

EXPERIMENTE
ZUM PHÄNOMEN FARBE

Diplomarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades
eines Magisters der Naturwissenschaften

an der Karl-Franzens-Universität Graz

vorgelegt von

Dominik HADL

am Institut für Physik

Begutachter: Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot Pottlacher

Graz, 15.2.2017

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen inländischen oder ausländischen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht. Die vorliegende Fassung entspricht der eingereichten elektronischen Version.

Datum

Unterschrift

EXPERIMENTS ABOUT THE PHENOMENON 'COLOR'

by Dominik Hadl

Main referent: Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot Pottlacher

Subject area: Experimental Physics 2

The content of this document is based on a single unit of a lecture at the Technical University of Graz. In this unit a huge amount of experiments about color and light was made. Most of them are based on two lectures, called Experimental Physics 2 and 3, which can be visited both at the Technical University and Karl-Franzens University Graz.

On one hand Experimental Physics 2 is about geometrical optics. Terms like diffraction, polarization and interference are discussed. On the other hand there is Experimental Physics 3, which is about the wave-particle dualism. Also the inner atomic structure, electrons and spectral analysis are hot topics. Those terms will also act a part in this document. A special issue will be 'color'. This phenomenon needed a lot more literature, to be discussed sufficiently.

All in all, this document is about physical experiments concerning the topics 'color' and 'light'. They will be described, explained and arranged.

EXPERIMENTE ZUM PHÄNOMEN FARBE

von Dominik Hadl

Hauptreferent: Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot Pottlacher

Fachbereich: Experimentalphysik 2

Diese Arbeit stützt sich auf einen speziellen Bereich der Experimentalphysik. In diesem wird eine große Anzahl unterschiedlichster Experimente zum Thema Farbe und Licht durchgeführt. Die meisten dieser Versuche zählen zu den Lehrveranstaltungen Experimentalphysik 2 und 3, die sowohl an der Karl-Franzens-Universität, als auch an der Technischen Universität in Graz angeboten werden. Gegliedert sind die Experimente in Aufbau und Durchführung, Beobachtung und Erklärung.

Während die Experimentalphysik 2 den Bereich der geometrischen Optik beleuchtet und auf einige Begriffe, wie Beugung, Polarisation und Interferenz eingeht, thematisiert die Experimentalphysik 3 dagegen den Welle-Teilchen-Dualismus. Die innere Atomstruktur, Elektronen und Spektralanalyse sind Schlagwörter, die auch in dieser Arbeit eine wichtige Rolle spielen. Der eigentliche Begriff 'Farbe' wird allerdings in beiden Lehrveranstaltungen nicht ausreichend behandelt. Da diese Arbeit aber ein besonderes Augenmerk auf dieses Phänomen legt, bedurfte es einiger Literatur, um jedes der diskutierten Experimente zufriedenstellend erklären zu können.

Zusammenfassend besteht das Ziel dieser Arbeit darin, physikalische Versuche zu den Themen Licht und Farbe zu beschreiben, sie zu erklären und thematisch zu ordnen.

DANKSAGUNG

“When I was in college,
I wanted to be involved in things
that would change the world. Now I am.”

Elon Musk

(MotivationGrid 2015, Quotes)

Elon Musk verändert die Welt mit Innovationen in der Autoindustrie und mit seiner geplanten Mars-Mission will er wortwörtlich nach den Sternen greifen. Doch so, wie es diejenigen gibt, die die Welt, wie wir sie kennen, in großem Stil auf den Kopf stellen, so gibt es die, die Welt Einzelner verändern.

Als Lehrer werde auch ich die Möglichkeit bekommen, die Welt vieler jungen Menschen zu verändern. Als ich mich für diesen Berufsweg entschied, wählte ich, aufgrund meiner Begeisterung für die Naturwissenschaften Mathematik und Physik. Von Anfang an setzte ich mir das Ziel, eben diese Begeisterung und bahnbrechende Methoden zu nutzen, um den jungen Schülern und SchülerInnen das Wissen näher zu bringen. Die Schule ist ein Ort, an dem viele Kinder erstmals mit Naturwissenschaften in Berührung kommen. Daher ist es sehr wichtig, sie mit Freude und Elan an Wissensbereiche und komplexe Strukturen heranzuführen.

Um dieser Berufung folgen zu können, wurde ich stets von meiner Familie und meiner Partnerin unterstützt. So möchte ich besonders meinen Eltern Hannes und Martina danken, die mir sowohl meinen Schulabschluss, als auch die universitäre Ausbildung ermöglichten. Ebenso gilt mein Dank meinem Großvater. Er war seinerseits Lehrer, betreute mich in meiner Schulzeit und verfolgte mit viel Freude meinen beruflichen Werdegang. Leider konnte er nicht länger bei mir sein, um meinen Abschluss noch zu erleben.

Diese Arbeit schreiben zu dürfen, erachte als großes Glück, denn bestimmt kommt es nicht häufig vor, dass man dabei großen Spaß hat, einen großen Wissens- und Interessenzuwachs erlebt und das aufbereitete Wissen in späterer beruflicher Laufbahn noch regelmäßig nutzen kann. So möchte ich mich auch ganz herzlich bei meinem Mentor Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot Pottlacher bedanken. Durch anschauliche Experimente und viele lehrreiche Momente half er mir stets, die Welt der Physik besser zu verstehen.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
2	Wellenoptik	2
2.1	Huygensches Prinzip	2
2.2	Polarisiertes Licht	3
2.2.1	Versuch: Polarisationsfilter	4
2.3	Optische Aktivität	5
2.3.1	Versuch: Optische Aktivität von Quarz	5
2.3.2	Versuch: Optische Aktivität einer Zuckerlösung	6
2.4	Streuung	7
2.4.1	Versuch: Polarisation durch Streuung	8
2.5	Doppelbrechung	9
2.5.1	Versuch: Spannungsoptik	11
2.6	Dispersion und Brechung	11
3	Farbempfindung und Farbmessung	14
3.1	Das Auge	14
3.2	Die Graßmann-Gesetze	16
3.2.1	Versuch: Der Farbkreis	18
3.2.2	Versuch: Additive Farbmischung	18
3.2.3	Versuch: Farbverläufe	19
3.2.4	Versuch: Subtraktive Farbmischung	20
3.3	Das Farbhufeisen	22
3.4	Spektrale Helligkeitskurven	23
3.4.1	Versuch: Beleuchten von Gegenständen	24
3.5	Lichtwahrnehmung unterschiedlicher Lebewesen	25
3.6	Farbmetrik: Vektordarstellung von Farben	26
3.7	Der RGB-Farbraum	27
3.8	Die Graßmann-Gesetze im RGB-Farbraum	28
3.9	Kompensativ- und Komplementärfarben	30
3.9.1	Versuch: Farbanteile streichen	30
4	Interferenz	32
4.1	Beugung am Spalt	32
4.2	Das Beugungsgitter	34
4.2.1	Versuch: Seifenlamelle	35

4.2.2	Versuch: Die Newton Ringe	36
4.2.3	Versuch: Interferenzen an einer Pfauenfeder.....	37
5	Lumineszenz.....	38
5.1	Fluoreszenz	39
5.2	Phosphoreszenz.....	40
5.2.1	Versuch: Photolumineszenz: Fluoreszenz und Phosphoreszenz.....	40
5.3	Chemolumineszenz - Biolumineszenz.....	41
5.3.1	Versuch: Chemolumineszenz: Knicklicht.....	41
5.4	Elektrolumineszenz.....	42
5.4.1	Versuch: Unterschiedliche Farben von LEDs	42
5.4.2	Versuch: Leuchtende Essiggurke.....	59
5.5	Mechanolumineszenz – Tribolumineszenz.....	43
5.5.1	Versuch: Leuchtender Würfelzucker.....	43
6	Schwarzkörperstrahlung	44
6.1	Schwarze Körper.....	44
6.2	Planckscher Kurvenzug.....	46
7	Spektralanalyse	47
7.1	Optische Spektroskopie.....	47
7.1.1	Versuch: Spektrum einer Glühlampe oder Halogenglühlampe	48
7.1.2	Versuch: Spektrum einer Kohlebogenlampe.....	49
7.1.3	Versuch: Wasserstoffentladung.....	50
7.1.4	Versuch: Eisenspektrum	52
7.2	Linienverbreiterung.....	53
7.2.1	Versuch: Spektrum einer Quecksilberdampfampe	53
7.2.2	Versuch: Spektrum einer Natrium-Dampfampe.....	54
7.3	Farbwiedergabe.....	55
7.4	Emissions- und Absorptionsspektren.....	56
7.5	Flammenfärbung.....	57
7.5.1	Versuch: Flammenfärbung.....	58
8	Lichtemission durch Mikrowellen	61
8.1.1	Versuch: Glühlampe unter Mikrowellenstrahlung.....	61
8.1.2	Versuch: Leuchtstoffröhre unter Mikrowellenstrahlung.....	62
8.2	Geissler-Röhrchen.....	62
8.2.1	Versuch: Geissler-Röhrchen unter Mikrowellenstrahlung.....	63
8.3	Glimmlampen – Flackerlampen	63
8.3.1	Versuch: Flackerlampen unter Mikrowellenstrahlung:.....	64

9	Resümee	65
10	Literaturverzeichnis	66
11	Abbildungsverzeichnis.....	70
12	Tabellenverzeichnis	70
13	Abkürzungsverzeichnis.....	76
14	Formelverzeichnis.....	77
15	Register	78

1 EINLEITUNG

Die Natur bietet uns tagtäglich ein faszinierendes Schauspiel: Am Morgen überflutet das Licht der Sonne den Horizont und lässt die Welt vor unseren Augen in bunten Farben erstrahlen. Der Himmel wird blau, die Wiese grün und die Blumen beginnen, in allen nur erdenklichen Farben zu blühen.

Auch auf uns Menschen haben Farben einen großen Einfluss. Oft schmücken wir uns und präsentieren uns, so wie Pfauen ihr Gefieder. Doch haben Sie sich je gefragt, wie ein Pfau seine beeindruckenden Farbmuster erzeugt?

Die Antwort wird Sie überraschen! Diese ist nur eine von vielen Antworten, die mit dem beeindruckenden Thema „Farbe“ in Zusammenhang steht. Und eben der Begriff "Farbe" ist das, womit wir uns hier beschäftigen. Es bedarf allerdings einiger grundlegender Überlegungen, die im Vorhinein getätigt werden müssen, bevor wir uns den farbenfrohen Experimenten zuwenden können. Viele der aufgegriffenen Informationen stammen aus den Fachbereichen Experimentalphysik 2 und 3, die an der Karl-Franzens-Universität und der Technischen Universität Graz angeboten werden.

Zur Experimentalphysik 2 zählt der große Bereich Optik. Es wird Licht in Betrachtungsform von elektromagnetischen Wellen eingeführt. So kann das Verhalten von Licht an Grenzflächen, sowie dessen Ausbreitung in isotropen und anisotropen Medien diskutiert werden. Effekte, wie Polarisation, Interferenzen, Streuung und Beugung werden behandelt. (*Vgl. UniGraz 2016, Experimentalphysik 2*)

Die Experimentalphysik 3 dagegen dringt noch tiefer in die Welt der Atome ein. Unter dem Namen 'Atom-, Kern- und Teilchenphysik' behandelt diese Lehrveranstaltung den Welle-Teilchen-Dualismus. (*Vgl. UniGraz 2016, Experimentalphysik 3*) Licht erfüllt also zugleich Wellen- als auch Teilcheneigenschaften. Diese Tatsache zeigt auch das Mach-Zehnder-Interferometer (Vgl. Kapitel 2). Die Erforschung des Wasserstoffatoms trug maßgeblich zur Erforschung der Atome bei und ermöglichte ein solides Atommodell.

Passend zur jeweiligen Thematik werden die zugehörigen Experimente der Vorlesungseinheit, auf der diese Arbeit basiert, besprochen. Aufbau und Materialien werden erörtert und das Resultat beschrieben. Die behandelte Theorie ermöglicht uns, eine plausible Erklärung für das auftretende Phänomen zu finden.

Eine Reihe von Fußnoten soll für Zusatzinformationen und Hinweise sorgen. Neue Begriffe werden durch kursive Schrift kenntlich gemacht. Sowohl ein Abkürzungsverzeichnis, als auch ein Register, am Ende der Arbeit, stehen dem Leser/ der Leserin zur Verfügung.

2 WELLENOPTIK

2.1 Huygensches Prinzip

Wie uns Experimente, wie das *Mach-Zehnder Interferometer*, beweisen, erfüllt Licht sowohl Wellen-, als auch die Teilchen-Eigenschaften. Bei der Ausbreitung verhält es sich wie eine Welle und erst beim Auftreffen auf Materie, nimmt es schließlich den Teilchen-Charakter an. (Vgl. KIT 2009, *Mach-Zehnder-Interferometer*)

Licht, als Welle betrachtet, erfüllt das Prinzip von Huygens, welches aussagt, dass jeder einzelne Punkt einer Wellenfront wieder Ausgangspunkt einer neuen Elementarwelle ist. Ein kleiner Spalt in einer Barriere kann als ein solcher Ausgangspunkt zur Veranschaulichung dienen. Die Barriere hält eine ebene Welle auf; die kleine Öffnung darin allerdings, wirkt wie ein Elementarwellensender: Von dort aus breitet sich eine Welle in alle Richtungen kreisförmig aus (siehe Abbildung 1).¹ (Vgl. Jäger: 1)

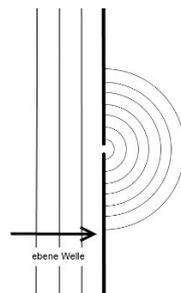


Abbildung 1: Prinzip von Huygens: Ein kleiner Spalt in einer Barriere lässt ein wenig Licht passieren – dieser wirkt wie ein Elementarwellensender. Vom Spalt aus breitet sich das Licht kreisförmig in alle Richtungen aus. (eigene Darstellung nach Jäger 2014: 2)

Diesen Effekt nennt man auch Beugung. Dies erfordert nicht zwingend eine kleine Öffnung, sondern tritt genauso auf, wenn eine Wellenfront auf eine breite Öffnung oder nur eine Kante trifft.

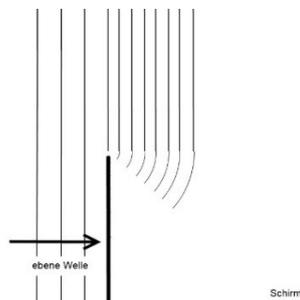


Abbildung 2: Die Beugung einer ebenen Welle an einer Kante bewirkt, dass auch auf den Teil des Schirms Licht trifft, den die Barriere abdeckt (eigene Darstellung nach Jäger 2014: 1)

¹ Zu dem Effekt der Interferenz kommen wir in Kapitel 4.

Es kommt zu diesem Effekt, da Licht sich während seiner Ausbreitung wie eine Welle verhält. Wir kennen diesen Effekt aus dem Alltag: Je weiter eine Kante, wie in Abbildung 2, von einem Schirm entfernt ist, auf den das Licht auftreffen kann, desto unschärfer wird die Abgrenzung zwischen Licht und Schatten. Wie aus der vorangehenden Abbildung ersichtlich, hat das Licht bei größerer Entfernung nämlich eine immer weiter hinter die Kante dringende Beugungserscheinung. (Vgl. Jäger: 1ff)

2.2 Polarisiertes Licht

Licht, ist eine elektromagnetische Welle. Dabei beschreibt je ein Vektor das *elektrische* und das *magnetische Feld* der Welle.

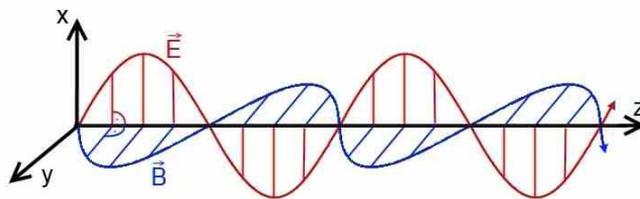


Abbildung 3: elektromagnetische Welle. x-Achse (\vec{E}) ... Ausbreitungsrichtung des elektrischen Feldes, y-Achse (\vec{B}) ... Ausbreitungsrichtung des magnetischen Feldes, z-Achse... Ausbreitungsrichtung des Lichts (eigene Darstellung nach Povb 2011: 183)

Bei der, in Abbildung 3 dargestellten elektromagnetischen Welle, stehen sowohl das elektrische Feld \vec{E} , als auch das magnetische Feld \vec{B} senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Man nennt diese Form *lineare Polarisation*.

Durch Kombination linear polarisierter Wellen, kommen auch andere Ausbreitungsarten zustande, bei denen sich der Vektor des elektrischen Feldes kreisförmig oder elliptisch auf der, zur Ausbreitungsrichtung senkrechten Ebene bewegt. Diese beiden Formen nennt man *zirkulare und elliptische Polarisation*. (Meschede 2008: 59 f)

Tritt Licht bei einer Lichtquelle aus, kann man nicht kontrollieren, welche Art der Ausbreitung stattfindet. Das Licht ist durchmischt, von linear, zirkular und elliptisch polarisiertem Licht, wobei auch die linear polarisierten Lichtwellen in jede beliebige Richtung zueinander verdreht sein können.

Mithilfe von *Polarisatoren* kann man das Licht auf eine einheitliche, lineare Polarisation führen. Dabei machen sich Polarisatoren die Transversalwellen-Eigenschaft des Lichts zunutze und filtern alle Anteile des ankommenden Lichts, die nicht auf einer bestimmten Polarisationsebene liegen (siehe Abbildung 4).

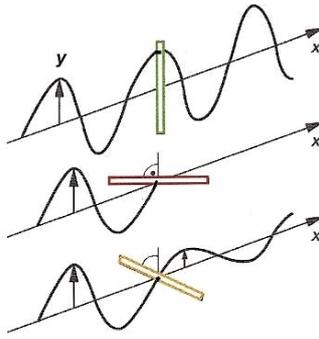


Abbildung 4: Polarisator. Ein Polarisator lässt nur Wellen in einer bestimmten Ebene passieren (Leute 2011: 14)

2.2.1 Versuch: Polarisationsfilter

Aufbau und Durchführung:

Bei einer Demonstration eignen sich ein Overheadprojektor und zwei Polarisationsfolien (beispielsweise erhältlich auf www.amazon.de, Stand: Jänner 2017). Eine Folie liegt am Projektor auf und wird vom Licht durchdrungen, welches dann auf einen Schirm fällt. Einige Zentimeter über der Arbeitsfläche des Gerätes kann nun die zweite Polarisationsfolie per Hand gehalten bzw. gedreht werden.

Beobachtung:

Durch Drehen des Polarisators können wir Intensitätsmaxima und Minima finden, bei denen der Schirm voll beleuchtet ist oder dunkel bleibt.

Erklärung:

Ist bereits polarisiertes Licht vorhanden und lassen wir dieses noch ein weiteres Mal einen Polarisator durchlaufen, so ändert sich die Lichthelligkeit nicht, solange die Polarisationsenebene des Lichts genau mit der des Polarisators zusammenpasst.² Drehen wir nun aber den Polarisator um einen kleinen Winkel, können wir einen Intensitätsverlust ausmachen, der immer größer wird, je mehr der Winkel zunimmt. Bei einer Drehung von 90° kommt es zur völligen Auslöschung. Vergrößert man den Winkel weiter, nimmt die Intensität wieder zu, bis sie bei 180° erneut ein Maximum erreicht. So wiederholt sich das bei jeder Vierteldrehung. In Abbildung 4: Polarisator. Ein Polarisator lässt nur Wellen in einer bestimmten Ebene passieren (Leute 2011: 14) sehen wir, dass das Licht nur in einer Ebene vollständig den Polarisator durchdringen kann. Bei unpassendem Winkel wird Licht absorbiert und die Intensität wird geringer.

² Idealerweise! Praktisch kommt es zu einem geringen Helligkeitsverlust durch Lichtabsorption im Polarisator.

Während wir zur Erzeugung linear polarisierten Lichts einen Polarisator benutzen, nennt man jenen, mit dem wir die Polarisation des Lichtes prüfen, einen *Analysator*, auch wenn beide dasselbe Bauteil darstellen. (Leute 2011: 14)

In Versuch 2.2.1 kann die Intensität I , die nach Durchlaufen des Systems noch vorhanden ist, durch eine Formel beschrieben werden:

$$I = I_0 \cos^2(\alpha) \quad (\text{F. 1})$$

Dabei ist I_0 die, vom Polarisator durchgelassene Lichtintensität und α der Winkel, den Polarisator und Analysator in ihren Schwingungsebenen einschließen. (Vgl. Jäger 2014: 16)

2.3 Optische Aktivität

Es gibt sowohl flüssige, als auch feste Stoffe, die polarisiertes Licht in ihrer Polarisationsebene drehen. Es gilt für den Drehwinkel α :

$$\alpha = d \cdot \alpha_{\text{spez}} \quad (\text{F. 2})$$

Die Stärke der Drehung hängt dabei von der Dicke d der optisch aktiven Schicht und dem *spezifischen Drehvermögen* α_{spez} des Materials ab. (Vgl. Demtröder 2009: 257 f)

2.3.1 Versuch: Optische Aktivität von Quarz

Aufbau und Durchführung:

Mit denselben Materialien, wie in Versuch 2.2.1, erzeugen wir linear polarisiertes Licht, das wir auf einen Schirm fallen lassen. Auf die erste Polarisationsfolie legen wir nun ein würfelförmiges Quarz-Gebilde, welches verschieden dicke, optisch aktive Schichten enthält. Hinter der Figur drehen wir erneut einen Analysator.

Beobachtung:

Haben wir den Analysator richtig eingestellt, erkennen wir am Schirm ein buntes Muster oder eine Figur.

Erklärung:

Das untersuchte Objekt enthält optisch aktive Schichten unterschiedlicher Dicke, die zum Muster angeordnet sind. Durchdringt weißes, polarisiertes Licht die optisch aktiven Schichten, des Quarzkristalls, wird dieses nicht gleichmäßig gedreht, denn die Drehung ist wellenlängenabhängig. Die unterschiedlichen Wellenlängen des Lichts erreichen den Analysator

daher in ganz unterschiedlichen Schwingungsebenen. Dieser blockiert, seiner eigenen Ausrichtung entsprechend, die ankommenden Wellenlängen (Vgl. Abbildung 4). Diese herausgefilterten Lichtanteile führen dazu, dass am Schirm ein Farbeindruck entsteht und damit ein buntes Muster³ (Siehe Kapitel 3). (Vgl. Jäger 2014: 18 ff)

2.3.2 Versuch: Optische Aktivität einer Zuckerlösung

Aufbau und Durchführung:

Wir verwenden das Licht einer Natriumdampflampe, da dieses monochromatisch ist (siehe auch Versuch 7.2.2). Die Lichtquelle positionieren wir mit einer Polarisationsfolie so auf einem Tisch, dass wir für die Durchführung des Versuches rein polarisiertes Licht zur Verfügung haben. Die Schwingungsebene ist dabei wichtig und könnte daher z.B. parallel oder normal zur Tischebene gewählt werden.

Des Weiteren füllen wir ein quaderförmiges Glasgefäß, dessen Maße bekannt sind, mit einer Zuckerlösung. Wir stellen das Gefäß vor das polarisierte Licht, sodass es durchleuchtet wird. Ein Analysator wird hinter der Lösung erst so eingestellt, dass er kein Licht mehr durchlässt. Der Winkel α' zwischen seiner Schwingungsebene und der des Polarisators wird gemessen. Der, für die Formel (F. 2), benötigte Winkel α ist dann

$$\alpha = 90 - \alpha' \quad (\text{F. 3})$$

Beobachtung:

Wir stellen fest, dass die Polarisationssebene durch die Zuckerlösung gedreht wird, denn eine 90°-Drehung der Polarisatoren zueinander, blockiert hier die Intensität des Lichts nicht mehr zur Gänze. Wiederholen wir das Experiment mit unterschiedlich hohen Konzentrationen der Zuckerlösung, stellen wir fest: Je höher der Zuckergehalt, desto stärker die Drehung.

Erklärung:

Offensichtlich ist die Zuckerlösung optisch aktiv. Die Schichtdicke d der Flüssigkeit bleibt stets gleich. Daher ist der einzige, sich ändernde Parameter das spezifische Drehvermögen α_{spez} der Flüssigkeit. Je höher der Zuckergehalt, desto stärker die Drehung.

Kennen wir also aufgrund empirischer Daten den Zusammenhang zwischen Zuckergehalt und spezifischem Drehvermögen, können wir mithilfe der Formeln (F. 2) und (F. 2), durch Messen des Winkels, sogar auf den Zuckergehalt der Lösung schließen.

³ Wird eine Wellenlänge, die einer Lichtfarbe entspricht, vom Analysator ganz blockiert, so bedeutet das, dass dessen Komplementärfarbe (siehe auch Kapitel 3.9) durchtritt – diese ist dann am Schirm sichtbar. (Vgl. ebd.: 20)

2.4 Streuung

Licht, als elektromagnetische Welle, breitet sich geradlinig aus. Der Vektor des elektrischen Feldes steht dabei senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (Vgl. Abbildung 3). Tritt Licht in ein Medium ein, so werden die Atome oder Moleküle, die man als *elektrische Dipole* betrachtet, vom Licht zur Schwingung angeregt, sobald sie von einem Photon (Lichtteilchen) getroffen werden. Als periodisch schwingender, elektrischer Dipol, sendet das erregte Teilchen dann neuerlich eine Lichtwelle aus. Diese gibt es aber in die, normal zur Schwingungsrichtung stehende Ebenen, ab. Der Vektor des elektrischen Feldes der neuen Lichtwelle steht letztendlich also normal auf den der ursprünglichen Lichtwelle. (Vgl. Salzmann Wissenstexte 2010, Polarisation)

Bei festen Stoffen, wie zum Beispiel Glas, oder Kristallen, ist eine symmetrische Struktur des Mediums vorhanden. Bei völlig regelmäßig angeordneten Atomen, wird das Licht so von Teilchen zu Teilchen weitertransportiert, dass es in selber Richtung wieder austritt, wie es eingetreten ist. Dafür müssen allerdings die Breite des Kristalls groß und der Teilchenabstand der Struktur sehr klein, im Vergleich zur Wellenlänge sein (siehe Abbildung 5).

