

# M12: Saitenschwingung

Verfasserin: Dan-Nha Huynh

Versuchspartner: Marco Kraft

Versuchsbetreuer: Dr. M. Busch

Versuchsdatum: 07.Mai 2008

<b>1. ZIELSTELLUNG</b>	<b>3</b>
<b>2. VERWENDETE INSTRUMENTE:</b>	<b>3</b>
<b>3. VERSUCHSAUFBAU</b>	<b>3</b>
<b>4. METHODE 1: MESSUNG DER RESONANZFREQUENZ <math>f_N</math> IN ABHÄNGIGKEIT VON N</b>	<b>3</b>
4.1 DURCHFÜHRUNG	3
4.2 MESSDATEN	4
4.3 AUSWERTUNG	4
4.3.1 Graphische Darstellung	5
4.3.2 Auswertung der graphisch ermittelten Ergebnisse	5
4.3.3 Messunsicherheit	6
4.4 ERGEBNIS	7
<b>5. METHODE 2: MESSUNG DER GRUNDFREQUENZ <math>f_1</math> IN ABHÄNGIGKEIT VON DER INVERSEN SAITENLÄNGE <math>1/L</math></b>	<b>7</b>
5.1 DURCHFÜHRUNG	7
5.2 MESSDATEN	7
5.3 AUSWERTUNG	7
5.3.1 Graphische Darstellung	8
5.3.2 Auswertung der graphisch ermittelten Ergebnisse	8
5.3.3 Messunsicherheit	9
5.4 ERGEBNIS	9
<b>6. FAZIT A</b>	<b>9</b>
<b>7. METHODE 3: MESSUNG DER GRUNDFREQUENZ <math>f_1</math> IN ABHÄNGIGKEIT VON <math>\sqrt{F_0}</math></b>	<b>10</b>
7.1 DURCHFÜHRUNG	10
7.3 AUSWERTUNG	10
7.3.1 Graphische Darstellung	10
7.3.2 Auswertung der graphisch ermittelten Ergebnisse	11
7.3.3 Messunsicherheit	11
7.4 ERGEBNIS	12
<b>8. FAZIT B</b>	<b>12</b>
<b>9. KRITISCHE BETRACHTUNG DES EXPERIMENTS</b>	<b>12</b>
<b>10. APPENDIX</b>	<b>13</b>

**Messdatenprotokoll**

# 1. Zielstellung

Bestimmung der Phasengeschwindigkeit der Transversalwelle<sup>1</sup> sowie der linearen Massendichte mit Hilfe von drei verschiedenen Methoden und anschließendem Methodenvergleich.

*Hinweis:* Für weitere Informationen zu den physikalischen Grundlagen und den Aufgabenstellungen zu diesem Versuch sei auf das Skript<sup>i</sup> verwiesen.

# 2. Verwendete Instrumente:

Tonfrequenzgenerator, Amperemeter, Zweikanaloszilloskop mit Detektorspule, diverse Massestücke, Stahlmaßband, Seite.

# 3. Versuchsaufbau

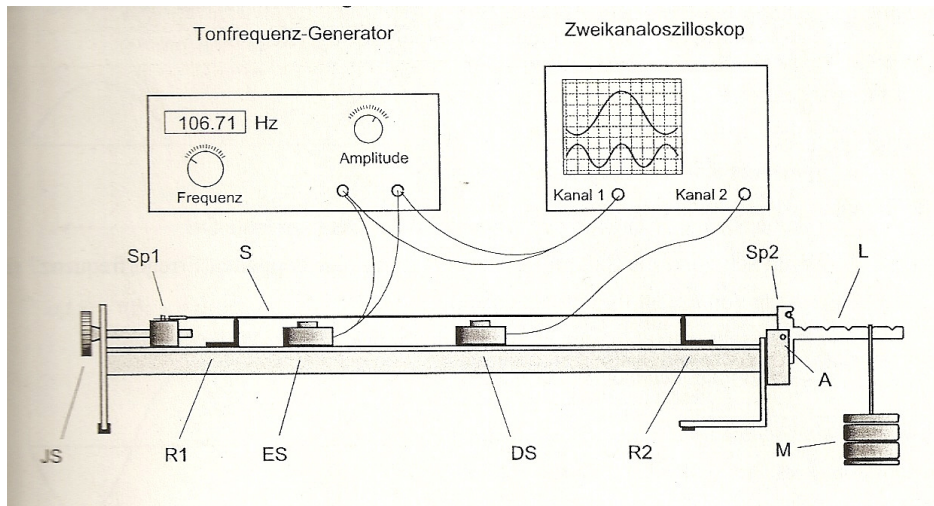


Abbildung 3-1<sup>ii</sup>

JS: Justierschraube; Sp1, Sp2: Einspannstellen; R1, R2: Reiter; S: Saite; ES: Erregerspule; DS: Detektorspule; A: Achse; L: Lasthebel; M: Massestück

