

Versuch 356

Kettenschaltung mit LC-Gliedern

Sebastian Pape Jonah Nitschke
sepa@gmx.de lejonah@web.de

Durchführung: 17.01.2017

Abgabe: 24.01.2017

1 Theorie

In dem folgendem Versuch geht es um die Betrachtung von Wellen mithilfe einer *LC*-Kette als Analogon zum verketteten harmonischen Oszillators in der Mechanik. Eine LC-Kette ist eine Kettenschaltung aus mehreren einzelnen LC-Kreisen. Es gibt dabei verschiedenen Betrachtungen solch einer Kette. Einerseits handelt es sich bei den einzelnen Kettengliedern um Tiefpässe, somit kann ein solche Schaltung zum Beispiel zum Herausfiltern von hohen Frequenzen genutzt werden.

Andererseits handelt es sich auch um ein gekoppeltes Schwingungssystem, daher eine Kopplung von Schwingkreisen durch gemeinsame Kapazitäten. Somit kann eine LC-Kettenschaltung als Transportvorrichtung für elektrische Energie betrachtet werden. Betrachtet werden soll also, unter welchen Bedingungen Energie nun von einem zum anderen Ende transportiert werden kann. In dem Versuch wird dabei die als Dispersion bezeichnete Erscheinung, dass der Energietransport von der angelegten Frequenz abhängig und nur in endlichen Frequenzbereichen möglich ist, untersucht.

Eine weiter Analogie besteht zu einem mechanischen Schwingungssystem. Somit eignet sich eine LC-Kette auch zu Darstellung bzw. Betrachtung von Wellen. Dabei werden verschiedene charakteristische Größen der entstehenden stehenden Wellen betrachtet, wie zum Beispiel die Dispersionsrelation, sowie der Phasenverschub zwischen der eingehenden und ausgehenden Spannung.

1.1 Die Dispersionsrelationen

Im Allgemeinen gibt die Dispersionsrelation an, in wie weit verschiedene physikalische Größen Abhängigkeiten von der Frequenz aufweisen. Um diese Abhängigkeiten für eine LC-Kettenschaltung zu bestimmen, wird zunächst mithilfe der Kirchoffschen Regeln die Schwingungsgleichung hergeleitet und auf n Kettenglieder verallgemeinert. Mit der Annahme, dass alle Kettenglieder mit der gleichen Frequenz ω schwingen und lediglich beim Durchlaufen einen Phasenverschub θ erfahren, lässt sich für die Kette folgende Dispersionsrelation herleiten:

$$\omega^2 = \frac{2}{LC}(1 - \cos \theta). \quad (1)$$

Aus dieser Formel lässt sich also die Phasenänderung pro Kettenglied in Abhängigkeit der angelegten Frequenz bestimmen.

Die bei Formel (1) bestimmte Dispersionsrelation lässt sich etwas verallgemeinern, indem eine Kettenschaltung mit alternierend eingebauten Kondensatoren C_1 und C_2 verwendet wird. Bei der Lösung der analog zu der obigen Schaltung bestimmten Schwingungsgleichung wird hierbei die Annahme getroffen, dass alle Kettenglieder immernoch mit der

gleichen Frequenz schwingen, allerdings jedes zweite Kettenglied eine andere Amplitude aufweist. Somit ergibt sich für die LC_1C_2 -Kette folgende Dispersionsrelation:

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{1}{L} \left\{ \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right\} \pm \frac{1}{L} \sqrt{\left\{ \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right\}^2 - \frac{4 \sin(\theta)^2}{C_1 C_2}}. \quad (2)$$

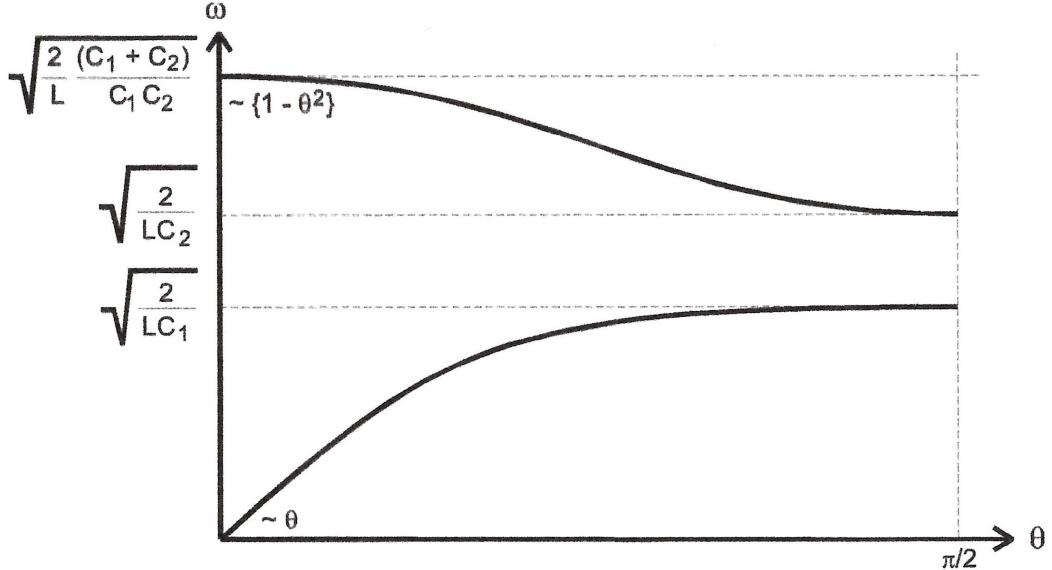


Abbildung 1: Dispersionskurve bei einer Kette mit zwei unterschiedlichen Kondensatoren [TUD17]

Wie der Formel (2) entnommen werden kann, bilden sich bei dieser Dispersionsrelation zwei Äste, auch akustischer und optische Ast genannt (siehe Abbildung 1). Zwischen den beiden Ästen existiert ein Bereich, welcher bei der Schwingung nicht auftretenden Frequenzen beinhaltet. Während ω_2 bei $\theta = \frac{\pi}{2}$ ein Maximum besitzt, tritt dort für ω_1 ein Minimum auf (siehe Abbildung 1).

