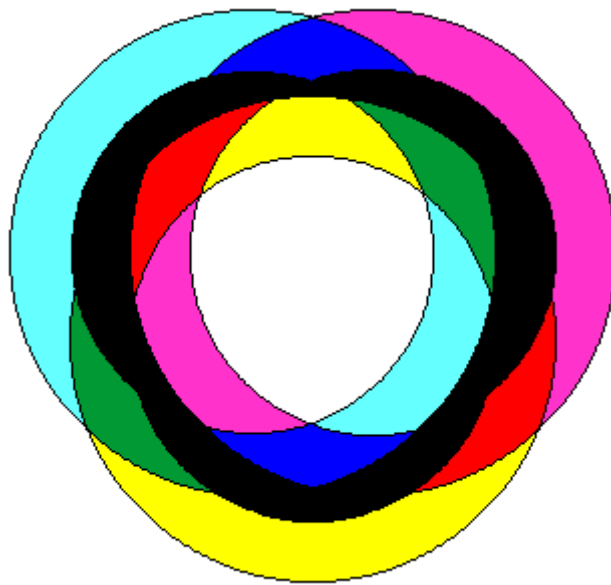


# Licht und Schatten

(A. Reichert)



# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Inhaltsverzeichnis</b> .....        | <b>2</b>  |
| <b>1. Einleitung</b> .....             | <b>3</b>  |
| <b>2. Grundlagen</b> .....             | <b>4</b>  |
| 2.1 Schatten .....                     | 4         |
| 2.2 Optische Abbildung .....           | 7         |
| 2.3 Beugung .....                      | 8         |
| 2.4 Brechung .....                     | 11        |
| 2.5 Farbsysteme .....                  | 12        |
| <b>3. LED/RGB-Lampe</b> .....          | <b>16</b> |
| 3.1 Aufbau der Lampe .....             | 16        |
| 3.2 Benötigte Teile .....              | 17        |
| 3.3 Bau der Lampe .....                | 17        |
| <b>4. Versuche</b> .....               | <b>20</b> |
| 4.1 Farbfernseher .....                | 20        |
| 4.2 Kern-/Halbschatten .....           | 21        |
| 4.3 Farbige Schatten .....             | 22        |
| 4.4 Lochkamera .....                   | 25        |
| 4.5 Optische Abbildung mit Linse ..... | 26        |
| 4.6 Beugung am Gitter .....            | 27        |
| 4.7 Brechung am Prisma .....           | 29        |
| 4.8 Optische Hebung .....              | 29        |

# 1. Einleitung

Das Auge ist neben dem Ohr unser wichtigstes Fenster zur Welt. In beiden Fällen empfangen wir Informationen aus unserer Umwelt mit Hilfe von Wellen. Physikalisch ist Licht eine elektromagnetische Welle mit faszinierenden Eigenschaften, die sich zum größten Teil mit wenig Aufwand im Schulunterricht untersuchen lassen. Es wirft Schatten und existiert in verschiedenen Farben. Schatten beruhen auf zwei wichtigen Eigenschaften des Lichtes. Zum einen breitet es sich geradlinig aus, zum anderen kann es nicht alle Gegenstände durchdringen. Daher gehört das Thema Schatten zum absoluten Pflichtkanon in Klasse 6, zumal Schatten uns im alltäglichen Leben auf vielfältige Weise begegnen. Ist es zu warm, so sucht man sich ein schattiges Plätzchen, Mond- und Sonnenfinsternis sind riesige Schattenspiele am Firmament, Sonnenuhren zeigen durch den Schatten eines Stabes die Zeit an. Und Schattenspiele mit den Händen sind bei Schülerinnen und Schülern sehr beliebt, weil sie dabei ihrer Fantasie freien Lauf lassen können. Man braucht eine helle, nahezu punktförmige LED-Lichtquelle. LEDs erfüllen diese Bedingung in fast idealer Weise. Die Begeisterung lässt sich steigern, wenn man Schatten in allen erdenklichen Farben an die Leinwand zaubert. Man benötigt eine RGB-Lampe, denn mit den Grundfarben rot, grün und blau lassen sich viele verschiedene Farben erzeugen, wie das Farbfernsehen und die moderne Farbfotographie eindrucksvoll beweisen. Gleichzeitig erfahren die Schüler eine Menge über additive und subtraktive Farbmischungen, die in der Kunst von zentraler Bedeutung sind. Mit einem Prisma oder einem optischen Gitter kann man das Licht einer weißen LED in seine Farben zerlegen und die Wellenlängen der unterschiedlichen Farben bestimmen. Beide Themen gehören zum Pflichtprogramm in der Oberstufe. Ordnet man die weißen LEDs in Form einer Eins an, so kann man mit der Lampe die Gesetze der optischen Abbildung überprüfen. Sie werden in der Mittelstufe behandelt.

Aus modernen superhellen weißen LEDs und einer roten, grünen und blauen LED kann man mit etwas Bastelerfahrung die benötigte LED/RGB-Lampe selbst herstellen. Daher bietet sich der Bau der Lampe als fächerübergreifendes Projekt an, zumal im Fach Kunst auch häufig Werken auf dem Lehrplan steht.

Stolberg, im März 2017

## 2. Grundlagen

### 2.1 Schatten

Licht ist eine elektromagnetische Welle mit einer Wellenlänge zwischen 400 nm und 800 nm. Eine ebene schmale Lichtwelle kann man sich wie einen Strahl vorstellen, der sich geradlinig ausbreitet. Lichtstrahlen können nicht alle Stoffe durchdringen. Sie werden von einigen ganz oder teilweise absorbiert. Hinter Gegenständen aus diesen Stoffen kommt kein Licht oder weniger Licht an. Es entsteht ein Schattenraum, der nur durch Streulicht und damit weniger hell ausgeleuchtet ist als die Umgebung. Stellt man in diesen Schattenraum einen Schirm, so beobachtet man auf ihm ein Abbild des Schattenraumes, das Schattenbild. Das Schattenbild ist umso größer, je näher sich der Gegenstand an der Lampe befindet, je größer er ist und je weiter der Schirm vom Gegenstand entfernt ist. Der Schatten ist besonders scharf oder hart, wenn man eine punktförmige Lichtquelle benutzt. Solche Lampen werden bei Schattenspielen eingesetzt.

Benutzt man gleichzeitig zwei Lampen, die nahe beieinander liegen, so tritt ein Kernschatten und rechts und links davon je ein Halbschatten auf (s. Abb.1).

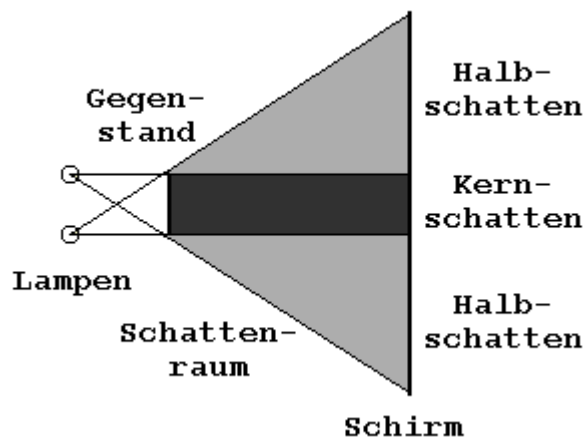
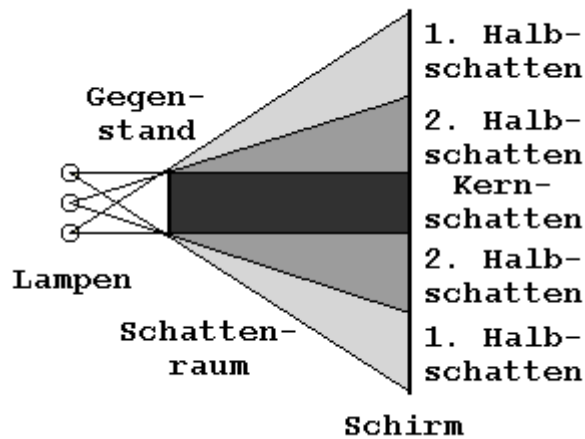


Abb.1: Schatten zweier Lampen

In den Kernschattenbereich fällt kein Licht, da er im Schattenraum beider Lampen liegt. Den oberen Halbschatten erreicht das Licht der oberen Lampe, nicht aber das der unteren Lampe. Beim unteren Halbschatten ist es genau umgekehrt. Liegen die beiden Lampen weit auseinander oder ist der Gegenstand klein gegenüber dem Abstand der beiden Lampen, so beobachtet man keinen Kernschatten. Die beiden Halbschatten überlagern sich nicht. Erhöht man die Zahl der Lampen auf drei, so kommen neue hellere Halbschatten hinzu (s. Abb.2). Der Kernschatten ist nach wie vor dunkel, da ihn das Licht keiner Lampe erreicht. Die nahe am Kernschatten liegenden, dunkleren Halbschatten werden nur vom Licht einer Lampe ausgeleuchtet, die nach außen

angrenzenden, helleren von jeweils zwei der drei Lampen. Die Umgebung ist hell, da sie vom Licht aller drei Lampen angestrahlt wird.



**Abb.2: Schatten dreier Lampen**

Ausgedehnte Lichtquellen werfen unscharfe, weiche Schatten, da man sich die Lichtquelle aus vielen nebeneinander liegenden Lichtpunkten zusammen gesetzt denken kann. Es entsteht ein Schatten, der von der Mitte aus nach beiden Seiten allmählich heller wird. Eine scharfe Schattengrenze ist nicht mehr zu erkennen. Solche Schatten sind bei der Deckenbeleuchtung erwünscht, da die scharfen Schatten punktförmiger Lichtquellen das Wohnklima sehr stören. Daher verwendet man gerne Mattglaslampen oder LED-Clusterlampen aus einer Vielzahl von LEDs.

