

# Messung der Lichtgeschwindigkeit als Remotely Controlled Laboratory (RCL)

S. Gröber, M. Vetter, B. Eckert, H. J. Jodl

## 1 Einleitung

Die Idee eines Remotely Controlled Laboratory (RCLs) besteht darin, einen Versuch real am Ort A aufzubauen und im Internet fortwährend bereit zu stellen. Ein Experimentator am Ort B kann dann vom eigenen Computer aus den Versuch durchführen (weitere Informationen [1, 2]).

Ein erster Grund die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit mit einem RCL zu realisieren, ist die Bedeutung der Lichtgeschwindigkeit in der Physik als

- definierter Wert von  $c = 299792,458 \text{ km/s}$  zur Festlegung der Basiseinheit „Meter“
- einheitliche Ausbreitungsgeschwindigkeit aller elektromagnetischer Wellen im Vakuum
- Grenzggeschwindigkeit und vom Bewegungszustand unabhängige Größe in der speziellen Relativitätstheorie
- Größe zur Bestimmung von Abständen (z. B. in der Landvermessung) und von Positionen mit dem Global Positioning System (GPS)
- Messgröße, die hohe Anforderungen an eine Zeitmessung stellt
- Fundamentalkonstante in den Gesetzen der Physik.

Ein zweiter Grund ist, die in der Schule gängigen Demonstrationsexperimente zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit um ein Schülerexperiment zu erweitern. Als Grundlage für das RCL wurde wegen des begrenzten Konstruktionsaufwands ein von den Lehrmittelfirmen angebotener Versuch ausgewählt. Die Versuche arbeiten alle mit der Laufzeitmethode und weisen unterschiedliche Vor- und Nachteile auf (Tab. 1).

Schulversuch mit ...	Vorbereitungsaufwand	Platzbedarf	Zeitmessung	Messreihe	Messfehler	Zielgruppe
mechanischer Drehspiegelmethode nach Foucault [3a, 4a]	Hoch wegen viel Mechanik und zeitaufwendiger Justierung des Strahlengangs	Hoch wegen begrenzter Drehzahl des Drehspiegels	Indirekt mit schlecht messbarer Ablenkung des Lichtflecks um wenige Millimeter	Nein weil, Justieraufwand zu groß und Änderung der Lichtfleckablenkung zu klein	ca. 20 %	Sek. II weil, Kenntnisse aus Mechanik Sek. II notwendig
optoelektronischer Messung der Phasenverschiebung modulierter Lichtsignale [3b, 4b]	Mittel wegen wenig Mechanik und teilweise nicht einfacher Justierung des Strahlengangs	Gering wegen hoher Modulationsfrequenz	Indirekt über Phasenverschiebung eines modulierten Mischsignals	Ja	ca. 5 %	Sek. II weil Kenntnisse aus Wellenlehre Sek. II notwendig
optoelektronischer Messung der Laufzeit von Lichtimpulsen [3c]	Gering wegen wenig Mechanik und einfacher Justierung des Strahlengangs	Hoch wegen nicht beliebig kleiner Breite der Lichtimpulse	Direkt aus zeitlichem Abstand zweier Signale	Ja	< 5 %	Sek. I und Sek. II weil, Geschwindigkeitsbestimmung aus Strecke und Zeit

