

Versuch 302

Elektrische Brückenschaltungen

Sebastian Pape
sepa@gmx.de

Jonah Nitschke
lejonah@web.de

Durchführung: 13.12.2016

Abgabe: 20.12.2016

1 Theorie

1.1 Elektrische Brückenschaltungen

Bei Brückenschaltungen handelt es sich um elektrische Schaltungen, mit dessen Hilfe die Widerstände von Bauteilen sehr genau bestimmt werden können. Hierbei sind auch komplexe Widerstände erlaubt, sodass auch die Kapazität eines Kondensators und die Induktivität einer Spulen gemessen werden können. Die grundlegende Struktur einer Brückenschaltung ist in Abb. 1 dargestellt.

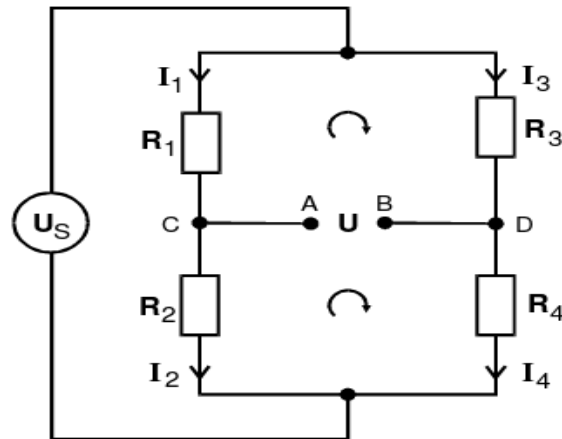


Abbildung 1: Grundlegende Struktur einer Brückenschaltung[TUD16]

Es wird ausgenutzt, dass zwischen zwei getrennten stromdurchflossenen Leitern eine Potentialdifferenz besteht, die durch die *Kirchhoffschen Gesetze* bestimmt werden kann.

1. Kirchhoffsches Gesetz (Knotenregel):

Die Summe aller in ein Knoten eingehenden Ströme ist gleich der Summe, der aus einem Knoten herausfließenden Ströme. Diese Gleichung ergibt sich aus der Ladungserhaltung.

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

2. Kirchhoffsche Gesetz (Maschenregel):

Die Summe aller Spannungen in einer Masche ist gleich Null. Dieses Gesetz entstammt aus der Energieerhaltung.

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

Der Zusammenhang zwischen der Brückenspannung U und der Speisespannung U_S ist durch folgenden Zusammenhang gegeben.

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

Eine Brücke wird als abgeglichen bezeichnet, wenn die Brückenspannung U_{Br} verschwindet. Dies ist gerade der Fall, wenn

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

erfüllt ist. Diese Bedingung ist unabhängig von der Speisespannung U_S und gilt somit für jede beliebige Speisespannung.

1.2 Komplexe Wechselstromwiderstände

Komplexe Wechselstromwiderstände treten auf, wenn Kondensatoren und oder Induktivitäten in einer Schaltung verbaut sind. Für die Bauteile ergibt sich

$$Z_R = R, \quad Z_C = \frac{1}{i\omega C}, \quad Z_L = i\omega L.$$

Eine komplexe Zahl besteht allgemein aus einem Realteil X und einem Imaginärteil Y . Also ist Z insgesamt $Z = X + iY$.

Dabei ist i die imaginäre Zahl und ω die Kreisfrequenz, mit der die Spannung wechselt. Damit die Abgleichbedingung (4) für die Brückenschaltung für komplexe Widerstände erfüllt ist müssen der Realteil und der Imaginärteil des Gesamtwiderstandes einzeln verschwinden. Somit ergibt sich

$$X_1 X_4 - Y_1 Y_4 = X_2 X_3 - Y_2 Y_3 \quad (5)$$

$$X_1 Y_4 + X_4 Y_1 = X_2 Y_3 + X_3 Y_2. \quad (6)$$

Dabei ist X_i der Realteil und Y_i der Imaginärteil.