Benutzt man zwei farbige Lampen, so erscheint der Hintergrund in der Mischfarbe, der Kernschatten schwarz. Der obere Halbschatten hat die Farbe der oberen Lampe, der untere die der unteren Lampe. In Abb.3 sehen Sie die Ergebnisse für die Farbkombinationen rot, grün und blau.

Verwendet man gleichzeitig drei Lampen in den Farben rot, grün und blau, die auf einer Linie angeordnet sind, so beobachtet man je nach Anordnung der Lampen Halbschatten in den Farben rot, grün, blau, magenta, cyan oder gelb (s. Abb.4). Der rote, grüne bzw. blaue Halbschatten entsteht da, wo nur das Licht der roten, grünen bzw. blauen Lampe hinfällt. Einen cyanfarbenen Halbschatten beobachtet man, wenn sich das Licht der grünen und blauen Lampe überlagert, einen magentafarbenen an der Stelle, wo sich die roten und blauen Strahlen treffen. In einem gelben Halbschatten vermischen sich das rote und das grüne Licht. Der Kernschatten ist schwarz und die Umgebung weiß, da die drei Grundfarben bei gleicher Helligkeit weiß ergeben.

Ordnet man die Lampen in der Form eines Dreieckes an, so ist der Kernschatten gleichzeitig von sechs Halbschatten in den genannten Farben umgeben.

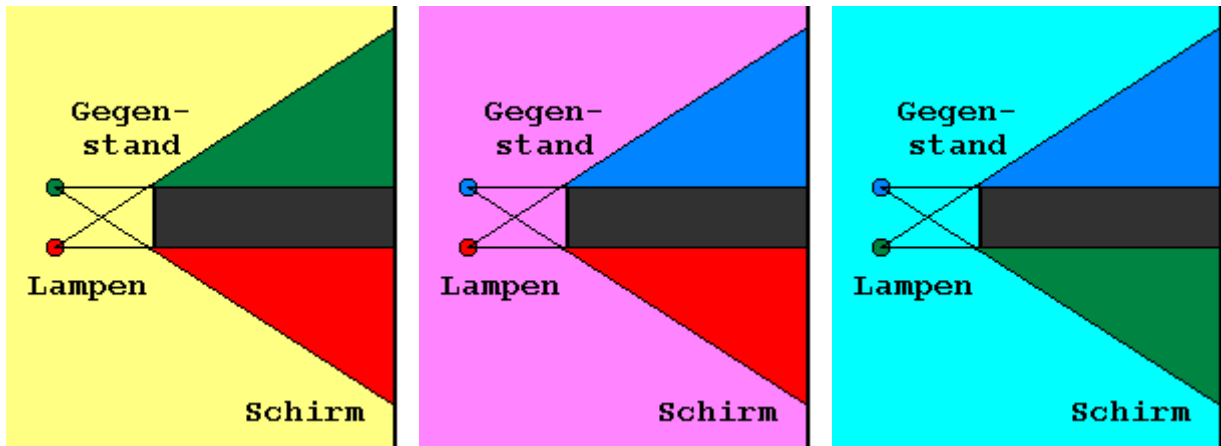


Abb.3: Schatten zweier farbiger Lampen

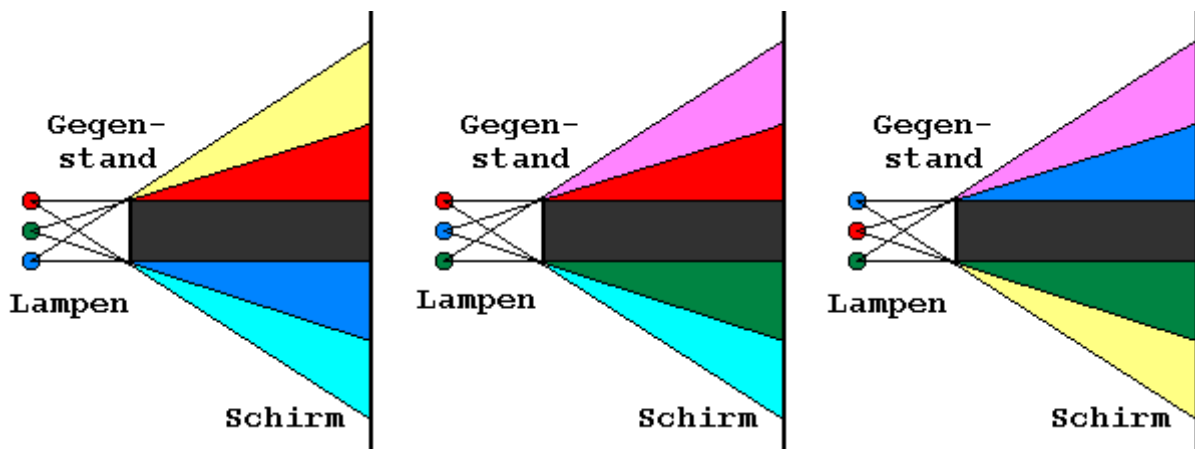


Abb.4: Schatten dreier farbiger Lampen

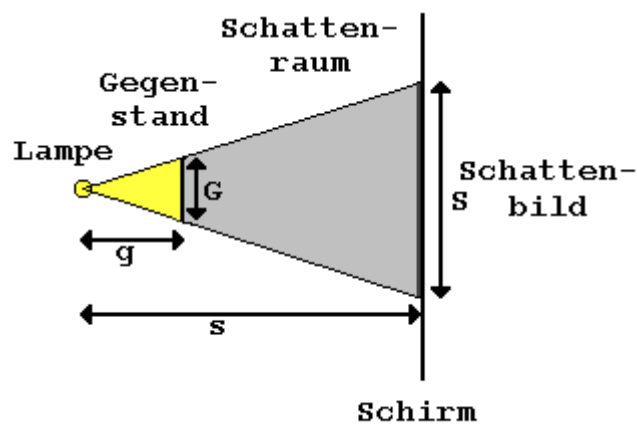


Abb.5: Schattengesetz

Steht die Schatten werfende Fläche parallel zum Schirm und erzeugt man den Schatten mit einer punktförmigen Lichtquelle, so gilt für die Größe  $S$  des Schattenbildes auf dem Schirm folgende einfache geometrische Beziehung (s. Abb.5):

$$\frac{S}{G} = \frac{s}{g}$$

Darin ist  $G$  die Höhe bzw. Breite des Gegenstandes, der den Schatten erzeugt und  $S$  die Höhe bzw. die Breite des Schattenbildes. Mit  $s$  ist die Entfernung des Schattenbildes von der Lichtquelle und mit  $g$  die Entfernung Lichtquelle Gegenstand gemeint.

## 2.2 Optische Abbildung

Jeder Punkt eines leuchtenden Gegenstandes sendet ein Lichtbündel aus. Treffen die einzelnen Bündel auf einen Schirm, so überlagern sie sich und ergeben eine einheitlich ausgeleuchtete Fläche (s. Abb.1). Sorgt man dafür, dass das Licht, das von einem Gegenstandspunkt ausgeht, nur einen Punkt auf dem Schirm anstrahlt, so erhält man ein Abbild des Gegenstandes auf dem Schirm. Das kann man einerseits erreichen, indem man aus jedem Lichtbündel durch eine Lochblende nur wenige Strahlen ausblendet, die auf dem Schirm einen kleinen Lichtfleck hinterlassen (s. Abb.2). Andererseits kann man die einzelnen divergenten Lichtbündel durch eine Linse in je einem Punkt sammeln (s. Abb.3).

