

VERSUCH 302

Brückenschaltung

Tabea Hacheney
tabea.hacheney@tu-dortmund.de

Bastian Schuchardt
bastian.schuchardt@tu-dortmund.de

Durchführung: 30.11.2021

Abgabe: 07.12.2021

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| 1 Zielsetzung | 3 |
| 2 Theorie | 3 |
| 2.1 Wheatstonesche Brückenschaltung | 4 |
| 2.2 Kapazitätsmessbrücke | 4 |
| 2.3 Induktivitätsmessbrücke | 5 |
| 2.4 Maxwell-Brücke | 6 |
| 2.5 Wien-Robinson-Brücke | 7 |
| 3 Durchführung | 9 |
| 3.1 Wheatstonesche Brückenschaltung | 9 |
| 3.2 Kapazitätsmessbrücke | 9 |
| 3.3 Induktivitätsmessbrücke | 9 |
| 3.4 Maxwell-Brücke | 9 |
| 3.5 Wien-Robinson-Brücke | 9 |
| 4 Auswertung | 10 |
| 4.1 Fehlerrechnung | 10 |
| 4.2 Wheatston'sche Messbrücke | 10 |
| 4.3 Kapazitätsmessbrücke | 10 |
| 4.4 Induktivitätsmessbrücke | 11 |
| 4.5 Maxwellbrücke | 11 |
| 4.6 Wien-Robinson-Brücke | 12 |
| 5 Diskussion | 14 |
| 6 Messwerte | 15 |
| Literatur | 21 |

1 Zielsetzung

In diesem Versuch werden Brückenschaltungen dazu verwendet verschiedene unbekannte Ohm'sche Widerstände, Kapazitäten und Induktivitäten zu bestimmen. Zudem wird die Wien-Robinson-Brücke dazu verwendet die Frequenzabhängigkeit der Brückenspannung und Speisespannung zu untersuchen.

Dabei werden bisher nur in der Theorie benutzte Konzepte angewendet, wie beispielsweise die Abgleichbedingung und die Kirchhoff'schen Gesetze.

2 Theorie

Brückenschaltungen werden dazu benutzt, durch bereits bekannte Widerstände Unbekannte zu bestimmen. Zu diesen Widerständen zählen Ohm'sche Widerstände, induktive Widerstände und kapazitative Widerstände. Bei den letzteren Beiden handelt es sich um komplexe Widerstände.

Zudem werden Brückenschaltungen oft in der Messtechnik dazu verwendet, die Auflösung einer Messung zu erhöhen, indem sie bestimmte Frequenzen filtern kann.

Allgemein werden bei allen folgenden Schaltungen die Kirchhoffschen Gesetze verwendet. Das Erste besagt, dass die Summe aller eingehenden und ausgehenden Ströme an einem Knoten Null ist:

$$\sum_k I_k = 0 \quad (1)$$

Das Zweite besagt, dass die Summe aller Speisespannungen gleich der Summe der Produkte der Stromstärken und Widerständen innerhalb einer Masche ist:

$$\sum_k U_k = \sum_k I_k R_k \quad (2)$$

Bei Gleichung 2 werden alle I_k im Uhzeigersinn als positiv und alle gegen den Uhzeigersinn als negativ gewertet.

Aus diesen grundlegenden Gesetzen (Gleichung 1 und Gleichung 2) lässt sich die Abgleichbedingung herleiten:

$$U_{Br} = \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_3 + R_4)(R_1 + R_2)} U_S$$

Wenn nun die Brückenspannung verschwindet, ergibt sich:

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad (3)$$

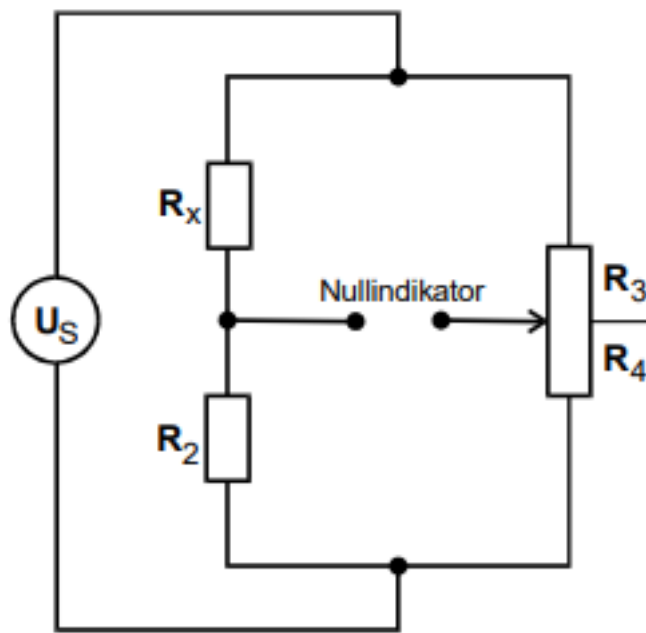


Abbildung 1: Wheatstonesche Brückenschaltung [1]

2.1 Wheatstonesche Brückenschaltung

Der einfachste Aufbau einer Brückenschaltung besteht aus einer Speisespannung U_S , drei bekannten und einem unbekannten Ohm'schen Widerstand und einem Spannungsmessgerät, was wie in Abbildung 1 aufgebaut wird.

Bei Abbildung 1 handelt es sich um eine Wheatstonesche Brückenschaltung. Sie kann sowohl mit Gleichstrom, als auch mit Wechselstrom betrieben werden. Diese Schaltung wird zur Bestimmung des Ohm'schen Widerstands R_X benutzt. Die Widerstände R_3 und R_4 können in diesem Fall durch ein Potentiometer ersetzt werden, da nur das Verhältnis der beiden Widerstände relevant zur Bestimmung von R_X ist.

