

FORTGESCHRITTENEN-PRAKTIKUM I

---

# Ringlaser

---

8. und 9. Oktober, 2014

Moritz  
BITTERLING

Benjamin  
ROTTLER

Betreuer: Wiebke HERZBERG



INSTITUT FÜR MATHEMATIK UND PHYSIK  
ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITÄT  
FREIBURG IM BREISGAU

Alle Berechnungen in diesem Protokoll wurden unter Python 2.7 mit Hilfe folgender Programmbibliotheken

- PyROOT (<http://root.cern.ch/drupal/content/pyroot>)
- NumPy (<http://www.numpy.org/>)

oder mit oder Mathematica 10 durchgeführt. Die Graphiken wurden mit Inkscape (<http://www.inkscape.org>) gezeichnet.

Alle Python-Skripte, L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X-Skripte, Mathematica-Notebooks und SVG-Graphiken können online unter <https://github.com/Bigben37/FP1/tree/master/1008-Ringlaser> abgerufen werden.

# Inhaltsverzeichnis

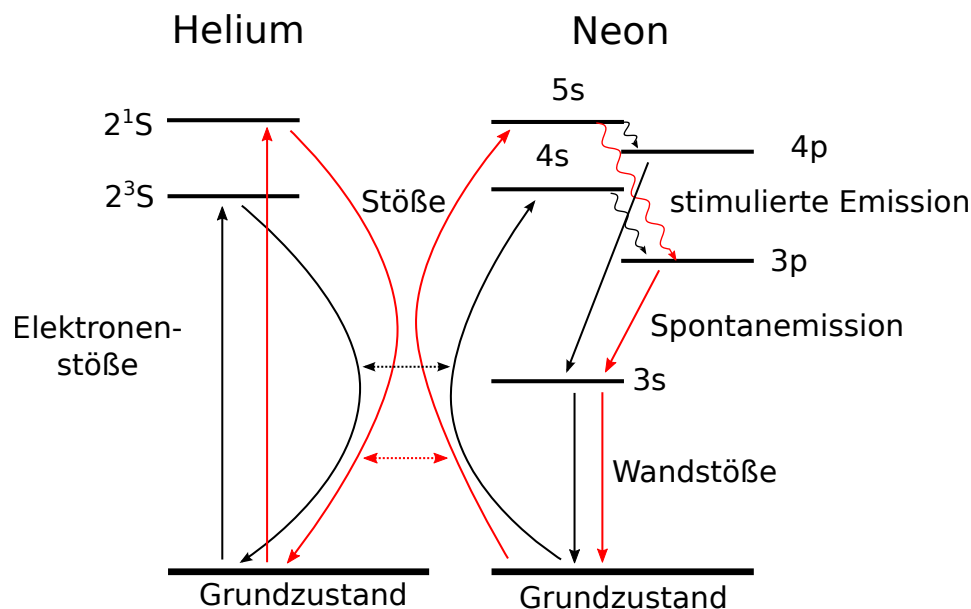
<b>1. Versuchsziel</b>	<b>1</b>
<b>2. Physikalische Grundlagen</b>	<b>1</b>
2.1. Helium-Neon-Laser . . . . .	1
2.2. Der Mitführungskoeffizient als Konsequenz der speziellen Relativitätstheorie	2
2.3. Bestimmung des Mitführungskoeffizienten mit dem Ringlaser . . . . .	3
<b>3. Versuchsaufbau</b>	<b>4</b>
<b>4. Versuchsdurchführung</b>	<b>5</b>
<b>5. Auswertung</b>	<b>5</b>
5.1. Variabler Auftreffpunkt $x_0$ . . . . .	5
5.2. Variable Periodendauer $T$ . . . . .	9
5.3. Vergleich der verschiedenen Mitführungskoeffizienten . . . . .	12
<b>6. Literatur</b>	<b>13</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>13</b>
A.1. Messprotokoll . . . . .	13

## 1. Versuchsziel

Im Versuch wird mit modernen Messmethoden ein Experiment durchgeführt, das eine Voraussage der speziellen Relativitätstheorie überprüft: Der *Mitführungskoeffizient* von Licht (hier in Quarz), der aus dem Gesetz der relativistischen Addition von Geschwindigkeiten folgt, wird bestimmt. Dazu wird ein Helium-Neon-Laser mit offenem Resonator verwendet und eine rotierende Quarzscheibe in den Strahlengang eingesetzt, die abhängig von ihrer Rotationsgeschwindigkeit die effektive Resonatorlänge ändert, damit das Laserlicht in zwei Frequenzkomponenten aufspaltet und so eine messbare Schwebung der Laserlichtintensität verursacht.

## 2. Physikalische Grundlagen

### 2.1. Helium-Neon-Laser



**Abbildung 2.1:** Termschemata von Helium und Neon: Energieübergänge im Laser. In rot der Zyklus, der im Versuch verstärkt wird.

Ein Laser besteht aus drei Komponenten: Einer *Pumpe*, die in einem *aktiven Medium* Besetzungsinversion verursacht und *Spiegeln*, die emittierte Strahlung zurück in das Medium reflektierten. Die reflektierte Strahlung stimuliert im Medium Emission und verstärkt sich dadurch selbst.

Der im Versuch verwendete Laser ist ein Helium-Neon-Gaslaser.<sup>1</sup> Der eigentliche Laserübergang findet beim Neon statt, das Helium dient nur zur Übertragung der Energie auf

<sup>1</sup> Die Ausführungen in diesem Abschnitt orientieren sich an [1].

das Neon: Eine an der Röhre angelegte Spannung führt zu Gasentladung und Anregung der Heliumatome in den metastabilen 2S-Zustand (siehe [Abbildung 2.1](#)). Durch Stöße wird diese Energie auf Neonatome übertragen und diese in höhere s-Zustände angeregt. Auf dem Rückweg in den Grundzustand können mehrere Übergänge als Laserübergänge verstärkt werden. Am Versuchsaufbau wird durch geeignete Wahl der Spiegel der Übergang 5s-3p verwendet, der eine Wellenlänge von 632.82 nm besitzt. Vom 3p-Zustand aus fallen die Neonatome schnell wieder spontan auf das 3s-Niveau und von dort aus durch Wandstöße zurück in den Grundzustand.

