

Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in Luft aus Laufweg und Laufzeit eines kurzen Lichtimpulses

Versuchsziele

- Relativmessung der Laufzeit t eines kurzen Lichtimpulses mit einem Oszilloskop in Abhängigkeit von der Position s des Reflexionsspiegels
- Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in Luft aus der Steigung des Graphen $s = f(t)$
- Absolutmessung der Laufzeit t eines kurzen Lichtimpulses mit einem Oszilloskop für einen vorgegebenen Laufweg $2s$ durch Markierung des Nullpunkts mit einem Referenzspiegel
- Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in Luft als Quotient aus Laufweg und Laufzeit
- Kalibrierung der Zeitmessung mit einem quarzgesteuerten Oszillatorsignal
- Absolutmessung der Laufzeit t eines kurzen Lichtimpulses für einen vorgegebenen Laufweg $2s$ durch Markierung des Nullpunkts mit einem Referenzspiegel
- Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit in Luft als Quotient aus Laufweg und kalibrierter Laufzeit

Grundlagen

Das Lichtgeschwindigkeits-Meßgerät sendet über eine Hochleistungs-LED sehr kurze, rote Lichtimpulse von etwa 20 ns Breite aus. Die Lichtimpulse werden nach Hin- und Rücklauf über eine bekannte Meßstrecke in Spannungsimpulse umgewandelt und mit einem Oszilloskop beobachtet.

Lichtweg:

Die Lichtquelle, eine hellrot ($\lambda = 615 \text{ nm}$) leuchtende LED, wird durch das Fenster F_1 des Lichtgeschwindigkeits-Meßgerätes von der Linse L ins Unendliche abgebildet. Der große Tripelspiegel T_1 faltet den Strahlengang in sich zurück, so daß die LED wieder auf sich selbst abgebildet wird (siehe Fig. 1).

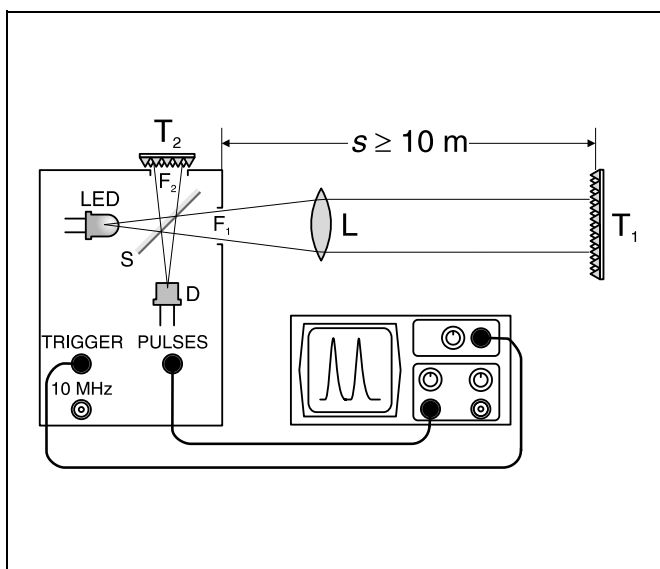
Der Strahlteiler S im Lichtgeschwindigkeits-Meßgerät reflektiert das zurückkommende Licht nach unten auf die Photodiode D . Gleichzeitig reflektiert er die Hälfte des ausgesandten Lichtes nach oben, wo es durch das zweite Fenster F_2 austritt. Dieser nach oben gerichtete Strahlengang ist gleichwertig zu dem horizontal austretenden.

Der direkt über F_2 angeordnete kleine Tripelspiegel T_2 erzeugt einen Referenzimpuls mit vernachlässigbarer Laufzeitverzögerung und beeinflusst den Meßstrahl nicht.