Mit Gleichung 3 wird nun eine Formel für R_X bestimmt:

$$R_X = R_2 \frac{R_3}{R_4} \quad (4)$$

Da diese Formel nur erfüllt ist, wenn die Brückenspannung Null ist, wird das Potentiometer [Verhältnis von R_3 und R_4] angepasst, bis die mit dem Spannungsmessgerät gemessene Spannung verschwindet.

2.2 Kapazitätsmessbrücke

Bei der Kapazitätsmessbrücke wird grundlegend derselbe Aufbau verwendet wie bei Abbildung 1. Da Kondensatoren einen Teil der durchfließenden elektrischen Energie in Wärme umwandeln, wird ein Ersatzschaltbild verwendet. Die dielektrischen Verluste

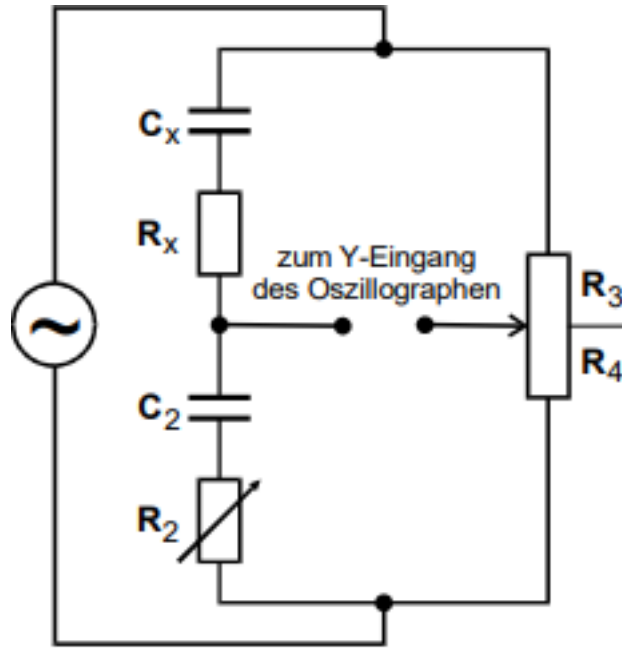


Abbildung 2: Kapazitätsmessbrücke [1]

werden durch einen mit dem Kondensator in Reihe geschalteten fiktiven Ohm'schen Widerstand dargestellt. Der reale Widerstand des Kondensators berechnet sich also aus:

$$Z_{C_{real}} = R - \frac{j}{\omega C}$$

In dem Aufbau Abbildung 2 der Brückenschaltung wird zudem ein zweiter Abstimmfreiheitsgrad (R_2) gewählt, um die durch R_X auftretende Phasenverschiebung zu kompensieren. Die beiden Unbekannten berechnen sich dann mit Gleichung 3 folgendermaßen:

$$R_X = R_2 \frac{R_3}{R_4} \quad (5)$$

$$C_X = C_2 \frac{R_4}{R_3} \quad (6)$$

2.3 Induktivitätsmessbrücke

Die Spule hat genau dasselbe Problem wie der Kondensator. Sie setzt einen Teil der magnetischen Feldenergie irreversibel in Wärme um. Daher wird wie beim Kondensator ein Ersatzschaltbild mit einem Ohm'schen Widerstand verwendet. Der Aufbau Abbildung 3 ist ähnlich wie bei Abbildung 2. Der reale Widerstand der Spule setzt sich folgendermaßen zusammen:

$$Z_{L_{real}} = R + j\omega L$$

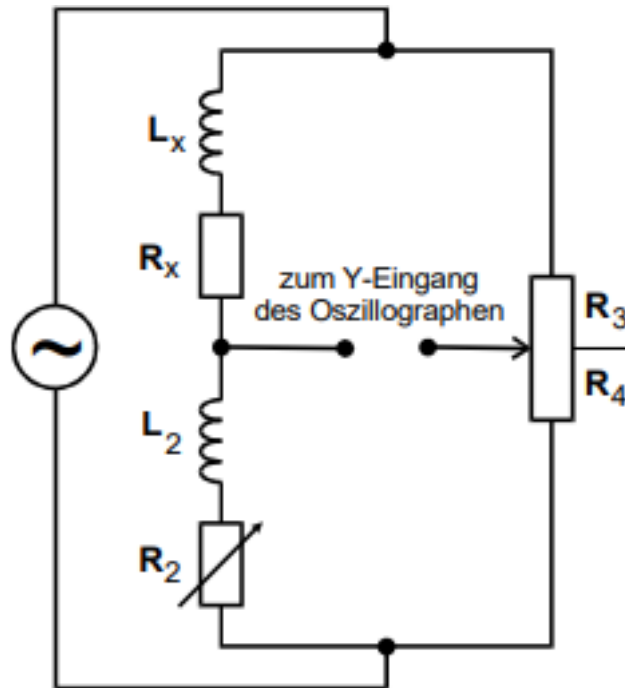


Abbildung 3: Induktivitätsmessbrücke [1]

Analog zu Gleichung 5 und Gleichung 6 lassen sich die jeweils gesuchten Größen so formulieren:

$$R_X = R_2 \frac{R_3}{R_4} \quad (7)$$

$$L_X = L_2 \frac{R_4}{R_3} \quad (8)$$

Wie auch bei der Kapazitätsmessbrücke wird hier der Widerstand R_2 variabel gewählt, um der durch R_X verursachten Phasenverschiebung entgegen zu wirken.

2.4 Maxwell-Brücke

Eine weitere Möglichkeit eine unbekannte Induktivität zu bestimmen besteht durch die Maxwell-Brückenschaltung. Der Unterschied zu allen bisherigen Schaltungen liegt darin, dass bei keiner der Abgleichbedingungen die Frequenz der Speisespannung mit einging. Der Aufbau der Schaltung Abbildung 4 ist wieder ähnlich zu Abbildung 3. Allerdings werden anstelle des Potentiometers die Widerstände R_3 und R_4 variabel gewählt. Zudem wird parallel zu R_4 ein bekannter Kondensator geschaltet.

