

Versuch 5A Gitterspektralapparat Beugung mit Laserlicht

Physikalische Grundbegriffe:

- Photon, Lichtquant, Schwingung, Welle,
- Plancksches Wirkungsquantum
- Interferenz, Kohärenz, Beugung
- Beugungsgitter
- Polarisation
- Reflexion, Absorption, Transmission, Extinktion
- Lambertsches Gesetz

meßtechnische Grundlagen

- Laser
- Gitterspektralapparat
- Spektralphotometer

weiterführende Literatur:

- W.Seibt, Physik f. Mediziner, 3.Aufl. p. 359-373, 404-406
- W.Hellenthal, Physik für Mediziner und Biologen, 6.Aufl. p. 246-256
- V.Harms, Physik für Mediziner und Pharmazeuten, 14.Aufl. p. 246-254

Erläuterung der wichtigsten Grundbegriffe

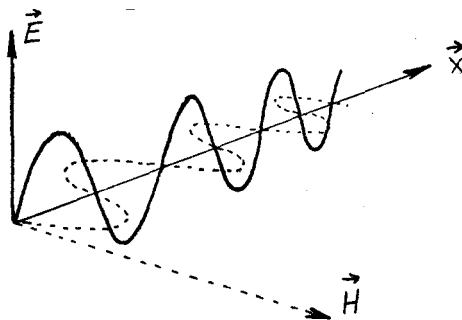


Abb.5.1 Elektromagnetische Schwingungen

- Licht

Licht ist eine elektromagnetische Wellenstrahlung (siehe auch Grundlagen zu Versuch 9 "Elektromagnetisches Spektrum"). In der elektromagnetischen Welle "schwingen" der elektrische Feldvektor \vec{E} und der magnetische Vektor \vec{H} senkrecht zueinander und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle (Transversalwelle!). Die Ausbreitung erfolgt im Vakuum mit der Geschwindigkeit $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Wie bei Schallwellen ist auch bei

elektromagnetischen Wellen die Ausbreitungsgeschwindigkeit c gleich dem Produkt aus Wellenlänge λ und Frequenz ν :

$$\boxed{c = \lambda \cdot \nu} \quad (5.1)$$

Die Energie des Lichts ist bei der Wellenvorstellung kontinuierlich über den Raum verteilt. Es gibt jedoch Erscheinungen (z.B. den lichtelektrischen Effekt, auch Photoeffekt genannt), nach denen sich Licht nur als ein Strom von einzelnen Energiequanten, den Lichtquanten oder Photonen, interpretieren lässt. Die Energie W der Photonen ist proportional zur Frequenz

$$\boxed{W = h \cdot \nu} \quad (5.2)$$

Der Proportionalitätsfaktor ist das **Plancksche Wirkungsquantum** $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{Ws}^2$.

Erscheinungen, die für die Wellenvorstellung des Lichts sprechen, sind z.B. die **Beugung**, die **Interferenz**, die **Polarisation**.

Das Auge empfindet Licht verschiedener Frequenz als verschieden farbig. Wegen des Zusammenhangs zwischen Frequenz und Wellenlänge (Gl.5.1) kann man die Farbe des Lichts auch der Wellenlänge zuordnen. Diese Wellenlängenangaben sind aber stets auf das Vakuum zu beziehen, da sich beim Übergang des Lichts von einem Medium in ein anderes mit unterschiedlicher Brechzahl nicht die Frequenz, wohl aber die Lichtgeschwindigkeit und somit auch die Wellenlänge ändert.

Der Empfindlichkeitsbereich des Auges für elektromagnetische Strahlung liegt etwa im Bereich von 400 nm (violett) bis 750 nm (dunkelrot). In Ängström-Einheiten: 4000 Å bis 7500 Å. ($1 \text{Å} = 10^{-10} \text{m}$).

• Interferenz von Wellen

Überlagern sich in einem Raumbereich zwei oder mehrere kohärente Wellen gleicher

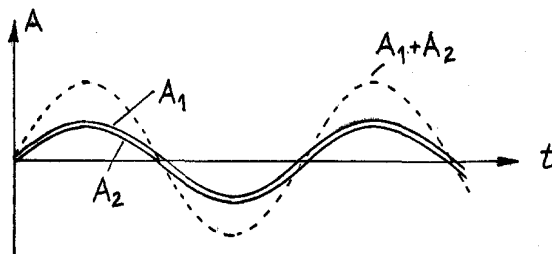


Abb.5.2: Konstruktive Interferenz

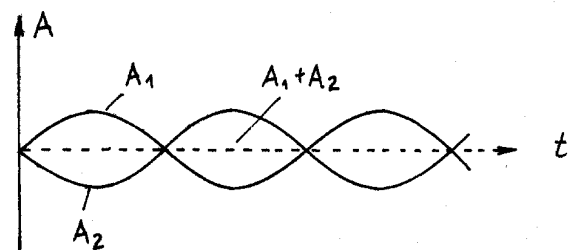


Abb.5.3 Destruktive Interferenz

Schwingungsrichtung, so tritt in den einzelnen Raumpunkten je nach Gangunterschied der Wellen (bzw. Phasendifferenz der Schwingungen) Verstärkung (konstruktive Interferenz) oder Abschwächung (destruktive Interferenz) der Schwingungsamplituden auf. Abb.5.2 zeigt den Fall maximaler Verstärkung. Er tritt ein, wenn der Gangunterschied Δx gleich $k \cdot \lambda$ ist, mit $k = 0, 1, 2, \dots$ usw. (dies entspricht einer Phasendifferenz der Schwingungen von $0, 2\pi, 4\pi, \dots$). Bei einem Gangunterschied von $\Delta x = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$ (entsprechend einer

Phasendifferenz von $\pi, 3\pi, 5\pi, \dots$) schwächen sich die Wellen besonders stark. Sind dabei die Amplituden der Wellen gleich groß, so tritt völlige Auslöschung ein (Abb.5.3).

- **Kohärenz**

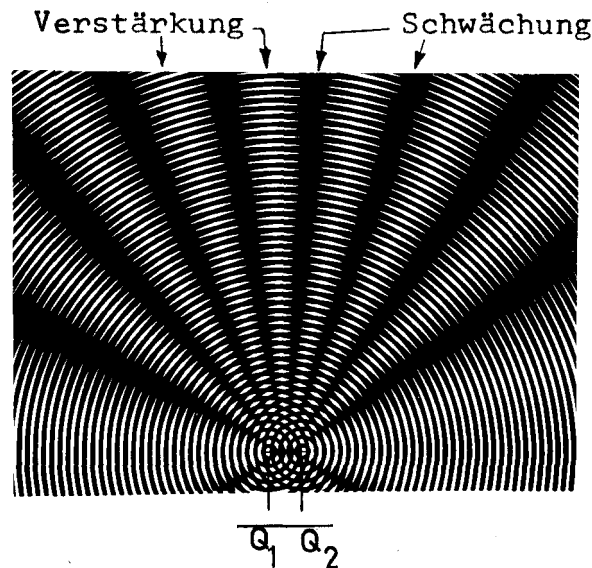


Abb. 5.4 Interferenzfeld zweier kohärenter Quellen Q_1 und Q_2 , die Kreiswellen aussenden.

Zwei Wellensysteme werden als kohärent bezeichnet, wenn die Wellen gleiche Frequenz haben und wenn an einem bestimmten Ort zwischen den Wellen ein konstanter (zeitlich unveränderlicher) Gangunterschied besteht. Nur dann verändert sich die Interferenzfigur nicht und weist einen hohen Kontrast auf. Ändert sich der Gangunterschied in zusammenhangloser Weise, so nennt man die Wellen inkohärent.

Bei Licht treten bei der Überlagerung zweier kohärenter Wellenfelder helle und dunkle Streifen, die sog. **Interferenzstreifen** auf.

