Schulbiologiezentrum
Hannover

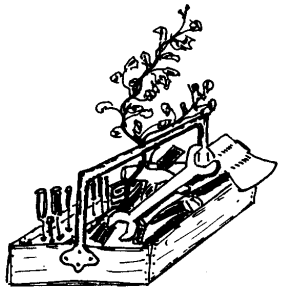
Vinnhorster Weg 2, 30419 Hannover
Tel: 0511-16847665/7
Fax: 0511-16847352
Email : schulbiologiezentrum@hannover-stadt.de

Hannover

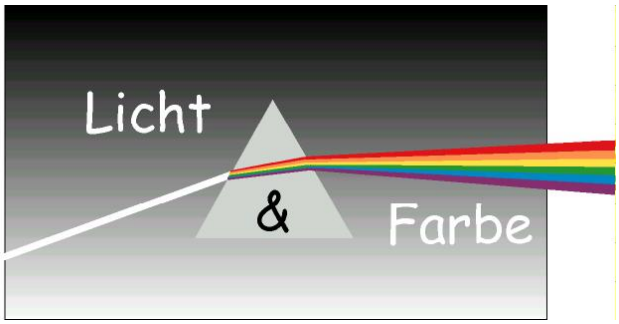
Unterrichtsprojekte Natur und Technik

19.57

**Als Anregung für
für Unterricht, Arbeitsgemeinschaften, Projektwochen
und Schullandheimfahrten:**



Physik zum Anfassen:
„Licht & Farbe“ in 12 Lernstationen



Wie kommt die Farbe in den Regenbogen, wann und wo ist er zu sehen? Warum sind Blätter grün und der Himmel blau? Warum schillern Seifenblasen und CDs in allen Farben? Wie wird das Fernsehen und die Zeitung farbig?
Mitte 2003 hat das Schul-LAB an der IGS Mühlenberg zusammen mit dem Schulbiologiezentrum Hannover begonnen, solche und ähnliche Fragen zu einem ein- bis zweitägigen Kurs zusammenzufassen. Ein methodisches Ziel dabei war den Lehrer dabei weitestgehend in den Hintergrund treten zu lassen: In – nach Absprache – unterschiedlich vielen Lernstationen können sich die Schülerinnen und Schüler selbstständig experimentierend mit der Materie auseinander setzen. Dabei haben wir gute Erfahrungen mit „wandernden“, aus 4 – 5 Jugendlichen bestehenden Kleingruppen gemacht. Nach mehreren, ganz unterschiedlich gestalteten Durchläufen möchten wir Ihnen jetzt ein Teilergebnis in Form einer Beschreibung der Lernstationen vorlegen. Wir legen die Arbeitsmaterialien (Arbeitsblätter) dazu, allerdings mit dem ausdrücklichen Hinweis, dass sie jeder jeweiligen Lerngruppe angepasst werden müssen.
Wir möchten Ihnen mit dieser Übersicht Anregungen geben, ein solches Projekt auch in Ihrer Schule durchzuführen. Die benötigten Materialien stellen wir Ihnen für einen

begrenzten Zeitraum leihweise über das Schulbiologiezentrum zur Verfügung.
Die Abfolge der dargestellten Themen ergibt sich aus dem Prinzip „Vom Phänomen zur experimentellen Klärung“ und überspannt ein breites Spektrum von „Licht & Farbe“. Der spielerische Umgang mit einem selbst erzeugten Regenbogen leitet über eine Reihe einfacher Stufen zur Untersuchung des Strahlengangs im Regentropfen. Dabei geht es um die „klassischen“ Gesetzmäßigkeiten der **Brechung**, der **Dispersion** und der **Reflexion**, nur dass sie an einer zentralen Fragestellung aufgehängt werden.
Die fast selbstverständlich erscheinende Tatsachen, dass Blätter grün und der Himmel am Tage blau führt zu einem (unerwarteten?) Zusammengang und wieder zu klassischen Themen der Physik des Lichts, nämlich der **Absorption** und **Streuung**. Licht ist Teilchen und Welle zugleich, je nach physikalisch-experimenteller Betrachtungsweise. Das mit Spalt und Prisma in sein Farbspektrum zerlegte weiße Licht führt zur Erkenntnis, dass „Weiß“ etwas ganz anderes ist als das was wir zu sehen meinen. Es führt hin zu Begriffen wie „**Infrarot**“, „**Ultraviolett**“, „**langwellig**“ und „**kurzwellig**“. Aber da verlassen wir (leider) auch schon das Feld des auf dieser Ebene experimentell Nachvollziehbaren. Das bunte Schillern der Seifenblasen und das Farbenspiel einer CD oder DVD ist aber nur zu verstehen, wenn das Licht als **elektromagnetische Strahlung** mit Welleneigenschaften aufgefasst wird. Da das Wissen darum heute zu den Standardauffassungen in der Physik gehört haben wir die Themen „**Wellen** und **Interferenz**“ mit in das Programm aufgenommen. Dabei ist uns klar, dass es Themen sind, die im Gegensatz zu den anderen, in den Lernstationen nicht experimentell gelöst werden können. Im möglichen und empfohlenen Zusammenhang mit dem relativ einfachen Selbstbau eines Spektroskops sollte der Wellencharakter des Lichts noch einmal aufgegriffen und vertieft werden. Auf der **additiven** und **subtraktiven Farbmischung** gründet sich unser Sehen, das Farbfernsehen und die Farbdrucktechnik.
Diese „tour d´horizont“ durch “Licht & Farbe“ überspannt also einen großen Teil klassischer Physikthemen. Dass die Schülerinnen und Schüler mit Phänomenen, angeleiteten Experimenten und Lösungswegen selbst befasst sind mag hoffentlich den Motivationseffekt positiv beeinflussen.
Die methodische Vorgehensweise in den Lernstationen wirken durch die Arbeitsmaterialien und die Arbeitsblätter weitgehend vorgegeben und eingegrenzt. Wir haben diese Form gewählt weil sie unserer Meinung nach den besten Überblick über den tatsächlichen Lernzuwachs ermöglicht. Unsere Besucher sind höchstens zwei Vormittage bei uns zu Gast und die Erwartungshaltung bei den Kolleginnen und Kollegen die ihre Klassen für diese Zeit „freistellen“ lassen müssen, entsprechend groß. Wir hoffen dennoch darauf, dass das praktische Tun Anlass gibt, das Eine oder Andere zusätzlich – auch später - neu zu entdecken und andere Fragestellungen und Herangehensweisen auszuprobieren. Manches müsste viel langsamer und intensiver wachsen dürfen als es im Rahmen einer Unterrichtsveranstaltung tatsächlich tut.
Als unlösbares Problem blieb die Progression der Inhalte. Die Inhalte der Stationen bauen in der dargestellten Abfolge aufeinander auf. Nicht jede Gruppe aber kann mit der Station 1 beginnen. Die meisten Gruppen sind infolgedessen Seiteneinsteiger. Manch ein Inhalt „höherwertige“ Stationen wird erst zu verstehen sein, wenn man später „unten“ angekommen ist. Wir hoffen dennoch, dass die Faszination, die vom spielerisch-entdeckenden Selber Tun und der Ästhetik vieler Farbphänomene ausgehen dürfte, auch dieses Manko erträglich macht. Unsere Erfahrungen zeigen wenigstens, dass nicht lösbare Fragen bereitwillig bis zur entscheidenden Station mitgenommen werden.

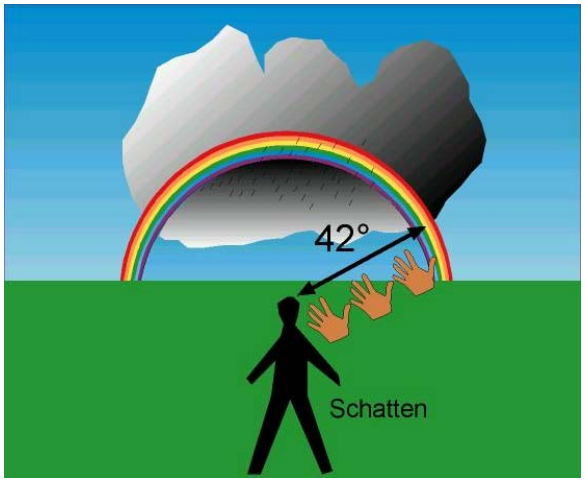
1 „Küsse unterm Regenbogen...?“

● Bringen Küsse unterm Regenbogen wirklich Glück?
● Kann man unter ihm hindurchgehen wie unter einer Brücke?
● Wo sind die Enden des Regenbogens an denen angeblich ein Schatz liegen soll?

Vorausgesetzt, die Sonne scheint und es steht ein Gartenschlauch zur Verfügung: Dann machen wir unseren Regenbogen selbst und gehen einem oft bestaunten Phänomen auf den Grund (Kamera nicht vergessen!).

Zum Phänomen des Regenbogens:
Die Physik des Regenbogens nicht ganz unkompliziert und erschließt sich nicht so leicht. Einige grundlegende Regeln lassen sich aber durch einfaches Beobachten und Ausprobieren mit einem selbst erzeugten Regenbogen herausfinden.
Zunächst gehen wir der Frage nach, wann und wo ein Regenbogen entsteht. Die Gesetzmäßigkeiten der Lichtbrechung, Dispersion und Reflektion, die zur Entstehung der Farben führen, untersuchen wir später an großen „Kunsttropfen“. Um den Strahlengang im Tropfen zu verstehen ist es notwendig, sich erst mal mit dem Regenbogen selbst zu beschäftigen. Regenbögen sehen wir nur auf der, der Sonne gegenüberliegenden Seite. Das Zentrum des gedanklich als Kreis zu vervollständigenden Regenbogens liegt genau dort, wo der Schatten unseres Kopfes liegt. Das bedeutet

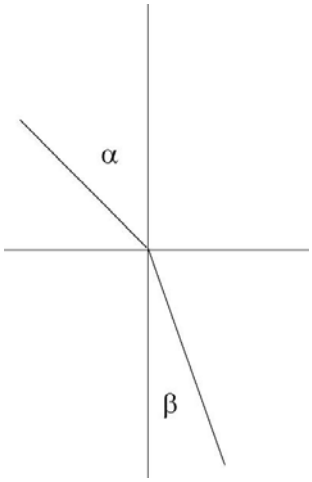
- jeder sieht „nur“ seinen eigenen ganz persönlichen Regenbogen
- der Regenbogen wandert mir mit
- Er „läuft vor mir weg“ und ich kann das Ende nie erreichen
- unter dem Regenbogen kann man nicht stehen



Der Radius des Regenbogens beträgt 42°. Das entspricht fast drei Handspannen bei ausgestrecktem Arm. Liegt der Sonne eine Regenwolke gegenüber kann man vom Schatten des eigenen Kopfes aus dreimal die weit gespreizte Hand anzulegen. Da wird der Regenbogen entstehen.
Steht die Sonne tief wölbt sich ein hoher Regenbogen über den Himmel. Die Abbildung oben entstand Ende Januar um etwa 13 Uhr. Zur Mittagszeit im Sommer muss der Horizont schon frei sein damit der dann flache Regenbogen überhaupt ins Auge fällt. Der Regenbogen zeigt – ineinander übergehend – sechs Farben: Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Violett. Rot ist außen, violett innen. Bei starkem Regen entsteht ein zweiter Regenbogen. Die Abfolge der Farben ist genau umgekehrt. Zwischen dem Haupt- und dem Nebenregenbogen ist der Himmel deutlich dunkler.

