

Laser und Lichtgeschwindigkeit

Vorbereitung:

Brechungsgesetz, Totalreflexion, Lichtausbreitung in Medien (z.B. in Glasfasern), Erzeugung und Eigenschaften von Laserlicht, Kohärenz, Funktionsweise eines Oszilloskops (siehe Versuch Oszilloskop und elektrische Schwingungen), Gefahren durch Laserstrahlung

1 Versuchsbeschreibung:

1.1 Einleitung

Der Laser ist seit seiner Erfindung in 1960er Jahren, kaum noch aus unserem Alltagsleben wegzudenken. Im Supermarkt werden an der Kasse die Artikel per Laser eingescannt, CD-, DVD-Brenner/Player würde es ohne Laser nicht geben, ohne den Einsatz von Glasfaserkabeln (auch Lichtwellenleiter genannt) wäre moderne Kommunikation undenkbar. Auch in der Medizin spielt der Laser wichtige Rolle, z. B. in den Bereichen

- Ophthalmologie (Behandlung von Augenerkrankungen und Fehlsichtigkeiten)
- Dermatologie (Haut- und Gefäßerkrankungen)
- Zahnmedizin, bei der Karies-Therapie
- minimal-invasive Chirurgie
- medizinische Forschung, zur Anregung spezifischer Markerproteine

1.2 Allgemeines zu Licht

Licht kann als elektromagnetische Welle beschrieben werden. Der sichtbare Spektralbereich für das menschliche Auge ist nur ein kleiner Teilbereich mit der Lichtwellenlänge von 400 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) bis 750 nm. Deutlich kleinere Wellenlängen ($\approx \text{nm}$) werden als Röntgenstrahlung bzw. Gammastrahlung ($< \text{pm}$ [$=10^{-12} \text{ m}$]) bezeichnet. Infrarot- und Mikrowellenstrahlung liegen dagegen im höheren Wellenlängenbereich (μm bis mm). Das Produkt aus Wellenlänge λ und Schwingungsfrequenz f ergibt die Ausbreitungsgeschwindigkeit, hier also die Lichtgeschwindigkeit c

$$c = \lambda \cdot f$$

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*). Nicht alle physikalischen Phänomene können aber mit dem Wellenbild vom Licht erklärt werden. 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

$$E = h \cdot f = hc/\lambda$$

h bezeichnet das Plancksche Wirkungsquantum ($h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} = 4.14 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$).

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.

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. Die Elektronen können nicht beliebige Energie aufnehmen, sondern sie können nur zwischen festen

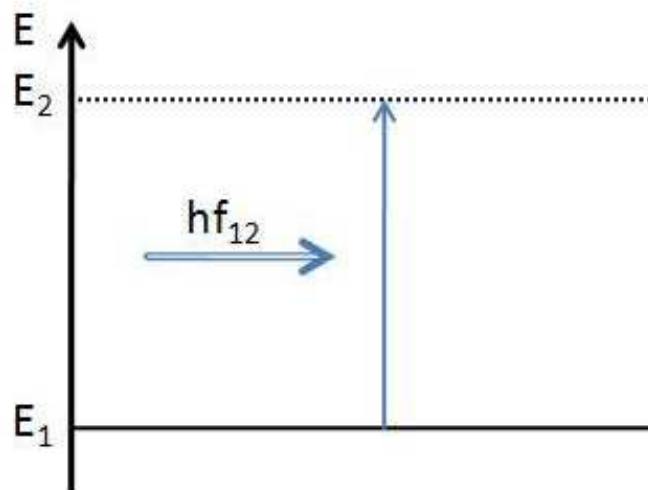


Abbildung 1: Absorption eines Photons mit der Energie $hf_{12} = E_2 - E_1$.

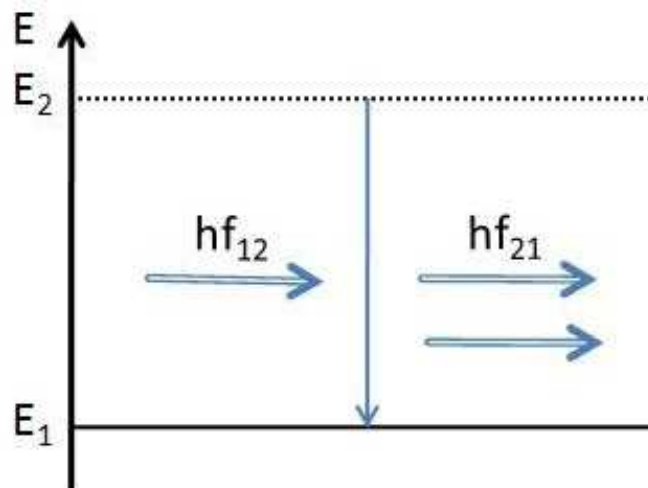


Abbildung 2: Stimulierte Emission: Ein ankommendes Photon hf_{12} stimuliert den Elektronenübergang in den Grundzustand. Am Schluß gibt es 2 Photonen mit der Energie $hf_{12} = E_2 - E_1$.

