

ANFÄNGERPRAKTIKUM DER FAKULTÄT FÜR PHYSIK,
UNIVERSITÄT GÖTTINGEN

Versuch 21
Messung der Lichtgeschwindigkeit

Praktikant/in:

E-Mail:

Betreuer/in:

Datum der Durchführung: 14.12.2023

Testat:

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Theorie	4
3	Durchführung	6
3.1	Aufbau	6
3.2	Warnung	6
3.3	Experiment	7
4	Auswertung	8
4.1	Messung der Lichtgeschwindigkeit in Luft	8
4.2	Brechungsindex und Lichtgeschwindigkeit in Acryl und Wasser	10
5	Diskussion	11
5.1	Werte und Fehlerintervalle	11
5.2	Diskussion der Ergebnisse und Präzession des Aufbaus	11
6	Anhang	12
6.1	Messdaten	12
6.2	Formeln für Fehlerrechnung und lineare Regression	13
	Literatur	15

1 Einleitung

Die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist eine fundamentale Naturkonstante und damit ein zentrales Anschauungsobjekt der Physik, das Physiker:innen schon seit vielen Generationen fasziniert. Sie begrenzt die Ausbreitung kausaler Zusammenhänge, wobei einzelne Phänomene wie der Quantentunneleffekt auch Überlichtgeschwindigkeiten zulassen, die allerdings in keinem Falle eine Informationsübertragung sind. Anhand der Lichtgeschwindigkeit wird die SI-Einheit Meter als die Strecke definiert, die Licht in einem 299.792.458-stel einer Sekunde zurücklegt. Außerdem ist die Lichtgeschwindigkeit in der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie von Albert Einstein die Schlüsselrolle. Über diese wesentlichen Charakterisierungen der Lichtgeschwindigkeit und ihre Bedeutung für die Physik wird sie auch benutzt, um kosmologische Fragestellungen wie das Problem der kosmologischen Konstante zu lösen, indem ihr ein anderer Wert zu Beginn des Universums zugeschrieben wird.

In populärwissenschaftlichen Veröffentlichungen ist die Lichtgeschwindigkeit eines der beliebtesten Themen, über das Beiträge veröffentlicht werden.

Nach dieser Motivation muss darauf hingewiesen werden, dass die Lichtgeschwindigkeit als exakt definiert ist und damit keinen Fehler hat. Der krumme Wert von $c_0 = 299.792.458 \text{ m/s}$ entsteht darüber, dass die Lichtgeschwindigkeit mit der alten Definition des Meters experimentell bestimmt wurde und anschließend im Jahre 1983 so gewählt wurde, dass die neue Definition des Meters über c_0 der alten sehr nahe kam. Eine experimentelle Bestimmung der Vakuumlichtgeschwindigkeit wie in diesem Versuch gibt also in erster Linie Auskunft über die Genauigkeit des Messinstrumente und der Methodik, als dass der Versuch die Vakuumlichtgeschwindigkeit physikalisch relevant beleuchtet. Für die Ausbreitung der Lichtgeschwindigkeit in Materie wie im zweiten Versuchsteil ist die Aussage dieses Experiments physikalisch von größerer Bedeutung, da man hier lediglich mit einem fehlerbehafteten Wert die Geschwindigkeit in Materie angeben kann und es daher interessant ist, die Ungenauigkeit im Aufbau zu reduzieren, um präziser messen zu können.

2 Theorie

In einem ladungs- und stromfreien Medium gelten die MAXWELL-Gleichungen [1, vgl. S. 136 ff.]:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0, \quad (2.0.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (2.0.2)$$

$$\nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0, \quad (2.0.3)$$

$$\nabla \times \vec{B} - \epsilon\mu \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0, \quad (2.0.4)$$

$$(2.0.5)$$

wobei \vec{E} das elektrische, \vec{B} das magnetische Feld bezeichnen, ϵ ist die Dielektizitätskonstante und μ die magnetische Permeabilität.