## 2.2. Der Mitführungskoeffizient als Konsequenz der speziellen Relativitätstheorie

### Relativistische Addition von Geschwindigkeiten

Schon vor der Formulierung der speziellen Relativitätstheorie war durch verschiedene Experimente bekannt, dass Strahlung von bewegten, optisch dichten Medien zum Teil mitgeführt wird. Für die Geschwindigkeit  $v$  der Strahlung im bewegten Medium mit Brechungsindex  $n$ , gemessen vom Ruhesystem, gilt

$$v = v' \pm \alpha \cdot w = \frac{c}{n} \pm \alpha \cdot w \quad (2.1)$$

Die Geschwindigkeit des bewegten Systems ist  $w$ ,  $c$  die Lichtgeschwindigkeit,  $v'$  die Lichtgeschwindigkeit im bewegten System und  $\alpha$  der Mitführungskoeffizient. Das Auftreten des Mitführungskoeffizienten wurde damals mit einer teilweisen Mitführung des Äthers erklärt.

In der Relativitätstheorie folgt der Mitführungskoeffizient als Grenzfall für kleine Geschwindigkeiten aus der Formel für die Geschwindigkeitsaddition bei Transformation in bewegte Inertialsysteme:

$$v = \frac{v' + w}{1 + \frac{v' \cdot w}{c^2}} \quad (2.2)$$

Division des Bruchs durch  $c$  liefert

$$v = \frac{\frac{v'}{c} + \frac{w}{c}}{\frac{1}{c} + \frac{v' \cdot w}{c^2}} \quad (2.3)$$

und aus der Taylorentwicklung für  $w \ll c$ , also  $w/c \ll 1$ , folgt

$$v \approx v' + \left(c - \frac{v'^2}{c}\right) \cdot \frac{w}{c} + \left(-v' + \frac{v'^3}{c^2}\right) \cdot \left(\frac{w}{c}\right)^2 \quad (2.4)$$

Da für die Lichtgeschwindigkeit  $v'$  im Medium mit Brechungsindex  $n$  gilt

$$v' = \frac{c}{n} \quad (2.5)$$

lautet die Taylorentwicklung bis zum linearen Term

$$v \approx v' + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \cdot w \quad (2.6)$$

Dies entspricht dem Zusammenhang, den A. J. FRESNEL aus der Äthertheorie ableitete.

### Relativistischer Dopplereffekt

Die Relativitätstheorie liefert aber noch einen weiteren Beitrag zum Mitführungskoeffizienten. Der relativistische Dopplereffekt, der die Frequenzveränderung einer E/M-Welle bei einer Relativbewegung zwischen Sender und Empfänger beschreibt, führt zur Aufnahme eines weiteren Terms in die Gleichung für den Koeffizienten. Die Frequenz des empfangenen Signals  $f_E$  beiträgt bei der Senderfrequenz  $f_S$

$$f_E = f_S \cdot \sqrt{\frac{c \pm w}{c \mp w}} \quad (2.7)$$

Der Mitführungskoeffizient unter Berücksichtigung des Dopplereffekts lautet (Herleitung siehe [2])

$$\alpha = 1 - \frac{1}{n^2} - \frac{\lambda}{n} \cdot \frac{\Delta n}{\Delta \lambda} \quad (2.8)$$

$\lambda$  ist die Wellenlänge des Lichts und  $\Delta n / \Delta \lambda$  die lineare Dispersion im Medium.

## 2.3. Bestimmung des Mitführungskoeffizienten mit dem Ringlaser

Die Herleitung der Formel für die Bestimmung des Mitführungskoeffizienten mit dem vorliegenden Aufbau erfordert aufwändige geometrische Überlegungen und findet sich in [2]. Hier werden nur kurz die Grundzüge der Herleitung dargelegt.

Die optische Gesamtlänge des Resonators  $L$  ist die Summe des Produkts aller Teilstreckenlängen  $l_i$  mit dem jeweiligen Brechungsindex  $n_i$

$$L = \sum_i l_i \cdot n_i \quad (2.9)$$

Für den Laser gilt die Randbedingung, dass eine ganze Zahl  $N$  von Wellenzügen mit der Wellenlänge  $\lambda$  in  $L$  liegen muss:

$$L = N \cdot \lambda \quad (2.10)$$

Für die Bestimmung des Mitführungskoeffizienten ist die Änderung der optischen Gesamtlänge  $\Delta L$  interessant. Diese Änderung wird nur durch die Änderung des effektiven Brechungsindex  $n_Q$  in der rotierenden Quarzscheibe verursacht. Für die optische Länge  $L_Q$  des Quarz mit der Dicke  $l_Q$  gilt

$$L_Q = n_Q \cdot l_Q \stackrel{(2.1)}{=} \frac{c}{\frac{c}{n_Q} \pm \alpha \cdot w} \quad (2.11)$$

Wenn man davon ausgeht, dass eine kleine Änderung der opt. Länge  $\Delta L$  die Anzahl  $N$  der Wellenzüge im Resonator nicht ändert, so gilt

