

V302

Elektrische Brückenschaltungen

Umut Aydinli
umut.aydinli@tu-dortmund.de

Muhammed-Sinan Demir
sinan.demir@tu-dortmund.de

Durchführung: 17.11.2021

Abgabe: 14.01.2022

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| 1 Zielsetzung | 3 |
| 2 Theorie | 3 |
| 2.1 Wheatstonesche Brücke | 5 |
| 2.2 Kapazitätsmessbrücke | 6 |
| 2.3 Induktivitätsmessbrücke | 6 |
| 2.4 Maxwell-Brücke | 7 |
| 2.5 Wien-Robinson-Brücke | 8 |
| 3 Versuchsaufbau und Versuchdurchführung | 10 |
| 3.1 Wheatstonesche Brücke | 10 |
| 3.2 Kapazitätsmessbrücke | 10 |
| 3.3 Induktivitätsmessbrücke | 10 |
| 3.4 Maxwell-Brücke | 11 |
| 3.5 Wien-Robinson-Brücke | 11 |
| 4 Auswertung | 11 |
| 4.1 Wheatstonesche Brücke | 11 |
| 4.2 Kapazitätmessbrücke | 12 |
| 4.3 Induktivitätsbrücke | 12 |
| 4.4 Maxwell-Brücke | 13 |
| 4.5 Wien-Robinson-Brücke | 13 |
| 5 Diskussion | 16 |
| 6 Anhang | 17 |
| Literatur | 19 |

1 Zielsetzung

In dem Versuch geht es um die Bestimmung von Messgrößen wie Widerständen, Kapazitäten und Induktivitäten durch verschiedene elektrische Brückenschaltungen. Ebenso wird durch die Wien-Robinson-Brücke die Frequenzabhängige Spannung ermittelt.

2 Theorie

Brückenschaltungen sind eine häufig verwendete Methode in der Messtechnik, weil diese die Auflösung einer Messung erhöhen. Durch Verwenden der Nullmethode gelingt dies insbesondere. In diesem Versuch wird die Nullmethode durch die abgeglichenen Brücken realisiert. Ebenso sind jegliche physikalische Größen gut messbar, wenn diese sich als elektrischer Widerstand, bzw. als Impedanz, darstellen lassen.

Um die Brückenspannung und die dazugehörige Abgleichbedingung zu berechnen, untersucht man die Potentialdifferenz der Schaltung, welche in zwei Punkten auf zwei getrennten stromdurchflossenen Leitern gemessen wird. Diese Potentialdifferenz steht in Abhängigkeit mit dem Widerstandsverhältnis der Schaltung. Eine „normale“ Brückengleichung ist in Abbildung 1 zu sehen.

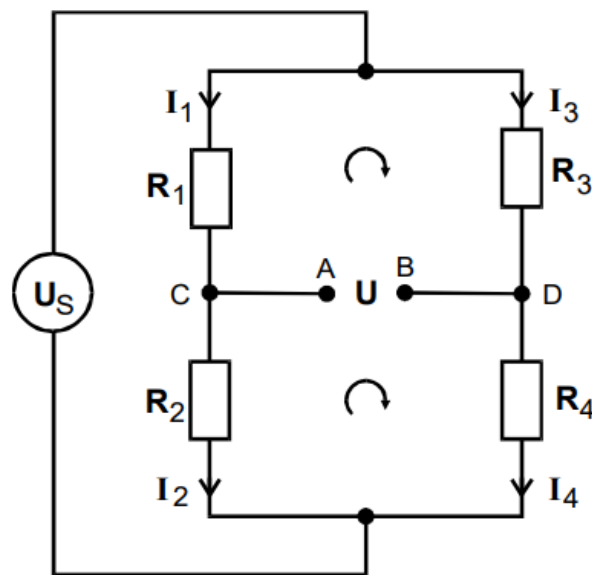


Abbildung 1: Eine Abbildung einer einfachen Brückenschaltung [1].

Die Spannung U zwischen den beiden Punkten wird als Brückenspannung bezeichnet. Die Berechnung dieser Spannung beruht auf den zwei Kirchhoffschen Gesetzen.

