

Farbwahrnehmung

- Farbe ist eine Empfindung (color versus paint)
- Im Auge gibt es drei Arten von Zapfen, die Licht in Nervenimpulse umwandeln
- Diese werden in den Ganglienzellen der Retina in Gegenfarben transformiert
- Im Gehirn werden diese Erregungsmuster dann als Farben interpretiert

Farbe aus verschiedenen Sichten

Chemie: Farbstoffe, ...

Kunst und Kultur:
Farbsymbolik, Pointillismus,
color field painting, ...

Physik: Spektrum,
Reflexion, Dispersion, ...



XXX: xxx, ...

Sinnesphysiologie:
Zapfen, farbopponente
Zellen, Farbzentrum, ...

Philosophie:
naiver Realismus vs.
Konstruktivismus,
Qualia, ...

Psychologie:
Simultankontrast,
Gegenfarben,
Emotionen, Farbtest,
Farbtherapie, ...

Farbwahrnehmung: Basiswissen

- Farbe ist eine Empfindung (color versus paint)
- Im Auge gibt es drei Arten von Zapfen, die Licht in Nervenimpulse umwandeln
- Diese werden in den Ganglienzellen der Retina in Gegenfarben transformiert
- Im Gehirn werden diese Erregungsmuster dann als Farben interpretiert

Farbe

Farbe ist keine Eigenschaft der physikalischen Welt, sondern **eine Sinneempfindung (sensation)**.

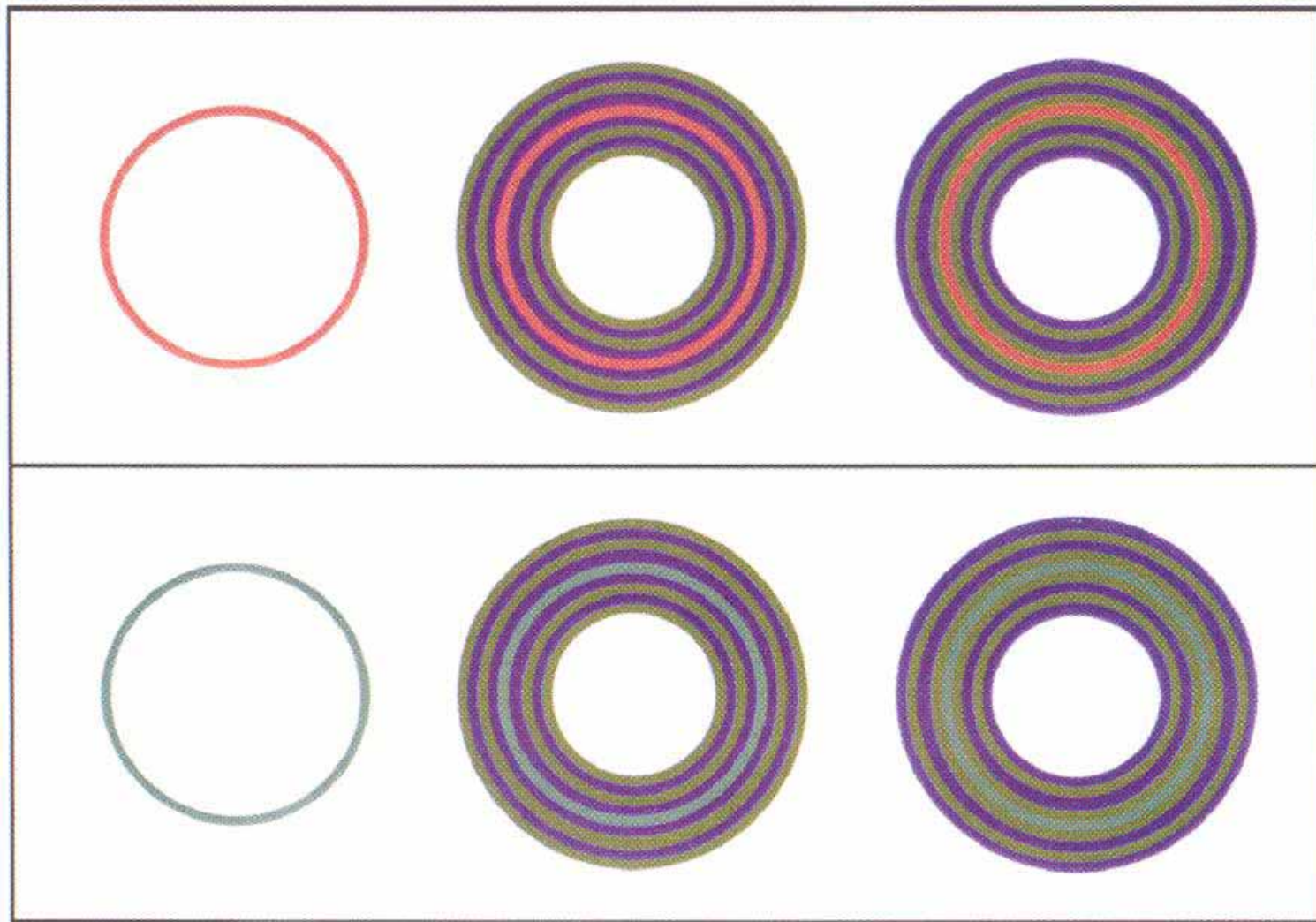
The Rays to speak properly are not coloured. In them there is nothing else than a certain Power and Disposition to stir up a Sensation of this or that Colour.

Opicks, or a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections & Colours of Light.



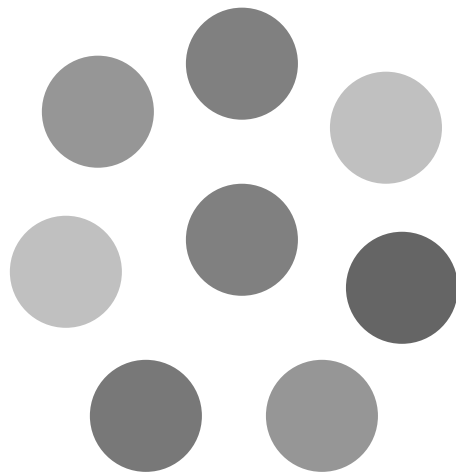
Isaac Newton
(1642–1727)

Farbe ist eine Empfindung

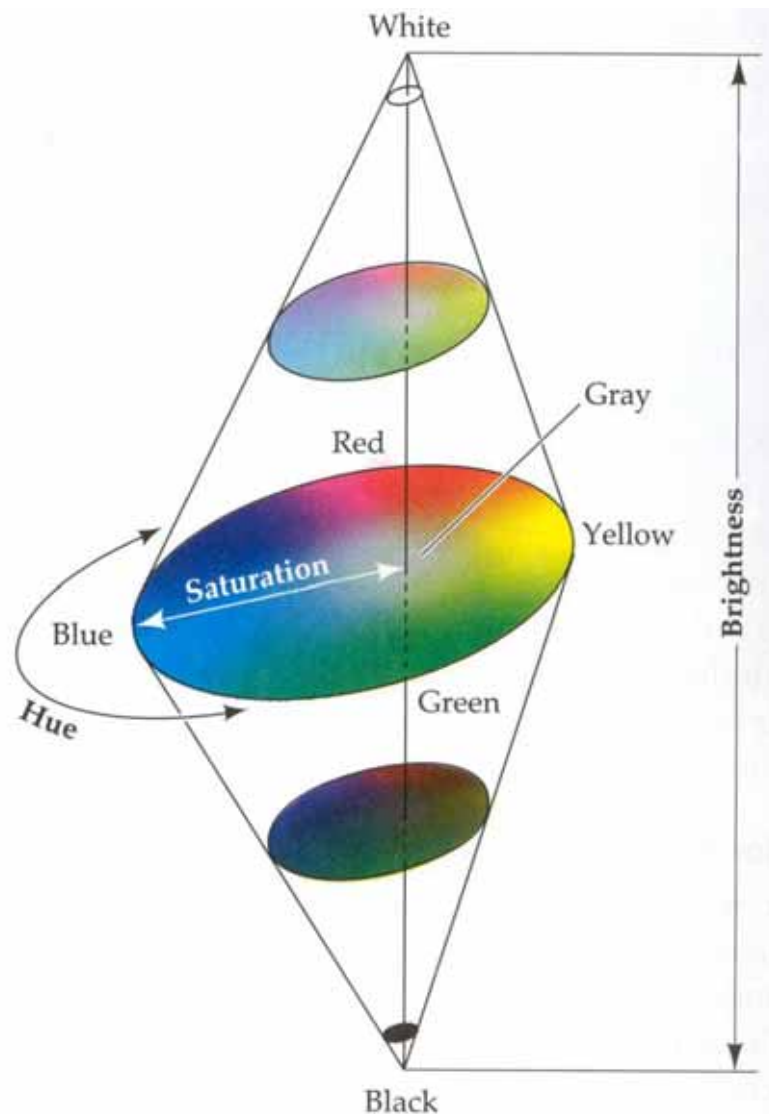


Eine Definition

Farbe ist diejenige Empfindung, die es uns erlaubt, zwei strukturlose Oberflächen gleicher Helligkeit zu unterscheiden.



Farbsehen



- bis zu 7 Millionen Farbvalenzen können unterschieden werden
- über **500 Helligkeitswerte** (brightness)
- über **200 Farbtöne** (hue)
- über **20 Sättigungsstufen** (saturation)

Funktionen der Farbwahrnehmung

Segmentierung: Unterscheiden und Gliedern

Farbe erlaubt die Unterscheidung von Objekten gleicher Textur.



Wo sind hier die Blumen?

Farbe und Segmentierung

Helligkeitsbild



+

isoluminantes Farbbild



=



Farbe und Segmentierung



Funktion der Farbe

- Die meisten Oberflächen besitzen eine Struktur (Textur) – strukturlose Oberflächen sind selten
- Verschiedene Oberflächen weisen meist auch einen Helligkeitsunterschied auf
- Farbe erlaubt eine *schnelle* Unterscheidung verschiedener Objekte vom Hintergrund und voneinander
- Farbe hat oft Signalcharakter (rote Ampel)

Farbe und Gedächtnis



Unsere Erinnerungen sind bunt.

Farbige Bilder werden besser erinnert als dieselben Bilder in schwarz/weiss.



Wichmann, Sharpe und Gegenfurtner. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory & Cognition



Phänomene der Farbwahrnehmung

Farbe und Sehschärfe

geglätteter Farbkanal +
originaler Helligkeitskanal:



geglätteter Helligkeitskanal +
originaler Farbkanal:



Farbe wird mit tiefen Raumfrequenzen verarbeitet.
Die räumliche Auflösung für Farbe ist schlechter als
die für Helligkeit.

Farbe und Sehschärfe

... ein weiteres Beispiel:

Originalbild
zum
Vergleich:

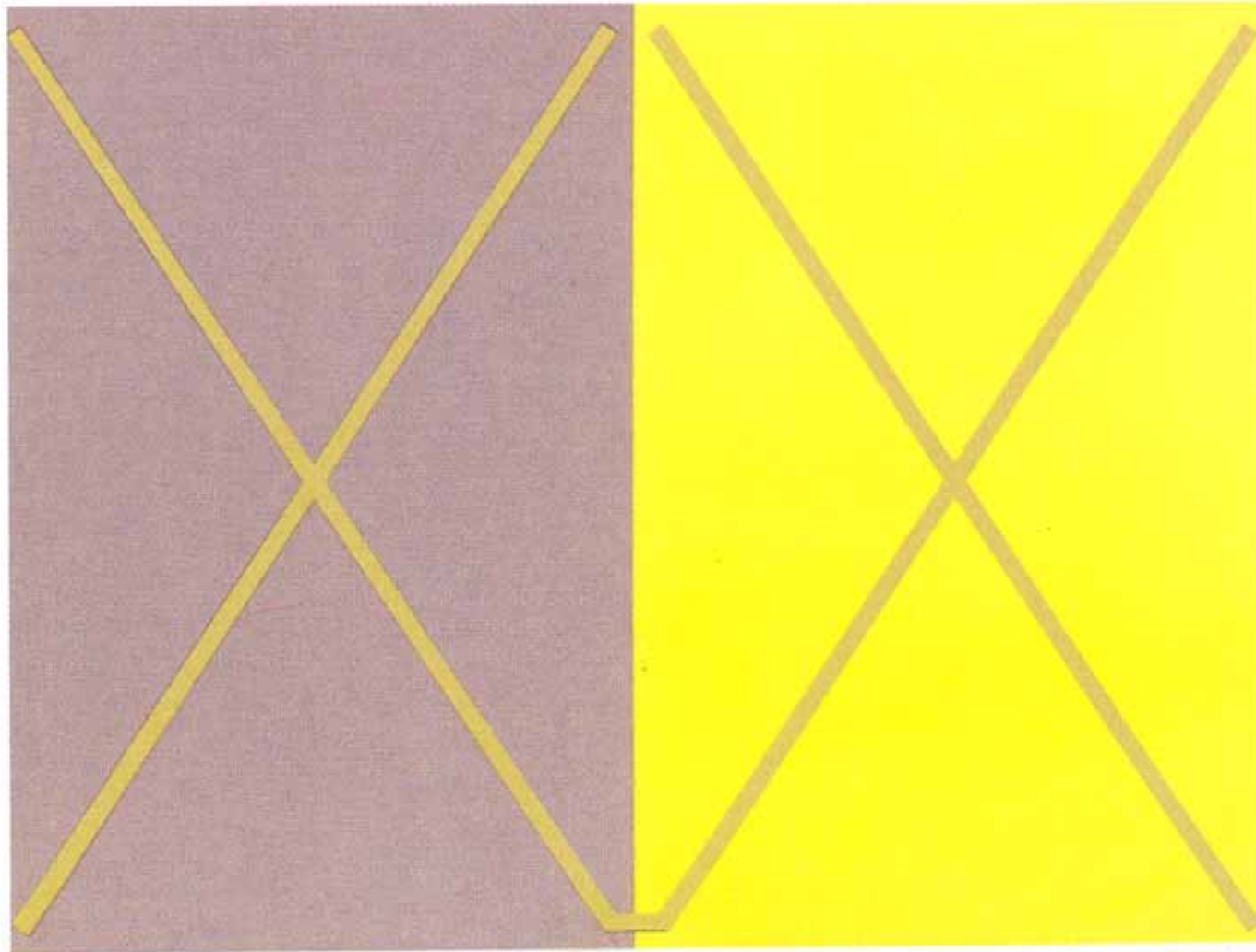


geglätteter Farbkanal +
originaler Helligkeitskanal:

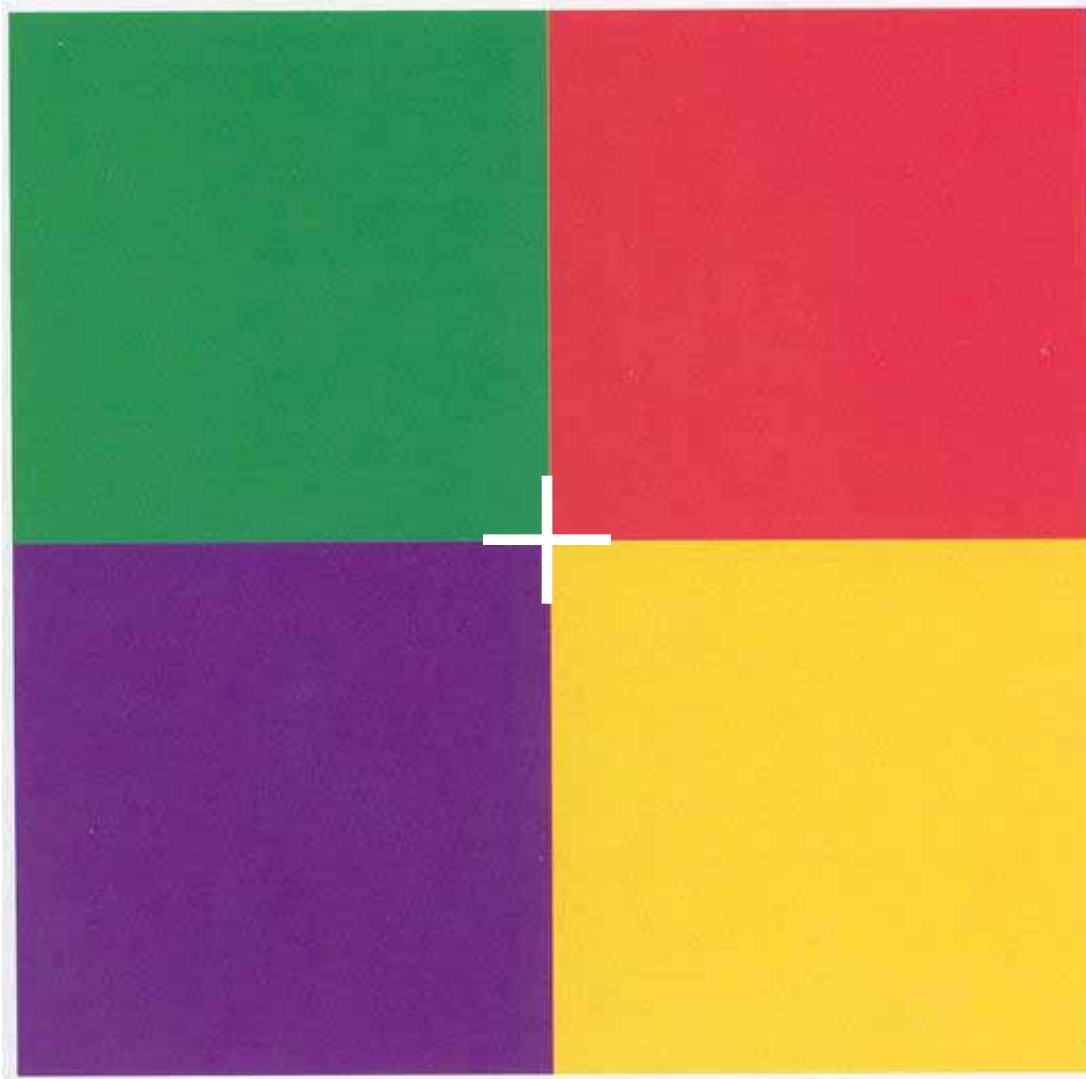
geglätteter Helligkeitskanal +
originaler Farbkanal:

Simultankontrast

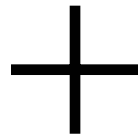
Josef Albers
(1888-1976)