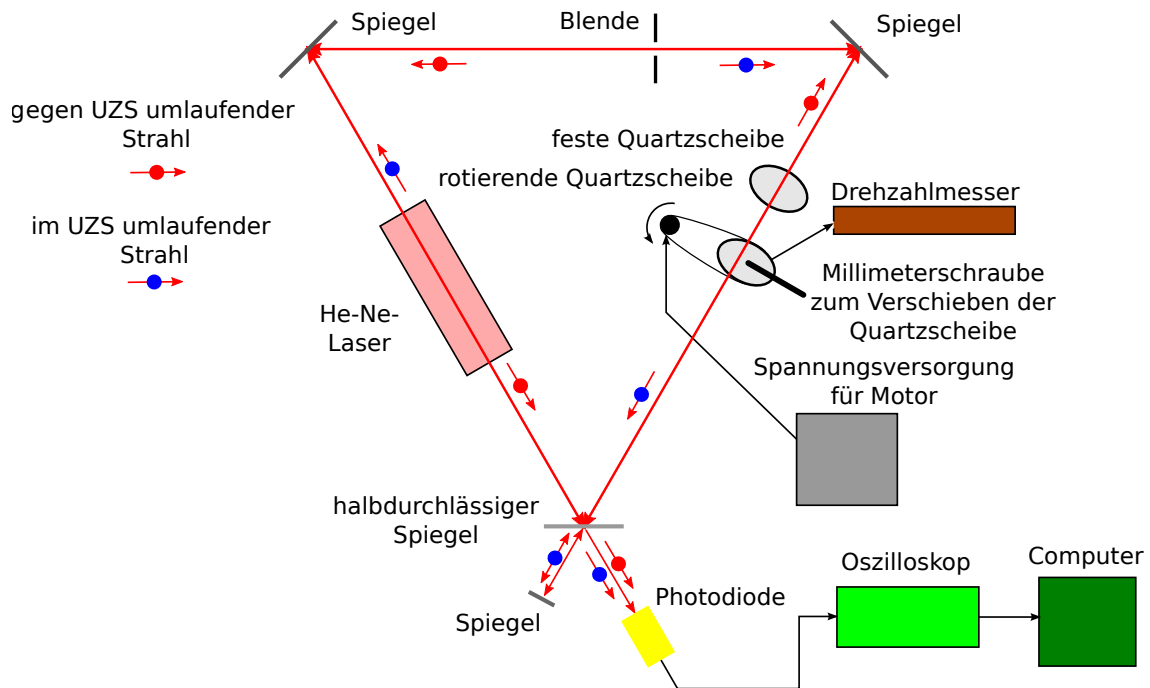
$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \quad (2.12)$$

Es wird also eine Änderung  $\Delta \lambda$  der Wellenlänge des Laserlichts verursacht, die für eine Strahlkomponente positiv, für die andere negativ ist. Dieser kleine Unterschied der Wellenlängen führt zur Ausbildung einer Schwebung mit der Frequenz  $\Delta \nu$ , die mit der Photodiode gemessen werden kann. Der Mitführungskoeffizient  $\alpha$  kann dann mit folgendem Zusammenhang bestimmt werden:

$$\alpha = \frac{L \cdot \lambda \cdot \Delta \nu}{2 \cdot n_Q \cdot \omega \cdot d \cdot x_0} \quad (2.13)$$

$\omega$ ,  $d$  und  $x_0$  sind Größen am Versuchsaufbau, die in [Abschnitt 3](#) erklärt werden.

### 3. Versuchsaufbau



**Abbildung 3.1:** Aufbau zur Bestimmung des Mitführungskoeffizienten von Quarz mit einem Ringlaser.

[Abbildung 3.1](#) zeigt den Aufbau des Ringlasers, mit dem die Messungen durchgeführt werden. Um eine Helium-Neon-Röhre, die von einem statischen elektrischen Feld gepumpt wird, ist mit drei Spiegeln ein Resonator aufgebaut. Einer der Spiegel ist halbdurchlässig, um den Laserstrahl auszukoppeln. Ein vierter Spiegel reflektiert den im

Uhrzeigersinn umlaufenden Stahl so, dass er zusammen mit dem anderen auf eine Photodiode fällt. Der vierte Spiegel und der Halbdurchlässige können in ihrer Position verändert werden. Im Strahlengang befindet sich außerdem eine einstellbare Blende, mit welcher der Strahl abgeschwächt werden kann. Zusätzlich sind im Strahlengang zwei Quarzscheiben, die im Brewsterwinkel vom Laserstrahl getroffen werden. Eine davon kann mit einem Motor in Rotation versetzt und ihre Drehzahl  $\omega$  gemessen werden. Der Laserstrahl trifft im Abstand  $x_0$  von der vertikalen Achse der Scheibe auf. Die zweite, ruhende Scheibe ist dazu da, den abgelenkten Strahl wieder zurück in den ursprünglichen Strahlverlauf zu brechen.

Das Signal der Photodiode wird auf einem Oszilloskop angezeigt und kann vom Computer ausgelesen werden.

Technische Daten des Versuchsaufbaus:

- optische Länge des Resonators:  $L = 214.9 \text{ cm}$
- Wellenlänge des He-Ne-Laser in Luft:  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$
- Brechungsindex von Quarzglas:  $n = 1.457$
- Dicke der Quarzscheibe:  $d = 1.27 \text{ cm}$

## 4. Versuchsdurchführung

Am Aufbau werden zwei verschiedene Messungen durchgeführt: Zuerst wird bei 30 ms, 45 ms und 60 ms Periodendauer einer Scheibenumdrehung die Position der Quarzscheibe über den ganzen möglichen Einstellbereich in 1 cm-Schritten (bei 45 ms Periodendauer) und 1.5 cm-Schritten (30 ms und 60 ms) variiert. Mit dem Oszilloskop wird nach Einstellung der beiden Spiegel und der Blende ein geeignetes Bild aufgenommen und am Computer der zeitliche Abstand von ca. 5-15 Intensitätsmaxima ausgemessen.

Anschließend werden vier Messungen mit Variation der Scheibendrehzahl für jeweils feste Position der Quarzscheibe durchgeführt; bei 36 cm, 40 cm, 53 cm und 57 cm (Anzeige der Millimeterschraube). Die Dauer einer Umdrehung wird dabei in 3 ms-Schritten von 30 ms auf 60 ms erhöht. Die Auswertung erfolgt wie oben.

