

Versuch 302

## **Elektrische Brückenschaltungen**

Nico Schaffrath

nico.schaffrath@tu-dortmund.de

Mira Arndt

mira.arndt@tu-dortmund.de

Durchführung: 19.11.2019

Abgabe: 26.11.2019

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Ziel</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
2.1	Wheatstonesche Brücke . . . . .	4
2.2	Kapazitätsmessbrücke . . . . .	5
2.3	Induktivitätsmessbrücke . . . . .	5
2.4	Maxwell-Brücke . . . . .	6
2.5	Wien-Robinson-Brücke . . . . .	7
2.6	Fehlerrechnung . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Durchführung</b>	<b>8</b>
3.1	Wheatstonesche Brücke . . . . .	8
3.2	Kapazitätsmessbrücke . . . . .	8
3.3	Induktivitätsmessbrücke . . . . .	8
3.4	Maxwell-Brücke . . . . .	8
3.5	Wien-Robinson-Brücke . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>9</b>
4.1	Wheatstonesche Brücke . . . . .	9
4.2	Kapazitätsmessbrücke . . . . .	9
4.3	Induktivitätsmessbrücke . . . . .	11
4.4	Maxwell-Brücke . . . . .	11
4.5	Frequenzabhängigkeit der Brückenspannung einer Wien-Robinson-Brücke	13
4.6	Klirrfaktormessung . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>15</b>
	<b>Literatur</b>	<b>16</b>

## 1 Ziel

Bei diesem Versuch sollen zunächst verschiedene elektronische Bauteile durch passende Brückenschaltungen vermessen werden. Außerdem soll die Frequenzabhängigkeit der Brückenspannung einer Wien-Robinson-Brücke und der Klirrfaktor des verwendeten Generators bestimmt werden.

## 2 Theorie

Brückenschaltungen werden in der Messtechnik eingesetzt um die Auflösung einer Messung zu erhöhen oder eine physikalische Größe, die sich als elektrischer Widerstand darstellen lässt, zu bestimmen.

Dafür muss eine Abgleichbedingung der Brückenschaltung erfüllt sein. Generell benötigt eine Brückenschaltung eine Speisespannung  $U_S$ , den zu ermittelnden elektrischen Widerstand und bekannte elektrische Bauteile um ein Widerstandsverhältnis zu bestimmen. Die Abgleichbedingung besteht darin, dass die Brückenspannung  $U_{Br}$  zwischen zwei Punkten verschwindet.



**Abbildung 1:** Allgemeine Funktionsweise einer Brückenschaltung[1, S. 216]

Ist die Abgleichbedingung erfüllt kann aus dem Widerstandsverhältnis der unbekannte Widerstand bestimmt werden.

Dieses Verhältnis ergibt sich aus den beiden Kirchhoffschen Gesetzen

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

$$\sum_k U_k = 0, \quad (2)$$

die besagen, dass die Summe aller eingehenden Ströme eines Knotens gleich der Summe aller ausgehenden Ströme ist und die Summe aller Spannungen in einer Masche immer

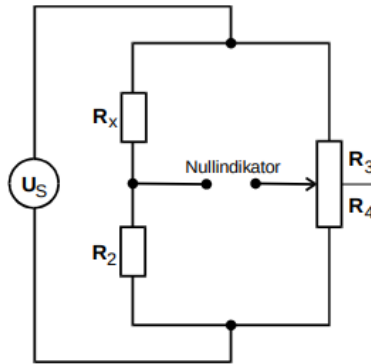
Null ist. Dadurch lässt sich die Brückenspannung als

$$U_{Br} = \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_3 + R_4)(R_1 + R_4)} U_S \quad (3)$$

ausdrücken. Sobald  $U_{Br}$  verschwindet gilt unabhängig von der Speisespannung  $U_S$

$$R_2 R_3 = R_1 R_4. \quad (4)$$

## 2.1 Wheatstonesche Brücke



**Abbildung 2:** Aufbau der Wheatstoneschen Brücke[1, S. 219]

Bei der Wheatstoneschen Brücke liegen lediglich ohmsche Widerstände vor, wobei  $R_x$  unbekannt ist und sich mit Gleichung 4 durch

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

bestimmen lässt.  $R_3$  und  $R_4$  sind dabei durch ein Potentiometer realisiert, da zur Berechnung nur ihr Verhältnis relevant ist.