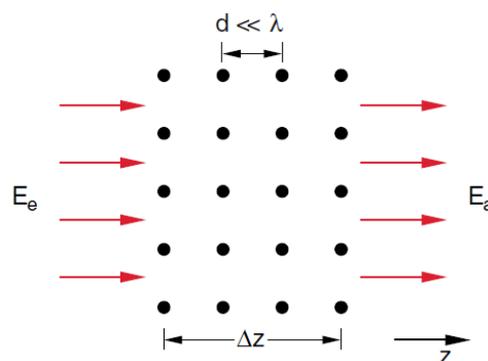


Abbildung 5: Kristallstruktur. Eintretendes Licht E_e und austretendes Licht E_a besitzen dieselbe Richtung, können aber zueinander phasenverschoben sein. Streuung findet keine statt. d ... Abstand der Atome (sehr viel kleiner als Wellenlänge λ des Lichts), Δz ... Dicke des Kristalls, z ... Raumrichtung (Demtröder 2009: 347)

Bei Flüssigkeiten oder Gasen gibt es keine regelmäßige Struktur. Das Licht wird von den Teilchen gestreut und tritt, abweichend zur Ausbreitungsrichtung, als Streulicht aus. Untersuchen wir das Licht, welches normal, also im 90° -Winkel zur Ausbreitungsrichtung austritt, so stellen wir fest, dass dieses linear polarisiert ist. (Vgl. Demtröder 2009: 347 f)

Das liegt daran, dass im rechten Winkel nur jenes Licht zum Betrachter gelangt, welches senkrecht zur Ausbreitungsrichtung und senkrecht zur Blickrichtung steht. (Vgl. Salzmann Wissenstexte 2010, Polarisation)

2.4.1 Versuch: Polarisation durch Streuung

Aufbau und Durchführung:

Wir bereiten ein quaderförmiges Glasgefäß mit Wasser vor und fügen eventuell ein wenig Milch hinzu, sodass die Flüssigkeit leicht trüb wird.⁴ Mit einer gerichteten Lichtquelle, die nicht polarisiert ist, durchleuchten wir das Gefäß von einer Seite. Die Ausbreitungsrichtung der Lichtstrahlen soll dabei näherungsweise parallel zu zwei der Quaderseiten verlaufen. Das Gefäß betrachten wir nun so, dass unser Blick, normal zur Ausbreitungsrichtung des Lichts, auf das Gefäß gerichtet ist. Wir nehmen einen Polarisator, halten ihn zwischen uns und das Gefäß und schwenken ihn.

Nach Beobachten des Effekts, können wir das Experiment noch abwandeln: Der Blick bleibt weiterhin auf die Seitenwand des Gefäßes gerichtet. Den Polarisator allerdings bringen wir nun zwischen Lichtquelle und Gefäß ein und schwenken ihn erneut.

Beobachtung:

Zuallererst sehen wir den Lichtkegel, der durch die trübe Flüssigkeit dringt. Die Intensität scheint dabei mit größerer Eindringtiefe abzunehmen. Halten wir nun den Polarisator vor das Gefäß und finden die richtige Position, können wir die, vom Polarisator abgedeckte Fläche, (fast) vollständig verdunkeln.

Bei der Variante polarisieren wir das eindringende Licht. Beim Schwenken des Polarisators, können wir, je nach Stellung eine Zu- und Abnahme der Intensität des Streulichts feststellen.

Erklärung:

Die Intensität des durchlaufenden Lichts nimmt tatsächlich ab. Verantwortlich dafür ist die Streuung, die das Licht von seiner Laufrichtung ablenkt. Wir beobachten dabei nicht die abnehmende Intensität des Lichts direkt, sondern die damit verbundene, abnehmende Streuung.

Wie im ersten Absatz des Kapitels beschrieben, handelt es sich bei dem, senkrecht zur Ausbreitungsrichtung betrachteten Licht, um linear polarisiertes. Die Polarisationsebene muss dabei waagrecht zur Arbeitsfläche sein, denn zum Beobachter gestreut wird jenes Licht, welches in seiner Schwingungsebene zuerst senkrecht zur Arbeitsfläche stand.

Bei der Variante ist die Stellung des Polarisators entscheidend: Nur, wenn dessen Schwingungsebene normal zur Arbeitsfläche steht, gelangt Licht in die Flüssigkeit, die auch zum Beobachter hin, gestreut wird. Drehen des Polarisators ändert die Streurichtung.

⁴ Die Milch vermischt sich gut mit dem Wasser. So sind mehr Teilchen vorhanden, an denen das Licht gestreut wird. Dies verbessert den gewünschten Effekt.

2.5 Doppelbrechung

Optisch isotrope Medien zeichnen sich dadurch aus, dass sich Licht darin in alle Raumrichtungen gleich schnell ausbreitet. Erzeugt man also innerhalb des Mediums ein Lichtsignal, so breitet sich dieses sphärisch aus (siehe Abbildung 6).

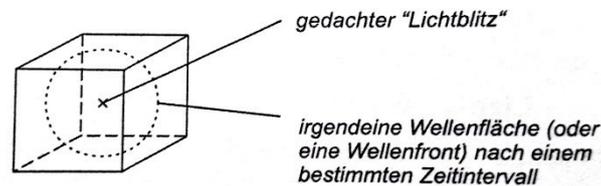


Abbildung 6: Isotrope Lichtausbreitung. In einem isotropen Medium breitet sich Licht in alle Raumrichtungen gleich schnell aus. (Jäger 2014: 12)

Als Gegenstück findet sich die Eigenschaft der *optischen Anisotropie*: Das Medium bremst das durchlaufende Licht richtungsabhängig. Das Resultat ist eine Lichtausbreitung in Form von Ellipsoiden (siehe Abbildung 7).

Sogenannte *doppelbrechende Kristalle* zeichnen sich dadurch aus, beide Formen der Ausbreitung zu besitzen. Ein eindringender Lichtstrahl wird also, aufgrund zweier unterschiedlicher Brechzahlen, aufgetrennt in den *ordentlichen Lichtstrahl*, der sich isotrop und den *außerordentlichen Strahl*, der sich anisotrop ausbreitet. Betrachtet man alle Raumrichtungen, so muss es aber eine geben, die, aufgrund der Struktur des Mediums, keine der beiden Strahlen bevorzugt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten sind gleich groß, sodass die Strahlen nicht unterschieden werden können. Diese Raumrichtung legt man als die *optische Achse* fest.

Weicht man von der optischen Achse ab und der ordentliche Strahl bewegt sich langsamer, als der außerordentliche, so nennt man den Kristall *negativ*. Umgekehrt nennt man ihn *positiv*.

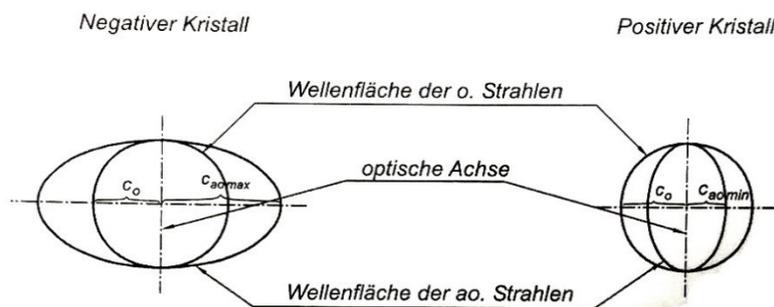


Abbildung 7: Dichroitische Kristalle. In diesen Kristallen breitet sich der ordentliche Lichtstrahl stets sphärisch aus – die außerordentlichen dagegen in Form von Ellipsoiden. c_o ist die gleichmäßige Ausbreitungsgeschwindigkeit des ordentlichen Strahls. Abgesehen von der optischen Achse, breitet sich bei negativen Kristallen der außerordentliche Strahl schneller aus. Die größte Geschwindigkeit $c_{ao,max}$ besitzt er in der Ebene, normal zur optischen Achse. Umgekehrt erreicht der außerordentliche Strahl dort seine niedrigste Geschwindigkeit $c_{ao,min}$, wenn es sich um einen positiven Kristall handelt. (Jäger 2014: 13)

Fällt Licht parallel zur optischen Achse auf einen dichroitischen Kristall, so breiten sich ordentlicher und außerordentlicher Lichtstrahl gleich schnell aus. Erst bei anderer Ausrichtung führen die unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten zu einer Aufspaltung des einfallenden Lichts. Die Besonderheit dieser *dichroitischen Kristalle* liegt nun darin, dass beide Lichtstrahlen linear polarisiert sind. Die Polarisationsebenen stehen dabei senkrecht aufeinander. So gelten die doppelbrechenden Kristalle als beliebte Bausteine, um polarisiertes Licht zu erzeugen. (Vgl. ebd: 13 f)

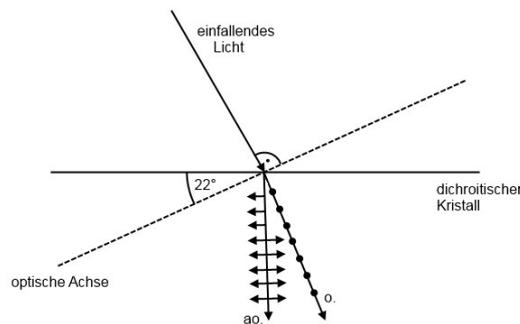


Abbildung 8: Polarisation bei dichroitischen Kristallen. Ein Lichtstrahl dringt von außen, normal zur optischen Achse in den Kristall ein. Ordentlicher Strahl o. und außerordentlicher Strahl ao. breiten sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aus (siehe auch Abbildung 7) und werden dabei auch unterschiedlich stark gebrochen. Beide Strahlen sind linear polarisiert - Deren Schwingungsebenen stehen aber senkrecht aufeinander. (eigene Darstellung)

Eine beispielhafte Bauart für Polarisatoren bietet das *Nicol-Prisma*, das aus Kalkspat besteht. Dieses doppelbrechende Material wird so geschnitten, dass die optische Achse senkrecht zum einfallenden Licht stehen kann. Die Oberfläche und die optische Achse stehen in einem Winkel von 22° zueinander (wie in Abbildung 8). Um einen Polarisator daraus zu bauen, entledigen wir uns des ordentlichen Strahls: Durch einen Schnitt (siehe Abbildung 9) wird der Kalkspat in zwei Teile geteilt. Es entstehen zwei Prismen, die mit einer Kittschicht aus Kanadabalsam wieder zusammengeführt werden.

Da die Brechzahl dieser Schicht etwas kleiner ist, als die des Kristalls, wird der ordentliche Lichtstrahl an den Rand des Prismas reflektiert (und wird dort von einer geschwärzten Wand absorbiert), während der außerordentliche Strahl die Schicht durchdringt. Das, aus dem System austretende Licht, ist nur noch in einer Ebene linear polarisiert. (Vgl. Meschede 2010: 565)

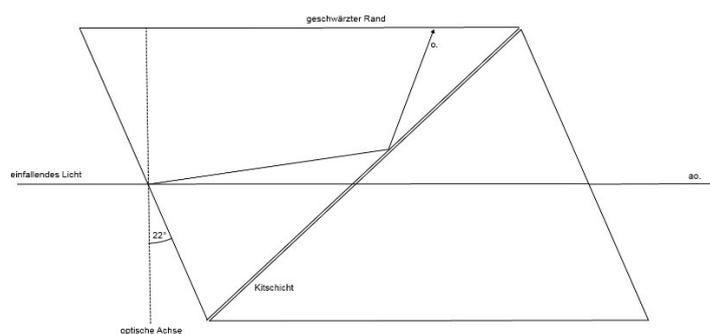


Abbildung 9: Nicol-Prisma. Der Kristall erzeugt zwei polarisierte Lichtstrahlen, von denen einer durch Totalreflexion an der Kittschicht aus dem System gedrängt wird. o ... ordentlicher Strahl, ao ... außerordentlicher Strahl (eigene Darstellung nach Jäger 2014: 15)

2.5.1 Versuch: Spannungsoptik

Aufbau und Durchführung:

Wir nutzen wieder, wie bereits in Versuch 2.2.1, einen Overheadprojektor und zwei Polarisationsfolien. Wir legen eine der Folien auf die Arbeitsfläche des Projektors und darauf ein Stück Plexiglas (einen optisch isotropen Stoff), welches beispielsweise die Form eines Hakens hat. Nun bietet es sich an, eine Helferin oder einen Helfer zu bitten, die zweite Polarisationsfolie über das Untersuchungsobjekt zu halten. Die Stellung soll dabei senkrecht zur Schwingungsebene der ersten Folie sein, sodass kein (bzw. kaum) Licht zum Beobachtungsschirm gelangt. Dann üben wir Druck und Zug an den Enden des Hakens aus.

Beobachtung:

Auf dem Schirm sehen wir helle Linien bzw. Streifen an den Stellen des Stücks, die besonders durch den Druck oder Zug belastet werden.

Erklärung:

Solange keine mechanische Beanspruchung auf das Plexiglas wirkt, ist der Stoff isotrop und das Licht kann den darüber liegenden Polarisator nicht durchdringen. Doch durch Druck oder Zug kommt es an den belasteten Stellen zu Brechungsindexänderungen. Der Stoff wird doppelbrechend und dreht stellenweise die Polarisationssebene des Lichts. Dieses wird dann aber nicht mehr vollständig vom Polarisator blockiert und wir können Linien und Streifen sehen, die uns die mechanische Belastung am Gegenstand veranschaulichen. (*Vgl. Demtröder 2009: 259*)

Dieser Versuch 2.5.1 ist ein Beispiel, wie Bauteile untersucht werden können: Abweichend von ihrem tatsächlichen Material, stellt man sie zuerst aus Kunststoff her und überprüft sie mithilfe der Spannungsoptik. Zu stark belastete Stellen können entdeckt und verstärkt werden.

2.6 Dispersion und Brechung

Weißes Licht besteht aus elektromagnetischen Wellen mit Wellenlängen zwischen 380 nm und 780 nm. Diese Wellen bewegen sich im Vakuum alle mit der gleichen Geschwindigkeit c (Lichtgeschwindigkeit).

Stellen wir uns eine Lichtquelle vor, die ein Lichtpaket aussendet, das alle sichtbaren Wellenlängen enthält. Im Vakuum wird dieses Paket, unabhängig von der Distanz, zusammenbleiben. Erst, wenn das Wellenpaket auf Materie, wie zum Beispiel Glas oder Wasser

trifft, ändert sich das: Plötzlich breiten sich die einzelnen Wellenlängenanteile des Pakets unterschiedlich schnell aus. Das Wellenpaket „zerfließt“ langsam, denn je langwelliger der Anteil ist, desto stärker wird er gebremst. Diesen Vorgang nennt man *Dispersion*. (Vgl. Lübbe 2013: 4)

Wie stark die Dispersion ist, hängt vom Material ab. Um eine, von der Lichtgeschwindigkeit abweichende Ausbreitungsgeschwindigkeit ausdrücken zu können, führen wir daher den *Brechungsindex* ein.

Bei einem Brechungsindex n und der Lichtgeschwindigkeit c ($\approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$) ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit:

$$v = \frac{c}{n} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (\text{F. 4})$$

Der Wert n hängt dabei nicht nur vom Medium, sondern auch von der Wellenlänge ab, wodurch es zur Dispersion kommt.⁵ (Vgl. Demtröder 2009: 223)

Da Luft über einen Brechungsindex n_l verfügt, mit $1.00002 \leq n_l \leq 1.00005$, können wir, aufgrund der geringen Auswirkungen, Luft bezüglich der Dispersion wie Vakuum annehmen. Spannende Ergebnisse erwarten wir uns dagegen bei Materie, wie Glas, mit einem Wert $n_g \approx 1.5$. (Vgl. Meschede 2008: 4)

Trifft das Licht senkrecht auf die Materie, lassen sich mit freiem Auge keine Auswirkungen feststellen.⁶ Bei geeignetem, schrägem Einfall kommt es, aufgrund der Dispersion, allerdings zu dem Effekt den man *Brechung* nennt: Das Licht zerfließt innerhalb des Mediums. Bei geeigneten, optischen Bauteilen, wie bei einem Prisma, können wir diesen Effekt sichtbar machen. Weißes Licht wird in seine Spektralfarben zerlegt. (Vgl. Lübbe 2013: 4)

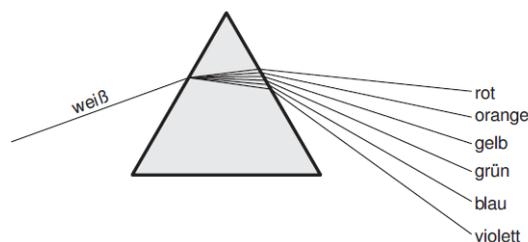


Abbildung 10: Lichtbrechung. Mit einem Prisma lässt sich weißes Licht in seine Spektralfarben zerlegen. (Osterhage 2014: 22)

⁵ Der Wert n ist stets größer als 1, da sonst v größer als die Lichtgeschwindigkeit wäre.

⁶ Doch würden wir beispielsweise eine Glasplatte mit Dicke Δz (Oberfläche senkrecht zur Ausbreitungsrichtung) in einen Strahlengang einbringen, wird das Licht gebremst: Zum Durchlaufen einer Vakuumschicht der Dicke Δz braucht Licht $t_v = \frac{\Delta z}{c}$ Sekunden. Für die Glasplatte dagegen benötigt das Licht die Zeit $t_g = \frac{\Delta z \cdot n}{c}$.

Das gibt eine Zeitdifferenz von $\Delta t = \frac{(n-1) \cdot \Delta z}{c}$. (Vgl. Demtröder 2009: 224)

Bei einem Prisma, wie in Abbildung 10, ist zu beachten, dass das Licht zwei Übergänge durchlaufen muss. Wir positionieren zu Beginn eine Lichtquelle, die einen gerichteten Strahl aussendet. Das Medium 1, in dem sich das Licht bewegt, ist Luft. Das Prisma aus Glas stellt unser Medium 2 dar, welches wir in den Strahlengang einbringen.

Nun spielen die Brechungsindices eine Rolle. Die Materie mit höherem Brechungsindex nennt man das *optisch dichtere Medium*. Analog dazu heißt das andere das *optisch dünnere Medium*. In unserem Fall liegt im ersten Teil ein Übergang vom optisch dünneren zum optisch dichteren Medium vor, da der Lichtstrahl aus der Luft in das Glas eintritt. Dabei kommt es zu einer Brechung zum Lot. Das Licht durchläuft dann das Prisma und dringt wieder nach außen, wandert also vom optisch dichteren in das optisch dünnere Medium. Es kommt zu einer Brechung vom Lot. Die Form des Prismas ermöglicht es, dass in beiden Fällen der Brechung das Lichtpaket auseinanderfließt, sodass es zur Aufspaltung des weißen Lichts in die Spektralfarben kommt.

Ein Prisma spaltet weißes Licht auf und man sieht alle Spektralfarben, die in einem kontinuierlichen Spektrum aneinandergereiht scheinen. Im Prinzip ist das eine Methode, Licht zu untersuchen. Jeder Farbanteil, der im Spektrum zu sehen ist, stellt eine wichtige Komponente dar, die das weiße Licht tatsächlich weiß macht. unter all den Farben, die wir mit dem Prisma und weißem Licht erzeugen können, ist Magenta nicht dabei. Dies besprechen wir in Kapitel 3.3. (Vgl. Lübbe 2013: 3 f)

Außerdem können wir nicht nur weißes Licht untersuchen, sondern auch jede andere beliebige Lichtquelle - dazu kommen wir in Kapitel 7.

3 FARBEMPFINDUNG UND FARBMESSUNG

3.1 Das Auge

Licht ist eine elektromagnetische Welle, deren Wellenlänge sich im Bereich zwischen 380 nm und 780 nm befindet. Unsere Augen sind speziell für diesen Wellenlängenbereich empfindlich, während wir außerhalb dieses Bereiches liegende Strahlung nicht mehr wahrnehmen können. (Vgl. Lübbe 2013: 1)

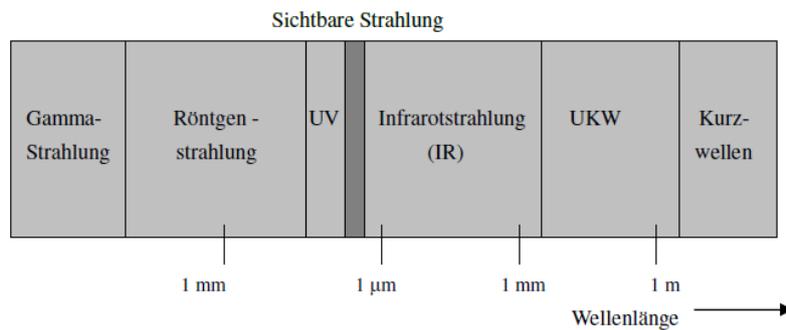


Abbildung 11: Schematische Darstellung elektromagnetischer Strahlung. Der dunkelgraue Balken markiert den Bereich des, für den Mensch sichtbaren Lichts im Wellenlängenbereich 380 nm – 780 nm. (Lübbe 2013: 2)

Die anderen Bereiche der Strahlung sind zwar nicht mehr sichtbar, aber wir nehmen sie teilweise dennoch wahr, da wir Temperaturrezeptoren in unserer Haut haben (Infrarotstrahlung), oder Hautbräunung stattfindet (Ultraviolettstrahlung). Unabhängig von der Wellenlänge kann uns aber jede Art von Strahlung schaden oder aber auch nutzen. (Vgl. ebd.)

Dass uns unsere Welt bunt erscheint, ist zwar abhängig von der Wellenlänge des Lichts, welches in unsere Augen gelangt, allerdings ist die Farbempfindung eine Leistung des Gehirns. Betrachten wir dazu im Folgenden einen vereinfachten Aufbau des Auges in Abbildung 12.

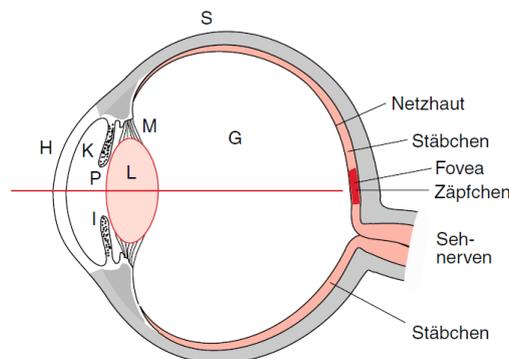


Abbildung 12: Das Auge: S ... Sehnhaut, H ... Hornhaut, K ... vordere Augenkammern, I ... Iris, P ... Pupille, L ... Linse, M ... Muskel, G ... Glaskörper (Demtröder 2009: 357)

In Abbildung 12 stellt die rote Linie einen Lichtstrahl dar, der in das Auge eindringt und in der Fovea, dem gelben Fleck auf der Netzhaut auftrifft. (Vgl. Demtröder 2009: 273)

In der Netzhaut befinden sich 4 - 7 Millionen zapfenförmige Zellen, die für das Farbsehen verantwortlich sind. Im Gegensatz zu diesen besitzen wir noch 110 - 125 Millionen stäbchenförmige Zellen, mit denen wir Helligkeit wahrnehmen können. (Vgl. Lübbe 2013: 12)

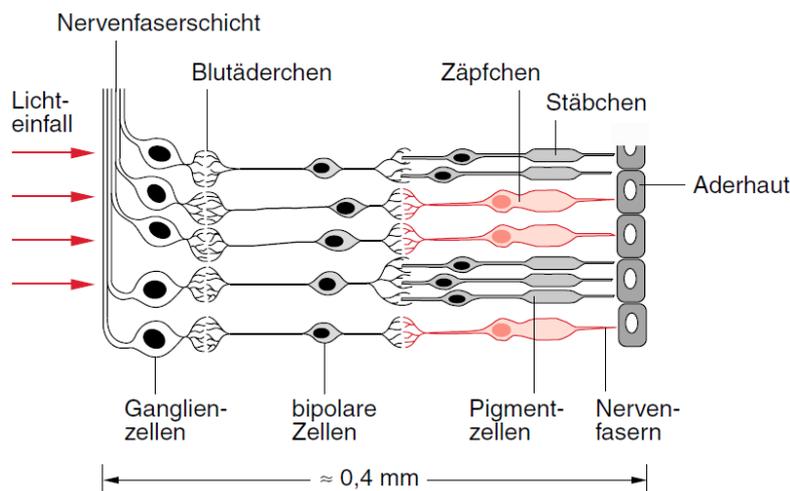


Abbildung 13: Schematischer Aufbau von Zapfen und Stäbchen im menschlichen Auge (Demtröder 2009: 374)

In der vorangehenden Abbildung sehen wir einen vereinfachten Aufbau der Netzhaut. Das Licht scheint dabei von der falschen Seite zu kommen, da es zuerst Nervenfasern und Blutäderchen durchdringen muss, bevor es auf die Zapfen- und Stäbchen- Zellen trifft. Doch dies schützt die Zellen vor zu hohen Intensitäten, die das Auge schädigen könnten. Die Fovea, der "gelbe Fleck", ist der Bereich des schärfsten Sehens.⁷ Dort sind ausschließlich die Zapfen vorhanden.

Der eindringende Lichtstrahl trifft dort auf drei verschiedene Arten von Zapfen, die bezüglich der Wellenlängen des Lichts unterschiedliche Erregungsmaxima besitzen: L-Zapfen sind empfindlich für langwelliges Licht, also die Farbe Rot. M-Zapfen werden bei mittleren und S-Zapfen bei kurzwelligen Lichtstrahlen erregt, sodass diese die Farben Grün und Blau wahrnehmen.⁸ Abhängig von der Intensität der jeweils ankommenden Lichtwellen kommt es zu unterschiedlich starker Erregung der Zapfen. Beispielsweise werden die S-Zapfen sehr stark erregt, wenn wir eine blaue Fläche betrachten - die anderen dagegen kaum. (Vgl. Lübbe: 12 f)

⁷ Wenn man einen Punkt fixiert und sich dann auf den Raum außerhalb dieses Punktes konzentriert, merkt man, dass außenliegende Bereiche verschwommen sind.

⁸ Die Bezeichnungen L-, M- und S- kommen aus dem Englischen und stehen für "long", "middle" und "short".

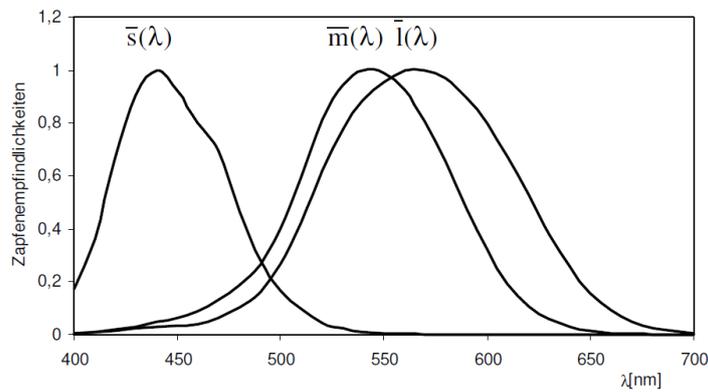


Abbildung 14: Darstellung der Empfindlichkeit der Zapfen, abhängig von der Wellenlänge. $\bar{s}(\lambda)$... S-Zapfen, $\bar{m}(\lambda)$... M-Zapfen, $\bar{l}(\lambda)$... L-Zapfen (Lübbe 2013: 14)

3.2 Die Graßmann-Gesetze

Die unterschiedlichen Anregungszustände der Zapfen nennt man *Farbreize*.⁹ Diese werden zu einem einzigen Signal verarbeitet, sodass im Gehirn ein bestimmter Farbeindruck entsteht.

