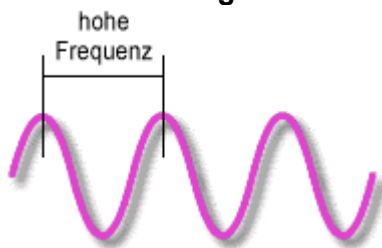


Licht und Farben

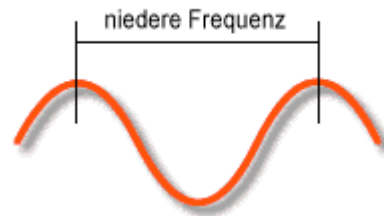
4. Das Licht als Welle

Was ist Licht? Das Licht führt sich zum Teil auf wie ein **Teilchen**, nämlich wenn wir es als Strom von Photonen interpretieren. Vieles ist aber nur erklärbar, wenn man Licht als **Welle** auffasst. Dies nennt man den **Welle-Teilchen-Dualismus** einer Strahlung (z.B. des Lichts). Licht, Wärme, Radiowellen, radioaktive Strahlung: All das sind **elektromagnetische Wellen**. Sie unterscheiden sich voneinander nur durch ihre Wellenlänge bzw. ihre Frequenz (Anzahl Schwingungen pro Sekunde). Die Frequenz wird in Hertz (Hz) angegeben. Die Wellenlänge ist die Distanz von einer Welle zur nächsten in Metern (bei Licht liegt sie im Nanometer-Bereich, (**nm** = Millionstel-Millimeter). Die Frequenz hat aber grossen Einfluss auf das Verhalten dieser Strahlung.

Violett schwingt schneller,
seine Frequenz ist höher,
seine **Wellenlänge ist kleiner**.



Rot schwingt langsamer,
seine Frequenz ist tiefer,
seine **Wellenlänge ist grösser**.



Es gibt **Materie-Wellen** (z.B. Wasserwellen oder Seilwellen)

Elektromagnetische Wellen (z.B. das Licht) sind **nicht an ein Medium** gebunden und breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus (dies aber streng genommen nur im Vakuum). Die **Lichtgeschwindigkeit c** beträgt im Vakuum rund

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad (= 300'000 \text{ km/s})$$

(Zum Vergleich: Die Schallgeschwindigkeit in Luft beträgt rund 330 m/s)

Das Farbspektrum des weissen Lichts



Spektrum des sichtbaren Lichts:
Weisses Licht setzt sich aus vielen
Einzelfarben zusammen.

Es reicht von Infrarot bis Ultraviolett. Es kommt aber nicht alle Farben vor, wie wir sie kennen: Braun, olivgrün oder pink kommen nicht vor.

Warum ist etwas farbig?

Physikalisch gesehen ist unsere Welt "farblos". Alle Objekte haben unterschiedliche Oberflächen, die bestimmte Anteile des Lichts, welches auf sie fällt, verschlucken (absorbieren) oder reflektieren (zurückwerfen). Das, was mehrheitlich reflektiert wird, bewirkt in unserem Auge (oder auf einem Fotofilm) einen bestimmten Farbeindruck.

Warum ist der Himmel blau?

Suche Antworten im Internet: Youtube, Wikipedia, ...

Siehe auch die Phänomene **Streuung** und **Filterwirkung**.