Mit der Abgleichbedingung ergeben sich nun folgende Formeln für die gesuchten Größen:

$$R_X = R_2 \frac{R_3}{R_4} \quad (9)$$

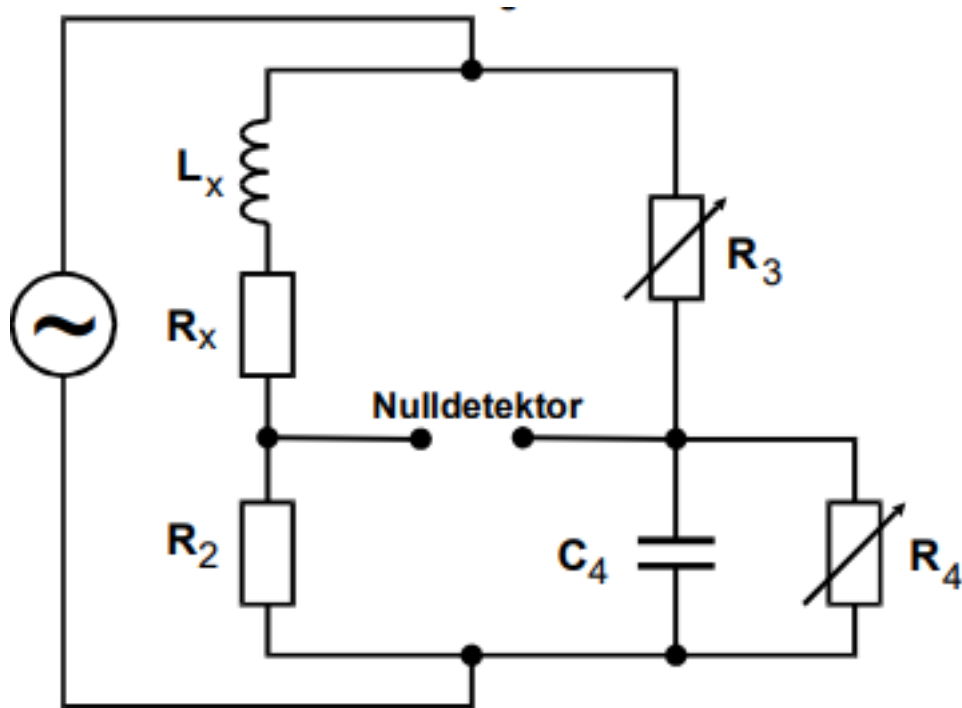


Abbildung 4: Maxwell-Brücke [1]

$$L_X = R_2 R_3 C_4 \quad (10)$$

2.5 Wien-Robinson-Brücke

Die Wien-Robinson-Brücke hat im Gegensatz zu den anderen keine Abgleichelemente und ist eine frequenzabhängige Brückenschaltung. Sie wird nicht zur Bestimmung von Widerständen verwendet, sondern als elektrischer Filter. Mithilfe dieser Schaltung soll im Rahmen des Versuchs die Frequenzabhängigkeit der Speisespannung und der Brückenspannung gemessen werden. Die Brückenspannung wird folgendermaßen bestimmt:

$$U_{Br} = \frac{\omega^2 R^2 C^2 - 1}{3(1 - \omega^2 R^2 C^2) + 9j\omega RC} U_S \quad (11)$$

Durch teilen von U_S und quadrieren ergibt sich folgende Formel:

$$\left| \frac{U_{Br}}{U_S} \right|^2 = \frac{(\omega^2 R^2 C^2 - 1)^2}{9[(1 - \omega^2 R^2 C^2)^2 + 9\omega^2 R^2 C^2]} \quad (12)$$

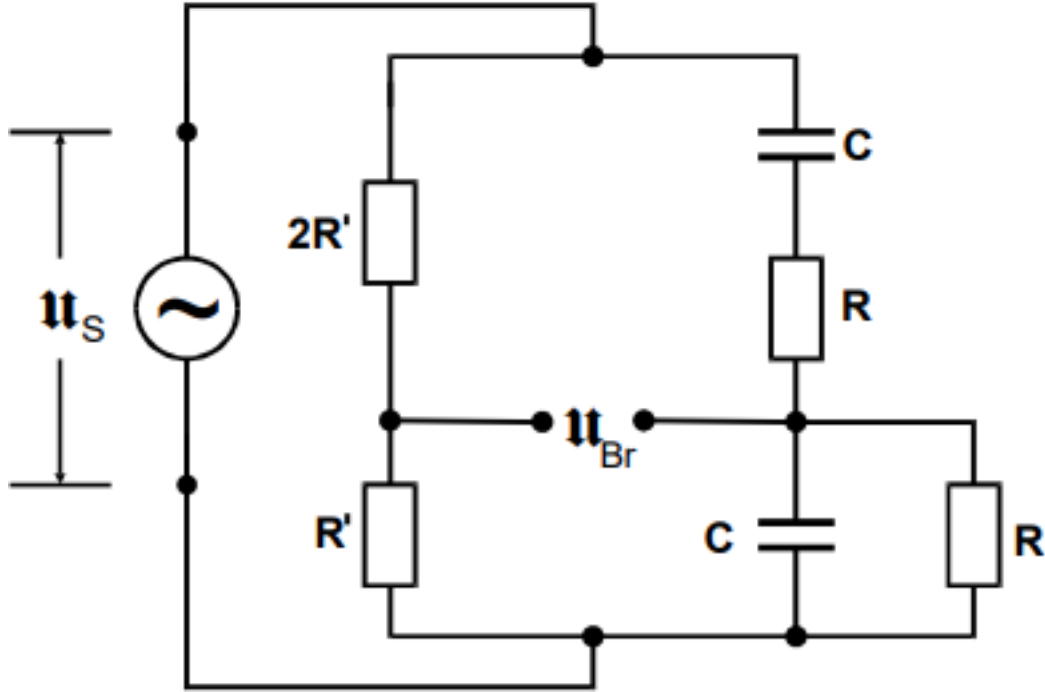


Abbildung 5: Wien-Robinson-Brücke [1]

