

V302

Brückenschaltung

Justus Weber

justus.weber@tu-dortmund.de

Guy Lochny

guy.lochny@tu-dortmund.de

Durchführung: 03.12.2024

Abgabe: 10.12.2024

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Brückenschaltungen	3
2.2 Fehlerrechnung	5
3 Durchführung	5
3.1 Wheatstone Brücke	5
3.2 Kapazitätsmessbrücke	6
3.3 Induktivitätsmessbrücke	7
3.4 Wien-Robinson Messbrücke	8
4 Auswertung	9
4.1 Wheatstone Brücke	9
4.2 Kapazitätsmessbrücke	10
4.3 Induktivitätsmessbrücke	11
4.4 Wien-Robinson Messbrücke	12
5 Diskussion	14
6 Anhang	15
Literatur	19

1 Zielsetzung

In diesem Versuch sollen durch elektrische Brückenschaltungen unbekannte Größen wie Widerstand, Kapazität und Induktivität bestimmt werden. Darüber hinaus soll das Filterverhalten (Frequenzabhängigkeit) der Brückenspannung einer Wien-Robinson-Brücke erforscht werden.

2 Theorie

2.1 Brückenschaltungen

Die Messung von durch Widerstände ausdrückbare Größen kann durch Brückenschaltungen möglich gemacht werden. In diesem Versuch geht es um ohmsche Widerstände und komplexe Widerstände, wie es bei Kondensatoren und Spulen der Fall ist. Um das Prinzip von Brückenschaltungen näherzubringen, ist eine in Abbildung 1 dargestellt.

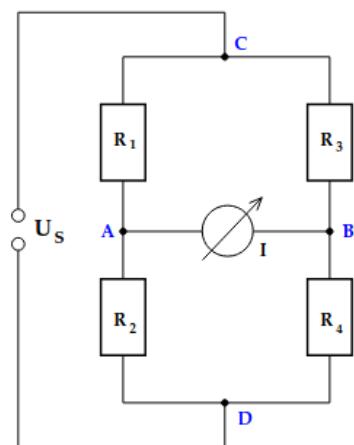


Abbildung 1: Allgemeine Brückenschaltung. [2]

Zwischen den Punkten A und B, welche wiederum zwischen den vier Widerständen R_1 , R_2 , R_3 und R_4 liegen besteht eine Verbindung über ein Messgerät. Diese Verbindung wird als Brücke bezeichnet. Um Fehlströme zu vermeiden und damit die Messung nicht fälschlicherweise beeinflusst werden kann, wird eine erdfreie Speisespannung genutzt. Es gelten die Kirchhoffsschen Gesetze [1]:

1. Die Summe aller Ströme, die an einem Knoten ein- und ausgehen, ist Null.

$$\sum_n^N I_n = 0 \quad (1)$$

2. Die Summe aller Spannungen in einem abgeschlossenen Stromkreis ist Null (unter Berücksichtigung der Vorzeichen).

$$\sum_n^N U_n = 0 \quad (2)$$

Die Punkte A und B befinden sich im Falle des Nullabgleichs auf gleichem Potential. Es kann eine Abgleichbedingung aufgestellt werden:

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

Das gleiche gilt analog für komplexe Widerstände. Ist einer der Widerstände von unbekannter Größe, kann er trivialerweise mithilfe der anderen Komponenten bestimmt werden. Jenes wird als Kompensationsmethode bezeichnet und soll im Folgenden gezeigt werden. Für die Wheatstone Brücke soll ein Widerstand R_x bestimmt werden, unter Einbezug der gewonnenen Erkenntnis bezüglich des Zusammenhangs ergibt sich für die unbekannte Größe [2]:

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

Bei der Kapazitätsmessbrücke soll zusätzlich zum unbekannten Widerstand eine Kapazität bestimmt werden. Anders als bei der Wheatstone Brücke (dessen genauer Aufbau noch in Abschnitt 3 geschildert wird), besteht der Schaltkreis aus zwei Widerständen R_3 , R_4 und darüber hinaus aus einer Kapazität C_2 . Es ergibt sich für die unbekannte gesuchte Kapazität folgender Zusammenhang:

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

Diese Gleichung gilt aufgrund des ähnlichen Aufbaus analog für die Induktivitätsmessbrücke (Der Aufbau dieser Brücke wird ebenso noch in Abschnitt 3 erläutert). Gesucht wird eine Induktivität, welche unter Einbezug der bekannten Variablen L_2 , R_3 und R_4 ermittelt wird.

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

Letztlich ist für dieses Experiment noch der Klirrfaktor von Relevanz. Bei dem Verhältnis von U_{Br} zu U_S wird die Gleichung

$$\left| \frac{U_{\text{Br}}}{U_S} \right|^2 = \frac{9(\Omega^2 - 1)^2}{9(1 - \Omega^2)^2 + 81\omega^2\Omega^2}. \quad (7)$$

verwendet. Bei dieser Gleichung handelt es sich um einen Filter, welcher bei der Frequenz $\omega = \omega_0$ sperrt, sodass keine Brückenspannung mehr dokumentiert werden kann. Sollte dieser Idealfall nicht eintreten, so kommt der Klirrfaktor ins Spiel, die Oberwellen der Speisespannung führen zu einer detektierbaren Brückenspannung.

2.2 Fehlerrechnung

Die gemessenen Werte unterliegen Messunsicherheiten und werden demnach im Folgenden nicht als fehlerfrei angesehen. Die Fehler entstehen bei der Bildung der Mittelwerte durch den Fehler des Mittelwerts und bei der Regressionsrechnung sowie der Fehlerfortpflanzung durch Python. Der Fehler des Mittelwerts ist gegeben durch

$$\begin{aligned}\Delta \bar{x} &= \sqrt{\bar{x}^2 - \bar{x}^2} \\ &= \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}}{\sqrt{N}}.\end{aligned}\quad (8)$$

Um Fehler einzubeziehen, wird die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung verwendet:

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \cdot (\Delta x)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \cdot (\Delta y)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \cdot (\Delta z)^2} \quad (9)$$

3 Durchführung

3.1 Wheatstone Brücke

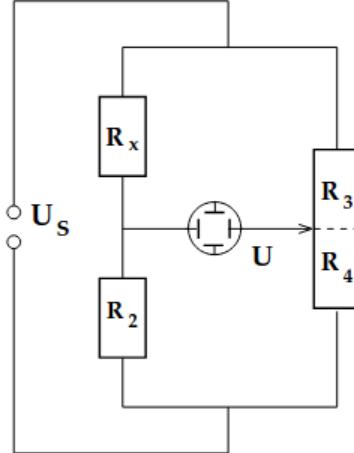


Abbildung 2: Wheatstone Brücke. [2]

Bei der Wheatstone Brücke befinden sich nur Ohmsche Widerstände in dem Schaltkreis. Dabei liegen R_3 und R_4 am Potentiometer. Jenes ist Spannungsteiler, an dem ein Schleifkontakt über den Widerstandsdräht gelegt wird, was es ermöglicht, den Widerstand kontinuierlich einzustellen. Um nun den unbekannten Widerstand R_x durch die Kompressionsmethode zu bestimmen, gilt Gleichung 4.