Meßverfahren:

Einer Meßstrecke von 10 m entspricht eine Laufzeit des Lichtimpulses von rund 60 ns für den Hin- und Rücklauf. Dieser Laufzeit ist die Impulsdauer mit ca. 20 ns angepaßt. Dabei erlaubt der spezielle Aufbau des Lichtgeschwindigkeits-Meßgerätes die Verwendung eines relativ einfachen Oszilloskops: Die Lichtimpulse werden mit einer hohen Wiederholfrequenz von 40 kHz ausgesandt. Das gewährleistet auch bei Ausnutzung der maximalen Ablenkgeschwindigkeit des Oszilloskops

Fig. 1: Prinzipskizze zur Lichtgeschwindigkeitsmessung mit kurzen Lichtimpulsen



Geräte	
1 Lichtgeschwindigkeits-Meßgerät	476 50
1 Steckernetzgerät 230 V/12 V~	562 791
1 Linse in Fassung, $f = 200$ mm	460 10
1 Optische Bank mit Normalprofil z. B.	460 32
2 Optikreiter, H: 90 mm, B: 50 mm	460 352
1 Zweikanal-Oszilloskop 303	575 211
3 HF-Kabel, 1 m	501 02
1 Holzmaßstab, 1 m	311 03
1 Großer Stativfuß, V-förmig	300 01
1 Stativstange, 100 cm	300 44
1 Leybold-Muffe	301 01

noch eine ausreichende Helligkeit des Signals auf dem Oszilloskopschirm.

Kurz vor der Auslösung eines Lichtimpulses im Lichtgeschwindigkeits-Meßgerät wird ein Triggersignal zur externen Triggereingabe des Oszilloskops abgegeben. Der Spannungsimpuls erscheint daher auch dann noch vollständig auf dem Oszilloskopschirm, wenn die Laufzeit des Lichtimpulses vernachlässigbar kurz ist, d.h. wenn der Tripelspiegel in minimalem Abstand vor F_1 oder über F_2 steht. Der Einsatz eines Oszilloskops mit eingebauter Verzögerungsleitung ist deshalb nicht erforderlich.

Vergrößert man den Abstand des großen Tripelspiegels vom Austrittsfenster, so verschiebt sich der Impuls auf dem Oszilloskopschirm infolge der längeren Laufzeit nach rechts. Die Änderung der Laufzeit kann aus der Verschiebung bestimmt werden. Die Lichtgeschwindigkeit berechnet man als Quotient aus der Änderung der Laufstrecke und der Änderung der Laufzeit. Bei Verwendung des Referenzimpulses durch den kleinen Tripelspiegel kann die gesamte Laufzeit mit dem Oszilloskop absolut bestimmt werden. Die Lichtgeschwindigkeit berechnet man in diesem Fall als Quotient aus der Laufstrecke und der Laufzeit.

Zur Kalibrierung der Zeitmessung kann gleichzeitig mit dem Meßimpuls ein quarzgesteuertes Oszillatorsignal auf dem Oszilloskop dargestellt werden. Da sich das Oszillatorsignal um mehr als eine Periodendauer gegenüber dem Meßimpuls verschieben läßt, können seine Flanken optimal als Meßraaster benutzt werden. Die Zeitmessung ist dann unabhängig von der Zeitbasis des Oszilloskops.

Aufbau

Der Versuchsaufbau ist in Fig. 2 dargestellt.

Mechanischer und optischer Aufbau:

- Optische Bank auf einen Tisch passender Höhe stellen und Lichtgeschwindigkeits-Meßgerät auf der Optischen Bank so montieren, daß das Fenster F_1 der Linse zugewandt ist (siehe Fig. 2).

- Linse in etwa 20 cm Abstand vom Lichtgeschwindigkeits-Meßgerät mit dem Mittelpunkt in Höhe des Fensters F_1 montieren.
- Großen Tripelspiegel auf Stativmaterial befestigen (siehe Fig. 2) und einige Meter vom Lichtgeschwindigkeits-Meßgerät entfernt aufstellen. Den Mittelpunkt in Höhe der optischen Achse und die Spiegelfläche annähernd senkrecht zur optischen Achse ausrichten.
- Lichtgeschwindigkeits-Meßgerät durch Einstecken des Steckernetzteils einschalten.

Falls beim Blick dicht an Lichtgeschwindigkeits-Meßgerät und Linse vorbei der Tripelspiegel nicht oder nur am Rande rot leuchtet:

- Durch Verkippen und seitliches Schwenken der Optischen Bank und ggf. durch Veränderung der Linsenhöhe die Strahlrichtung leicht verändern, bis der Tripelspiegel zentrisch getroffen wird.