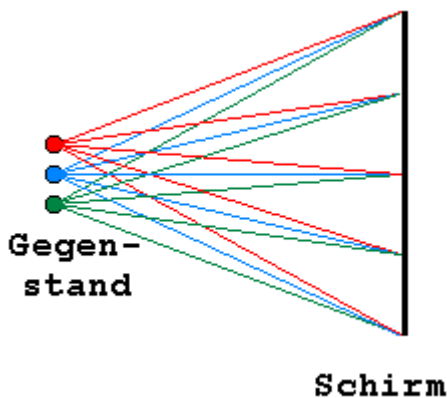


Abb.1: Bestrahlung einer Fläche

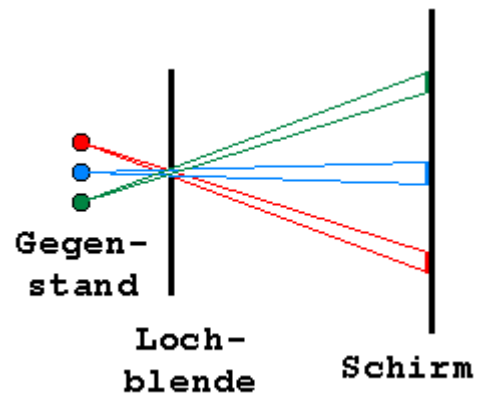


Abb.2: Abbildung mit einer Lochblende

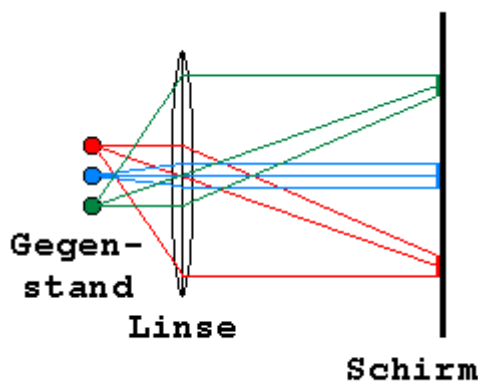


Abb.3: Abbildung mit einer Linse

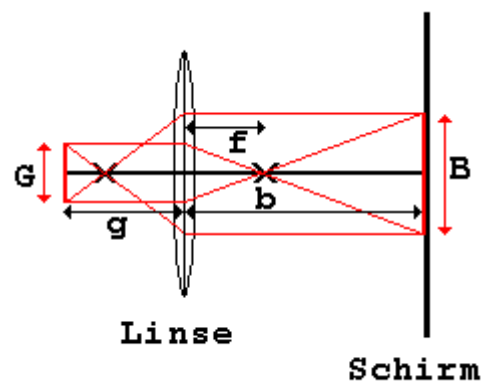


Abb.4: Abbildungsgesetze

## Linse

Beide Verfahren haben Vor- und Nachteile. Weil mit einer Lochblende nur ein geringer Teil des vom Gegenstandspunkt ausgehenden Lichtes ausgenutzt wird, ist das Bild lichtschwach. Außerdem können sich die einzelnen Bildpunkte auf dem Schirm überlagern. Das Bild wird unscharf. Dafür ist der apparative Aufwand sehr gering. Die erste Kamera, mit der man Bilder erzeugen konnte, camera obscura genannt, funktionierte nach diesem Prinzip. Verwendet man eine Linse, so ist das Bild lichtstärker und beim richtigen Abstand zwischen Linse und Schirm scharf. In beiden Fällen steht das Bild auf dem Kopf und ist seitenverkehrt, da Licht sich geradlinig ausbreitet. Um auf ein aufrechtes, seitenrichtiges Bild zu erhalten, kann man eine zweite Linse benutzen, oder man hält das Bild auf einer Fotoplatte oder einem Display fest, die man bei der Betrachtung einfach umdrehen kann. Für beide Abbildungsverfahren gilt das Abbildungsgesetz:

$$\frac{G}{B} = \frac{g}{b}.$$

Darin ist G die Gegenstandsgröße, B die Bildgröße, g die Gegenstandsweite und b die Bildweite (s. Abb.4). Verwendet man eine Linse, so gilt außerdem die Linsengleichung mit f als Brennweite der Linse:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}.$$

In vielen Geräten werden Bilder mit Linsen, Objektive genannt, erzeugt, etwa im Beamer, im Diaprojektor, im Auge, in Kameras, in Ferngläsern usw. Moderne Zoomobjektive bestehen meist aus zahlreichen Linsen, um die Brennweite ändern zu können und um Abbildungsfehler wie Verzerrungen und Farbfehler zu vermeiden.

### 2.3 Beugung

Stellt man in eine ebene räumlich begrenzte elektromagnetische Welle mit einheitlicher Frequenz eine schmale Spaltblende, deren Breite im Bereich der Wellenlänge der EM-Welle liegt, so beobachtet man hinter der Blende eine kreisförmige Wellenfront. Auf einem Schirm hinterlässt sie einen kreisförmigen Fleck, der einen größeren Durchmesser hat als das ursprüngliche Wellenbündel. Er ist rechts und links von Stellen umgeben, in denen man keine Teilwelle empfangen kann. Dazwischen liegen Stellen, an denen Empfang möglich ist. Diese Bereiche heißen Minima und Maxima. Man sagt, die EM-Welle wurde beim Durchgang durch die Blende gebeugt. Nach Huygens ist jeder Punkt des



Spaltes Ausgangspunkt einer Elementarwelle, die sich überlagern und ein Interferenzmuster ergeben, das sich durch Maxima und Minima auszeichnet. Enthält die Blende mehrere Spaltöffnungen, so interferieren die Elementarwellen aller Spalte miteinander und ergeben ein Interferenzmuster mit Maxima und Minima. Diese Muster lassen sich berechnen, wenn man die Intensität der einzelnen Elementarwellen unter Berücksichtigung ihrer Phasenverschiebung addiert. Die Herleitung der so erhaltenen Formel findet man in vielen Hochschullehrbüchern<sup>2)</sup>. Das Ergebnis lautet:

$$I = I_0 * \left( \frac{\sin(\pi b \sin \frac{\alpha}{\lambda}) * \sin(n \pi g \sin \frac{\alpha}{\lambda})}{\pi b \sin \frac{\alpha}{\lambda} * \sin(\pi g \sin \frac{\alpha}{\lambda})} \right)^2.$$

Darin bedeuten:

I: Intensität in Abhängigkeit vom Beugungswinkel  $\alpha$

$I_0$ : Intensität bei  $\alpha = 0^\circ$

b: Breite eines Spaltes in m

g: Abstand zweier Spalte in m

$\lambda$ : Wellenlänge in m

n: Anzahl der Spalte.

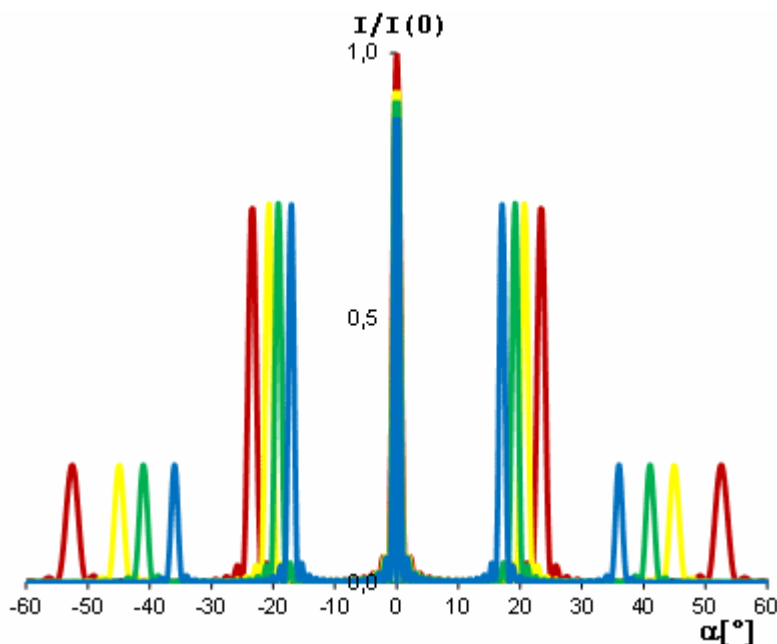


Abb.1: Auswertung mit Excel

Auswerten lässt sich die sehr komplizierte Formel nur mit Computerprogrammen, etwa Excel. Man kann für verschiedene Spaltanzahlen, Spaltbreiten, Spaltabstände und Wellenlängen die Intensitätsverteilung berechnen und graphisch darstellen, bei Bedarf auch für mehrere Wellenlängen gleichzeitig, etwa bei weißen Lichtquellen (s. Abb.1). Man erkennt, dass die Winkel, unter denen Maxima und Minima auftreten, von der Wellenlänge

der EM-Welle abhängen. Blaues Licht wird weniger gebeugt als rotes Licht. Weißes Licht wird bei Beugung und Interferenz in seine Farben aufgespalten. Nur das Hauptmaximum erscheint weiß, da sich dort alle Farben überlagern.

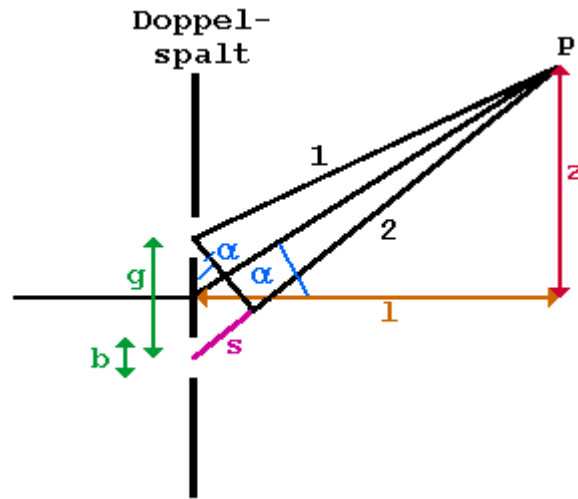


Abb.2: Beugung am Doppelspalt

Mit einfachen geometrischen Überlegungen, wie man sie in jedem Physikoerberstufenbuch<sup>1)</sup> findet, lassen sich Formeln herleiten für die Winkel, unter denen man Maxima und Minima beim Spalt, Doppelspalt und Gitter beobachtet. Sie werden in der Schule meist benutzt, um die Wellenlänge verschiedener EM-Wellen zu bestimmen. Die Überlegungen lassen sich am einfachsten am Beispiel des Doppelspaltes erläutern. Betrachten Sie dazu Abb.2. Die Ziffern 1 und 2 bezeichnen die Wellennormalen der Elementarwellen, die von den Mitten der beiden Spalte ausgehen. Man liest ab:

$$\sin \alpha = \frac{s}{g}$$

$$\tan \alpha = \frac{z}{l}$$

Damit sich die beiden Elementarwellen im Punkt P verstärken, muss für ihren Gangunterschied  $s$

$$s = k * \lambda$$

gelten, damit sie sich auslöschen, muss

$$s = (2k + 1) * \lambda / 2$$

sein mit

$$k = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Für die anderen Elementarwellen der beiden Spalten gelten die gleichen Bedingungen, wenn man die jeweils passenden Elementarwellen beider Spalte miteinander kombiniert. Damit beobachtet man Maxima unter Winkeln, für die gilt:

$$\sin \alpha_k = k * \frac{\lambda}{g}$$

$$\tan \alpha_k = \frac{z}{l}$$

und Minima unter Winkeln, für die gilt:

$$\sin \alpha_k = (2k + 1) * \frac{\lambda}{2g}$$

$$\tan \alpha_k = \frac{z}{l}.$$

Darin bedeuten:

$\alpha_k$ : Winkel des Nebenmaximums/Nebenminimums k. Ordnung

k: Ordnung des Nebenmaximums/Nebenminimums

$\lambda$ : Wellenlänge

g: Gitterkonstante

z: Abstand des Nebenmaximums/Nebenminimums vom Hauptmaximum

l: Entfernung Gitter-Schirm.