Als Einstellungen werden folgende Werte genommen:

$$\begin{aligned}
 &\text{Potentiometer für } R_3 \text{ und } R_4 = 1 \text{ k}\Omega \\
 &\text{Frequenz } \nu = 1 \text{ kHz} \\
 &\text{Amplitude } U_S = 1 \text{ V} \\
 &\text{Widerstand } R_2 = 332; 664; 1000 \Omega
 \end{aligned}$$

3.2 Kapazitätsmessbrücke

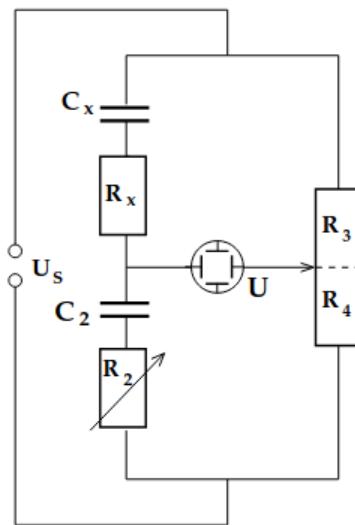


Abbildung 3: Kapazitätsmessbrücke. [2]

Da in diesem Bereich des Experiments Kapazitäten bestimmt werden sollen, muss Wechselstrom verwendet werden. Es werden zwei Potentiometer verwendet, das erste wird wie gehabt als Spannungsteiler für R_3 und R_4 verwendet. Das zweite Poti wird als Spannungsteiler für die unbekannten Komponenten C_x mit R_x und der bekannten Kapazität C_2 genutzt.

Die Brücke wird abgeglichen, indem alternierend die Poti so eingestellt werden, sodass die Spannung am Oszilloskop minimiert wird. Zuerst wird das eine Potentiometer so justiert, dass ein Minimum erreicht wird. Daraufhin wird das andere Poti so eingestellt, dass sich die Spannung weiterhin minimiert. Dieses Verfahren wird so häufig wiederholt, bis die Brücke abgeglichen ist. Für den Widerstand gilt weiterhin Gleichung 4. Für die zu bestimmende Kapazität wird Gleichung 5 genutzt.

Als Einstellungen werden folgende Werte genommen:

$$\text{Kapazität } C_2 = 450; 597; 992 \text{ nF}$$

$$\text{Frequenz } \nu = 1 \text{ kHz}$$

$$\text{Amplitude } U_S = 1 \text{ V}$$

3.3 Induktivitätsmessbrücke

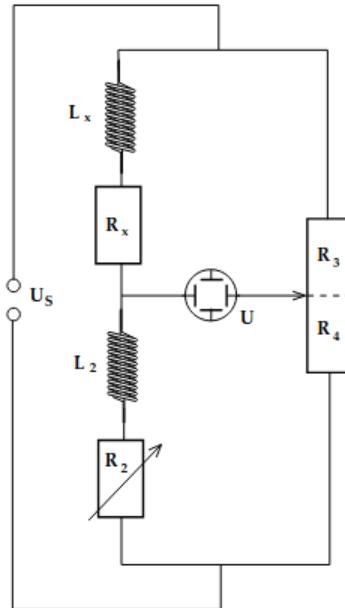


Abbildung 4: Induktivitätsmessbrücke. [2]

Der Aufbau erfolgt analog zu dem der zuvor angesprochenen Kapazitätsmessbrücke. Es werden lediglich Kondensatoren mit Spulen ausgewechselt. Folglich wird der Aufbau mit Wechselstrom betrieben. Für den unbekannten Widerstand R_x gilt erneut Gleichung 3. Für die unbekannte Induktivität wird die Gleichung 6 verwendet.

3.4 Wien-Robinson Messbrücke

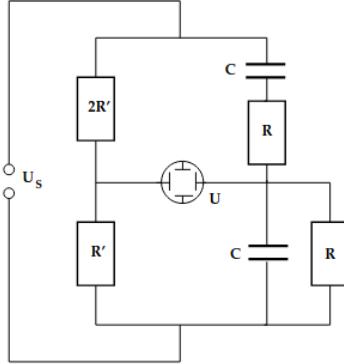


Abbildung 5: Wien-Robinson Messbrücke. [2]

