

Hausarbeit zum Hauptseminar im Fach Physik im WS 98/99:
**"Ausgewählte Themen des Physikunterrichts mit
Demonstrationsexperimenten"**

Dozenten: Ostr. Eberhard Claus; Prof. Dr. phil. Rainer Götz
vorgelegt von
Stefan Jaitner
zum Thema

"Unterrichtseinheit: Die Farben des Himmels"

Sollte in Zukunft eine Besiedlung des Mondes möglich werden, so wird ein dortiger Mensch nie den Anblick eines blauen Himmels oder der Farbspiele beim Sonnenuntergang bzw. -aufgang haben. Selbst eine Mondatmosphäre wäre aufgrund der geringen Gravitation wahrscheinlich zu dünn (Luftdichte und Dicke der Atmosphäre), um wahrnehmbare Farben zu ermöglichen. Alle Himmelsfarben bzw. Sonnenfarben werden erst durch die Erdatmosphäre möglich. In ihr findet eine Streuung und Absorption des Sonnenlichts statt, die für die Farben des Himmels, der Wolken und der Sonne verantwortlich sind.

Einordnung des Themas in den Unterricht der Sekundarstufe I:

Im Physikunterricht der Sekundarstufe I werden ausschließlich Themen aus der geometrischen (Strahlen-)Optik behandelt. Erst in der Sekundarstufe II erkennen die Schüler, daß das Strahlenmodell zur Beschreibung vieler Phänomene nicht genügt, woraus sich die Notwendigkeit ergibt, das leistungsfähigere Wellen- oder Quantenmodell einzuführen. Um den Schülern den Zugang zum Wellenmodell zu erleichtern, können bereits im Unterricht der Sekundarstufe I Fragen behandelt werden, die einen Hinweis auf das Wellenmodell erforderlich machen.

Aus dieser Sicht wäre es durchaus gerechtfertigt, das Thema "Streuphänomene in der Atmosphäre" oder "Die Farben des Himmels" innerhalb einer Physik-AG zu besprechen. Um dieses Thema behandeln zu können, müssen die Schüler bereits eine zumindest qualitative Vorstellung des Wellenmodells entwickelt haben (anhand von Seilwellen oder Wasserwellen).

Bei der Beschreibung der folgenden Unterrichtseinheit "Die Farben des Himmels" wird davon ausgegangen, daß sie Gegenstand einer Physik-AG in Klasse 10 ist, in der bereits einfache Versuche zu Schwingungen und Wellen (z.B. Versuche mit der Wellenwanne) durchgeführt wurden.

Grundsätzlich stellt sich hier die Frage, in welchem Umfang der fachwissenschaftliche Hintergrund zur Beschreibung der Phänomene benötigt wird, so daß die Schüler die Erklärung als befriedigend empfinden. Einen Anhaltspunkt hierfür finden wir beim Thema "Brechung", was auch erst durch wellentheoretische Überlegungen erklärbar wird, aber trotzdem Gegenstand des Lehrplans ist. Hier werden ausschließlich folgende qualitative Einsichten anhand von Versuchen vermittelt: Brechung findet an Grenzflächen zwischen zwei Medien verschiedener optischer Dichte statt, beim Übergang zum optisch dichteren Medium erfolgt die Brechung zum Lot hin. Die Frage, weshalb sich das Licht so verhält (Abhängigkeit der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit vom Medium) wird nicht behandelt. Auf ähnliche Weise wollen wir auch mit unserem Thema umgehen.

Lernziele:

- Die Schüler sollen begründen können, weshalb ihr bisheriges Wissen über das Verhalten von Licht an Grenzflächen nicht ausreicht, um die Himmelsfarben zu erklären.
- Die Schüler sollen folgende Merkmale der Streuung kennen:
 1. Abhängigkeit des Streuverhaltens von der Teilchengröße
 2. Die Sekundärwelle ist linear polarisiert
 3. Streuung und Streureflexion sind dafür verantwortlich, daß wir nicht selbstleuchtende Körper farbig bzw. nicht schwarz sehen.
- Die Schüler sollen die Bedingungen für die Rayleigh-Streuung nennen können.
- Die Schüler sollen das Himmelsblau durch die Eigenschaften der Rayleigh-Streuung ($K_s \sim \frac{1}{\lambda^4}$) erklären können, und wissen, welche Teilchen der Atmosphäre das Himmelsblau verursachen.
- Die Schüler sollen die in den Versuchen beobachteten Vorgänge anhand der Streuung erklären und diese auf Erscheinungen, wie weiße Wolken und Abendrot anwenden können.
- Die Schüler sollen erkennen, daß die Streuung alleine nicht sämtliche Himmelsfarben erklären kann und daß Streuung häufig in Verbindung mit anderen Erscheinungen wie Absorption u.ä. auftritt, wie am Beispiel der grau-blauen Wolken ersichtlich wird.
- Je nach Niveau der Klasse kann auf die Erklärung der Rayleigh-Formel durch die Dipolstrahlung eingegangen werden, jedoch nur dann, wenn die Dipolstrahlung bereits im Rahmen des Themas elektromagnetische Wellen in der AG behandelt wurde.