## 5. Auswertung

### 5.1. Variabler Auftreffpunkt $x_0$

Für jede Messreihe (konstante Periodendauer  $T$ ) werden die Differenzenfrequenzen  $\Delta\nu$  aus der Anzahl der Maxima  $N$  und dem zeitlichen Abstand  $\Delta t$  berechnet.

$$\Delta\nu = \frac{N}{\Delta t}, \quad s_{\Delta\nu} = \Delta\nu \cdot \frac{s_{\Delta t}}{\Delta t} = \frac{N \cdot s_{\Delta t}}{\Delta t^2} \quad (5.1)$$



Der Fehler der Zeitdifferenz  $\Delta t$  wurde auf  $s_{\Delta t} = 10 \mu\text{s}$  abgeschätzt.<sup>2</sup>

Aus [Gleichung 2.13](#) folgt:

$$x_0(\Delta\nu) = \frac{\lambda \cdot L}{2 \cdot n \cdot d \cdot \omega \cdot \alpha} \cdot \Delta\nu =: m \cdot \Delta\nu \quad (5.2)$$

Allerdings unterscheidet sich der gemessene Auftreffpunkt  $x'_0$  aufgrund des Messaufbaus um einem Skalenoffset  $x_m$ , welcher noch berücksichtigt werden muss.

$$x'_0 = x_0 - x_m \quad (5.3)$$

Die Daten können also mit folgender Formel beschrieben werden:

$$x_0(\Delta\nu) = m \cdot \Delta\nu + x_m \quad (5.4)$$

Die gemessenen Werte werden nun in ein  $x'_0$ - $\Delta\nu$ -Diagramm eingetragen und mit der obigen Formel gefittet ([Abbildung 5.1](#), [Abbildung 5.2](#) und [Abbildung 5.3](#)). Durch diese Wahl der Koordinatenachsen kann der Offset  $x_m$  nun direkt abgelesen werden. Der geschätzte Fehler auf  $x'_0$  beträgt  $s_{x'_0} = 0.05 \text{ mm}$ . Die Ergebnisse sind in [Tabelle 5.1](#) dargestellt.

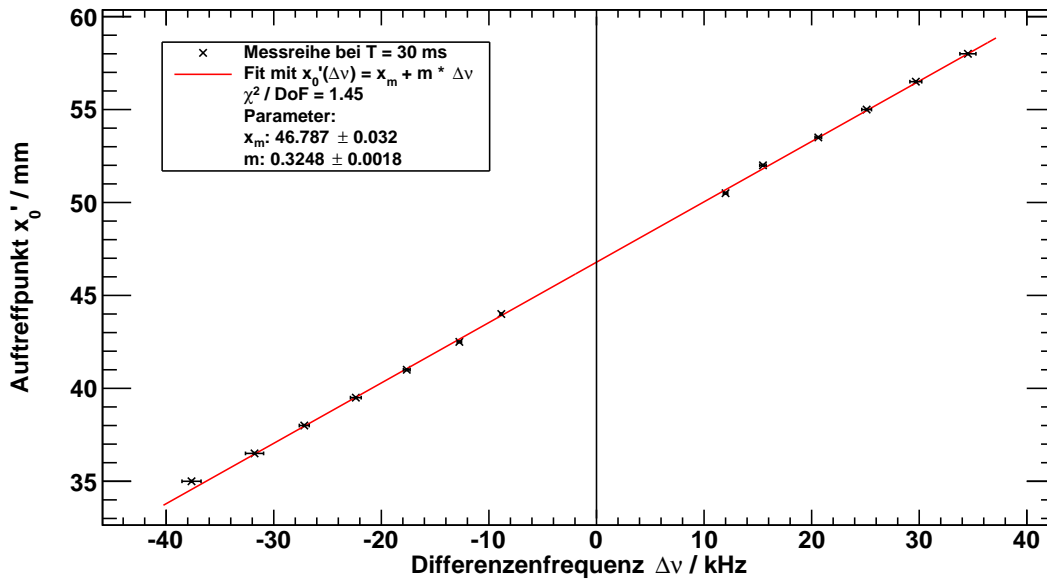


Abbildung 5.1: Linearer Fit von  $x'_0$  bei  $T = 30 \text{ ms}$ .

<sup>2</sup>Dies ist das 5-fache des protokollierte Fehlers, da zusätzliche Fehler (z.B. Überlagerung von verschiedenen Lasermode) auftreten, die nicht vom Ablesen der Maxima herrühren.

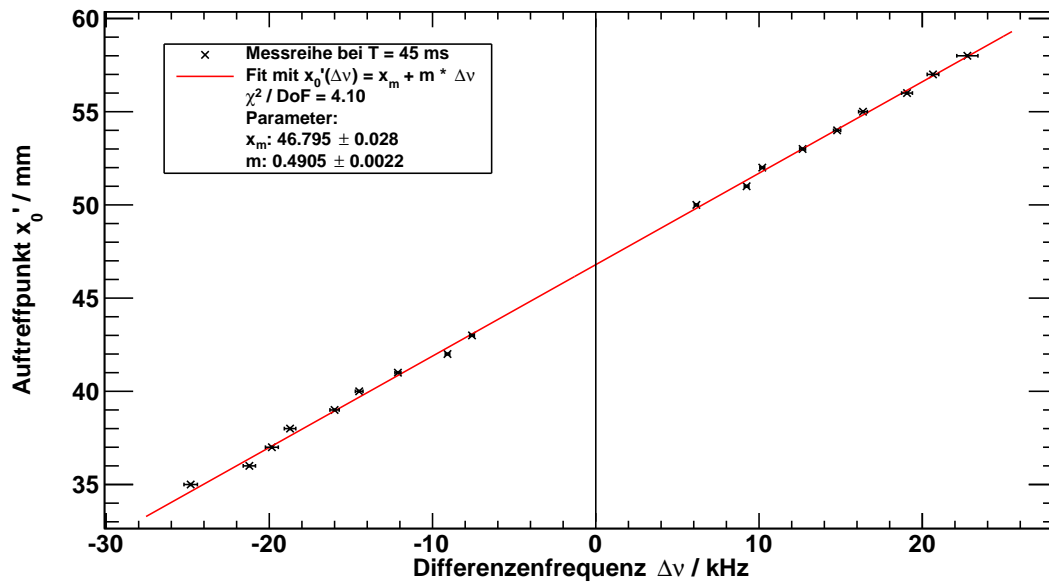


Abbildung 5.2: Linearer Fit von  $x'_0$  bei  $T = 45$  ms.

