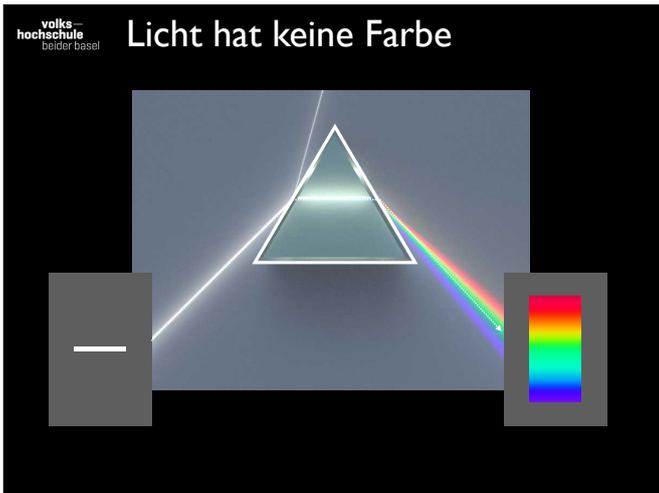


4

Themen der Vorlesung:

- (1) Licht - Die physikalische Voraussetzung
- (2) Das menschliche Auge - Die Wahrnehmung von Farbe
- (3) Farbe in der Malerei - Pigmente und Farbstoffe
- (4) Farbe in Fotografie und Film - 'Analoge' Farbwiedergabe
- (5) Die Codierung von Farben - Farbmeter, CIE-, RGB- und andere Farbräume
- (6) Digitale Bildverarbeitung - Digitale Farbwiedergabe



5

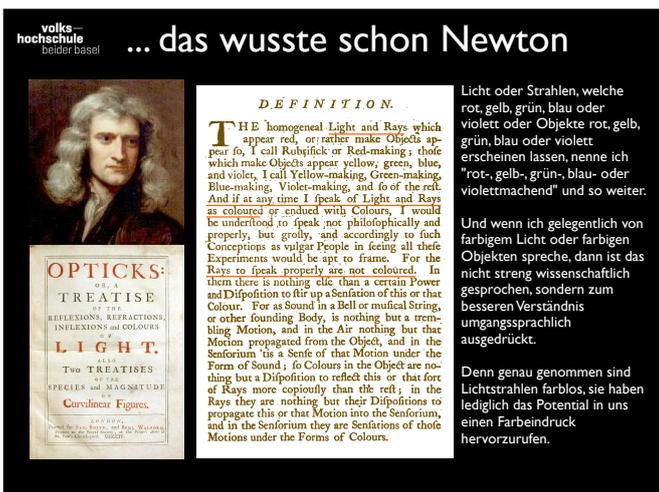
Im **Newsletter** zur VL wurde gefragt:

Was ist überhaupt Farbe – sind Farben ein physikalisches Phänomen oder bloss eine Sinnestäuschung? Sehen wir Farben, wo es gar keine gibt? Ist der Himmel wirklich blau, das Gras grün, unser Blut rot? Und wie ist es möglich, dass wir zum Beispiel die Farben des Regenbogens mit Ölfarben oder auf einem Computerschirm richtig wiedergeben können?

Hier die Antworten (Achtung Spoiler-Warnung)

Nein, Farben sind KEIN physikalisches Phänomen. Nein, der Himmel IST nicht blau, das Gras nicht grün, und unser Blut nicht rot... sie erscheinen uns nur so. Also doch bloss eine "Sinnestäuschung"? - Eher eine grossartige "Sinnesleistung".

Allerdings ist das, was wir auf Gemälden oder Computerschirmen als die Farben des Regenbogens erkennen, nur für uns Menschen eine "richtige" Wiedergabe. Bienen oder Mantys Shrimps hätten ihre liebe Mühe damit.



6

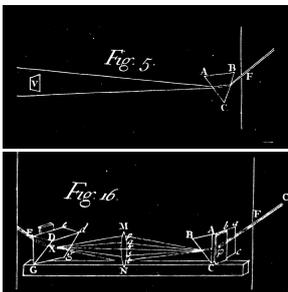
Sir Isaac Newton (1643 - 1727): Opticks erscheint 1704

Am 28. April 1664 wurde er Scholar, und im April 1665 erhielt er den Bachelor-Abschluss. Sein eigentlicher Durchbruch als Mathematiker und Naturwissenschaftler erfolgte, als die Universität im Sommer 1665 wegen der Großen Pest geschlossen wurde und er an seinen Wohnort Woolsthorpe zurückkehrte, wo er die nächsten zwei Jahre bis zur Wiedereröffnung der Universität in relativer wissenschaftlicher Isolation verbrachte. Nach Aufhebung der Quarantäne im Jahr 1667 wurde Newton Fellow des Trinity College (Cambridge). Newton hielt seine Antrittsvorlesungen über seine

Theorie der Farben. Von 1670 bis 1672 lehrte er Optik, wobei er besonders die Lichtbrechung untersuchte. Aus seiner Arbeit schloss Newton, dass jedes mit Linsen aufgebaute Fernrohr unter der Dispersion des Lichtes leiden müsse, und schlug ein Spiegelteleskop vor, um die Probleme zu umgehen. 1672 baute er ein erstes Exemplar. 1720 verlor er bei der Südsee-Spekulation 20.000 Pfund (heute etwa 3 Millionen Euro), nachdem er zuvor größere Gewinne gemacht hatte. Er klagte, „er könne die Bewegung der Sterne berechnen, aber nicht die Dummheit der Menschen“, blieb jedoch bis zu seinem Tod ein wohlhabender Mann.

volks-  
hochschule  
beider basel

## Newton's Versuche



aus Newtons "Opticks"

- weisses Licht wird in Spektralfarben zerlegt
- einzelne Spektralfarben können nicht weiter zerlegt werden
- die Spektralfarben können wieder zu weissem Licht zusammengefügt werden

7

Newton returned to Woolsthorpe in 1666 when Cambridge University closed due to the plague, and here he performed many of his most famous experiments, most notably his work on light and optics.[1] This is also said to be the site where Newton, observing an apple fall from a tree, was inspired to formulate his law of universal gravitation

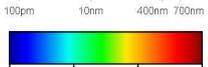
# I. Szene: es werde Licht!

8

Hier geht es um den physikalischen Hintergrund, um Optik und darum, wie man Licht, erzeugen kann, wie das Spektrum eines schwarzen Strahlers aussieht, um Sonnenlicht und Himmelslicht, um warmes und kaltes Licht.

volks-  
hochschule  
beider basel

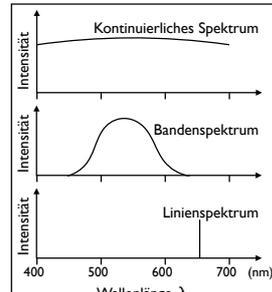
## Licht

Licht ist elektromagnetische Strahlung mit einer Wellenlänge von ca. 400 bis 700 nm

$1 \text{ nm} = 1/1000 \mu\text{m} = 10^{-9} \text{ m}$   
 $1 \mu\text{m} = 1/1000 \text{ mm} = 10^{-6} \text{ m}$   
 $1 \text{ mm} = 1/1000 \text{ m} = 10^{-3} \text{ m}$   
 $1 \text{ \AA} = 1/10 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$

Lichtgeschwindigkeit beträgt ca. 300'000 km/s  
 $c = \lambda \cdot \nu = \text{Frequenz} \cdot \text{Wellenlänge}$   
 $\Rightarrow$  Licht ist elektromagnetische Strahlung mit einer Frequenz von ca. 450 bis 750 THz



9

Lichtgeschwindigkeit:

$$c = 299'792'458 \text{ m/s} = 299'792'458 \cdot 1'000'000'000 \text{ nm/s}$$

Frequenz:

$$\nu = c/\lambda$$

$$\lambda = 400\text{nm} \Rightarrow \nu = 299'792'458 \cdot$$

$$1'000'000'000/400 = 749'481'145'000'000 \text{ Hz} = 749.5 \text{ THz}$$

$$\lambda = 700\text{nm} \Rightarrow \nu = 299'792'458 \cdot$$

$$1'000'000'000/700 = 428'274'940'000'000 \text{ Hz} = 428.3 \text{ THz}$$

# die Sonne, ein schwarzer Körper

10

**Planck'sches Strahlungsgesetz**  
beschreibt die Strahlung eines schwarzen Körpers in Abhängigkeit der Temperatur

$$\text{Intensität}(\lambda, T) = (2\pi^5 h c^2 / \lambda^5) / (e^{hc/\lambda kT} - 1)$$

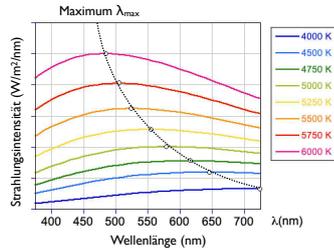
**Wien'sches Verschiebungsgesetz**  
berechnet das Maximum der Strahlung

$$\lambda_{\text{peak}}(\text{nm}) = b / T(\text{K}) \quad b = 2'898'772 \text{ nmK}$$

**Achtung:**

je tiefer die Temperatur,  
desto höher ist der langwellige Anteil  
⇒ rötliches ('wärmeres') Licht

je höher die Temperatur,  
desto höher der kurzwellige Anteil  
⇒ bläuliches ('kälteres') Licht

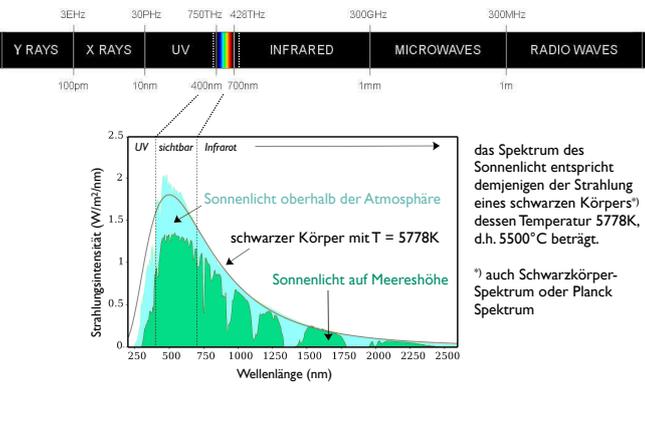


Kalte Körper leuchten rot - heisse Körper leuchten blau !

Mehr zum Plank'schen Strahlungsgesetz: [https://de.wikipedia.org/wiki/Plancksches\\_Strahlungsgesetz](https://de.wikipedia.org/wiki/Plancksches_Strahlungsgesetz)  
Mehr zum Wien'schen Verschiebungsgesetz: [https://de.wikipedia.org/wiki/Wiensches\\_Verschiebungsgesetz](https://de.wikipedia.org/wiki/Wiensches_Verschiebungsgesetz)  
bzw. den entsprechenden englischen Seiten.