Stundenverlauf:

1. Beobachtungen:

- a) Das Blau des Himmels ist nicht überall gleich intensiv. In Sonnennähe ist es blau, in 90° zu ihr ist das Himmelsblau am intensivsten und wird danach wieder schwächer blau.
- b) Die Sonne selbst ändert im Ablauf eines Tages ihre Farbe. Sie ist mittags weiß, nachmittags wird sie weiß-gelb, während ihres Untergangs färbt sie sich orange bis rot und geht schließlich als blutroter Feuerball unter.

2. Ursachen:

- (Ding, kindliche Vorstellung:) Die Existenz eines konstant blauen Himmelszelts steht im Widerspruch zu den Beobachtungen.

Wohin würde das blaue Himmelszelt nachts verschwinden ?

Wie könnte dann eine Rakete zum Mond fliegen ? (Gedankenexperiment)

- (stoffliche Erklärung:) Wenig Luft ist durchsichtig, aber trotzdem könnte sie blau sein. So erscheint ja auch Wasser, das mit ein wenig Tinte blau gefärbt wird, blau oder durchsichtig, ja nachdem, ob die Wasserschicht dick oder dünn ist.

Versuch 1a: Aus einem Becherglas mit Wasser und einigen Tropfen Tinte wird ein Reagenzglas mit dieser Mischung gefüllt und bei durchscheinendem Licht betrachtet. Die Mischung ist nahezu durchsichtig, wobei sie im breiten Becherglas bläulich erscheint.

Könnte die Ursache des Himmelsblau also die blaue Luft sein (Ozon usw.) ?

Versuch 1b: Nun wird das Becherglas von einer Lampe durchleuchtet. Bei der Durchsicht bemerken wir, daß das Lampenlicht hinter dem blau gefärbten Wasser auch blau erscheint.

Die Abendsonne ist jedoch rot ?! Hat dieser Effekt also eine andere Ursache (z.B. die Luftfeuchtigkeit)?

- (Erklärung durch Verhalten des Lichts:) Entsteht das Himmelsblau durch Dispersion (Brechungsphänomen: die Brechung des Lichts ist abhängig von der Wellenlänge) an Wassertröpfchen wie beim Prisma und beim Regenbogen? Die blauen Strahlen werden weggebrochen, während die roten Strahlen fast ungebrochen durch die Atmosphäre hindurch gehen ?

Versuch 2a: Man schaut in den Himmel und sucht den Bereich, an dem das Himmelsblau am tiefsten (intensivsten) ist. Man findet ihn etwa unter einem Winkel von 90° zu den einfallenden Sonnenstrahlen.

Versuch 2b: Nun betrachtet man die Bereiche an denen das Himmelsblau am tiefsten ist durch ein Polarisationsfilter und bemerkt, daß beim Drehen des Filters, die "Helligkeit des

Himmels" abnimmt. Blickt man durch den Polarisationsfilter in Richtung der Sonne, so ändert sich deren Helligkeit beim Drehen des Filters quasi nicht. Das Himmelsblau ist also linear polarisiert.

Diese Effekte können weder mit dem Brechungs- noch mit dem Reflexionsgesetz erklärt werden. Es müssen also andere Erklärungsversuche unternommen werden.

- Welche Phänomene unserer Umwelt zeigen ein widersprüchliches Farbverhalten ? Z. B. Blut ist rot, aber in den Adern erscheint es blau. Milch ist weiß, aber Magermilch wirkt bläulich. Rauch einer Zigarette oder von getrocknetem Laub wirkt bei Betrachtung vor einem dunklen Hintergrund (seitlich zur Einfallsrichtung des Lichts) blau und bei Betrachtung vor einem hellen Hintergrund gelblich (Versuch !).

