

I. Licht

1. Erzeugung und Nachweis von Licht

1.1 Lichtquellen

Die Sonne ist die wichtigste Lichtquelle für unser Leben auf der Erde. Da ihre Physik in der vorjährigen Vorlesung besprochen wurde, wollen wir uns heute auf die Beschreibung terrestrischer Lichtquellen beschränken. In früherer Zeit war das Feuer die Quelle von Licht und Wärme. Anstelle des Feuers sind heute die Lampen getreten, z.B. die Glühbirne, die Leuchtstoffröhre und der Laser. Diese Quellen unterscheiden sich im wesentlichen durch ihre Helligkeit, d.h. die Menge des pro Sekunde abgestrahlten Lichtes, durch ihre Farbe und ihre räumliche Verteilung: Eine Glühbirne z.B. sendet gleichmäßig in alle Richtungen weißes Licht aus, während Laserlicht eine bestimmte Farbe hat und scharf in eine Richtung gebündelt ist. Allen Lichtquellen ist gemeinsam, dass sie Energie aufnehmen und (teilweise) in Licht umwandeln. In einer vorläufigen und unvollständigen Form können wir also feststellen, dass Licht eine Form von Energie ist. Später werden wir sehen: Licht besteht aus kleinen Energiepaketen, den sog. Photonen.

Zunächst stellen wir einige Lichtquellen vor. Dann werden wir die Spektren der verschiedenen Quellen aufnehmen, d.h. das Licht in sog. reine Farben zerlegen (Spektralzerlegung). Zum Schluss werden wir die Farben durch die zugehörigen Wellenlängen charakterisieren.

Versuch: Lichtquellen

- a) Eine Glühlampe beruht auf dem Prinzip, dass jeder genügend heiße Körper Licht abstrahlt. Die Farbe und die Intensität des Lichtes hängen dabei von der Temperatur ab. Wenn man die Spannung an einer Glühbirne erhöht, steigt die Temperatur des Glühfadens, dessen Farbe sich von Dunkelrot über Hellrot und schließlich zu einem gleißenden Weiß verändert.
- b) In einer heißen farblosen Flamme werden verschiedene chemische Substanzen verdampft. Bei Natrium leuchtet die Flamme gelb, grün bei Strontium und rot bei Barium. Dieses Experiment steht für die Lichterzeugung in Leuchtstoffröhren, wobei der Mechanismus allerdings etwas komplizierter ist.
- c) Ein Laser ist eine kompliziertere Lichtquelle, die wir hier nicht genauer erklären können. Er produziert Licht von genau einer Farbe, das in einem Strahl hochgradig gebündelt wird, so dass die Lichtenergie auf einen kleinen Fleck konzentriert ist. Laser sind inzwischen für wissenschaftliche Untersuchungen, aber auch in vielen technischen Geräten unentbehrlich.

1.2 Brechung und Dispersion des Lichtes

Die Brechung von Licht ist ein aus dem täglichen Leben vertrautes Phänomen: Die Richtung eines Lichtstrahles ändert sich abrupt, wenn der Strahl schräg von einem Medium, z.B. Luft in ein anderes Medium, z.B. Wasser oder Glas übergeht. Dabei ist

entscheidend, ob das Licht vom optisch dünneren ins dichtere Medium (z.B. Luft \rightarrow Wasser) übertritt oder umgekehrt (Wasser \rightarrow Luft). Im ersten Fall wird das Licht zum Einfallslot hin, im zweiten vom Einfallslot weg gebrochen. Der Zusammenhang zwischen Einfallswinkel α und Brechungswinkel β ist durch das Snelliussche Brechungsgesetz $\sin\alpha/\sin\beta = n$ gegeben, wobei beim Übergang aus Luft bzw. Vakuum der Brechungsindex n charakteristisch für das optisch dichtere Medium ist.

Fällt ein Lichtstrahl senkrecht auf die Grenzfläche, so wird er nicht gebrochen. Fällt er unter einem genügend großen Einfallswinkel vom optisch dichteren Medium auf die Grenzfläche, so wird er vollständig oder total reflektiert.