# 4. Methode 1: Messung der Resonanzfrequenz $f_n$ in Abhängigkeit von $n$

## Durchführung

<sup>1</sup> Betrachtet man die Formeln für die Phasengeschwindigkeit  $c$  der Transversalwelle sowie der Longitudinalwelle

$$c^{trans} = \sqrt{\frac{F_0}{A \cdot \rho}} \quad c^{long} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

( $F_0$ : Fadenspannung,  $E$ : Elastizitätsmodul,  $A$ : Querschnittsfläche,  $\rho$ : Massendichte der Saite), so gilt  $E \gg F_0/A$ , d.h.  $c^{long} \gg c^{trans}$  (gleiches gilt für die dazu proportionalen Frequenzen). Damit sind nur die Transversalwellen beobachtbar.

Bei fest gehaltener Saitenlänge ( $l = 0,6\text{m}$ ) sowie fester Zugspannung (Belastung von 1kg in der 3. Kerbe des Lasthebels) wird die Resonanzfrequenz  $f_n$  für  $n = 1$  bis 9 bestimmt. Sie ist das Doppelte der Erregerfrequenz (Dies gilt auch für alle folgenden Abschnitte). Anhand von Lage und (theoretisch) Anzahl der erfassten Schwingungsknoten kann der Schwingungszustand  $n$  bestimmt werden. Jedoch können Schwingungsknoten unter einem Abstand von etwa 15 cm (bei höheren Frequenzen sogar bis zu 20cm) nicht mehr korrekt erfasst werden, da es dann zu direkter Wechselwirkung von Detektorspule und Erregerspule kommt. Die Lage der auffindbaren Schwingungsknoten, welche, wie im Folgenden noch festgestellt wird, gut mit den theoretisch ermittelten Lagewerten übereinstimmt, muss daher für die Bestimmung von  $n$  genügen.

Die Amplitude wird mit Hilfe des Stromstärkereglers eingestellt.

## Messdaten

Erfassung von  $n$ :

Messung i	Lage der Schwingungsknoten in cm	theoretische Lage der Schwingungsknoten in cm	Anzahl der Schwingungsknoten
1	-	-	0
2	.../30,0/60,0	0,0/30,0/60,0	3
3	.../20,0/40,0/60,0	0,0/20,0/40,0/60,0	4
4	.../15,0/30,0/45,1/60,0	0,0/15,0/30,0/45,0/60,0	5
5	.../24,0/36,0/47,8/60,0	0,0/12,0/24,0/36,0/48,0/60,0	6
6	.../20,0/40,0/50,0/60,0	0,0/10,0/20,0/30,0/40,0/50,0/60,0	7
7	.../17,0/25,9/34,1/42,9/51,4/60,0	0,0/8,6/17,1/25,7/34,3/42,9/51,4/60,0	8
8	.../22,5/30,0/37,5/45,0/52,5/60,0	0,0/7,5/15,0/22,5/30,0/37,5/45,0/52,5/60,0	9
9	.../26,7/33,3/40,0/46,5/53,0/60,0	0,0/6,7/13,3/20,0/26,7/33,3/40,0/46,7/53,3/60,0	10

Tabelle 4.2-1

Man erhält für die Messung der Lage der Schwingungsknoten eine 91%-ige Übereinstimmung mit den theoretischen Werten. Dies soll genügen um  $n$  aus den Messungen zu festzulegen. Für die jeweiligen Messungen gelte daher:

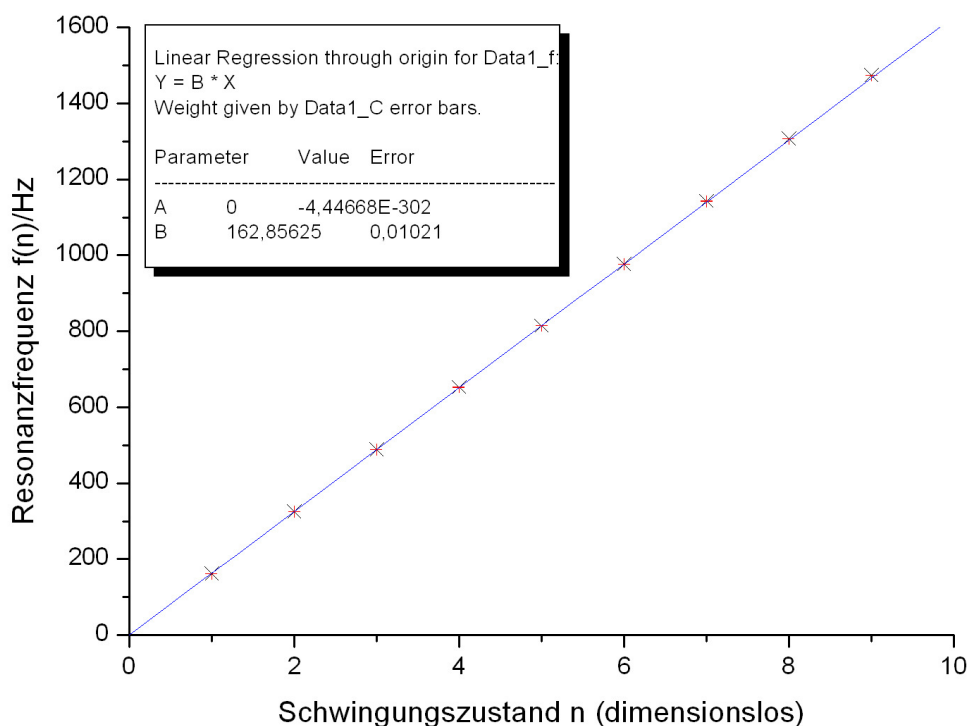
Messung i	Schwingungszustand $n$ [dimensionslos]	Erregerfrequenz $f/\text{Hz}$	Resonanzfrequenz $f(n)/\text{Hz}$
1	1	80,80	161,60
2	2	162,5	325,0
3	3	244,4	488,8
4	4	326,4	652,8
5	5	407,2	814,4
6	6	488,5	977,0
7	7	571,3	1142,6
8	8	653,3	1306,6
9	9	736,9	1473,8

