

Laser und Lichtgeschwindigkeit

Letztes Update: März 2025

Vorbereitung

1. Brechungsgesetz
2. Totalreflexion
3. Lichtausbreitung in Medien (z.B. in Glasfasern)
4. Erzeugung und Eigenschaften von Laserlicht
5. Kohärenz
6. Grundsätzliche Funktionsweise eines Oszilloskops
7. Gefahren durch Laserstrahlung

1 Versuchsbeschreibung

1.1 Der Laser

Der Laser ist seit seiner Erfindung in den 1960er Jahren kaum noch aus unserem Alltag wegzudenken. Im Supermarkt werden an der Kasse die Artikel per Laser eingescannt, und Blu-ray-Player in Konsolen wären ohne Laser nicht möglich. Ohne den Einsatz von Glasfaserkabeln (auch Lichtwellenleiter genannt) wäre moderne Kommunikation undenkbar. Auch in der Medizin spielt der Laser eine wichtige Rolle, zum Beispiel in den Bereichen:

- Ophthalmologie (Behandlung von Augenerkrankungen und Fehlsichtigkeiten)
- Dermatologie (Haut- und Gefäßerkrankungen)
- Zahnmedizin (z. B. bei der Karies-Therapie)
- Minimal-invasive Chirurgie
- Medizinische Forschung (z. B. zur Anregung spezifischer Markerproteine)

1.2 Allgemeines zu Licht

Licht kann als elektromagnetische Welle oder als Teilchen (Photonen) beschrieben werden. Jede dieser Beschreibungen liefert Antworten auf das Verhalten von Licht in verschiedenen Situationen. Zunächst betrachten wir die Wellennatur des Lichtes.

Eine wichtige Eigenschaft ist hierbei die Wellenlänge λ . Diese erstreckt sich von mehreren Metern im Radiobereich bis hin zu Bruchteilen eines Atomdurchmessers im Gammastrahlungsbereich. Ein Überblick über das gesamte elektromagnetische Spektrum ist in Abbildung 1 dargestellt.

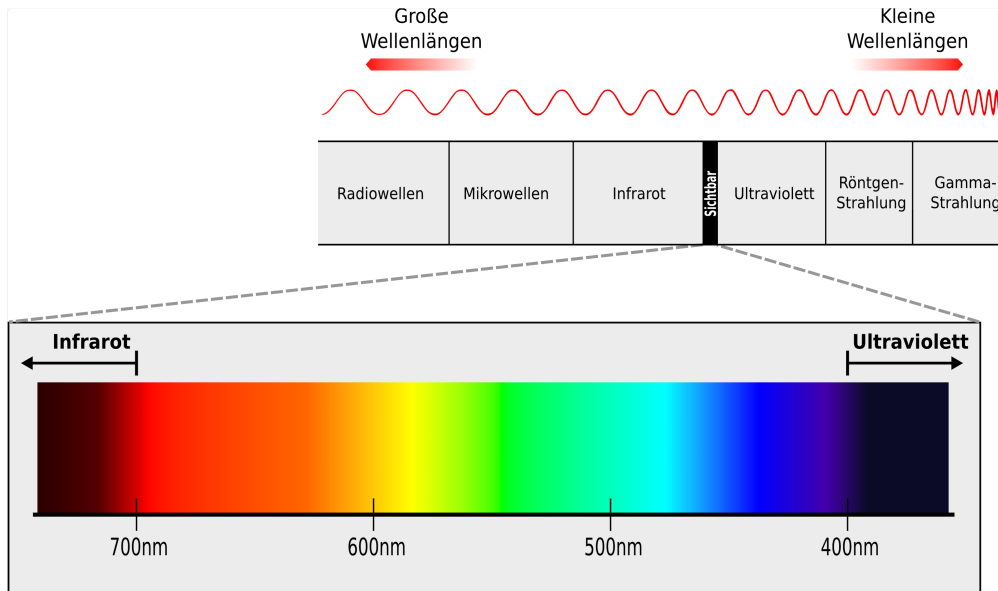


Abbildung 1: Illustration des elektromagnetischen Spektrums.

Der sichtbare Spektralbereich für das menschliche Auge ist nur ein kleiner Teilbereich zwischen 400 nm und 750 nm Wellenlänge ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Deutlich kleinere Wellenlängen werden als Röntgenstrahlung bzw. Gammastrahlung ($< \text{pm} = 10^{-12} \text{ m}$) bezeichnet. Infrarot- und Mikrowellenstrahlung hingegen, liegen im höheren Wellenlängenbereich (μm bis mm). Das Schlusslicht bilden hier die Radiowellen mit Wellenlängen von einigen cm bis hin zu mehreren Metern.

