

Messung der Lichtgeschwindigkeit mit Lichtimpulsen

B. Ehret

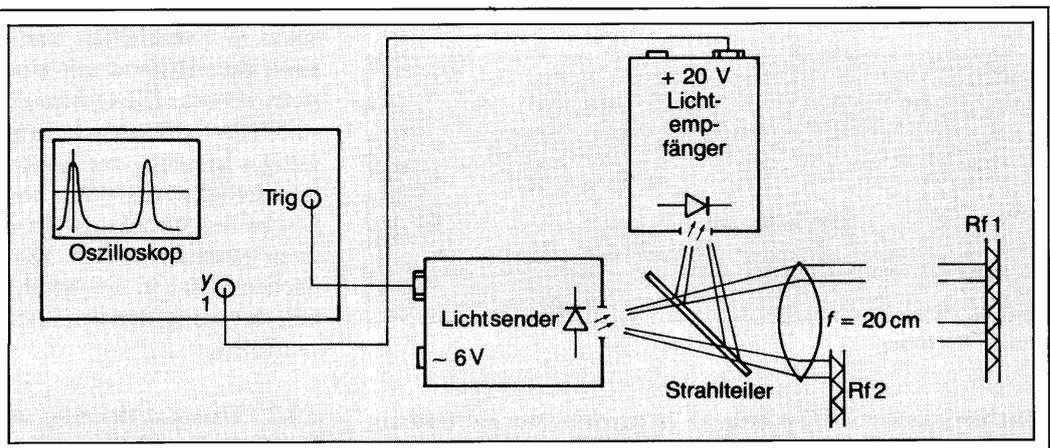
1 Einführung

Die Messung der Lichtgeschwindigkeit in Luft und in durchsichtigen Medien mit Hilfe von elektronisch erzeugten, sehr kurzen Lichtimpulsen, deren Laufzeit mit Hilfe eines Oszilloskopes bestimmt wird, war Gegenstand vieler Abhandlungen in der Praxis der Naturwissenschaften Physik [1–13].

hinter der Linse parallel. Sie treffen in einigen Metern Entfernung auf einen Reflektor (Katzenaugen) und werden von diesem in sich selbst zurückreflektiert.

Ein Strahlteiler sorgt dafür, daß die Lichtstrahlen auf dem Rückweg in die Fotodiode des Lichtempfängers gelangen, wobei die Fotodiode ebenfalls im Brennpunkt der Linse sitzt und somit von möglichst viel Licht getroffen wird.

Abb. 1: Versuchsaufbau



Unter Verwendung der in [5] angegebenen Schaltungsvorschläge wurde ein Gerät zusammengebaut, mit dessen Hilfe die Lichtgeschwindigkeitsmessung im Physikunterricht und im physikalischen Schülerpraktikum mit geringem Aufwand und großem Erfolg durchgeführt werden kann.

Meine Erfahrungen mit dem Gerät und weitere Versuchsmöglichkeiten wie z. B. die Lichtgeschwindigkeitsmessung in Lichtleitern oder die Abschätzung der Lichtgeschwindigkeit in einer Flüssigkeitssäule möchte ich beschreiben.

Mit Hilfe einer ausführlichen Bauanleitung kann das Gerät problemlos selbst hergestellt werden, falls Erfahrungen im Elektronikbau vorhanden sind.

2 Versuchsprinzip und Versuchsmöglichkeiten

Das Versuchsprinzip ist in [5] ausführlich beschrieben. Zum besseren Verständnis soll das Meßverfahren nochmals zusammenfassend dargestellt werden. Anschließend werden weitere Versuchsmöglichkeiten beschrieben.

2.1 Lichtgeschwindigkeitsmessung in Luft (ohne Zeiteichnung) (Abb. 1)

2.1.1 *Der Lichtimpulssender* erzeugt durch periodische Entladung eines Kondensators über eine rotleuchtende Leuchtdiode Lichtimpulse von ca. 40 ns Dauer mit einer Wiederholfrequenz von ca. 10 kHz.

Die Leuchtdiode sitzt im Brennpunkt einer Linse mit einer Brennweite von ca. 20 cm. Somit verlaufen die Lichtstrahlen

In der Fotodiode werden die Lichtimpulse in elektrische Impulse umgewandelt und können dann auf dem Schirm des Oszilloskopes dargestellt werden.

Zur Messung der Lichtgeschwindigkeit wird der Reflektor zunächst direkt hinter die Linse gebracht und die Lage des Impulses auf dem Schirm des Oszilloskopes bestimmt. Dann entfernt man den Reflektor um einige Meter. Da der Lichtimpuls jetzt einen größeren Weg zurücklegen muß, braucht er länger und ist somit auf der Zeitachse des Oszilloskopes nach rechts verschoben.

Aus der Zeitdifferenz (die sich aus der Verschiebung des Impulses auf dem Schirm ergibt) und der Wegdifferenz (die sich aus der Verschiebung des Reflektors ergibt) kann jetzt direkt die Lichtgeschwindigkeit in Luft bestimmt werden.

Ist der Laufweg des Lichtes genügend groß, so können unverschobener und laufzeitverschobener Impuls mit Hilfe von zwei Reflektoren gleichzeitig auf dem Schirm (getrennt) dargestellt werden.

2.1.2 Versuchsaufbau: (Abb. 1)

2.1.3 Justierung und Geräteeinstellung (Abb. 2)

1. Das Grundbrett mit Sender und Empfänger wird mit Hilfe von Stativstab und Tischklemme an einer Tischkante befestigt.

2. Die Linse ca. $f = 20 \text{ cm } \varnothing = 12 \text{ cm}$ wird ebenfalls mit Hilfe einer Tischklemme an der Tischkante befestigt, wobei die optische Achse durch die LED laufen und die LED im Linsenbrennpunkt sitzen muß.

3. Anschluß von Sender und Empfänger über BNC-Kabel an Trigger- bzw. y -Eingang eines Oszilloskopes (z. B. Hameg 204, 605 o. ä.). Zeitablenkung $0,05 \mu\text{s}/\text{cm}$ oder $0,1 \mu\text{s}/\text{cm}$; Trigger extern; y -Verstärkung $50 \text{ mV}/\text{cm}$.

Anschluß der Versorgungsspannungen von $6 \text{ V} \sim$ bzw. *max.* $20 \text{ V} =$; der Minuspol der Gleichspannungsquelle wird an die Erdungsbuchse des Oszilloskopes angeschlossen.

4. Reflektor Rf1 (bestehend aus sechs Einzelreflektoren $115 \times 75 \text{ mm}$) in ca. $0,5 \text{ m}$ bis 1 m Entfernung in Höhe der optischen Achse mit Stativmaterial an der Tischkante befestigen. Bei geeigneter Triggerpegeleinstellung muß auf dem Oszilloskopschirm der Lichtimpuls zu sehen sein. Strahlteiler vorsichtig drehen, bis der empfangene Impuls maximale Amplitude besitzt, dann Strahlteiler durch Mutter M4 kornern. Ist der Empfänger übersteuert, so kann z. B. durch Abdecken des Reflektors Rf1 erreicht werden, daß weniger Licht in den Empfänger gelangt.

5. Raum abdunkeln. Mit einem weißen Schirm wird der Strahlengang des roten LED-Lichtes verfolgt (evtl. durch Erhöhung der Wechselspannung am Sender bis *max.* 8 V

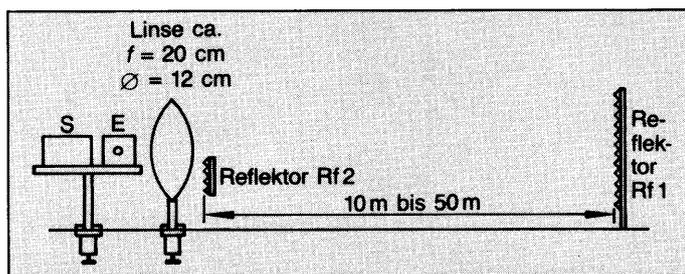


Abb. 2: Justierung

Leuchtstärke der LED erhöhen). In gewünschter Entfernung von 10 m bis 50 m wird der weiße Schirm auf Stativ bzw. an Tisch befestigt, so daß er vom Licht getroffen wird. Mit der Linse $f = 20 \text{ cm}$ den roten Leuchtfleck der LED möglichst scharf abbilden (kleinstmögliche Ausdehnung des Leuchtflecks und größte Flächenhelligkeit), indem die Linse vorsichtig entlang der Tischkante verschoben wird. Das rote LED-Licht verläuft dann nach der Linse bis zum Schirm nahezu parallel.

6. Reflektor Rf1 anstelle des weißen Schirmes fest montieren.

7. Linsenstellung und Stellung des Strahlteilers optimieren, so daß der empfangene Impuls auf dem Oszilloskopschirm maximale Amplitude besitzt (y -Kanalverstärkung nachregeln).

8. Evtl. kann der Lichtweg verdoppelt werden, indem das parallele Lichtbündel anstelle von Reflektor Rf1 mit Hilfe eines genügend großen ebenen Spiegels in die Nähe des Senders zurückreflektiert wird und erst hier auf den Reflektor Rf1 trifft.

9. Reflektor Rf2 (bestehend aus einem Einzelreflektor $95 \times 45 \text{ mm}$) direkt hinter der Linse in den Strahlengang einschwenken, bis beide Impulse auf dem Oszilloskopschirm gleiche Höhe haben.

2.2 Lichtgeschwindigkeitsmessung in Luft mit Zeitmarke

2.2.1 Mit Hilfe eines Eichgenerators, der eine quarzstabilisierte Rechteckspannung von 10 MHz liefert, kann die Genauigkeit der Lichtgeschwindigkeitsmessung nach der Impulsmethode erheblich gesteigert werden [5].

Dazu wird auf dem Bildschirm eines Zweikanaloszilloskopes gleichzeitig mit den Lichtimpulsen das Rechtecksignal des Eichgenerators dargestellt und als Zeitmarke benutzt.

Der Abstand zwischen den beiden Reflektoren Rf1 und Rf2 wird so eingestellt, daß die Impulslaufzeitdifferenz genau 100 ns oder ein natürliches Vielfaches davon beträgt. Der Reflektorabstand beträgt dann $14,97 \text{ m}$ (bzw. ein Vielfaches davon).

Lichtimpulse und Rechtecksignal werden auf dem Bildschirm übereinandergelegt, so daß die ansteigende Flanke des Lichtimpulses mit der abfallenden Flanke des Rechtecksignals zum Schnitt kommen. Dabei müssen die beiden Lichtimpulse auf dem Schirm gleiche Höhe haben, was durch entsprechendes Einschwenken von Rf2 in den Strahlengang erreicht wird (Abb. 3).

Beträgt der Impulsabstand genau eine Periodendauer, so liegen die Schnittpunkte zwischen Rechtecksignal und Lichtimpulsen genau auf gleicher Höhe. Liegen die Schnittpunkte nicht auf gleicher Höhe, so ist der Lichtimpulsabstand größer oder kleiner als die Periodendauer und der Reflektorabstand wird verkleinert bzw. vergrößert. Nach dieser Methode kann der Abstand mit einem Fehler kleiner als 1% eingestellt werden. Die Genauigkeit der Periodendauer des quarzstabilisierten Rechtecksignals ist sehr hoch, so daß bei sorgfältiger Messung des Abstandes der Reflektoren die Lichtgeschwindigkeitsmessung besser als 1% wird [5].

Die beiden Reflektoren können gleichzeitig in den Strahlengang gebracht werden. Besser ist es jedoch, die Reflektoren nacheinander in den Strahlengang einzuschwenken, da eine Überlagerung der Impulsflanken zu falschen Meßergebnissen führt.

2.2.2 Versuchsanordnung und Schaltung (Abb. 4)

Die Signal- und Triggerverbindungen mit dem Oszilloskop müssen durch BNC-Verbindungskabel (BNC-BNC; 50Ω) erfolgen. Die Verbindung der beiden Trigger-Ausgänge von Lichtsender und Phasenschieber muß ebenfalls durch ein BNC-Verbindungskabel erfolgen.

Die Spannungsversorgung von Lichtempfänger und Rechteckgenerator kann durch eine Spannungsquelle *max.* $20 \text{ V} =$ erfolgen. Der Minuspol dieser Spannungsquelle wird mit der Massebuchse des Oszilloskopes verbunden.

Das Oszilloskop wird im Zweikanalbetrieb Dual (alternate mode) betrieben. Bei dieser Betriebsart erfolgt die Aufzeichnung der beiden Signale am $y1$ bzw. $y2$ Kanal nacheinander (kein Chopper-Betrieb; die Chop-Taste darf nicht eingedrückt sein!).

2.2.3 Einstellung des Zweikanal-Trigger-Oszilloskopes:

$y1$ -Kanal: Verstärkung $\cong 50 \text{ mV}/\text{cm}$ Kopplung AC oder DC

$y2$ -Kanal: Verstärkung $\cong 0,2 \text{ V}/\text{cm}$ Kopplung AC oder DC

Dual-Betrieb

Zeitablenkung $\cong 0,1 \mu\text{s}/\text{cm}$ (evtl. auch Zeitdehnung $\times 5$ bzw. $\times 10$)

Trigger extern, Trigger-Level feinfühlig einregulieren, Trigger-Flanke neg., Trigger-Ankopplung AC oder DC

Bildfang: Sowohl der Rechteckgenerator als auch der Lichtsender erzeugen einen Triggerimpuls, mit dem der Elektronenstrahl des Oszilloskopes für den jeweiligen Kanal (nacheinander) ausgelöst wird. Damit die Signale der beiden Kanäle (Lichtimpuls bzw. Rechtecksignal) stehend und störungsfrei auf dem Bildschirm dargestellt werden, muß mit etwas Fingerspitzengefühl vorgegangen werden.

1. **Monobetrieb** (Dual-Taste gelöst): Man überprüft, ob für jeden Kanal einzeln, Lichtimpuls bzw. Rechtecksignal (Channel 1/2-Taste drücken) getriggert werden und sich somit jeweils stehende Signalbilder ergeben (Trigger-Pegel-Regler dazu feinfühlig einregulieren). Dabei müssen natürlich alle Versorgungsspannungen anliegen!

Hinweis: Es kann vorkommen, daß der Rechteckgenerator 10 MHz nach dem Einschalten der Versorgungsspannung *max.* 20 V = keinen Triggerimpuls liefert und sich somit (bei Triggerstellung extern) kein stehendes Bild des Rechtecksignals erzeugen läßt. (Dieser Fall tritt besonders dann auf, wenn die Versorgungsspannung mit Hilfe eines Netzgerätes durch Betätigen des Netzschalters eingeschaltet wird).

Abhilfe: Bei eingeschalteter Versorgungsspannung z. B. Verbindungskabel vom Minuspol der Spannungsquelle zur Erdungsbuchse des Oszilloskopes abziehen und wieder in die Buchse einstecken. (Evtl. mehrmals wiederholen).

mer P2 2 k Ω (Abb. 48) kann jetzt die Phasenlage des Rechtecksignals bezüglich des Lichtimpulssignales um ca. eine Periode verschoben werden. Die ansteigende Flanke des ersten Lichtimpulses und die abfallende Flanke des Rechtecksignals können somit auf der Mittellinie des Bildschirms zum Schnitt gebracht werden. Der Abstand des Reflektors Rf1 wird jetzt entsprechend eingestellt (Abb. 3).

2.3 Lichtgeschwindigkeitsmessung im Glasfaserkabel und Lichtwellenleiter

2.3.1 Mit dem Versuchsgerät ist es möglich auf einfache Weise die Lichtgeschwindigkeit in einem Glasfaserkabel (bestehend aus mehreren dünnen Einzelfasern) oder in einem Lichtwellenleiter (eine Ader, ca. 1 mm \varnothing) zu messen. Das Kabel (Länge ab ca. 10 m) wird mit dem Anfang an die Sender-LED und mit dem Ende an die Empfängerdiode gebracht. Dazu kann eine einfache Halterung angefertigt werden, die an die Stelle des Strahlteilers auf das Grundbrett geschraubt wird und in die Kabelanfang und -ende verstellbar eingeklemmt werden können.