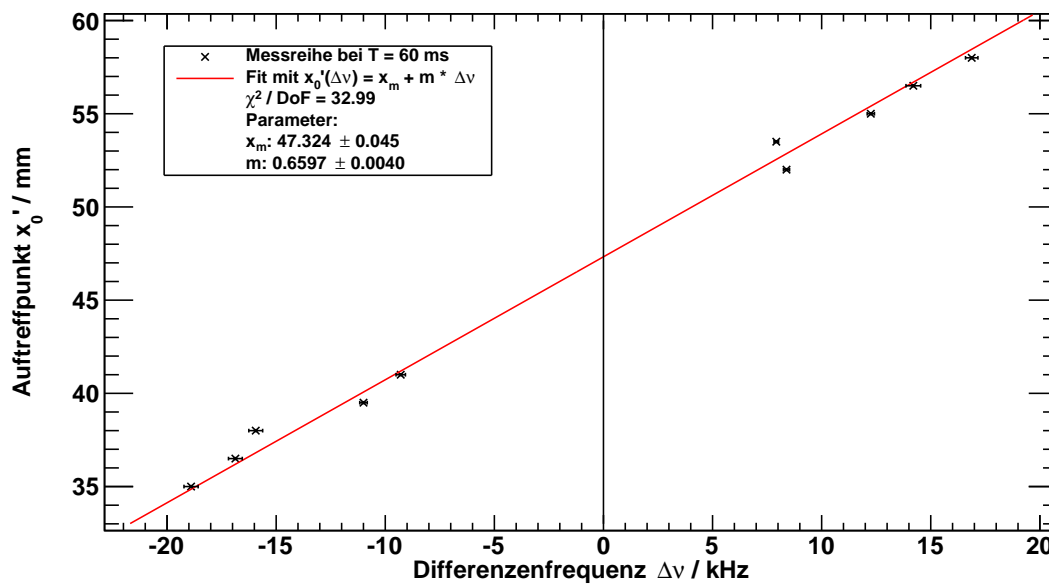


Abbildung 5.3: Linearer Fit von  $x'_0$  bei  $T = 60$  ms.

Der  $\chi^2$ -Wert der dritten Messreihe (Abbildung 5.3) ist zu groß und liegt nicht mehr in den

üblichen Konfidenzintervallen. Eine Erklärung könnten die unregelmäßigen, nicht ganz sinusförmige Signale sein, die zu hohen Schwankungen der Messwerte führten. Jedoch lässt sich trotzdem noch eine Gerade als Trend erkennen, weshalb die Fitparameter in der weiteren Auswertung trotzdem mitbenutzt wurden.

**Tabelle 5.1:** Fitergebnisse von  $x'_0(\Delta\nu)$  bei festen Periodendauern  $T$ .

$T$ / ms	$x_m$ / mm	$s_{x_m}$ / mm	$m$ / (mm / kHz)	$s_m$ / (mm / kHz)
30	46.787	0.032	0.3248	0.0018
45	46.795	0.028	0.4905	0.0022
60	47.324	0.045	0.6597	0.0040

Der gewichtete Mittelwert aus den Offsets  $x_m$  für verschiedene Periodendauern  $T$  liefert:

$$\bar{x}_m = (46.886 \pm 0.019) \text{ mm} \quad (5.5)$$

Aus den einzelnen Steigungen  $m$  lässt sich nun der Mitführungskoeffizient  $\alpha$  nach [Gleichung 5.2](#) bestimmen. Die Werte der Konstanten des Versuchsaufbaus sind in [Abschnitt 3](#) aufgelistet.

$$\alpha = \frac{\lambda \cdot L}{2 \cdot n \cdot d} \cdot \frac{1}{\omega \cdot m}, \quad s_\alpha = \alpha \cdot \sqrt{\left(\frac{s_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{s_\omega}{\omega}\right)^2} \quad (5.6)$$

Die Kreisfrequenz  $\omega$  lässt sich aus der Periodendauer  $T$  folgendermaßen bestimmen:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad s_\omega = \omega \cdot \frac{s_T}{T} \quad (5.7)$$

wobei der Fehler auf der Periodendauer  $T$  auf  $s_T = 0.2 \text{ ms}$  geschätzt wurde. Die berechneten Mitführungskoeffizienten sind in [Tabelle 5.2](#) aufgelistet.

**Tabelle 5.2:** Mitführungskoeffizienten bei festen Periodendauern  $T$ .

$T$ / ms	$\alpha$	$s_\alpha$
30	0.540	0.005
45	0.537	0.003
60	0.532	0.004

Da alle Mitführungskoeffizienten innerhalb einer Standardabweichung übereinstimmen, kann der gewichtete Mittelwert  $\bar{\alpha}$  gebildet werden.

$$\bar{\alpha} = 0.536 \pm 0.002 \quad (5.8)$$

## 5.2. Variable Periodendauer $T$

Es werden wieder die einzelnen Differenzenfrequenzen mit [Gleichung 5.1](#) berechnet. Hier ist der Fehler  $s_{\Delta t}$  auf die Zeitdifferenz  $\Delta t$  entweder 5 oder 10  $\mu\text{s}$ , je nach verwendeter Auflösung des Oszilloskops.<sup>3</sup>

Die gemessenen Werte werden in einem  $\Delta\nu$ - $\omega$ -Diagramm dargestellt. Dazu werden die eingestellten Periodendauern  $T$  mit [Gleichung 5.7](#) in Kreisfrequenzen  $\omega$  umgerechnet.

Die Daten können wieder mit einer Geraden beschrieben werden:

$$\Delta\nu(\omega) = a + \frac{2 \cdot n \cdot d \cdot x_0 \cdot \alpha}{\lambda \cdot L} \cdot \omega =: a + b \cdot \omega \quad (5.9)$$

Der Offset  $a$  sollte im Idealfall verschwinden, ist er jedoch nicht 0, so gibt er Information über einen eventuellen systematischen Fehler. Die Fits für die verschiedenen, festen Auftreffpunkte  $x_0$  sind in [Abbildung 5.4](#), [Abbildung 5.5](#), [Abbildung 5.6](#) und [Abbildung 5.7](#) dargestellt. Die Ergebnisse für den Offset  $a$  und die Steigung  $b$  sind in [Tabelle 5.3](#) aufgelistet.

