

# Lehrerhandbuch zu den Experimentierstationen



Vfasst von Saskia Wüst  
im Rahmen der schriftlichen Hausarbeit.  
Betreuer: AR Dr. Thomas Wilhelm

# Lehrerhandbuch zu den Experimentierstationen

## Inhalt

1. Einleitung.....	3
2. Optische Phänomene.....	4
2.1. Sehen.....	4
2.1.1. Grundlagen.....	4
2.1.2. Schülervorstellungen.....	6
2.1.3. Lehrplanbezug.....	6
2.1.4. Stationen.....	7
2.2. Farbe.....	9
2.2.1. Grundlagen.....	9
2.2.2. Schülervorstellungen.....	13
2.2.3. Lehrplanbezug.....	13
2.2.4. Stationen.....	14
2.3. Spiegel.....	17
2.3.1. Grundlagen.....	17
2.3.2. Schülervorstellungen.....	19
2.3.3. Lehrplanbezug.....	19
2.3.4. Stationen.....	20
3. Akustische Phänomene.....	22
3.1. Schallerzeugung.....	22
3.1.1. Grundlagen.....	22
3.1.2. Schülervorstellungen.....	23
3.1.3. Lehrplanbezug.....	24
3.1.4. Stationen.....	24
3.2. Schallausbreitung.....	25
3.2.1. Grundlagen.....	25
3.2.2. Schülervorstellungen.....	26
3.2.3. Lehrplanbezug.....	27
3.2.4. Stationen.....	28
4. Literatur.....	28

# 1. Einleitung

## Zielsetzung – Wozu die Experimentierstationen?

Der Einsatz der Experimentierstationen soll es allen Schülern ermöglichen, eigene Erfahrungen mit physikalischen Phänomenen zu machen.

Dadurch sollen Interesse geweckt, naturwissenschaftliche Vorstellungen angeregt und erste Erfahrungen mit der Methode des Experimentierens gewonnen werden.

Da die Stationen frei zugänglich aufgebaut sind, können sie auch (gerade!) außerhalb des Unterrichts von den Schülern ausprobiert werden, völlig ohne Zeit- oder Leistungsdruck.

In verschiedenen Studien (z.B. der Dissertation von Pascal Guderian) wurde die Einsicht gewonnen, dass der Besuch von außerschulischen Lernorten, an denen Experimente durchgeführt wurden, bei Schülern nur dann längerfristige Effekte erzielt, wenn der Besuch in den Unterricht eingebunden wird.

Meiner Überzeugung nach gilt dies auch für an der Schule installierte Experimente. Daher orientiert sich die Auswahl der Stationen am Lehrplan für die bayerische Grundschule, eine Einbindung in den Unterricht soll so erleichtert werden.

Die Experimentierstationen sollen eine sinnvolle Ergänzung zu einigen Themenbereichen des HSU sein, können und sollen die Behandlung dieser Themen im Unterricht jedoch *nicht* ersetzen.

Sie ersparen in einigen Fällen den mühsamen Aufbau von Versuchen und ermöglichen, mit wenig Aufwand die Schüler eine Vielzahl von Experimenten ausprobieren zu lassen.

Von mir zusammengestellte Schülerarbeitsblätter sollen Ideen geben, wie die Stationen im Unterricht bearbeitet werden könnten.

## Aufbau

Die beiden folgenden Kapitel beginnen jeweils mit einem kurzen Abriss über die physikalischen Grundlagen der ausgewählten Themen. Sie können unabhängig voneinander gelesen werden, da sie nicht aufeinander aufbauen.

Nachdem klar ist, worum es geht, werden die wichtigsten Vorstellungen und Erfahrungen von Schülern dargestellt. Dies soll dazu dienen, eventuell auftretende Verständnisschwierigkeiten der Schüler vorhersehen und verstehen zu können.

Um die Nutzung im Unterricht zu erleichtern, wird anschließend knapp ein Bezug zum bayerischen Lehrplan hergestellt. Dann folgen Hinweise und Erläuterungen zu jeder einzelnen Station und teilweise auch zu den Schülerarbeitsblättern.

Zuletzt werden im vierten Kapitel die zur Erstellung des Textes verwendeten Bücher aufgeführt, um bei Interesse an einem der Themen das Weiterlesen zu erleichtern.

## 2. Optische Phänomene

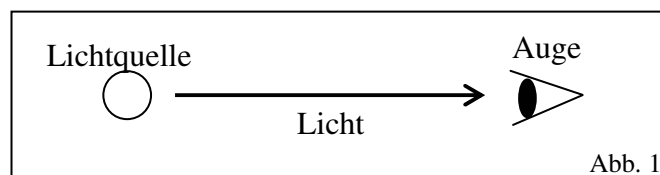
### 2.1. Sehen

#### 2.1.1. Grundlagen

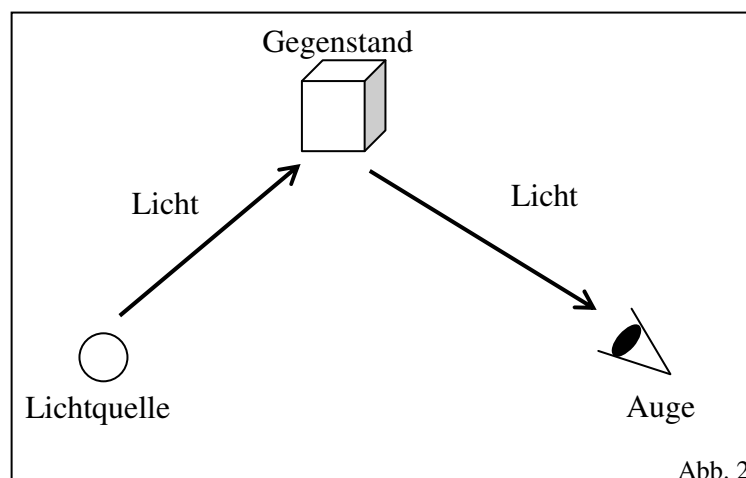
##### Der Sehvorgang

Sehen können wir nur, wenn **Licht in unsere Augen** gelangt. Dabei gibt es zwei Möglichkeiten:

- 1) Der Gegenstand leuchtet selbst, er ist also eine Lichtquelle (Lampe, Leuchtziffern, etc.). Das Licht fällt direkt vom Gegenstand in unser Auge (Abb. 1).



- 2) Der Gegenstand leuchtet NICHT selbst, er muss beleuchtet werden. Das Licht fällt von einer Lichtquelle zunächst auf den Gegenstand und wird dann von ihm zum Teil absorbiert, zum Teil gestreut (d.h. in alle Richtungen zurückgeworfen). Das gestreute Licht trifft dann auf unser Auge, wir können den Gegenstand sehen (Abb. 2).



Für den Sehvorgang ist es letztlich unerheblich, ob der Gegenstand selbst leuchtet oder nicht.

## Ausbreitung des Lichts

Es ist nicht möglich, Licht auf dem Weg von der Quelle zum Gegenstand direkt zu beobachten.

Mit etwas Kreidestaub oder Puder kann man es jedoch sichtbar machen: An den kleinen Staubteilchen wird das Licht gestreut, dort können wir es sehen.

Der Weg des Lichts verläuft immer auf einer **geraden Linie**, es macht keine Knicks oder Kurven.

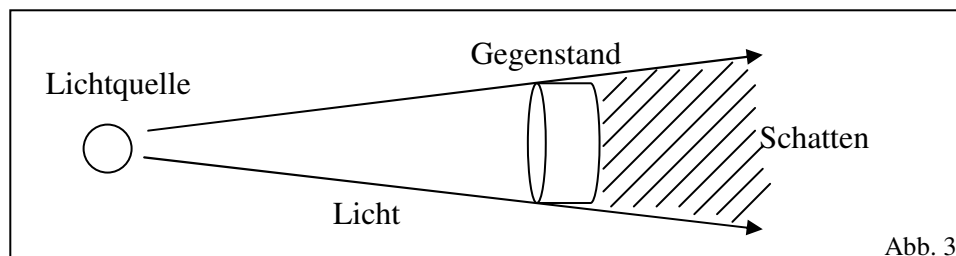
Das Licht bewegt sich sehr schnell, mit etwa  $300.000 \frac{km}{s}$ . Es braucht beispielsweise um von der Sonne zur Erde zu gelangen nur ca. 8 Minuten.

Dabei legt es eine weite Strecke im Vakuum zurück – es braucht also anders als Schallwellen kein Medium (wie Luft) zur Ausbreitung.

## Schatten

Ein Schatten entsteht, wenn man einen nicht durchsichtigen Gegenstand beleuchtet, denn hinter diesen Gegenstand kann das Licht nicht gelangen.

Der Schatten entsteht also immer in der Verlängerung der Linie zwischen Lichtquelle und Gegenstand (Abb. 3).