Tabelle 4.2-2

## Auswertung

## Graphische Darstellung

Nun kann im Folgenden die Resonanzfrequenz in Abhängigkeit von  $n$  grafisch dargestellt werden. Der lineare Fit durch die Datenpunkte lässt dann eine Ursprungsgerade mit der Steigung  $B$  entstehen. Für die Erstellung der Fehlerbalken wird dabei im Resonanzfrequenzbereich bis 200Hz eine systematische Messunsicherheit von 0,02Hz, im Frequenzbereich ab 200Hz eine systematische Messunsicherheit von 0,2Hz angenommen. Dies ergibt sich aus der Anzeigegenauigkeit der digitalen Anzeige des Tonfrequenzgenerators. Die Betrachtung einer statistischen Messunsicherheit erscheint an dieser Stelle nicht sinnvoll, da der Stichprobenumfang für die jeweiligen Frequenzen, nämlich eine Messung, für eine solche Betrachtung nicht ausreicht.



Graphik 4.3-1

Für die Steigung erhält man somit:

$$\underline{\underline{B = (162,86 \pm 0,01) \text{ Hz}}}$$

## Auswertung der graphisch ermittelten Ergebnisse

Aus dem Geradenanstieg lässt sich jetzt mit dem Wissen über Saitenlänge  $l$  und Fadenspannung  $F_0$  (Angaben s. 4.3.1) die lineare Massendichte  $\mu$  bestimmen. Für diese gilt nämlich:

$$\mu = \frac{F_0}{(2lB)^2} \quad (\text{Gl. 4.3-1})$$

Dabei ergibt sich  $F_0$  folgendermaßen: Das Übersetzungsverhältnis des Hebelarmes<sup>iii</sup> beträgt für die dritte Kerbe  $j = 3$ . Dazu liefert der Hebelarm selbst durch sein Eigengewicht eine Zugkraft von 0,52N:

$$F_0 = 3mg + 0,52N \quad (\text{Gl. 4.3-2})$$

m: angehängte Masse

g: Erdbeschleunigung ( $g = 9,81\text{m/s}^2$ )

$$\underline{\underline{F_0 = 29,95N}}$$

Somit ergibt sich für die lineare Massendichte:

$$\underline{\underline{\tilde{\mu} \approx 7,84 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}}}$$

Aus  $\mu$  lässt sich im Weiteren die Phasengeschwindigkeit der Transversalwelle  $c^{\text{trans}}$  berechnen:

$$c^{\text{trans}} = \sqrt{\frac{F_0}{\mu}} (= 2lB) \quad (\text{Gl. 4.3-3})$$

$$\underline{\underline{\tilde{c}^{\text{trans}} \approx 195,43 \frac{\text{m}}{\text{s}}}}$$

## Messunsicherheit

Die Messunsicherheit der linearen Massendichte  $u_\mu$  ergibt sich aus den systematischen Messunsicherheiten, aus denen sie sich zusammensetzt.

$$u_\mu = \sqrt{\left(\frac{1}{(2lB)^2} \cdot u_{F_0}\right)^2 + \left(-\frac{F_0}{2l^3B^2} \cdot u_l\right)^2 + \left(-\frac{F_0}{2l^2B^3} \cdot u_B\right)^2} \quad (\text{Gl. 4.3-4})$$

$u_{F_0}$ : Systematische Messunsicherheit von  $F_0$

$u_l$ : Systematische Messunsicherheit von  $l$  ( $(5 \cdot 10^{-6} + l \cdot 5 \cdot 10^{-5})\text{m} = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{m}$ )

$u_B$ : Systematische Messunsicherheit von  $B$  ( $0,01\text{Hz}$ )