Aus der **Wellenlänge** λ und der **Schwingungsfrequenz** f , lässt sich direkt die Ausbreitungsgeschwindigkeit, hier als die **Lichtgeschwindigkeit** c berechnen:

$$c = \lambda \cdot f \quad (1)$$

Mit den Welleneigenschaften können insbesondere Effekte beschrieben werden, die durch die Überlagerung von (Licht)wellen zustande kommen. Hierzu zählen Beugungs- und Interferenzeffekte (*Young'sches Doppelspaltexperiment*).

Wie bereits erwähnt, lassen sich nicht alle physikalischen Phänomene rein mit dem Wellenbild vom Licht erklären¹. Phänomene, die eher mit dem Teilchencharakter von Licht beschrieben werden können, sind beispielsweise der Photoeffekt oder die Schwarzkörperstrahlung (*Plancksches Strahlungsgesetz*). Lichtteilchen werden Photonen genannt, und die Energie E eines Photons hängt mit der Frequenz bzw. der Wellenlänge wie folgt zusammen:

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2)$$

Hierbei bezeichnet h das **Plancksche Wirkungsquantum** ($h \approx 6.63 \times 10^{-34} \text{ J s} = 4.14 \times 10^{-15} \text{ eV s}$)

1.3 Laserlicht

Licht, welches von thermischen Lichtquellen stammt (Sonne, Glühbirne, Halogenlampe) ist unpolarisiert, praktisch inkohärent, besitzt ein breites Wellenlängenspektrum und wird mehr oder weniger gleichmäßig in alle Raumrichtungen abgestrahlt. Laserlicht hingegen hat gänzlich andere Eigenschaften. Es ist monochromatisch, polarisiert und zeitlich wie räumlich kohärent.

⁰Leifiphysik (2025) *Joachim Herz Stiftung*. [Online; Zugriff 24-Januar-2025]. <https://www.leifiphysik.de/optik/elektromagnetisches-spektrum/grundwissen/sichtbares-licht>

¹Diese scheinbare "Dualität" des Lichts als Welle und Teilchen ist ein Artefakt der Beschreibung im Sinne der klassischen Physik. Die sogenannte **Quanten Feld Theorie (QFT)** vereinigt diese beiden Konzepte zu einer einheitlichen Beschreibung. Bei Interesse, fragen Sie den Betreuer.

Die Grundlagen für die Besonderheit des Laserlichts findet man in der Quanten- und Atomphysik. Im Bohrschen Atommodell befinden sich die Elektronen auf festen „Bahnen“ um den positiv geladenen Atomkern ².

Die Elektronen können hierbei nicht beliebig Energie aufnehmen, sondern sie können nur zwischen festen Niveaus übergehen. Das niedrigste Energieniveau bezeichnet man gängigerweise als **Grundzustand**. Wird nun ein Elektron auf einen höheren Energiezustand gehoben (z.B. durch Stöße oder durch Anregung mit Photonen), spricht man von einem **angeregten Energieniveau**.

Betrachten wir zur Illustration ein System/Atom mit zwei Energieniveaus mit Energie E_1 (Grundzustand) und E_2 (angeregtes Energieniveau). Der energetische Unterschied zwischen dem Grundzustand und dem angeregten Energieniveau entspricht einer bestimmten Energie (bzw. Wellenlänge, siehe Gleichung 2).

Nur ein Photon mit genau dieser Energie $E_p = E_2 - E_1$ kann das Elektron in den angeregten Zustand heben. Diesen Prozess nennt man Absorption und ist in Abbildung 2 (a) illustriert. Das Photon gibt hierbei seine Energie an das Elektron ab und wird damit vernichtet. (Dies geschieht im Übrigen unter Energie- Impuls- und Drehimpulserhaltung!). Ganz allgemein kann man formulieren, dass ein Photon mit der passenden Energie $E_2 - E_1$ immer einen Übergang des Elektrons zwischen den beiden Zuständen induziert. Da sich normalerweise („thermisches Gleichgewicht“) das Elektron im Grundzustand befindet, führt der Prozess typischerweise zu einer Absorption des Photons.