Der Effekt ist auch als *additive Farbmischung* bekannt: Im Gehirn werden die drei Farbanteile, die wir mit den drei unterschiedlichen Zapfen sehen, zusammengeführt: Abhängig von der Zusammensetzung ergibt sich dann eine resultierende Farbe. (Vgl. ebd.: 25 f) Dies funktioniert für zeitlich nacheinander-, räumlich übereinander- oder eng nebeneinandergelegte Lichtsignale. (Vgl. Lübbe 2013: 30)

Wir stellen nun fest, dass es möglich wäre, die selbe Farbe zu sehen, obwohl die spektrale Zusammensetzung¹⁰ des ankommenden Lichts eine andere ist. Denn auch, wenn durch unterschiedliche Wellenlängen unterschiedliche Zapfen erregt werden, kann die resultierende Farbe, die wir sehen, die selbe sein.

Betrachten wir dazu ein Beispiel: Wir verwenden drei Spots (Spotlights), welche farbiges Licht auf einen Schirm fallen lassen (siehe auch Versuch 3.2.2). Nebeneinander sollen die Farben Rot, Grün und Gelb zu sehen sein.

Verschieben wir nun aber das rote Licht, hinein in das Grüne, mischen sich die beiden Farben im Gehirn additiv und wir sehen (wenn die Mischung passt) dasselbe Gelb, welches, an dritter Stelle, vom letzten Spot ausgeht. Man nennt diesen Effekt *Farbvalenz*: Verschiedene Farbreize, die dieselbe Farbvalenz haben, rufen die gleiche Farbempfindung hervor. (Vgl. Lübbe 2013: 26)

⁹ Der Farbreiz ist eine physikalisch messbare Größe. Es ist darunter jene Strahlung φ_λ zu verstehen, die durch direkte Reizung der Netzhaut zur Ursache der Farbempfindung wird. (Lübbe 2013: 25)

¹⁰ Die spektrale Zusammensetzung beschreibt die Wellenlängenanteile von Licht, die in einem Lichtstrahl vorhanden sind.

Die bereits genannten Phänomene lassen sich als die *Graßmann-Gesetze* formulieren:

1. Jede Farbvalenz kann mithilfe von drei Grundgrößen dargestellt werden.¹¹
2. Farben lassen sich beim Mischen stetig zu anderen Farben verändern.
3. Unabhängig von der spektralen Zusammensetzung können gleiche Farbreize entstehen.

(Vgl. ebd.: 27)

Die Graßmann-Gesetze können wir auch mithilfe von Vektoren ausdrücken (siehe Kapitel 3.6). Die Gesetze erklären uns, welche Farben der Mensch durch additive Farbmischung sehen kann. Im Folgenden wollen wir die additive Farbmischung anschaulich machen und benötigen dazu die, in Kapitel 3.3 noch genauer diskutierte, *Normfarbtafel*. Diese enthält alle, für den Menschen sichtbaren Farben (siehe Abbildung 15).

Wir wählen darauf drei Punkte bzw. Farben, von denen, nach dem dritten Graßmann-Gesetz, keine durch Kombination der anderen beiden darstellbar ist. Dies ist bei Rot, Grün und Blau der Fall. Die Normfarbtafel ist so konzipiert, dass auf den Strecken zwischen den Punkten alle möglichen Mischfarben liegen. (Vgl. Hasche/Ingwer 2016: 25) Insbesondere bilden diese Strecken die Kanten eines Dreiecks. Dieses schließt, nach dem dritten Graßmann-Gesetz, alle Mischfarben ein, die durch die drei Farbpunkte erreicht werden können. Wir nennen das ein *Farbdreieck*.

In der folgenden Abbildung 15 ist ersichtlich, dass eine geeignete Kombination von grünem, blauem und rotem Licht weißes Licht ergibt. Der Punkt ist mit *WP* gekennzeichnet und man nennt ihn *Weißpunkt*. (Vgl. ebd.)

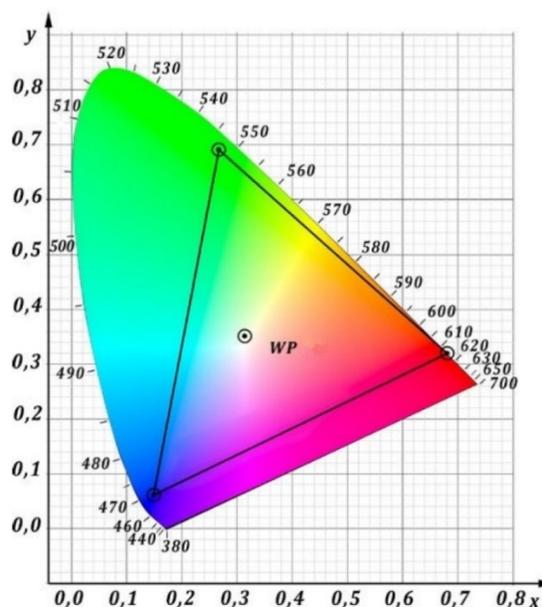


Abbildung 15: Normfarbtafel (siehe auch Kapitel 3.3) und Farbdreieck. WP ist der Weißpunkt. (Vgl. Hasche/Ingwer 2016: 83)

¹¹ Beim Mensch bilden diese 3 Grundgrößen die 3 unterschiedlichen Zapfen.

Der Weißpunkt WP , aus Abbildung 15, kann durch additive Farbmischung der Eckpunkte des Farbdreiecks erreicht werden. Der folgende Versuch 3.2.1 zeigt dies mit einem Farbkreisel, bei dem Farbsektoren zeitlich übereinandergelegt werden. (Vgl. Lübbe 2013: 30)

3.2.1 Versuch: Der Farbkreisel

Aufbau und Durchführung:

Dieser Versuch kann mit wenig Aufwand nachgestellt werden. Mithilfe einer Stecknadel und dickem Papier baut man einen Kreisel, dessen Durchmesser zumindest 20 cm betragen sollte, damit man den Effekt gut sieht. Die Oberfläche wird gedrittelt und jeder Sektor mit einer der Farben Rot, Grün und Blau bemalt.

Dann dreht man den Kreisel an. Wenn man es schafft, einen sehr stabilen Kreisel zu bauen, wäre es empfehlenswert, den Kreisel mithilfe eines Motors (z.B. einer Bohrmaschine) rotieren zu lassen.

Beobachtung:

Wenn man den Kreisel von oben betrachtet, sieht man anstelle der einzelnen bunten Flächen eine einzige weiße (oder graue) Oberfläche.

Erklärung:

Für das menschliche Auge genügt es bei Filmen, 20 Bilder pro Sekunde zu zeigen, um den Eindruck eines bewegten Bildes zu erzeugen. (Vgl. Glaeser/Paulus 2014: 29)

Auch der Kreisel bewegt Bilder (die Farben) und zeigt jede Farbe öfter, als 20-mal in der Sekunde an derselben Stelle. Das reicht aus, um das Gehirn auszutricksen: Im Gehirn beginnen sich alle Farben, die man an ein und derselben Position sieht, übereinanderzulegen und es kommt zur additiven Farbmischung. Wie wir im Farbdreieck gesehen haben ist die resultierende Farbe Weiß, sofern die Kombination geeignet ist. In der Praxis ist sie das in der Regel nicht und man sieht stattdessen einen hellen Grauton.

3.2.2 Versuch: Additive Farbmischung

Aufbau und Durchführung:

Drei verschiedene Lichtquellen (z.B. Weißlichtspots mit Filterung oder LED-Spots), die die Farben Rot, Grün und Blau erzeugen, werden auf einen Schirm gerichtet. Der Aufbau wird so eingestellt, dass jede Farbe jede weitere ein wenig überlagert, wie es in Abbildung 16 gezeigt wird.



Abbildung 16: Additive Farbmischung: Überlagerung der drei Farben Rot, Grün und Blau (Lübbe 2013: 33)

Beobachtung:

Dort, wo sich Rot und Grün überlagern, entsteht Gelb; wo sich Rot und Blau überlagern entsteht Magenta; wo sich Grün und Blau überlagern entsteht Cyan; In der Mitte, wo alle drei Farben zusammenkommen, sieht man Weiß oder zumindest einen hellen Grauton.

Erklärung:

An den Stellen, wo sich die Lichtquellen überlagern, dringen von jeder Farbe die zugehörigen Wellenlängen in unser Auge. Jeder der drei Farbreize stimuliert eine andere Zapfenart. Die Signale werden an das Gehirn weitergeleitet und erst dort kommt es zur additiven Farbmischung. (Vgl. Hasche/Ingwer 2016: 3)

Rot, Grün und Blau bezeichnen wir als die *Primärfarben*. Bei Überlagerung von zwei dieser Farben, analog zum obigen Experiment entstehen die *Sekundärfarben* Gelb (Grün, Rot), Magenta (Rot, Blau) und Cyan (Blau, Grün). (Vgl. Welsch/Liebmann 2012: 1)

3.2.3 Versuch: Farbverläufe

Aufbau und Durchführung:

Wir benötigen, wie in Versuch 3.2.2, farbige Spots (RGB). Für diesen Versuch müssen diese allerdings dimmbar sein. Nun können durch Variieren der Intensitäten die Farbverläufe zwischen den drei Primärfarben beobachtet werden.

Beispielsweise beleuchten wir Anfangs einen Schirm mit dem roten Spot (volle Intensität). Wir beginnen dann, das Licht am Schirm mit dem grünen Spot zu überlagern (Geschwindigkeit beliebig, bis zu dessen voller Intensität). Dann dimmen wir die rote Lichtquelle, bis diese ganz erlischt. In gleicher Weise setzen wir das Überlagern mit Grün-Blau und schließlich mit Blau-Rot fort.

Beobachtung:

Wir können einen Farbverlauf beobachten, der uns alle Farben liefert, die an den Seiten eines Farbdreiecks liegen (wie in Abbildung 15). Wir erhalten dabei die wichtigsten Punkte in folgender Reihenfolge: Rot – Gelb – Grün – Cyan – Blau – Magenta – Rot.

Erklärung:

Das am Schirm zusammenfallende Licht nehmen wir mit additiver Farbmischung wahr. Die Mischfarben Gelb, Cyan und Magenta erhalten wir dabei stets dann, wenn sich die Primärfarben in gleichen Teilen überlagern. Das ist der Fall wenn je zwei Spots die volle Lichtintensität abgeben.

Des Weiteren kann erwähnt werden, dass beim Bau von Monitoren die additive Farbmischung eingesetzt wird. Beispiel: Plasmafernseher: Hier besteht jeder Bildpunkt des Monitors aus drei winzigen Kammern. In jeder dieser Kammern ist ein bestimmtes Gas enthalten, welches bei Anregung eine der Farben Rot, Grün und Blau erzeugt. (Vgl. *Experimentis 2016, Was ist Plasma?*) Dies kann mit beliebigen Intensitäten gemacht werden. Das menschliche Auge legt die drei Farbanteile eines Pixels, aufgrund der geringen Distanz zueinander, zusammen und es entsteht der gewünschte Farbeindruck. (Vgl. *Lübbe 2013: 30*)

Während die *additive Farbmischung* ein Vermischen aller eingehenden Farbreize im Gehirn ist, funktioniert die *subtraktive Farbmischung* physikalisch: Aus weißem Licht, wie zum Beispiel dem der Sonne, lassen sich mithilfe von Filtern Farbanteile herausnehmen. Das übrigbleibende Licht gibt jene Farbe, die durch die restlichen Wellenlängen noch zustande kommt.¹² (Vgl. *Hasche/Ingwer 2016: 35*)

3.2.4 Versuch: Subtraktive Farbmischung

Aufbau und Durchführung:

Wir verwenden hier die Sekundärfarben Gelb, Cyan und Magenta. Diese filtern wir aus weißem Licht heraus. Dafür benötigen wir Farbfolien als Filter (Erhältlich auf www.amazon.de, Stand:

¹² Achtung: Aus farbigem Licht kann man physikalisch durch Filter gewisse Anteile herausnehmen. (Beispielsweise nehmen wir aus weißem Licht den gesamten Rot-Anteil.) Das übrigbleibende Licht allerdings, wird in unserem Gehirn wieder additiv gemischt.

Jänner 2017). Ein Overheadprojektor dient uns als Weißlichtquelle. Wir legen auf der Arbeitsfläche des Projektors die Folien so auf, dass mittig ein Überlappen aller drei Filter entsteht. Zusätzlich soll aber auch jede Folie für sich allein liegen bzw. nur eine weitere kreuzen (wie in Abbildung 17). So ist jede Kombination genau einmal vertreten.

Beobachtung:

An den Stellen, wo sich je zwei Filter überlagern entstehen Rot, Grün und Blau.

Da, wo alle drei Filter übereinanderliegen, bleibt der Schirm schwarz. (siehe folgende Abbildung)

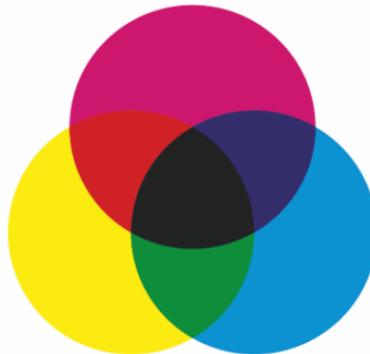


Abbildung 17: Subtraktive Farbmischung: weißes Licht wird gefiltert (Lübbe 2013: 33)

Erklärung:

Die Filter blockieren gewünschte Wellenlängenbereiche des weißen Lichts gerade so, dass die übrigbleibenden Wellenlängen die Sekundärfarben bilden.

Überlagere ich zwei Filter, so werden die ersten Anteile beim ersten Filter absorbiert. Die noch übrigbleibenden Wellenlängen müssen aber dann noch den nächsten Filter passieren. Dieser nimmt dann nochmals den Wellenlängenbereich heraus, für den er vorgesehen ist. Übrig bleiben also nur die Wellenlängen, die auch wirklich beide Filter passieren dürfen. Die Reihenfolge der Filter spielt für das Resultat keine Rolle.

Die Sekundärfarben sind in ihrer Zusammensetzung an Wellenlängen so beschaffen, dass bei einer Hintereinanderreihung aller drei Filter jede Wellenlänge absorbiert wird. Am Schirm bleibt eine schwarze Fläche, da kein Licht durch die Anordnung dringt.

Auch subtraktive Farbmischung kommt beim Bau von Monitoren zum Einsatz. Ein Beispiel dafür sind die LCD-Bildschirme: Bei LCD-Schirmen wird eine Basis aus weißem Licht geschaffen. Durch Filtern unterschiedlicher Farbanteile kann der gewünschte Farbeindruck erzeugt werden. (Vgl. Welsch/Liebmann 2012: 337)

3.3 Das Farbhufeisen

Kommen wir zurück zum Farbdreieck. Haben wir drei Farben gegeben, können wir, grafisch betrachtet, jede Farbmischung zwischen diesen Punkten erreichen (siehe auch Versuch 3.2.3). Tatsächlich haben wir aber nicht nur drei, sondern alle Farben des gesamten Farbspektrums von weißem Licht zur Verfügung, um daraus Mischungen herzustellen.

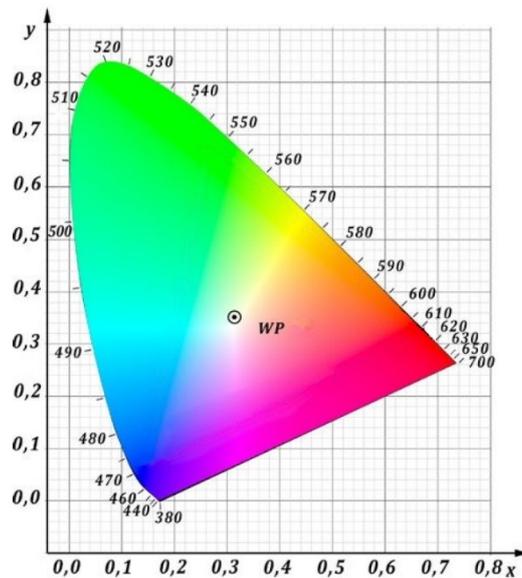


Abbildung 18: Normfarbtabelle: Die Spektralfarben liegen außen am Hufeisen. Durch additive Farbmischung ist die Gesamtheit aller wahrnehmbaren Farben darstellbar. WP ... Weißpunkt (Vgl. Hasche/Ingver 2016: 83)

Im sogenannten *Farbhufeisen* sind die Spektralfarben anstelle einer Linie, hufeisenförmig angeordnet. Dies ermöglicht es, die Gesamtheit aller wahrnehmbaren Farben darzustellen. Das bereits abgebildete Farbdreieck (siehe Abbildung 15) findet sich darin wieder.

Die gerade Linie, die Blau-Violett und Rot verbindet, nennt man *Purpurgerade*. Spaltet man weißes Licht mit einem Prisma in seine Spektralfarben auf, so findet sich darin kein Magenta. Der gesamte Bereich des Farbhufeisens, in dem Magenta vorkommt, bildet die uneigentliche Farbmischung. Diesen Bereich zu sehen, macht nur die additive Farbmischung in unserem Gehirn möglich. (Vgl. ebd.: 25)

Durch diese Darstellung lässt sich jede Farbe in Koordinaten darstellen (Normfarbwerte x,y). Der Weißpunkt WP spielt dabei eine zentrale Rolle:

Alle Farben, die auf einer Strecke von WP zu einem Punkt außen liegen, besitzen denselben *Farbton*, die *Sättigung* nimmt allerdings zum Weißpunkt hin ab. (Vgl. Leute 2011: 79)

Neben den Sinneswahrnehmungen für Farbton und der Sättigung ist die dritte Empfindung die *Helligkeit*, die in der Abbildung der Normfarbtafel nicht zur Darstellung gelangt. Um diese Variable miteinzubeziehen, kann man der Tafel eine dritte Dimension hinzufügen. Das entstehende Gebilde nennt man den *Rösch-Farbenraum*. (Vgl. Lübbe 2013: 87)

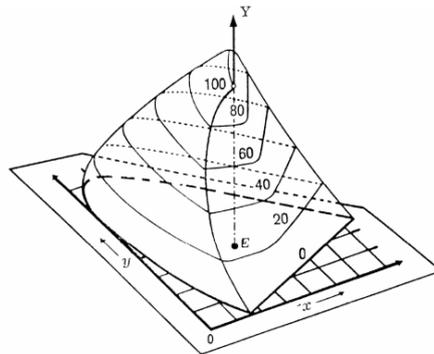


Abbildung 19: Der Rösch-Farbenraum. Grundfläche (x, y): Farbton und Sättigung, Höhe (Y): Helligkeit (Lübbe 2013: 87)

An der Oberfläche des dreidimensionalen Gebildes befinden sich die *Optimalfarben*. Schwarz und Weiß unterscheiden sich nur in ihrer Helligkeit und liegen daher direkt übereinander. Zwischen ihnen befinden sich unterschiedliche Grautöne.¹³ (Vgl. ebd.)

3.4 Spektrale Helligkeitskurven

Hier ist hinzuzufügen, dass Farben, trotz gleicher Helligkeit unterschiedlich hell wahrgenommen werden. Man nennt dies die *spektrale Helligkeitsempfindung*. Diese stellt man, abhängig zur Wellenlänge in 2 Kurven, die $V(\lambda)$ - und die $V'(\lambda)$ -Kurve dar. (Vgl. ebd.: 24 f)

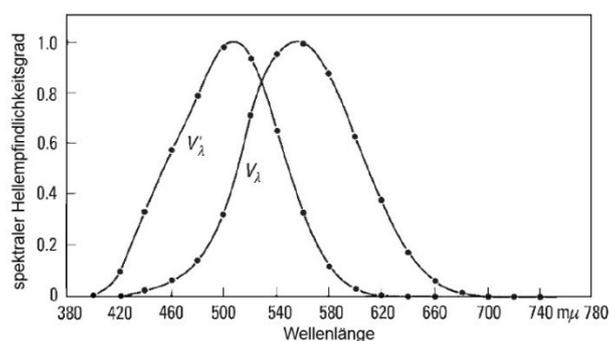


Abbildung 20: Spektrale Helligkeitskurven $V(\lambda)$ für Sehen bei Tageslicht und $V'(\lambda)$ für das Sehen bei Nacht. (Bergmann/Schaefer 2004: 148)

¹³ Bei Experimenten, wie dem Farbkreis ist als Resultat anstelle von Weiß oft ein Grauton zu sehen, da eben auch die Helligkeit eine Rolle spielt.

Die beiden Kurven zeigen den Unterschied für Sehen bei Tag und bei Nacht bzw. wenn es hell oder dunkel ist. Die $V(\lambda)$ und $V'(\lambda)$ Kurven sind, wie man aus Abbildung 20 entnimmt, versetzt. Je nachdem, ob es also hell, oder dunkel ist, nehmen wir gewisse Farben als besonders hell wahr. Gelbgrün (555 nm) ist bei Tag die hellste Farbe. Von dieser aus nehmen wir auf- und absteigende Wellenlängen kontinuierlich dunkler wahr. Das bedeutet, dass wir für dasselbe Helligkeitsempfinden höhere Intensität benötigen.

Analoges Verhalten ist, wie man es in der vorangehenden Grafik sieht, auch bei der $V'(\lambda)$ Kurve zu beobachten. Bei Nacht verschiebt sich das Maximum der Helligkeitsempfindung allerdings in Richtung Blaugrün auf 507 nm.

Bei Tag, oder bei tagheller Beleuchtung regt die hohe Intensität des Lichts die Zapfen an und wir können Farben wahrnehmen. Ab einer genügend geringen Intensität reicht das vorhandene Licht aber nicht mehr aus, um die Zapfen zu reizen. Das Farbsehen geht also verloren.

Sehen können wir aber dennoch, da die Stäbchen sehr wohl noch für geringere Helligkeiten empfindlich sind. (Vgl. *Liibbe 2013: 24 f*)

3.4.1 Versuch: Beleuchten von Gegenständen

Aufbau und Durchführung:

Für den ersten Teil des Experiments benötigt man eine weiße Lichtquelle, die man sehr stark dimmen kann. Im zweiten Teil verwendet man am besten LEDs, die weißes, rotes, usw. Licht erzeugen. Als zu beleuchtender Gegenstand eignet sich beispielsweise ein vielfarbiger Blumenstrauß. Der Experimentierraum muss so verdunkelt werden, dass kein Licht mehr von außen eindringt.

Im ersten Teil des Experiments positioniert man die weiße, dimmbare Lichtquelle im Raum, so schwach, dass die Augen eine Weile brauchen, um sich an die Dunkelheit zu gewöhnen. Den Blick richtet man dann auf den Blumenstrauß.

Im zweiten Teil verwendet man die LEDs und beleuchtet den Blumenstrauß erst mit weißem, dann rotem usw. Licht.

Beobachtung:

Das erste Experiment sollte den Eindruck eines Blumenstraußes in unterschiedlichen Grautönen, also ohne Farben erzeugen.

Im zweiten Teil wird der Blumenstrauß erst mit weißem Licht beleuchtet und man kann alle Farben erkennen - wir sehen den Strauß bunt, so wie wir es aus der Alltagswelt gewohnt sind.

Ändert man allerdings die Beleuchtung und betrachtet den Strauß jeweils unter rotem, blauem und grünem Licht (oder auch anderem), so beobachtet man, dass stets nur die Blüten farbig erscheinen, die auch unter weißem Licht diese Farbe besitzen.

Rote Blüten erscheinen beispielsweise sowohl in weißem, als auch in rotem Licht rot. Alle anderen Farben verschwinden bei diesem Wechsel der Lichtquelle allerdings: In rotem Licht sieht eine blaue Blüte schwarz aus.

Erklärung:

Im ersten Versuch aktiviert man bei ausreichend geringer Helligkeit im Raum die Stäbchen der Augen, welche für das Nachtsehen zuständig sind. Sie nehmen keine Farben wahr. Der Strauß sieht daher grau aus.

Trifft im zweiten Experiment weißes Licht auf einen Gegenstand, den wir beispielsweise rot sehen, so werden alle Wellenlängen des weißen Lichts vom Gegenstand absorbiert, bis auf die im roten Wellenlängenbereich. Diese werden reflektiert und erreichen unser Auge. Eine blaue Blume, die nur mit rotem Licht beleuchtet wird, absorbiert alle auftreffenden Wellenlängen. Jene Wellenlängen, die die Blüte reflektieren würde und die sie dann blau erscheinen lassen, sind also gar nicht erst vorhanden. Es wird also kein Licht reflektiert und wir sehen nur Schwarz.

Schwarze Oberflächen absorbieren auch bei weißem Licht alle auftreffenden Wellenlängen. Je "schwärzer" ein Objekt wirkt, desto mehr Licht wird absorbiert.

Dieser Versuch scheint auch optimal für den Schulalltag zu sein, um den Kindern zu zeigen, weshalb dunkle Objekte in der Sonne viel heißer werden, als weiße. Begründung: Je mehr Strahlung absorbiert wird, desto wärmer wird ein Objekt.

3.5 Lichtwahrnehmung unterschiedlicher Lebewesen

Offensichtlich gab uns die Evolution mithilfe der Zapfen und Stäbchen ein äußerst praktisches Werkzeug. Während die Stäbchen zwar ein besseres Sehen im Dunklen ermöglichen, gewährleisten die Zapfen als Zusatzinformation das Farbsehen, welches in der Welt der Menschen kaum wegzudenken ist.

