

<b>Versuch O3 - Wechselwirkung Licht - Materie</b>		
Namen:		
Gruppennummer:	lfd. Nummer:	Datum:

## 1. Aufgabenstellung

### 1.1. Versuchsziel

Untersuchen Sie die Polarisierung, optische Aktivität und Extinktion bei der Wechselwirkung von Licht und Materie.

Verschaffen Sie sich Kenntnisse zu folgenden Schwerpunkten des Versuches:

- Polarisierung von Wellen
- Brewstersches Gesetz
- Absorption, Streuung, Transmission, Extinktion

### 1.2. Messungen

- 1.2.1. Bauen Sie den Versuch nach Abb. 5 auf. Bestimmen Sie den Photostrom als Funktion des Drehwinkels der Polarisatoren in Abständen von  $10^\circ$  im Bereich  $0^\circ - 350^\circ$ .
- 1.2.2. Bauen Sie den Versuch gemäß Abb. 6 auf und bestimmen Sie den Brewsterwinkel durch kombiniertes Variieren der Polarisierungsebene des Laserstrahls und des Winkels der Halbkreisscheibe.
- 1.2.3. Bauen Sie den Versuch nach Abb. 7 auf. Messen Sie die Drehwinkel  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  und  $\alpha_3$  der Polarisierungsebene des Lichtes beim Durchgang durch Zuckerlösungen der Dicken  $d_1 = 10$  cm,  $d_2 = 20$  cm und  $d_3 = d_1 + d_2 = 30$  cm durch Bestimmung des Intensitätsminimums beim Einsatz des Analysators P2 einmal vor und dann hinter der Probe.
- 1.2.4. Benutzen Sie den Versuchsaufbau Abb. 7. Anstelle der Küvette und Polarisationsfilter werden Absorptionsfilter (Gelbfilter) unterschiedlicher Dicke verwendet ( $d_1 = 0,23$  mm,  $d_2 = 2 \times d_1$ ,  $d_3 = 3 \times d_1$ ). Messen Sie den Photostrom  $I_p$  für unterschiedliche Filterdicken und solche, die durch Kombination der einzelnen Filter erreicht werden können.

### 1.3. Auswertungen

- 1.3.1. Stellen Sie alle unter 1.2.1. gewonnenen Messwerte grafisch dar.
- 1.3.2. Berechnen Sie aus dem unter 1.2.2. ermittelten Brewsterwinkel den Brechungsindex des Halbkreis-Scheiben-Materials.
- 1.3.3. Tragen Sie die unter 1.2.3. gemessenen Drehwinkel  $\alpha$  gegen die entsprechenden Schichtdicken  $d$  grafisch auf und bestimmen Sie die Verhältnisse der Drehwinkel  $\alpha_3/\alpha_1$ ,  $\alpha_2/\alpha_1$  und  $\alpha_3/\alpha_2$ .
- 1.3.4. Tragen Sie zunächst die jeweils gemessenen Photoströme  $I_{pi}$  gegen die entsprechenden Filter-Dicken  $d_i$  auf. Stellen Sie daraufhin  $\ln(I_p) = f(d)$  dar und bestimmen Sie daraus den Absorptionskoeffizienten