# Sonnenlicht

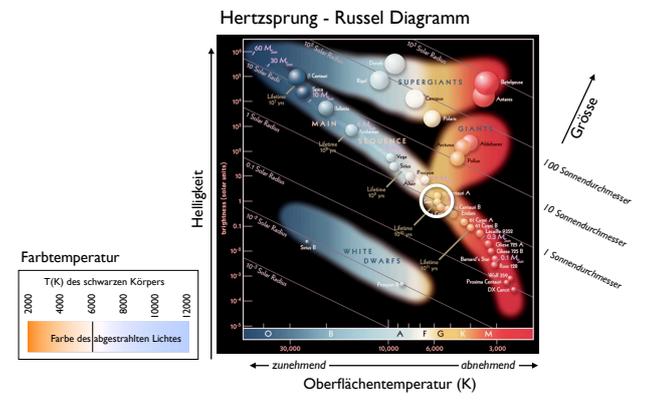
11



Schwarze Strahler (mehr später) Planck'sches und Wien'sches Gesetz  
Strahlungsintensität ( $W/m^2/nm$ ) = englisch: "spectral radiosity" oder "spectral intensity"  
In der englischen Grafik mit "Irradiance" bezeichnet, aber die Dimension von irradiance (oder flux density) = ( $W/m^2$ )  
Quantity: Spectral radiosity – Symbol:  $J_{e,\lambda}$  – Unit name: Watt per square metre, per metre – Unit symbol:  $W/m^3$   
Spectral radiosity = Radiosity of a surface per unit frequency or wavelength. The latter is commonly measured in  $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$ . This is sometimes also confusingly called "spectral intensity".

# Sternenlicht

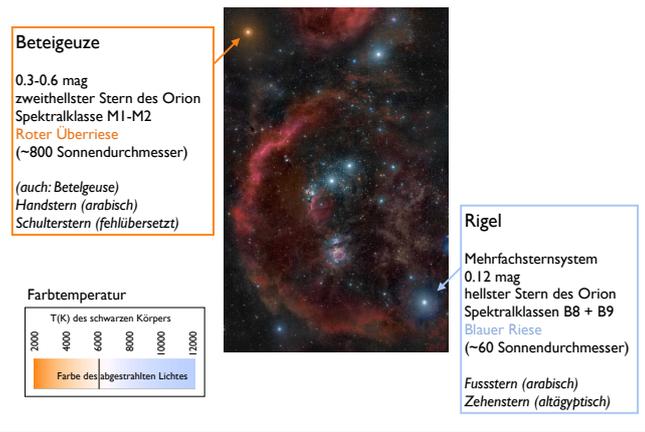
12



**die Sonne ist weiss**  
Helligkeit ist logarithmisch aufgetragen, Temperatur als der Kehrwert der Temperatur in Kelvin (Arrheniusplot)  
Die Spektralklassen von Sternen sind nach Oberflächentemperatur unterteilt. Ihr Spektrum entspricht näherungsweise der Strahlung eines Schwarzen Körpers und steht damit in direktem Zusammenhang mit der Farbtemperatur.

# Orion

13

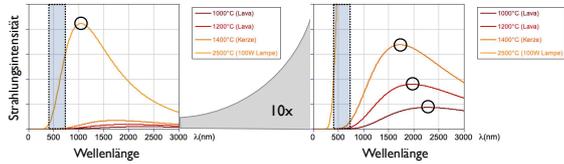
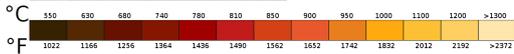


Die beiden leicht zu findenden Hauptsterne im **Sternbild Orion, Beteigeuze** und **Rigel**, lassen sich am Sternenhimmel farblich sehr gut unterscheiden. Beteigeuze ist deutlich rötlicher und gehört mit einer Oberflächentemperatur von 3.450 K in die Spektralklasse M, der bläuliche Rigel ist mit 10.500 K deutlich heißer und gehört zur Spektralklasse B. Orion mit rot leuchtenden Wolken ionisierten Wasserstoffs (H-alpha). Der große Bogen wird Barnard's Loop genannt. (Langzeitaufnahme)  
Je niedriger der Wert der scheinbaren Helligkeit (Magnitude), desto größer ist die scheinbare Helligkeit eines Gestirns; besonders helle Objekte haben einen negativen mag-Wert.

## glühende Lava



Temperatur 1000 - 1200 °C  
 $\Rightarrow \lambda_{\text{max}} = 2300\text{-}2000 \text{ nm}$   
 = Mikrowellenbereich



14

The temperature of a Pāhoehoe lava flow can be estimated by observing its color. The result agrees well with other measurements of temperatures of lava flows at about 1,000 to 1,200 °C (= 1273 - 1473 K).  
 $\Rightarrow$  maximum = 2277 nm to 1969 nm.

s. auch "Pele meats the sea" <https://www.youtube.com/watch?v=diYAN3eR2p4>  
**Wo ist es am heissesten (im Bild)?**

## der schwarzer Körper Mensch

Pro memoria:  
 Wien'sches Verschiebungsgesetz

$$\lambda_{\text{peak}} = b / T$$

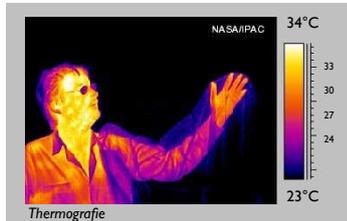
T = Temperatur in Kelvin  
 b = Wien'sche Verschiebungskonstante  
 $\approx 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$

Intensitätsmaximum eines Menschen (36°C):

$$\lambda_{\text{peak}}(\mu\text{m}) = 2898 / (273+36)$$

$$= 9.38 \mu\text{m}$$

= Infrarot-Strahlung  
 (unsichtbar)



Beachte: schwarzer Sack ist durchsichtig !

15

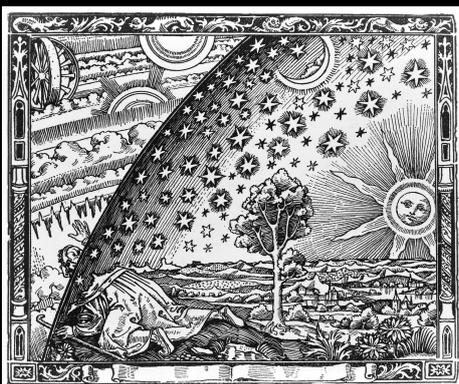
**Much of a person's energy is radiated away in the form of infrared light.** Some materials are transparent in the infrared, but opaque to visible light, as is the plastic bag in this infrared image (right). Other materials are transparent to visible light, but opaque or reflective in the infrared, noticeable by the darkness of the man's glasses.  
 Wien's law (Wien'sches Verschiebungsgesetz):  
 $\lambda_{\text{peak}} = b/T$   
 T is the absolute temperature.  
 b is a constant of proportionality called Wien's displacement constant, =  
 $2.897771955 \dots \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ , or  $b \approx 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ .

## 2. Szene: der blaue Himmel

16

Hier geht es darum, wie man das Spektrum einer Lichtquelle verändern kann, genauer gesagt um Streuung. Letztlich ist das Spektrum des Lichtes welches auf unserer Netzhaut eintrifft der physikalische Stimulus unseres Farbsehens.

## eigentlich ist der Himmel ...



17

Illustration von der Vorstellung, dass sich Sonne, Mond und Sterne innerhalb des festen Himmelsgewölbes befinden.  
 Flammarions Holzstich: Illustration zu La forme du ciel im Kapitel Le jour:  
 "Un missionnaire du moyen âge raconte qu'il avait trouvé le point où le ciel et la Terre se touchent ..."  
 Camille Flammarion: L'atmosphère, Paris 1888, Seite 163,  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Flammarions\\_Holzstich](https://de.wikipedia.org/wiki/Flammarions_Holzstich)  
 Some commentators have claimed that Flammarion produced the image to propagandize the myth that medieval Europeans widely believed the Earth to be flat. In his book, however, Flammarion never

discusses the history of beliefs about the shape of the Earth. His text suggests that the image is simply a fanciful illustration of the false view of the sky as an opaque barrier.

PS: Die Vorstellung einer flachen Erde taucht ohnehin erst im 20.Jh mit disc world auf....



18

Die Erde und ihr blauer Himmel ... sind ein durchaus lokales Phänomen, unser grossartiger Himmel ist eine dünne Hülle, eng an die die Erde geschmiegt, reicht nicht gerade weit ins Weltall hinaus, enthält ganz sicher nicht Sonne Mond und Sterne... Hier vom Mond aus sehen wir unser famoses Himmelsgewölbe bloss als die Färbung unseres "blauen Planeten". Auf dem Weg durch's leere Weltall ist das Licht unsichtbar und ganz sicher farblos. Im Weltall ist der Himmel schwarz. Und solange Licht durch's Weltall streift, können wir es nicht sehen... es ist unsichtbar und ganz sicher farblos



19

Atmosphäre der Erde, aufgenommen von der ISS  
 NASA Earth Observatory - <http://eol.jsc.nasa.gov/scripts/sseop/photo.pl?mission=ISS013&roll=E&frame=54329>  
**View of the crescent moon through the top of the earth's atmosphere.** Photographed above 21.5°N, 113.3°E by International Space Station crew Expedition 13 over the South China Sea, just south of Macau (NASA image ID: ISS013-E-54329).  
 Erstellt: 20. Juli 2006

**Licht - Streuung**  $\lambda \gg \delta$

Raleigh-Streuung: elastische Streuung elektromagnetischer Wellen an Teilchen, deren Durchmesser viel kleiner ist als die Wellenlänge des Lichts.

Für  $d \ll \lambda$   
 $\sigma(\omega) \approx \sigma_{Th} \cdot \omega^4 / \omega_0^4$

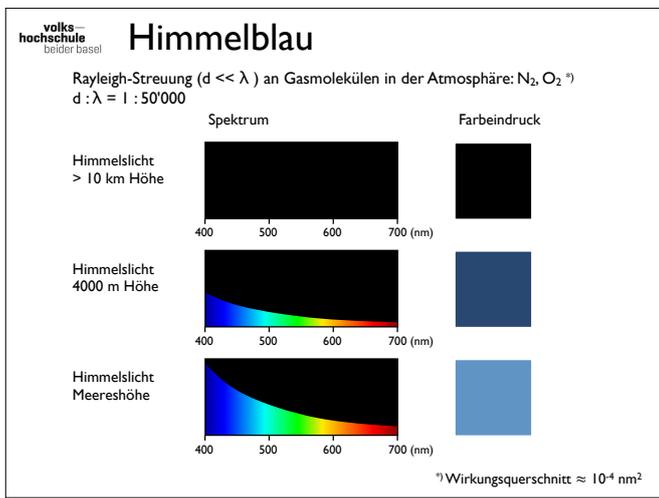
$\sigma(\omega)$  Wirkungsquerschnitt der Raleigh-Streuung  
 $\sigma_{Th}$  Thomson Wirkungsquerschnitt ( $0.665 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$ )  
 $\omega$  Frequenz ( $\omega \ll \omega_0$ )  
 $\omega_0$  Eigenfrequenz  
 $\omega$  Kreisfrequenz =  $2\pi \nu$   
 $\nu$  Frequenz  
 $\lambda$   $c / \nu$   
 $c$  Lichtgeschwindigkeit

$\frac{\sigma(\text{blau})}{\sigma(\text{rot})} = \frac{1/\lambda(\text{blau})^4}{1/\lambda(\text{rot})^4} = \left(\frac{700\text{nm}}{400\text{nm}}\right)^4 \approx 9.4$

Raleigh-Streuung ist  
 - abhängig von der Frequenz  
 - umgekehrt abhängig von der Wellenlänge

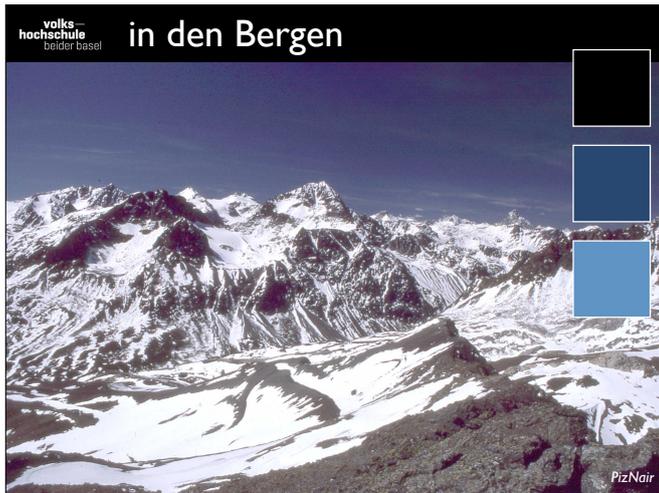
20

Light coming from the sun scatters off molecules of gas and other small particles in the atmosphere. Rayleigh scattering gives the surrounding sky its brightness and its color. Shorter wavelength will scatter more than the longer wavelengths. Oxygen in the Earth's atmosphere absorbs the ultra-violet region of the spectrum. The resulting color, which appears like a **pale blue**, actually is a mixture of all the scattered colors, mainly blue and green. Conversely, glancing toward the sun, the colors that were not scattered away are directly visible, giving the **sun itself a slightly yellowish hue**. Viewed from space, the sky is black and the sun is white.