Die gleichen Formeln ergeben sich für die Beugung an einem Gitter aus einer Vielzahl von Spalten.

Beugung tritt auch auf, wenn eine schmale ebene EM-Welle an einem Gegenstand mit schmalen Stegen, die wie bei einer CD nahe beieinanderliegen, reflektiert wird. Es gelten die gleichen mathematischen Gesetze wie bei der Beugung an einem Transparenzgitter. Nach Huygens breiten sich die Elementarwellen in alle Richtungen aus, also auch rückwärts in Richtung des einfallenden Strahles. Daher beobachtet man bei einem durchscheinenden Gitter aus Glas ein Transparenz- und ein Reflexionspektrum.

## 2.4 Brechung

Geht eine ebene EM-Welle von einem Medium in ein anderes über, so ändert sich ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit. Das hat zur Folge, dass sie aus ihrer Richtung abgelenkt wird. Sie wird gebrochen. Der Winkel zwischen dem einfallenden Strahl und dem Lot, Einfallswinkel genannt, und zwischen dem gebrochenen Strahl und dem Lot, als Brechungswinkel bezeichnet, sind nicht

gleich. Mit Hilfe der Huygenschen Prinzipien lässt sich ein Gesetz herleiten, das den Vorgang quantitativ beschreibt, das Brechungsgesetz. Es lautet:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = n.$$

Darin bedeuten:

$\alpha$ : Einfallswinkel

$\beta$ : Brechungswinkel

$c_1$ : Wellengeschwindigkeit im 1. Medium

$c_2$ : Wellengeschwindigkeit im 2. Medium

$n$ : Brechungsindex.

Die Herleitung findet man in jedem Physikoberstufenbuch<sup>1)</sup>. Da die Geschwindigkeit der EM-Wellen in vielen Stoffen auch von der Wellenlänge abhängt, wird z.B. weißes Licht bei der Brechung in seine Farben aufgespalten. Diese Erscheinung nennt man Dispersion. Sie lässt sich experimentell am einfachsten mit einem Prisma zeigen. Ist die Geschwindigkeit im zweiten Medium größer als im Medium, aus dem die EM-Welle auf die Grenzfläche trifft, so übersteigt der Brechungswinkel den Einfallswinkel. Die Wellennormale wird vom Lot weg gebrochen und nicht wie beim umgekehrten Vorgang zum Lot hin. Ab einem bestimmten Einfallswinkel müsste der Brechungswinkel größer als  $90^\circ$  sein, die EM-Welle tritt nicht mehr ins zweite Medium ein, sondern verbleibt im ersten. Sie wird an der Grenzfläche nach dem Reflexionsgesetz reflektiert. Da ein Teil der EM-Welle auch schon bei kleineren Winkeln an der Grenzfläche reflektiert wird, spricht man ab dem Grenzwinkel von Totalreflexion. Sie wird z.B. in Lichtleitern ausgenutzt. Für den Grenzwinkel der Totalreflexion gilt nach dem Brechungsgesetz mit  $\alpha = 90^\circ$

$$\sin \beta_g = \frac{1}{n},$$

denn der Lichtweg ist umkehrbar. Für den Übergang Glas-Luft gilt das gleiche Gesetz wie für den Übergang Luft-Glas. Es sind nur die Winkel vertauscht.  $\beta$  entspricht im Gesetz dem Einfallswinkel,  $\alpha$  dem Brechungswinkel.

## 2.5 Farbsysteme

Farben sind rein physikalisch betrachtet elektromagnetische Lichtwellen einer bestimmten Wellenlänge, wobei die Wellenlängen zwischen etwa 400 nm bei violett und etwa 800 nm bei rot liegen können. Farbeindrücke in Natur und Technik bestehen jedoch in den seltensten Fällen aus nur einer Wellenlänge, vielmehr stellen sie eine Mischung diverser Frequenzen dar. Das

macht es so schwierig, sie exakt messtechnisch zu erfassen. Es wurden mehrere metrische Farbsysteme entwickelt, die in verschiedenen Bereichen angewendet werden.

In der Digitaltechnik, also bei Bildschirmen, Farbfernsehern, Digitalkameras und Beamer, wird fast ausschließlich das RGB-System benutzt. Aber auch unser Auge arbeitet nach diesem System. Man spricht von Trichromatismus oder Dreifarbenlehre. Überlagert man die Grundfarben rot (R), grün (G) und blau (B) in verschiedenen Anteilen, so ergeben sich viele verschiedene Farbtöne. Meist können die drei Farben in jeweils 256 verschiedenen Intensitäten ausgewählt werden. Daraus ergeben sich

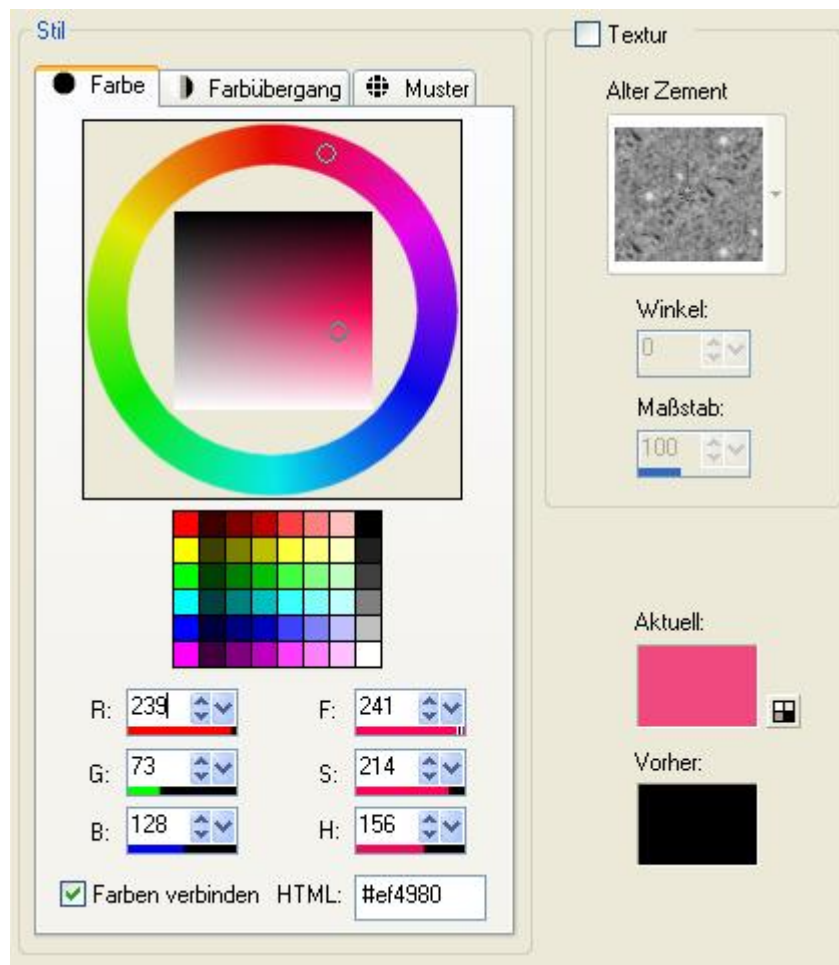
$$z = 256^3$$
$$= 16777216$$

mögliche Farbeindrücke. Man nennt das Verfahren additive Farbmischung. Mit jedem guten Graphikprogramm (s. Abb.1) lassen sich die Farbanteile der Grundfarben von 0 - 255 getrennt einstellen, so dass man die z Farben nach Bedarf mischen kann.

Besitzen die drei Grundfarben jeweils ihre maximale Intensität, so ergeben sie weiß, bei der Intensität null schwarz. Rot und grün liefern bei voller Intensität gelb, rot und blau magenta und grün und blau cyan. Auch Farbübergänge und Farbmuster (s. Abb.1) lassen sich auswählen, so dass man Zeichnungen und Abbildungen sehr variabel gestalten kann. Ein bisschen probieren mit einem solchen Programm lohnt auf jeden Fall, zumal man erst dann ein Gefühl für die vielfältigen Möglichkeiten bekommt, die moderne Graphikprogramme zu bieten haben.

Aus den Mischfarben cyan, gelb und magenta lassen sich ihrerseits durch subtraktive Farbmischung sehr viele Farbtöne erzeugen. Jede absorbiert ein Drittel des Farbspektrums je nach Intensität mehr oder weniger stark, gelb den blauen und violetten Anteil, magenta den grünen und gelben Anteil und cyan den roten und orangen Anteil. Gelb und Magenta überlagern sich daher zu rot, cyan und magenta zu blau und gelb und cyan zu grün. Zusammen ergeben sie rein theoretisch schwarz, allerdings bei realen Druckvorgängen in Farbdruckern eher dunkelgrau. Um ein sauberes Schwarz zu erhalten, besitzen die Farbdrucker somit vier Patronen mit den Farben cyan, gelb, magenta und schwarz. Man spricht vom CYMK-Farbmodell, wobei C für Cyan, Y für Yellow, M für Magenta und K für Key(Schwarz) steht. Die Farbräume der beiden Farbsysteme stimmen nicht genau überein. Der RGB-Farbraum umfasst mehr Farben als der CYMK-Farbraum, jedoch sind nicht alle Farben des CYMK-Raums auch im RGB-Raum enthalten und umgekehrt. Deshalb kommt es immer wieder zu Farbproblemen, wenn man Bilder aus der Digital-

kamera oder vom Bildschirm ausdruckt. Die Druckereien können davon ein Lied singen.



