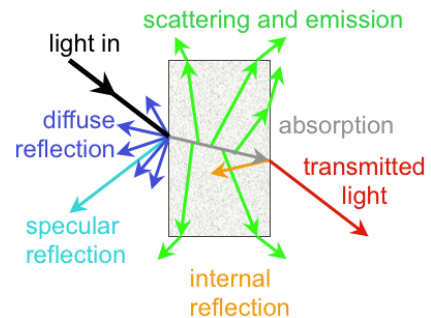


Farbursachen

www.webexhibits.org/causeofcolor

Die Interaktion eines Objektes mit Licht ist teilweise verantwortlich für die empfundene Farbe des Objektes. Fällt Licht auf ein Objekt, wird dieses für unser Auge erkennbar.

- Diffuse Reflexion auf fast jeder Oberfläche reflektiert die Lichtwellen in alle Richtungen.
- Spiegelnde Reflexion gibt die Farbe des einfallenden Lichtes wieder (Einfallrichtung = Ausfallrichtung).
- Durch Absorption im Objekt geht Licht verloren.
- Interne Reflexion an den inneren Flächen leitet einen Teil des Lichtes in eine andere Richtung ab.
- Licht wird im Objekt gefiltert und gestreut

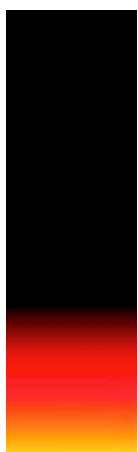


Farbiges Licht entsteht grundsätzlich auf drei Arten:

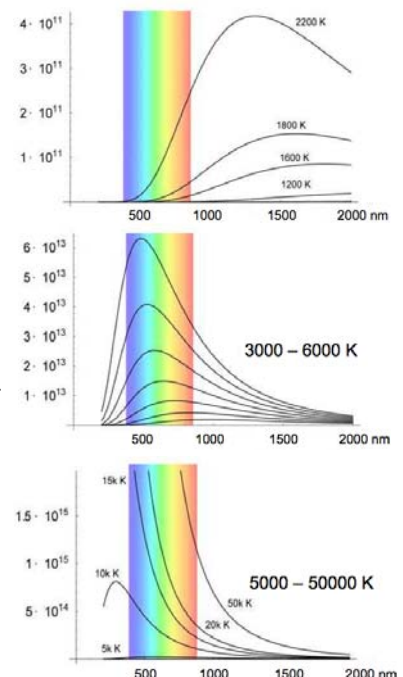
- *erzeugtes* Licht (Glühlampen, Feuer, Blitz etc.)
- *verlorenes* Licht (Wasser, Pflanzen, Edelsteine etc.)
- *verschobenes* Licht (Regenbogen, Sonnenuntergang, Schmetterling etc.)

1. Erzeugtes Licht

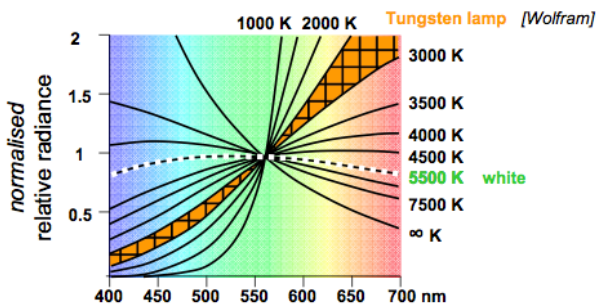
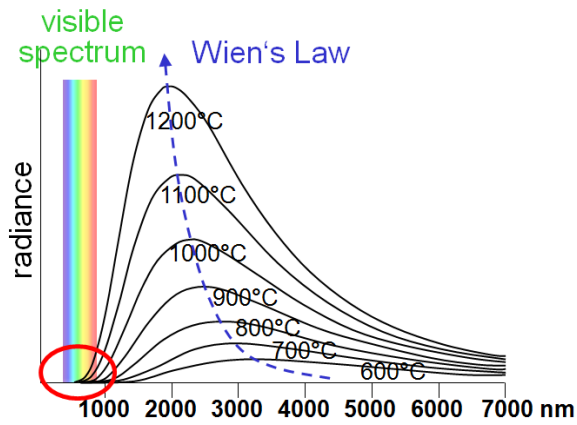
1.1 Farbiges Licht entsteht durch *Glühen* (Incandescence Light). Wird ein Körper stark erhitzt, z.B. durch elektrischen Strom oder durch chemische Reaktionen, so sendet er elektromagnetische Strahlung aus, die zum Teil im sichtbaren Bereich ist. Die Farbe dieses Lichtes hängt von der verwendeten Technologie ab:



Wird ein Körper zum Glühen gebracht, entsteht Licht einer bestimmten Farbe, die *nur von der Temperatur, nicht aber vom Material abhängt*. Für theoretische Betrachtungen muss man einen Körper wählen, der sonst keine Strahlung abgibt, insbesondere keine Strahlung reflektiert, der also absolut schwarz ist (d.h. alles absorbiert, was auf ihn einwirkt). Man bezeichnet daher den ausschließlich durch die Hitze entstehenden Strahlungsanteil mit *Schwarzkörperstrahlung* (wenn ein Körper einmal so heiß ist, dass er sichtbares Licht ausstrahlt, dann kann man alle anderen Effekte sowieso vernachlässigen). Der idealisierte Schwarzkörper absorbiert also alles einfallende Licht zur Gänze und strahlt nur auf Grund seiner Temperatur etwas ab.



Schwarzkörperstrahlung (Blackbody Radiation) ist die elektromagnetische Strahlung eines Objektes bei einer bestimmten Temperatur. Bei der absoluten Nulltemperatur von $0 \text{ K} = -273^\circ \text{ C}$ strahlt der Schwarzkörper nicht. Je höher die Temperatur steigt desto kurzwelliger und intensiver wird die abgestrahlte Energie. Ab etwa 500 K enthält diese Strahlung bereits für das Auge erkennbare Anteile, das Objekt beginnt rot zu *glühen*, ab 2000 K glüht es bereits gelb und bei 6000 K weiß (z.B. extrem heiße Eisen-Schmelzöfen). Noch heißeres Material (z.B. Plasmasterne bei 20.000 K) strahlt dann bläuliches Licht aus. Die Abbildungen zeigen das Emissionsspektrum für verschiedene Körpertemperaturen.



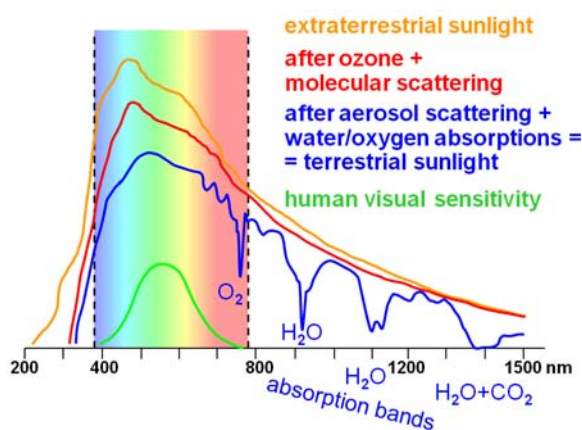
Das Verschiebungsgesetz von Wilhelm Wien gibt an, bei welcher Wellenlänge bzw. Frequenz ein Schwarzkörper je nach seiner Temperatur die größte Strahlungsleistung oder die größte Photonenrate abgibt. Wie man sieht, wandert dieser Punkt mit zunehmender Temperatur immer weiter in den kurzwelligen Bereich. Bei etwa 3000 K liegt die Spitze bereits im roten sichtbaren Bereich, bei 4500 K im grünen Bereich und bei 6000 K im blauen Bereich. Bei noch höheren Temperaturen verschiebt sich dieser Punkt der höchsten Abstrahlung dann in den UV-Bereich. Da es bei allen Temperaturen über 500 K einen sichtbaren Anteil gibt, sehen wir bei jeder solchen Temperatur eine Farbe, die aus dem sichtbaren Spektrumsanteil erzeugt wird. Für den Bereich zwischen 3500 K und 8000 K empfinden wir das Licht im Wesentlichen als weiß. Um die Farben bei verschiedenen Temperaturen besser vergleichen zu können, skaliert man jeweils den sichtbaren Spektrumsanteil so, dass alle bei 555 nm den gleichen Wert haben (siehe Abbildung).