Doch nicht nur für den Menschen, sondern auch für andere Lebewesen sind Augen so elementar, dass im Laufe der Evolution dieselbe Idee gleich viele Male unabhängig entwickelt wurde. Die *Linsenaugen*, wie der Mensch sie hat, sind unter den Wirbeltieren vertreten. Doch genauso gibt es *Facettenaugen*, wie viele Insekten sie haben. (Vgl. Glaeser/Paulus 2014: 2ff) Natürlich gibt es noch weitere Arten der Umgebungswahrnehmung, wie beispielsweise *Lochkameraaugen*, die, dem

Namen nach, das Prinzip der Lochkamera nutzen. Ausreichende Sicht haben damit aber nur Lebewesen mit sehr langsamer Fortbewegung, da nur ein geringes Sehvermögen gegeben ist. (Vgl. *ebd.*: 109) Da die meisten Lebewesen aber auf schnelle Reaktion und Bewegung angewiesen sind, setzten sich in der Natur überwiegend Linsen- und Facettenaugen durch. Durch mindestens ein Augenpaar wird eine räumliche Wahrnehmung möglich. (Vgl. *ebd.*: 62) Das Sehen von Farben hängt allerdings von den Rezeptoren ab und hat sich nicht gleichmäßig entwickelt, sondern nur für die Arten, die es für die Jagd, Paarung und andere Signale benötigen. (Vgl. *ebd.*: 169) Abhängig vom Aufbau werden auch unterschiedliche Spektralbereiche wahrgenommen. Vögel verfügen, im Vergleich zum Menschen über einen vierten Rezeptor, der Sehen im UV-Bereich ermöglicht. Dies ist für Vögel wichtig, da ihr Gefieder oft auch Licht in diesem Wellenlängenbereich reflektiert. Bienen, mit ihren Facettenaugen können auch Licht im UV-Bereich sehen, große Wellenlängen, die der Mensch als die Farbe Rot sieht, dagegen nicht. (Vgl. *Lübbe 2013: 11f*)

3.6 Farbmotrik: Vektordarstellung von Farben

Die Tatsache, dass so viele Lebewesen mit unterschiedlichsten Arten und Formen von Augen bestückt sind, eröffnet die bereits beantwortete Frage, ob die Welt von allen gleich wahrgenommen wird. Doch alleine die Menschen untereinander scheinen sich in ihrer Wahrnehmung schon massiv zu unterscheiden. Das zeigt beispielsweise die Farbenblindheit.

Aber auch, wenn Farbe eine rein subjektive Empfindung ist, so kann man Beziehungen und Regeln finden, die eine *Farbmotrik* ermöglichen. Dies ist die Lehre zur Darstellung von Farben mit Maß und Zahl. (Vgl. *Bergmann/Schaefer 1987: 702*)

Angenommen wir haben eine farbige Lichtquelle, deren Helligkeit verstellbar ist. Lassen wir das Licht auf einen Schirm fallen und erhöhen die Lichtintensität von 0 auf einen willkürlich festgelegten Höchstwert 100, so ändert sich zwar die Helligkeit, nicht aber die Farbe selbst. Alle machbaren Farben unterschiedlicher Intensität sind von derselben *Farbart*. Von der dunkelsten Stelle weg, dem *Schwarzpunkt*, teilen wir jeder *Farbart* einen eigenen Richtungsvektor zu. Die Länge des Vektors gibt den sogenannten *Farbwert* an. Ein solcher Vektor, mit bestimmter Richtung und Länge gibt die Farbvalenz des farbigen Lichts an. (Vgl. *ebd.*: 709)

Die additive Farbmischung kann nun man als eine Vektoraddition sehen. Seien zwei Farben Rot und Blau gegeben, deren Richtung wir durch \vec{R} und \vec{B} angeben. Zugehörige Farbwerte sind Skalare. Wir bezeichnen sie mit R_M und B_M . Dann ergeben für die folgende Abbildung 21 die Farbvalenzen und deren Mischfarbe $\vec{F}_{Violett}$. (Vgl. ebd.: 709 f)

$$\vec{F}_{Rot} = R_M \vec{R} \quad (\text{F. 5})$$

$$\vec{F}_{Blau} = B_M \vec{B} \quad (\text{F. 6})$$

$$\vec{F}_{Violett} = \vec{F}_{Rot} + \vec{F}_{Blau} \quad (\text{F. 7})$$

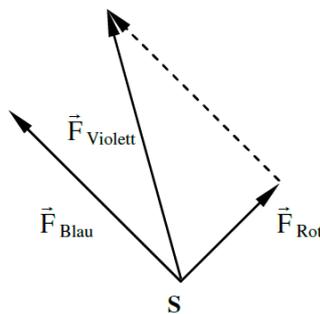


Abbildung 21: Vektordarstellung von Farben. Durch additive Mischung zweier Farbvalenzen \vec{F}_{Blau} und \vec{F}_{Rot} ausgehend vom Schwarzpunkt S, entsteht eine neue Farbvalenz $\vec{F}_{Violett}$. (Lübbe 2013: 27)

Durch additive Farbmischung kann jede Farbe erreicht werden, die innerhalb des Winkels liegt, den die beiden Vektoren miteinander einschließen. Man nennt das auch die *innere Farbmischung*. Theoretisch kann man aber auch Farben außerhalb des Winkels erreichen. Dazu benötigt man eine weitere Farbvalenz innerhalb der aufgespannten Ebene, die man festlegt. Durch Zugeben dieser Farbvalenz erreicht man die außerhalb liegende. Mathematisch macht sich das durch negative Werte in der Gleichung bemerkbar. Man nennt das *äußere Farbmischung*. Praktisch ist bei additiver Farbmischung ein Abziehen der Farbe aber nicht umsetzbar. (Vgl. Bergmann/Schaefer 1987: 711)

Das Mischen von drei unabhängigen¹⁴ Farbvalenzen ermöglicht uns aber bereits sehr viel, wie uns das Farbdreieck in Abbildung 15 und der Rösch-Farbenraum in Abbildung 19 gezeigt haben.

3.7 Der RGB-Farbraum

Ziehen wir eine vektorielle Darstellung der additiven Farbmischung vor, können wir den RGB-Farbraum erstellen. Dabei nutzen wir drei Farbvektoren \vec{R} , \vec{G} und \vec{B} , der Farben Rot, Grün und Blau, als Orthogonalbasis. (Vgl. Lübbe 2013: 107 f)

¹⁴ Farbvalenzen sind voneinander unabhängig, wenn sich keine von ihnen durch Kombination der anderen beiden bilden lässt. Mathematisch bedeutet das, dass die Vektoren der Farbvalenzen linear unabhängig sind.

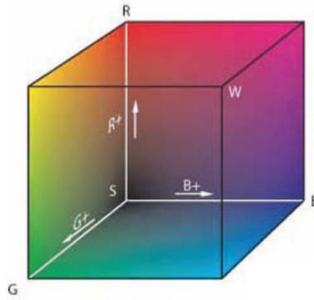


Abbildung 22: Der RGB-Farbraum. Drei Basisvektoren \vec{R} , \vec{G} und \vec{B} bilden eine Orthogonalbasis (hier: $R+$, $G+$, $B+$). Jeder Punkt in diesem System gilt als Kombination der drei Basisvektoren. S ... Schwarzpunkt, W ... Weißpunkt (Lübbe 2013: 108)

Dieses System nutzt man beispielsweise bei Computerdarstellungen. Bildpunkte eines Bildschirms sind schwarz (Ursprungspunkt S in Abbildung 22), doch erreichen durch additive Farbmischung jede Farbe, bis hin zu weiß. (Vgl. ebd.)

Der RGB-Farbraum ist nur einer von vielen Farbräumen. Farbräume unterscheiden sich in ihrer Wahl der Basisvektoren. Die Basisvektoren des RGB-Farbraumes wurden so gewählt, dass die Punkte G und B der Abbildung 22, der grünen und der blauen Spektrallinie des Quecksilberatoms unter Normaldruck entsprechen (siehe Abbildung 40). (Vgl. Hasche/Ingwer 2016: 17) Genaueres dazu findet sich in Kapitel 7.

3.8 Die Graßmann-Gesetze im RGB-Farbraum

Die Darstellung von Farbvalenzen im RGB-Farbraum, gibt uns nun die Möglichkeit die Graßmann-Gesetze aus Kapitel 3.2 mithilfe der Farbvektoren \vec{R} , \vec{G} und \vec{B} grafisch darzustellen. So lassen sich das zweite und dritte Gesetz neu formulieren.

1. Jede Farbvalenz F ist eine dreidimensionale Größe, die im dreidimensionalen Farbraum dargestellt werden kann.

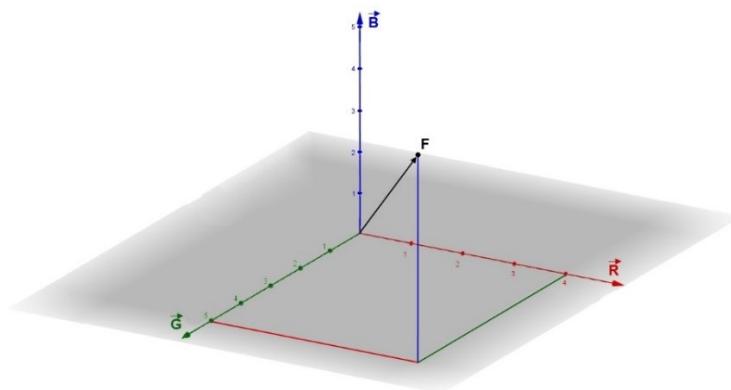


Abbildung 23: 1. Graßmann-Gesetz: Die Farbvalenz F ist eine dreidimensionale Größe, die durch die Basisvektoren \vec{R} , \vec{G} und \vec{B} dargestellt wird. (eigene Darstellung)

2. Wird eine Komponente einer Mischfarbe stetig geändert, ändert sich auch die Farbe stetig. (Vgl. *ebd.*: 695) Gleiches Ändern aller Komponenten um einen Faktor c ändert nicht die Farbe, sondern die Helligkeit. (Vgl. *Heß*: 10) Farbvektoren können also mit Skalaren multipliziert werden.

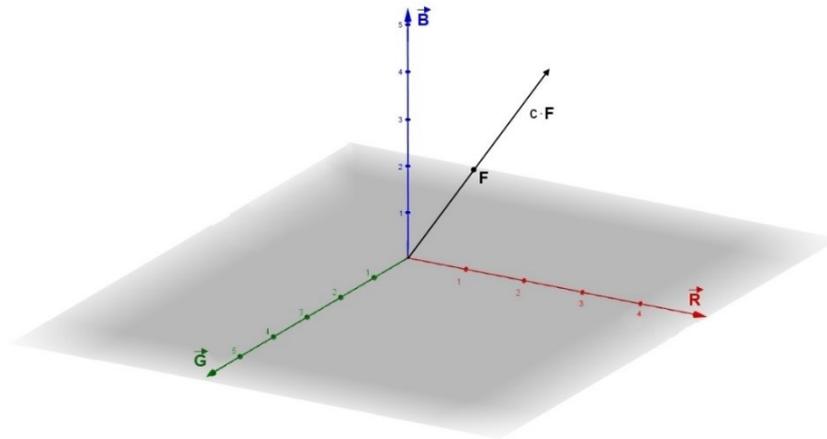


Abbildung 24: 3. Graßmann-Gesetz: \vec{R} , \vec{G} und \vec{B} bilden die Basis. Wird eine Farbvalenz F mit einer Konstanten c multipliziert, ändert sich nicht die Farbempfindung, sondern nur die Helligkeit. (eigene Darstellung)

3. Farbreize addieren sich. Daher kann eine Farbvalenz durch Addition mehrerer Farbreize nachgebildet werden. Farben unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung, aber gleicher Farbvalenz nennt man *bedingt gleich* oder *metamer*. (Bergmann/Schaefer 2004: 697)

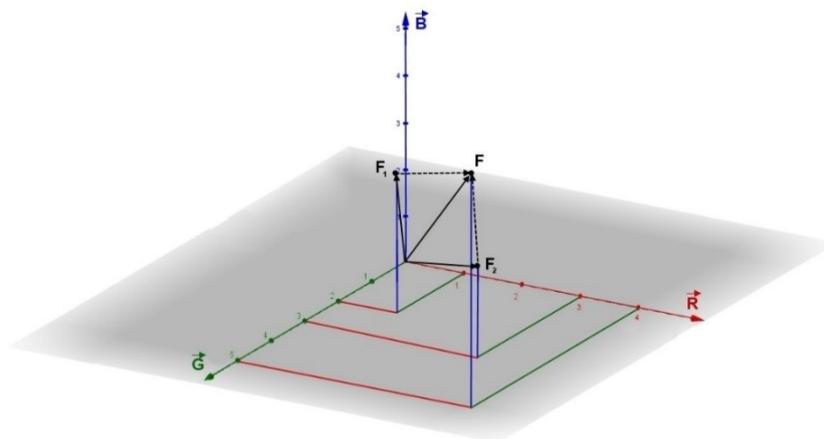


Abbildung 25: 2. Graßmann-Gesetz: Zwei Farbvalenzen F_1 und F_2 können addiert werden. Die resultierende Farbvalenz F ist unabhängig vom gewählten Weg. \vec{R} , \vec{G} und \vec{B} bilden die Basis. (eigene Darstellung)

Die vektorielle Darstellung von Farben bringt uns nun zu einer weiteren Frage: Was bedeutet es, wenn zwei Farbvalenzen sich zum Nullvektor addieren?

3.9 Kompensativ- und Komplementärfarben

Hier wird noch einmal verdeutlicht, dass man unter Farbvalenz die Wirkung eines Farbreizes im menschlichen Auge versteht. (Vgl. Lübbe 2013: 25) Also löst eine Farbvalenz einen bestimmten Farbreiz in unserem Gehirn aus. Die Mischung zweier Farbvalenzen, die sich gegenseitig aufheben, gleicht einer vektoriellen Addition zu Null. Entsprechend dem vorangehenden Kapitel entspräche das einem Zusammenfallen im Schwarzpunkt S. Dies bedeutet aber nicht, dass wir beim experimentellen Mischen solcher Farben automatisch Schwarz sehen. Abhängig von den skalaren Farbwerten ist eine Mischung zu Weiß ebenso möglich, wie eine Mischung zu Schwarz. Je nach Helligkeit der Farben sind alle Grautöne möglich. Wir blicken zurück zum Farbdreieck in Abbildung 15 und dem Rösch-Farbenraum in Abbildung 19 und erinnern uns, dass ein Übereinanderliegen von Weißpunkt und Schwarzpunkt bereits angedeutet wurde.

Zwei Farbvalenzen, die im Weißpunkt zusammenfallen, nennt man *Kompensativfarben*. Ergibt die additive Mischung weiß, so nennt man sie *Komplementärfarben*. (Vgl. ebd.: 76 f)

3.9.1 Versuch: Farbanteile streichen

Aufbau und Durchführung:

Der Versuch zählt zur subtraktiven Farbmischung. Man betrachte folgendes Linsensystem:

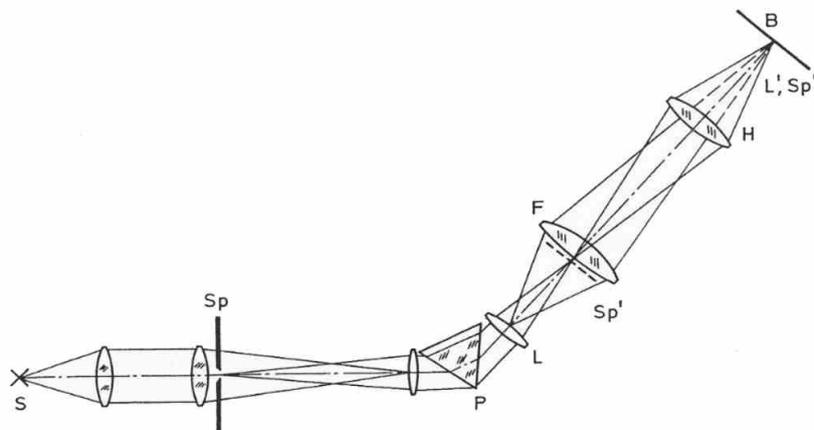


Abbildung 26: Versuchsaufbau: S ... Lichtquelle, Sp ... Spalt, P ... Dispersionsprisma, L ... Linse, Sp' ... veränderbarer Spalt für die Versuchsdurchführung, F ... Feldlinse, H ... Hilfslinse, L', Sp'' ... Bild, B ... Bildschirm (Bergmann/Schaefer 1987: 743)

Im Punkt S sei für den Versuch eine Weißlichtquelle (Bogenlampe) positioniert. Das Licht der Bogenlampe wird durch ein Prisma spektral zerlegt und dann wieder zusammengeführt. Des Weiteren ist es möglich, im Punkt Sp' Abdeckungen einzubringen, die einen beliebigen Spektralbereich blockieren.

Beobachtung:

Am Schirm ist zunächst weißes Licht erkennbar. Das Licht wird nun zerlegt und wieder zusammengebracht. Doch je nachdem, welcher Bereich im Punkt Sp' abgedeckt wird, kommt es am Schirm zu unterschiedlichen Farben.

Erklärung:

Das weiße Licht enthält Wellenlängen aus dem gesamten Spektralbereich. Im Prinzip besitzt also jeder Anteil dieses Lichts seine Komplementärfarbe, sodass sich durch die additive Farbmischung weißes Licht ergibt.

Durch das Einbringen einer Blockade, filtert man einen Teil des Spektralbereichs, sodass die Komplementären der blockierten Farben keinen "aufhebenden" Partner mehr haben. Fällt das Licht also ohne diesen Teil wieder zusammen, reichen die Anteile nicht mehr, um durch additive Farbmischung weißes Licht zu bekommen. Man sieht die Farbe, die durch additive Farbmischung der übrigbleibenden Komplementärfarben entsteht.

4 INTERFERENZ

4.1 Beugung am Spalt

Wir machen einen Sprung zurück zur Wellenoptik. Wie wir bereits gehört haben, verhält sich Licht, während der Ausbreitung wie eine Welle und folgt somit auch dem Prinzip von Huygens. Trifft eine monochromatische Lichtwelle auf eine Barriere, die eine kleine Öffnung besitzt, so breitet sich die Welle dahinter kreisförmig aus.

Sehen wir aber noch genauer hin, passiert etwas sehr Interessantes: Auch, wenn der Spalt, durch den das Licht dringen kann, noch so klein scheint, ist er dennoch breit genug, um zwei unterschiedliche, nebeneinanderliegende Punkte zu unterscheiden. Diese beiden Punkte kann man als zwei *Elementarwellensender* betrachten: Von beiden geht also nach dem Prinzip von Huygens eine kreisförmige Welle aus.

Fallen diese beiden Wellen auf einem weit entfernten Schirm wieder in einem Punkt zusammen, so besitzen sie einen gewissen Wegunterschied. Dieser lässt sich bei einer Spaltbreite b durch beschreiben durch:

$$\Delta z = \frac{b}{2} \sin \alpha \quad (\text{F. 8})$$

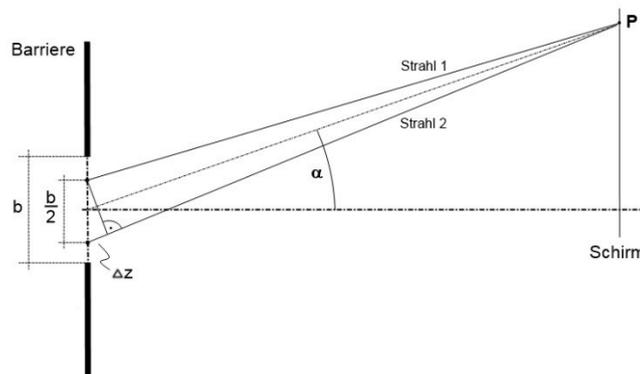


Abbildung 27: Beugung am Spalt. Von links kommendes Licht wird am Spalt gebeugt. Wegunterschied Δz zweier Elementarwellensender zum gemeinsamen Punkt P. b ... Spaltbreite, α ... Beugungswinkel (eigene Darstellung nach Jäger 2014: 3)

Entsteht durch diesen Wegunterschied ein Gangunterschied der Wellen, der genau der halben Wellenlänge (also $\frac{\lambda}{2} = \Delta z = \frac{b}{2} \sin \alpha$) entspricht, so heben sich die beiden Wellen in P völlig auf, sodass die Lichtintensität dort Null ist.

Je nachdem, welchen Punkt am Schirm wir betrachten, überlagern sich die Wellen und löschen sich aus oder aber, sie verstärken sich. Das hängt vom Gangunterschied der Wellen ab.

Dadurch bildet sich auf dem Beobachtungsschirm hinter der Barriere ein *Interferenzmuster*:

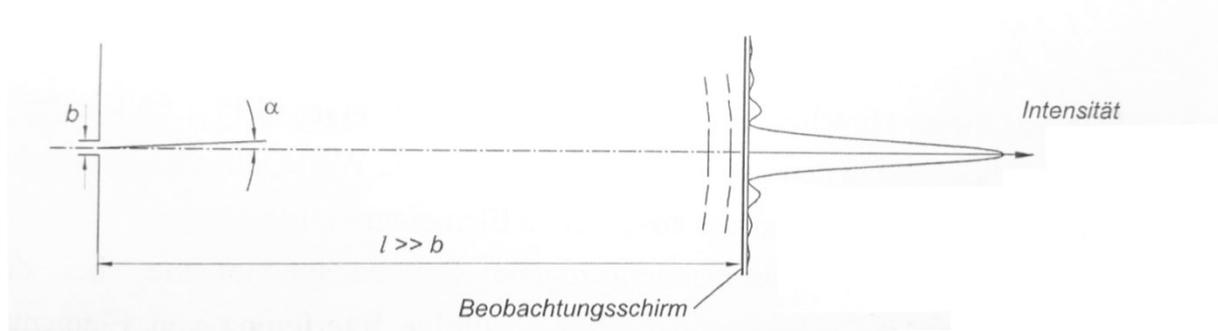


Abbildung 28: Interferenzmuster: Beugungsfigur am Beobachtungsschirm. Dem Maximum in der Mitte gibt man die Ordnung 0. Nach außen gehend werden in beide Richtungen die Maxima mit den Ordnungen 1, 2, ... nummeriert. (Jäger 2014: 2)

In der Abbildung sind die Lichtintensitäten skizziert, die man am Beobachtungsschirm feststellt. Es ist eine Aneinanderreihung von Intensitätsmaxima (die von der Mitte nach außen hin immer kleiner werden) und -minima. Diese Anordnung bezeichnet man als *Beugungsfigur*.

Handelt es sich bei der Öffnung in der Barriere um einen länglichen Spalt, so erscheint uns die Beugungsfigur als Anordnung von Lichtstreifen, die von der Mitte nach außen hin dunkler werden. Ebenso kann es sich bei dabei um eine kreisrunde Öffnung handeln. In diesem Fall sehen wir ein *Beugungsscheibchen*: Einen hellen Lichtpunkt (da wo die Intensität am höchsten ist), den dunkler werdende, konzentrische Lichtkreise umgeben.¹⁵

Eine solche kreisrunde Öffnung bildet auch der Pupillenrand des Auges. Das bedeutet, dass auch das Licht, das in unsere Augen dringt, gebeugt wird: Auf der Netzhaut treffen Beugungsscheibchen auf, deren Durchmesser in etwa $5 \mu\text{m}$ beträgt. Da dies in etwa auch der Größe der Zapfen und Stäbchen im Auge entspricht, haben kleinere Durchmesser, die eine höhere Auflösung bewirken würden, keinen Sinn, da unser Auge diese ohnehin nicht genauer wahrnehmen könnte. (Vgl. Jäger 2014: 4 ff)

¹⁵ Eine Lochkamera lässt durch eine winzige Öffnung Licht eines selbstleuchtenden Körpers auf einen Schirm fallen. Gemäß der geometrischen Optik entsteht dort ein Bild dieses Körpers. Dieses Bild ist nichts Anderes, als eine Aneinanderreihung unendlich vieler Beugungsscheibchen. Da die Form eines Beugungsmusters von der Größe der Öffnung abhängt, lässt sich also durch Variieren der Öffnungsgröße das Bild verändern: Es wird schärfer oder unschärfer. (Vgl. Demtröder 2009: 269 f)

4.2 Das Beugungsgitter

Mit dem *Youngschen Doppelspaltversuch* gehen wir nun einen Schritt weiter. Monochromatisches Licht soll auf eine Barriere treffen, bei der zwei Spalte, derselben Breite b , eng beieinanderliegen. Beide Öffnungen zusammen bilden ein neues Interferenzmuster, welches sich von dem Muster, das nur ein einzelner Spalt erzeugt hätte, unterscheidet. Das liegt daran, dass die jeweiligen Interferenzmuster sich noch zusätzlich beeinflussen. (Vgl. Demtröder 2009: 311 f)

Der Doppelspalt bildet ein Interferenzmuster, das über mehr Maxima und Minima als das alte Muster verfügt. Diese sind zusätzlich schmaler, liegen enger beieinander und sind heller. Das hellste Maximum in der Mitte übersteigt in seiner Intensität dabei aber nicht die des hellsten Maximums des alten Musters. Vielmehr "hüllt" das alte Muster das neue ein:

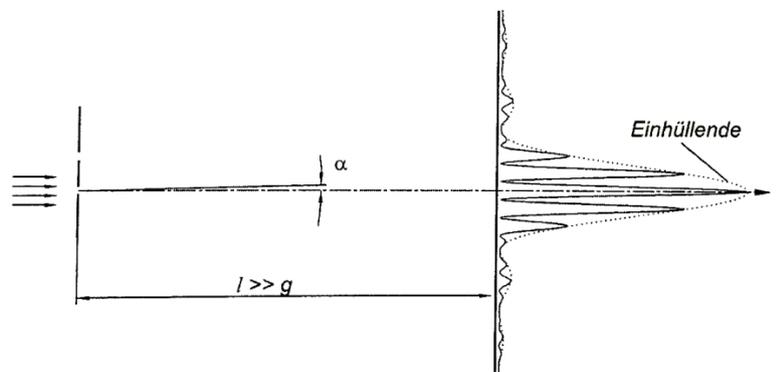


Abbildung 29: Doppelspalt: Die Beugungsfigur eines Doppelspalts (durchgezogen) wird von der eines Einzelspalts (gepunktet) eingehüllt. Dabei ist die Entfernung l vom Schirm zur Barriere sehr viel größer, als der Spaltabstand g . (Jäger 2014: 7)

Erhöht man die Spaltanzahl weiter, so verzeichnet man eine Zunahme an Maxima und Minima, die immer schmaler und heller werden. Wir treiben das Ganze so weit, dass wir das Experiment nicht nur an Spalten, sondern sogar mit einem Gitter durchführen. Die folgende Abbildung zeigt, dass sich schließlich eine Aneinanderreihung gleich großer Maxima bildet:

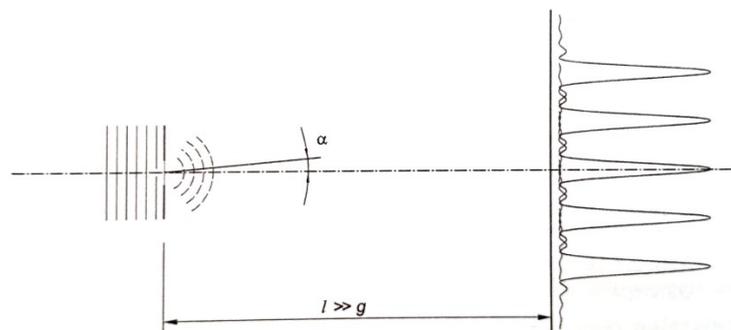


Abbildung 30: Intensitätsverteilung der Beugungsfigur bei einem Gitter (Jäger 2014: 9)

Da die Stärke der Beugung abhängig von der Wellenlänge ist, kann man mithilfe eines Beugungsgitters Versuche mit weißem Licht durchführen, bei denen dieses dann, ähnlich wie bei einem Prisma, in seine Farbanteile zerlegt wird. Man kennt solche Interferenzerscheinungen auch aus dem Alltag von CDs, die auftreffendes Licht beugen, sodass sie bunt aussehen. (Vgl. Jäger 2014: 7 ff)

Das Maximum nullter Ordnung bleibt dabei stets weiß, da dieses einem ungebeugten Bild entspricht. Erst in allen weiteren Ordnungen kommt es zur Aufspaltung von Licht, wobei kurzwelliges weniger als langwelliges Licht gebeugt wird. Man spricht auch davon, dass kleinere Wellenlängen einen kleineren *Beugungswinkel* besitzen. (Vgl. Hügatsberger 1977: 617)

Durch das Beugungsgitter ist somit das Aufspalten von Licht in seine *Spektrallinien* möglich, falls dieses aus diskreten Farbanteilen zusammengesetzt ist.¹⁶ Dafür nutzt man oft weit außenliegende Maxima (also höhere Ordnungen), da es dort zu einer breiten Auffächerung kommt.