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{L} \frac{2(C_1 + C_2)}{C_1 C_2}} \left\{ 1 - \theta^2 \frac{C_1 C_2}{(C_1 + C_2)^2} \right\} \quad (3)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{2}{L(C_1 + C_2)}} \theta \quad (4)$$

Aus den Formeln (3) und (4) lassen sich nun die in Abbildung 1 schon eingetragenen Grenzfrequenzen für den optischen sowie akustischen Ast bestimmen:

$$\omega_{Grenz,C} = \frac{2}{\sqrt{L \cdot C_1}} \quad (5)$$

$$\omega_{Grenz,C_1C_2}^{optisch} = \sqrt{\frac{2}{L \cdot C_1}} \quad (6)$$

$$\omega_{Grenz,C_1C_2,unten}^{akustisch} = \sqrt{\frac{2}{L \cdot C_2}} \quad (7)$$

$$\omega_{Grenz,C_1C_2,oben}^{akustisch} = \sqrt{\frac{2(C_1 + C_2)}{L \cdot C_1 C_2}}. \quad (8)$$

(9)

Aus den bestimmten Dispersionsrelationen lassen sich nun ebenfalls die Phasen- und die Gruppengeschwindigkeit herleiten. Da die Gruppengeschwindigkeit in dem Versuch jedoch nicht betrachtet wird, wird im folgenden nur auf die Phasengeschwindigkeit eingegangen:

$$v_{Ph} = \frac{\omega}{\theta} = \frac{\omega}{\arccos(-\frac{1}{2}\omega^2 LC)} \quad (10)$$

Die Dispersion verschwindet in dem Bereich kleiner Frequenzen, also bei $\omega \ll 1/LC$. Beim Erreichen der Grenzfrequenz $\omega_G = 2/\sqrt{LC}$ erreicht die Phasengeschwindigkeit einen Minimalwert:

$$v_{Ph_{min}} = \frac{2}{\pi} \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (11)$$

1.2 (unendlich lange) LC-Ketten

Interessant für die Schaltungstechnik ist auch der am Eingang der Kette gemessene Eingangswiderstand (auch Wellenwiderstand), welcher als Quotient von der am Eingangskondensator anliegenden Spannung U_0 und dem in die Schaltung hineinfließenden Strom I_0 definiert ist:

$$Z(\omega) = \frac{U_0}{I_0} = \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{4}\omega^2 LC}}. \quad (12)$$

Der Eingangswiderstand einer (unendlich langen) Kette ist somit rein reell, obwohl in der Schaltung nur Komponenten mit imaginären Impedanzen verwendet wurden. Somit sind Strom und Spannung an jedem Ort in Phase, elektrische Energie kann lediglich in

die Kette hineinfließen. Eine (unendlich lange) Kette kann also auch bei einer begrenzten mit dem Wellenwiderstand als Abschlusswiderstand simuliert werden.

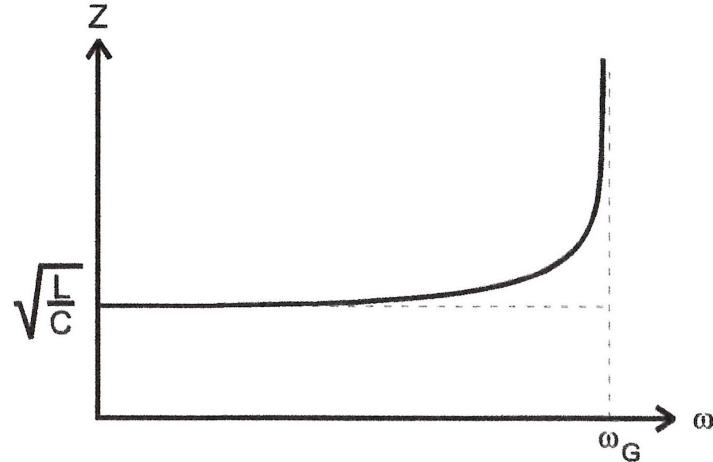


Abbildung 2: Frequenzabhängigkeit der charakteristischen Impedanz [TUD17]

In Abbildung 2 sieht man die Abhängigkeit der Impedanz von der angelegten Frequenz. Zu sehen ist, dass sich die Frequenz einem bestimmten Grenzwert annähert, ab dem der Wellenwiderstand über alle Grenzen wächst. Über den angeschlossenen Widerstand und den Wellenwiderstand lässt sich das Verhältnis zwischen Amplitude der eingehenden und reflektierten Spannung über folgende Formel bestimmen:

$$\frac{U_{\text{ref}}}{U_E} = \frac{r - Z}{r + Z}. \quad (13)$$

Die Welle weist nun für verschiedene Abschlusswiderstände unterschiedliche Eigenschaften auf, die im folgenden aufgelistet sind:

- a) offenes Ende ($R = \infty$):
 $U_{\text{ref}} = U_E \implies$ vollständige Reflexion ohne Phasensprung.
- b) kurzgeschlossene Kette ($R = 0$):
 $U_{\text{ref}} = -U_E \implies$ vollständige Reflexion mit Phasensprung um π .
- c) Abschluss mit Wellenwiderstand ($R = Z$):
 $U_{\text{ref}} = 0 \implies$ keine Reflexion.
- d) in allen anderen Fällen tritt eine Teilreflexion auf und bei einem nicht reellen R zusätzlich eine Phasendrehung.

Bei den ersten beiden Fällen entsteht durch Interferenz der einlaufenden und der rücklaufenden Welle eine stehende Welle. Dabei entstehen Schwingungsknoten, an denen die Amplitude für alle Zeiten verschwindet:

$$n_z \theta = z \frac{\pi}{2} \quad (z = 1, 3, 5, \dots) \quad (14)$$

$$n_z \theta = z\pi \quad (z = 1, 2, 3, \dots) \quad (15)$$

Dabei bezieht sich die Formel (14) auf ein offenes Ende und die Formel (15) auf ein geschlossenes Ende.

Im Fall $R = \infty$ kann sich allerdings nur dann eine stehende Welle ausbilden, wenn am Kettenende ($n = n_{\max}$) ein Spannungsbauch befindet.

2 Versuchsdurchführung

2.1 Bestimmung der Durchlasskurve

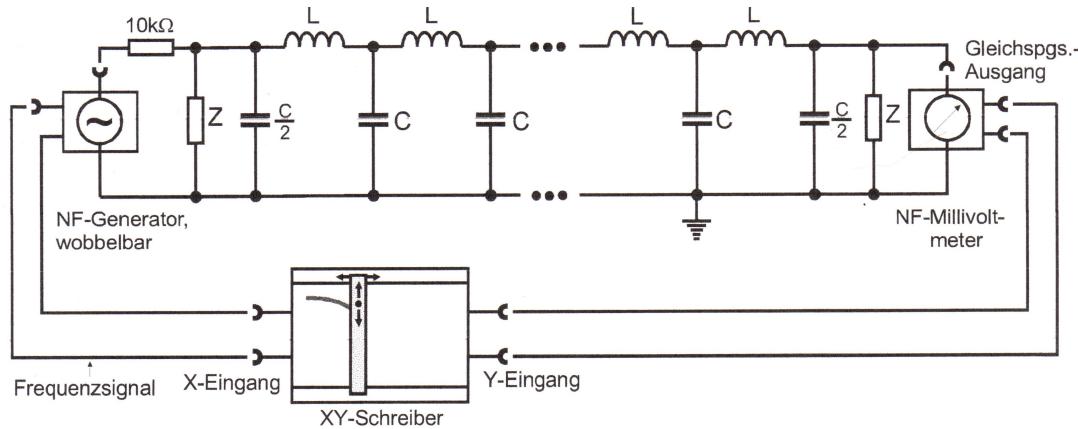


Abb. 15: Schaltung zur Aufnahme der Durchlasskurve

Abbildung 3: Schaltung zur Bestimmung der Durchlasskurve und dem Nachweis stehender Wellen [TUD17]

In dem ersten Teil des Experimentes wird mithilfe eines Schreibers eine Durchlasskurve für beide Ketten angefertigt. Dabei wird an dem Generator ein Sweep eingestellt, sodass der Schreiber die gemessenen Spannungsspitzen am Ausgang der LC-Kette in Abhängigkeit der anliegenden Frequenz aufzeichnet. Dabei müssen die Achsen so angepasst sein, dass die Grenzfrequenzen auf der angefertigten Zeichnung ebenfalls zu sehen sind. Die Schaltung für diesen Teil der Messung ist in Abbildung 3 zu sehen.