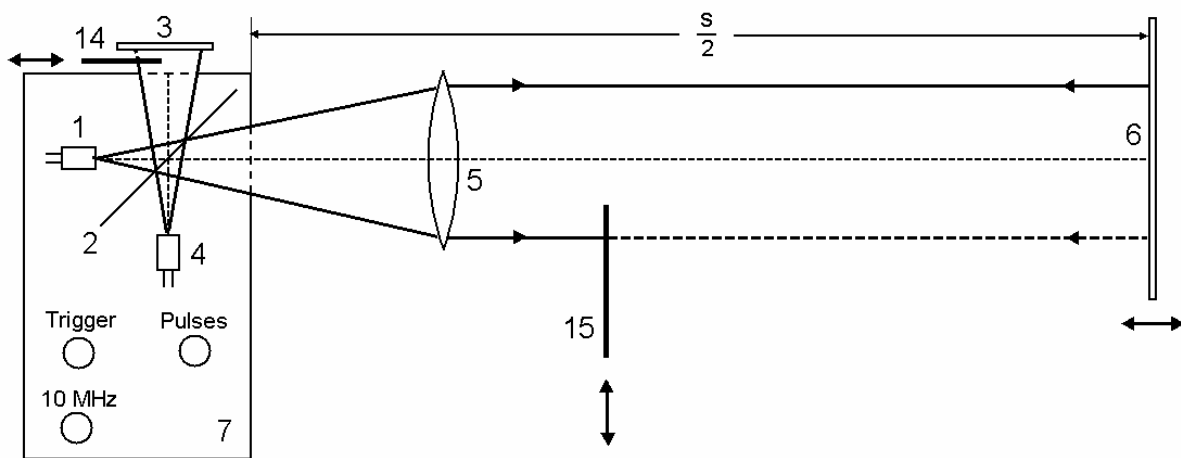
**Tab. 1: Vor- und Nachteile von Schulversuchen zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit.**

Da RCLs in der Regel nur einmalig stationär aufgebaut werden müssen, spielen der Vorbereitungsaufwand und der Platzbedarf für die Realisierung eines RCLs eine untergeordnete Rolle. Entscheidendes Kriterium für die Wahl des Versuchs der optoelektronischen Messung der Laufzeit von Lichtimpulsen [3c] war das Verfahren der Zeitmessung: Die

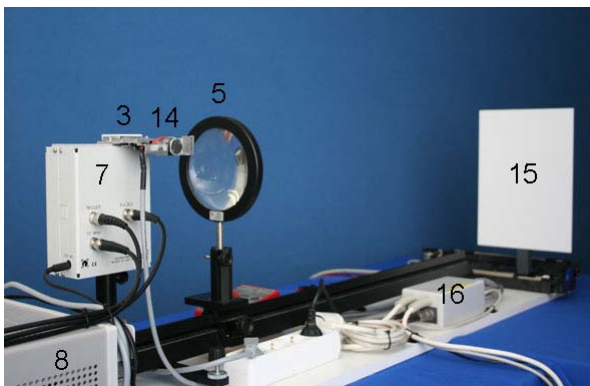
Laufzeit des Lichts kann direkt auf dem Oszilloskopbildschirm abgelesen werden, während diese bei den anderen Versuchen indirekt über mehrere Zwischengrößen bestimmt werden muss. Hinzu kommt die geringe Ablenkung des Lichtflecks bei der Drehspiegelmethode und die nur schwer für Schüler verständliche Zeitmessung beim Versuch mit optoelektronischer Messung der Phasenverschiebung modulierter Lichtsignale aufgrund der Verwendung von Mischsignalen. Darüberhinaus bietet der gewählte Versuch Vorteile bei den restlichen Kriterien.

## 2 Versuchsaufbau und Versuchsbeschreibung

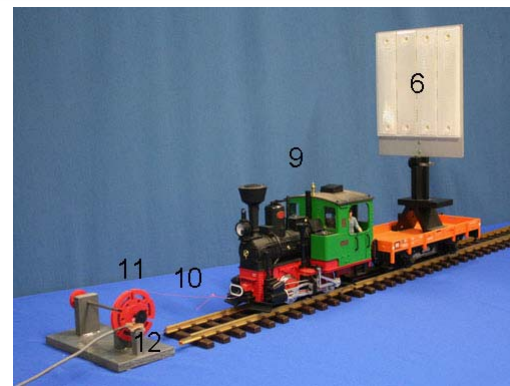
Abb. 1 zeigt den Versuchsaufbau des RCLs. Die Funktionsweise des Versuchs ist wie folgt:



a)



b)



c)

Abb. 1: Versuchsaufbau des RCLs als modifizierter Schulversuch.