Das gesamte elektromagnetische Spektrum

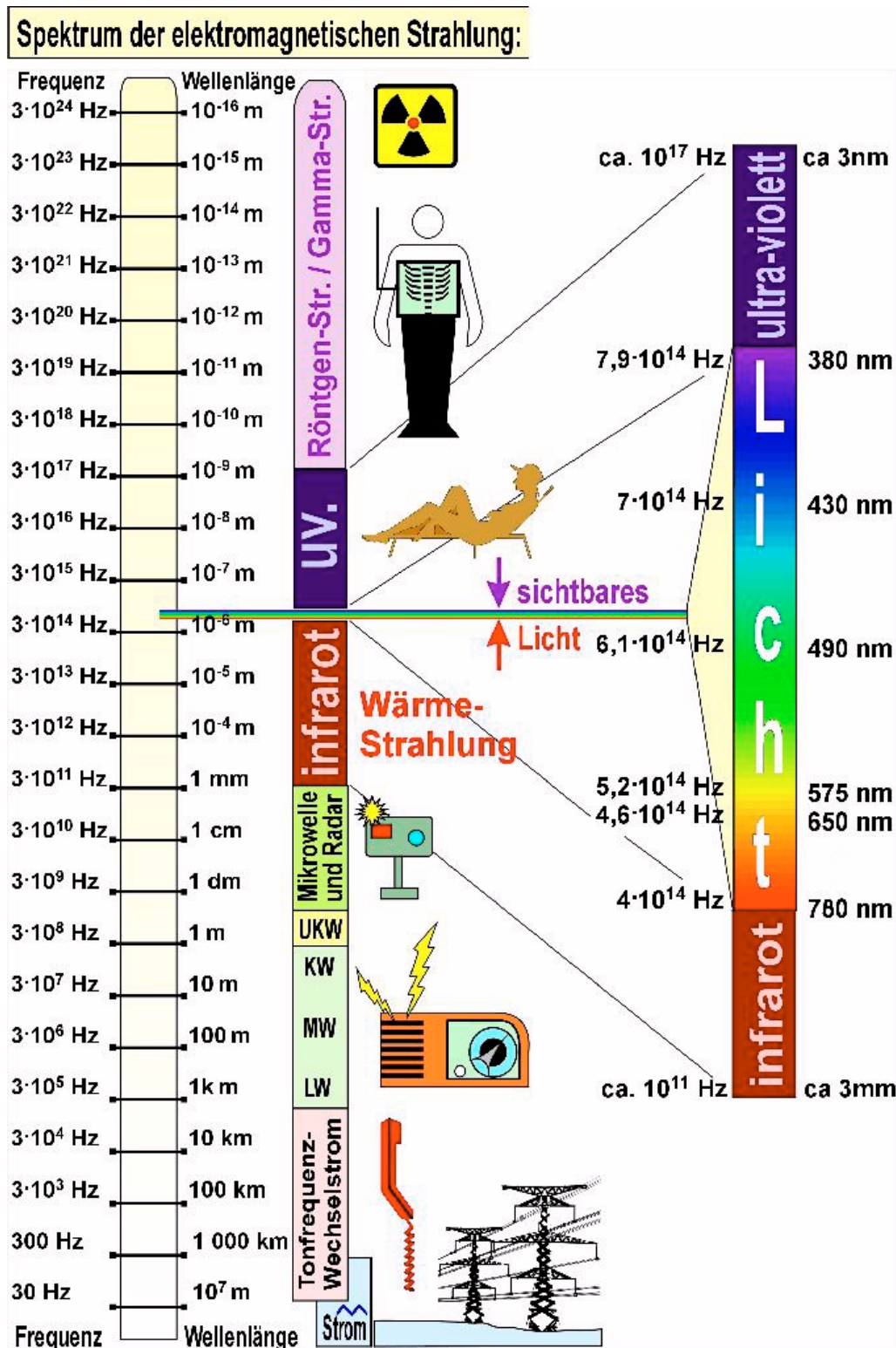
Unser sichtbares Licht ist ein winziger Ausschnitt aus diesem ganzen Spektrum.

Es liegt bei Wellenlängen von ca. 380nm bis ca. 780 nm.

Für jede Welle (auch Wasserwellen) gilt folgendes Gesetz:

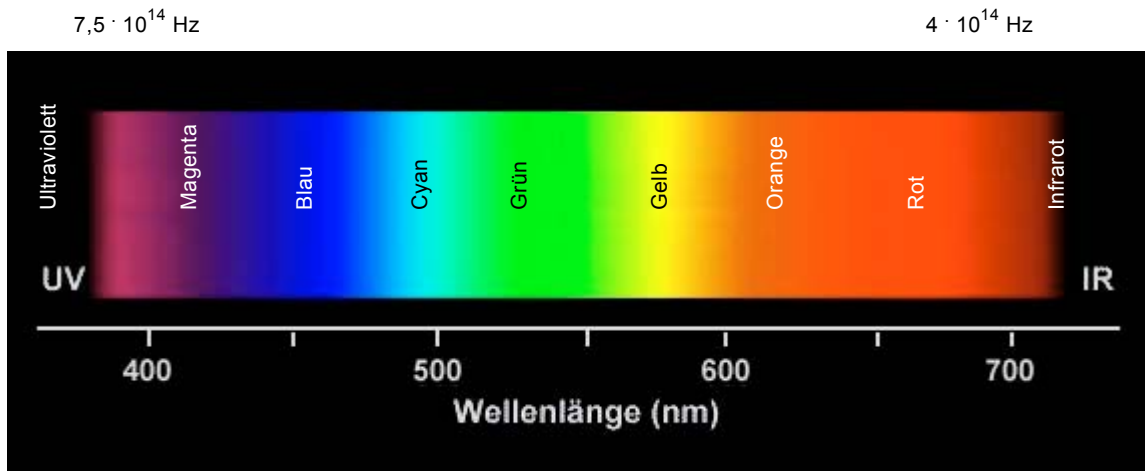
Wellenlänge λ ("Lambda") mal Frequenz f gibt die Ausbreitungsgeschwindigkeit v , hier also die Lichtgeschwindigkeit c :