**Abb.1: Farbeingabefeld eines Graphikprogramms**

Das menschliche Auge kann sehr viele Farbtöne unterscheiden, die von den beiden Systemen nicht erfasst werden. Daher werden die verschiedenen Farben manchmal auch über die drei Werte Farbton (engl. hue), Sättigung (engl. saturation) und Helligkeit (engl. lightness) definiert, da das menschliche Auge Farben aufgrund dieser Eigenschaften erkennt (s. Abb.1). Man erhält so das HSL-Farbsystem.

Für Internetseiten verwendet man eine weitere Farbcodierung, wie man Abb.1 entnehmen kann. Dabei werden die drei Farbwerte des RGB-Systems in einem speziellen HTML-Code zusammengefasst. Man wandelt die Werte für R, G und B in Hexadezimalzahlen um und hängt sie aneinander. Als Führungszeichen dient das Zeichen #. So erhält man aus

***RGB(239,73,128)***

***#ef4980,***

da

$$239 = 14 * 16 + 15$$

$$73 = 4 * 16 + 9 \textit{ und}$$

$$128 = 8 * 16 + 0$$

ist.

Auf diese Weise lassen sich alle RGB-Werte in HTML-Code umrechnen, allerdings ist die Zahl der websicheren Farben auf 216 begrenzt, da die Farbtiefe auf älteren Computern oder Minicomputern aus speichertechnischen Gründen oft nur 6 bit, also 216 Farben, beträgt. Dafür ist der Farbeindruck für diese Farben auf allen Computersystemen garantiert gleich.

### 3. LED/RGB-Lampe

#### 3.1 Aufbau der Lampe

Abb.1 zeigt den Schaltplan der LED-Lampe und Abb.2 die Verschaltung auf einer Lochrasterplatine.

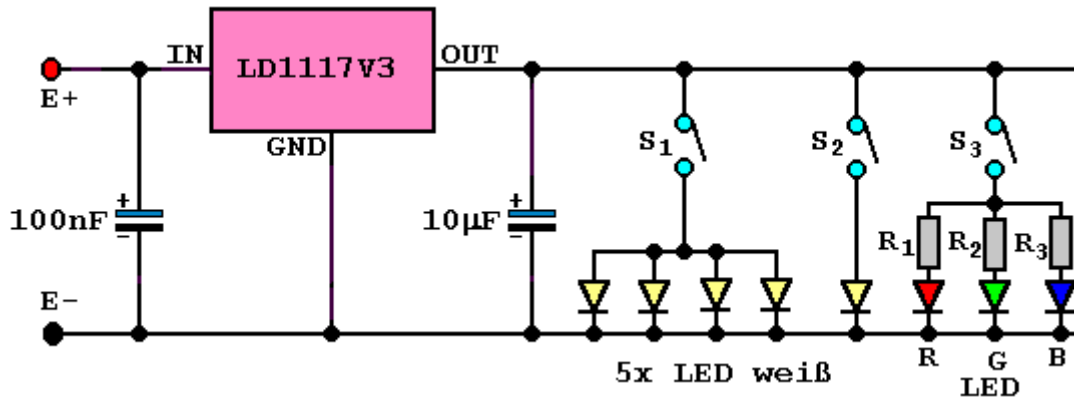


Abb.1: Schaltplan der LED/RGB-Lampe

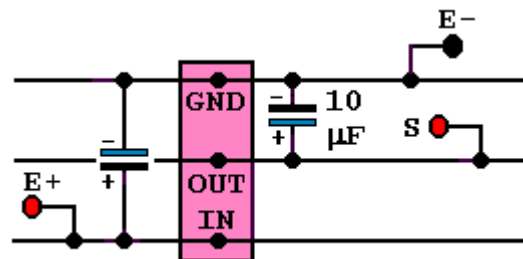


Abb.2: Verschaltung auf einer Lochrasterplatine

Sie besteht aus fünf weißen, einer roten, einer grünen und einer blauen LED, die gemeinsam mit dem Spannungsregler LD1117V3 betrieben werden, der an seinem Ausgang eine konstante Spannung von  $U = 3V$  liefert. Die weißen LEDs können ohne Vorwiderstand am Regler betrieben werden, für die rote, grüne und blaue LED benötigt man je einen Vorwiderstand. Sein Wert ist für jede LED unterschiedlich. Er lässt sich mit der zulässigen Spannung  $U_L$  und dem zulässigen Strom  $I_L$  der LED wie folgt berechnen:

$$R = \frac{3V - U_L}{I_L}.$$

Für die rote LED erhält man

$$R = \frac{3V - 2V}{0,02A} = 50\Omega.$$



Man schaltet zwei Normwiderstände zu je  $100\ \Omega$  parallel. Für die blaue bzw. grüne benötigt man meist nur Vorwiderstände mit wenigen Ohm, bei den Modellen einiger Hersteller kommt man bei ihnen ohne Vorwiderstand aus. Bei den von mir verwendeten LEDs brauchte ich für die grüne LED keinen Vorwiderstand und für die blaue  $2,2\ \Omega$ . Wenn auf den LEDs keine zulässige Betriebsspannung angegeben ist, schließt man sie an eine regelbare Gleichspannungsstromquelle an und erhöht vorsichtig die Spannung, bis der zulässige Strom, in aller Regel  $I = 20\ \text{mA}$ , erreicht ist. Dann misst man die Spannung, die an der LED abfällt.

### 3.2 Benötigte Teile

Man benötigt folgende Bauteile:

- 1 Gehäuse etwa der Größe  $13,5 \times 8,5 \times 5,5\ \text{cm}$
- 3 Widerstände, Werte s.o.,  $1/4\ \text{W}$
- 1 Kondensator  $100\ \text{nF}$ ,  $16\ \text{V}$
- 1 Kondensator  $10\ \mu\text{F}$ ,  $16\ \text{V}$
- 1 Spannungsregler LD1117V3
- 1 Stück Platine  $2\ \text{cm} \times 3\ \text{cm}$  RM  $2,52\ \text{mm}$
- 2 Schrauben  $15 \times 2\ \text{mm}$
- 4 Muttern  $\Phi\ 2\ \text{mm}$
- 4 Unterlegscheiben  $\Phi\ 2\ \text{mm}$
- 1 Buchse schwarz  $8\ \text{mm}$
- 1 Buchse rot  $8\ \text{mm}$
- 2 Lötösen
- 3 Mikroschalter
- 5 superhelle LED's, golden white, Abstrahlwinkel  $40^\circ$
- 1 rote LED
- 1 grüne LED
- 1 blaue LED
- 8 LED-Fassungen verchromt
- Schaltlitze
- Lötmaterial

### 3.3 Bau der Lampe

Zunächst verlötet man den Spannungsregler und die beiden Kondensatoren auf der Platine gemäß Abb.2, sowie die Schaltlitzen für die Ein- und Ausgänge des Reglers und die Anschlüsse für die drei Mikroschalter. Die Anschlüsse des Spannungsreglers sind wie folgt belegt: Zeigen die Beinchen nach unten und schaut man auf die metallene Rückwand des Reglers, so ist das rechte Beinchen der gemeinsame Minuspol  $E_-$ ,  $A_-$  des Ein- und Ausganges, das mittlere der Ausgang  $A_+$  und das linke der Eingang  $E_+$ . Beim Elektrolytkondensator von  $10\ \mu\text{F}$  sollte man unbedingt auf die richtige Polung achten, der andere Kondensator ist bipolar. Als nächstes bohrt man in den Gehäusedeckel die insgesamt elf  $8\ \text{mm}$ -Löcher für die acht LED-Fassungen und die Mikroschalter, sowie zwei  $3\ \text{mm}$ -Löcher, um die Platine am Gehäuse

befestigen zu können. An der rechten Seite des Deckels benötigt man außerdem zwei 8mm-Löcher für die beiden Buchsen, mit der die Schaltung mit Strom versorgt wird. Die optimale Betriebsspannung beträgt  $U = 5V$ . Sie sollte stabilisiert sein. Eine mögliche Anordnung der einzelnen Teile auf dem Gehäusedeckel zeigt Abb.3. So stören die Zuleitungskabel für die Stromquellen und die Schalter die Abstrahlung der LEDs am wenigsten. Man verschraubt die LED-Fassungen, die Mikroschalter und die Versorgungsbuchsen am Gehäuse. Zwischen die beiden Schrauben der Buchsen legt man jeweils eine Lötöse. Dann steckt man die LED in die Fassungen. Für die rote, grüne und blaue LED sind die Fassungen im oberen Teil des Deckels vorgesehen. Sie bilden ein Dreieck, die fünf LEDs die Zahl 1, wenn man das Gehäuse auf der Seite liegend aufstellt. So kann man zeigen, dass bei einer optischen Abbildung oben und unten und rechts und links vertauscht werden. Man befestigt anschließend die Platine am Gehäusedeckel. Damit die Lötstellen der Platine beim Verschrauben nicht verbogen werden, unterlegt man die Befestigungsschrauben auf beiden Seiten der Platine mit Muttern und Unterlegscheiben. Dabei muss man darauf achten, dass sie keine Leiterbahnen leitend miteinander verbinden, in denen Bauteile eingelötet sind, damit es zu keinen Kurzschlüssen kommt. Man verlötet den Eingang E- des Spannungsreglers mit der schwarzen Buchse und den Eingang E+ mit der roten. Außerdem verlötet man mit einem Stück Schaltlitze die Kathode, das kurze Beinchen, der ersten LED mit der schwarzen Buchse. Von dieser LED schleift man den Anschluss mit je einem kurzen Stück Schaltlitze zu den Kathoden aller anderen LEDs durch. Man verlötet den S-Anschluss der Platine mit dem Eingang eines Schalters und schleift ihn mit kurzen Schaltlitzen zu den Eingängen der beiden anderen Schalter durch. Den Ausgang des linken Schalters verbindet man mit einem Stück Schaltlitze mit der Anode der ersten der vier in Reihe liegenden LEDs und schleift ihn zu den Anoden der anderen drei LEDs durch. Den Ausgang des rechten Schalters verlötet man mit einem Stück Schaltlitze mit der Anode der einzelnen weißen LED, die die Spitze der Zahl 1 bildet. Den Ausgang des dritten Schalters verbindet man über die betreffenden Widerstände mit den Anoden der roten, grünen und blauen LED. Die Lampe ist nun einsatzbereit. Legt man sie an eine Versorgungsspannung  $U = 5V$ , so müssen alle LEDs leuchten, wenn man alle drei Schalter einschaltet. Anderenfalls muss man die Verkabelung noch mal überprüfen.