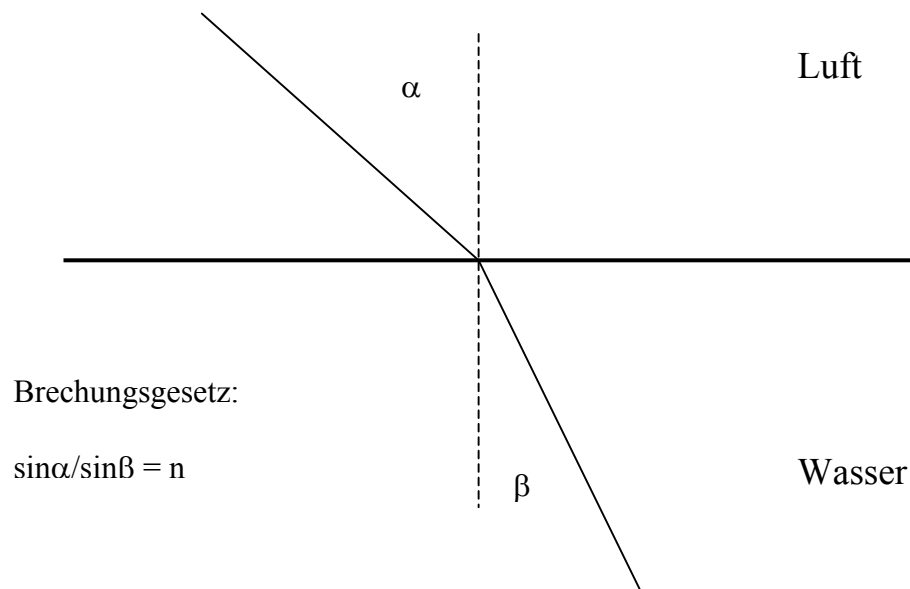


Abb. 1.1: Brechung von Licht beim Übergang von Luft in Wasser

Versuch: Lichtbrechung und Totalreflexion

Von einer Lampe im Wasser werden mehrere Strahlen ausgeblendet, die von unten auf die Trennfläche zwischen Wasser und Luft treffen. Man sieht die verschiedenen Brechungswinkel, aber auch das Phänomen der Totalreflexion, wenn der Strahl genügend flach auf die Trennfläche trifft.

Die Lichtbrechung ist ein schon lange bekanntes Phänomen und wird in vielen optischen Geräten, z.B. in den Linsensystemen des Photoapparats oder des Mikroskops, ausgenutzt.

Der Brechungswinkel des Lichts hängt ferner von seiner Farbe ab. Oder umgekehrt: Lässt man einen Strahl weißes Licht auf eine Grenzfläche fallen, so fächert er sich in farbige Strahlen auf, die sich in verschiedene Richtungen weiter bewegen. Dieses Phänomen, das Dispersion genannt wird, soll im folgenden Versuch gezeigt werden,

Versuch : Dispersion

Fällt ein Strahl aus weißem Licht schräg auf die Seite eines Prismas, wird er zweimal gebrochen und in eine andere Richtung gelenkt. Dabei wird er in ein farbiges Band aufgefächert. In einem Geradsichtprisma wird der Strahl zwar auch in Farben aufgefächert, aber der Strahl verlässt das Prisma nahezu ohne Ablenkung

Mit Hilfe eines Geradsichtprismas wurde das Licht aus den oben vorgestellten Lampen untersucht.

Versuch: Spektren verschiedener Lichtquellen

- a) Das Licht der Glühlampe liefert ein kontinuierliches Spektrum von Farben von Rot über Grün zu Blau.
- b) Das Licht der Flammenfärbung führt zu scharfen Linien. Dies wurde mit einer Quecksilber-Dampfampe gezeigt. Ob eine oder mehrere Linien auftreten und von welcher Farbe sie sind, ist eine charakteristische Eigenschaft der in der Flamme verdampften Substanz. Deshalb benutzt man die Zerlegung in Farben auch zur Identifikation von chemischen Elementen (Spektralanalyse nach Bunsen und Kirchhoff).
- c) Das Laserlicht liefert genau eine Linie. Man nennt das Licht deshalb auch monochromatisch.