Wie groß der Schatten ist, hängt von zwei Faktoren ab:

- wie weit ist die Lichtquelle vom Gegenstand entfernt (je näher, desto größer)
- wie weit ist der Gegenstand von der Fläche entfernt, auf die der Schatten fällt (je näher, desto kleiner)

Je nachdem, wie groß die Lichtquelle ist, sind die Ränder des Schattens unterschiedlich scharf. Je kleiner die Lichtquelle ist, desto schärfer sind die Schatten.

Bei einer großen Lichtquelle gibt es einen Übergangsbereich zwischen beleuchteter und unbeleuchteter Fläche. Schaut man von diesem Übergangsbereich aus zurück zur Lichtquelle, sieht man, dass sie vom Gegenstand teilweise verdeckt wird.

## 2.1.2. Schülervorstellungen

Den meisten Schülern ist bewusst, dass man nur sehen kann, wenn Licht vorhanden ist.

Licht macht in ihrer Vorstellung hell, ermöglicht das Sehen. Es taucht die Umgebung in ein Lichtbad.

Den Zusammenhang, dass es das Licht ist, das man sieht, vermuten sie jedoch nicht.

Auch die Verbindung zwischen Gegenstand und Auge bleibt ungeklärt. Sie glauben nicht, dass Licht vom Gegenstand in ihr Auge fallen muss, um diesen sehen zu können.

Die Vorstellung, dass Licht sich geradlinig ausbreitet, ist den meisten Schülern klar.

Allerdings haben sie Probleme damit, sich einen Lichtfluss von der Lichtquelle zum Gegenstand vorzustellen. In ihrer Vorstellung befindet sich das Licht nach dem Einschalten in einem statischen Zustand.

Dass hinter einem Gegenstand ein Schatten entsteht, ist den meisten Kindern klar, auch wird Schatten meist mit „Lichtmangel“ in Verbindung gebracht.

Manche Schüler glauben, dass der Schatten auch im Dunkeln da ist, man ihn nur nicht sehen kann.

Bei der oben beschriebenen Lichtbad-Vorstellung kann die Schattenbildung nicht verstanden werden. Da das Licht nicht als von der Quelle ausgehend, sondern als „alles umgebend“ angenommen wird, kann nicht erklärt werden, warum es bestimmte Stellen nicht erreicht.

Auch wenn sie nicht die Lichtbad-Vorstellung haben, erkennen viele Schüler den Zusammenhang zwischen der Position der Lichtquelle und der Richtung des Schattens nicht.

Auch dass hinter dem beleuchteten Gegenstand ein ganzer Schattenraum und nicht nur eine Schattenfläche entsteht, ist ihnen nicht klar.

Einigen Kindern ist ebenfalls nicht bewusst, dass Schatten weder Farbe noch Binnenstruktur haben.

## 2.1.3. Lehrplanbezug

Das Thema Sehen taucht im Lehrplan für die Grundschulen in Bayern bereits in der ersten Klasse auf, der zu behandelnde Gesichtspunkt ist hier die Schattenbildung:

<b>1.6.2 Tag und Nacht</b>	
Mit Licht und Schatten Erfahrungen sammeln	Schattenspiele, z. B. Schattenfangen; Schattenfiguren

Die Raum-Lage-Beziehungen zwischen Lichtquelle, Gegenstand und Schatten bestimmen	Schattenlage, Schattenlänge; Schattenentstehung erklären
---	--

Die Ausbreitung des Lichts wird erst in der dritten Klasse im Inhaltsbereich „optische Phänomene“ aufgegriffen. Unter anderem heißt es dort: „Die Ausbreitung des Lichts untersuchen: einfache Versuche zur geradlinigen Ausbreitung“.

Die Station „Kinorad“ passt z.B. zum Thema „Wünsche und Bedürfnisse“:

<b>2.3 Wünsche und Bedürfnisse</b>	
Freizeitgestaltung im Wandel der Zeit	Veränderung des Freizeitverhaltens an einem ausgewählten Beispiel in verschiedenen Zeitausschnitten: Spiel, Urlaub, Sport o. Ä.; Quellenarbeit, Zeitzeugen befragen

Durch die Entwicklung vom Daumenkino bis zum Fernseher wurde eine der größten Veränderungen in der Freizeitgestaltung vieler Menschen ausgelöst.

## 2.1.4. Stationen

### Station „Schatten“

Bei dieser Station können die Schüler Erfahrungen mit Schatten sammeln.

Es stehen mehrere Gegenstände zur Verfügung, die Lampe kann weitgehend frei bewegt werden.

Wünschenswert wäre es, wenn die Schüler anfangen, frei zu experimentieren, also z.B. eigene Gegenstände benutzen, auch die eigenen Hände, etc.

Durchsichtige Gegenstände könnten besonders interessant sein.

Mit den Arbeitsblättern erkunden sie zunächst frei die Schatten verschiedener Körper.

Dann sollen sie herausfinden, was die Form des Schattens mit der Form des Körpers zu tun hat. Auch der Zusammenhang zwischen der Lage des Schattens und der Position der Lichtquelle wird thematisiert.

Durch Ausprobieren sollen die Schüler herausfinden, wie man große und kleine Schatten erzeugen kann.

### Station „Kinorad“

Durch die Schlitze in einer drehbar gelagerten Scheibe blickt man jeweils auf das gegenüberliegende, an der anderen Scheibe angebrachte Bild. Die einzelnen Bilder geben einen Bewegungsablauf wieder, wobei nebeneinander liegende Bilder sich immer nur leicht unterscheiden.

Dreht man die Scheibe nun an und blickt durch die Schlitze, kann das Auge ab einer gewissen Geschwindigkeit keine einzelnen Bilder mehr erkennen – sie verschmelzen zu einer Bewegung.

Dabei ist es wichtig, dass man nur durch die Schlitze schaut und so die Bilder immer durch ein Stück Scheibe voneinander getrennt werden. Schaut man nicht durch die Schlitze auf die Bilder, verschmelzen diese einfach zu einem undefinierbaren Streifen.

Die Schüler können an dieser Station erkunden, wie die Illusion einer Bewegung zustande kommt.

Beim Vergleich der einzelnen Bilder miteinander sollen sie feststellen, dass diese sich immer nur sehr wenig voneinander unterscheiden.

Auch können sie herausfinden, dass die Bilder erst ab einer gewissen Drehgeschwindigkeit miteinander verschmelzen.

Vertiefend könnte im Unterricht ein eigenes Daumenkino gebastelt werden.

### Station „Scheibe oder Tunnel?“

Auf eine Scheibe sind mehrere exzentrische Kreise gemalt. Dreht man die Scheibe, glaubt man in einen dreidimensionalen Tunnel oder Kegel zu schauen.

Diese optische Täuschung wird „Stereokinetisches Phänomen“ genannt, wie genau sie erklärt werden kann ist noch strittig.

Eine Theorie versucht das Phänomen damit zu erklären, dass unser visuelles System versucht, die Geschwindigkeitsunterschiede (Punkte, die weiter außen auf der Scheibe liegen, bewegen sich schneller also solche, die weiter innen liegen) zu minimieren. Dies kann gelingen, wenn man „annimmt“ (nicht bewusst!) dass die sich langsamer bewegenden Punkte weiter weg sind. Denn Dinge, die weiter weg sind, sehen kleiner aus. Auch die Strecken, die sie zurücklegen, sehen kleiner aus, es wirkt, als würden sie sich langsamer bewegen.



Die Schüler sollen hier erfahren, dass unsere Wahrnehmung sich recht leicht täuschen lässt und eine optische Täuschung kennen lernen. Auf dem Text neben den Stationen wird der Begriff „dreidimensional“ verwendet – falls dieser den Schülern nicht bereits geläufig ist, sollte er erklärt werden.

### Station „Welches ist größer?“

Diese Station besteht aus zwei gleich großen Holzstücken.

Die äußere und die innere Kante eines Holzstücks sind jeweils gleich gekrümmt (Kreisbögen mit dem gleichen Radius), sodass die Hölzer aneinander passen. Die äußere Kante ist jedoch länger.

Legt man die Holzstücke aneinander, scheint das hintere Holzstück kleiner zu sein. Die kurze Seite des hinteren Holzstücks wird mit der langen Seite des vorderen Stücks verglichen – daher scheint die ganze vordere Figur länger zu sein.

Hier lernen die Schüler eine weitere optische Täuschung kennen.

Auf dem Arbeitsblatt werden sie zusätzlich dazu angeregt, eine eigene Idee zu entwickeln, wie die Täuschung zustande kommen könnte.