Abb. 3: Schnitt der Impulsflanken

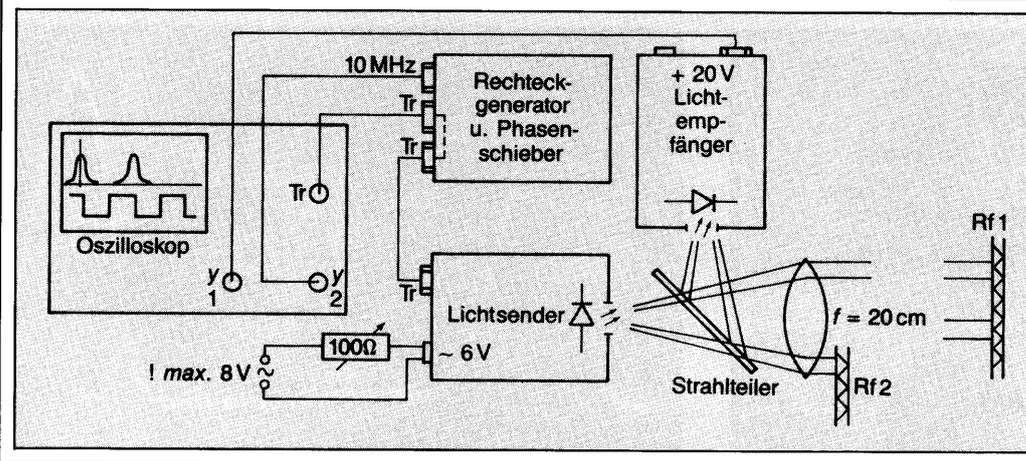
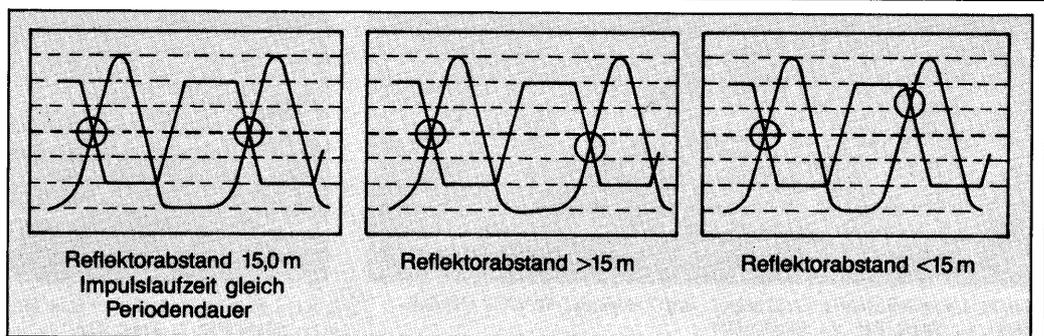


Abb. 4: Versuchsaufbau mit 10 MHz Generator

2. Dualbetrieb (Dual-Taste gedrückt):

Durch feinfühliges Regulieren des Trigger-Pegelreglers müssen beide Signale „eingefangen“ werden und sauber auf dem Bildschirm zu sehen sein. Kann das „Einfangen“ nicht alleine mit Hilfe des Trigger-Pegelreglers erreicht werden, so muß zusätzlich die Wechselspannung *max.* 8 V zur Stromversorgung des Lichtsenders etwas verändert werden. Dazu ist eine einstellbare Wechselspannungsquelle erforderlich. Es genügt jedoch auch ein regelbarer Vorwiderstand von ca. 100 Ω geringer Leistung.

Schnitt der Impulsflanken:

Lichtimpulssignal und Rechtecksignal werden nun mit den Positionsreglern der beiden y-Kanäle symmetrisch zur Mittellinie des Bildschirms eingestellt. Mit dem Spindeltrim-

Mit Hilfe eines weiteren Kabelstückes von einigen cm Länge können unverschobener und laufzeitverschobener Lichtimpuls wieder auf dem Schirm des Oszilloskopes dargestellt werden, was jedoch nur bei genügender Kabellänge sinnvoll ist, da sich sonst die Impulse überlagern (Abb. 5, S. 20).

Die beiden Impulse müssen auf dem Schirm wiederum gleiche Höhe haben, was durch geeignetes Positionieren von Kabelanfang und -ende vor der jeweiligen Diode erreicht wird.

2.3.2 Wird die Länge des Kabels so gewählt, daß ein Lichtimpuls genau eine oder zwei Perioden der Rechteckschwingung des 10 MHz Generators benötigt, so kann die Lichtgeschwindigkeitsmessung im Glasfaserkabel (GFK) bzw. Lichtwellenleiter (LWL) wiederum mit sehr großer Genauig-

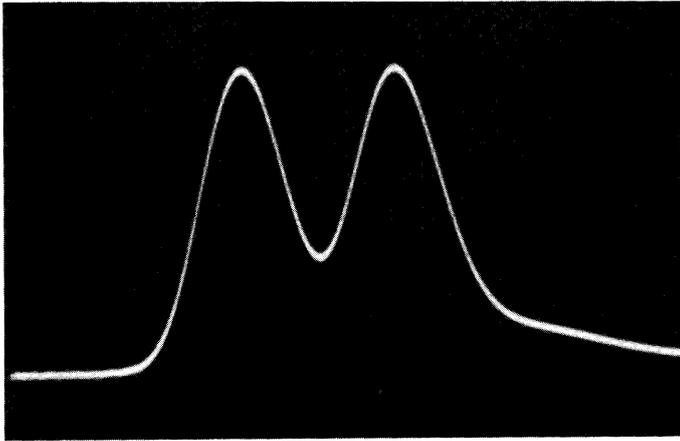


Abb. 5: Überlagerung der beiden Lichtimpulse im Lichtwellenleiter von 20 m Länge (x: 50 ns/Rastereinheit (RE); y: 20 mV/RE)

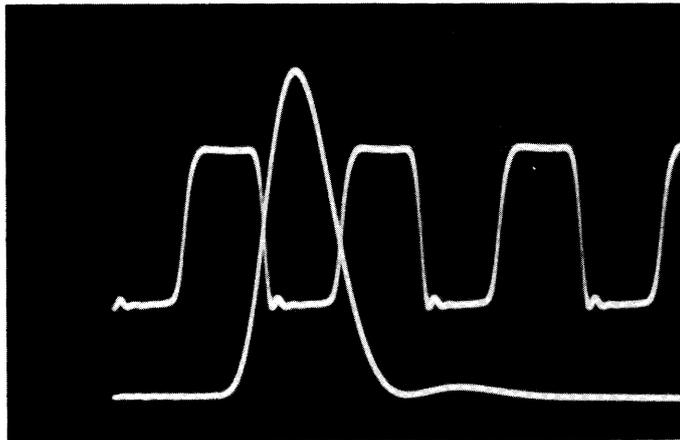


Abb. 6: Unverschobener Lichtimpuls mit Zeitmarke 10 MHz (Nullabgleich). (x: 50 ns/RE; y₁: 50 mV/RE)

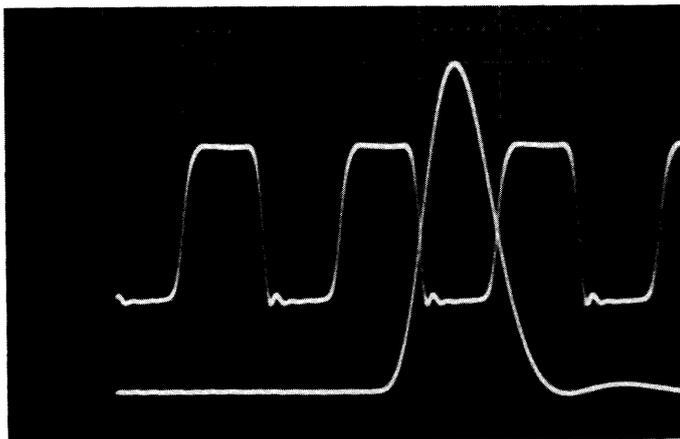


Abb. 7: Laufzeitverschobener Lichtimpuls im LWL (Länge 20 m). Laufzeit geringfügig größer als 100 ns. (x: 50 ns/RE; y: 50 mV/RE)

b) *Glasfaserkabel (GFK)* (Abb. 8 und 9)
 Länge 51,30 m; Impulslaufzeit ca. 285 ns
 $c_{\text{GFK}} = 180\,000 \text{ km/s}$; $n_{\text{GFK}} = 1,67$; $\epsilon_{\text{GFK}} = 2,77$

2.4 Lichtgeschwindigkeitsmessung mit Infrarotlicht, Lichtdispersion

2.4.1 Wird die rote LED durch eine Infrarot-LED ersetzt, so können alle bisherigen Experimente im Infrarotlichtbereich durchgeführt werden.

Infrarot-LED besitzen hohe Leuchtstärken. Geeignet sind z. B. die gängigen Typen CQW 13 bzw. SFH 400 mit einer Wellenlänge von 950 nm. Im Vergleich zur roten LED (HSPR 5505 bzw. H1000 mit $\lambda \approx 650 \text{ nm}$) ist jedoch die Impulsbreite größer, wobei der Lichtimpuls rasch ansteigt, jedoch nach Erreichen des Maximums nur langsam abflacht (Abb. 10).

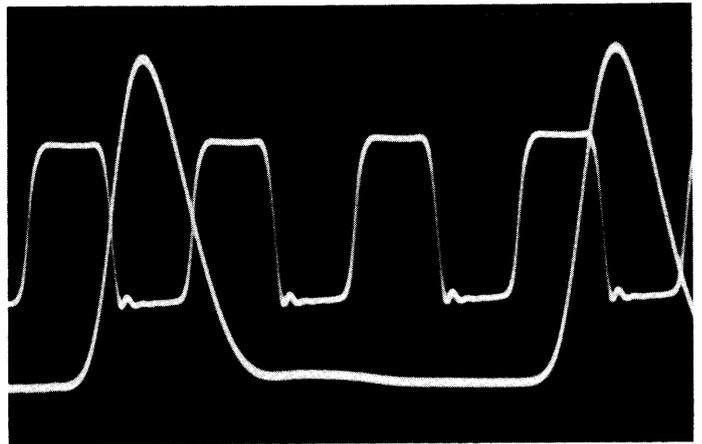


Abb. 8: Unverschobener und laufzeitverschobener Lichtimpuls im GFK (x: 50 ns/RE; y: 5 mV/RE)

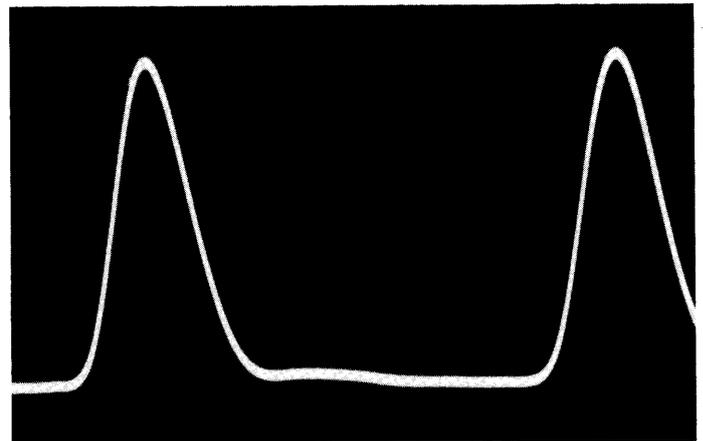


Abb. 9: Zeigt Abb. 8 mit Zeitmarke. Laufzeit $t = 3 \cdot T - 15 \text{ ns}$; $T = 100 \text{ ns}$

keit durchgeführt werden, wenn das 10 MHz Rechtecksignal als Zeitmarke benutzt wird (Abb. 6 und 7).

2.3.3 Meßergebnisse

a) *Lichtwellenleiter (LWL)* (Abb. 6 und 7)
 Länge 20 m; Impulslaufzeit ca. 100 ns

$$c_{\text{LWL}} = \frac{20 \text{ m}}{100 \text{ ns}} = 200\,000 \text{ km/s}$$

Für den Brechungsindex und die relative Dielektrizitätszahl ergibt sich nach bekannten Gleichungen:

$$n_{\text{LWL}} = 1,5; \epsilon_{\text{LWL}} = 2,24$$

2.4.2 Von besonderem Interesse sind Experimente mit IR-Licht im GFK ab einer Kabellänge von ca. 40 m. (Im LWL wird das IR-Licht stark absorbiert) (Abb. 10 und 11).

Vergleicht man Abb. 9 mit Abb. 11, so fällt auf, daß die Laufzeit des IR-Impulses um ca. 5 ns kleiner ist als die Laufzeit des roten Lichtimpulses. Infrarotes Licht pflanzt sich also im GFK schneller fort als rotes Licht (Lichtdispersion).

Bei einer Dehnung der Zeitachse um den Faktor 10 ist eine Laufzeitdifferenz von rotem ($\lambda = 650 \text{ nm}$) und infrarotem Licht ($\lambda = 950 \text{ nm}$) von genauer 4,5 ns auf dem Schirmbild des Oszilloskopes abzulesen (Abb. 12 und 13). Diese geringe Laufzeitdifferenz und damit die Lichtdispersion können

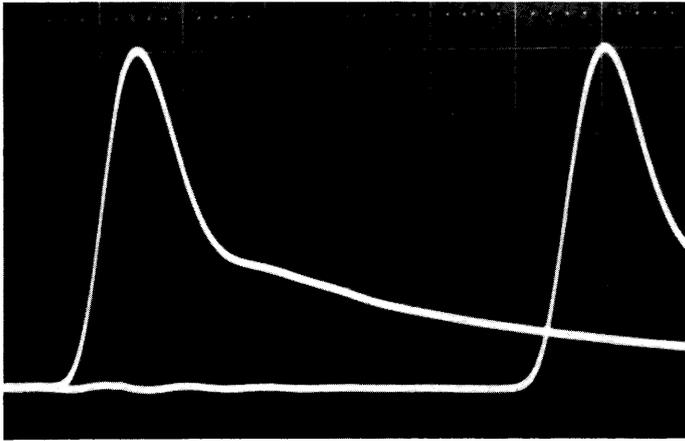


Abb. 10: Unverschobener und laufzeitverschobener Lichtimpuls $\lambda = 950 \text{ nm}$ im GFK; Aufnahme doppelbelichtet ($x: 50 \text{ ns/RE}$; $y: 5 \text{ mV/RE}$) Kabellänge 51,30 m

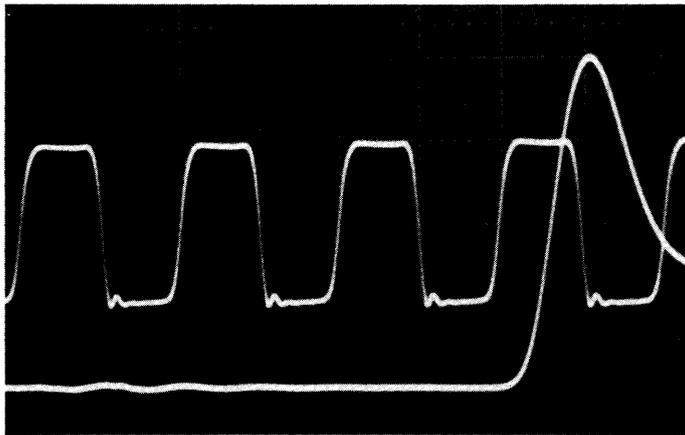


Abb. 11: Zeigt den laufzeitverschobenen Lichtimpuls von Abb. 10 mit Zeitmarke ($x: 50 \text{ ns/RE}$; $y: 5 \text{ mV/RE}$)

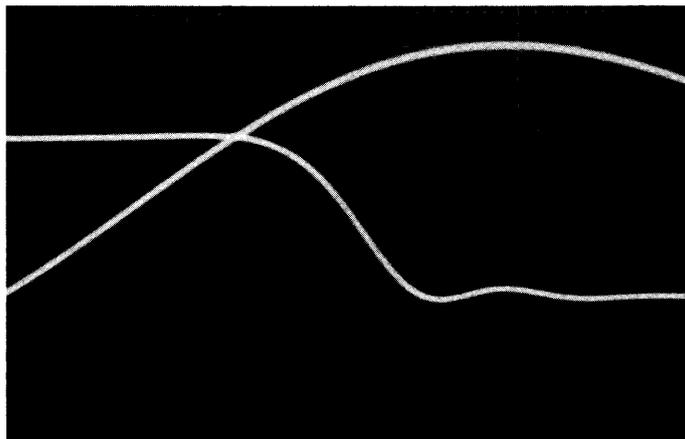


Abb. 12: Zeigt den laufzeitverschobenen Impuls ($\lambda = 650 \text{ nm}$) von Abb. 9 mit Dehnung der Zeitachse X10 (GFK 51,30 m) ($x: 5 \text{ ns/RE}$; $y: 5 \text{ mV/RE}$)

natürlich nur bei sorgfältiger Messung mit einem guten Oszilloskop überzeugend demonstriert werden.

2.4.3 Meßergebnisse:

GFK Länge 51,30 m

a) $\lambda = 950 \text{ nm}$ (Abb. 10, 11 und 13).