Versuch 3a: Ein Plexiglaskasten mit Magermilch (Wasser mit wenigen Tropfen Milch) wird von einer Lampe durchleuchtet. Der Lichtkegel wirkt von der Seite aus betrachtet blau, wie der Himmel und von vorne gelb-rot wie die aufgehende bzw. untergehende Sonne.

Versuch 3b: Nun beobachten wir das Blau der Milch durch ein Polarisationsfilter und bemerken, daß sich die Helligkeit auch hier beim Drehen des Filters verändert. Blickt man jedoch in Richtung der Lampe, so ist quasi keine Helligkeitsänderung bemerkbar.

⇒ Auch das Blau der Magermilch ist linear polarisiert.

Unsere Beobachtungen des Versuchs stimmen mit dem "Verhalten der Himmelsfarben" überein.

An dieser Stelle ist es nun notwendig, den Begriff Streuung für eine "neue Verhaltensweise des Lichts an Grenzflächen" einzuführen und deren Eigenschaften zu studieren.

- Da in einem mit Wasser gefüllten Plexiglaskasten der Effekt aus Versuch 3 nicht beobachtbar ist (Versuch !), muß die Streuung also etwas mit den Milchteilchen (den suspendierten Fettmolekülen) und vielleicht sogar mit deren Anzahl oder Anordnung zu tun haben.

Versuch 4: Im Aufbau von Versuch 3 erhöhen wir die Zahl der "Milchteilchen", indem wir noch einige Tropfen Milch hinzufügen. Man beobachtet, daß der blaue Bereich bei Betrachtung von der Seite kürzer ist und ins gelbliche übergeht. Die auf den Schirm fallende "Sonne" wird eher rot.

⇒ Die Intensität der Streuung nimmt mit zunehmender Teilchendichte zu.

Warum wird das Licht an den Wasserteilchen nicht im gleichen Maß gestreut ?

Wäre die Teilchendichte die einzig ausschlaggebende Größe, müßten wir Wasser tief rot

oder sogar schwarz sehen (die Teilchendichte der Wassermoleküle ist weit größer als die der Milchteilchen in der Wasserlösung). Der beobachtete Effekt muß also mit der Größe der Teilchen zusammenhängen, und zwar, je kleiner die Teilchen, desto intensiver die Streuung ! Die Wasserteilchen scheinen bereits zu groß und anders angeordnet als die Milchteilchen zu sein, so daß dieser Effekt nicht beobachtet werden kann.

Lehrervortrag:

Warum ist der Himmel blau?

Das Phänomen der Blaufärbung des klaren Himmels beschäftigt schon seit Jahrhunderten die Wissenschaftler. Obwohl die exakten theoretischen Grundlagen erst um die Jahrhundertwende (~1900) gefunden wurden, waren die Erklärungen früherer Wissenschaftler der Realität schon sehr nahe gekommen. Die Basis ihrer Erklärungen - die Reflektion/Streuung des Sonnenlichts während des Durchgangs des Sonnenlichts durch die Atmosphäre - erfaßte das Prinzip der Himmelsblaufärbung. Nur mit den Vermutungen über die Teilchen, die die Streuung verursachen, lag man - für die Zeit verständlich - daneben. Erst Lord Rayleigh (19. Jahrhundert) erkannte, daß nicht - wie bis dahin angenommen - Luftverunreinigungen für die Himmelsblaufärbung verantwortlich sein können, sondern die Luftmoleküle selbst.

Alhazen von Basra, 11. Jahrhundert:

Der arabische Physiker führte die Helligkeit des Tageshimmels auf die ``Reflektion`` des einfallenden Sonnenlichts an Partikeln in der Luft zurück.

Leonardo da Vinci, 15. Jahrhundert:

„I say that the blueness we see in the atmosphere is not intrinsic color, but is caused by warm vapor evaporated in minute and insensible atoms on which the solar rays fall, rendering them luminous against the infinite darkness of the fiery sphere which lies beyond and includes it... If you produce a small quantity of smoke from dry wood and the rays of the sun fall on this smoke and if you place (behind) a piece of black velvet on which the sun does not fall, you will see that the black stuff will appear of beautiful blue color... Water violently ejected in a fine spray and in a dark chamber where the sunbeams are admitted produces then blue rays... Hence it follows, as I say, that the atmosphere assumes this azure hue by reason of the particles of moisture which catch the rays of the sun.“

Wie auch von Basra nahm da Vinci auf Grund seiner Beobachtungen an, daß die Himmelsfärbung ebenfalls durch die immer in der Luft vorhandenen Verunreinigungen verursacht werde.