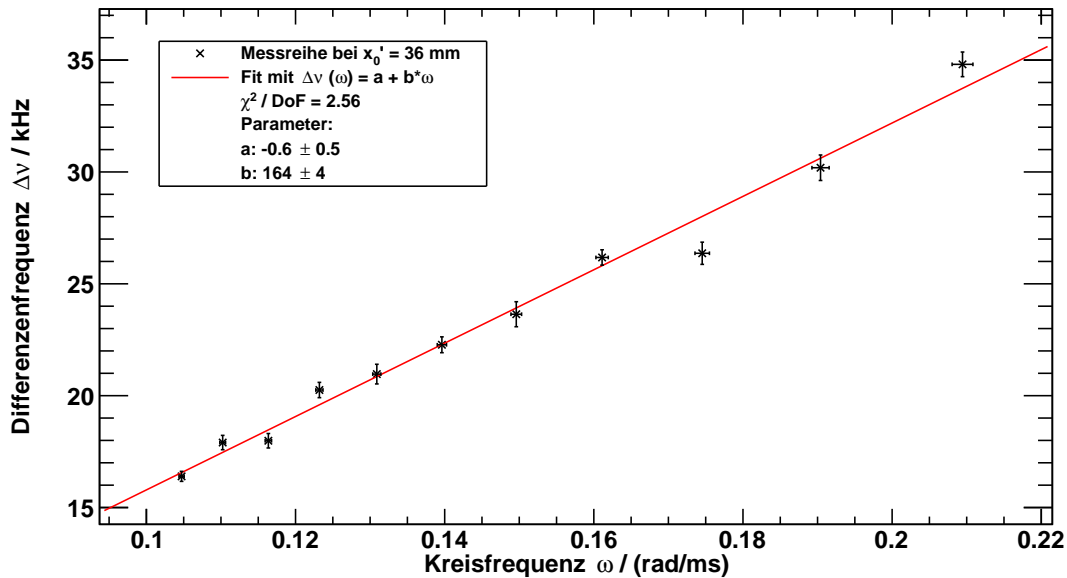


Abbildung 5.4: Linearer Fit von  $\Delta\nu$  bei  $x'_0 = 36$  mm.

<sup>3</sup>Auch hier ist der verwendete Fehler das 5-fache des angegebenen Fehlers.

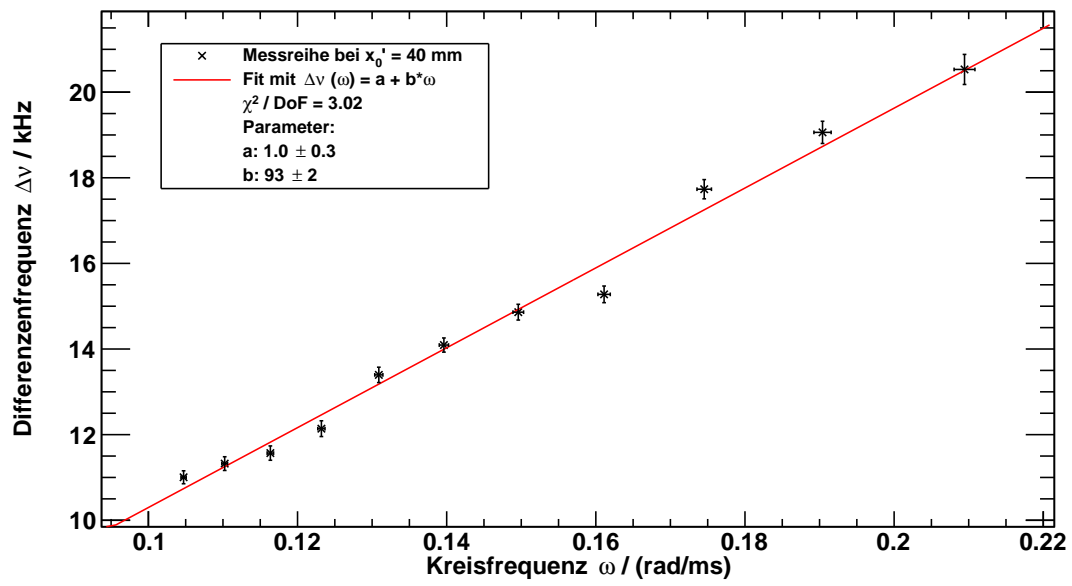


Abbildung 5.5: Linearer Fit von  $\Delta\nu$  bei  $x'_0 = 40$  mm.