Niveaus übergehen. Das niedrigste Energieniveau bezeichnet man Grundzustand. Wird nun ein Elektron auf eine höher gelegene Bahn gehoben (z.B. durch Stöße oder durch Anregung mit Photonen), spricht man von einem angeregten Energieniveau. Der energetische Unterschied zwischen dem Grundniveau und dem angeregten Energieniveau entspricht einer bestimmten Wellenlänge. Nur ein Photon mit genau dieser Wellenlänge kann das Elektron in den angeregten Zustand heben. Diesen Prozess nennt man Absorption (vgl. Abb 1). Das Photon gibt seine Energie an das Elektron ab und wird damit vernichtet. Nun kann das Elektron aber wieder (spontan) in den Grundzustand zurückgehen. Die dabei frei werdende Energie wird in Form eines Lichtquants (mit genau der gleichen Energie $E = E_2 - E_1 = hf_{12}$) abgegeben. Diesen Prozess nennt man spontane Emission.

Trifft genau so ein Photon auf ein angeregtes Atom kann es nicht absorbiert werden, da das Elektron ja bereits im angeregten Zustand sitzt. Vielmehr sorgt das ankommende Photon dafür, dass das Elektron in den Grundzustand übergeht und dabei ebenfalls ein Photon (mit genau der gleichen Energie!) emittiert. Darüber hinaus besitzen beide Photonen die gleiche Richtung, und Polarisation. Diesen Prozess bezeichnet man stimulierte Emission (vgl. Abb. 2).

Mit der stimulierten Emission ist es also möglich, Licht (einer bestimmten Wellenlänge) zu verstärken, indem man ein Medium mit angeregten Elektronenzuständen bereitstellt. Um daraus einen Laser zu machen, muss man noch für eine geeignete Rückkopplung sorgen. Im einfachsten Fall stellt man dieses Medium

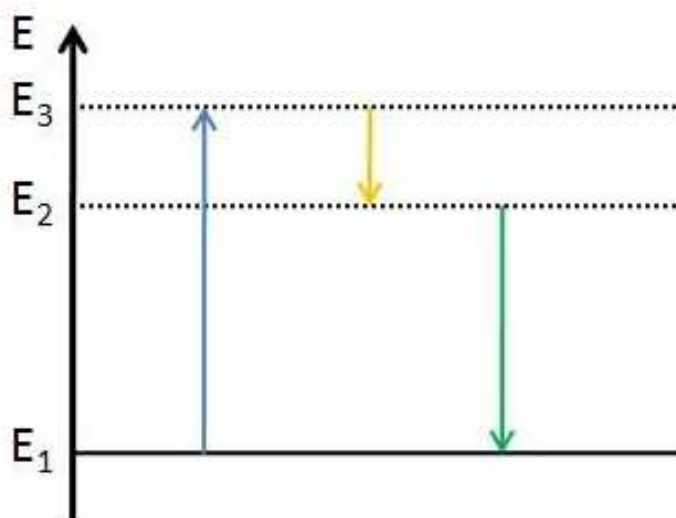


Abbildung 3: 3-Niveau System

zwischen 2 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. Abb. 4).

Tatsächlich erreicht man in einem 2-Niveau-System wie in Abb. 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 Grundzustand, man spricht von Besetzungsinversion. Um diese zu erreichen, benötigt man mindestens drei Niveaus (siehe Abb. 3). Die Elektronen im Grundzustand werden zunächst in ein höheres Niveau (E_3) angeregt. Dieses besitze eine kurze Lebensdauer, nach der die Elektronen in das Niveau E_2 (mit längerer Lebensdauer) übergehen. Dadurch kommt es zu einer höheren Besetzung des Zustandes E_2 verglichen mit E_1 . Ankommende Photonen mit der Energie $E = E_2 - E_1 = hf_{21}$ bewirken also stimulierte Emission, werden somit verstärkt. Dazu müssen natürlich kontinuierlich Elektronen über den Zustand E_3 nachgeliefert werden. Dies geschieht durch externes „Pumpen“ von E_1 nach E_3 . Der Pumpprozess kann ebenfalls durch Licht, oder durch Stöße in einem Plasma oder, wie im Halbleiterlaser, durch elektrischen Strom erreicht werden.