Licht, das von verschiedenen Punkten einer ausgedehnten Lichtquelle ausgeht, ist inkohärent. Strahlung entsteht in den Atomen durch Elektronenübergang vom angeregten Zustand in den Grundzustand während einer Zeit von etwa 10^{-8} s. Dies entspricht der Aussendung eines Wellenzuges der Länge von der Größenordnung 1 m. Da der Elektronenübergang spontan erfolgt (**spontane Emission**), sind die von den verschiedenen Atomen ausgehenden Wellenzüge zeitlich nicht korreliert und haben deshalb keine feste Phasenbeziehung untereinander.

Eine Ausnahme stellt der Laser dar, dessen Licht einen sehr hohen Kohärenzgrad besitzt. Das Wort "**Laser**" ist die Abkürzung für: **L**ight **a**mplification by **s**timulated **e**mission of **r**adiation. Im Laser erfolgt also eine Lichtverstärkung durch **stimulierte Emission** von Strahlung. Die Elektronenübergänge erfolgen im Laser nicht spontan, sondern geordnet ("synchronisiert"), wodurch eine konstante Phasenbeziehung zwischen den einzelnen Wellenzügen erreicht wird. Weitere besondere Eigenschaften des Laserlichts: Es ist monochromatisch und der Laserstrahl weist eine sehr geringe Winkeldivergenz und eine sehr große Leistungsdichte ($\approx 10^6$ W/cm²) auf.

- **Beugung**

Trifft ein Lichtbündel auf eine enge Öffnung, so beobachtet man, dass das Licht auch in den geometrischen Schattenraum eindringt, das Licht dabei also von seiner geradlinigen Ausbreitung abweicht. Das gleiche beobachtet man, wenn Licht auf ein sehr schmales Hindernis auftrifft. Diese Erscheinung heißt **Beugung** des Lichts. Eine Deutung dieses Effekts lässt sich mithilfe des **Huygensschen Prinzips** geben. Es lautet:

- a) Jeder Punkt im Raum, der von einer Wellenfläche getroffen wird, wird zum Ausgangspunkt einer Kugelwelle (**Elementarwelle**).
- b) Im isotropen Medium breiten sich die Elementarwellen nur nach vorn aus. An der Grenzfläche zweier Medien erfolgt Ausbreitung nach vorn und nach rückwärts.
- c) Die Einhüllende der Fronten aller Elementarwellen, die zur Zeit t auf einer Wellenfläche starten und sich während des Zeitintervalls Δt ausbreiten, soll die zur Zeit $t+\Delta t$ beobachtbare neue Wellenfront sein.

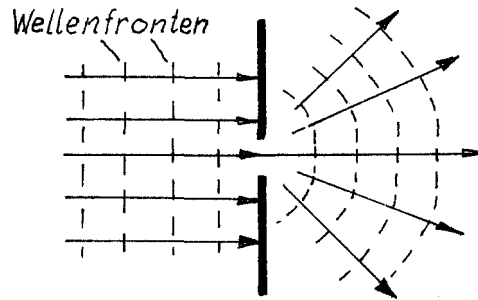


Abb. 5.5: Beugung an enger Öffnung; Entstehung neuer Wellenfronten.

Der Halbraum hinter der beugenden Öffnung ist nicht gleichmäßig hell. Durch Interferenz der Elementarwellen kommt es in bestimmten Richtungen zur Auslöschung, in anderen Richtungen zur Verstärkung des Lichts. Hinter beugenden Öffnungen (bzw. Hindernissen) beobachtet man also Lichtverteilungen, die durch Beugung und Interferenz (**Huygens-Fresnelsches Prinzip**) zustande kommen. Für eine spaltförmige und eine kreisförmige Öffnung soll die Intensitätsverteilung hinter der Öffnung nun etwas eingehender betrachtet werden.

• **Beugung am Spalt**

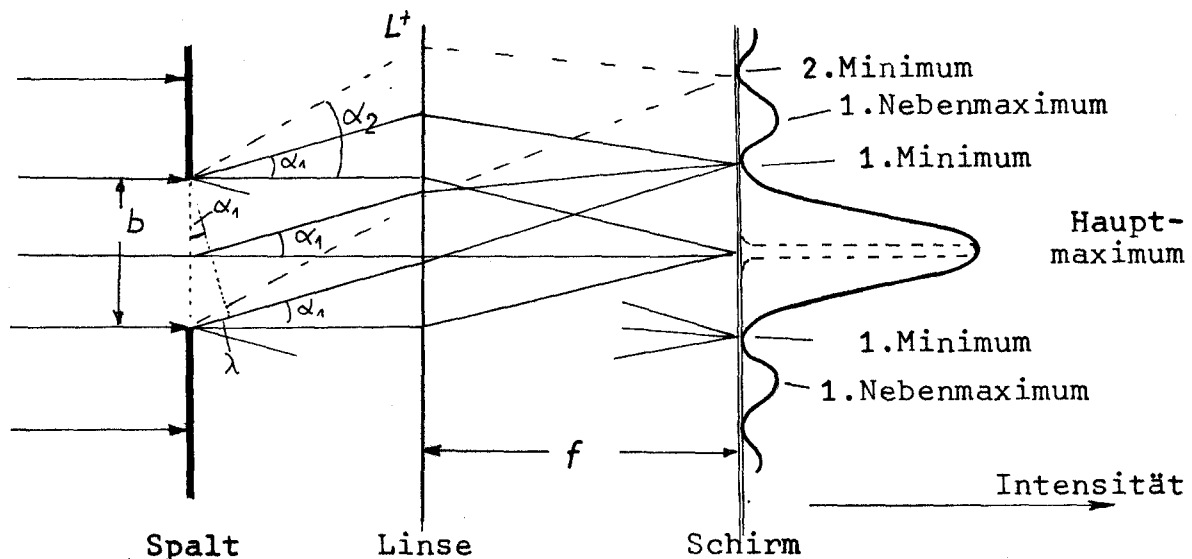


Abb. 5.6: Entstehung der Intensitätsverteilung hinter einem Spalt.

Gegeben ist ein Spalt der Breite b . Dahinter befindet sich eine Linse, in deren Brennebene ein Schirm steht. Beleuchtet man den Spalt mit parallelem Licht, so müsste sich ohne Beugungseffekte auf dem Schirm ein sehr schmaler heller "Streifen" ergeben (in Abb.5.6 die

gestrichelte Intensitätsverteilung). Tatsächlich ergibt sich aber ein System von hellen und dunklen Streifen. Die Intensitätsverteilung quer zur Lichtrichtung in diesem Streifensystem entspricht der ausgezogenen Kurve in Abb.5.6. Die größte Helligkeit findet sich in Geradeausrichtung (Hauptmaximum). Den ersten dunklen Streifen (1. Minimum) beobachtet man unter dem Winkel α_1 . Hier heben sich alle Elementarwellen von Ausgangspunkten mit Abstand $b/2$ gerade auf. Es gilt

$$\sin \alpha_1 = \frac{\lambda/2}{b/2} = \frac{\lambda}{b}$$

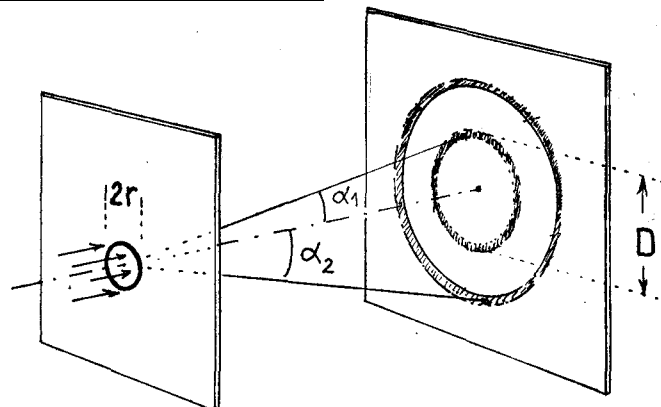
Allgemein gilt für die Richtung α_k des k-ten Minimums:

$$\sin \alpha_k = \frac{k \cdot \lambda}{b} \quad (5.3)$$

($k = 1, 2, \dots$) $\lambda =$ Wellenlänge des Lichts

Gl.5.3 folgt aus der Bedingung, dass **Intensitätsminima** für solche Richtungen hinter dem Spalt auftreten, für die zwischen den beiden Randstrahlen des Bündels ein Gangunterschied von $k \cdot \lambda$ besteht.