## **2.2. Farbe**

### **2.2.1. Grundlagen**

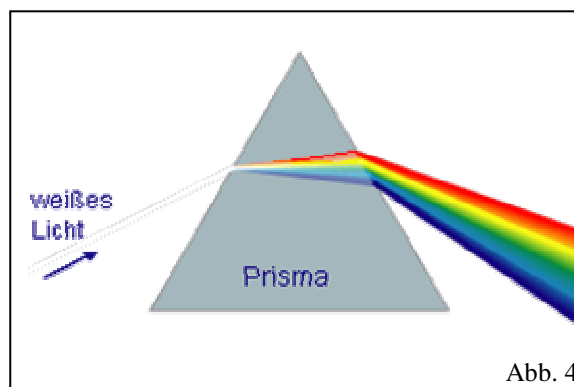
#### Aufspaltung weißen Lichts

Weißes Licht besteht aus einer **Mischung verschiedener Farben**.

Lassen wir weißes Licht durch ein Prisma fallen, werden die Farben unterschiedlich stark abgelenkt – rotes Licht am wenigsten, violettes am stärksten.

Stellen wir hinter das Prisma einen Schirm, lässt sich darauf ein regenbogenfarbiges Band beobachten, dessen Hauptfarben Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau und Violett sind (Abb. 4).

Diese Farben nennt man Spektralfarben.



Umgekehrt ist es auch möglich, durch „Mischen“ von farbigem Licht den Farbeindruck „weiß“ zu erzeugen. Dazu müssen wir die gleiche weiße Fläche mit rotem, grünem und blauen Licht beleuchten (oder mit allen Spektralfarben).

### Farbige Gegenstände

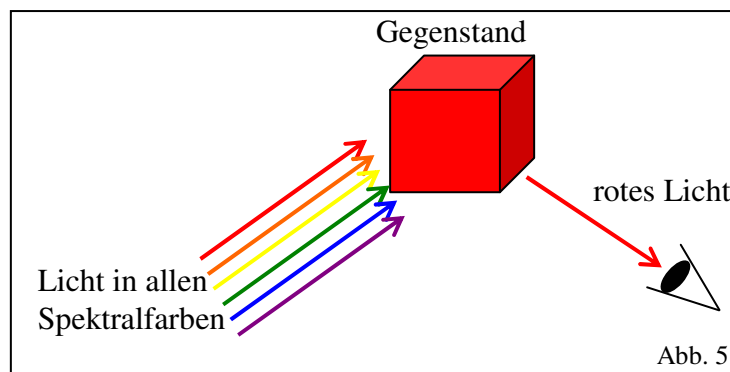
Wie kommt es nun, dass uns manche Gegenstände farbig erscheinen und andere nicht, obwohl sie doch alle mit dem gleichen weißen Licht beleuchtet werden?

Ein Gegenstand, der uns weiß erscheint, reflektiert alle Farben.

Ein z.B. rot erscheinender Gegenstand enthält einen Farbstoff, der alle Farben außer rot fast vollständig absorbiert (verschluckt). Nur den roten Bereich des Spektrums reflektiert er, also kann auch nur das rote Licht in unser Auge treffen (Abb. 5).

Häufig werden auch die Nachbarfarben reflektiert, unser Gehirn erkennt die Farbe dennoch (z.B. als Rot).

Wenn ein Gegenstand alle Farben absorbiert, erscheint er uns schwarz.



Bei einem durchsichtigen, z.B. grün erscheinenden Gegenstand wird nur das grüne Licht durchgelassen, alle anderen Farben werden absorbiert.

Der Farbeindruck, den wir von einem Gegenstand haben, hängt folglich nicht nur von dem Farbstoff im Gegenstand ab, sondern auch vom Licht, mit dem wir ihn beleuchten.

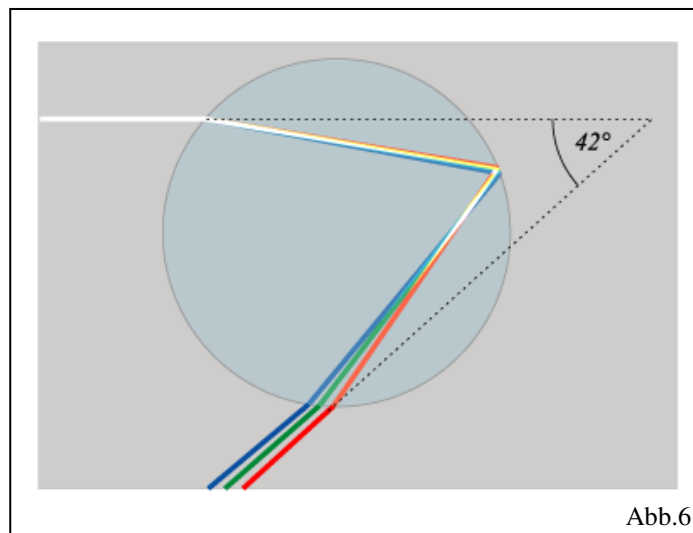
Ein in weißem Licht rot erscheinender Gegenstand sieht beispielsweise in rein blauem Licht schwarz aus. Da blaues Licht absorbiert wird und nur rotes Licht reflektieren würde, kann kein Licht vom Gegenstand in unser Auge gelangen.

## Der Regenbogen

Zur Entstehung eines Regenbogens sind Licht und Wassertropfen nötig.

Weißes Licht von der Sonne dringt in einen Wassertropfen ein (Abb. 6).

Beim Übergang von der Luft ins Wasser wird das Licht wie beim Prisma gebrochen (der Strahl macht einen Knick), und zwar je nach Farbe unterschiedlich stark. Dadurch wird es in die Spektralfarben aufgefächert.



An der Rückseite des Tropfens wird ein Teil des Lichts reflektiert, der Rest tritt wieder aus dem Tropfen aus (dieser Rest wurde nicht eingezeichnet, er trägt nicht zur Entstehung des Regenbogens bei).

Der reflektierte Teil trifft wieder auf die Wand des Tropfens und wird beim Übergang in Luft abermals gebrochen. Das Licht verlässt den Regenbogen in verschiedenen Richtungen, bei einem Winkel von etwa  $42^\circ$  zwischen einfallendem und gebrochenen Lichtbündel gibt es eine Häufung, hier tritt besonders viel Licht aus. Daher sieht man dort den Regenbogen, das Licht, das unter anderen Winkeln austritt ist zu schwach.

Da das rote Licht am wenigsten gebrochen wird, fällt vom obersten Tropfen rotes Licht ins Auge (Abb. 7). Blaues Licht wird am stärksten gebrochen, es fällt vom untersten Tropfen ins Auge.

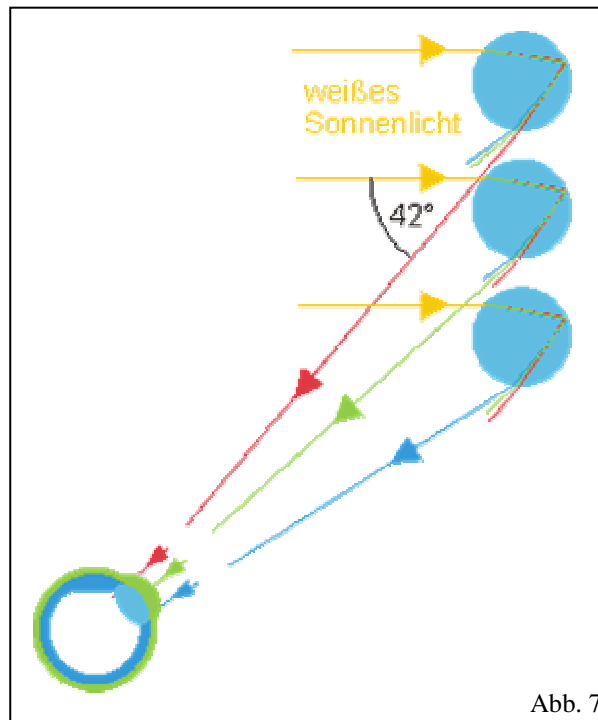


Abb. 7

Manchmal kann man am Himmel neben dem Hauptregenbogen einen weiteren beobachten (Abb. 8).



Abb. 8

Ein solcher Nebenregenbogen entsteht, wenn das Licht im Tropfen zweimal reflektiert wird. Die Farbfolge ist beim Nebenregenbogen umgekehrt. Außerdem ist es innerhalb des ersten Regenbogens heller, zwischen den beiden Regenbögen dunkler.

## 2.2.2. Schülervorstellungen

Die meisten Schüler lehnen die Vorstellung ab, dass weißes Licht eine Mischung verschiedenfarbigen Lichts ist.

Licht, das durch ein Prisma in seine Spektralfarben zerlegt wird, wird als vom Prisma eingefärbtes Licht gedeutet.

Ein Gegenstand erscheint nach Meinung der Kinder farbig, weil er eine bestimmte Farbe hat und das Licht diese sichtbar werden lässt.

