

Lichtgeschwindigkeitsmessung in der gymnasialen Oberstufe

NILS WÜCHNER

Johannes Kepler Gymnasium, Stuttgart
nils.wuechner@jkg-stuttgart.de

22. März 2022

Zusammenfassung

Modernste Mikroelektronik und 3D-Drucktechnik ermöglichen die kostengünstige Fertigung von Schülerexperimentiersets zum Einsatz in der gymnasialen Oberstufe. In diesem Artikel wird ein Praktikumsversuch zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in Luft und der Bestimmung der Brechungsindizes von Wasser und Plexiglas vorgestellt. Dabei wird sowohl das Prinzip der Time-Of-Flight-Messung vorgestellt, als auch der Verweis auf die Bauteile gegeben und zuletzt Ergebnisse aus einem Praktikumsversuch vorgestellt.

I. EINFÜHRUNG

Nicht erst mit der Neudefinition der SI-Einheiten bildet die Lichtgeschwindigkeit eine zentrale Größe in unserer Weltanschauung. Nachdem sich zunächst Galilei und Fizeau an ihrer Bestimmung versucht haben, gelang dies zunächst Foucault und später Michelson/Morley mit erstaunlicher Präzision. Allgemein anerkannt ist heute der Wert von

$$2,99792458 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Demonstrationsversuche boten aufgrund komplizierter und teurer Aufbauten jahrzehntelang die einzige Möglichkeit zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in der gymnasialen Lehre. Kostengünstige Mikroelektroniken schaffen in Kombination mit Laser- und Fotodiodentechnik neue Möglichkeiten und lassen in Kombination mit der FDM-Technik des 3D-Druckers die Serienfertigung von Schülerexperimentiersets erschwinglich werden.

Der VL53L0X V2 ist ein Sensormodul der neuesten Generation zur Zeitmessung mit der Time-Of-Flight-Technik. Er liefert akkurate Längenmessung im Bereich bis zu zwei Meter und ist trotz der geringen Anschaffungskosten ein wahres Juwel der Mikroelektronik. Normalerweise als Laser-Abstandssensor eingesetzt, bietet er neben Zeitmessung eines Lichtpulses die Möglichkeit zur präzisen Messung der Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Medien.

II. METHODE

Unter der Laufzeit wird die Zeit verstanden, die ein Objekt benötigt, um eine Strecke durch ein Medium

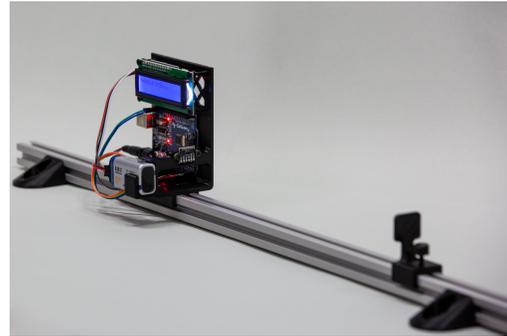


Abbildung 1: Aufbau des Versuches zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit

zurückzulegen. Die Messung dieser Zeit ermöglicht die Messung der Geschwindigkeit oder der Weglänge durch das Medium, sowie der Eigenschaften des Mediums.

Für die Laufzeitmessung wird ein Sender und Empfänger benötigt. Im verwendeten VL53L0X Sensor emittiert ein VCSEL Laser einen Lichtpuls im nahen Infrarot (940nm) während die schnelle Einzelphotonen-Avanlanchediode so beschichtet ist, dass sie nur für diese Wellenlänge empfindlich ist. Die integrierte Ausleselektronik betreibt Laser und Diode und ist für Kalibrierung, Messung und Konvertierung ins digitale Signal zuständig.

Zur Datenverarbeitung wird ein Arduino Uno mit angeschlossenen I2C-Display zur Ausgabe verwendet.