Abb. 3: LED/RGB-Lampe

## 4. Versuche

### 4.1 Farbfernseher

#### Versuch 1:

##### **Geräte:**

Man benötigt die LED/RGB-Lampe, eine Gleichstromquelle mit  $U = 5 \text{ V}$ , einen weißen Schirm, etwa eine weiße Wand, eine Sammellinse mit großem Durchmesser und einer Brennweite  $f = 50 \text{ cm}$  der Firma Leybold (LH46011) und eine Lochscheibe der Firma Leybold (LH347739).

##### **Durchführung:**

Man stellt die LED/RGB-Lampe in einer Entfernung von 1-2 m vor einer weißen Leinwand auf, verbindet sie mit der Stromquelle und schaltet die drei farbigen LEDs ein. Mit der Sammellinse bildet man sie auf der Leinwand als Kreise ab, die sich überlagern. Anschließend ersetzt man die Linse durch die Lochscheibe. Bei allen Versuchen sollte man darauf achten, dass die Schüler nicht direkt in die LEDs blicken, da durch die große Helligkeit die Netzhaut verletzt werden kann.

##### **Beobachtung:**

Bei voller Helligkeit der LEDs erkennt man auf dem Schirm drei Kreise in den Farben rot, grün und blau. In den Überlagerungszonen der Kreise beobachtet man die Farben cyan, gelb und magenta. In dem Bereich, in dem sich alle drei Grundfarben bei voller Helligkeit überschneiden, erscheint die Leinwand weiß. Mit der Lochscheibe ist der Bildschirm übersät mit Dreiecken aus roten, grünen und blauen Punkten.

##### **Erklärung:**

Nach den Überlegungen aus Kapitel 2.5 liegt eine additive Farbmischung der Grundfarben rot, grün und blau vor, so dass in den Überlagerungszonen die Mischfarben cyan, gelb und magenta entstehen. Alle drei zusammen ergeben den Farbeindruck weiß. Die Löcher der Lochscheibe werden aus verschiedenen Winkeln von den drei LEDs angestrahlt, so dass eine Folge von Dreiecken aus roten, grünen und blauen Punkten entsteht. Das entspricht dem Aufbau eines Farbfernsehbildschirmes, auch wenn die einzelnen Punkte einer Mattscheibe meist stäbchenförmig und parallel angeordnet sind. Wird ein Fernsehbild erzeugt, so werden die einzelnen Punkte beim Röhrenfernseher durch je einen Elektronenstrahl getrennt zum Leuchten gebracht. Die Elektronen werden durch Magnetfelder von links nach rechts und von oben nach unten durch eine Lochmaske über den ganzen Schirm geführt, damit sie jeweils nur das ihnen zugeordnete Stäbchen je nach gewünschter Farbe mehr oder weniger erhellen. Beim LED-Fernseher entfallen die Elektronenstrahlen und die einzelnen Punkte werden durch eine Hintergrundbeleuchtung mit LEDs in den drei Grundfarben zum Leuchten angeregt.

## 4.2 Kern-/Halbschatten

### Versuch 1:

#### **Geräte:**

Man benötigt die LED/RGB-Lampe, eine Gleichstromquelle mit  $U = 5 \text{ V}$ , eine weiße Leinwand, etwa eine weiße Wand, verschieden große lichtundurchlässige Gegenstände und ein Lineal.

#### **Durchführung:**

Man platziert die LED/RGB-Lampe in einer Entfernung von etwa 1 m vor einer weißen Leinwand, verbindet sie mit der Gleichstromquelle und schaltet die Einzel-LED ein. Man hält zwischen die Lampe und den Schirm verschieden große Gegenstände. Außerdem variiert man den Abstand zwischen Lampe und Gegenstand. Man misst für einen Schattenkörper die Größe  $S$  des Schattens, die Größe  $G$  des schattenwerfenden Körpers, die Entfernung  $s$  zwischen der LED-Lampe und dem Schirm und die Entfernung  $g$  des Schattenkörpers von der LED-Lampe. Dann schaltet man die Einzel-LED aus und die LED-Viererreihe ein. Man deckt nacheinander drei, zwei und zum Schluss eine mit der Hand oder einem Karton ab. Zum Schluss schaltet man die Einzel-LED dazu. Die Lampe sollte so aufgestellt werden, dass die Schülerinnen und Schüler nicht direkt in die LEDs blicken können, da sie sehr hell strahlen und die Netzhaut verletzen können.

#### **Beobachtung:**

Mit der Einzel-LED sieht man auf dem Schirm einen scharfen, dunklen Kernschatten ohne Halbschatten, der umso größer ist, je näher der Gegenstand sich an der Lampe befindet und je größer er ist. Man misst z.B. folgende Abstände:

$$S = 24\text{cm}$$

$$G = 6\text{cm}$$

$$s = 120\text{cm}$$

$$g = 30\text{cm}.$$

Benutzt man die vier LEDs, so treten Halbschatten auf. Bei vier LEDs beobachtet man einen Kernschatten und zu jeder Seite drei Halbschatten, die nach außen immer heller werden (s. Abb.1). Benutzt man einen kleinen Gegenstand, so erscheinen vier einzelne helle Schatten, die sich nicht zu dunkleren Halbschatten oder einem Kernschatten überlagern. Verwendet man die Vierer-LED-Kette und die Einzel-LED gleichzeitig, so erhält man auf dem Schirm einen Kernschatten, der oben und unten von einem Halbschatten und rechts und links von je drei Halbschatten umgeben ist.

#### **Erklärung:**

Licht breitet sich geradlinig aus. Es kann nicht alle Gegenstände durchdringen. Hinter dem Gegenstand tritt ein Bereich auf, in den kein Licht fällt. Er ist dunkler als die Umgebung, die vom Licht hell erleuchtet wird. Bei mehreren Lampen gibt es Bereiche, die von einer oder mehreren Lichtquellen ausgeleuchtet werden, aber nicht von allen. Zusätzlich findet man einen Bereich, in den das Licht keiner Lampe dringt. So entstehen die Halbschatten- und Kernschattenräume.



**Abb.1: Schattenbild mit 4 LEDs**

Mit Hilfe der Messwerte überprüft man das Schattengesetz aus Kapitel 2.1. Es gilt:

$$\frac{S}{G} = \frac{24cm}{6cm} = 4$$

$$\frac{s}{g} = \frac{120cm}{30cm} = 4.$$

Damit bestätigt sich das Schattengesetz.

### 4.3 Farbige Schatten

#### Versuch 1:

##### **Geräte:**

Man benötigt die LED/RGB-Lampe, eine Gleichstromquelle mit  $U = 5\text{ V}$ , eine weiße Leinwand, etwa eine weiße Wand und verschieden große lichtundurchlässige Gegenstände.

##### **Durchführung:**

Man stellt die RGB/LED-Lampe in einer Entfernung von etwa 1-2 m vor einer weißen Leinwand auf, verbindet sie mit der Gleichstromquelle und schaltet die rote, grüne und blaue LED ein. Dann hält man zwischen die Lampe und den Schirm verschiedene lichtundurchlässige Gegenstände, z.B. einen Stift, eine Kreisscheibe oder ähnliches. Mit den Händen kann man diverse Lebewesen bzw. Gegenstände nachahmen oder man schneidet sich aus schwarzer Pappe verschiedene Figuren aus. Dann hält man nacheinander die rote, grüne bzw. blaue LED zu. Beim Versuch muss man unbedingt darauf achten, dass die Schüler nicht direkt in

die LEDs blicken, da durch die große Helligkeit die Netzhaut verletzt werden kann.

**Beobachtung:**

Zunächst erscheint die Leinwand zum größten Teil weiß, da der Überlagerungsbereich der drei LEDs wegen des Abstrahlwinkels von jeweils  $30^\circ$  recht groß ist. Hält man einen Gegenstand in den Lichtweg, so beobachtet man einen schwarzen Kernschatten, der von Schattenrändern in sechs verschiedenen Farbtönen, den Grundfarben rot, grün und blau, und den Farben gelb, cyan und magenta umgeben ist. Beleuchtet man den Gegenstand nur mit zwei LEDs, so ist der Kernschatten von zwei Halbschatten in den Farben der beiden angeschalteten LEDs umgeben.

**Erklärung:**

Im Kernschattenbereich wird das Licht aller drei LEDs vom lichtundurchlässigen Gegenstand abgeschirmt. Farbige Ränder beobachtet man an Stellen, die nur von einer oder zwei Lichtquellen angestrahlt werden. Das Mischen jeweils zweier Grundfarben ergibt die Farbtöne gelb, cyan und magenta. Die Bereiche des Schirmes, die von allen drei Lichtquellen angestrahlt werden, erscheinen dagegen weiß. Erzeugt man den Schatten nur mit zwei LEDs, so ist der Kernschatten von zwei Halbschatten in den Farben der leuchtenden LEDs umgeben, da es rechts bzw. links vom Kernschatten jeweils einen Bereich gibt, der nur vom Licht einer der beiden Lichtquellen angestrahlt wird.