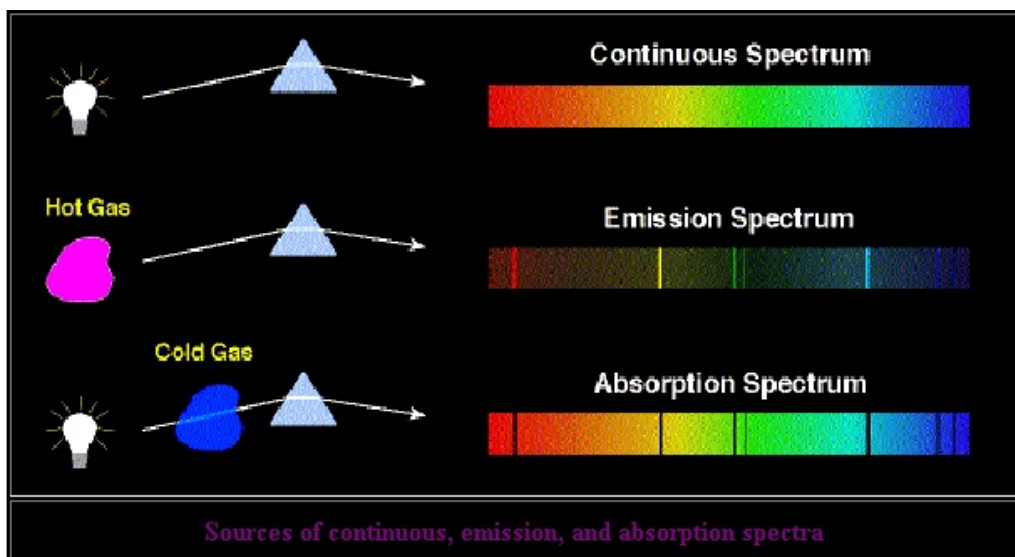


Abb. 1.2: Entstehung der verschiedenen Arten von Spektren. Bei gleichem Gas liegen die Linien im Absorptionsspektrum an der gleichen Stelle wie die im Emissionsspektrum, denn was vom kalten Gas absorbiert wird, wird vom heißen emittiert.

1.3 Zusammenhang zwischen der Farbe des Lichtes und seiner Wellenlänge

Die Farben des Lichtes sind ein wunderbares ästhetisches Erlebnis, aber sie sind auch recht subjektiv. Wie kann man einem anderen Menschen genau die Farbe einer Lichtquelle beschreiben? Physik ist andererseits eine quantitative Wissenschaft, deren Ziel es sein muss, jede Naturbeobachtung letztlich auf Zahlen und mathematische Zusammenhänge zwischen diesen Zahlen zurückzuführen. Wir wollen diesen Weg jetzt für die Farben des Lichtes verdeutlichen. Dazu bedienen wir uns der Analogie mit dem Schall.

Beim Anschlagen einer Stimmgabel entsteht ein reiner Ton. Das Zusammenspiel vieler Instrumente führt zu einem Gemisch von Tönen. Die einzelnen reinen Farben eines Linienspektrums entsprechen den reinen Tönen des Schalls. Das weiße Licht ist ein Gemisch von vielen Farben.