Anschluß des Oszilloskops:

- Den Ausgang „Pulses“ mit Kanal I des Oszilloskops und den Ausgang „Trigger“ mit dem externen Triggereingang des Oszilloskops durch HF-Kabel verbinden.

Tab. 1: Oszilloskop-Einstellungen, exemplarisch angegeben für das Zweikanal-Oszilloskop 303 (Kat.-Nr. 575 211)

Betriebsart:	nur Kanal I
Kanal I:	DC, 5–100 mV/cm
Null-Linie:	auf unterem Schirrand
Triggereingabe:	extern, AC, + (ansteigende Flanke)
Triggerlevel:	automatisch
Zeitablenkung:	0,2 μ s/cm, cal.
X-Dehnung:	1 \times
Intensität:	maximal

- Mit den Oszilloskop-Einstellungen aus Tab. 1 einen Spannungsimpuls suchen.
- Großen Tripelspiegel in der maximalen für das Experiment geplanten Entfernung aufstellen und die Impulsamplitude durch kleine Variationen der optischen Justierung, insbesondere durch Verschieben der Linse auf der Optischen Bank, optimieren.
- Dehnung der X-Achse des Oszilloskops auf 10 \times schalten.

Durchführung

a) Laufzeitmessung in Abhängigkeit von der Position des Tripelspiegels:

- Großen Tripelspiegel in geringem Abstand zur Optischen Bank aufstellen und seine Position markieren.
- Maximum des Spannungsimpulses durch Verstellen der X-Position auf eine vertikale Rasterlinie im linken Bereich des Oszilloskopschirms schieben (siehe Fig. 3 oben).
- Großen Tripelspiegel im Strahlengang verschieben, Verschiebungsweg s messen und notieren.
- Zeitliche Verschiebung t des Spannungsimpulses auf dem Oszilloskopschirm ablesen (siehe Fig. 3 unten) und notieren.
- Messungen für weitere Verschiebungen s wiederholen (siehe Tab. 2).