Anhand Gleichung 12 erkennt man gut, dass die Brückenspannung verschwindet wenn $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ ist. Wir wählen zudem $\Omega := \frac{\omega}{\omega_0}$. Damit verkürzt sich Gleichung 12 zu:

$$\left| \frac{U_{Br}}{U_S} \right|^2 = \frac{(\Omega^2 - 1)^2}{9[(1 - \Omega^2)^2 + 9\Omega^2]} \quad (13)$$

Die Wien-Robinson-Brücke filtert aus einem kontinuierlichen Frequenzspektrum Schwingungen mit $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ und schwächt die in nächster Nähe stark. Bei realen Messungen wird aber trotzdem ein Wert gemessen, der durch Oberwellen verursacht wird. Das Verhältnis dieser Oberwellen kann durch den Klirrfaktor ausgedrückt werden:

$$k := \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^N U_i^2}}{U_1} \quad (14)$$

Wenn der Klirrfaktor Null ist, handelt es sich um einen idealen Sinusspannungsgenerators. Es werden also keine Oberwellen erzeugt.

3 Durchführung

Alle Brückenschaltungen werden mit einer Wechselspannung mit 1000 Hz betrieben und als Spannungsmessgerät wird ein digitales Oszilloskop benutzt.

3.1 Wheatstonesche Brückenschaltung

Die Schaltung wird nach Abbildung 1 aufgebaut und sich zwei unbekannte Widerstände ausgesucht. In diesem Fall wurden Wert 13 und Wert 14 verwendet. Für Wert 13 wird das Potentiometer zunächst solange verstellt, bis die gemessene Brückenspannung verschwindet. Dann werden alle bekannten Werte abgelesen und notiert. Dies wird für jeweils drei verschiedene bekannte Widerstände R_2 wiederholt. Anschließend wird das Ganze nochmal für Wert 14 durchgeführt.

3.2 Kapazitätsmessbrücke

Die Schaltung wird zunächst wie in Abbildung 2 aufgebaut und sich zwei Kondensatoren mit unbekannten Kapazitäten und in Reihe geschalteten unbekannten Widerständen rausgesucht. Hier wurde nur Wert 8 verwendet, da Wert 15 fehlerhafte Ergebnisse am Oszilloskop angezeigt hatte.

Das Potentiometer und der veränderliche Widerstand R_2 werden so lange verändert, bis die Brückenspannung minimal ist. Alle bekannten Werte werden wieder abgelesen und notiert.

3.3 Induktivitätsmessbrücke

Die Schaltung wird nach Abbildung 3 aufgebaut und analog zur Kapazitätsmessbrücke durchgeführt. Nur, dass anstelle des Kondensators C_2 nun eine bekannte Spule L_2 verwendet wird. Die Werte werden wieder abgelesen und notiert.

3.4 Maxwell-Brücke

Die Brückenschaltung wird wie in Abbildung 4 aufgebaut und sich dasselbe unbekannte Bauteil wie bei der Induktivitätsmessbrücke genommen, welches aus einer unbekannten Spule und einem unbekannten Ohm'schen Widerstand besteht. Die Widerstände R_3 und R_4 werden so lange variiert, bis die gemessene Brückenspannung Null wird. Dann werden wieder alle Werte notiert.

3.5 Wien-Robinson-Brücke

Die Schaltung wird wie in Abbildung 5 gezeigt aufgebaut. Bei diesem Versuch sind alle verwendeten Bauteile bekannt. Es wird die Spannungsfrequenz zwischen 20 und 30 000 Hz variiert und notiert wie sich die Brückenspannung U_{Br} dementsprechend verändert. Hierzu wurde bei 20 Hz begonnen und der nächste Wert immer als doppeltes des vorherigen genommen, also: 20 Hz, 40 Hz, 80 Hz... . Anschließend wurde die Speisespannung U_S nach dem gleichen Schema untersucht.

4 Auswertung

4.1 Fehlerrechnung

Da die baubedingten relativen Fehler bei den Bauteilen angegeben sind, lässt sich die Gaußsche Fehlerfortpflanzung zu

$$\Delta z = \bar{z} \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad (15)$$

für Größen der Form

$$z = x \cdot y$$

bestimmen. Δx und Δy sind dabei die relativen Fehler und \bar{z} ist der Mittelwert.

4.2 Wheatston'sche Messbrücke

Der relative Fehler für $\frac{R_3}{R_4}$ ist mit 0,5 % und der für R_2 ist mit 0,2 % angegeben. Die Werte für R_{14} und R_{13} sind in Tabelle 1 und 2 zu finden. Mit Hilfe von (4) lassen sich die Werte

$$\begin{aligned} R_{14} &= (704 \pm 631) \Omega \\ R_{13} &= (1724 \pm 1440) \Omega \end{aligned}$$

bestimmen. Die Fehler aus der Standarabweichung sind wesentlich größer als die angegebenen relativen Fehler.

$$\begin{aligned} \Delta R_{14} &= 4 \Omega \\ \Delta R_{13} &= 9 \Omega \end{aligned}$$

Tabelle 1: Messung von R_3 und R_4 für R_{14}

| R_2/Ω | R_3/Ω | R_4/Ω | R_{14}/Ω |
|--------------|--------------|--------------|-----------------|
| 332 | 243 | 757 | 106,6 |
| 664 | 392 | 608 | 428,1 |
| 1000 | 612 | 388 | 1577,3 |

4.3 Kapazitätsmessbrücke

Der relative Fehler für R_2 beträgt 3 % und der für C_2 ist mit 0,2 % angegeben. Der relative Fehler des Potentiometers ist gleich geblieben. C_2 ist als $C_2 = 597 \cdot 10^{-9} \text{ F}$ angegeben. Die Werte für C_8 und R_8 lassen sich in Tabelle 3 finden.