2 Brechung, Dispersion und Reflexion

Brechung:
Beim Übergang zwischen optischen Medien unterschiedlicher Dichte wird ein Lichtstrahl gebrochen, das heißt aus seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt. Der Grund ist die unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit: In dichteren Medien, beispielsweise Glas oder Wasser pflanzen sich Lichtwellen langsamer fort als in Luft oder gar im Vakuum.



Aus dem Brechungsgesetz von Snellius

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$$

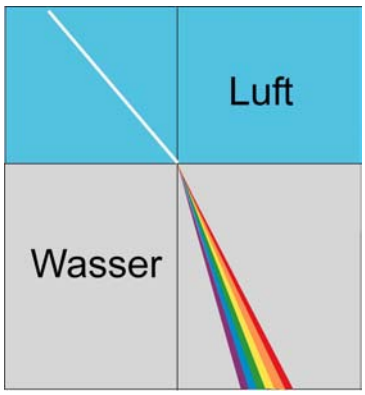
folgt: $\sin \beta = \sin \alpha : n_2$ und $\beta = \text{asn} (\sin \alpha : n_2)$

n ist die Brechzahl des Mediums,
$n_1 = 1$ für Luft,
$n_2 = 1{,}3312$ für Wasser

Die Brechzahl n ist der Quotient aus der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c und der Lichtgeschwindigkeit im Medium c_m
$n = c : c_m$ oder $c_m = c : n$

Beispiel: Ein Lichtstrahl trifft auf eine Wasseroberfläche:
Der Einfallswinkel des Lichts α sei 45° zum Lot
$\beta = \text{asn} (\sin \alpha : n_2) = 32{,}12°$

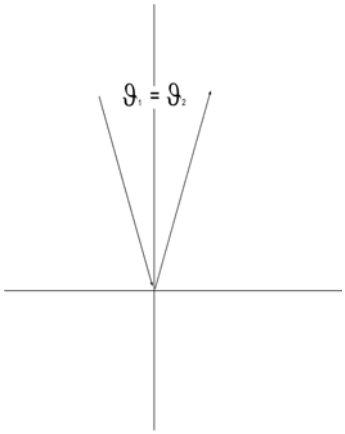
Die Abhängigkeit des Brechungswinkels vom Einfall eines Lichtstrahls lässt sich mit einem Laserpointer und einem mit Wasser gefüllten Aquarium untersuchen. Dem Wasser wird ein Tropfen Kondensmilch hinzugefügt.
Der gebrochene Lichtstrahl wird an den Milchteilchen gestreut und dadurch sichtbar. Es gilt: Je flacher der Einfallswinkel, desto stärker die Brechung an der Wasseroberfläche bis sich unterhalb eines kritischen Winkels der Lichtstrahl in einen gebrochenen und einen reflektierten Anteil aufspaltet.



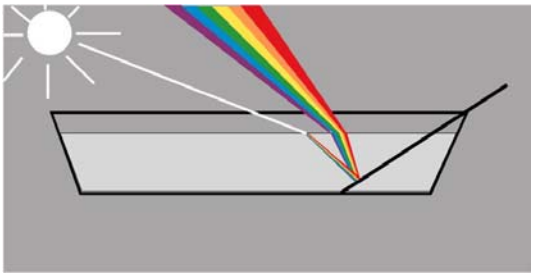
Dispersion:
Die Geschwindigkeit des Lichts und damit die Brechzahl ist in geringfügigem Maße abhängig von der Lichtwellenlänge.

Farbe	Brechzahl	β bei $\alpha = 45°$
rot	1,3312	32° 05´
gelb	1,3330	32° 02´
blau	1,3406	31° 50´
violett	1,3435	31° 45´

Dieses, als Dispersion bezeichnete Phänomen ist verantwortlich für die blauen und roten Ränder die in billigen Ferngläsern auftreten.
Stellen Sie eine mit Wasser gefüllter weiße Schale in die Sonne. Zunächst ist der Boden weiß da auf jeden Punkt Lichtstrahlen aller Spektralfarben fallen und sich zu weiß addieren. Halten Sie aber eine Hand so vor die Sonne dass der Schatten auf den Boden des Gefäßes fällt erscheint der Rand des Schattens auf der einen Seite bläulich, auf der anderen Seite rötlich. Scheiden Sie einen schmalen geraden Spalt in eine große Pappe und halten Sie diese so vor die Sonne, dass sie den Gefäßboden vollständig beschattet.. Das Sonnenlicht, das durch den waagerecht gehaltene Spalt dringt bildet sich als Farbstreifen auf dem Boden des Gefäßes ab. Unter günstigen Bedingungen sind alle Spektralfarben zu sehen.
Je tiefer das Licht ins Wasser eindringen kann, je flacher der Eintrittswinkel des Sonnenlichts und je schmäler der Spalt desto besser sind die Ergebnisse.



Reflexion: Um die Phänomene im Regenbogen verstehen zu können greifen wir die Vorgänge bei der Reflexion an spiegelnden (optisch glatten, nicht streuenden) Flächen auf. Mit Hilfe zweier Stehgreifversuche wird deutlich, dass der Eintrittswinkel gleich dem Austrittswinkel ist.
Ein Planspiegel liegt waagerecht auf dem Tisch: Unter welchen Bedingungen kannst Du Deinem Partner im Spiegel in die Augen schauen?
Ein Planspiegel liegt waagerecht auf dem Boden eines mit Wasser und einem Tropfen Kondensmilch gefüllten Aquariums. Richte einen Laserpointer auf den Spiegel und untersuche den Strahlengang bei unterschiedlichen Einfallswinkeln!



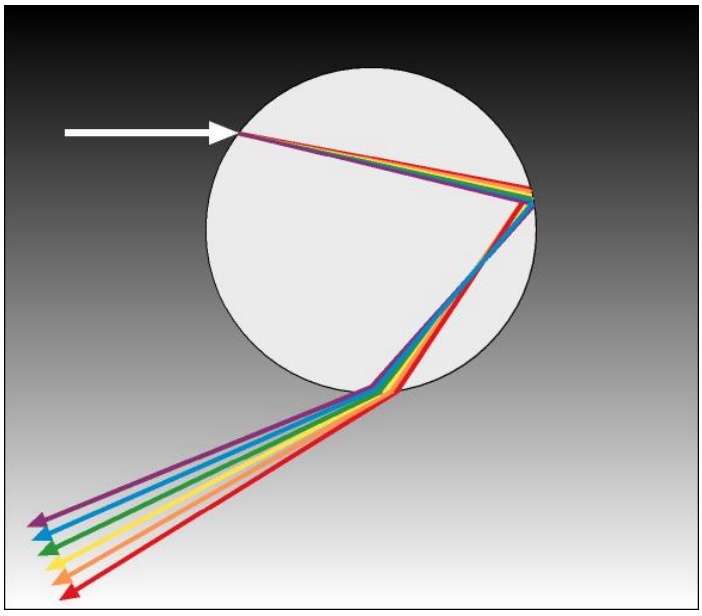
Die Phänomene Brechung, Dispersion und Reflexion lassen sich zusammenfassend mit einer flachen weißen Schale und einem Spiegel untersuchen. Diese Anordnung führt hin zu den ungleich komplizierteren Ursachen eines Regenbogens.

Das Licht der Sonne trifft – hier ohne durch einen Spalt verengt zu werden – auf die Wasseroberfläche. Aus dem schräg im Wasser aufgestellten Spiegel tritt es in allen Spektralfarben aus und kann als „Regenbogen“ auf eine weiße Wand oder – ästhetisch sehr schön! - eine innen mit Tropfen behangene Flasche projiziert werden. Dabei bildet Rot den obersten, Violett den untersten Farbstreifen. Der für die Projektion eines breiten Spektrums optimale Winkel des Spiegels kann durch Versuch und Irrtum gefunden werden. Er ist abhängig vom Eintrittswinkel des Sonnenlichts, von der Wasserhöhe über dem Spiegel und anderen Parametern.

3 Brechung, Dispersion und Reflexion im Wassertropfen

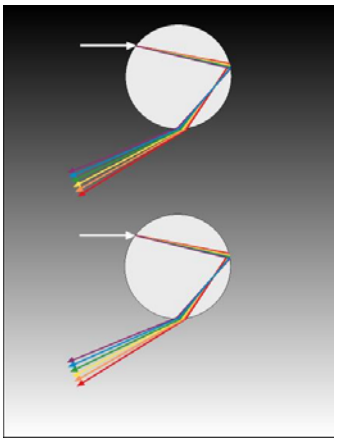
Die Sonne im Rücken und vor Dir regnet es. Wenn Sonnenlicht auf die Regenwand fällt entsteht ein Regenbogen.
Was bringt die Farbe in die Regentropfen?
Mit „Kunsttropfen“, die von einer starken Lichtquelle angestrahlt werden, lässt sich ein Teil des Rätsels lösen.

Beim Eintritt in einen fallenden, annähernd kugelförmigen Wassertropfen wird ein Lichtstrahl gebrochen, reflektiert und beim Austritt erneut gebrochen. Dabei kommt es zu einem bevorzugten Austrittswinkel von etwa 42° zum einfallenden Licht.
Da die Brechzahl im Wasser abhängig ist von der Wellenlänge des Lichts, wird das weiße Licht in seine Farbbestandteile aufgefächert (dispergiert). Rotes Licht wird am geringsten, violettes Licht am stärksten gebrochen.