Mit dem Wasserfarbkasten haben die Schüler bereits vielfältige Erfahrungen zur Farbmischung gesammelt. Die daraus entstandenen Vorstellungen entsprechen der subtraktiven Farbmischung, also dem Verschlucken von Licht (siehe 2.2.1 *Farbige Gegenstände* und 2.2.4 *Farbschlucker*). Daher ist additive Farbmischung, also das Überlagern verschiedenfarbigen Lichts, für die Schüler höchst erstaunlich (siehe 2.2.4 *Mischen von Licht*).

## 2.2.3. Lehrplanbezug

Die Optik ist im bayerischen Lehrplan in der dritten Klasse angesiedelt:

### 3.2.3 Optische oder akustische Phänomene

(Ein Inhaltsbereich - „Licht“ oder „Schall“ - ist verbindlich, in Abstimmung mit 3.2.2.)

Ausbreitung des Lichts und Spiegelphänomene bewusst machen - die Ausbreitung des Lichts untersuchen	einfache Versuche zur geradlinigen Ausbreitung, Streuung und Bündelung von Licht; Licht in die Spektralfarben (Regenbogenfarben) auflösen; Licht bündeln, z. B. mit der Lupe Sicherheitserziehung: Entzündungsgefahr, Laser
---	---

Mit „Licht in die Spektralfarben (Regenbogenfarben) auflösen“ wird auch der Bereich Farben angesprochen.

## 2.2.4. Stationen

### Station „Licht mischen“

An dieser Station können die Schüler ausprobieren, was passiert, wenn man mit rotem, grünem und blauem Licht die gleiche weiße Fläche beleuchtet. Dabei können die drei farbigen Lampen einzeln an- und ausgeschaltet werden.

Die verschiedenen Farben „addieren“ sich zu einer Mischfarbe:

Schaltet man nur das **rote** und **grüne** Licht an, verarbeitet unser Gehirn den Farbeindruck als **Gelb**. **Rot** und **Blau** erscheinen uns **magentafarben** (pink), **Blau** und **Grün** wirken wie **Cyan** (Türkis). Alle drei Farben zusammen erscheinen uns weiß, was nicht den Erfahrungen entspricht, die beim Malen mit Wasserfarben gemacht werden können.

Die Farben, die wir sehen, müssen also nicht immer reine Spektralfarben sein. Auch Mischfarben können den gleichen Farbeindruck hervorrufen.

Genutzt wird diese Art der Farbmischung beispielsweise beim Fernseher. Dort liegen für jeden Bildpunkt (Pixel) je drei Farbpunkte (rot, grün, blau) so eng beieinander, dass sie nicht einzeln wahrgenommen werden. Werden alle drei gleich stark zum Leuchten gebracht, sieht der Pixel weiß aus. Indem die drei Farben unterschiedlich stark zum Leuchten gebracht werden, lässt sich beinahe jeder Farbeindruck erzeugen.

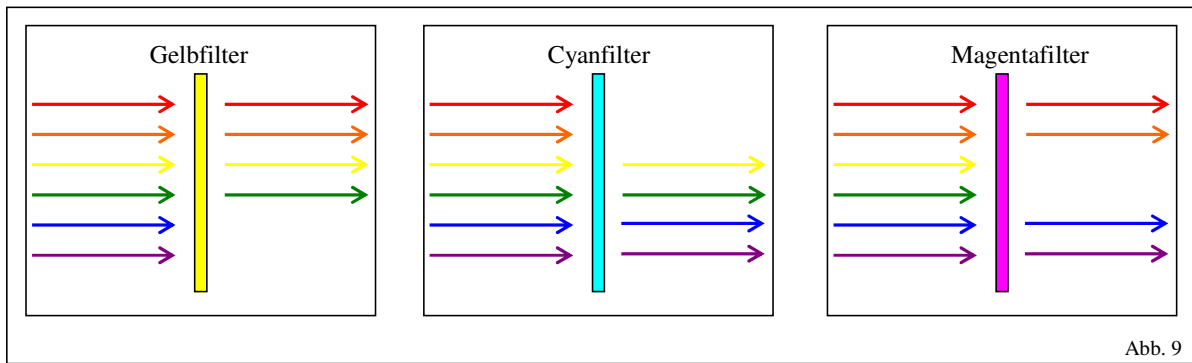
Bei einem Röhrenfernseher kann man die einzelnen Farbpunkte mit einer Lupe sehr gut erkennen.

### Station „Farbschlucker“

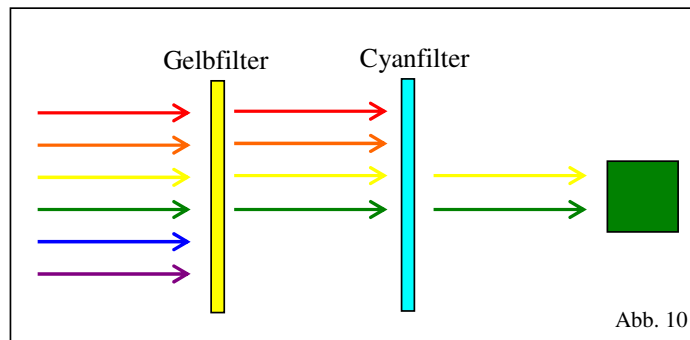
An dieser Station können ein gelber, ein magentafarbener und ein cyanfarbener Filter voreinander geschoben werden.

Dabei können die Schüler beobachten, dass ein neuer Farbeindruck entsteht, wenn man zwei Filter voreinander schiebt, und dass die Filter schwarz aussehen, wenn man alle drei voreinander schiebt. Das entspricht den Erfahrungen, die mit dem Wasserfarbkasten gewonnen werden können.

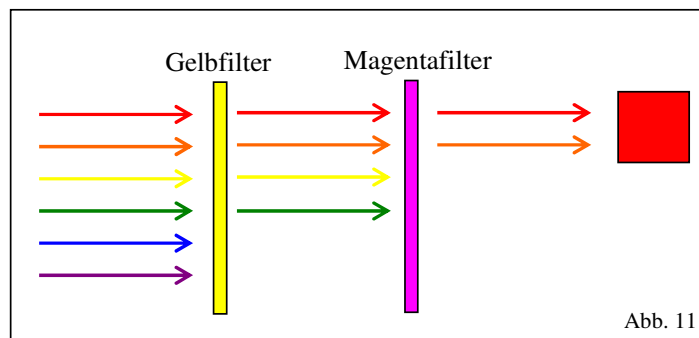
Die Filter lassen jeweils nur einen bestimmten Teil des Spektrums durch und „verschlucken“ den anderen Teil (Abb. 9):



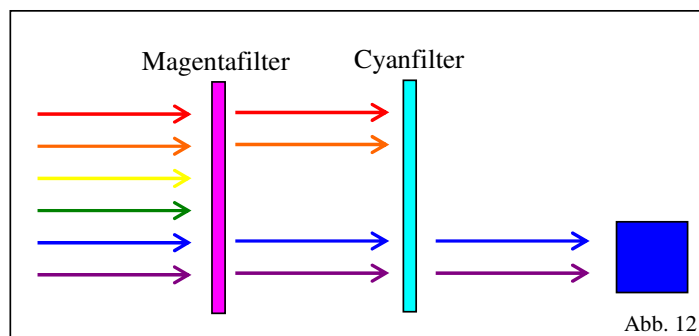
Gelbfilter absorbieren blaues und violettes Licht und lassen gelbes Licht durch, Cyanfilter verschlucken den rötlichen Teil des Spektrums und lassen türkisblaues durch. Schiebt man beide hintereinander, entsteht ein grünlicher Farbeindruck, da nur der grüne Teil des Spektrums von beiden durchgelassen wird (Abb. 10):



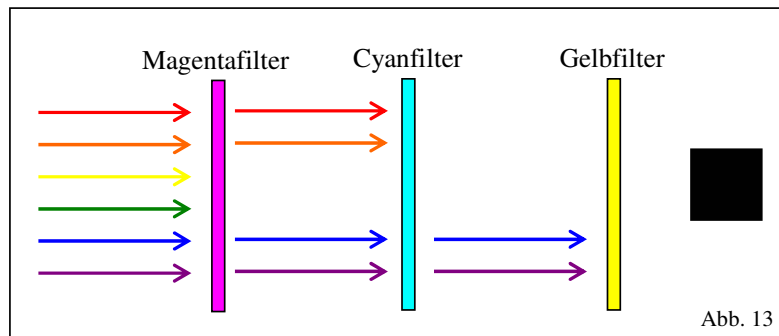
Magentafilter absorbieren den grünen Teil des Spektrums und lassen pinkrotes durch. Durch die Kombination eines Magenta- und eines Gelbfilters kommt also nur rotes Licht (Abb. 11).