Farbige Nachbilder



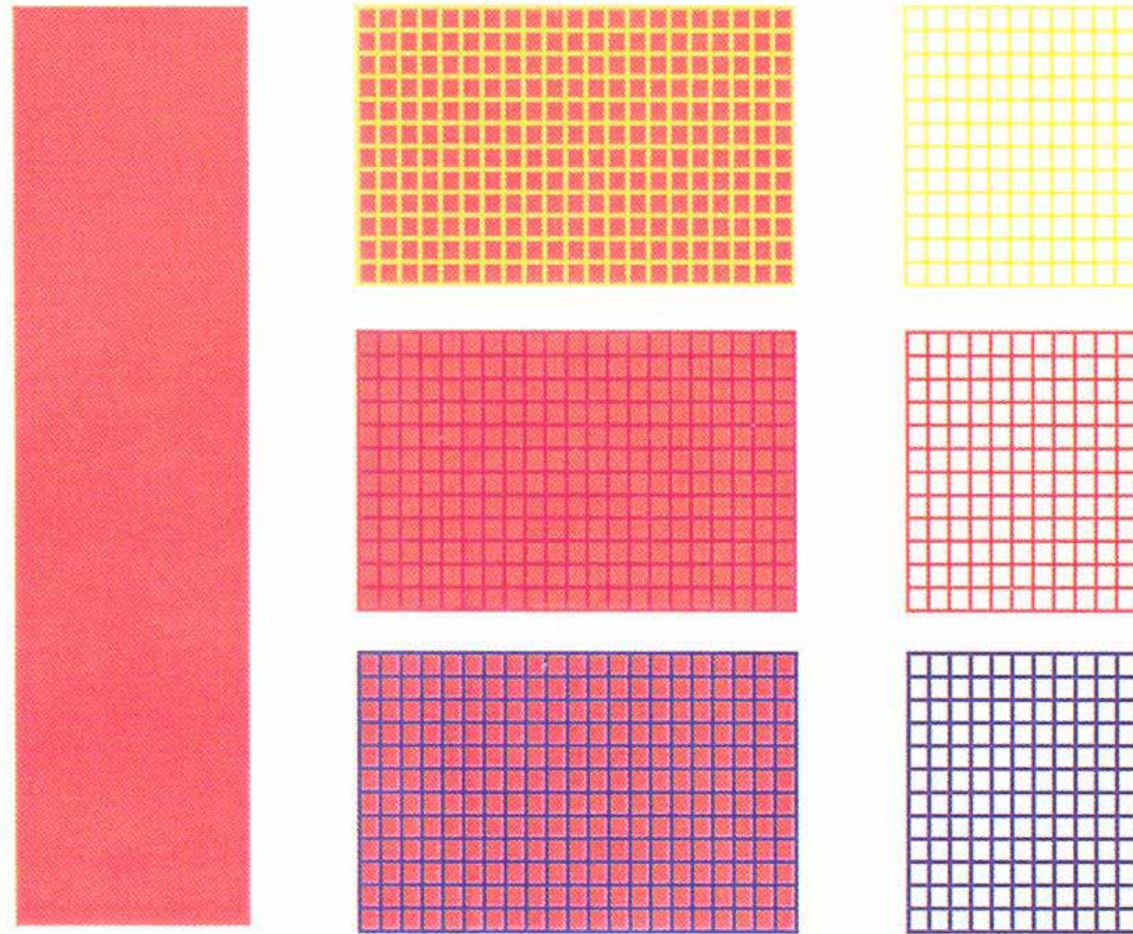
Farbige Nachbilder



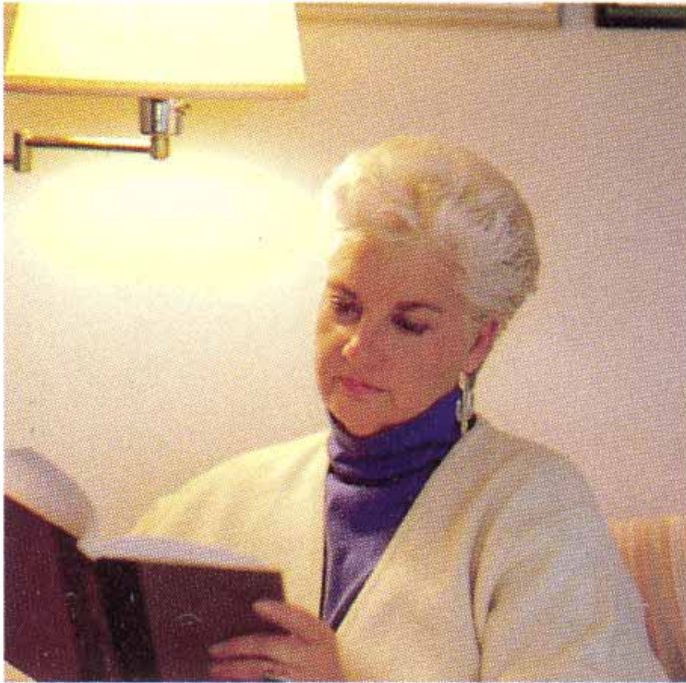
Farbige Nachbilder bei Goethe



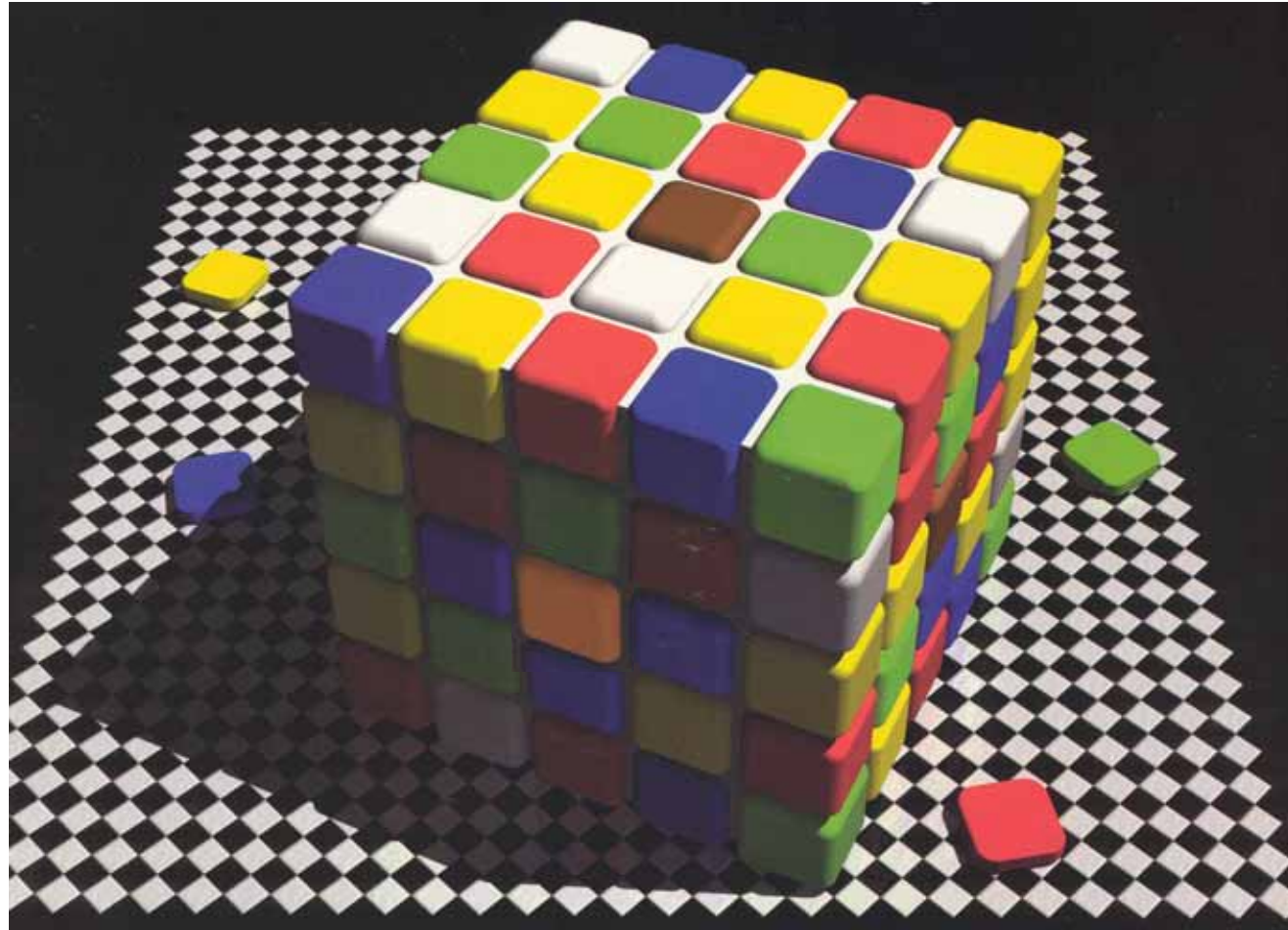
Chromatische Assimilation



Farbkonstanz

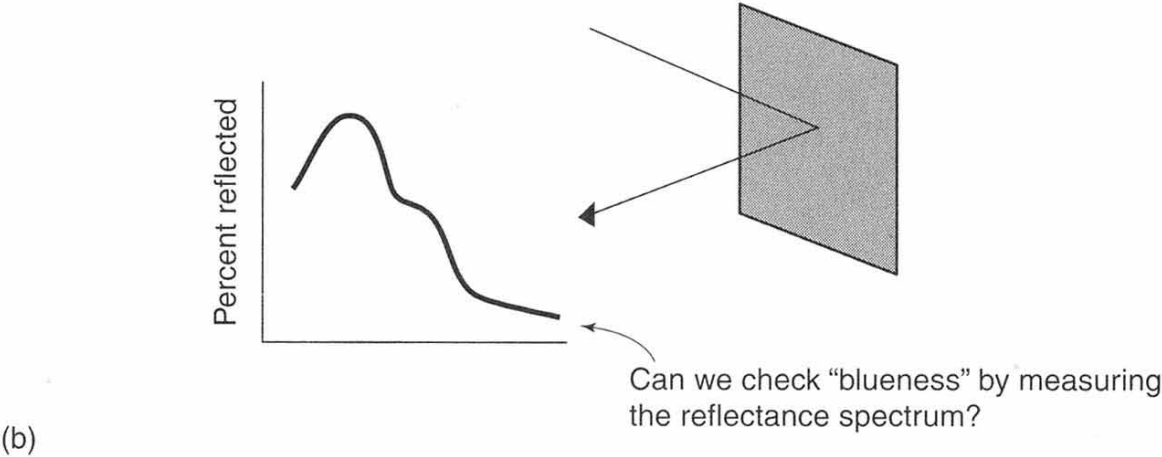
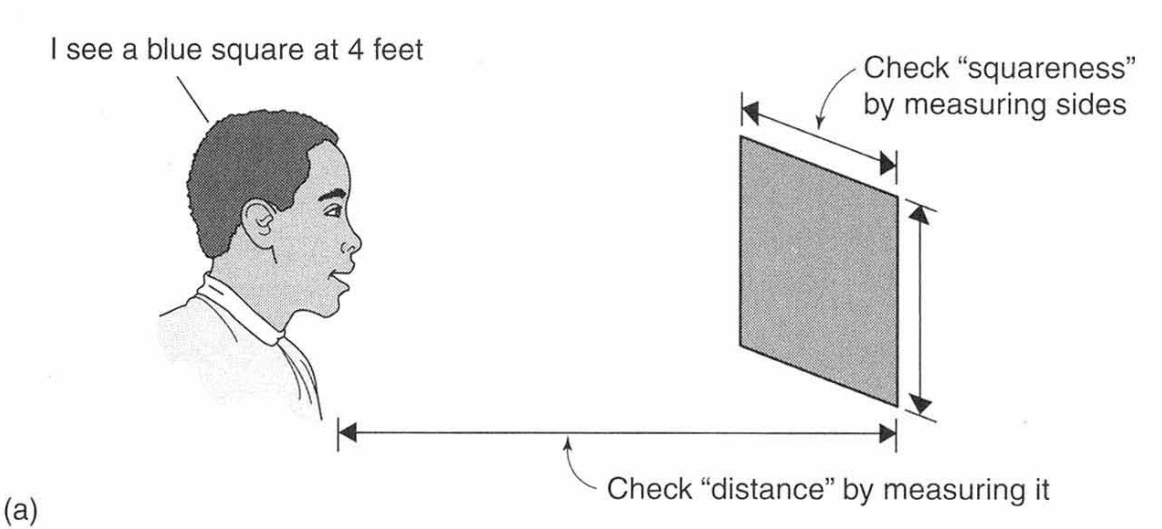


Farbkonstanz



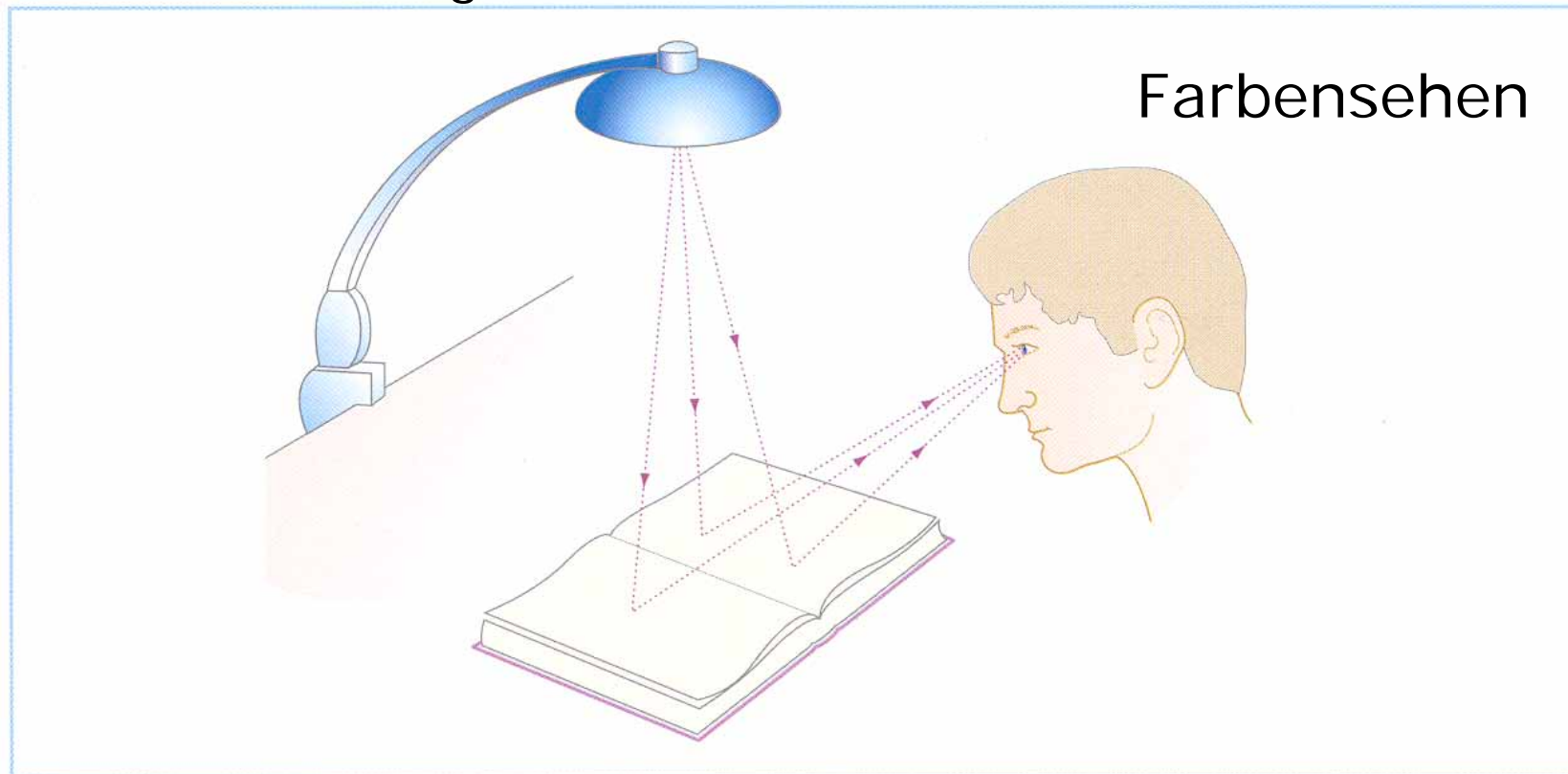
Farbe und Wellenlänge

Farbe und Wellenlänge



Licht und visuelle Wahrnehmung

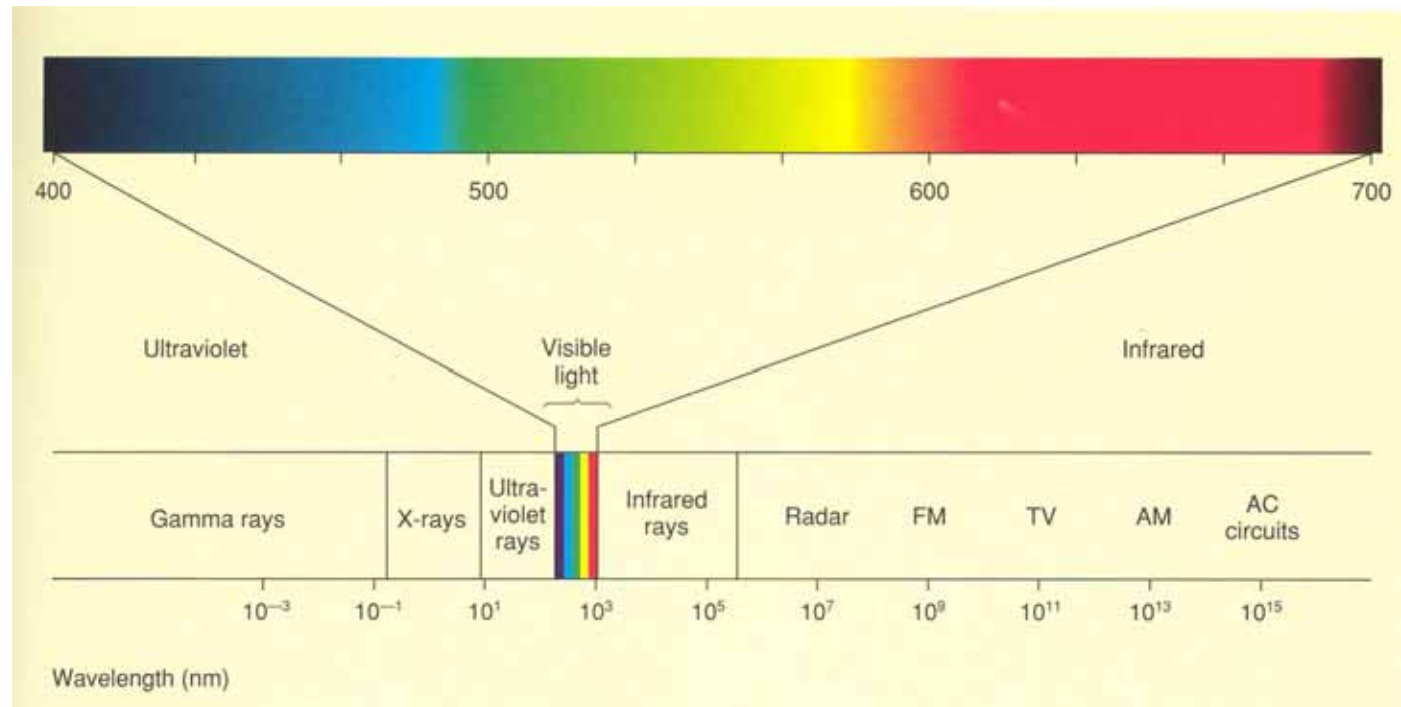
Beleuchtung



Farbsehen

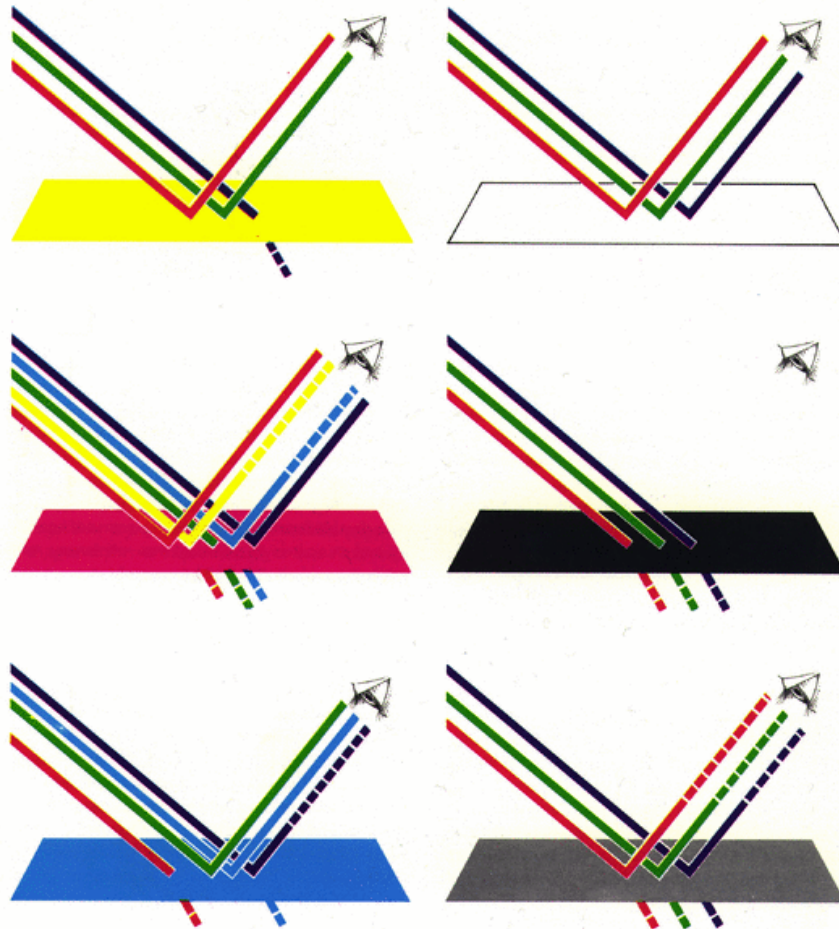
Reflexion und Absorption

Lichtreize



Das Sehsystem ist empfindlich für elektromagnetische Strahlung in einem eng umgrenzten Bereich von Wellenlängen. Nur für Strahlung dieser Wellenlängen besitzen wir Rezeptoren.