Das erste Kirchhoffsche Gesetz besagt, dass die Summe der zufließenden Ströme gleich der Summe der abfließenden Ströme in einem Verzweigungspunkt ist.

$$\sum_k I_k = 0$$



Abbildung 2: Die Abbildung eines Knotenpunktes mit einer Leitzerverzweigung [1].

Das zweite Kirchhoffsche Gesetz besagt, dass die Summe aller Spannungen einer beliebig gewählten Masche des Schaltkreises gleich null ist.

$$\sum_k U_k = 0.$$

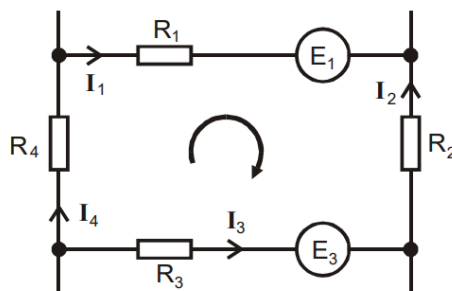


Abbildung 3: Die Abbildung einer Masche [1].

Wenn der Strompfeil im Uhrzeigersinn läuft, ist die Spannung positiv zu rechnen. Wenn der Strompfeil gegen den Uhrzeigersinn läuft, ist die Spannung negativ zu rechnen.

Durch die beiden Kirchhoffschen Gesetze ergibt sich die Formel für die Brückenspannung in Abhängigkeit von den Schaltungsparametern

$$U_{\text{Br}} = \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_3 + R_4)(R_1 + R_2)} U_S \quad (1)$$

mit

$$U_S = I_1 (R_1 + R_2). \quad (2)$$

Wenn die Widerstände so gewählt werden, dass die Brückenspannung, welche unabhängig von der Speisespannung ist, verschwindet, ergibt sich die sogenannte Abgleichbedingung:

$$R_1 R_4 = R_2 R_3.$$

Ebenfalls wichtig sind die Impedanzen bei Brückenschaltungen. Unter einer Impedanz wird die Zusammenarbeit von Blind- und Wirkwiderstand verstanden. Der Wirkwiderstand X steht hierbei für den Realteil und der Blindwiderstand Y für den imaginären Teil.

$$\xi = X + iY$$

2.1 Wheatstonesche Brücke

Die Wheatstonesche Brücke ist eine Widerstandsmessbrücke und enthält dadurch nur ohmsche Widerstände. Betrieben kann diese mit Gleich- sowie Wechselstrom, wobei der Nullindikator entsprechend der Stromart gewählt werden muss. In Abbildung 4 ist die Wheatstonesche Brückenschaltung gezeigt.

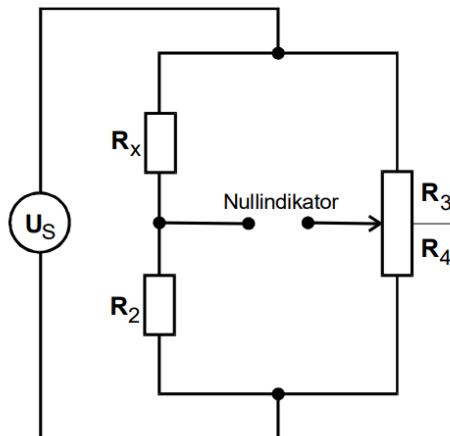


Abbildung 4: Die Abbildung einer Wheatstonesche Brücke [1].

Die Bestimmung des unbekannten Widerstandes erfolgt durch die Formel

$$R_x = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}. \quad (3)$$

2.2 Kapazitätsmessbrücke

Die Kapazitätsmessbrücke ist eine Schaltung, in welcher Kondensatoren hinzugefügt werden. Durch den Kondensator, welcher neben dem Speichern von Energie auch andere Eigenschaften mit sich bringt, wie die Umwandlung von elektrischer Energie zu Wärmeenergie. Der Kondensator ist in Reihe mit einem ohmschen Widerstand geschaltet, aufgrund der Eigenschaft des realen Kondensators. Das Schaltkreisbild der Kapazitätsmessbrücke ist zu sehen in Abbildung 5.