Die *Farbtemperatur* ist nun die Farbe des Lichtes eines Schwarzkörpers, das bei dieser Temperatur erzeugt wird,

ist also ein Maß für Farbe in Kelvin (und nicht für Temperatur!). Niedrige Farbtemperaturen entsprechen einem rötlichen bis gelblichen Licht, hohe Farbtemperaturen entsprechen dagegen einem weißen bis bläulich-weißen Farbeindruck. Die *korrelierte Farbtemperatur* eines Lichtes ist die Farbtemperatur der ähnlichsten Schwarzkörperstrahlung.

Farbtemperaturen einiger Lichtquellen:

Farbtemperatur	Lichtquelle	Farbtemperatur	Intensitätsmaximum
1800 K	Kerze	1500 K	IR-nah
4000 K	Glühbirne (40W)	2200 K	IR-nah
5500 K	Glühbirne (200W)	3000 K	IR-nah
8000 K	Flour.Leuchtstoffröhre	4400 K	im sichtbaren Bereich
12000 K	Xenon Lampe	4500 K	im sichtbaren Bereich
16000 K	Sonnenlicht Sommer	5500 K	im sichtbaren Bereich
	elektron. Blitz	5600 K	im sichtbaren Bereich
	bewölkter Himmel	7000 K	im sichtbaren Bereich
	blauer Himmel	9000-20000 K	UV-nah
		> 16000 K	UV



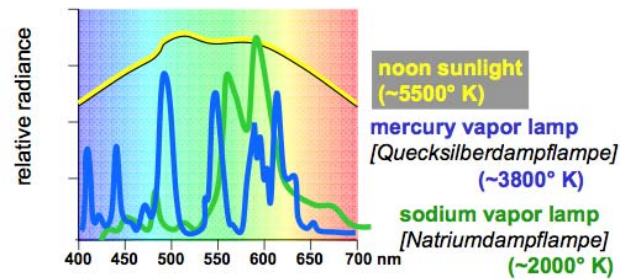
In einer normalen *Glühbirne* (Tungsten Lamp, auch Incandescent Light genannt) wird ein *Wolfram*-Faden durch Elektrizität erhitzt und gibt dadurch Schwarzkörperstrahlung ab. Eine 100W-Glühbirne strahlt bei einer Temperatur von $\sim 2.500^\circ \text{C} = \sim 2.800 \text{ K}$ ein gelbliches Licht ab. Bei höheren Temperaturen würde der Wolfram-Glühfaden schnell zerstört sein (Schmelzpunkt 3.695 K, zum Vergleich Eisen hat einen Schmelzpunkt von 1.811 K und ist daher als Glühfaden ungeeignet).

Die Oberflächentemperatur der Sonne liegt bei ca. 5800°K. Das von der Sonne kommende Licht wird

durch die Atmosphäre mehrfach gefiltert, so dass das auf der Erdoberfläche eintreffende Licht keine Schwarzkörpercharakteristik mehr hat.

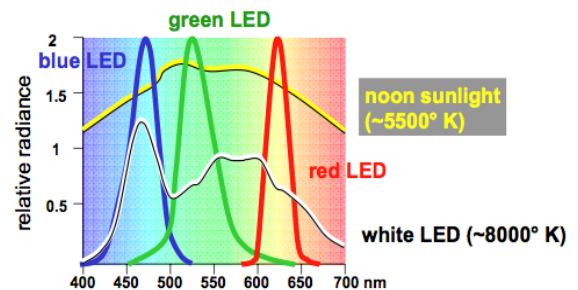
1.2 Farbige Licht entsteht durch *Gasanregung*

(gas excitation), wenn chemische Elemente, wie Natrium oder Quecksilber im gas- oder dampfförmigen Zustand Licht erzeugen. Durch elektrische Anregung werden Atome in ein höheres Energieniveau gehoben. Beim Zurückfallen in den Grundzustand geben sie die frei werdende Energie als elektromagnetische Strahlung ab, deren sichtbarer Spektrumsanteil als Licht wirkt. Beispiele dafür sind Leuchtstoffröhren und Polarlichter (Aurora Borealis).



1.3 Farbige Licht durch *dotierte Halbleiter* (doped semiconductors)

entsteht, wenn Leuchtdioden (LED - Light Emitting Diode) Licht aussenden. Als Dotierung bezeichnet man das Einbringen von Störstellen in Halbleiterkristallen (das sind Fremdatome mit unterschiedlicher Wertigkeit). Das Einbringen von Störstellen erzeugt zusätzliche, örtlich gebundene Energieniveaus im Banddiagramm des Kristalls. Fließt durch die Diode Strom in Durchlassrichtung, so strahlt sie Licht mit einer vom Halbleitermaterial und der Dotierung abhängigen Wellenlänge ab. Eine Eigenschaft Farbe-erzeugender-dotierter Halbleiter ist, dass der Spektralbereich des ausgesandten Lichtstroms ziemlich scharf begrenzt ist (siehe Diagramm).