Das *Auflösungsvermögen* eines Beugungsgitters ist dann erreicht, wenn sich das nullte Intensitätsmaximum der einen Spektrallinie mit dem ersten Minimum der anderen Spektrallinie überlappt. Die Spektrallinien können darüber hinaus nicht mehr unterschieden werden. (Vgl. Jäger 2014: 9 f)

4.2.1 Versuch: Seifenlamelle

Aufbau und Durchführung:

Wir versehen eine Blende (oder zwei selbst gebogene hintereinander angeordnete Drähte) mit Seifenlauge derart, dass eine zweiwandige Seifenlamelle entsteht. Wir bezeichnen sie als 1. und 2. Lamelle. Diese beleuchten wir mit weißem Licht, beispielsweise von einer Halogenlampe. Dabei wird an den Lamellen jeweils ein Teil reflektiert und ein Teil transmittiert.

Den von beiden Lamellen transmittierten Teil der Lichtquelle bilden wir über eine Sammellinse (Brennweite $f = 140$ mm) auf einem Schirm ab. Die reflektierten Lichtanteile lenken wir mit einem Spiegel ebenfalls auf den (oder einen anderen) Schirm und bilden das Licht wieder mithilfe einer Linse (Brennweite $f = 200$ mm) ab. (Vgl. Hügatsberger 1977: 615)

¹⁶ Das ist zum Beispiel bei lichtemittierenden atomaren Teilchen der Fall. Durch diese sogenannte Emissionsspektroskopie ist eine Lichtquellenanalyse möglich, ohne durch die Messung die Lichtquelle zu beeinflussen. (Vgl. Jäger 2014: 10)

Beobachtung:

Das transmittierte Licht zeigt kaum Interferenzen. Das reflektierte Licht dagegen, zeigt deutlich die Interferenzfarben Rot und Blau.

Erklärung:

Beginnend an der 1. Lamelle wird Licht sowohl transmittiert, als auch reflektiert. Das durchtretende Licht gelangt zur 2. Lamelle, wo sich der Vorgang wiederholt. Für, zur 1. Lamelle zurücklaufende Licht gilt das gleiche Prinzip. Insgesamt erzeugen wir durch dieses System zwei Lichtstrahlen: Beim transmittierten Licht kommt es kaum zu Gangunterschieden der Lichtwellen, beim reflektierten dagegen schon. Die Wegunterschiede des Lichts entstehen dabei zwischen innerer und äußerer Lamelle. (Vgl. Hügatsberger 1977: 615)

4.2.2 Versuch: Die Newton Ringe

Aufbau und Durchführung:

Bei diesem Versuch pressen wir eine plankonvexe Linse mit ihrer gekrümmten Seite auf eine planparallele Linse. Dieses System durchleuchten wir von der Seite der planparallelen Linse mit kohärentem Licht (weiß oder monochromatisch). Eine weitere Linse, hinter dem System, bildet das Licht auf einem Schirm ab.

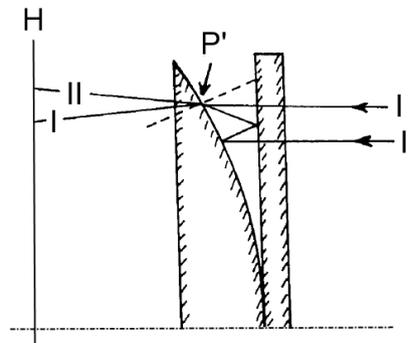


Abbildung 31: Newton'sche Ringe: In diesem Linsensystem durchlaufen zwei parallele Lichtbündel I und II von rechts nach links denselben Punkt P'. Gangunterschiede erzeugen Interferenzen. Die Linse H bildet die Strahlen auf einem Schirm ab, auf dem diese zu sehen sind. (Hügatsberger 1977: 620 f)

Beobachtung:

Auf dem Schirm beobachten wir Interferenzerscheinungen. Je nachdem, ob weißes oder monochromatisches Licht benutzt wurde, sind diese bunt, oder nur hell bzw. dunkel.

Interferenzen sind auf beiden Seiten des Systems beobachtbar, da auch Lichtanteile reflektiert werden. Die Interferenzerscheinungen an der Vorder- und Hinterseite sind dabei genau gegengleich. Unter Verwendung von weißem Licht entspricht das Gegenstück der Komplementärfarbe.

Erklärung:

Die parallelen Strahlen I und II, die sich im Punkt P' treffen, besitzen einen Gangunterschied (oder auch nicht), sodass sie sich auslöschen oder verstärken. Dies verursacht die Interferenzen.

Dass die Erscheinungen bei Transmission und Reflexion genau gegengleich sind, liegt daran, dass Lichtstrahlen bei einer Reflexion genau einen Phasensprung von π erfahren. Da, wo in P' also eine Auslöschung von transmittiertem Licht stattfindet, kommt es bei einer Reflexion zur Verstärkung. Bei weißem Licht ergibt sich dadurch die Komplementärfarbe.

4.2.3 Versuch: Interferenzen an einer Pfauenfeder

Aufbau, Durchführung und Beobachtung:

Wir betrachten eine Pfauenfeder im Sonnenlicht oder in weißem Licht. Die Pfauenfeder erstrahlt in vielen Farben, obwohl die Feder selbst eigentlich grau ist.

Erklärung:

Die Feder besteht aus vielen winzigen Härchen, von denen wieder noch kleinere Härchen abstehen. So entsteht ein dreidimensionales Beugungsgitter, an dem das Licht interferieren kann. Im Gegensatz zum Doppelspaltexperiment, wo man eine monochromatische Lichtquelle verwendet, wird hier weißes Licht gebeugt. In diesem sind alle Farben unterschiedlichster Wellenlängen vorhanden, die an einem solchen Gitter jeweils unterschiedlich stark gebeugt werden.¹⁷ Des Weiteren spielt dabei die *Bragg-Bedingung* eine Rolle:

Bei einem dreidimensionalen Gitter, bei dem die Abstände der Ebenen d betragen und θ der Einfallswinkel des Lichtes zum Gitter ist, muss die Beugung folgende Gleichung mit Beugungsordnung n und Wellenlänge λ erfüllen:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin(\theta) \quad (\text{F. 9})$$

Das heißt nun, dass das Licht, das von der Feder bis zu unserem Auge gelangt diese Bedingung erfüllen muss: Für jede Lichtwellenlänge λ dürfen sich die Gangunterschiede zu jedem einzelnen Spalt nur um ein Vielfaches n von λ unterscheiden, damit sie in einem zusammenfallenden Bildpunkt (in unserem Auge) konstruktiv interferieren. Da die Bragg-Bedingung nie für alle Wellenlängen gleichzeitig erfüllt sein kann, sehen wir also verschiedene Farben. (*Vgl. Demtröder 2009: 392 f*)

¹⁷ Kurzwelliges Licht wie zum Beispiel Blau wird weniger stark gebeugt, als langwelliges wie zum Beispiel Rot.

5 LUMINESZENZ

Manche Stoffe geben nach Energiezufuhr Licht ab, dessen Spektralbereich bis in den UV- oder IR-Bereich reichen kann. Das bedeutet also, dass diese Stoffe zu leuchten beginnen, nachdem sie angeregt wurden. Diesen Vorgang nennt man *Lumineszenz*. (Vgl. Vögtle 2007: 185)

Um zu verstehen, wie das möglich ist, blicken wir auf die atomare Struktur eines solchen Stoffes: Im Grundzustand eines Atoms, bewegen sich Elektronen in den niedrigstmöglichen Schalen um den Atomkern. Wird aber Energie, beispielsweise durch elektromagnetische Einstrahlung zugeführt, so können die Elektronen von ihren niedrigen Bahnen auf höhere springen. Die gespeicherte Energie im Atom erhöht sich. Dieser Zustand ist jedoch nicht stabil. Das Atom strebt danach, seinen Grundzustand wieder zu erreichen und die erregten Elektronen fallen wieder in tiefer liegende Schalen. Um eine kernnähere Schale zu erreichen, muss das Elektron die gespeicherte Energie jedoch wieder abgeben. Diese Abgabe erfolgt in Form von elektromagnetischer Strahlung. (Vgl. Osterhage 2014: 49 f)

Lumineszenz resultiert aus Anregung, die auf unterschiedliche Arten erfolgen kann:

Photolumineszenz: Der Stoff wird durch elektromagnetische Strahlung angeregt. Wir unterscheiden dabei zwischen *Fluoreszenz* und *Phosphoreszenz*.

Chemolumineszenz: Das Leuchten wird durch einen chemischen Prozess ermöglicht.

Radiolumineszenz: Der Stoff wird durch Kernstrahlung angeregt.

Thermolumineszenz: Wärmezufuhr bewirkt das Leuchten.

Elektrolumineszenz: In elektrischen Feldern kann es zur Emission von sichtbarem Licht kommen.

(Vgl. Vögtle 2007: 185)

Zusätzlich lässt sich zu den, von Vögtle genannten Arten noch die *Mechanolumineszenz* hinzufügen. Dazu zählen alle Formen von mechanischer Anregung von Festkörpern, die daraufhin zu leuchten beginnen. (Vgl. Jüstel/Schwung 2016: 107)

Bei der Photolumineszenz stellen wir uns elektromagnetische Strahlung als ein Energiepaket vor. Die Energie eines solchen Pakets lässt sich mithilfe des Planckschen Wirkungsquantum h und Frequenz ν des Lichts ausdrücken:

$$E = h \cdot \nu \tag{F. 10}$$

Trifft die Strahlung auf Materie, wird die Energie übertragen. Der Energieübertrag erfolgt dabei auf ein Elektron, welches augenblicklich in eine höhere Umlaufbahn springt.¹⁸ (Vgl. ebd.: 39 ff)

5.1 Fluoreszenz

Bei der Fluoreszenz fällt das angeregte Elektron von seiner höheren Bahn direkt wieder zurück in einen der Singlett Grundzustände (Siehe Abbildung 32). Bei einer spektralen Analyse stellt man ein Emissionsspektrum fest, dass näherungsweise das absorbierte Spektrum am 0-0 Übergang¹⁹ zu spiegeln scheint. Die abgestrahlten Wellenlängen sind also nur um einen gewissen Bereich verschoben. Diesen nennt man *Stokes-Verschiebung*. (Vgl. Vögtle 2007: 186)

Grund dafür ist, dass Elektronen im angeregten Zustand Energie verlieren, wenn es zu gaskinetischen Zusammenstößen kommt. Das emittierte Licht bleibt also gleich (0-0 Übergang), oder es wird langwelliger. (Vgl. Meschede 2010: 686) So ist es möglich, UV-Licht in den sichtbaren Wellenlängenbereich zu verschieben.

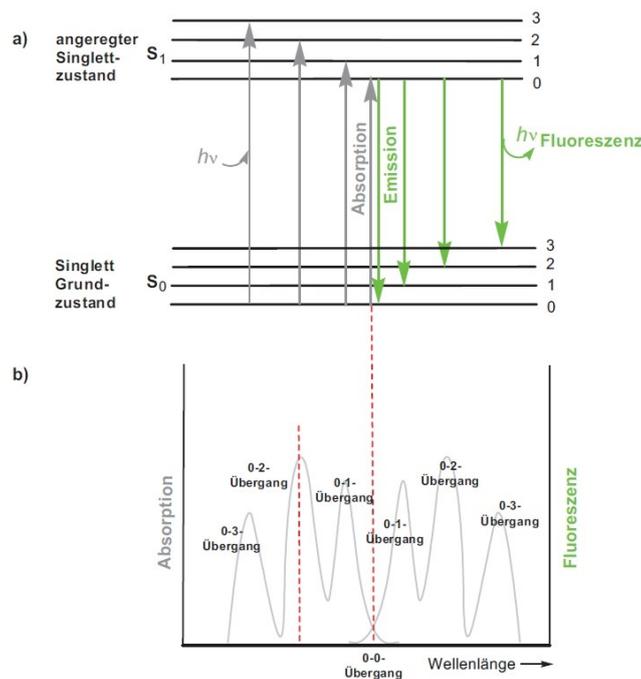


Abbildung 32: Fluoreszenz. a) Singlett Zustand und angeregter Singlett Zustand beschreiben die energetischen Bahnen, auf denen sich die Elektronen im Grundzustand und im erregten Zustand bewegen. Bei Lichtabsorption nehmen die Elektronen die Energie des Lichts auf und geben diese bei Emission wiederum in Form von Licht ab. b) Die Wellenlängenmaxima des absorbierten und des emittierten Lichts werden am 0-0-Übergang näherungsweise gespiegelt. (Vögtle 2007: 186)

¹⁸ Bei metallischen Oberflächen werden Elektronen, bei ausreichend hoher Energie, sogar ganz aus den Atomen herausgeschlagen.

¹⁹ Elektronen in einem Atom haben nie den selben Energiezustand (Pauli-Prinzip). Beispielsweise unterscheiden sie sich im Spin. In Abbildung 32 sind diese geringen Unterschiede durch Linien dargestellt. Ein Linienblock steht für eine Schale. Bei einem 0-0-Übergang springt ein Elektron also vom niedrigsten Niveau der einen Schale zum niedrigsten Niveau der zweiten. (Vgl. Meschede 2010: 738 f)

Das ausschlaggebende Merkmal der Fluoreszenz ist die spontane Emission unmittelbar nach der Absorption. Der Zeitraum ist also verschwindend gering. Endet die Bestrahlung, so stoppt auch die Emission. (Vgl. Vögtle 2007: 186)

5.2 Phosphoreszenz

Phosphoreszierende Stoffe verhalten sich anders. Bei diesem Vorgang kommt es zu einem zeitlichen Versatz, sodass auch nach stoppender Bestrahlung ein mehr oder weniger langes Nachleuchten stattfindet.

Dies liegt daran, dass angeregte Elektronen nicht direkt in den Grundzustand zurückfallen. Stattdessen springen sie in unterschiedliche Anregungszustände. Der niedrigste, angeregte Zustand ist der *Triplett-Zustand*. In diesem Zustand verweilen die Elektronen, bevor sie wieder in den Grundzustand übergehen. Erst dann emittieren sie auch den Rest ihrer überschüssigen Energie. (Vgl. ebd.: 187)

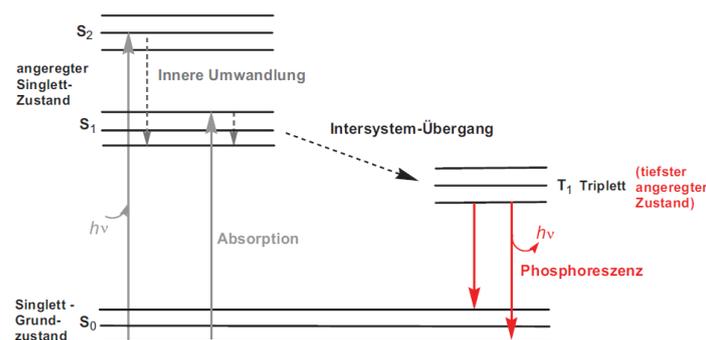


Abbildung 33: Phosphoreszenz: Angeregte Elektronen springen vom Grundzustand in den angeregten Singlett-Zustand S_1 oder S_2 . Bei phosphoreszierenden Stoffen können die Elektronen dann in den energieniedrigeren Triplet-Zustand fallen, wo sie erst verweilen, bevor sie unter Lichtabgabe wieder in den Grundzustand zurückgehen. $h\nu$... zugeführte/abgestrahlte Energie (Vögtle 2007: 187)

5.2.1 Versuch: Photolumineszenz: Fluoreszenz und Phosphoreszenz

Aufbau und Durchführung:

Mehrere fluoreszierende und phosphoreszierende Stoffe können bei diesem Experiment verwendet werden. Beispielsweise bieten sich Der Raum sollte weitgehend verdunkelt sein. Die vorbereiteten Stoffe werden mit einer Schwarzlichtquelle (UV-Lampe, beispielsweise erhältlich auf www.amazon.de, Stand: Jänner 2017) beleuchtet. Der Effekt kann einige Sekunden beobachtet werden. Dann wird die Lichtquelle abgeschaltet.

Beobachtung:

Alle beleuchteten Stoffe lumineszieren, solange die Lichtquelle an ist. Sobald das Licht abgeschaltet wird, leuchten manche Stoffe weiter, andere aber nicht.

Erklärung:

Die, nach Abschalten der Lichtquelle, weiterleuchtenden Stoffe phosphoreszieren. Der Leuchteffekt hält an, solange, bis keine angeregten Elektronen mehr vorhanden sind (siehe Abbildung 33). Die lumineszierenden Stoffe dagegen werden sofort dunkel, sobald die Bestrahlung stoppt.

5.3 Chemolumineszenz - Biolumineszenz

Es gibt Stoffe, wie beispielsweise 9,10-Diphenylanthracen, die sich gut für Chemolumineszenz eignen. Um diese zum Leuchten zu bringen, führt man ihnen auf chemischem Weg Energie zu. Zum Beispiel mithilfe von Wasserstoffperoxid sowie einer Oxalsäureverbindung. Bringt man diese zusammen, entsteht 1,2-Dioxethandion, das zerfällt. Bei diesem Zerfall entsteht angeregtes Kohlendioxid. Ist bei diesem Prozess ein Farbstoff beigemischt, kann die Energie auf diesen übertragen werden. Im Fall von 9,10-Diphenylanthracen kommt es dann zu einem blauen Leuchten. (*Vgl. Wissenschaft im Dialog 2008: Knicklichter*)

5.3.1 Versuch: Chemolumineszenz: Knicklicht

Aufbau, Durchführung und Beobachtung:

In einem weitgehend verdunkelten Raum werden Knicklichter (beispielsweise erhältlich auf www.amazon.de, Stand: Jänner 2017) aktiviert. Die Knicklichter beginnen in verschiedenen Farben zu leuchten. Der Leuchteffekt hält oft viele Stunden an.

Erklärung:

Knicklichter bestehen aus einem verschlossenen Kunststoffzylinder. Darin befindet sich eine Oxalsäureverbindung, gemischt mit einem Farbstoff. Innerhalb des Zylinders befindet sich ein länglicher Glasbehälter, gefüllt mit Wasserstoffperoxid. Die Stoffe sind also voneinander getrennt, sodass es zu keiner Reaktion kommen kann. Erst, wenn das Knicklicht gekrümmt wird und der enthaltene Glasbehälter bricht, kann die Reaktion ablaufen. (*Vgl. ebd.*)

Die *Biolumineszenz* ist mit der Chemolumineszenz verwandt, denn auch sie nutzt chemische Reaktionen. Sie unterscheidet sich dahingehend, dass die chemischen Prozesse in lebenden Organismen, wie Glühwürmchen, Pilzen oder Bakterien ablaufen. Dabei wird meist der Stoff Luziferin durch das Enzym Luziferase oxidiert. Das Produkt dieser Oxidation ist Oxyluziferin im angeregten Zustand. Geht dieses in seinen Grundzustand über, wird Licht emittiert. (Vgl. Jüstel/Schwung 2016: 19 f)

5.4 Elektrolumineszenz

Elektrolumineszenz ist eine Art der Lichterzeugung, die wir, bei moderner Lichtgewinnung, von LEDs (Light Emitting Diodes) kennen. Diese werden, wie gewöhnliche Verbraucher in einen Stromkreis eingebracht. Damit wir verstehen können, wie dabei Licht emittiert wird, müssen wir in die Materie elektronischer Halbleiter eindringen. (Vgl. ebd.: 41)

Elektronische Halbleiter bestehen aus *dotierten* Materialien, die eng nebeneinander angeordnet werden. Das eine Material ist n-dotiert. Das bedeutet, dass dieses Material über mehr Elektronen als nötig verfügt.²⁰ Das andere Material ist p-dotiert, sodass es weniger Elektronen als nötig besitzt. Bringt man an ein solches Halbleiterelement eine Spannung an, so baut sich ein elektrisches Feld auf. Die Elektronen beginnen vom n- zum p-Leiter zu springen und es fließt Strom. (Vgl. Jäger 2014: 142 ff) Beim Überspringen haben die Elektronen hohe kinetische Energie. Wenn sie aber in das p-dotierte Material eindringen, werden sie abgebremst. Man nennt den Vorgang *Rekombination*. Die Überschüssige Energie wird in Form von Licht abgestrahlt. (Vgl. Jüstel/Schwung 2016: 41)

5.4.1 Versuch: Unterschiedliche Farben von LEDs

Aufbau, Durchführung und Beobachtung:

Wir betreiben einige LEDs mit beliebigen Farben, um die Elektrolumineszenz zu beobachten. Standardleuchtdioden (Durchmesser 5 mm) werden mit Gleichstrom (10 mA), je nach Farbe, mit unterschiedlichen Spannungen betrieben (siehe Tabelle). (Vgl. *Elektronik Kompendium, Standard-LEDs*)

²⁰ Dies schafft man durch Einlagern eines Elements: Die eingebauten Atome besitzen mehr Elektronen, als für die Bindung nötig gewesen wären. Beispiel: Germanium wird mit Arsen dotiert. (Vgl. Jäger 2014: 142)

LED-Farbe (Material des Mischkristalls)	Spannung
rot (Galliumphosphid)	2.1 V
grün (Galliumphosphid)	2.1 V
gelb (Galliumphosphid)	2.2 V
blau (GalliumNitrid)	2.9 V

Tabelle 1: Standard-LEDs in unterschiedlichen Farben (Materialien) und Betriebsspannung. (Vgl. Elektronik Kompendium, Standard-LEDs)

Erklärung:

Farben lassen sich bei LEDs mithilfe unterschiedlicher p- und n-Leitermaterialien herstellen. Auch das Material der Dotierung und dessen Konzentration tragen dazu bei. (Vgl. Leifiphysik, Leuchtdioden)

5.5 Mechanolumineszenz – Tribolumineszenz

Bei mechanischer Anregung unterscheiden wir drei Formen: Eine davon ist *Fractolumineszenz*, die ein Leuchten durch Zerschneiden eines Kristalls hervorruft. (Vgl. Jüstel/Schwung 2016: 61) Die *Piezolumineszenz*, zählt zu den reversiblen Prozessen. Beispielsweise genügt Druckausübung, um einen Effekt zu sehen, ohne dass der Körper beschädigt wird. (Vgl. ebd.: 123) Die dritte Form ist *Tribolumineszenz*. Sie scheint der Fractolumineszenz sehr ähnlich, denn auch sie nutzt das Zerschneiden von Festkörpern. Beim Brechen kommt es zur Trennung von Ladungen, da bestimmte Bindungen gelöst werden. Durch *Rekombination* kommt es zum Leuchten. Die genaue Funktionsweise ist aber noch nicht erforscht. (Vgl. ebd.: 159 f)

5.5.1 Versuch: Leuchtender Würfelzucker

Aufbau und Durchführung und Beobachtung:

Für dieses Experiment ist ein verdunkelter Raum notwendig, der aber gerade so viel Licht bietet, dass man sich orientieren kann. Des Weiteren benötigt man Würfelzucker, einen Hammer und eine Fläche, auf die man schlagen kann. Ein, oder mehrere Zuckerwürfel (für mehrere Wiederholungen) werden auf der Schlagfläche positioniert. Bevor man aber im dunklen Raum mit dem Hammer auf die Würfel schlägt, sollte man warten, bis sich die Augen an die Dunkelheit gewöhnt haben. Beim Zerschlagen der Zuckerwürfel sieht man Lichtblitze.

Erklärung:

Der Hammer zerschlägt den Würfel. Dabei werden die Strukturen und Bindungen im Zucker gelöst und es kommt zu Tribolumineszenz.

6 SCHWARZKÖRPERSTRAHLUNG

Im Allgemeinen strahlt sämtliche Materie, deren Temperatur über dem absoluten Nullpunkt liegt, elektromagnetische Strahlung ab. Dies nennt man *Temperaturstrahlung*. Diese ist für das menschliche Auge aber nur sichtbar, wenn eine ausreichend hohe Temperatur (ab etwa 500 °C) erreicht ist. Beispielsweise ist Temperaturstrahlung bei glühender Kohle sichtbar. Wenn das Glühen langsam verschwindet, ist die Temperatur unter 500 °C abgesunken. Die Temperaturstrahlung hat sich aus dem sichtbaren Wellenlängenbereich in den IR-Bereich zurückgezogen. Wir nehmen die IR-Strahlung aber als Hitze wahr.

Ein gutes Beispiel für Temperaturstrahlung bietet uns auch die Sonne. Sie ist so heiß, dass sie elektromagnetische Strahlung im gesamten sichtbaren Spektralbereich (und darüber hinaus) abgibt.

Wie gut ein Körper, wie zum Beispiel die Sonne, Strahlung abgibt, können wir durch das *Emissionsvermögen E* in Relation bringen. Analog dazu gibt uns das *Absorptionsvermögen A* die Fähigkeit eines Körpers an, auftreffende Strahlung zu absorbieren.

$$E = \frac{\text{Strahlungsleistung}}{\text{strahlende Fläche}} \quad [\text{Watt/m}^2] \quad (\text{F. 11})$$

$$A = \frac{\text{absorbierte Strahlungsenergie}}{\text{auftreffende Strahlungsenergie}} \quad (\text{F. 12})$$

(Vgl. Schreiner 1975: 112 f)

6.1 Schwarze Körper

Das *Kirchhoffsche Strahlungsgesetz* führt uns zu einer weiteren Erkenntnis: Emissionsvermögen und Absorptionsvermögen eines Körpers sind bei gleicher Wellenlänge und gleicher Temperatur identisch. Das bedeutet, dass ein Körper, der jede auftreffende Strahlung (jeder Wellenlänge) vollständig absorbiert, auch in jedem Wellenlängenbereich Strahlung abgibt. (Vgl. ebd.: 115) Ist dies der Fall, handelt es sich um einen *Schwarzen Körper*. Umgekehrt wiederum nennt man einen Körper der jede auftreffende Strahlung vollständig reflektiert und nichts abstrahlt, einen *Weissen Körper*. (Vgl. Osterhage 2014: 19 f)

Die Strahlung, die von einem Schwarzen Körper ausgeht, wird von der absorbierten Strahlung nicht beeinflusst. Er nimmt diese lediglich auf und erwärmt sich dabei. Das Intensitätsmaximum der abgegebenen elektromagnetischen Strahlung entspricht der Temperatur. Das Material des Körpers spielt also keine Rolle. (Vgl. Meschede 2010: 684)

Dies führt uns zum *Planckschen Strahlungsgesetz*. Dieses Gesetz gibt die *spektrale spezifische Ausstrahlung* $M(\lambda, T)$ an:

$$M(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \mu\text{m})] \quad (\text{F. 13})$$

Dabei ist $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s die Lichtgeschwindigkeit, $h \approx 6,63 \cdot 10^{-34}$ Js das Plancksche Wirkungsquantum und $k \approx 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K die Boltzmannkonstante.