21

Raleighstreuung + Absorption von UV in der Ozonschicht (CHappuis-Absorption)  
 Wirkungsquerschnitt =  $10^{-4} \text{ nm}^2 = 10^{-2} \text{ nm}^2$   
 Durchmesser =  $1/100 \text{ nm}$   
 für  $500 \text{ nm}$  Licht:  $d : \lambda = 1/100 : 500 = 1 : 50'000$



22

auf 3500 m Höhe ist der Himmel dunkelblau



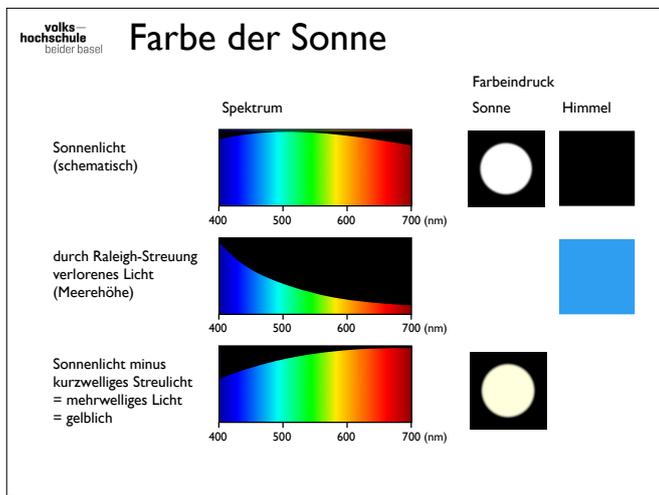
23

auf Meereshöhe ist himmelblau ein helles blau (400-500 nm)



24

Für den **Tyndall-Effekt** ist die **Mie-Streuung** verantwortlich. Im Gegensatz zur Raleigh-Streuung: blaues Licht wird nicht stärker gestreut, weiss bleibt weiss. Dafür ist die Mie-Streuung weniger diffus als die Raleighstreuung, sondern streut vorwiegend vorwärts.  
 Der Tyndall-Effekt beschreibt die Streuung von Licht an mikroskopisch kleinen Schwebeteilchen, mit Abmessungen ähnlich der Lichtwellenlänge, die allgemein in einem „trüben Medium“, besonders in einer Flüssigkeit oder einem Gas, suspendiert sind. Der Effekt ist nach seinem Entdecker John Tyndall benannt, der die Streuung von Licht in kolloiden Lösungen untersucht hat.



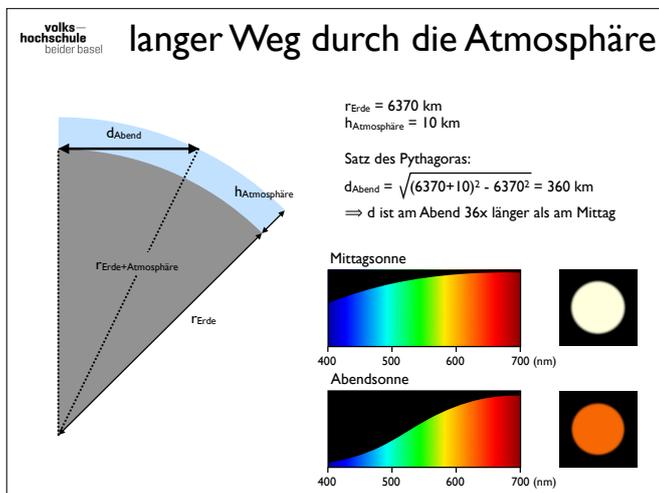
25

1. Sonnenlicht - warum schematisch? Sollte leicht gewölbt sein. schwarzer Strahler mit maximum bei ca. 500nm.
2. Warum verloren? Weggestreutes Licht = Himmelslicht
3. Direktes Licht minus weggestreutes Licht empfinden wir gelblicher



26

Beispiel: Blick von Shwezana Pagode in Bagan Richtung Sonnenuntergang  
Was fällt auf? Himmel ist nicht blau sondern rot.



27

Bei niedrigem Sonnenstand ist die Strecke des Sonnenlichts durch die Erdatmosphäre viel länger. Dadurch wird ein Großteil der hochfrequenten Lichtanteile (blau) durch **Raleigh-Streuung** seitlich weggestreut, es bleibt überwiegend Licht mit langen Wellenlängen übrig und der Farbeindruck der Sonne verschiebt sich in Richtung rot. Dieser Effekt wird durch zusätzliche Partikel in der Luft (z. B. Dunst, Aerosole, Staub, **Mie-Streuung**) weiter verstärkt. Für die Blaufärbung des Himmels im Zenit nach Sonnenuntergang ist allerdings die **Chappuis-Absorption** verantwortlich, die sich bei höherem Sonnenstand kaum bemerkbar macht.



28

wir sehen die Sonne hier zwar nicht direkt, aber ihr Licht, welches auf die Wolken fällt



29

Apropos Raleigh scattering:

Some of the scattering can also be from sulfate particles. For years after large Plinian eruptions, the blue cast of the sky is notably brightened by the persistent sulfate load of the stratospheric gases. Some works of the artist J. M. W. Turner may owe their vivid red colours to the eruption of Mount Tambora in his lifetime.

Chichester Canal is a painting by the English Romantic landscape painter, watercolourist and printmaker J. M. W. Turner. It was painted in 1828 and was commissioned by George Wyndham, 3rd Earl of Egremont. It is now in the Tate Collection. The work depicts the Chichester Canal in Sussex, southern England. The ship is probably a collier brig, as this serene scene had commercial purpose. Its brilliant colours may have been influenced by atmospheric ash from the eruption of Mount Tambora in Indonesia (see also Year Without a Summer).

Aber Achtung:

"Chichester Canal," British painter J.M.W. Turner wurde 1828 gemalt - viele andere Sonnenuntergänge auch viel später

Mt Tambora - war 1815 - the year without summer war 1816 ....

## 3. Szene: der Regenbogen

30

Auch hier geht es darum, wie man das Spektrum einer Lichtquelle verändern kann, diesmal geht es um Lichtbrechung. Nach wie vor gilt: das Spektrum des Lichtes welches auf unserer Netzhaut eintrifft, ist der physikalische Stimulus unseres Farbsehens.

volks-  
hochschule  
beider basel

## Licht - Brechung $\lambda \ll \delta$

Brechungsgesetz von Snellius

$$\sin(\delta_1) \cdot n_1 = \sin(\delta_2) \cdot n_2$$

$$\sin(\delta_1) / \sin(\delta_2) = n_2 / n_1$$

$\delta_1$  = dünneres Medium  
 $\delta_2$  = dichteres Medium

Je höher der Brechungsindex eines Mediums, desto stärker die Ablenkung des Lichtstrahls.

$n_0 = 1.000$  (Vakuum)  
 $n_{\text{Wasser}} = 1.333$   
 $n_{\text{Kronglas}} = 1.55$

$\delta_1 > \delta_2$   $n_2 > n_1$

Grenzwinkel der Totalreflexion:  
 $\delta_1 = 90^\circ \Rightarrow \sin(\delta_1) = 1.000$

$$\delta_g = \sin^{-1}(n_1 / n_2)$$

Beispiel:  
 $n_{\text{Luft}} / n_{\text{Wasser}} = 1.000 / 1.333$   
 $\delta_{g\text{Wasser}} = 48.6^\circ$

31

Das Brechungsgesetz ist für verschiedene Materialien aber nicht in Abhängigkeit von Wellenlänge formuliert

$n_{\text{Medium}} = c_{\text{Vakuum}} / c_{\text{Medium}}$

$\lambda_{\text{Medium}} = \lambda_{\text{Vakuum}} / n_{\text{Medium}}$

Brechungsindex Vakuum = 1

Brechungsindex Luft Meeresniveau = 1.00028

Kronglas 1.5-1.6 Flintglas 1.6-1.8

# Brechungsindex

Brechungsgesetz von Snellius

$$\sin(\delta_1) / \sin(\delta_2) = n_2 / n_1$$

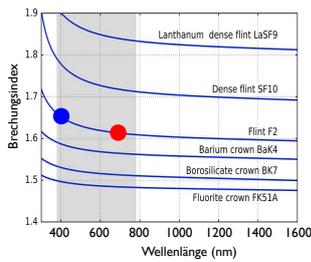
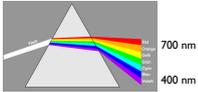
$$n = n(\lambda)$$

Je kürzer die Wellenlänge des Lichts, desto stärker die Ablenkung des Lichtstrahls.

Beispiel:

$n_{\text{Flintglas}} = 1.77$  (400nm)

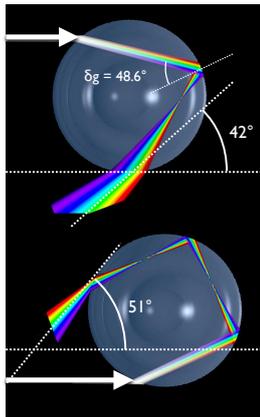
$n_{\text{Flintglas}} = 1.73$  (700nm)



32

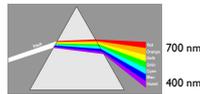
Der Brechungsindex ist aber abhängig von der Wellenlänge

# der Regenbogen ...



... ist ein Effekt von Brechung und Spiegelung in runden Wassertropfen

einmal Totalreflexion primärer (innerer) Regenbogen erscheint mit einem Öffnungswinkel von 42°



zweimal Totalreflexion sekundärer (äusserer) Regenbogen erscheint mit einem Öffnungswinkel von 51°

33

Die Tropfengröße und die Tropfenform haben generell Einfluss auf die farbliche Erscheinung des Regenbogens. Häufig sind die Enden des Bogens besonders hell. Dieser Effekt wird ebenfalls durch Interferenz verursacht, die zusätzlich von Abweichungen von der Kugelform abhängt. Große Tropfen (Durchmessern von mehreren mm) erzeugen besonders helle Regenbögen mit wohldefinierten Farben. Bei Größen von weniger als 1,5 mm wird zunächst die Rotfärbung immer schwächer. Sehr kleine Tropfen, wie beispielsweise in Nebelschwaden, in denen der Durchmesser oft nur etwa ein Hundertstel Millimeter beträgt, liefern nur noch verwaschene Farben.