Also lautet die Umrechnung bei der Lichtgeschwindigkeit: $f = \frac{c}{\lambda}$ $\lambda = \frac{c}{f}$



Das Spektrum des sichtbaren Lichts

Hier noch genauer der Ausschnitt aus der vorherigen Grafik:



Lichtgeschwindigkeit c , Frequenz f und Wellenlänge λ

Die elektromagnetischen Wellen breiten sich im Vakuum mit einer Geschwindigkeit von 300'000 km/s aus. Die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde heisst Frequenz, sie wird in Hertz Hz gemessen. Von einem Wellenberg zum nächsten besteht also ein bestimmter Abstand. Diese Weglänge heisst **Wellenlänge λ** („Lambda“)

Für **jede Welle** gilt folgendes Gesetz:

Wellenlänge λ („Lambda“) mal Frequenz f gibt die Ausbreitungsgeschwindigkeit v , hier also die Lichtgeschwindigkeit c :

$$c = \lambda \cdot f$$

c = Lichtgeschwindigkeit 300'000 km/s = $3 \cdot 10^8$ m/s
 λ = Wellenlänge in m
 f = Frequenz in Hz

Beispiel

Wie gross ist die Frequenz von grünem Licht, dessen Wellenlänge 550nm (nanoMeter) beträgt?

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m}}{0,55 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}} = 5,45 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Diese Zahlen sind für uns kaum vorstellbar. Versuchen wir es trotzdem: In 1 Sekunde legt das Licht durch den Raum eine Strecke zurück, die 7,5 mal dem Erdumfang entspricht. Und bei dieser Geschwindigkeit ändert es seine „Polarität“ etwa 2000 Mal pro Millimeter. Trifft es dabei auf unser Auge, so sehen wir diese Welle als "grün". Würde sie aber "nur" 1300 Mal pro Millimeter die Polarität ändern, so würde sie als "rot" von uns wahrgenommen.

Übungen 1 + 2

Bestimmen Sie anhand des Bilds oben die Frequenz von blauem und gelbem Licht.

$$f_{bl} =$$

$$f_{ge} =$$

Lichtgeschwindigkeit in anderen Medien:

Die Lichtgeschwindigkeit wird mit dem kleinen Buchstaben **c** als Formelzeichen angegeben. **c** gibt die Lichtgeschwindigkeit im **Vakuum**, also im luftleeren Raum an. Für unsere Betrachtungen gilt diese Geschwindigkeit auch in **Luft** und anderen Gasen, da die Geschwindigkeit nur wenig kleiner ist.

Breitet sich das Licht aber in einem dichteren Medium wie Glas, Wasser, Diamant oder Glasfasern (Lichtwellenleitern, LWL) aus, so ist die Geschwindigkeit des Lichts im Medium wesentlich kleiner. Beim Austritt an die Luft erreicht das Licht wieder die „normale“

Geschwindigkeit von $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

Der Zusammenhang zwischen f und λ gilt auch in langsameren Medien genau gleich, er ergibt immer die Ausbreitungsgeschwindigkeit. In „langsameren“ Medien verwendet man aber nicht mehr c , sondern v (wie allgemein in der Physik für Geschwindigkeit):

$$v = \lambda \cdot f \qquad \lambda = \frac{v}{f} \qquad f = \frac{v}{\lambda}$$

Einige Lichtgeschwindigkeiten:

Material	Geschwindigkeit des Lichts (rund)
Vakuum Gase, Luft	$3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
Wasser	$2.25 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
Alkohol	$2.21 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
Glas	$1.875 - 2.14 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
Glimmer	$1.90 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
Diamant	$1.24 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Beispiel

Wie gross ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtstrahls in einem Glaskörper, wenn die Frequenz $f = 5,65 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ bei einer Wellenlänge von $\lambda = 373 \text{ nm}$ beträgt?