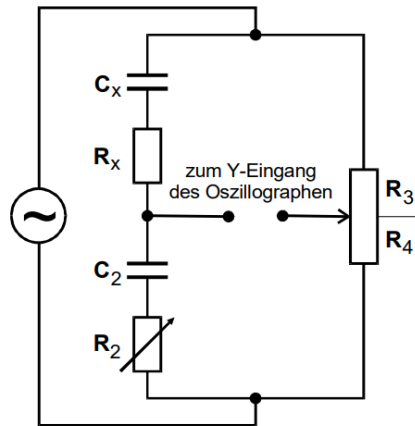


Abbildung 5: Die Abbildung einer Kapazitätsmessbrücke [1].

Die Abgleichbedingung für die Kapazitätsmessbrücke lauten

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

und

$$C_x = C_2 \frac{R_4}{R_3}. \quad (5)$$

2.3 Induktivitätsmessbrücke

Bei der Induktivitätsbrücke wird in dem Schaltbild der Kapazitätsmessbrücke der Kondensator durch eine Spule ersetzt, welche ein Teil der magnetischen Feldenergie in Wärme umwandelt.

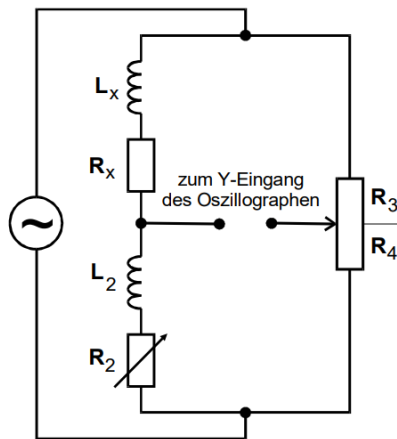


Abbildung 6: Die Abbildung einer Induktivitätsmessbrücke [1].

Die Abgleichbedingung für R_x ist identisch mit der, der Kapazitätsmessbrücke, für die Induktivität gilt jedoch

$$L_x = L_2 \frac{R_3}{R_4}. \quad (6)$$

2.4 Maxwell-Brücke

Die Maxwell-Brücke ist eine weitere Induktivitätsmessbrücke, welche für die Messung der Induktivität verwendet wird. Hierbei fällt die Spule L_2 weg, weil die Spule möglichst geringe Verluste vorweisen sollte und dadurch der Widerstand R_2 den Wirkanteil realisiert. Bei niedrigen Frequenzen ist dies jedoch schwer zu realisieren, weswegen man die Maxwell-Brücke verwendet. Der Widerstand R_2 wird als bekannten Widerstand genommen, aufgrund der möglichst verlustarmen Kapazität C_4 , R_3 und R_4 sind beide Regelwiderstände, wobei R_4 parallel zu dem Kondensator C_4 geschaltet ist. Das Schaltbild zu der Maxwell-Brücke wird in Abbildung 7 gezeigt.

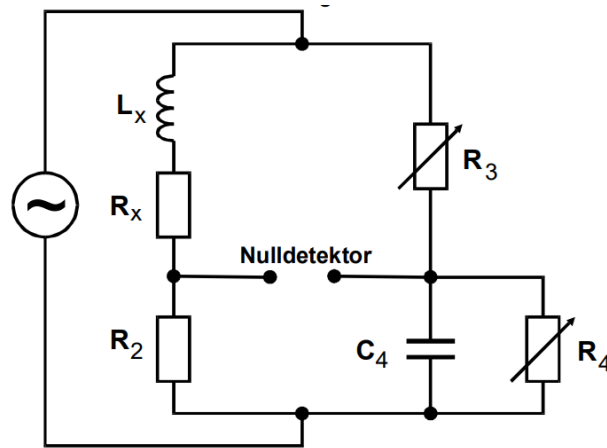


Abbildung 7: Die Abbildung einer Maxwell-Brücke [1].