**Versuch 2:**

**Geräte:**

Man benötigt die LED/RGB-Lampe, eine Gleichstromquelle mit  $U = 5\text{ V}$ , eine weiße Leinwand, etwa eine weiße Wand, verschieden große lichtundurchlässige Gegenstände, einen Korkring etwa mit einem Außendurchmesser von 14 cm und einem Innendurchmesser von 9 cm und einen Ständer mit Metallspitze, etwa von einer Magnetnadel.

**Durchführung:**

Man stellt die RGB/LED-Lampe in einer Entfernung von etwa 1-2 m vor einer weißen Leinwand auf, verbindet sie mit der Gleichstromquelle und schaltet die rote, grüne und blaue LED ein. Dann steckt man den Korkring auf die Spitze des Ständers und stellt ihn zwischen Lampe und Schirm. Beim Versuch muss man unbedingt darauf achten, dass die Schüler nicht direkt in die LEDs blicken, da durch die große Helligkeit die Netzhaut verletzt werden kann.

**Beobachtung:**

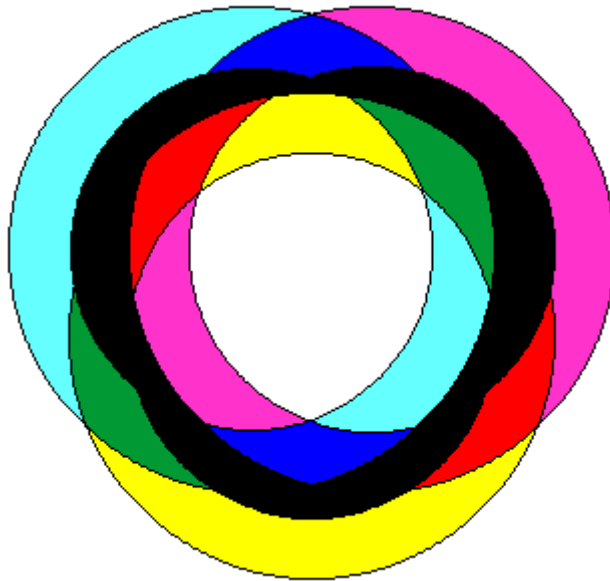
Das Innere des Kreisringes erscheint weiß. Am Innen- und Außenrand des Kernschattens beobachtet man farbige Halbschatten in den sechs Farben rot, grün, blau, gelb, magenta und cyan. Weiter außen ist die Leinwand wieder weiß (s. Abb.2).

**Erklärung:**

Das Innere des Ringes wird von allen drei Lampen angestrahlt und erscheint daher weiß. In den inneren und äußeren Randbereichen werden einzelne Flächen nur von einer oder zwei Lampen



beleuchtet. Daher strahlen sie in den drei Grundfarben rot, grün und blau bzw. den drei Mischfarben gelb, magenta und cyan. Weiter außen trifft wieder das Licht aller drei Lampen auf den Schirm.



**Abb.2: Schattenbild eines Ringes  
mit der RGB-Lampe**

### **Versuch 3:**

#### **Geräte:**

Man benötigt als Lichtquelle das LED-Mobile, das ich im Skript Optoelektronik auf dieser Internetseite beschrieben habe, eine Gleichspannungsquelle mit  $U = 10 \text{ V}$ , einen Schirm, etwa eine weiße Wand und den Korkring mit Ständer aus Versuch 2.

#### **Durchführung:**

Man stellt das Mobile in einer Entfernung von 1-2 m vor der Wand auf, steckt den Korkring auf den Ständer und stellt ihn zwischen Mobile und Wand.

#### **Beobachtung:**

Auf dem Schirm erscheint ein fantastisches Spiel aus Licht und Schatten in allen erdenklichen Farbtönen, das sich ständig ändert. Zeitweise beobachtet man nur Halbschatten, dann wieder Halb- und Kernschatten gleichzeitig.

#### **Erklärung:**

Das Mobile besteht aus LEDs in den sechs Regenbogenfarben, weißen LEDs und einer RGB-LED. Überlagern sich die Schatten dieser LEDs, so ergibt sich eine Vielzahl unterschiedlicher Farben. Außerdem treten zeitweise nur Halbschatten auf, da die LEDs nicht alle zur gleichen Zeit leuchten und räumlich gegeneinander versetzt angeordnet sind.



## 4.4 Lochkamera

### Versuch 1:

#### **Geräte:**

Man benötigt die LED/RGB-Lampe, eine Gleichstromquelle mit  $U = 5\text{ V}$ , eine weiße Leinwand, etwa eine weiße Wand und eine Irisblende.

#### **Durchführung:**

Man verbindet die LED/RGB-Lampe mit der Gleichstromquelle, stellt sie mit der flachen Seite in einer Entfernung von 1 - 2 m vor der Wand auf, schaltet die Einzel-LED und die Vierer-LED-Kette ein und stellt zwischen Lampe und Schirm eine Irisblende. Zunächst schließt man sie fast ganz und öffnet sie dann immer weiter.

#### **Beobachtung:**

Bei kleiner Öffnung der Blende beobachtet man auf dem Schirm ein seitenverkehrtes und auf dem Kopf stehendes Bild der LED-Eins. Öffnet man die Blende, so überlagern sich die Lichtkegel der fünf LEDs immer mehr.

#### **Erklärung:**

So lange die Blende nur wenig geöffnet ist, erreicht von jeder LED nur ein kleiner Lichtkegel den Schirm. Dabei kehrt sich aufgrund der geradlinigen Ausbreitung des Lichtes die Reihenfolge der LEDs sowohl in der horizontalen als auch in der vertikalen Richtung um. Je mehr man die Blende öffnet, umso größer wird der Lichtkegel jeder einzelnen LED, so dass sie sich überlagern. Das Bild der Lampe verschwimmt. Genau diese Erscheinungen beobachtet man auch bei einer Lochkamera. Sie liefert nur bei kleiner Öffnung ein scharfes Bild, das allerdings sehr lichtschwach ist, weil nur ein geringer Teil des Lichtes jeder LED den Schirm erreicht. Öffnet man die Blende weiter, so wird das Bild zwar lichtstärker, aber auch unschärfer.

### Versuch 2:

#### **Geräte:**

Man benötigt die LED/RGB-Lampe, eine Gleichstromquelle mit  $U = 5\text{ V}$ , eine weiße Leinwand, etwa eine weiße Wand und eine Irisblende.

#### **Durchführung:**

Man verbindet die LED/RGB-Lampe mit der Gleichstromquelle, stellt sie aufrecht in einer Entfernung von 1 - 2m vor der Wand auf, schaltet die RGB-LEDs ein und stellt zwischen Lampe und Schirm eine Irisblende. Zunächst schließt man sie fast ganz und öffnet sie dann immer weiter.

#### **Beobachtung:**

Bei kleiner Öffnung der Blende beobachtet man auf dem Schirm ein seitenverkehrtes und auf dem Kopf stehendes Bild des farbigen RGB-Dreiecks. Öffnet man die Blende, so überlagern sich die Bilder der drei LEDs immer mehr und ergeben in der Mitte die Farbe Weiß und in den Überlagerungsbereichen je zweier Farben die Farben Gelb, Cyan und Magenta.

**Erklärung:**

So lange die Blende nur wenig geöffnet ist, erreicht von jeder LED nur ein kleiner Lichtkegel den Schirm. Dabei kehrt sich aufgrund der geradlinigen Ausbreitung des Lichtes die Reihenfolge der RGB-LEDs sowohl in der horizontalen als auch in der vertikalen Richtung um. Je mehr man die Blende öffnet, umso größer wird der Lichtkegel jeder einzelnen LED, so dass sie sich überlagern. Die Farben vermischen sich auf dem Schirm. Dass sich die Farben nicht schon im Loch der Blende mischen, obwohl sie gleichzeitig das Loch durchdringen, ist für die Lochkamera und alle modernen Kameras sehr wichtig. Ansonsten wäre jede Farbfotographie undenkbar, da jedes Bild dann nur aus einem einheitlichen Weiß oder Grau bestehen würde.

## 4.5 Optische Abbildung

**Versuch 1:****Geräte:**

Man benötigt die LED/RGB-Lampe, eine Gleichstromquelle mit  $U = 5\text{ V}$ , eine weiße Leinwand, etwa eine weiße Wand und eine Linse mit einer Brennweite von  $f = 10 - 15\text{ cm}$ .

**Durchführung:**

Man verbindet die LED/RGB-Lampe mit der Gleichstromquelle, stellt sie mit der flachen Seite vor der Wand in einer Entfernung von etwa  $1\text{ m}$  auf, schaltet die Einzel-LED und die Vierer-LED-Kette ein und stellt zwischen Lampe und Schirm die Linse. Man verschiebt die Linse, bis man ein scharfes Bild der Eins auf der Wand erhält.