Einen Magenta- und einen Cyanfilter hintereinander kann nur blaues Licht passieren (Abb. 12).



Schiebt man alle drei Farbfilter hintereinander, wird alles Licht absorbiert, die Filter sehen schwarz aus (Abb. 13).



Diese Art der Farbmischung wird subtraktive Farbmischung genannt, weil immer ein Teil des Lichts absorbiert, also subtrahiert, wird.

Sie tritt immer auf, wenn Stoffe gemischt werden, beispielsweise beim Mischen von Wasserfarben.

Auch Farbdruker funktionieren nach diesem Prinzip. Allerdings nutzen sie meist zusätzlich noch schwarze Farbe.

### Station „Weißes Licht - oder nicht?“

Diese Station ermöglicht es, Licht in die Spektralfarben zu zerlegen.

Das Prisma ist drehbar gelagert. Die Schüler können so den Winkel, unter dem das Licht einfällt, verändern, bis auf dem Schirm ein Spektrum zu sehen ist.

Sie sollen erfahren, dass weißes Licht aus Licht aller Farben besteht. Allerdings benötigen sie hier vermutlich Hilfe, damit sie **nicht** die Vorstellung entwickeln, das Prisma färbe das Licht ein.



## 2.3. Spiegel

### 2.3.1. Grundlagen

#### Reflexion

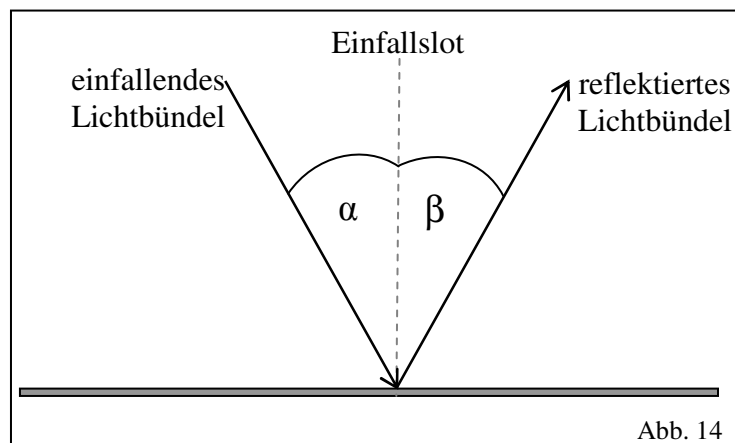
Um einen Gegenstand sehen zu können, muss von diesem aus Licht in unser Auge gelangen. Die Oberflächen der meisten Körper reflektieren das auf sie fallende Licht in alle Richtungen. Man nennt dies „diffuse Reflexion“ oder Streuung.

Manche Oberflächen lenken das Licht jedoch in nur eine bevorzugte Richtung ab – hier spricht man von „gerichteter Reflexion“ oder „Spiegelung“.

Die Richtung, in welche das Licht reflektiert wird, lässt sich bei einem ebenen (also nicht gekrümmten) Spiegel mit dem **Reflexionsgesetz** leicht vorhersagen.

Das auf den Spiegel fallende Lichtbündel, das reflektierte Lichtbündel und das sog. Einfallslot (Lot auf den Spiegel im Auftreffpunkt des einfallenden Bündels) liegen in einer Ebene.

Einfallswinkel  $\alpha$  und Reflexionswinkel  $\beta$  haben bezogen auf das Einfallslot den gleichen Betrag (Abb. 14).



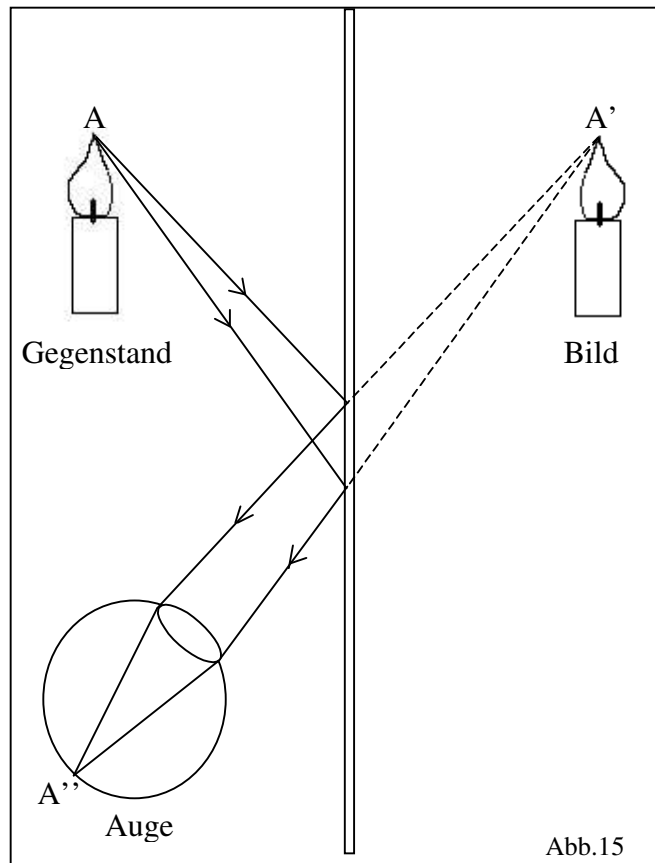
#### Entstehung des Spiegelbilds

Ein Lichtbündel, das von der Kerzenspitze (A) ausgeht, wird laut Reflexionsgesetz so reflektiert, dass das reflektierte Bündel verläuft, als käme es von einer Kerzenspitze K' hinter dem Spiegel (Abb. 15).

Das Auge verlängert das Lichtbündel nach hinten und verlegt somit den Ursprung nach hinten.

Der Abstand des realen Gegenstandes vom Spiegel und der Abstand des vom Auge „vermuteten“ Spiegelbildes vom Spiegel sind gleich groß.

Das Auge kann nicht unterscheiden, ob das Bündel am Spiegel „abgeknickt“ wurde und nur ein Bild der Flamme zu sehen ist, oder ob am Punkt A' tatsächlich eine Kerzenflamme ist.

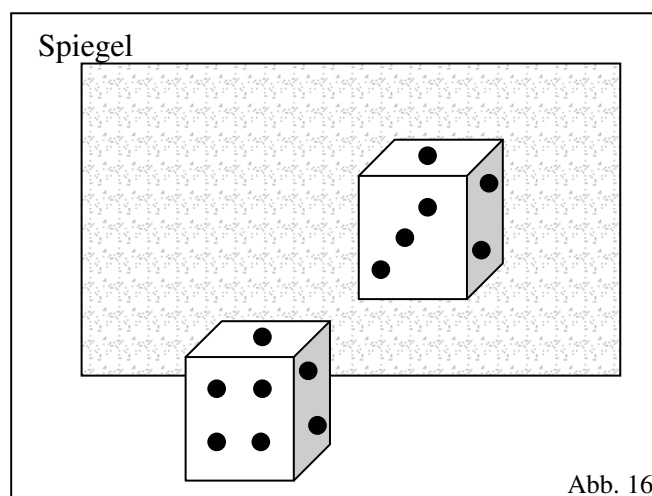


### Eigenschaften des Spiegelbildes

Das Spiegelbild liegt im gleichen Abstand hinter dem Spiegel, wie der Gegenstand davor. Es ist genauso groß und symmetrisch zur Spiegelebene.

Entgegen der Alltagsvorstellung vertauscht der Spiegel **nicht links und rechts** – er müsste dann ja konsequenterweise auch oben und unten vertauschen.

Mit einem Würfel lässt sich veranschaulichen, was der Spiegel vertauscht:



Die Zwei ist auch im Spiegelbild rechts, die Eins oben – aber statt der Vier ist die Drei vorne. Der Spiegel vertauscht also vorne und hinten.

### 2.3.2. Schülervorstellungen

Zur Lage des Spiegelbildes gibt es zwei verschiedene Schülermeinungen:

Die einen geben an, man sehe das Spiegelbild hinter dem Spiegel, es sei aber *auf* dem Spiegel (bzw. auf der Rückwand oder zwischen den Wänden des Spiegels). Der Spiegel wird hier als Bildträger gesehen, ähnlich wie ein Foto.

Laut den anderen Schülern sieht man das Spiegelbild hinter dem Spiegel, es ist aber *im* Spiegel (also in einer Spiegelwelt bzw. dem Spiegelinneren).

Zwischen Licht und Spiegelbild sehen die meisten Schüler keinen Zusammenhang.

Sie wissen zwar aus eigener Erfahrung, dass man mit einem Spiegel Licht zurückwerfen kann, sehen den Spiegel aber primär als etwas, das dem Betrachter das zeigt, was vor ihm steht. Das hat für sie nichts mit Licht zu tun, zumal ihnen auch der Zusammenhang zwischen Licht und Sehen nicht geläufig ist.