1.4 Glimmen (Glowing)

Unter Glimmen versteht man die Entstehung von Licht mittels Chemolumineszenz die bei chemischen Reaktionen passiert. Beispiele hierfür findet man bei Leuchtplancton im Meer („Mitternachtswellen“), Glühwürmchen, Tiefseefischen, Leuchtstäben, uvm.

2. Farbe durch Lichtverlust

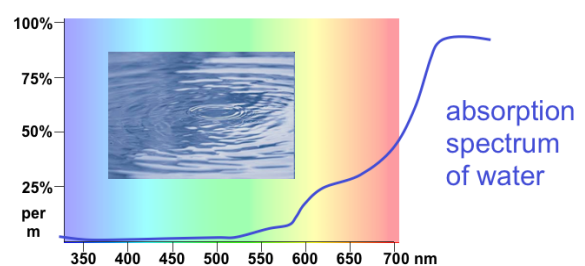
Absorption bezeichnet den Vorgang, bei dem ein Teil der elektromagnetischen Strahlung, die auf ein Material auftrifft, von diesem in andere Energiezustände umgewandelt wird (meist Wärme). Wenn dies den sichtbaren Bereich dieser Strahlung betrifft, so reduziert das das Spektrum des reflektierten Lichtes. Dies kann durch ein Absorptionsspektrum beschrieben werden, das für jede Wellenlänge den Prozentsatz des absorbierten Lichtes angibt, als auch durch ein Reflexionsspektrum, in dem die Prozentsätze des nicht absorbierten Lichtes aufscheinen. Klarerweise sind diese beiden Spektren komplementär zueinander.

Physikalische Erklärung (grob): Wenn ein Photon auf ein Material trifft, für das dessen Energie (zwischen 1,6 eV [bei 775 nm] und 3,0 eV [bei 413 nm]) genau zur Erreichung eines angeregt(er)en Zustandes passt, so geht das Photon darin auf (und wird normalerweise als Wärme wieder abgegeben).

Es gibt mehrere konkrete Absorptionsgründe (Vibration und Rotation, der Ligandenfeldeffekt, Ladungsverschiebung, Bandstruktur, Farbzentren und organische Moleküle) bei unterschiedlichen Materialien:

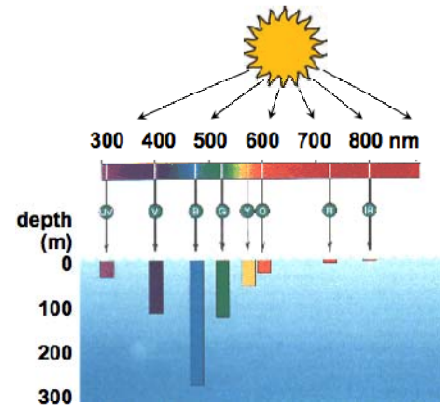
2.1 Farbe entsteht durch *Vibration und Rotation*

Atome und Moleküle sind in ständiger Bewegung. Diese Bewegungen bezeichnet man als Schwingungsmodi (vibrational modes), die bei bestimmten Frequenzen, meistens im IR-Frequenz-Bereich, auftreten. Moleküle



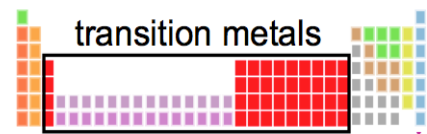
absorbieren Photonen mit korrekter Energie, um die Vibration in ein höheres Niveau zu bringen. Nur die Vibrationen von Wassermolekülen finden auch im sichtbaren Bereich statt.

Das Wasser ist blau, da H₂O-Moleküle viel rotes, ein wenig grünes und geringfügig blaues Licht absorbieren (das abgebildete Absorptionsspektrum zeigt Prozent Absorption pro Meter an). So schafft es rotes Licht kaum das Wasser zu durchdringen, grünes Licht rund 100m und blaues Licht dringt am tiefsten ein mit rund 300m. Natürlich kann auch nur nicht absorbiertes Licht wieder reflektiert werden, so dass das Meer seine schöne blaue Farbe erhält.