- **Beugung an kreisrunder Öffnung**



Die Beugungsfigur hinter einer kreisrunden Öffnung besteht aus einem System von hellen und **dunklen Ringen** (in der Mitte Helligkeit). Die Theorie liefert für die Richtung α_1 des ersten dunklen Ringes:

$$\sin \alpha_1 = \frac{1,22 \cdot \lambda}{2r} \quad (5.4)$$

$r =$ Radius der Öffnung.

Der zentrale Helligkeitsfleck bis zum ersten dunklen Ring wird als "Beugungsscheibchen" bezeichnet. Der Durchmesser D des Beugungsscheibchens ist also gleich dem Durchmesser des ersten dunklen Ringes.

Beugungserscheinungen treten an allen Linsenbegrenzungen (Linsenöffnungen) auf. Je kleiner der Radius r , desto größer ist α_1 , und desto größer auch der Durchmesser D des Beugungsscheibchens. Im allgemeinen werden zwei Beugungsscheibchen dann noch getrennt wahrgenommen, wenn das erste Minimum des einen auf das zentrale Maximum des anderen fällt.

• **Optisches Gitter**

Verwendet man statt **eines** Spaltes **sehr viele** dicht nebeneinander liegende Spalte, so hat man ein optisches **Beugungsgitter**. Der Spaltabstand - die sog. **Gitterkonstante** - liegt bei etwa 1/100 mm bis 1/1000 mm. Ein Gitter besteht z.B. aus einer Glasplatte, in die mit einem Diamanten äquidistante Furchen geritzt wurden. Die Furchen bilden den lichtundurchlässigen Teil, während die Glasstege dazwischen lichtdurchlässig sind und als enge Spalte wirken. Meist werden jedoch nur Kopien von Gittern verwendet (Abdrücke).

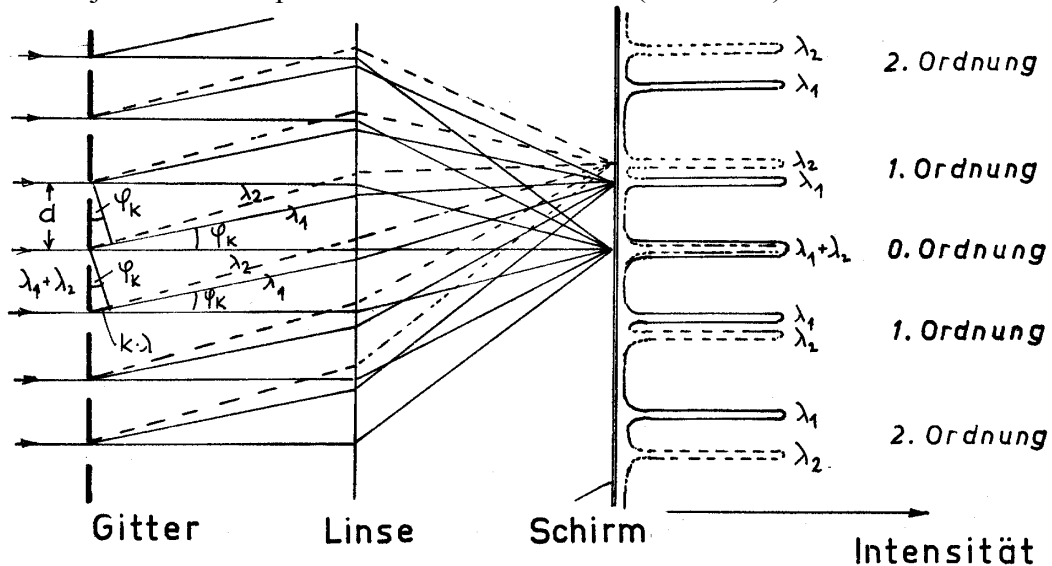


Abb.5.7 Intensitätsverteilung hinter einem optischen Gitter

Die Intensitätsverteilung hinter dem Gitter bei Beleuchtung mit parallelem Licht ist in Abb. 5.7 dargestellt. Im Gegensatz zum Einzelspalt erscheinen die Nebenmaxima beim Gitter nahezu intensitätsgleich. Sie werden außerdem um so schärfer (schmäler), je größer die Zahl der Spalte (Gitterstriche) ist, die vom Lichtbündel durchstrahlt werden.

Die Richtungen φ_k , in der die **Helligkeitsmaxima** k-ter Ordnung für das Gitter liegen, ergeben sich aus der Bedingung, dass der Wegunterschied zweier benachbarter homologer (z.B. jeweils vom oberen Spaltrand in Abb.5.7 ausgehender) Strahlen gleich $k \cdot \lambda$ sein muss:

$$\sin \varphi_k = \frac{k \cdot \lambda}{d} \tag{5.5}$$

d = **Gitterkonstante** = Abstand zweier benachbarter Spalte
 k = **Ordnung**

Nach Gl.(5.5) werden also verschiedene Wellenlängen für eine bestimmte Ordnung k (ausgenommen $k = 0$) verschieden stark gebeugt, so dass z.B. zwei diskrete Wellenlängen λ_1 und λ_2 derselben Ordnung als zwei getrennte Linien erscheinen. Nur in der nullten Ordnung (Geradausrichtung) fallen alle Wellenlängen zusammen. Der Abstand zweier Spektrallinien (z.B. λ_1 und λ_2 Abb.5.7) wird mit zunehmender Ordnung größer, d.h. man erhält eine um so bessere Auflösung, in je höherer Ordnung man beobachtet. Für das

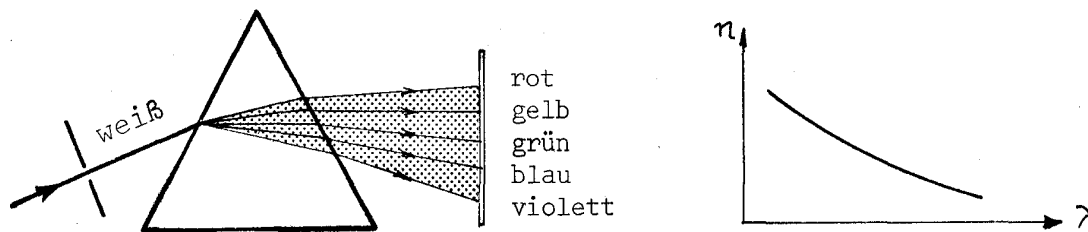
Auflösungsvermögen $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$ des Gitters bei der Wellenlänge λ gilt:

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = k \cdot N$$

N : Zahl der beleuchteten Gitterstriche.

Zwei benachbarte Wellenlängen λ und $\lambda + \Delta\lambda$ werden also gerade getrennt gesehen, wenn das Produkt $k \cdot N$ mindestens gleich $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$ ist.

- **Spektralapparate**



Prinzip der Lichtzerlegung im Prisma

Dispersionskurve für Glas

Zur Messung von Lichtwellenlängen dienen **Spektralapparate**. Abb.5.9 zeigt den Aufbau eines **Gitterspektralapparates**. Zur Beobachtung der Spektrallinien dient ein schwenkbares Fernrohr. Eine Gradeinteilung auf dem Apparat gestattet das Ablesen der Winkel φ . Auf einem ganz anderen Prinzip beruht der **Prismenspektralapparat**. Bei ihm wird das Licht durch ein Glasprisma zerlegt. Der physikalische Grund hierfür liegt in der Tatsache, dass die Lichtgeschwindigkeit im Glas von der Frequenz bzw. Wellenlänge abhängt. Somit hängt auch die Brechzahl von der Wellenlänge ab: $n = n(\lambda)$.

