

# Versuch 6b: Lichtgeschwindigkeit

Robin Hoffmann\*, Arik Bürkle†

12. Dezember 2023

## Zusammenfassung

*In diesem Versuch wurde mithilfe der Foucault-Methode, bei der Laserstrahlen mit Spiegeln umgelenkt und mit einer Kamera aufgezeichnet werden, die Lichtgeschwindigkeit  $c$  bestimmt. Für unsere Versuchsreihe ergab sich dabei ein Wert von  $2,72(1) \cdot 10^8$  m/s für die Lichtgeschwindigkeit.*

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Theorie</b>	<b>1</b>
2.1	Drehspiegel-Methode . . . . .	1
<b>3</b>	<b>Experiment und Aufbau</b>	<b>2</b>
3.1	Aufbau . . . . .	2
3.2	Abstände der Messgeräte . . . . .	3
3.3	Kalibrierung der Kamera . . . . .	4
3.4	Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>4</b>
4.1	Kalibrierung der Kamera . . . . .	4
4.2	Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit . . . . .	5
4.3	Systematische Fehler bei der Durchführung . . . . .	6
<b>5</b>	<b>Diskussion und Schlussfolgerung</b>	<b>7</b>

---

\*robin.hoffmann@student.uibk.ac.at

†arik.buerkle@student.uibk.ac.at

# 1 Einleitung

Die Lichtgeschwindigkeit ist eine der fundamentalsten Größen, die nicht nur in allen Bereichen der Physik Anwendung findet, sondern auch im alltäglichen Leben eine essentielle Rolle spielt. Sie beschreibt nicht nur die Geschwindigkeit, mit der sich Licht ausbreitet, sondern dient auch als obere Schranke für die Geschwindigkeit jeglicher Teilchen und somit für den Informationsaustausch. Die Tatsache, dass sich Licht unabhängig von der Geschwindigkeit des Inertialsystems ausbreiten kann, bildet die Grundlage von Einsteins Relativitätstheorie. Bereits im Jahr 1983 wurde die Lichtgeschwindigkeit als eine der ersten Naturkonstanten verwendet, um das Meter als SI-Einheit zu definieren, und seitdem ist sie mit exakt 299 792 485 m/s festgelegt. [1]

Dennoch musste die Lichtgeschwindigkeit historisch betrachtet zunächst präzise gemessen werden. Die erste bekannte Messung erfolgte 1676 astronomisch und wurde später genauer durchgeführt. Die Einführung der Maxwell-Theorie brachte einen neuen Zusammenhang für die Lichtgeschwindigkeit, der es ermöglichte, sie durch die Messung der elektrischen und magnetischen Feldkonstante zu bestimmen. Auch mittels Interferometern kann die Lichtgeschwindigkeit äußerst präzise bestimmt werden, wie das Michelson-Morley-Experiment zeigte, das nachwies, dass sich Licht unabhängig von der Bewegung der Erde in alle Richtungen mit derselben Geschwindigkeit ausbreitet. Schließlich kann die Laufzeit des Lichts direkt gemessen werden, was in diesem Versuch mithilfe der Drehspiegel-Methode erfolgte.

Dieser Bericht umfasst zunächst eine theoretische Erklärung der verwendeten Methode, gefolgt von einer Beschreibung des Versuchsaufbaus und der Durchführung. Anschließend werden die Versuchsdaten ausgewertet, gefolgt von einer Diskussion der Ergebnisse und einem abschließenden Fazit.

## 2 Grundlagen und Theorie

Um das durchgeführte Experiment zu verstehen, ist es wichtig, zu wissen, wie sich aus dem Versuchsaufbau die Lichtgeschwindigkeit bestimmen lässt. In diesem Abschnitt werden die theoretischen Grundlagen des Versuchs erläutert.

### 2.1 Drehspiegel-Methode

Bei der Drehspiegel-Methode wird ein Laserstrahl über einen rotierenden Spiegel reflektiert und dann mithilfe einer Kamera aufgezeichnet. Je höher die Frequenz des Spiegels ist, desto stärker verschiebt sich das sichtbare Bild des Laserstrahls. In diesem Abschnitt möchten wir den Zusammenhang zwischen der Verschiebung  $\Delta s$  im Kamerabild und der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  des Spiegels theoretisch herleiten.