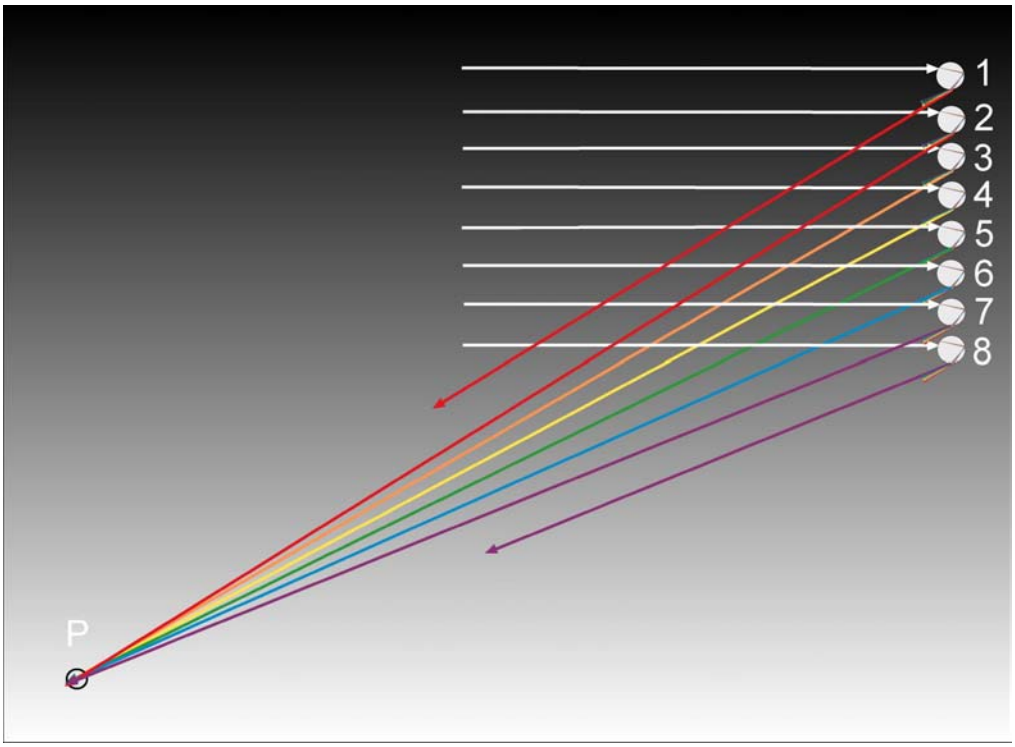
Daraus folgen - je nach Wellenlänge - unterschiedliche Reflexionswinkel an der Tropfenrückseite. Das rote Licht trifft in flacherem Winkel auf als das violette. Entsprechend ist der Reflexionswinkel im Falle des roten Lichts größer als beim violetten Licht. Das führt zur Überkreuzung der farbigen Lichtstrahlen.
Beim Austritt aus dem Tropfen wird das Licht erneut gebrochen und noch stärker aufgefächert. Das flacher auf die Tropfenoberfläche fallende violette Licht wird stärker aus der ursprünglichen Richtung abgelenkt als das rote.

Verlängern wir die farbigen Strahlen mehrerer senkrecht übereinander stehender Tropfen wird deutlich, dass gleiche „Farbstrahlen“ Parallelen bilden, ungleiche dagegen sich in großem Abstand schneiden.

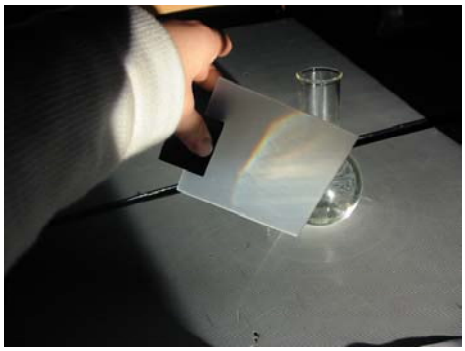


Einen Regenbogen sehen wir, wenn sich unsere Augen im Schnittpunkt aller Farbstrahlen befinden. Ein vereinfachtes Schema zeigt 8 senkrecht fallende Tropfen. Die „Farbstrahlen“ der Tropfen 2 - 7 schneiden sich im Punkt P (Augen). Der Tropfen 2 leuchtet im Schnittpunkt der farbigen Strahlen rot, der Tropfen 7 violett. Fällt der Tropfen 2 auf die Position 3 leuchtet er orange auf. Die „rote“ Position wird

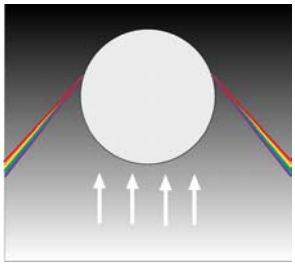
derweil vom Tropfen 1 besetzt, der bisher nicht am Regenbogen beteiligt war weil keiner seiner „Farbstrahlen“ den Punkt P berührten. Auch der „violette“ Tropfen wird beim weiteren Fall unsichtbar. Er wird durch den „blauen“ ersetzt, der jetzt „violett“ wird.
Bei einem Regenguss fällt eine riesige Menge Tropfen. Damit gibt es eine Unzahl möglicher Schnittpunkte und eine Unzahl von Regenbögen. Da wir aber nicht an mehreren Orten gleichzeitig sein können, sehen wir nur unseren „eigenen“ Regenbogen. Wer den Regenbogen anderer Leute sehen möchte, muss halt dorthin gehen...



Der Strahlengang im Regentropfen lässt sich mit Hilfe eines mit Wasser gefüllten Glaskolbens („Kunsttropfen“) und einer starken Lichtquelle, beispielsweise einem

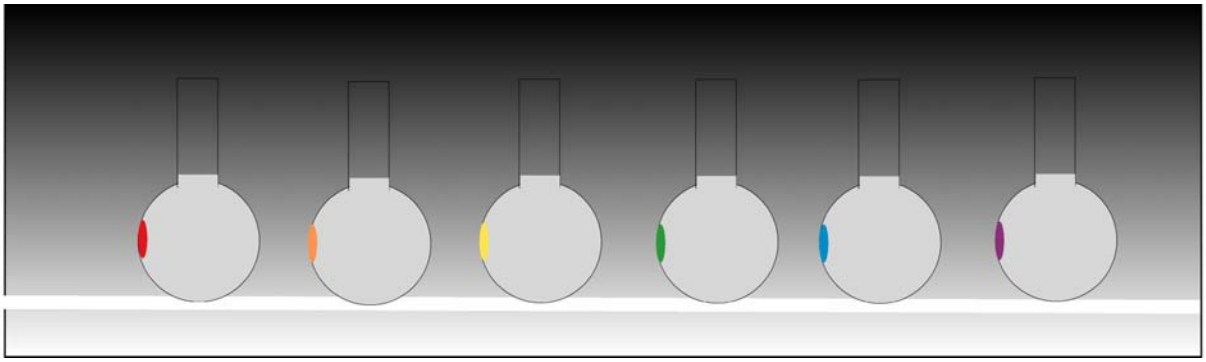


Diaprojektor experimentell untersuchen. Anschließend zeigen mehrere, quer zur Lichteinfallsrichtung aufgestellte „Kunsttropfen“ das Prinzip des Regenbogens.
Der Glaskolben muss auf einer weißen Fläche stehen. Dann erscheinen im Winkel von 42° zur Lichteinfallsrichtung auf beiden Seiten des „Kunsttropfens“ leuchtende Streifen, die alle Regenbogenfarben

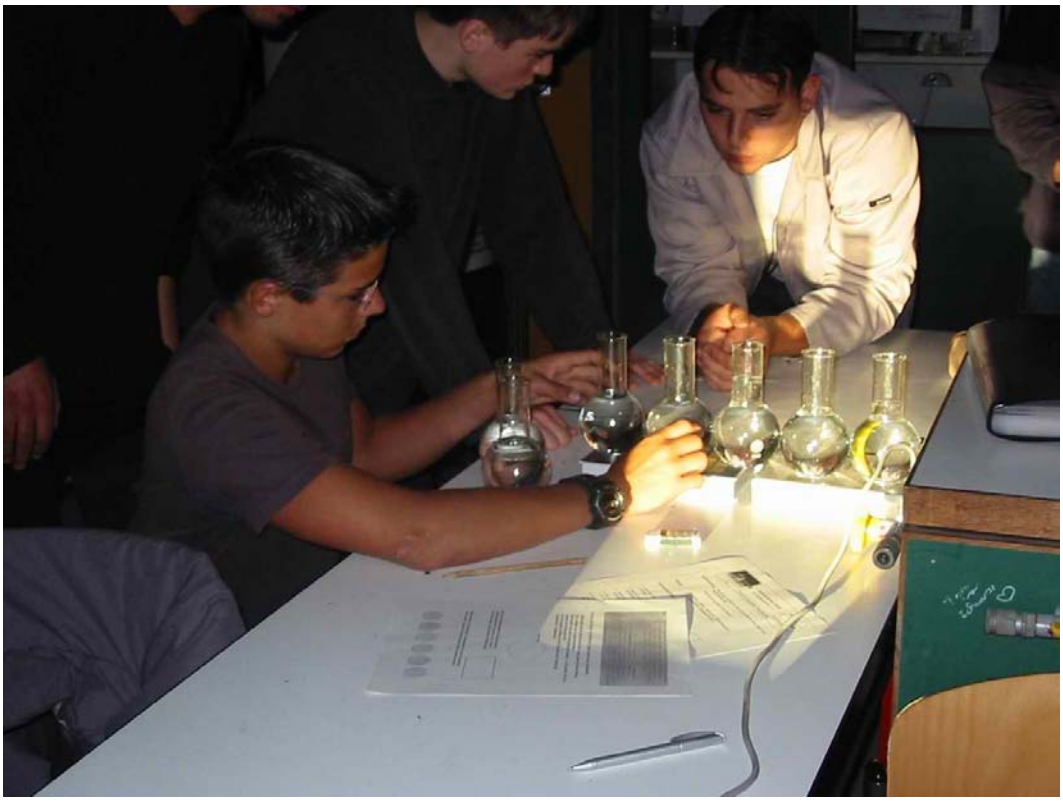


enthalten. Besonders deutlich wird das mit einer in den Farbstreifen gehaltene Milchglasscheibe. Dann erscheint ein Teil eines „Regenbogens“ der sich mit der Mattscheibe bis zu seinen beiden Enden verfolgen lässt.
Hinter dem „Tropfen“ entsteht ein schwaches farbiges Bogenmuster
In der Verlängerung der beiden leuchtenden Farbstreifen betrachtet leuchtet ein

Punkt am Rand des „Kunsttropfens“ in jeweils einer Spektralfarbe auf. Hat man einen Ort gefunden, wo er beispielsweise rot aufleuchtet, dann genügt es unter günstigen Umständen, abwechselnd das eine und das andere Auge zuzukneifen und der Punkt leuchtet violett.