Impulslaufzeit $t = 3 \cdot 100 \text{ ns} - 18 \text{ ns} = 282 \text{ ns}$

$$c_{\text{GFK}} = \frac{51,30 \text{ m}}{282 \text{ ns}} = 182\,000 \text{ km/s}$$

b) $\lambda = 650 \text{ nm}$ (Abb. 9 und 12)

Impulslaufzeit $t = 3 \cdot 100 \text{ ns} - 14 \text{ ns} = 286 \text{ ns}$

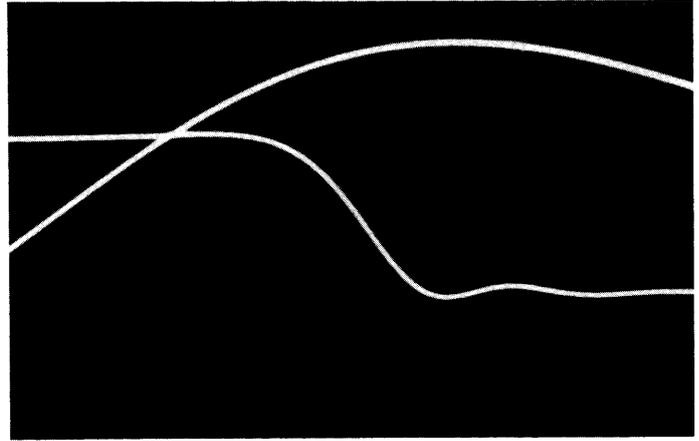


Abb. 13: Zeigt den laufzeitverschobenen Impuls ($\lambda = 950 \text{ nm}$) von Abb. 11 mit Dehnung der Zeitachse X10 (GFK 51,30 m) ($x: 5 \text{ ns/RE}$; $y: 5 \text{ mV/RE}$)

$$c_{\text{GFK}} = \frac{51,30 \text{ m}}{286 \text{ ns}} = 179\,000 \text{ km/s}$$

2.4.4 Versuche zur Lichtdispersion können auch mit verschiedenfarbigen, leuchtstarken LED im sichtbaren Spektralbereich in einem LWL durchgeführt werden. Dabei ist zu beachten, daß besonders kurzwellige LED (grün, blau) meist relativ breite Lichtimpulse liefern (wobei jedoch der Anstieg des Impulses immer ausreichend schnell erfolgt). Bereits bei einer Länge von 20 m konnten in dem LWL geringfügig unterschiedliche Laufzeiten verschiedenfarbiger Lichtimpulse gemessen werden:

LWL Länge 20 m

$t_{\text{rot}} = 102,5 \text{ ns}$

$c_{\text{rot}} = 195\,000 \text{ km/s}$

$t_{\text{gelb}} = 103,5 \text{ ns}$

$c_{\text{gelb}} = 193\,000 \text{ km/s}$

$t_{\text{grün}} = 104,0 \text{ ns}$

$c_{\text{grün}} = 192\,000 \text{ km/s}$

Bei diesen Versuchen können mehrere verschiedenfarbige LED z. B. in Reihe an den Lichtimpulssender angeschlossen werden. Der LWL kann mit seinem Ende fest am Empfänger angebracht werden. Der Anfang des LWL braucht dann nur vor der jeweiligen LED befestigt zu werden.

Der Nullabgleich mit Hilfe des unverschobenen Lichtimpulses muß für jede LED neu durchgeführt werden (da die Lichtimpulsformen ganz unterschiedlich sein können).

2.4.5 Eine weitere Möglichkeit besteht im Einsatz von Halbleiter-Laser-Dioden [4] (z. B. SG 2003/7RCA oder LD 74 Laser-Laboratories; $\lambda = 904 \text{ nm}$). Diese Dioden sind jedoch relativ teuer. Außerdem ist der elektronische Aufwand zur Erzeugung kurzer Lichtimpulse sehr viel größer als bei einer LED, da der Laser-Effekt erst bei Impulsströmen von ca. 10 A auftritt.

2.5 Abschätzung der Lichtgeschwindigkeit bei kurzen Lichtlaufstrecken ($\Delta s \geq 1 \text{ m}$)

2.5.1 Kurzbeschreibung

Bei sehr großer Ablenkgeschwindigkeit des Elektronenstrahles eines Oszilloskopes z. B. 5 ns/cm oder 10 ns/cm, die bei guten Oszilloskopen durch Dehnung der Zeitachse um den Faktor 10 bis 5 eingestellt werden kann, wird die Laufzeitdifferenz Δt zwischen dem unverschobenen Impuls und dem Impuls mit Laufzeitverschiebung auf dem Oszilloskopschirm abgeschätzt. Bei Lichtlaufstrecken von ca. einem Meter ergeben sich Laufzeitdifferenzen in der Größenordnung von 10 ns [6, 12].

Der Meßfehler bei der Messung von so kurzen Zeiten ist natürlich relativ groß und hängt auch insbesondere von der Qualität des benutzten Oszilloskopes ab. Mit dem bei den Experimenten benutzten Oszilloskop der Firma Hameg Typ HM 605 konnten jedoch vernünftige Abschätzungen der Lichtgeschwindigkeiten in durchsichtigen Stäben und Flüssigkeitssäulen ab einer Länge von ca. einem Meter gemacht werden.

2.5.2 Meßverfahren

2.5.2.1 Bei einer Zeitablenkung von $0,05 \mu\text{s}/\text{cm}$ wird durch Optimierung des Lichtweges (Strahlteilerstellung, Spiegelstellung, Linsenstellung etc.) versucht, eine *möglichst große Impulshöhe* des laufzeitverschobenen Impulses auf dem Bildschirm des Oszilloskopes zu erhalten. Durch geeignete Einstellung der y-Kanalverstärkung wird dann z. B. eine Impulshöhe von genau 4 cm eingestellt.

2.5.2.1.1 Dabei ist darauf zu achten, daß möglichst wenig Licht auf direktem Weg vom Sender in den Empfänger gelangt (da eine Überlagerung des unverschobenen und des zeitverschobenen Impulses zu einem erheblichen Meßfehler führt). Dies erreicht man durch:

1. Säuberung des Strahlteilers.
2. Verschiebung des Lichtabschirmröhrchens über der Sende-LED bis ganz an den Strahlteiler heran. Zusätzlich kann das Röhrchen beim Strahlteiler schräg angeschnitten werden, so daß kein Licht an der Innenseite des Röhrchens in Richtung des Empfängers reflektiert werden kann.
3. Vermeidung von Lichtreflexionen an der Linsenoberfläche und an der Oberfläche des Mediums, in der die Lichtgeschwindigkeitsmessung erfolgen soll (z. B. durch Säubern der Oberflächen und geringfügiges Verdrehen der Linse etc.).

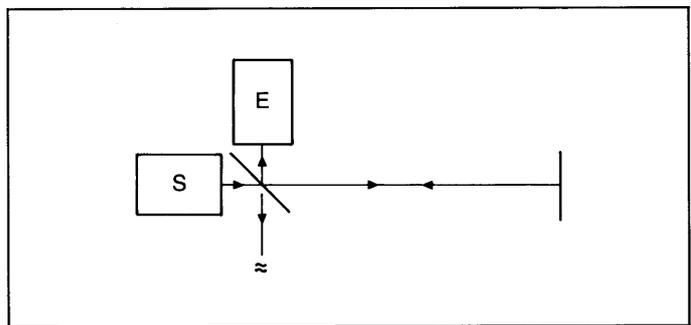


Abb. 14: Lichtstreuung in Vorwärtsrichtung

4. Vermeidung von Lichtstreuung in Richtung des Empfängers von Licht, das vom Strahlteiler nach vorne reflektiert wird (Abb. 14).

2.5.2.1.2 Durch Unterbrechung des Lichtweges des laufzeitverschobenen Impulses kann überprüft werden, ob möglichst wenig Licht auf direktem Weg in den Empfänger gelangt (indem man z. B. den Spiegel entfernt bzw. schwarzen Karton zwischen Linse und Medium einschiebt etc.). Je größer die Impulshöhendifferenz von laufzeitverschobenem und unverschobenem Impuls (nach Unterbrechung des Strahlenganges) desto genauer wird die Messung.

2.5.2.2 Der Lichtweg wird unterbrochen (z. B. schwarzen Karton vor die Linse einschieben) und zwischen Strahlteiler

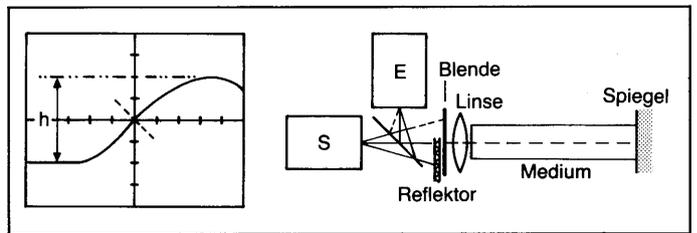


Abb. 15: Nullabgleich des unverschobenen Lichtimpulses

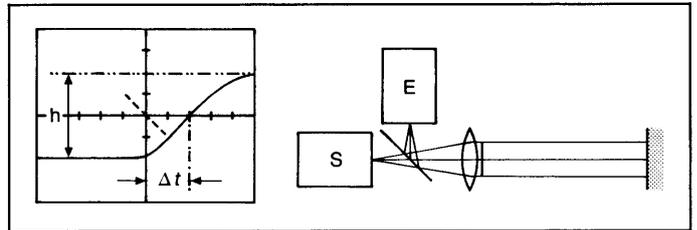


Abb. 16: Bestimmung der Laufzeitdifferenz Δt im Medium

und Linse wird ein Reflektor (Katzenauge) so weit eingeschoben, daß der unverschobene Lichtimpuls genau die gleiche Höhe h von 4 cm auf dem Bildschirm erreicht wie zuvor der laufzeitverschobene Impuls.

2.5.2.3 Als Nullmarke für die Zeitmessung dient die Zentimeterrasterung des Oszilloskopschirmes, wobei die Mitte der ansteigenden Flanke des unverschobenen Impulses mit Hilfe der x- und y-Positionsregler des Oszilloskopes auf einen Rasterkreuzpunkt (z. B. Bildschirmmitte) eingestellt wird.

(Steht ein 10 MHz-Generator mit Phasenschieber zur Verfügung, so kann zusätzlich die Mitte der abfallenden Flanke des unverschobenen Lichtimpulses in diesem Rasterkreuzpunkt zum Schnitt gebracht werden.)

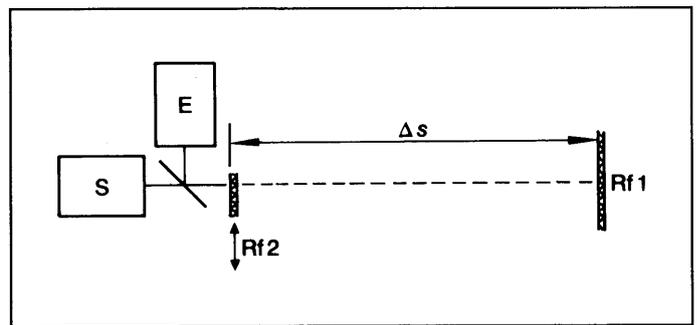


Abb. 17: Lichtgeschwindigkeitsmessung in Luft

2.5.2.4 Jetzt wird eine Zeitablenkung von $5 \text{ ns}/\text{cm}$ bzw. $10 \text{ ns}/\text{cm}$ durch Zeitdehnung $\times 10$ bzw. $\times 5$ am Oszilloskop eingestellt und die Lage des unverschobenen Lichtimpulses auf dem Schirm des Oszilloskopes korrigiert (Abb. 15):

2.5.2.5 Der Strahlengang durch das zu untersuchende Medium wird freigegeben und der Reflektor zwischen Strahlteiler und Linse wird entfernt.

Bei einer Laufzeitdifferenz Δt von z. B. 10 ns ist die Mitte der ansteigenden Impulsflanke um 2 cm nach rechts verschoben (bei einer Zeitablenkung von $5 \text{ ns}/\text{cm}$; gleiche Impulshöhe h !). Die Lichtgeschwindigkeit im Medium beträgt $c = 2 \cdot \Delta s / \Delta t$ (Abb. 16).

2.5.3 Versuchsanordnungen ($\Delta s \approx 1 \text{ m}$, s. Abb. 17).

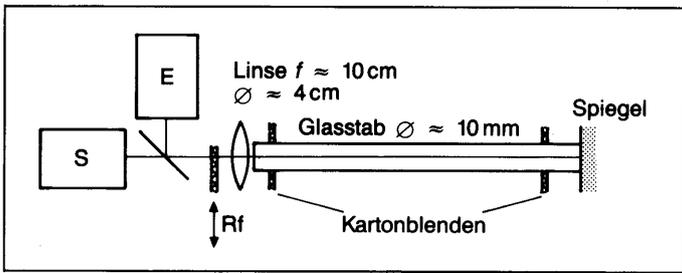


Abb. 18: Lichtgeschwindigkeitsmessung im (Plexi)-Glasstab (Enden poliert)

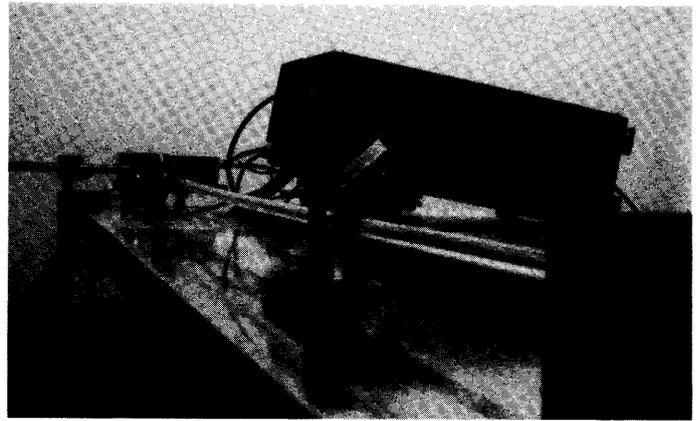


Abb. 21: Versuchsanordnung c-Messung im Plexiglasstab

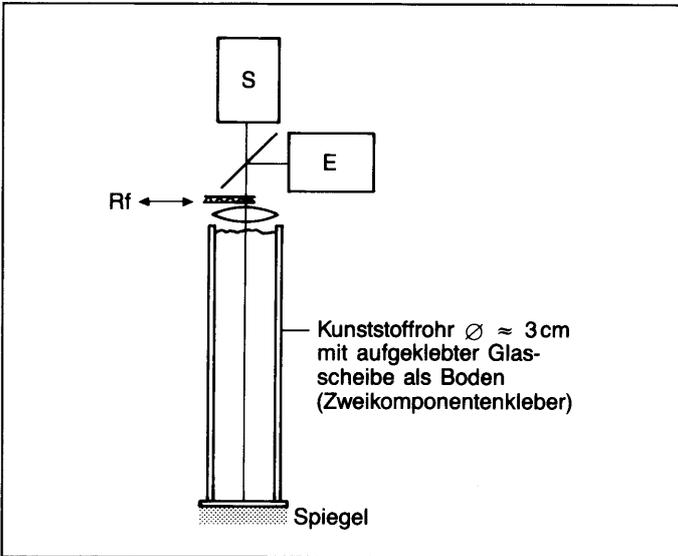


Abb. 19: Lichtgeschwindigkeitsmessung in einer Flüssigkeitssäule (Versuchsanordnung um 90° gedreht)