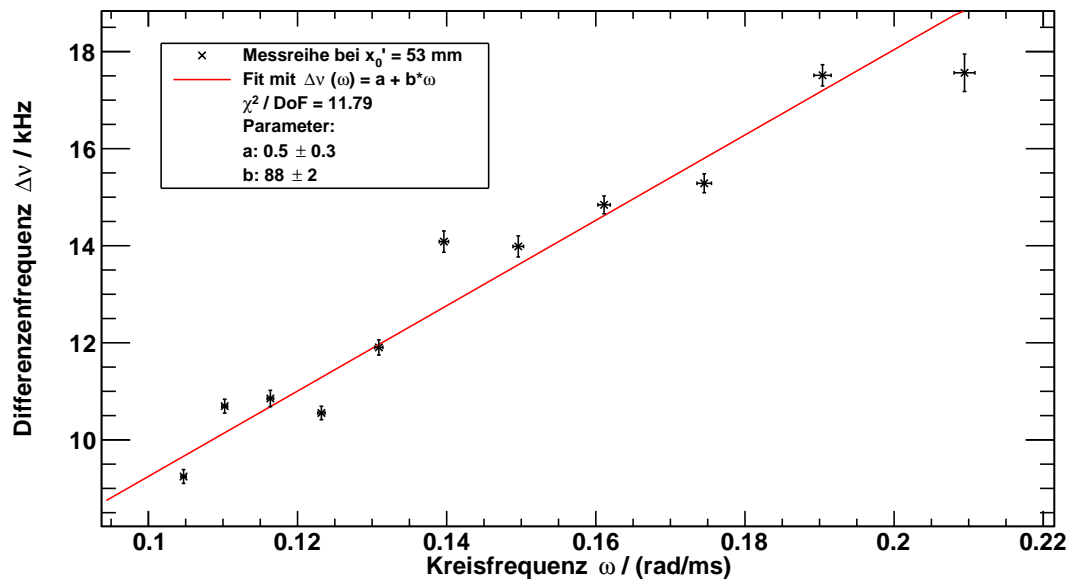


Abbildung 5.6: Linearer Fit von  $\Delta\nu$  bei  $x'_0 = 53$  mm.

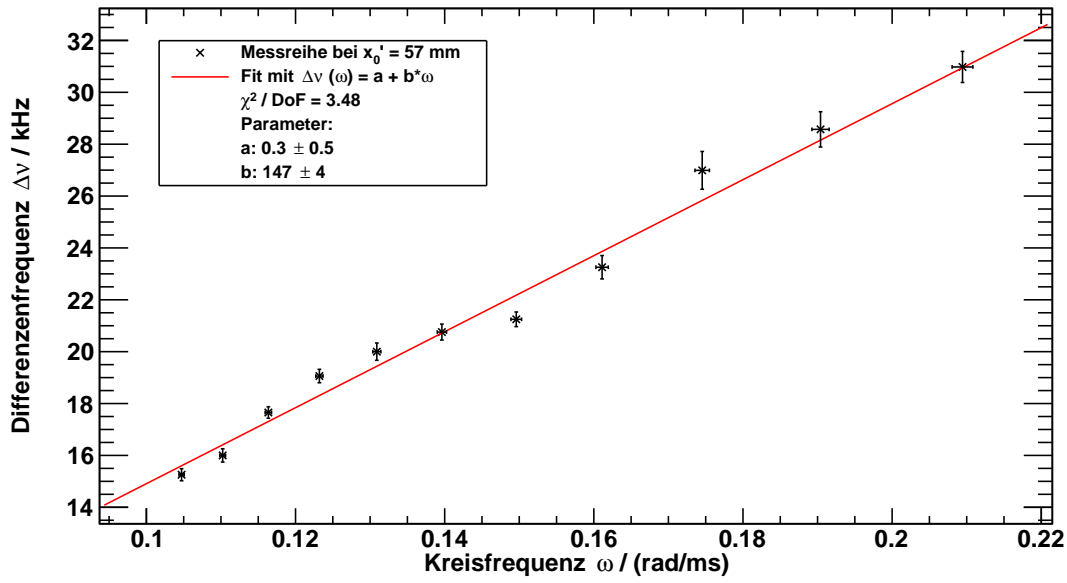


Abbildung 5.7: Linearer Fit von  $\Delta\nu$  bei  $x'_0 = 57$  mm.

Auch hier streuen die Werte mehr oder weniger um das theoretische Modell, was auf die gleiche Ursache wie oben zurückzuführen ist.

**Tabelle 5.3:** Fitergebnisse von  $\Delta\nu(\omega)$  bei festen Auftrittspunkten  $x'_0$ .

$x'_0$ / mm	$a$ / kHz	$s_a$ / kHz	$b$ / (kHz · ms / rad)	$s_b$ / (kHz · ms / rad)
36	-0.6	0.5	164	4
40	1.0	0.3	93	2
53	0.5	0.3	88	2
57	0.3	0.5	147	4

Die Offsets  $a$  verschwinden alle innerhalb von maximal 4 Standardabweichungen. Aus den Steigungen  $b$  lässt sich nun mit [Gleichung 5.9](#) der Mitführungskoeffizient  $\alpha$  bestimmen (alle Konstanten aus [Abschnitt 3](#)):

$$\alpha = \frac{\lambda \cdot L}{2 \cdot n \cdot d} \cdot \frac{b}{x_0}, \quad s_\alpha = \alpha \cdot \sqrt{\left(\frac{s_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{s_{x_0}}{x_0}\right)^2} \quad (5.10)$$

Der Auftreffpunkt  $x_0$  berechnet sich aus dem gemessenen Auftreffpunkt  $s'_0$  (Fehler  $s_{x'_0} = 0.05$  mm) und dem Offset des Auftreffpunkts  $x_m$ , welcher oben ([Gleichung 5.5](#)) bestimmt wurde.

$$x_0 = x'_0 - x_m, \quad s_{x_0} = \sqrt{s_{x'_0}^2 + s_{x_m}^2} \quad (5.11)$$

Die verschiedenen Mitführungskoeffizienten sind in [Tabelle 5.4](#) aufgelistet.

**Tabelle 5.4:** Mitführungskoeffizienten bei festen Auftreffpunkten  $x'_0$ .

$x'_0$ / mm	$\alpha$	$s_\alpha$
36	0.554	0.014
40	0.498	0.012
53	0.529	0.013
57	0.532	0.016

Sie stimmen innerhalb von drei Standardabweichungen überein, deshalb kann wieder der gewichtete Mittelwert  $\bar{\alpha}$  gebildet werden.

$$\bar{\alpha} = 0.526 \pm 0.007 \quad (5.12)$$

### 5.3. Vergleich der verschiedenen Mitführungskoeffizienten

Der theoretische Mitführungskoeffizient  $\alpha_{\text{theo}}$  lässt sich mit [Gleichung 2.8](#) mit dem Brechungsindex von Quarzglas  $n = 1.457$  und der Dispersion  $\frac{dn}{d\lambda} = -300 \text{ cm}^{-1}$  bei der Wellenlänge  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  berechnen.

$$\alpha_{\text{theo}} \approx 0.542 \quad (5.13)$$

Es werden zum Vergleich nochmal die gemittelten Mitführungskoeffizienten bei variablen Periodendauern  $\alpha_T$  und bei variablen Auftreffpunkten  $\alpha_{x_0}$  aufgelistet.

$$\begin{aligned} \alpha_T &= 0.526 \pm 0.007 \\ \alpha_{x_0} &= 0.536 \pm 0.002 \end{aligned} \quad (5.14)$$

Die beiden stimmen innerhalb von zwei Standardabweichungen überein und der gewichtete Mittelwert lautet:

$$\alpha_{\text{exp}} = 0.535 \pm 0.002 \quad (5.15)$$

Der theoretische Wert liegt innerhalb des  $4\text{-}\sigma$ -Intervalls dieses Wertes. Die prozentuale Abweichung des gemessenen Wertes beträgt

$$\frac{0.542 - 0.535}{0.542} \approx 1.3\% \quad (5.16)$$

was ein akzeptables Ergebnis ist.