## 2.2 Kapazitätsmessbrücke

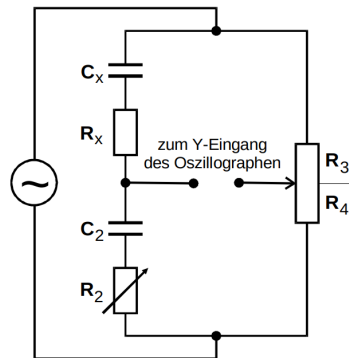


Abbildung 3: Aufbau der Kapazitätsmessbrücke[1, S. 220]

Mit der Kapazitätsmessbrücke lässt sich eine unbekannte Kapazität  $C_x$  ermitteln. Da es sich bei einer Kapazität um einen komplexen Widerstand handelt muss diese Schaltung mit Wechselstrom betrieben werden. Der Innenwiderstand des Kondensators wird durch einen unbekannten Ohmschen Widerstand  $R_x$  ausgedrückt. Aus Gleichung 4 ergeben sich die zu ermittelnden Größen als

$$R_x = R_2 \frac{R_3}{R_4} \quad (6)$$

und

$$C_x = C_2 \frac{R_4}{R_3}. \quad (7)$$

## 2.3 Induktivitätsmessbrücke

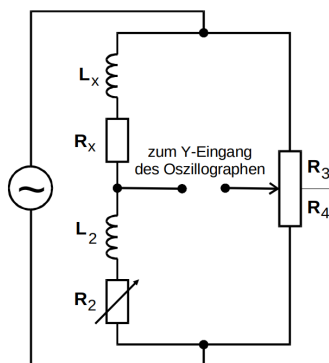


Abbildung 4: Aufbau der Induktivitätsmessbrücke[1, S. 221]

Analog zu 2.2 wird wieder Wechselstrom verwendet, da es sich bei der zu bestimmenden unbekannten Induktivität  $L_x$  ebenfalls um einen komplexen Widerstand handelt. Auch

hier gibt es einen unbekannten ohmschen Widerstand  $R_x$  der den inneren Widerstand der Spule darstellt. Ähnlich wie bei 2.2 lassen sich  $R_x$  und  $L_x$  mit Gleichung 4 durch

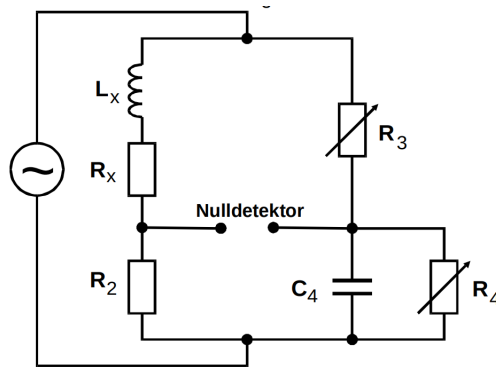
$$R_x = R_2 \frac{R_3}{R_4} \quad (8)$$

und

$$L_x = L_2 \frac{R_3}{R_4} \quad (9)$$

berechnen.

## 2.4 Maxwell-Brücke



**Abbildung 5:** Aufbau der Maxwell-Brücke[1, S. 222]

Diese Schaltung unterscheidet sich von 2.3 vor allem dadurch, dass zur Bestimmung der Induktivität  $L_x$  keine bereits bekannte Induktivität nötig ist, sondern nur eine bekannte Kapazität  $C_4$ . Der Abgleich ist bei diesem Aufbau optimal durchführbar, wenn die Wirk- und Blindwiderstände die gleiche Größenordnung besitzen.  $L_x$  und  $R_x$  können mit Gleichung 4 durch

$$R_x = R_2 \frac{R_3}{R_4} \quad (10)$$

und

$$L_x = R_2 R_3 C_4 \quad (11)$$

berechnen.