Eine schnelle Hochleistungs-LED (1) sendet kurze, ca. 20 ns dauernde Lichtimpulse mit einer Wiederholungsrate von 40 kHz, einer Wellenlänge von 615 nm und vergleichsweise hoher Lichtintensität aus. Der teildurchlässige Spiegel (2) spaltet zeitgleich jeden Lichtimpuls in einen Referenzimpuls und einen durchgehenden Laufstreckenimpuls auf. Die Referenzimpulse werden an einem kleinen Tripelspiegel (3) in sich reflektiert, passieren den teildurchlässigen Spiegel und gelangen so zur Empfänger-Diode (4). Eine Linse (5) mit 200 mm Brennweite erzeugt aus dem durchgehenden Licht der Laufstreckenimpulse zum Erzielen einer große Reichweite ein annähernd paralleles Lichtbündel. Dieses wird an einem großen Tripelspiegel (6), der eine einfache Justierung des Strahlengangs erlaubt, in sich reflektiert und gelangt auf umgekehrten Weg durch Reflexion am teildurchlässigen Spiegel ebenfalls zur Empfänger-Diode. Da die Lichtwege für die geteilten Impulse inner-

halb des Lichtgeschwindigkeit-Messgerätes (7) gleich sind, trägt nur die Laufstrecke  $s$  zum Laufzeitunterschied zwischen den Referenz- und Laufstreckenimpulsen bei.

Der Laufzeitunterschied kann mit einem Oszilloskop (8) im Zweikanal-Betrieb gemessen werden: Auf dem einen Kanal dient ein 10 MHz-Signal (Periodendauer  $T = 100 \text{ ns}$ ) des Lichtgeschwindigkeit-Messgeräts als kalibrierte Zeitreferenz (Anschlussbuchse „10 MHz“), auf dem anderen Kanal wird das Signal der Referenzimpulse und der verzögert eintreffenden Laufstreckenimpulse (Anschlussbuchse „Pulses“) dargestellt.

Der Schulversuch wurde in folgender Weise modifiziert:

- Der große Tripelspiegel (6) wurde auf einer elektrisch betriebenen Spielzeuglokomotive (9) befestigt. Damit kann in den Räumlichkeiten am Standort des RCLs die Laufstrecke  $s$  zwischen ungefähr 9 m und 22 m variiert werden. Die Bewegung der Spielzeuglokomotive entlang der Schienen wird durch eine Schnur (10) auf ein Speichenrad (11) übertragen und die Strecke  $s/2$  mit einer Lichtschranke (12) gemessen.
- Die Laufzeitdifferenz zwischen Referenz- und Laufstreckenimpulsen stimmt nur bei gleicher Amplitude der Signale mit dem Abstand der ansteigenden Flanken und der Signalspitzen überein [3c]. Daher wurden mit Schrittmotoren fernsteuerbare Blenden im Lichtweg der Referenz- (14) und der Laufstreckenimpulse (15) positioniert.
- Zwischen den Webserver und den Versuch ist ein Interface (16) geschaltet. Der darin enthaltene Microcontroller erlaubt beim erstmaligen Aufbau des RCLs am Standort eine Streckenkalibrierung, verarbeitet die Datenströme von der Lichtschranke und zu den Schrittmotoren, steuert die Spielzeuglokomotive und schaltet das Oszilloskop ein und aus.
- Eine Webcam erlaubt die Übertragung des Oszilloskopbildschirms, eine zweite Webcam zeigt den Versuchsaufbau in der Totale.

### 3 Versuchsdurchführung und Messergebnisse

Im RCL-Portal [6] ist die Laborseite des Versuchs wie die jedes anderen RCLs Teil einer stets nach den gleichen Menüpunkten strukturierten Lernumgebung (Abb. 2, links). Diese stellt Lehrkräften vielfältiges Unterrichtsmaterial und Schülern alle notwendigen Informationen zum Verständnis und zur eigenständigen Durchführung des Versuchs bereit.

Im oberen Webcambild (Abb. 2, mittig) ist der Oszilloskopbildschirm mit dem 10-MHz-Signal als Zeitreferenz sowie das Referenz- und Laufstreckensignal zu sehen. Zur Bestimmung der Zeitdifferenz zwischen den Signalen kann das Bild des Schirms durch Betätigen des Buttons „Oszilloskop-Screenshot“ gespeichert werden. Im unteren Webcambild ist der Versuchsaufbau im Überblick zu sehen, so dass die Bewegung der Spielzeuglokomotive mitverfolgt und ein ungefährender Wert für die Strecke  $s/2$  auf einer Skala an der Wand abgelesen werden kann.