Tyndall, Rayleigh etc., 19. Jahrhundert:

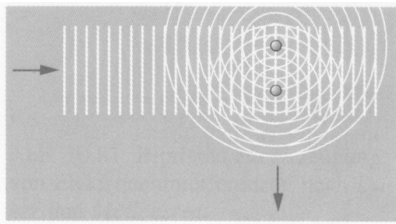
Bis weit ins letzte Jahrhundert wurde obige Erklärung verwendet und neu formuliert. So beschäftigte sich Tyndall in seinen Experimenten mit der Lichtstreuung an sehr kleinen Partikeln (Teilchengröße \approx Wellenlänge). Wie schon da Vinci stellte er eine Blaufärbung des Streulichts fest und sah, wie dieser damit auch die Blaufärbung des Himmels erklärt. Aufbauend auf den Ergebnissen entwickelte der englische Physiker Lord Rayleigh die theoretischen Grundlagen dieser Streuung, die nach ihm benannt wurde. Sie werden noch heute überall dort angewandt, wo die Wellenlänge der Strahlung vielfach größer als die Größe des Streuteilchens ist. Die Blaufärbung des Himmels wird somit durch die Streuung des Sonnenlichts an den Luftmolekülen verursacht.

Exkurs: Fachwissenschaftliche Hintergründe zur Streuung:

Der Vorgang der Streuung tritt auf, sobald eine elektromagnetische Welle (Primärwelle) auf ein Objekt trifft. Dieses strahlt dann eine sogenannte Streuwelle (Sekundärwelle) aus. Normalerweise ist die Anzahl der Streuobjekte nicht auf eins beschränkt, so daß der Betrachter die Interferenz all dieser Wellen wahrnimmt. Sind die Streuobjekte in einem regelmäßigen Gitter angeordnet, so löschen sich die einzelnen Wellen aus, keine Streustrahlung wird wahrgenommen. Sobald die Anordnung unregelmäßig wird (z.B. durch Wärme) oder sich die die Streuwelle beeinflussenden Größen (Objektgröße und -form) der Objekte ändern, kann die Streustrahlung wieder gemessen werden. Wie Spiegelung und Brechung beruht die Streuung ebenfalls auf der Wechselwirkung von Licht und Materie, und zwar auf den gleichen Grundgesetzen, jedoch sind die Randbedingungen anders. Die Phänomene Spiegelung und Brechung setzen einigermaßen homogene Bereiche voraus, deren Ausdehnung groß im Vergleich zur Wellenlänge ist. Sind aber die Grenzflächen, auf die Licht fällt, rau, oder besteht die durchsetzte Materie aus einem ungeordneten Gemenge kleiner Teilchen bis herab zu atomaren Durchmessern, wird die Kohärenz (konstante Phasenbeziehungen zwischen den einzelnen Wellen) der Wellenfronten völlig zerstört. Es treten Phänomene auf, die mit dem Sammelbegriff Streuung bezeichnet werden. So wird z.B. beim Durchgang von Licht durch Nebel jegliche von Licht transportierte Information zerstört. Streureflexion und Streuung machen uns alle nichtselbstleuchtenden Körper als Fremdstrahler

sichtbar. Eine grobe Einteilung der Phänomene ergibt sich, wenn man die Größe der streuenden Teilchen zur Lichtwellenlänge in Beziehung setzt.

Unter zwei Bedingungen läßt sich die Streuung quantitativ einfach behandeln:



Ein geordnetes System atomarer Streuzentren streut sichtbares Licht praktisch nicht, denn für jeden Sekundärstrahler gibt es einen anderen, so daß beider Sekundärwellen sich weginterferieren (bei Röntgenlicht ist das für einzelne Richtungen nicht der Fall). Im Gas ist ein solcher Partner nicht immer vorhanden. Nur infolge von Dichteschwankungen ist der Himmel hell, nämlich blau

1. müssen die Abmessungen der streuenden Gebilde sehr klein gegen die Wellenlänge des Lichts sein.
2. müssen hinreichend große Abstände voneinander eine Wechselwirkung zwischen den streuenden Gebilden ausschließen, z.B. statistisch verteilte Atome in einem Gas. (Wären die Streuzentren regelmäßig verteilt, würden sich die Streuwellen nach dem Huygenschen Prinzip wieder zur ursprünglichen Welle überlagern und das entstehende Streulicht würde sich gegenseitig weginterferieren. Siehe Bild). Sind diese beiden

Bedingungen erfüllt, spricht man von *Rayleigh-Streuung*.