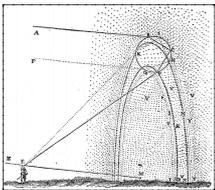
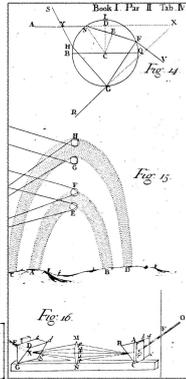
# ... eine altbekannte Geschichte



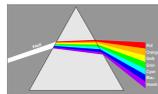
René Descartes (1596-1650)



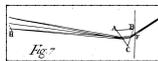
Isaac Newton (1643-1727)



Discours de la méthode (1637)



pro memoria



Opticks (1704)

34

René Descartes (latinisiert Renatus Cartesius; \* 31. März 1596 in La Haye en Touraine; † 11. Februar 1650 in Stockholm) war ein französischer Philosoph, Mathematiker und Naturwissenschaftler. Sir Isaac Newton (\* 25. Dezember 1642jul./ 4. Januar 1643greg. in Woolsthorpe-by-Colsterworth in Lincolnshire; † 20. März 1726jul./ 31. März 1727greg. in Kensington) war ein englischer Naturforscher und Verwaltungsbeamter. In der Sprache seiner Zeit, die zwischen natürlicher Theologie, Naturwissenschaften, Alchemie und Philosophie noch nicht scharf trennte, wurde Newton als Philosoph bezeichnet.

# Regenbogen

sekundärer Regenbogen (51°)

Alexanders dunkles Band

primärer Regenbogen (42°)

35

Sonne hinter uns: innen blau aussen rot, Winkel =  $f(\text{Tröpfchenform})$ ,  $n=1.31$  (wie Eis)

**Alexanders dunkles Band:** Dieser Helligkeitskontrast entsteht, weil sich die Farben im Inneren der Kegelmantel-Spots überlagern und schließlich jenseits des blauen weißes Licht von den Regentropfen zum Beobachter reflektiert wird. Haupt- und Nebenregenbogen sind einander mit ihrer roten Seite zugekehrt. Hier fehlt das zusätzliche weiße Licht. – Dieses dunkle Band wird zu Ehren seines Entdeckers Alexander von Aphrodisias als Alexanders dunkles Band bezeichnet. (griechisch Ἀλέξανδρος ὁ Ἀφροδιαιεύς lateinisch Titus Aurelius Alexander) war ein antiker Philosoph, der um 200 n. Chr. lebte.

# 4. Szene: grünes Gras, rotes Blut, weisser Schnee

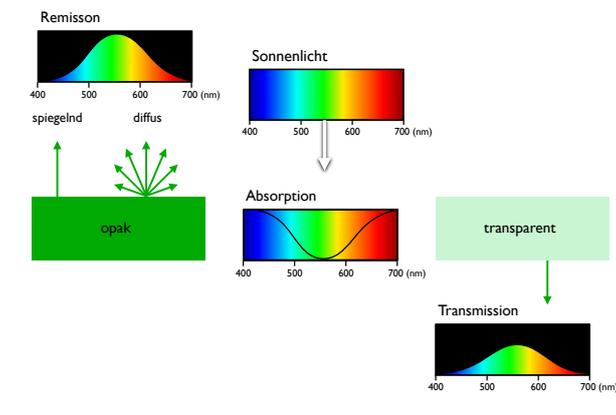
36

Hier geht es darum, wie Licht mit Objekten interagiert, also um Absorption, Remission und Transmission. Man kann es nicht oft genug sagen: Licht an sich, ist zwar farblos, aber es ist der physikalische Stimulus, der uns Farben empfinden lässt.

## Absorption Remission Transmission

37

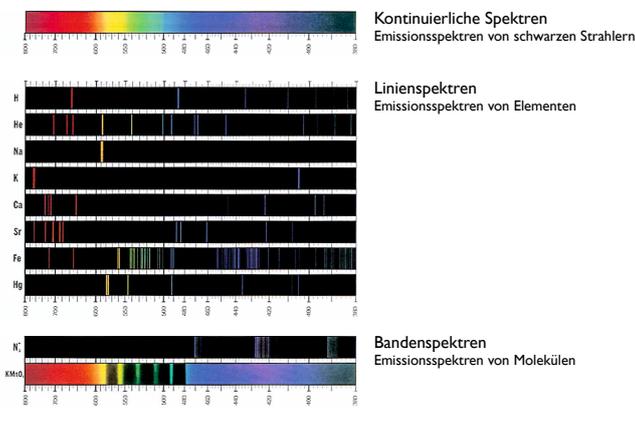
Ein Objekt erscheint grün, wenn es alles ausser den 'grünen Wellenlängen', d.h. also im roten und blauen Spektrumsdrittel, absorbiert. Als Remission (von lateinisch remittere zurückschicken) bezeichnet man in der Physik die diffuse Reflexion von Wellen, insbesondere von Licht, im Gegensatz zur gerichteten Reflexion, die das Reflexionsgesetz erfüllt. Häufiger wird aber in beiden Fällen von Reflexion gesprochen. Man unterscheidet dann zwischen spiegelnder und diffuser Reflexion. Das oberflächenbezogene Maß für die Remission ist der Remissionsgrad. Das Verhältnis von remittierter zu eingestrahelter Energie in Prozent nennt man Albedo-Wert.



## Spektren

38

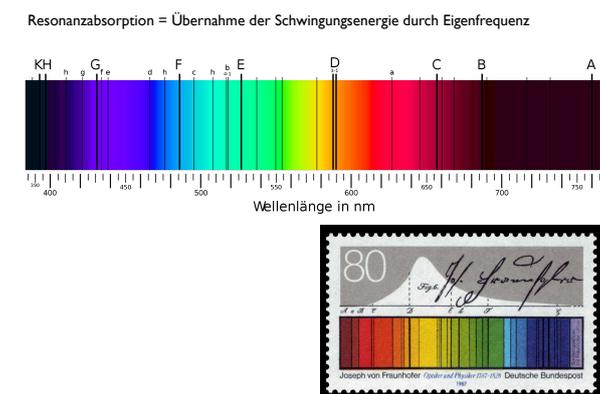
Achtung, die Wellenlänge steigt von rechts nach links...  
... weil die Frequenz von links nach rechts steigt



## Fraunhofer'sche Linien

39

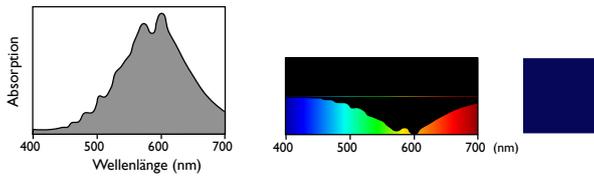
Die Fraunhoferlinien oder Fraunhofer'schen Linien sind Absorptionslinien im Spektrum der Sonne. Sie entstehen durch **Resonanzabsorption** der Gase in der Sonnen-Photosphäre. Die Fraunhoferlinien erlauben Rückschlüsse auf die chemische Zusammensetzung und Temperatur der Gasatmosphäre der Sonne und von Sternen. Die wichtigsten Fraunhoferlinien im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums Echellegitter-Spektrum der Sonne mit Fraunhoferlinien



## Chappuis-Absorption

Chappuis-Absorption = Absorption in der Ozonschicht, die einen kleinen Teil des Sonnenlichts im Spektralbereich absorbiert.

Nur bei langem Lichtweg durch die Atmosphäre, d.h. während der Dämmerung, in der blauen Stunde, bemerkbar.



40

Die Chappuis-Absorption ist eine Absorption elektromagnetischer Strahlung, durch die Ozonschicht, die einen kleinen Teil des Sonnenlichts im Spektralbereich des sichtbaren Lichts absorbiert. Die **Chappuis-Absorptionsbanden** liegen zwischen 400 und 650 nm. Die Kontinuumsabsorption innerhalb dieses recht großen Spektralbereichs weist zwei ungefähr gleich große Absorptionsmaxima bei 575 nm und 603 nm auf. Sie trägt neben der Rayleigh-Streuung zur Blaufärbung des Himmels bei und wirkt sich vor allem bei einem langen Lichtweg durch die Atmosphäre aus. Deshalb ist die Chappuis-Absorption der entscheidende Prozess für die Färbung des Himmels nach Sonnenuntergang – also

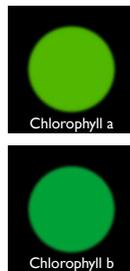
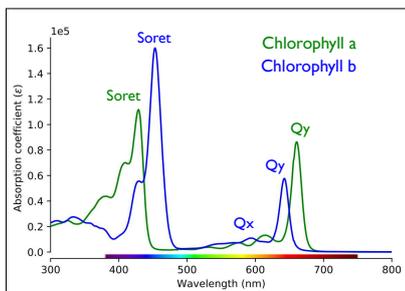
## blaue Stunde



41

Oben das dunkle violettblau entsteht durch Chappuis-Absorption.

## Chlorophyll



Chlorophyll a in Cyanobakterien und allen phototrophen Eukaryoten  
Chlorophyll b in Grünalgen (Chlorophyta), Euglenozoa und allen Landpflanzen

42

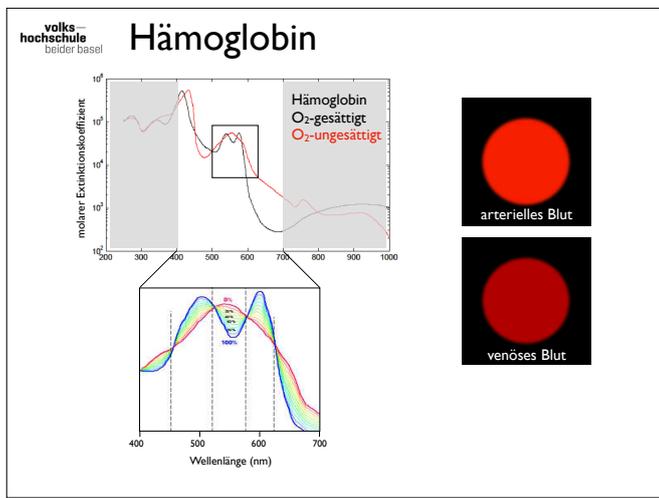
Chlorophyll a, blaugrün, Maxima bei 430, 662 nm. Typisch für Cyanobakterien und alle phototrophen Eukaryoten.  
Chlorophyll b, gelbgrün, Maxima bei 454, 643 nm. Typisch für Grünalgen (Chlorophyta), Euglenozoa und alle Landpflanzen