Die Abgleichbedingungen für die Maxwell-Brücke ergeben sich durch

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

und

$$L_x = R_2 R_3 C_4. \quad (8)$$

2.5 Wien-Robinson-Brücke

Die Wien-Robinson-Brücke verfügt über keine Abgleichelemente, was bedeutet, dass alle Impedanzen bekannt sind. Deswegen sollten die Bauteile dieser Schaltung, C , R und R' , eine möglichst geringe Toleranz haben. Die Kondensatoren sollten dazu ebenfalls geringe Verluste haben. Durch das Ändern der Frequenz wird bei dieser Schaltung dieser Abgleich durchgeführt, was bedeutet, dass die Wien-Robinson-Brücke als elektronischer Filter funktioniert. Deutlich wird dies in der Aufstellung der Gleichung für das Verhältnis der Brückenspannung zur Speisespannung.

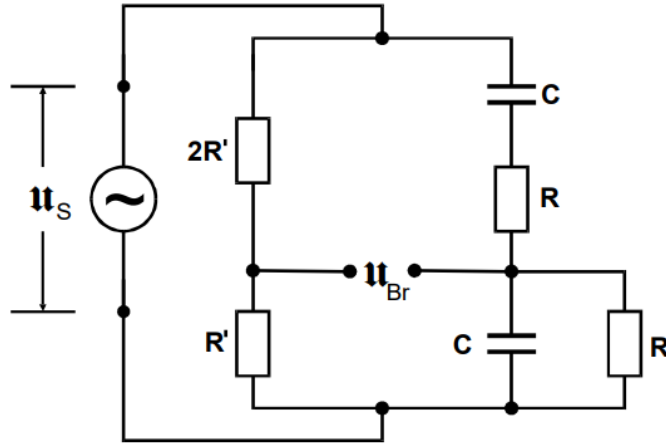


Abbildung 8: Die Abbildung einer Wien-Robinson-Brücke [1].

Die Brückenspannung setzt sich hierbei zusammen aus

$$U_{\text{Br}} = \frac{\omega^2 R^2 C^2 - 1}{3(1 - \omega^2 R^2 C^2) + 9i\omega RC} U_S.$$

Das darausfolgende Verhältnis zwischen Speise- und Brückenspannung

$$\left| \frac{U_{\text{Br}}}{U_{\text{Sp}}} \right|^2 = \frac{(\omega^2 R^2 C^2 - 1)}{9((1 - \omega^2 R^2 C^2)^2 + 9\omega^2 R^2 C^2)} \quad (9)$$

mit

$$\omega_0 = \frac{1}{RC}$$

und dem Frequenzverhältnis

$$\Omega = \omega / \omega_0$$

wird die Gleichung (9) vereinfacht zu

$$\left| \frac{U_{\text{Br}}}{U_{\text{Sp}}} \right|^2 = \frac{1}{9} \frac{(\Omega^2 - 1)^2}{(1 - \Omega^2) + 9\Omega^2}. \quad (10)$$

Bei einer Frequenz von ω_0 sollte keine Brückenspannung mehr zu sehen sein. In der Theorie klappt es, aber in der Realität wird trotzdem ein minimaler Wert angegeben, der sich durch Oberwellen erklären lässt. Das Verhältnis von Oberwellengehalt zur Grundwelle wird durch den Klirrfaktor ausgedrückt:

$$\kappa = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^N U_i^2}}{U_1} \quad (11)$$

3 Versuchsaufbau und Versuchdurchführung

3.1 Wheatstonesche Brücke

Die Schaltung wird wie in Abbildung 4 aufgebaut. Das Potentiometer wird so eingestellt, dass die Brückenspannung verschwindet. Wenn das Potentiometer so variiert wurde, dass die Brückenspannung verschwindet, werden die Werte für R_3 und R_4 notiert. R_2 ist ein fest gewählter Widerstand und R_x wird durch die Formel (3) berechnet. Dieser Durchgang wird für drei verschiedene R_2 Widerstände wiederholt, für jeweils zwei verschiedene unbekannte R_x Widerstände.

