

# Messung der Lichtgeschwindigkeit am Küchentisch

Helmut Kühnelt

Die Messung des Brechungsindex  $n$  durch Vergleich der Winkel (eigentlich deren Sinus) von einfallendem und gebrochenem Strahl an der Grenzfläche zweier transparenter Medien, etwa Luft und Glas, ist ein gängiger Schulversuch. Oft wird dazu gesagt, dass  $n$  den Faktor angibt, um den das Licht im optisch dichteren Medium langsamer laufe. Diese Eigenschaft des Lichts wurde von Jean Foucault 1853 erstmalig an Wasser nachgewiesen, in der Schule ließ sie sich bisher kaum nachweisen. Zuvor hatte Hippolyte Fizeau 1849 mit der Zahnradmethode und einem Lichtweg von ca. 17 km erstmalig eine terrestrische Messung der Lichtgeschwindigkeit in Luft vorgenommen. Sein Messwert lag etwa 5% über dem heute akzeptierten Wert. Mit der Drehspiegelmethode gelang Foucault bereits 1850 ein verbesserter Wert von 298000 km/s.

Die Messung der Lichtgeschwindigkeit in Luft ist als Schulversuch sehr aufwändig [1, 2]. Im Jahr 1983 wurde der Wert der Lichtgeschwindigkeit mit  $c = 299\,792\,458$  m/s festgelegt, daher überprüft jeder Versuch zur Messung von  $c$  die eigene experimentelle Fertigkeit. Auf der Definition und der Möglichkeit, kurze Zeiten elektronisch zu messen, beruhen die „Laserpistole“ der Polizei und das „elektronische Maßband“, der Laser-Distanzmesser aus dem Baumarkt. Kürzlich haben Waltner, Krätzig und Wiesner [3] und Ochoa et al. [4] einfache Praktikumsexperimente mit Entfernungsmessern von Bosch (PLR 30, GLM 50) [5] vorgestellt, die als Freihandexperiment leicht nachzumachen sind.

Die Funktion des Laser-Distanzmessers (LDM) ist eine elektronische Variante der Zahnradmethode von Fizeau und im Prinzip einfach: Ein intensitätsmodulierter Laserstrahl wird diffus an einem Objekt gestreut, aus der Phasenverschiebung der reflektierten Lichtpakete gegenüber den emittierten Paketen wird die Laufzeit ermittelt, die mittels der Lichtgeschwindigkeit (in Luft) in Entfernungen umgerechnet wird. Für Laien tritt ein überraschender Effekt auf, wenn der Laserstrahl dabei ein transparentes Medium durchläuft. Die angezeigte Distanz ist größer und daher „falsch“, das Licht hat länger gebraucht. Dies legt nahe: Die Lichtgeschwindigkeit im Medium ist geringer als in Luft.

Abb. 1 zeigt die Anordnung des Küchentisch-Experiments. Unter einem LDM befindet sich ein schlankes Trinkglas, auf dessen Boden eine Münze liegt. Die Münze legt eine definierte Reflexionsebene fest. Bei leerem Glas wird der Abstand  $a$  der Münze vom LDM gemessen. Nachdem

Dr. Helmut Kühnelt, theoretischer Physiker und ehemaliger Obmann des Vereins zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts.

Wasser, Zuckerlösung, Glycerin oder eine andere transparente Flüssigkeit z.B.  $d = 10$  cm hoch eingefüllt wurde – in der Abbildung ist zur besseren Sichtbarkeit Apfelsaft verwendet, wird der Münzenabstand wieder gemessen. Als Wert ergibt sich  $b > a$ . Der optische Weg ist also größer geworden. Schließlich lässt man auf der Flüssigkeitsoberfläche ein kleines Stück Papier schwimmen, um die Entfernung  $h$  des LDM von der Oberfläche zu bestimmen. (Die Entfernungsangaben des LDM beziehen sich üblicherweise auf die hintere Kante des Geräts.)

Aus den Messwerten folgt daher der Brechungsindex als  $n = 1 + (b - a)/(a - h)$ .