III. AUFBAU

Der Versuch besteht im Wesentlichen aus einer optischen Bank in Form eines Aluminium-Nutprofils mit



Abbildung 2: Sende-/Empfangseinheit und Reflektor in Detailansicht

einer Sende-/ Empfangseinheit sowie einem Reflektor. Für die Herstellung ist neben dem Kauf der einzelnen Materialien der Druck der CAD-Files im 3D-Drucker nötig. Dieser kann mit Standard-PLA erfolgen, wobei sich vor allem matt-schwarzes Material bestens für Optikversuche eignet. Bei der Füllung (10 – 15%), Druckauflösung (0,1 – 0,12mm) und Verfeinerung sind Standardwerte ausreichend. Unterstützungsstrukturen werden keine benötigt.

Tabelle 1: 3D-Druckteile pro Aufbau

Name / Teil	Anzahl
2020nut_base.stl	2 – 4
2020nut_arduinoisplay_vl53l0x-v2_holder.stl	1
2020nut_optikbank_mirrowholder.stl	1
Raendelkopf M4	2

Die Aluminiumprofile entsprechen den klassischen Nutprofilen (20x20, Nut 5, B-Typ), welche sich bei vielen Herstellern für einen geringen Preis pro Meter beziehen lassen. Diese eignen sich am besten in Längen zwischen 100 – 120 cm zur Ausstattung einer Schülergruppe. Kürzere oder längere Profile sind aufgrund von experimentellen Überlegungen oder Tischkapazitäten oft nicht sinnvoll. Die Profile werden mittels Standfüßen auf dem Tisch platziert, welche in einer breiteren oder schmaleren Version vorliegen. In die Nuten werden speziell angepasste Reiter eingebracht, sodass die Sende-/Empfangseinheit und Reflektor auf der Bank fixiert werden können. Für die Sende-/Empfangseinheit wurde ein Time-of-Flight-Sensor mit einer Laser-Diode (Klasse 1, infrarot 940nm) und einer Hochgeschwindigkeit-Empfangsdiode mit einem Arduino gekoppelt. Arduino, Display und Sensor werden mit M3-Schrauben an der Halterung festgeschraubt. Für das Display muss ein größerer Abstand generiert werden, indem mit M3-Muttern gegengezogen wird. Die M3-Schrauben schneiden ihr Gewinde selbst. Die beiden Bauteile verfügen über Löcher an der Unterseite, die zur Fixierung mit M4-Schrauben in 16mm Länge an der Bank vorgesehen sind. Die Innengewinde dafür sollten zusätzlich geschnitten werden. Rundkopfschrauben können mit einem Rändeldeckel versehen werden.

Tabelle 2: Materialliste pro Aufbau

Materialien	Anzahl	Preis
Arduino Uno	1	5€
I2C Display (8x2)	1	4€
VL53L0X V2 Time-of-flight Sensor	1	10€
Aluminiumprofil 20mm Nut 5 B-Typ (max. 120-130cm)	1	4€
Katzenaugenaufkleber	1	3€
M3- / M4-Rundkopfschrauben	8/2	-
Plexiglasblock	1	-

IV. VERSUCHSTEILE

Lichtgeschwindigkeit in Luft

Zur Messung der Lichtgeschwindigkeit in Luft wird die Laufzeit mehrfach bei verschiedenen Weglängen gemessen, um statistisch relevante Daten zu erhalten. Dazu steuert der Arduino eigenständig 50-100 Messungen und gibt die gemittelte Laufzeit aus. Die Anzahl der Messungen kann im Programmcode festgelegt werden. Mehrfache Wiederholung bei derselben Weglänge erhöhen die Messgenauigkeit. Die schrittweise Erhöhung der Weglänge in 10cm-Schritten erlaubt später auch eine graphische Auftragung im Diagramm und liefert eine Proportionalitätskonstante, die der Lichtgeschwindigkeit entspricht. Bei Weglängen über einen Meter kann es zu größeren systematischen Fehlern aufgrund der Sensorelektronik kommen.