Im Bedienfeld (Abb. 2, rechts) werden die Messungen durchgeführt. Mit den Buttons „Reflektordistanz verkleinern“ und „Reflektordistanz vergrößern“ wird der Reflektor (großer Tripelspiegel) mit der Spielzeuglokomotive positioniert. Bei Betätigung des Buttons „Lok anhalten - Reflektordistanz messen“ hält die Spielzeuglokomotive an und die Strecke  $s/2$  wird ausgegeben. Mit den Buttons im unteren Teil des Bedienfeldes werden die beiden Blenden zum Erzeugen gleicher Amplituden der Signale eingestellt.

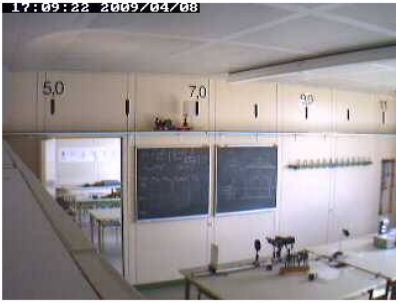
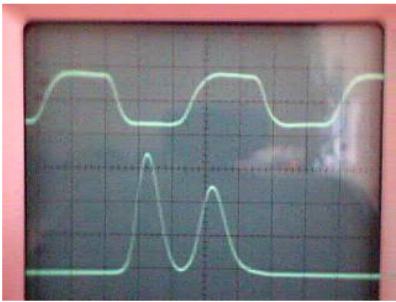
# RCL - Remotely Controlled Laboratories

experimentieren aus der Ferne

Home    Das RCL-Projekt    **Labs**    Kontakt    Benutzerhinweise

Lichtgeschwindigkeit

- Einstieg
- Aufbau
- Theorie
- Aufgaben
- Labor**
- Auswertung
- Diskussion
- Material
- Betreuung



Oszilloskop und Raumbelichtung schalten sich nach dem Bewegen der Lokomotive ein.

Oszilloskop-Screenshot

## RCL - Lichtgeschwindigkeit

### Labor

Verbleibende Experimentierzeit:  s

Reflektordistanz verkleinern    Reflektordistanz vergrößern

Lok anhalten - Reflektordistanz messen

6726 mm

öffnen ----- Blende für Referenzimpulse ----- schließen

<<<   <<   <   >   >>   >>>

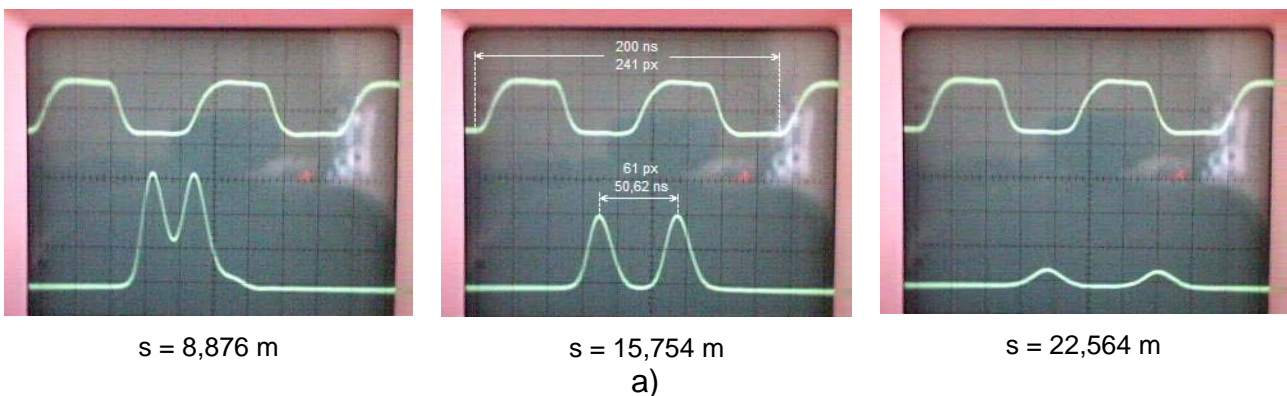
öffnen ---- Blende für Laufstreckenimpulse ---- schließen