Mit Hilfe von (6) und (5) sind C_8 und R_8 bestimmt als

$$\begin{aligned} C_8 &= (578 \pm 146) \cdot 10^{-9} \text{ F} \\ R_8 &= (787 \pm 73) \Omega \end{aligned}$$

Tabelle 2: Messung von R_3 und R_4 für R_{13}

| R_2/Ω | R_3/Ω | R_4/Ω | R_{13}/Ω |
|--------------|--------------|--------------|-----------------|
| 332 | 579 | 421 | 456,6 |
| 664 | 595 | 405 | 975,5 |
| 1000 | 789 | 211 | 3739,3 |

Auch hier sind die Fehler aus der Standardabweichung wesentlich größer als die angegebenen relativen Fehler.

$$\Delta C_8 = 9 \cdot 10^{-9} \text{ F}$$

$$\Delta R_8 = 24 \Omega$$

Tabelle 3: Messung von C_8 und R_8

| R_2/Ω | R_3/Ω | R_4/Ω | $C_8/10^{-9}\text{F}$ | R_8/Ω |
|--------------|--------------|--------------|-----------------------|--------------|
| 500 | 640 | 360 | 336 | 889 |
| 600 | 580 | 420 | 432 | 829 |
| 700 | 480 | 520 | 647 | 646 |
| 800 | 491 | 509 | 619 | 772 |
| 900 | 470 | 530 | 673 | 789 |
| 1000 | 440 | 560 | 760 | 786 |

4.4 Induktivitätsmessbrücke

Der relative Fehler für R_2 und das Potentiometer ist gleich geblieben. Der baubedingte Fehler für L_2 ist als 0,2 % angegeben. Die Werte für L_{16} und R_{16} sind in Tabelle 4 angegeben. Mit (8) und (7) ergibt sich

$$L_{16} = (12,4 \pm 2,7) \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

$$R_{16} = (663 \pm 255) \Omega.$$

Die Fehler der Mittelwerte sind erneut größer als die der relativen Fehler.

$$\Delta L_{16} = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

$$\Delta R_{16} = 20 \Omega$$

4.5 Maxwellbrücke

Die relativen Fehler von R_3 und R_4 sind mit 3 % angegeben. Die für R_2 und C_2 betragen 0,2 %. Die Messwerte für L_{16} und R_{16} sind in Tabelle 5 zu finden. Mit (10) und (9) ergibt

Tabelle 4: Messung von L_{16} und R_{16}

| R_2/Ω | R_3/Ω | R_4/Ω | $L_{16}/10^{-3}\text{H}$ | R_{16}/Ω |
|--------------|--------------|--------------|--------------------------|-----------------|
| 500 | 342 | 638 | 268,0 | 7,8 |
| 600 | 430 | 570 | 452,6 | 11,0 |
| 700 | 492 | 508 | 678,0 | 14,1 |
| 800 | 445 | 555 | 641,4 | 11,7 |
| 900 | 527 | 473 | 1002,7 | 16,3 |
| 1000 | 532 | 568 | 936,6 | 13,7 |

sich

$$L_{16} = (91,9 \pm 47,7) \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

$$R_{16} = (239 \pm 150) \Omega.$$

Auch hier sind die Fehler der Standardabweichung wieder wesentlich größer als die angegebene relativen Fehler.

$$\Delta L_{16} = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

$$\Delta R_{16} = 1 \Omega$$

Tabelle 5: Messung von L_{16} und R_{16}

| R_3/Ω | R_4/Ω | $L_{16}/10^{-3}\text{H}$ | R_{16}/Ω |
|--------------|--------------|--------------------------|-----------------|
| 222 | 500 | 132,5 | 444 |
| 218 | 600 | 130,1 | 363 |
| 210 | 700 | 125,4 | 300 |
| 175 | 800 | 104,5 | 219 |
| 95 | 900 | 56,7 | 106 |
| 4 | 1000 | 0,2 | 4 |

4.6 Wien-Robinson-Brücke

Es soll die Frequenzabhängigkeit der Brückenspannung untersucht werden. Dazu wird der Quotient aus effektiver Brückenspannung $U_{Br,eff}$ und Speisespannung U_s gegen $\Omega = \frac{f}{f_0}$ aufgetragen und eine Theoriekurve eingezeichnet. Die Messwerte sind in Tabelle 7 eingetragen. Die Theoriekurve bestimmt sich aus (12) und ist in Abbildung 6 aufgezeichnet. Die effektive Brückenspannung ist gegeben durch

$$U_{Br,eff} = \frac{U_{Br}}{2\sqrt{2}}.$$

Die Werte der verwendeten Bauteile lassen sich in Tabelle 6 finden. f_0 bestimmt sich durch

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} = \frac{1}{1000 \Omega \cdot 660 \cdot 10^{-9} \text{ F}} = 1515 \text{ Hz}$$

$$\Leftrightarrow f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = 241 \text{ Hz}$$

Tabelle 6: Bauteile der Wien-Robinson-Brücke

| R/Ω | R'/Ω | $2R'/\Omega$ | $C/10^{-9}\text{F}$ |
|------------|-------------|--------------|---------------------|
| 1000 | 332 | 664 | 660 |