$u_{F_0}$  berechnet sich formal dabei folgendermaßen:

$$u_{F_0} = \sqrt{(jmg \cdot u_j)^2 + (jmg \cdot u_m)^2 + (jmg \cdot u_g)^2} \quad (\text{Gl. 4.3-5})$$

$u_j$ : Systematische Unsicherheit des Übersetzungsverhältnisses

$u_m$ : Systematische Unsicherheit des Massestückes

$u_g$ : Systematische Unsicherheit der Erdbeschleunigung

Da es zu diesem Versuch keine Angaben über die Systematischen Unsicherheiten von  $j$ ,  $m$  und  $g$  gibt, werden diese Größen an dieser Stelle als fehlerfrei angenommen. Es sei aber ausdrücklich darauf hingewiesen, dass insbesondere  $j$  keinesfalls fehlerfrei ist (mehr hierzu in Abschnitt 8). Die anzunehmende Messunsicherheit ist also sicherlich größer, als in diesem Abschnitt berechnet wird.

Somit ergibt sich für  $u_\mu$ :

$$\underline{\underline{u_\mu \approx 1,34 \cdot 10^{-7} \text{ kg / m}}}$$

Hieraus lässt sich die Messunsicherheit der Phasengeschwindigkeit  $u_c$  berechnen:

$$u_c = \left| -\frac{\sqrt{F_0}}{2\mu^{3/2}} \cdot u_\mu \right| \quad (\text{Gl. 4.3-6})$$

$$\underline{\underline{u_c \approx 0,017 \text{ m/s}}}$$

## Ergebnis

$$\mu = \tilde{\mu} \pm u_c = (7,842 \pm 0,002) \cdot 10^{-4} \text{ kg / m}$$

Diese Angabe stimmt soweit mit der Herstellerangabe von  $7,8 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}$  überein.

*Anmerkung:* Um sicher zu gehen, wurde die Messunsicherheit von  $\mu$  aufgerundet.

$$c^{\text{trans}} = \tilde{c}^{\text{trans}} \pm u_c = (195,43 \pm 0,02) \text{ m / s}$$

## 5. Methode 2: Messung der Grundfrequenz $f_1$ in Abhängigkeit von der inversen Saitenlänge $1/l$

### Durchführung

Anders als in Abschnitt 4 wird nun bei festem  $n = 1$  die Saitenlänge  $l$  variiert und die jeweils zu  $l$  gehörige Resonanzfrequenz  $f_1$  gemessen. Die Zugspannung wird wie in Abschnitt 4 bei  $m = 1 \text{ kg}$  konstant gehalten. Die Messung wird für 10 verschiedene Saitenlängen durchgeführt.

### Messdaten

Messung i	Saitenlänge l/m	Erregerfrequenz f/Hz	Grundfrequenz f(1)/Hz	Inverse Saitenlänge 1/l/1/m
1	0,650	74,91	149,82	1,5385
2	0,620	78,27	156,54	1,6129
3	0,600	80,80	161,6	1,6667
4	0,580	83,51	167,02	1,7241
5	0,550	88,12	176,24	1,8182
6	0,520	93,24	186,48	1,9231
7	0,500	97,07	194,14	2,0000
8	0,440	110,6	221,2	2,2727
9	0,400	121,8	243,6	2,5000
10	0,380	128,1	256,2	2,6316

