30)$$

gilt, beschreibt das Verhältnis von der Grundwelle zu den Oberwellen. Dabei ist U_1 die Amplitude der Grundwelle und U_n die Amplitude der n-ten Oberwelle. Vereinfacht wird hier nur von der ersten Oberwelle ausgegangen. Für diese gilt

$$U_2 = \frac{U_{Br}}{f(\Omega = 2)} = 0.0698 \text{ V}. \quad (31)$$

Dadurch lässt sich der Klirrfaktor auf

$$k = 8.55 \cdot 10^{-3} \quad (32)$$

bestimmen.

8 Diskussion

Bei der Induktivitätsmessung geht man in der Theorie davon aus, dass mithilfe eines verlustarmen Kondensators anstelle einer Spule eine genauere Messung durchgeführt werden kann. Unsere Messungen der unbekannten Widerstände und Induktivitäten weisen bei den beiden unterschiedlichen Messmethoden eine gewisse Abweichung auf. Die Induktivität wurde bei der Induktivitätsbrücke kleiner bestimmt als bei der Maxwellbrücke, während der Widerstand größer ist. Der größere Widerstand und die geringere Kapazität lassen sich auf einen generell höheren Verlust einer Spule im Vergleich zu einem Kondensator zurückführen.

Unsere Messung bei der Maxwellbrücke ergab einen höheren Fehler, was sich möglicherweise darauf zurückführen lässt, dass wir hier mehrere Messungen durchgeführt haben. Gleichzeitig haben wir, mangels fehlender Vergleichsspulen, lediglich zwei Messungen bei der Induktivitätsmessbrücke durchgeführt, welche scheinbar zufällig nah beieinander gelegen haben.

Die Messungen mittels Wheatstonebrücke sowie Kapazitätsmessbrücke verliefen ohne signifikante Auffälligkeiten.

Bei der frequenzabhängigen Messung gilt es die gemessene Sperrfrequenz v_0 mit der errechneten zu vergleichen. Während der errechnete Wert bei 1149.6 Hz liegt, ergab sich bei unserer Messung ein Wert von 1125 Hz. Diese Abweichung lässt sich dadurch erklären, dass wir bei der Frequenzeinstellung lediglich in 25 Hz Schritten genau sein konnte.

Auffällig ist ebenfalls das Abweichen unserer Messwerte von der Theoriekurve, vor allem bei höheren Frequenzen als der Sperrfrequenz. Dies ist ein Phänomen, welches wir nicht erklären können. Entscheidend ist jedoch, dass wir eine deutliche Bandsperre für die Sperrfrequenz erkennen können. Weitere Ungenauigkeiten folgen aus schaltungsinternen Fehlerquellen, beispielsweise Verlusten an Kontakten, reale Widerstände von Kabeln, etc.

9 Anhang

e) ν / Hz	U_{Bz} / V	Brückenschaltungen	
		ν / Hz	U_{Bz} / V
20	2,5	2000	7,8
200	2,78	20000	7,76
400	7,6	20000	7,78
600	7,04	30000	7,86
800	0,536		
900	0,476		$U_s = 8,76 \text{ V}$
950	0,302		$2R' = 7000 \Omega$
1000	0,170		$R' = 500 \Omega$
1050	0,0984		$C = \text{Wert?}$
1075	0,0864		$R = 332,0 \Omega$
1100	0,0336		
1125	0,0704		
1150	0,0752		
1175	0,0776		
1200	0,72		
1300	0,25		
1400	0,34		
1500	0,84		
1700	0,6		
1900	0,276		
2100	0,888		
2300	0,992		
2500	7,08		
3000	7,27		
3500	7,47		
4000	7,57		
5000	7,62		

*10.11.
S.*

Abbildung 10: Originaldaten Teil 1.