Wendet man nun erneut den Rotationsoperator auf Gleichung 2.0.3 an, so erhält man

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{B}) \quad (2.0.6)$$

$$\Leftrightarrow \nabla (\nabla \cdot \vec{E}) - \Delta \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{B}) \quad (2.0.7)$$

$$(2.0.8)$$

wobei angewendet wurde, dass $\nabla \times (\nabla \times \vec{u}) = \nabla (\nabla \cdot \vec{u}) - \Delta \vec{u}$ für den Operator ∇ gilt. Mit Gleichung 2.0.1 und einsetzen von Gleichung 2.0.4 wird dies zu

$$\Delta \vec{E} = \epsilon\mu \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E}. \quad (2.0.9)$$

Analoges Vorgehen führt zur einer ähnlichen Gleichung für \vec{B} :

$$\Delta \vec{B} = \epsilon\mu \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{B}. \quad (2.0.10)$$

Beide dieser Gleichungen haben die Form einer ebenen Wellengleichung, wobei die Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser Welle als

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (2.0.11)$$

abgelesen werden kann.

Im Vakuum gilt $\epsilon = \epsilon_0$ die elektrische Feldkonstante und $\mu = \mu_0$ die magnetische Feldkonstante.

Die Lichtgeschwindigkeit wiederum ist nach [1, S. 124] definiert als

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}. \quad (2.0.12)$$

Der Brechungsindex n eines Materials ist definiert als [1, S. 220]

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon \mu}{\epsilon_0 \mu_0}}, \quad (2.0.13)$$

woraus mit Gleichung 2.0.11 und Gleichung 2.0.12 der Zusammenhang

$$v = \frac{c}{n} \quad (2.0.14)$$

folgt. Eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von v bedeutet auch, dass die Welle in der Zeit $\Delta t = \frac{l}{v}$ die Strecke der Länge l zurücklegt.

Die Geschwindigkeit in Vakuum ist höher, sodass die Welle dort in der selben Zeit $\Delta t = \frac{l+\Delta l}{c}$ die größere Strecke $l + \Delta l$ zurücklegt, wobei Δl die Verschiebung eines Knotenpunktes einer stehenden Welle beschreibt. Setzt man diese nun gleich, erhält man

$$\frac{l}{v} = \frac{l + \Delta l}{c_0}. \quad (2.0.15)$$

Mit Gleichung 2.0.14 führt dies auf eine Formel zum Bestimmen des Brechungsindex

$$n = \frac{l + \Delta l}{l}. \quad (2.0.16)$$

3 Durchführung

3.1 Aufbau

Der Versuch besteht aus einem Betriebsgerät, das seitlich parallel zu der Messschiene ein Lasersignal aussendet, welches bei jeder Messung an dem Spiegel reflektiert wird, sodass es zurück in die Öffnung des Lasers fällt. Bei zwei von drei Messungen durchsetzt der Laser das Medium Wasser in der Rohrküvette und Polacryl in Stabform.

Das Betriebsgerät wird mit Anschluss f_{emit} an Channel 1 (CH1) des Oszilloskops und mit Anschluss $f_{\text{rec}} - f_{\text{sync}}$ an CH2 angeschlossen.

Das Oszilloskop zeigt das pulsformige Rechtecksignal des vom Betriebsgerät ausgesendeten Lasers und des wieder eingegangenen Signals von der Reflexion des Spiegels mit $1/1000$ der tatsächlichen Frequenz an.

Der beschriebene Aufbau kann auch noch einmal in Abbildung 3.1 nachvollzogen werden.