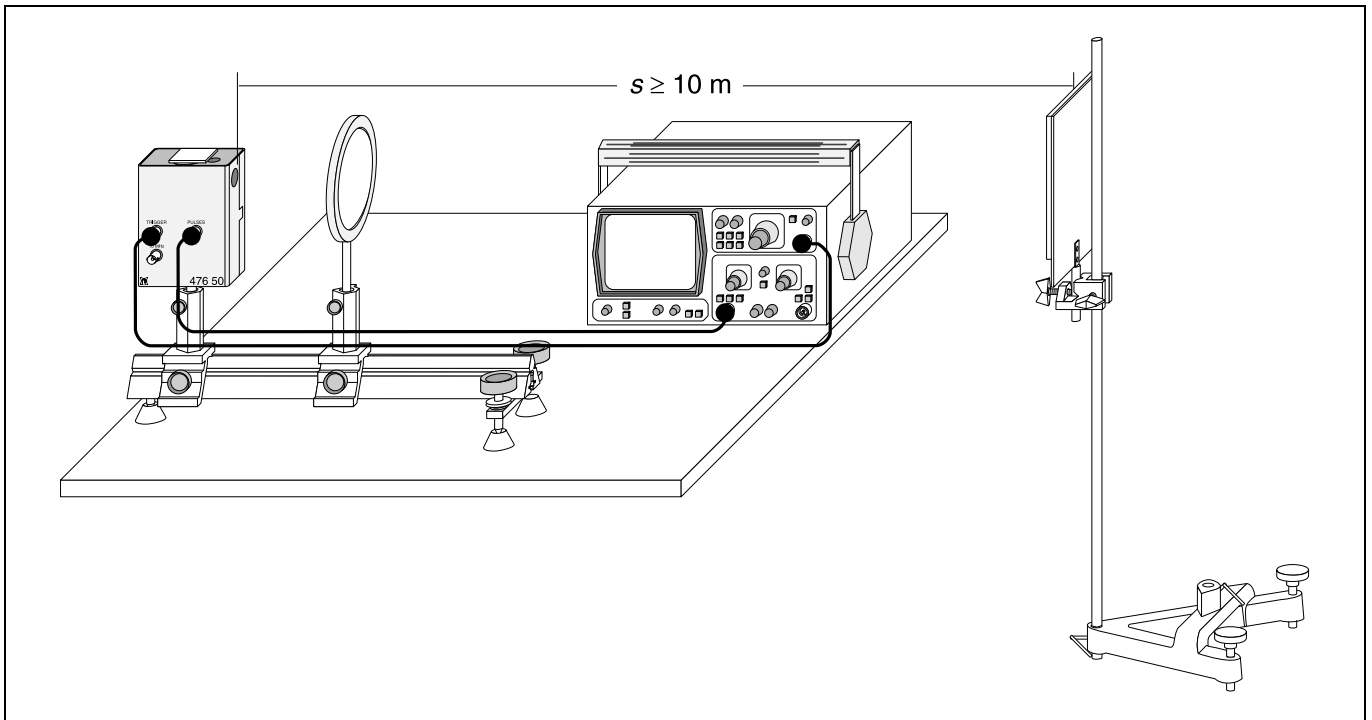


Fig. 2: Versuchsaufbau zur Lichtgeschwindigkeitsmessung

b) Laufzeitmessung mit einem Referenzspiegel:

- Aufbau an die linke Tischkante schieben, mit einem Auge an der senkrechten Kante des Lichtgeschwindigkeits-Meßgerätes entlang peilen und die Position auf dem Boden markieren (siehe Fig. 4).
- Kleinen Tripelspiegel direkt vor F_1 halten und Maximum des Spannungsimpulses durch Verstellen der X-Position auf eine vertikale Rasterlinie im linken Bereich des Oszilloskopschirms schieben.
- Anschließend den kleinen Tripelspiegel auf F_2 legen und sich vergewissern, daß die Lage des Referenzimpulses unverändert geblieben ist (gleicher Lichtweg).
- Großen Tripelspiegel in mindestens 10 m Entfernung in den Strahlengang bringen, so daß in deutlichem Abstand zum Referenzimpuls der Meßimpuls als zweites Signal auf dem Oszilloskopschirm zu sehen ist.
- Durch Verschieben des kleinen Tripelspiegels auf der Fensteröffnung beide Signale auf exakt gleiche Größe einstellen. Die ansteigende Flanke des Referenzimpulses so verschieben, daß sie die Mittellinie im Kreuzungspunkt mit einer senkrechten Rasterlinie schneidet (siehe Fig. 5).
- Laufzeit t am Schnittpunkt des zweiten Impulses mit der Mittellinie ablesen (siehe Fig. 5) und notieren.

Hinweis: Der Zeitabstand zwischen Referenzimpuls und Meßimpuls stimmt nur dann mit dem Abstand der beiden ansteigenden Flanken auf dem Oszilloskopschirm überein, wenn beide Impulse die gleiche Amplitude haben und der Abstand deutlich größer als die Impulsbreite ist.

- Position des großen Tripelspiegels auf dem Boden markieren, den Abstand s zum Fenster F_1 bestimmen und notieren (siehe Fig. 4).

