

Physikalisches Grundpraktikum

Praktikum für Mediziner		
03 Wechselwirkung von Licht und Materie		
Name:	Versuchsgruppe:	Datum:
Mitarbeiter der Versuchsgruppe:		lfd. Versuchs-Nr:

Aufgaben

Vorbereitungsaufgaben:

V-1) Ein Saccharimeter der Rohrlänge $d = 20$ cm enthält eine wässrige Rohrzuckerlösung mit $m = 1$ g Rohrzucker in $V = 100$ cm³ Lösung. Wie groß ist der Drehwinkel α bei Verwendung von gelbem Natrium-D-Licht bei $[\alpha]_D = 66,5^\circ/(\text{dm g})$? Wie verändert sich der Drehwinkel bei Erhöhung der Rohrlänge auf 50 cm, bzw. bei Verdünnung der Lösung auf 5 g pro Liter?

V-2) Wie groß ist die transmittierte Intensität eines linear polarisierten Lichtstrahls durch ein Polarisationsfilter, wenn das Filter um 30° , 45° , 60° und 90° aus der Maximalstellung gedreht wurde?

V-3) Aus einem linear polarisierten Lichtstrahl soll mit Hilfe zweier Polarisationsfilter ein Strahl mit senkrechter Polarisationsrichtung (d.h. einer Drehung von 90°) hergestellt werden. Wie müssen die beiden Polarisationsfilter eingestellt werden, um die höchstmögliche Intensität (nämlich welche?) zu erreichen?

V-4) Durch eine Schicht der Dicke $d=1$ cm einer absorbierenden/streuenden Lösung trete $1/3$ der Intensität eines Lichtstrahls hindurch. a) Welcher Anteil tritt bei Gültigkeit des Lambert-Beerschen Gesetzes durch eine doppelt, bzw. eine halb so dicke Schicht derselben Flüssigkeit? b) Wie muss die Dicke gewählt werden, „Halbwertsdicke“ $d_{1/2}$, damit die Hälfte der Intensität durchgelassen wird? c) Welche Transmission wird bei Reduzierung der Konzentration auf $1/5$ der Ausgangskonzentration erwartet?

Messaufgaben:

M-1) Polarisationsfilter: Machen Sie sich mit den Eigenschaften eines bzw. mehrerer Polarisationsfilter vertraut!

M-2) Bestimmen Sie den Brewsterwinkel!

M-3) Untersuchen Sie die optische Aktivität einer Zuckerlösung!

M-4) Betrachten Sie die Abschwächung eines Laserstrahls beim Durchgang durch Materie!

Geräteliste:

Winkelschiene, Laserpointer (ist auszuleihen), Schirm, Photoelement, Multimeter, 3 Polarisationsfilter, 2 Küvetten, Zuckerlösung, 3 Gelbfilter & Halterung, 2 Messleitungen

Hinweise

! **Wichtiger Sicherheitshinweis:** Bei diesem Versuch verwenden Sie einen kontinuierlichen Laser (Laserpointer) mit einer Leistung von <1 mW. Laser werden in die Klassen 1 (ungefährlich) bis 4 (große Gefahr für Auge und Haut) eingeteilt. Der hier verwendete Laser gehört zu der Klasse 2: "Laser dieser Klasse sind zwar nicht wirklich sicher, der Augenschutz ist jedoch durch den Lidreflex und andere Abwehrreaktionen sichergestellt. Schaut man bewusst länger in den Strahl oder wird der Reflex z.B. medikamentös unterdrückt, kann eine Schädigung eintreten

Also: schauen Sie niemals direkt in den Laserstrahl!

Motivation

Die Wechselwirkung von Licht mit Materie spielt in der Labormedizin eine wichtige Rolle. Mit Hilfe der Messung der Absorption von Licht sowie der Drehung der Polarisations Ebene lassen sich die Konzentrationen gelöster Stoffe bestimmen. Als Beispiele seien genannt die Ermittlung der Sauerstoffsättigung des Hämoglobins der roten Blutkörperchen mittels Spektralphotometrie (Vergleich der Absorption bei verschiedenen Wellenlängen) und die Bestimmung des Zuckergehalts durch Polarimetrie (Saccharimetrie). Darüber hinaus gilt das Lambertsche Schwächungsgesetz nicht nur im optischen Bereich der elektromagnetischen Wellen, sondern z.B. auch für die ionisierenden Röntgen- und Gammastrahlen.