Blaues Licht wird stärker, rotes schwächer gebrochen. Die Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle von der Frequenz heißt Dispersion. Im Vakuum zeigt die Lichtgeschwindigkeit keine Dispersion, wohl aber in Materie.

Licht, das von glühenden festen Körpern und Flüssigkeiten ausgeht, ergibt nach der Zerlegung durch ein Prisma oder optisches Gitter ein **kontinuierliches Spektrum** (die einzelnen Farben gehen ineinander über). Glühende Gase oder Dämpfe dagegen erzeugen ein **Linienpektrum** (einzelne scharfe farbige Linien auf dunklem Grund). Für jede Atomart gibt es charakteristisch Linienpektren. Allgemein werden die Spektren von glühenden Stoffen Emissionsspektren genannt.

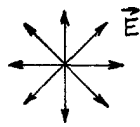
Lässt man weißes Licht auf durchsichtige Körper, Flüssigkeiten oder Gase auftreffen und zerlegt das hindurchgegangene Licht spektral, so erhält man ein Absorptionsspektrum. Es zeigt dunkle Linien oder Streifen auf hellem (farbigem) Untergrund. Die dunklen Bereiche sind durch Absorption einzelner Wellenlängen entstanden. Diese Absorptionslinien können wieder charakteristisch für die absorbierende Substanz sein.

- **Polarisation des Lichtes**

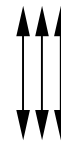
Da Licht eine transversale Welle ist, lässt es sich polarisieren. Bei einer linear polarisierten elektromagnetischen Welle erfolgen die periodischen Änderungen des elektrischen Feldvektors \vec{E} (er wird auch "Lichtvektor" genannt) in einer Ebene, die als **Schwingungsebene** bezeichnet wird (Ebene (\vec{E}, \vec{x}) in Abb.5.1). Die dazu senkrechte Ebene (\vec{H}, \vec{x}) heißt "Polarisationsebene". Der Vektor \vec{x} zeigt in die Ausbreitungsrichtung des Lichts.

Die Lichtaussendung erfolgt durch Atome. Stark vereinfacht kann man sich vorstellen, dass — wie weiter unten erläutert wird — von den einzelnen Atomen der Lichtquelle in unregelmäßiger Folge polarisierte Wellenzüge begrenzter Länge ausgehen. Im zeitlichen Mittel kommen alle Richtungen der Schwingungsebenen der Wellenzüge gleich häufig vor, so dass das Licht einer Lichtquelle immer unpolarisiert ist.

Eine Polarisation des Lichts erfolgt unter bestimmten Bedingungen bei der **Reflexion**, bei der **Streuung** und bei der **Doppelbrechung**. Für die Erzeugung von polarisiertem Licht wird hauptsächlich die Doppelbrechung ausgenutzt. Man versteht darunter die Erscheinung, dass linear polarisiertes Licht in einem anisotropen Kristall (z.B. Kalkspat) je nach Schwingungsrichtung unterschiedlich gebrochen wird. Entsprechend breitet es sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit und Ausbreitungsrichtung aus. Unpolarisiertes Licht wird bei Eintritt in den Kristall in zwei senkrecht zueinander polarisierte Anteile zerlegt, die sich je nach Polarisationsrichtung ausbreiten. Durch Ausblenden oder Absorption einer Komponente erhält man so linear polarisiertes Licht. Vorrichtungen zur Erzeugung von polarisiertem Licht heißen Polarisatoren.



unpolarisiertes Licht



polarisiertes Licht

Der Doppelpfeil stellt die Schwingungsrichtung des Lichtvektors \vec{E} dar.

• Optische Aktivität

Schickt man linear polarisiertes Licht durch eine Rohrzuckerlösung, so stellt man fest, dass sich die Schwingungsrichtung des Lichts nach Durchtritt durch die Zuckerlösung geändert hat. Stoffe, die die Schwingungsebene des linear polarisierten Lichts zu drehen vermögen, heißen **optisch aktive Stoffe**.

Der Drehwinkel α ist proportional zur Länge der Probe und proportional zur Konzentration: $\alpha = \alpha^* \cdot l \cdot k$. Der spezifische Drehwinkel α^* ist materialabhängig. Apparate zur Bestimmung des Drehwinkels von opt. aktiven Stoffen heißen Polarimeter, wenn sie zur Zucker Konzentrationsbestimmung dienen: Saccharimeter. Es gibt rechts- und linksdrehende Substanzen (Rechtsdrehung, wenn vom Beobachter aus gesehen, Drehung im Uhrzeigersinn erfolgt). α lässt sich durch Drehen des Analysators ermitteln.

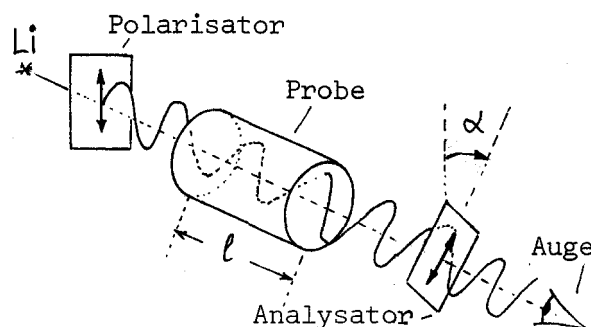


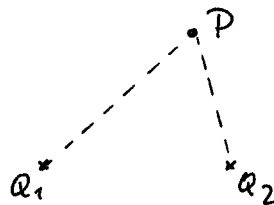
Abb. 5.8: Funktionsweise eines Polarimeters

Was man unbedingt wissen sollte:

- Was versteht man unter dem 'Dualismus des Lichtes'?
- Was ist ein Photon und wie berechnet sich dessen Energie?
- Wann bezeichnet man zwei Wellensysteme als kohärent?
- Wie bezeichnet man auch die Überlagerung zweier Wellensysteme und welche Phänomene können dabei auftreten?
- Wie kommt es zum Phänomen der Beugung?
- Zu welchem Zweck kann ein Gitterspektralapparat eingesetzt werden?
- Was versteht man unter optischer Aktivität?
- Welche physikalischen Phänomene treten auf, wenn Licht auf einen Körper trifft?
- Welche mathematische Funktion beschreibt die Lichtintensitätsabnahme durch eine Lösung mit gegebener Schichtdicke?
- Welche Eigenschaft eines Stoffes wird durch die Absorptionskonstante beschrieben, von was ist sie abhängig?
- Was bezeichnet man als Extinktion?

Übungsaufgaben:

- Ü 5.1 Warum ist Licht eine Transversalwelle?
- Ü 5.2 Für welchen Wellenlängenbereich und welchen Frequenzbereich ist das Auge für elektromagnetische Strahlung durchlässig? Das Auge ist für grünes Licht am empfindlichsten. Wie würde dann die Empfindlichkeit als Funktion der Frequenz im Diagramm aussehen?
- Ü 5.3 Wie groß sind Frequenz, Wellenlänge und Geschwindigkeit von rotem Licht mit der Frequenz $4,3 \cdot 10^{14}$ Hz in Wasser ($n = 1,33$)?
Wie groß ist die Energie eines Photons mit dieser Frequenz?
- Ü 5.4 Was versteht man unter Interferenz? Wann sind zwei Lichtquellen kohärent?
- Ü 5.5 Q_1 und Q_2 sind zwei kohärente Lichtquellen. Wann tritt im Punkt P Helligkeit und wann Dunkelheit auf?