Tabelle 5.2-1

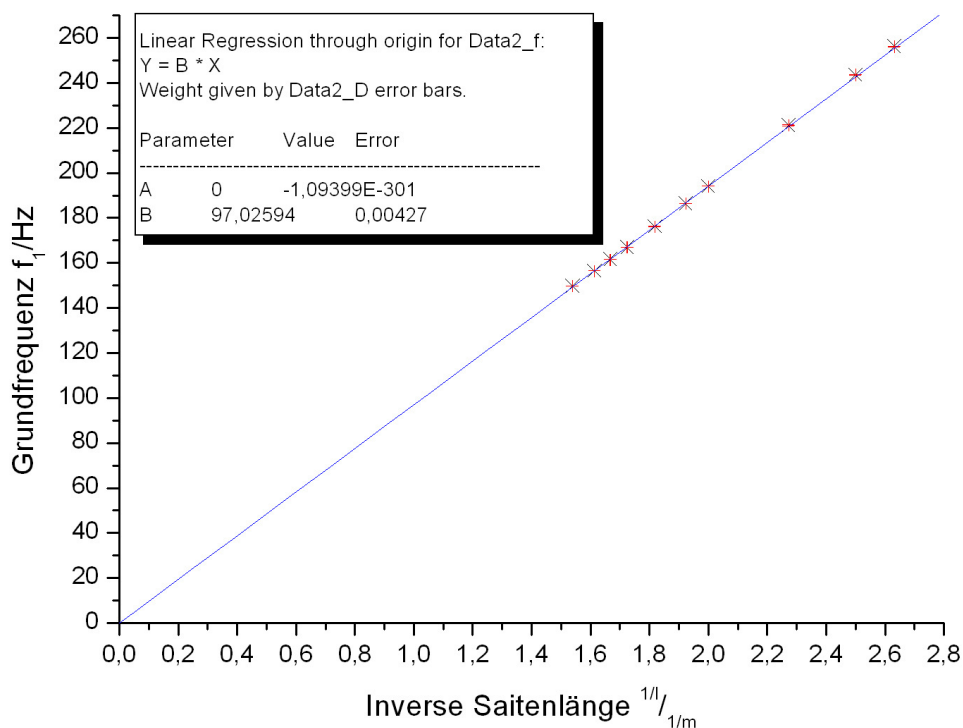
### Auswertung

## Graphische Darstellung

Im Folgenden wird die jeweilige Grundfrequenz in Abhängigkeit von der inversen Saitenlänge dargestellt, so dass sich beim Fit eine Ursprungsgerade mit der Steigung B ergibt. Die systematischen Messunsicherheiten von  $f_1$  ergeben sich dabei wie in 4.3.1 angegeben. Die systematische Messunsicherheit der inversen Saitenlänge berechnet sich folgendermaßen:

$$u_{1/l} = \left| -\frac{1}{l^2} \cdot u_l \right| \quad (\text{Gl. 5.3-1})$$

$u_l$ : Systematische Messunsicherheit von  $l$  ( $(5 \cdot 10^{-6} + l \cdot 5 \cdot 10^{-5})\text{m}$ )



Graphik 5.3-1

*Anmerkung:* Der Bildausschnitt wurde bewusst so gewählt, damit der zuvor verlangte Ursprungscharakter deutlich wird. Um einen Bildausschnitt zu erhalten, der die Lage Datenpunkte besser veranschaulicht, siehe Appendix.

Für die Steigung erhält man somit:

$$\underline{\underline{B = (97,026 \pm 0,004)\text{Hz}}}$$

## Auswertung der graphisch ermittelten Ergebnisse

Aus dem Geradenanstieg lässt sich nun die Phasengeschwindigkeit  $c^{\text{trans}}$  berechnen:



$$c^{trans} = \frac{2B}{n} \quad (\text{Gl. 5.3-2})$$

$$\tilde{c}^{trans} \approx 194,05 \frac{m}{s}$$

Ebenso kann auch die lineare Massendichte berechnet werden:

$$\mu = \frac{F_0 \cdot n^2}{4B^2} \quad (\text{Gl. 5.3-3})$$

$$\mu \approx 7,95 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}$$

## Messunsicherheit

n wird wiederum als fehlerfrei angenommen, somit ist die Messunsicherheit von  $c^{trans}$ :

$$u_c = \left| \frac{2u_B}{n} \right| \quad (\text{Gl. 5.3-4})$$

$$u_c \approx 8,54 \cdot 10^{-3} \frac{m}{s}$$

Für die lineare Massendichte ergibt sich Folgendes:

$$u_\mu = \left| -\frac{F_0 \cdot n^2}{2B^3} \cdot u_B \right| \quad (\text{Gl. 5.3-5})$$

$$u_\mu \approx 6,79 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}$$

Dies ist im Vergleich zu 4.3.3 eine relativ hohe Messunsicherheit!

## Ergebnis

$$c^{trans} = \tilde{c}^{trans} \pm u_c = (194,052 \pm 0,009) \text{ m/s}$$

$$\mu = (7,95 \pm 0,07) \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}$$

## 6. Fazit A

- (1) Betrachtung der Phasengeschwindigkeit: Vergleicht man das Ergebnis 5.4 mit 4.4, so stellt man eine Abweichung der beiden Werte voneinander ab, die auch nicht mit den Messunsicherheiten verträglich ist. Dabei ist jedoch die Messunsicherheit von  $c^{trans}$  in 5.4 kleiner als in 4.4.

Verlässlicher ist daher das Ergebnis aus 5.4, besonders wenn man beachtet, dass in 4.4 zur Berechnung von  $u_c$   $F_0$  als quasi fehlerfrei angenommen wurde, was durchaus nicht zutrifft (mehr hierzu in Abschnitt 8). Zur Berechnung der Phasengeschwindigkeit bietet sich daher eher Methode 2 an.

- (2) Betrachtung der linearen Massendichte: Das Ergebnis weicht natürlich weit von der Herstellerangabe ab. Und ist auch unter Hinzuziehung der Messunsicherheit nicht mit dieser

---

<sup>2</sup> Die gräuliche Farbgebung erklärt sich in Abschnitt 6.

verträglich. Dies gilt auch für das Ergebnis für  $\mu$  aus der Methode 1. So ist festzustellen, dass bei  $n = 1$  im Gegensatz zu Gl. 4.3-1, aus der die lineare Massendichte schon sehr gut bestimmt werden konnte, der Faktor  $1/l^2$  in Gl. 5.3-3 fehlt. Im Folgenden soll daher nur noch das Ergebnis aus Methode 1 diskutiert werden. Dies entspricht auch der Aufgabenstellung im Skript<sup>i</sup>.