Schall ist ein Wellenphänomen. Man spricht ja auch von Schallwellen. Wenn eine Saite einer bestimmten Länge angeschlagen oder angezupft wird, beginnt sie zu schwingen und überträgt diese Bewegung auf die umgebende Luft, so dass sich die Luft an gewissen Stellen verdichtet, an anderen verdünnt: So entstehen die Schallwellen, die an unser Ohr dringen. Saiten verschiedener Längen erzeugen Töne verschiedener Tonhöhe. Diesen Zusammenhang benutzt man, um Tonhöhen quantitativ festzulegen. Die doppelte Länge einer Saite, die einen Ton erzeugt, nennt man die Wellenlänge λ der sich ausbreitenden Schallwelle. So gehört zum Kammerton a^1 in Luft von 20°C eine Wellenlänge von 77 cm. Bei einer Stimmgabel ist die Wellenlänge der ausgesandten Schallwellen nicht so einfach zu erkennen. Deshalb charakterisiert man die Tonhöhe durch die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde, die Frequenz f . Töne breiten sich im entsprechenden Medium mit der Geschwindigkeit c_s aus. Zwischen den drei Größen Frequenz, Wellenlänge und Schallgeschwindigkeit besteht die einfache Beziehung: $\lambda f = c_s$. Beispiel: Der Kammerton a^1 besitzt die Frequenz $f = 440\text{ Hz}$, d.h. eine entsprechende Stimmgabel führt 440 Schwingungen pro Sekunde aus. Damit errechnet sich für Luft (Schallgeschwindigkeit $c_s = 340\text{ m/s}$ bei 20°C) eine Wellenlänge von ca. 77 cm, wie oben erhalten.

In einer der folgenden Vorlesungen werden wir zeigen, dass auch Licht ein Wellenphänomen ist, dessen Wellenlängen gemessen werden können. Hier wollen wir diese Tatsache nur benutzen, um den reinen Farben Wellenlängen zuzuordnen, die in Metern (m) oder Nanometern (nm; $1\text{ m} = 10^9\text{ nm}$) objektiv gemessen und mitgeteilt werden können. Allerdings sind die Wellenlängen des Lichtes i.a. sehr viel kleiner als die des Schalls, für gelbes Licht gilt etwa $\lambda = 575\text{ nm}$, d.h. etwas weniger als ein Millionstel Meter, während der für uns hörbare Schall Wellenlängen zwischen ca. 20 Meter und 2 cm Zentimeter besitzt.

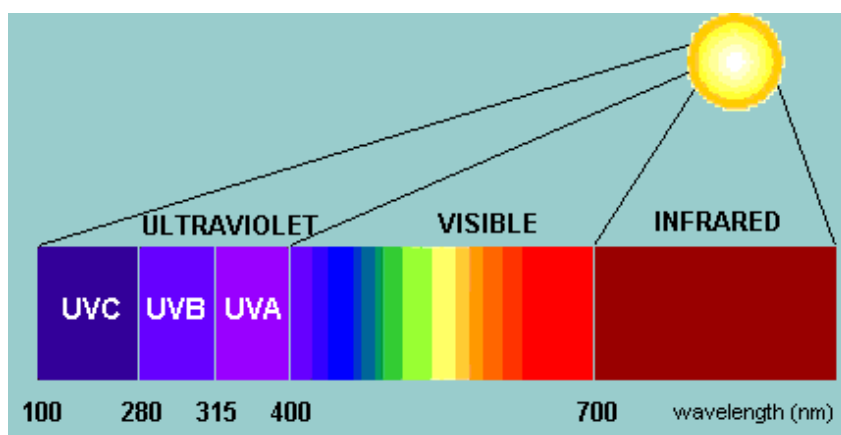


Abb. 1.3: Spektrale Zerlegung des Sonnenlichts vom Ultravioletten bis zum Infraroten. Hierin sind die von links nach rechts ansteigenden Wellenlängen den entsprechenden Farben zugeordnet.

1.4 Nachweis des Lichtes

Neben der Erzeugung ist der Nachweis von Licht interessant. Als Lichtdetektoren eignen sich Augen, Fotoplatten und andere lichtempfindliche Substanzen. Wir wollen hier das Auge und die Fotoemulsion kurz besprechen.