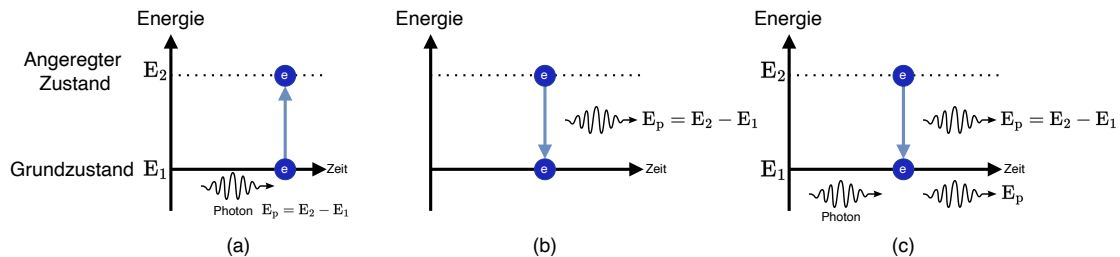


Abbildung 2: Illustrierung der Absorption eines Photons (a), der spontanen Emission (b) und der stimulierten Emission eines zusätzlichen Photons (c) in einem System mit zwei Energieniveaus.

Ohne äußeren Einfluss kann das Elektron nach kurzer Zeit schon wieder von alleine („spontan“) in den Grundzustand zurückkehren. Die Energiedifferenz wird hierbei wieder als Photon frei, $E_2 - E_1 = hf$.

Wenn allerdings das Elektron noch im angeregten Zustand ist während das Photon eintrifft, erfährt das Elektron eine „stimulierte Emission“ (vgl. Abbildung 2 (b)), wobei es in den Grundzustand übergeht und ein identisches zum eintreffenden Photon emittiert. Beide Photonen besitzen damit die gleiche Ausbreitungsrichtung und Polarisation.

Durch den Prozess der stimulierten Emission ist es also möglich, Licht (einer bestimmten Energie bzw. Wellenlänge) zu verstärken, indem man ein Medium mit angeregten Elektronenzuständen bereitstellt. Um daraus einen Laser zu bauen, muss man noch für eine geeignete Rückkopplung sorgen. Im einfachsten Fall stellt man dieses Medium zwischen zwei Spiegel, sodass die erzeugten Photonen immer wieder durch das verstärkende Medium laufen können und in diesem Resonator weitere „identische“ Photonen erzeugen. Wählt man einen Spiegel teildurchlässig, kann ein Teil der im Resonator umlaufenden Photonen diesen verlassen (vgl. Abbildung 4).

Tatsächlich erreicht man in einem Zwei-Niveau-System wie in Abbildung 2 bestenfalls, dass Absorption und stimulierte Emission gleich häufig sind – das Material wird also höchstens transparent. Verstärkung tritt erst auf, wenn im angeregten Zustand mehr Elektronen sind als im

²Das Bohrsche Atommodell ist hierbei eine Vereinfachung der sog. Atomorbitale aus der Quantenmechanik, welche die Aufenthaltswahrscheinlichkeiten der einzelnen Elektronen für ein Atom darstellen.

Grundzustand. Man spricht dann von **Besetzungsinversion**. Um diese zu erreichen, benötigt man mindestens drei Niveaus, wie in Abbildung 3 dargestellt.

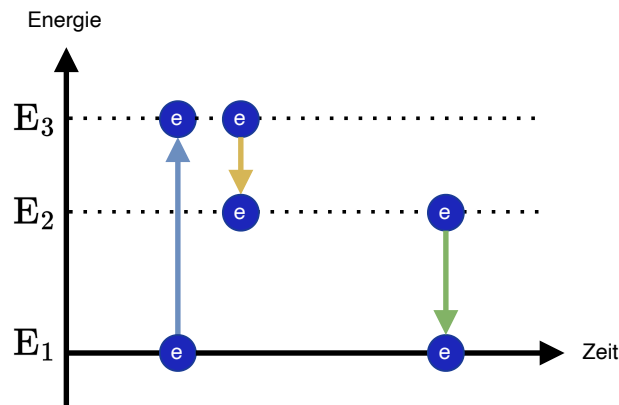


Abbildung 3: Illustration eines Drei-Niveau Systems.

Die Elektronen befinden sich zunächst im Grundzustand und werden auf ein drittes, höheres Niveau mit der Energie E_3 angeregt. Dieses Niveau besitzt eine kurze Lebensdauer, nach der die Elektronen in ein stabileres Niveau mit der Energie E_2 übergehen. Dadurch kommt es zu einer höheren Besetzung des Zustands E_2 im Vergleich zu E_1 .