## 7. Methode 3: Messung der Grundfrequenz $f_1$ in Abhängigkeit von

$$\sqrt{F_0}$$

### Durchführung

Diesmal werden  $n = 1$  und die Saitenlänge  $l = 0,6\text{m}$  konstant gehalten und die Zugspannung durch Veränderung der angehängten Massestücke variiert. Die Massestücke werden dabei in der dritten Kerbe des Hebelarmes eingehängt.  $f_1$  wird wie gehabt bestimmt.

### Messdaten

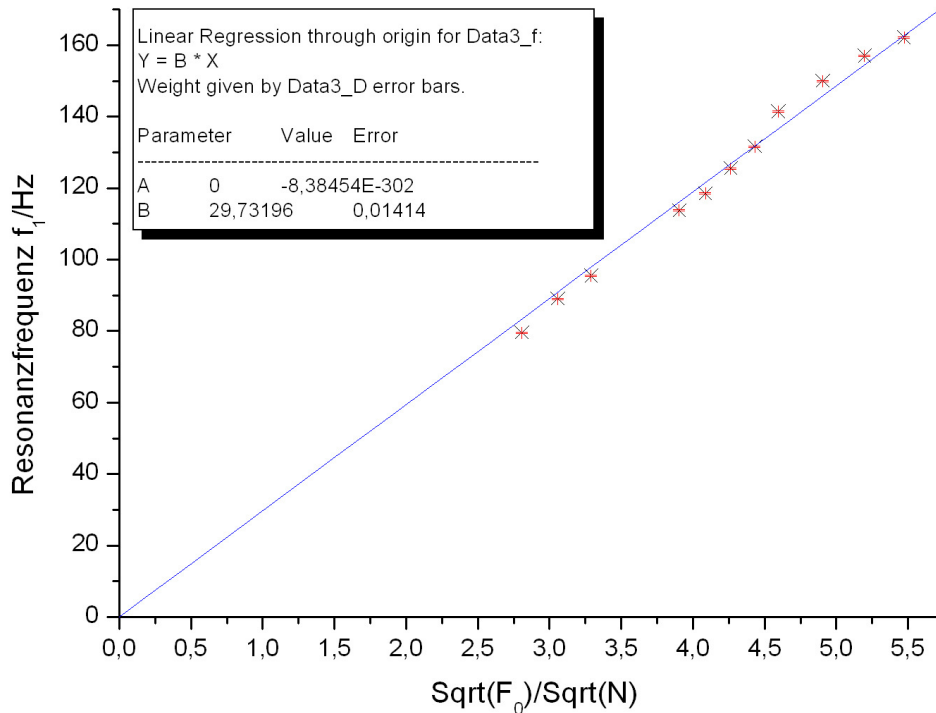
Messung i	Masse m/kg	$\sqrt{F_0}$	Erregerfrequenz f	Resonanzfrequenz $f_1(\sqrt{F_0})/\text{Hz}$
1	0,250	2,8067	39,78	79,56
2	0,300	3,0576	44,51	89,02
3	0,350	3,2895	47,72	95,44
4	0,500	3,9032	56,88	113,76
5	0,550	4,0874	59,23	118,46
6	0,600	4,2636	62,77	125,54
7	0,650	4,4328	65,81	131,62
8	0,700	4,5958	70,70	141,4
9	0,800	4,9055	75,00	150
10	0,900	5,1968	78,49	156,98
11	1,000	5,4727	81,07	162,14

Tabelle 6.2-1

### Auswertung

#### Graphische Darstellung

Es kann nun die Resonanzfrequenz  $f_1$  in Abhängigkeit von der Zugspannung dargestellt werden. Zur Erstellung von Fehlerkreuzen wurde entsprechend 4.3.1 die systematische Messunsicherheit von  $f_1$  festgelegt. Die verschiedenen  $\sqrt{F_0}$  hingegen wurden entsprechend 4.3.3 als fehlerfrei angenommen.



Graphik 7.3-1

Für die Steigung erhält man somit:

$$\underline{\underline{B = (29,73 \pm 0,02) \text{ Hz} / \sqrt{N}}}$$

*Anmerkung:* Um sicher zu gehen, wurde die Messunsicherheit von B aufgerundet. Der Bildausschnitt wurde wiederum auf diese Weise gewählt, um den Verlauf durch den Ursprung deutlich zu machen. Um wiederum einen Bildausschnitt zu erhalten, der die Lage Datenpunkte besser veranschaulicht, siehe Anhang.

### Auswertung der graphisch ermittelten Ergebnisse

Aus dem Geradenanstieg lässt sich nun die lineare Massendichte  $\mu$  bestimmen:

$$\mu = \left( \frac{n}{2lB} \right)^2 \quad (\text{Gl. 7.3-1})$$

$$\underline{\underline{\tilde{\mu} = 7,86 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m}}}}$$

*Anmerkung:* Es gibt an dieser Stelle keine sinnvolle Möglichkeit aus den Messdaten, die Phasengeschwindigkeit zu berechnen, da diese aus  $\sqrt{F_0}$  hervorgeht.  $\sqrt{F_0}$  ist aber Variable der Resonanzfrequenz.