- Ü 5.6 Wodurch unterscheidet sich Licht eines Lasers vom Licht einer Glühlampe?
- Ü 5.7 Was versteht man unter Beugung? Wann ist die Beugung besonders ausgeprägt?
- Ü 5.8 Für welche Richtung tritt hinter einem $0,1$ mm breiten Spalt das 2. Minimum auf, wenn der Spalt mit Licht der Frequenz $5 \cdot 10^{14}$ Hz beleuchtet wird?
- Ü 5.9 Auf eine Linse mit der Brennweite $f = 7$ mm und dem Linsendurchmesser $D = 2$ mm falle paralleles Licht der Wellenlänge 550 nm. Wie groß ist der Beugungswinkel (in Minuten) für das erste Minimum?
Wie groß ist der Radius des Beugungsscheibchens in der Brennebene der Linse?
- Ü 5.10 Wie unterscheidet sich die Helligkeitsverteilung hinter einem Spalt von der hinter einem Gitter für einfarbiges Licht (Skizze)?
- Ü 5.11 Was versteht man unter Dispersion? Hat blaues oder rotes Licht in Glas die größere Geschwindigkeit?
- Ü 5.12 Welche Körper senden ein kontinuierliches und welche ein Linienspektrum aus?
- Ü 5.13 Warum treten im Sonnenspektrum dunkle Linien auf?

Versuchsdurchführung 5A Gitterspektralapparat

- **Aufgabenstellung:**

Man bestimme die Wellenlängen der vier hellsten Spektrallinien (blau, grün, gelb, gelb) einer Hg-Dampf-Lampe in 1. Ordnung und die Wellenlänge der grünen Linie auch in 2. Ordnung.

- **Versuchsdurchführung:**

Das den Kollimator (Sammellinse) verlassende Lichtbündel soll möglichst parallel sein, d.h. der Eintrittsspalt ES (von der Lichtquelle beleuchtet) muss in der Brennebene der Kollimatorlinse liegen. Um dies zu erreichen, stellt man zunächst das Fernrohr durch Beobachtung eines weit entfernten Gegenstandes auf "Unendlich" ein. Dies ist bereits durchgeführt. Auf dem Fernrohr okular ist hierfür eine Markierung angebracht. Bei dieser Fernrohereinstellung ($\varphi = 0^\circ$) verschiebt man nun den Eintrittsspalt ES des Kollimators so lange, bis der Spalt scharf erscheint.

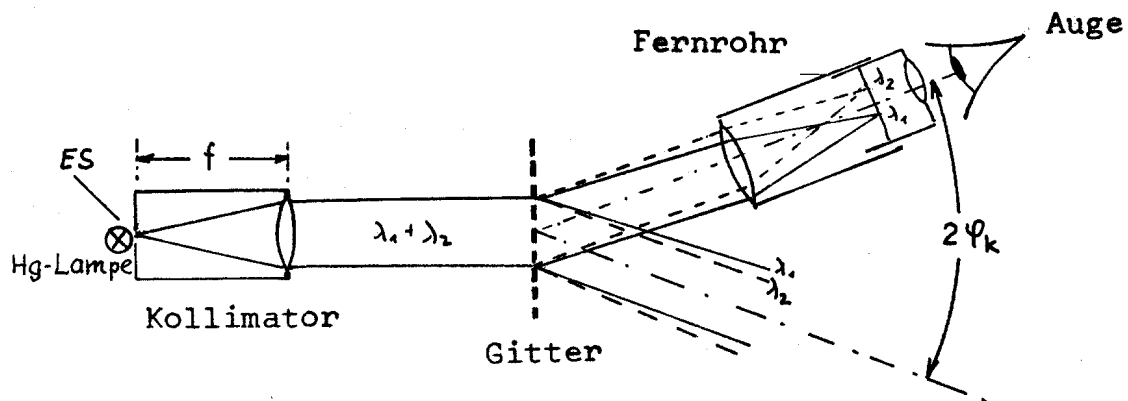


Abb.: 5.9 Gitterspektralapparat

Dreht man das Fernrohr von der Mitte aus nach rechts oder links, so erscheinen im Gesichtsfeld des Fernrohrs die Spektrallinien. Möglichst schmale Linien erhält man durch Verkleinern der Spaltbreite des Eintrittsspalt. Mit Hilfe einer Arretierung und eines Feintriebes am Spektrometer (Erläuterung durch den Assistenten!) lässt sich das Fadenkreuz im Okular genau auf die zu messende Linie justieren. Die Ablesung des Winkels auf dem Teilkreis des Spektrometers kann mit dem Nonius auf $\pm 0,05^\circ$ erfolgen.

Man dreht dann nach Lösen der Arretierung das Fernrohr zur anderen Seite und stellt auf die entsprechende Linie derselben Ordnung ein. Die Differenz $\varphi_r - \varphi_l$ der Ablesungen rechts und links ergibt den doppelten Winkel $2 \cdot \varphi_k$.

Die Berechnung der Wellenlänge erfolgt nach Gl.5.5. Die Gitterkonstante d ist am Arbeitsplatz angegeben.

Man trage alle Messwerte und Ergebnisse zur besseren Übersicht in eine Wertetabelle nach folgendem Schema ein und gebe darin auch die Wellenlängen in den verlangten Einheiten an:

Wertetabelle für 1. Ordnung

Farbe	φ_r	φ_l	$2\varphi = \varphi_r - \varphi_l$	φ	λ		
					μm	nm	Å
blau							
grün							
gelb							
gelb							

Werte für grüne Linie in 2.Ordnung:

φ_r	φ_l	$2\varphi = \varphi_r - \varphi_l$	φ	λ / nm

Versuchsdurchführung 5A: Beugung mit Laserlicht

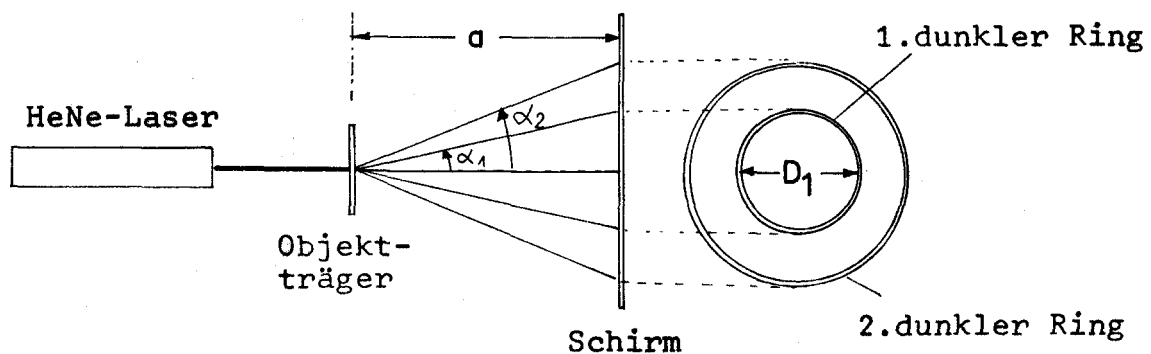
• Aufgabenstellung:

- Man bestimme den Durchmesser $d = 2r$ (in μm) von roten Blutkörperchen aus dem Winkel α_1 für den ersten dunklen Beugungsring bei Beleuchtung mit Laserlicht.
- Man bestimme den Durchmesser einiger Blutkörperchen auch durch Ausmessen unter dem Mikroskop

• Versuchsdurchführung:

Beugungserscheinungen werden mit Laserlicht besonders kontrastreich. Die Beugungsfiguren, die bei Beleuchtung kleiner kreisrunder Öffnungen vom Durchmesser $2r$ entstehen, sind identisch mit den Beugungsfiguren, die an lichtundurchlässigen Scheibchen vom gleichen Durchmesser hervorgerufen werden.

Beleuchtet man eine Glasplatte (Objektträger), auf der sich nebeneinander rote Blutkörperchen befinden, so tritt auf einem hinter dem Objektträger befindlichen Schirm ein System von hellen und dunklen Ringen auf.