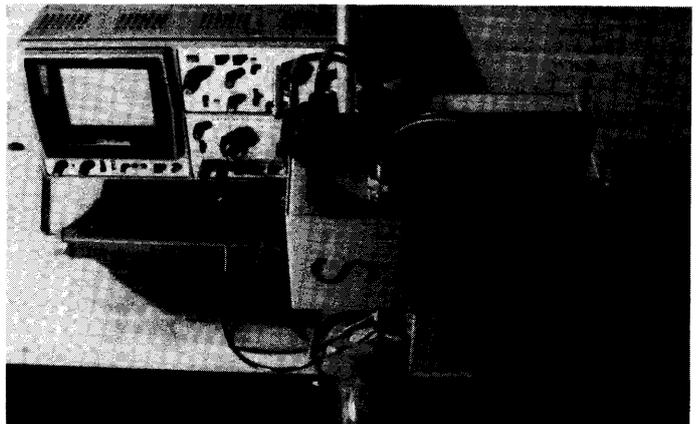


Abb. 22: Versuchsanordnung c-Messung in der Wassersäule

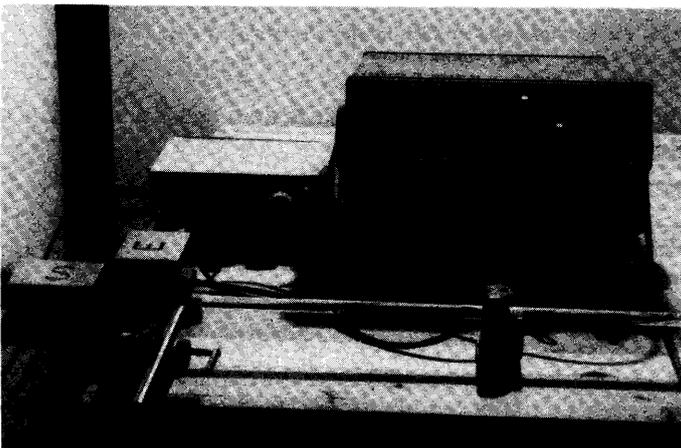


Abb. 20: Versuchsanordnung c-Messung im Plexiglasstab

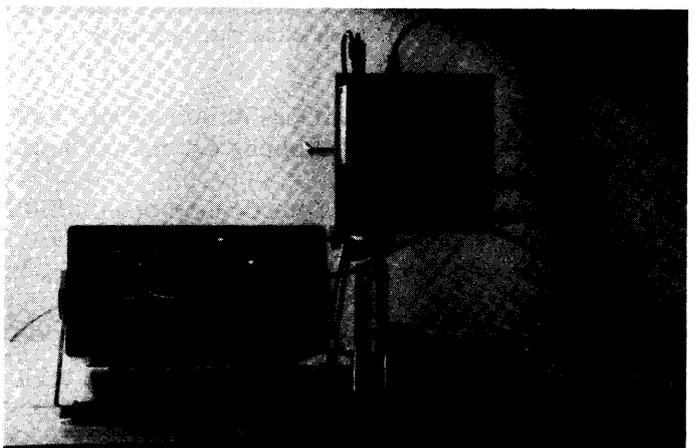


Abb. 23: Versuchsanordnung c-Messung in der Wassersäule

2.5.4 Meßergebnisse:

a) c-Messung im Plexiglasstab Länge 1,50 m ($\lambda = 650 \text{ nm}$)
Impulslaufzeit ca. 14,5 ns (Abb. 24, 25, 26 und 27).

$$c_{\text{Plexiglas}} \approx \frac{2 \cdot 1,50 \text{ m}}{14,5 \text{ ns}} = 207\,000 \text{ km/s}$$

Herstellerangabe: $n_{\text{Plexiglas}} = 1,49$.

b) c-Messung in einer Wassersäule von 0,91 m Länge
Impulslaufzeit ca. 7,5 ns bis 8 ns (Abb. 28, 29 und 30).

$$c_{\text{H}_2\text{O}} \approx \frac{2 \cdot 0,91 \text{ m}}{7,5 \text{ ns}} = 240\,000 \text{ km/s}$$

(Literaturwert 225 000 km/s).

2.6 Laufzeit und Reflexionsverhalten von Nadelimpulsen auf einem Koaxialkabel

2.6.1 Die kurzen Spannungsimpulse, die der Lichtimpulssender am Triggerausgang abgibt, können zur Untersuchung der Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen auf einem Koaxialkabel benutzt werden [9, 11, 13].

Dazu wird der Triggerausgang des Senders über den einen Anschluß eines BNC-T-Steckers und ein kurzes BNC-Kabelstück (Länge $\leq 50 \text{ cm}$) an den y-Eingang eines Oszilloskopes (Triggerung intern) angeschlossen. An den zweiten Anschluß des T-Steckers wird eine Koaxialkabelrolle (Länge $\geq 50 \text{ m}$) angeschlossen. Die Triggerimpulse laufen auf der Koaxialkabelrolle entlang und werden am offenen Kabel-

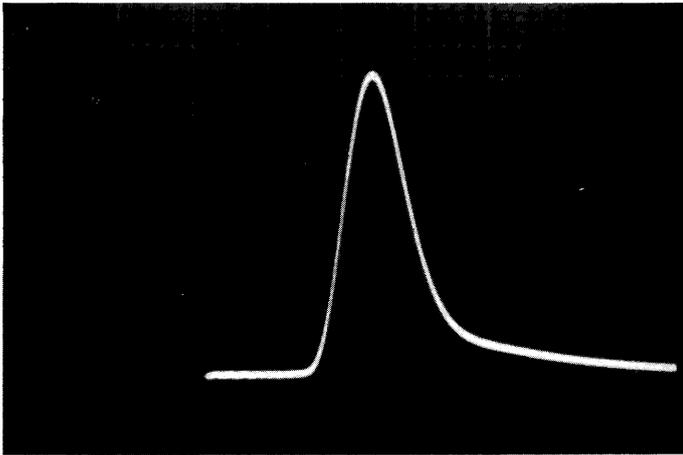


Abb. 24: Unverschobener Lichtimpuls (Nullabgleich) (x: 50 ns/RE; y: 50 mV/RE)

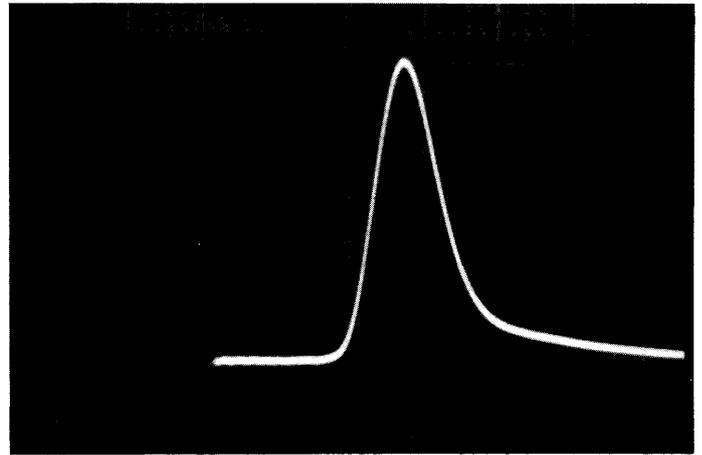


Abb. 27: Zeigt Abb.25 mit Dehnung der Zeitachse X10 (x: 5 ns/RE, y: 50 mV/RE)

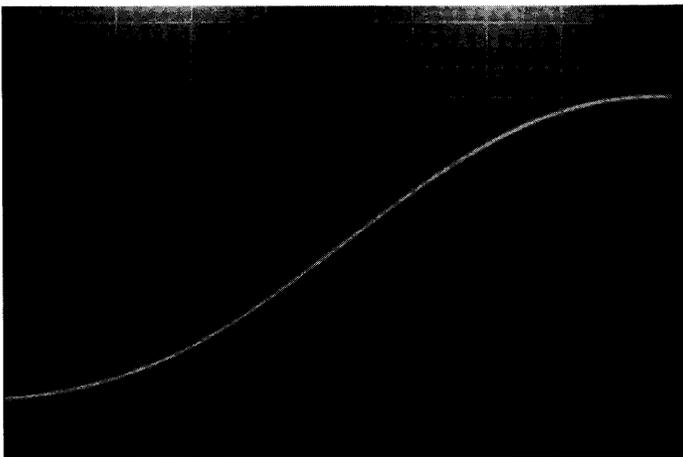


Abb. 25: Laufzeitverschobener Lichtimpuls im Plexiglasstab (x: 50 ns/RE; y: 50 mV/RE)

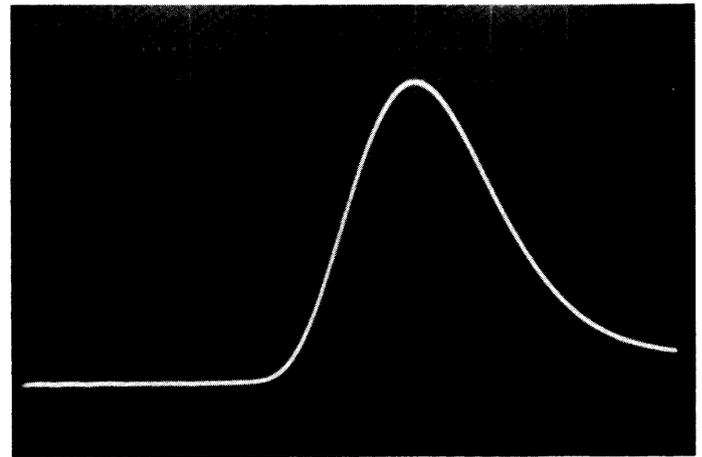


Abb. 28: Unverschobener Lichtimpuls (Nullabgleich) (x: 20 ns/RE; y: 50 mV/RE)

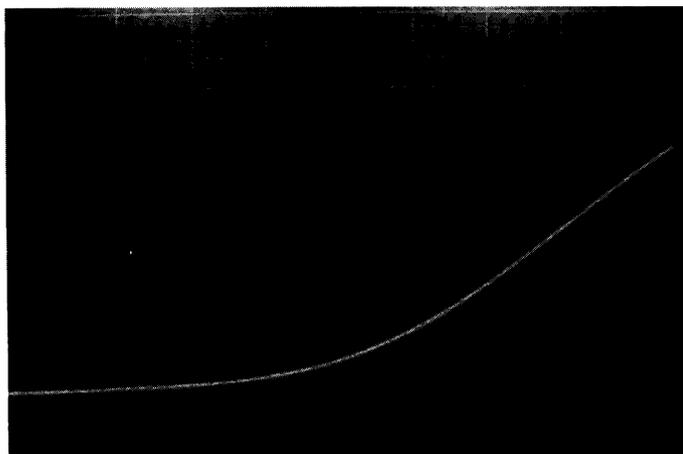
ende reflektiert (Abb. 31). Wird das Kabelende der Rolle kurzgeschlossen, so werden die Impulse mit einem Phasen-sprung reflektiert (Abb. 32).

Wird das Kabelende mit einem Potentiometer von ca. 200 Ω abgeschlossen, so werden die Reflexionen unterdrückt, wenn ein Widerstandswert von 50 Ω am Potentiometer eingestellt wird (Abb. 33).

2.6.2 Meßergebnisse:

Kabellänge 50m; Impulslaufzeit für drei Hin- und Rückläufe 1,5 μs

Abb. 26: Zeigt Abb. 24 mit Dehnung der Zeitachse X10 (x: 5 ns/RE; y: 50 mV/RE)



Ausbreitungsgeschwindigkeit der Spannungsimpulse auf der Koaxialkabelrolle:

$$c = \frac{6 \cdot 50 \text{ m}}{3 \cdot 0,5 \mu\text{s}} = 200\,000 \text{ km/s}$$

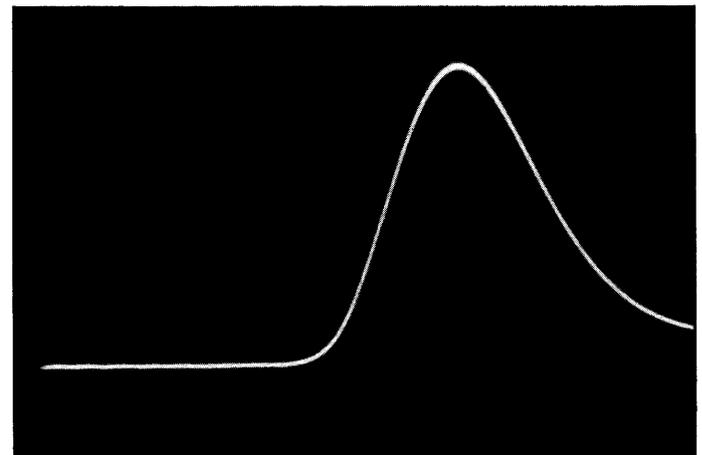
Relative Dielektrizitätskonstante des Kabelmaterials:

$$\epsilon_r = 2,25$$

2.7 Zusammenfassung

2.7.1 Die Versuche zur Lichtgeschwindigkeitsmessung bei größeren Laufstrecken ab 10m in Luft oder in Lichtleitern

Abb. 29: Laufzeitverschobener Lichtimpuls in der Wassersäule (x: 20 ns/RE; y: 50 mV/RE)



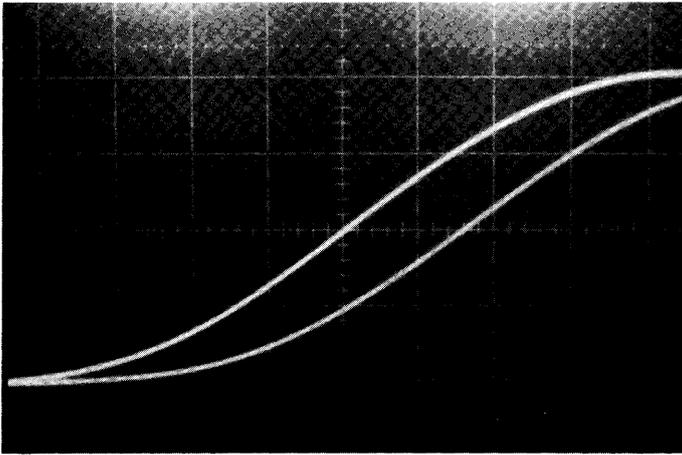


Abb. 30: Unverschobener und laufzeitverschobener Lichtimpuls; Zeitachse um Faktor 10 gedehnt; Aufnahme doppelbelichtet (vergleiche Abb. 28 und Abb. 29) ($x: 5 \text{ ns/RE}$; $y: 50 \text{ mV/RE}$)

sind einfach durchzuführen und erfordern kaum Justieraufwand.

Das erforderliche Oszilloskop sollte eine Zeitablenkung von mindestens $0,1 \mu\text{s/cm}$ besitzen und muß extern zu triggern sein. Ein entsprechendes Oszilloskop wird wohl in den meisten Physksammlungen zur Verfügung stehen.

Soll gleichzeitig mit den Lichtimpulsen das Rechtecksignal zur Zeiteichung auf dem Bildschirm des Oszilloskopes dargestellt werden, so muß ein Zweikanal-Trigger-Oszilloskop benutzt werden. Mit den Oszilloskopen HM 412, HM 203, HM 605 der Firma Hameg z. B. können diese Versuche ohne Schwierigkeiten durchgeführt werden.

Ist bei einem Einkanaloszilloskop bzw. bei einem Oszilloskop mit Triggerproblemen die gleichzeitige Darstellung von Lichtimpulsen und Rechtecksignal nicht möglich, so kann trotzdem die Meßgenauigkeit erheblich gesteigert werden, wenn mit Hilfe des Rechteckgenerators die Zeitachse geeicht wird. (Z. B. kann die Zeitachse Abweichungen von der Linearität aufweisen) [1].

2.7.2 Für Versuche zur Lichtdispersion oder zu kleinen Laufstrecken ist ein Oszilloskop mit Dehnung der Zeitachse erforderlich, so daß eine Zeitablenkung von 10 ns/cm besser 5 ns/cm erreicht wird (z. B. HM 605).

Abb. 31: Reflexionen am offenen Kabelende ($x: 0,5 \mu\text{s/RE}$; $y: 0,5 \text{ V/RE}$)

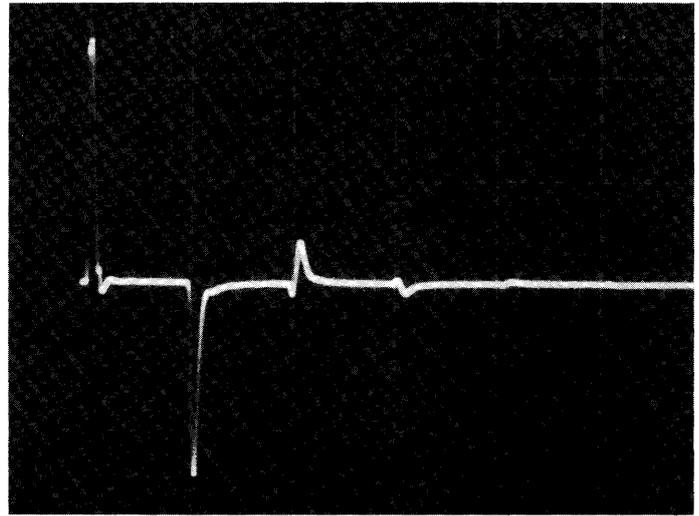
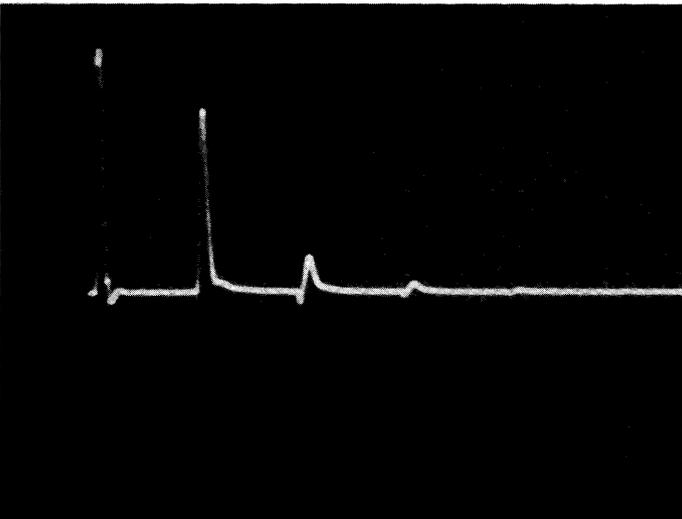


Abb. 32: Reflexionen am kurzgeschlossenen Kabelende ($x: 0,5 \mu\text{s/RE}$; $y: 0,5 \text{ V/RE}$)

Bei diesen Experimenten muß sehr sorgfältig justiert werden; die Genauigkeit der Meßergebnisse ist dabei nicht allzu groß. Ein Fehler bei der Laufzeitmessung von $\pm 1 \text{ ns}$ führt natürlich zu einer erheblichen Meßungenauigkeit, so daß z. B. bei der Lichtgeschwindigkeitsmessung in einer Wassersäule von 1 m Länge leicht ein Fehler von 10% und mehr auftreten kann. Größere Genauigkeit ist nur bei einer längeren Laufstrecke im Wasser zu erreichen [6].