2.2 Farbe durch Übergangsmetallbindungen Ligandenfeldeffekt (ligand field effect)

Ein Ligand ist ein Atom, Ion oder Molekül, das an ein Metall gebunden ist, wobei ein oder mehrere Elektronen formal abgegeben werden. Es gibt 2 Versionen, wie dabei Farbe entstehen kann: *Übergangsmetallverbindungen* und *Übergangsmetallverunreinigungen* (Übergangsmetalle sind die Elemente 21-48, 57-80, 89-112 des Periodensystems).



Übergangsmetallverbindungen (Transition Metal Compounds) liefern die Farbe von vielen Mineralien und Farbpigmenten, und werden auch *idiochromatisch* (selbstfärbend) genannt. Beispiele hierfür sind Chrom-Grün Cr₂O₃, Thenards-Blau Al₂CoO₄, rotes Eisenerz Fe₂O₃ und Pink-Rhodochrosite MnCO₃.



Übergangsmetallverunreinigungen (Transition Metal Impurities) bewirken in sonst meist farblosen Mineralien und Edelsteinen, wie in Rubinen oder Smaragden (emerald), eine Färbung. Diese nennt man auch *allochromatisch* (andersgefärbt). Beispiele dafür sind neben Rubin und Smaragd auch Aquamarin, Grüner Jade, die Farbe in Keramik, Glas u.v.m.

Eine spezielle Form des Ligandenfeldeffekts ist der *Pleochroismus*. Dabei handelt es sich um den Effekt, dass Kristalle bei Betrachtung aus unterschiedlichen Blickrichtungen verschiedene Farben zeigen.



2.3 Farbe durch Ladungsverschiebung (Charge Transfer)

Charge Transfer tritt auf, wenn *zwei* unscheinbare *Verunreinigungen* eines Kristalls sich gegenseitig beeinflussen, wie z.B. bei Saphiren. Sie ist dem Ligandenfeldeffekt ähnlich.



2.4 Metalle und Legierungen (Bandstruktur)

Polierte Metalloberflächen besitzen eine starke Reflexion. Licht kann in Metalle nicht tief (nur wenige 100 Atome) eindringen, da die Elektronen des Metalls gemeinsam ein *Energieband* bilden, das jede Lichtfrequenz absorbiert. Da sie aber sofort wieder emittiert wird, ist Metall nicht schwarz sondern glänzt silbrig.



Silber, Eisen, Chrom, ... sind weißlich/gräuliche Metalle, und Gold, Messing, Kupfer, ... sind gelblich/rötliche Metalle. Legierungen (wie etwa Bronze) sind in ihrer Farbe nicht prognostizierbar. Die Farbe rührt daher, dass der Absorptionsprozess für kürzere Wellenlängen in manchen Metallen weniger effizient ist.

2.5 Halbleiter (Semiconductor)

Halbleiter haben eine Kristallstruktur, d.h. einen bestimmten Kristallaufbau. Im Valenzband des Siliziumkristalls sind die Valenzelektronen voll besetzt. Die entstehende Bandlücke (band gap) ermöglicht das Absorbieren von Wellenlängen nur ab einer bestimmten Mindestenergie, so dass nur Photonen ab einer materialabhängigen Mindestfrequenz „verschwinden“. Dies wirkt wie ein Tiefpassfilter und es entstehen



Mischfarben auf der roten Seite des sichtbaren Bereiches. Beispiele für reine Halbleiter sind Silizium, purer Diamant und gelbes Cadmium.

2.6 Farbzentren (color centers)

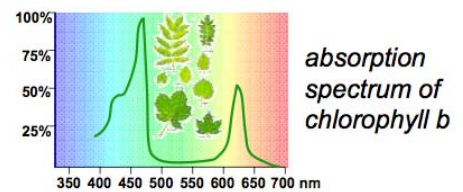
Durch energiereiche Einstrahlung (z.B. UV-Licht) auf ein ansonsten farbloses Material entsteht ein Zustand, in dem manche Elektronen in einem angeregten Zustand feststecken, d.h. sich in einem lokalen Energieminimum befinden. In diesem Zustand absorbieren sie Licht bestimmter Wellenlängen und färben damit das Material. Durch starke Erhitzung kann man diese Elektronen aus ihrer Falle befreien, und die Farbe verschwindet wieder. Beispiele dafür sind Rauchquartz, Amethystglas und blauer Topas.