Nach Gl.(5.4) gilt für den Winkel α_1 , unter dem der erste dunkle Ring erscheint:

$$\sin \alpha_1 = \frac{1,22 \cdot \lambda}{2r}$$

Ist D_1 der Durchmesser des ersten dunklen Ringes und a der Abstand Schirm - Objektträger, so ist:

$$\tan \alpha_1 = D_1 / 2a .$$

Die Wellenlänge des verwendeten Laserlichts beträgt 633 nm.

Versuch 5B Spektralphotometrie

Erläuterung der wichtigsten Physikalischen Grundbegriffe:

Fällt Licht auf einen Körper, so wird ein Teil des Lichtstroms an der Oberfläche des Körpers reflektiert. Das in den Körper eindringende restliche Licht wird teilweise absorbiert und teilweise durchgelassen.

Ist I_0 die auf den Körper auftreffende Lichtintensität, I_r die reflektierte, I_a die absorbierte und I die durchgelassene Lichtintensität, so bezeichnet man als:

Reflexionsgrad	$r = \frac{I_r}{I_0}$	(5.6.a)
-----------------------	-----------------------	----------------

Absorptionsgrad	$\alpha = \frac{I_a}{I_0}$	(5.6.b)
------------------------	----------------------------	----------------

Transmission	$T = \frac{I}{I_0}$	(5.6.c)
---------------------	---------------------	----------------

Die **Absorption** ist abhängig von der Art des Stoffes (bei Lösungen auch von der Konzentration des gelösten Stoffes) und von der Wellenlänge λ des eingestrahnten Lichts. Misst man für einen bestimmten Stoff den Absorptionsgrad als Funktion der Lichtwellenlänge, so erhält man sein **Absorptionsspektrum**. Stoffe, die nur im ultraroten und ultravioletten Bereich absorbieren, erscheinen farblos. Erfolgt die Absorption im Sichtbaren gleichmäßig für alle Wellenlängen, so erscheint die Substanz grau. Dagegen erscheint die Substanz farbig, wenn aus dem sichtbaren Bereich des Spektrums nur bestimmte Wellenlängen oder Wellenbereiche absorbiert werden.

Fällt monochromatisches Licht auf eine **Lösung**, die einen Stoff enthält, der dieses Licht absorbiert, so ist die Intensität I des austretenden Lichts geringer als die Intensität I_0 des eintretenden Lichts. Der reflektierte Anteil des Lichts wird in der Praxis dadurch eliminiert, dass die I_0 -Messung nach Durchtritt des Lichts durch eine Küvette allein mit dem **Lösungsmittel** erfolgt. Es gilt dann:

$$\alpha + T = 1 \qquad (5.7)$$

- **Lambertsches Gesetz**

Wir betrachten eine Küvette mit einer Lösung der Schichtdicke d . I_0 sei die auf die Lösung auftreffende Lichtintensität, I diejenige nach Durchtritt durch die Lösung. Lambert fand

heraus, dass die Lichtintensität I mit zunehmender Schichtdicke d **exponentiell** abnimmt. Es gilt demnach ($e = 2,718\dots$: Basis der natürlichen Logarithmen):

Lambertsches Gesetz	$I(d) = I_0 \cdot e^{-k \cdot d}$	(5.8)
----------------------------	-----------------------------------	--------------

k : Absorptionskonstante

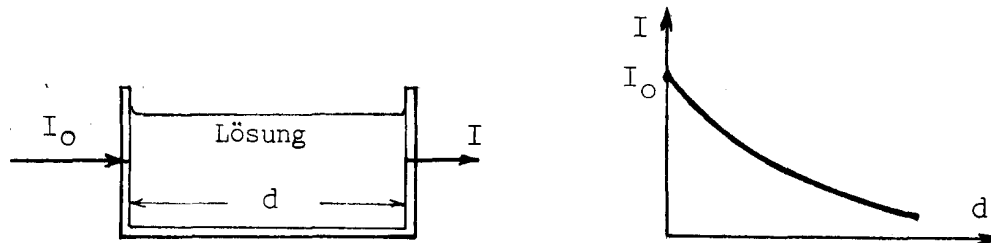


Abb.5.10 Abnahme der Intensität monochromatischen Lichts beim Durchgang durch

Das Lambertsche Gesetz (Gl.5.8) beschreibt also die Abnahme der durchgegangenen Lichtintensität von monochromatischem Licht durch eine Lösung als Funktion der Schichtdicke d . Abb.5.10 zeigt qualitativ den Verlauf.

Die **Absorptionskonstante** k hängt bei konstanter Temperatur von der **Wellenlänge** des eingestrahlt Lichts und von der Art und der Konzentration der absorbierenden Substanz ab.

- **Beersches Gesetz**

Beer stellte fest, dass die relative Intensitätsabnahme in einer Lösung bei konstant gehaltener Schichtdicke und für eine gegebene Wellenlänge proportional ist zur Konzentration c des gelösten Stoffes. Dies bedeutet, dass k proportional zu c ist:

Beersches Gesetz	$k = k' \cdot c$	(5.9)
-------------------------	------------------	--------------

- **Lambert-Beersches Gesetz**

Setzt man dies in Gl.5.8 ein, so erhält man:

$I(d) = I_0 \cdot e^{-k' \cdot c \cdot d}$	(5.9.a)
--	----------------

d.h. die Intensität nimmt (bei konstanter Schichtdicke d) auch mit der Konzentration c exponentiell ab. k' ist nur noch eine Funktion der Wellenlänge des Lichts und der Stoffart des gelösten Stoffes. Bei bekanntem k' und gegebener Schichtdicke d lässt sich durch Messen der Intensität I und I_0 die Konzentration c einer Lösung photometrisch nach Gl.5.9a bestimmen. Für die Berechnung von c aus Gl.5.9a muss man diese logarithmieren. Man erhält:

$$-\log \frac{I}{I_0} = k' \cdot c \cdot d \cdot \log e = \varepsilon \cdot c \cdot d$$

mit $\varepsilon = k' \cdot \log e$ ε : **molarer dekadischer Extinktionskoeffizient**

Der dekadische Logarithmus von I_0/I wird **Extinktion** E genannt:

$$E = \log \frac{I_0}{I} \quad (5.10)$$

Damit erhält man:

Lambert-Beersches Gesetz $E = \varepsilon \cdot c \cdot d$ (5.11)
--

Es wird auch als **Grundgesetz der Absorptionsphotometrie** bezeichnet. Das Gesetz gilt nur für verdünnte Lösungen (c kleiner als 10 mol/l.)

Bei konstanter Temperatur des absorbierenden Stoffes ist also die Extinktion proportional zur Schichtdicke d und zur Konzentration c . Für konstante Schichtdicke ist $E \sim c$ (Abb. 5.11).

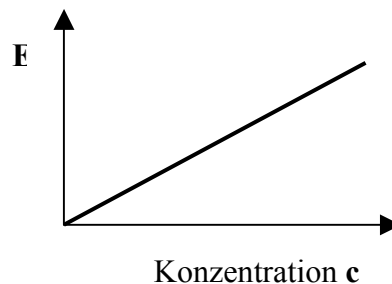


Abb.5.11 Lambert-Beersches Gesetz

Der molare dekadische Extinktionskoeffizient hängt von der Natur des absorbierenden Stoffes und von der Wellenlänge des eingestrahlt Lichts ab. Gibt man c in mol/l und d in cm an, so hat ε die Einheit $1 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. In der Praxis werden oft auch andere Einheiten benutzt.

Transmission T und Absorptionsgrad α lassen sich ebenfalls als Funktion der Konzentration oder Schichtdicke darstellen. Es ist:

$$T(d) = e^{-k' \cdot c \cdot d} \quad (5.12)$$

und

$$\alpha = 1 - e^{-k' \cdot c \cdot d} \quad (5.13)$$

Die Abb.5.12 zeigt qualitativ die entsprechenden Verläufe von T und α als Funktion der Konzentration.