## das grüne Gras ...



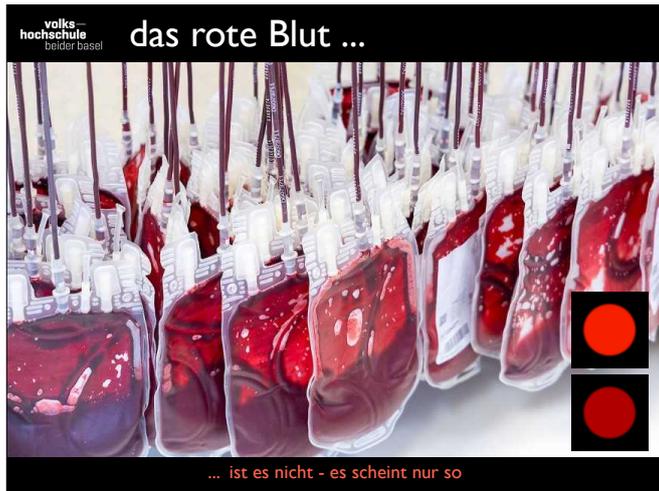
... ist es nicht - es scheint nur so

43



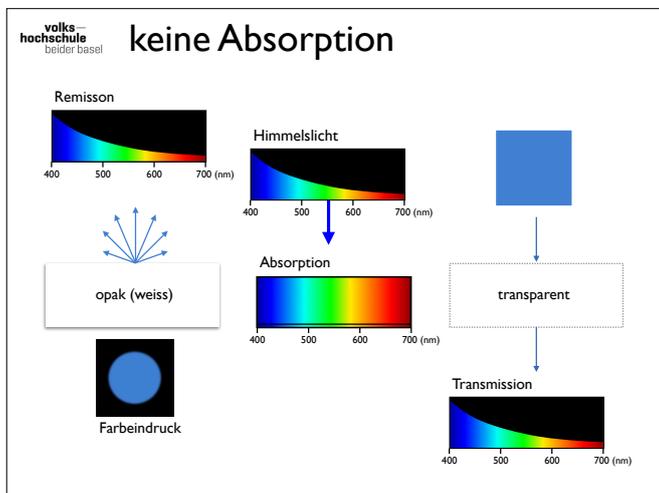
44

Molarer Extinktionskoeffizient von mit Sauerstoff gesättigtem (HbO<sub>2</sub>) und ungesättigtem (Hb) Hemoglobin in Wasser nach. Im Detailplot sind versch. Sättigungskurven gezeigt.



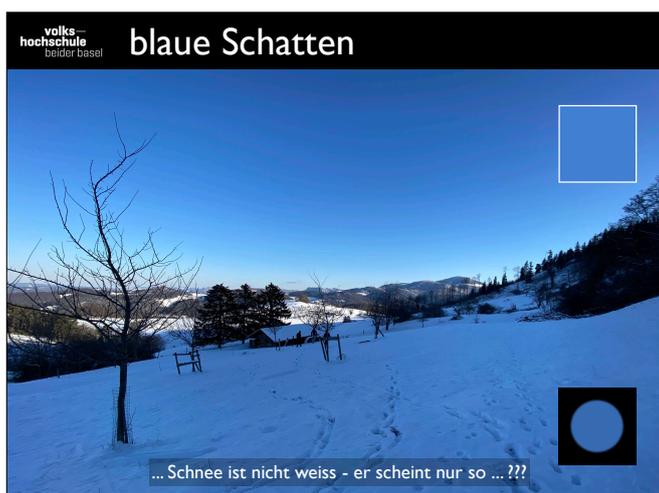
45

... drum sag ich's noch einmal... :-)



46

Objekte scheinen weiss, bzw. in der Farbe des beleuchtenden Lichtes, wenn sie nichts absorbieren. Klare Fensterscheiben absorbieren nicht (... im sichtbaren Bereich). Himmelblau und Abendrot erreichen uns auch durch geschlossene Fenster.



47

Dass der Schnee im Schatten nicht weiss erscheint, bedeutet nicht, dass er dort im roten und grünen Spektrumsdrittel absorbiert, ... es bedeutet, dass er dort nicht mit weissem Sonnenlicht, sondern nur mit blauem Himmelslicht beleuchtet wird, von dem er dann nichts absorbiert, ... aha...

# 5. Szene: Schmetterlinge und Seifenblasen

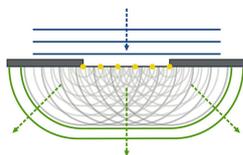
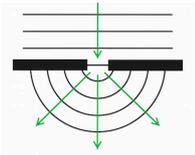
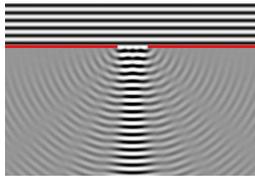
48

Hier geht es um sogenannte Strukturfarben oder Schillerfarben. Das sind Farben die durch Beugung des Lichtes entstehen. Durch Interferenz entstehen werden gewisse Wellenlängen verstärkt, andere gelöscht.

volks-  
hochschule  
beider basel

## Beugung

$$\lambda \approx \delta$$



Huygens Prinzip  
jeder Punkt einer Wellenfront ist Ausgangspunkt einer neuen Welle

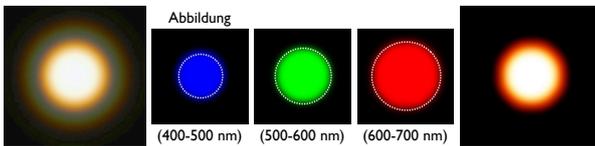
49

[https://en.wikipedia.org/wiki/Wave\\_interference](https://en.wikipedia.org/wiki/Wave_interference)

[https://de.wikipedia.org/wiki/Beugung\\_\(Physik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Beugung_(Physik))

volks-  
hochschule  
beider basel

## Beugungsscheibchen



Beugung von Sonnenlicht  
an kreisförmiger Lochblende

Durchmesser der Beugungsscheibe (Airy disc)

$$d = 1.22 \cdot \lambda / \sin(2\phi)$$

je grösser die Wellenlänge  
desto grösser der Ablenkwinkel  
 $\phi(700 \text{ nm}) > \phi(400 \text{ nm})$

je grösser die Tröpfchen  
desto kleiner der Sehwinkel  
desto kleiner der Hofdurchmesser

50

Beugung des Lichts der Sonne an einer kreisförmigen Lochblende ( $d \approx \lambda$ ) - je kürzer die Wellenlänge, desto geringer werden die entsprechenden Farbanteile gebeugt.

Ablenkwinkel ( $\phi$ ) bzw. der Sehwinkel ( $2\phi$ ) hängen von der Wellenlänge ( $\lambda$ ) und der Tröpfchengrösse ( $d$ ) ab:

Weil  $d = 1.22 \cdot \lambda / \sin(2\phi) \Rightarrow \phi = 0.5 \cdot \arcsin(1.22 \cdot \lambda / d)$

volks-  
hochschule  
beider basel

## Koronabildung

51

Mondhof: Mond weiss - Corona innen (kleiner Beugungswinkel) bläulich, gegen aussen (grosser Beugungswinkel) zunehmend rot.

Der Koronawinkel ist eine Frage der Tröpfchendurchmesser  $d$ :

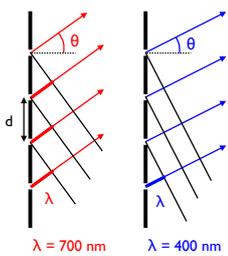
Tröpfchengrösse:  $d = 1.22 \cdot \lambda / \sin(2\phi)$

Koronawinkel:  $2\phi = \arcsin(1.22 \cdot \lambda / d)$

$2\phi =$  Öffnungswinkel, Sehwinkel

## Beugung am Gitter

Positive Interferenz



Gittergleichung:  
 $d \cdot \sin(\theta) = \lambda$

Rot wird mehr gebeugt als blau



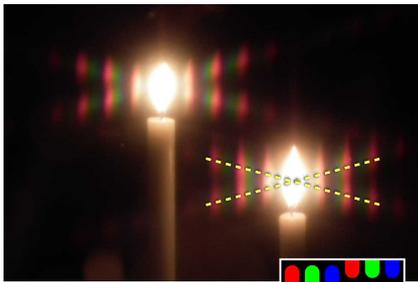
Gitterkonstante d  
für DVD = 0,74 μm = 740 nm  
für CD = 1,6 μm = 1600 nm

52

Reflexionsgitter:

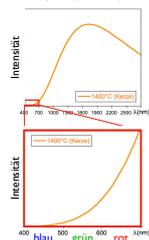
Blaue Lichtanteile der Glühbirne werden weniger stark von der Senkrechten wegbeugt (erscheinen unter kleinerem Beugungswinkel) als rote.  
θ = Ablenkungswinkel

## Beugung im TV Monitor



Aufnahme von Esther Stähelin

Strahlung des schwarzen Körpers (1400°C)



Schlitzmaske TV monitor

53

Auch hier handelt es sich um ein **Reflexionsgitter**, hervorgerufen durch die Schlitzmaske des Monitors. Die scheinbare Lücke im abgestrahlten Spektrum zwischen rot und grün ist auf den **geringen Blauanteil im Kerzenlicht** zurückzuführen.

## Tagpfauenauge



54

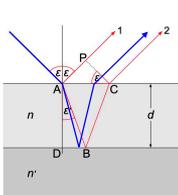
Tagpfauenauge

Braune Farben sind Pigmente, entstehen durch Absorption

Blau, weiss etc. sind sog. Strukturfarben, entstehen durch Interferenz

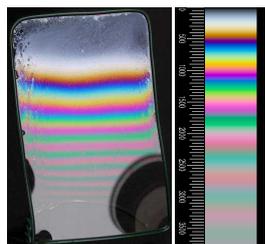
## Farben dünner Schichten

Negative Interferenz



Addition  
wenn  $ABC - AP$   
= 1x, 2x, 3x, ... Wellenlänge

Extinktion  
wenn  $ABC - AP$   
= 1.5x, 2.5x, 3.5x, ... Wellenlänge



Seifenfilm in Rahmen Filmstärke in nm

Auslöschungsreihenfolge  
Blau → Cyan → Grün → Gelb → Rot

Resultierende Farben = Gegenfarben  
Gelb → Rot → Magenta → Blau → Cyan

Magenta bei Vielfachen von ~550nm

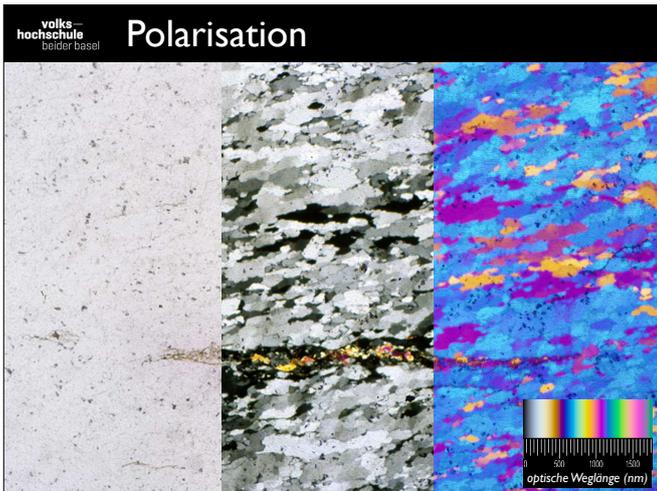
55

Magenta erscheint periodisch bei Schichtdicken, welche ein Vielfaches von ~550nm betragen. Der Seifenfilm wird also von oben nach unten von weniger als 550nm bis 11x 550nm, also etwa 6 μm dick.