Da die einzelnen Gebilde nach Definition nicht miteinander wechselwirken, addieren sich die Intensitäten der Einzelwellen zur Gesamtintensität, denn die relativen Phasen mitteln sich aus und spielen daher keine Rolle. Beim Durchgang einer elektromagnetischen Welle durch ein streuendes Medium wird durch Streuung und Absorption Energie von der Welle genommen. Dieser Vorgang wird Extinktion genannt.

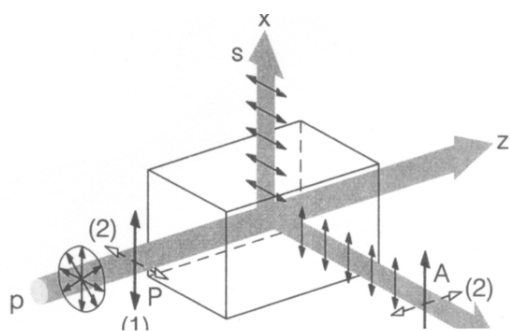
Herleitung der Formel für den Streuquerschnitt der *Rayleigh-Streuung*:

Das elektrische Wechselfeld des Lichts, das mit der Amplitude E_0 und der Intensität

$$I = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2 \quad (\text{Lichtgeschwindigkeit } c = 299\,792\,458 \frac{m}{s}; \text{ Dielektrizitätskonstante}$$

$\epsilon_0 = 8,854187817 \cdot 10^{-12} \frac{A \cdot s}{V \cdot m}$; Amplitude E_0) einfällt, veranlaßt die Ladungen im Atom zum

Schwingen und damit zur Aussendung einer Sekundärwelle.



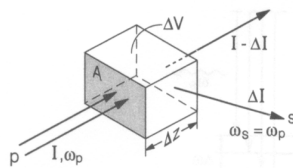
Polarisation der Streustrahlung

An jedem Atom wird ein dem elektrischen Lichtfeld E_0 proportionales Dipolmoment induziert. $p_0 = \alpha \cdot E_0$ (Dipolmoment p_0 ; Polarisierbarkeit des Atoms α). Jeder Atomdipol führt erzwungene Schwingungen mit der Frequenz ω_p der einlaufenden (primären) Lichtwelle aus. Er emittiert eine elektromagnetische Kugelwelle, die

nun der Huygenschen Elementarwelle entspricht. Die abgestrahlte Leistung P_{Dipol} (Einheit: Watt) eines schwingenden Dipols ist dem Quadrat des Dipolmoments und der vierten Potenz der Schwingungsfrequenz proportional.

$$P_{Dipol} = \frac{4}{3} \cdot \frac{\pi^3}{\epsilon_0 c^3} \cdot p_0^2 \cdot \nu^4 = \frac{4}{3} \cdot \frac{\pi^3 c}{\epsilon_0} \cdot \frac{p_0^2}{\lambda^4} \quad (\text{Frequenz } \nu ; \text{ Wellenlänge } \lambda ; \text{ mit } c = \lambda \cdot \nu) \quad \text{Multipliziert}$$

man die von einem Atomdipol abgestrahlte Leistung mit der Anzahldichte n der Atome, erhält man die pro m^3 emittierte Strahlungsleistung $\frac{\Delta P}{\Delta V} = n \cdot P_{Dipol}$. (Volumen V ; Strahlungsleistung P).



Streuung einer Welle in einem Volumenelement $\Delta V = A \cdot \Delta z$. Primärwelle (p) mit der Frequenz ω_p und der Intensität I ; Sekundärwelle (s) mit der Frequenz $\omega_s = \omega_p$ und der Intensität ΔI . Die durchgehende Welle hat an Intensität verloren: $I - \Delta I$.

Schließlich ist dann $\Delta P \cdot \Delta z$ die von den Atomen in der Schicht mit der Dicke Δz emittierte Intensität ΔI , die der einfallenden Primärwelle entnommen wurde und dieser nun fehlt. Die Intensitätsabnahme der Primärwelle beträgt also $-\Delta I = n \cdot P_{Dipol} \cdot \Delta z$. Die relative Intensitätsabnahme ist der Dicke Δz der durchquerten Teilchenschicht und der Anzahldichte n der Atome in ihr proportional, also

$$-\frac{\Delta I}{I} \sim n \cdot \Delta z, \text{ oder differentiell } -\frac{dI}{I} = \sigma_s \cdot n \cdot dz = K_s \cdot dz. \quad (\text{Streuquerschnitt } K_s : \text{ relative}$$