2.2 Bestimmung der Dispersionsrelation

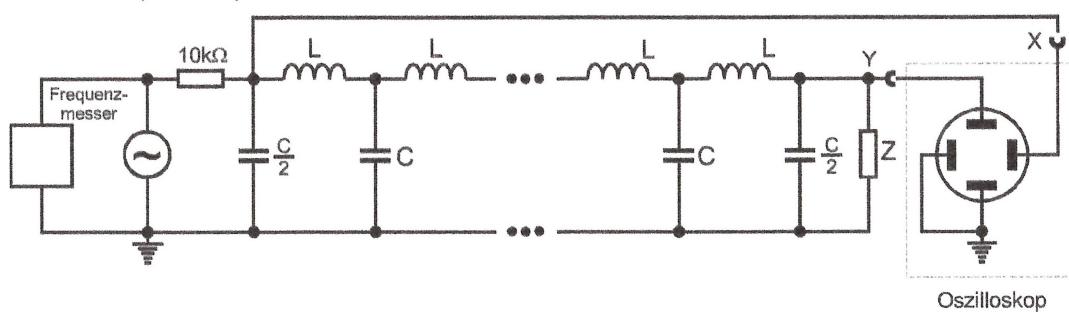


Abbildung 4: Schaltung zur Bestimmung der Dispersionsrelation [TUD17]

Mithilfe der in Abbildung 4 dargestellten Schaltung lässt sich die Phasenverschiebung pro Kettenglied betrachten. Dafür wird an einem Oszilloskop mithilfe von Lissajous-Figuren die Phasenverschiebung zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung betrachtet, wobei lediglich Frequenzen mit einer Phasenverschiebung eines Vielfachen von π notiert werden.

2.3 Nachweis von stehenden Wellen

Mit der Schaltung nach Abbildung 3 (ohne Schreiber und Wobbeleinrichtung) wird nun versucht, stehende Wellen nachzuweisen. Dafür wird mit einem Millivoltmeter anfangs die Ausgangsspannung gemessen, um eine Frequenz mit einem Spannungsmaximum am Kettenende zu finden. Danach wird an jedem Kettenglied die auftretende Spannung gemessen. Diese Messung wird für eine beiderseits offene Kette mit der 1. und 2. Eigenschwingung durchgeführt und danach für eine mit dem Wellenwiderstand als Abschlusswiderstand eingestellte Kette für eine beliebige Eigenfrequenz wiederholt.

3 Auswertung

Im Folgendem werden die Messergebnisse ausgewertet und in geeigneter Weise visualisiert.

3.1 Grenzfrequenzen

Die verwendete Apparatur hatte die folgenden Werte.

$$L = 1,217 \text{ mH} \quad (16)$$

$$C_1 = 20,13 \text{ nF} \quad (17)$$

$$C_2 = 9,41 \text{ nF} \quad (18)$$

Diese Daten wurden ohne Fehler angegeben und werden deshalb als fehlerfrei angenommen. In der LC -Kettenschaltung wurde der Kondensator mit der Kapazität C_1 verwendet.

Mittels (5), (6) und (7) ergeben sich die Werte:

$$\omega_{Grenz,C} = 404\,075 \text{ Hz}$$

$$\omega_{Grenz,C_1C_2}^{akustisch} = 285\,724 \text{ Hz}$$

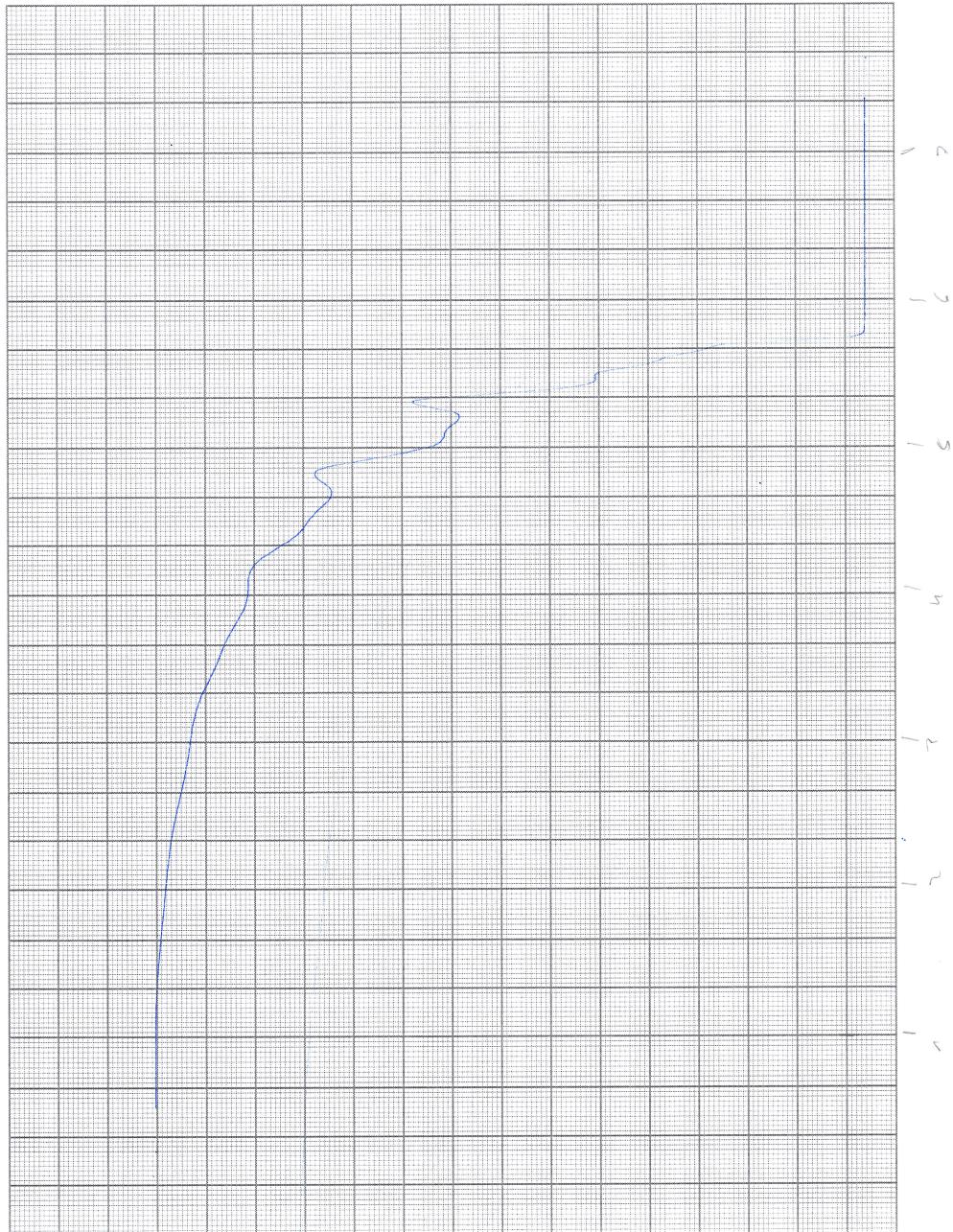
$$\omega_{Grenz,C_1C_2}^{optisch} = 417\,902 \text{ Hz.}$$