Bei dieser Brücke, dessen Aufbau in Abbildung 5 dargestellt ist, soll der Frequenzgang und der Klirrfaktor der Speisespannung ermittelt werden. Letzteres ist als Maß für die Qualität einer Spannungsquelle, insbesondere in Bezug auf die Reinheit der ausgegebenen Sinusspannung, zu verstehen; er gibt an, wie stark die erzeugte Spannung von einer Sinuskurve abweicht. Gegensätzlich zu den vorherigen Versuchen wird diese Brücke nicht zur Messung von Komponenten genutzt, alle Komponenten verfügen über bekannte Werte. Die Brücke dient als elektronischer Filter für die Frequenz. Für das Verhältnis von Brückenspannung U_{Br} zu der Speisespannung U_S gilt:

$$\left| \frac{U_{\text{Br}}}{U_S} \right|^2 = \frac{(\omega^2 R^2 C^2 - 1)^2}{9((1 - R^2 C^2)^2 + 9 \omega^2 R^2 C^2)} \quad (10)$$

Bei Abgleichung der Brückenspannung (links) und der normierten Frequenz (rechts)

$$\omega_0 = \frac{1}{RC}, \quad \Omega = \frac{\omega}{\omega_0} \quad (11)$$

reduziert sich das Verhältnis auf

$$\left| \frac{U_{\text{Br}}}{U_S} \right|^2 = \frac{9(\Omega^2 - 1)^2}{9(1 - \Omega^2)^2 + 81 \omega^2 \Omega^2}. \quad (12)$$

Wie in der Theorie angemerkt, wird hier der Klirrfaktor relevant. Der Anteil der Oberwellen, welche detektierbar sind, werden durch eben diesen Faktor k bestimmt. Dieser lautet

$$k = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^N U_i^2}}{U_1} \quad (13)$$

mit der Amplitude der Grundwelle U_1 und den Amplituden der i-ten Oberwellen U_i . Je näher der Klirrfaktor an dem Wert Null ist, desto weniger Oberwellen werde erzeugt.

4 Auswertung

4.1 Wheatstone Brücke

Mithilfe der Wheatstone Brücke wird ausgehend von drei bekannten Widerständen R_2 , R_3 und R_4 und einer ausgeglichenen Brückenspannung Der Widerstand R_x mithilfe von Gleichung 3 berechnet.

Tabelle 1: Werte der Widerstände zur Wheatstone Brücke.

	R_2 / Ω	R_3 / Ω	R_4 / Ω
	1000	330	670
Wert11	664	426	574
	332	597	403
	1000	474	526
Wert14	664	574	426
	332	732	268
	1000	281	719
Wert12	664	370	630
	332	541	459

Für die Bestimmung eines Widerstands R_x werden R_3 und R_4 bei ausgeglichener Brückenspannung für drei unterschiedliche R_2 bestimmt. Daraus werden die drei Widerstände er und anschließend gemittelt. Als baubedingte Fehler für die gegebenen Widerstände werden 2% angenommen.

Nach Einsetzen der Messwerte und der zugehörigen Fehler in Gleichung 3 und Mittelung der Ergebnisse ergeben sich für die unbekannten Widerstände die Werte:

$$R_{x,11} = (629,0 \pm 13,0) \Omega$$

$$R_{x,14} = (901,0 \pm 18,0) \Omega$$

$$R_{x,12} = (391,0 \pm 8,0) \Omega$$

Eine beispielhafte Rechnung für $R_{x,11}$ lautet:

$$R_{x,11} = \frac{\left(R_{2,1} = 1000\Omega \cdot \frac{R_{3,1}=330\Omega}{R_{4,1}=670\Omega} + R_{2,2} = 664\Omega \cdot \frac{R_{3,2}=426\Omega}{R_{4,2}=574\Omega} + R_{2,3} = 332\Omega \cdot \frac{R_{3,3}=597\Omega}{R_{4,3}=403\Omega} \right)}{3}$$

$$= 629\Omega$$

Es werden die Widerstände der Einzelmessungen berechnet, aufaddiert und durch die Anzahl der Messungen geteilt um den Mittelwert zu erhalten. Der Fehler ergibt sich durch die Fehlerfortpflanzung durch Python und dem Standartfehler des Mittelwertes bei der Annahme einer Messungenauigkeit von zwei Prozent (siehe Unterabschnitt 2.2).