Reflektion und Absorption

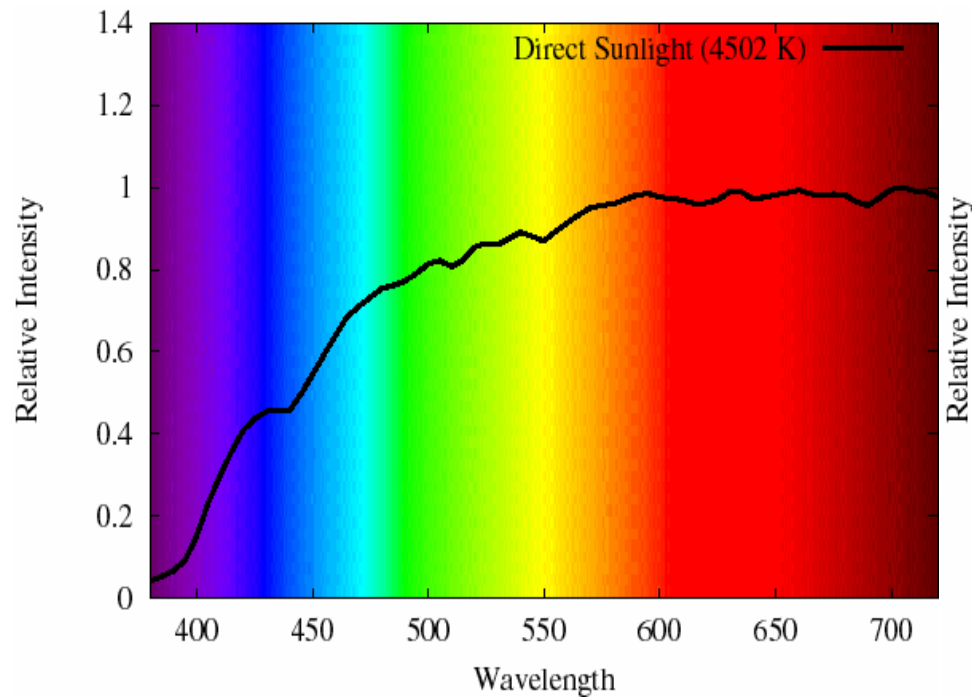


Ein Teil des einfallenden Lichts wird reflektiert, der andere Teil absorbiert.

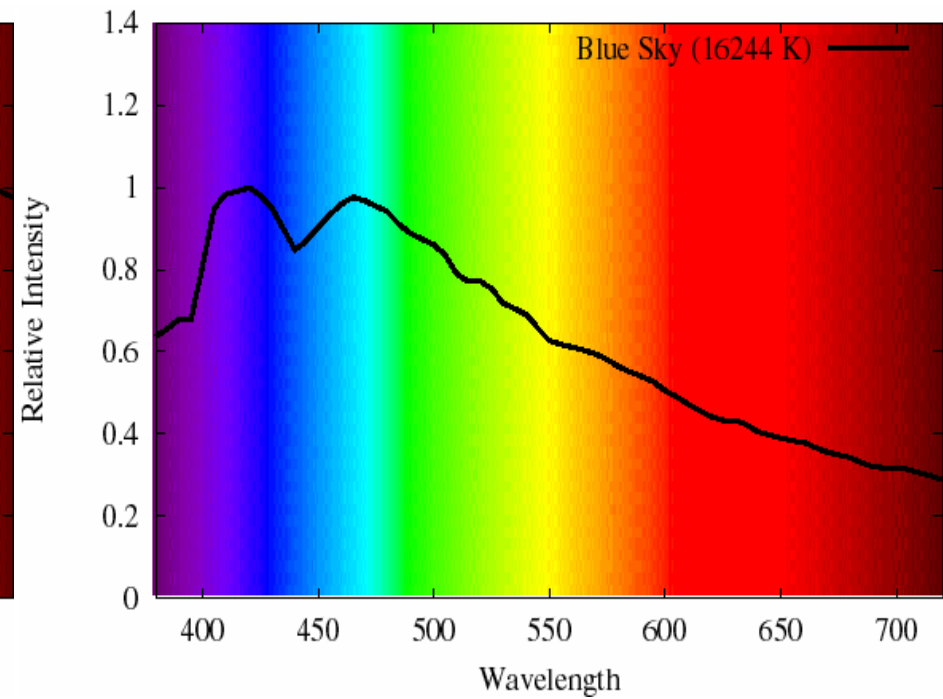
Ändert sich die Beleuchtung, dann ändert sich auch die spektrale Zusammensetzung des Lichts, das ins Auge fällt.

Aber: Der Grad an Absorption über alle Wellenlängen hinweg ist charakteristisch für ein bestimmtes Objekt, unabhängig von der Beleuchtung.