Zwischen der Transmission T und der Extinktion E besteht folgender Zusammenhang:

$E = -\log T$ bzw. $T = 10^{-E}$ (5.14)

Misst man die Extinktion einer Lösung als Funktion der Wellenlänge des Lichts und trägt die Extinktion bzw. den Extinktionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ auf, so erhält man das **Absorptionsspektrum**, das für jeden Stoff ein Charakteristikum darstellt und zu seiner Identifizierung dienen kann.

In Abb.5.13 sind als Beispiel die Absorptionsspektren von Hämoglobinproben unterschiedlichen Sauerstoffgehalts dargestellt.

Das Absorptionsspektrum einer Lösung setzt sich zusammen aus der Absorption durch den gelösten Stoff und der durch das Lösungsmittel. Bei den üblichen Lösungsmitteln, wie Wasser, Alkohol, Aceton, Benzol usw., liegt der Absorptionsbereich nicht im Sichtbaren, da sie farblos erscheinen, so dass Absorptionsanteile durch das Lösungsmittel nicht auftreten. Zeigt jedoch auch der gelöste Stoff im sichtbaren Licht keine Absorption (farblose Lösung!), so steht für eine photometrische Ausmessung noch der ultraviolette und der infrarote Bereich zur Verfügung. Da in diesen Bereichen aber meist die farblosen Lösungsmittel absorbieren, müssen bei photometrischen Messungen im UV und IR die Absorptionseigenschaften der Lösungsmittel gesondert untersucht werden. Farblose Stoffe können auch durch geeignete chemische Reaktionen in Substanzen übergeführt werden, die im Sichtbaren charakteristisch absorbieren.

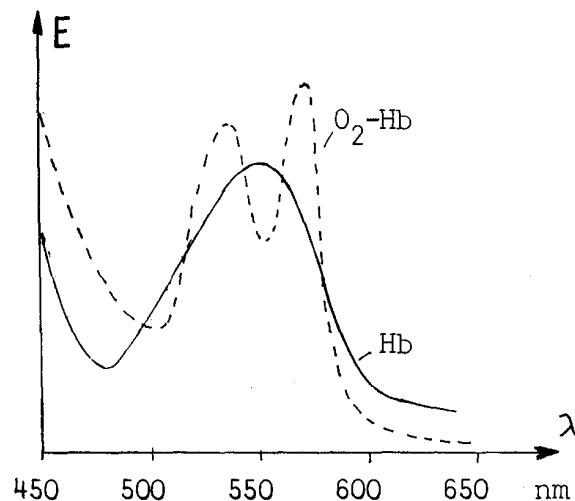


Abb.5.13: Absorptionsspektren von sauerstofffreiem (Hb) und sauerstoffbeladenem Hämoglobin (O_2 -Hb)

Bei der Absorption von Strahlung werden von einem Molekül genau definierte (gequantelte) Energiebeträge aufgenommen. Das Molekül geht dabei in einen angeregten Zustand über. Für jedes Molekül gibt es daher spezifische Linienspektren, die aber in Lösungen in **Absorptionsbanden** übergehen (bedingt durch die Wechselwirkung mit den Lösungsmittelmolekülen).

Bei der Absorption im Sichtbaren und im UV handelt es sich um Änderungen der Energie der Valenzelektronen. Bei der Absorption im nahen Infrarot werden molekulare Oszillationen angeregt. Die von den Molekülen aufgenommene Strahlungsenergie wird entweder in Wärme umgewandelt oder wieder als Strahlung abgegeben (Fluoreszenz). Die Wellenlänge der Fluoreszenzstrahlung kann dabei nie kleiner als die des eingestrahlten Lichts sein (Stokessche Regel).

Die **Absorptionsphotometrie** gehört im biochemischen und klinischen Labor zu den wichtigsten Verfahren der qualitativen und quantitativen Analyse. Durch die Aufnahme des Absorptionsspektrums der zu untersuchenden Probe über einen größeren Spektralbereich kann die gesuchte Verbindung durch Vergleich mit bekannten Spektren identifiziert werden. Die Messung der Extinktion E bei einer bestimmten Wellenlänge erlaubt es nach dem Lambert-Beerschen Gesetz, die Konzentration der Substanz zu bestimmen, wenn der Extinktionskoeffizient ϵ und die Schichtdicke d bekannt sind (quantitative Analyse). Die Methode zeichnet sich durch große Einfachheit und hohe Empfindlichkeit aus (wenige Mikrogramm der zu bestimmenden Substanz reichen oft aus).

Zur Aufnahme von Absorptionsspektren und zur Messung der Extinktion bzw. Transmission dienen **Spektralphotometer**. Abb. 5.14 zeigt schematisch den Aufbau eines Spektralphotometers.

Das von der Lichtquelle (z.B. einer Wolframlampe) ausgehende weiße Licht durchsetzt zunächst einen "Monochromator". Der Monochromator besteht entweder aus einem optischen Gitter oder einem Prisma oder einzelnen Filtern. Beim Prisma und beim Gitter wird das weiße Licht in ein kontinuierliches Spektrum zerlegt. Durch Ausblenden eines schmalen Wellenlängenbereichs erhält man dann annähernd monochromatisches Licht (Spektralbreite ca. 10 nm). Dreht man bei fester Blendenanordnung das Gitter bzw. Prisma, so treffen andere Wellenlängenbereiche auf den Durchlassspalt. Man kann auf diese Weise den ganzen Spektralbereich "durchfahren", d.h. jede gewünschte Wellenlänge in kontinuierlicher Folge auswählen. Bei der Verwendung von Einzelfiltern steht dagegen pro Filter jeweils nur ein Wellenlängenbereich zur Verfügung (Filterphotometer).

Das aus dem Monochromator austretende einfarbige Licht durchsetzt nun die Küvette mit der zu untersuchenden Lösung. Der von der Lösung nicht absorbierte Lichtstrom fällt anschließend auf einen Detektor (Photozelle, Photoelement), der Licht in elektrischen Strom umwandelt. Der Detektor ist mit einem Verstärker mit Anzeigeinstrument verbunden. Der Zeigerausschlag des Messinstruments ist dann ein Maß für die auf den Detektor auftreffende Lichtintensität. Eine eingebaute Elektronik wandelt die Intensitätswerte des Lichts in Extinktionswerte um, so dass diese direkt abgelesen werden können.

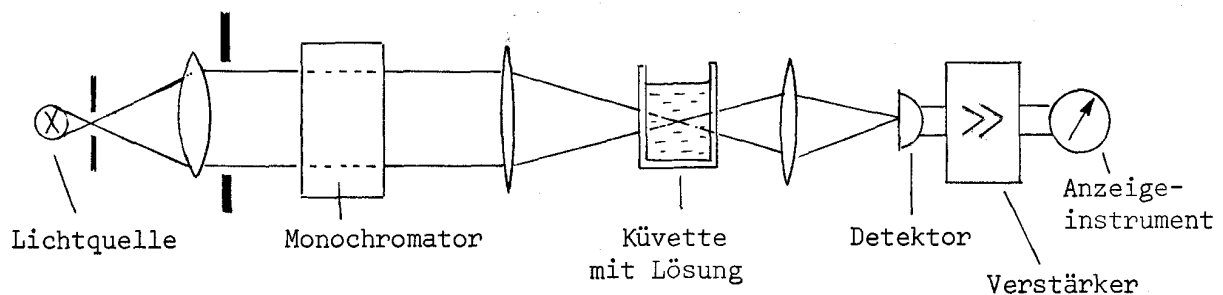


Abb.5.14: Aufbau des Spektralphotometers

Versuchdurchführung 5 B: Spektralphotometer

- **Aufgabe:**

1. Aufnahme des Absorptionsspektrums einer gegebenen Lösung (Messung von E als Funktion von λ).

2. Prüfung des Lambert-Beerschen Gesetzes und Bestimmung des molaren dekadischen Extinktionskoeffizienten ϵ der gegebenen Substanz für eine vorgegebene Wellenlänge.