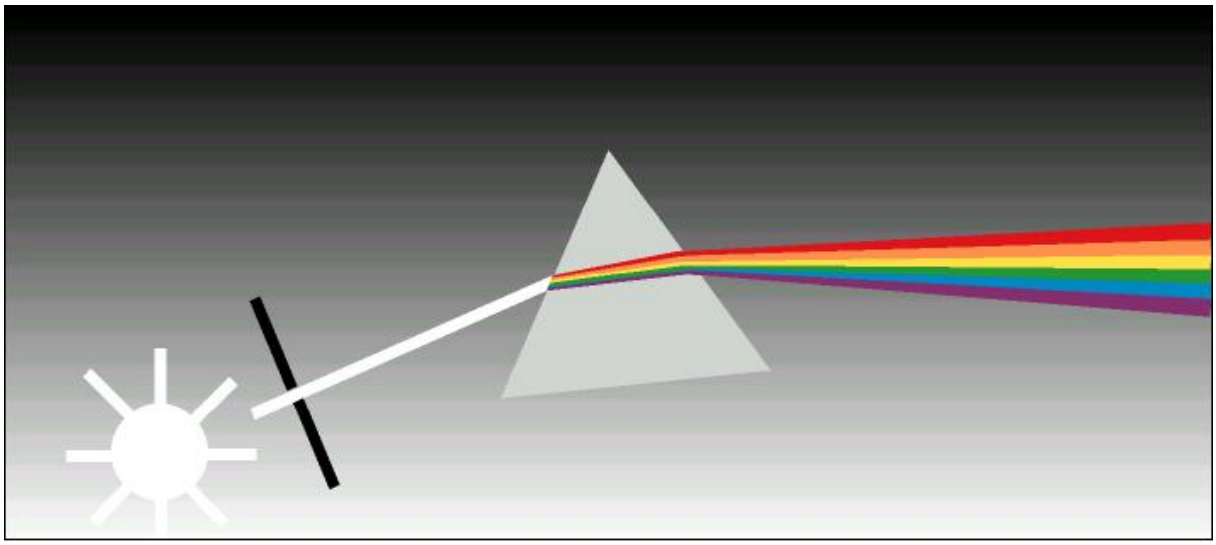


Nebeneinander und quer zum Licht des Diaprojektors aufgestellte „Kunsttropfen“ machen bei geschickter Anordnung und bei aus „passender“ Perspektive betrachtet das Prinzip des Regenbogens deutlich: Jeder „Tropfen“ leuchtet in einer anderen Farbe auf. Die Abfolge der Farben entspricht der des Regenbogens.



4 Spektralfarben mit dem Prisma

Beim Durchgang durch ein dreiseitiges Prisma wird ein durch einen Spalt verengter Lichtstrahl zweimal gebrochen: Einmal beim Eintritt in das Prisma und einmal beim Austritt. Die Brechung erfolgt stets weg von der brechenden Kante.
Die Brechzahl des Prismas ist abhängig von der Wellenlänge des Lichts: Weißes Licht wird in seine Spektralanteile aufgefächert und dieser Effekt tritt gleich zweimal ein was unter günstigen Umständen zu einem breiten farbigen Band auf einer Projektionsfläche führt.



Die mathematisch-geometrischen Zusammenhänge zwischen Ein- und Austrittwinkel sind lassen sich mit dem Brechungs- und Reflexionsgesetz darstellen. Sie sind aber zum Verständnis des Experiments nicht unbedingt erforderlich

Wir beschränken uns auf folgende Aussagen:

Die Brechzahl* des Prismas hängt von der verwendeten Glassorte ab:

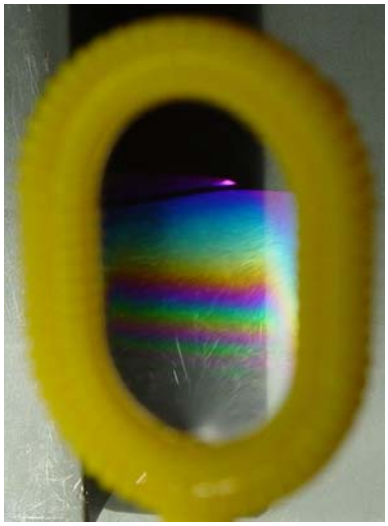
Quarzglas	1,458
Silicat-Kronglas	1,503
Borat-Flintglas	1,565
Silicat-Flintglas	1,612

*) bezogen auf gelbes Natriumlicht
(λ = 589 nm)

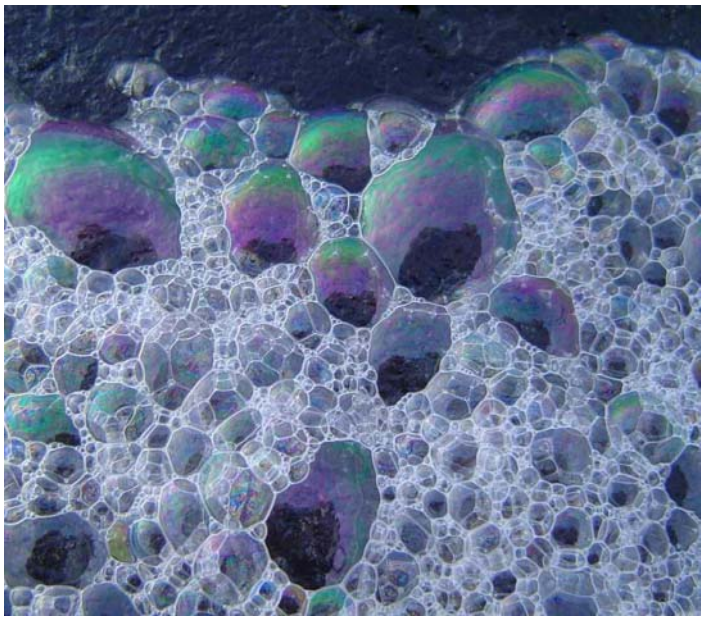
Je flacher der Lichtstrahl auf die ihm zugewandte Kante des Prismas fällt desto stärker wird er gebrochen und desto breiter ist das abgebildete Spektrum.
Unterschreitet der Eintrittswinkel allerdings einen kritischen Wert überwiegt die Reflexion besonders an der zweiten Glaskante.

5 Bunte Seifenblasen

Seifenblasen schillern in allen Regenbogenfarben. Anders als ein bunter Ball, dessen Oberfläche ein durch Aufdruck oder Bemalung festgelegtes Farbmuster zeigt wechseln die Farben auf der Seifenblasenhaut. Im Dunkeln sind diese Effekte nicht zu sehen, die Seifenblase leuchtet also nicht selbst sondern reflektiert das Licht ihrer Umgebung. Bei Beleuchtung mit nur einer Farbe sind keine Regenbogenfarben zu sehen, dafür ein Muster aus hellen und dunklen Streifen.
Auch ein Ölfilm auf dem Wasser oder zwei durch eine dünne Wasserhaut getrennte Glasscheiben zeigen solche schillernden Farbeffekte. Der physikalische Hintergrund ist der gleiche.



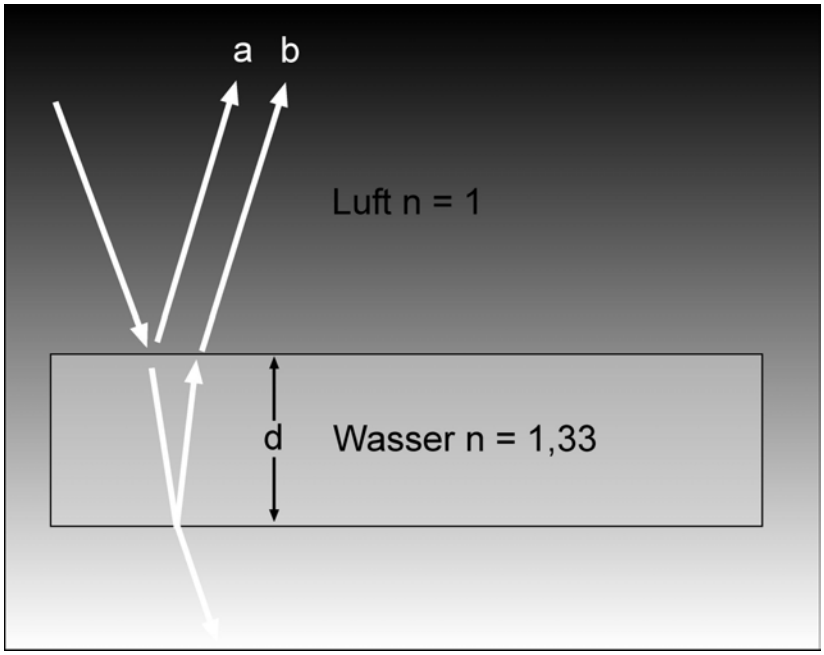
Die nebenstehende Abbildung zeigt den Ring aus einem Seifenblasenröhrchens („Pustefix“) der mit der Verschlusskappe aufrecht auf einer Tischplatte steht. Die in ihm hängende Seifenblasenhaut zeigt im Sonnenlicht und vor einem dunklen Hintergrund eine bunte horizontale Streifung. Mehrere Serien von „Regenbögen“ folgen nach unten immer schmaler und schwächer werdend aufeinander. Die obere Zone zeigt die intensivsten Farben von violett-blau (oben) bis tiefrot (unten), gefolgt vom nächsten „Regenbogen“ mit der gleichen Farbabfolge. Bald verlaufen die Zonen ineinander, der Wasserfilm wird der Schwerkraft folgend unten immer dicker und reißt oben schließlich ab: Die Haut platzt.
Mit einfarbigem Licht beleuchtet, etwa mit einem Diaprojektor und einem Farbfilter entsteht ein Muster aus hellen und dunklen Streifen.



Das Farbenspiel auf Seifenblasen lässt sich nur verstehen, wenn wir das Licht als Welle auffassen und die wahrgenommenen Farben als Strahlung einer bestimmten Wellenlänge. Wellen beeinflussen sich gegenseitig, sie verstärken sich durch positive Überlagerung oder löschen sich aus wenn Wellenberg auf Wellental trifft. Diese so genannten konstruktiven oder destruktiven Interferenzerscheinungen führen bei der Reflexion an dünnen Wasserfilmen zur Bevorzugung bestimmter Wellenlängen mit dem Ergebnis, dass aus dem weißen Wellenlängengemisch nur bestimmte Farben reflektiert, andere dagegen ausgelöscht werden. Welche Farbe reflektiert wird hängt

ab von der Stärke des Wasserfilms und vom Eintrittswinkel.
Der Wellenzug wird an der oberen Luft-Wasser-Grenze zum Teil zum Lot hin gebrochen, zum Teil reflektiert. Die Anteile von Brechung und Reflexion so wie deren Winkel sind natürlich abhängig vom Einfallswinkel. Der gebrochene Wellenzug wird an der unteren Wasser-Luft-Grenze zum zweiten Mal gebrochen als auch reflektiert. Das Ausmaß und Winkel hängen wiederum vom ursprünglichen Eintrittswinkel ab.

Die Interferenzerscheinungen an und in der Seifenblasenhaut lassen sich leichter beobachten und erklären, wenn sie mit monochromatischem, d.h. Licht einer Wellenlänge beleuchtet wird. Dann leuchtet sie natürlich nicht mehr in allen Regenbogenfarben, dafür tritt ein charakteristisches Hell-Dunkel-Muster auf. Die dunklen Streifen zeigen die Zonen in denen sich die Wellen auslöschen. Die hellen Streifen entstehen durch die Addition der Wellenzüge.



Der reflektierte Wellenzug trifft auf die obere Wasser-Luft-Grenze und wird vom Lot weg gebrochen. Die Strahlen a und b laufen jetzt parallel nebeneinander her. Ihre Phasenlage ist aber nur unter bestimmten Umständen gleich:
Der Strahl b hat den Wasserfilm zweimal passiert, er ist also schon länger unterwegs. Der Wegstreckenunterschied ist bei senkrechtem Einfall (dann keine Brechung) 2d, im Falle flacherer Eintrittswinkel größer als 2d.
Durch die zeitliche Verzögerung kommt es zu einem Gangunterschied in der Phasenlage zwischen Wellenzug a und Wellenzug b.
Hinzuzufügen sind

- der Phasensprung um 180° bei der Reflexion am optisch dichteren Medium Wasser. Der Strahl a ist damit um eine halbe Wellenlänge phasenverschoben.
- und die Tatsache, dass sich das Licht im Wasser langsamer (c_m= c/n) ausbreitet wodurch sich die Wellenlänge während des Durchlaufs durch den Wasserfilm um den Betrag $\lambda' = \lambda/n$ verkürzt.