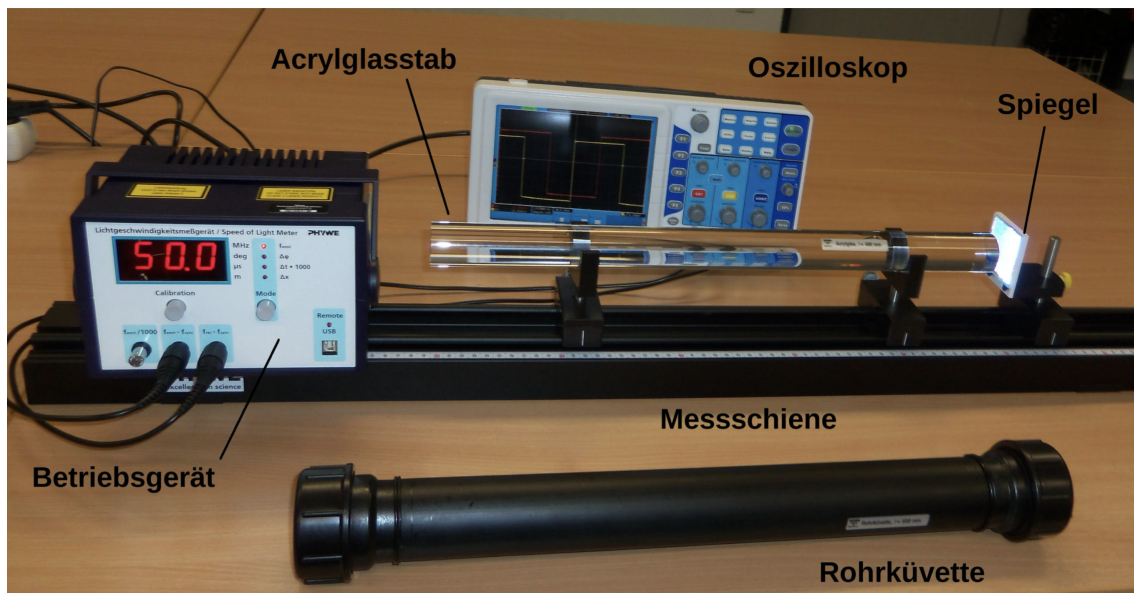


Abbildung 3.1: Aufbau des Versuchs „Messung der Lichtgeschwindigkeit“ mit allen beteiligten Bauteilen des Versuchs; ein Kabel am Betriebsgerät wurde in der Durchführung am Versuchstag nicht am mittleren, sondern am linken Anschluss angebracht; Quelle: [2, S. 35]

3.2 Warnung

In diesem Versuch wird mit einem offenen Laser gearbeitet. Das Sicherheitsverständnis gebietet es, nie bei laufendem Betrieb im Strahlengang zu arbeiten, den Laser nie ohne Spiegel zu verwenden oder in den Laserstrahl selbst zu blicken. Weiterhin sollte vorsichtshalber reflektierender Armschmuck abgelegt werden. Da das Betriebsgerät durch

den Betrieb des Lasers warm wird, sollte man nicht das Metallgehäuse anfassen. Für eine Pause sollte das Betriebsgerät nicht allzu lange ausgeschaltet werden, sodass es sich nicht abkühlt, wodurch sich der Nullpunkt verschieben würde (für diesen Fall den Schritt **Kalibration erneut durchführen**).

3.3 Experiment

Zunächst wird der Aufbau wie in Unterabschnitt 3.1 beschrieben ohne Rohrküvette oder Acrylstab aufgebaut. Vor der Verwendung des Lasers und der ersten Messung muss sich dieser 15 min lang aufwärmen.

Als erstes wird das Betriebsgerät in f_{emit} genutzt, das über den **mode**-Knopf ausgewählt werden kann. Jetzt muss der Spiegel so ausgerichtet werden, dass der Laserstrahl mittig auf den Spiegel trifft und direkt in die Lampe des Lasers zurückfällt.

Die **Kalibration** erfolgt, indem der Spiegel direkt vor die Austrittsöffnung des Lasers am Betriebsgerät gebracht wird. Die Position des Spiegels ist als Nullpunkt der Messung zu notieren. Zur Probe wird das Betriebsgerät nun mit dem **mode**-Knopf in den $\Delta\varphi$ -Betrieb gebracht. Anschließend drücke man den **Calibration**-Knopf. War die Kalibration erfolgreich, sollten zwei wie in Unterabschnitt 3.1 beschriebene Rechteckkurven zu sehen sein, die einander genau überlagern.

Für die erste Messung werden der Spiegel auf Abstände > 50 cm verschoben und bis zum Ende der Messschiene auf zehn Positionen der auf dem Oszilloskop durch Verschiebung der Rechteckkurven angezeigte Zeitunterschied der Signale aufgeschrieben. Auf dem Oszilloskop soll die Ablesegenauigkeit des Zeitunterschieds abgeschätzt werden.