## 2.5 Wien-Robinson-Brücke

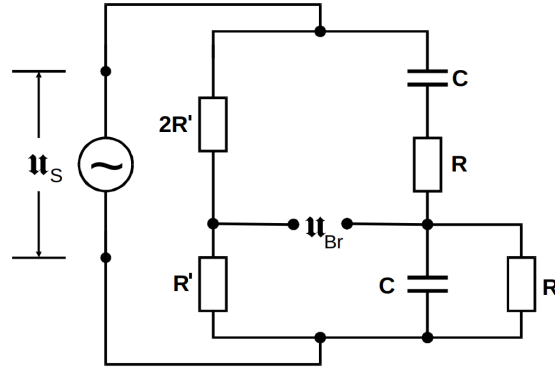


Abbildung 6: Aufbau der Wien-Robinson-Brücke[1, S. 223]

Anders als bei den anderen Schaltungen ist die Wien-Robinson-Brücke frequenzabhängig. Bei einer festen Speisespannung  $U_S$  hängt das Verhältnis  $|\frac{U_{Br}}{U_S}|$  also bei bekannten elektrischen Bauteilen nur von der Frequenz  $\nu$  der Speisespannung ab. Aus Gleichung 3 folgt

$$U_{Br} = \frac{\omega^2 R^2 C^2 - 1}{3(1 - \omega^2 R^2 C^2) + 9i\omega RC} U_S \quad (12)$$

$$\Leftrightarrow \left| \frac{U_{Br}}{U_S} \right|^2 = \frac{1}{9} \frac{(\Omega^2 - 1)^2}{(1 - \Omega^2)^2 + 9\Omega^2} \quad \text{mit} \quad \Omega := \frac{\omega}{\omega_0}. \quad (13)$$

Mit Hilfe der Wien-Robinson-Brücke lässt sich außerdem der Klirrfaktor  $k$  des verwendeten Generators bestimmen. Der Klirrfaktor ist ein Maß des Oberwellengehalts im Vergleich zur Grundwelle und berechnet sich durch die Formel

$$k := \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots}}{U_1}, \quad (14)$$

wobei  $U_1$  die Amplitude der Grundwelle ist und  $U_n$  die Amplitude der  $n$ -ten Oberwellen. Mit der vereinfachten Annahme, dass die Summe der Oberwellen nur aus der zweiten Oberwelle besteht wird dies zu

$$k = \frac{U_2}{U_1} \quad \text{mit} \quad U_2 = \frac{U_{Br}}{f(2)}, \quad (15)$$

wobei  $f$  Gleichung 14 entspricht.

## 2.6 Fehlerrechnung

Bei der Auswertung werden die Mittelwerte der errechneten Größen durch die Formel

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (16)$$

berechnet. Der dazu gehörige Standardfehler des Mittelwerts berechnet sich durch

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

Der Prozentuale Fehler  $x_p$  eines Messwertes  $x_M$  zum Theoriewert  $x_T$  lässt sich durch die Formel

$$x_p = 100 \cdot \left( \frac{x_T - x_M}{x_T} \right) \quad (18)$$

ermitteln.

### 3 Durchführung

Die Schaltungen werden jeweils wie auf den Schaltbildern bei 2 aufgebaut. Dabei beträgt die Speisespannung 2,5V. Die Brückenspannung wird mit einem Oszilloskop gemessen.

#### 3.1 Wheatstonesche Brücke

Der unbekannte Widerstand ist der ohmsche Widerstand Wert 11. Es werden drei Messungen durchgeführt bei denen jeweils der Widerstand  $R_2$  variiert wird. Das Potentiometer wird so eingestellt, dass die Brückenspannung verschwindet und die Werte für  $R_3$  und  $R_4$  werden zusätzlich zu  $R_2$  im Messheft festgehalten.