Der mathematische Zusammenhang des Gangunterschiedes ist nach TIPLER

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2\theta_1}$$

d = Durchmesser des Wasserfilms
n = Brechzahl des Wassers (1,33)
θ_1 = Eintrittswinkel des Lichts zum Lot, 90° bei senkrechtem Einfall

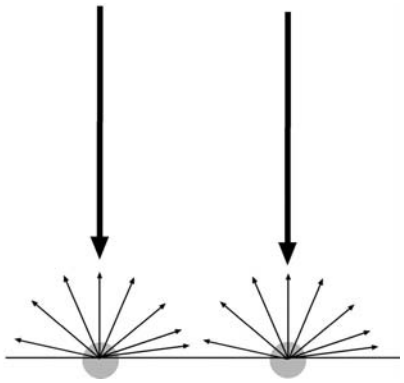
Liegen die Wellenzüge a und b in Phase (0° oder ein ganzzahliges Vielfaches von 360°) addieren sich die Amplituden zum doppelten Wert. Die Intensität ist dann vierfach so groß. Bei einer Phasendifferenz von 180° (Wellenberg trifft mit Wellental zusammen) löscht sich die Wellenfront aus.

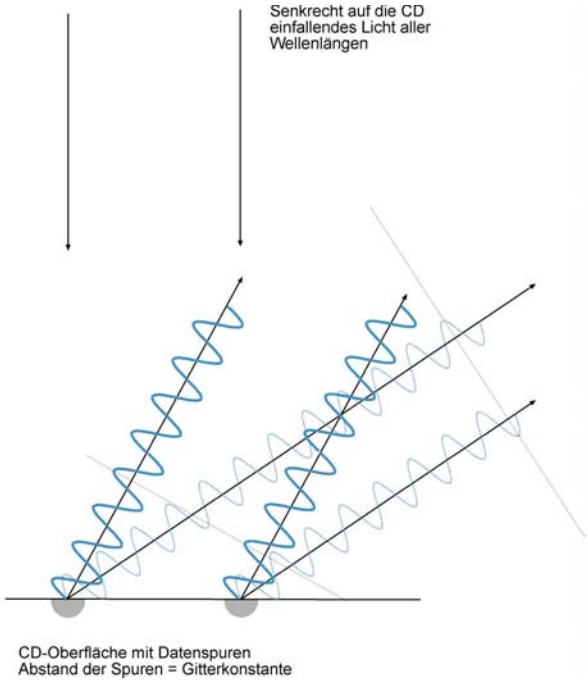
6 Mit der CD dem Licht auf der Spur

Warum leuchten CDs im Licht in allen Regenbogenfarben?

Auch CDs und DVDs fächern das Licht auf und erzeugen bunte Farbeffekte. Die auf einem dünnen Aluminiumfilm angelegten Datenspuren ähneln den Rillen einer Schallplatte, allerdings mit dem Unterschied, dass ihr Abstand mit 1,6 μm bei der CD so gering ist, dass die „Rillen“ selbst mit hochauflösenden Lichtmikroskopen unsichtbar bleiben. Physikalisch gesehen stellen die Datenspuren ein Beugungsgitter dar, dass weißes Licht in seine Spektralfarben zerlegen kann.

Das vom Auge als „weiß“ wahrgenommene Farbgemisch des Sonnenlichts wird in den Datenspuren wie in einer Spiegelrinne reflektiert, das heißt, - anders als durch einen einfachen Spiegel in *alle* Richtungen zurückgestrahlt.
Dabei kommt es zu konstruktiven und destruktiven Interferenzerscheinungen die zur Verstärkung der Amplituden oder zu ihrer Auslöschung führen. Welche Wellenlänge dabei verstärkt wird hängt vom Austrittswinkel ab.





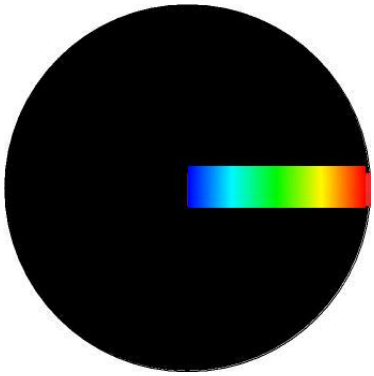
Die Abbildung links zeigt zwei Wellenzüge die phasengleich nebeneinander herlaufen. Ihre Wellenberge und Wellentäler fallen genau zusammen (gestrichelte Linie) und verstärken sich gegenseitig (konstruktive Interferenz). Zwei weitere Wellenzüge werden unter einem anderen Winkel so reflektiert, dass die Wellenberge mit den Wellentälern zusammenfallen. Das Ergebnis ist Null, das heißt, sie löschen sich aus. Da die Wellenlänge mit einer bestimmten Farbe korrespondiert ist diese Farbe aus dem einen Blickwinkel sichtbar, aus dem anderen nicht.
Halten wir eine CD gegen die Sonne oder eine andere eine starke Lichtquelle, projiziert sie konzentrische Farbringe an eine Wand oder an die Decke.
Sie enthalten mehrere immer schwächer leuchtende Folgen (Ordnungen) aller Spektralfarben. Die Tatsache, dass der rote Ring stets außen, der violette stets innen liegt lässt vermuten, dass der Beugungswinkel mit der Wellenlänge steigt. Er hängt darüber hinaus mit der sogenannten Gitterkonstante zusammen, dem Abstand zwischen den Rillen. Eine kleine Gitterkonstante führt zu größeren Beugungswinkeln, spreizt also die Farben stärker.
Aus der Gitterkonstanten g (bei einer CD 1600 nm) folgt in der n-Ordnung der Reflexionswinkel α

$\lambda * n = g * \sin \alpha \quad \Rightarrow \quad \sin \alpha = (\lambda * n)/g \quad \Rightarrow \quad \alpha = \text{asn}\ (\lambda * n)/g$

Licht der Wellenlänge 530 nm (grün) wird bei senkrechtem Auftreffen also unter den Winkeln 19,3° , Licht mit λ = 660 nm (rot) unter 24,4° reflektiert.

Farbe	Wellenlänge in nm*	Beugungswinkel in Grad
Violett	400 - 450	14,5 – 16,3
Blau	450 - 500	16,3 – 18,2
Grün	500 - 570	18,2 – 20,9
Gelb	570 - 590	20,9 – 21,6
Orange	590 - 620	21,6 – 22,8
Rot	620 - 700	22,8 – 25,9

*nm = 1 Milliardstel m oder 1 Millionstel mm



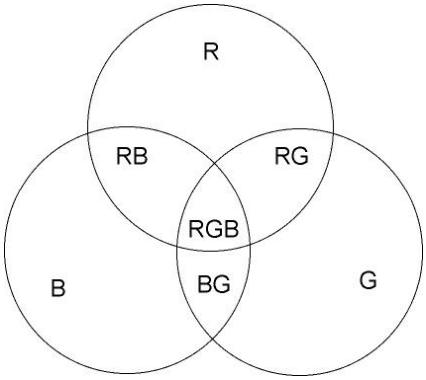
Mit einer CD lässt sich untersuchen, wie sich das Licht der Sonne oder das verschiedener Lampen zusammensetzt . Dazu wird die CD bis auf einen schmalen Streifen abgedeckt oder abgeklebt. Schneiden Sie einen schmalen Spalt in ein großes Stück Pappe. Das Licht – und nur dieses Licht! - fällt durch einen quer zum Streifen gehaltenen schmalen Spalt auf die CD. Es entsteht ein Spektrum, vergleichbar mit dem des Prismas.
Sonnenlicht und Glühlampen zeigen ein kontinuierliches Spektrum mit ineinander übergehenden Farben, Energiesparlampen und andere Gasentladungsleuchten dagegen ein aus einzelnen farbigen Streifen bestehendes Linienspektrum.
Leuchtstoffröhren enthalten gasförmiges Quecksilber unter geringem Druck. Die angelegte Spannung führt dazu, dass Elektronen im Quecksilber auf höhere Energieniveaus gehoben werden. Sie fallen unter Aussendung bestimmter Wellenlängen auf ihr normales Energieniveau zurück. Bei Leuchtstoffröhren sind eine violette, eine grüne, eine schwache gelbe und eine rote Linie zu sehen. Bestimmte chemische Verbindungen auf der Innenwand der Leuchtstoffröhre werden durch die vom Quecksilber ausgehende
Strahlung sekundär angeregt und führen zu einem „wärmeren“ Farbton. Die starke violette Linie verschiebt den Gesamteindruck bei der „klassischen“ Leuchtstoffröhre allerdings ins bläuliche.

7 Additive Farbmischung

Konzertauftritt der „White´s No Colour“. Deine Aufgabe als Bühnentechniker ist es, die Gruppe in praktisch allen Farben auszuleuchten. Es stehen drei Scheinwerfer mit Farbfiltern in Rot, Grün und Blau zur Verfügung.
Die Helligkeit der Schweinwerfer lässt sich über die Spannung regeln.

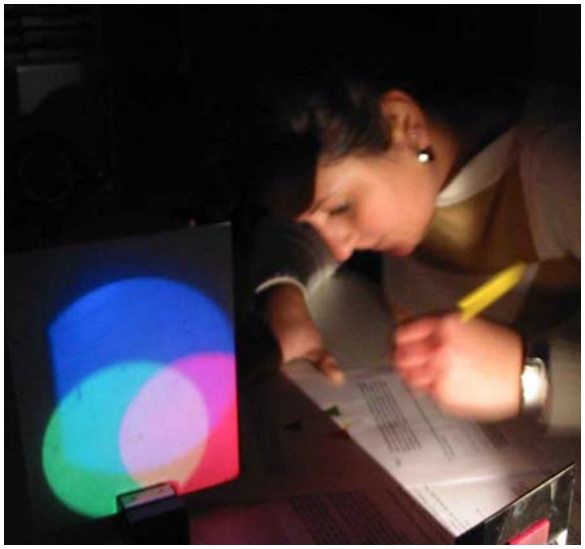
Drei mit Scheinwerfern auf eine weiße Fläche projizierte rote, grüne und blaue Farbkreise werden so ausgerichtet, dass sich die Kreise zum Teil überlagern. Der Schnittpunkt aller drei Grundfarben erscheint fast weiß. Dort wo sich nur zwei Farben addieren sich diese zu den Komplementärfarben:

- Rot und Grün zu Gelb,
- Grün und Blau zu Cyan,
- Rot und Blau zu Magenta.