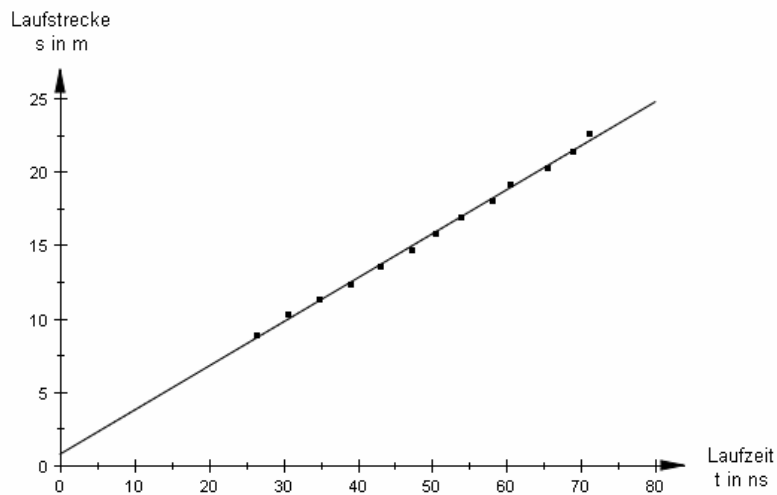
<<<   <<   <   >   >>   >>>

beide Blenden öffnen

Abb. 2: Laborseite des Versuchs mit Versuchsmenü (links), Webcambildern (mittig) und Bedienfeld (rechts).

Abb. 3a zeigt exemplarisch drei Screenshots des Oszilloskopbildschirms für unterschiedliche Laufstrecken  $s$  der Laufstreckenimpulse und gleicher Amplitude der Signale. Zur Auswertung kalibriert man die Zeitachse des 10-MHz-Signals mit Hilfe eines Bildbearbeitungsprogramms in ns/px und bestimmt den zeitlichen Abstand  $t$  der Signalspitzen. Nach Abb. 3b erhält man aus der Steigung der Regressionsgeraden einen Wert der Lichtgeschwindigkeit von  $c = 299791$  km/s.





b)

**Abb. 3: Oszilloskopbilder für verschiedene Laufstrecken der Laufstreckenimpulse (a), Auswertung der Messergebnisse (b).**

Die Laufstrecke  $s$  lässt sich auf ca. 1 cm genau kalibrieren, der Ablesefehler für die Laufzeit  $t$  liegt bei ca.  $3 \text{ px} \equiv 2,4 \text{ ns}$  und über die Frequenzstabilität des 10 MHz-Signals liegen keine Angaben vor. Der hauptsächlich durch die Zeitmessung verursachte maximale Messfehler schwankt damit zwischen ca. 9 % für die kleinste und ca. 3 % für die größte gemessene Laufstrecke. Die Regressionsgerade geht wegen eines konstanten Offsets in der Zeitmessung nicht durch den Koordinatenursprung – ein möglicher Fehler von ca. 35 cm bei der Streckenkalibrierung liegt nicht vor.

### Zusammenfassung - Mehrwert des RCLs

Eine Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit mit dem RCL hat unseres Erachtens folgende Vorteile:

- Außer Demonstrationsexperimenten zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit ist ein Schülerexperiment verfügbar.
- Die direkte Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit aus Laufstrecke und Laufzeit von Lichtimpulsen ist leicht verständlich und der Versuch kann ab der Sekundarstufe I eingesetzt werden.
- Die Lehrkraft hat nicht nur die Möglichkeit experimentelle Hausaufgaben zu stellen, sondern auch die Schüler so zu organisieren, dass diese in Gruppen und in elektronischer Form umfangreiche Laufzeit-Laufstrecke-Messreihen für eine aussagekräftige Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit zusammentragen. Eine Erkenntnis kann sein, dass der Einsatz moderner Elektronik allein noch keinen besonders kleinen Meßfehler garantiert.
- Der Einsatz moderner Elektronik (Hochleistungs-LED und Empfänger-Diode mit nachgeschalteter Messelektronik) regt zum Selbstbau des Versuchs an [7].