### Messunsicherheit

n wird wiederum als fehlerfrei angenommen, somit ist die Messunsicherheit von  $\mu$ :

$$u_{\mu} = \sqrt{\left(-\frac{n^2}{2l^3 B^2} \cdot u_l\right)^2 + \left(-\frac{n^2}{2l^2 B^3} \cdot u_B\right)^2} \quad (\text{Gl. 7.3-2})$$

$$u_l = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

$$u_B = 0,014 \text{ Hz} / \sqrt{N}$$

$$\underline{\underline{u_{\mu} = 7,53 \cdot 10^{-7} \text{ Hz} / \sqrt{N}}}$$

Die Messunsicherheit ist dabei, immer noch kleiner als erwartet, da  $F_0$  ungünstigerweise als fehlerfrei angenommen wird (mehr hierzu s. Abschnitt 8).

## Ergebnis

$$\mu = \tilde{\mu} \pm u_c = (7,856 \pm 0,008) \cdot 10^{-4} \text{ kg / m}$$

## 8. Fazit B

Das in 7.4 gezeigte Ergebnis für  $\mu$  ist selbst unter Berücksichtigung Messunsicherheit weder mit der Herstellerangabe von  $7,8 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}$  noch mit dem Ergebnis aus Abschnitt 4.4 verträglich. Die in Abschnitt 7 verwendete Methode zur Bestimmung der linearen Massendichte erweist sich daher als ungeeignet. Dies liegt vor allem daran, dass bei jeder neuen angehängten Masse der Hebelarm jedes Mal erneut mit Hilfe der Justierschraube in horizontale Lage gebracht werden musste. Jedoch ist diese horizontale Lage nur subjektiv, d.h. abhängig vom Urteilungsvermögen des Experimentators, bestimmbar, da eine Wasserwaage für eine solche Bestimmung fehlt. Liegt nämlich der Hebelarm nicht horizontal zum Erdboden, so ist das zur Berechnung von  $F_0$  verwendete Übersetzungsverhältnis nicht mehr gleich 3 für die 3. Kerbe. Es ergibt sich also eine Messabweichung für  $F_0$ , welche jedoch ungünstigerweise bei den Berechnungen gleich Null gesetzt wurde.

Man beachte hierbei, dass in Methode 1 nur einmal eine Justierung mit Hilfe der Schraube vorgenommen wurde, eine Abweichung von  $F_0$  also für alle Messungen gleichermaßen gilt. In Methode 3 hingegen wurde, jedes mal erneut justiert und die Messabweichungen können daher mehr oder minder stark ausfallen. Man erkennt vermutlich auch daher eine starke Streuung von Datenpunkten um den gefitteten Graphen aus der Graphik 7.3-1.

Die Methode 1 erscheint zur Bestimmung der linearen Massendichte auch aufgrund der guten Verträglichkeit mit der Herstellerangabe am besten geeignet.

## 9. Kritische Betrachtung des Experiments

Zusammenfassend kann Folgendes festgestellt werden:

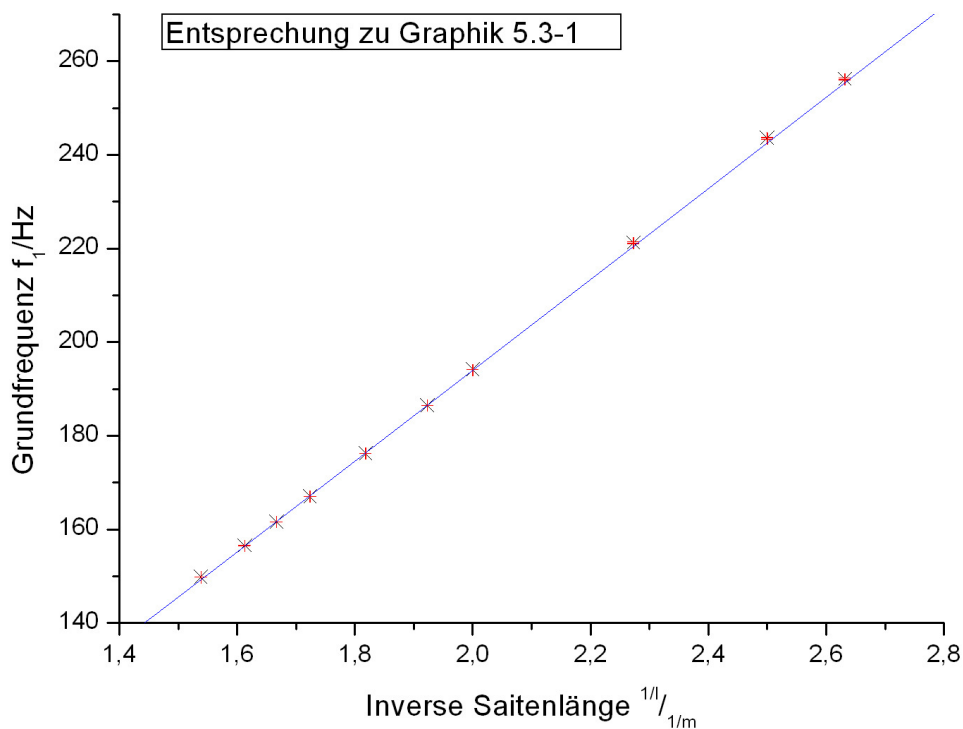
Für die Bestimmung der Phasengeschwindigkeit erweist sich die Methode 2 als am besten. Zur Bestimmung der linearen Massendichte erweist sich hingegen die Methode 1 als am besten. Gründe hierfür finden Sie in den Abschnitten 6 und 8.