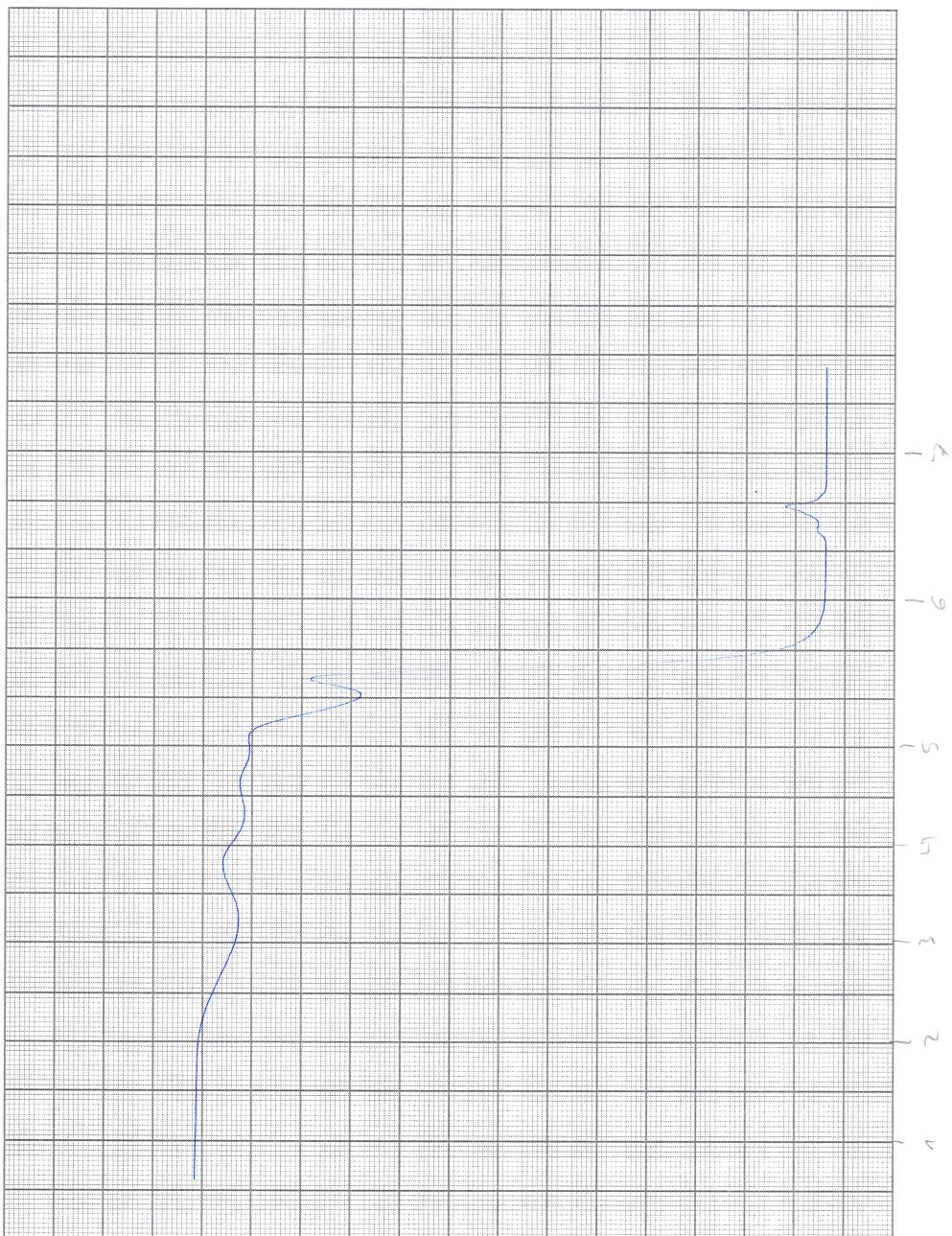
Mit Hilfe des XY-Scheibers wurden die Grenzfrequenzen der LC -Kettenschaltung und der LC_1C_2 -Kettenschaltung visualisiert. Die Diagramme sind logarithmisch. Durch Ermitteln der Frequenzen an bestimmten Stellen der Grafik kann eine exponentielle Regressionsrechnung gemacht werden. Damit ist einen Zusammenhang zwischen den Messdaten und vom Generator durchlaufenden Frequenzen bekannt.

Die Ausgleichsrechnung wurde mithilfe des *Python*-Paketes *curve_Fit* bewerkstelligt. Die Funktion hatte die Gestalt:

$$\nu(t) = a \cdot e^{bx} + c. \quad (19)$$

Die Messungen der Durchlasskurve ergaben die folgenden Werte.





Gruppe: Mittel / Pech

Datum: 17.12.2014

Versuch: V3536

Abbildung 6: Durchlasskurve einer Ketten schaltung mit zwei verschiedenen Typen Kondensator

ν_C in Hz	1338	2055	2843	3730	5023	6471	8624
$\nu_{C_1C_2}$ in Hz	7345	10478	21072	30336	50353	79169	

Tabelle 1: Messdaten der Durchlasskurve

Es ergeben sich mittels der Messdaten der Tabelle 1 die folgenden Funktionen.

$$\nu_C(x) = ((13984 \pm 1701)\text{Hz}) \cdot e^{(0,08 \pm 0,005)\frac{1}{\text{cm}} \cdot x} - (5155 \pm 2006)\text{Hz} \quad (20)$$

$$\nu_{C_1C_2}(x) = ((64117 \pm 5474)\text{Hz}) \cdot e^{(0,15 \pm 0,005)\frac{1}{\text{cm}} \cdot x} - (20547 \pm 7703)\text{Hz} \quad (21)$$

Anhand der Graphen kann die Grenzfrequenz abgelesen werden, indem der Abstand vermessen wird. Die Messung wurde mit einem Lineal gemacht und ergibt für die LC -Kettenschaltung einen Wert von ca. 17,2 cm. Die Messung der Grenzfrequenzen der LC_1C_2 -Kettenschaltung ergab für den akustischen Zweig eine Grenzfrequenz bei 11 cm und für den optischen Zweig eine Grenzfrequenz bei 12,2 cm.