1.4 Aufbau eines Lasers

Die wesentlichen Bestandteile eines Laser sind demnach das aktive Lasermaterial, welches die Verstärkung liefert, die Resonatoren 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 Laserstrahl.

1.5 Laserschutz

Die starke, gerichtete und sehr schmalbandige Strahlung von Lasern sind andererseits auch gefährlich, vor allem für das Auge aber auch für die Haut. Daher werden Laser (grob) in 4 Klassen eingeteilt, die das Gefährdungspotential angeben. Laser der Klasse I (Laserstrahlung ist ungefährlich) und II (zugängliche Laserstrahlung ist sichtbar, kleiner als 1 mW und ungefährlich für eine Einwirkzeit $t < 0.25$ s - Lidschlussreflex) können dabei als „ungefährlich“ eingestuft werden, so dass keine besonderen Vorkehrungen getroffen werden müssen. Laser der Klassen III und IV dürfen nur von entsprechend unterwiesenem Personal und mit entsprechender Schutzausrüstung (Laserbrillen) betrieben werden. Die verwendeten (gepulsten) Laserdioden im Versuch fallen unter die Kategorie I.

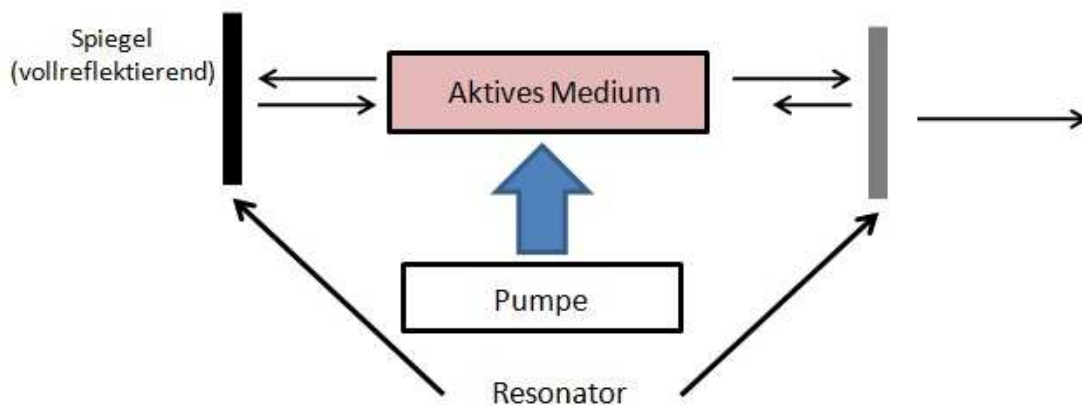


Abbildung 4: Schematischer Aufbau eines Lasers. Der linke Spiegel besitzt ein Reflexionsvermögen von nahezu 100%, während der rechte Spiegel teildurchlässig ist und so für die Auskopplung des Laserstrahls sorgt.

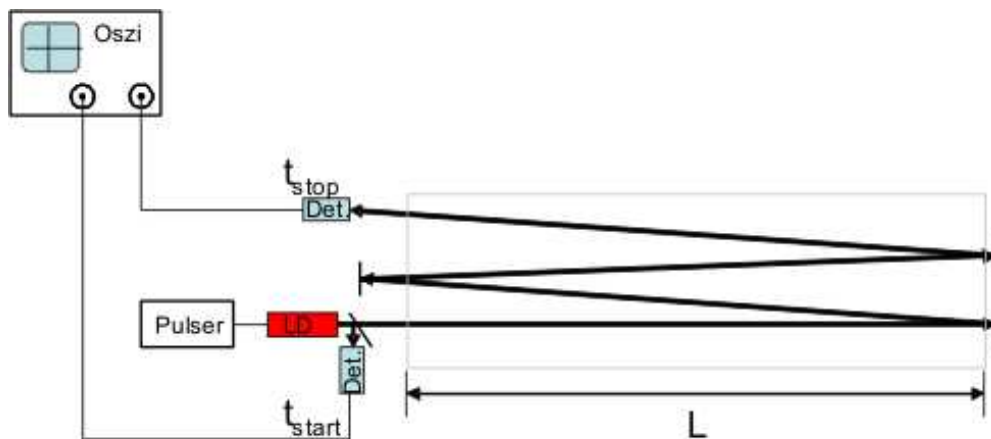


Abbildung 5: Schema des Versuchsaufbaus

1.6 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abbildung 5 dargestellt. Eine Laserdiode wird durch einen Puls-generator gesteuert und emittiert in festen Abständen kurze Lichtpulse bei einer Wellenlänge von $\lambda = 650 \text{ nm}$. Über einen Strahlteiler 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 2. Detektor (Signal) trifft.