Da nun für die zweite Messreihe der Aufbau verändert wird, muss der Laser für kurze Zeit ausgeschaltet werden. Der Acrylstab wird auf die Messschiene gestellt und der Laser erneut eingeschaltet. Der Spiegel wird an das rechte Ende des Acrylstabes platziert und im $\Delta\varphi$ -Modus der **Calibration**-Knopf gedrückt. Wenn die Kalibration geklappt hat, sollten sich beide Rechtecksignale wieder überlagern, dann ist die Position des Spiegels zu notieren. Wird nun der Acrylstab aus dem Strahlengang unter erneutem Ausschalten des Lasers entfernt, entsteht auf dem Oszilloskop wieder ein Zeitunterschied beider Signale. Sobald durch Verschieben des Spiegels die Signale sich wieder überlagern, wird diese Position des Spiegels aufgeschrieben. Diese Prozedur ist fünfmal zu wiederholen, sodass man zehn Positionswerte erhält.

Die letzte Messung ist analog mit der vollständig mit Wasser gefüllten Rohrküvette zu wiederholen.

4 Auswertung

4.1 Messung der Lichtgeschwindigkeit in Luft

Die Strecke, die das Licht in der auf dem Oszilloskop angegebenen Zeit zurücklegt, ergibt sich über

$$\Delta x = 2 \cdot (x_{\text{pos}} - x_0) \quad (4.1.1)$$

mit x_0 als die Nullposition des Spiegels. Die Formel ergibt sich, weil das Licht durch die Reflektion die Strecke bis zum Nullpunkt doppelt zurücklegt.

Wenn die Überlagerung der Linien auf dem Oszilloskop durch integrierten Fehler des Oszilloskops fehlerbehaftet ist, müsste man den Spiegel verschieben, um die Linien tatsächlich zu überlagern, sodass der Positionsfehler auf der Messschiene von dem zeitlichen Fehler des Oszilloskops abhängig ist. Daher schätzen wir den Positionsfehler konservativ auf $\sigma_{\text{pos}} = 2,5 \text{ mm}$.

Für Gleichung 4.1.1 ergibt sich dann mit Gaußscher Fehlerfortpflanzung 6.2.5 ein Fehler von

$$\sigma_{\Delta x} = \sqrt{8} \cdot \sigma_{\text{pos}}. \quad (4.1.2)$$

Für die Zeit wurde ein Fehler von $\sigma_{\Delta t} = 4 \cdot 10^{-11} \text{ s}$ angenommen, da dies das Inkrement war, mit dem man die Cursorlinie auf dem Oszilloskop feinstmöglich verschieben konnte, wenn man die Umrechnung von Betriebsgerät zu Oszilloskop mit Faktor 1000 beachtet. Für die Berechnung der Lichtgeschwindigkeit wurde ein Fit an die Datenpunkte der Strecke aufgetragen gegen die Zeit gelegt. Der Fit wurde mit Python bestimmt.

Zu beachten ist, dass in dem Versuch der abhängige Parameter natürlich die Zeit ist, da diese bestimmt wurde, indem die Strecke, die das Licht zurücklegen muss, variiert wurde. In der Abbildung wurde dieser Zusammenhang umgekehrt, um die Geschwindigkeit bestimmen zu können. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Der y-Achsenabschnitt gibt uns den Abstand des Ausganges des Lasers zu dem Nullpunkt der Messung. Das ist allerdings nicht weiter von Bedeutung.

Wie aus der Fitsteigung in Abbildung 4.1 abzulesen ist, beträgt die gemessene Lichtgeschwindigkeit in Luft

$$c_{\text{Luft}} = (2,81 \pm 0,04) \cdot 10^8 \text{ m/s}.$$

Die Lichtgeschwindigkeit in Luft lässt sich über Gleichung 2.0.14 berechnen mit $c = 299.792.458 \text{ m/s}$ im Vakuum und $n_{\text{Luft}} \approx 1,00028$ nach und ergibt sich folglich zu