a) Werte:
1. $R_x = \text{Wert } 74$
1. $R_1 = 332,0\Omega \quad R_2 = 500\Omega \quad R_3 = 1000\Omega$ $R_4 = 283\Omega \quad R_5 = 645\Omega \quad R_6 = 475\Omega$ $R_7 = 267\Omega \quad R_8 = 355\Omega \quad R_9 = 525\Omega$
2. $R_x = \text{Wert } 77$
2. $R_1 = 1000\Omega \quad R_2 = 500\Omega \quad R_3 = 332\Omega$ $R_4 = 737\Omega \quad R_5 = 437\Omega \quad R_6 = 598\Omega$ $R_7 = 669\Omega \quad R_8 = 503\Omega \quad R_9 = 402\Omega$
b) Kondensatorenbrücke:
1. Combi Wert 8
$C_1 = 750\text{nF} \quad C_2 = 599\text{nF} \quad C_3 = 399\text{nF}$ $R_1 = 238\Omega \quad R_2 = 292\Omega \quad R_3 = 437\Omega$ $R_4 = 776\Omega \quad R_5 = 627\Omega \quad R_6 = 579\Omega$ $R_7 = 284\Omega \quad R_8 = 329\Omega \quad R_9 = 427\Omega$
2. $C_x = \text{Wert } 3$
$C_1 = 399\text{nF} \quad C_2 = 750\text{nF} \quad C_3 = 599\text{nF}$ $R_1 = 0\Omega \quad R_2 = 0\Omega \quad R_3 = 0\Omega$ $R_4 = 489\Omega \quad R_5 = 692\Omega \quad R_6 = 589\Omega$ $R_7 = 571\Omega \quad R_8 = 358\Omega \quad R_9 = 477\Omega$
3. $C_x = \text{Wert } 7$
$C_1 = 59\text{pF} \quad C_2 = 750\text{nF} \quad C_3 = 399\text{nF}$ $R_1 = 3\Omega \quad R_2 = 0\Omega \quad R_3 = 7\Omega$ $R_4 = 478\Omega \quad R_5 = 532\Omega \quad R_6 = 378\Omega$ $R_7 = 522\Omega \quad R_8 = 468\Omega \quad R_9 = 622\Omega$

Abbildung 11: Originaldaten Teil 2.

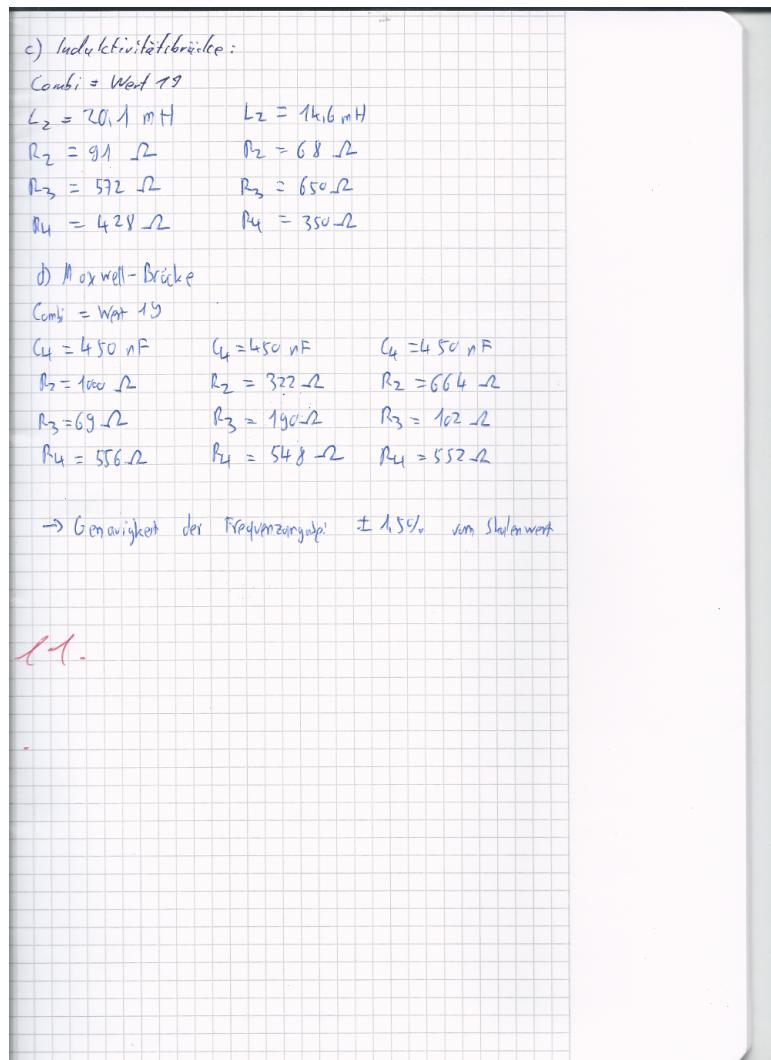


Abbildung 12: Originaldaten Teil 3.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung, Versuch Nr. 302*. 2015. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V302.pdf>.