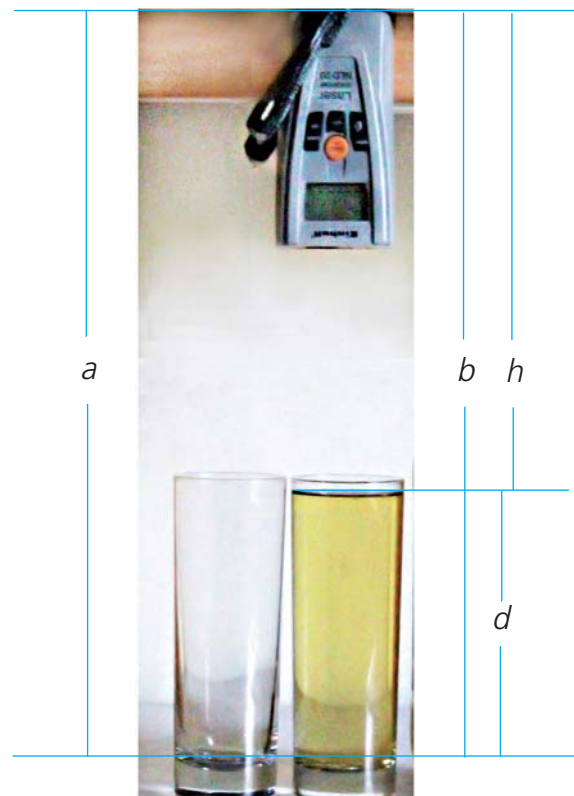


Abb. 1: Messung am Küchentisch

Mit „OBI-gespritzt“ ergaben sich für die Messung in Abb.1 die Werte  $a = 0,659$  m,  $b = 0,695$  m,  $c = 0,556$  m, und daraus  $n = 1,35$  – sicher ein glücklicher Zufall bei einer einzigen Messung, wird doch für das verwendete betagte LDM der Fa. Einhell eine Messgenauigkeit von 5 mm angegeben. Der Standardwert für den Brechungsindex von Wasser ist 1,33, von 5%iger Zuckerlösung etwas höher.

Eine eingehende Diskussion von Methoden und Fehlerquellen der Laser-Entfernungsmessung geben Amman et al. [6], eine kurze Begriffsklärung gibt Paschotta [7]. Die Hauptfehlerquellen sind: Streulicht, Rauschen der Laserdiode und der Elektronik des Empfängers/Verstärkers. Bei dem schwachen Signal des reflektierten Lichts ist Streulicht möglichst zu vermeiden. Außerdem ist der Minimalabstand lt. Datenblatt zu beachten. Abb. 2 zeigt die Frontseite des LDM mit einem Fenster für das emittierte rote Laserlicht und die Linse zum Empfang des diffus reflektierten Lichts, unter der weitere Linsen für Photodetektoren erkennbar sind.

Eine Messreihe mit verschiedenen konzentrierten Zuckerlösungen mit Überprüfung des angegebenen Zuckeranteils von Apfelsaft wäre eine bewältigbare Aufgabe für eine VWA, eine einzelne Messung könnte Teil der mündlichen Matura sein. Bei Vorhandensein eines schnellen Fotodetektors und eines Oszilloskops könnte die im MHz-Bereich liegende Modulationsfrequenz bestimmt werden.

**Abschließend eine historische Notiz:** Bekannt ist Galileis erfolgloser Versuch zu entscheiden, ob Licht sich unendlich schnell ausbreitet oder doch eine endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit hat. 60 Jahre danach konnte Ole Roemer an Hand der beobachteten Verfinsterungen des Jupitermondes Io zeigen, dass Licht sich mit endlicher Geschwindigkeit ausbreitet. Er war sich der Probleme bei der Quantifizierung bewusst: Zu seiner Zeit war der Erdbahnradius nur sehr ungenau bekannt und die Messung längerer Zeiten war äußerst ungenau, da die Sonne keine gleichmäßige Uhr darstellt. So schloss er, dass das Licht von der Sonne zur Erde 660 Sekunden brauche, was vom wahren Wert 500 s beträchtlich abweicht. Eine eingehende Diskussion von Roemers Leistung gibt Albert van Helden in einem lesenswerten Artikel [8].

## Literatur

- [1] Roger Erb: Der Fizeau-Versuch in neuem Gewand. In: Physik in unserer Zeit, 36 (2005), 274-277
- [2] Marcus Meincke, Andreas Strunz, Jan-Peter Meyn: Optimierung des Drehspiegelexperiments zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit, Beiträge zur Physikdidaktik B, DD 01.06 (2012). Online: <http://www.phydid.de>.
- [3] Christine Waltner, Anna Krätzig, Hartmut Wiesner: Experimente mit dem Laser-Entfernungsmesser, Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 1/58 (2009), 12-14
- [4] Romulo Ochoa, Richard Fiorillo, Cris Ochoa: Index of Refraction Measurements Using a Laser Distance Meter, The Physics Teacher 52 (2014), 167-168
- [5] Für Schulzwecke und privaten Gebrauch sind die Laser-Distanzmesser von Bosch mit grünem Gehäuse (PLR 15, PLR 30) als Klasse II-Laser (635 nm Wellenlänge) ausreichend. Erstaunlich ist die erreichbare Genauigkeit von 2 mm bei einem Messbereich von 20 cm bis 30 m.
- [6] Markus-Christian Amann, Thierry Bosch, Marc Lescure, Risto Myllylä, Marc Rioux: Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement. Opt. Eng. 40 (2001) 10-19. Online: <http://www.utdallas.edu/~aiken/LASERCLASS/laserprinlipels.pdf>
- [7] Rüdiger Paschotta: Encyclopedia article on distance measurements with lasers (online: [http://www.rp-photonics.com/distance\\_measurements\\_with\\_lasers.html](http://www.rp-photonics.com/distance_measurements_with_lasers.html)) [19/05/2014]
- [8] Albert van Helden: Roemer's Speed of Light, Journal for the History of Astronomy, 14:2 (1983), NO.40, 137-140; online: <http://adsabs.harvard.edu/full/1983JHA....14..137V>



Abb. 2: Frontansicht des Laser-Entfernungsmesser