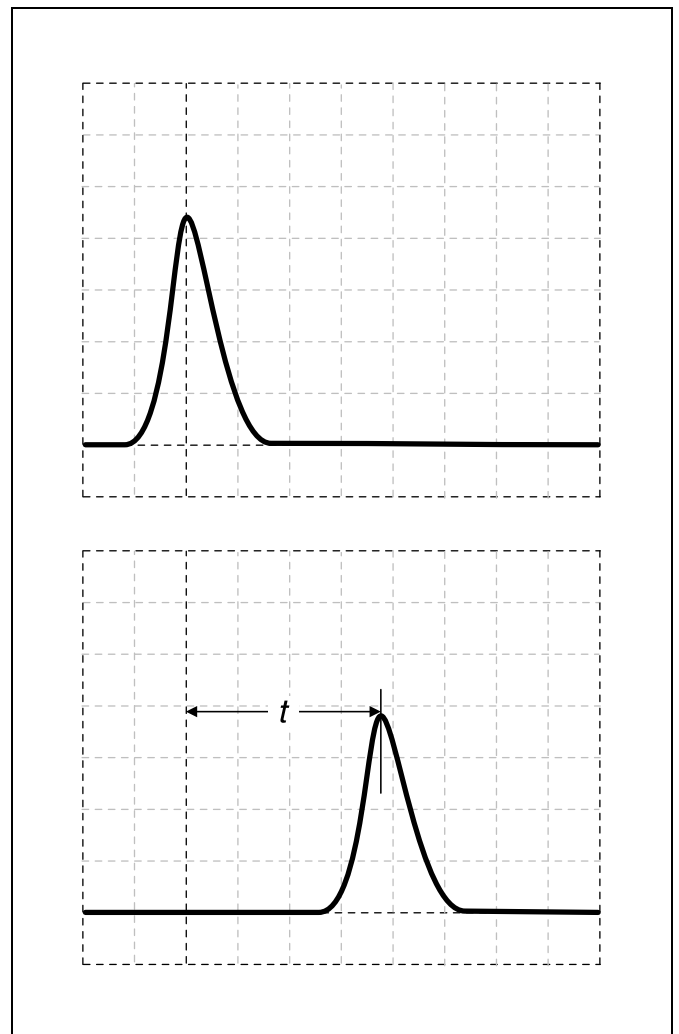


Fig. 3: Relativmessung der Laufzeit t des Lichtimpulses

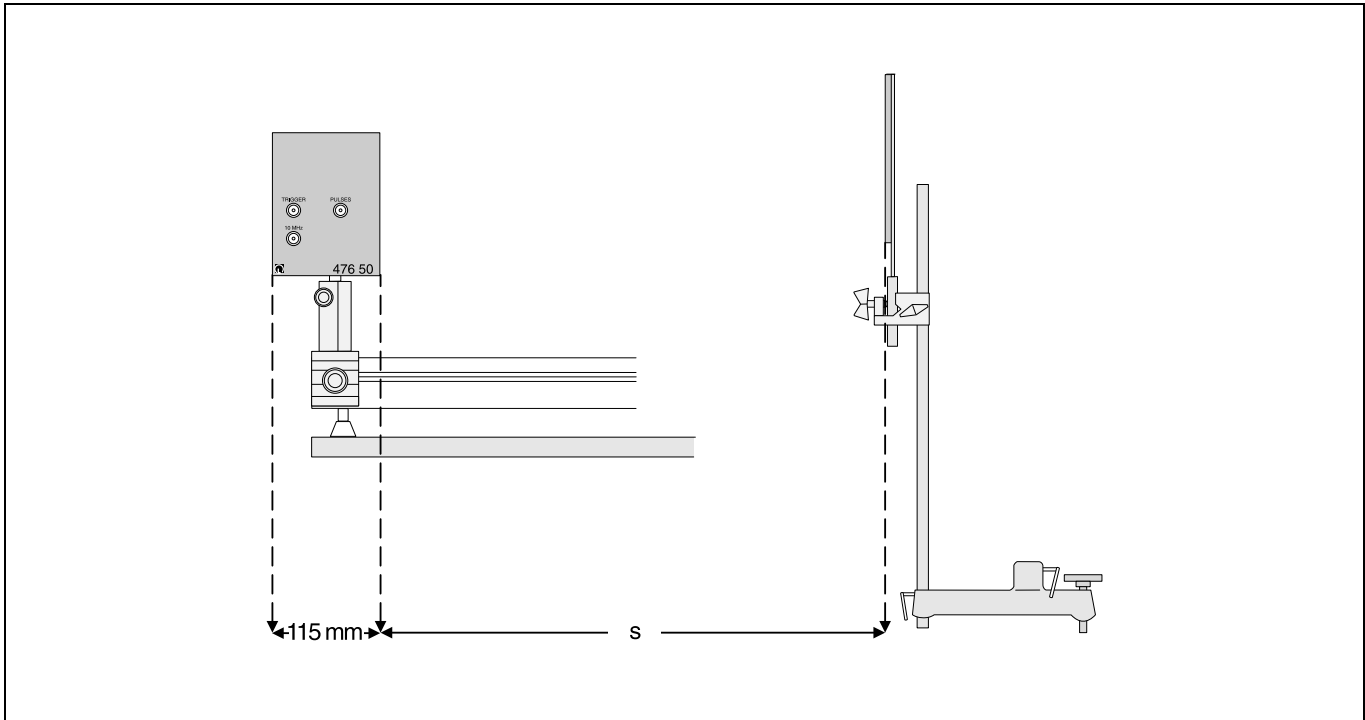


Fig. 4: Skizze zur Bestimmung der Position des Lichtgeschwindigkeits-Meßgerätes und des großen Tripelspiegels