**Beobachtung:**

Auf dem Schirm entsteht ein seitenverkehrtes, auf dem Kopf stehendes Bild der Zahl Eins, das wesentlich lichtstärker ist als im Versuch mit der Lochblende. Man erhält z.B. folgende Messwerte:

$$B_H = 25\text{cm}; B_B = 9\text{cm}$$

$$G_H = 5\text{cm}; G_B = 1,8\text{cm}$$

$$g = 16\text{cm}; b = 79\text{cm}.$$

**Auswertung:**

Die von einer LED ausgehenden Strahlen werden durch die Linse auf dem Schirm wieder in einem Punkt vereinigt, dem Bildpunkt. Von oben ausgehende Strahlen gelangen nach unten und umgekehrt. Auf die gleiche Weise werden rechts und links vertauscht. Anhand der Messwerte kann man die beiden Abbildungsgesetze aus Kapitel 2.2 überprüfen. Es gilt:

$$\frac{B_H}{G_H} = \frac{25\text{cm}}{5\text{cm}} = 5$$

$$\frac{B_B}{G_B} = \frac{9\text{cm}}{1,8\text{cm}} = 5$$

$$\frac{b}{g} = \frac{79\text{cm}}{16\text{cm}} = 4,94$$

sowie

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{79\text{cm}} + \frac{1}{16\text{cm}} = 0,0752$$

und damit

$$f = 13,31\text{cm}.$$

Man kann die Brennweite der Linse überprüfen, in dem man mit ihr auf einem Schirm ein scharfes Bild eines weit entfernten Gebäudes erzeugt und den Abstand zwischen Linse und Schirm misst. Es ergibt sich eine Brennweite von  $f = 13 - 14\text{cm}$ . Die Ergebnisse bestätigen die Abbildungsgesetze aus Kapitel 2.2.

## 4.6 Beugung am Gitter

### **Versuch 1:**

#### **Geräte:**

Man benötigt die LED/RGB-Lampe, eine Gleichstromquelle mit  $U = 5\text{ V}$ , einen Schirm, etwa eine weiße Wand, ein optisches Gitter mit einer Gitterkonstanten  $g = 1 \cdot 10^{-6}\text{ m}$ , eine Halterung für das Gitter, eine Linse mit einer Brennweite von  $f = 10 - 15\text{ cm}$  und ein Lineal.

#### **Durchführung:**

Man verbindet die LED/RGB-Lampe mit der Gleichstromquelle und stellt sie in einer Entfernung von etwa  $1\text{ m}$  vor dem Schirm auf. Man schaltet die Einzel-LED ein und bildet sie mit der Linse auf dem Schirm möglichst scharf ab. Dann stellt man zwischen den Schirm und die Linse das optische Gitter. Man misst die Abstände  $z$  der Nebenmaxima der einzelnen Farben vom Hauptmaximum und die Entfernung  $l$  des Gitters zum Schirm.

#### **Beobachtung:**

Rechts und links vom weißen Punkt der LED sieht man auf dem Schirm jeweils ein Spektrum in den Farben blau, grün und rot. Für die Abstände  $z$  und  $l$  misst man:

$$l = 6\text{cm}$$

$$z_{\text{rot}} = 10\text{cm}$$

$$z_{\text{grün}} = 7,5\text{cm}$$

$$z_{\text{blau}} = 6\text{cm}.$$

**Auswertung:**

Nach Kapitel 2.3 gilt für die Winkel, unter denen das 1.Nebenmaximum für die einzelnen Farben auftritt:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{z}{2l}\right).$$

Für die einzelnen Farben ergeben sich folgende Werte:

$$\alpha_{\text{rot}} = 39,8^\circ$$

$$\alpha_{\text{grün}} = 32^\circ$$

$$\alpha_{\text{blau}} = 26,6^\circ.$$

Für die Wellenlängen erhält man mit Kapitel 2.3:

$$\lambda = \frac{g * \sin \alpha}{k}$$

und damit für die einzelnen Farben mit  $k = 1$  und  $g = 1 \cdot 10^{-6}$  m:

$$\lambda_{\text{rot}} = 640\text{nm}$$

$$\lambda_{\text{grün}} = 530\text{nm}$$

$$\lambda_{\text{blau}} = 448\text{nm}.$$

Diese Werte stimmen sehr gut überein mit den Werten in einer Spektraltafel.<sup>1)</sup>

## 4.7 Brechung am Prisma

### Versuch 1:

#### **Geräte:**

Man benötigt die LED/RGB-Lampe, eine Gleichstromquelle mit  $U = 5\text{ V}$ , einen Schirm, etwa eine weiße Wand, eine Linse mit  $f = 15\text{ cm}$  und ein Geradsichtprisma.

#### **Durchführung:**

Man verbindet die LED/RGB-Lampe mit der Gleichstromquelle, schaltet die Einzel-LED ein und stellt sie in einer Entfernung von etwa  $1\text{ m}$  vor der Wand auf. Dann bildet man die LED mit der Linse auf dem Schirm scharf ab. Zwischen Linse und Schirm schiebt man das Geradsichtprisma.

#### **Beobachtung:**

Man sieht auf dem Schirm ein Spektrum in den Farben blauviolett, grün, gelb orange und rot. Hellblau fehlt.

#### **Erklärung:**

Beim Durchgang des Lichtes durch das Prisma wird es zweimal gebrochen, beim Eintritt ins Prisma zum Lot hin und beim Austritt vom Lot weg. Da die Stärke der Brechung von der Wellenlänge des Lichtes abhängt, wird das weiße Licht der LED in seine Farben aufgespalten. In weißen LEDs wird nur blauviolettes Licht erzeugt, dass zum Teil durch Fluoreszenzstoffe in die anderen Farben umgewandelt wird. So ergibt sich insgesamt die Farbe Weiß.

## 4.8 Optische Hebung

### Versuch 1:

#### **Geräte:**

Man benötigt die LED/RGB-Lampe, eine Gleichstromquelle mit  $U = 5\text{ V}$ , zwei Bechergläser mit  $V = 500\text{ ml}$ , Wasser und einige Holzklötze oder Bücher. Für den zweiten Teilversuch benötigt man eine Tasse, ein Becherglas mit Wasser, eine Münze und etwas Tesafilm.

#### **Durchführung:**

Man verbindet die LED/RGB-Lampe mit der Gleichstromquelle und schaltet die Einzel-LED ein. Man legt die Lampe mit der LED nach oben auf den Tisch. Man baut vor und hinter der Lampe einen Bücherstapel auf, der etwa  $2\text{ cm}$  höher als die Lampe ist. Man peilt über den vorderen Bücherstapel die LED an und senkt dann den Kopf so weit ab, dass man die LED gerade nicht mehr sieht. Man stellt auf die Lücke zwischen den Bücherstapeln über die LED ein Becherglas und füllt es mit dem anderen vorsichtig mit Wasser. Man nimmt das Glas weg und stellt es wieder auf die Bücher. Für den zweiten Teilversuch klebt man die Münze auf den Boden der Tasse. Man peilt die Münze in der Tasse über den Tassenrand an und senkt dann den Kopf so tief, dass man die Münze gerade nicht mehr sieht. Dann gießt man Wasser in die Tasse.

#### **Beobachtung:**

Füllt man beim ersten Teilversuch ins Becherglas Wasser, so kann man ab einer bestimmten Füllhöhe die leuchtende LED sehen. Nimmt man das Glas weg, so verschwindet die LED wieder, stellt man es wieder auf die Bücher, erscheint die LED wieder. Beim zweiten Teilversuch kann man die Münze in der Tasse sehen, wenn man Wasser in die Tasse gießt.

**Erklärung:**

Dieses Phänomen ist als optische Hebung bekannt. Beim Übergang der Lichtstrahlen aus dem Wasser in Luft werden sie vom Lot weggebrochen. Strahlen, in der Abb.1 gelb dargestellt, die ohne Wasser am Auge vorbeigingen bzw. wegen des Tassen- bzw. Bücherrandes nicht in unser Auge gelangen können, erreichen nun unser Auge, da sie vom geradlinigen Weg abgelenkt wurden (s. Abb.1). Die von einem Punkt P der Münze bzw. der LED ausgehenden Strahlen treffen als divergentes Bündel ins Auge. Das Auge meint, sie kämen von einem Punkt P' her, der höher im Wasser liegt als der ursprüngliche Gegenstandspunkt. So ergibt sich insgesamt ein virtuelles Bild des Gegenstandes. Beim Versuch mit der LED werden die Lichtstrahlen insgesamt mehrfach gebrochen, beim Eintritt ins Glas zum Lot hin, beim Übergang ins Wasser ein wenig vom Lot weg und beim Austritt aus dem Wasser stark vom Lot weg. Insgesamt ergibt sich aber die gleiche Erscheinung wie beim Münzversuch, da die entscheidende Brechung in beiden Fällen beim Übergang vom Wasser in die Luft an der Wasseroberfläche geschieht.

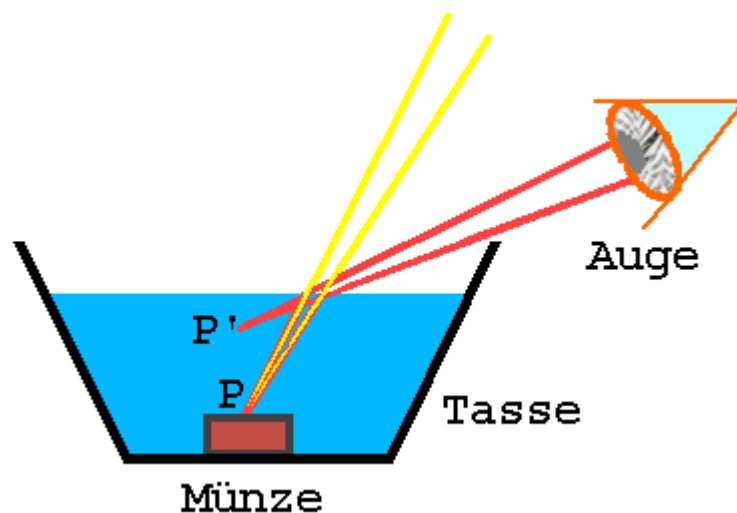


Abb.1: optische Hebung

## 5. Literaturverzeichnis

- 1) Dorn-Bader, Physik Gymnasium SII, Braunschweig 2010, Bildungshaus Schulbuchverlage
- 2) Alonso-Finn, Fundamental University Physics, Fields and Waves II, Addison-Wesley Publishing Company, 7. Ausgabe, Reading Massachusetts 1975