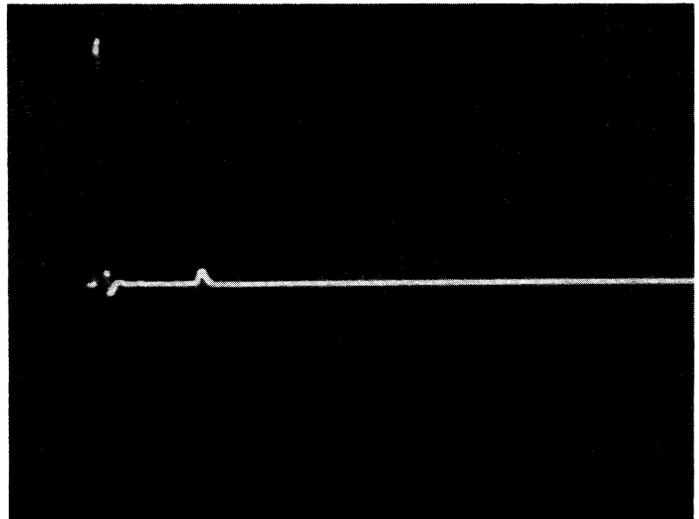
3 Versuchsgerät und Schaltungen

Gegenüber den in [5] angegebenen Schaltungen wurden einige kleine Änderungen angebracht:

3.1 Lichtsender (Siehe Abb. 37)

Der Sperrschwinger zur Erzeugung der Hochspannung für die Ladung des Kondensators C2 wurde durch einen kleinen Netztrafo ersetzt, dessen Primär- und Sekundärwicklung vertauscht werden. Neben dem Vorteil eines einfacheren Aufbaues der Stromversorgung des Lichtsenders und dem Wegfall des Ringkernübertragers (umständliche Bewicklung) entfallen Störungen durch die intensiven Stromimpulse des Sperrschwingers, die auf den Stromversorgungsleitungen in den Lichtempfänger gelangen können.

Abb. 33: Kabelende mit Widerstand $\approx 50 \text{ Ohm}$ abgeschlossen



Als Leuchtdiode wird der Typ HSPR 5501 bzw. H 1000 [8, 10] eingesetzt. Diese Leuchtdioden haben sehr hohe Leuchtstärken, so daß sich keine Intensitätsprobleme ergeben und die Lichtlaufstrecke über 100m betragen kann.¹⁾ Der Transistor BC 237 kann durch einen ähnlichen Typ z. B. BC 546 ersetzt werden.

3.2 Lichtempfänger (Siehe Abb. 40)

Der Transistor BFR 99 wurde durch den gängigeren Typ BF 979 ersetzt. Die Zenerdiode Z 3,9V wurde in [5] im Schaltplan falsch gepolt eingezeichnet. Die Diode 1N 4148 wurde zusätzlich als Verpolungsschutz eingebaut.

3.3 Rechteckgenerator (Siehe Abb. 47)

Der Spannungsregler 78 L 05 (IC 3) erzeugt die zum Betrieb der beiden IC 7400 bzw. 74123 erforderliche Spannung von 5 V. Die maximale Eingangsspannung des Spannungsreglers darf 20 V betragen, so daß eine gemeinsame Spannungsquelle für den Betrieb von Rechteckgenerator und Lichtempfänger von 20 V = genügt. Die Diode D1 dient als Verpolungsschutz. Der Wert der Widerstände R4 und R6 darf (laut Herstellerangabe) minimal 5 kΩ betragen. R4 braucht nicht als Potentiometer ausgeführt zu werden. Falls sich Probleme mit der Triggerung des Rechtecksignals ergeben sollten, kann der Wert von R4 oder auch von C3 abgeändert werden.

3.4 Sender, Empfänger und Generator können in drei verschiedene Alu-Gehäuse (Abmessungen z. B. 72×56×42mm Firma Teko) eingebaut werden (Abb. 34). Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, Sender und Generator in ein Gehäuse (Abmessungen z. B. 140×72×42mm Firma Teko) einzubauen, was zu einem kompakteren Aufbau führt (Abb. 35). Für die Platinen sind Platinenvorlagen angegeben, nach denen die drei Platinen im Ätzverfahren hergestellt werden können (Abb. 50, 51 und 52).

Die fertigen Geräte werden auf eine Grundplatte aus Holz oder PVC geschraubt. Eine PVC-Platte hat den Vorteil, daß die erforderlichen Gewinde für Strahlteiler und Stativstabilisierung direkt in das PVC-Material gedreht werden können (Abb. 44).

Je nach gewählten Gehäusen sind in die Grundplatte Bohrungen 3,2mm Ø nach Plan einzubringen.

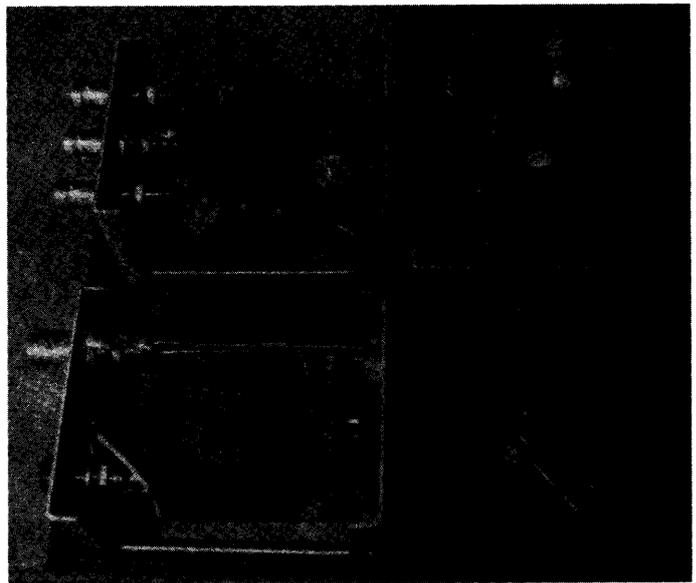


Abb. 34: Sender, Empfänger und Rechteckgenerator in verschiedenen Gehäusen

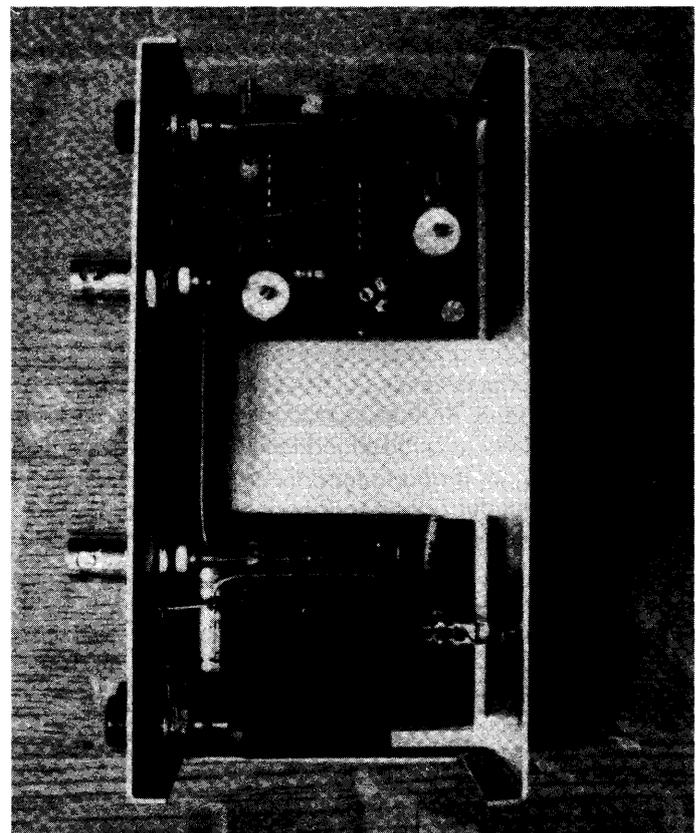
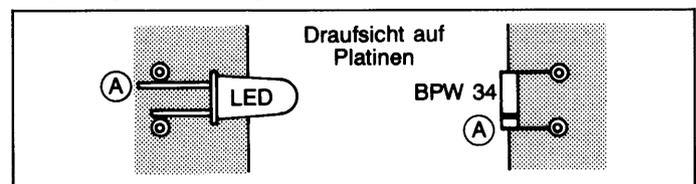


Abb. 35: Sender und Rechteckgenerator im gemeinsamen Gehäuse

Bestückungsplänen!). Der Transistor BF 979 muß mit dem Typenaufdruck nach oben eingelötet werden!

4.4 Die vier Hochspannungsdioden 1N 4004 sind auf der Kupferseite der Platine S in ca. 5 mm Abstand von der Pla-

Abb. 36: Einbau der Lichtsenderdiode und Lichtempfängerdiode auf den jeweiligen Platinen (vgl. Abb. 38 und 41)



4 Bauanleitung Lichtsender und Lichtempfänger

4.1 Kontrolle der Platinen auf Fehler (Brücken, Risse).

4.2 Bohrung der Platinen mit Bohrer Ø 0,7mm. Bei Lötstiften (im Bestückungsplan mit ⊙ gekennzeichnet) auf 1,3mm aufweiten. Bohrungen der Befestigungslöcher mit Bohrer Ø 3mm (aufweiten) (Abb. 38 und 41).

4.3 Bestückung von Senderplatine S und Empfängerplatine E nach Bestückungsplan. Zuerst Widerstände und Kondensatoren einlöten. Halbleiter zum Schluß einlöten, wobei insbesondere bei den Dioden auf richtige Polung zu achten ist! (Siehe Markierungen auf den Dioden in den

¹⁾ Inzwischen werden auch von der Firma Conrad-Electronic sehr preiswerte, leuchtstarke rote LED's (Typen RTL 53 500mcd und L 53SRC/C 1000mcd) angeboten.

tine einzulöten. Dazu Anschlüsse entsprechend mit der Zange umbiegen und kürzen (Abb. 39, S. 28).

4.5 An die Platine S sind zwei Kabelstücke ca. 50 mm lang zum Anschluß des Trafos an die Bananenbuchsen ($6\text{ V} \sim$) anzulöten.

4.6 Die Sendediode (LED mit weißem, durchsichtigem Gehäuse) und die Empfängerdiode BPW 34 werden erst *nach Einbau der Platinen* in die Gehäuse in richtiger Höhe hinter den entsprechenden Gehäusebohrungen an den jeweiligen Lötstiften festgelötet.

4.7 Bohrungen der Gehäuse nach Skizzen (Abb. 42 und 43). Alle Bohrungen mit 1,5 mm vorbohren. Dann Bohrungen mit 3 mm, 4 mm usw. vorsichtig aufweiten, bis gewünschter Durchmesser erreicht ist. Die Gehäuse müssen zum Bohren fest eingespannt werden. Ab 5 mm Bohrmaschine auf kleinste Drehzahl stellen! Bohren von dünnem Alu-Blech erfordert Umsicht und Geschick! Vorsicht Verletzungsgefahr!

4.8 Einbau der BNC-Buchsen und Bananenbuchsen in die Gehäuse. Jede Buchse erhält eine Lötfläche und Unterlegscheibe bzw. Zahnscheibe. Die Lötfläche der BNC-Buchse ist jeweils Masseanschluß. Bananenbuchsen mit zweiter Mutter kontern (evtl. zusätzlich Zweikomponentenkleber).

4.9 Die Lötflächen der Bananenbuchsen werden jeweils mit einem Kondensator ca. 1–2 nF mit der Gehäusemasse (BNC-Lötfläche) verbunden. Diese Abblockmaßnahme ist wichtig, damit HF-Störungen vermieden werden.

4.10 Einbau der Platinen in die Gehäuse mit Messing-Distanzbolzen 10 mm und Schrauben M3. Direkt unter die Empfänger-Platine kommen zusätzlich zwei Plastik-Distanzrollen 5 mm. Die Schrauben M3×5 mm an den Gehäuseböden werden später (bei der Montage von Sender und Empfänger auf das Grundbrett) durch Schrauben M3×15 mm ersetzt.

4.11 Anschluß der Platinen an die Buchsen und zwar: Gehäusemasse mit Lötstift M (jeweils bei Sender und Empfänger).

BNC-Buchse mit Lötstift Tr (Sender) über Widerstand R_4 100 k Ω (Abb. 37).

Trafo-Anschlüsse ($6\text{ V} \sim$) mit Bananenbuchsen (Sender).

Buchse Plus (rot) mit Lötstift + (Empfänger).

BNC-Buchse mit Lötstift Ausgang A (Empfänger).

Die Verbindungen (außer Trafo-Anschluß) werden am besten mit steifem Schaltausgang ausgeführt. *Alle* Verbindungen müssen *so kurz wie möglich* sein, da sich sonst dem Lichtimpuls Störungen überlagern können!

4.12 LED und BPW 34 werden an die entsprechenden Lötstifte mittig hinter den Gehäusebohrungen angelötet. Die Anschlüsse der LED müssen zuvor gekürzt werden (langer LED-Anschluß etwas weniger kürzen, da durch den längeren LED-Anschluß die LED-Anode gekennzeichnet ist). Auf richtigen Anschluß achten (Abb. 36, 38 und 41):

LED-Anode an Emitter von Transistor BC 547.

Ebenfalls auf richtigen Anschluß der Empfängerdiode BPW 34 achten! Silberner Balken auf der lichtempfindlichen (bläulichen) Fläche kennzeichnet die Anode. Sie muß zur Befestigungsbohrung M3 (die näher liegt) zeigen.

Vor dem Anlöten der Dioden Lötstifte und Diodenanschlüsse verzinnen. Beim Anlöten Dioden mit Pinzette halten.

4.13 Funktionskontrolle:

Anschluß von Sender und Empfänger über BNC-Kabel an Trigger- bzw. y -Eingang eines Oszilloskopes (z. B. Hameg 204, 605 o. ä.; Zeitablenkung $0,1\ \mu\text{s}/\text{cm}$; y -Ablenkung $0,5\ \text{V}/\text{cm}$; Trigger extern). Anschluß der Versorgungsspannungen von $6\text{ V} \sim$ bzw. $\text{max. } 20\text{ V} =$; der Minuspol der Gleichspannungsquelle wird an die Erdungsbuchse des Oszilloskopes angeschlossen. Die Stromaufnahme des Empfängers sollte ca. 15 mA betragen.

Die LED des Senders muß rot leuchten, evtl. die Wechselspannung bis $\text{max. } 8\text{ V}$ erhöhen. Das Licht der Sender-LED wird auf die Empfänger-Diode gerichtet. Auf dem Bildschirm des Oszilloskopes muß jetzt bei entsprechender Triggerpegelstellung ein Signal zu sehen sein. Mit dem Potentiometer P1 wird der Empfänger so abgeglichen, daß auf dem Bildschirm ein sauberer Impuls von ca. 50 ns Breite zu sehen ist. Bei voller Aussteuerung des Empfängers hat der Impuls eine Höhe von ca. 2 V. (Bei zu großer Lichtintensität wird der Empfänger übersteuert und der Impuls verzerrt).