4.2 Kapazitätsmessbrücke

Tabelle 2: Werte der Widerstände zur Wheatstone Brücke.

	C_2 / nF	R_2 / Ω	R_3 / Ω	R_4 / Ω
Wert8	992	164	772	228
	450	369	603	397
	597	728	670	330
Wert15	992	285	620	380
	450	654	413	587
	597	542	471	529
Wert9	992	204	693	307
	450	443	510	490
	597	334	580	420

Hier werden die Werte für drei unbekannte Kapazitäten ähnlich wie im letzten Abschnitt bestimmt. Analog wird der Wert für die Kapazität mit drei unterschiedlichen Widerständen für R_2 über Gleichung 4 berechnet und die Ergebnisse gemittelt. Mit den Werten aus Tabelle 2 ergeben sich einerseits für die Widerstände nach Gleichung 3 die Werte

$$R_{x,8} = (865,0 \pm 19,0) \Omega$$

$$R_{x,15} = (469,0 \pm 9,0) \Omega$$

$$R_{x,9} = (461,0 \pm 9,0) \Omega$$

und nach Gleichung 4 für die Kapazität

$$C_{x,8} = (294,0 \pm 6,0) \text{nF}$$

$$C_{x,15} = (639,0 \pm 13,0) \text{nF}$$

$$C_{x,9} = (435,0 \pm 9,0) \text{nF}.$$

4.3 Induktivitätsmessbrücke

Tabelle 3: Werte der Widerstände zur Wheatstone Brücke.

	L_2 / mH	R_2 / Ω	R_3 / Ω	R_4 / Ω
Wert19	14.6	58	647	353
	27.5	108	496	504
	20.1	75	572	428
Wert16	14.6	51	901	99
	27.5	86	831	169
	20.1	59	870	130
Wert18	14.6	103	773	227
	27.5	194	645	355
	20.1	138	713	287

Zusammen mit den Werten aus Tabelle 3 können die Werte für erneut drei unterschiedliche Widerstände analog zu Unterabschnitt 4.2 errechnet werden. An Widerständen ergibt sich inklusive Fehlern