Intensitätsabnahme der Lichtwelle in der Schichtdicke Δz ; Streuquerschnitt

$$\sigma_s = \frac{\text{gesamte pro Sekunde gestreute Energie}}{\text{pro Quadratmeter und pro Sekunde einfallende Energie}})$$

Hieraus folgt unmittelbar

$$K_s = -\frac{1}{I} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta z} = n \cdot \frac{P_{Dipol}}{I} = n \cdot \frac{8\pi}{3\epsilon_0^2} \cdot \frac{1}{\lambda^4} \cdot \left(\frac{p_0}{E_0}\right)^2 = n \cdot \frac{8\pi}{3\epsilon_0^2} \cdot \frac{1}{\lambda^4} \cdot \alpha^2$$

Man sieht, daß die relative Intensitätsabnahme der Lichtwellen bei Durchgang durch eine Schicht der Dicke Δz der vierten Potenz der Frequenz ($c = \lambda \cdot \nu$) und dem Quadrat der Polarisierbarkeit der Atome proportional ist.

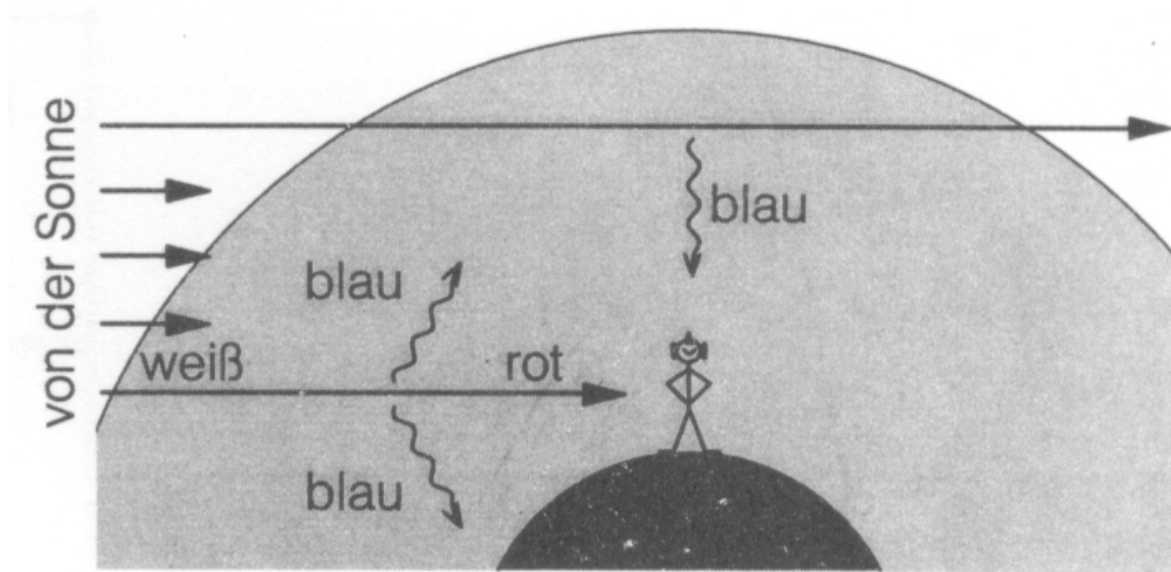
Da die Wellenlänge des violetten oder blauen Lichts mit ca. 380 nm etwa halb so groß ist, wie

die Wellenlänge des roten Lichts mit ca. 780 nm folgt, daß $K_{s\text{blau}} = konst \cdot \frac{1}{1^4}$ und

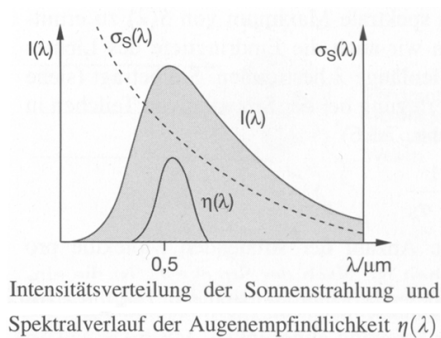
$$K_{s\text{rot}} = konst \cdot \frac{1}{2^4} = konst \cdot \frac{1}{16} \quad (\text{konst geeignet gewählt}), \text{ d.h. daß die Intensitätsabnahme}$$

durch Streuung im roten Wellenlängenbereich nur $\frac{1}{16}$ der Intensitätsabnahme durch Streuung

im blauen Wellenlängenbereich beträgt.