Einfallende Photonen mit der Energie $E_p = E_2 - E_1$ bewirken also stimulierte Emission und werden somit verstärkt. Dazu müssen natürlich kontinuierlich Elektronen über den Zustand mit der Energie E_3 nachgeliefert werden. Dies geschieht durch externes „**Pumpen**“ von E_1 nach E_3 . Der Pumpprozess kann ebenfalls durch Licht, durch Stöße in einem Plasma oder, wie im Halbleiterlaser, durch elektrischen Strom erreicht werden.

1.4 Aufbau eines Lasers

Die wesentlichen Bestandteile eines Lasers sind demnach das aktive Lasermaterial, welches die Verstärkung liefert, der Resonator für die Rückkopplung der Laserphotonen und die „Pumpe“ für die Besetzungsinversion. Zum Anstoßen der Laserstrahlung genügt im Prinzip ein Photon, welches in Richtung der Spiegel emittiert wurde. Der Prozess der kontinuierlichen Verstärkung durch stimulierte Emission zusammen mit der gerichteten Rückkopplung im Resonator führt innerhalb kürzester Zeit zur Ausbildung eines räumlich gerichteten, kohärenten, monochromatischen und intensiven Laserstrahls.

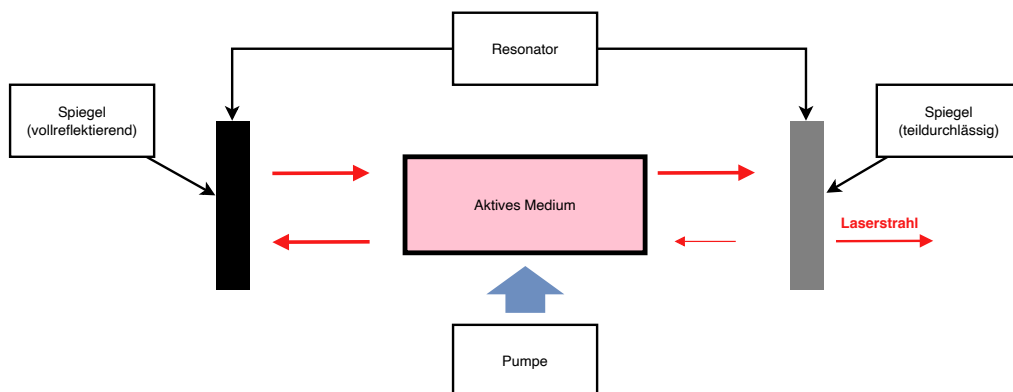


Abbildung 4: Schematischer Aufbau eines Lasers. Der linke Spiegel besitzt ein Reflexionsvermögen von nahezu 100 %, während der rechte Spiegel teildurchlässig ist und so für die Auskopplung des Laserstrahls sorgt.

1.5 Laserschutz

Die starke, gerichtete und sehr schmalbandige Strahlung von Lasern ist andererseits auch gefährlich, vor allem für das Auge, mit stärkerer Leistung aber auch für die Haut. Daher werden Laser grob in vier Klassen eingeteilt, die das Gefährdungspotential angeben.

- **Klasse I:** Laserstrahlung ist in allen Anwendungen ungefährlich.
- **Klasse II:** Zugängliche Laserstrahlung ist sichtbar und hat eine Leistung kleiner als 1 mW und ist für eine Einwirkzeit $t < 0.25\text{ s}$ ungefährlich für das Auge (Augenlidschlussreflex).
- **Klasse III:** Laserstrahlung (bis zu 500 mW) ist gefährlich für das Auge. Schutzmassnahmen sind erforderlich.
- **Klasse IV:** Hochleistungs-Laserstrahlung ($> 0.5\text{ W}$), die irreparable Schäden am Auge und schwere Schädigungen der Haut verursachen kann, sowohl bei direkter Einwirkung als auch bei diffuser Reflexion. Hier sind neben technischen auch spezielle persönliche Schutzmaßnahmen erforderlich, um sicheres Arbeiten zu gewährleisten.

Laser der Klassen III und IV dürfen nur von entsprechend unterwiesenem Personal mit entsprechender Schutzausrüstung (Laserbrillen) betrieben werden.

Die im Versuch verwendeten gepulsten Laserdioden fallen allerdings unter die Klasse I und sind im Betrieb ungefährlich.