$$R_{x,19} = (104,3 \pm 2,1) \Omega$$

$$R_{x,16} = (427,0 \pm 9,0) \Omega$$

$$R_{x,18} = (349,0 \pm 7,0) \Omega$$

und nach Gleichung 5 für die Induktivität

$$L_{x,19} = (26,9 \pm 0,5) \text{ mH}$$

$$L_{x,16} = (134,2 \pm 2,7) \text{ mH}$$

$$L_{x,18} = (49,9 \pm 1,0) \text{ mH}.$$

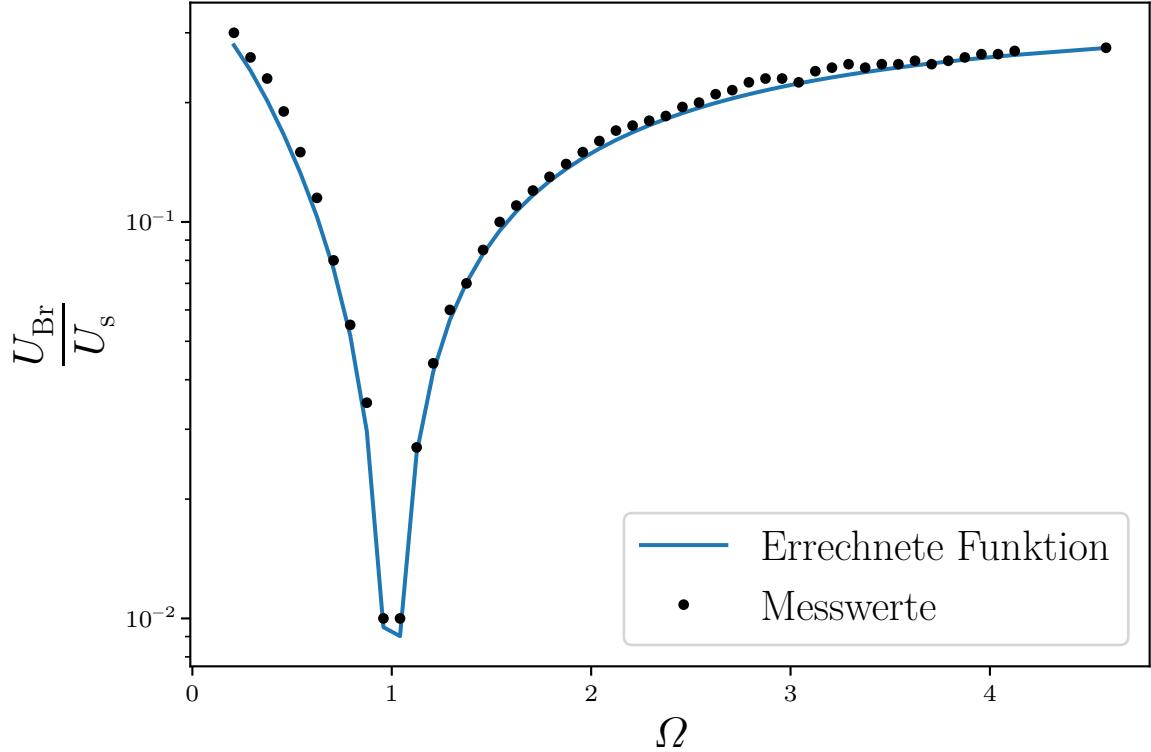
4.4 Wien-Robinson Messbrücke

Tabelle 4: Wien-Robinson Messbrücke.

ν/Hz	U/mV								
50	300	250	10	450	140	650	215	850	250
70	260	270	27	470	150	670	225	870	255
90	230	290	44	490	160	690	230	890	250
110	190	310	60	510	170	710	230	910	255
130	150	330	70	530	175	730	225	930	260
150	115	350	85	550	180	750	240	950	265
170	80	370	100	570	185	770	245	970	265
190	55	390	110	590	195	790	250	990	270
210	35	410	120	610	200	810	245	1100	275
230	10	430	130	630	210	830	250		

Mithilfe der Wien-Robinson Messbrücke kann der Klirrfaktor der Speisespannung ermittelt werden. Dazu wird in einem halblogarithmischen Diagramm das Verhältnis der Brückenspannung zur Speisespannung ($\frac{U_{Br}}{U_s}$) in Abhängigkeit von der normierten Frequenz Ω aufgetragen.

Abbildung 6: Verhältnis Brückenspannung zu Speisespannung, abhängig von der Frequenz und errechnete Funktion



Die Messwerte für $\frac{U_{Br}}{U_s}(\Omega)$ sind in Abbildung 6 zusammen mit einer Theoriefunktion, bestimmt aus Gleichung 12, abgebildet. Die Theoriefunktion bildet Ω auf die Funktion

$$\frac{U_{Br}}{U_s} = \sqrt{\frac{1}{9} \frac{(\Omega^2 - 1)^2}{(1 - \Omega^2)^2 + 9\Omega^2}}, \quad \Omega = \omega \cdot R \cdot C \quad (14)$$