Natürliche Spektren

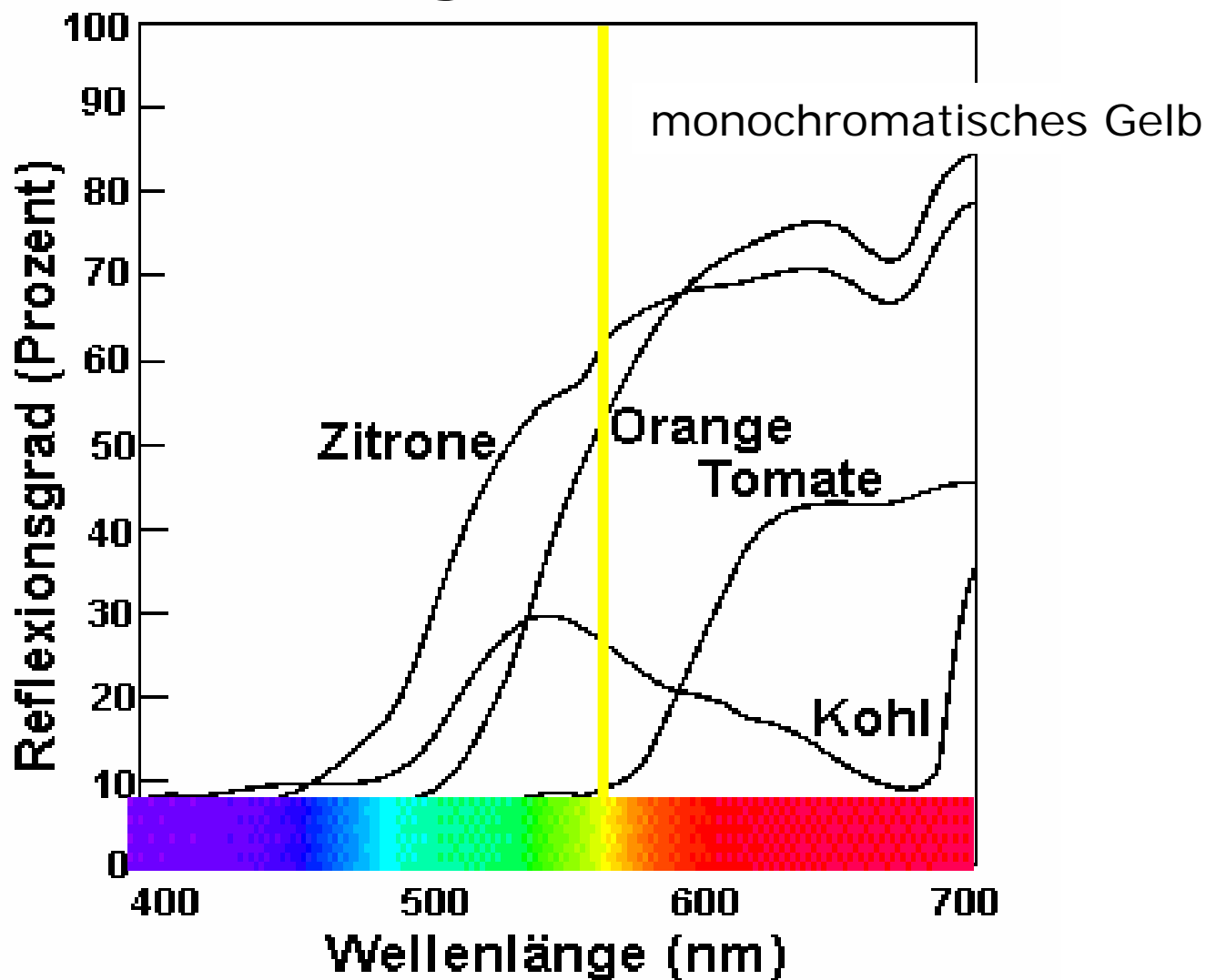


direktes Sonnenlicht

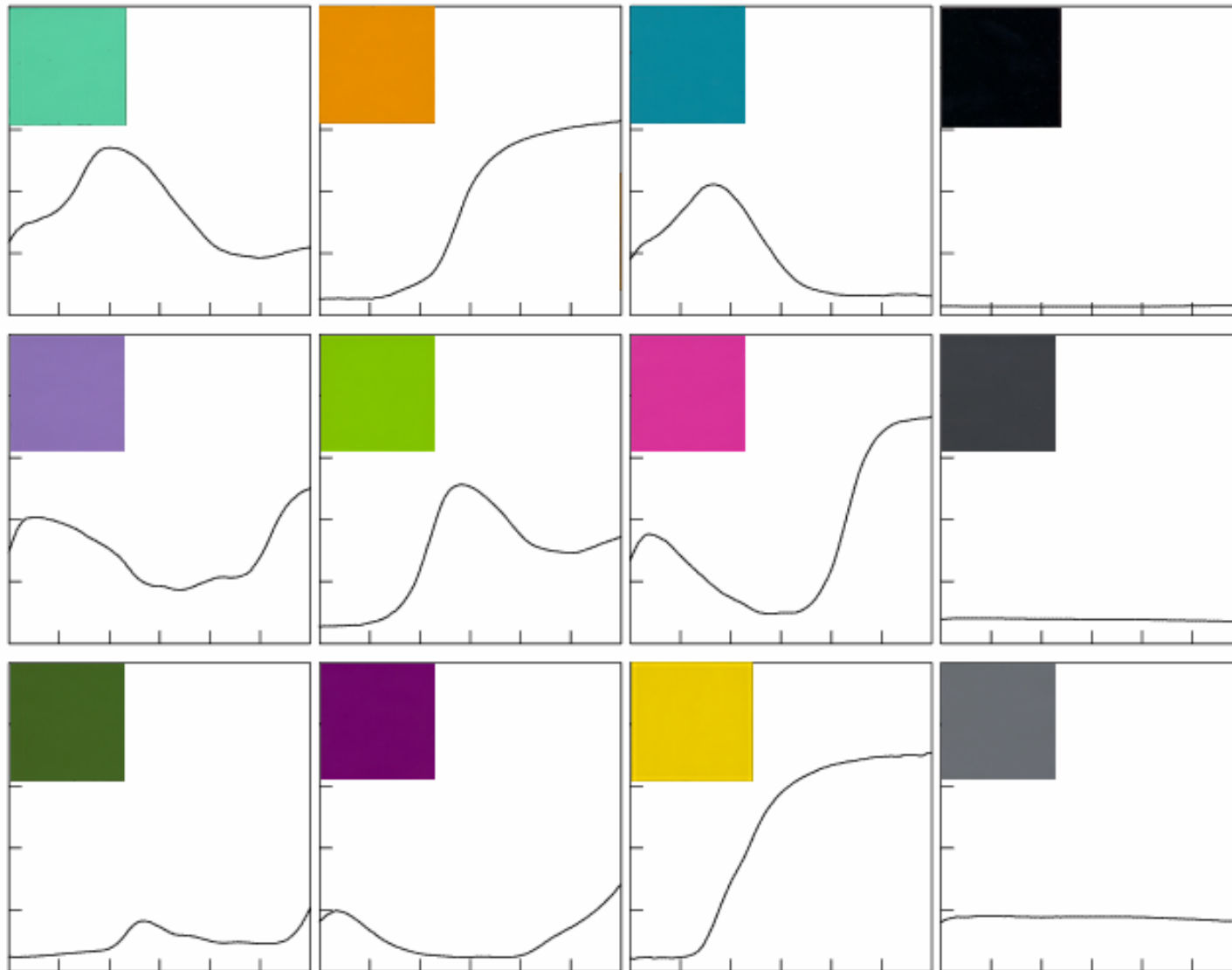


blaues Himmelslicht

Spektren einiger Lebensmittel



Spektren von Farbpapieren



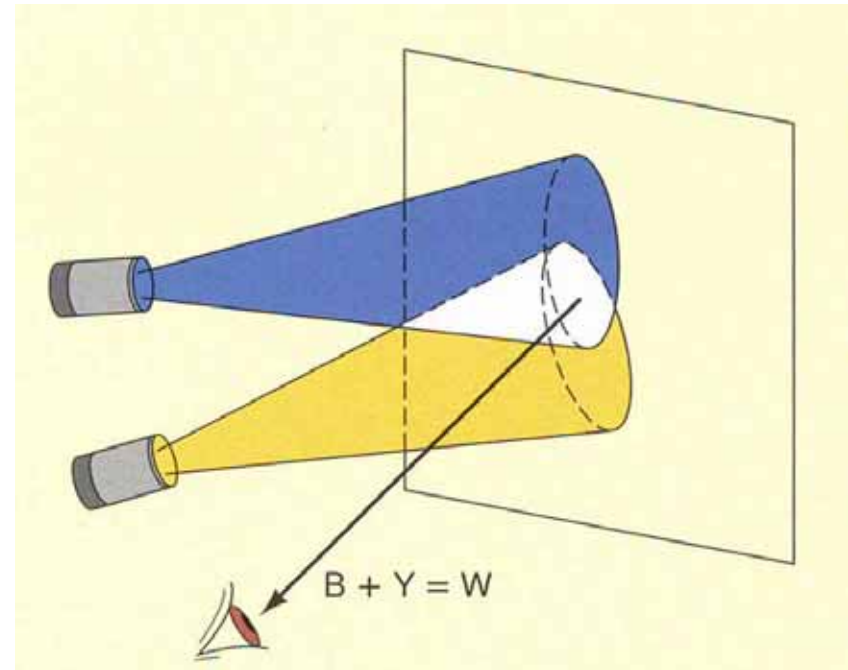
Additive und subtraktive Farbmischung

Additive Farbmischung

Bei der *additiven* Farbmischung wird Licht addiert:

- Übereinanderprojektion von Scheinwerfern
- Farbfernsehen
- Farbkreis
- Nebeneinanderdrucken reiner Farbstoffe

Das Ergebnis ist die Summe der Strahlungen.

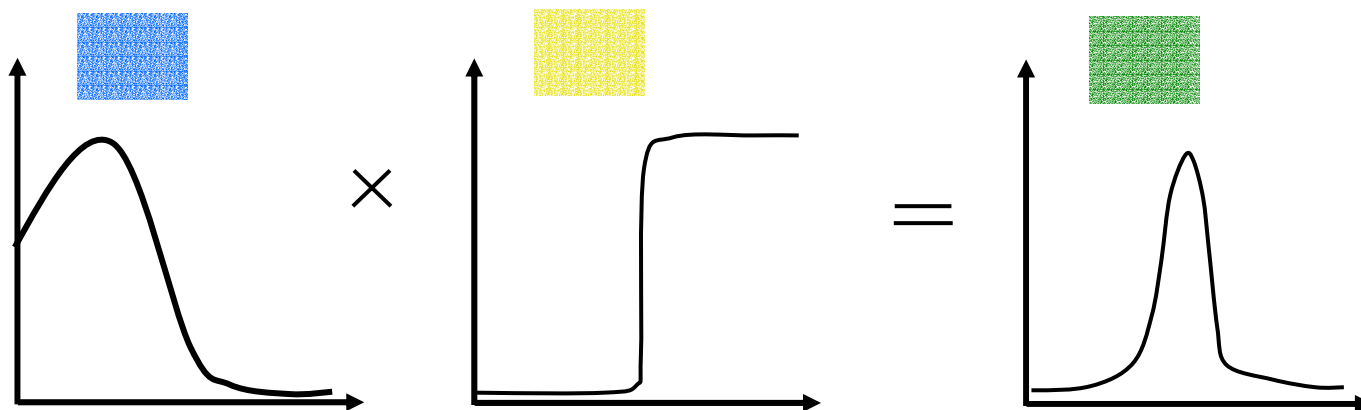


Subtraktive Farbenmischung

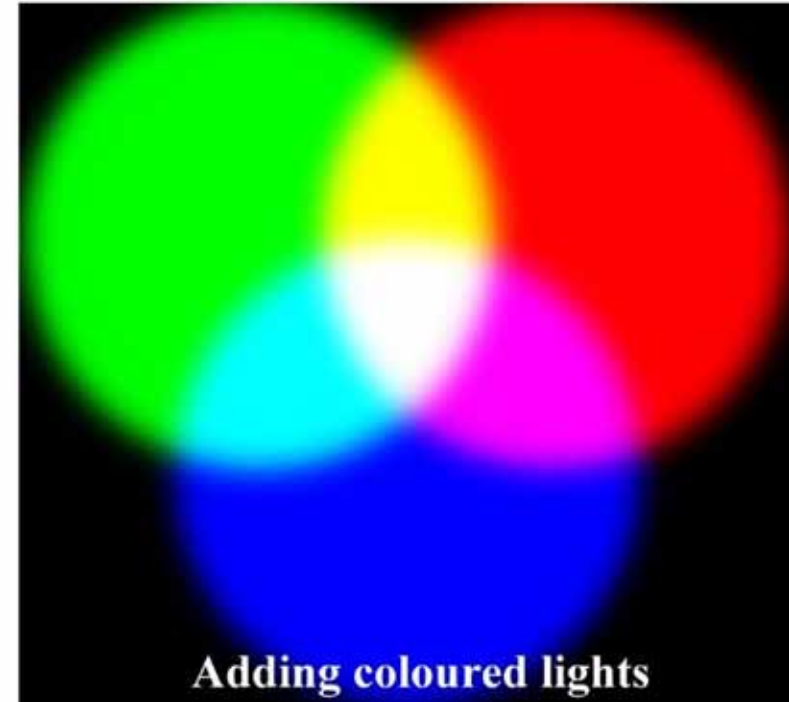
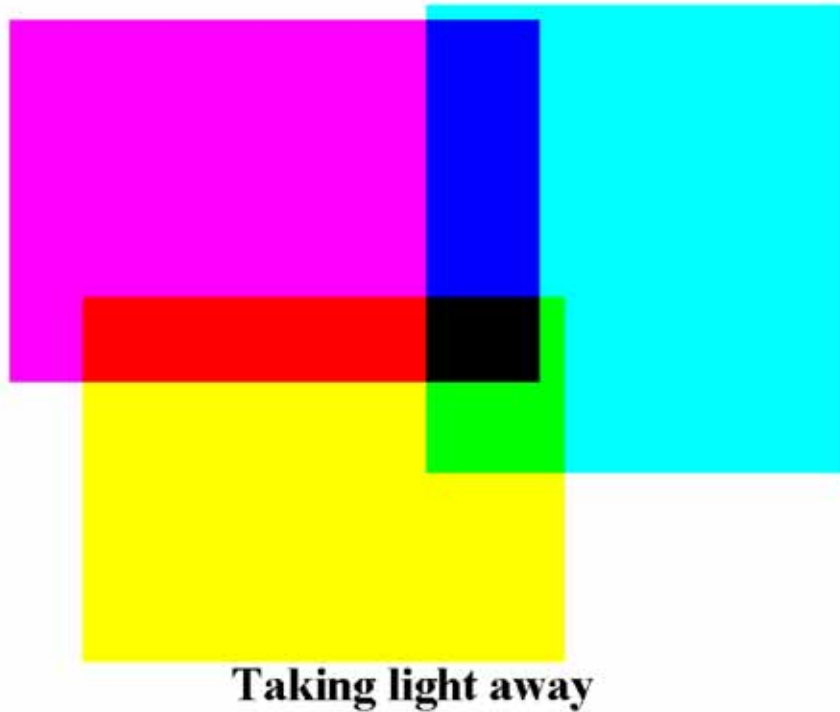
Bei der subtraktiven Farbenmischung werden die Spektren des Lichts und die Transmissionsfunktion eines Filters miteinander multipliziert.

Die Transmissionsfunktionen zweier übereinanderliegender Filter ist das Produkt der Transmissionsfunktionen der einzelnen Filter.

Ein blaues Filter auf ein gelbes Filter gelegt ergibt Grün.



Farbmischung

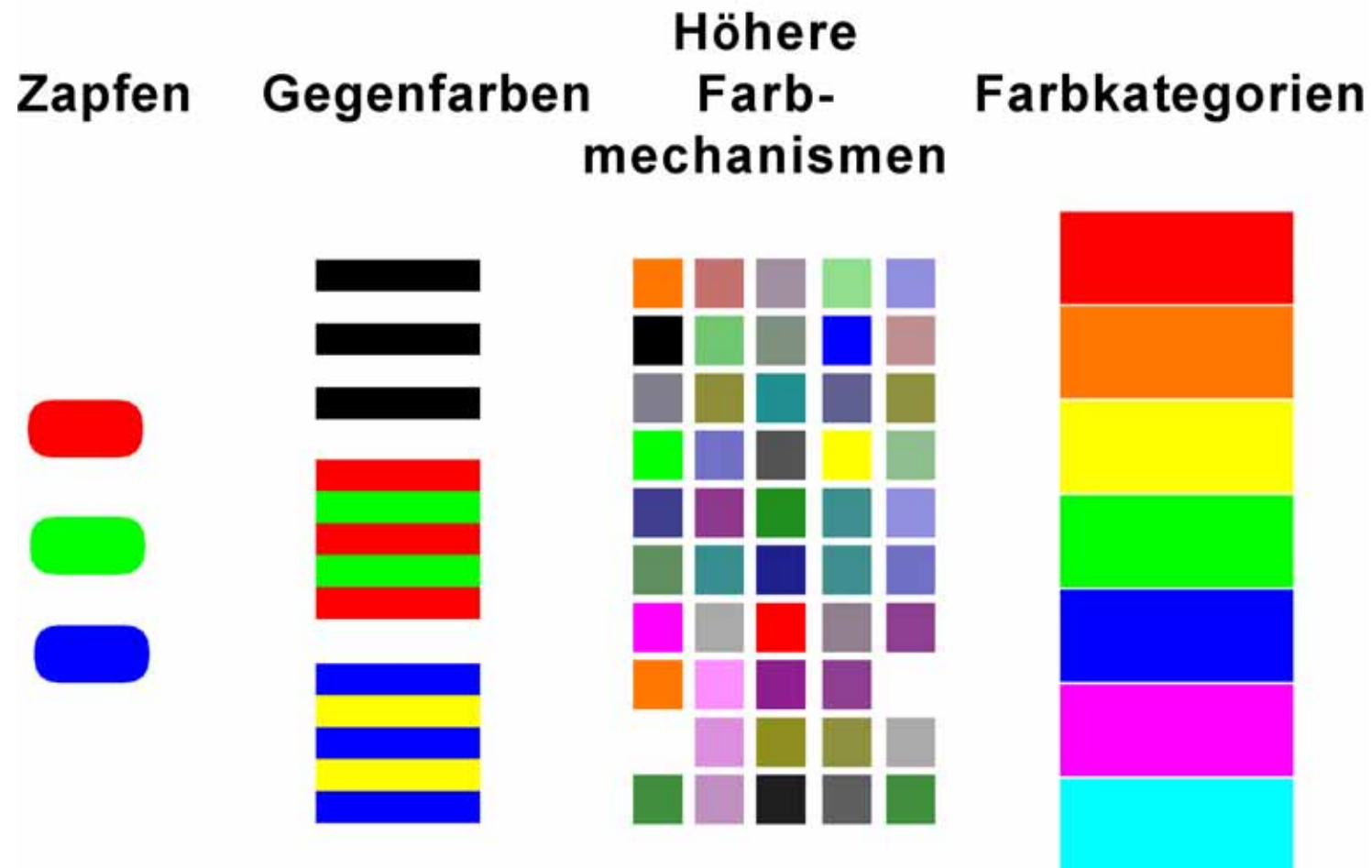


Die Grundfarben bei der Farbenmischung sind im Prinzip beliebig. In der Praxis wählt man die Grundfarben so, dass eine möglichst grosse Vielfalt an Farben gemischt werden kann. Für die subtraktive Farbmischung sind das meist cyan, magenta und gelb, für die additive Farbmischung rot, grün und blau.