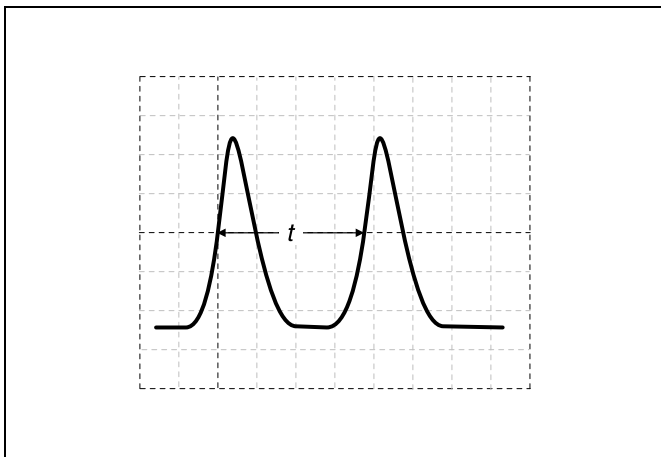


Fig. 5: Absolutmessung der Laufzeit t des Lichtimpulses

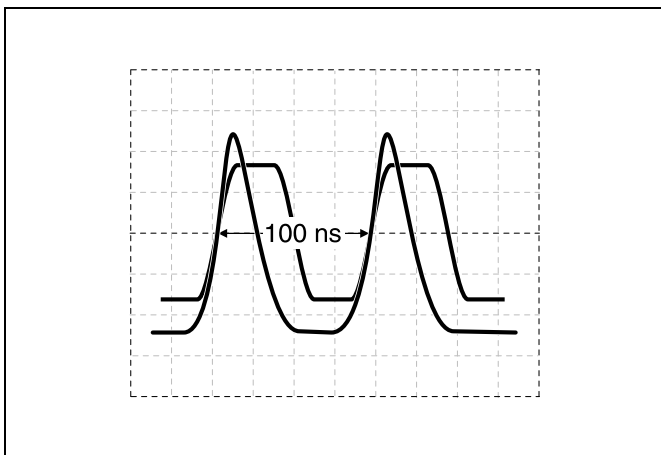


Fig. 6: Absolutmessung der Laufzeit t des Lichtimpulses mit extern kalibrierter Zeitbasis

c) Laufzeitmessung mit extern kalibrierter Zeitbasis:

- Kleinen Tripelspiegel auf F_2 legen und großen Tripelspiegel in etwa 15 m Entfernung in den Strahlengang bringen, so daß zwei Impulse auf dem Oszilloskopschirm zu sehen sind.
- Ggf. mit variabler Zeitablenkung möglichst großen Abstand der beiden Impulse auf dem Oszilloskopschirm einstellen.
- Durch Verschieben des kleinen Tripelspiegels auf der Fensteröffnung F_2 beide Impulse auf exakt gleiche Größe einstellen.
- 10-MHz-Ausgang des Lichtgeschwindigkeits-Meßgerätes mit Kanal II des Oszilloskops durch ein drittes HF-Kabel verbinden.
- Zweikanalbetrieb wählen (Taste Dual) und Kanal II des Oszilloskops hinzuschalten (AC, 0,1 V/cm), so daß Meßimpulse und Oszillatorsignal gleichzeitig zu sehen sind.
- 10-MHz-Signal mit dem Phasensteller des Lichtgeschwindigkeits-Meßgerätes so verschieben, daß die Anstiegsflanke des ersten Spannungsimpulses exakt über einer Anstiegsflanke des 10-MHz-Signals liegt (siehe Fig. 6).
- Den Abstand des großen Tripelspiegels so einjustieren, daß die Anstiegsflanke des zweiten Spannungsimpulses exakt über der nächsten Anstiegsflanke des 10-MHz-Signals liegt (siehe Fig. 6).
- Ggf. durch optische Justierung bzw. Dejustierung der Tripelspiegel die Spannungsimpulse beider Tripelspiegel auf exakt gleiche Größe bringen und anschließend Lage der Anstiegsflanken nachjustieren.
- Position des Lichtgeschwindigkeits-Meßgerätes und des großen Tripelspiegels auf dem Boden markieren (dazu mit einem Auge an den senkrechten Gerätekanten entlang peilen), den Abstand s des großen Tripelspiegels vom Fenster F_1 messen und notieren (siehe Fig. 4).