Lösung: $v = 2,107 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Übung 2

Die Lichtgeschwindigkeit im Diamant beträgt $v = 1,24 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Wie gross ist die Wellenlänge des Lichts einer Frequenz $f = 4,2 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$?

Welcher Farbe entspricht diese Wellenlänge ?

Übung 3

Welche Frequenz besitzt ein Lichtstrahl in einem LWL, wenn die Geschwindigkeit $v = 2,04 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ und die Wellenlänge $\lambda = 615 \text{ nm}$ beträgt ?

Übung 4

Mit welcher Geschwindigkeit durchläuft ein Lichtstrahl mit $f = 5,8 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ einen LWL, wenn die Wellenlänge des Lichts $\lambda = 323 \text{ nm}$ beträgt ?

Übung 5

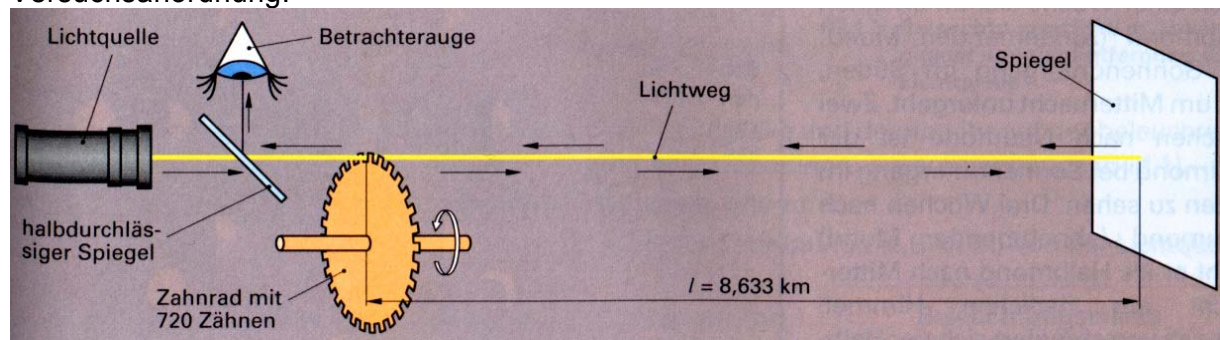
In welchem optischen Medium ist ein Lichtstrahl mit $\lambda = 456 \text{ nm}$ und $f = 6,575 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$?

Messung der Lichtgeschwindigkeit

Die Lichtgeschwindigkeit beträgt im Vakuum $2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Gerundet rechnen wir immer mit

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{oder} \quad 300'000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

Da die Lichtgeschwindigkeit für unser Auge viel zu gross ist, als dass wir sie irgendwie messen könnten, benötigen wir technische Hilfsmittel, um sie zu bestimmen. Eine erste experimentelle Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit gelang dem französischen Physiker Armand Hyppolite Fizeau (1819 – 1896) im Jahre 1849. Er benutzte die folgende Versuchsanordnung.






Das Licht der Lichtquelle geht durch den halbdurchlässigen Spiegel und einer Zahnradlücke des stehenden Zahnrads bis zum 8,633 km entfernten Spiegel. Von diesem Spiegel wird es reflektiert und gelangt durch dieselbe Lücke über den halbdurchlässigen Spiegel bis zum Betrachteauge. Beginnt sich das Zahnrad zu drehen, so geht der Lichtstrahl durch die Zahnradlücke zum Spiegel und wird reflektiert. Kommt er wieder zum Zahnrad, so hat sich die Zahnradlücke in der Zwischenzeit etwas gedreht, der Strahl trifft nun teilweise auf den Zahn und wird dunkler. Der Beobachter kann das sehen. Bei einer bestimmten Drehzahl, nämlich bei 12,6 Umdrehungen pro Sekunde, geht der Strahl durch die Zahnradlücke zum Spiegel, aber der reflektierte Strahl trifft vollständig auf den Zahn. Der Betrachter sieht kein Licht mehr. Aus der Umdrehungszahl des Zahnrades, der Zahnzahl und der Distanz bis zum Spiegel kann die Lichtgeschwindigkeit bestimmt werden.