$$c_{\text{Luft, theo}} \approx 299.708.540.$$

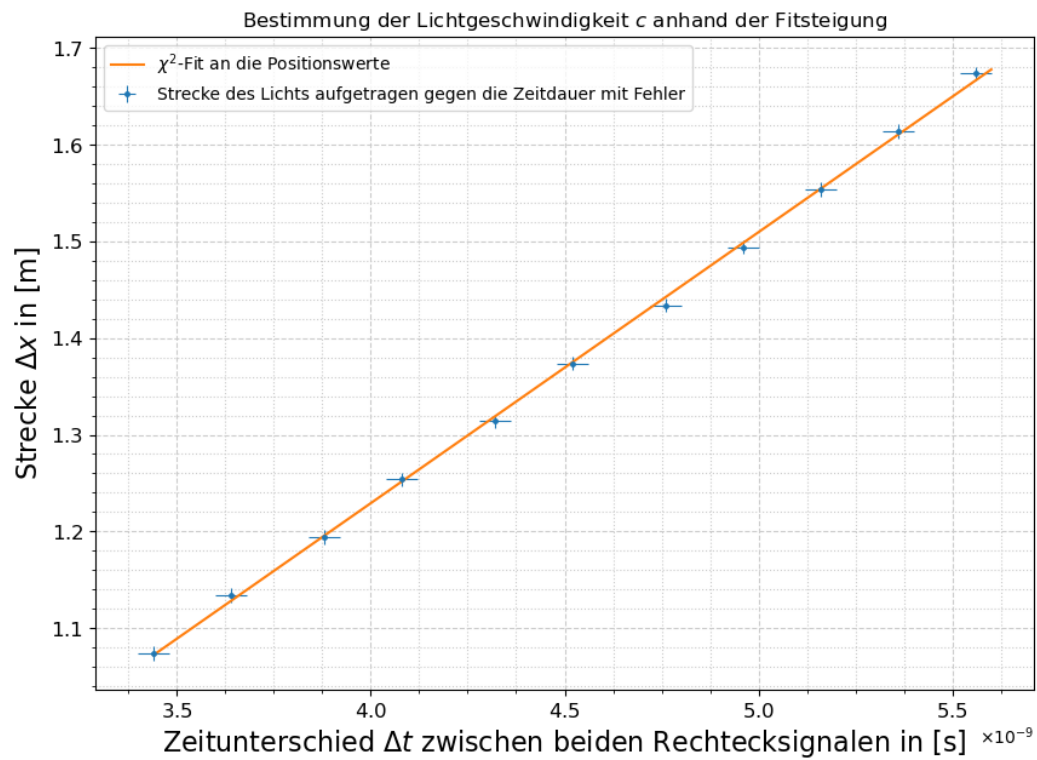


Abbildung 4.1: χ^2 -Fit aus Python, dessen Geradensteigung die Lichtgeschwindigkeit in Luft gibt; die Fitfunktion lautet $\Delta x(\Delta t) = (2,81 \pm 0,04) \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot \Delta t + (0,107 \pm 0,015) \text{ m}$; eigene Darstellung

4.2 Brechungsindex und Lichtgeschwindigkeit in Acryl und Wasser

Der Brechungsindex von Acryl ist nach [3] gegeben als $n_{Acryl} = 1,49 \pm 0,01$. Nach Gleichung 2.0.15, mit der Länge des Acrylstabes $l = 490$ mm und der Differenz der Position des Spiegels Δl , lässt sich nun der Brechungsindex experimentell bestimmen. Dabei war die Länge am Versuchsplatz angegeben und ist somit als fehlerfrei angenommen. Der Fehler der Strecke, um die verschoben wurde, ist auf $\sigma_{\Delta l} = 2,5$ mm abgeschätzt, aufgrund der Auflösung des Oszilloskops und der Schwankung der Werte bei der Messung. Für c wurde der genaue Wert der Lichtgeschwindigkeit verwendet. Damit ergibt sich für die Lichtgeschwindigkeit in Acryl:

$$c_{Acryl} = \frac{l \cdot c}{l + \Delta l} = (1,972 \pm 0,015) \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