#### 3.2 Kapazitätsmessbrücke

Die unbekannte Kapazität ist Teil einer RC-Kombination, bei der direkt auch der unbekannte ohmsche Widerstand realisiert ist. Bei den ersten beiden Messungen wird die bekannte Kapazität  $C_2$  variiert. Bei der dritten Messung wird keine vorgefertigte RC-Kombination vermessen, sondern die Zusammensetzung der Kapazität mit Wert 3 und dem ohmschen Widerstand mit Wert 10. Auch hier wird wie oben das Potentiometer passend eingestellt und die entsprechenden Werte notiert.

#### 3.3 Induktivitätsmessbrücke

Hier ist die unbekannte Induktivität Teil einer LR-Kombination mit Wert 18. Es werden drei Messungen mit jeweils anderen Widerständen  $R_2$  durchgeführt indem wieder das Potentiometer eingestellt und die Werte aufgenommen werden.

#### 3.4 Maxwell-Brücke

Es wird die gleiche LR-Kombination wie bei 3.3 vermessen. Es erfolgen wieder drei Messungen mit variiertem Widerstand  $R_2$ . Diesmal wird jedoch nur  $R_3$  durch das Potentiometer angepasst bis die Brückenspannung verschwindet und der Wert wird im Messheft festgehalten.



### 3.5 Wien-Robinson-Brücke

Bei diesem Aufbau werden die elektrischen Bauteile nicht ausgetauscht, sondern nur die Frequenz am Generator variiert. Zunächst wird die Frequenz  $\nu_0$  eingestellt, bei der die Brückenspannung minimal wird. Um diesem Bereich werden 10 Messungen durchgeführt bei denen die Frequenz jeweils um 10 Hz variiert wird. Weiter entfernt vom Minimum werden weitere 14 Messungen mit Frequenzabständen von 50 Hz vorgenommen.

## 4 Auswertung

Im Folgenden wurden die baubedingten Fehler sämtlicher Bauteile vernachlässigt und treten somit auch nicht in den Fehlerrechnungen auf. Diese beschränken sich lediglich auf die Berechnung der Mittelwerte, sowie die damit verbundenen Fehler der Standardabweichungen.

### 4.1 Wheatstonesche Brücke

Mit den verwendeten Widerständen, die in Tabelle 1 aufgeführt wurden, lassen sich durch Gleichung 5 folgende Werte für den unbekannten Widerstandswert  $R_{11}$  berechnen:

$$R_{11,1} = 491,821 \, \Omega$$

$$R_{11,2} = 492,794 \, \Omega$$

$$R_{11,3} = 490,313 \, \Omega$$

Über die zuvor aufgeführten Gleichungen 16 und 17 lassen sich der Mittelwert

$$\bar{R}_{11} = 491,643 \, \Omega,$$

samt zugehörigem Fehler der Standardabweichung

$$\Delta R_{11} = 0,722 \, \Omega$$

ermitteln.

Das zusammengefasste Ergebnis für den, mithilfe der Wheatstonesche Brückenspannung, berechneten Widerstandswert lautet demnach

$$R_{11} = (491,643 \pm 0,722) \, \Omega.$$

### 4.2 Kapazitätsmessbrücke

Unter Verwendung der oben ausgeführten Gleichungen 6 und 7, sowie der aufgenommenen Messwerte aus Tabelle 2, können die Werte

$$R_{15,1} = 538.899 \, \Omega$$

$$R_{15,2} = 474.937 \, \Omega$$

Messung	$R_2 / \Omega$	$R_3 / \Omega$	$R_4 / \Omega$
1	332	597	403
2	664	426	574
3	1000	329	671

**Tabelle 1:** Aufgenommene Werte zur Bestimmung von  $R_{11}$

für den ohmschen Widerstand und

$$C_{15,1} = 491.625 \text{ n}\Omega$$

$$C_{15,2} = 629.986 \text{ n}\Omega$$

für die Kapazität des Kondensators in der RC-Kombination Nummer 15 ermittelt werden. Mithilfe der Gleichungen 16 und 17 lässt sich

$$R_{15} = (506.918 \pm 50.566) \Omega$$

und

$$C_{15} = (560.806 \pm 67.181) \text{ nF}$$

als Mittelwert samt Fehler der Standardabweichung für den ohmschen Widerstand beziehungsweise der Kapazität der RC-Kombination Nummer 15 benennen.