Erklärung von Himmelsblau und Abendrot

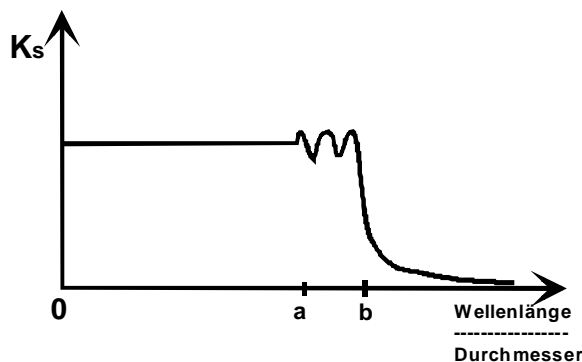


Das der Himmel nun nicht violett, sondern blau aussieht liegt daran, daß die Intensitätsverteilung des Sonnenlichtes und auch die Augenempfindlichkeit ein Maximum im grünen Bereich haben. Aus der Überlagerung der Intensitäts- und Empfindlichkeitskurven ergibt sich zwanglos die blaue Farbe des Himmels.

Bei niedrigen Sonnenständen wird durch den langen Weg des Sonnenlichts durch die Atmosphäre die Extinktion im blauen Spektralbereich noch deutlicher. Das Sonnenlicht wird gelblich/rötlich. Wie deutlich dieses ausgeprägt ist, hängt natürlich auch wesentlich von Luftverunreinigungen ab (zusätzliche Streuzentren). Besonders gut läßt sich die Rotfärbung des Sonnenlichts an dünnen Wolken sehen, da diese das Sonnenlicht relativ unabhängig von der Wellenlänge gleich stark streuen (Mie-Streuung). Im Volksmund wird dieser Effekt Abendrot genannt.

Morgenrot-Schlechtwetter droht; Abendrot-Gutwetterbot. Dies ist eine der bekanntesten Bauernregeln. In den meisten Fällen stimmt die Regel auch. Zumindest dann, wenn man unter Abend- und Morgenrot die intensive Beleuchtung von Wolken durch die untergehende oder untergegangene Sonne versteht. In unseren Breiten wird das Wettergeschehen durch Westwinde bestimmt. Ein schönes Abendrot kann sich nur ergeben, wenn der Himmel im Westen klar ist und sich im Osten noch viele Wolken, z.B. von einem abziehenden

Niederschlagsgebiet, befinden. Im Laufe der Nacht ziehen die Wolken dann weiter nach Osten ab und darauf folgt oft ein heiterer Tag. Am Morgen ist es genau umgekehrt. Dann steht die Sonne im Osten, wo der Himmel noch klar sein muß, aber von Westen zieht bereits Bewölkung auf. Im Laufe des Tages bedecken die Wolken dann den ganzen Himmel. Die rote Farbe der Wolken beruht darauf, daß das Sonnenlicht an den verschiedenen Bestandteilen der Atmosphäre gestreut wird. Zum einen streuen die Luftmoleküle das blaue Licht stärker als rotes. Daraus ergibt sich die orange Farbe der Sonne beim Sonnenuntergang. Um ein intensives Himmelsrot hervorzurufen, müssen sich darüber hinaus aber viele Wassertröpfchen in der Atmosphäre befinden. Neben Wassertröpfchen können auch Staubteilchen (z.B. von einem Vulkanausbruch) zu farbigen Dämmerungserscheinungen beitragen.



In dem Diagramm ist die Intensitätsabnahme durch Streuung als Funktion des Verhältnisses Wellenlänge / Durchmesser des Streukörpers schematisch dargestellt. Im Bereich zwischen 0 und a ist die Streuung unabhängig von der Wellenlänge. So wird das Licht aller Wellenlängen von Nebeltropfen gestreut.

Deswegen sind auch Wolken weiß. Die Streuung beruht auf diffuser Reflexion, Brechung und Beugung. Im Bereich zwischen a und b werden Wellen bestimmter Wellenlängen absorbiert. So wird das rote Licht von den großen Wassertropfen der Gewitterwolken absorbiert. Deswegen haben sie die komplementäre Farbe: schiefergrau bis blau. Im Bereich hinter b dominiert die bereits behandelte Rayleigh-Streuung (Strahlung von atomaren Dipolen). Je kürzer die Wellenlänge, desto intensiver wird das Licht gestreut.