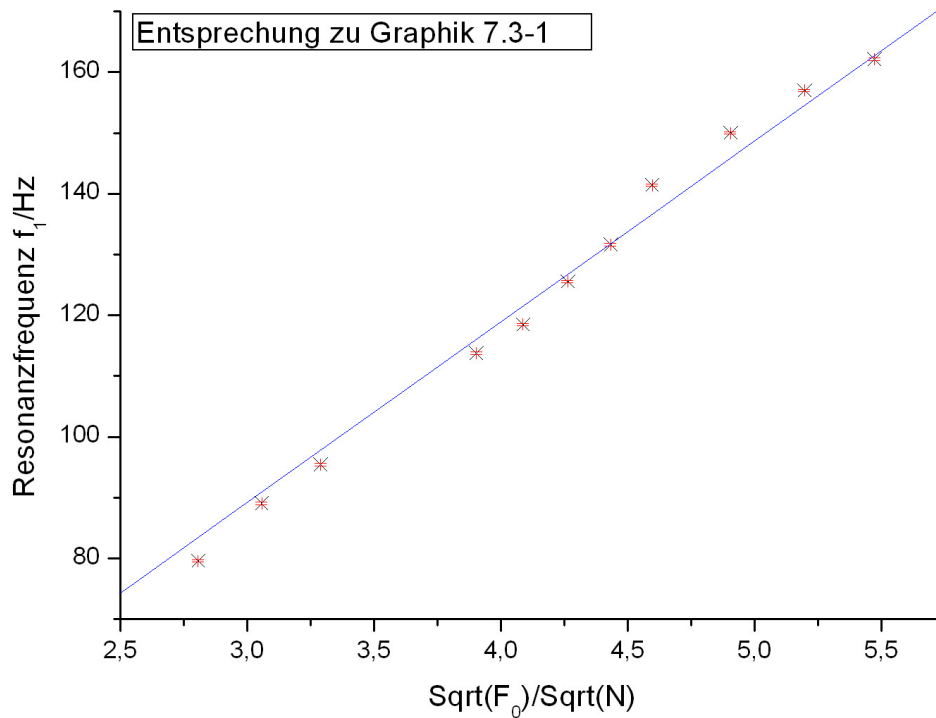
Neben den in Abschnitt 6 und 8 aufgeführten Kritikpunkten werden im Folgenden noch diese Mängel bzw. Verbesserungsvorschläge aufgeführt:

- Für die Bestimmung der Resonanzfrequenzen ist es von besonderer Bedeutung die Schwingungsknoten exakt zu erfassen, es ist jedoch schwer zu erkennen, bei welcher Lage der Detektorspule, der angezeigte Ausschlag auf dem Zweikanaloszilloskop minimal wird.
- Es fehlen Angaben zur Genauigkeit von Massestück und Eigengewicht des Lasthebels.
- An dem Hebelarm sollte eine Wasserwaage angebracht sein, oder Winkelmesser und Messschieber vorhanden sein, um mittels Hebelgesetz die Zugspannung besser bestimmen zu können.

Insgesamt kann das Experiment als durchaus sinnvoll zur Bestimmung von Phasengeschwindigkeit und linearer Massendichte betrachtet werden.

## 10. Appendix





Für die Erstellung dieses Protokolls wurden *Microsoft Word 2003* und *ORIGIN 7.0* verwendet.

---

Quellenangabe:

<sup>i</sup> Vgl. [54-60], *Physikalisches Grundpraktikum – Mechanik und Thermodynamik 2005, Humboldt-Universität, Berlin, August 2005*

<sup>ii</sup> [59], *Physikalisches Grundpraktikum – Mechanik und Thermodynamik 2005, Humboldt-Universität, Berlin, August 2005*

<sup>iii</sup> Vgl. [59], *Physikalisches Grundpraktikum – Mechanik und Thermodynamik 2005, Humboldt-Universität, Berlin, August 2005*