4.14 Empfänger und Sender werden auf ein Holzbrett $150 \times 150 \times 16\text{ mm}$ nach Plan geschraubt. Die Schrauben M3×5 mm in den Gehäuseboden sind dazu vorsichtig zu entfernen und die Gehäuse mit Hilfe von Schrauben M3×15 mm von der Unterseite des Holzbrettes her zu verschrauben, wobei die Schrauben M3×15 mm in die Gewinde der Distanzbolzen vorsichtig eingeschraubt werden. Die M3×15 mm Schrauben sind zuvor in das Holzbrett einzusenken. Ebenso zuvor in das Brett eine Mutter M10 von oben zur Befestigung des Grundbrettes auf einem Stativstab und eine Mutter M4 von unten zum Einschrauben des Strahlteilers nach Plan einsenken. Die Schraube M10 kann z. B. mit einem Schraubstock in ein Bohrloch $\varnothing 18\text{ mm}$, Tiefe 10 mm eingedrückt werden (evtl. mit Zweikomponentenkleber einkleben) (Abb. 44).

4.15 Der Strahlteiler wird mit Hilfe eines Glasplättchens (z. B. Dia- oder Objektträgergläschen) ca. $40 \times 25 \times 1\text{ mm}$, das in den Schlitz einer Schraube M4×16 mm mit Zweikomponentenkleber mittig eingeklebt wird, hergestellt. Die Schraube M4 mit Glasplättchen wird dann in die Mutter M4 im Holzbrett eingedreht und mit einer zweiten Mutter M4 von oben leicht gekontert.

4.16 Sechs Reflektoren ca. $115 \times 75\text{ mm}$ werden auf ein geeignetes Holzbrett geschraubt oder geklebt (z. B. doppelseitiges Klebeband). Diese sechs Reflektoren zusammen bilden den Reflektor Rf1 (siehe Praktikumsanleitung oder Justieranleitung) (Abb. S. 34 bzw. 1).

Ein weiterer Reflektor (in der Praktikumsanleitung mit Rf2 bezeichnet) wird beim Meßversuch direkt so hinter der Linse mit $f = 20\text{ cm}$ angeordnet, daß er in den Strahlengang eingeschwenkt werden kann.

Auf dem Oszilloskopschirm sind dann zwei Impulse zu sehen. Licht an Rf2 reflektiert gelangt praktisch vom Sender direkt in den Empfänger und erzeugt auf dem Oszilloskopschirm einen unverschobenen Impuls. Licht an Rf1 reflektiert muß die Strecke zum Rf1 hin und zurück zurücklegen und erzeugt auf dem Schirm den verschobenen Impuls.

4.17 Zusammenstellung des Versuches nach der Praktikumsanleitung. Über die Sender-LED ist ein lichtdichtes Pappröhrchen zu schieben, um zu verhindern, daß Licht direkt vom Sender in den Empfänger gelangt.

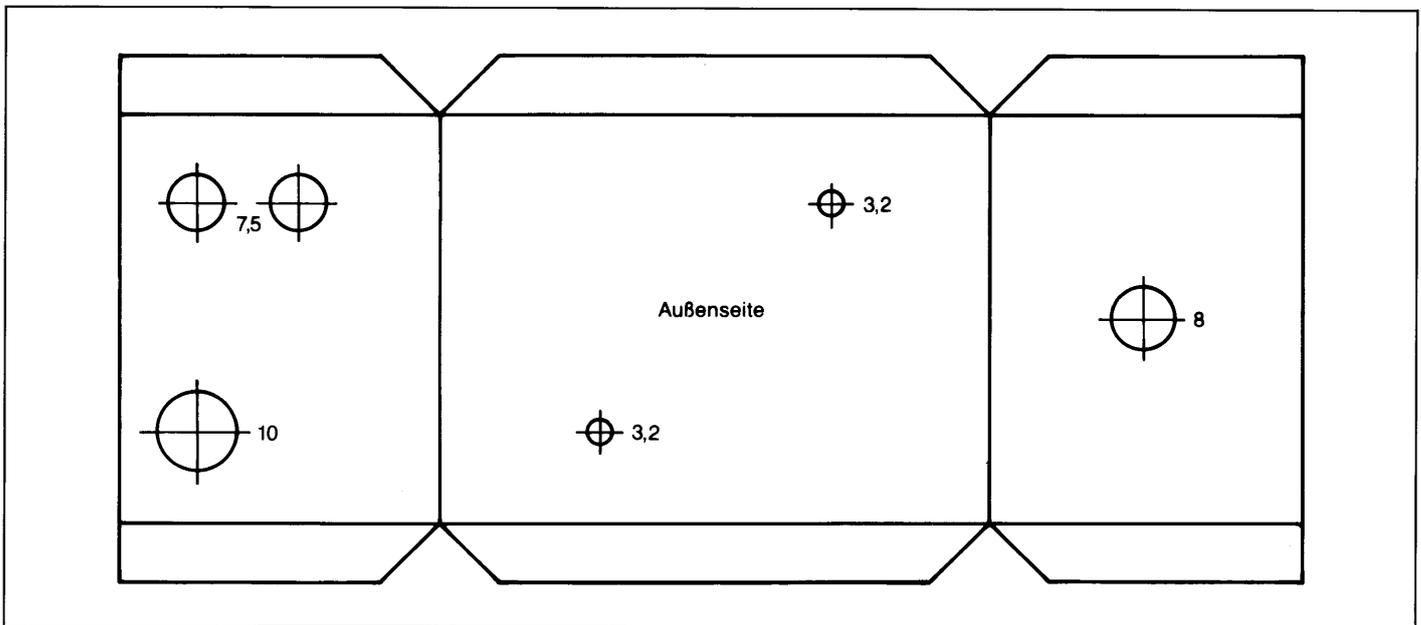


Abb. 42: Bohrschablone Lichtsendergehäuse

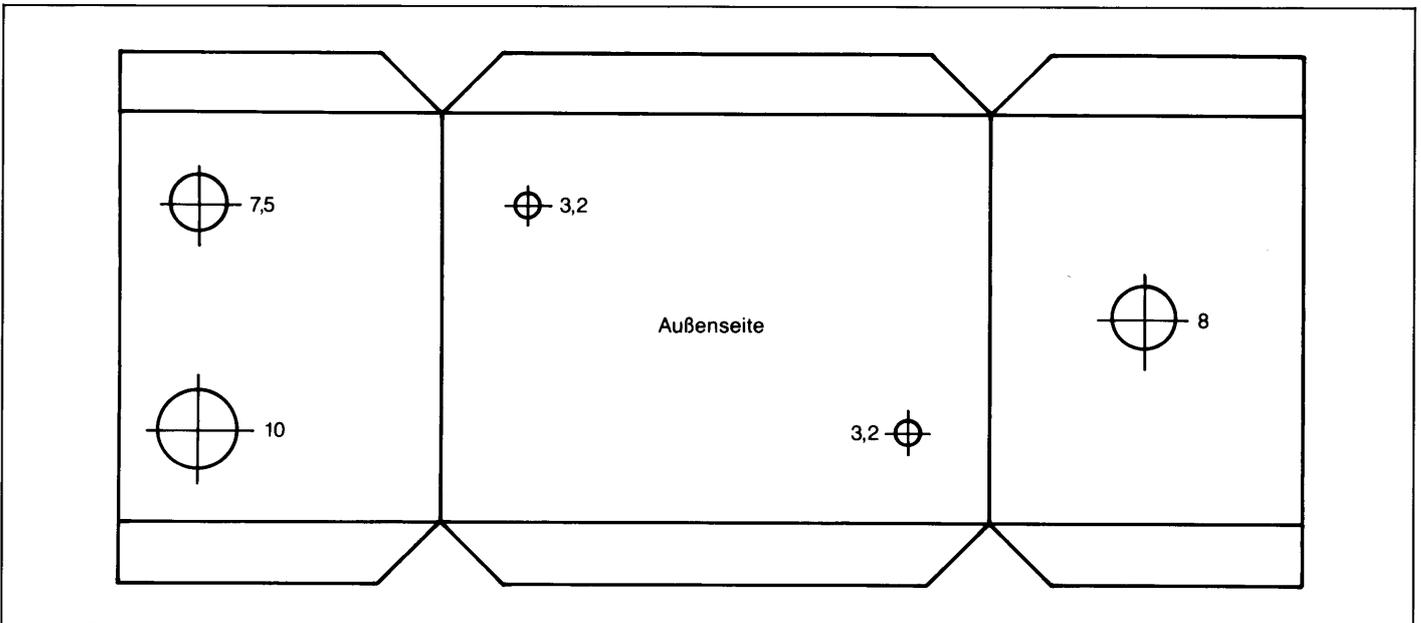


Abb. 43: Bohrschablone Lichtempfängergehäuse

Wichtiger Hinweis zur Sender-LED

Die Lichtsender-Leuchtdiode HSPR 5501 bzw. H 1000 kann bei zu großem Impulsstrom dauerhaft Schaden nehmen, wobei die Leuchtstärke der LED erheblich abnimmt. Die LED muß dann ausgetauscht werden. Deshalb darf die Wechselspannung am Lichtsender einen Wert von 8 V (eff) keinesfalls überschreiten. Um eine lange Lebensdauer der LED zu erreichen, sollte die Wechselspannung am Lichtsender immer möglichst niedrig eingestellt werden. In Versuchspausen sollte der Sender ganz abgeschaltet werden, so daß die LED nicht unnötig betrieben wird. Zur Justierung des Versuchsgerätes kann der Sender kurzzeitig mit etwas mehr als den empfohlenen 6 V Wechselspannung betrieben werden.

Die Wechselspannung, bei der die LED anfängt zu leuchten, hängt im übrigen von der Durchbruchspannung des Transistors BC 546 o. ä. ab, die Exemplarstreuungen unterworfen ist.

Schalt- und Bestückungspläne Lichtsender und Lichtempfänger (Abb. 37 bis 41)

Bohrschablonen (Alle Bohrungen in mm)
Bohrschablonen ausschneiden und auf Gehäuse legen.
Bohrmittelpunkte durchstechen (Abb. 42 bis 44, S. 31).

5 Bauanleitung Quarzgenerator 10 MHz mit Phasenschieber

5.1 Kontrolle der Platinen auf Fehler (Brücken, Risse).

5.2 Bohrung der Platinen mit Bohrer $\varnothing 0,7$ mm.
Befestigungslöcher mit Bohrer $\varnothing 3$ mm aufweiten.

5.3 Bestückung der Platinen nach Bestückungsplan (Abb. 48). Zuerst die Widerstände und IC-Fassungen einlöten, dann die Kondensatoren, wobei bei dem Elektrolytkondensator auf die Polung zu achten ist. Vor dem Einbau der beiden Trimmkondensatoren T1, T2 und des Trimpotentiometers

meters P1 1k müssen die Bohrungen dieser Bauteile auf der Platine auf 1,2 mm aufgeweitet werden. Der Quarz 10 MHz, die Diode 1N 4148 und der Spannungsregler 78L05 werden zum Schluß eingelötet, wobei auf die richtige Polung der Diode geachtet werden muß (siehe Markierung im Bestückungsplan!).

5.4 An die Stromversorgungsanschlüsse +P bzw. -M sind Kabel von ca. 50 mm Länge (Farbe rot bzw. blau) zum Anschluß an die Bananenbuchse (+ rot) bzw. an die Löt-fahne der BNC-Buchse anzulöten.

5.5 An den Ausgängen Tr (Trigger) und A (Signal 10 MHz) sind jeweils versilberte Schaltdrähte (ca. 50 mm) zum Anschluß an die jeweiligen BNC-Buchsen anzulöten.

5.6 Bohrung des Gehäuses nach der Bohrschablone (Abb. 45 oder 46). Alle Bohrungen mit 1,5 mm vorbohren. Dann die Bohrung mit 3 mm, 4 mm usw. vorsichtig aufweiten, bis der gewünschte Durchmesser erreicht ist. Die Gehäuse müs-sen zum Bohren fest eingespannt werden. Ab 5 mm die Bohrmaschine auf kleinste Drehzahl stellen! Bohren von dünnem Alu-Blech erfordert Umsicht und Geschick! Vor-sicht Verletzungsgefahr! Beachte 5.14!

5.7 Einbau der BNC-Buchsen in das Gehäuse. Jede BNC-Buchse erhält zur Sicherung eine Zahnscheibe. Die mittlere BNC-Buchse erhält zusätzlich eine Löt-fahne (unter der Zahnscheibe), die als Masseanschluß dient. Die BNC-Buch-senmuttern werden mit einem Schraubschlüssel M14 fest angezogen, wobei die Buchsen mit einer Zange oder im Schraubstock gegengehalten werden.

5.8 Einbau der Bananenbuchse in das Gehäuse. Es ist zweckmäßig, vor dem Einbau den farbigen Kopf vom Metallgewinde der Buchse abzuschrauben, und den vorderen Teil des Metallgewindes mit wenig Zweikomponentenkleber einzustreichen. Dann wird der farbige Kopf wieder auf das Metallgewinde aufgeschraubt. Jetzt kann der Buchsenkopf hinten ebenfalls mit Zweikomponentenkleber eingestrichen und in die Gehäusebohrung eingesetzt werden. Die Bana-nenbuchse kann sich dann im Gehäuse nicht mehr lockern. Die Buchse erhält eine Löt-fahne sowie eine Unterlegscheibe und wird mit einer zweiten Mutter gekontert.

5.9 Die Löt-fahne der Bananenbuchse wird mit einem Kon-densator ca. 47 nF mit der Gehäusemasse (BNC-Löt-fahne) verbunden. (Der Abblockkondensator dient zur Unter-drückung von HF-Störungen).

5.10 Einbau der Platine in das Gehäuse mit zwei Messing-Distanzbolzen 10 mm und Schrauben M3. Direkt unter die Platine kommen zusätzlich je eine Plastik-Distanzrolle 5 mm. Die Schrauben M3×5 mm am Gehäuseboden werden später (bei der Montage des Quarzgenerators auf das Grundbrett, auf dem sich bereits Lichtsender und Lichtemp-fänger befinden) durch Schrauben M3×15 mm ersetzt.

5.11 Anschluß der Stromversorgungskabel +P an die Bana-nenbuchse und -M an die Löt-fahne der BNC-Buchse. Anschluß der Ausgänge Tr (Trigger) und A (Rechtecksignal 10 MHz) an die jeweiligen BNC-Buchsen (steifer Schalt-draht).

5.12 Funktionskontrolle und Abgleich:

Anschluß des Generators über zwei BNC-Kabel an den Trig-ger-Eingang bzw. y-Eingang eines Oszilloskopes (z. B.

Hameg 203, 204, 412, 605 o. ä.; Zeitablenkung ca. 0,1 µs/cm; oder 50 ns/cm). Anschluß der Versorgungsspannung von 8 V bis max. 20 V =; der Minuspol der Gleichspannungsquelle wird an die Erdungsbuchse des Oszilloskopes angeschlossen. Die Stromaufnahme sollte ca. 50–70 mA betragen.

a) Trigger intern:

Auf dem Oszilloskopschirm erscheint ein Schwingungssig-nal. Mit dem Trimpotentiometer P1 und dem Trimmkon-densator T2 wird eine Rechtecksignalform mit einer Ampli-tude von ca. 0,2 V eingestellt. Die Periodendauer muß genau 0,1 µs betragen. Mit dem Trimmkondensator T1 kann die Frequenz 10 MHz minimal verändert werden (Kontrolle mit Frequenzzähler möglich, jedoch nicht erforderlich).

b) Trigger extern:

Das Rechtecksignal ist nach dem Nachregeln der Intensität auf dem Oszilloskopschirm wieder zu sehen. (Da der Elek-tronenstrahl erst durch einen Triggerimpuls, der vom IC 74123 erzeugt wird, ausgelöst wird, verringert sich die Bildhelligkeit). Mit dem Spindeltrimmer P2 kann die Pha-senlage des Rechtecksignals auf dem Bildschirm jetzt um ca. eine Periode in x-Richtung verschoben werden.

Hinweis: Es kann vorkommen, daß das IC 74123 nach dem Einschalten der Versorgungsspannung 8–20 V = keinen Triggerimpuls liefert und sich somit bei Trigger-stellung extern kein stehendes Bild des Rechtecksignals erzeugen läßt. (Dieser Fall tritt besonders dann auf, wenn die Versorgungsspannung mit Hilfe eines Netzge-rätes durch Betätigen des Netzschalters eingeschaltet wird und hängt auch vom benutzten IC ab).
Abhilfe: Bei eingeschalteter Versorgungsspannung z. B. Verbindungskabel vom Minuspol der Spannungsquelle zur Erdungsbuchse des Oszilloskopes abziehen und wie-der in die Buchse einstecken (evtl. mehrfach wdh.).

5.13 Der Rechteckgenerator kann jetzt auf das Grundbrett, auf dem sich bereits Lichtsender und Lichtempfänger befin-den, montiert werden. (Siehe Bauanleitung Lichtsender und Lichtempfänger 4.14.)