Um die theoretische Herleitung anschaulicher zu gestalten, vereinfachen wir die Strecken gemäß Abbildung 1 wie folgt:  $d_1 = \overline{DCBH}$ ,  $d_2 = \overline{DE}$  und  $d_3 = \overline{EFG}$ , wobei A bis H die in der Abbildung eingezeichneten Orte sind. Das Licht legt auf dem Weg vom Drehspiegel bis zu seiner erneuten Reflexion eine Strecke von  $2d_3$  zurück und benötigt dafür eine Zeit von  $t = 2d_3/c$ ,

wobei  $c$  die Lichtgeschwindigkeit ist. In dieser Zeit dreht sich der Spiegel um den Winkel  $\theta = \omega t$ . Dadurch verschiebt sich der Strahl um eine Strecke  $\Delta x = d_3 \sin(2\theta)$ . Da sich der Spiegel nicht übermäßig weiter drehen kann, bis der Strahl wieder auf ihn trifft, kann die Kleinwinkel-Näherung verwendet werden, sodass  $\Delta x = d_3 \cdot 2\theta$  gilt. Die Verschiebung des Kamerabildes und die Verschiebung am Spiegel können mithilfe des Strahlensatzes in Verbindung gebracht werden.

$$\Delta s = \frac{b}{g} \Delta x \quad (1)$$

wobei  $b = d_1$  die Bildweite und  $g = d_1 + d_2$  die Gegenstandsweite ist.[2] Ersetzt man nun dies in der Formel so erhält man:

$$\Delta s = \frac{d_1}{d_1 + d_2} \Delta x \quad (2)$$

Um eine eindeutige Formel zu erhalten, können wir die restlichen Eigenschaften einsetzen, um  $\Delta s$  in Abhängigkeit von  $\omega$  darzustellen.

$$\Delta s = \frac{4d_1 d_3^2}{d_1 + d_2} \frac{\omega}{c} \quad (3)$$

Aus diesem Gesetz kann dann die Lichtgeschwindigkeit bestimmt werden.

## 3 Experiment und Aufbau

In diesem Abschnitt soll sowohl die Funktionsweise als auch der Aufbau und die Durchführung des Experiments erklärt werden [3].

### 3.1 Aufbau

Um die Sicherheit der Studenten zu gewährleisten, wurde das Experiment in einem abgeschlossenen Kasten durchgeführt. Abbildung 1 zeigt hierbei den Aufbau des Versuchs. Der erste Baustein ist ein Laser, der an der Stelle A positioniert ist. Dieser Laser erzeugt einen Laserstrahl mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 635 \text{ nm}$  und dient als Lichtquelle für den Versuch. An der Stelle B befindet sich ein Strahlteiler, der den Laserstrahl in zwei Strahlen aufteilt. Dadurch wird ein Teil des Strahls in Richtung des Spiegels C durchgelassen, während der andere Teil zur Kamera reflektiert wird. Der Spiegel C lenkt den Strahl um, sodass er auf den Spiegel D trifft. Dort wird der Strahl zum Drehspeigel an der Stelle E reflektiert. Der Drehspeigel ist ein rotierbarer Spiegel, der extern programmiert werden kann, um sich mit einer Frequenz von bis zu  $f = 5000 \text{ Hz}$  zu drehen. Der Laserstrahl trifft nach dem Durchgang durch den Drehspeigel auf den Spiegel F und schließlich auf den Spiegel G, wo der Laserstrahl dann komplett zur Kamera im Punkt H zurückreflektiert wird.

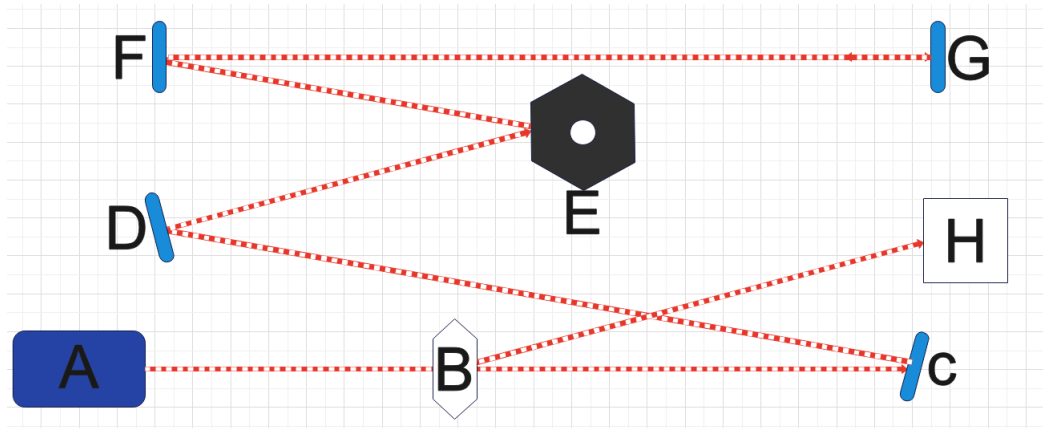


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.