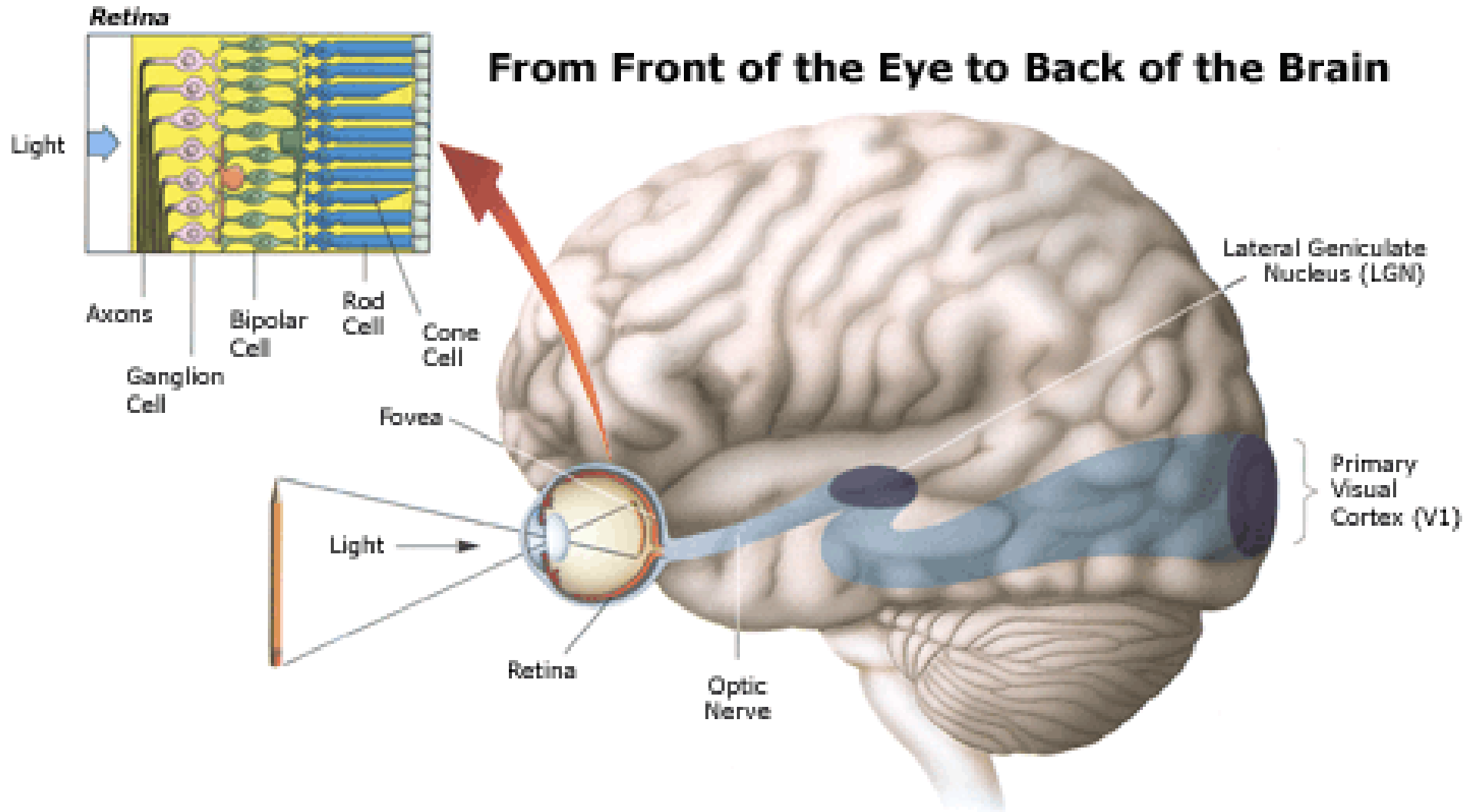
Stadien der Farbverarbeitung

Überblick

Stadien der Farbverarbeitung



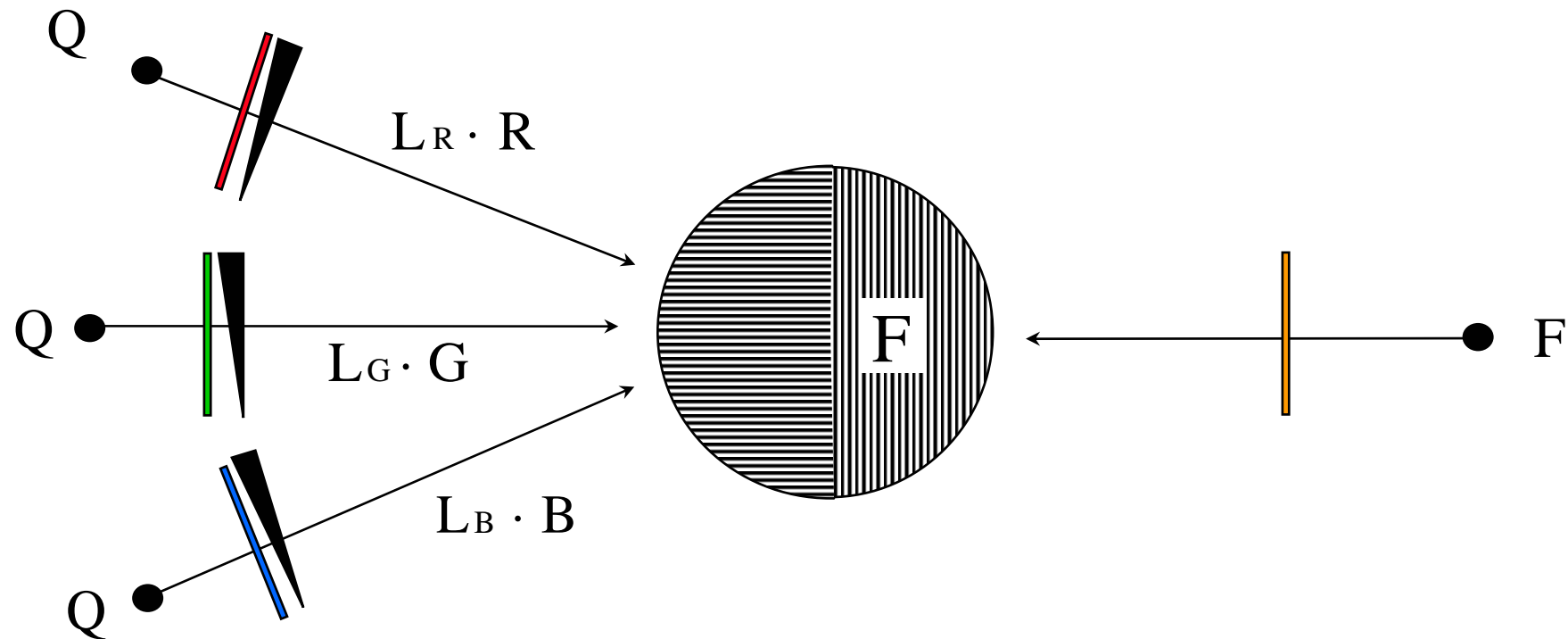
Visuelle Verarbeitung



Sensorische Kodierung von Farbe

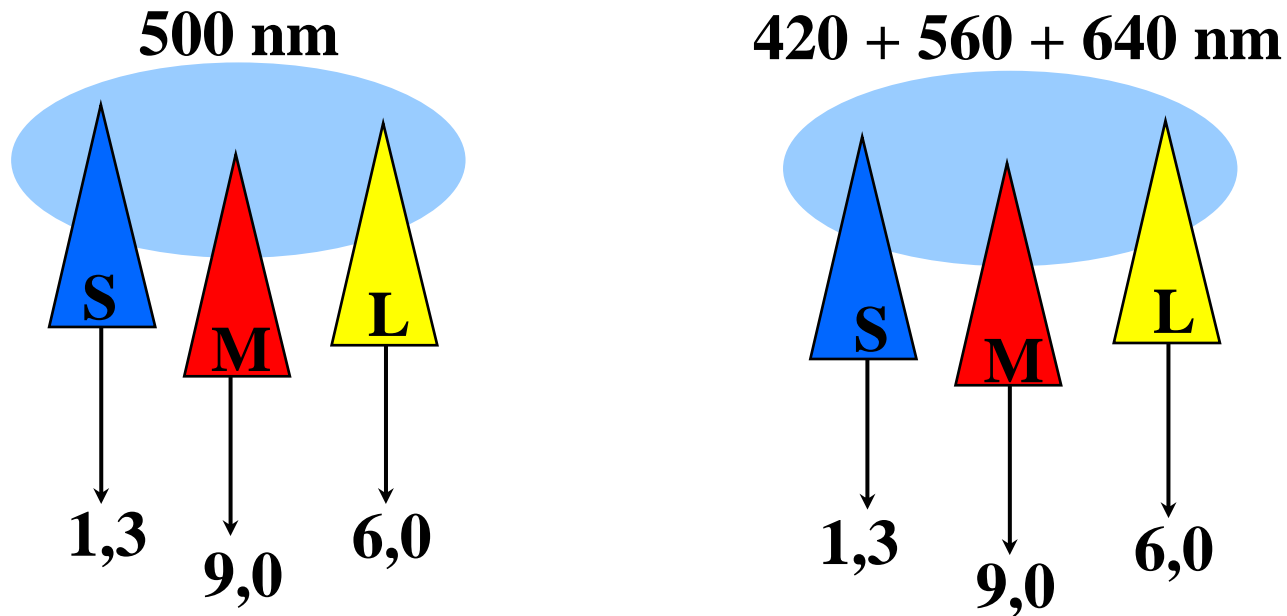
Erste Stufe: Zapfen und die
Dreifarbentheorie

Farbabgleich-Experimente mit einem Farbmischer



Eine beliebige Farbe F wird durch Variation der Reizgrößen L dreier Farbreize R, G und B nachgemischt.

Die Dreifarbentheorie



Die Anteile von 420-, 560- und 640-nm-Licht im rechten Feld wurden so gewählt, daß das Mischlicht mit dem 500-nm-Licht im linken Feld identisch aussieht.

Dreifarbentheorie

Experimente mit dem Farbenmischer:

- jede beliebige Farbe kann durch Mischung von drei anderen Farben hergestellt werden
- zwei Farben reichen nicht aus, mehr als drei sind nicht nötig

Young-Helmholtz-Dreifarbentheorie:

Die Farbwahrnehmung beruht auf drei Rezeptorsystemen mit unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit.



Thomas Young
1773-1829



Hermann von Helmholtz
1821-1894

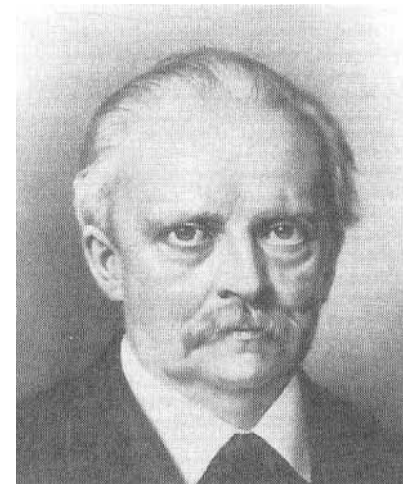
Dreifarbentheorie

As it is almost impossible to conceive each sensitive point of the retina to contain an infinite number of particles, each capable of vibrating in perfect unison with every possible undulation, it becomes necessary to suppose the number limited, for instance to the three principles colours, red, yellow and blue.