- **Apparatur und Versuchsdurchführung:**

Abb.5.15 zeigt eine Ansicht des vorhandenen Gitterspektralphotometers. Es ist ein kommerzielles Gerät und zeigt je nach Stellung des Betriebsartschalters die E-Werte oder T-Werte direkt an.

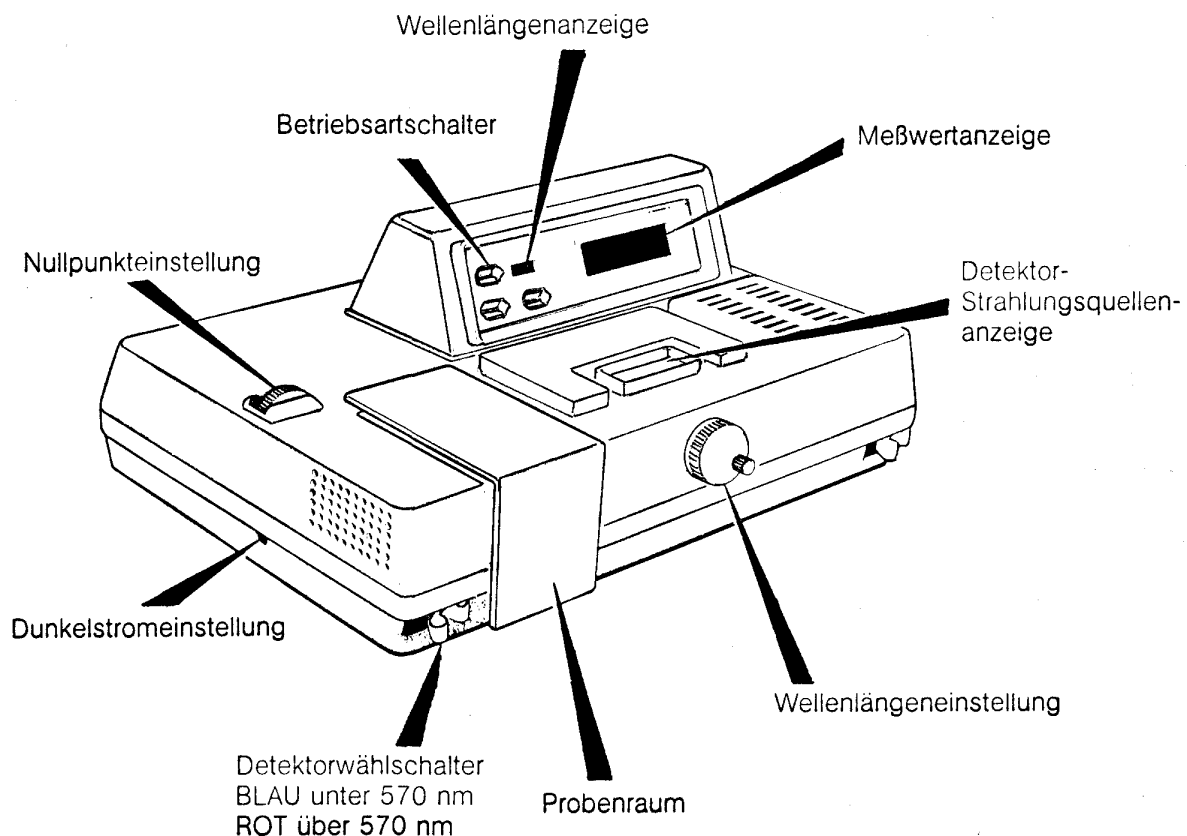


Abb.5.15 Ansicht des Spektralphotometers

Die Wellenlängeneinstellung erfolgt an der Frontseite. Das Gerät enthält zwei Detektoren: Für Licht der Wellenlänge unter 570 nm (blauer Bereich) und für Licht über 570 nm (roter Bereich). Bei Über- oder Unterschreitung des Wertes 570 nm muss also der Detektorwählschalter umgestellt werden. Der Probenraum enthält einen Küvettenwechsler für vier Küvetten. Um Reflexionsverluste an den Küvettenwänden und eine eventuelle Absorption durch das Lösungsmittel selbst zu eliminieren, wird zunächst eine Küvette mit dem reinen Lösungsmittel in den Strahlengang gebracht und mit Hilfe des Nullpunktreglers

die Messwertanzeige bei E-Messung auf Null bzw. bei T-Messung auf 100 % eingestellt. Da die Detektoransprechempfindlichkeit von der Wellenlänge abhängt, muss diese Nullpunktseinstellung für jede gewählte Wellenlänge neu durchgeführt werden. Man verfährt nun bei der Extinktionsmessung wie folgt:

- a) Betriebsartschalter auf 0-1A. stellen.
- b) Gewünschte Wellenlänge einstellen (dabei auf Detektorwählschalter achten!).
- c) Blindlösung (Küvette mit reinem Lösungsmittel) in den Probenraum einsetzen und Probenraum schließen.
- d) Mit Nullpunktregler am Zeigerinstrument Nullwert einstellen.
- e) Blindlösung durch Probe ersetzen (Küvettenwechsler um eine Raste weiter ziehen) und Extinktionswert am Zeigerinstrument ablesen.

Auf diese Weise bestimme man die E-Werte für eine Reihe von Wellenlängen (am Arbeitsplatz genauer angeben) und trage die E-Werte als Funktion der Wellenlänge in einem Diagramm auf (Absorptionsspektrum).

Für die Prüfung des Lambert-Beerschen Gesetzes verdünne man die vorgegebene Lösung der Konzentration c_0 auf $2/3 c_0$ und $1/3 c_0$ und bestimme wieder jeweils den E-Wert für die Wellenlänge des Absorptionsmaximums.

Man trage nun E als Funktion von der Konzentration auf (3 Werte). Man überprüfe nun die Gültigkeit des Lambert-Beerschen Gesetzes: Die Messpunkte müssen einschließlich des Nullpunkts auf einer Geraden liegen.

Für die Ermittlung des Extinktionskoeffizienten bestimme man aus der grafischen Darstellung das Steigungsmaß $\Delta E / \Delta c$ und daraus bei bekannter Schichtdicke $d = 1 \text{ cm}$ den molaren dekadischen Extinktionskoeffizienten ϵ (Wellenlänge angeben!).

Übungsaufgaben:

- Ü 5.16 Wann erscheint ein Körper grau, wann farbig?
- Ü 5.17 Was versteht man unter Transmission und Extinktion? Wie hängen Transmission und Extinktion zusammen? Welchen E-Wert hat eine Lösung mit der Transmission 0,2? Welche Transmission hat eine Lösung, wenn $E = 2$?
- Ü 5.18 Wie lautet das Lambertsche Gesetz der Lichtabsorption? Wovon ist die Absorptionskonstante in diesem Gesetz abhängig? Welche SI-Einheit hat sie?
- Ü 5.19 Wie viel Prozent Licht wird jeweils absorbiert, wenn die Extinktion 1 bzw. 2 beträgt?
- Ü 5.20 Wie lautet das Lambert-Beersche Gesetz?
Wovon hängt der molare dekadische Extinktionskoeffizient ab?
- Ü 5.21 Eine Lösung mit der Schichtdicke 1 cm absorbiert 20 % des auftreffenden Lichts. Wie viel % absorbiert dann eine 2 cm dicke Schicht?
- Ü 5.22 Skizzieren Sie in einem Diagramm die Transmission und den Absorptionsgrad als Funktion der Schichtdicke.
- Ü 5.23 Was ist ein Monochromator?
- Ü 5.24 Warum muss man beim Spektralphotometer bei jeder neuen Wellenlängeneinstellung zunächst den Nullpunkt neu einregeln?