### 1.4. Zusatzaufgaben

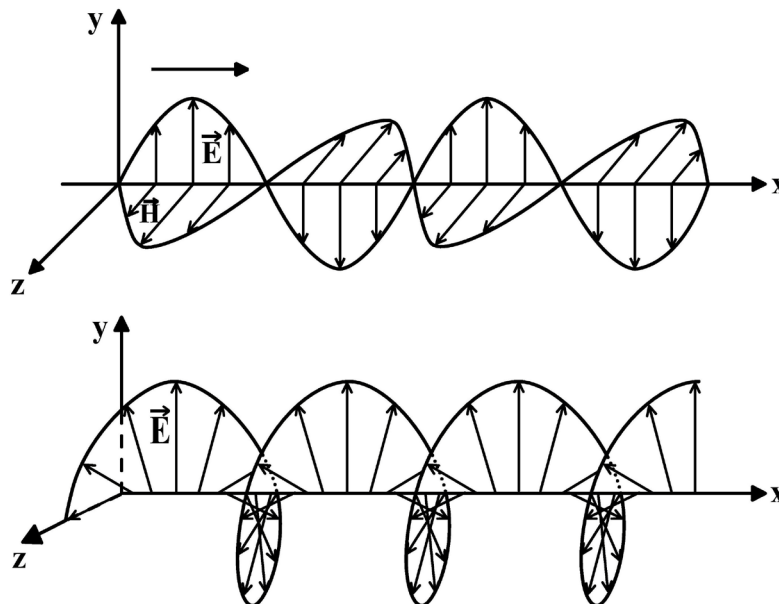
Ein Lichtbündel treffe aus Luft auf eine Glasplatte der Brechzahl  $n = 1,5$ . Wie groß ist der Brewsterwinkel? Unter welchem Winkel wird das Licht gebrochen, wenn es unter dem Brewsterwinkel einfällt? Aus einem linear polarisierten Lichtstrahl soll mit Hilfe zweier Polarisationsfilter ein Strahl mit senkrechter Polarisationsrichtung (d.h. eine Drehung um  $90^\circ$ ) hergestellt werden. Wie müssen die beiden Polarisationsfilter eingestellt werden, um die höchstmögliche Intensität zu erreichen?

## 2. Grundlagen

Die Wechselwirkung von Licht mit Materie spielt in Wissenschaft und Technik 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 Sauerstoff-Sättigung 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.

### 2.1. Polarisiertes Licht

Lichtwellen sind elektromagnetische Wellen, d.h. sie bestehen aus elektrischen und magnetischen Feldern. Es handelt sich um transversale Wellen. Die elektrischen und magnetischen Feldvektoren schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Lichtes und senkrecht zueinander. In Abb. 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.



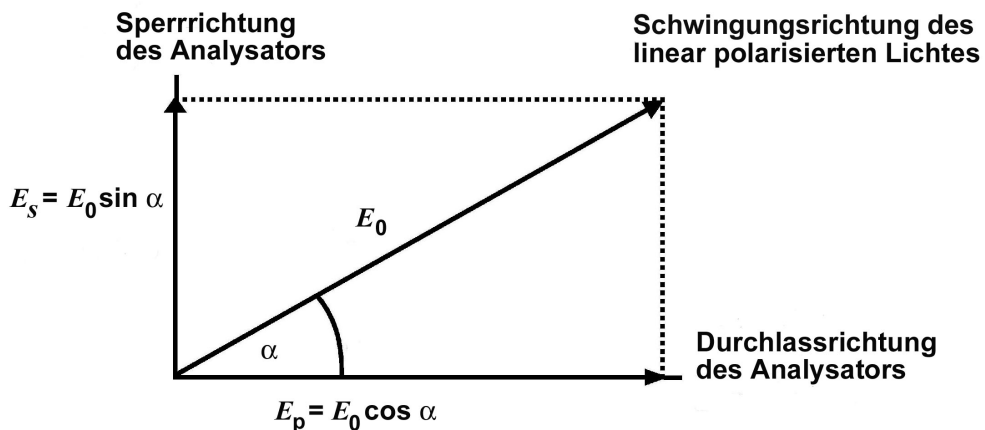
**Abb. 1** Linear polarisiertes Licht (oben) und zirkular polarisiertes Licht (unten).

Das Licht, welches von einem einzigen Atom emittiert wird, ist i.a. polarisiert. Durch Überlagerung vieler solcher einzelner Emissionsprozesse in völlig ungeordneter Weise ergibt sich unpolarisiertes Licht, d.h. 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** oder **Polarisationsfilter** 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 auf einen Analysator und ist seine Schwingungsebene gegenüber der Durchlassrichtung des Filters um einen beliebigen Winkel  $\alpha$  gedreht, so kann man den Schwingungsvektor gemäß Abb. 2 in zwei senkrecht aufeinander ste-

hende Komponenten zerlegen (eine in Durchlassrichtung und eine senkrecht zur Durchlassrichtung des Filters).