wobei aus allen fünf Messreihen dieser Wert berechnet wurde und dann mittels Gleichung 6.2.2 der gewichtete Mittelwert bestimmt wurde. Der Fehler wurde hier nach Gaußscher Fehlerfortpflanzung 6.2.5 bestimmt mit

$$\sigma_{c_{Acryl}} = \sqrt{\sigma_{\Delta l}^2 \cdot \left(\frac{c \cdot l}{(l + \Delta l)^2} \right)^2} \quad (4.2.1)$$

und dann auch gemittelt über die Messreihen nach Gleichung 6.2.3. Damit ist der Brechungsindex nach Gleichung 2.0.14

$$n_{Acryl} = 1,520 \pm 0,012.$$

Der Brechungsindex von Wasser ist nach [3] $n_{Wasser} = 1,3311$. Analog zur Berechnung von Lichtgeschwindigkeit und Brechungsindex für Acryl können diese nun auch für Wasser berechnet werden. Dabei ist l die Länge der mit Wasser gefüllten Rohrküvette, welche wieder als fehlerfrei angenommen wird. Damit ist die Lichtgeschwindigkeit in Wasser

$$c_{Wasser} = (2,137 \pm 0,018) \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Es wurde auch hier analog zu den Berechnungen für Acryl der gewichtete Mittelwert und Fehler bestimmt.

Der Brechungsindex von Wasser ist dann

$$n_{Wasser} = 1,403 \pm 0,012.$$

5 Diskussion

5.1 Werte und Fehlerintervalle

Der experimentell bestimmte Wert für die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht in Luft beträgt $c_{\text{Luft}} = (2,81 \pm 0,04) \cdot 10^8 \text{ m/s}$, wobei der aus dem Brechungsindex von Luft und der Definition der Vakuumlichtgeschwindigkeit berechnete theoretische Wert sich zu $c_{\text{Luft, theo}} \approx 299.708.540$ ergibt. Das führt auf ein Fehlerintervall von $\sigma = 7$.

Für den Brechungsindex von Acryl ergibt sich ein $3\text{-}\sigma$ -Intervall zum theoretisch erwarteten Wert und für den Brechungsindex von Wasser ein $6\text{-}\sigma$ -Intervall.

5.2 Diskussion der Ergebnisse und Präzession des Aufbaus

Wie bereits erwähnt, ist die Definition der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum exakt und auch der Brechungsindex in Luft lässt sich auf viele Nachkommastellen genau bestimmen, sodass, sofern korrekt gemessen wurde, die Zahl der Sigmaintervale einen guten Aufschluss über die Präzession des Versuchsaufbaus geben sollte.

Es steht außer Frage, dass durch Zufälligkeiten im Versuchsaufbau wie die lose Arretierung des Abschlussspiegels die Ergebnisse beeinflusst werden, weswegen man die Daten verschiedener Versuchsgruppen mit denselben Fehlerabschätzungen benötigen würde, um auf guter Datengrundlage über die Genauigkeit des Aufbaus urteilen zu können.

Wie sich zeigt, müssten die Fehler des Aufbaus größer abgeschätzt und berechnet werden, damit sich die Fehlerintervalle reduzieren. Damit sich für die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Luft ein Sigma-Intervall von 1 ergibt, müsste der Fehler $6,866\%$ des Messwertes betragen. Dies gibt einen ungefähren Ausschluss für die Genauigkeit des Versuchsaufbaus. Es ist anzunehmen, dass die Messung aller drei Lichtgeschwindigkeiten Fehlerintervalle von 3 bis 7 haben, weil das Licht pro Sekunde ungefähr 7,5-mal die Erde umrundet und somit auf so kleine Entfernungen zwangsläufig relativ große Fehler zustande kommen. Für diese kleine Entfernung von 1 m misst das Oszilloskop auf $0,04 \mu\text{s}$ erstaunlich genau, wie man auch in Abbildung 4.1 erkennen kann.

Eine einfache Verbesserung des Versuchsaufbaus wäre, die betrachteten Strecken größer zu wählen, sodass für den Versuchsteil mit der Messung der Luftlichtgeschwindigkeit Abstände auf über 1 m oder 1,5 m genommen werden müssten und auch die Rohrküvette sowie der Plexiglasstab eher 1 m statt 0,5 m lang sein müssten, was die Positionsungenauigkeit des Spiegels reduzieren sollte.