### 3.2 Abstände der Messgeräte

Vor der Messung der Lichtgeschwindigkeit wurden die einzelnen Abstände der Bauelemente gemessen. Hierzu wurde die Glasdecke des Kastens abmontiert und mit einem Maßband konnten die Abstände der einzelnen Elemente ermittelt werden. Bei den Spiegeln wurde der Abstand bis zum Anfang der Bauelemente gemessen, wo das Licht reflektiert wird. Beim Drehspiegel wurde bis zur Mitte der Drehachse gemessen, und mit dem Radius des Drehspiegels  $r_D = 1,8(1)$  cm konnte der tatsächliche Abstand der Bauelemente bestimmt werden. Bei der Kamera wurde der Abstand gemessen, an dem die Kamera das Bild aufnimmt. Dabei entstand eine Ableseungenauigkeit von  $\delta s = 0,5$  cm bei den Abstandsmessungen. Bei der Streckenmessung der Kammerlinse, ergibt sich eine weitere Ungenauigkeit aufgrund der Abschätzung des Messorts von  $\delta d = 0,3$  cm. Die gemessenen Werte sind in Tabelle 1 angegeben:

Tabelle 1: Auflistung der gemessenen Distanzen gemäß der vergebenen Bezeichnungen in Abbildung 1, unter Einbeziehung des Drehspiegelradius.

Variable	Strecke	Distanz (cm)	Unsicherheit (cm)
	$\overline{AB}$	73,1	0,5
	$\overline{BC}$	121,7	0,5
	$\overline{CD}$	132,8	0,5
	$\overline{DE}$	81,3	0,5
	$\overline{EF}$	142,5	0,5
	$\overline{FG}$	193,4	0,5
	$\overline{BH}$	126,4	0,6
$d_1$	$\overline{DCBH}$	380,9	0,9
$d_2$	$\overline{DE} - r_D$	79,5	0,5
$d_3$	$\overline{EFG} - r_D$	334,1	0,7

Daraus können die relevanten Strecken für den Versuch, die im Abschnitt 2.1 besprochen wurden, bestimmt werden.

### 3.3 Kalibrierung der Kamera

In diesem Versuch werden alle Bilder mit einer Kamera aufgenommen. Dabei ist es jedoch nicht möglich, die genauen Strecken anhand der Bilder zu bestimmen. Daher ist es zunächst erforderlich, die Kamera zu kalibrieren, um eine Umrechnung von einer Pixelverschiebung in eine räumliche Verschiebung durchführen zu können.

Zu Beginn muss die Justierung der Spiegel erfolgen, damit das Licht des Lasers von der Kamera erfasst werden kann. Sobald das Laserlicht erfasst wird, sollten die Einstellungen so angepasst werden, dass selbst an der hellsten Stelle das Licht nicht den Maximalwert erreicht. Dadurch kann das Bild später eindeutig ausgewertet werden.

Sobald sowohl die Spiegel als auch die Kamera justiert sind, kann die eigentliche Messung beginnen. Dazu wird die Kamera mithilfe einer Mikrometerschraube um eine kleine Strecke verschoben und beobachtet, wie sich das Kamerabild verändert. Zuerst wird ein Bild bei Nullverschiebung aufgenommen. Anschließend wird die Kamera um  $100(5) \mu\text{m}$  verschoben, und ein weiteres Bild wird aufgenommen. Dieser Prozess wird in Schritten von  $100(5) \mu\text{m}$  wiederholt, bis die Kamera um  $2300(5) \mu\text{m}$  verschoben ist, sodass sich das Laserlicht am anderen Ende des Kamerabildes befindet. Dabei ist der Fehler der Verschiebung durch die Ablesegenauigkeit der Mikrometerschraube gegeben. Die Bilder können dann mithilfe eines vorgegebenen MATLAB-Programms ausgewertet werden, das die Lichtstärke im Bild erfasst und den Ort bestimmt, an dem das Licht am hellsten ist. Dieser Ort entspricht der Mitte des Laserstrahls, der auf die Kamera trifft.