Beide Detektorsignale können am Oszilloskop beobachtet werden. In den Strahlengang können weiterhin eine Plexiglasplatte bzw. ein mit Wasser gefüllter Behälter gefahren werden.

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 (10%-90%), die Abfallszeit (90%-10%) und die Pulsdauer (50%-50%) eines Pulses sowie den zeitlichen Abstand zwischen den Pulsen (Pulsfrequenz f_{rep}) wie in Abb. 6 gezeigt. Welche Zeitauflösung ist mit diesem Versuchsaufbau zu erreichen? Was schränkt die zeitliche Auflösung ein?

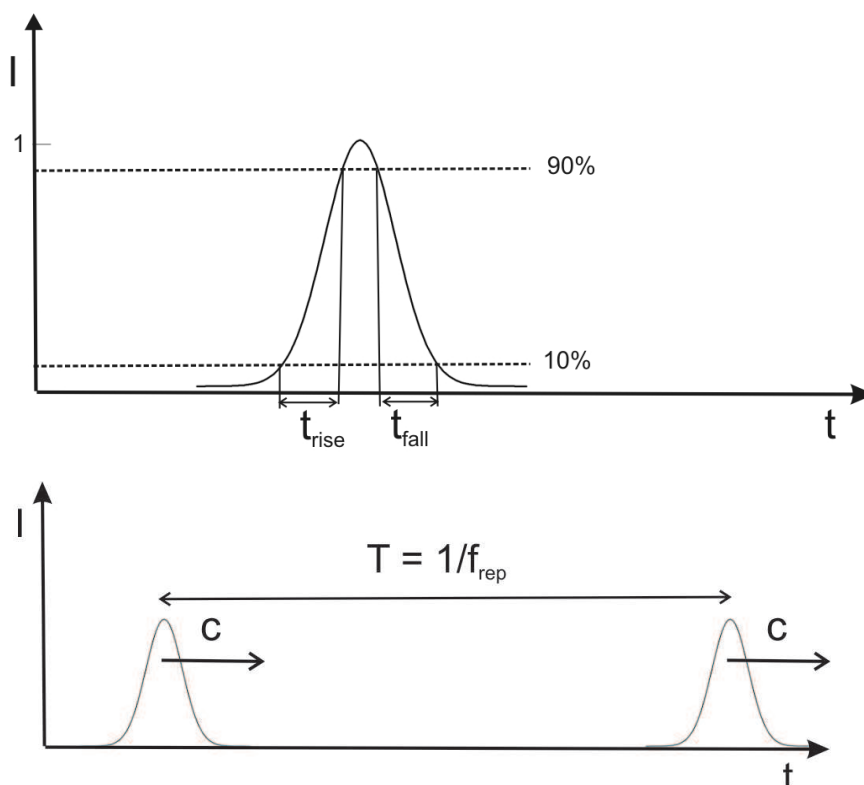


Abbildung 6: Charakterisierung der Pulse

2.2 Leistungsmessung

Messen Sie nun mit dem Laser-Leistungsmessgerät die mittlere Leistung der Laserdiode und bestimmen Sie daraus die Pulsenergie sowie die Leistung der Diode wenn diese im Dauerstrichbetrieb laufen würde.

2.3 Laufzeitmessung

Messen Sie nun die Laufzeit des Laserpulses über eine Strecke der Länge L (Messfehler?) indem Sie die Zeit zwischen den Pulsen am Referenzdetektor und dem Messdetektor auf dem Oszi 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 (absoluter Fehler?)

$$c_0 = 299\,792\,458 \text{ m/s?}$$

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

- Plexiglas
- Wasser

durch. Bestimmen Sie die entsprechenden Lichtgeschwindigkeiten in Wasser und Plexiglas und berechnen Sie die dazugehörigen Brechungsindices.

2.5 Totalreflexion

Machen sie sich mit Hilfe des Prismas den Effekt der Totalreflexion klar. Unter welchem Winkel tritt Totalreflexion auf? Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit dem aus 2.4 a).

2.6 Lichtleitung in Glasfasern

Versuchen Sie mithilfe des Objektivs das Laserlicht in die Glasfaser einzukoppeln. Platzieren Sie das andere Ende der Faser vor dem 2. Detektor und bestimmen Sie die Verzögerungszeit. Berechnen Sie daraus die Faserlänge (Brechungsindex von Quarzglas: $n = 1.458$.)

2.7 Polarisation

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