Das Gesetz besagt, dass mit zunehmender Temperatur die spektrale spezifische Ausstrahlung ein immer größer werdendes Maximum erreicht. (Vgl. Lübbe 2013: 5 f) Das Maximum verschiebt sich bei zunehmender Temperatur außerdem hin zu kürzeren Wellenlängen. Dies ist bekannt, als das *Wiensche Verschiebungsgesetz*. (Vgl. Meschede 2010: 594) Beide Effekte veranschaulicht die folgende Grafik:

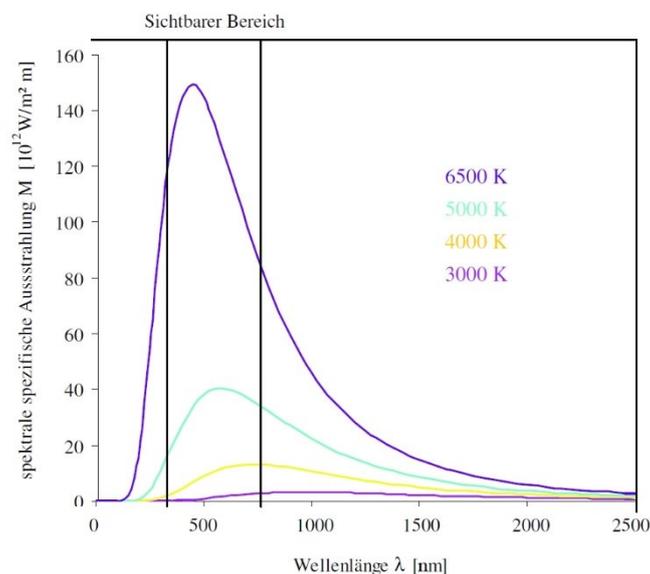


Abbildung 34: Plancksches Strahlungsgesetz. Mit zunehmender Temperatur nimmt auch das Maximum der spektralen spezifischen Ausstrahlung zu und verschiebt sich in den kürzeren Wellenlängenbereich. Der sichtbare Wellenlängenbereich (380 – 780 nm) ist markiert. (Lübbe 2013: 6)

Die Sonne oder Glühlampen leuchten nach dem Planckschen Strahlungsgesetz und sind näherungsweise Schwarze Körper. Daher besitzt die spektrale spezifische Ausstrahlung der Sonne auch näherungsweise die Form der violetten Kurve aus Abbildung 34, mit einer Temperatur von 6500 K. (Vgl. ebd.: 6 f)

Die Spektralanalyse (Kapitel 7) von Sonnenlicht zeigt daher auch ein (fast) kontinuierliches Spektrum. Genauere Analyse des Lichts zeigt, dass das auf der Erde ankommende Sonnenspektrum von einigen schwarzen Linien, den *Fraunhofer'schen Linien* durchzogen ist. Diese fehlenden Wellenlängen werden nämlich in der Photosphäre der Sonne von Elementen wie beispielsweise Natrium, Wasserstoff oder Helium absorbiert. (Stuart/Klages 2010: 265 f)

6.2 Planckscher Kurvenzug

Ein Schwarzer Körper (oder auch Schwarzer Strahler), der im sichtbaren Wellenlängenbereich strahlt, leuchtet in einer Farbe, die eindeutig seiner Temperatur zugeordnet werden kann (und umgekehrt). Die Temperatur, die sich einer gewissen Farbe zuordnen lässt, nennt man *Farbtemperatur*.

Jede Farbe innerhalb des Farbhufeisens besitzt eine Koordinate. Verbinden wir alle Koordinaten bzw. Farben, in denen ein Schwarzer Strahler im sichtbaren Wellenlängenbereich, bei unterschiedlichen Temperaturen, leuchtet, so erhalten wir den *Planckschen Kurvenzug*. (Vgl. TU-Ilmenau 2015, *Die Farbtemperatur in der Lichttechnik*)

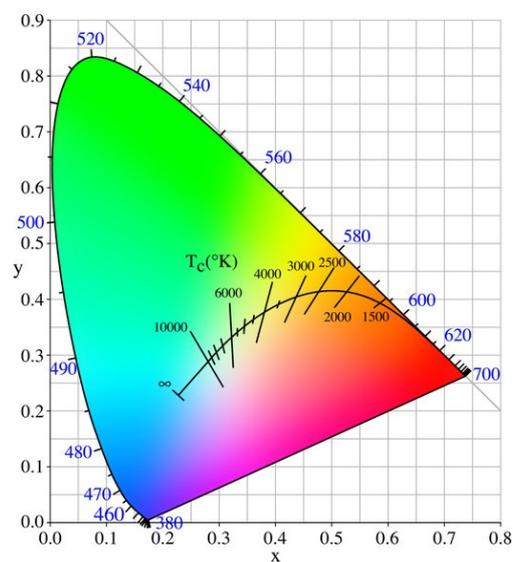


Abbildung 35: Planckscher Kurvenzug. Der Plancksche Kurvenzug (T_c) lässt sich im Farbhufeisen eintragen. (Stromsparlampen, LED Farbtemperatur)

Auch Lichtquellen, die keine Temperaturstrahler sind, wie beispielsweise weiße LEDs, können in ihrer Farbe mithilfe der Temperaturstrahlung beschrieben werden. So liegt zum Beispiel die Farbtemperatur einer warmweißen LED bei 3500 K. (Vgl. *ebd.*)

7 SPEKTRALANALYSE

Eine Kohlebogenlampe oder Glühfaden-/Glühlampe, erzeugen ausreichend hohe Temperaturen, um nach dem Planckschen Strahlungsgesetz sichtbares Licht (380 – 780 nm) abzustrahlen.²¹ (Vgl. Schreiner 1975: 118) Dabei gibt es keine Unterbrechung des Emissionsspektrums. Daher sprechen wir von einem *kontinuierlichen Spektrum*. Auch von der Sonne würde ein kontinuierliches Spektrum ausgehen, wenn nicht die Fraunhofer'schen Linien absorbiert werden würden. Fehlen Teile eines sonst kontinuierlichen Spektrums, nennen wir es ein *Absorptionsspektrum*. (Vgl. ebd. 120 f)

Bevor wir noch auf eine dritte Form von Spektren zu sprechen kommen, lernen wir hier noch eine letzte Möglichkeit der Lichterzeugung kennen: Leuchtende chemische Elemente, vorzugsweise Gase, die als *Plasma* bezeichnet werden. (Vgl. Demtröder 2009: 64) Unter passenden Voraussetzungen können Gase, wie zum Beispiel Quecksilberdampf oder Natriumdampf, elektrischen Strom leiten. Im Gas spielt sich dabei eine elektrische Entladung ab, durch die Licht erzeugt wird. Solange die verwendeten Gase einem Druck von weniger als einem Torr ausgesetzt sind, emittieren sie nur bestimmte Wellenlängen, die für das Element charakteristisch sind.²² Diese Art von Spektren, wie sie hier oder bei der Lumineszenz auftreten, nennt man *Linienpektren* oder *diskrete Spektren*. (Vgl. Schreiner 1975: 118)

7.1 Optische Spektroskopie

Um eine Lichtquelle zu untersuchen, können wir beispielsweise einen *Prismenspektrographen* oder einen *Gitterspektrographen* nutzen. Doch auch Programme, wie WavePad, erlauben eine Spektralanalyse am Computer (beispielsweise erhältlich www.nch.com, Stand: Jänner 2017).

Bei einem Prismenspektrographen wird durch Brechung und Dispersion einfallendes Licht in seine Wellenlängen zerlegt (siehe Kapitel 2.6 Dispersion und Brechung). Bei Planckschen Strahlern oder bei unter Druck stehenden Gasen sehen wir ein kontinuierliches Spektrum. Bei anderen Lichtquellen sehen wir dagegen einzelne Spektrallinien. Die Linienform zeigte sich als besonders

²¹ Unsere Augen haben sich so entwickelt, dass sie speziell diesen Wellenlängenbereich wahrnehmen können. (Vgl. Meschede 2010: 592)

²² Wird der Druck erhöht, werden die emittierten Linien immer breiter, bis sie schließlich in ein kontinuierliches Spektrum übergehen. (Vgl. Schreiner 1975: 118)

anschaulich und resultiert aus einem linienförmigen Eintrittsspalt für das Licht in den Prismenspektrographen. (Vgl. Windholz 2013: 57)

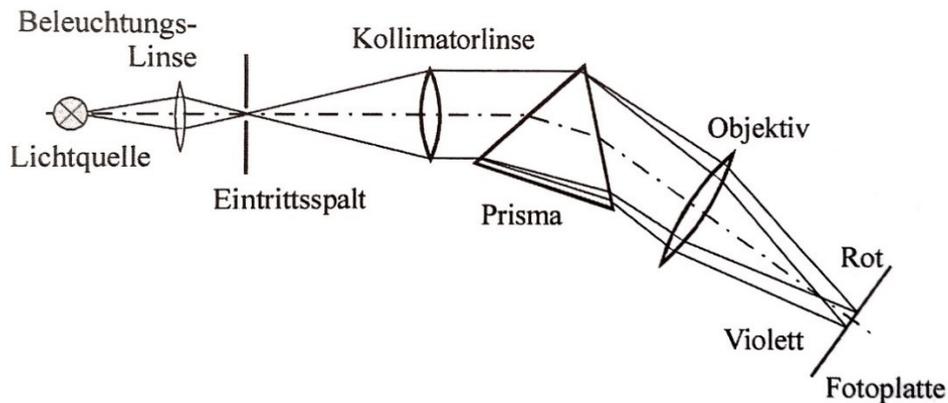


Abbildung 36: Prismenspektrograph. Sowohl Beleuchtungslinse, Kollimatorlinse, als auch Objektiv sind Sammellinsen. Das Prisma spaltet durch Brechung und Dispersion die Wellenlängen der Lichtquelle auf und eine Linse bildet sie auf einer Fotoplatte ab. (Windholz 2013: 58)

Die, auf der Fotoplatte entstehenden Spektrallinien, sind sichtbar gekrümmt. Dabei weist die konkave Seite der Linien in Richtung der kürzeren Wellenlängen. Dieser Effekt wird durch Kollimatorlinse und Prisma (siehe Abbildung 36) erzeugt. Die Lichtstrahlen werden durch die Krümmung der Linse nicht ganz parallel auf die Oberfläche des Prismas übertragen. Die, am Rand liegenden Lichtstrahlen, erfahren so eine stärkere Brechung, die auf der Fotoplatte die Krümmung hervorruft. (Vgl. Grebe et al. 1929: 101)

7.1.1 Versuch: Spektrum einer Glühlampe oder Halogenglühlampe

Aufbau und Durchführung:

Wir untersuchen das Licht einer leuchtenden Glühlampe oder Halogenglühlampe, mithilfe eines Spektrographen, wie in Abbildung 36.

Beobachtung:

Wir sehen in beiden Fällen ein kontinuierliches Spektrum mit allen Spektralfarben.

Erklärung:

Die Glühlampen erzeugen ihr Licht gemäß dem Planckschen Strahlungsgesetz. Sie verfügen über eine *Glühwendel*. Dies ist ein, viele Male spiralförmig aufgerollter Draht, der in der Regel aus Wolfram besteht. Bei Stromdurchfluss erhitzt sich die Wendel, bis die Temperaturstrahlung ins sichtbare Spektrum vordringt. Durch die vielen Windungen des glühenden Drahtes wird eine hohe Lichtausbeute erzielt.

Wolfram wird aufgrund seines hohen Schmelzpunktes verwendet. Viele andere Metalle würden den hohen Temperaturen nicht standhalten (oder sind zu teuer). (Vgl. Jüstel/Schwung 2016: 68)

In normalen Glühlampen wird die Wendel von einem Vakuum oder Inertgasen (Argon, Stickstoff, Krypton oder Xenon) umschlossen, damit sie bei Betrieb nicht verbrennt. Die Leistung beginnt bei 15 W, es können aber auch Glühlampen mit bis zu 2000 W hergestellt werden. (Vgl. Wissen.de 2014 - 2017, Glühlampe) Halogenglühlampen dagegen, füllt man mit Gasen, wie Brom oder Iod. Sie ermöglichen eine noch höhere Betriebstemperatur und eine höhere Lebensdauer. (Vgl. Jüstel/Schwung 2016: 71)

Versuch 7.1.1 kann erweitert werden, indem man die Glühlampe nicht, gemäß dem vorgeschriebenen Strom entsprechend, betreibt. Eine höhere Strommenge führt dazu, dass die Wendel einer Glühlampe überhitzt und schmilzt. Gleich nach Einschalten der Lampe, brennt sie also durch. Dafür erhält man aber einen sehr hellen Lichtblitz.

7.1.2 Versuch: Spektrum einer Kohlebogenlampe

Aufbau und Durchführung:

Wir verwenden eine Kohlebogenlampe als Lichtquelle. Alternativ kann aber genauso eine Halogenlampe verwendet werden. Diese untersuchen wir mit einem Prismenspektrographen, wie in Abbildung 36.

Beobachtung:

Man beobachtet ein kontinuierliches Spektrum, welches dem der Sonne ähnelt.

Erklärung:

Die Kohlebogenlampen nutzen Graphitstäbe als Elektroden.²³ Unter angelegter Gleichspannung von 110 V werden diese zusammengeführt. Der Stromfluss an den Berührungspunkten erhitzt die Elektroden. Zieht man nun die Graphitstäbe ein wenig auseinander, wird der Stromfluss nicht unterbrochen, denn über die geringe Distanz der Elektroden, erfolgt eine *Gasentladung*. (Vgl. Higatsberger 1977: 442) Die Gasentladung wird dabei durch zwei Ereignisse verursacht: Einerseits erhitzen die Elektroden die umliegenden Gasatome aus der Luft. Deren Elektronen springen also

²³ Die Elektrode, die Elektronen anzieht, nennt man *Anode*. Die andere Elektrode, ihr Gegenstück, heißt *Kathode*. (Vgl. Jüstel/Schwung 2016: 40)

in höhere Bahnen. Andererseits werden, durch das starke elektrische Feld zwischen den Elektroden, Elektronen aus der Kathode zur Anode hin beschleunigt. Auf ihrem Weg prallen die Elektronen mit den Gasatomen zusammen. Deren, ohnehin schon stark erregten Elektronen, werden so ganz aus ihren Bahnen herausgeschlagen. Die, übriggebliebenen Atome, die nun über zu wenige Elektronen verfügen, nennt man *Ionen*. Sie sind elektrisch positiv geladen und bewegen sich daher zur Kathode. Elektronen dagegen, sind negativ geladen und bewegen sich zur Anode. So bricht der Stromfluss zwischen den Elektroden nicht ab, sondern fließt über das leitfähig gewordene Gas weiter. Das elektrisch leitfähig gemachte Gas nennt man *Plasma*.

Sowohl die Elektronen, als auch die positiven Ionen, geben beim Auftreffen auf die Elektroden ihre Bewegungsenergie ab. Durch die so erzeugte Hitze wird Temperaturstrahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich emittiert. (Vgl. *Schreiner 1975: 246 f*)

In vielen Fällen entsteht auch Lichtemission vom Plasma selbst: Freie Elektronen können von Ionen eingefangen werden, da diese sich gegenseitig anziehen. Geschieht dies, werden die Elektronen gebremst und strahlen Licht ab. Dieses verfügt, je nach Element, über bestimmte, charakteristische Wellenlängen (siehe dazu Kapitel 8). (Vgl. *Experimentis 2016, Was ist Plasma?*)

Der Versuch 7.1.2 lässt noch ein weiteres Experiment zu: Der Lichtbogen zwischen den beiden Kohlestäben lässt sich auspusten. Aufgrund der vorangehenden Erklärungen erschließt sich uns, dass ein Windstoß die ionisierten Teilchen von den Kohlestäben entfernt. Außerdem wird kühle Luft zugeführt, die die hohe Temperatur absenkt. So wird der Stromfluss zwischen den Kohlestäben unterbrochen. Ein neuerliches Zünden ist aufgrund des großen Abstandes nicht mehr möglich. Erst ein erneutes Zusammenführen und Trennen der Kohlestäbe aktiviert die Lichtquelle wieder.

7.1.3 Versuch: Wasserstoffentladung

Aufbau und Durchführung:

Für dieses Experiment benötigen wir eine Gasentladungslampe, die das Spektrum von Wasserstoff emittiert. Das Wasserstoffgas ist hierbei in einer Glas- oder Quarzröhre eingeschlossen, welches für sichtbares und UV-Licht durchlässig ist. (Vgl. *Bergmann/Schaefer 2004: 239*) Um das Röhrchen sind Elektroden positioniert, die Elektronen durch das Gas beschleunigen. Die Elektronen müssen dabei eine Energie (Ionisierungsenergie) von ca. 10 eV erreichen, um die Gasatome zu ionisieren. (Vgl. *Demtröder 2009: 65*) Der Wasserstoff beginnt zu leuchten. Die Untersuchung des Lichts kann wieder mithilfe eines Prismenspektrographen erfolgen (siehe Abbildung 36).

Beobachtung:

Man sieht ein diskretes Spektrum. Es zeigt eine Spektrallinie im Roten, eine im Blau-Grünen und zwei Linien im Violetten. Andere Linien folgen im ultravioletten, nicht sichtbaren Bereich. Die Abstände der Linien zueinander werden immer geringer.²⁴ (Vgl. ebd.)

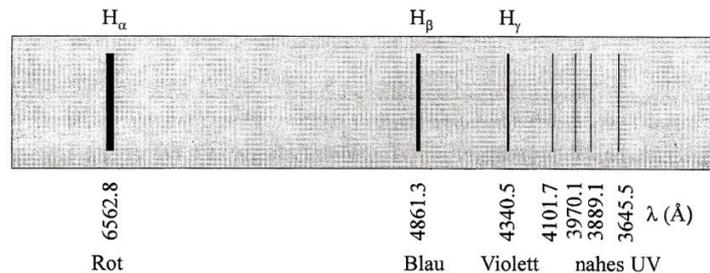


Abbildung 37: Spektrum des Wasserstoff-Atoms. Die Linienstärke soll die Intensität der Linien andeuten. H_α , H_β und H_γ geben den Linien Bezeichnung und Reihenfolge. Die nebenstehenden Zahlen geben die Wellenlänge an dieser Position an. Die angegebene Einheit ist Angström: $1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ nm}$ (Windholz 2013: 71)

Erklärung:

Die Anordnung der Linien folgt einer Gesetzmäßigkeit, die Johan Balmer 1885 mathematisch beschrieb. Daher sind die Linien auch als die Balmer-Serie bekannt. (Vgl. Schreiner 1975: 119)

Die Anordnung ist eng mit dem Aufbau des Atoms verknüpft: Ein Wasserstoff-Atom verfügt nur über ein Proton als Atomkern und über ein Elektron, welches in seinem Grundzustand die niedrigstmögliche Energie besitzt. Wird aber auf das Atom Energie übertragen, so begibt sich das Elektron sprunghaft in eine energiehöhere Schale. Je höher die Schale, desto näher liegt diese an der Folgenden. Des Weiteren ist sowohl ein Zurückfallen in den Grundzustand, als auch das Einnehmen eines niedrigeren Energiezustands, in einer tiefer liegenden Schale möglich. Die Tatsache, dass nur ein Elektron pro Atom vorhanden ist, macht eine eindeutige Interpretation möglich.

Die Balmer-Serie spielte eine große Rolle bei der Erforschung der Atomphysik, denn sie gibt Auskunft über den Aufbau der Elektronenhülle. Sie ist die einzige Serie des Wasserstoffatoms, mit einer Emission im sichtbaren Wellenlängenbereich. Es gibt jedoch auch andere Serien, wie beispielsweise die Lyman- oder die Paschen-Serie, im ultravioletten Bereich. (Vgl. ebd.: 352 ff)

In der folgenden Abbildung 38 sind verschiedene Energieniveaus des Wasserstoff-Atoms dargestellt. Vom energieniedrigsten Zustand $n = 1$ beginnend, werden die Zustände durchnummeriert. Der Sprung von einem höheren, auf ein niedrigeres Niveau gibt eine Energiedifferenz ΔW . Die Wellenlänge λ nimmt mit zunehmender Energie ab. Aus historischen Gründen gibt man aber nicht λ , sondern die Wellenzahl $\nu^* = \frac{1}{\lambda}$ an. (Vgl. Stuart/Klages 2010: 266 f)

²⁴ Im Ultravioletten sind die Abstände so gering, dass ein Kontinuum entsteht. Es ist das sogenannte *Grenzkontinuum*. (Vgl. ebd.: 119)

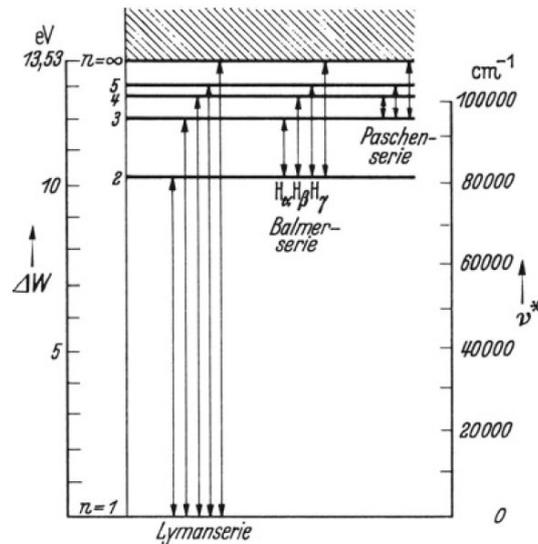


Abbildung 38: Energieniveauschema des Wasserstoff-Atoms. Die Lyman-, Balmer und Paschen-Serie sind abgebildet. Sie zeigen mögliche Energieniveaus, die das Elektron des Wasserstoffatoms erreichen kann. Diese sind charakteristisch für die Atomshalen. Die Balmer-Serie ist die einzige, die auch sichtbare Wellenlängen abstrahlt. Die drei sichtbaren Wellenlängen sind mit H_α , H_β und H_γ gekennzeichnet. (Stuart/Klages 2010: 267)

In Abbildung 38 wird die Energie in *Elektronenvolt* (eV) angegeben. Es gilt: $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Für alle Serien gibt es eine *Seriengrenze* bei 13,53 eV ($n = \infty$). Werden dem Elektron mehr, als 13,53 eV zugeführt, tritt das Elektron aus: Es verlässt die Umlaufbahn des Atomkerns. Zurück bleibt ein geladenes Teilchen, ein *Ion*. Man nennt dies daher die *Ionisierungsenergie* oder *Austrittsarbeit*. (Vgl. ebd.: 268)

7.1.4 Versuch: Eisenspektrum

Aufbau und Durchführung:

Analog zu den vorangehenden Versuchen, untersuchen wir das Spektrum von strahlenden Eisenatomen. Dafür erzeugt man einen Lichtbogen zwischen zwei Eisenelektroden (vergleiche Versuch 7.2.1).

Beobachtung:

Untersuchen wir das Plasma, sehen wir viele diskrete Linien in unterschiedlichsten Rot-, Grün- und Blautönen.

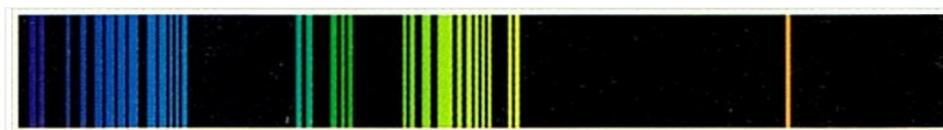


Abbildung 39: Eisenspektrum. Das Emissionsspektrum von Eisenatomen besitzt viele Spektrallinien im roten, grünen und blauen Bereich. (Abibev, Atomspektren)

Erklärung:

Die Spektrallinien entstehen auf analoge Weise, wie in Versuch 7.1.3. Allerdings verfügen Eisenatome über weit mehr Elektronen, als das Wasserstoffatom. Dadurch kommt es auch zu mehr Emissionen im sichtbaren Wellenlängenbereich.

7.2 Linienverbreiterung

Die beobachteten Spektrallinien haben immer eine gewisse Dicke.²⁵ Das bedeutet, dass ausgesendete Strahlung einer ganz bestimmten Frequenz immer leicht schwankt.

Dieses Schwanken kommt daher, dass Atome, aufgrund ihres Aufbaus, nicht ununterbrochen strahlen können. Die emittierte elektromagnetische Welle bricht ab und eine neue beginnt. Dabei wird die Periodizität gestört. Resultat ist ein schmales Kontinuum von Frequenzen – eine Spektrallinie. (*Vgl. Meschede 2010: 685*)

Bei Gasen, die unter geringem Druck diskrete Spektren besitzen (siehe Anfang des Kapitels 7), kann die Periodizität durch zunehmende Druckerhöhung gestört werden. Die Strahlungsakte werden nämlich auch durch Zusammenstöße einzelner Atome unterbrochen. Mehr Druck bedeutet für die Teilchen auch mehr Stöße. Die, sonst so schmalen Spektrallinien, werden unter zunehmendem Druck immer breiter. Auch ein vollständiges, kontinuierliches Spektrum im sichtbaren Wellenlängen ist möglich. (*Vgl. ebd.: 686*)

7.2.1 Versuch: Spektrum einer Quecksilberdampfampe

Aufbau und Durchführung:

Eine Quecksilberdampfampe besteht aus zwei Quecksilberelektroden, die in einem Entladungsrohr eingeschlossen sind. Das Glas (Quarzglas) des Entladungsrohrs ist UV-durchlässig, da der gezündete Lichtbogen auch starke, ultraviolette Strahlung aussendet.

Gezündet werden Quecksilberdampflampen mithilfe von Edelgasen: die Entladung des Edelgases bewirkt ein Verdampfen des Quecksilbers, bis dessen Bogenentladung auftritt. Der Druck im Rohr nimmt, aufgrund des Quecksilberdampfes, stark zu. (*Vgl. Hügatsberger 1977: 445*)

Wir untersuchen das Licht leuchtender Quecksilberdampflampen unterschiedlichen Drucks.