Eine Anwendung aus dem täglichen Leben findet man in Sonnenbrillen, die bei Sonnenlicht durch UV abdunkeln und in dunklen Räumen wieder aufhellen, um den Effekt rückgängig zu machen.

2.7 Organische Moleküle/Pflanzen: z.B. Chlorophyll

Chlorophyll absorbiert einen Teil des Lichtes und verwendet diese Energie zur Umwandlung von CO₂ und Wasser in Glukose und Sauerstoff.



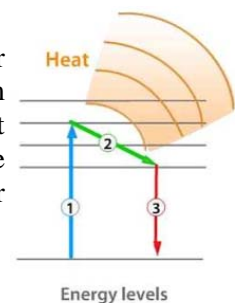
Bei der Absorption von Licht durch organische Moleküle tritt auch häufig Fluoreszenz auf.

3. Verschobenes Licht (Moved Light)

Die Abstrahlung von Licht weist ein verändertes Spektrum zum einstrahlenden Licht auf.

3.1 Fluoreszenz

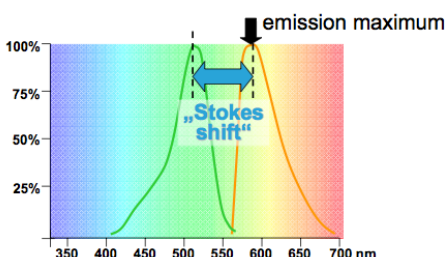
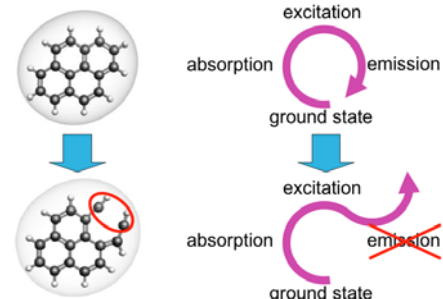
Fluoreszenz bezeichnet die Re-Emission von einstrahlendem Licht in energieärmerer Form, also längerwellig. Dies ist ein häufiger Effekt, kann jedoch nur mit einem Bispektral-Photometer gemessen werden. Licht, das auf eine Fläche auftrifft, unterliegt dort einer Wandlung. Ein Teil der Energie wird in Wärme umgewandelt, d.h. die Photonen werden mit weniger Energie (also in einer niedrigeren Frequenz = mit längerer Wellenlänge) abgestrahlt. Das ergibt eine *Farbverschiebung*.



Prozess der Fluoreszenz

1. Anregung durch Absorption der Lichtenergie
2. kurze angeregte Lebensdauer mit Energieverlust
3. Lichtemission zum Grundzustand (langwelliger als das absorbierte Licht)

Durch die dauernde Anregung brechen manche fluoreszierende Moleküle im Lauf der Zeit und verlieren damit diese Fähigkeit. Das Material fluoresziert immer weniger, man spricht von *Fotobleichung*.

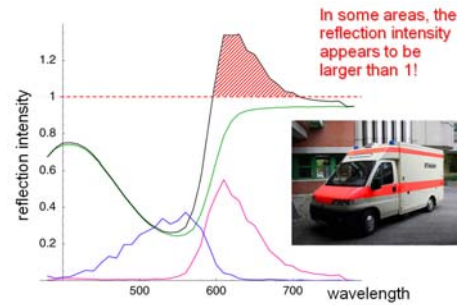


Die *Stokesverschiebung* beschreibt, um wieviel die Frequenzverschiebung der Fluoreszenz stattfindet. Im Beispiel (Abbildung) absorbiert das Material hauptsächlich grüne Lichtanteile und sendet sie als gelb-oranges Licht wieder aus.

Fluoreszenz hat eine hohe Bedeutung für *Leuchtstoffröhren*, da durch Gasanregung erzeugtes Licht sehr viele UV-Anteile hat. Die UV-Anteile werden durch eine fluoreszierende Beschichtung der Röhre in den Bereich des sichtbaren Lichtes verschoben und erhöhen auf diese Weise die Gesamtlichtausbeute stark.