2 Versuchsaufbau

In dem Versuch werden verschiedene Brückenschaltungen verwendet. In dem folgendem Abschnitt werden die verwendeten Schaltungen erläutert und die dazugehörigen Formeln angegeben.

2.1 Wheatstonesche Brücke

Die Wheatstonesche Brücke wird für die Widerstandsmessung eines unbekannten Widerstandes verwendet. In der Schaltung werden ausschließlich ohmsche Widerstände verwendet.

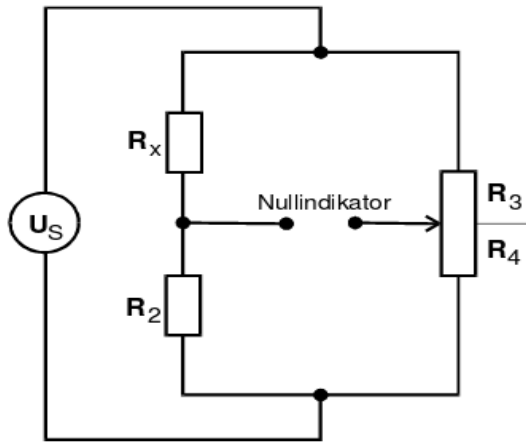


Abbildung 2: Schaltungsskizze einer Wheatstonesche Brückenhaltung[TUD16]

Der unbekannte Widerstand lässt sich mit Hilfe von (1) und (2) ermitteln. Es ergibt sich

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

Dabei werden R_3 und R_4 so eingestellt, dass die Brücke nach der Bedingung (4) abgeglichen ist.

2.2 Kapazitätsmessbrücke

Durch das Ergänzen eines ohmschen Widerstandes in der Schaltung kann auch mit einem idealen Kondensator ein realer Kondensator simuliert werden. Ein realer Kondensator ist verlustbehaftet. Diese Eigenschaft wird von dem ergänzten ohmschen Widerstand übernommen. Mit Hilfe einer Kapazitätsmessbrücke kann die Kapazität und der Widerstand eines realen Kondensators bestimmt werden. Dafür wird der Aufbau in Abb. 3 verwendet.

Über die Knoten- und Maschenregel ergeben sich für die unbekannten Größen R_x und C_x folgende Gleichungen.

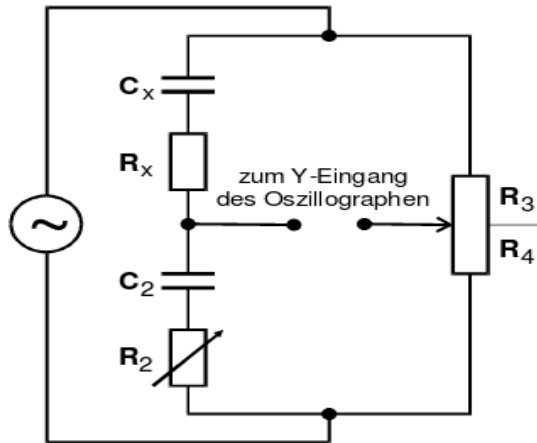


Abbildung 3: Schaltungsskizze einer Kapazitätsmessbrücke[TUD16]

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

$$C_x = C_2 \frac{R_4}{R_3} \quad (9)$$

2.3 Induktivitätsmessbrücke

Die Induktivitätsmessbrücke ist der Kapazitätsmessbrücke sehr ähnlich, nur wird anstelle des zu bestimmenden Kondensators die zu vermessende Spule eingebaut. Ebenso ist die ideale Spule mit einem ohmschen Widerstand zu versehen, sodass sie das Verhalten einer realen Spule beschreibt.

Durch die komplexen Abgleichbedingungen (5) und (6) ergeben sich

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

$$L_x = L_2 \frac{R_3}{R_4}. \quad (11)$$

Die Induktivität und der Widerstand von einer realen Spule sind mit der Induktivitätsmessbrücke schwierig zu vermessen. Der Wirkanteil sollte möglichst alleine durch R_2 realisiert werden und L_2 sollte eine möglichst hohe Effizienz haben, damit L_x und R_x präzise vermessen werden können. Dies ist experimentell kompliziert zu realisieren. Deshalb wird für die Messung von Induktivitäten in einem weiteren Versuch noch einmal die Maxwell-Brücke verwendet.