Zusammenfassung der physikalischen Grundlagen

Polarisiertes Licht

Lichtwellen sind elektromagnetische Wellen, d.h. sie bestehen aus elektrischen (\vec{E}) und magnetischen (\vec{H}) Feldern. Es handelt sich um transversale Wellen. Die elektrischen und magnetischen Feldvektoren schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Lichtes und senkrecht zueinander.

In Abb.O3_1 sind zwei verschiedene Polarisationsmöglichkeiten von Lichtwellen dargestellt. Schwingt das elektrische Feld immer nur in einer Richtung (oder in Gegenrichtung dazu), so heißt das Licht linear polarisiert. Die Schwingungsebene des elektrischen Feldstärkevektors heißt Polarisations- oder Schwingungsebene. Schwingt der elektrische Feldvektor bei Blickrichtung gegen den Strahl, so dass die Spitze des Vektors eine Ellipse um die Ausbreitungsrichtung des Lichtes beschreibt, so heißt das Licht elliptisch polarisiert. Im Spezialfall eines Kreises um die Ausbreitungsrichtung heißt das Licht zirkular polarisiert.

Das Licht, welches von einem einzigen Atom emittiert wird, ist i.a. polarisiert. Durch die Überlagerung vieler solcher einzelner Emissionsprozesse in einer völlig ungeordneten Weise ergibt sich unpolarisiertes Licht: alle Polarisationsarten sind gleichmäßig und ungeordnet vertreten. Dies trifft z.B. für das Licht einer Glühlampe zu. Geräte, mit denen man Licht linear polarisieren kann, werden als Polarisatoren bezeichnet. Benutzt man einen Polarisator, um mit ihm die Polarisationsrichtung und den Polarisationsgrad von Licht zu ermitteln, wird er auch Analysator genannt.

Fällt linear polarisiertes Licht so auf einen Analysator, dass seine Schwingungsebene gegenüber der Durchlassrichtung des Filters um einen beliebigen Winkel α gedreht ist, so kann man den Schwingungsvektor gemäß Abb.O3_2 in zwei senkrecht aufeinander stehende Komponenten zerlegen (eine in Durchlassrichtung und eine senkrecht zur Durchlassrichtung des Filters).

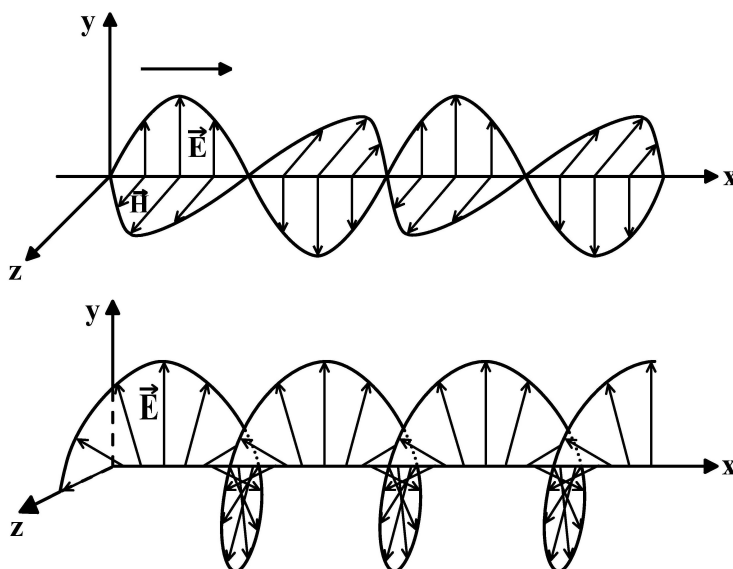


Abb O3-1: Linear polarisiertes Licht (oben) und zirkular polarisiertes Licht (unten).