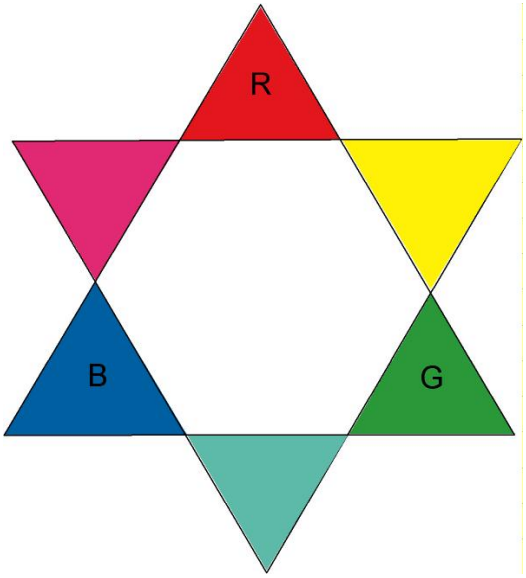
Ein „Kleeblatt“ aus den drei Farbkreisen zeigt Weiß (RGB), Gelb (RG), Cyan (BG) und Magenta (RB).
Das Weiß im Zentrum erscheint gelblich weil die Glühfäden der Scheinwerfer auf Grund ihrer relativ geringen Betriebstemperatur kein weißes sondern gelbliches Licht erzeugen. Weiß entsteht, wenn Sonnenlicht eingespiegelt und durch die Farbfilter gegeben wird.

Wird die Helligkeit der Scheinwerfer reduziert, verblassen die Grundfarben. Dabei verändern sich auch die Farben in den Schnittflächen.



Im Prinzip sind mit drei RGB-Scheinwerfern alle Spektralfarben darstellbar.
Die Zusammenhänge sind mit dem „Farbensechseck“ gut darstellbar:
An den Spitzen des darin enthaltenen aufrecht stehenden Dreiecks stehen die Grundfarben RGB. Die Spitzen zwischen jeweils zwei Grundfarben enthalten die Komplementärfarben, z.B. Cyan aus Grün und Blau. Das zentrale Sechseck ist weiß, da die Addition aus RGB Weiß ergibt. Die Addition einer Grundfarbe und der ihr im Farbensechseck gegenüberstehenden Farbe ergibt ebenfalls Weiß.

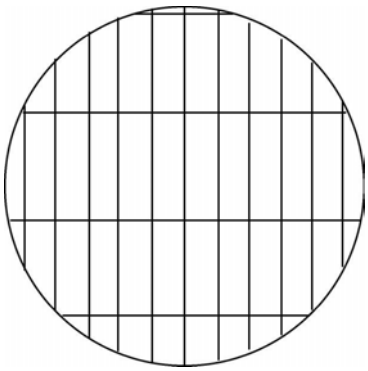
Zu Weiß ergänzt sich beispielsweise Rot und Cyan. Cyan setzt sich aus Grün und Blau zusammen.



8 Farbig fernsehen

Vor 1967 gab es in Deutschland nur schwarz-weiße Bilder im Fernsehen. Welche Technik macht es möglich, alle Farben auf den Bildschirm zu bringen?
Mit der Lupe und unseren Kenntnissen zur „Additiven Farbmischung“ lässt sich ein Teil des Rätsels lösen.

Geht man mit den Augen sehr nahe an das Fernsehgerät heran sieht man dass sich die „Mattscheibe“ aus Punkten zusammenzusetzen scheint. Mit der Lupe ist zu erkennen, dass die Fläche von senkrechten farbigen „Bändern“ durchzogen ist die ihrerseits winzige rechteckige Felder aufgeteilt sind. In weißen Bereichen des Fernsehbildes leuchten die „Bänder“ in den Farben Rot, Grün und Blau. In schwarzen Abschnitten verblasst das Leuchten und die Bänder erscheinen schwarz.
Von der neueren LCD-Technik einmal abgesehen beruht Fernsehen darauf, dass die Bildröhre einen Elektronenstrahl erzeugt der auf Grund der hohen Spannung stark beschleunigt wird. Die Pixel werden mit den sehr energiereichen Elektronen



„beschossen“ und werden dadurch zum Leuchten angeregt. Durch starke Ablenkmagneten kann der Elektronenstrahl gelenkt werden und tastet so nach und nach jede Zeile der Bildschirmoberfläche ab. Schwarz-weiß Fernsehen heißt nichts anderes als dass die Pixel als mehr oder weniger stark beschossen werden und aufleuchten: Kein Elektronenstrahl heißt schwarzer Pixel, stärkst möglicher Elektronenstrahl, weißer Pixel. Dazwischen gibt es eine Unzahl von Grauwerten.
Um farbige Bilder darzustellen bedient sich die Fernsehtechnik der Additiven Farbmischung. Jeweils ein roter, ein grüner und ein blauer Farbpunkt (Pixel) bilden einen Farbtripel (Triplett). Jeder Pixel besteht aus in einer der Grundfarben fluoriszierenden Grundfarben. Der Rot-, Grün- und Blauanteil jedes Tripletts ist abhängig von der Stärke des Elektronenstrahls.

Da aus den Grundfarben RGB alle Spektralfarben gemischt werden können wird jedes Triplett in einer eigene Farbe aufleuchten.
Aus dem Abstand einiger Meter betrachtet verfließen die Pixel zu einem Gesamteindruck.

Farben die nicht im Spektrum enthalten sind, etwa braun, entstehen dadurch, dass ein bestimmter Anteil Schwarz hinzugemischt wird.

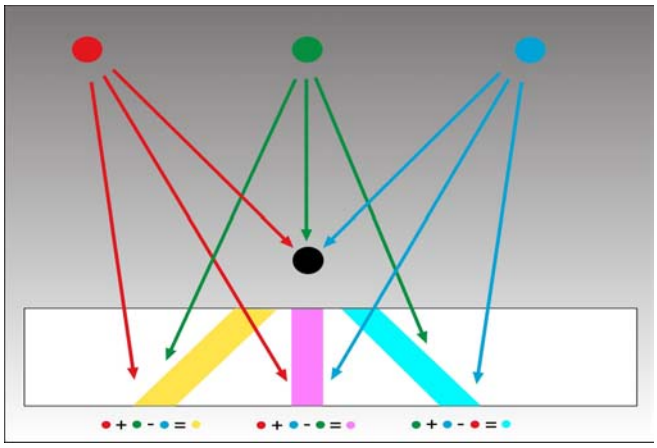
Die obere Farbreihe im Testbild zeigt Weiß, Gelb, Cyan, Grün, Magenta, Rot, Blau und Schwarz. Unter der Lupe zeigt sich folgendes Bild:

9 Subtraktive Farbmischung

In der Disco gibt es manchmal Farben, die gibt es eigentlich nicht...
Warum erzeugen rote, grüne und blaue Lampen leuchtend bunte Schatten in ganz „neuen“ Farben?

Drei in einer Reihe montierte Scheinwerfer mit Licht in den Grundfarben Rot, Grün und Blau strahlen gemeinsam auf eine weiße Fläche. Die Addition von RGB ergibt – sofern die Leuchten auf einen Punkt ausgerichtet sind – theoretisch weißes Licht. Wirklich weiß ist die angestrahlte Fläche allerdings nur dann, wenn die Lichtquellen hinter den Farbfiltern tatsächlich weißes Licht erzeugen.

Der über die weiße Tischfläche gehaltene Bleistift erzeugt drei Schatten in den Farben Gelb, Magenta und Cyan. Aus der Anordnung der Leuchten (Rot, Grün, Blau) und den farbigen Flächen auf dem Tisch lässt sich ableiten, dass die blaue Leuchte für den gelben Schatten „verantwortlich“ ist, entsprechend die grüne für den magentafarbigen und die rote für den cyanfarbigen.



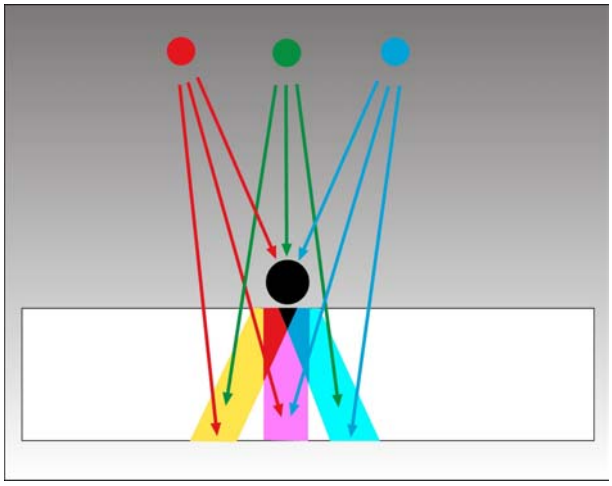
Kurz gefasst ergibt:

Rot + Grün – Blau = Gelb

Rot + Blau – Grün = Magenta

Grün + Blau – Rot = Cyan

Überlagern sich die Schatten bei geringem Abstand zur Projektionsfläche, bei eng nebeneinander montierten Leuchten oder durch einen großen Schattenwerfer entstehen zusätzliche Schattenfarben:



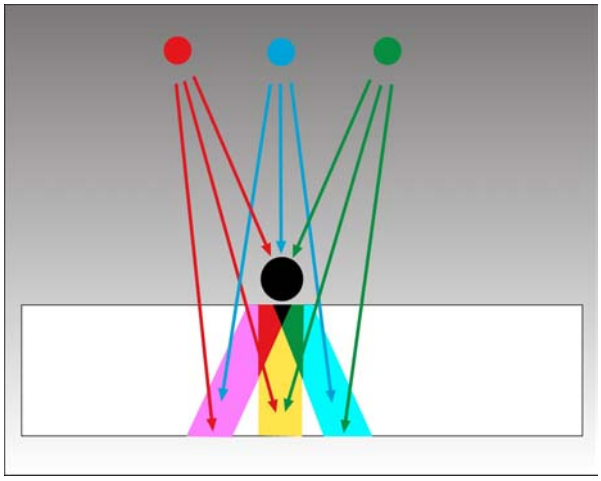
Einfach lässt sich sagen, dass die rote Schattenfläche nur vom Licht des roten Scheinwerfers getroffen wird. Das Licht der grünen und blauen Scheinwerfer wird durch den Gegenstand blockiert. Die blaue Schattenfläche erhält kein rotes und kein grünes Licht. Verdeckt der Gegenstand alle Leuchten ist sein Schatten schwarz.