Für die Grenzfrequenzen ergeben sich damit die Werte:

$$\omega_{Grenz,C} = 50224,00\text{Hz} \quad (22)$$

$$\omega_{Grenz,C_1C_2}^{akustisch} = 311361,75\text{Hz} \quad (23)$$

$$\omega_{Grenz,C_1C_2}^{optisch} = 376566,51\text{Hz} \quad (24)$$

3.2 Dispersionskurven

Mit den Angaben (16), (17) und (18) kann die Dispersionskurve der $LC - Kette$ und der LC_1C_2 -Kette über die Funktionen (1) und (2) bestimmt werden. Die Messdaten wurden in das Diagramm mit eingetragen. Bei allen Werten die eine Phasenverschiebung von über $\frac{\pi}{2}$ haben wurde die Phasenverschiebung mit $\frac{\pi}{2}$ subtrahiert und an der y -Achse gespiegelt, da die Dispersionskurve $\frac{\pi}{2}$ -Periodisch ist.

In Abb. 7 ist die Kreisfrequenz ω der Phasenverschiebung pro Glied θ gegenüber aufgetragen. Die in dem Diagramm eingetragenen Messdaten sind in Tabelle 2 in der Spalte der LC -Kette dargestellt. An der Theoriekurve ist zu erkennen, dass die Kreisfrequenz mit steigender Phasenverschiebung pro Glied sich der Grenzfrequenz asymptotisch nähert. Grenzfrequenz ergibt sich aus dem folgendem Zusammenhang:

$$\omega_{Grenz} = \frac{2}{\sqrt{L \cdot C_1}} \quad (25)$$

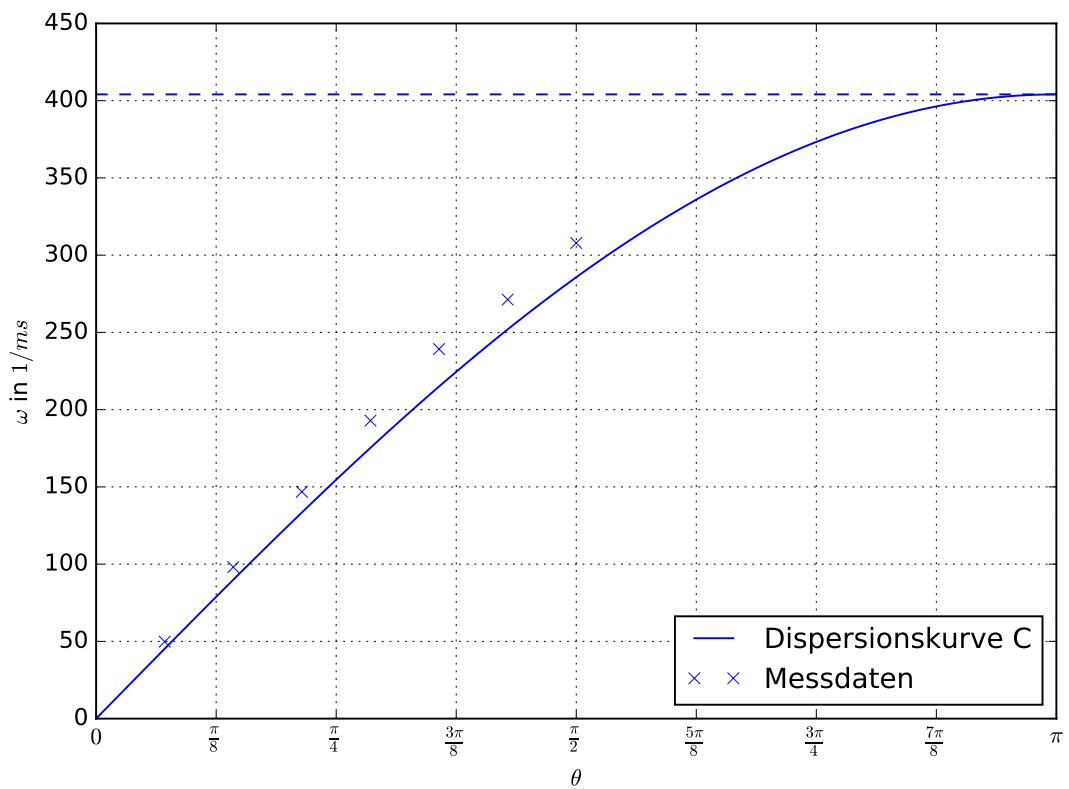


Abbildung 7: Dispersionskurve der LC -Kettenschaltung

Die Messdaten liegen in guter Näherung auf der Theoriekurve. Nur Werte bis zu einer Phasenverschiebung pro Glied von $\frac{\pi}{2}$ konnten gemessen werden. Alle Werte darüberhinaus waren nicht mehr messbar.