Eine erste Version des RCLs wurde im Jahr 2005 vor einer Gruppe von Schülern auf einem Summercamp der Technischen Universität München innerhalb einer Woche aufgebaut, programmiert, getestet und der Öffentlichkeit präsentiert. Diese Version haben wir technisch nachgebessert, die Lernumgebung ergänzt und das RCL über das RCL-Portal veröffentlicht.

## Danksagung

Wir danken Herrn Bucher, Frau Szasz und Herrn Wild von der Hochschule Heilbronn, dem Standort des RCLs, für die gute Kooperation beim Einsatz des RCLs in der Lehre. Den Sponsoren (BMW-Eberhard von Kuenheim-Stiftung - Frau Grammes, Arbeitgeberverband Gesamtmetall - Herr Gollub, Intel - Herr Ensle) danken wir für die ideale und materielle Unterstützung des RCL-Gesamtprojekts.

## Literatur

- [1] Altherr, S., Eckert, B., Vetter, M. & Jodl, H. J. (2005): Experimentieren aus der Ferne - Ferngesteuertes Labor im Internet (Remotely Controlled Laboratory – RCL), PdN-PhiS 6/54, S. 40 - 46.
- [2] Vetter, M., Gröber, S., Eckert, B. & Jodl, H.-J. (2006): Neues vom Remote Controlled Lab Projekt, in: Nordmeier, V. & Oberländer, A. (Hrsg.): DPG Frühjahrstagung - Didaktik der Physik, Kassel 2006, Lehmanns Media.
- [3] LD Systeme AG & Co. KG: a) Gebrauchsanweisung „Drehspiegel zur Lichtgeschwindigkeit“ (Nr. 47640), b) Handblatt Physik „Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit mit einem periodischen Lichtsignal auf kurzer Messstrecke“ (P 5.6.3.1), c) Gebrauchsanweisung „Lichtgeschwindigkeits-Messgerät VLM“ (Nr. 47650).
- [4] Conatex Didaktik GmbH: a) Messung der Lichtgeschwindigkeit nach Foucault – Drehspiegelmethode (Nr. 104.0273), b) Messung der Lichtgeschwindigkeit über die Phasenverschiebung eines Laserstrahls (Nr. 104.0272).
- [5] Phywe Systeme GmbH & Co. KG: Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in Luft (Nr. P0749700).
- [6] <http://rcl.physik.uni-kl.de>.
- [7] Ehret, B. (1992): Messung der Lichtgeschwindigkeit mit Lichtimpulsen, PdN-Ph 4/41, S. 17 - 35.

## Anschrift der Verfasser

Stellvertretend für die Arbeitsgruppe: Sebastian Gröber, Fachbereich Physik, Technische Universität Kaiserslautern, Erwin-Schrödinger-Str., 67663 Kaiserslautern.  
E-Mail: groeber@physik.uni-kl.de

## Kurzfassung

Obwohl der Wert der Lichtgeschwindigkeit heute definiert ist, ist die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in der Schule ein „Muss“. Gründe sind die physikalische Bedeutung der Lichtgeschwindigkeit (z. B. Lichtgeschwindigkeit als Grenzgeschwindigkeit), auf der Lichtgeschwindigkeit basierende technische Anwendungen (z. B. Positionsbestimmung mit GPS) und die Frage, wie eine so große Geschwindigkeit überhaupt gemessen werden kann. Alle Schulversuche zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit sind Lehrerdemonstrationsexperimente mit teilweise nachteiligem Messverfahren. Daher wurde ein RCL realisiert, das mit der optoelektronischen Messung der Laufzeit von Lichtimpulsen arbeitet und auf einem Versuch der Firma LD Systeme basiert. Bereits Schüler oder Schülergruppen ab der Sekundarstufe I können damit von zu Hause aus am Computer eigene Messungen durchführen, Messdaten für eine Messreihe zusammentragen und die Lichtgeschwindigkeit bestimmen.