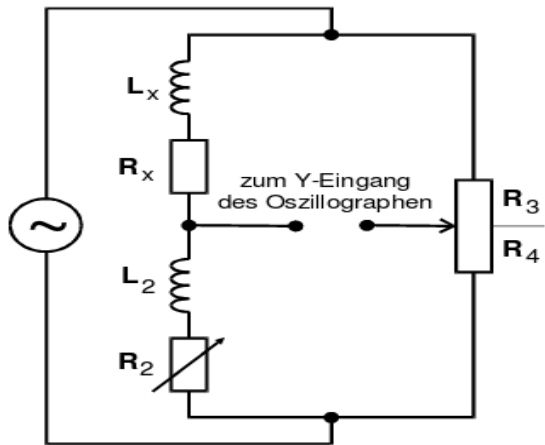


Abbildung 4: Schaltungsskizze einer Induktivitätsmessbrücke[TUD16]

2.4 Maxwell-Brücke

Bei der Maxwell-Brücke wird parallel zum vierten ohmsche Widerstand R_4 eine Kondensator mit der Kapazität C_4 geschaltet. Die Schaltung ist in Abb. 5 skizziert.

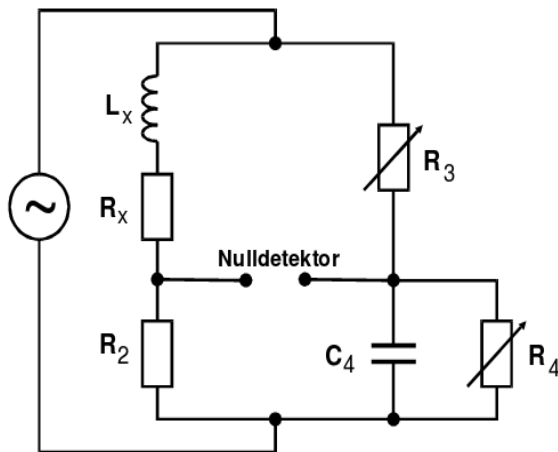


Abbildung 5: Schaltungsskizze einer Maxwell-Brücke[TUD16]

Durch die komplexen Abgleichbedingungen (5) und (6) ergeben sich

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_4} \quad (12)$$

$$L_x = R_2 R_3 C_4. \quad (13)$$

Die Regelwiderstände R_3 und R_4 werden als Abgleichelemente verwendet und der Kondensator sollte für eine präzise Messung möglichst verlustarm sein.

2.5 Wien-Robinson-Brücke

Die Wien-Robinson-Brücke ist eine frequenzabhängige Brückenschaltung. Der Zusammenhang zwischen der Brückenspannung und der Speisespannung kann über die Formel (3) berechnet werden. Für die Schaltung der Wien-Robinson-Brücke ergibt sich die folgenden Formel.

$$\left| \frac{U_{\text{Br}}}{U_{\text{S}}} \right|^2 = \frac{(\omega^2 R^2 C^2 - 1)^2}{9 \left[(1 - \omega^2 R^2 C^2)^2 + 9 \omega^2 R^2 C^2 \right]} \quad (14)$$

Die Brückenspannung verschwindet für die Frequenz $\omega_0 = \frac{1}{RC}$. Somit wird die Frequenz ω_0 gefiltert und alle Schwingungen mit der Frequenz ω_0 werden nicht durch diese Brückenschaltung durchgelassen. Schwingungen mit einer Frequenz nahe von ω_0 werden stark abgeschwächt.