Im Folgenden setzt sich die RC-Kombination aus dem Kondensator Nummer 3 und dem Widerstand Nummer 10 zusammen. Weiterhin können die in Tabelle 3 aufgeführten Messwerte verwendet werden, um über die Gleichungen 6 und 7

$$R_{10,1} = 239.429 \Omega$$

als ohmschen Widerstand von Bauteil Nummer 10 und

$$C_{3,1} = 553.267 \text{ nF}$$

als Kapazität des Bauteils Nummer 3 zu identifizieren. Da nur eine Messung durchgeführt wurde, können lediglich  $R_{10,1}$  und  $C_{3,1}$  angegeben werden, nicht aber Mittelwerte beziehungsweise Fehler der Standardabweichungen.

Messung	$R_2 / \Omega$	$R_3 / \Omega$	$R_4 / \Omega$	$C_2 / \text{F}$
1	664	448	552	$399 \cdot 10^{-9}$
2	664	417	583	$450 \cdot 10^{-9}$

**Tabelle 2:** Aufgenommene Werte zur Bestimmung von  $R_{15}$  und  $C_{15}$

Messung	$R_2 / \Omega$	$R_3 / \Omega$	$R_4 / \Omega$	$C_2 / \text{F}$
1	332	419	581	$399 \cdot 10^{-9}$

**Tabelle 3:** Aufgenommene Werte zur Bestimmung von  $R_{10}$  und  $C_3$

### 4.3 Induktivitätsmessbrücke

Für diesen Teil des Versuchs können die Werte aus Tabelle 4 und die Gleichungen 8 und 9 verwendet werden, sodass die Ergebnisse der Einzelmessungen die Werte

$$R_{18,1} = 3184.100 \Omega$$

$$R_{18,2} = 1130.555 \Omega$$

$$R_{18,3} = 2114.243 \Omega$$

für den Verlustwiderstand  $R_{18}$  und

$$L_{18,1} = 46.448 \text{ mH}$$

$$L_{18,2} = 49.717 \text{ mH}$$

$$L_{18,3} = 46.488 \text{ mH}$$

für die Induktivität  $L_{18}$  der LR-Kombination liefern. Unter der Zuhilfenahme von Gleichungen 16 und 17 lassen sich  $R_{18}$  und  $L_{18}$  durch ihre Mittelwerte und Fehler der Standardabweichungen

$$R_{18} = (2142.966 \pm 592.981) \Omega$$

$$L_{18} = (47.564 \pm 1.076) \text{ H}$$

angeben.

### 4.4 Maxwell-Brücke

Um den Verlustwiderstand  $R_{18}$ , sowie die Induktivität  $L_{18}$ , der LR-Kombination ein weiteres Mal zu errechnen, sollen nun die Werte aus Tabelle 5 und die beiden Gleichungen

Messung	$R_2 / \Omega$	$R_3 / \Omega$	$R_4 / \Omega$	$L_2 / \text{H}$
1	1000	761	239	$14,6 \cdot 10^{-3}$
2	332	773	227	$14,6 \cdot 10^{-3}$
3	664	761	239	$14,6 \cdot 10^{-3}$