Aus diesen Messwerten soll der Klirrfaktor der Speisespannung ermittelt werden. Dies geschieht durch das Ermitteln der Restspannung U_{Rest} . Diese Restspannung wird mit dem Koeffizienten $g(2)$ multipliziert, welcher dem Verhältnis $\frac{U_{Br}}{U_s}$ aus Gleichung 3 bei $\Omega = 2$ entspricht, um so einen Wert für die Amplitude der zweiten Oberwelle U_2 zu erhalten. Daraus lässt sich durch Gleichung 13 der Klirrfaktor berechnen, wenn die Annahme getroffen wird, dass nur die zweite Oberwelle wesentlich zum Klirrfaktor beiträgt. Des Weiteren wird angenommen, dass der Klirrfaktor klein ist. Es wird $U_1 = U_s$ genähert. Die Restspannung bei $\Omega = 0$ entspricht

$$U_{\text{rest}} = 240 \text{ V},$$

was zu einem Klirrfaktor von

$$k = \frac{U_2}{U_1} = \frac{U_{\text{rest}} \cdot \frac{U_{Br}}{U_s}(\Omega = 2)}{U_s} = 0,0357$$

führt.

5 Diskussion

Zunächst ist festzuhalten, dass jegliche bestimmte Größen nicht mit Literaturwerten zu vergleichen sind. Die tatsächlichen Werte der Widerstände sind unbekannt. Jedoch liegen die Werte der Mittelwertbildung größtenteils verhältnismäßig nah beieinander, was auf eine gute Genauigkeit bei den Messungen hindeutet. Lediglich bei der Berechnung der Induktivität des "Wert16" wichen die berechneten Werte des Widerstands R_x mit $R_{x1} = 464$, $R_{x2} = 422$ und $R_{x3} = 394$ entsprechend stark voneinander ab. Es ist anzunehmen, dass diese Abweichung durch eine Ungenauigkeit am Widerstand zurückzuführen ist, da auch bei mehrfacher Durchführung des Versuches mit dem erwähnten Widerstand große Abweichungen zustande kamen.

Für die Bauelemente wurde bei Widerständen, Kapazitäten, sowie Induktivitäten jeweils ein Fehler von 2% angenommen. Dieser Fehler wurde auf Grundlage vorhergeganger Berechnungen abgeschätzt, sodass dieser annähernd mit den Abweichungen zusammenpasst. Für die unbekannten Widerstände ergab sich bei der Wheatstone Brücke:

$$\begin{aligned} R_{x,11} &= (629,0 \pm 13,0) \Omega \\ R_{x,14} &= (901,0 \pm 18,0) \Omega \\ R_{x,12} &= (391,0 \pm 8,0) \Omega \end{aligned}$$

Bei der Kapazitätsmessbrücke ergaben sich die unbekannten Größen zu

$$\begin{aligned} R_{x,8} &= (865,0 \pm 19,0) \Omega \\ R_{x,15} &= (469,0 \pm 9,0) \Omega \\ R_{x,9} &= (461,0 \pm 9,0) \Omega \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} C_{x,8} &= (294,0 \pm 6,0) \text{nF} \\ C_{x,15} &= (639,0 \pm 13,0) \text{nF} \\ C_{x,9} &= (435,0 \pm 9,0) \text{nF}. \end{aligned}$$

Bei der Induktivitätsmessbrücke ergaben sich die unbekannten Größen zu

$$\begin{aligned} R_{x,19} &= (104,3 \pm 2,1) \Omega \\ R_{x,16} &= (427,0 \pm 9,0) \Omega \\ R_{x,18} &= (349,0 \pm 7,0) \Omega \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} L_{x,19} &= (26,9 \pm 0,5) \text{mH} \\ L_{x,16} &= (134,2 \pm 2,7) \text{mH} \\ L_{x,18} &= (49,9 \pm 1,0) \text{mH}. \end{aligned}$$

Die Fehlertoleranz liegt bei allen gemessenen Größen bei etwa 2%, was zu dem Fehler der Geräte passt, in dieser Hinsicht kann der Versuch als gelungen interpretiert werden.