Viele Schüler (und auch Erwachsene) sind der Meinung, dass ein Spiegel rechts und links vertauscht. Sie können aber häufig richtig vorhersagen, wie ein Gegenstand im Spiegel aussieht.

### 2.3.3. Lehrplanbezug

Das Untersuchen von Spiegelphänomenen wird im Lehrplan der dritten Jahrgangsstufe im Bereich HSU recht ausführlich festgeschrieben:

<b>3.2.3 Optische oder akustische Phänomene</b>	
Ausbreitung des Lichts und Spiegelphänomene bewusst machen - Spiegelphänomene erkunden und anwenden	Licht mit Spiegeln umleiten; Spiegelsymmetrie: Spiele mit Spiegeln, z. B. Spiegelschrift, Kaleidoskop, Spiegellabyrinth, Periskop; Spiegelbilder auf der Wasseroberfläche, Glas, polierten Flächen o. Ä. betrachten; Lagebestimmung des Spiegelbildes: den Abstand von Bild und Spiegelbild zur Spiegeloberfläche betrachten,

	Bewegungsrichtung im Spiegel verfolgen Phänomen des „Toten Winkels“ (VKE)
--	--

Auch in Mathematik sollen Spiegelphänomene aufgegriffen werden:

<b>3.1.3 Achsensymmetrie</b>	
Die Eigenschaften symmetrischer Figuren entdecken	z. B. Falten, Reißen, Schneiden; Klecksbilder erstellen, mit einem Spiegel experimentieren
Symmetrische Figuren entdecken, erstellen, zeichnen und beschreiben	z. B. Spiegeln, Legen, Figuren am Geobrett spannen, Ergänzen; Dynamische Geometrie: am Computer Achsensymmetrie darstellen leistungsschwächere Schüler: mit Schablone arbeiten leistungsstärkere Schüler: Mehrfachspiegelung an parallelen bzw. aufeinander senkrecht stehenden Achsen
Symmetrien in der Umwelt auffinden	Gebäude, Buchstaben usw.
<i>Fachbegriffe:</i> Symmetrieachse, symmetrisch und deckungsgleich	

## 2.3.4. Stationen

### Station „Klappspiegel“

Die Station besteht aus zwei Spiegeln, die wie ein Buch klappbar miteinander verbunden sind. Einer ist fest auf der Tischplatte montiert, der andere lässt sich drehen.

Dadurch können verschiedene Winkel zwischen den Spiegeln eingestellt werden, sodass sich ein zwischen die Spiegel gestellter Gegenstand unterschiedlich oft spiegelt.

Durch geschickte Wahl der Winkel lassen sich schöne Muster erzeugen.

Erstaunliches zeigt der Klappspiegel bei einem Winkel von  $90^\circ$ : Blickt man nun in den Spiegel, sieht man sich so, wie einen andere sehen. Der Spiegel vertauscht jetzt tatsächlich rechts und links.

Mit dem ersten Arbeitsblatt sollen die Schüler im Unterricht erkunden, was der Spiegel vertauscht. Dazu wird ein Würfel benutzt, da dieser auf jeder Seite anders aussieht.

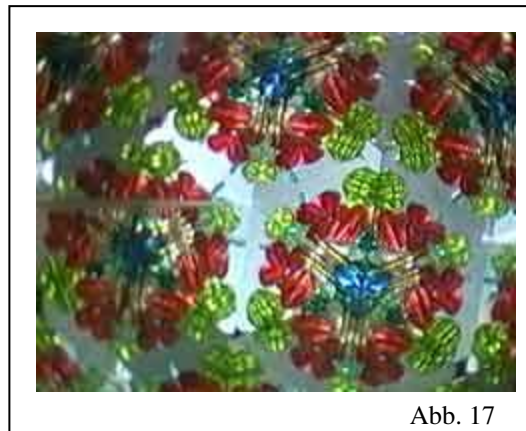
Der Klappspiegel wird hierbei ganz aufgeklappt ( $180^\circ$ ) und benutzt als sei es eine große Spiegelfläche. Dadurch sollen zunächst verwirrende Mehrfachspiegelungen vermieden werden.

Auf den beiden anderen Arbeitsblättern sollen die Mehrfachspiegelungen genutzt werden, um aus einfachen Bildern Muster zu erzeugen.

### Station „Kaleidoskop“

Genau wie seine kleinen „Verwandten“ besteht das begehbare Kaleidoskop aus drei Spiegeln, die jeweils in einem Winkel von  $60^\circ$  zueinander angeordnet sind.

Übersetzt heißt Kaleidoskop etwa „Schönseher“ (Abb. 17).



Man spiegelt sich im Kaleidoskop nicht nur einmal, sondern sieht sich unendlich oft – das Spiegelbild wird wieder und wieder gespiegelt.

Die Schüler sollen sich an dieser Station darüber Gedanken machen, warum man sich nicht nur einmal sieht – haben sie die Station „Klappspiegel“ bereits erkundet, sind ihnen Mehrfachspiegelungen ja bereits bekannt.

Sie können erfahren, dass lediglich drei Spiegel nötig sind, um die wunderschönen Bilder zu erzeugen.

Eine interessante Ergänzung wäre es, die Schüler selbst Kaleidoskope basteln zu lassen (eine sehr einfache Bastelanleitung gibt es z.B. unter: <http://www.rahmenplan.de/R41.html>).

## 3. Akustische Phänomene

### 3.1. Schallerzeugung

#### 3.1.1. Grundlagen

„Schall“ ist der **Überbegriff** für Töne, Klänge und Geräusche. Töne sind gleichmäßige Schwingungen, die z.B. ertönen, wenn man eine Stimmgabel anschlägt. Klänge sind ein Zusammenspiel verschiedener Töne, Geräusche hingegen völlig unregelmäßige Schwallschwankungen, wie sie beispielsweise entstehen, wenn man durch trockenes Laub geht.

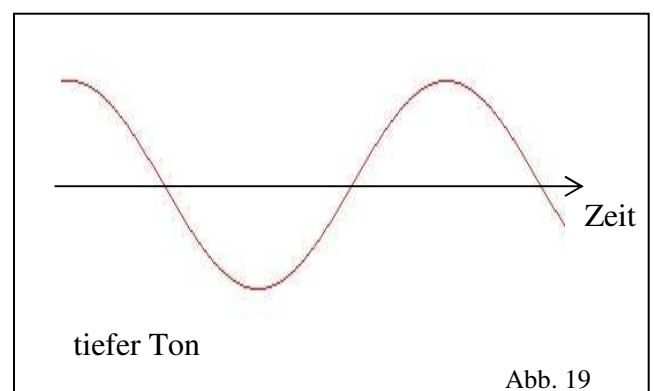
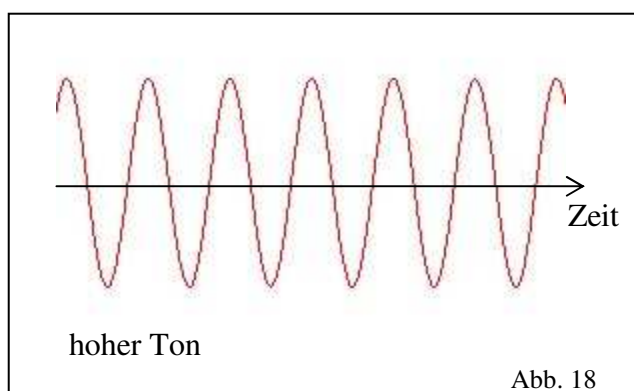
Schall kann von verschiedenen Gegenständen erzeugt werden. Gemeinsam ist allen Gegenständen, dass sie in eine **schnelle Bewegung** versetzt werden müssen – sie müssen schwingen.

Diese Schwingung wird dann an ein **Medium** (meist Luft) weitergegeben, das auch anfängt zu schwingen. Nun kann sich die Schwingung ausbreiten.

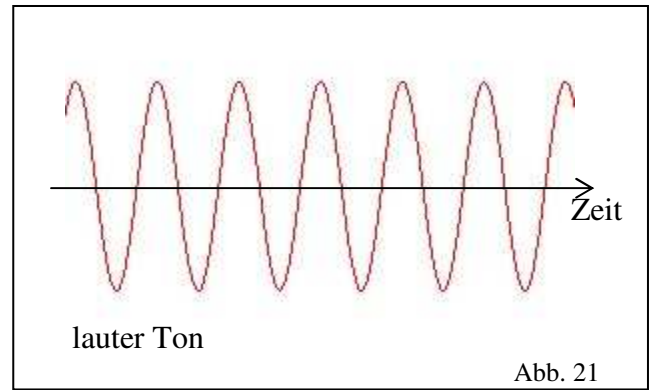
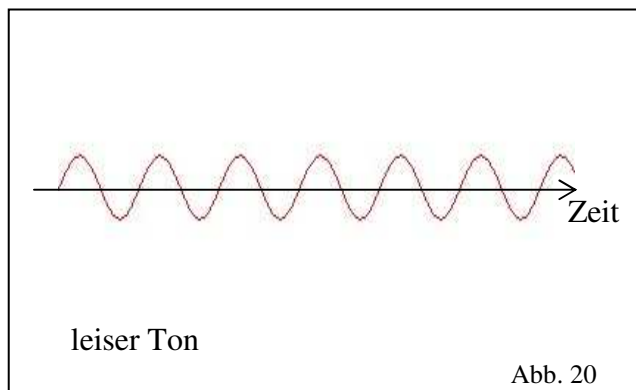
Töne können als hoch oder tief und als laut oder leise unterschieden werden.