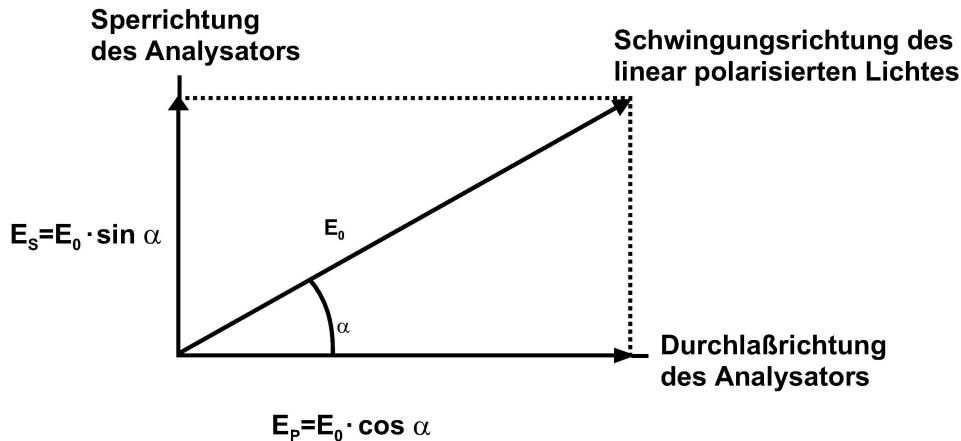


Abb. O3-2 Zur Ableitung des Malusschen Gesetzes

Der vom Analysator durchgelassene Teil der Amplitude ist $E_p = E_0 \cos \alpha$, der vom Analysator ausgelöschte Anteil $E_s = E_0 \sin \alpha$. Da die Strahlungsleistung I („Intensität“) des Lichts dem Quadrat der Amplitude proportional ist, gilt für die vom Polarisationsfilter hindurchgelassene Intensität das Gesetz von Malus:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{E_p^2}{E_0^2} = \cos^2 \alpha \quad \text{oder} \quad I = I_0 \cos^2 \alpha. \quad (\text{Glg. O3}_1)$$

Daraus folgt, dass das durchgehende Licht bei gekreuzter Stellung von Polarisator und Analysator ausgelöscht wird, da hier für $\alpha = 90^\circ$ und $\cos \alpha = 0$ gilt..

Polarisation durch Reflexion

Fällt Licht auf eine Glasplatte, so wird ein Teil des Lichts reflektiert, ein Teil gebrochen (Abb. O3_3) Diesen Vorgang kann man sich so vorstellen, dass die einfallende Lichtwelle elektrische Dipole an der Grenzfläche zum Schwingen anregt. Die von den Dipolen abgestrahlten Wellen ergeben dann den reflektierten und den gebrochenen Strahl. Allerdings strahlt ein elektrischer Dipol immer nur senkrecht zu seiner Schwingungsrichtung ab. Wenn reflektierter und gebrochener Strahl senkrecht zueinander stehen, treten Polarisierungseffekte auf. Angenommen, der einfallende Strahl sei in der Einfallsebene polarisiert (Abb. O3_3 rechts). (Die Einfallsebene ist die Ebene, die aus dem einlaufenden Strahl und dem Lot auf die Platte aufgespannt wird – in der Abb. also die Zeichenebene). Dann kann der zum Schwingen angeregte Dipol nur in Richtung des gebrochenen Strahls abstrahlen. Es gibt in diesem Fall keinen reflektierten Strahl.

Ist der einlaufende Strahl hingegen senkrecht zur Einfallsebene polarisiert, so treten immer sowohl reflektierter als auch gebrochener Strahl auf (Abb. O3_3, links). Reflektierter und gebrochener Strahl stehen aufeinander senkrecht, wenn der Einfall unter dem Brewsterwinkel α erfolgt. Nach dem Brechungsgesetz gilt:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\sin(90^\circ - \alpha)} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha \quad (\text{Glg. O3}_2)$$

Für Glas mit einem Brechungsindex $n=1.53$ ergibt sich $\alpha \approx 57^\circ$. Verwendet man nun einen unpolarisierten (alle Schwingungsrichtungen enthaltenden) Strahl, so ist unter dem Brewsterwinkel α das reflektierte Licht senkrecht zur Einfallsebene polarisiert.