Übung 6

Welchen Wert der Lichtgeschwindigkeit hat Fizeau beim obigen Versuch erhalten?

Farbmischungen

So wie aus weissem Licht Spektralfarben entstehen, so können wir auch umgekehrt aus farbigen Lichtquellenteilen weisses Licht erzeugen. Dazu braucht es nur die richtigen Grundfarben rot, grün und blau (RGB), um wieder weisses Licht zu erzeugen. Im Malkasten braucht man aber andere Farben zum Mischen.

Additive Farbmischung	Subtraktive Farbmischung
<p>(additiv=zusätzlich, Mischfarben entstehen durch Zusammenführen von Grundfarben)</p> <p>RGB-Farbmodell: 3 farbige Lichtquellen mit rot, grün und blau übereinanderprojiziert ergeben weisses Licht.</p> <p>Bei der additiven Farbmischung RGB entsteht aus der Summe der Grundfarben Weiss. Die Farben, die der Mensch wahrnehmen kann lassen sich durch entsprechende Rot-, Grün- und Blauanteile beschreiben – ein sattes Orange hat 100% Rotanteil, 50% Grün und kein Blau.</p> 	<p>(subtraktiv = abzüglich, Mischfarben entstehen durch Herausfiltern von Grundfarben)</p> <p>CMY-Farbmodell: Die 3 Grundfarben cyan [türkisblau], magenta[-rot] und yellow (gelb) gemischt ergeben zusammen schwarze Farbe.</p> <p>Um die Helligkeit der Farben besser steuern zu können, verwendet man zusätzlich Schwarz (black/K) in verschiedenen Grautönen. Dieses Modell heisst dann CMYK. Es kommt z. B. bei Farbdruckern zum Einsatz.</p> 
<p>Anwendung: TV- & PC-Bildschirme, Beamer</p>  <p>Werden nicht alle drei sondern jeweils nur 2 der Grundfarben additiv gemischt, ergeben sich die Grundfarben aus dem subtraktiven Modell rechts, nämlich Gelb (R+G), Purpur (R+B) und Blaugrün (G+B).</p>	<p>Anwendung: Malkasten, Drucker (die Patronenfarben)</p> <p>Das CMY(K)-Modell hat per Definition der Grundfarben einen kleineren Farbraum als das RGB-Modell, kann also bestimmte Farbtöne gar nicht beschreiben. Daraus entstehen viele der Probleme beim Farbdruck vom PC. Deshalb sieht ein Ausdruck nicht immer so aus wie am Bildschirm. Ausserdem gibt es noch einige weitere Farbmodelle.</p> <p>Werden nicht alle drei, sondern jeweils nur 2 der Grundfarben subtraktiv gemischt, ergeben sich die Grundfarben aus dem additiven Modell links.</p>

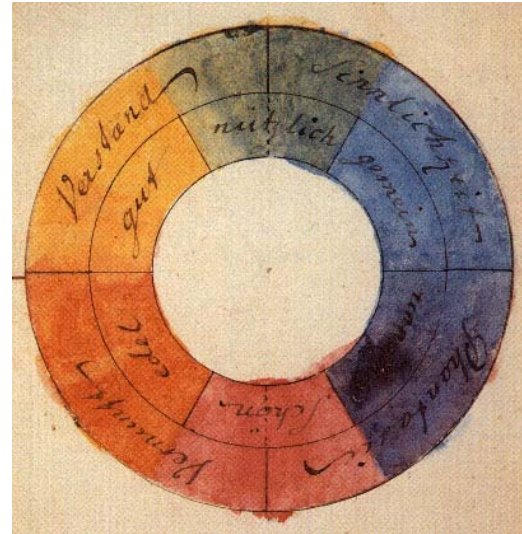
Der Farbkreis

Es gibt diverse unterschiedliche Farbtheorien, begonnen bei Goethe (rechts) über Itten und andere. Diese sind im wesentlichen psychologisch bestimmt. Und sehr interessant!

Newton und andere haben sich aus physikalischer Sicht damit befasst. Sie alle bemühten sich um eine Systematik der Farben, um eine Farbenlehre.

So gibt es auch verschiedene Darstellungen des Farbkreises:

Farbkreis nach Goethe:



Welches Farbmodell stimmt?