5.14 Lichtsender und Rechteckgenerator können auch in ein gemeinsames Gehäuse (Abmessungen 140×72×42 mm) ein-gebaut werden (Abb. 46). Dadurch wird ein BNC-Kabel zur Verbindung der Triggerausgänge von Sender und Rechteck-generator eingespart. Diese Verbindung muß dann zwischen den beiden Geräten intern durch eine Drahtbrücke aus steifem Schaltdraht hergestellt werden. Die Brücke wird an den Triggerausgang des Rechteckgenerators angelötet und in Gehäusewandnähe zur Trigger-BNC-Buchse bei der Sender-platine geführt und angelötet. (An diese BNC-Buchse ist bereits der Triggerausgang des Senders über den 100 Ω Widerstand angeschlossen).

Um HF-Einstreuungen bzw. -Störungen zu vermeiden, sind alle Leitungen möglichst kurz auszuführen!

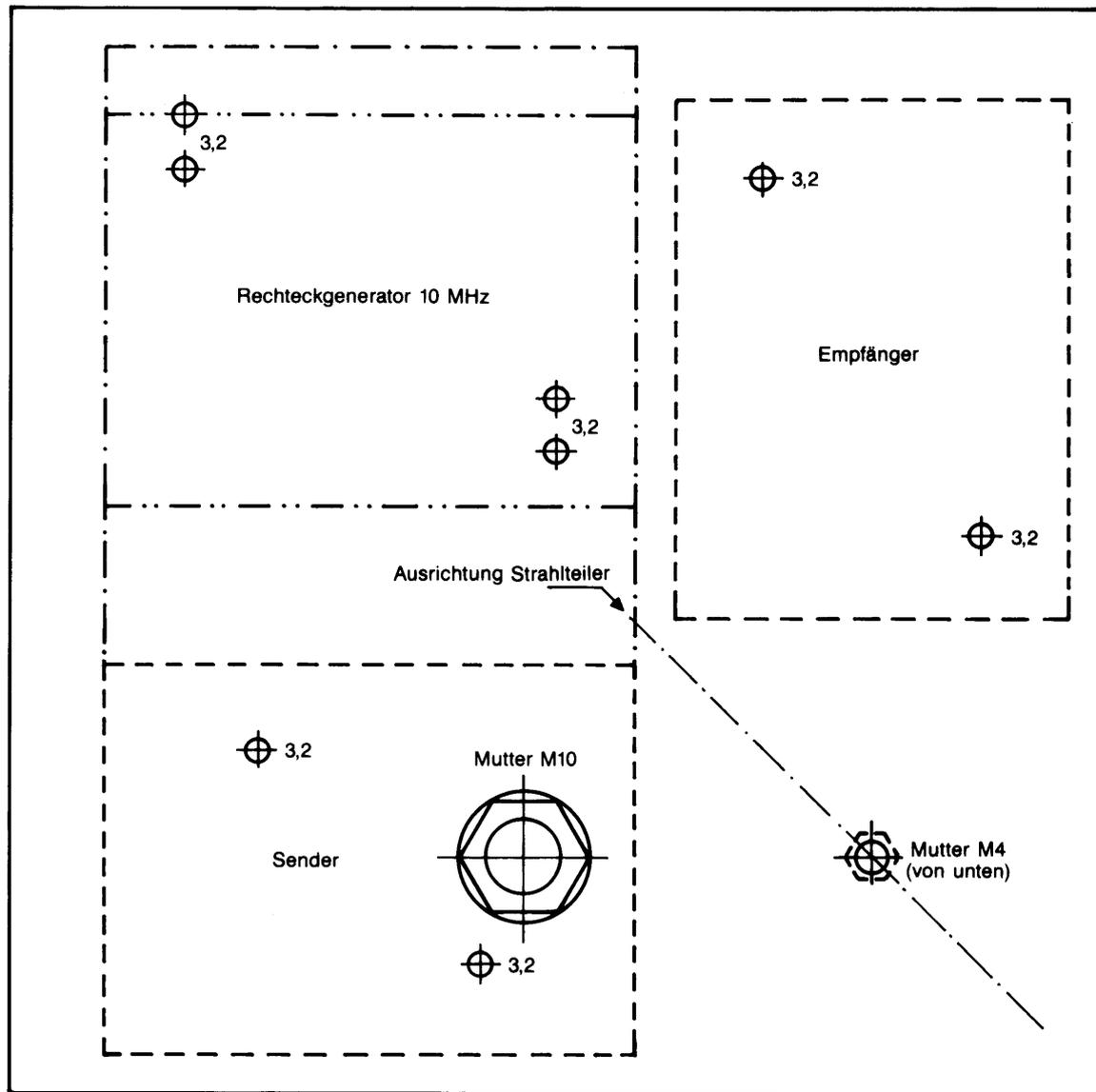
Stückliste:

Quarzgenerator 10 MHz mit Phasenschieber		
IC1 4-fach NAND Gatter	7400	} jeweils mit IC-Fassung
IC2 2 monostabile Multivibratoren	74123	
IC3 Spannungsregler 5 V	78L05	

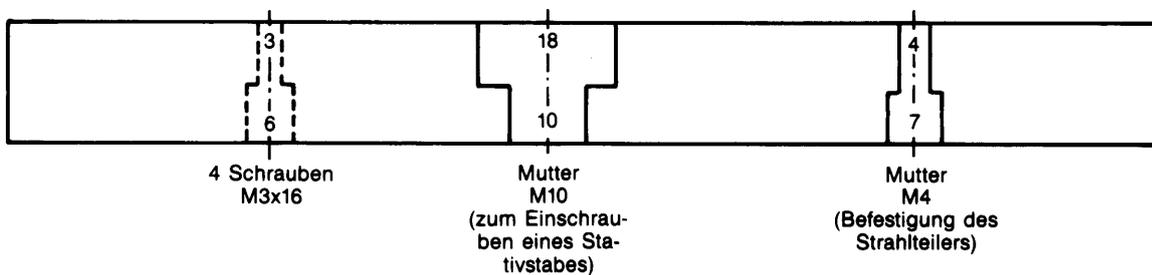
- Q1 Quarz 10 MHz
 R1 1,0 k Ω C1 22 nF C7 47 nF
 R2 1,0 k Ω C2 1 nF C8 47 nF
 R3 8,2 M Ω C3 100 nF C9 10 μ F Elko
 R4 5,0 k Ω C4 150 pF
 R5 18 k Ω C5 2,2 nF
 R6 5,0 k Ω C6 2,2 nF
 R7 100 Ω
 P1 Potentiometer 1 k Ω
 P2 Spindelpotentiometer 2 k Ω
 T1 Trimmkondensator 20 pF
 T2 Trimmkondensator 10 pF (oder 20 pF)

- D1 1 N 4148
 Platine QG 10 MHz
Zubehör
 1 Abblockkondensator 47 nF
 1 Gehäuse 72 \times 56 \times 42 mm mit 4 Blechschrauben
 3 BNC-Buchsen mit Zahnscheibe und Mutter
 1 Lötöse 10 mm
 1 Lötöse 6 mm
 1 Bananenbuchse mit Scheibe und zwei Muttern
 2 Distanzbolzen M3 \times 10 mm
 2 Schrauben M3 \times 5 mm
 2 Schrauben M3 \times 10 mm
 2 Schrauben M3 \times 16 mm
 2 Distanzröllchen 5 mm

Abb. 44: Bohrschablone Grundbrett 150 \times 150 \times 16 mm (Holz- oder PVC-Brett)



Versenkung der Muttern und Schrauben



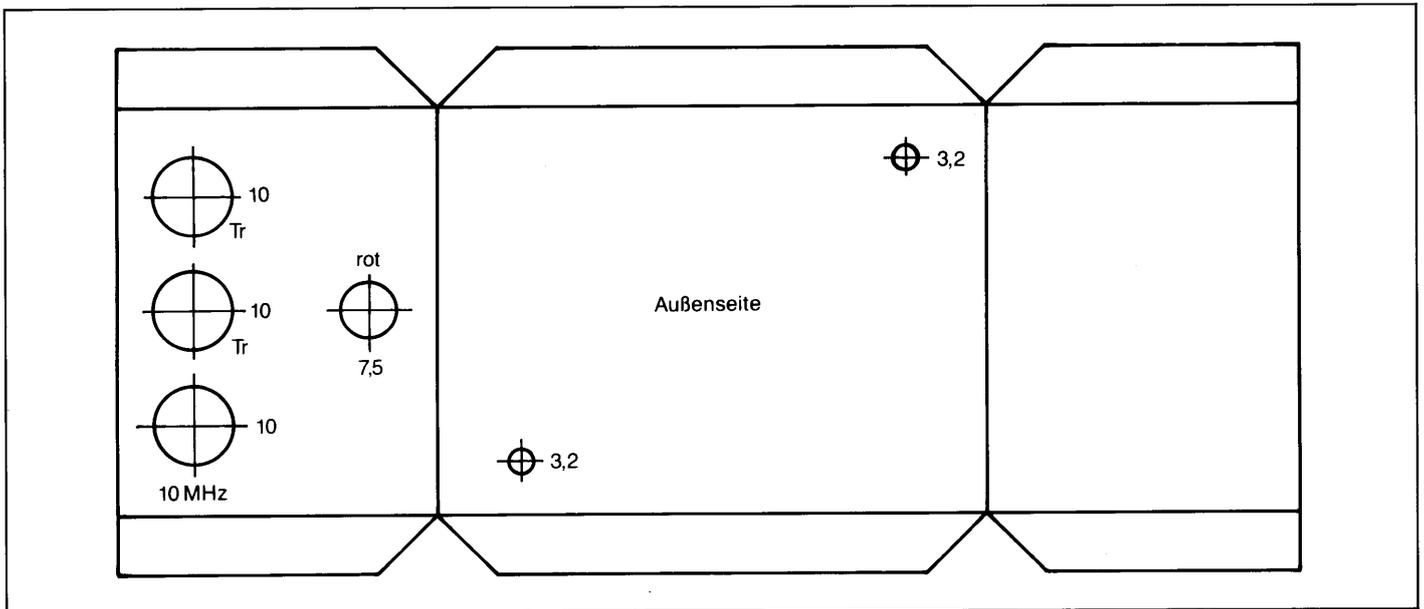
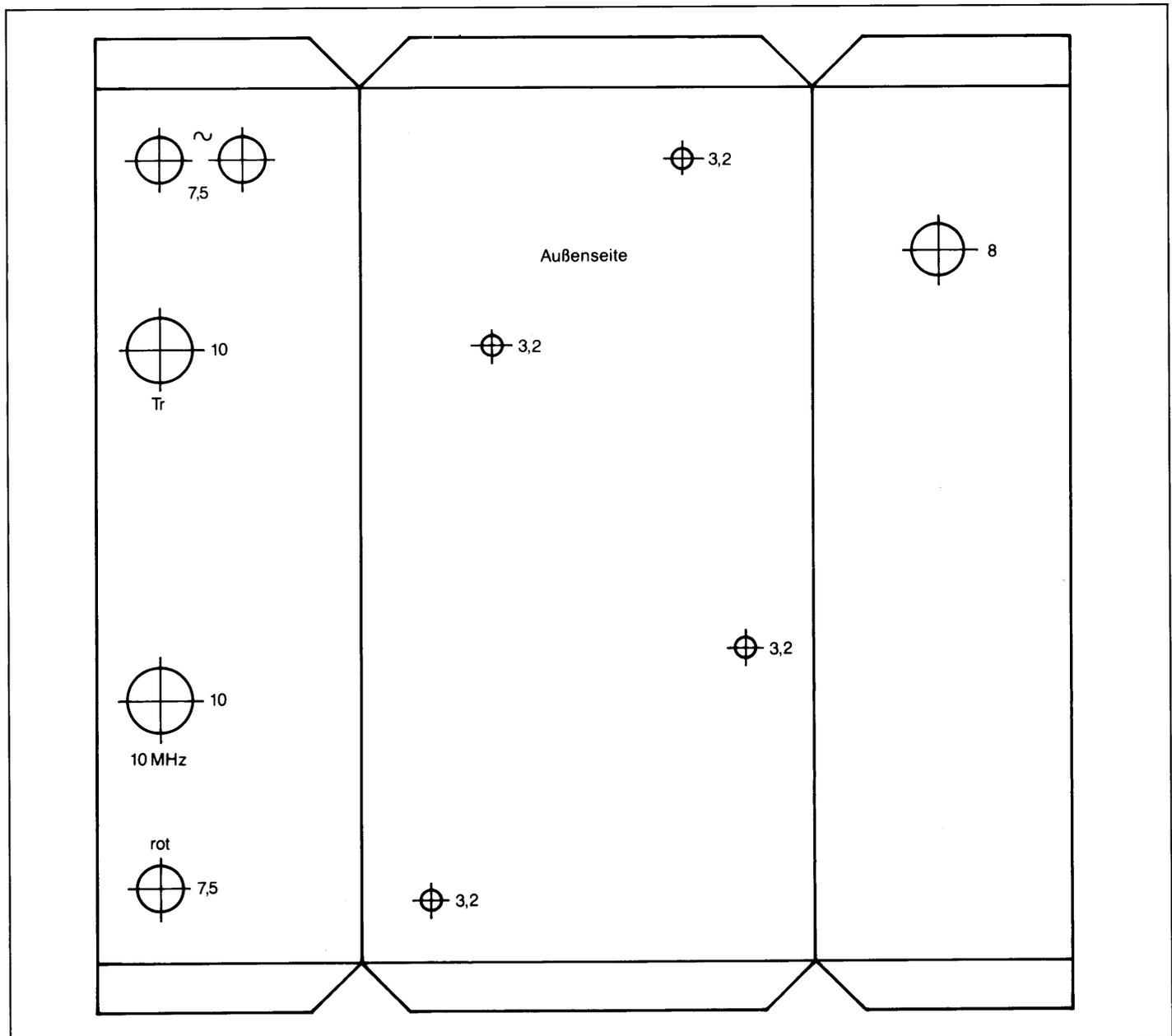


Abb. 45: Bohrschablone Quarzgenerator 10 MHz

Abb. 46: Bohrschablone Lichtsender und Quarzgenerator (gemeinsames Gehäuse)



Bohrschablonen (Alle Bohrungen in mm)
Bohrschablone ausschneiden und auf Gehäuse legen. Bohr-
mittelpunkte durchstechen (s. Abb. 45).

Schaltplan und Bestückungsplan Quarzgenerator 10 MHz mit
Phasenschieber (s. Abb. 47 u. 48)

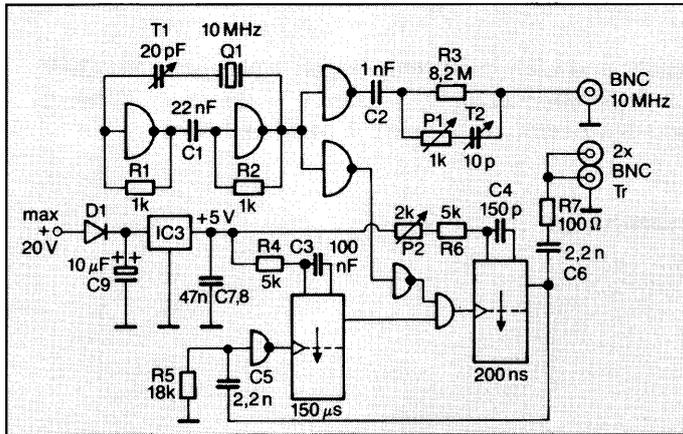


Abb. 47: Schaltplan Quarzgenerator

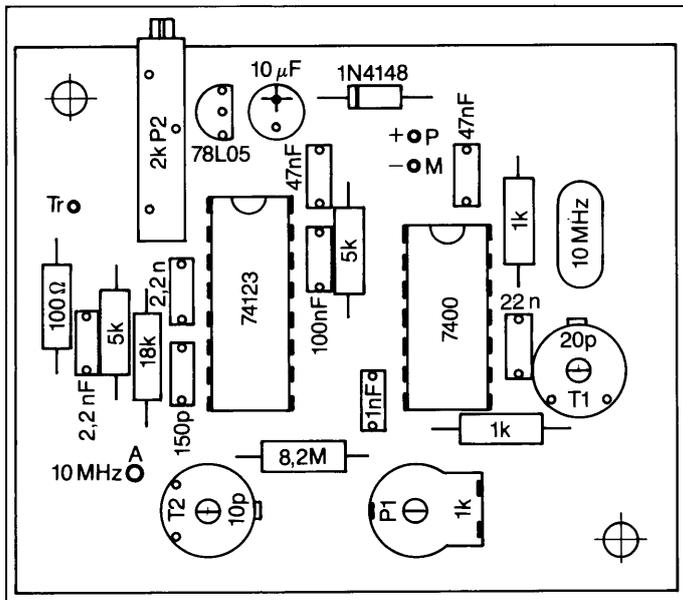


Abb. 48: Bestückungsplan Quarzgenerator (vergrößert 1 : 1,4)

Schaltungsbeschreibung [5]

Quarzgenerator 10 MHz mit Phasenschieber
Die quarzstabilisierte Rechteckspannung wird mit Hilfe
eines IC 7400 erzeugt. Das IC enthält vier NAND Glieder,
die jeweils als Inverter geschaltet sind. Für den Quarzoszillat-
tor werden lediglich zwei der Inverter in Verbindung mit dem
Quarz benötigt. Mit dem Trimmkondensator T1 kann die
Generatorfrequenz in engen Grenzen eingestellt werden. Die
restlichen beiden Inverter entkoppeln das Rechtecksignal des
Oszillators.