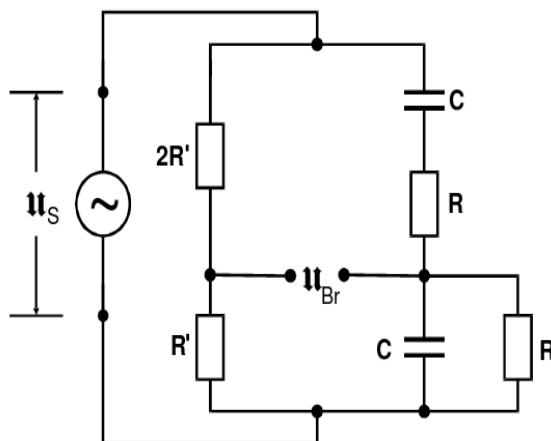


Abbildung 6: Schaltungsskizze einer Wien-Robinson-Brücke[TUD16]

2.6 Klirrfaktor

In dem Versuch soll der Klirrfaktor des verwendeten Sinusgenerator bestimmt werden. Der Klirrfaktor ist eine Zeichen der Güte eines Generators und beschreibt die Anteile der Oberwellen im Verhältnis zu der Grundwelle. Der Klirrfaktor kann mit Hilfe der Wien-Robinson-Brücke (Abb.6) ermittelt werden. Dafür stellt man die Widerstände so ein, dass die Brückenspannung minimal ist. An diesem Minimum ist die Frequenz ω_0

erreicht, bei dem nur noch die Oberwellen des Sinusgenerators durch die Schaltungen gelassen werden.

Der Klirrfaktor ist definiert als:

$$k := \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots}}{U_1}. \quad (15)$$

Dabei ist U_1 die Amplitude der Grundwelle und U_i die Amplitude der i-ten Oberwelle. Zur vereinfachten Rechnung wird hierbei lediglich U_2 berücksichtigt.

3 Messergebnisse

Tabelle 1: Gemessene Werte bei der Wheatstoneschen Brücke

		Messung 1	Messung 2	Messung 3
Wert 10	R_2 in Ω	1000	664	332
	R_3 in Ω	196	268	422
	R_4 in Ω	804	732	578
Wert 12	R_2 in Ω	1000	664	332
	R_3 in Ω	284	373	543
	R_4 in Ω	716	627	457

Tabelle 2: Gemessene Werte für die Kapazitätsmessbrücke ohne Widerstände

		Messung 1	Messung 2	Messung 3
Wert 3	C_2 in nF	450	399	597
	R_3 in Ω	519	490	590
	R_4 in Ω	481	510	410
Wert 1	C_2 in nF	450	399	597
	R_3 in Ω	407	380	478
	R_4 in Ω	593	520	522

Tabelle 3: Gemessene Werte für die Kapazitätsmessbrücke mit Widerständen

		Messung 1	Messung 2	Messung 3
Wert 8	C_2 in nF	450	399	597
	R_2 in Ω	371	418	278
	R_3 in Ω	606	578	673
	R_4 in Ω	394	422	327
Wert 9	C_2 in nF	450	399	597
	R_2 in Ω	466	524	352
	R_3 in Ω	511	481	581
	R_4 in Ω	489	519	419

Tabelle 4: Gemessene Werte für die Induktivitätsmessbrücke

		Messung 1	Messung 2	Messung 3
Wert 10	L_2 in mH	14.6	20.1	27.5
	R_2 in Ω	45	57	85
	R_3 in Ω	907	875	837
	R_4 in Ω	83	125	163
Wert 18	L_2 in mH	14.6	20.1	27.5
	R_2 in Ω	108	143	197
	R_3 in Ω	775	715	648
	R_4 in Ω	225	285	352

Tabelle 5: Gemessene Werte für R-L-Glieder mit der Maxwell-Brücke

		Messung 1	Messung 2	Messung 3
Wert 10	R_2 in Ω	100	664	332
	R_3 in Ω	347	523	1036
	R_4 in Ω	829	829	829
Wert 18	R_2 in Ω	100	664	332
	R_3 in Ω	128	193	382
	R_4 in Ω	347	349	348