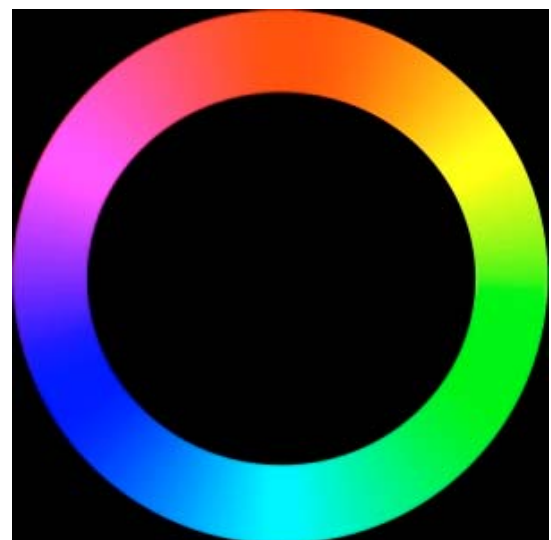
In der Wirklichkeit, der Welt, die uns umgibt, spielt die subtraktive Farbmischung nach dem CMY-Modell die Hauptrolle. Denn der Farbeindruck eines Gegenstandes entsteht im Wesentlichen dadurch, welche Anteile des weissen Lichts von der angeleuchteten Fläche verschluckt (absorbiert) werden und welche nicht. In der elektronischen Bild-Wiedergabe (selbstleuchtende Farbquellen) und im menschlichen Auge ist dagegen die additive Farbmischung (RGB-Modell) von großer Bedeutung (etwa bei Computermonitor oder Fernseher).

Die als harmonisch empfundene Farbenfolge im Ring der "reinen" Farben entspricht genau der Farbenfolge im Spektrum des weissen Lichts. Im Farbring erkennen wir sowohl die RGB-Grundfarben wie auch die CMY-Grundfarben.



Hier im (physikalischen) Spektrum fehlt aber die Farbe Magenta, die zwischen blau und rot läge. Magenta ist also eine reine Mischfarbe und kein Bestandteil des weissen Lichts. Auch braun oder olivgrün und viele andere kommen nicht vor!

Farbkreis nach Johannes Itten (1961)



Hier ist folgendes erkennbar:

Primärfarben: Gelb, Rot, Blau.

Sekundärfarben: Orange, Violett, Grün
(Ergeben sich aus dem Mischen der Primärfarben).

Durch das Mischen der Sekundärfarben wird der Farbkreis ergänzt. (Rotviolett, Gelbgrün usw.)

Was kann man aus dem Farbkreis noch erkennen?

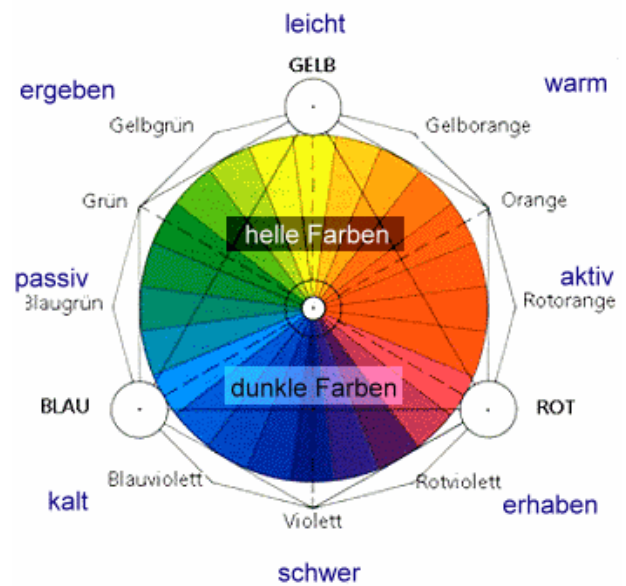
1) Er teilt sich in eine warme und eine kalte Hälfte:

- von gelb nach rechts = warme Farben
- violett = neutral
- von violett aufsteigend = kalte Farben

2) Komplementärfarben (Gegenfarben) liegen im Farbkreis einander gegenüber:

Das Gleichseitige Dreieck zeigt die Harmonie von drei Farben

Kombination des Farbsystems aus Farbordnung (nach Johannes Itten) und dem Farbkreis (nach Prof. Bitsch)



Komplementärfarben

Jede Farbe des Farbspektrum besitzt ein Gegenstück, die sogenannte Komplementärfarbe (komplementär = ergänzend). Komplementärfarben **ergänzen** sich bei der additiven Farbmischung **zum Farbeindruck Weiss** (bzw. zu einem sehr hellen Grau).