Lichtgeschwindigkeit in dichteren Medien

Mit einfachsten Mitteln lässt sich auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Laserpulses in optisch dichteren Medien beobachten. Mithilfe eines Plexiglas-Blocks oder einer mit Wasser gefüllten Plastikbox kann der Brechungsindex der beiden Medien bestimmt werden. Die Verwendung verschiedener Weglängen und mehrfacher Messungen ist auch hier von Vorteil. Plexiglas-Blöcke können manchmal als Spende von lokalen Unternehmern bereitgestellt werden. Bei den Plastikboxen für das Wasser ist auf gute Durchsicht und dünnes Material zu achten. Milchige oder dicke Boxen sind aufgrund der Intensitätsverluste und der Streuung ungeeignet.

V. ERGEBNISSE

In einer Beispielmessung wurden mehrere Laufzeitmessungen im Abstand von 5cm durchgeführt. Die Messwerte sind in Abbildung 4 dargestellt. Eine Auswertung durch Mittelwertbildung ergibt eine Ausbrei-

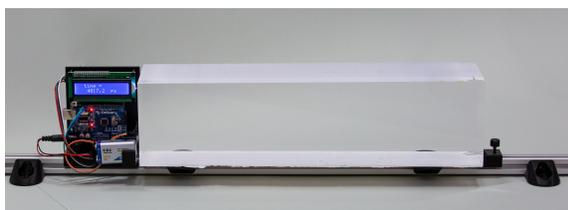


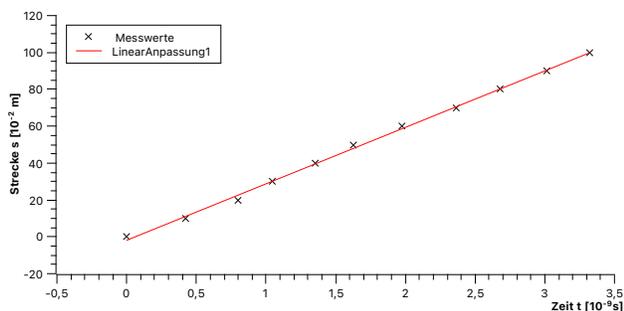
Abbildung 3: Messung des Brechungsindex von Plexiglas

tungsgeschwindigkeit von

$$c \approx 2,875 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

und damit einen relativen Fehler von ungefähr vier Prozent zum Literaturwert.

Abbildung 4: Messdaten und linearer Fit



Für die Brechungsindizes von Wasser (1,33) und Plexiglas (1,49) ergeben sich ebenfalls sehr genaue Werte von

$$n_{\text{Wasser}} \approx 1,34 \quad \text{und} \quad n_{\text{Acrylglas}} \approx 1,56$$

VI. ZUSAMMENFASSUNG

Aufgrund des reduzierten Aufbaus und der hervorragenden Messergebnisse eignet sich die Time-Of-Flight-Messung der Lichtgeschwindigkeit als einfacher Praktikumsversuch für die Oberstufe. Erweitert um die Bestimmung der Brechungsindizes bietet sich die Möglichkeit zur Differenzierung und des praktischen Erfahrens dieser abstrakten Materialeigenschaft. Der geringe Kosteneinsatz von ca. 30 Euro pro Versuchsaufbau eröffnet die Möglichkeit zum Einsatz im Schüler-Praktikum.