Tabelle 6: Gemessene Werte bei der Wien-Robinson-Brücke

ν in $\frac{1}{s}$	U_{Br} in V	U_{Sp} in V
20	2.480	2.700
100	1.960	2.550
200	1.000	2.200
270	0.524	2.000
320	0.260	1.800
340	0.172	1.800
360	0.078	1.700
370	0.044	1.700
390	0.053	1.650
395	0.084	1.650
400	0.094	1.650
405	0.136	1.650
410	0.140	1.600
415	0.166	1.600
420	0.184	1.600
430	0.210	1.600
440	0.254	1.550
469	0.328	1.500
480	0.384	1.450
500	0.468	1.400
550	0.590	1.250
600	0.740	1.200
700	1.020	1.100
800	1.150	0.950
1000	1.450	0.750
1200	1.660	0.680
1500	1.860	0.540
2000	2.000	0.410
3000	2.140	0.285
5000	2.180	0.175
10000	2.040	0.090
20000	1.660	0.060
30000	1.180	0.055

4 Auswertung

4.1 Wheatstonesche Brückenschaltung

Mit den gemessenen Werte aus Tabelle 1 und der Formel (7) lassen sich nun die gesuchten Widerstände berechnen. Dabei ergeben sich folgende Werte:

$$R_{x,10} = (243.1 \pm 0.4) \Omega \quad (16)$$

$$R_{x,12} = (395.4 \pm 0.7) \Omega \quad (17)$$

4.2 Kapazitätsmessbrücke

Mit den Werten aus Tabelle 2 für die Kapazitätsmessbrücke ohne zwischengeschaltete Widerstände und der Formel (9) ergeben sich für die gesuchten Kapazitäten die folgenden Werte:

$$C_{x,1} = (652.9 \pm 1.4) \text{ nF} \quad (18)$$

$$C_{x,3} = (415.7 \pm 0.7) \text{ nF} \quad (19)$$

Mit den Werten aus Tabelle 3 für die Kapazitätsmessbrücke mit Widerständen und den Formen (8) und (9) lassen sich ebenfalls die gesuchten Werte der R-C-Glieder bestimmen:

$$R_{x,8} = (571.8 \pm 0.6) \Omega \quad (20)$$

$$C_{x,8} = (291.3 \pm 0.7) \text{ nF} \quad (21)$$

$$R_{x,9} = (487.6 \pm 0.3) \Omega \quad (22)$$

$$C_{x,9} = (430.0 \pm 0.6) \text{ nF} \quad (23)$$

4.3 Induktivitätsmessbrücke

Mit den Formeln (10) und (11) und den Werten aus der Tabelle 4 ergeben sich für die gesuchten R-L-Glieder folgende Werte:

$$R_{x,16} = (442 \pm 27) \Omega \quad (24)$$

$$L_{x,16} = (147 \pm 6) \text{ mH} \quad (25)$$

$$R_{x,18} = (364 \pm 4) \Omega \quad (26)$$

$$L_{x,18} = (50.5 \pm 0.1) \text{ mH} \quad (27)$$

4.4 Maxwell-Brücke

Die gleichen R-L-Glieder wie bei der Induktivitätsmessbrücke wurden nochmal mithilfe der Maxwell-Brücke gemessen, bei der ein Kondensator mit der Kapazität $C_4 = 399 \text{ nF}$ verwendet wurde. Mit den Werten aus der Tabelle 5 sowie den Formeln (12) und (13) ergeben sich für die beiden R-L-Glieder somit folgende Werte:

$$R_{x,16} = (417.5 \pm 1.3) \Omega \quad (28)$$

$$L_{x,16} = (138.1 \pm 0.4) \text{ mH} \quad (29)$$

$$R_{x,18} = (366.8 \pm 1.3) \Omega \quad (30)$$

$$L_{x,18} = (50.94 \pm 0.17) \text{ mH} \quad (31)$$

4.5 Robinson-Wien-Brücke

Bei der Messung die für Robinson-Wien-Schaltung wurden die folgenden Komponenten verwendet:

$$C = (415.7 \pm 0.7) \text{ nF} \quad (32)$$

$$R' = 332 \Omega \quad (33)$$

$$2R' = 664 \Omega \quad (34)$$

$$R = 1000 \Omega \quad (35)$$

In dieser Messreihe wurde die Frequenzabhängigkeit der Brückenspannung untersucht. Dazu wird in den Graphen 8 und 7 das Verhältnis der effektiven Brückenspannung $U_{\text{Br,eff}}$ zur Speisespannung U_{Sp} gegen $\Omega = \frac{\nu}{\nu_0}$ aufgetragen. Für $U_{\text{Br,eff}}$ gilt dabei:

$$U_{\text{Br,eff}} = \frac{U_{\text{Br}}}{2\sqrt{2}}. \quad (36)$$

Als Frequenz, bei der die Brückenspannung verschwinden sollte, ergibt sich folgender Wert:

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} = \frac{1}{1000 \, \Omega \cdot (415.7 \pm 0.7) \cdot 10^{-9} \, \text{F}} = (2406 \pm 4) \, \text{Hz} \quad (37)$$

$$\nu_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = (382.9 \pm 0.6) \, \text{Hz} \quad (38)$$

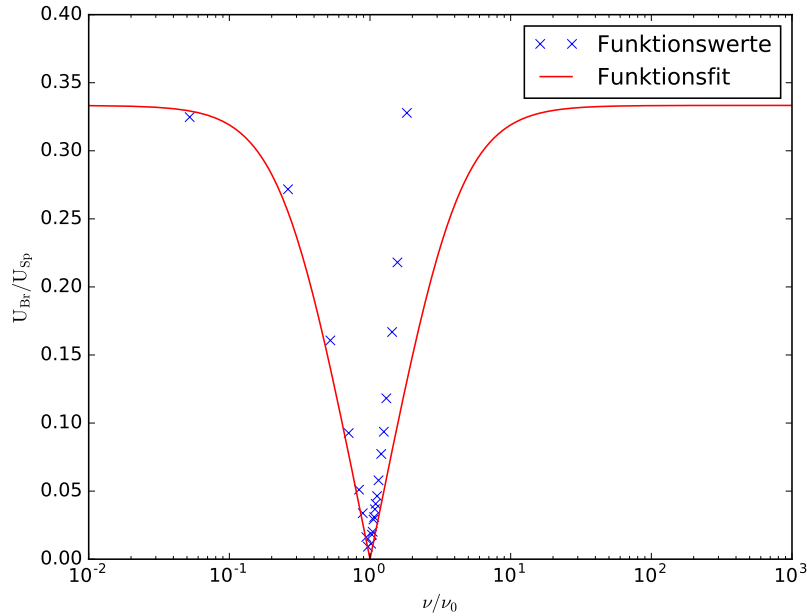


Abbildung 7: Vergleich der Messdaten mit einer Theoriekurve im kleineren Bildintervall

In dem folgendem Abschnitt wird mit der bereits durch Formel (36) bestimmten Effektivspannung weitergerechnet, um den Klirrfaktor zu bestimmen. Zur Vereinfachung der Rechnung wird dabei genähert, dass die Summe der Oberwellen lediglich von dem Term der zweiten Oberwelle bestimmt wird.