**Abb. 2** Zur Ableitung des Malusschen Gesetzes.

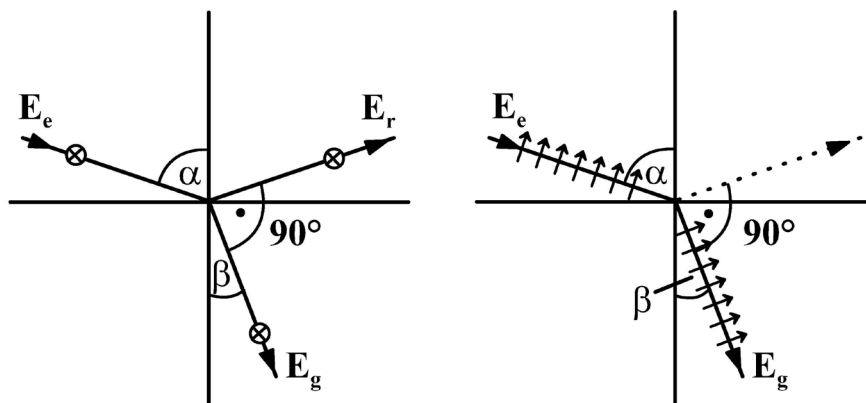
Der vom Analysator durchgelassene Teil der Amplitude ist  $E_p = E_0 \cos \alpha$ , der vom Analysator ausgelöschte Anteil  $E_s = E_0 \sin \alpha$ . Da die Strahlungsleistung  $I$  (Intensität) des Lichtes dem Quadrat der Amplitude proportional ist, gilt für die vom Polarisationsfilter hindurch gelassene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

$$\frac{I}{I_0} = \frac{E_p^2}{E_0^2} = \cos^2 \alpha \quad \text{oder} \quad I = I_0 \cdot \cos^2 \alpha . \quad (1)$$

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

## 2.2. Polarisation durch Reflexion

Fällt Licht auf eine Glasplatte, so wird ein Teil des Lichts reflektiert und ein Teil gebrochen (Abb. 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.



**Abb. 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).

Wenn reflektierter und gebrochener Strahl senkrecht zueinander stehen, treten Polarisierungseffekte auf. Angenommen, der einfallende Strahl sei in der Einfallsebene polarisiert (Die Einfallsebene ist die Ebene, die aus dem einlaufenden Strahl und dem Lot auf die Platte aufgespannt wird – in der Abbildung also die Zeichenebene (s. Abb. 3 rechts)), dann kann der zum Schwingen angeregte Dipol nur in Richtung des gebrochenen Strahles 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. 3 links). Reflektierter und gebrochener Strahl stehen aufeinander senkrecht, wenn der Einfall unter dem Brewsterwinkel  $\alpha$  erfolgt. Nach dem Brechungsgesetz gilt:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\sin(90^\circ - \alpha)} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha \quad . \quad (2)$$

Für Glas mit einem Brechungsindex  $n = 1.53$  ergibt sich  $\alpha \approx 57^\circ$ .

Verwendet man einen unpolarisierten (alle Schwingungsrichtungen enthaltenden) Strahl, so ist unter dem Brewsterwinkel  $\alpha$  das reflektierte Licht senkrecht zur Einfallsebene polarisiert.

### 2.3. 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.

### 2.4. 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 Nicolschen 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.

### 2.5. 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  $\alpha$  bestimmt werden. Es gilt:

$$\alpha = [\alpha_0] \cdot l \cdot c \quad . \quad (3)$$

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

## 2.6. Absorption von Strahlung

Bringt man eine Schicht eines mehr oder weniger lichtdurchlässigen Stoffes der Dicke  $\Delta x$  in einen Lichtstrahl (Abb. 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  $\phi$  wird durch die Atome und Moleküle des Stoffes absorbiert und die Energie in kinetische Energie (Wärme) umgewandelt.
- Ein Teil von  $\phi$  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  $\Delta x$ . Dann ist der absorbierte bzw. gestreute Lichtstrom proportional zur Schichtdicke:

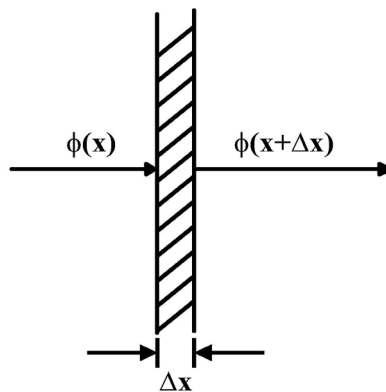
$$\phi(x + \Delta x) - \phi(x) = \Delta\phi = -k \cdot \phi(x) \cdot \Delta x \quad \rightarrow \quad \frac{\Delta\phi}{\Delta x} = -k \cdot \phi(x) \quad (4)$$

Die Proportionalitätskonstante  $k$  heißt natürliche Extinktionskonstante.