Ein Auge besteht aus einem Abbildungssystem (Pupille, Linse und Glaskörper), das ein Bild auf der Netzhaut entwirft, und einem Nachweissystem (Stäbchen und Zäpfchen der Netzhaut), das die Helligkeiten und Farben des Bildes in Nervenimpulse verwandelt. Die biologische Forschung hat ergeben, dass das Prinzip des Nachweissystems schon sehr früh in der Evolution entwickelt wurde und auch heute noch in den meisten Lebewesen in dieser Form vorhanden ist, während das Abbildungssystem sich weiterentwickelt hat. Im Gegensatz zu den Linsenaugen der Wirbeltiere besitzen z.B. die Insekten Facettenaugen.

Wir besprechen hier nur das Nachweissystem des Lichtes in der Netzhaut. Trifft ein Lichtquant in einem Stäbchen der Netzhaut auf das Molekül Retinal, das in seiner Ruheposition in der abgewinkelten Form vorliegt (siehe Abb. 1.4), so streckt sich das Molekül unter dem Einfluss des Lichtes und löst damit eine längere Kette von chemischen Reaktionen aus, an deren Ende ein Ionenkanal geschlossen wird, durch den sonst ein elektrischer Strom in Form von Natrium Ionen fließt. Damit entsteht ein elektrischer Impuls, der über verschiedene Stufen an das Gehirn weitergeleitet wird. Die elektrischen Signale, die von den verschiedenen Stäbchen der Netzhaut ausgehen, werden dort wieder zu einem Bild zusammengesetzt.

Die Schwärzung einer Fotoemulsion durch auffallendes Licht läuft ähnlich ab. In die Gelatine der Fotoemulsion sind Silberbromid Moleküle eingelagert. Wie das Retinal seine Form unter dem Einfluss des Lichtes ändert, so bricht das Silberbromid unter dem Einfluss des Lichtes in Brom und Silber auf, das zu einem sog. Keim wird. Bei der Entwicklung des Filmes werden weitere Silberbromid Moleküle in Silber und Brom aufgebrochen, bevorzugt jedoch solche in der Umgebung der Keime. Dort entsteht dann besonders viel Silber und ergibt auf diese Weise eine Schwärzung des Filmes an solchen Stellen, wohin das Licht gefallen ist (Negativ).

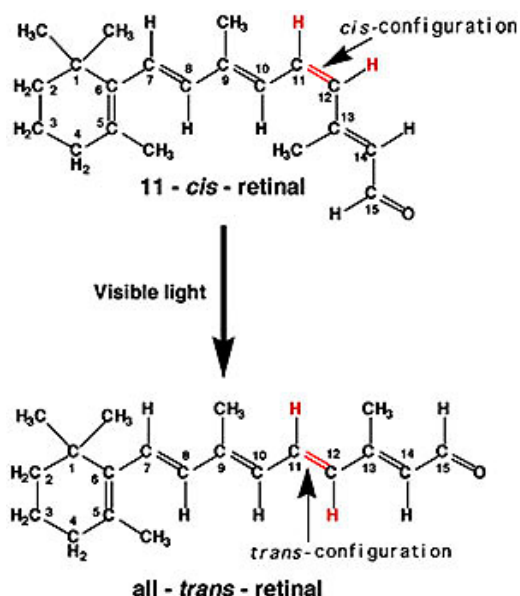


Abb. 1.4: Änderung der Konfiguration des Moleküls Retinal bei Bestrahlung mit Licht.

1.5 Biographie: Charles H. Townes (* 1915)

"I've always said that you do your best at things you enjoy doing."