1.6 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abbildung 5 dargestellt. Eine Laserdiode wird durch einen Pulsgenerator gesteuert und emittiert in festen Abständen kurze Lichtpulse bei einer Wellenlänge von $\lambda = 650\text{ nm}$. Über einen Strahlteiler (engl. Beamsplitter) wird ein Teil des Lichtes auf den ersten Detektor (**Referenz**) gelenkt. Der andere Teil des Pulses legt über eine Spiegelstrecke einen längeren Weg zurück, bis er auf den zweiten Detektor (**Signal**) trifft. Beide Detektorsignale können am Oszilloskop beobachtet werden. In den Strahlengang können weiterhin eine Plexiglasplatte bzw. ein mit Wasser gefüllter Behälter eingeführt werden.

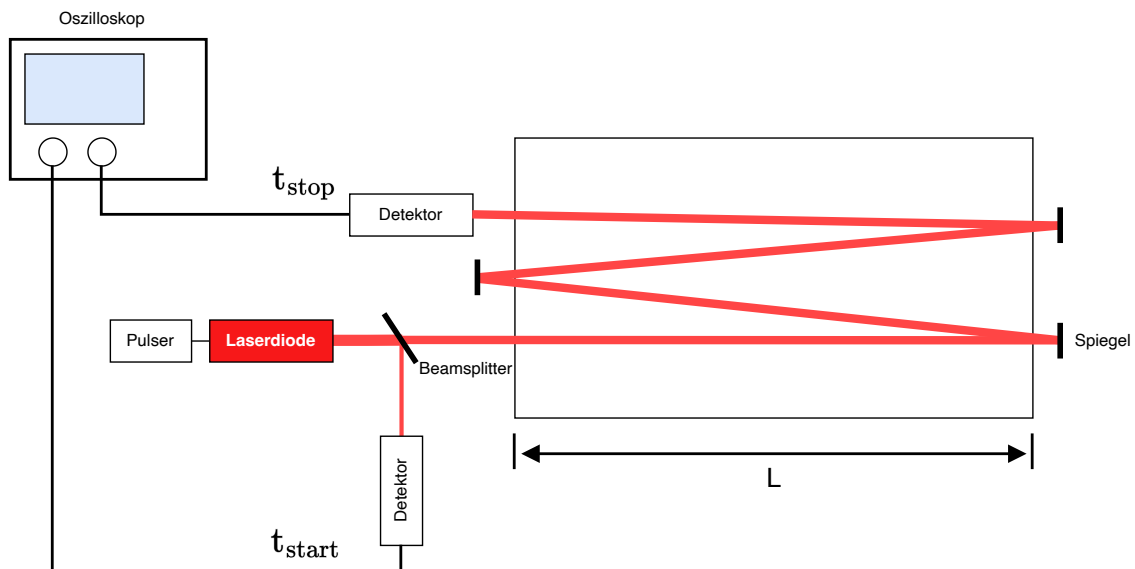


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.

2 Aufgaben

2.1 Charakterisierung des Laserdiodensignals

Machen Sie sich zunächst mit der Funktion des Oszilloskops vertraut und messen Sie mit dem Referenzdetektor am Oszilloskop die:

- **Anstiegszeit** t_{rise} von 10% auf 90% der Peakintensität,
- **Abfallzeit** t_{fall} von 90% auf 10% der Peakintensität,
- **Pulsdauer** T von 50% (steigende Flanke) auf 50% (fallende Flanke) der Intensität,
- **Pulsfrequenz** f der Pulse.