Ein hoher Ton entsteht bei einer sehr **schnellen** Schwingung (Abb. 18), ein tiefer durch eine langsame Schwingung (Abb. 19). Entsprechend gibt man die Tonhöhe an durch die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde, gemessen in Hertz (Hz).

Ein Mensch kann Schwingungen etwa zwischen 16 Hz (sehr tief) und 20.000 Hz (sehr hoch) hören.



Wie laut ein Ton ist hängt von der **Schwingungsweite** ab. Lenkt man z.B. eine Gitarrensaite nur leicht aus (Abb. 20), ist der Ton leiser als der von einer stark ausgelenkten Saite erzeugte Ton (Abb. 21).



Um einen Ton lauter zu machen kann man auch einen Resonanzkörper nutzen: Dieser schwingt mit und verstärkt so den Schall.

Beispielsweise klingt eine Spieluhr viel lauter, wenn man sie auf den Tisch legt. Berührt man den Tisch, kann man die Schwingung sogar spüren.

### 3.1.2. Schülervorstellungen

Der Sammelbegriff „Schall“ ist den Schülern weitgehend unbekannt, vor allem jüngeren.

Kircher und Engel schlagen vor, stattdessen den Ausdruck „Ton“ zu verwenden, da die umgangssprachliche Bedeutung dieses Begriffs ungefähr die gleiche sei wie die von „Schall“.

Dass die Ursache von Schall eine sich bewegende Schallquelle sein muss, ist den meisten Grundschulern nicht klar. Sie wissen nur, dass man etwas tun muss um Schall zu erzeugen, also beispielsweise auf einen Tisch schlagen. Schall fassen sie als direkte Folge der Tätigkeit auf. Ein Grund für diese Auffassung könnte sein, dass die Bewegung des Gegenstandes meist nicht sichtbar ist.

Macht man die Kinder in Versuchen gezielt auf die Bewegung aufmerksam, begreifen sie den Zusammenhang meist leicht.

Überlegungen zu hohen und tiefen Tönen sind für die meisten Schüler wenig verständlich, sie denken bei hoch und tief an räumliche Kriterien. (Beispielsweise einen hohen Ton singen manche, indem sie sich auf die Zehenspitzen stellen.)

Daher vertauschen sie die Begriffe häufig.

Laute und leise Töne können Grundschüler gut unterscheiden, sie sind auch in der Lage, mit einem Instrument (z.B. Trommel) laute und leise Töne zu erzeugen. Sie denken, ein lauter Ton erfordert eine kräftigere auslösende Handlung. Allerdings können sie sich nicht von diesen konkreten Prozessen lösen und abstrahieren, dass der Gegenstand weiter schwingt.

Auch die Wirkung eines Resonanzkörpers können fast alle Schüler mit ihrer Vorstellung nicht erklären.

Dennoch kennen sie viele Beispiele hierfür: Musikinstrumente mit einem Hohlkörper, wie Geigen, Gitarren, Trommeln, Xylophone, usw.

### 3.1.3. Lehrplanbezug

Die Erzeugung von Schall wird im bayerischen Lehrplan in der dritten Klasse behandelt:

3.2.3 Optische oder akustische Phänomene	
Ausbreitung des Schalls untersuchen - Töne, Klänge, Geräusche durch schwingende Körper und Gegenstände erzeugen und ihnen zuordnen	hohe - tiefe, laute - leise Geräusche, z. B. durch gespanntes Gummiband mit verschiedenen Längen Hörrätsel, einfache Flöten; Monochord

Das Monochord wird sogar direkt erwähnt.

### 3.1.4. Stationen

#### Station „Klangrohre“

Diese Station besteht aus acht verschiedenen langen Regenfallrohren. Ihre Längen sind so abgestimmt, dass beim Anschlagen der Rohre die Töne c', d', e', f', g', a', h', c'' erklingen.

Es lassen sich also einfache Melodien spielen.

Mit dem Arbeitsblatt soll herausgefunden werden, dass die erzeugten Töne tiefer sind, je länger das Rohr ist.

Hierzu müssen die Schüler bereits wissen, was hohe und tiefe Töne sind.

Außerdem sollen die Schüler ausprobieren, was passiert, wenn sie ein Rohr beim Anschlagen festhalten – hier kann deutlich gemacht werden, dass die Schallquelle sich bewegen muss.

Zusätzlich kann ausprobiert werden, wie laute und leise Töne hervorgerufen werden können.

Falls an der Schule mit Boomwhackers, den unterschiedlich langen, gestimmten Kunststoffröhren (Abb. 22, z.B. <http://www.andreasvonhoff.de>) gearbeitet wird, bietet sich ein Vergleich an.





### Station „Klingende Saite“

Das Monochord besteht – wie der Name bereits andeutet – aus nur einer Saite mit Resonanzkörper. Mit Hilfe eines Holzkeils lässt sich die Länge der angezupften Saite verändern. Je länger die Saite ist, desto tiefer ist der Ton.

Die Bewegung der Saite ist dabei recht deutlich sichtbar.

Das erste Arbeitsblatt soll bei der Erkundung des Zusammenhangs zwischen Saitenlänge und Tonhöhe helfen.

Indem auch gefragt wird „Was siehst du?“, wird die Bewegung der Schallquelle bereits thematisiert.

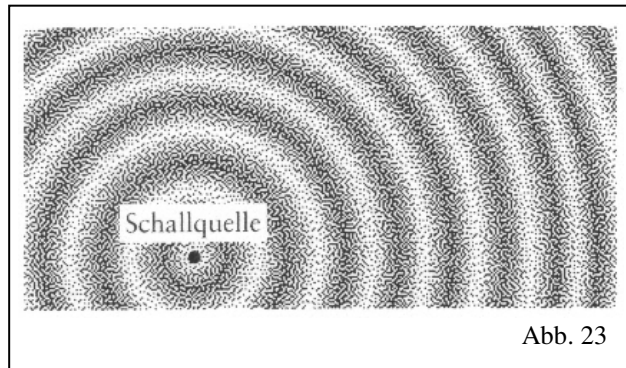
Das zweite Arbeitsblatt lenkt die Aufmerksamkeit weiter auf die Bewegung der Saite: Einerseits auf die größere Auslenkung bei lauten Tönen, andererseits auf das Verstummen des Tons, wenn man die Saite festhält.

## **3.2. Schallausbreitung**

### **3.2.1. Grundlagen**

Nachdem die Schallquelle in Bewegung versetzt wurde, gibt sie diese Bewegung weiter an das sie umgebende Medium, beispielsweise Luft. Dabei werden die Teilchen, aus denen das Medium besteht, aneinander gedrückt und auseinander gezogen. Dadurch ist die Luft an manchen Stellen dünner, an anderen dichter, es entstehen also Druckschwankungen.

Die vom Gegenstand angestoßenen Teilchen stoßen wieder neue Teilchen in ihrer Umgebung an – so kann sich die Schwingung ausbreiten (Abb. 23).



Es entsteht eine Schallwelle, bei der alle angestoßenen Luftteilchen nacheinander die gleiche Bewegung ausführen, wie die Schallquelle.

Treffen die schwingenden Luftteilchen auf unser Trommelfell, so wird es auch in Schwingung versetzt – wir können den Schall hören.

Da die Teilchen des Mediums zur Ausbreitung benötigt werden, kann sich Schall ohne Medium (im Vakuum) nicht ausbreiten.

Die Ausbreitung von Schall erfolgt nicht beliebig schnell, die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist in verschiedenen Stoffen unterschiedlich groß.

In Luft beträgt sie ca.  $340 \frac{m}{s}$  (etwa  $1200 \frac{km}{h}$ ), in Wasser ca.  $1480 \frac{m}{s}$  (etwa  $5300 \frac{km}{h}$ ) und in Holz ca.  $5500 \frac{m}{s}$  (etwa  $20.000 \frac{km}{h}$ ).

Außerdem verändert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit je nach Temperatur – je wärmer, desto schneller.