Die Spektralfarben lassen sich bekanntlich wieder zu weiss mischen.

Wenn man vor dem Mischen eine Wellenlänge herausfiltert, so ergibt sich nicht weiss, sondern die Komplementärfarbe der herausgefilterten Farbe. Die Herausgefilterte und ihre Komplementärfarbe ergeben dann zusammen aber wieder weiss.

Komplementärfarben liegen sich in allen Farbkreisen gegenüber.

Bilden drei Farben des Farbkreises die Ecken eines gleichseitigen Dreiecks (vgl. nebenstehende Abbildung), so ergibt deren additive Farbmischung Weiss (RGB oder auch CMY).*



Eine jede Farbe des Farbkreises ist die additive Mischfarbe der beiden benachbarten Farben.

Werden die Farben in einem Farbkreis bzw. einem Farbensechseck angeordnet, finden sich die jeweiligen Komplementär- oder Gegenfarben auf der gegenüberliegenden Seite.

Eine Farbe und ihre Komplementärfarbe ergeben additiv gemischt weiss.

Lösungen

Übung 1

$$f_b = \frac{c}{\lambda_b} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m}}{455 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}} = 6,59 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$f_{ge} = \frac{c}{\lambda_b} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m}}{580 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}} = 5,17 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Übung 2

Die Lichtgeschwindigkeit im Diamant beträgt $v = 1,24 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Wie gross ist die Wellenlänge des Lichts einer Frequenz $f = 4,2 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$?

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1,24 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{4,2 \cdot 10^{14} \text{ Hz}} = 295,2381 \cdot 10^{-9} \text{ m} = \underline{\underline{295 \text{ nm}}}$$

Welcher Farbe entspricht diese Wellenlänge?

Die Farbe liegt oberhalb des für unser Auge sichtbaren Bereiches, d.h. im Ultraviolett-Bereich.

Übung 3

Welche Frequenz besitzt ein Lichtstrahl in einem LWL, wenn die Geschwindigkeit $v = 2,04 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ und die Wellenlänge $\lambda = 615 \text{ nm}$ betragen?

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{2,04 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{615 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 3,317 \cdot 10^{14} \text{ Hz} = 331,7 \cdot 10^{12} \text{ Hz} = \underline{\underline{331,7 \text{ THz}}}$$

Übung 4

Mit welcher Geschwindigkeit durchläuft ein Lichtstrahl mit $f = 5,8 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ einen LWL, wenn die Wellenlänge des Lichts $\lambda = 323 \text{ nm}$ beträgt?

$$v = \lambda \cdot f = 323 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot 5,8 \cdot 10^{14} \text{ Hz} = 187,34 \cdot 10^6 \text{ m/s} = \underline{\underline{1,87 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}}$$

Übung 5

In welchem optischen Medium ist ein Lichtstrahl mit $\lambda = 456\text{nm}$ und $f = 6,575 \cdot 10^{14}\text{ Hz}$?

$$v = \lambda \cdot f = 456 \cdot 10^{-9} \cdot 6,575 \cdot 10^{14} = 2,9982 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \hat{=} c$$

Da $v = c$, ist das Medium Vakuum, Luft oder ein Gas.

Übung 6

Gegeben: $\left. \begin{array}{l} 720 \text{ Zähne} \\ 720 \text{ Lücken} \end{array} \right\} 1440 \text{ Schritte}$

$$\text{Drehzahl} \quad n = 12,6 \frac{\text{Umdrehungen}}{\text{s}}$$

$$\text{Strecke} \quad l = 0,633\text{km} \quad \rightarrow \quad s = 2 \cdot l = 1,266\text{km}$$

In 1 Sekunde dreht sich das Zahnrad 12,6-mal.

Für 1 Umdrehung benötigt das Zahnrad 79,4 ms.

Für einen Zahnschritt benötigt das Zahnrad:

$$\frac{1 \text{ Umdrehung}}{1440 \text{ Schritte}} \rightarrow t = 55,1\mu\text{s}$$

Daraus folgt:

$$c = \frac{s}{t} = \frac{1,266\text{km}}{55,1\mu\text{s}} = \underline{\underline{313'274 \frac{\text{km}}{\text{s}}}}$$