Beispiel fluoreszierende Farbe:

Die normale Reflexionskurve (grüne Kurve) der orangen Streifen des Rettungswagens würde ein gewöhnliches gesättigtes Orange produzieren. Da jedoch ein Teil des eintreffenden blauen Lichtes (blaue Kurve) mittels Fluoreszenz in Richtung Rot verschoben wird (rosa Kurve), ergibt sich eine insgesamt Lichtabstrahlung, die im orangen Bereich *mehr als 100%* des einfallenden orangenen Lichtes ausmacht. Die Reflexion scheint das Licht noch zu verstärken, die orangen Streifen „leuchten“.

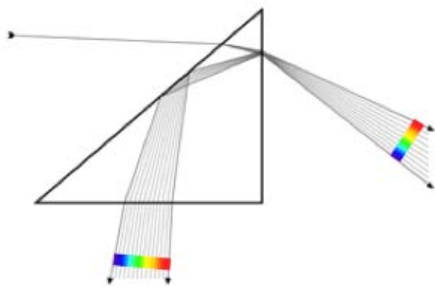


3.2 Phosphoreszenz

Phosphoreszenz ist die Fähigkeit eines Materials, die Lichtenergie aufzunehmen, eine Zeit lang zu speichern, und nach bestimmter Halbwertszeit wieder abzustrahlen. Somit ist der angeregte Zustand, der durch Lichteinstrahlung erzeugt wird, nicht so labil wie bei normalen Oberflächen.

Dieses wurde früher für die Zeiger von Uhren verwendet, damit sie im Dunklen durch Phosphoreszenz noch eine Zeit lang leuchten. Heute kennen wir Phosphoreszenz hauptsächlich von Juxartikeln.

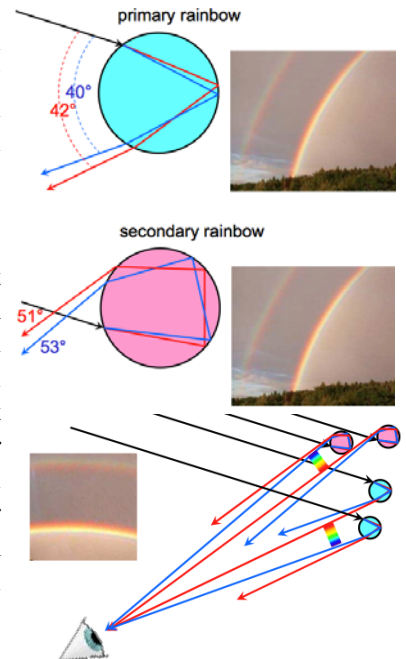
3.3 Dispersion



Die *Dispersion* ist die Zerlegung von Licht in ihre Einzelteile. Im Alltag ist dies z.B. beim Regenbogen, in optischen Gläsern oder in Diamanten zu finden.

Der *Regenbogen* entsteht, wenn das Sonnenlicht auf Regentropfen trifft und dort mehrfach gebrochen und reflektiert wird (Regentropfen sind kleine Kugeln).

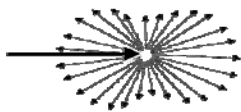
Das Sonnenlicht wird dabei in seine spektralen Farben zerlegt. Auf der Rückseite der Tropfen wird das Licht reflektiert, tritt wieder aus und der Regenbogen wird für das Auge sichtbar. Wenn der Winkel zwischen der Sonne, den Wassertropfen und dem Auge zwischen 40° und 42° beträgt, dann fällt das zerlegte Licht genau in unser Auge. Der zweite „sekundäre“ Regenbogen entsteht zwischen 51° und 53° . Im primären Regenbogen ist Rot außen, und im schwächeren sekundären Regenbogen ist Blau außen.



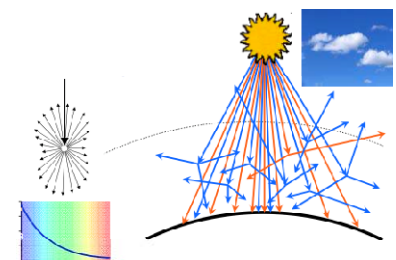
3.4 Streuung (Scattering)

Wird Licht (in transparentem Medium) von ihrer Ausbreitungsrichtung von Molekülen und kleinen Partikeln abgelenkt, dann spricht man von Streuung.