### 3.2.2. Schülervorstellungen

Die Vorstellung, dass die Schwingungen der Schallquelle durch ein Medium weitergeleitet werden, ist den meisten Schülern völlig fremd.

Das größte Problem liegt vermutlich darin, dass Luft nicht als etwas Stoffliches aufgefasst wird, sondern für „Nichts“ gehalten wird. Daher haben die Schüler Schwierigkeiten, sich die Übertragung der Bewegung vorzustellen.

Sie stellen sich oft vor, dass der Ton irgendwie durch den Raum fliegt und dabei auch an unserem Ohr vorbeikommt. Die Töne werden zuvor durch das Manipulieren des Gegenstandes hervorgehört – sie können auch wieder in der Schallquelle verschwinden, wenn man z.B. die Stimmgabel mit der Hand festhält.

Ältere Grundschüler stellen sich einen Ton wie einen Gegenstand vor, der z.B. an Wänden zurückgeworfen wird.

Da sie Gegenstände (Wände, Gebirge, ...) als Hindernisse sehen, können sie sich die Schallausbreitung in festen Körpern nicht erklären. Lässt man sie das Ohr an einen Gegenstand halten und klopft auf der anderen Seite leise darauf, erklären sie häufig, dass der Gegenstand den Ton außen entlang leitet.

Dass man beispielsweise auch hinter einer Wand etwas hört, erklären sie sich mit kleinen Löchern in der Wand.

In beiden Vorstellungen ist ein Medium nicht nötig, deswegen nehmen viele Schüler an, dass man im Vakuum (z.B. Weltall) besser hören kann.

Dass Schall Zeit braucht, um sich auszubreiten, ist den meisten Kindern klar. Sie kennen dies vom Gewitter: Der Donner ist später zu hören als der Blitz zu sehen ist, weil das Geräusch länger braucht als das Licht, um bis zu uns zu kommen.

### 3.2.3. Lehrplanbezug

Das Untersuchen der Schallausbreitung wird im Lehrplan der dritten Klasse recht ausführlich behandelt:

<b>3.2.3 Optische oder akustische Phänomene</b>	
<p>Ausbreitung des Schalls untersuchen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausbreitung von Schall in Luft, festen Körpern und Wasser</li> </ul>	<p>Schallausbreitung in Luft sichtbar machen, z. B. Reiskörner auf Tamburin; Schallträger wie Tischplatte oder Baumstamm, Resonanzkörper, Schnurtelefon</p> <p>Schallausbreitung im Wasser: mit angeschlagener Stimmgabel, Zusammenschlagen zweier Steine</p> <p>leistungsstärkere Schüler: Echolot; Orientierung der Fledermäuse; Kommunikation der Wale</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verstärken oder Bündeln des Schalls</li> </ul>	<p>Trichter, Lautsprecher; Hörrohr; Maßnahmen zum Schutz vor Verkehrs-, Industrie-, Nachbarschaftslärm</p>

### 3.2.4. Stationen

#### Station „Geräusche im Holz“

Ein Baumstamm dient als fester Körper, an dem die Schallausbreitung in Feststoffen untersucht werden kann.

Hält man sein Ohr an die Schnittfläche des Stamms, kann man beispielsweise das Ticken einer an die andere Seite gehaltenen Armbanduhr deutlich hören.

Die Schüler sollen erkennen, dass Schall auch durch Feststoffe weitergeleitet werden kann. Zuvor sollte die Schallausbreitung in Luft und evtl. Wasser bereits thematisiert worden sein.

#### Station „Richtungshören“

An dieser Station können die Schüler erfahren, wie genau unsere Ohren wahrnehmen können, aus welcher Richtung ein Geräusch kommt.

Sie halten sich auf jedes Ohr einen Trichter, die Trichter sind mit einem Schlauch verbunden, dessen Mitte markiert wurde.

Wenn man nur wenige Zentimeter links oder rechts von der Mitte auf den Schlauch klopft, ist der Unterschied bereits hörbar.

Die Töne kommen mit einem winzigen Zeitunterschied an unseren Ohren an. Dieser kleine Unterschied genügt für unser Gehirn bereits, um die Richtung festzustellen.

## 4. Literatur

Beim Verfassen des Kapitels „optische Phänomene“ verwendete Literatur:

- KAHLERT, Joachim; DEMUTH, Reinhard: *Wir experimentieren in der Grundschule – Band 1*. Einfache Versuche zum Verständnis physikalischer und chemischer Zusammenhänge. Köln 2007.
- WILHELM, Thomas: Skript zur Vorlesung „Einführung in die Fachdidaktik I Ziele und Inhalte“: [www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/vorlesung.htm](http://www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/vorlesung.htm)
- JENNINGS, Terry: *Licht und Energie*. Mülheim an der Ruhr 1992.
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UNTERRICHT UND KULTUS: *Lehrplan für die Grundschule in Bayern*. München 2000.
- FEUERLEIN, Rainer; NÄPFEL, Helmut; SCHÄFLEIN, Horst: *bsv Physik 2*. München 1993, S. 72ff.

- DEGER; GLEIXNER; PIPPIG; WORG: *Galileo 9. Das anschauliche Physikbuch*. München 2000, S. 144ff.
- BEGHI, L.; XAUSA, E.; ZANFORLIN, M.: *Analytic determination of the depth effect in stereokinetic phenomena without a rigidity assumption*. In: *Biological Cybernetics* 65 (1991). Heidelberg 1991, S. 425-432.
- WIESNER, Hartmut; CLAUS, Jürgen: *Vorstellungen zu Schatten und Licht bei Schülern der Primarstufe*. In: *Sachunterricht und Mathematik in der Primarstufe* 13 (1985). Köln 1985, S. 318 – 322.
- BLUMÖR, Rüdiger; WIESNER, Hartmut: *Das Spiegelbild. Untersuchungen zu Schülervorstellungen und Lernprozessen (Teil1)*. In: *Sachunterricht und Mathematik in der Primarstufe* 20 (1992). Köln 1992, S. 2-6.
- BEUTELSPACHER, Albrecht et al.: *Mathematik zum Anfassen. 50 mathematische Experimente*. Gießen 2007, S. 136f., S. 152f.
- <http://leifi.physik.uni-muenchen.de> (02.05.2008)
- Benham Kreisel: [http://en.wikipedia.org/wiki/Benham's\\_top](http://en.wikipedia.org/wiki/Benham's_top) (11.05.2008)
- Anleitung zum Bau eines Kaleidoskops: <http://www.rahmenplan.de/R41.html> (12.05.2008)

Beim Verfassen des Kapitels „akustische Phänomene“ verwendete Literatur:

- KAHLERT, Joachim; DEMUTH, Reinhard: *Wir experimentieren in der Grundschule – Band 2. Einfache Versuche zum Verständnis physikalischer und chemischer Zusammenhänge*. Köln 2007.
- WILHELM, Thomas: Skript zur Vorlesung „*Einführung in die Fachdidaktik I Ziele und Inhalte*“: [www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/vorlesung.htm](http://www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/vorlesung.htm)
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UNTERRICHT UND KULTUS: *Lehrplan für die Grundschule in Bayern*. München 2000.
- KIRCHER, Ernst; ENGEL, Christine: *Schülervorstellungen über Schall*. In: *Sachunterricht und Mathematik in der Primarstufe* 22 (1994). Köln 1994, S. 53-57.
- Boomwhackers: <http://www.andreasvonhoff.de>

Sonstige Literatur:

- GUDERIAN, P.: *Wirksamkeitsanalyse außerschulischer Lernorte. Der Einfluss mehrmaliger Besuche eines Schülerlabors auf die Entwicklung des Interesses an Physik*. Berlin 2007.

### Abbildungsnachweis:

- Abb. 4: <http://www.bn-hof.de/~didactronic/Farbcodierung/prisma0.gif>
- Abb. 6: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Rainbow1.png>
- Abb. 7: [http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web\\_ph07\\_g8/umwelt\\_technik/03regenbogen/regenbogen\\_h.gif](http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph07_g8/umwelt_technik/03regenbogen/regenbogen_h.gif)
- Abb. 8: <http://climate.met.psu.edu/data/frost/images/rainbow.jpg>
- Abb. 17: [http://www.wdrmaus.de/sachgeschichten/kaleidoskop/bilder/02\\_9.jpg](http://www.wdrmaus.de/sachgeschichten/kaleidoskop/bilder/02_9.jpg)
- Abb. 22: <http://img3.musiciansfriend.com/dbase/pics/products/4/1/5/258415.jpg>
- Abb. 23: Kahlert, Joachim; Demuth, Reinhard: *Wir experimentieren in der Grundschule – Band 2*. Einfache Versuche zum Verständnis physikalischer und chemischer Zusammenhänge. Köln 2007, S. 158, Abb. 4.