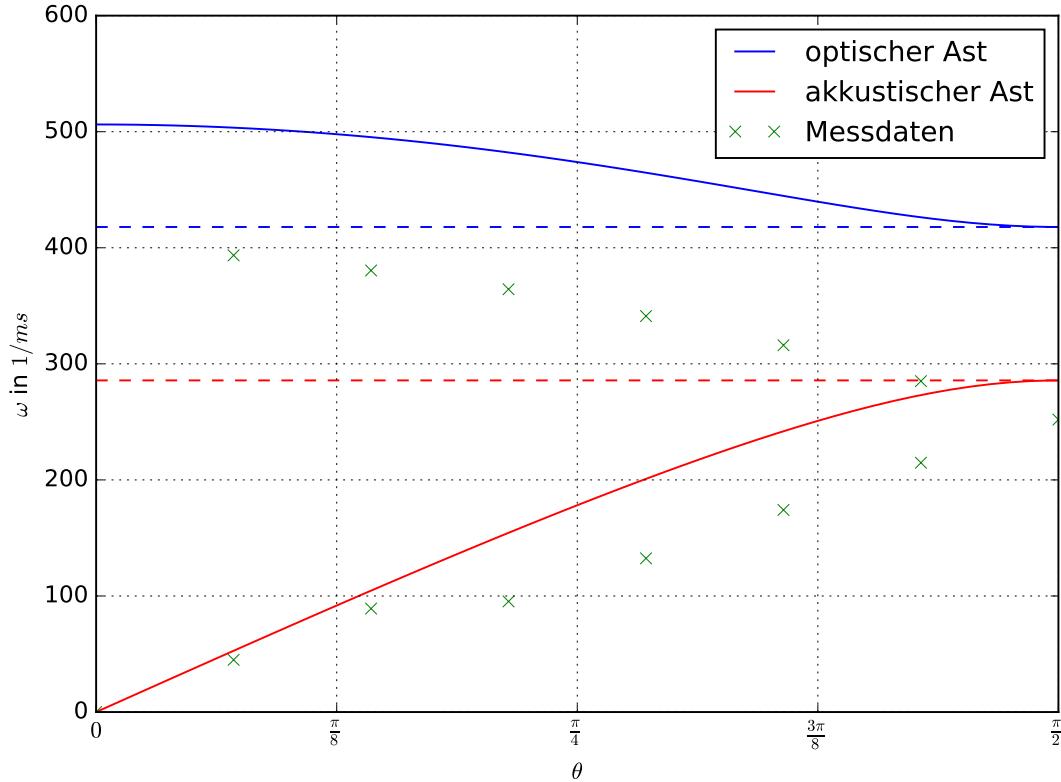


Abbildung 8: Dispersionskurve der LC_1C_2 -Kettenschaltung

Das Diagramm 8 zeigt die Dispersionskurve der LC_1C_2 -Kette. Tabelle 2 enthält in der Spalte zur LC_1C_2 -Kette die eingetragenen Messdaten. Der Theoriegraph besteht zum einen aus dem optischen Ast und zum anderen aus dem akustischen Ast. Die Messdaten weichen deutlich von den Theoriewerten ab. Auf diese Abweichung wird speziell noch einmal in der Diskussion eingegangen.

Die Messdaten der Dispersionsrelation sind in Tabelle 2 dargestellt.

3.3 Phasengeschwindigkeit

Anhand der Dispersionsrelation und der gemessenen Eigenfrequenzen aus Tabelle 2 lässt sich die Phasengeschwindigkeit über die Formel (11) berechnen. Die Theoriekurve und die Werte, die sich aus den Messungen ergeben sind in dem Diagramm 9 dargestellt. Die Phasenverschiebung pro Glied θ berechnet sich durch:

Verschiebung	ν_C	$\nu_{C_1 C_2}$
0	0	0
1π	7927	7158
2π	15 610	14 188
3π	23 372	21 078
4π	30 703	27 714
5π	38 072	34 188
6π	43 171	40 094
7π	49 000	45 378
8π	—	50 298
9π	—	54 295
10π	—	57 976
11π	—	60 550
12π	—	62 625

Tabelle 2: Messdaten der Dispersionsrelation

$$\theta = \frac{\pi n_i}{n}, i = 0, \dots, 14 \quad (26)$$

Dabei ist n die Anzahl der Kettenglieder.

θ	0	$\frac{\pi}{14}$	$\frac{\pi}{7}$	$\frac{3\pi}{14}$	$\frac{2\pi}{7}$	$\frac{5\pi}{14}$	$\frac{3\pi}{7}$	$\frac{\pi}{2}$
v_{Ph} in $\frac{1}{rad}$	—	201 524	200 019	19 412	193 799	188 791	184 288	177 700

Tabelle 3: Messdaten der Phasengeschwindigkeit

In Abb. 9 ist die Phasengeschwindigkeit gegenüber der Frequenz aufgetragen. Die Theoriekurve wurde nach Formel 1 berechnet. Es ist erkennlich, dass die gemessenen Werte mit denen der Theorie im Rahmen der Messunsicherheit übereinstimmen. Die eingetragenen Messdaten sind aus Tabelle 3 entnommen.

3.4 Stehende Wellen

Beim Messen der Spannungsamplituden der offenen LC -Kette ergeben sich die Diagramme 10, 11 und 12.

Das Diagramm 10 zeigt die Messdaten der Spalte $\nu_C = 7133$ Hz aus der Tabelle 4. Die erste Grundschwiegung ist deutlich zu erkennen. Die Generatorfrequenz ν_C wurde auf die Frequenz der ersten Eigenschwingung eingestellt, weshalb dieses Diagramm den Erwartungen entspricht.