Tabelle 7: Spannung in Abhängigkeit von der Frequenz des Sinusgenerators

| f/Hz | $U_{Br}/10^{-3}\text{V}$ | $U_{Br,eff}/10^{-3}\text{V}$ | $U_S/10^{-3}\text{V}$ |
|---------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------|
| 20 | 560 | 198 | 2500 |
| 40 | 510 | 180 | 2500 |
| 80 | 390 | 138 | 2600 |
| 160 | 150 | 53 | 2700 |
| 220 | 40 | 14 | 2750 |
| 240 | 2 | 0,71 | 2750 |
| 260 | 30 | 11 | 2750 |
| 280 | 60 | 21 | 2750 |
| 320 | 100 | 35 | 2750 |
| 640 | 320 | 113 | 2700 |
| 1280 | 500 | 177 | 2600 |
| 2560 | 560 | 198 | 2600 |
| 5120 | 600 | 212 | 2500 |
| 10240 | 580 | 205 | 2500 |
| 20480 | 400 | 141 | 2300 |
| 30000 | 300 | 106 | 1000 |

Es fällt auf, dass die Messwerte immer mehr von der Theoriekurve abweichen, je weiter sie vom Minimum entfernt sind. Dies spricht für eine ungenaue Messung. Weiterhin lässt sich die Abweichung um das Minimum herum durch einen relativ hohen Klirrfaktor erklären. Nichts desto trotz ist eine Ähnlichkeit zur Theoriekurve feststellbar.

Der Klirrfaktor bestimmt sich durch (14). Dabei wird die Näherung verwendet, dass die Summe der Oberwellen nur von der zweiten Oberwelle abhängt. Dementsprechend werden nur noch U_1 und U_2 benötigt. U_1 ist durch 2,75 V von U_s bei f_0 gegeben. U_2 bestimmt

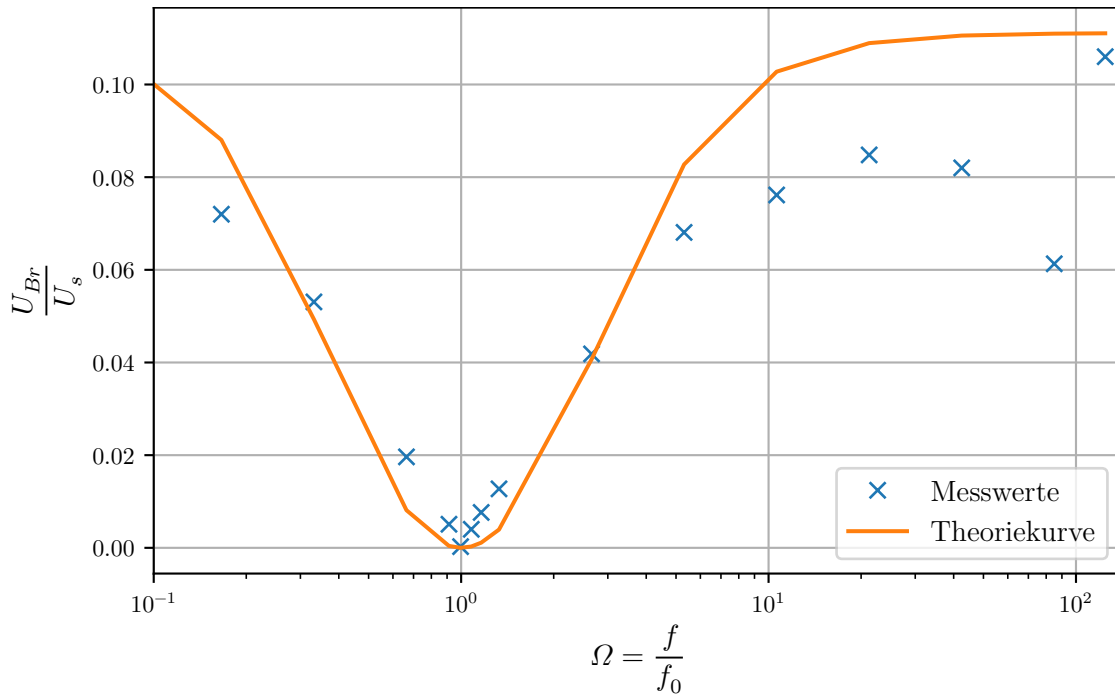


Abbildung 6: Abgleich mit Theoriekurve

sich aus (12) und $\Omega = 2$ zu

$$U_2 = \frac{0,71 \text{ V}}{\sqrt{\frac{(2^2-1)^2}{9((1-2^2)^2+9\cdot 2^2)}}} = 4,76 \text{ V}.$$

Der Klirrfaktor ergibt sich dann zu

$$k = \frac{U_2}{U_1} = \frac{4,76 \text{ V}}{2,75 \text{ V}} = 1,73.$$

5 Diskussion

Allgemein fällt auf, dass die Fehler der Messwerte, die sich aus der Standardabweichung ergeben, wesentlich größer als die angegebenen baubedingten Fehler sind. Da der Versuchsaufbau korrekt umgesetzt wurde, bleibt als Fehlerquelle lediglich die Genauigkeit der Bauelemente. Dabei ist fest zu stellen, dass die Bauelemente alle relativ alt sind. Besonders sei dabei das Potentiometer erwähnt, da es bei leichtem Verstellen schon für enorme Abweichungen, die sich selbst nach einer Wartezeit nicht verbessert haben, bei der Messung gesorgt hat.

Weiterhin ist die Abweichung für L_{16} und R_{16} ziemlich groß, obwohl die Werte einmal mit einer Induktivitäts- und einmal mit einer Maxwellbrücke bestimmt wurden. Die Werte von L_{16} weichen um 641,13 % voneinander ab. Die Werte von R_{16} weichen um 177,41 % voneinander ab.