²⁵ Logisch, denn wären sie unendlich dünn, könnten wir sie nicht sehen.

Beobachtung:

Quecksilberdampf lampen besitzen zwei charakteristische Spektrallinien im grünen und zwei im blauen, sichtbaren Bereich. (Vgl. Higatsberger 1977: 445) Diese befinden sich bei 400 nm und 550 nm. Unter Hochdruck allerdings, kommt es zur Linienverbreiterung und man erhält ein kontinuierliches Spektrum. (Kneubühl/Sigrüst 2005: 342)



Abbildung 40: Emissionsspektrum von Quecksilber-Atomen unter Niederdruck. Die spiegelsymmetrische Zerlegung erfolgte durch ein Gitter. Daber ist die Abbildung redundant: Die mittlere, weiße Linie ist die Beugung 0-ter Ordnung und ist zu vernachlässigen. Jeweils rechts und links von ihr sieht man die Zerlegungen. (Physikunterricht-online, Untersuchung des Spektrums einer Quecksilberdampf lampen)

Erklärung:

Das Zünden einer Quecksilberdampf lampen erfolgt mithilfe eines Edelgases. Die *Glimmentladung*, die auch über eine Hilfselektrode erzeugt werden kann, erwärmt die Röhre. Das Quecksilber beginnt zu verdampfen und damit steigt der Druck. Sind genügend Quecksilber-Atome im gasförmigen Zustand vorhanden, kommt es zur Bogenentladung: Das Gas leitet elektrischen Strom und strahlt dabei Licht ab.²⁶

Je höher der Druck in der Lampe ist, desto stärker wirkt sich die Linienverbreiterung auf die Spektrallinien aus. Quecksilberdampf lampen mit niedrigem Druck gehen bis zu 2 bar, darüber spricht man von Hochdrucklampen. Erst ab einem Druck von mehr als 30 bar, erhält man ein kontinuierliches Spektrum. (Vgl. Schreiner 1977: 254 f)

7.2.2 Versuch: Spektrum einer Natrium-Dampf lampen

Aufbau und Durchführung:

Das Licht einer Natriumdampf lampen wird untersucht. Die Untersuchung kann wieder mithilfe eines Prismenspektrographen erfolgen (siehe Abbildung 36). Hier bietet sich allerdings auch an, ein Analyseprogramm (siehe Anfang des Kapitels 7.1) zu verwenden, um genauer arbeiten zu können.

²⁶ Ein *Vorwiderstand* begrenzt den Stromfluss. Eine heiße Quecksilberdampf lampen kann erst nach Abkühlen wieder eingeschaltet werden, da der hohe Gasdruck eine höhere Zündspannung verlangt, die nicht aufgebracht werden kann. (Vgl. Schreiner 1977: 254 f)

Beobachtung:

Es findet sich nur eine, sehr stark ausgeprägte Spektrallinie im gelben Wellenlängenbereich. Genauer gesagt, handelt es sich um zwei Linien, die sehr nahe beieinanderliegen.²⁷ Ihre Wellenlängen $\lambda_1 = 589.0 \text{ nm}$ und $\lambda_2 = 589.6 \text{ nm}$ können bei einer Spektroskopie kaum auseinandergehalten werden. (Vgl. Demtröder 2009: 229)



Abbildung 41: Spektrum einer Natriumdampflampe. Die Natrium-D-Linie besteht eigentlich aus zwei sehr nahe beieinanderliegenden Spektrallinien. (Fornoff 2011, Das Spektrum der Sonne)

Erklärung:

Das Strahlen der Na-Atome wird auf dieselbe Art erzeugt, wie in Versuch 7.1.3 oder 7.1.4.

7.3 Farbwiedergabe

Die *Farbwiedergabe* gibt die Qualität einer Lichtquelle an. Dies wird durch Angabe des Farbwiedergabe-Index R_a gemacht. Dieser Wert kann zwischen 0 und 100 liegen, wobei 100 das Optimum ist.

Um R_a zu bestimmen, beleuchtet man mit der, zu untersuchenden Lichtquelle, Testfarben. Als Referenz verwendet man stets eine Weißlichtquelle, von der ein Farbwiedergaben-Index 100 angenommen wird. (Dazu zählen beispielsweise die Sonne oder eine Glühlampe). Zu jeder, von acht Testfarben werden Indices R_i aufgestellt, die durch Aufsummieren schließlich den Farbwiedergabe-Index R_a ergeben. (Vgl. Lübbe 2013: 124)

²⁷ Liegen zwei Spektrallinien so eng beieinander, dass sie nicht mehr auseinandergehalten werden können, spricht man auch von einem *Bandenspektrum*. (Vgl. Osterhage 2014: 51)



Abbildung 42: Testfarben zur Farbwiedergabe. Die ersten acht der 14 Testfarben wurden zur Bestimmung des R_a -Wertes herangezogen. Die Farben entsprechen der DIN 6169 (Deutsches Institut für Normung) (Lübbe 2013: 124)

Lampe	Index R_a
Glühlampe	100
Leuchtstofflampe, weiße de Luxe	85 ... 100
Leuchtstofflampe, weiß	70 ... 84
LED, weiß	70 ... 95
Leuchtstofflampe	50 ... 90
Halogen-Metaldampf-Lampe	60 ... 95
Natriumdampf-Hochdrucklampe, warmweiß	80 ... 85
Quecksilberdampf-Hochdrucklampe	45
Natriumdampf-Hochdrucklampe, Standard	18 ... 30
Natriumdampf-Hochdrucklampe, farbverbessert	60
Natriumdampf-Niederdrucklampe	44

Tabelle 2: Farbwiedergabe-Index einiger Lampen. (Lübbe 2013: 125)

Während kontinuierliche Lichtquellen oder näherungsweise Schwarze Strahler einen sehr hohen bzw. einen optimalen Farbwiedergabe-Index besitzen, erreichen Atom-Lichtemissionen, wie Na-, oder Hg-Dampflampen weniger gute Ergebnisse (siehe Tabelle 2). Weiße LEDs besitzen, besonders im kurzwelligen Bereich, nur eine geringe Emission. Dies verschlechtert ihren R_a -Wert. (Vgl. *ebd.* 123).

7.4 Emissions- und Absorptionsspektren

Im vorangehenden Kapitel 7 haben wir uns mit der Lichtemission von angeregten Atomen beschäftigt. Die entstehenden Bilder bei einer Spektroskopie sind *Emissionsspektren*, also Spektren, die von Lichtquellen erzeugt und direkt untersucht werden.

Eine indirekte Form der Analyse stellen dagegen die *Absorptionsspektren* dar. Mit einem Spektrographen untersucht man nicht die Lichtquelle selbst, sondern Gase oder andere lichtdurchlässige Stoffe, die zwischen Lichtquelle und Untersuchungsgerät eingebracht werden. Absorbieren die Atome der Substanz bestimmte Wellenlängenbereiche einer Weißlichtquelle, mit kontinuierlichem Spektrum, so fehlen eben diese Wellenlängen und wir erhalten ein Absorptionsspektrum. (Vgl. *Osterhage 2014: 51*)

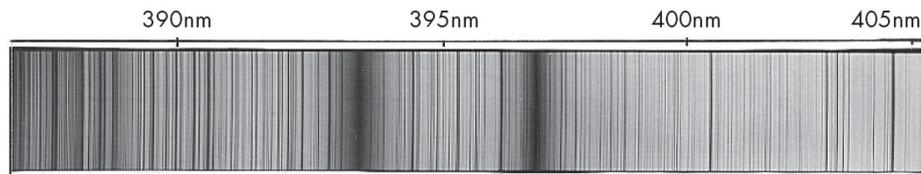


Abbildung 43: Absorptionsspektrum der Sonne. Aus einem kontinuierlichen Spektrum werden einzelne Wellenlängenbereiche gefiltert; schwarze Linien bleiben übrig. (Osterhage 2014: 51)

Die Sonne entspricht nur näherungsweise einem Schwarzen Strahler. Außerdem fehlen dem Spektrum, wie in Kapitel 6.1 erwähnt, die Fraunhofer'schen Linien. Grund dafür ist, dass Gasatome gewisse Wellenlängenbereiche absorbieren. Die absorbierte Energie wird von den Atomen zwar wieder abgegeben, allerdings ist diese etwas niedriger, sodass auch die elektromagnetische Strahlung in einem niedrigeren Frequenzbereich liegt.

Das Spektrum der Sonne ändert sich jedoch auch massiv durch die Atmosphäre der Erde: Ozon absorbiert sehr viel UV-Strahlung. Wasserdampf und CO_2 dagegen absorbieren IR-Strahlung. (Vgl. ebd. 613)

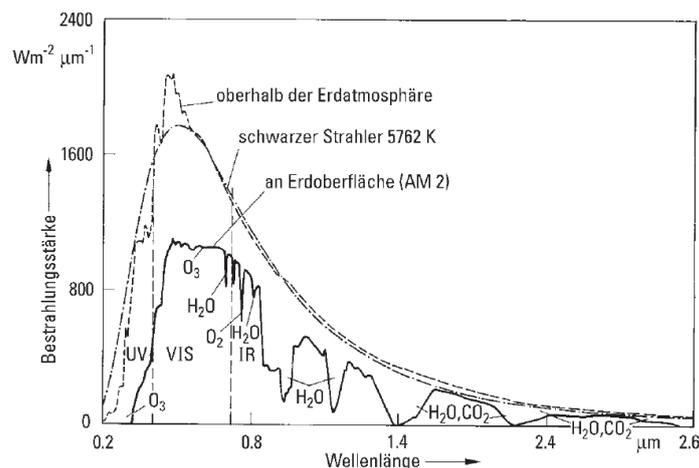


Abbildung 44: Spektrale Bestrahlungsstärke der Sonne zur Wellenlänge (extraterrestrisch und an der Erdoberfläche). Näherungsweise nimmt die extraterrestrische spektrale Bestrahlungsstärke der Sonne die Funktionsform eines idealen Schwarzen Körpers (siehe auch Abbildung 34) an. Die Atmosphäre absorbiert große Teile der Strahlung, bis es auf die Erdoberfläche trifft. (Bergmann/Schaefer 2004: 653)

7.5 Flammenfärbung

Die Flamme eines Gasbrenners ist nur schwach zu sehen. Sie leuchtet kaum, da sie nicht sehr heiß und nicht schwarz ist: gerade im sichtbaren Wellenlängenbereich gibt es keine Absorption, also auch keine Emission (siehe 6.1: Kirchhoffsches Strahlungsgesetz). (Vgl. Meschede 2010: 603)

Dies kann man sich zum Vorteil machen, wenn es um die Analyse chemischer Stoffe geht. So kann man beispielsweise Reinstoffe, wie Lithium, Natrium oder Kalium in die Flamme einbringen. Es kommt zu elementabhängigen Flammenfärbungen, denn wie im ersten Absatz des 7. Kapitels

erwähnt, emittiert jedes Element, wie bei einem Fingerabdruck, charakteristische Wellenlängen.²⁸ Durch Analyse des farbigen Lichts lässt sich auf die eingebrachten Elemente schließen. Untersuchungen der Intensität ermöglichen sogar Aussagen über die zugeführten Mengen. (Vgl. *Welsch/Liebmann 2012: 300*)

7.5.1 Versuch: Flammenfärbung

Aufbau und Durchführung:

Benötigt werden ein Gasbrenner, Magnesiastäbchen und einige Lösungen, in denen jeweils eines der zu untersuchenden Elemente gelöst ist. (Vgl. *PH Oberösterreich: Basisexperiment - Flammenfärbung*) Welsch und Liebmann geben an, dass sich die Elemente Lithium, Natrium, Kalium, Rubidium, Cäsium, Calcium, Strontium, Barium und Kupfer für dieses Experiment eignen. (Vgl. *Welsch/Liebmann 2012: 300*)

Die Spitze eines Magnesiastäbchens wird erst 30 Sekunden in der Brennerflamme erhitzt, um Verunreinigungen zu entfernen. Dann tauchen wir sie in eine der Lösungen und führen sie dann erneut der Flamme zu. (Vgl. *PH Oberösterreich: Basisexperiment - Flammenfärbung*)

Beobachtung:

Beim Einbringen eines der Elemente kommt es zu Flammenfärbungen. Welche Farben die jeweiligen Elemente erzeugen, zeigt die folgende Tabelle 3.

Element	Lichtfarbe
Lithium	kirschrot
Natrium	gelb
Kalium	rot
Rubidium	rot
Cäsium	violett
Calcium	ziegelrot
Strontium	rot
Barium	gelbgrün
Kupfer	grün

Tabelle 3: Elemente und deren abgegebene Lichtfarbe beim Experiment Flammenfärbung. (Welsch/Liebmann 2012: 300)

²⁸ Deswegen sollte die Flamme des Brenners möglichst farblos sein: Jeder Wellenlängenbeitrag, den der Brenner liefert, muss dann im Spektrum berücksichtigt werden. Auch die Flammenfarbe selbst würde durch die Flammenfarbe des Brenners mit additiver Farbmischung beeinflusst.

Erklärung:

Die Flammenfärbung kommt durch Lichtabgabe des eingebrachten Elements zustande. Die Elektronen der Atome werden durch die zugeführte Wärmeenergie des Gasbrenners in höhere Bahnen gebracht und senden beim Zurückfallen Licht im sichtbaren Wellenlängenbereich aus (siehe auch Kapitel 385). (Vgl. PH Oberösterreich: Basisexperiment - Flammenfärbung)

Betrachten wir beispielsweise das Element Lithium, so entsteht seine Flammenfärbung durch das Zurückfallen der Elektronen aus den angeregten Zuständen ${}^2P_{1/2}$ und ${}^2P_{3/2}$ in den Grundzustand ${}^2S_{1/2}$. (Vgl. Jüstel/Schwung 2016: 99)

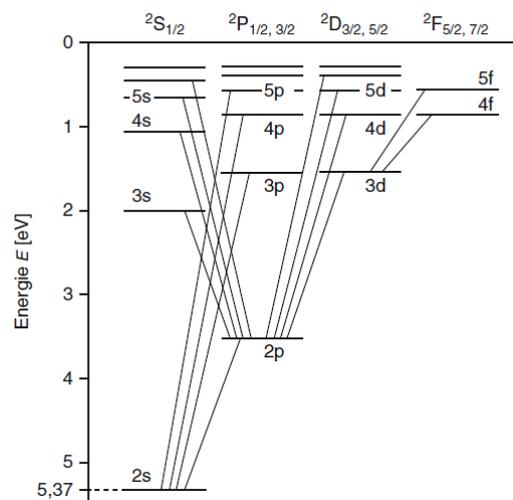


Abbildung 45: Thermischeschema von Lithium. (Jüstel/Schwung 2016: 99)

Bringen wir Natrium in die Flamme ein, so wird das, für Natrium charakteristische Licht mit den Wellenlängen 589.0 nm und 589.6 nm emittiert. (Vgl. Jüstel/Schwung 2016: 116) Beim folgenden Versuch 7.5.2 erfolgt die Anregung allerdings nicht durch eine Gasflamme, sondern es wird durch elektrischen Strom ein Plasma erzeugt.

7.5.2 Versuch: Leuchtende Essiggurke

Aufbau und Durchführung:

Man benötigt eine Essiggurke, deren Enden mit Schrauben oder Nägeln durchstoßen werden. Diese, so konstruierten *Elektroden*²⁹ werden mit Kabeln an die Steckdose (230 V) angeschlossen. Dieses Experiment ist daher mit besonderer Vorsicht durchzuführen!

²⁹ Elektroden bestehen aus leitendem Material. Zwischen ihnen befindet sich ein weiteres Medium, wie beispielsweise die Essiggurke. Wird an die Elektroden eine Spannung angelegt, kann dadurch eine Reaktion im zwischenbefindlichen Material bewirkt werden.

Beobachtung:

Die Essiggurke beginnt flackernd gelb zu leuchten. Nach einigen Sekunden verschmort sie außerdem, sodass das Experiment beendet werden sollte.

Erklärung:

In der Essiggurke ist Natriumchlorid (Kochsalz) in wässriger Lösung enthalten. Diese leitet den elektrischen Strom. Die Natrium-Atome werden dabei angeregt und emittieren Licht, wenn sie in den Grundzustand zurückfallen. (*Vgl. Uni-Regensburg, Die leuchtende Essiggurke*)

8 LICHTEMISSION DURCH MIKROWELLEN

Mikrowellenherde emittieren elektromagnetische Strahlung, mit der Wellenlänge $\lambda = 12$ cm bzw. der Frequenz $\nu = 2.5$ GHz. Damit liegt die Strahlung nicht im sichtbaren Bereich, sondern weit im IR-Bereich (Vergleiche mit Kapitel 3.1). Viele Atome oder Moleküle, die elektrische Dipole darstellen (siehe Kapitel 2.4), werden durch die Strahlung zum Schwingen angeregt. Sie erhalten also Energie von außen und erhitzen sich. (Vgl. Max-Planck-Institut 2009, *Wie funktioniert ein Mikrowellenherd?*)

Da Atome Strahlung absorbieren und in anderen Wellenlängen wieder emittieren können, können wir unterschiedliche Gase der Mikrowellenstrahlung aussetzen und beobachten, wie diese reagieren. Legen wir Lampen in einen Mikrowellenherd, und beobachten Effekte, können wir Aussagen über die, in den Lampen enthaltenen Gase, machen.

8.1.1 Versuch: Glühlampe unter Mikrowellenstrahlung

Aufbau und Durchführung:

Es wird eine Glühlampe in einen Mikrowellenherd gelegt, den man anschließend mit höchstmöglicher Leistung betreibt.

Beobachtung:

Erst beginnt das Füllgas der Lampe zu leuchten und schon nach wenigen Sekunden platzt die Lampe schließlich.

Erklärung:

Glühlampen sind mit *Inertgasen* gefüllt, die keine chemischen Reaktionen eingehen. Dies schützt die Glühwendel davor, zu verbrennen. Darunter fallen Stickstoff und Edelgase. (Vgl. Jüstel/Schwung 2016: 66) Edelgase wie Xenon, Krypton oder Argon werden auch in *Gasentladungslampen* gezielt eingesetzt. (Vgl. ebd. 64) Jedes Gas strahlt in seinem angeregten Zustand in einer charakteristischen Strahlung, die bei jedem dieser Gase eine bestimmte Lichtfarbe erzeugt. Bei diesem Versuch werden durch die Mikrowellenstrahlung die enthaltenen Gase ionisiert und zum Leuchten angeregt. Helium leuchtet gelb, Neon rot, Argon blau, Krypton gelb-grün und Xenon blau-grün. (Vgl. Latscha/Mutz 2011: 181) Stickstoff kann blau oder violett leuchten. (Vgl. Experimentis 2016, *Was ist Plasma?*)

Die ideale Gasgleichung lautet:

$$p V = \nu R T \quad (\text{F. 14})$$

Dabei ist p der Druck, V das Volumen, ν die Stoffmenge, R die universelle Gaskonstante. (Vgl. Meschede 2010: 309) Für das Gas in der Lampe bedeutet also zunehmende Temperatur einen zunehmenden Druck (da das Volumen gleichbleibt). Ist der Druck zu groß, platzt die Lampe.

8.1.2 Versuch: Leuchtstoffröhre unter Mikrowellenstrahlung

Aufbau, Durchführung und Beobachtung:

Man legt eine kurze Leuchtstoffröhre in den Mikrowellenherd und betreibt diesen mit der höchstmöglichen Leistung. Die Leuchtstoffröhre beginnt weiß zu leuchten.

Erklärung:

Leuchtstofflampen enthalten in der Regel Quecksilber. Der erregte Quecksilberdampf emittiert hauptsächlich ultraviolette Strahlung. Eine, an der Lampeninnenseite angebrachte Leuchtstoffschicht, wandelt diese schließlich in sichtbares Licht um. (Vgl. Jüstel/Schwung 2016: 94)

In einem Mikrowellenherd regt die Strahlung die enthaltenen Gase an und der gewöhnliche Leuchtablauf der Lampe wird erzeugt.

8.2 Geissler-Röhrchen

Geissler-Röhrchen sind kleine Glasröhrchen, die sowohl Luft, Gase und Flüssigkeiten, als auch leicht verdampfende Festkörper, in sehr reinem Zustand und unter unterschiedlichem Druck enthalten. (Vgl. Kayser 1883: 83) Durch Spannungen von einigen kV werden die Röhrchen zum Leuchten gebracht. Beispielsweise leuchtet Luft unter dem Druck von 1 mbar bläulich-rot. Dies ist eine *Glimmentladung*. (Vgl. Meschede 2010: 485)

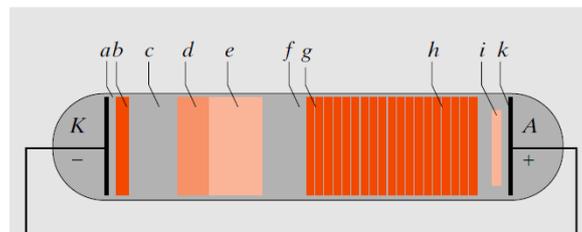


Abbildung 46: Glimmentladung eines Geissler-Röhrchens. K ist die Kathode, A die Anode. Jede Erscheinung im Röhrchen besitzt einen Namen, den Meschede unter $a - k$ angibt. Hier wird darauf verzichtet. (Meschede 2010: 485)

Unter Normalbetrieb spielt auch der Druck eine Rolle: Die Glimmentladungen erzeugen Leuchterscheinungen der Röhre entlang, die Hell- und Dunkelräume aufweisen. (*Vgl. ebd.*) Verringert man den Druck in einem Geissler-Röhrchen, rücken die Leuchterscheinungen von der Kathode weg, das Leuchten wird blasser und die Dunkelräume wachsen. (*Vgl. ebd.: 487*)

8.2.1 Versuch: Geissler-Röhrchen unter Mikrowellenstrahlung

Aufbau, Durchführung und Beobachtung:

Man legt ein, oder mehrere Geissler-Röhrchen in den Mikrowellenherd und schaltet diesen auf höchster Leistung ein. Die Röhrchen können unterschiedlichen Gases und Drucks sein. Die Röhrchen leuchten in bunten Farben.

Geissler-Röhrchen sind alt und schwer zu bekommen. Der Mikrowellenherd sollte daher nur wenige Sekunden betrieben werden, da sonst die Röhrchen zerstört werden (siehe (F. 14)).

Erklärung:

Wiederum werden die Gase durch die Mikrowellenstrahlung angeregt. Je nach Gas/Element kommt es zu unterschiedlichen Leuchterscheinungen. Achtung: Im Gegensatz zum Normalbetrieb (siehe Abbildung 46), ist das Leuchten in der Mikrowelle gleichmäßig.

8.3 Glimmlampen – Flackerlampen

Glimmlampen sind Lichtquellen, die ihr Strahlungsspektrum durch eine Gasentladung erzeugen. Sie besitzen einen sehr niedrigen Stromverbrauch und gleichen in ihrem Aufbau den Geissler-Röhrchen (siehe Abbildung 41). (*Vgl. Jüstel/Schwung 2016: 65*) Als Füllmittel nutzt man Neon. Dies erzeugt ein charakteristisches rotes Leuchten. Dieselbe Lichtfarbe erhielt man auch in Neonröhren, als erste Form der Gasentladungsröhren. Obwohl diese heute obsolet sind, hat sich der Name 'Neonröhre' in der Umgangssprache festgesetzt. (*Vgl. ebd. 116*)

Flackerlampen sind ebenfalls Glimmlampen, die sich durch ihren simulierten Kerzenschein auszeichnen. Ihre Kathode besteht aus ungereinigtem Eisenblech, das stellenweise sogar oxydiert ist. Diese Unreinheiten sorgen dafür, dass es zu keiner gleichmäßigen Entladung kommt. Stattdessen flackert das Licht, wie bei einer Kerze. (*Vgl. Wikipedia 2015: Flackerkerze*)

8.3.1 Versuch: Flackerlampen unter Mikrowellenstrahlung:

Aufbau und Durchführung:

Es werden eine oder mehrere, mit Neon gefüllte Flackerlampen in einen Mikrowellenherd gelegt. Dann wird dieser mit höchstmöglicher Leistung betrieben.

Beobachtung:

Die Flackerlampen beginnen zu leuchten. Im Gegensatz zum normalen Strombetrieb tritt hier kein Flackern auf.

Erklärung:

Es handelt sich wieder um eine Gasentladung, wie in Versuch 8.2.1. Da nun das Anregen der Neon-Atome nicht von den Elektroden abhängt, kommt es auch nicht zum Flackern.

9 RESÜMEE

Wir streiften in dieser Arbeit eine Vielzahl von Themen. Das Kapitel 2, die Wellenoptik, spielt eine besonders elementare Rolle. Sie zeigt uns, wie sich Licht, als Welle betrachtet, verhält. So lassen sich beispielsweise Beugung und Polarisation erklären. Polarisationsfilter und optische Aktivität finden in diesem Kapitel Platz. Es folgen Streuung und Doppelbrechung.

Mit dem Phänomen `Dispersion` wird dann der wichtige Baustein für das Thema `spektrale Zerlegung` gelegt. Wir lernen das Prisma und seine brechende Wirkung kennen und erstmals diskutieren wir das Auftrennen von weißem Licht. Resultat sind Farben, die wir offensichtlich, abhängig von ihren Wellenlängen, als diese erkennen. Wie unser Gehirn mithilfe der Augen Farben wahrnimmt, führt uns zur additiven Farbmischung. Fest verankert in einem der drei Graßmann-Gesetze wird uns ihre Bedeutung klar.

Das Farbhufeisen, der Rösch-Farbenraum und die Kompensativfarben sind ebenfalls ein Resultat der additiven Farbmischung. Erstmals fällt der Begriff `Spektralfarben`.

Mit dem Kapitel 4, über die Interferenz, weichen wir aber noch von der Spektralanalyse ab. Effekte der Interferenz werden deutliche, wenn kohärente Lichtquellen verwendet werden. Doch Versuche, wie die Interferenz an der Pfauenfeder, oder die Seifenlamelle zeigen uns, dass auch hier farbenfrohe Experimente möglich sind.

Mit den Kapiteln Lumineszenz und Schwarzkörperstrahlung diskutieren wir schließlich Möglichkeiten, zur Erzeugung von Licht. Alle Versuche, in denen elektromagnetische Strahlung ausgesendet wird, lassen sich auf den Bahnenwechsel von Elektronen zurückführen.