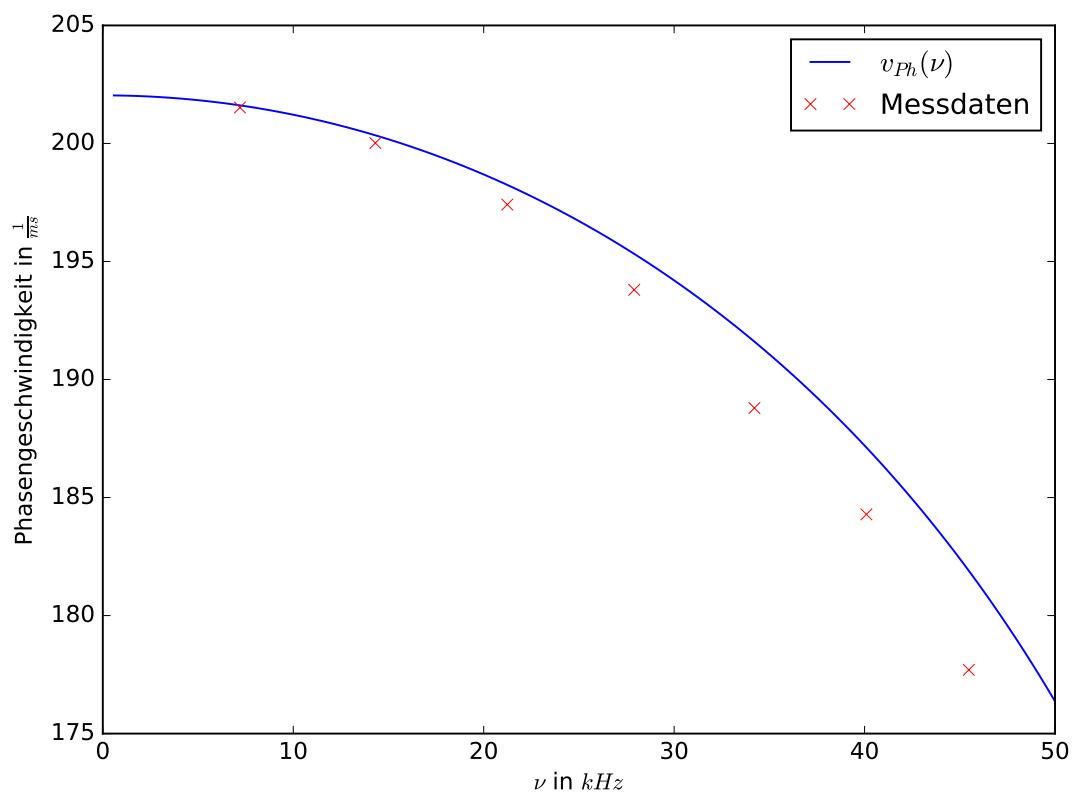


Abbildung 9: Phasengeschwindigkeit

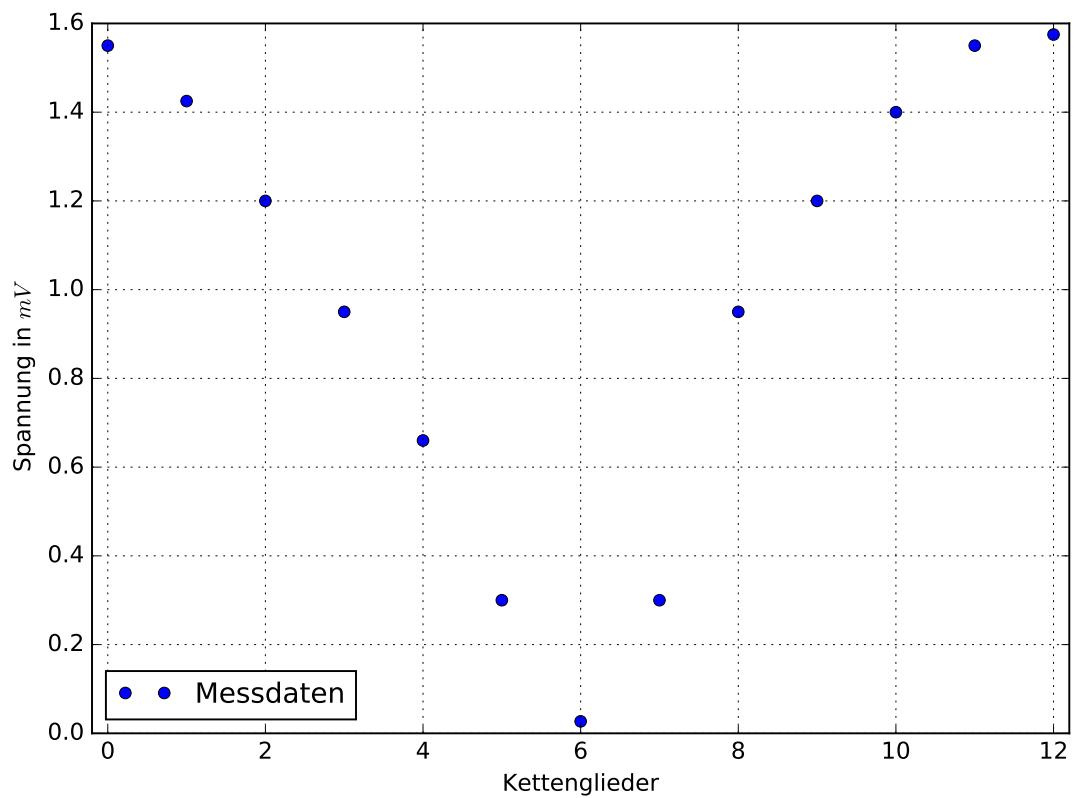


Abbildung 10: Erste Grundschwingung der offenen LC -Kettenschaltung bei $\nu = 7133 \text{ Hz}$

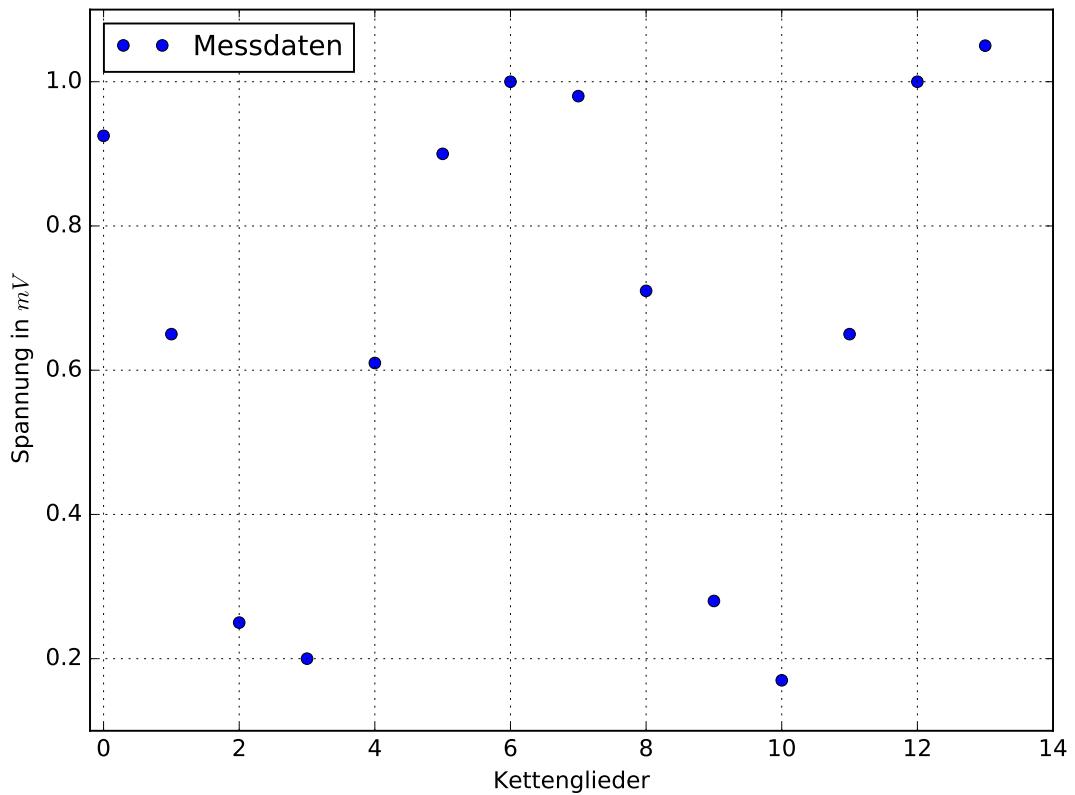


Abbildung 11: Zweite Grundschwingung der offenen LC -Kettenschaltung bei $\nu = 14\,307\,\text{Hz}$

Die Darstellung der Werte aus Spalte $\nu_C = 14\,307\,\text{Hz}$ von Tabelle 4 ist in Diagramm 11 erfolgt. Die zweite Grundschwingung ist deutlich erkennbar. Dies liegt daran, dass die Generatorfrequenz auf die zweite Eigenfrequenz der Schaltung eingestellt wurde.

Das letzte Diagramm 12 zeigt die Spannungsamplituden an den Kettengliedern bei der abgeschlossenen LC -Kette. Dafür wurden die Daten der Tabelle 4 aus der Spalte von ν_{abge} bei einer Frequenz von $7337\,\text{Hz}$. Der Verlauf der Messdaten entspricht den Erwartungen der Messung, da keine stehenden Welle erkennbar sind. Dies ergibt sich auch aus den theoretischen Überlegungen über die abgeschlossene Schaltung.

Die Messungen der Spannungsamplituden der offenen LC -Kettenschaltung, LC_1C_2 -Kettenschaltung und der abgeschlossenen LC -Kettenschaltung ergab die folgenden Werte. Die Angaben sind in mV.