56

Auch hier: Magenta erscheint periodisch bei schichtdicken, welche ein Vielfaches von ~550nm betragen.  
Der Ölfilm ist also < 0.1 µm (oder abwesend), und nur am Abfluss, wo es staut maximal =1.5 µm dick (Magenta - Abfolgen zählen, mal 550 nm)



57

Diese Bild einfach weil's so schön ist.  
Die optische Weglänge (Brechungsindex mal Distanz) hängt von der Doppelbrechung eines Minerals ab. Die Interferenzfarbe gibt also Auskunft über das Mineral, bzw über die Orientierung des Kristallgitters im Raum. Das kann man in einem Polarisationsmikroskop sichtbar machen.

**was man sich merken kann**

$\lambda \gg \delta$       **Streuung**      (Scattering)  
(Interaktion mit Partikeln)  
Wellenlänge des Lichts  $\gg$  Durchmesser des streuenden Partikels  
Partikel sind zum Beispiel Gase ( $\lambda \gg \delta$ ) oder Aerosole ( $\lambda \geq \delta$ )

$\lambda \approx \delta$       **Beugung**      (Diffraction)  
(Licht verhält sich wie eine Welle)  
Wellenlänge des Lichts  $\approx$  Hindernisse  
Hindernisse sind zum Beispiel Gitter oder Lochblenden

$\lambda \ll \delta$       **Brechung**      (Refraction)  
(Licht pflanzt sich geradlinig fort wie ein Lichtstrahl)  
Wellenlänge des Lichts  $\ll$  Geometrie der Hindernisse  
Hindernisse sind zum Beispiel Wassertropfen oder Prismen

**Merke:**  
Streuung:  
Blau stärkste Streuung  
Rot schwächste Streuung

Beugung:  
Rot stärkste Ablenkung  
Blau geringste Ablenkung

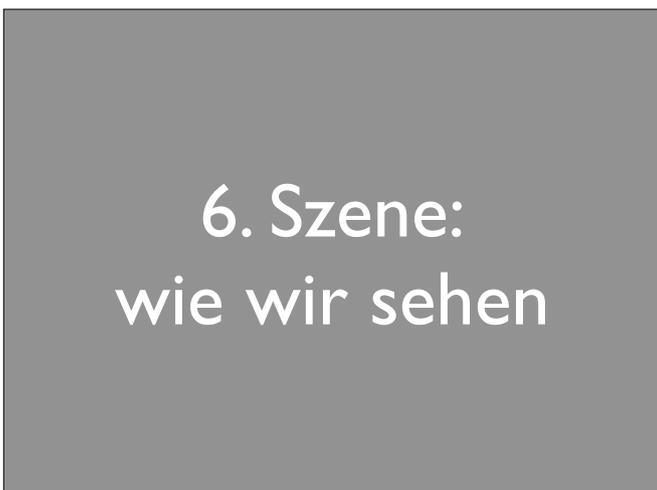
Brechung:  
Blau stärkste Ablenkung  
Rot geringste Ablenkung

Red Refraction Reduced.

58

**Zusammenfassung**

1. Blau wird stärker gestreut als Rot, deswegen ist das Himmelslicht blau
2. Blau wird stärker gebrochen als Rot, deswegen ist der primäre Regenbogen innen blau, aussen rot. Wegen der doppelten Spiegelung in den Regentropfen ist es beim sekundären (äusseren) Regenbogen umgekehrt: innen rot und aussen blau.
3. Hingegen wird Rot stärker gebeugt als Blau, die resultierende Interferenz ergibt eine (subtraktive) Reihenfolge von weiss nach gelb nach rot nach blau.

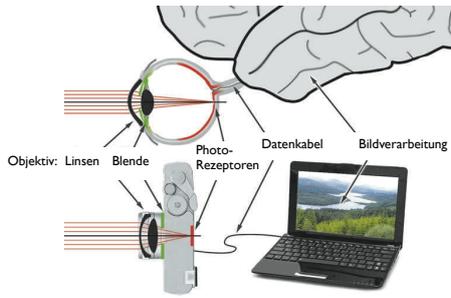


59

Hier geht es darum, wie wir Trichromaten den, auf die Netzhaut einfallenden Stimulus, d.h. das Licht einer bestimmten spektralen Zusammensetzung, zuerst zu einer Farbvalenz, d.h. eine Art 'Primärfarbe', und am Ende zu einer Farbempfindung verarbeiten.

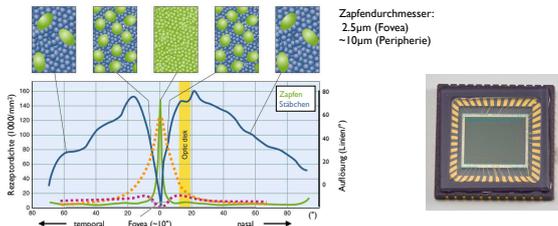
# der Sehvorgang

60



# Auflösungsvermögen

61



**Auge**  
 Netzhaut:  
 $110^\circ \cdot 180^\circ$ ,  $(20 \cdot 30 = 600\text{mm}^2)$ , 120 MegaZapfen  
 Fovea:  
 Fläche  $\approx 1.7\text{mm}^2$ , 6 MegaZapfen

7.5x

**Kamera**  
 Lumix DC-FZ1000 II:  
 Sensor  $1''$  ( $13.2 \cdot 8.8 = 116\text{mm}^2$ ), 20 Megapixel  
 iPhone 11 Pro:  
 Sensor  $1/2.5''$  ( $6 \cdot 4.3 = 25.8\text{mm}^2$ ), 12 Megapixel

Netzhaut  $\approx 1/3$  Augenoberfläche ( $110^\circ \cdot 180^\circ \approx 600\text{mm}^2 \approx 20 \cdot 30\text{mm}^2$  (Kugeloberfläche  $\pi d^2$ ,  $d = 24\text{mm}$ )

Fovea ( $d = 1.5\text{mm}$ ) Fläche =  $1.77\text{mm}^2 = 1 \cdot 1.7\text{mm}^2$

Digitalkamera Lumix DC-FZ1000 II Sensor CMOS  $1''$   $13,2 \times 8,8 \text{ mm}$  (Formatfaktor 2,7)

Cropfaktor = Formatfaktor = linearer Faktor um welchen ein Bildsensor kleiner ist als  $24 \times 36\text{mm}$  Kleinbild

Pixel size (iphone)  $\sim 1.5\mu\text{m}$  ( $2436 \times 1125$ )

Lumix  $12.8 \times 9.6\text{mm} / 20.9 \text{ megapixel} =$

$12800 \times 9600 \mu\text{m}^2 / 20.9 / 1000000 = 5.9 \mu\text{m}^2$

$\Rightarrow d = 2.4 \mu\text{m}$  color info  $4.8 \times 4.8 \mu\text{m}$ ,  $2.4 \mu\text{m}$  resolution through de-mosaicing

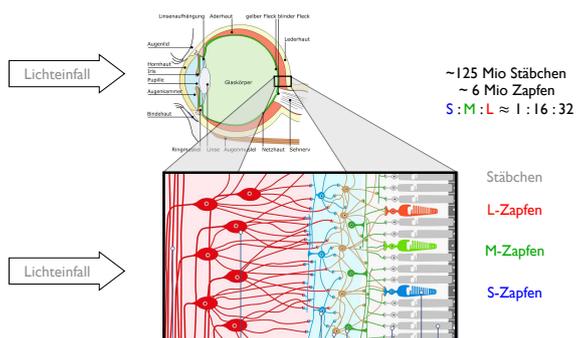
(see [https://en.wikipedia.org/wiki/Bayer\\_filter](https://en.wikipedia.org/wiki/Bayer_filter))

s. auch: Structure of cone photoreceptors, Debarshi Mustafi, A. Engel, K. Palczewski (2009), Biology, Medicine, Progress in Retinal and Eye Research, DOI: 10.1016/j.preteyeres.2009.05.003 Corpus ID: 18987027

NB: Winkelauflösung: ca.  $1'$  (= 1 Winkelminute) (Durchmesser Sonne bzw. Mond = ca.  $30'$ )

# das menschliche Auge

62



Menschen sind Trichromaten

Die meisten Wirbeltiere wie Vögel, Fische, Reptilien und Amphibien sind **Tetrachromaten**. Die meisten Säugetiere sind **Dichromaten** (blau + grün), Menschen (und Affen), sind **Trichromaten**. Mantys shrimps sind **Dodecachromaten** !!

Achtung: die Rezeptoren sind zuhinterst, wir schauen durch die Schaltzellen, Ganglienzell und Blutgefäße in der Netzhaut hindurch!

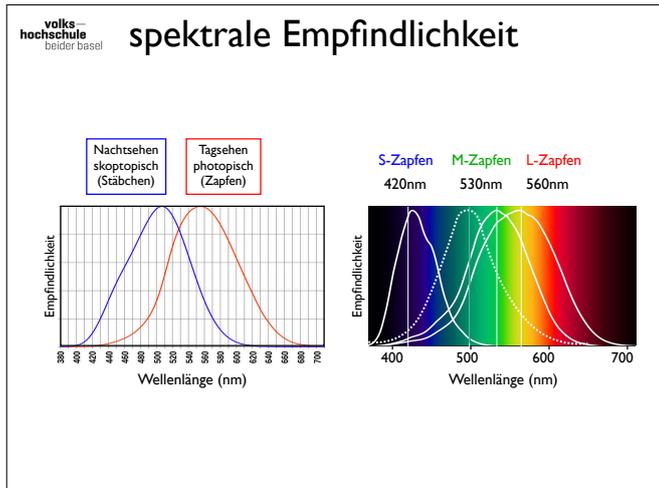
3 verschiedene Sensorzellen (3 Zapfen) für das photopische Sehen (Tagsehen).

Der 4. Typ (Stäbchen) dient dem skotopischen Sehen (Nachtsehen).

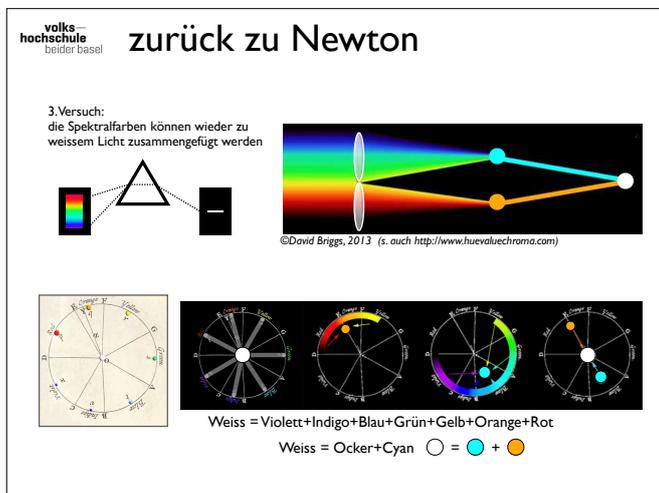
von links nach rechts:

Ganglienzellen (rosa Schicht) bilden den optischen

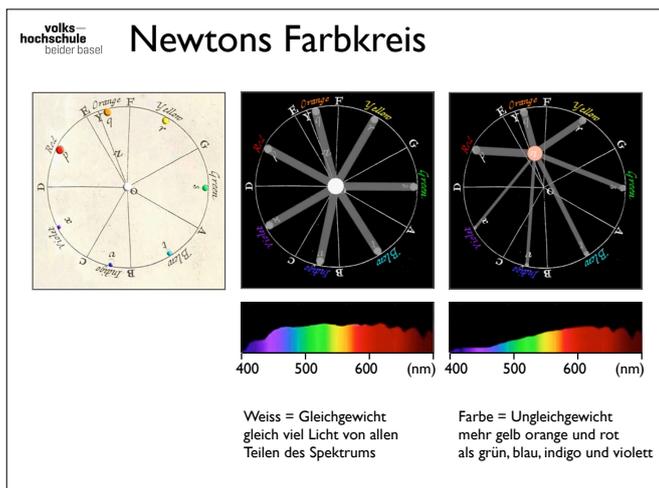
Nerv -> Datenübertragung  
 Schaltzellen (hellblaue Schicht) -> Pre-processing,  
 verknüpfen die Signale benachbarter Rezeptoren  
 Zapfen (L,M,S) und Stäbchen (grau)  
 dunkle Pigmentschicht