Mit dem Trimpotentiometer P1 und dem Trimmkondensat-
or T2 kann die Signalform eingestellt werden. Mit Hilfe des
IC 74123, das zwei nachtriggerbare monostabile Multivibrato-
ren enthält, wird ein Triggersignal erzeugt, mit dem das
Oszilloskop extern getriggert werden kann. Da der Ausgang
des Quarzoszillators mit dem Nachtriggereingang eines
Monoflops verbunden ist, hat dieser Triggerimpuls eine feste
Phasenbeziehung zur Rechteckspannung.

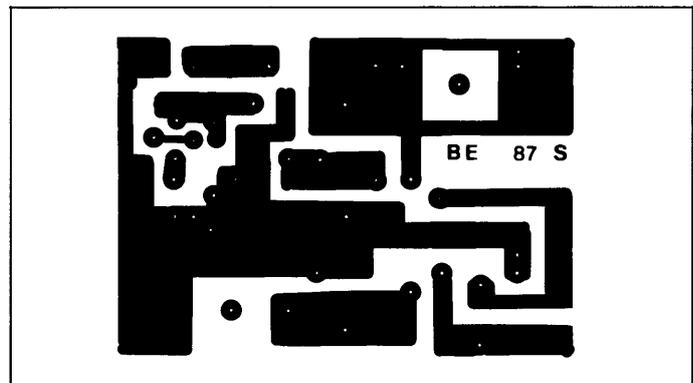


Abb. 49: Platinenvorlage Lichtempfänger E

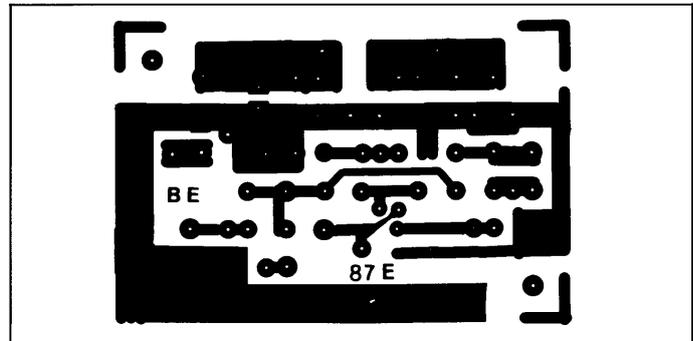


Abb. 50: Platinenvorlage Lichtsender S

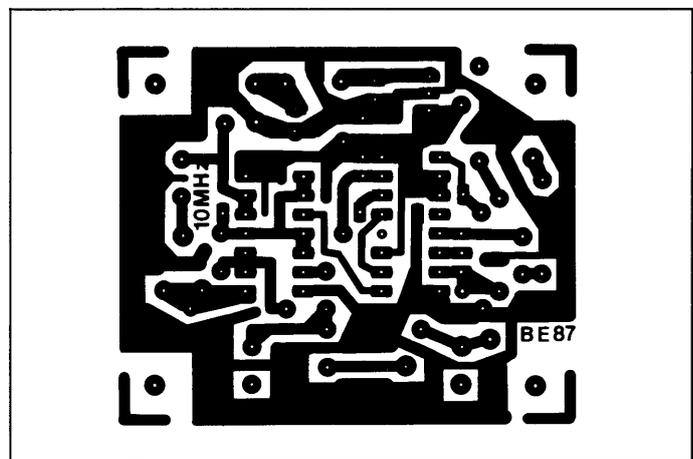


Abb. 51: Platinenvorlage Quarzgenerator 10 MHz

Das zweite Monoflop dient zur Verschiebung des Rechteck-
signals auf dem Oszilloskopschirm. Dazu kann die Zeit-
konstante dieses Monoflops mit Hilfe des Spindeltrim-
mers P2 eingestellt werden.
Der Spannungsregler 78L05 erzeugt die zum Betrieb der bei-
den IC erforderliche Spannung von 5 V. Die maximale Ein-
gangsspannung des Spannungsreglers darf 20 V betragen, so
daß eine gemeinsame Spannungsquelle für den Betrieb von
Rechteckgenerator und Lichtempfänger genügt. Die Diode
1N 4148 dient als Verpolungsschutz.

**6 Lichtgeschwindigkeitsmessung im Physikali-
schen Praktikum**

Die Lichtgeschwindigkeitsmessung (bei großen Laufstrecken
in Luft bzw. im Glasfaserkabel) wurde von Schülern im Rah-
men des Physikalischen Praktikums mit dem Versuchsgerät
ohne Schwierigkeiten durchgeführt.

Name: _____

Datum: _____

Physikpraktikum 13/1: Messung der Lichtgeschwindigkeit mit Lichtimpulsen

Geräte:

1 Gerät zur Lichtgeschwindigkeitsmessung mit Lichtimpulssender und Lichtimpulsempfänger; 1 Netzgerät SÜ (20 V =; 6 V ~) Oszilloskop HM605; 3 BNC-Kabel (ca. 50 cm); 2 Experimentierkabel; 1 Linse $f = 20$ cm \varnothing 12 cm; 2 Reflektoren (Katzenaugen); 1 Schirm weiß; 3 Tischklemmen; 3 Stativstäbe (ca. 15 cm); 1 Maßband 50 m

Versuchsziel:

Messung der Lichtgeschwindigkeit in Luft mit der Lichtimpulsmethode

Vorbereitende Hausaufgaben:

1. Geschichte der Messung der Lichtgeschwindigkeit:
 - a) Meßversuche von Galilei (1564–1642)
 - b) Astronomische Methode (Ole Römer 1644–1710; 1675)
 - c) Zahnradmethode Fizeau (1849)
 - d) Drehspiegelmethode Foucault (1819–1868; 1850)
2. Lichtgeschwindigkeit in Materie; Dispersion des Lichtes
3. Lichtgeschwindigkeit und Brechungsindex
4. Stahlgang bei Linse, Prisma und Tripelspiegel (Katzenauge)
5. Aufbau und Funktionsweise von Leuchtdiode und Fotodiode
6. Funktionsweise eines Oszilloskops. Wirkungsweise eines Oszilloskops als Zeitmesser

Versuchsbeschreibung:

Der Lichtimpulssender erzeugt (durch periodische Entladung eines Kondensators über eine rotleuchtende Leuchtdiode) Lichtimpulse von ca. 40 ns Dauer. Die Wiederholfrequenz der Lichtimpulse beträgt ca. 10 kHz.

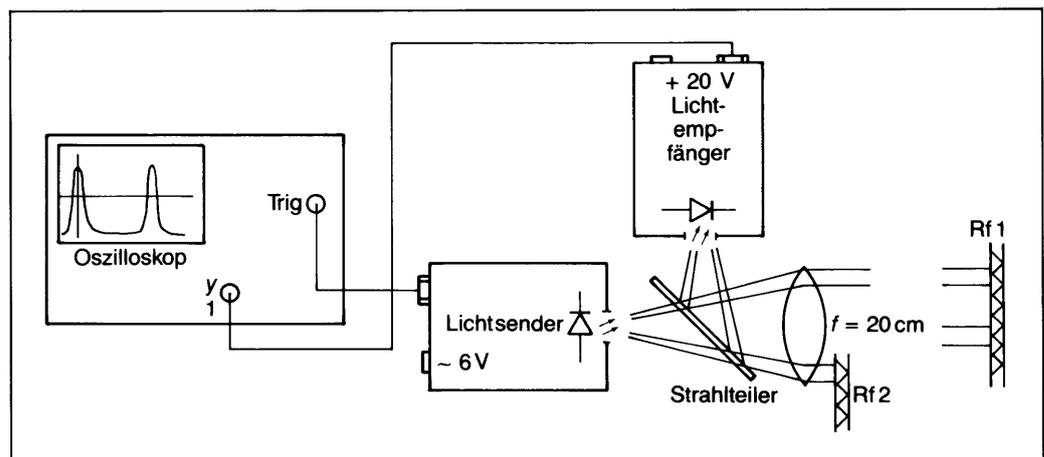
Die Leuchtdiode sitzt im Brennpunkt einer Linse mit einer Brennweite von $f = 20$ cm. Somit verlaufen die Lichtstrahlen hinter der Linse parallel. Sie treffen in einigen Metern Entfernung auf einen Reflektor (Katzenaugen) und werden von diesem in sich selbst zurückreflektiert.

Ein Strahlteiler sorgt dafür, daß die Lichtstrahlen auf dem Rückweg in die Fotodiode des Lichtempfängers gelangen, wobei die Fotodiode ebenfalls im Brennpunkt der Linse sitzt und somit von möglichst viel Licht getroffen wird.

In der Fotodiode werden die Lichtimpulse in elektrische Impulse umgewandelt und können dann auf dem Schirm des Oszilloskops dargestellt werden.

Zur Messung der Lichtgeschwindigkeit wird der Reflektor Rf2 direkt hinter die Linse gebracht und die Lage des Impulses auf dem Schirm des Oszilloskops bestimmt. Dann wird der Reflektor Rf1 freigegeben. Auf dem Schirm des Oszilloskops sind jetzt zwei Impulse zu sehen. Der Lichtimpuls muß bis zum Reflektor Rf1 einen längeren Weg zurücklegen. Er braucht dazu länger und ist deshalb auf der Zeitachse des Oszilloskops nach rechts verschoben. Aus der Zeitdifferenz (die sich aus der Verschiebung des Impulses auf dem Schirm ergibt) und der Wegdifferenz (die sich aus dem Abstand der beiden Reflektoren ergibt) kann jetzt die Lichtgeschwindigkeit in Luft bestimmt werden.

Versuchsaufbau:



Versuchsdurchführung und Auswertung:

Die Versuchsanordnung mit Lichtimpulssender und Empfänger, Strahlenteiler, Linse, evtl. Faltspiegel und Reflektor 1 wird vom Lehrer aufgebaut und justiert. Das Oszilloskop wird vom Lehrer eingestellt und die Bedienung erläutert.

1. An den Lichtsender wird eine Wechselspannung von $6\text{ V} \sim$, an den Empfänger eine Gleichspannung von max. $20\text{ V} =$ angelegt.
2. Auf dem Schirm erscheint der verschobene Lichtimpuls, der die Strecke vom Sender zum Reflektor 1 (evtl. über den Faltspiegel) und zurück zurückgelegt hat.
3. Direkt hinter die Linse wird ein zweiter Reflektor 2 (Katzenauge) in den Strahlengang eingeschwenkt. Auf dem Schirm des Oszilloskopes sind jetzt unverschobener Lichtimpuls (gelangt vom Sender direkt in den Empfänger) und verschobener Lichtimpuls (legt die Strecke Δs siehe unter 2. zurück) zu sehen. Unverschobener und verschobener Lichtimpuls sollen auf dem Bildschirm gleiche Höhe haben. Reflektor 2 ist entsprechend in den Strahlengang einzu-schwenken.
4. Das Maximum des unverschobenen Lichtimpulses muß auf eine cm-Rasterung in der linken Bildhälfte fallen (evtl. Regulierung mit Drehknopf x -Position am Oszilloskop).
5. Die Laufzeitdifferenz Δt zwischen den beiden Impulsen wird nun mit Hilfe des cm-Rasters ($1/10\text{ mm}$ schätzen) auf dem Bildschirm bestimmt.
6. Aus dem Abstand der beiden Reflektoren wird die halbe Laufstreckendifferenz $\Delta s/2$ der Lichtimpulse bestimmt (Maßband).
7. Aus der Laufstrecke und der Laufzeit wird die Lichtgeschwindigkeit in Luft bestimmt. Vergleich mit dem Literaturwert und Angabe des prozentualen Fehlers.

Zusatzversuch:

Messung der Lichtgeschwindigkeit in Lichtleitern und Bestimmung des Brechungsindex des Lichtleitermaterials. Der Lichtleiter wird zwischen Sendediode und Empfängerdiode gehalten. Die Messung erfolgt weiter wie unter 4. bis 7. beschrieben. Der Brechungsindex des Lichtleiters ergibt sich dann aus dem Brechungsgesetz. Steht eine Infrarotleuchtdiode zur Verfügung, können entsprechende Versuche mit Infrarotlicht durchgeführt werden.

Es ist sicher von hohem didaktischem Wert, wenn die Schüler diesen grundlegenden Versuch zur c -Messung auf leichtverständliche Art und Weise selbst durchführen können. Bei der c -Messung in durchsichtigen Medien lernt der Schüler neben grundlegenden physikalischen Gesetzen der Lichtausbreitung einiges über neue Techniken der Informationsübertragung durch Licht im Glasfaserkabel.

Zur Vorbereitung auf den Versuch wurde den Schülern ca. eine Woche vor der Versuchsdurchführung die folgende Versuchsanleitung ausgehändigt.

Sorgfältig experimentierenden Schülern gelingt sicher auch die c -Messung in Stäben oder Flüssigkeitssäulen, wenn der Versuch vom Lehrer aufgebaut und justiert wird.

Literatur

- [1] E. Kagerer; Messung der Lichtgeschwindigkeit nach der Impulsmethode; PdN-Ph Heft 7/77
- [2] J. Kahra; Ergänzungen zum Erfahrungsbericht über die Messung der Lichtgeschwindigkeit mit elektronischen Mitteln; PdN-Ph Heft 7/77
- [3] E. Kagerer; Messung der Lichtgeschwindigkeit nach der Impulsmethode; PdN-Ph Heft 8/78
- [4] J. Kahra; Erfahrungen mit der Messung der Lichtgeschwindigkeit nach der Impulsmethode; PdN-Ph Heft 8/78
- [5] P. Ganz, R. Hagner; Ein anschauliches Verfahren zur Messung der Lichtgeschwindigkeit; PdN-Ph Heft 11/80
- [6] J. Kahra; Messung der Lichtgeschwindigkeit im Wasser mit optoelektronischen Mitteln; PdN-Ph Heft 4/82
- [7] P. Ganz, R. Hagner; Ein anschauliches Verfahren zur Messung der Lichtgeschwindigkeit — Nachtrag; PdN-Ph Heft 7/82

- [8] J. Kahra; Praktische Winke. Eine neue, sehr lichtstarke LED; PdN-Ph Heft 10/82
- [9] E. Kagerer; Nadelimpulse auf Koaxial-Kabeln; PdN-Ph Heft 1/84
- [10] E. Kagerer; Versuche mit extrasuperhellen Leuchtdioden; PdN-Ph Heft 3/85
- [11] H. Weidner; Reflexionsversuche mit elektromagnetischen Wellen; PdN-Ph Heft 3/85
- [12] P. Ganz, R. Hagner; Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht in Medien nach der Laufzeitmethode; PdN-Ph Heft 6/36 (1987)
- [13] B. Ehret; Fortpflanzung und Reflexion von Nadelimpulsen auf einem Koaxialkabel; PdN-Ph. 1/40 (1991)

Bezugsquellen

- (1) Völkner electronic, 33 Braunschweig, Postfach 5320 (Elektronische Bauteile, Montagematerial, Gehäuse, Lichtwellenleiter, Glasfaserkabel, Reflexspiegel)
- (2) Conrad Electronic, 8452 Hirschau, Klaus-Conrad-Str. 1 (Elektronische Bauteile, Montagematerial, Gehäuse, Lichtwellenleiter, Reflexspiegel, Infrarot-LED, farbige LED's hoher Leuchtstärke ca. 200 mcd, rote LED's sehr preiswert 500 mcd und 1000 mcd)
- (3) Elite Elektronik, 8019 Steinhöring, Postfach 40 (Sende-LED rot 500 mcd und 1000 mcd)
- (4) Bühler elektronik, Postfach 32, 7570 Baden-Baden (Laser-Infrarot-Diode SG 2003/7 RCA)

Platinen und einige wenige Bausätze sind über den Verfasser zu beziehen.

Anschrift des Verfassers:

Bernhard Ehret, Gartenstr. 4/1, 7056 Weinstadt