### 3.4 Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit

Um die Lichtgeschwindigkeit zu bestimmen, wird der Drehspiegel gedreht. Nachdem das Kamerabild erneut angepasst wurde, um ein möglichst scharfes Bild zu erhalten, wird eine Verschiebung des Laserstrahls beobachtet, die von der Frequenz abhängt, mit der sich der Spiegel dreht. Diese Verschiebung kann für verschiedene Frequenzen gemessen werden. Zunächst wird der Spiegel mit einer Frequenz von  $f = 500(5) \text{ Hz}$  gedreht, und es wird ein Bild des Laserstrahls mit der Kamera aufgenommen. Dann wird die Frequenz in Schritten von  $250 \text{ Hz}$  erhöht, bis eine Endfrequenz von  $f = 5000(5) \text{ Hz}$  erreicht ist. Die tatsächliche Frequenz des Spiegels weicht von der eingestellten Frequenz ab und ist durch  $f_r = f_{dk}/6$  gegeben.

## 4 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse des Versuchs und die daraus entstandenen Werte präsentiert. Diese werden hierzu in mehreren Diagrammen grafisch dargestellt und ausgewertet. Mithilfe einer Fit-Funktion kann dann die Lichtgeschwindigkeit bestimmt werden.

### 4.1 Kalibrierung der Kamera

Nach der Durchführung des Versuchs können die Daten in einem Diagramm dargestellt werden, in dem man die Verschiebung der Kamera gegen die Verschiebung des Intensitätsmaximums aufträgt. Dadurch erhält man den folgenden Graphen, siehe Abb. 2.

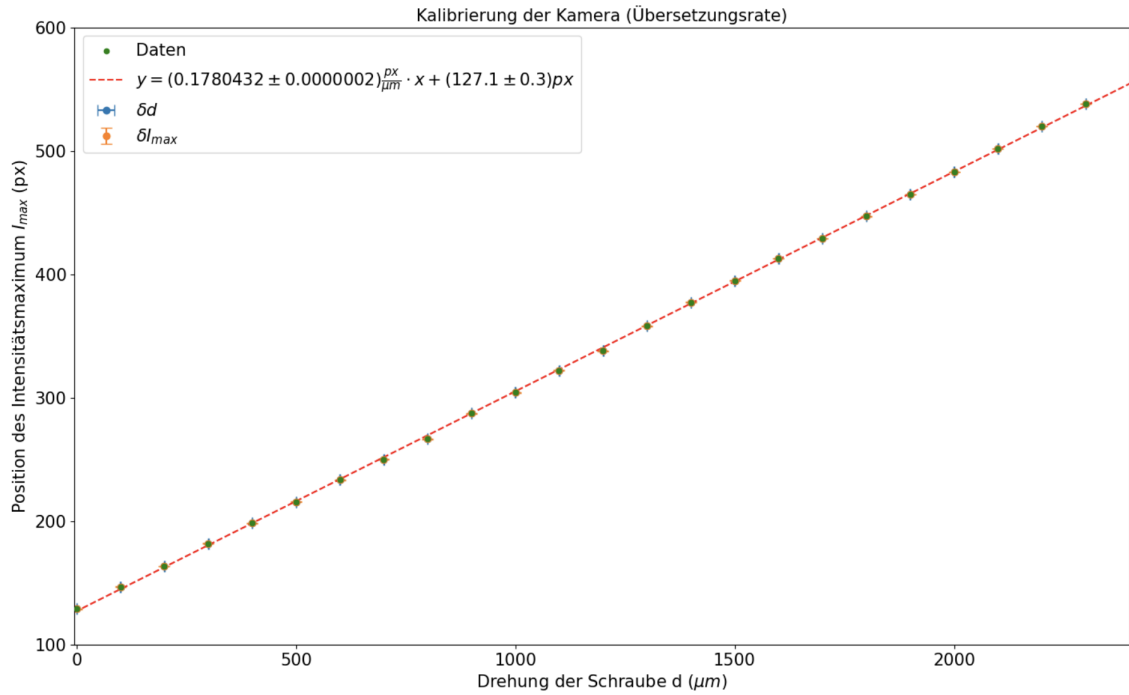


Abbildung 2: Das Diagramm zeigt die von der Kamera aufgezeichneten Intensitätsmaxima, aufgetragen gegen den Ort der Kamera. Es wurde ein linearer Fit mit der Funktion  $p = 0,178043(2) \text{px}/\mu\text{m} \cdot d + 127,1(3) \text{px}$  durchgeführt.