3.2 Kapazitätsmessbrücke

Die Schaltung wird wie in Abbildung 5 aufgebaut. Man stellt das Potentiometer R_2 und R_3 wieder so ein, dass die Brückenspannung verschwindet und notiert die Werte für R_2 , R_3 und R_4 . Der Wert für C_2 ist fest gewählt, R_x wird durch die Formel (4) und C_x durch die Formel (5) bestimmt. Dies wird einmal wiederholt, danach werden die Widerstände R_x und R_2 ausgebaut und der Versuch wird ein weiteres mal ausgeführt und es werden die Messwerte für R_3 und R_4 notiert.

3.3 Induktivitätsmessbrücke

Die Schaltung wird wie in Abbildung 6 aufgebaut und die Potentiometer R_2 und R_3 werden erneut so eingestellt, dass die Brückenspannung verschwindet. Die Werte die aufgenommen werden sind wieder R_2 , R_3 und R_4 . Der Wert für L_2 ist fest gewählt, R_x wird durch die Formel (4) und L_x durch die Formel (6) bestimmt. Dies wird nur einmal durchgeführt.

3.4 Maxwell-Brücke

Die Schaltung wird wie in Abbildung 7 aufgebaut und erneut werden wie vorher die Potentiometer, welche diesmal R_3 und R_4 sind, so eingestellt, dass die Brückenspannung verschwindet. Der Widerstand R_2 ist diesmal fest gewählt, genauso wie der Kondensator C_4 und die Werte für R_3 und R_4 werden notiert. Der Widerstand R_x wird über die Formel (7) und die Spule L_x über die Formel (8) berechnet. Dadurch dass die Maxwell-Brücke eine weitere Induktivitätsbrücke ist, ist der Wert für die Spule L_x genauer als der Wert für L_x von der Induktivitätsmessbrücke.

3.5 Wien-Robinson-Brücke

Die Schaltung wird wie in Abbildung 8 aufgebaut. Hierbei wird kein Bauteil bestimmt oder variiert, sondern die Brückenspannung für verschiedene Frequenzen ermittelt. Die Frequenzen werden im Bereich von $20 \text{ Hz} \leq \nu \leq 30000 \text{ Hz}$ variiert und die Spannungen U_{Br} aufgenommen und notiert.

4 Auswertung

4.1 Wheatstonesche Brücke

Der Unbekannte R_x wird mit der Hilfe der Formel (4) berechnet.

Tabelle 1: Die Messwerte der Wheatstoneschen Brücke mit dem R_x für Wert 10.

| | Messung 1 | Messung 2 | Messung 3 |
|-------|-----------------|-----------------|-----------------|
| R_x | 237,46 Ω | 229,81 Ω | 238,44 Ω |
| R_2 | 500 Ω | 644 Ω | 332 Ω |
| R_3 | 322 Ω | 263 Ω | 418 Ω |
| R_4 | 678 Ω | 737 Ω | 582 Ω |

Der Wert R_x wird gemittelt und die dazugehörige Abweichung berechnet

$$R_{x, \text{Wert 10}} = (235,24 \pm 4,72) \Omega.$$

Tabelle 2: Die Messwerte der Wheatstoneschen Brücke mit dem R_x für Wert 13.

| | Messung 1 | Messung 2 | Messung 3 |
|-------|-----------------|-----------------|------------------|
| R_x | 318,98 Ω | 318,33 Ω | 316,790 Ω |
| R_2 | 332 Ω | 500 Ω | 644 Ω |
| R_3 | 490 Ω | 389 Ω | 323 Ω |
| R_4 | 510 Ω | 611 Ω | 677 Ω |

Daraus folgt

$$R_{x, \text{Wert } 13} = (318,03 \pm 1,12) \Omega.$$

4.2 Kapazitätsmessbrücke

Die Berechnung der Werte C_x und R_x folgt nach den Formeln (4) und (5).