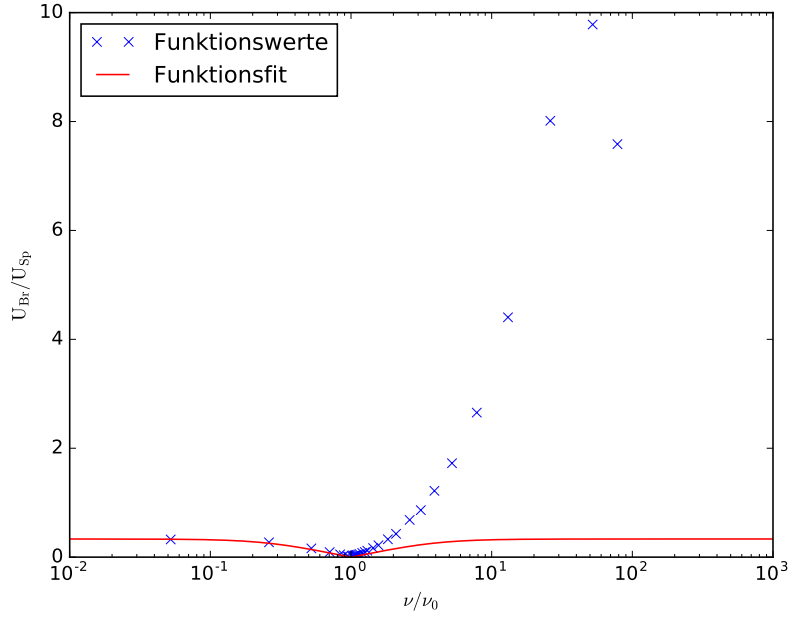


Abbildung 8: Vergleich der Messdaten mit einer Theoriekurve

Mit Formel (15) werden zu Berechnung noch die Werte für U_2 und U_1 bestimmt, wobei U_1 die 1,65 V von U_{Sp} bei ν_0 sind. Aus der Formel (14) und $\Omega = 2$ errechnet sich U_2 dann wie folgt:

$$U_2 = \frac{U_{Br,eff}}{f(2)} \quad (39)$$

$$= 4.269 \cdot 10^{-2} \text{ V}. \quad (40)$$

Der Klirrfaktor ergibt sich damit nun aus dem Quotienten von U_2 und U_1 :

$$k = \frac{U_2}{U_1} = 2.668 \cdot 10^{-2}. \quad (41)$$

5 Diskussion

In dem folgenden Abschnitt soll nun betrachtet werden, inwieweit die verwendeten Messmethoden zuverlässige Ergebnisse liefern.

Bei allen Messungen ist deutlich erkennbar, dass die Fehler der einzelnen Bauteile relativ gering ausfallen. Somit lässt sich auf eine systematisch korrekte und ziemlich genaue Messung schließen.

Ein Vergleich der auftretenden Fehler bei den Messungen 4.3 und 4.4, der Induktivitätsmessbrücke und der Maxwell-Brücke, zeigt einen deutlichen Unterschied bei den entstehenden Fehlern. Die Fehler der Maxwell-Brücke fallen deutlich geringer aus, was vor allem an der Annahme liegen könnte, dass die verwendete Spule L_2 bei der Induktivitätsmessbrücke keinen Innenwiderstand besitzt, was in der Messung nicht realisierbar ist. Zwar wurde auch bei der Maxwell-Brücke der Kondensator als verlustfrei angenommen, dies lässt sich jedoch weitaus besser realisieren. Dennoch sind die Abweichungen der gemessenen Werte beider Methoden nicht allzu groß, die Maxwell-Brücke scheint in dieser Messung lediglich genauer zu sein.

Bei der Bestimmung des Klirrfaktors sieht man, dass die gemessenen Werte besonders bei Frequenzen oberhalb des Minimums stark von der Theoriekurve abweichen. Da die Form der Kurve jedoch ähnlich ist, kann man auf einen systematischen Fehler schließen. Dies ist schon in den Messwerten zu erkennen, in denen die Speisespannung eigentlich relativ konstant bleiben sollte, jedoch zwischenzeitlich auf ca. 3 % des ursprünglichen Wertes absinkt. Somit kann der Klirrfaktor als Beurteilung der Güte des Sinusgenerators eigentlich nur bedingt verwendet werden. Dennoch ist der Wert trotz der Messungenauigkeiten ziemlich gering.

Literatur

- [TUD16] TU-Dortmund. *Versuch V302: Elektrische Brückenschaltungen*. 16. Dez. 2016. URL: <http://129.217.224.2/HOME/PAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V302.pdf>.