**Tabelle 4:** Aufgenommene Werte zur Bestimmung von  $R_{18}$  und  $L_{18}$

10 und 11 verwendet werden. Somit ergeben sich für  $R_{18}$

$$R_{18,1} = 208.000 \Omega$$

$$R_{18,2} = 204.000 \Omega$$

$$R_{18,3} = 204.819 \Omega$$

Ein analoges Vorgehen ergibt

$$L_{18,1} = 51.792 \text{ mH}$$

$$L_{18,2} = 50.796 \text{ mH}$$

$$L_{18,3} = 51.000 \text{ mH}$$

als Werte für  $L_{18}$ . Daran geschlossen können die beiden gesuchten Größen unter Verwendung von Gleichung 16 und 17 über die Mittelwerte der Messungen, sowie den Fehler der Standardabweichung angegeben werden. Folglich ergibt sich

$$R_{18} = (205.606 \pm 1.220) \Omega$$

für den Verlustwiderstand  $R_{18}$  und

$$L_{18} = (51.196 \pm 0.304) \text{ mH}$$

für die Induktivität  $L_{18}$  der LR-Kombination.

Messung	$R_2 / \Omega$	$R_3 / \Omega$	$R_4 / \Omega$	$C_4 / \text{F}$
1	332	208	332	$750 \cdot 10^{-9}$
2	664	102	332	$750 \cdot 10^{-9}$
3	1000	68	32	$750 \cdot 10^{-9}$

**Tabelle 5:** Aufgenommene Werte zur Bestimmung von  $R_{18}$  und  $L_{18}$

#### 4.5 Frequenzabhängigkeit der Brückenspannung einer Wien-Robinsson-Brücke

Um den Theoriewert für  $\nu_0$  zu erhalten, muss zunächst  $\omega_0$  mit

$$\omega_0 = \frac{1}{R \cdot C}$$

berechnet werden. Durch Einsetzen der Größen, die in der Tabelle 6 aufgeführt sind, ergibt sich

$$\omega_0 = \frac{1}{1000 \, \Omega \cdot 420 \, \text{nF}} = 2380.952 \, \text{Hz}$$

als Kreisfrequenz. Nach Umrechnung der Kreisfrequenz  $\omega_0$  in die Frequenz  $\nu_0$  mithilfe von

$$\nu_0 = \frac{\omega_0}{2 \cdot \pi}$$

ergibt sich der Theoriewert

$$\nu_0 = \frac{2380.952 \, \text{Hz}}{2 \cdot \pi} = 378.94 \, \text{Hz}$$

für die Kreisfrequenz, bei der die minimale Brückenspannung  $U_{Br}$  gemessen werden kann.