63      Was heisst wohl S- M- L- ? Vielleicht short - medium - long ??  
 L (Gelbgrün) peaking at ~ 560 nm; ~ 65%  
 M (Smaragdgrün) peaking at 530 nm; ~ 33% (2:1)  
 S (Blauviolett) peaking at 420 nm; ~ 2%  
 L:M ratio varies from 76:20% to 51:44% (~4:1) to (~1:1)



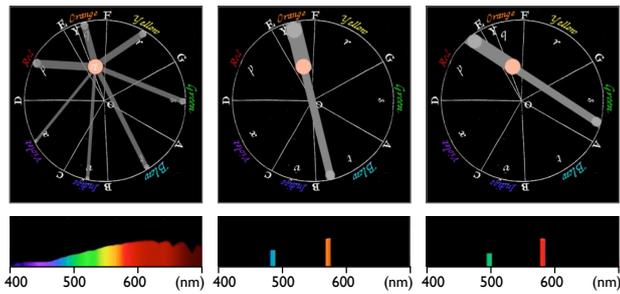
64      Der englische Physiker Sir Isaac Newton (1643–1727) entdeckte mit Hilfe eines Glasprismas, dass verschiedene Farben im Tageslichtspektrum Bestandteile des weissen Lichtes sind. Er war davon überzeugt, dass Licht- und Schallausbreitung vergleichbar und übereinstimmend zu behandeln sind. Weil eine Oktave sieben Tonintervalle zeigt, formte er seinen **Farbkreis** (1704 veröffentlicht) aus sieben Farben: **Violett, Indigo, Blau, Grün, Gelb, Orange und Rot**. Bei der Größe der sieben Segmente orientierte er sich an den Intervallgrößen einer dorischen Tonleiter.



65      Newton operiert mit 7 Grundfarben

## eine Farbe - verschiedene Spektren

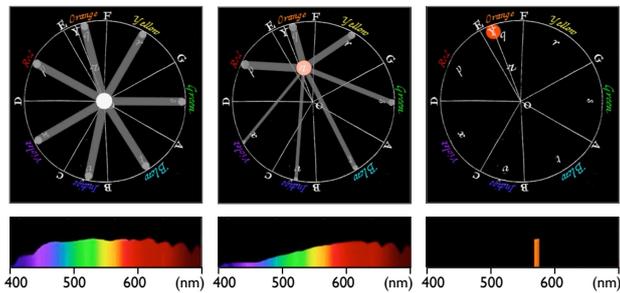
66



Verschiedene Formen von Ungleichgewicht.  
Jede Farbe kann verschieden zusammengesetzt sein.  
Dabei kann das Spektrum kontinuierlich oder  
aus Spektrallinien zusammengesetzt sein.

## Gleichgewicht - Ungleichgewicht

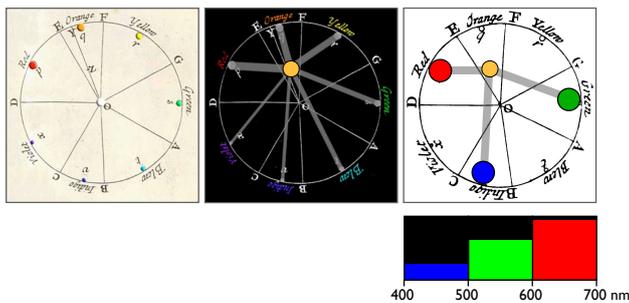
67



Im Zentrum herrscht Gleichgewicht, es ist unbunt (die Farbe ist weiss)  
Je näher am Rand, desto gesättigter (leuchtender, kräftiger) ist die Farbe,  
je näher am Zentrum, desto ungesättigter (verweisslichter) ist sie.

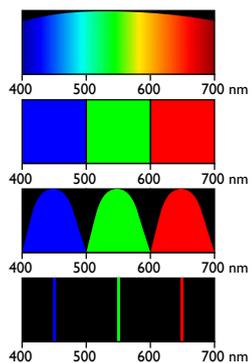
## from Newton to RGB

68

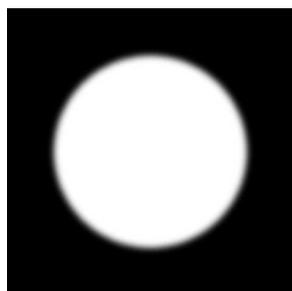


## weiss

69

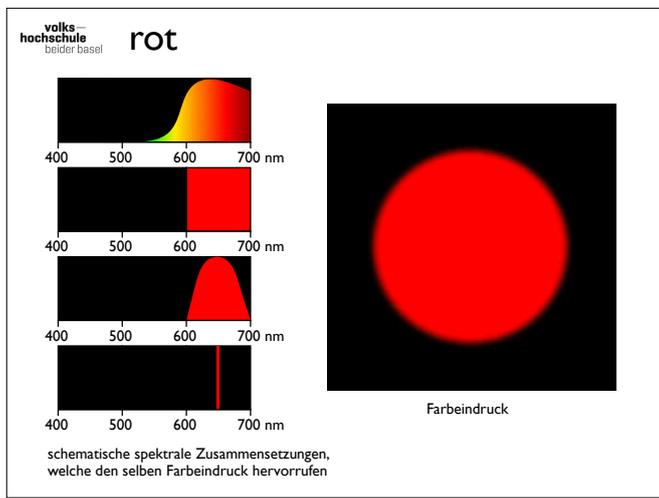


schematische spektrale Zusammensetzungen,  
welche den selben Farbeindruck hervorrufen

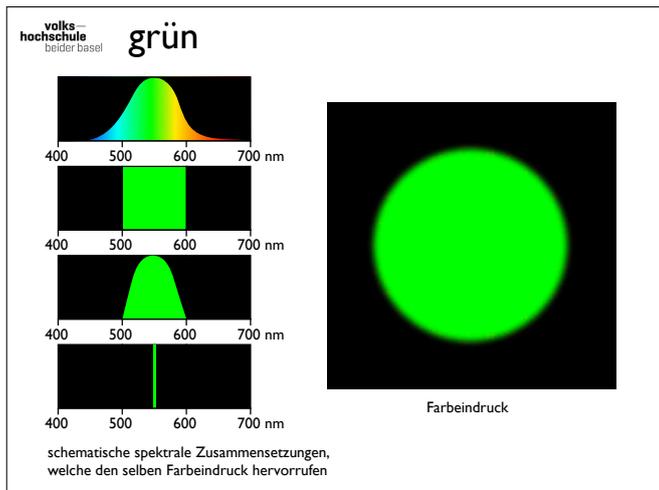


Farbeindruck

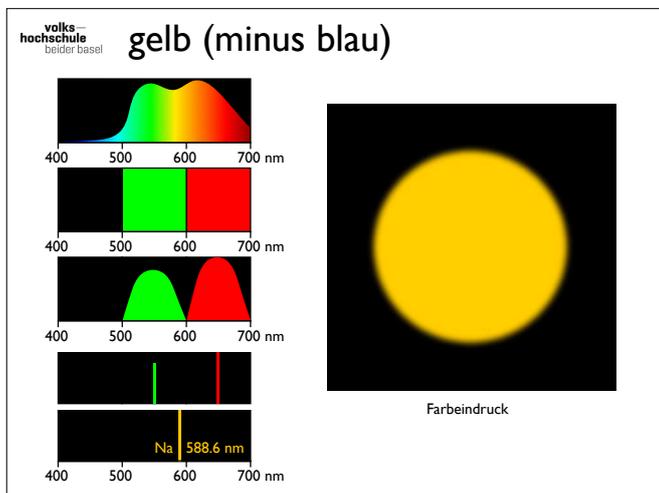
Obwohl die Zapfenmaxima bei 420 (B), 530 (G), 560 (R) liegen,  
und R:G und (R+G):B abgeschätzt wird, können wir vereinfacht so tun als ob das Gleichgewicht zwischen R:G:B entscheiden würde



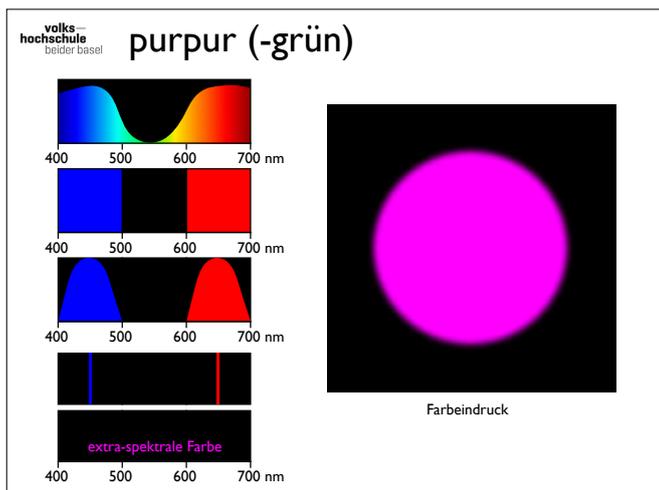
70



71

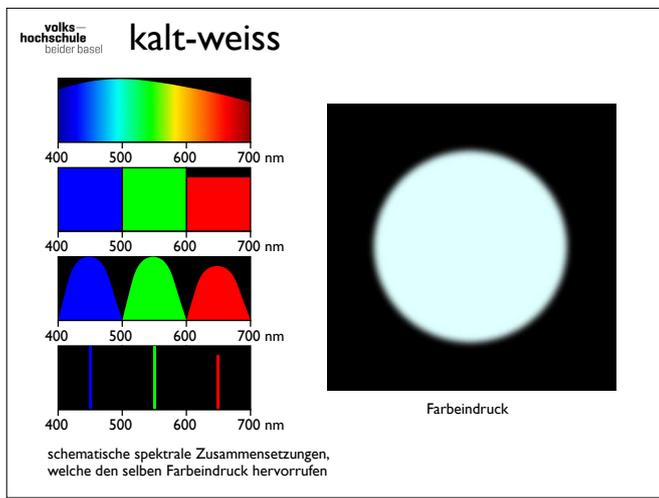


72



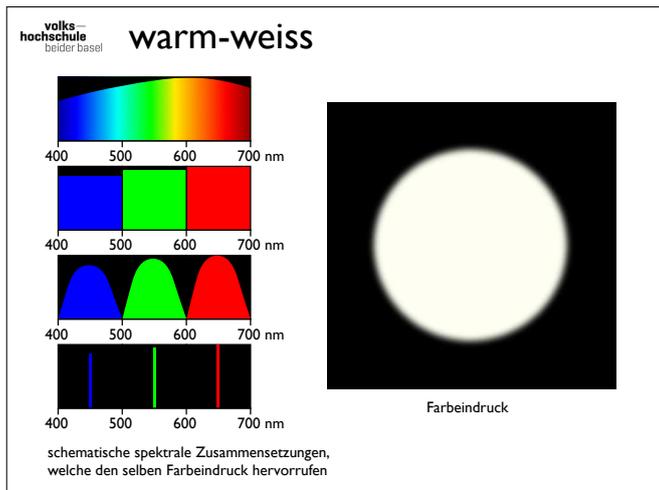
73

Das Spektrum ist linear, erst mit einem Farbkreis kann man Magenta zwischen Rot und Blau legen