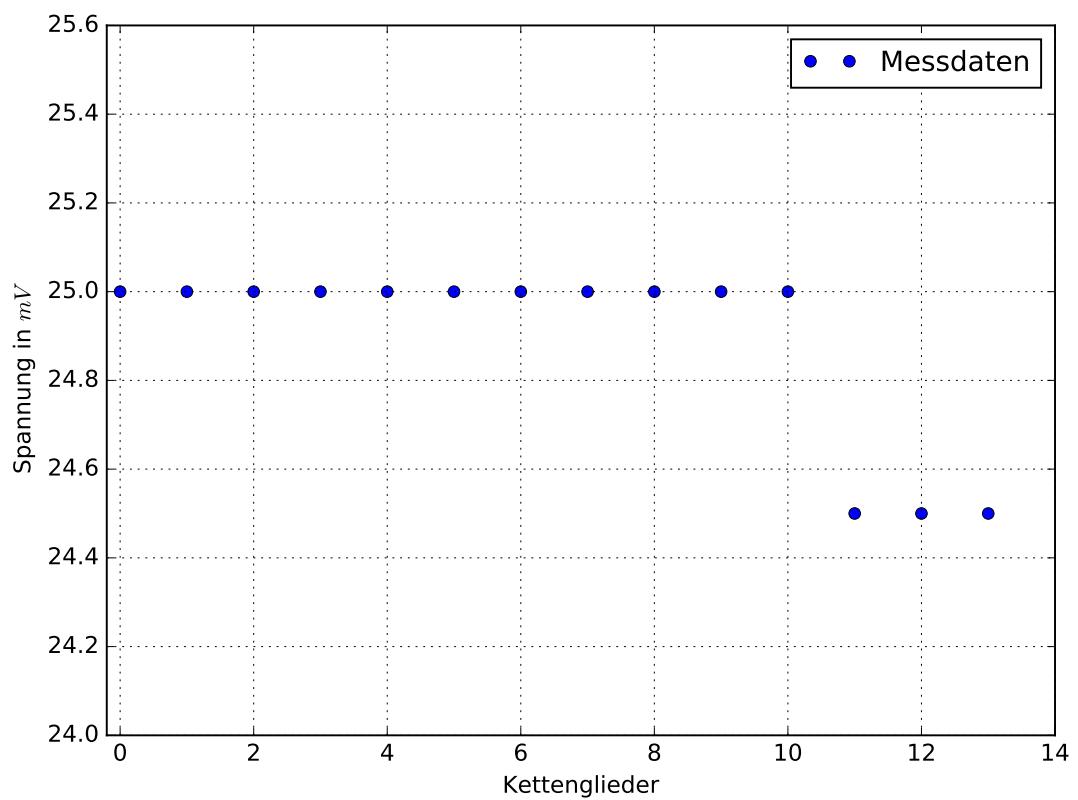


Abbildung 12: Abgeschlossene LC –Kettenschaltung bei $\nu = 7337\text{ Hz}$

Kettenglied	$\nu_C = 7133 \text{ Hz}$	$\nu_C = 14\,307 \text{ Hz}$	$\nu_{abge} = 7337 \text{ Hz}$
1	1,55	0,925	25
2	1,425	0,65	25
3	1,2	0,25	25
4	0,95	0,2	25
5	0,66	0,61	25
6	0,3	0,9	25
7	0,027	1	25
8	0,3	0,98	25
9	0,95	0,71	25
10	1,2	0,28	25
11	1,4	0,17	25
12	1,55	0,65	24,5
13	1,575	1	24,5
14	–	1,05	24,5

Tabelle 4: Messdaten der stehenden Welle

4 Diskussion

Im Folgendem werden die Messergebnisse diskutiert. Zunächst wird auf mögliche Fehlerquellen eingegangen, mit denen sich die Messungenauigkeiten begründen lassen. Zum einen war das Einstellen des Wellenwiderstandes auf der Eingangsseite (links) äußerst unpräzise. Leichte Berührungen des Widerstandreglers hatten schon enormen Einfluss auf den wiedergegebenen Widerstand. Zudem konnten die gemessenen Frequenzen nur schwierig abgelesen werden, da der Generator keine konstante Frequenz bereitgestellt hat. Die Frequenzen können deshalb die Messergebnisse mit Fehlern behaftet haben. Während des Zeichnens der Durchlasskurve durch den XY-Schreiber wurden Fixpunkte an dem Diagramm gewählt, an denen die Frequenz zu bestimmen war. Die Abstandsmessung der Fixpunkte wurde als fehlerfrei angenommen und das Messen der Frequenzen erfolgte nicht parallel zum Zeichnen. Insgesamt ist zu sagen, dass die verwendete Apparatur sehr alt ist und sehr undurchsichtig wirkte. Damit ist gemeint, dass nicht sichergestellt war, ob alle angeschlossenen Bauteile funktionierten. Die Induktivitäten und Kapazitäten der Apparatur wurden als fehlerfrei angenommen.

Die Messergebnisse der Durchlasskurven sind in den Abbildungen 7 und 8 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Dispersionskurve der LC -Kette beinahe auf der Theoriekurve liegt. Jedoch wird nicht die theoretische Grenzfrequenz in dem Aufbau erreicht. Die Messung war nur bis zu einer relativen Phasenverschiebung pro Glied von $\frac{\pi}{2}$ möglich. Die Lissajous-Figuren wurden bei allen höheren Verschiebungen nicht mehr erkennbar. Die gemessene Dispersionskurve der LC_1C_2 -Kette ähnelt der Theoriekurve erkennbar,

doch scheint sie um eine Faktor verschoben zu sein. Es wird deutlich, dass der Anfang der Kurve linear ist. Die Abweichungen der Messdaten von der Theoriekurve sind durch die oben genannten Gründe erklärbar.

Nun folgt eine Diskussion der Diagramme 10, 11 und 12. In den ersten Diagramm ist die 1. Eigenschwingung der *LC*-Kettenschaltung zusehen. Die Gestalt der Eigenschwingung ist deutlich zu erkennen. Abweichungen zu einer Theoriekurve der ersten Eigenschwingung sind mit Frequenzschüben des Generators zu erklären. Das zweite Diagramm zeigt die zweite Eigenschwingung des Systems, auch deren Gestalt ist deutlich zu erkennen. Die beiden Knotenpunkte lassen sich erahnen. Das an diesen Stellen keine wirklichen Knotenpunkte sitzen lässt sich wieder auf Frequenzschübe des Generators zurückführen. Das letzte Diagramm zeigt die abgeschlossenen *LC*-Kette bei einer Frequenz von 7337 Hz. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich keine sichtbare Welle ausbreitet. Dies hängt damit zusammen, dass sich keine stehenden Wellen ausbilden. Die Abweichungen ab dem 11. Kettenglied sind ebenfalls mit dem Wellenwiderstand zubegründen.

Literatur

- [TUD17] TU-Dortmund. *Versuch V356: Kettenschaltung mit LC-Gliedern*. 17. Jan. 2017. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V356.pdf>.