Tabelle 3: Die Messwerte der Kapazitätsmessbrücke mit dem R_x für Wert 15 und Wert 11.

| | Messung 1 | Messung 2 |
|-------|--------------|--------------|
| C_2 | 399 nF | 399 nF |
| R_2 | 805 Ω | 0 Ω |
| R_3 | 359 Ω | 376 Ω |
| R_4 | 611 Ω | 624 Ω |
| C_x | 626 nF | 662 nF |
| R_x | 512 Ω | 0 Ω |

Die Berechnung wird gemittelt und die Standardabweichung gebildet.

$$C_{x, \text{Wert } 15} = (644 \pm 25,45) \text{ nF}.$$

4.3 Induktivitätsbrücke

Mit Hilfe der Formeln (6) und (4), sowie mit einer eingestellten Frequenz von $\nu = 1076 \text{ Hz}$, ergeben sich folgende Werte.

Tabelle 4: Die Messwerte der Induktivitätsmessbrücke mit dem L_x und R_x für den Wert 18.

| | Messung 1 |
|-------|--------------|
| L_2 | 14,6 mH |
| R_2 | 90 Ω |
| R_3 | 820 Ω |
| R_4 | 180 Ω |
| L_x | 66,5 mH |
| R_x | 410 Ω |

4.4 Maxwell-Brücke

Die Messwerte L_x und R_x ergeben sich über die Formeln (7) und (8).

Tabelle 5: Die Messwerte der Maxwell-Brücke mit L_x und R_x für den Wert 18.

| Messung 1 | |
|-----------|-------------------|
| R_2 | 664Ω |
| R_3 | 205Ω |
| R_4 | 420Ω |
| C_4 | 399 nF |
| L_x | $54,3 \text{ mH}$ |
| R_x | 324Ω |

4.5 Wien-Robinson-Brücke

Die Frequenzabhängigkeit der Brückenspannung wird im Bereich $20 \text{ Hz} \leq v \leq 30000 \text{ Hz}$ untersucht. Dazu wird der Quotient $\frac{U_{Br}}{U_s}$ gegen $\Omega = \frac{v}{v_0}$ in einem halbalogarithmischen Diagramm aufgetragen.

Ab welcher Frequenz die Brückenspannung verschwinden sollte, wird nach den folgenden Formeln berechnet:

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} = \frac{1}{1000 \Omega \cdot 660 \text{ nF}} = 1515,15 \text{ Hz}$$
$$v_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi RC} = 241,14 \text{ Hz}.$$

Tabelle 6: Die Messwerte der frequenzabhängigen Spannung.

| v / Hz | U_{Br} / V |
|----------|---------------------|
| 20 | 3,20 |
| 50 | 2,80 |
| 100 | 1,98 |
| 150 | 1,10 |
| 200 | 0,44 |
| 220 | 0,20 |
| 230 | 0,10 |
| 240 | 0,017 |
| 250 | 0,085 |
| 260 | 0,17 |
| 280 | 0,34 |
| 300 | 0,48 |
| 400 | 1,15 |
| 500 | 1,60 |
| 750 | 2,30 |
| 1000 | 2,60 |
| 2000 | 3,10 |
| 5000 | 3,20 |
| 10000 | 3,05 |
| 15000 | 2,80 |
| 20000 | 2,30 |