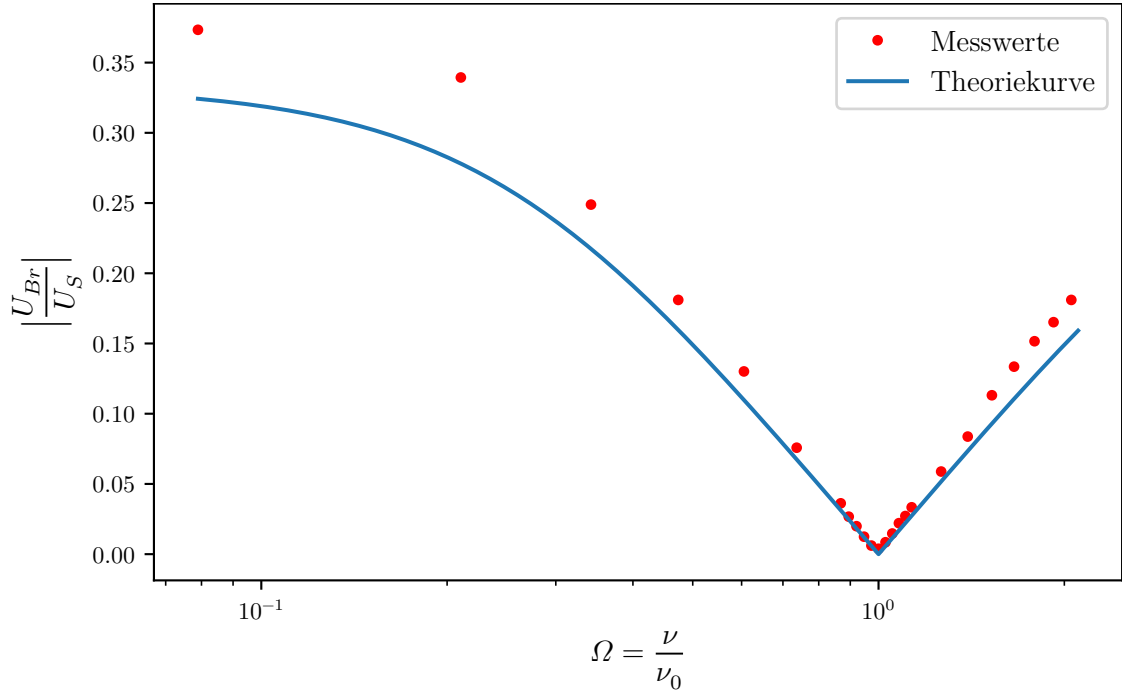
In Abbildung 7 wurden die Messwerte, ebenso wie die mit Gleichung 13 berechneten Werte für die Theoriekurve, aufgetragen. Auf der x-Achse ist das Verhältnis  $\Omega$  von  $\nu$  zu  $\nu_0$  logarithmisch aufgetragen, wohingegen die y-Achse das Verhältnis von der Brückenspannung  $U_{Br}$  zu der Speisespannung  $U_S$  wiedergibt. Es fällt auf, dass der prozentuale Fehler des gemessenen Wertes für  $\nu_0$  mit

$$\Delta_p \nu = 0.2789 \, \%$$

gering ausfällt. Weiterhin ist zu beobachten, dass die Messwerte um das Frequenzverhältnis  $\Omega = 1$  herum sehr nah an der Theoriekurve liegen. Allerdings vergrößert sich die Abweichung von Theoriekurve zu den aufgenommenen Messwerten zunächst, je weiter das Frequenzverhältnis von dem Wert eins abweicht. Für Frequenzverhältnisse, die sich dem Wert Null annähert, ist zu beobachten, dass Theoriekurve und Messwerte nicht weiter auseinanderlaufen. Im Gegensatz dazu lässt sich dieses Verhalten für Frequenzverhältnisse  $\Omega > 0$  nicht beobachten.

#### 4.6 Klirrfaktormessung

Zuletzt soll eine Näherung für den Klirrfaktor  $k$  mit Gleichung 14 ermitteln werden, wobei davon ausgegangen werden soll, dass  $U_i = 0 \, \text{V}$  mit  $i > 2$  gilt.



**Abbildung 7:** Darstellung der aufgenommenen Messwerte und der Theoriekurve

$2R' / \Omega$	$R' / \Omega$	$R / \Omega$	$C_4 / F$
664	332	1000	$420 \cdot 10^{-9}$

**Tabelle 6:** Aufgenommene Messwerte zur Bestimmung von  $\nu_0$

Dafür soll zunächst das Spannungsverhältnis  $|\frac{U_{Br}}{U_S}|$  für  $\Omega = 2$  ermittelt werden. Dieses ergibt sich durch Verwendung von Gleichung 13 und liefert

$$f(2) = \frac{1}{9} \cdot \frac{(\Omega^2 - 1)^2}{(1 - \Omega^2)^2 + 9 \cdot \Omega^2} = \frac{\sqrt{5}}{15} = \frac{1}{\sqrt{45}}$$

als Wert. Bevor der Klirrfaktor  $k$  nun ermittelt werden kann, müssen zunächst die Amplituden  $U_1$  und  $U_2$  berechnet werden. Die Amplitude der Grundwelle  $U_1$  entspricht der Speisespannung  $U_S$ , von der bereits der Effektivwert gegeben ist, wohingegen die Amplitude  $U_2$  der Spannung der 2-ten Oberwelle entspricht und für den vorliegenden Versuch mit Gleichung 15