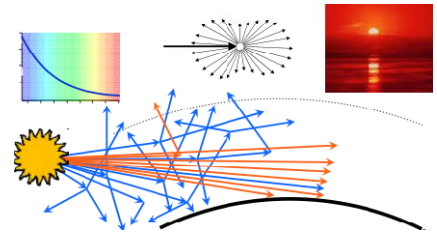
Die *Rayleigh-Streuung* ist die Streuung von Licht durch Partikel die kleiner als $1/10$ der Wellenlänge sind (dafür reichen schon die Luftmoleküle selbst). Die Streuungsintensität ist abhängig von der Wellenlänge: je kurzwelliger das Licht, desto stärker wird es gestreut. Ein Beispiel hierfür ist der *blaue Himmel*. Wenn das Sonnenlicht in die Erdatmosphäre tritt, wird dieses in der



Atmosphäre von Teilchen gestreut. Der blaue Lichtanteil ist kurzwelliger und wird stärker gestreut, d.h. wir sehen das blaue Licht aus allen Richtungen kommend. Das gelbe und rote Licht dagegen geht durch die Atmosphäre großteils gerade durch und trifft nur aus der direkten Sonnenrichtung auf uns. Aus diesem Grund erscheint uns der Himmel tagsüber blau.



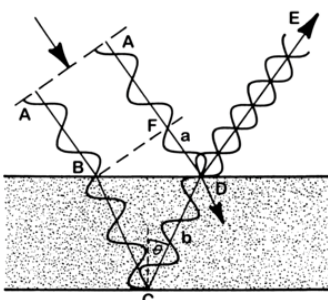
Bei *Sonnenuntergang* hat das Sonnenlicht einen *viel weiteren Weg* durch die Atmosphäre zurückzulegen. Dadurch schafft es das blaue Licht gar nicht mehr, bis zu uns durchzudringen, es wird vorher schon zu oft zerstreut. Das rote Licht dagegen kommt teilweise durch und färbt alles rot.



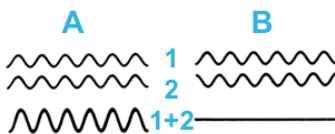
Mie-Streuung dagegen ist die Streuung an Partikeln, die wesentlich größer sind (etwa in der Größenordnung der Wellenlänge des Lichtes, also Dunst und Verunreinigungen). Sie streut das Licht nicht so stark, d.h. das meiste Licht behält seine Richtung ungefähr bei. Die Mie-Streuung ist verantwortlich für Effekte wie Nebelschleier und Mondhof.



3.5 Interferenz



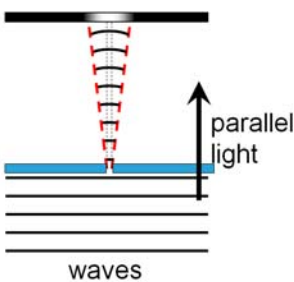
Licht das auf eine sehr dünne Schicht auftrifft, kann sowohl von der Oberfläche als auch von der Unterseite dieser Schicht in die gleiche Richtung reflektiert werden. Frequenzen, die dabei phasengleich reflektiert werden, werden verstärkt, und Frequenzen, die um eine halbe Wellenlänge verschoben zur Reflexion kommen, löschen sich dabei aus. So werden je nach Richtung andere Farben reflektiert, das entstehende Farbspiel nennt man *Interferenz*. Farben an den Flügeln von Schmetterlingen oder auf Seifenblasen entstehen auf diese Art, ebenso die Farbringe um Ölflecken auf der Straße.



Interferenz-Anwendungen findet man auch in Metallicfarben, wo man von *Goniochromismus* spricht, wenn ein Lack aus unterschiedlichen Richtungen betrachtet unterschiedliche Farbwerte liefert.



3.6 Beugung (Diffraction)



Wenn Licht eine Kante passiert, dann wird ein kleiner Teil des Lichtes an dieser Kante abgelenkt, man spricht von *Lichtbeugung*. Ähnlich wie bei der Interferenz kommt es dabei je nach Ablenkungswinkel zu Verstärkung oder Auslöschung, es entsteht ein Streifenmuster.

Dieses Interferenzmuster lässt sich am besten mit monochromatischem Licht an einem Spalt beobachten:



Da jede Wellenlänge bei anderen Winkeln verstärkt bzw. ausgelöscht wird, entstehen bei weißem Licht bunte Farbspiele:



Beispiele findet man am beleuchteten Spinnennetz, dem Farbspiel auf Opalen, der Glorie um einen Flugzeugschatten auf Wolken, den Farbringen auf einer CD u.v.m.