6.2 Formeln für Fehlerrechnung und lineare Regression

Mittelwert (Bestwert, für den die quadratischen Abweichungen minimal werden): wird verwendet, um verschiedene Werte für **dieselbe** gemessene Größe zu mitteln:

$$\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6.2.1)$$

Gewichteter Mittelwert: wird verwendet, um durch Mitteln der Ergebnisse mehrerer Messvorgänge, abhängig von unterschiedlichen Variablen, eine Größe zu bestimmen:

$$\bar{x} = \frac{\sum_i \frac{x_i}{\sigma_i^2}}{\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (6.2.2)$$

Fehler des gewichteten Mittelwertes:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}}} \quad (6.2.3)$$

Gesamtfehler: der Gesamtfehler ist eine Möglichkeit, den statistischen und systematischen Fehler in der Formel zu verbinden und auf einen Fehler zu berechnen; der systematische Fehler ist ein Fehler, der sich beispielsweise durch eine falsche Messkalibrierung durch einen gesamten Versuch, auch bei Wiederholung desselben Experimentes, durchzieht. Der statistische Fehler ist ein zufälliger Fehler, der durch ungenaues Ablesen oder Zufälligkeiten im Versuchsaufbau entsteht:

$$\sigma_{ges} = \sqrt{\sigma_{sys}^2 + \sigma_{stat}^2} \quad (6.2.4)$$

Fehlerfortpflanzung: die zu berechnende Größe f , die von den zu bestimmenden Größen A und B abhängt, kann um weitere Variablen C , D , E usw. ergänzt werden, wenn sich die Formel so gestaltet; die Fehler für weitere Variablen werden nach derselben Logik unter der Wurzel hinzugefügt; wurde sie verwendet, wurden die jeweiligen Größen und Ableitungen in die Formel eingesetzt:

$$\sigma_f = \sqrt{\left(\sigma_A \cdot \frac{\partial f}{\partial A}\right)^2 + \left(\sigma_B \cdot \frac{\partial f}{\partial B}\right)^2} \quad (6.2.5)$$

Lineare Regression: die Steigung m und der Achsenabschnitt b des linearen Fits werden – wenn benutzt – durch ein Skript in Python berechnet:

$$m = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (6.2.6)$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (6.2.7)$$

Fehler für die Fitwerte der linearen Regression:

$$\sigma_m^2 = \frac{n \sum (y_i - b - m x_i)^2}{(n - 2)(n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2)} \quad (6.2.8)$$

$$\sigma_b^2 = \frac{\sum x_i^2 \sum (y_i - b - m x_i)^2}{(n - 2)(n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2)} \quad (6.2.9)$$

Literatur

- [1] W. Demtröder. *Experimentalphysik 2 Elektrizität und Optik*. Springer Spektrum, 6. edition, 2013.
- [2] Große-Knetter J. Schaaf, P. *Das Physikalische Praktikum*. Universitätsverlag Göttingen, 2023.
- [3] W. Walcher. *Praktikum der Physik*. Teubner Studienbücher, 2004.

Abbildungsverzeichnis

3.1	Aufbau des Versuchs „Messung der Lichtgeschwindigkeit“ mit allen beteiligten Bauteilen des Versuchs; ein Kabel am Betriebsgerät wurde in der Durchführung am Versuchstag nicht am mittleren, sondern am linken Anschluss angebracht; Quelle: [2, S. 35]	6
4.1	χ^2 -Fit aus Python, dessen Geradensteigung die Lichtgeschwindigkeit in Luft gibt; die Fitfunktion lautet $\Delta x(\Delta t) = (2,81 \pm 0,04) \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot \Delta t + (0,107 \pm 0,015) \text{ m}$; eigene Darstellung	9
6.1	Versuchsmitschrift vom Versuchstag; zu beachten ist, dass bei der unteren Beschriftung im Bild statt ein zweites Mal Acrylstab eigentlich die mit Wasser befüllte Rohrküvette gemeint ist; eigene Darstellung	12