Versuch 5 (Sonnenuntergang und Abendrot im Hörsaal):

Wir befestigen eine Reuterlampe mit Sammellinse in einem Dreifuß und schließen sie an den Wechselspannungsausgang des Stufentransformators (6 bzw. 12 V) an. Im Abstand von etwa 10 - 20 cm stellen wir etwas erhöht einen Plexiglkasten auf. In ca. einem Meter Entfernung hinter dem Plexiglkasten bringen wir einen Schirm an. (Dieser Aufbau wurde bereits für die vorangegangenen Versuche verwendet.) Nun lösen wir in einem Becherglas ein Reagenzglas voll Natriumthiosulfat in etwa 800 ml Wasser auf. Nachdem sich das körnige Natriumthiosulfat völlig gelöst hat, gießen wir die Lösung in den Plexiglkasten und füllen ihn mit Wasser bis zur Hälfte auf. Wenn das Wasser zur Ruhe gekommen ist, wird auf dem

Schirm ein heller Lichtkreis abgebildet. Dieser Lichtkreis soll wie in den vorangegangenen Modellversuchen die Sonne darstellen. Danach stellen wir uns in einem zweiten Becherglas verdünnte Schwefelsäure her, indem wir zu 200 ml Wasser etwa 10 bis 15 Tropfen konzentrierte Schwefelsäure (Konzentration $> 18\%$) dazu gießen. Die so verdünnte Schwefelsäure wird in den Plexiglaskasten gegossen und mit der Natriumthiosulfatlösung vermischt. Nach zwei bis drei Minuten beginnt sich dieses Gemisch, von der Seite aus betrachtet, bläulich zu färben (wie beim Versuch 3) und die "Sonne" färbt sich immer stärker rot. Dieser Vorgang vollzieht sich weiter, bis kein Licht mehr auf den Schirm fällt ca. 3- 4 Minuten. Die Mischung sieht nun trüb weiß aus.

Erklärung: In dem Gemisch bilden sich nach kurzer Zeit winzige Schwefelkörner (Streuzentren). Über die Versuchsdauer hinweg wird zunehmend mehr Schwefel ausgefällt und die Schwefelkörner werden entsprechend größer. Durch die zunehmende Größe und Dichte der Ausfällungskörnchen werden neben blau auch die anderen Spektralfarben gestreut und lassen die Lösung weiß erscheinen. Rotes Licht wird am wenigsten gestreut und passiert daher die Flüssigkeit relativ ungehindert.

Quellen:

- Marcel Minnaert. Licht und Farbe in der Natur. Birkhäuser Verlag 1992
- <http://members.aol.com/astrohans/html/halos.htm>
- <http://members.tripod.com/~regenbogen/index.htm>
- F.Siensen: "Das Phänomen der Himmelfarben und eine Erklärung für Schüler der Sekundarstufe I" (S. 277-279) in H. Behrendt. Zur Didaktik der Physik und Chemie: Probleme und Perspektiven. Leuchtturm Verlag 1993
- D. Vornholz: "Ein Abend am Meer" (S. 136-140) in Lutz Schön. Naturwissenschaften im Unterricht Physik. 6.Jahrgang; Heft 29; Oktober 1995
- F. Siensen: "Das Himmelsblau" (S. 131-136) in W. Franzbecker; W. Jung. physica didactica: Zeitschrift für Didaktik der Physik. 8.Jahrgang (1981) Nr.3
- Rainer Götz; Helmut Dahncke; Fritz Langensiepen. Handbuch des Physikunterrichts: Sekundarbereich I Band 4/I Optik. Aulis Verlag Deubner & Co KG 1995
- Wilfried Kuhn. Handbuch der experimentellen Physik: Sekundarbereich II Band 4/I Optik. Aulis Verlag Deubner & Co KG 1992
- Rudolf Töpfer. Wir experimentieren. Verlag Industrie-Druck GmbH 1959
- Artur Friedrich. Handbuch der experimentellen Schulphysik: Optik. Aulis Verlag Deubner & Co KG 1963

- Robert Wichard Pohl. Optik und Atomphysik. 13. Auflage. Springer Verlag 1976
- Heinz Niedrig. Bergmann/Schaefer Lehrbuch der Experimentalphysik: Band 3 Optik. 9. Auflage. 1993
- Richard P. Feynman. Vorlesungen über Physik: Band 1 Mechanik, Strahlung, Wärme. 3. Auflage. Oldenbourg Verlag 1997
- Wolfgang Demtröder. Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik. Springer Verlag 1995
- Helmut Vogel. Gerthsen Physik. 18. Auflage. Springer Verlag 1995