Bakerian lecture to the Royal Society, 1802

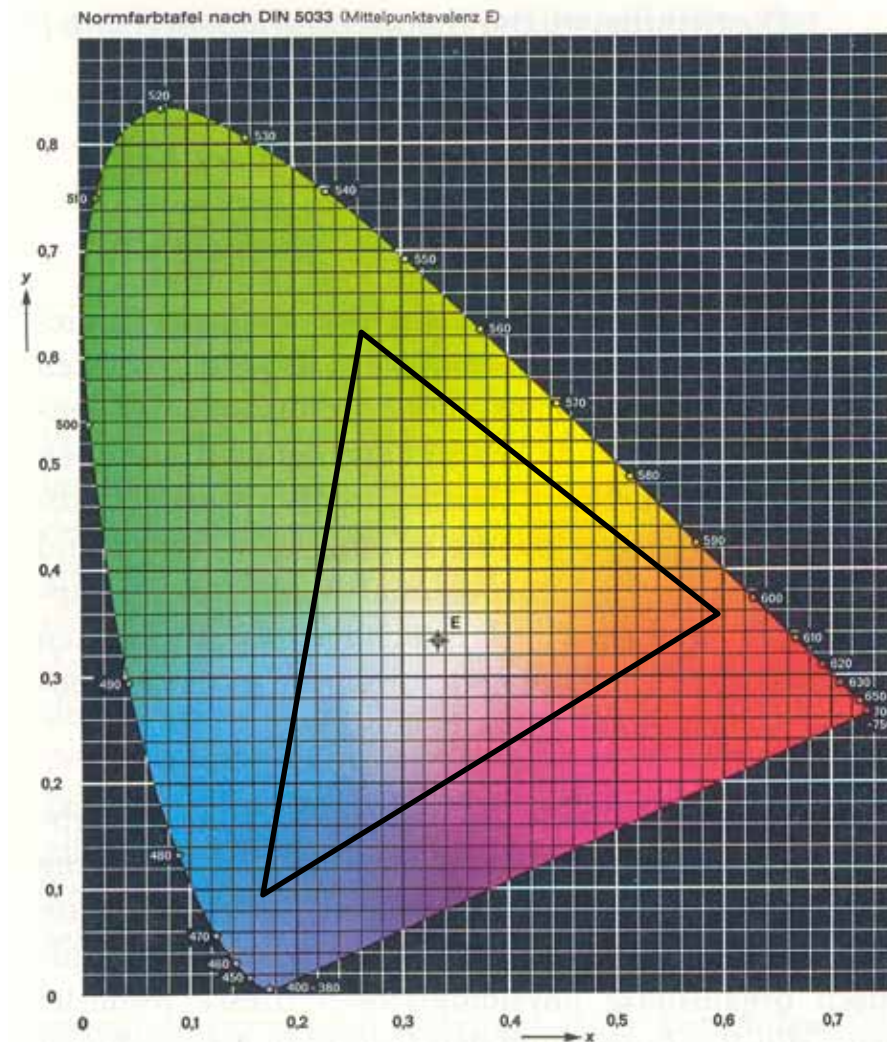


Thomas Young
1773-1829



Hermann von Helmholtz
1821-1894

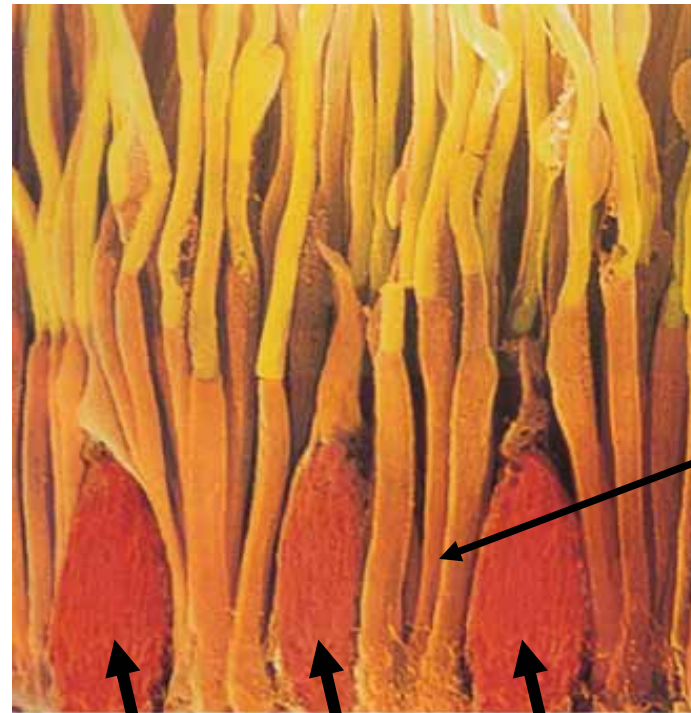
CIE Normfarbtafel



- Jeder Farbton kann durch eine Mischung von 3 Grundfarben erzeugt werden
- Weiß entsteht durch Mischung von Komplementärfarben
- Farben verhalten sich wie Vektoren

Zapfen: Die Photorezeptoren für das Farbempfinden

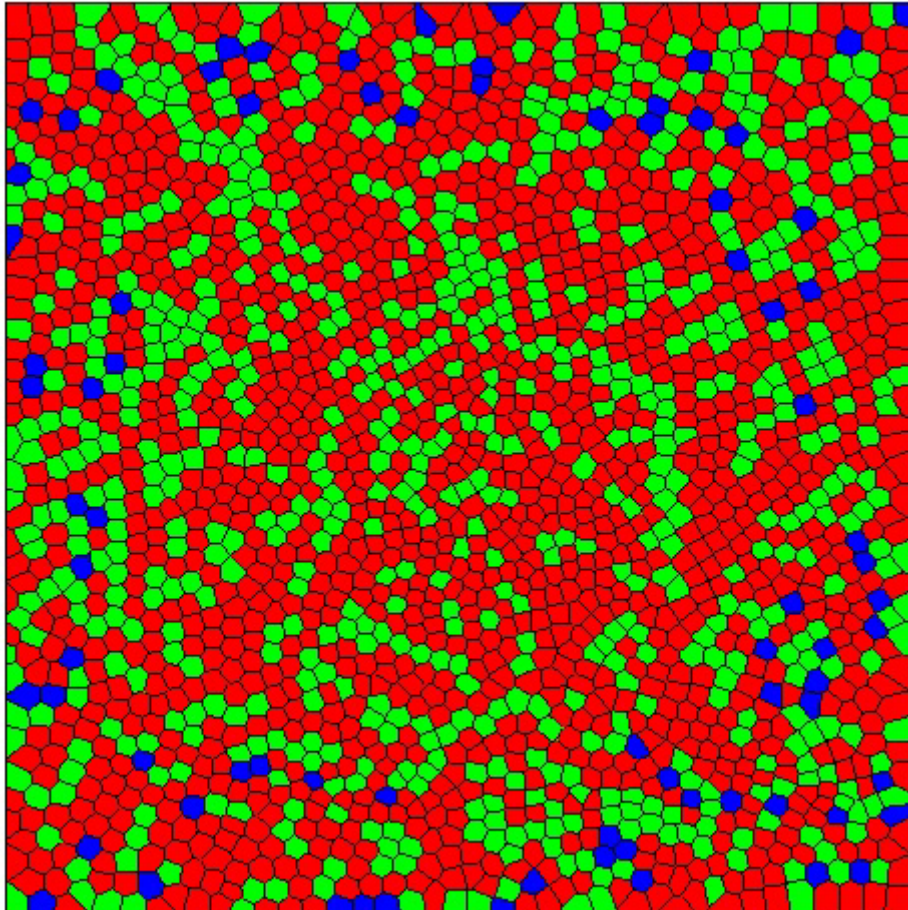
Zapfen und Stäbchen
unter dem
Elektronenmikroskop



Stäbchen
(rods)

Zapfen (cones)

Zapfenmosaik



In der Netzhaut gibt es drei Typen von Zapfen

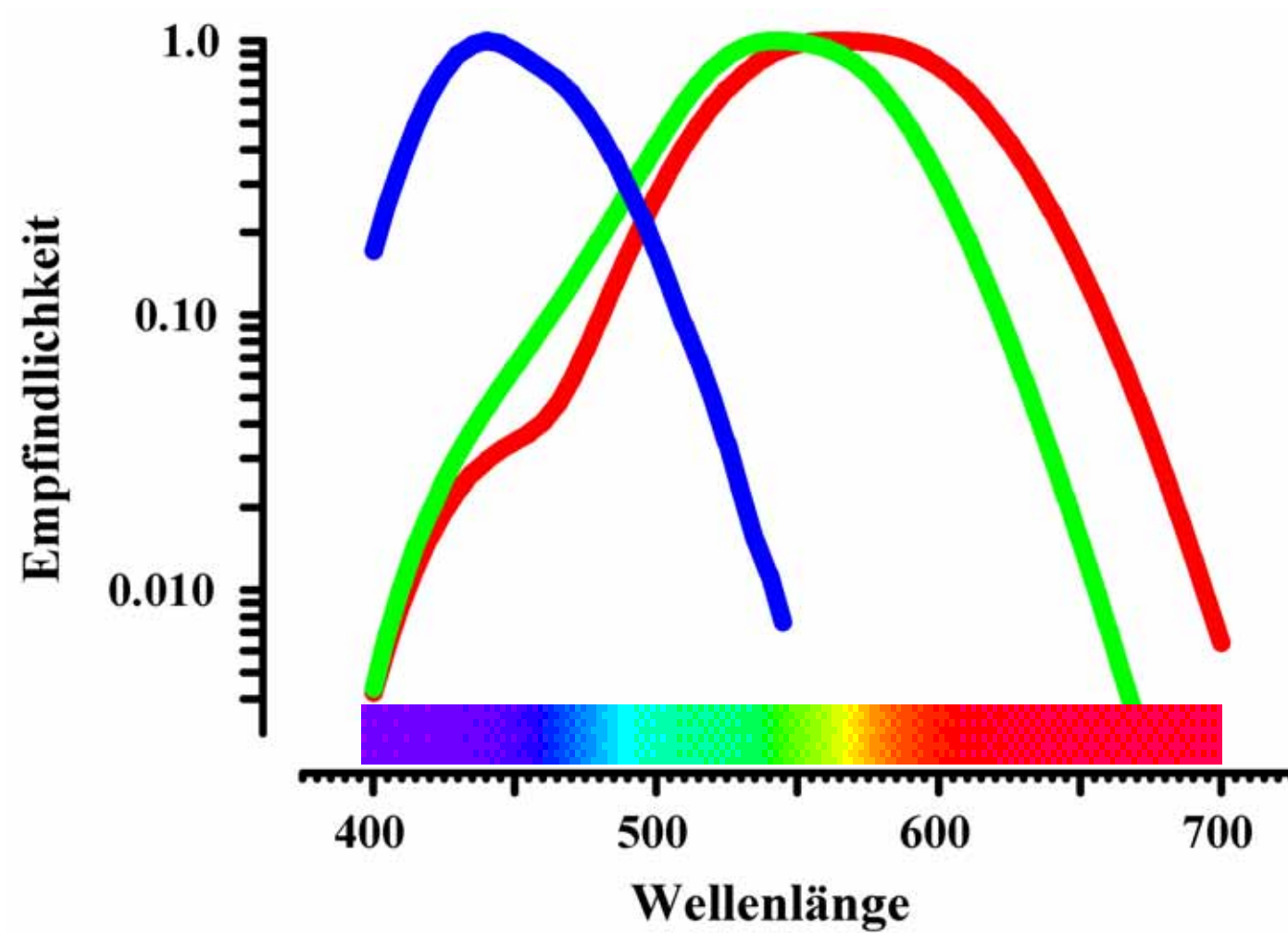
Diese sind zu einem Mosaik angeordnet

An jeder Stelle gibt es nur einen Zapfen

Es gibt ca. doppelt so viele Rot-Zapfen wie Grün-Zapfen

Nur ca. 10% sind Blau-Zapfen

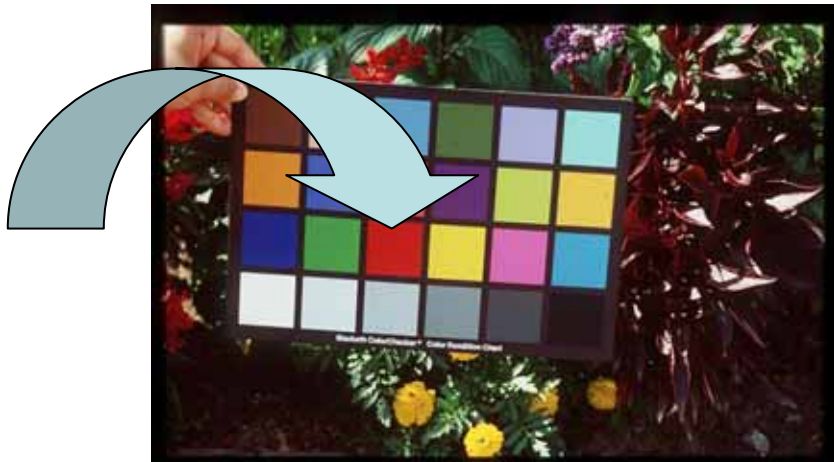
Zapfenabsorption



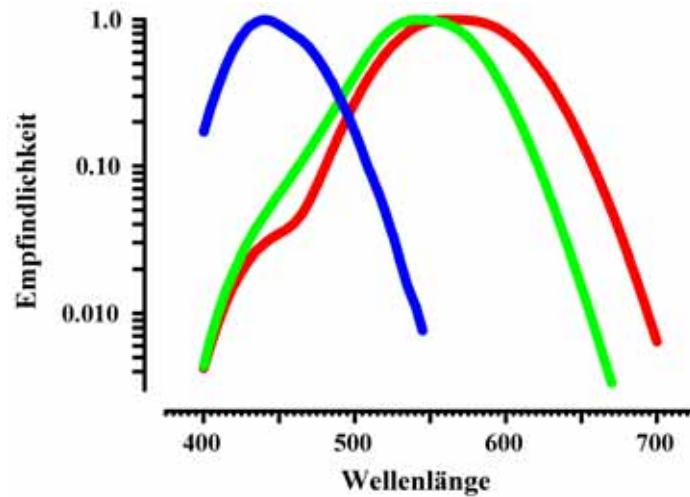
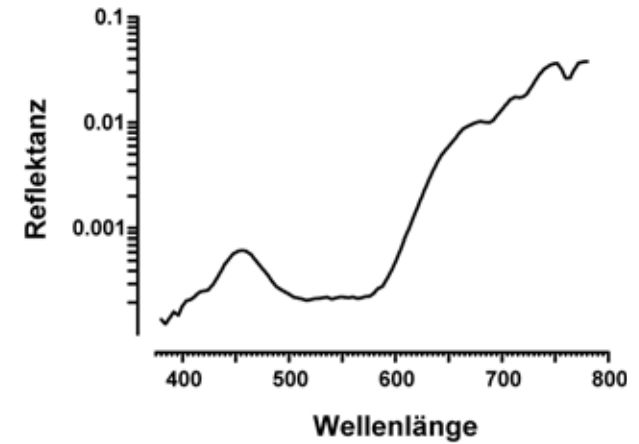
Zapfen