Eine wahrscheinliche Fehlerquelle ist das Vorliegen von verschiedenen Lasermode, was zu Schwankungen der Periodendauer des gemessenen Signals geführt hat. Anscheinend wurden durch die Fehlerabschätzung im Protokoll nicht alle Fehlerquellen berücksichtigt, was sich an erhöhten  $\chi^2$ -Werte zeigt.

## 6. Literatur

- [1] Demtröder, W. *Experimentalphysik 3, Atome, Moleküle und Festkörper, 4. Auflage*. Springer Spektrum, 2010.
- [2] Ippendorf, A. *Messung des Mitführungskoeffizienten von Licht mit einem Ringlaser; Zulassungsarbeit*. Freiburg, 1979.

## A. Anhang

### A.1. Messprotokoll



Ringlaser:

~~58 mm~~

Messbereich  $\rightarrow$ :

Außen  $\uparrow$  58 mm

50 mm

Mitte - 47 mm

42 mm

Außen  $\downarrow$  347 mm

bei  $T \approx 45$

$$s_T = 0,2 \text{ ms}$$

$$s_{0T} = 2 \text{ ms}$$

$$s_{\pm 0} = 0,05 \text{ mm}$$

wenn nicht  
anders  
angegeben

a) feste Drehzahl; versch.  $\pm 0$

$$1. T = 45,0 \text{ ms}$$

~~87 ms~~

$x_d / \text{mm}$	N	$\Delta t / \mu\text{s}$	$x_0 / \text{mm}$	N	$\Delta t / \mu\text{s}$
38,00	10	534,0	42,00	6	<del>660,5</del>
37,00	10	504,0	43,00	4	527,5
36,00	12	565,5	50,00	3	487,0
35,00	15	604,5	51,00	6	640,5
34,00	9	562,5	52,00	7	686,5
40,00	9	627,0	53,00	9	<del>6710,5</del>
41,00	8	666,0	54,00	10	676,5
57,00	12	587,0	55,00	10	617,0
58,00	8	357,5	56,00	11	577,0

~~862 ms~~

$$2. T = 60,0 \text{ ms}$$

$x_d / \text{mm}$	N	$\Delta t / \mu\text{s}$	$x_0 / \text{mm}$	N	$\Delta t / \mu\text{s}$
58,00	10	592,5	35,00	11	582,0
56,50	6	422,5	36,50	9	533,5
55,00	9	734,5	38,00	8	502,0
53,50	6	575,5	39,50	7	636,5
52,00	5	596,0	41,00	4	430,5



$$3. T = 30,0 \text{ ms}$$

$$(S_{\Delta t} = 1 \text{ ms} *)$$

$x_0 / \text{mm}$	$N$	$\Delta E / \mu\text{s}$	$x_0 / \text{mm}$	$N$	$\Delta E / \mu\text{s}$
35,00	8	212,50	44,00	4	452,0
36,50	6	188,75	58,00	8	237,75
38,00	8	204,50	56,50	8	269,50
39,50	5	223,50	55,00	7	278,75
41,00	5	283,50	53,50	7	339,50
42,50	8	627,5	52,00	4	258,50
			50,50	7	583,50

b) festes  $x_0$ , variables  $T$

$$1: x_0 = 57,00$$

$$S_{\Delta t} = 1 \text{ ms} \text{ für gesamte Messung}$$

$T / \text{ms}$	$N$	$\Delta E / \mu\text{s}$	$T / \text{ms}$	$N$	$\Delta E / \mu\text{s}$
30,0	8	258,25	48,0	6	300,00
33,0	6	270,00	51,0	7	367,25
36,0	5	785,25	54,0	7	396,50
39,0	6	258,00	57,0	5	312,50
42,0	8	376,50	60,0	5	327,75
45,0	7	337,25			

$$2. x_0 = 53,00$$

$$(S_{\Delta t} = 1 \text{ ms} *)$$

$T / \text{ms}$	$N$	$\Delta E / \mu\text{s}$	$T / \text{ms}$	$N$	$\Delta E / \mu\text{s}$
30,0	4	227,75	48,0	9	756,0
33,0	7	399,75	51,0	8	758,0
36,0	6	302,50	54,0	7	645,0
39,0	6	404,25	57,0	8	748,0
42,0	9	643,5	60,0	6	649,0
45,0	9	639,0			



$$S. X = 36,00 \text{ mm}$$

$$S_{DE} = 1 \mu s$$

T/ms	N	DE/μs
30,0	11	316,00
33,0	8	265,00
36,0	7	265,50
39,0	10	382,00
42,0	5	211,50
45,0	7	314,25

T/ms	N	DE/μs
48,0	5	238,50
51,0	6	206,25
54,0	5	278,00
57,0	5	270,25
60,0	6	360,00

$$4. X = 40,00 \text{ mm}$$

$$S_{DE} = 1 \mu s$$

T/ms	N	DE/μs
30,0	6	202,25
33,0	7	367,25
36,0	7	394,75
39,0	6	362,75
42,0	6	403,75
45,0	6	425,75

T/ms	N	DE/μs
48,0	5	373,25
51,0	4	320,50
54,0	4	345,75
57,0	4	353,25
60,0	4	363,50

W.W.