Aus der Steigung des linearen Fits kann die Umrechnungsrate von Pixeln in Mikrometern bestimmt werden. Dadurch ergibt sich, dass 1 Pixel einer Strecke von  $s = 5,616\,613(5) \mu\text{m}$  entspricht.

## 4.2 Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit

Um die Lichtgeschwindigkeit zu bestimmen, wird der Drehspiegel mit unterschiedlichen Frequenzen gedreht. Dadurch ergibt sich gemäß Gleichung 3 eine Verschiebung des Intensitätsmaximums. Die Position des Intensitätsmaximums wird dann gegen die Winkelgeschwindigkeit des Drehspiegels aufgetragen, wie in Abbildung 3 dargestellt.

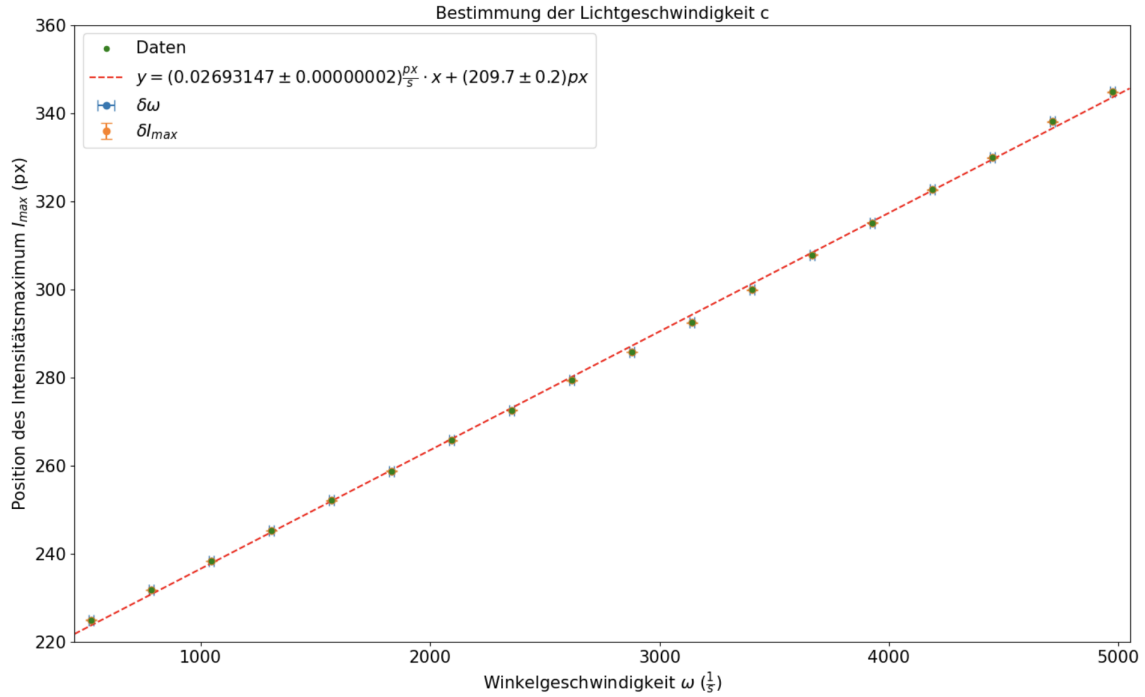


Abbildung 3: Das Diagramm zeigt die Verschiebung des Intensitätsmaximums  $I_{max}$  in Abhängigkeit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$ . Ein linearer Fit mit der Funktion  $p = 0,02693147(2), px/s \cdot \omega + 209,7(2), px$  wurde angelegt.

Aus der Steigung der Fit-Funktion kann gemäß Gleichung 3 die Lichtgeschwindigkeit bestimmt werden. Dafür muss die Pixellänge in die SI-Einheit Meter umgerechnet werden, was mithilfe des Kalibrierungsfaktors in Abschnitt 4.1 erfolgt ist.