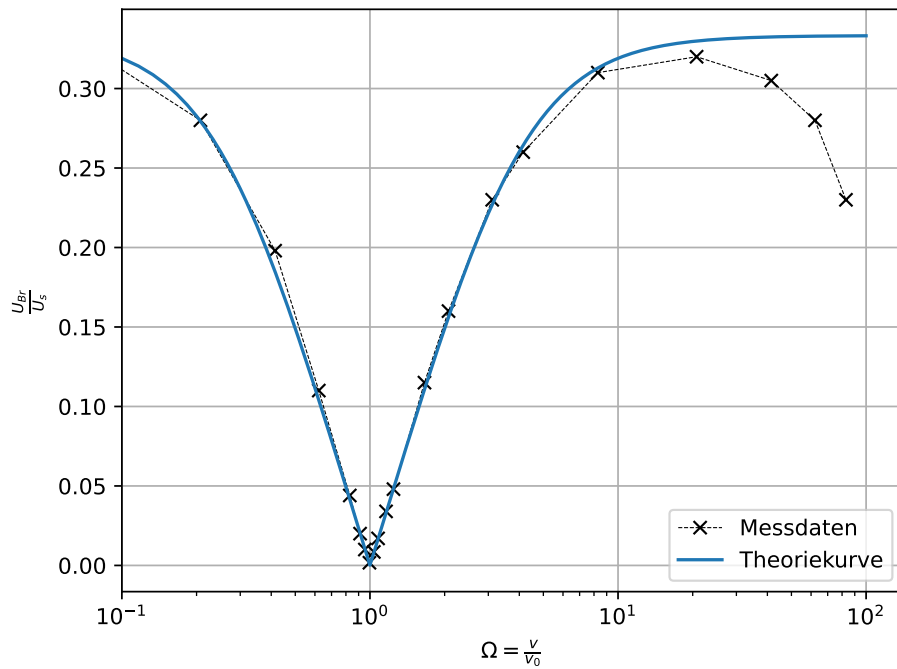


Abbildung 9: Die graphische Darstellung der Messwerte für die frequenzabhängige Spannung mit der Ausgleichsfunktion.

Wie an der Kurve zu erkennen, verschwindet die Brückenspannung bei ungefähr $V_0 = 240 \text{ Hz}$. Für die Bestimmung des Klirrfaktors wird die Formel (11) benutzt. Wie zu erkennen, benötigt man den Wert U_2 , welcher aus (10) errechnet werden kann. Dabei ist $U_1 = 10 \text{ V}$ aus U_s . Daraus folgt mit $\Omega = 2$:

$$U_2 = \frac{0,004\text{V}}{\sqrt{\frac{(2^2-1)^2}{9(1-2^2)^2+9\cdot 2^2}}} = 0,01442 \text{ V}.$$

Anschließend folgt für den Klirrfaktor

$$k = \frac{U_2}{U_1} = 1,442 \cdot 10^{-3}.$$

5 Diskussion

Werden die einzelnen Bauteile in Betracht gezogen, so fällt auf, dass die meisten Abweichungen von den Bauteilen ausgehen. Dabei sind die Abweichungen gering, was dazu führt, dass die Bestimmung der gesuchten Werte nahezu gleich sind. Wie bei der Wheatstoneschen Brücke, besitzt die bestimmte Größe eine relative Abweichung von $-1,56\%$ vom Literaturwert $R_{x,10} = 239\,\Omega$. Für den Wert 13 beträgt die Abweichung $-0,3\%$, welcher sich im Toleranzbereich befindet. Bei der Kapazitätsmessbrücke, welche eine Eichgenauigkeit von 3% laut Hersteller besitzt [1], hat eine relative Abweichung von $-1,22\%$. Auffällig ist, dass der bei der Wheatstoneschen Brücke sowie der Kapazitätsmessbrücke, die jeweiligen Abweichungen größtenteils sich im Toleranzbereich befindet. Beim Vergleich der Messung mit der Induktivitätsbrücke sowie der Maxwell-Brücke, so fällt auf, dass die Messwerte sich deutlich vom Literaturwert $L_{18} = 49,82\,\text{mH}$ und $R_{18} = 360,5\,\Omega$ unterscheiden. Bei der Induktivitätsmessbrücke beträgt die relative Abweichung der Induktivität $33,48\%$ und der Widerstand $13,88\%$. Bei der Maxwell-Brücke ist die Abweichung deutlich kleiner, mit $8,99\%$ bei der Induktivität und -10% bei der Bestimmung des Innenwiderstandes. Der Unterschied lässt sich darauf hinweisen, dass die Induktivitätsmessbrücke keinem Innenwiderstand besitzt, wodurch sich dann die Verluste durch auftretende Wärmeenergie vorweisen lässt. Dabei besitzt die Maxwell-Brücke einen eingebauten Kondensator C_4 , wodurch sich das Ergebnis deutlich näher am Toleranzbereich befindet. Dennoch treten kleine Abweichungen auf, die aber auf das menschliche Geschick zurückzuführen sind. Bei Beobachtung sowie das präzise Einstellen des Reglers, bis zum Verschwinden der Brückenspannung, weist ebenso auf eine mögliche Abweichung. Die Vermutung, dass eine Brückenspannung bei v_0 trotzdem durch Oberwellen entsteht, wurde durch den Klirrfaktor bestätigt.