Der gemessene Klirrfaktor liegt bei 3,57%, demnach ist das Signal dezent verzerrt. Hauptursache für diesen hohen Wert ergibt sich aus der Berechnung: Der Klirrfaktor ergibt sich unter der Annahme, dass die zweite Oberwelle den größten Beitrag liefert, die restlichen Wellen vernachlässigt. Jenes impliziert, dass die Signalverzerrung größtenteils durch diese Hauptwelle entsteht, trotzdem könnten gegebenenfalls Oberwellen zu diesem Werte geführt haben.

Grundsätzlich kann der Versuch als gelungen gewertet werden, äußerliche Bedingungen wie thermodynamische Aspekte haben keinen Einfluss auf den Versuch. Das spiegelt sich im Ergebnis wieder, die gemessenen Fehler passen zueinander und die Messwerte liegen verhältnismäßig in der jeweiligen Größenordnung.

6 Anhang

Abbildung 7: Messwerte Seite 1.

<u>V302 - Brückenschaltung</u>					
Wheatstone Brücke:					
seitlich Ω	R_2	R_3	R_4	R_x	$C_x \text{ in } \Omega$
1000	330	670	492,54		
664	426	574	492,79		Wert 11
332	597	403	491,82		
1000	474	526	907,14		
664	524	426	894,69		Wert 14
332	232	268	904,81		
1000	281	219	390,82		
664	320	630	389,97		Wert 12
332	547	459	391,37		
<u>Kapazitätsmetrische:</u>					
C_2	R_2	R_3	R_4	R_x	C_x
992	164	722	228	555,3	292,97
450	369	603	397	560,47	296,07
597	278	620	330	364,42	294,04
992	285	620	380	465	608
450	654	473	582	460	639,59
597	542	471	529	482,52	620,52
992	204	693	307	469,6	439,66
450	443	510	490	461,08	432,35
597	334	580	420	461,24	432,31

Abbildung 8: Messwerte Seite 2.

Induktivitätsmessreihe:					$L \text{ in } \mu\text{H}$	$R \text{ in } \Omega$	$L_x = L_2 \frac{R_3}{R_4}$
L_2	R_2	R_3	R_4	R_x			$R_x = R_2 \frac{R_3}{R_4}$
24,6	58	642	353	10637	26,26	Wert 19	$L_x = R_2 \frac{R_3}{R_4}$
27,5	108	926	504	106,29	27,06		
20,1	75	572	428	100,23	26,86		
Durchmesser					14,6 57 901 99 66,15 132,87	Wert 16	
→					27,5 86 837 169 422,86 135,22		
					20,1 59 870 130 394,85 734,52		
14,6 103 773 227 350,74 49,22					Wert 18		
27,5 194 645 355 352,48 49,96							
20,1 138 713 287 342,84 49,93							
Wien-Robinson Membranreihe: Wert 11: 663,86 nF							
$U(\text{mV})$	$f(\text{Hz})$	$\pm 5\text{mV}$	$f(\text{Hz})$	$U(\text{mV})$	$f(\text{Hz})$	$U(\text{mV})$	
300	50		50	300	290	44	
280	60		70	260	370	60	
270	70		90	230	330	70	
250	80		100	190	350	85	
230	90		130	150	370	100	
200	100		150	115	390	110	
190	110		170	80	410	120	
			190	55	430	130	
			210	35	450	140	
			230	10	470	150	
			250	15	490	160	
			270	27	510	170	

Abbildung 9: Messwerte Seite 3.

$f(\text{Hz})$	$u(\text{mV})$
520	180
530	190
550	185
570	195
590	200
610	200
630	210
650	215
670	215
690	215
710	220
730	225
750	240
770	245
790	250
810	245
830	250
850	250
870	255
890	250
910	255
930	260
950	265
970	265
990	270
1010	275

Literatur

- [1] studyflix. *Kirchhoffsche Regeln*. Abgerufen am 13. Januar 2025. 2025. URL: <https://studyflix.de/elektrotechnik/kirchhoffsche-gesetze-327> (besucht am 13.01.2025).
- [2] V302: Brückenschaltungen. TU Dortmund. 2024.