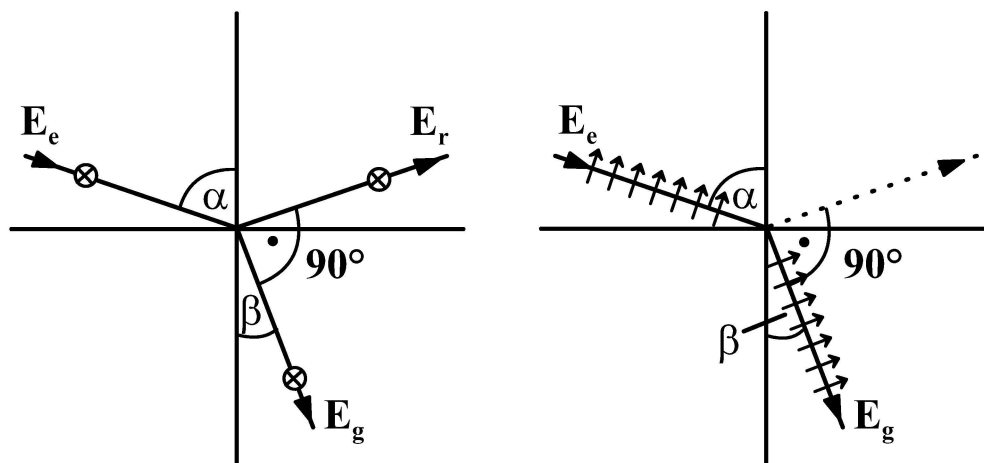


Abb. O3-3: Reflexion und Brechung eines Lichtstrahls im Brewsterwinkel an einer Glasplatte für lineare Polarisation in der Einfallsebene (rechts) und lineare Polarisation senkrecht zur Einfallsebene (links).

Polarisation durch Dichroismus

Dichroitische Kristalle schwächen den ordentlichen und den außerordentlichen Strahl unterschiedlich stark ab. Folien, in die kleine, dichroitische Kristalle parallel zueinander eingelagert sind, lassen sich als Polarisatoren bzw. Analysatoren verwenden.

Optische Aktivität

Optisch aktive Substanzen sind dadurch gekennzeichnet, dass sie die Polarisationsrichtung des Lichts drehen. Diese Eigenschaft ist meist auf den asymmetrischen Aufbau der Moleküle, aus denen die Substanzen aufgebaut sind, zurückzuführen (in manchen Fällen einer festen Substanz auch auf den Kristallaufbau).

Im Versuch soll die Konzentration einer Zuckerlösung aus der Messung des Drehwinkels α bestimmt werden. Es gilt:

$$\alpha = [\alpha_0] \cdot l \cdot c \quad (\text{Glg. O3}_3)$$

Dabei bedeuten $[\alpha_0]$ das spezifische Drehvermögen, c die Konzentration des Zuckers (in g/cm^3) und l die Länge der Küvette (in cm).

Absorption von Strahlung

Bringt man eine Schicht eines mehr oder weniger lichtdurchlässigen Stoffes in einen Lichtstrahl (Abb. O3-4), so ist der durchtretende Lichtstrom (Lichtintensität) $\phi(x + \Delta x)$ kleiner als der einfallende $\phi(x)$. Dies hat mehrere Gründe:

- An den Grenzflächen zwischen verschiedenen Medien wird das auftreffende Licht teilweise reflektiert.
- Ein Teil des das Medium durchsetzenden Lichtstromes ϕ wird durch die Atome und Moleküle des Stoffes absorbiert und die Energie in ungeordnete kinetische Energie (Wärme) umgewandelt.
- Ein Teil von ϕ wird an den Atomen und Molekülen gestreut, ändert seine Richtung und gelangt so nicht mehr zum Empfänger (Streuabsorption).