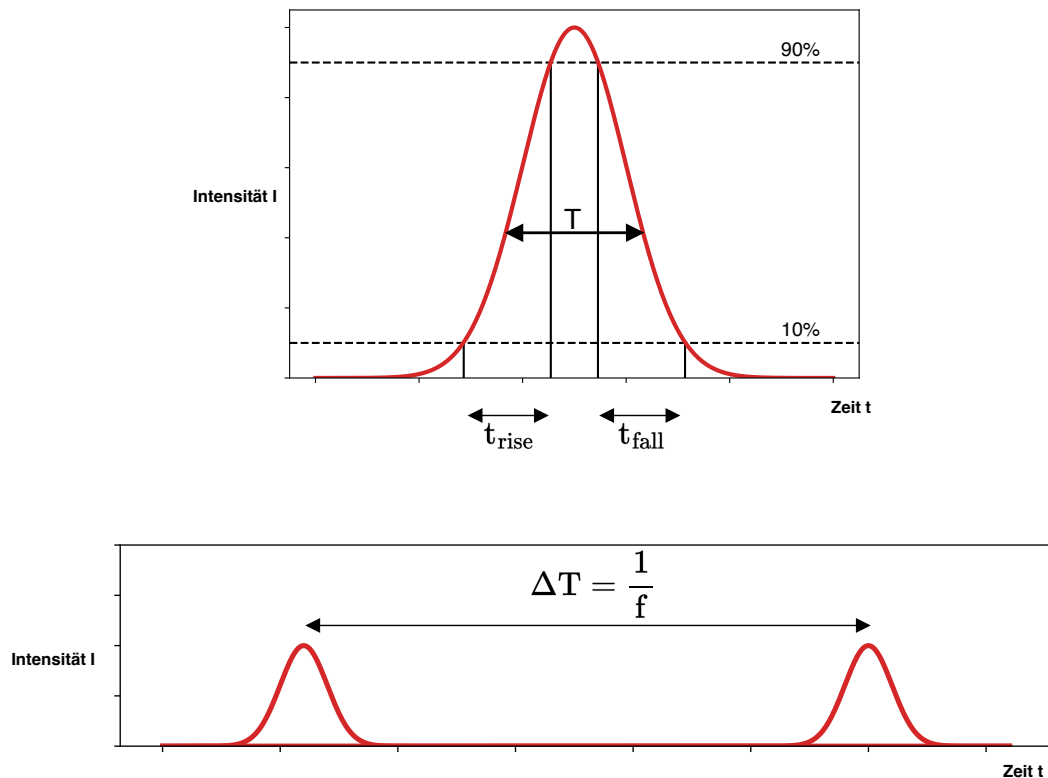


Abbildung 6: Illustration der wichtigen Parameter des Laserdiodensignals für einen Puls (oben) und zwischen zwei aufeinanderfolgenden Pulsen (unten).

Überlegungen:

Welche Zeitauflösung ist mit diesem Versuchsaufbau zu erreichen? Was schränkt die zeitliche Auflösung ein?

2.2 Leistungsmessung

Messen Sie nun mit dem Laser-Leistungsmessgerät die mittlere Leistung der Laserdiode. Bestimmen Sie hieraus die Energie eines Pulses, sowie die Leistung der Diode, wenn diese im Dauerstrichbetrieb laufen würde.

Überlegungen:

Welche andere Quelle trägt zur gemessenen Leistung noch bei? Wie kann man diesen Beitrag ausblenden?

2.3 Laufzeitmessung

Messen Sie die Laufzeit des Laserpulses über eine **Strecke der Länge L** indem Sie die Zeit zwischen den Pulsen am Referenzdetektor und dem Messdetektor auf dem Oszilloskop bestimmen. Berechnen Sie daraus die Lichtgeschwindigkeit und machen Sie eine Fehlerrechnung bzw. Fehlerabschätzung. Wie groß ist die Diskrepanz zum tatsächlichen Wert der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum?

$$c_0 = 299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3)$$

2.4 Lichtausbreitung in Plexiglas bzw. Wasser

Beim Übergang von Luft (bzw. Vakuum) in ein Medium mit **Brechungsindex n** tritt aufgrund der veränderten Ausbreitungsgeschwindigkeit Brechung (und Reflexion) auf. Aus der Messung der Lichtgeschwindigkeit im Medium kann daher dessen Brechungsindex bestimmt werden.

Führen Sie entsprechende Messungen (wie in 2.3) in Wasser/Plexiglas durch. Bestimmen Sie die entsprechenden Lichtgeschwindigkeiten in Wasser/Plexiglas und berechnen Sie die dazugehörigen Brechungsindizes.

2.5 Totalreflexion

Machen Sie sich mit Hilfe des Prismas den Effekt der Totalreflexion klar. Unter welchem Winkel tritt Totalreflexion auf?

2.6 Polarisation

Stellen Sie mithilfe des Polarisators fest, ob bzw. in welche Richtung die Laserstrahlung polarisiert ist.

2.7 Lichtleitung in Glasfasern

Versuchen Sie, mithilfe des Objektivs das Laserlicht in die Glasfaser einzukoppeln. Platzieren Sie das andere Ende der Faser vor dem zweiten Detektor und bestimmen Sie die Verzögerungszeit. Berechnen Sie daraus die Faserlänge (Brechungsindex von Quarzglas: $n = 1.458$).