Geboren wurde Townes in Greenville, South Carolina, im Südosten der USA. Sein Vater war Jurist, der jedoch - wie viele Südstaatler - auch eine kleine Farm bewirtschaftete. So wuchsen die Kinder - 2 Jungen und ein Mädchen - in einer ländlichen Umgebung auf und lernten auf ursprüngliche Weise die Natur mit ihren vielen wunderbaren Facetten kennen. Sie wurden vom sehr naturverbundenen Vater angeleitet, die Pflanzen- und Tierwelt und den gestirnten Himmel zu beobachten. Antworten auf die sich dabei ergebenden Fragen holten sie sich oft aus Büchern und Lexika, die im Hause Townes reich vorhanden waren. Die beiden Buben halfen außerdem bei den in der Landwirtschaft anfallenden



Arbeiten und waren des öfteren auch damit beschäftigt, kleinere Reparaturen an defekten Fahrzeugen und Geräten auszuführen. Auf diese Weise erwachte in ihnen eine Neugier, die sie antrieb herauszufinden, wie die Dinge funktionieren und wie man sie am besten repariert.

Nach dem Besuch der public school in seiner Heimatstadt studierte Charles an der dortigen Furman-University, wo er 1935 im Alter von 19 Jahren sowohl den BSc in Physik als auch den BA in modernen Sprachen mit Auszeichnung erhielt. Anschließend ging Townes an die Duke University, um dort seine Arbeiten für den MA in Physik fortzuführen. Nach dem Examen wechselte er ans Cal Tec, wo damals Oppenheimer und Millikan forschten und lehrten. Es war für die Physik eine sehr interessante Zeit, u.a. war die Kernphysik gerade entdeckt worden. So ist es nicht verwunderlich, dass Townes sich diesem Gebiet widmete und 1939 mit einer Arbeit über Isotopentrennung und Kernspins promovierte. Danach wollte er eigentlich Hochschullehrer werden, doch in der Zeit der Depression waren die Stellen knapp, so dass er auf Anraten seines Professors ein Angebot der Bell Telephone Laboratories annahm und von 1939 bis 1947 dort arbeitete. Der Krieg brachte es mit sich, dass er bald auf einem militärisch interessanten Gebiet eingesetzt wurde und Radar Systeme (radar bombing systems) konstruieren musste.

Nach 1945 wandte er die im Krieg in der Radar-Forschung entwickelte Mikrowellentechnik auf friedliche Ziele an. Er sah darin ein neues wertvolles Instrument, um die Struktur der Atome und Moleküle zu studieren, und als eine mögliche Technik, elektromagnetische Wellen zu untersuchen. Die Ernennung zum Professor an der Columbia University in New York im Jahre 1948 gab ihm hierzu die Möglichkeit.

Die Idee für den Maser kam ihm im Frühling 1951. Er war zu einem Meeting der Navy nach Washington gekommen, auf dem führende Wissenschaftler versuchen wollten, ein verbessertes Radarsystem zu entwickeln. An einem sonnigen Morgen ging er vor dem Frühstück - das Restaurant war noch geschlossen - in den Park und schrieb seine Ideen auf einem Papierfetzen nieder. Er hatte vorher bereits 5 Jahre lang darüber nachgedacht. Danach dauerte es noch bis Anfang 1954, bis er zusammen mit Gordon und Zeiger den Prototyp eines Masers gebaut hatte.

Im Dezember 1958 konnten er und Schawlow zeigen, wie man das Prinzip des Masers in den optischen Bereich übertragen kann und nach weiteren 2 Jahren war der erste "optische Maser", der sog. Laser von Mainman gebaut. Bereits kurze Zeit später erhielt Townes im Jahre 1964 für seine Arbeiten den Nobelpreis für Physik.

Charles Townes war und ist bekannt als Forscher auf verschiedenen Gebieten, aber auch als hervorragender Lehrer und als Berater der Regierung. Seine wesentliche Entdeckung, der Laser, wird auch in Zukunft eine Menge von Anwendungen hervorbringen, die man sich heute noch gar nicht vorstellen kann. Dieser Zweig der Wissenschaft ist derzeit noch in einer starken Wachstumsphase, was durch die Verleihung des Physik-Nobelpreises in diesem Jahr (2005) unterstrichen wird. Doch bei allem Ruhm ist der Erfinder des Lasers stets ein unglaublich bescheidener und zugänglicher Mann geblieben, den seine Freunde schlicht Charlie nennen.