Rot	+ Grün	+ Blau	- Rot	- Grün		=	Blau
Rot	+ Grün	+ Blau	- Grün	- Blau		=	Rot
Rot	+ Grün	+ Blau	- Rot	- Grün	- Blau	=	Schwarz

Als Zusatzaufgabe bietet sich die Frage an, unter welchen Umständen ein grüner Schatten entstehen könnte

Rot	+ Grün	+ Blau	- Rot	- Blau		=	Grün

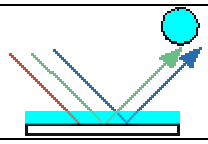
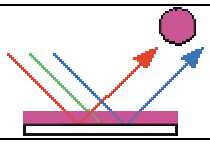
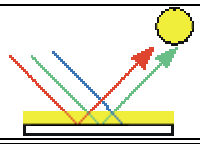
In der vorgegebenen Anordnung (RGB) gibt es keinen grünen Schatten weil sich die gelben und cyanfarbigen Schatten nur innerhalb des schwarzen Bereichs überlappen. Durch Austausch der Scheinwerfer, beispielsweise des blauen und des grünen, kann auch ein grüner Schatten entstehen:



10 Farbig drucken

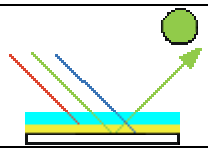
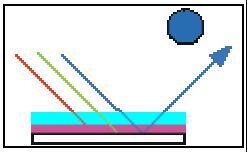
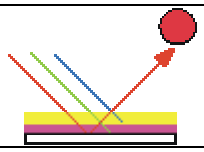
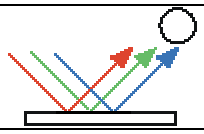
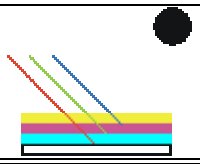
Problemstellung:
Auf einer Zeitungsseite findet man unten einen schwarzen, einen blauengrünen, einen magentafarbigen und einen gelben Punkt.
Die Farbpatronen eines Tintenstrahldruckers enthalten Gelb, Cyan und Magenta. Ohne die schwarze Patrone werden die Farben nicht richtig widergegeben.
Wie entsteht ein farbiges Foto in der Zeitung oder im Drucker?

Sachhintergrund:
Farbig drucken ist eine technische Anwendung der subtraktiven und additiven Farbmischung“:
Ein Farbpigment hat bestimmte Absorptions- und Reflexionseigenschaften. Cyan beispielsweise absorbiert den roten Anteil des weißen Lichts, subtrahiert also diesen Bereich aus dem Spektrum. Alle anderen Anteile, hier der grüne und der blaue, werden vom Farbpigment und vom darunter liegenden weißen Papier reflektiert. Grün und Blau addieren sich zu Blaugrün (Cyan).

Tintenfarbe	Absorbierte Farbe	Reflektierte Farben	Farbeindruck	Darstellung
Cyan	Rot	Blau, Grün	Cyan	
Magenta	Grün	Blau, Rot	Magenta	
Gelb	Blau	Rot, Grün	Gelb	

Die anderen Spektralfarben kommen durch das Auftragen mehrerer Farbpigmente zu Stande. Schwarz entsteht durch alle drei Farbpigmente, die das gesamte Spektrum absorbieren. Die „Farbe“ Weiß ist die Kostengünstigste, hier reicht das weiße Papier. Farben wie Braun oder Rosa entstehen durch Hinzugabe von schwarzen Pigmenten.

Die Farbsättigung (helle oder dunkele Farben) wird dadurch eingestellt, dass mehr oder weniger Tinte auf das Papier gegeben wird. Beim Zeitungsdruck lässt sich mit der Lupe (oder besser einem stärker vergrößernden und auf einem Stativ montierten Binokular) feststellen dass sich eine farbige Fläche aus kleinen Punkten in den vier Druckfarben zusammensetzt. Helle und dunkle Farbtöne entstehen dadurch, dass Farbpunkte mehr oder weniger dick aufgetragen werden, braune und rosa Töne durch Hinzusetzen von schwarzen Punkten.

Tintenfarbe	Absorbierte Farbe(n)	Reflektierte Farbe(n)	Farbeindruck	Darstellung
Cyan + Gelb	Rot, Blau	Grün	Grün	
Cyan + Magenta	Rot, Grün	Blau	Blau	
Magenta + Gelb	Grün, Blau	Rot	Rot	
- - -	- - -	Rot, Grün, Blau	Weiß	
Magenta + Gelb + Cyan	Grün, Blau, Rot	- - -	Schwarz	

11 Warum ist der Himmel blau? Warum geht die Sonne rot unter?

Warum ist der wolkenlose Himmel nicht rot, gelb oder grün? Warum gerade blau? Ist er auf anderen Planeten auch blau? Auf dem Mond ist er schwarz...
Warum „errötet“ die Sonne morgens und abends?

Der „blaue Planet“ Erde ist durch blaue Ozeane und eine blaue Lufthülle gekennzeichnet. Über unserem Mond ist der Himmel schwarz und man kann tagsüber – gleich neben der weißen Sonne - die Sterne sehen. Auf der Erde ist der Himmel – anders als auf dem Mond - tagsüber auch dort hell, wo die Sonne nicht steht.
Das weiße Licht der Sonne wird in der Erdatmosphäre gestreut. **Streuung** bedeutet, dass die Lichtquanten (Photonen) die vorwiegend zweiatomigen Gasmolekühle zum Schwingen anregen und sie dazu zu veranlassen, die aufgenommene Energie in alle Richtungen abzustrahlen.
Größenordnungsmäßig liegen N_2 und O_2 , die zusammen über 99% der Atmosphäre ausmachen, unter der Wellenlänge des Lichts. Bei solchen Teilchengrößen gilt der Streumechanismus der Rayleigh-Strahlung. Das Ausmaß der Streuung (Streuquerschnitt σ) ist abhängig von der Frequenz ω der Strahlung und von der Größe der Teilchen (Molekülvolumen) V.
Die Frequenz und die Wellenlänge der Strahlung sind über die Lichtgeschwindigkeit miteinander verknüpft: $c = \omega\lambda$. c hat den Wert 300000 km/s oder $3 * 10^8$ m/s.

$$\sigma \approx \frac{\omega^4 V^2}{6\pi c^4}$$

Kurzwelligere Strahlung (heißt: höhere Frequenz) wird wegen ω^4 erheblich stärker gestreut als langwellige. Das Molekülvolumen V steht nur in der zweiten Potenz (V^2) und schlägt minder stark durch.

Die „griffigere“ Formel für die Wahrscheinlichkeit der Rayleigh-Streuung ist

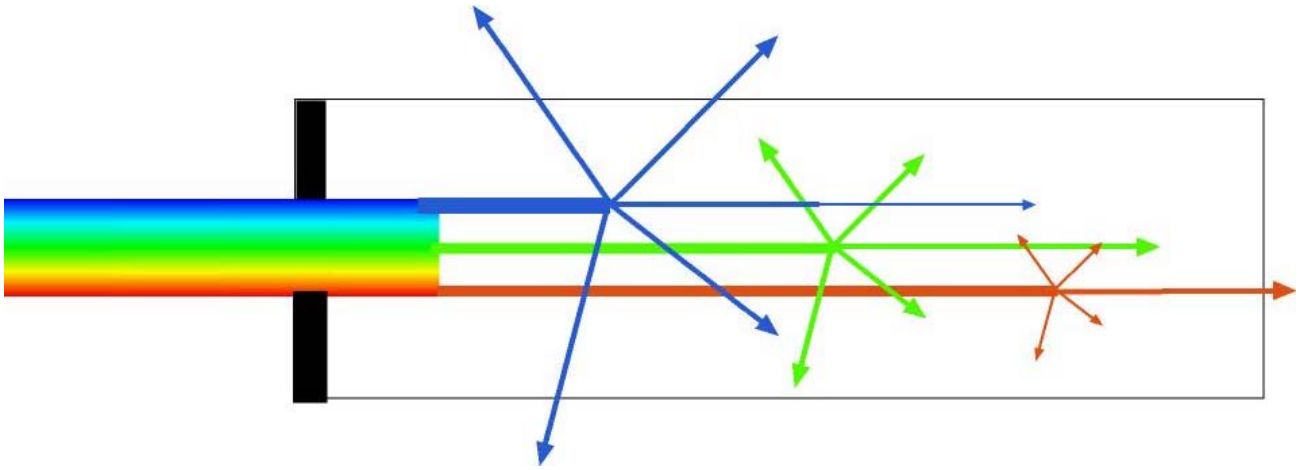
$$\frac{1}{\lambda^4}$$

Je kürzer die Wellenlänge, desto größer die Streuung. Für violettes Licht der Wellenlänge 400 nm ist die Wahrscheinlichkeit an Gasmolekülen der Atmosphäre gestreut zu werden 9,3 mal so hoch wie für rotes Licht mit λ = 700 nm.
Die mittlere freie Weglänge eines Photons in der Atmosphäre, dass heißt der Kehrwert der durchschnittlichen Kollisionswahrscheinlichkeit mit einem Molekül ist ebenfalls wellenlängen- bzw. frequenzabhängig. Hier gilt

$l \approx 160\lambda^4$ (l = Eindringtiefe in km, λ in μm)

Für 400 nm (violett) beträgt die Eindringtiefe etwa 4 km, für 800 nm (rot) 65 km. Tagsüber, bei hohem Sonnenstand wird nur der violette und blaue Anteil gestreut und damit aus dem Spektrum subtrahiert. Übrig bleibt eine gelbliche Sonne. Steht die Sonne am Horizont und ist die Wegstrecke des Lichts durch die Atmosphäre mehrere hundert Kilometer lang, wird auch die längerwellige Strahlung gestreut. Dann fehlt dem direkten Sonnenlicht zunehmend auch der grüne und gelbe Anteil. Er findet sich zwar am Himmel, die Sonne selbst aber wird rot.

Die Streueffekte in der Atmosphäre lassen sich mit einfachen Mitteln mit in Wasser suspendierter Milch simulieren. Die Größe einzelner emulgierter, nicht zusammen geflossener Milchfetttröpfchen liegt etwa bei der Wellenlänge des Lichts, sie sind also mit den Gasmolekülen in der Atmosphäre vergleichbar.
Geben Sie einige wenige Tropfen Milch in ein mit Wasser gefülltes Glasgefäß. Das direkte Licht einer davor aufgestellten Leuchte erscheint nach gelblich bis rötlich, je nach der Weglänge die das Licht durchläuft. Betrachten Sie das Gefäß von der Seite vor einem dunklen Hintergrund so erscheint die Suspension bläulich.
Besser noch ist es (aber Vorsicht mit den Augen!), das Licht der Sonne mit einem Spiegel durch eine gleich stark konzentrierte Milchsuspension zu schicken. Da das Licht der Sonne entsprechend ihrer wesentlich höheren Oberflächentemperatur mehr kurzwellige Anteile hat als das einer Kunstlichtquelle, wird die Streuung des blauen Lichts zur Seite hin noch erheblich deutlicher. Dafür wird das direkte Licht „nur“ gelblich und nicht rötlich.



Im Unterricht empfiehlt sich folgender Versuchsaufbau: Weißes Licht dringt über einen Spalt (Dia Projektor mit Schlitzblende) in die Schmalseite eines mit einer Wasser-Milch-Suspension gefüllten Aquariums ein. Der kurzwellige violette und blaue Anteil wird schon bei geringer Eindringtiefer an den im Wasser schwebenden Fettkügelchen gestreut. Mittlere Wellenlängen (grün) dringen tiefer ein und werden erst bei größerer Weglänge stärker gestreut. Das langwellige rote Licht durchdringt die Suspension nur wenig geschwächt. Sehr lange Wegstrecken führen allerdings auch hier zur Streuung.
Mit blauen, grünen und roten Farbfiltern und einem Luxmeter lässt sich der Anteil der durch Streuung subtrahierten Strahlung für unterschiedliche Wellenlängenbereiche untersuchen.