Damit ergibt sich für die Lichtgeschwindigkeit der Wert  $c = 2,72(1) \cdot 10^8 \text{ m/s}$ .

### 4.3 Systematische Fehler bei der Durchführung

Im Experiment gibt es neben den üblichen statistischen Fehlern wie Ablesungenauigkeiten auch einige potenzielle systematische Fehlerquellen, die in diesem Abschnitt diskutiert werden sollen.

Die größte Quelle für systematische Fehler ist die Übersetzung der Mikrometerschraube. Da diese im Versuch nicht kalibriert wurde, müssen wir uns auf die Angaben des Herstellers verlassen, dass eine Drehschritt der Schraube einer Verschiebung von  $10 \mu\text{m}$  entspricht. Eine geringfügige Änderung dieses Werts würde die Umrechnungsrate beeinflussen und somit das Messergebnis erheblich verändern. Zudem ist die Schraube anfällig für Abnutzung, was ebenfalls zu Veränderungen der Umrechnungsrate führen kann. Da wir die letzten Teilnehmer dieses Versuchs waren, kann eine größere Abnutzung vermutet werden.

Eine weitere Fehlerquelle ist die Kamera selbst. Es ist schwierig abzuschätzen, wo genau das Bild tatsächlich erzeugt wird, was die Längenmessungen verfälschen kann. Zudem können auf dem Kamerabild Fehlerpunkte auftreten, da die Kamera aufgrund von Abnutzung einige Blindspots aufweisen kann. Dadurch kann sich das tatsächliche Intensitätsmaximum verschieben.

In diesem Versuch wurde die Lichtgeschwindigkeit nur in einem Medium, nämlich Luft, bestimmt. Da der Versuch nicht in einem evakuierten Raum durchgeführt wurde, weicht der erwartete Wert

von der exakt festgelegten Lichtgeschwindigkeit in Vakuum ab. Der erwartete Wert in Luft ist  $c_l = 2,99 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  [4].

Die letzte Fehlerquelle betrifft die vom Motor eingestellte Drehfrequenz. In diesem Versuch gab es keine Möglichkeit, diese zu kalibrieren. Dadurch kann die tatsächliche Drehfrequenz von der eingestellten abweichen. Wenn diese Abweichung für alle Frequenzen konstant ist, hat sie keine Auswirkungen auf das Versuchsergebnis, da die Steigung in Abb. 3 unverändert bleibt. Wenn der Offset jedoch nicht konstant für die Frequenz ist, würde sich die Steigung ändern, was zu Abweichungen von der tatsächlichen Lichtgeschwindigkeit führen würde.

## 5 Diskussion und Schlussfolgerung

In diesem Versuch wurde mithilfe der Drehspiegel-Methode eine Lichtgeschwindigkeit von  $c = 2,72(1) \cdot 10^8 \text{ m/s}$  bestimmt. Dieser Wert weicht jedoch vom Literaturwert der Lichtgeschwindigkeit mit  $c = 2,997\,924\,58 \text{ m/s}$  ab. Diese Abweichung kann durch die in Abschnitt 4.3 aufgelisteten Fehlerquellen erklärt werden. Trotzdem bietet das Experiment einen guten Ansatz die Lichtgeschwindigkeit in ihrer Größenordnung zu bestimmen.

## Literatur

- [1] Wikipedia. *Lichtgeschwindigkeit*. Online; Stand: 7. Juli 2023. Abgerufen am 10. Juli 2023. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Lichtgeschwindigkeit>.
- [2] Wikipedia. *Strahlensatz*. Online; Stand: 5. Juni 2023. Abgerufen am 10. Juli 2023. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Strahlensatz>.
- [3] Universität Innsbruck - Fakultät Experimentalphysik. *Grundpraktikum 2: Lichtgeschwindigkeit*. Skript; Stand: 15. März 2018. Abgerufen am 10. Juli 2023.
- [4] Lernhelfer. *Die Lichtgeschwindigkeit und ihre Bestimmung*. Online; Abgerufen am 10. Juli 2023. URL: <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/die-lichtgeschwindigkeit-und-ihre-bestimmung>.



## Erklärung

Hiermit versichern wir, dass der vorliegende Bericht selbständig verfasst wurde und alle notwendigen Quellen und Referenzen angegeben sind.

Arik Bürkle  
Student 1

10.07.2023  
Datum

Robin Hoffmann  
Student 2

10.07.2023  
Datum