Durchsetzt das Licht eine Schicht der Dicke  $d$ , so erhält man durch Integration von Gl. 4 das **Lambertsche Schwächungsgesetz**:

$$\phi(d) = \phi(0) \cdot e^{-k \cdot d} \quad (5)$$

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  $k = k_{LM} + k_{LS}$ .



**Abb. 4** Absorption von Licht in einer dünnen Schicht.

Im Fall einer verdünnten Lösung mit kleiner Extinktion gilt das **Beersche Gesetz**, das besagt, dass  $k_{LS}$  proportional zur Konzentration  $c_{LS}$  ist:

$$k_{LS} = c_{LS} \cdot k_{spez} \quad (7)$$

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

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{c_1}{c_2} \quad (8)$$

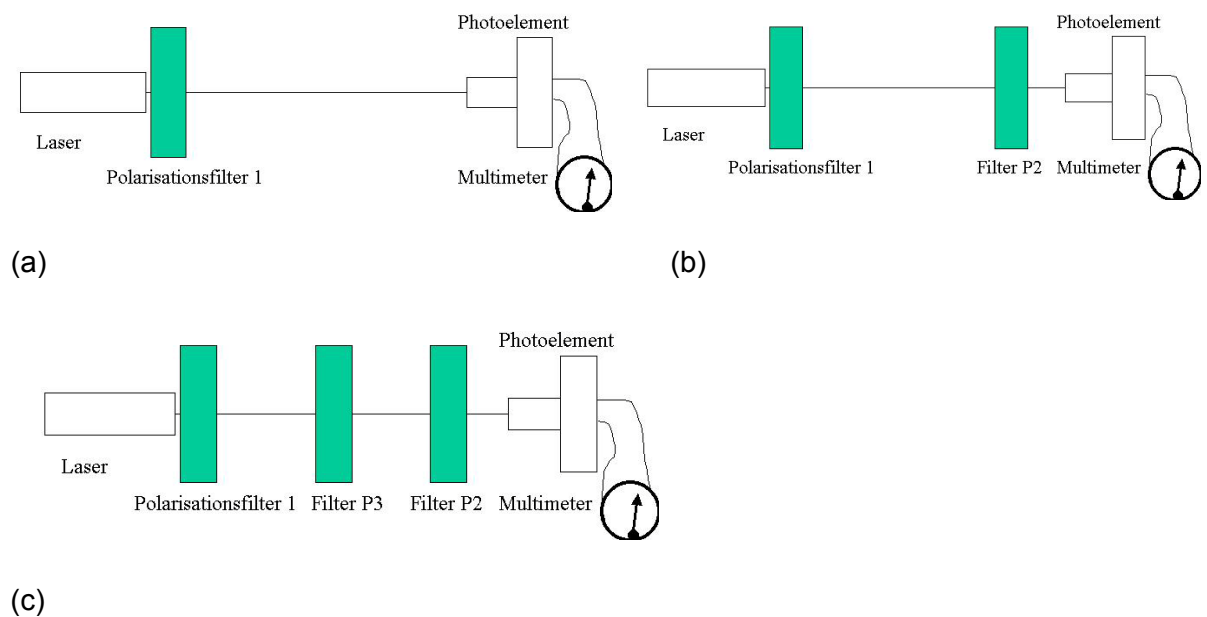
Beachten Sie außerdem:  $k$  ist abhängig von der Wellenlänge des benutzten Lichtes. Wir führen deshalb den Versuch mit dem monochromatischen Licht eines Lasers durch.