12 Warum sind Blätter grün?

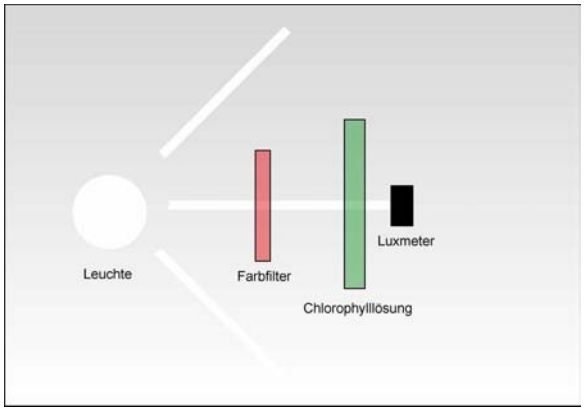
Blätter sind nur im weißen Licht grün. Mit rotem oder blauem Licht bestrahlt erscheinen sie mehr oder weniger schwarz...

Der grüne Blattfarbstoff Chlorophyll absorbiert Teile des elektromagnetischen Strahlungsspektrums der Sonne. Die dabei eingefangene Energie wird bei der Photosynthese in chemischen Verbindungen (Zucker, Stärke) als Betriebs- und Reservestoff festgelegt.
Die Absorptionsmaxima des Chlorophylls liegen im roten und im nahen ultravioletten Bereich des sichtbaren Spektrums. Daher erscheinen grüne Blätter in Rot- oder Blaulicht nahezu schwarz.
Die Sonne emittiert gemäß ihrer Oberflächentemperatur von etwa 6000 K ein Strahlungsspektrum das sein Maximum bei 483 nm also im Gelbgrünen hat. Die spektrale Empfindlichkeit unserer Augen liegt – wohl nicht zufällig – gerade im gelbgrünen Bereich.
Warum liegt die eine Absorptionsspitze des Chlorophylls im roten Bereich und wie erklärt sich das zweite Maximum im blauvioletten? Und warum wird der grüne Bereich nicht genutzt sondern reflektiert?

Die Energie der mit der Strahlung transportierten Photonen steigt nach $E = hc/\lambda$ mit abnehmender Wellenlänge. Die Energie der Photonen am „oberen“ Ende des sichtbaren Spektrums (λ = 400 nm) ist mit 3,1 eV fast doppelt so hoch wie die „roter“ Photonen (λ = 700 nm $\rightarrow$1,77 eV)
Die Strahlungsverteilung der Sonne zeigt eine breite Schulter zum Roten und Ultraroten Bereich hin. Die Schulter zum Ultravioletten zeigende Schulter hingegen bricht steil ab. Die Photonendichte im langwelligeren Bereich ist damit größer als im kurzwelligen. Die geringere Photonenenergie auf der roten Seite wird kompensiert durch eine größere Anzahl von Teilchen.
Durch Absorptions- und Streuungsprozesse in der Atmosphäre wird die Strahlungsspitze am Erdboden zum Roten hin verschoben. Die Lufthülle der Erde streut besonders stark im blauen Abschnitt des Spektrums. Deswegen ist der Himmel tagsüber blau und das Sonnenlicht erscheint gelblicher als es außerhalb der Atmosphäre der Fall ist. Dass das zweite Maximum am blauen Ende des Spektrums liegt mag eine Anpassung an das blaue Streulicht des Himmels sein, das Absorption auch bei indirektem Licht zulässt.
Die Resonanzeigenschaften des Chlorophyllmoleküls werden kein Zufall sein,

sondern Ergebnis einer frühen und auf die Bedingungen der Erde gerichteten Evolution. Pflanzen auf anderen Planeten müssen also nicht unbedingt grün sein, vielleicht haben sie sogar keine für uns wahrnehmbare Farbe...

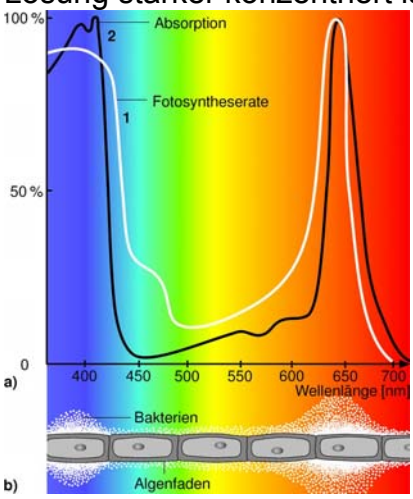
Experimentell lassen sich die Absorptionseigenschaften des Chlorophylls mit Hilfe einer Leuchte, Farbfiltern, einer mit einer Chlorophylllösung gefüllten Küvette und einem Luxmeter untersuchen.
Die Leuchte sollte möglichst hell sein und fast weißes Licht erzeugen. Da die Betriebstemperatur auch heller Halogenstrahler weit unter der Oberflächentemperatur der Sonne liegt wird das Licht stets gelblicher als weiß sein. Alternativ zur Leuchte kann auch die Sonne als Strahlungsquelle genutzt werden. Um die Gefahr von Augenschäden beim direktem Betrachtender Sonne auszuschließen möchten wir empfehlen, das Sonnenlicht durch in den Versuchsaufbau einzuspiegeln.
Messen Sie zunächst mit dem Luxmeter die Helligkeit der Strahlungsquelle. Halten Sie dann nacheinander die Farbfilter davor und notieren Sie erneut die Helligkeit.
Bereiten Sie eine Chlorophylllösung vor, indem Sie ein grünes Blatt mit einem Mörser unter Zugabe von etwas Sand und etwas Wasser in einer Reibschale zu einem Brei verarbeiten. Gießen Sie den Brei mit Wasser auf und geben Sie ihn durch einen Kaffeefilter. Die Lösung sollte hellgrün und frei von Trübstoffen sein.



Füllen Sie eine zweite Küvette mit Wasser. Messen Sie die Intensität des Lichts nach dem Durchgang durch die mit Wasser gefüllte Küvette. Wiederholen Sie die Messung mit der Chlorophylllösung. Setzen Sie die Messwerte ins Verhältnis. Wiederholen Sie die Messung – nunmehr nacheinander mit den Farbfiltern, jeweils mit Wasser und mit der Chlorophylllösung. Das absorbierte Anteil lässt sich als Quotient oder als Prozentwert berechnen.

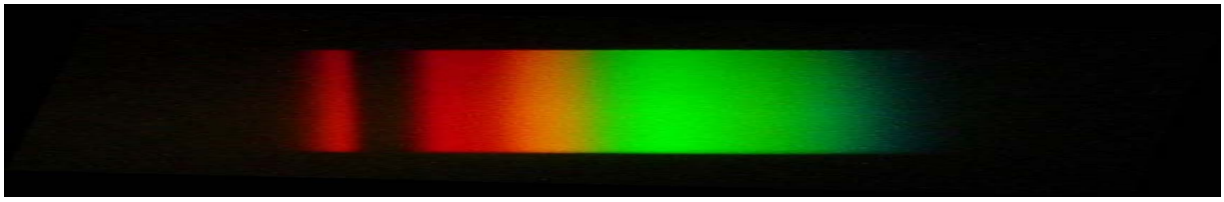
Der Versuchsaufbau entspricht grob einem Photometer bei dem eine zu prüfende Lösung mit Licht unterschiedlicher Wellenlänge bestrahlt und aus der Transmission bzw. Absorption auf die Eigenschaften der Testsubstanz geschlossen wird. Vorzugsweise sollte wie beim Photometer jedes zusätzlich einfallende Licht unterdrückt werden. Stellen Sie den Versuchsaufbau daher unter einen dunklen Kasten oder führen Sie das Experiment ganz im Dunkeln durch.

Absorptionseigenschaften von Farblösungen und des Chlorophylls mit dem Spektroskop untersucht:
Lösen Sie etwas **Kongo**- oder **Neutralrot** in Wasser auf und gib die Farblösung in eine Küvette. Stellen Sie die Küvette vor das Objektiv eines Diaprojektors und betrachten Sie das hindurch gelassene Licht mit einem Spektroskop (CD-Schuhkarton-Spektroskop, s. Arbeitshilfe 19.56 oder Handspektroskop aus der Physiksammlung). Ersatzweise kann man sich mit einer CD behelfen vor ein schmaler, aus einem Pappstreifen herausgeschnittener Spalt gehalten wird. Decken Sie den Spalt mit Transparentpapier oder einer milchig-transparenten Obsttüte aus dem Supermarkt ab. Die Spektrometer und die CD sind optische Beugungsgitter, dass das weiße Licht in seine Spektralanteile zerlegt.
Bevor Sie die Absorptionseigenschaften der Farblösung(en) untersuchen, sollten Sie sich das Farbspektrum der Lichtquelle ansehen. Im Falle des Diaprojektors ist es ein kontinuierliches Spektrum, das im tiefroten, langwelligen Bereich beginnt und im violetten, kurzwelligen Bereich endet.
Die Kongo- oder Neutralrotlösung lässt nur einen schmalen roten Bereich des Spektrums passieren, die kürzeren Wellenlängen werden absorbiert und erscheinen im Spektroskop schwarz. Je stärker Sie die Farblösung konzentrieren, desto auffälliger ist der Effekt.
Eine blaue Lösung können Sie mit **Indigokarmin** herstellen. Lösen Sie etwas Indigokarmin in Wasser auf. Hier wird der hellrote, orange und gelbe Bereich absorbiert und erscheint dunkel. Das Spektrum ist zweigeteilt in einen schmalen tiefroten Abschnitt und einen breiten grün, indigo, blau und violettfarbigen Bereich. Der rote und der kurzwellige Spektralanteil führen zu einem violetten Farbeindruck. Auch hier wird die Absorption der mittleren Spektralbereiche deutlicher wenn die Lösung stärker konzentriert ist.



Auch die Absorptionseigenschaften des **Chlorophylls** lassen sich gut zeigen: Schneiden Sie Gras in kleine Stücke und zerreiben Sie die Blätter zusammen mit etwas Sand in einem Mörser. Gießen Sie anschließend Brennspiritus darüber und filtrieren Sie die Lösung in eine Küvette.
Das Spektrum zeigt einen schwarzen Balken im roten Bereich. Das blaue Ende des Spektrums erscheint scharf abgeschnitten.
.

Kongo- oder Neutralrot und Indigokarmin erhalten Sie in kleinen Mengen (Mikroskopie) nach Vorbestellung im Schulbiologiezentrum Hannover.



Spektrum einer Chlorophylllösung aus mit dem Mörser zerriebenem Gras und Brennspiritus. Aufgenommen mit einem Handspektroskop und einer Digitalkamera

Ingo Mennerich, Schulbiologiezentrum Hannover, Sylt Januar 2004