Absorption und Streuung werden unter dem Begriff **Extinktion** zusammengefasst. Um die Extinktion in einer dicken Schicht zu verstehen, betrachtet man zunächst eine sehr dünne Schicht Δx . Dann ist der absorbierte bzw. gestreute Lichtstrom proportional zur Schichtdicke:

$$\Phi(x + \Delta x) - \Phi(x) = \Delta\Phi = -k \cdot \Phi(x) \cdot \Delta x, \quad (\text{Glg O3}_4)$$

$$\rightarrow \frac{\Delta\Phi}{\Delta x} = -k \cdot \Phi(x) \quad (\text{Glg O3}_5)$$

Die Proportionalitätskonstante k heißt natürliche Extinktionskonstante. Durchsetzt das Licht eine Schicht der Dicke d , so erhält man durch Integration von Glg.O3_5 das Lambertsche Schwächungsgesetz:

$$\Phi(d) = \Phi(0) \cdot e^{-kd} \quad (\text{Glg O3}_6)$$

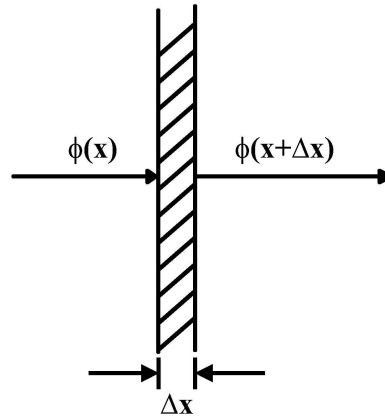


Abb O3-4: Absorption von Licht an einer dünnen Schicht.

Dabei ist $\phi(0)$ der einfallende und $\phi(d)$ der durch die Schicht hindurchgetretene Lichtstrom.

Enthält das durchstrahlte Medium mehrere Stoffanteile, z.B. Lösungsmittel (LM) und gelösten Stoff (LS), so addieren sich die Extinktionskonstanten der Anteile zu $k = k_{LM} + k_{LS}$. Im Fall einer verdünnten Lösung mit kleiner Extinktion gilt das Beersche Gesetz, das besagt, dass k_{LS} proportional zur Konzentration c_{LS} ist:

$$k_{LS} = c_{LS} \cdot k_{spez,LS} \quad (\text{Glg O3}_7)$$

Dabei wird k_{spez} spezifische Extinktionskonstante genannt. Für zwei Lösungen (1, 2) des gleichen Stoffes gilt bei verschiedenen Konzentrationen c_1, c_2 demnach:

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{c_1}{c_2} \quad (\text{Glg O3}_8)$$

Beachten Sie außerdem: k ist abhängig von der Wellenlänge des benutzten Lichtes. Wir führen deshalb den Versuch mit dem monochromatischem Licht eines Lasers durch.

Polarisation durch Doppelbrechung

Polarisation durch Doppelbrechung geschieht mit Hilfe spezieller Kristalle, wie z.B. Kalkspat. Diese Kristalle besitzen eine Vorzugsrichtung, die optische Achse. Trifft Licht, das senkrecht zur optischen Achse linear polarisiert ist, auf den Kristall, so wird es ganz normal gebrochen, man spricht vom ordentlichen Strahl.

Ist das Licht hingegen parallel zur optischen Achse polarisiert, so wird es unter einem anderen Winkel gebrochen, da dieser Strahl im Medium eine größere Ausbreitungsgeschwindigkeit hat: Er wird deshalb außerordentlicher Strahl genannt. Diesen Effekt kann man zur Erzeugung von polarisiertem Licht ausnutzen, z.B. im Nicol-schen Prisma.

Eine andere Anwendung der Doppelbrechung ist das $\lambda/4$ -Plättchen. Es handelt sich dabei um einen doppelbrechenden Kristall, der gerade so dick ist, dass der ordentliche und der außerordentliche Strahl nach dem Durchgang einen Gangunterschied von $\lambda/4$ haben. Dies bewirkt, dass aus linear polarisiertem Licht zirkular (bzw. elliptisch) polarisiertes Licht wird.

Messaufgaben

M-1) Polarisationsfilter

Bauen Sie den Versuch gemäß Abb. O3_5a auf! (Alle drei Polarisationsfilter, P1-P3, sind identisch)

M-1.1: Bestimmen Sie den Photostrom als Funktion des Winkels des Polarisationsfilters P1 in Abständen von 10° für den Bereich von 0° bis 350° und stellen Sie die Messergebnisse graphisch dar!