$$U_2 = \frac{9.6166 \text{ mV}}{\sqrt{\frac{1}{45}}} = 0.0645 \text{ V}$$

$U_S / \text{mV}$	$U_{Br} / \text{mV}$	$\Omega$	$\nu / \text{H}$
2500	1320	0.0789	30
2500	1200	0.2105	80
2500	880	0.3221	130
2500	640	0.4737	180
2500	460	0.6053	230
2500	268	0.7368	280
2500	128	0.8684	330
2500	94.4	0.8947	340
2500	70.4	0.9211	350
2500	44.0	0.9474	360
2500	21.6	0.9737	370
2500	13.6	1.0000	380
2500	30	1.0263	390
2500	52	1.0526	400
2500	78	1.0789	410
2500	96	1.1053	420
2500	118	1.1316	430
2500	208	1.2631	480
2500	296	1.3947	530
2500	400	1.5263	580
2500	472	1.6579	630
2500	536	1.7894	680
2500	584	1.9210	730
2500	640	2.0526	780

**Tabelle 7:** Aufgenommene Messwerte zur Bestimmung des Klirrfaktors  $k$

lautet. Der Effektivwert der Spannung wird mit

$$U_{2,eff} = \frac{U_2}{\sqrt{2}} = 0.0456 \text{ V}$$

errechnet. Mit diesen Werten und Gleichung 15 ergibt sich

$$k = \frac{U_2}{U_1} = \frac{0.0456 \text{ V}}{2.5 \text{ V}} = 0.0182$$

für den gesuchten Klirrfaktor  $k$ .

## 5 Diskussion

Es ist auffällig, dass einige Messungen sehr präzise Werte für die Eigenschaften der Bauelemente liefern, wie beispielsweise in 4.1, wohingegen andere Messungen, wie zum

Bespiel 4.2 sehr hohe Fehler der Standardabweichungen aufweisen.

Ganz besonders sticht dies bei dem Vergleich der errechneten Werte von 4.3 und 4.4 hervor. Diese sollten zwar dieselben Werte liefern, allerdings erscheint lediglich der in 4.4 ermittelte Wert für den ohmschen Widerstand der RC-Kombination sinnvoll zu sein, da der in 4.3 einen viel zu großen Fehler der Standardabweichung ausweist. Der in 4.3 errechnete Wert lässt sich nicht durch übliche systematische beziehungsweise statistische Fehler erklären. Da mit Ausnahme von  $L_2$  in beiden Versuchen die gleichen Bauelemente verwendet wurden, liegt die Vermutung nahe, dass sich der Fehler in der Berechnung auf eine fehlerhaft funktionierende Spule zurückführen lässt.

Das die experimentell gemessene Frequenz  $\nu_0$  fast mit dem in der Theorie berechneten Wert übereinstimmt, kann auf den geringen Klirrfaktor  $k$  zurückgeführt werden, da das Spannungsminimum dadurch gut zu erkennen war. Der größer werdende Abstand der Messwerte von der Theoriekurve in Abbildung 7, für Frequenzverhältnisse, die von dem Wert  $\Omega = 1$  abweichen, lässt sich möglicherweise damit erklären, dass die Skala für die Frequenz der Wechselspannung an der Spannungsquelle vor allem für größere Frequenzen ungenauer wird. Folglich würde dies einen systematische Fehler hervorrufen, der mit zunehmenden Abstand von  $\nu_0$  selbst zunimmt. Allgemein könnten Unterschiede von den errechneten und den tatsächlichen Größen der Bauelemente dadurch zustande kommen, dass, wie zuvor erwähnt, keine baubedingten Fehler beachtet wurden, aber auch, dass davon ausgegangen wurde, dass es sich bei den Kondensatoren und Spulen um ideale Bauelemente handelt, sprich das diese vollkommen verlustfrei sind.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung Brückenschaltungen*.
- [2] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [3] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [4] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.