### 3. Experiment

#### 3.1. Geräte / Material

- 1 - Winkelschiene
- 2 - 3 Gelbfilter mit Halterunge
- 3 - Schirm
- 4 - Photoelement
- 5 - Multimeter
- 6 - 3 Polarisationsfilter
- 7 - Küvette
- 8 - Zuckerlösung
- 9 - Laserpointer in Halterung
- 10 – 2 kleine Kabel
- 11 – Halbkreisprisma mit Winkelscheibe

#### 3.2. Versuchsanordnung und Inbetriebnahme



**Abb. 5** Aufbauten zu den Experimenten mit verschiedenen Kombinationen von Polarisationsfiltern.

Stellen Sie das Polarisationsfilter P1 auf maximalen Durchlass und arretieren Sie es am Laser. Fügen Sie gemäß Abb. 5b das Polarisationsfilter P2 hinzu und bestimmen Sie den Photostrom als Funktion des Drehwinkels von P2.

Stellen Sie P2 auf minimalen Durchlass und fügen Sie das Polarisationsfilter P3 gemäß Abb. 5c zwischen P1 und P2 ein. Bestimmen Sie dann erneut den Photostrom als Funktion des Drehwinkels von P3.

Führen Sie die gleiche Messung mit P3 durch, jedoch nachdem Sie P2 auf maximalen Durchlass eingestellt haben (durch Einstellen des Minimums und Drehung von P1 oder P2 um  $90^\circ$ ).

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

### 3.2.1. Messung des Brewsterwinkels

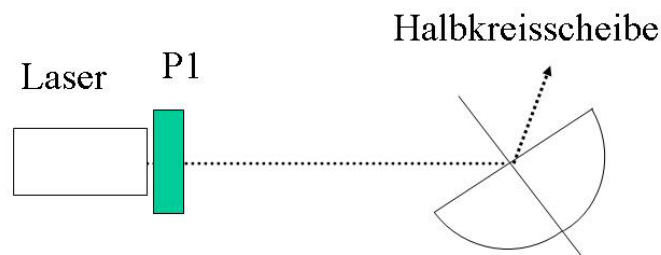


Abb. 6 Anordnung zur Bestimmung des Brewsterwinkels.

### 3.2.2. Versuchsaufbau zur Messung der optischen Aktivität

Der Versuch wird so aufgebaut, dass die Küvette nach dem Füllen nicht mehr bewegen müssen. Dazu sollte links und rechts von der Küvette genügend Platz für Laserpointer, Polarisator und Analysator vorgesehen werden.

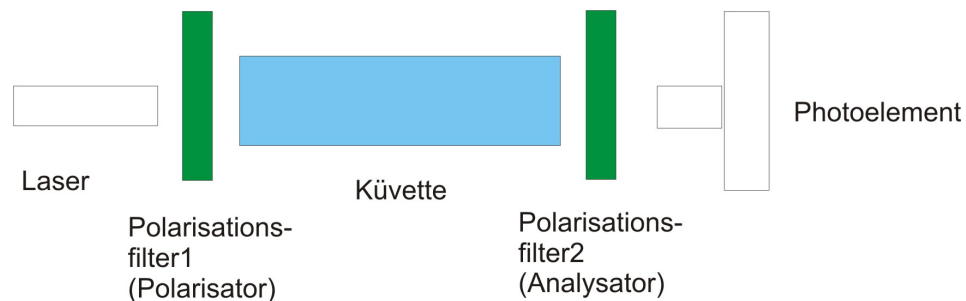


Abb. 7 Anordnung zur Messung der optischen Aktivität.

**Hinweis:** Zur Durchführung des Punktes 1.2.3. begeben Sie sich zu dem Versuchsaufbau mit Zuckerlösung auf Platz 43. Bitte sprechen Sie sich dazu mit Betreuer und ihren Nachbargruppen ab. Wenn Sie diesen Teilversuch durchgeführt haben, wechseln Sie bitte zu ihrem Versuchstisch zurück. Auf diese Weise wird jeder Transport der Lösungen vermieden und die Gefahr des Verschüttens minimiert.

#### 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." [Jürgen Eichler: Laser und Strahlenschutz, Vieweg 1992, S. 158]

**Also schauen Sie niemals direkt in den Laserstrahl!**