M-1.2: Stellen Sie P1 auf maximalen Durchlass und arretieren Sie P1 am Laserpointer. Fügen Sie das Polarisationsfilter P2 zum Aufbau hinzu (Abb. O3_5b)! Bestimmen Sie den Photostrom als Funktion des Winkels des Polarisationsfilters P2 wiederum in Abständen von 10° für den Bereich von 0° bis 350° und mit graphischer Darstellung!

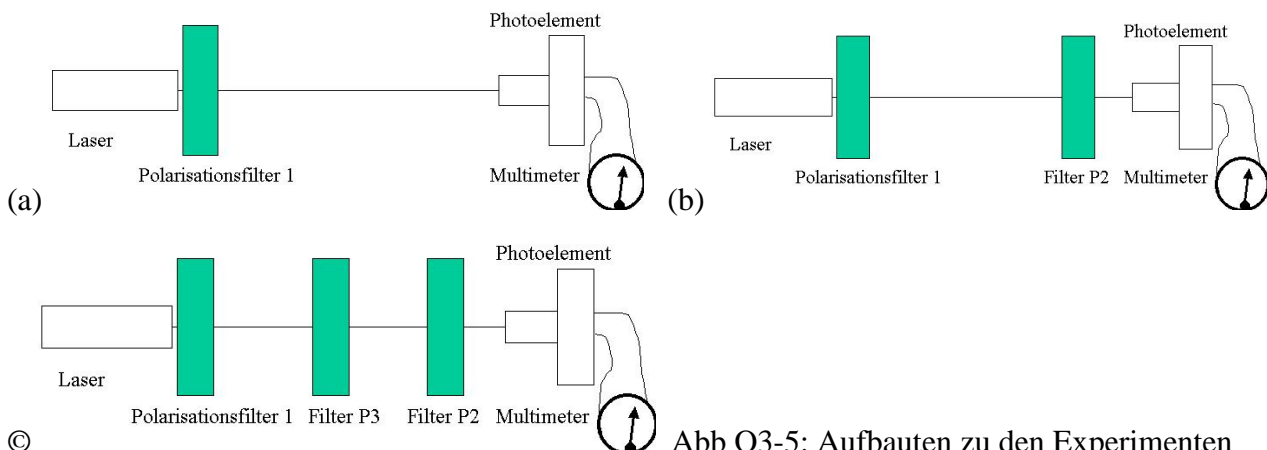


Abb O3-5: Aufbauten zu den Experimenten mit Polarisationsfiltern

M-1.3: Stellen Sie nun P2 auf minimalen Durchlass und fügen Sie das Polarisationsfilter P3 zwischen P1 und P2 ein (Abb. O3_5c)! Bestimmen Sie erneut den Photostrom, nun als Funktion des Winkels des Polarisationsfilters P3, wiederum in Abständen von 10° für den Bereich von 0° bis 350° und mit graphischer Darstellung!

M-1.4: Stellen Sie wie in M-1.3 das dritte Polarisationsfilter P3 zwischen P1 und P2, nun aber nachdem sie P2 auf maximalen Durchlass eingestellt haben (durch Einstellen des Minimums und Drehung von P1 oder P2 um 90°)! Bestimmen Sie wieder den Photostrom als Funktion des Winkels des Polarisationsfilters P3 in Abständen von 10° für den Bereich von 0° bis 350° und stellen Sie das Ergebnis graphisch dar!

M-2) Brewsterwinkel

Bauen Sie den Versuch gemäß Abb. O3-6 auf! Bestimmen Sie den Brewsterwinkel durch kombiniertes Variieren der Polarisationssebene des Laserstrahls und des Winkels der Halbkreisscheibe! Welcher Brechungsindex ergibt sich aus dieser Messung?