Meßbeispiel

a) Laufzeitmessung in Abhängigkeit von der Position des Tripelspiegels:

Tab. 2: Verschiebungsweg s des großen Tripelspiegels und der Laufzeit t des Lichtimpulses

$\frac{s}{m}$	$\frac{t}{ns}$
0,0	0
3,0	20
6,0	41
9,0	60
12,0	81
15,0	101
18,0	122

b) Laufzeitmessung mit einem Referenzspiegel:

$s = 15,00 \text{ m}$, $t = 99 \text{ ns}$

c) Laufzeitmessung mit extern kalibrierter Zeitbasis:

$s = 15,05 \text{ m}$

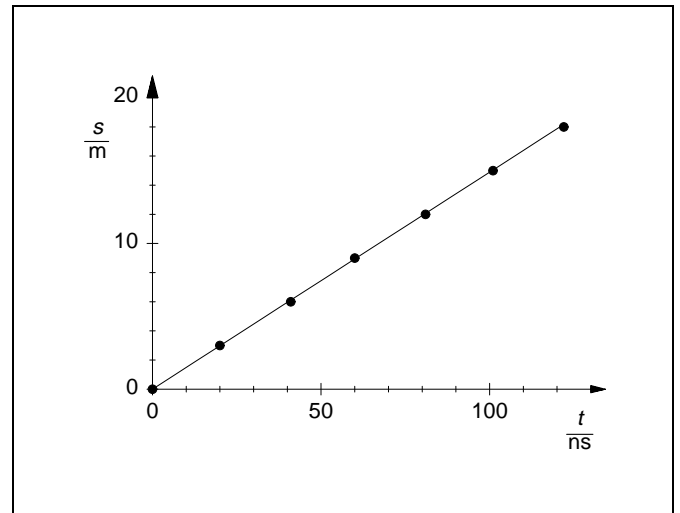


Fig. 7: Verschiebungsweg s des großen Tripelspiegels als Funktion der Laufzeit t des Lichtimpulses

c) Laufzeitmessung mit extern kalibrierter Zeitbasis:

Der Abstand s ist gerade so gewählt worden, daß die gesamte Laufzeit t des Lichtimpulses 100 ns beträgt.

$$c = 2 \cdot \frac{s}{100 \text{ ns}} = 3,01 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

d) Vergleich der Meßmethoden:

Zusätzlich zu dem in allen Messungen auftauchenden Ablesfehler bei der Zeitmessung ist bei den Messungen aus a) und b) die Genauigkeit der kalibrierten Stellungen für die Zeitablenkung des Oszilloskops zu berücksichtigen. Sie beträgt beim angegebenen Oszilloskop 3 %.

e) Literaturwerte:

Lichtgeschwindigkeit im Vakuum:

$$c_0 = 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Lichtgeschwindigkeit in Luft (Phasengeschwindigkeit):

$$c = \frac{c_0}{n} = 2,997 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

(Brechzahl $n = 1,003$ bei Normalbedingungen)

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der kurzen Lichtimpulse in Luft entspricht genau genommen der Gruppengeschwindigkeit eines Wellenpaketes. Auf die Unterscheidung zwischen Phasengeschwindigkeit und Gruppengeschwindigkeit kann aber angesichts der erreichbaren Meßgenauigkeit verzichtet werden.

Auswertung

a) Laufzeitmessung in Abhängigkeit von der Position des Tripelspiegels:

In Fig. 6 sind die Meßwerte s graphisch gegen t aufgetragen. Aus der Steigung a der Geraden durch die Meßpunkte erhält man für die Lichtgeschwindigkeit in Luft:

$$c = 2 \cdot a = 2,98 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

b) Laufzeitmessung mit einem Referenzspiegel:

Aus dem Quotienten von Abstand s und Laufzeit t erhält man für die Lichtgeschwindigkeit in Luft:

$$c = 2 \cdot \frac{s}{t} = 3,03 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