Weiterhin scheint auch der Sinusgenerator größere Ungenauigkeiten zu haben, da ein relativ hoher Klirrfaktor von $k = 1,73$ bestimmt wurde. Dieser reicht aber aus, um die Abweichungen von der Theoriekurve zu erklären. Der Klirrfaktor scheint sich dabei besonders auf die höheren Frequenzen auszuwirken.

6 Messwerte

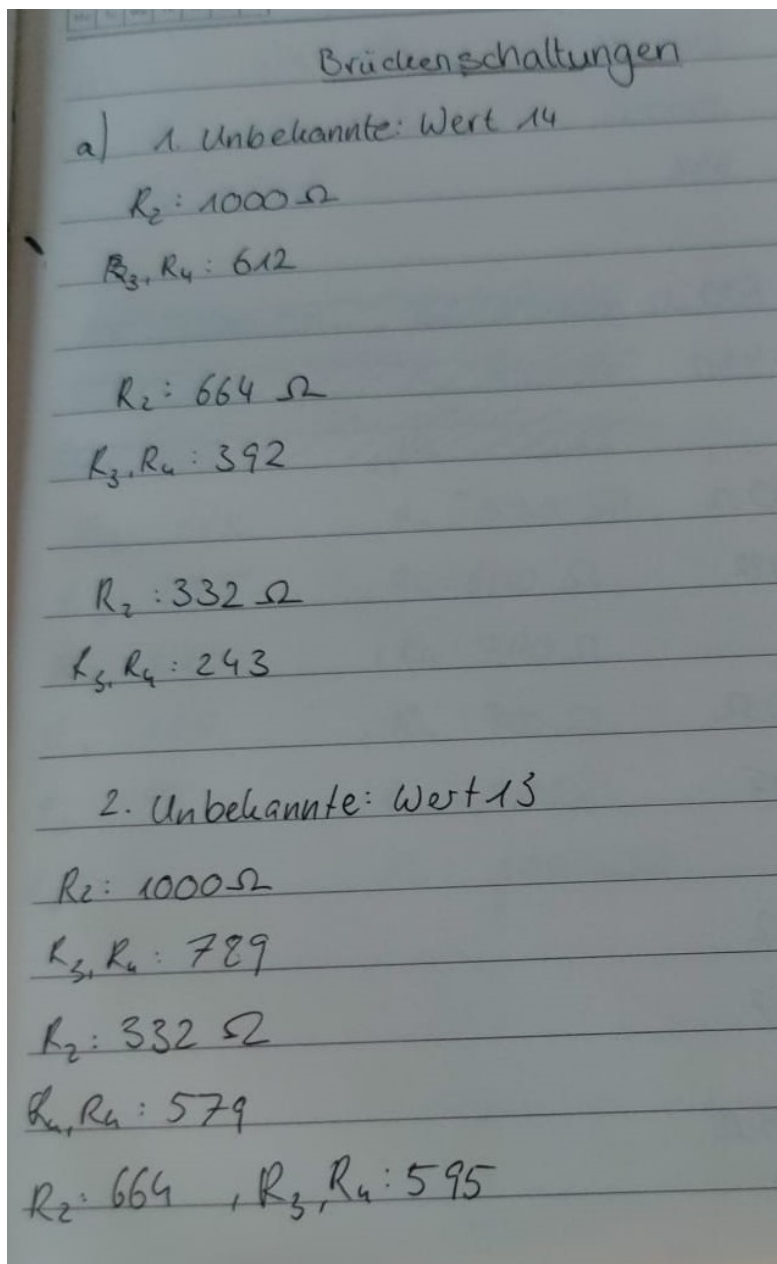


Abbildung 7: Messdaten 1

| | | |
|----|-------------|-----------------|
| 6) | Wert 8 | $C_2: 597nF$ |
| | $R_2: 500$ | $R_3, R_4: 640$ |
| | $R_2: 600$ | " : 580 |
| | $R_2: 700$ | " : 480 |
| | $R_2: 800$ | " : 491 |
| | $R_2: 900$ | " : 470 |
| | $R_2: 1000$ | " : 440 |
| | | |
| | Wert 15 | $C_2: 597nF$ |
| | $R_2: 500$ | $R_3, R_4:$ |
| | $R_2: 600$ | " : |
| | " : 700 | " : |
| | " : 800 | " : |
| | " : 900 | " : |
| | " : 1000 | " : |