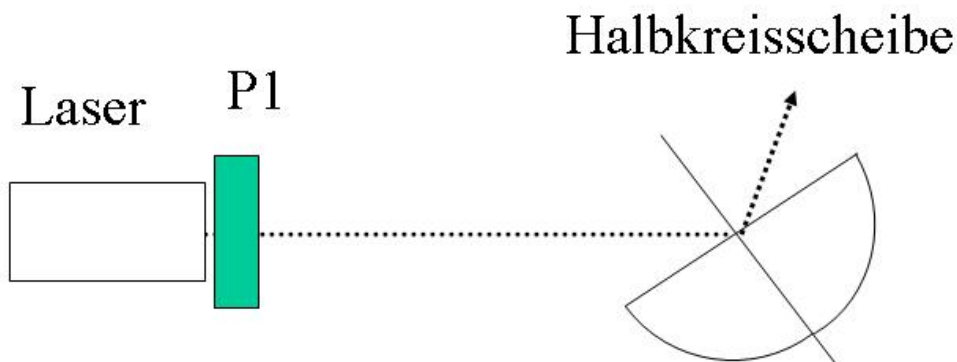


Abb O3-6: Zur Bestimmung des Brewsterwinkels

Hinweis: Die Hälfte der Gruppen fährt hier mit dem Teil-Versuch M-3 fort, die anderen Gruppen mit Teilversuch M-4.

Bitte sprechen Sie sich mit Betreuer und einer Nachbargruppe ab! Wenn Sie Ihre jeweiligen Versuche durchgeführt haben, so wechseln Sie bitte den Versuchstisch. Auf diese Weise wird jeder Transport der Lösungen vermieden und die Gefahr des Verschüttens minimiert!

M-3) Optische Aktivität

Hinweis: Bauen Sie diesen Versuch so auf, dass Sie die Küvetten nach dem Füllen mit Zuckerlösung nicht mehr bewegen müssen! Dazu sollte links, rechts und zwischen beiden Küvetten jeweils genügend Platz für Laserpointer, Polarisator und Analysator vorgesehen werden!

Messen sie die Drehwinkel α_1 , α_2 und α_3 der Polarisationssebene des Lichtstrahls bei Durchgang durch Zuckerlösungen der Schichtdicke $d_1 = 10$ cm, $d_2 = 20$ cm und $d_3 = d_1 + d_2 = 30$ cm! Bestimmen Sie dazu das Intensitätsminimum (Verschwinden des Lichtflecks auf dem Schirm), wenn der Analysator P2 einmal vor und dann hinter der Probe eingesetzt wird! Tragen Sie die Drehwinkel α gegen die Schichtdicken d graphisch auf und bestimmen Sie die Verhältnisse der Drehwinkel, α_3/α_1 , α_2/α_1 , α_3/α_2 !

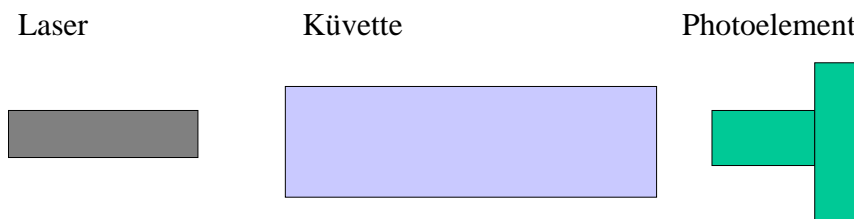


Abb O3-7

M-4) Extinktion

Bauen Sie den Versuch gemäß Abb O3-7 auf. Anstelle der Küvette stellen Sie bitte zwischen Laser und Photoelement die Halterung für die Gelbfilter. Bestimmen Sie den Photostrom als Maß der Intensität des Lasers ohne Verwendung der Gelbfilter. Bringen Sie nun nacheinander alle Gelbfilter und deren Kombinationen in den Strahlengang. Das Diarähmchen mit der Aufschrift (1) enthält eine Folie, das mit der Aufschrift (2) enthält zwei Folien usw., Sie können also die Anzahl der Folien von 0 bis 6 variieren. (Diagramm Photostrom I_{ph} über Anzahl n der Folien, Diagramm $\ln I_{ph}$ über n)

Hinweis: Der Lichtfleck muß optimal auf den Photoempfänger auftreffen. Zur Feinjustierung befindet sich am Empfängergehäuse eine Stellschraube.