6 Anhang

| N302 Daten | | | | |
|------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|--|
| 1) | Messung 1 | Messung 2 | Messung 3 | $f = 76 \text{ Hz}$ |
| R_1 | 237,46 Ω | 229,81 Ω | 238,44 Ω | R_x für Wert "10" $R_{10} = 239 \Omega$ |
| R_2 | 500 Ω | 644 Ω | 332 Ω | |
| R_3 | 322 Ω | 263 Ω | 418 Ω | |
| R_4 | 678 Ω | 737 Ω | 582 Ω | |
| R_x | 318,98 Ω | 316,33 Ω | 316,79 Ω | R_x für Wert "13" $R_{13} = 319,5 \Omega$ |
| R_2 | 332 Ω | 500 Ω | 644 Ω | |
| R_3 | 490 Ω | 389 Ω | 823 Ω | |
| R_4 | 510 Ω | 611 Ω | 677 Ω | |
| 2) | Messung 1 | Messung 2 | Messung 3 | |
| C_2 | 399 nF | 399 nF | | Wert "15" und Wert "11" $C_{15} = 652 \text{ nF}$ $R_{15} = 473 \text{ nF}$ $C_{11} = 660 \text{ nF}$ $R_{11} = 0$ |
| R_2 | 505 Ω | 0 Ω | | |
| R_3 | 389 Ω | 376 Ω | | |
| R_4 | 611 Ω | 624 Ω | | |
| C_x | $6,26 \cdot 10^{-9}$ | $6,62 \cdot 10^{-9}$ | | |
| R_x | 512 Ω | 0 Ω | | |
| 3) | $f = 1076 \text{ Hz}$ | | | |
| | Wert 18 | Messung 1 | Messung 2 | |
| L_2 | 14,6 mH | | | |
| R_2 | 90 Ω | | | |
| R_3 | 820 Ω | | | |
| R_4 | 180 Ω | | | |
| L_x | 0,0665 H | | | |
| R_x | 6,5 mH | | | |
| | 410 Ω | | | |
| | | | | $L_{18} = 69,82 \text{ mH}$ $R_{18} = 360,5 \Omega$ |

| | | | |
|-------------------------------------|--|--------------------------|------------------------------|
| 4) | Messung 1 | Wert 18 | $f = 1076 \text{ Hz}$ |
| | R_2 | 664 Ω | |
| | R_3 | 205 Ω | |
| | R_4 | 420 | |
| | C_4 | 399 nF | |
| | L_x | 54,3 mH | } Vergleichswert siehe 3) |
| | R_x | 324 Ω | |
| 5) | $\frac{1}{2\pi R_0} = \gamma_0$ | $\gamma = 20 \text{ Hz}$ | |
| | $\gamma_0 = \frac{1}{2\pi \cdot 1000 \Omega \cdot 660 \text{ nF}}$ | $= 240 \text{ Hz}$ | $241,14 \text{ Hz}$ |
| $U_0 = \text{const} = 10 \text{ V}$ | | | |
| γ / Hz | U_{R_2} / V | | |
| 20 | 3,2 | | |
| 50 | 2,8 | | |
| 100 | 2,1,98 | | |
| 150 | 1,1 | | |
| 200 | 0,99 | | |
| 220 | 0,2 | | |
| 230 | 0,1 | | |
| 240 | 0,012 | | |
| 250 | 0,085 | | |
| 260 | 0,117 | | |
| 280 | 0,34 | | |
| 300 | 0,48 | | |
| 400 | 1,15 | | |
| 500 | 1,6 | | |
| 750 | 2,3 | | |
| 1000 | 2,6 | | |
| 2000 | 3,1 | | |
| 5000 | 3,2 | | |
| 10.000 | 3,05 | | |
| 15.000 | 2,8 | | |
| 20000 | 2,3 | | |

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Elektrische Brückenschaltungen*. 2021. URL: https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/1716954/mod_resource/content/1/V302.pdf (besucht am 16.12.2021).