Abbildung 8: Messdaten 2

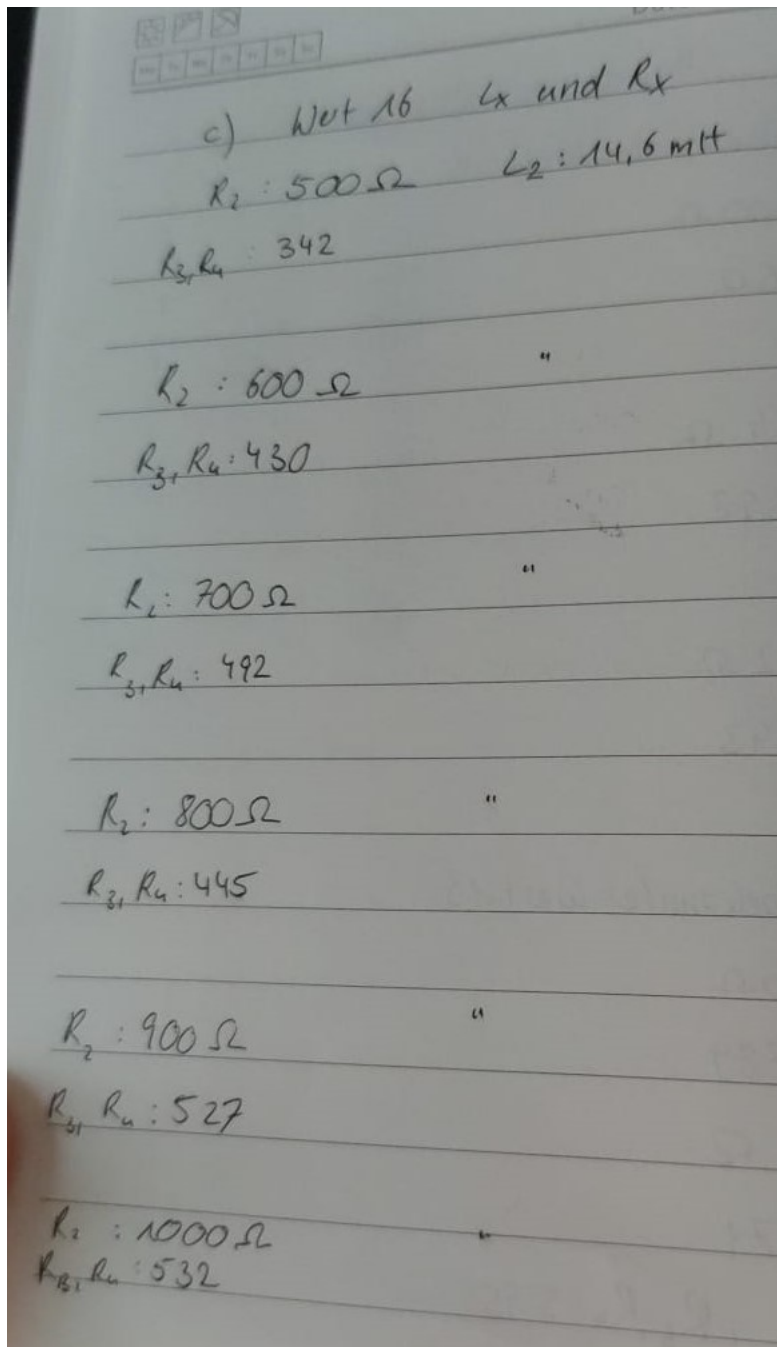


Abbildung 9: Messdaten 3

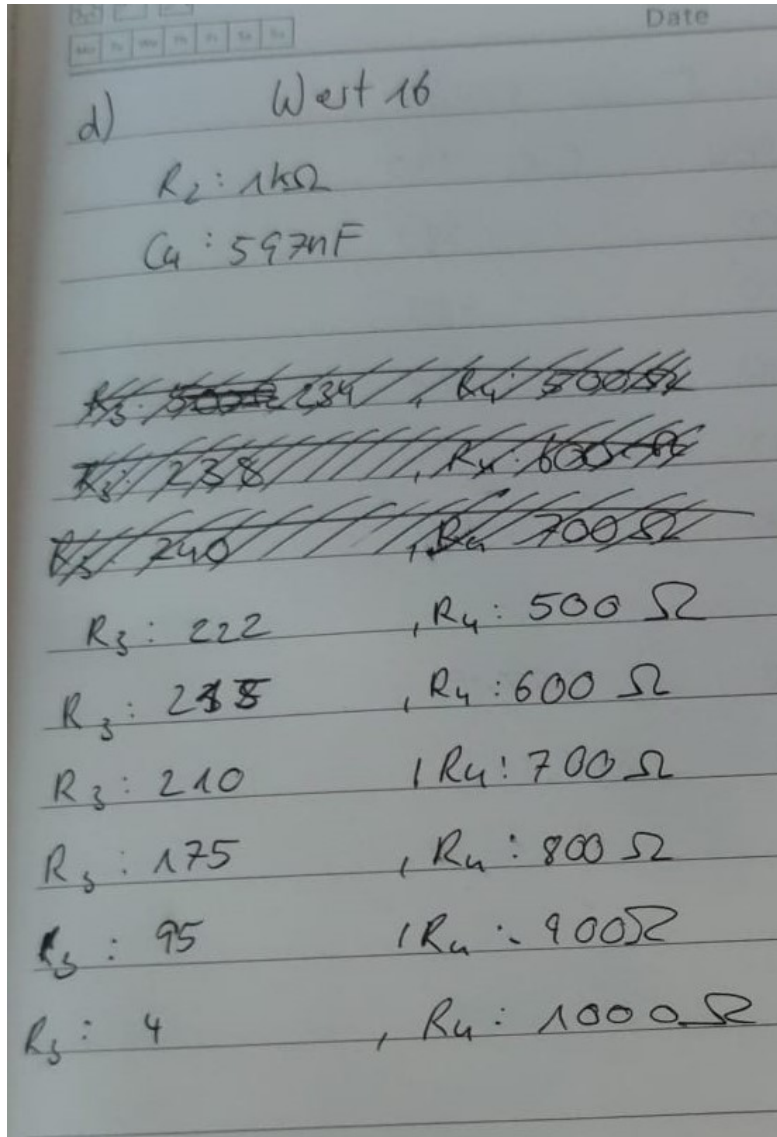


Abbildung 10: Messdaten 4

e) $C = 660 \text{ nF}$
 $R' = 332 \Omega$ $2R' = 664 \Omega$
 $R = 1 \text{ k}\Omega$

| U_R | φ | U_s |
|--------------------|--------------------------------------|----------------------|
| 560 510 | 20 | 2500 V |
| 390 | 40 | |
| | 80 | U_{gr} 2600 |
| 128 150 | 160 | 2700 |
| 100 | 320 | 2750 |
| 320 | 640 | 2800 |
| 500 | 1280 | 2800 |
| 560 | 2560 | 2600 2600 |
| 600 | ¹ 4425 5620 | 2600 2500 |
| 580 | 10240 | 2600 2500 |
| 400 | 20480 | 2600 2300 |
| 300 | 40960 30000 | 2600 1800 |

K. POPP

Abbildung 11: Messdaten 5

Literatur

- [1] Versuchsanleitung zu *“Elektrische Brückenschaltungen”*.