Erst mithilfe dieses Wissens können wir schließlich unsere letzten Schritte tun und in den beiden Kapiteln 7 und 8 über die Spektrale Zerlegung und strahlende Atome erörtern. Dabei entsteht in diesen Kapiteln ein letzter Eindruck, der uns deutlich macht, wie wichtig dieses Wissen für uns ist. Wir benötigen es, um zu verstehen, wie besonders es eigentlich ist, eine Lampe einzuschalten, einen Mikrowellenherd zu betreiben oder nach draußen zu gehen um die Farbenpracht der Welt zu bewundern.

10 LITERATURVERZEICHNIS

Bergmann/Schaefer 1987, Lehrbuch der Experimentalphysik Band 3, Optik (7. Auflage), de Gruyter

Bergmann/Schaefer 2004, Lehrbuch der Experimentalphysik Band 3, Optik (10. Auflage), de Gruyter

Demtröder 2009, Experimentalphysik 2 (5. Auflage), Springer

Glaeser/Paulus 2014, Die Evolution des Auges: Ein Fotoshooting, Springer

Grebe et al. 1929, Handbuch der wissenschaftlichen und angewandten Photographie Band 8, Farbenphotographie, Springer

Hasche/Ingwer 2016, Game of Colors: Moderne Bewegtbildproduktion, Springer

Heß, Lichtmeßtechnik II (Sehen und Farblehre), Institut für Experimentalphysik, TU Graz

Higatsberger 1977, Physik in 700 Experimenten, Frankfurt/M.: Blick in die Welt

Jäger 2014, Experimentalphysik 2 (36. Auflage), Institut für Experimentalphysik, TU-Graz

Jüstel/Schwung 2016, Leuchtstoffe, Lichtquellen, Laser, Lumineszenz, Springer

Kayser 1883, Lehrbuch der Spektralanalyse, Springer

Kneubühl/Sigrist 2005, Laser (6. Auflage), Teubner

Latscha/Mutz 2011, Chemie der Elemente: Chemie-Basiswissen 4, Springer

Leute 2011, Optik für Medientechniker: Optische Grundlagen der Medientechnik, Hanser

Lübbe 2013, Farbempfindung, Farbbeschreibung und Farbmessung: Eine Formel für die Farbsättigung, Springer

Meschede 2008, Optik, Licht und Laser (3. Auflage), Vieweg+Teubner

Meschede 2010, Gerthsen Physik (24. Auflage), Springer

Osterhage 2014, Studium Generale Quantenphysik: Ein Rundflug von der Unschärferelation bis zu Schrödingers Katze , Springer

Povh 2011, Anschauliche Physik für Naturwissenschaftler, Springer

Schreiner 1975, Physik 2 (5. Auflage), Hölder-Pichler-Tempsky

Stuart/Klages 2010, Kurzes Lehrbuch der Physik (19. Auflage), Springer

Vögtle et al. 2007, Dendritische Moleküle: Konzepte, Synthesen, Eigenschaften, Anwendungen, Teubner

Welsch/Liebmann 2012, Farben: Natur Technik Kunst (3. Auflage), Spektrum

Windholz 2013, Atom-, Kern- und Teilchenphysik (Auflage WS 2013/2014), Institut für Experimentalphysik, TU-Graz

ONLINELITERATUR

Abiweb, Atomspektren:

<https://www.abiweb.de/physik-atomphysik-kernphysik/atomspektren.html> (6.9.2016)

Elektronik Kompendium, Standard-LEDs:

<http://www.elektronik-kompendium.de/sites/bau/0201111.htm> (30.1.2017)

Experimentis 2016, Was ist Plasma?:

<http://www.experimentis.de/wissenschaft/kuenstlerisch-kunst/was-ist-plasma-nordlicht-aurora/>
(10.9.2016)

Fornoff 2011, Das Spektrum der Sonne:

<http://www.fornoff.homepage.t-online.de/Qastro/3Sonne/Spektrum.htm> (6.9.2016)

KIT, Mach-Zehnder-Interferometer:

<http://psi.physik.kit.edu/128.php> (21.3.2016)

Leifiphysik, Leuchtdioden:

<http://www.leifiphysik.de/elektronik/halbleiterdiode/ausblick/leuchtdioden-led> (23.8.2016)

Max-Planck-Institut 2009, Wie funktioniert ein Mikrowellenherd?:

<http://www.ds.mpg.de/132946/01> (9.9.2016)

MotivationGrid 2015, Quotes:

<http://motivationgrid.com/15-remarkable-elon-musk-quotes/> (14.9.2016)

PH Oberösterreich, Basisexperiment – Flammenfärbung:

<http://ph->

[ooe.at/fileadmin/old_fileadmin/fileadmin/user_upload/fdznawi/downloadbereich/KOPEx_KLEx/KOPEx-Flammenfärbung-2.pdf](http://ph-ooe.at/fileadmin/old_fileadmin/fileadmin/user_upload/fdznawi/downloadbereich/KOPEx_KLEx/KOPEx-Flammenfärbung-2.pdf) (28.11.2016)

Physikunterricht-online, Untersuchung des Spektrums einer Quecksilberdampflampe:

<http://physikunterricht-online.de/jahrgang-11/spektralanalyse-optisches-gitter/> (5.9.2016)

Salzmann Wissenstexte 2010, Polarisation:

<http://www.physik.wissenstexte.de/polarisation.htm#molantenne> (4.8.2016)

Stromsparlampen, LED Farbtemperatur:

http://www.stromsparlampen.eu/index.php?main_page=page&id=1& (12.9.2016)

TU-Ilmenau 2015, Die Farbtemperatur in der Lichttechnik:

<https://www.tu->

[ilmenau.de/fileadmin/public/lichttechnik/Lux_junior/Vortraege_2015/Rotscholl_Lux_junior_2015.pdf](https://www.tu-ilmenau.de/fileadmin/public/lichttechnik/Lux_junior/Vortraege_2015/Rotscholl_Lux_junior_2015.pdf) (12.9.2016)

UniGraz 2016, Experimentalphysik 2:

<https://online.uni->

[graz.at/kfu_online/wblv.wbShowLvDetail?pStpSpNr=458242&pSpracheNr=1&pMUISuche=FA](https://online.uni-graz.at/kfu_online/wblv.wbShowLvDetail?pStpSpNr=458242&pSpracheNr=1&pMUISuche=FA)
LSE (14.9.2016)

UniGraz 2016, Experimentalphysik 3:

https://online.tugraz.at/tug_online/lv.detail?clvnr=199679 (14.9.2016)

Uni-Regensburg, Die leuchtende Essiggurke:

http://www.physik.uni-regensburg.de/infra/vorlvorb/VorlVorb/Versuche/VK_22_4_c.htm
(23.8.2016)

Wikipedia 2015, Flackerkerze:

<https://de.wikipedia.org/wiki/Flackerkerze> (12.9.2016)

Wissen.de 2014 - 2017, Glühlampe:

<http://www.wissen.de/lexikon/gluehlampe> (30.1.2017)

Wissenschaft im Dialog 2008, Knicklichter:

<https://www.wissenschaft-im-dialog.de/projekte/wieso/artikel/beitrag/wie-funktionieren-sogenannte-knicklichter/> (22.8.2016)

11 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Prinzip von Huygens: Ein kleiner Spalt in einer Barriere lässt ein wenig Licht passieren – dieser wirkt wie ein Elementarwellensender. Vom Spalt aus breitet sich das Licht kreisförmig in alle Richtungen aus. (eigene Darstellung nach Jäger 2014: 2) 2

Abbildung 2: Die Beugung einer ebenen Welle an einer Kante bewirkt, dass auch auf den Teil des Schirms Licht trifft, den die Barriere abdeckt. (eigene Darstellung nach Jäger 2014: 1) 2

Abbildung 3: elektromagnetische Welle. x-Achse (\mathbf{E}) ... Ausbreitungsrichtung des elektrischen Feldes, y-Achse (\mathbf{B}) ... Ausbreitungsrichtung des magnetischen Feldes, z-Achse... Ausbreitungsrichtung des Lichts (eigene Darstellung nach Povh 2011: 183) 3

Abbildung 4: Polarisator. Ein Polarisator lässt nur Wellen in einer bestimmten Ebene passieren (Leute 2011: 14) 4

Abbildung 5: Kristallstruktur. Eintretendes Licht E_e und austretendes Licht E_a besitzen dieselbe Richtung, können aber zueinander phasenverschoben sein. Streuung findet keine statt. d ... Abstand der Atome (sehr viel kleiner als Wellenlänge λ des Lichts), Δz ... Dicke des Kristalls, z ... Raumrichtung (Demtröder 2009: 347) 7

Abbildung 6: Isotrope Lichtausbreitung. In einem isotropen Medium breitet sich Licht in alle Raumrichtungen gleich schnell aus. (Jäger 2014: 12) 9

Abbildung 7: Dichroitische Kristalle. In diesen Kristallen breitet sich der ordentliche Lichtstrahl stets sphärisch aus – die außerordentlichen dagegen in Form von Ellipsoiden. c_o ist die gleichmäßige Ausbreitungsgeschwindigkeit des ordentlichen Strahls. Abgesehen von der optischen Achse, breitet sich bei negativen Kristallen der außerordentliche Strahl schneller aus. Die größte Geschwindigkeit c_{aomax} besitzt er in der Ebene, normal zur optischen Achse. Umgekehrt erreicht der außerordentliche Strahl dort seine niedrigste Geschwindigkeit c_{aomin} , wenn es sich um einen positiven Kristall handelt. (Jäger 2014: 13) 9

Abbildung 8: Polarisation bei dichroitischen Kristallen. Ein Lichtstrahl dringt von außen, normal zur optischen Achse in den Kristall ein. Ordentlicher Strahl o . und außerordentlicher Strahl ao . breiten sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aus (siehe auch Abbildung 7) und werden

daher auch unterschiedlich stark gebrochen. Beide Strahlen sind linear polarisiert - Deren Schwingungsebenen stehen aber senkrecht aufeinander. (eigene Darstellung) 10

Abbildung 9: Nicol-Prisma. Der Kristall erzeugt zwei polarisierte Lichtstrahlen, von denen einer durch Totalreflexion an der Kantschicht aus dem System gedrängt wird. o ... ordentlicher Strahl, ao ... außerordentlicher Strahl (eigene Darstellung nach Jäger 2014: 15) 10

Abbildung 10: Lichtbrechung. Mit einem Prisma lässt sich weißes Licht in seine Spektralfarben zerlegen. (Osterhage 2014: 22) 12

Abbildung 11: Schemenhafte Darstellung elektromagnetischer Strahlung. Der dunkelgraue Balken markiert den Bereich des, für den Mensch sichtbaren Lichts im Wellenlängenbereich 380 nm – 780 nm. (Lübbe 2013: 2) 14

Abbildung 12: Das Auge: S ... Sehhaut, H ... Hornhaut, K ... vordere Augenkammern, I ... Iris, P ... Pupille, L ... Linse, M ... Muskel, G ... Glaskörper (Demtröder 2009: 357) 14

Abbildung 13: Schematischer Aufbau von Zapfen und Stäbchen im menschlichen Auge (Demtröder 2009: 374) 15

Abbildung 14: Darstellung der Empfindlichkeit der Zapfen, abhängig von der Wellenlänge. $s(\lambda)$... S-Zapfen, $m(\lambda)$... M-Zapfen, $l(\lambda)$... L-Zapfen (Lübbe 2013: 14) 16

Abbildung 15: Normfarbtafel (siehe auch Kapitel 3.3) und Farbdreieck. WP ist der Weißpunkt. (Vgl. Hasche/Ingwer 2016: 83) 17

Abbildung 16: Additive Farbmischung: Überlagerung der drei Farben Rot, Grün und Blau (Lübbe 2013: 33) 19

Abbildung 17: Subtraktive Farbmischung: weißes Licht wird gefiltert (Lübbe 2013: 33) 21

Abbildung 18: Normfarbtafel: Die Spektralfarben liegen außen am Hufeisen. Durch additive Farbmischung ist die Gesamtheit aller wahrnehmbaren Farben darstellbar. WP ... Weißpunkt (Vgl. Hasche/Ingwer 2016: 83) 22

Abbildung 19: Der Rösch-Farbenraum. Grundfläche (x, y): Farbton und Sättigung, Höhe (Y): Helligkeit (Lübbe 2013: 87) 23

Abbildung 20: Spektrale Helligkeitskurven $V(\lambda)$ für Sehen bei Tageslicht und $V'(\lambda)$ für das Sehen bei Nacht. (Bergmann/Schaefer 2004: 148) 23

Abbildung 21: Vektordarstellung von Farben. Durch additive Mischung zweier Farbvalenzen F_{Blau} und F_{Rot} , ausgehend vom Schwarzpunkt S , entsteht eine neue Farbvalenz F_{Violett} . (Lübbe 2013: 27) 27

Abbildung 22: Der RGB-Farbraum. Drei Basisvektoren R , G und B bilden eine Orthogonalbasis (hier: $R+$, $G+$, $B+$). Jeder Punkt in diesem System gilt als Kombination der drei Basisvektoren. S ... Schwarzpunkt, W ... Weißpunkt (Lübbe 2013: 108) 28

Abbildung 23: 1. Graßmann-Gesetz. Die Farbvalenz F ist eine dreidimensionale Größe, die durch die Basisvektoren R , G und B dargestellt wird. (eigene Darstellung) 28

Abbildung 25: 3. Graßmann-Gesetz. R , G und B bilden die Basis. Wird eine Farbvalenz F mit einer Konstanten c multipliziert, ändert sich nicht die Farbempfindung, sondern nur die Helligkeit. (eigene Darstellung) 29

Abbildung 24: 2. Graßmann-Gesetz. Zwei Farbvalenzen F_1 und F_2 können addiert werden. Die resultierende Farbvalenz F ist unabhängig vom gewählten Weg. R , G und B bilden die Basis. (eigene Darstellung) 29

Abbildung 26: Versuchsaufbau: S ... Lichtquelle, Sp ... Spalt, P ... Dispersionsprisma, L ... Linse, Sp' ... veränderbarer Spalt für die Versuchsdurchführung, F ... Feldlinse, H ... Hilfslinse, L' , Sp'' ... Bild, B ... Bildschirm (Bergmann/Schaefer 1987: 743) 30

Abbildung 27: Beugung am Spalt. Von links kommendes Licht wird am Spalt gebeugt. Wegunterschied Δz zweier Elementarwellensender zum gemeinsamen Punkt P . b ... Spaltbreite, α ... Beugungswinkel (eigene Darstellung nach Jäger 2014: 3) 32

Abbildung 28: Interferenzmuster: Beugungsfigur am Beobachtungsschirm. Dem Maximum in der Mitte gibt man die Ordnung 0. Nach außen gehend werden in beide Richtungen die Maxima mit den Ordnungen 1, 2, ... nummeriert. (Jäger 2014: 2) 33

Abbildung 29: Doppelspalt: Die Beugungsfigur eines Doppelspalts (durchgezogen) wird von der eines Einzelspalts (gepunktet) eingehüllt. Dabei ist die Entfernung l vom Schirm zur Barriere sehr viel größer, als der Spaltabstand g . (Jäger 2014: 7) 34

Abbildung 30: Intensitätsverteilung der Beugungsfigur bei einem Gitter (Jäger 2014: 9) 34

Abbildung 31: Newtonsche Ringe: In diesem Linsensystem durchlaufen zwei parallele Lichtbündel I und II von rechts nach links denselben Punkt P'. Gangunterschiede erzeugen Interferenzen. Die Linse H bildet die Strahlen auf einem Schirm ab, auf dem diese zu sehen sind. (Higatsberger 1977: 620 f) 36

Abbildung 32: Fluoreszenz. a) Singlett Zustand und angeregter Singlett Zustand beschreiben die energetischen Bahnen, auf denen sich die Elektronen im Grundzustand und im erregten Zustand bewegen. Bei Lichtabsorption nehmen die Elektronen die Energie des Lichts auf und geben diese bei Emission wiederum in Form von Licht ab. b) Die Wellenlängenmaxima des absorbierten und des emittierten Lichts werden am 0-0-Übergang näherungsweise gespiegelt. (Vögtle 2007: 186) 39

Abbildung 33: Phosphoreszenz. Angeregte Elektronen springen vom Grundzustand in den angeregten Singlett-Zustand S_1 oder S_2 . Bei phosphoreszierenden Stoffen können die Elektronen dann in den energieniedrigeren Triplett-Zustand fallen, wo sie erst verweilen, bevor sie unter Lichtabgabe wieder in den Grundzustand zurückgehen. $h\nu \dots$ zugeführte/abgestrahlte Energie (Vögtle 2007: 187) 40

Abbildung 34: Plancksches Strahlungsgesetz. Mit zunehmender Temperatur nimmt auch das Maximum der spektralen spezifischen Ausstrahlung zu und verschiebt sich in den kürzeren Wellenlängenbereich. Der sichtbare Wellenlängenbereich (380 – 780 nm) ist markiert. (Lübbe 2013: 6) 45

Abbildung 35: Planckscher Kurvenzug. Der Plancksche Kurvenzug (T_C) lässt sich im Farbhufeisen eintragen. (Stromsparlampen, LED Farbtemperatur) 46

Abbildung 36: Prismenspektrograph. Sowohl Beleuchtungslinse, Kollimatorlinse, als auch Objektiv sind Sammellinsen. Das Prisma spaltet durch Brechung und Dispersion die Wellenlängen der Lichtquelle auf und eine Linse bildet sie auf einer Fotoplatte ab. (Windholz 2013: 58) 48

Abbildung 37: Spektrum des Wasserstoff-Atoms. Die Linienstärke soll die Intensität der Linien andeuten. H_α , H_β und H_γ geben den Linien Bezeichnung und Reihenfolge. Die nebenstehenden Zahlen geben die Wellenlänge an dieser Position an. Die angegebene Einheit ist Ångström: $1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ nm}$ (Windholz 2013: 71) 51

Abbildung 38: Energieniveauschema des Wasserstoff-Atoms. Die Lyman-, Balmer und Paschen-Serie sind abgebildet. Sie zeigen mögliche Energieniveaus, die das Elektron des Wasserstoffatoms

erreichen kann. Diese sind charakteristisch für die Atomschalen. Die Balmer-Serie ist die einzige, die auch sichtbare Wellenlängen abstrahlt. Die drei sichtbaren Wellenlängen sind mit H_α , H_β und H_γ gekennzeichnet. (Stuart/Klages 2010: 267) 52

Abbildung 39: Eisenspektrum. Das Emissionsspektrum von Eisenatomen besitzt viele Spektrallinien im roten, grünen und blauen Bereich. (Abiweb, Atomspektren) 52

Abbildung 40: Emissionsspektrum von Quecksilber-Atomen unter Niederdruck. Die spiegelsymmetrische Zerlegung erfolgte durch ein Gitter. Daher ist die Abbildung redundant: Die mittlere, weiße Linie ist die Beugung 0-ter Ordnung und ist zu vernachlässigen. Jeweils rechts und links von ihr sieht man die Zerlegungen. (Physikunterricht-online, Untersuchung des Spektrums einer Quecksilberdampfampe) 54

Abbildung 41: Spektrum einer Natriumdampfampe. Die Natrium-D-Linie besteht eigentlich aus zwei sehr nahe beieinanderliegenden Spektrallinien. (Fornoff 2011, Das Spektrum der Sonne) 55

Abbildung 42: Testfarben zur Farbwiedergabe. Die ersten acht der 14 Testfarben wurden zur Bestimmung des R_a -Wertes herangezogen. Die Farben entsprechen der DIN 6169 (Deutsches Institut für Normung) (Lübbe 2013: 124) 56

Abbildung 43: Absorptionsspektrum der Sonne. Aus einem kontinuierlichen Spektrum werden einzelne Wellenlängenbereiche gefiltert; schwarze Linien bleiben übrig. (Osterhage 2014: 51) 57

Abbildung 44: Spektrale Bestrahlungsstärke der Sonne zur Wellenlänge (extraterrestrisch und an der Erdoberfläche). Näherungsweise nimmt die extraterrestrische spektrale Bestrahlungsstärke der Sonne die Funktionsform eines idealen Schwarzen Körpers (siehe auch Abbildung 34) an. Die Atmosphäre absorbiert große Teile der Strahlung, bis es auf die Erdoberfläche trifft. (Bergmann/Schaefer 2004: 653) 57

Abbildung 45: Thermschema von Lithium. (Jüstel/Schwung 2016: 99) 59

Abbildung 46: Glimmentladung eines Geissler-Röhrchens. K ist die Kathode, A die Anode. Jede Erscheinung im Röhrchen besitzt einen Namen, den Meschede unter a – k angibt. Hier wird darauf verzichtet. (Meschede 2010: 485) 62

12 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Standard-LEDs in unterschiedlichen Farben (Materialien) und Betriebsspannung. (Vgl. Elektronik Kompendium, Standard-LEDs) 43

Tabelle 2: Farbwiedergabe-Index einiger Lampen. (Lübbe 2013: 125) 56

Tabelle 3: Elemente und deren abgegebene Lichtfarbe beim Experiment Flammenfärbung. (Welsch/Liebmann 2012: 300) 58

13 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Å ... Angström

ao. Strahlen ... außerordentliche Strahlen

CD ... Compact Disc

CO₂ ... Kohlenstoffdioxid

ebd ... ebenda

eV ... Elektronenvolt

f ... und die folgende Seite

ff ... und folgende Seiten

GHz ... Gigahertz

h ... Plancksches Wirkungsquantum

Hg ... Quecksilber

IR ... Infrarot

J ... Joule

k ... Boltzmann-Konstante

kV ... Kilovolt

LCD ... Liquid Crystal Display

LED ... Light Emitting Diode

mbar ... Millibar

mm ... Millimeter

µm ... Mikrometer

Na ... Natrium

nm ... Nanometer

o. Strahlen ... ordentliche Strahlen

RGB ... Rot-Grün-Blau

spez ... spezifisch

Spot ... Spotlight

UV ... Ultraviolett

Vgl ... vergleiche

14 FORMELVERZEICHNIS

Lichtintensität nach Durchlauf eines Polarisators $I = I_0 \cos^2(\alpha)$ (F. 1)

Optisches Drehvermögen $\alpha = d \cdot \alpha_{spez}$ (F. 2)

Optisches Drehvermögen: Berechnung des Winkels α $\alpha = 90 - \alpha'$ (F. 3)

Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht im Medium mit Brechungsindex n $v = \frac{c}{n} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$ (F. 4)

Farbvalenz 1 $\vec{F}_{Rot} = R_M \vec{R}$ (F. 5)

Farbvalenz 2 $\vec{F}_{Blau} = B_M \vec{B}$ (F. 6)

Mischfarbe aus Farbvalenz 1 und 2 $\vec{F}_{Violett} = \vec{F}_{Rot} + \vec{F}_{Blau}$ (F. 7)

Gangunterschied zu einem Punkt P von zwei Elementarwellensendern $\Delta z = \frac{b}{2} \sin \alpha$ (F. 8)

Bragg-Bedingung $n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin(\theta)$ (F. 9)

Energie $E = h \cdot \nu$ (F. 10)

Emissionsvermögen eines Körpers $E = \frac{\text{Strahlungsleistung}}{\text{strahlende Fläche}} \text{ [Watt/m}^2\text{]}$ (F. 11)

Absorptionsvermögen eines Körpers $A = \frac{\text{absorbierte Strahlungsenergie}}{\text{auftreffende Strahlungsenergie}}$ (F. 12)

Spektrale spezifische Ausstrahlung nach dem Planckschen Strahlungsgesetz $M(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \text{ [W/(m}^2 \mu\text{m)]}$ (F. 13)

Ideale Gasgleichung $p V = \nu R T$ (F. 14)

15 REGISTER

- 0-0 Übergang 39
Absorptionsspektrum 47, 56
Absorptionsvermögen 44
additive Farbmischung 16
Analysator 5
Auflösungsvermögen 35
äußere Farbmischung 27
außerordentlicher Strahl 9
Austrittsarbeit 52
Beugungsfigur 33
Beugungsscheibchen 33
Beugungswinkel 35
Biolumineszenz 42
Bragg-Bedingung 37
Brechung 12
Brechungsindex 12
dichroitische Kristalle 10
diskretes Spektrum 47
Dispersion 12
Doppelbrecherkristalle 9
dotierte Materialien 42
elektrische Dipole 7
elektrisches und magnetisches Feld 3
Elektrolumineszenz 38
Elektronenvolt 52
Elektronische Halbleiter 42
Elementarwellensender 32
Emissionsspektrum 56
Emissionsvermögen 44
Facettenaugen 25
Farbart 26
Farbdreieck 17
Farbhufeisen 22
Farbmetrik 26
Farbreiz 16
Farbton 22
Farbvalenz 16
Farbwert 26
Farbwiedergabe 55
Flackerlampen 63
Fractolumineszenz 43
Fraunhofer Linien 45
Gasentladung 49
Gasentladungslampen 61
Geissler-Röhren 62
Gitterspektrograph 47
Glimmentladung 54, 62
Glowwendel 48
Graßmann-Gesetze 17
Helligkeit 23
Inertgase 61
innere Farbmischung 27
Interferenzmuster 33
Ionen 50
Ionisierungsenergie 52
Kirchhoffsche Strahlungsgesetz 44
Kompensationsfarben 30
Komplementärfarben 30
kontinuierliches Spektrum 47
LEDs 42
lineare Polarisation 3
Linienspektrum 47
Linienverbreiterung 53
Linsenaugen 25
Lochkameraaugen 25
Lumineszenz 38
Mach-Zehnder Interferometer 2
Mechanolumineszenz 38
Mikrowellenherd 61
Nicolisches Prisma 10
Normfarbtafel 17
Optimalfarben 23
optisch dichteres Medium 13
optisch dünneres Medium 13
optisch isotrope Medien 9
optische Achse 9
optische Anisotropie 9
ordentlichen Lichtstrahl 9
Phosphoreszenz 40
Piezolumineszenz 43
Plancksches Wirkungsquantum 38
Planckscher Kurvenzug 46
Plancksches Strahlungsgesetz 45
Plasma 47, 50
Polarisatoren 3
Primärfarben 19
Prismenspektrograph 47
Purpurgrade 22
Quecksilberdampf Lampe 53
Radiolumineszenz 38
Rekombination 43
RGB-Farbraum 28
Rösch-Farbenraum 23
Sättigung 22
Schwarzer Körper 44
Schwarzpunkt 26
Sekundärfarben 19
Seriegrenze 52
spektrale Helligkeitsempfindung 23
spektrale spezifische Ausstrahlung 45
spezifisches Drehvermögen 5
Stokes-Verschiebung 39
subtraktive Farbmischung 20
Temperaturstrahlung 44
Thermolumineszenz 38
Tribolumineszenz 43
Triplet-Zustand 40
Weißer Körper 44
Weißpunkt 17
Wellenoptik 32
Wellenzahl 51
Wiensches Verschiebungsgesetz 45
Youngscher Doppelspaltversuch 34
Zapfen- und Stäbchen-Zellen 15
zirkulare u. elliptische Polarisation 3