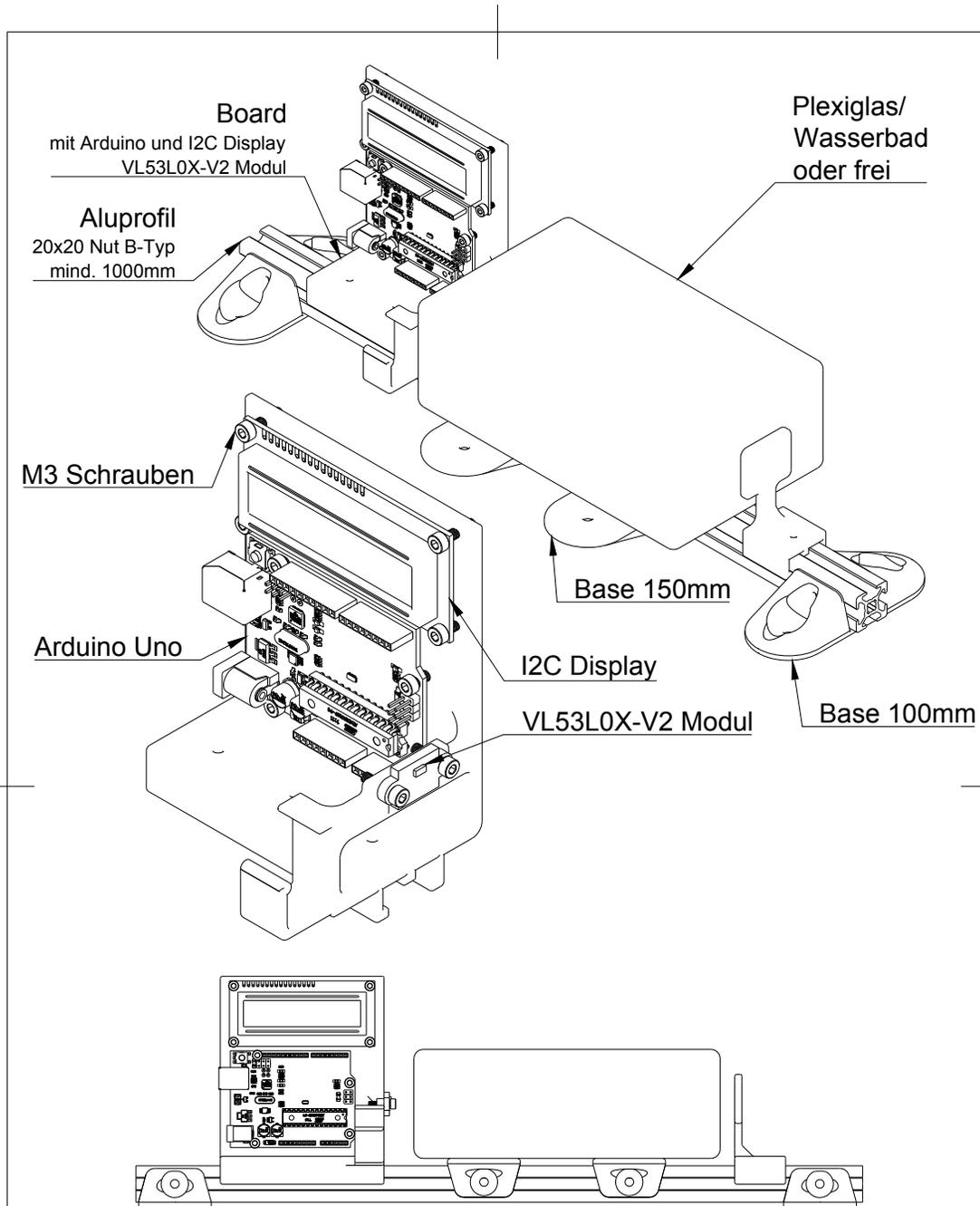
DANKSAGUNG

Besonderer Dank gilt Prof. Bruno Rager vom Seminar Esslingen für die ständige pädagogische Betreuung und Hinweise zum Programmcode und Aufbau. Grundlegende Ideen sind dem PhysicsOpenLab [openphysics] entnommen. Die präsentierten Messwerte stammen aus der ersten Durchführung im Phy-

sik Leistungskurs. Der Dank für die präzise Messwertfassung gilt Ira Himstedt und Fedja Bubalo.

LITERATUR

[openphysics] PhysicsOpenLab via Jabolatorium.com (2018). Light Speed Measure with a Time-of-Flight (ToF) Sensor. <https://physicsopenlab.org/2018/09/21/light-speed-measure-with-a-time-of-flight-tof-sensor/>, 21.09.2018.



Dept. Physics	Technical reference Wellenoptik	Created by nils wuechner	16.01.21	Approved by	
		Document type	Document status		
		Title Speed of Light with VL53L0X-V2	DWG No.		
		Rev.	Date of issue	Sheet 1/1	