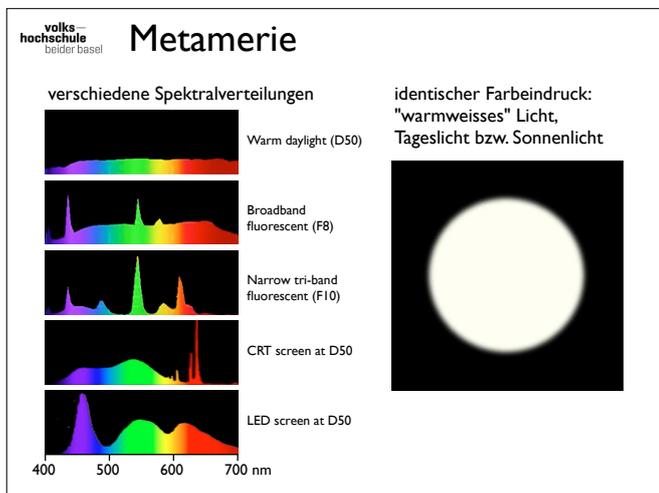
74

Kaltes Weisslicht kommt von schwarzen Strahlern mit höherer Farbtemperatur



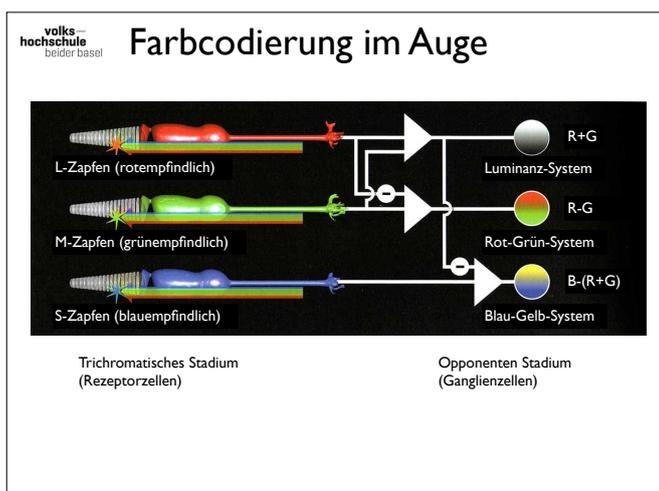
75

Warmes Weisslicht kommt von schwarzen Strahlern mit niedrigerer Farbtemperatur



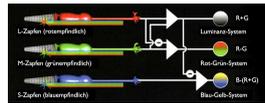
76

**Das hier ist SUPER wichtig!** Ohne Metamerie wär's nichts mit Malen, Drucken, Photographieren usw. - Ohne die Fähigkeit zur Metamerie müssten wir Augen mit spektralanalytischen Eigenschaften haben... 300 oder noch mehr verschiedenen Zapfen !?



77

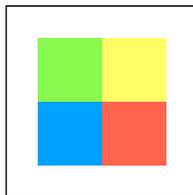
## Farbcodierung im Auge



78

Der Rot-Grün Kontrast wird hier als Magenta-Grün Kontrast dargestellt.

## Gegenfarbe im Auge



79

Erst ca. 20 Sekunden auf die vier Quadrate schauen, dann auf weissen Hintergrund: die Gegenfarben erscheinen.

80

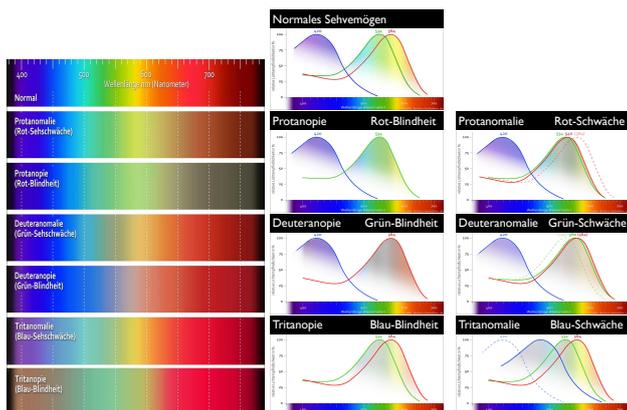
Hier geht darum zu zeigen, dass der Weg vom Stimulus zur Farbempfindung nicht immer so funktioniert, wie wir uns das gerne vorstellen.

7. Szene:  
was wir sehen  
... und was nicht

81

Prot ... Erster Zapfentyp für Rot-Sehen  
Deuter ... Zweiter Zapfentyp für Grün-Sehen  
Trit ... Dritter Zapfentyp für Blau-Sehen

## Farbenblindheit



## Farbenblindheit



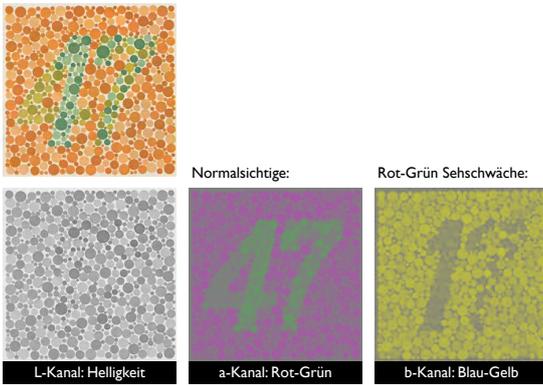
weitere Beispiele: <https://www.eyebizz.de/augengesundheit/die-welt-in-anderen-farben-sehen/>

Typ	Bezeichnung	Ursache	Männer (%)	Frauen (%)
Farbenblindheit	Achroma(top)sie	keine Zapfen	0.003	0.003
Rotblindheit	Protanopie	keine L- Zapfen	1.000	0.010
Rotsehschwäche	Protanomalie	degenerierte L-Zapfen	1.000	0.030
Grünblindheit	Deutanopie	keine M-Zapfen	1.000	0.010
Grünsehschwäche	Deuteranomalie	degenerierte M-Zapfen	5.000	0.350
Blaublindheit	Tritanopie	keine S-Zapfen	0.005	0.005
Blausehschwäche	Tritanomalie	degenerierte S-Zapfen	0.005	0.005

82

<https://www.eyebizz.de/augengesundheit/die-welt-in-anderen-farben-sehen/>

## Ishihara Testbilder



83

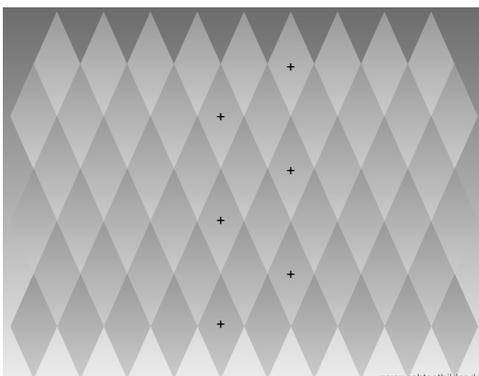
Was sehen Sie?  
Sehen alle alles?

## Farbkonstanz



84

## Simultankontrast

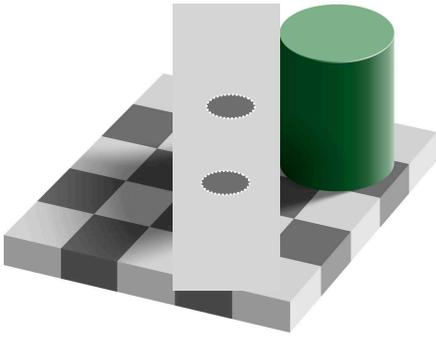


<https://www.sehtestbilder.de/optische-taeschungen-illusionen/>

85

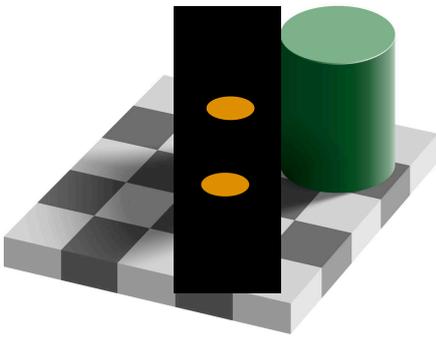
## Simultankontrast

86



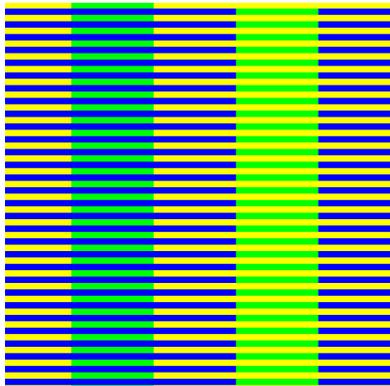
## Simultankontrast

87



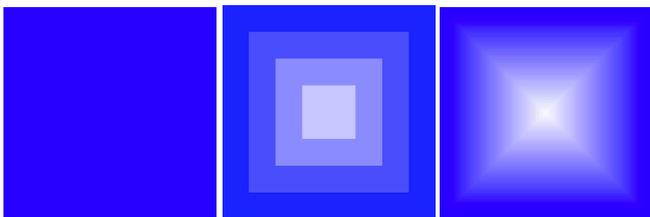
## Munker Täuschung

88



## Pyramiden Täuschung

89



1 ...

... 4 ... 8 ... 16 ... 32 ...

... 64

Quadrate von konstanter Farbe

## Sukzessivkontrast (Nachbild)

90

Gut 20 Sekunden auf das linke Auge starren, dann auf einen weissen Hintergrund: Ada Lovelace erscheint!



## Zusammenfassung Licht

91

- Farbe ist keine physikalische Eigenschaft, Farbe existiert nur in unserem Kopf.
- Sonnenlicht entspricht der Strahlung eines schwarzen Körpers bei 5500°C
- Bevorzugte Streuung des kurzwelligen Lichtes in der Atmosphäre lässt den Himmel blau erscheinen
- Brechung und Spiegelung in Regentropfen führt zur Bildung von Regenbogen: diese erscheinen mit einem fixen Öffnungswinkel von 42°, innen blau aussen rot.
- Absorption modifiziert das einfallende Licht: Objekte erscheinen farbig
- Beugung und Interferenz führen zu Koronabildung, zu Schillerfarben und zu den Auslöschungsfarben dünner Schichten

## Zusammenfassung Farbsehen

92

- Der Mensch ist ein Trichromat: S-Zapfen registrieren kurze, M-Zapfen mittlere und L-Zapfen längere Wellenlängen
- Die Netzhaut (Retina) enthält ~130 Mio Rezeptoren: ~125 Mio. Stäbchen für das Nachtsehen und ~6 Mio. Zapfen für das Tagsehen
- In der Retina findet ein Pre-processing statt: die Antworten der drei Zapfentypen werden zu (1) Luminanz, (2) Rot-Grün-Kontrast und (3) Gelb-Blau-Kontrast zusammengeschaltet
- Im visuellen Cortex werden diese Signale zur Farbbeimpfindung weiterverarbeitet
- Farbe entsteht erst in unseren Köpfen