- es gibt drei Typen von Zapfen
- alle drei Typen von Zapfen absorbieren Licht in einem breiten Bereich von Wellenlängen
- kennt man die Wellenlänge eines Photons, so kann man trotzdem nicht vorhersagen, von welchem Zapfentyp es absorbiert wird
- Zapfen werden manchmal fälschlicherweise als Rot-, Grün, oder Blau-Zapfen bezeichnet.
Die korrekte Bezeichnung nach den Sensitivitäts*maxima* im lang-, mittel-, oder kurz(short)welligen Bereich:
L-, M-, und S- (oder K-) Zapfen

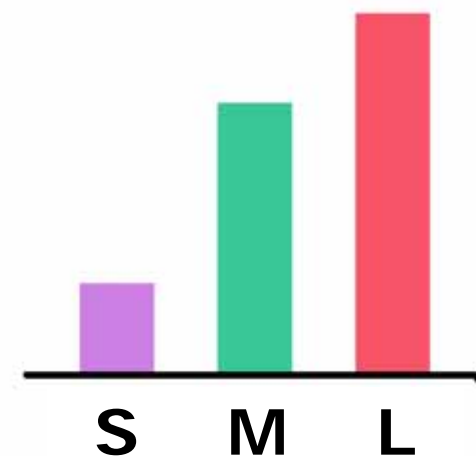
Trichromatizität und Univarianz



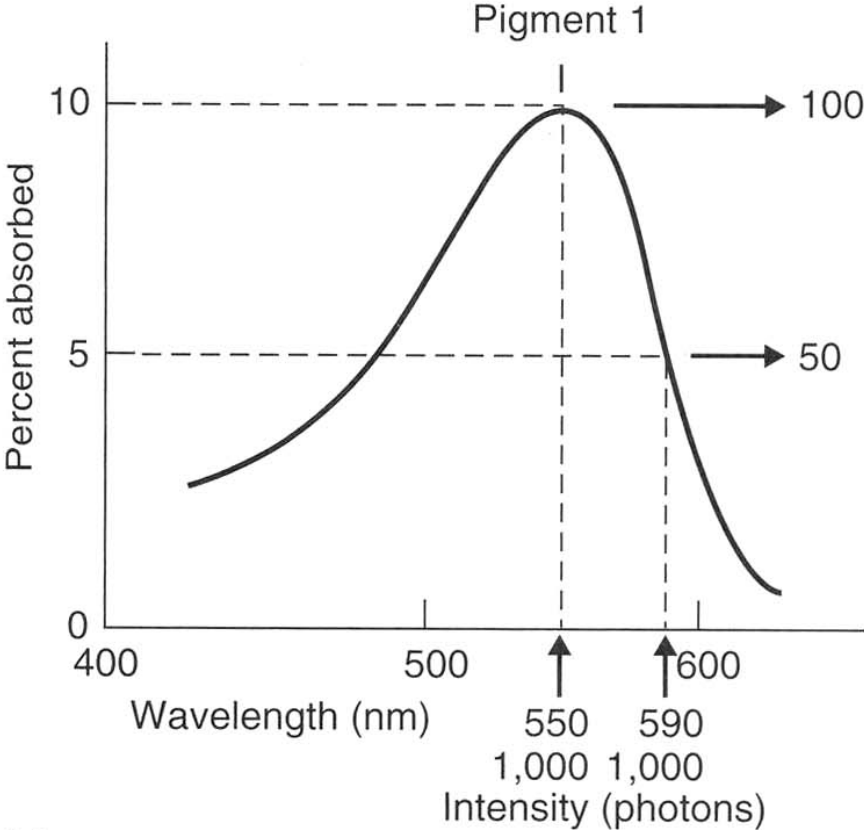
Licht



Zapfen



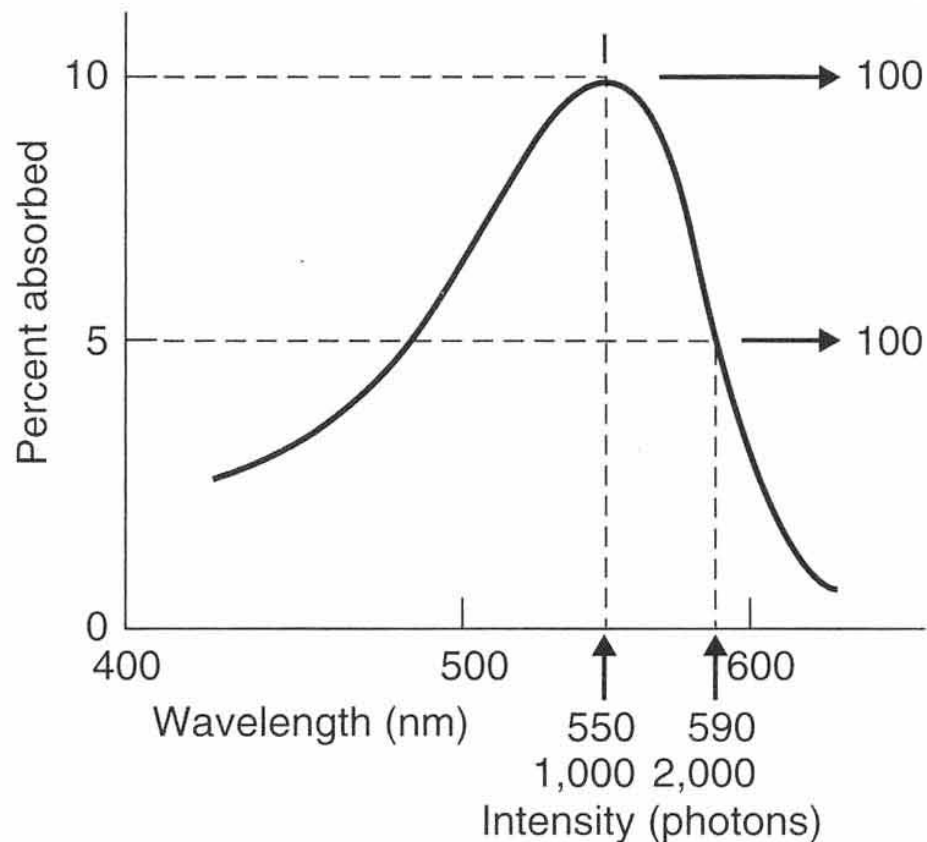
Farbensehen mit einem Rezeptor?



| Photons | Wavelength | Isomerized |
|---------|------------|------------|
| 1,000 | 550 | 100 |
| 1,000 | 590 | 50 |

(a)

... geht nicht!

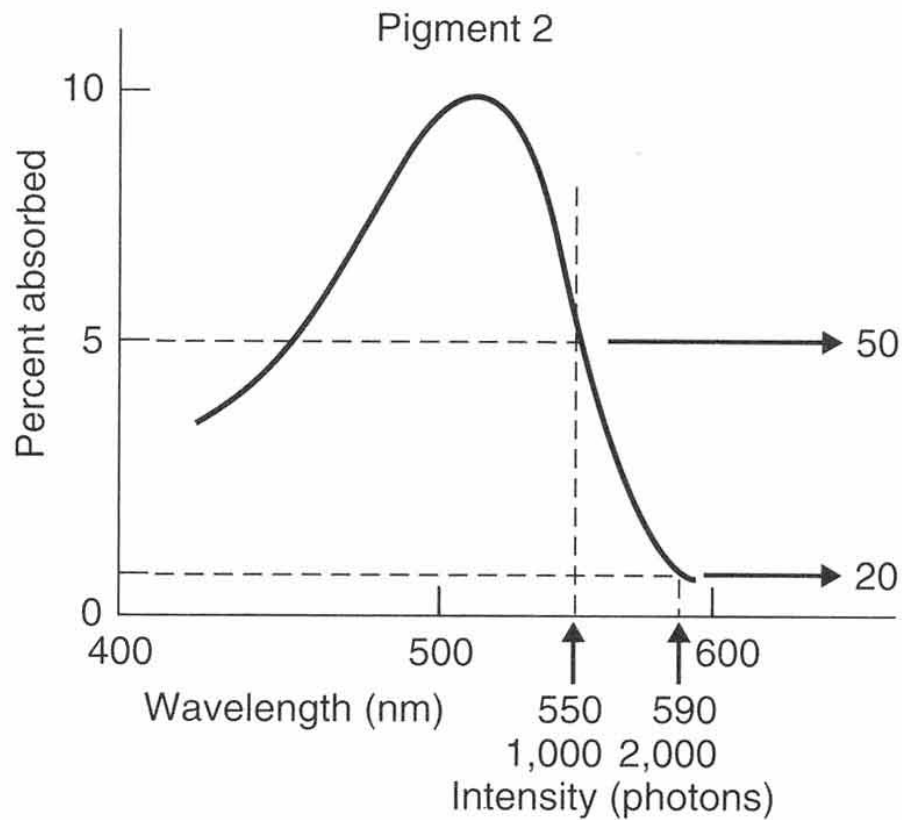


(b)

| Photons | Wavelength | Isomerized |
|---------|------------|------------|
| 1,000 | 550 | 100 |
| 2,000 | 590 | 100 |

Mit nur einem Rezeptor können Unterschiede in der Wellenlänge nicht von Unterschieden in der Intensität unterschieden werden. Daher ist beim Nachtsehen (mit den Stäbchen) Farbsehen nicht möglich. Auch Personen, die nur einen Zapfentyp aufweisen, können Farben nicht unterscheiden.

Mindestens zwei Rezeptoren sind notwendig



Erster Zapfentyp

| Photons | Wavelength | Isomerized |
|---------|------------|------------|
| 1,000 | 550 | 100 |
| 2,000 | 590 | 100 |

Zweiter Zapfentyp

| Photons | Wavelength | Isomerized |
|---------|------------|------------|
| 1,000 | 550 | 50 |
| 2,000 | 590 | 20 |

Trichromatizität, Univarianz und Metamerie

Alle Farben lassen sich durch *drei* Zahlen beschreiben
(**Trichromatizität**)

Lichter sind durch ein kontinuierliches Spektrum
(unendlich viele Zahlen) gekennzeichnet

Wird ein Photon absorbiert, so geht die Information über
seine Wellenlänge verloren (**Univarianz**)

Unterschiedliche physikalische Spektren können dieselbe
Farbempfindung hervorrufen (sogenannte bedingt-gleiche
oder metamere Farbreize oder kurz **Metamere**).

Trichromatizität, Univarianz und Metamerie: Vor- und Nachteile

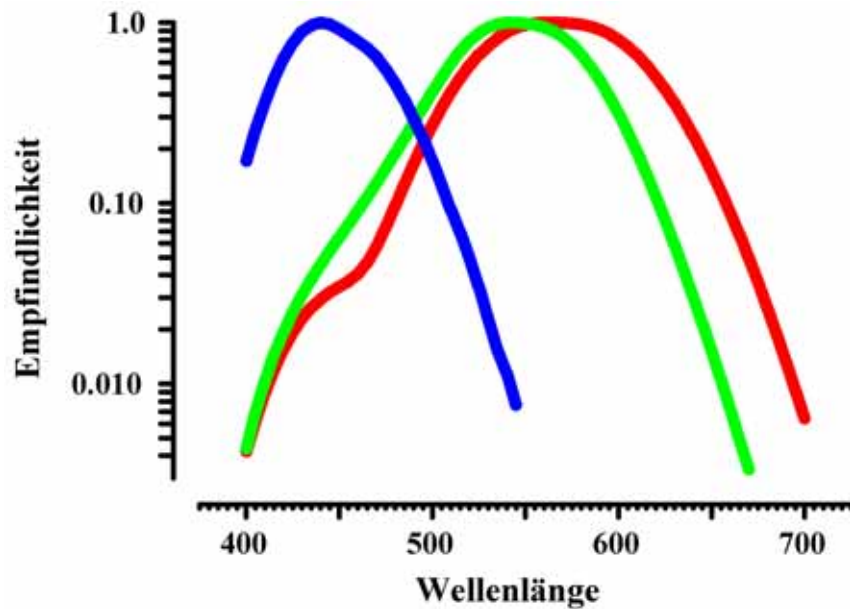
Vorteile

Aus wenigen Farbstoffen können durch Mischung viele Farbtöne erzeugt werden (z.B. Fernseher, Monitor, Farbdrucker)

Nachteile

Oberflächen können bei manchen Beleuchtungen gleich, bei anderen ungleich aussehen

Entwicklung der Zapfen



L- und M-Zapfen Absorptions-Spektren sind sehr ähnlich

Die beiden Zapfentypen haben sich erst vor ca. 35 Millionen Jahren auseinanderentwickelt

Die Genetik des Farbensehens ist sehr gut erforscht

Die Gensequenzen von L- und M-Zapfen unterscheiden sich nur geringfügig voneinander

Evolution und Farbe



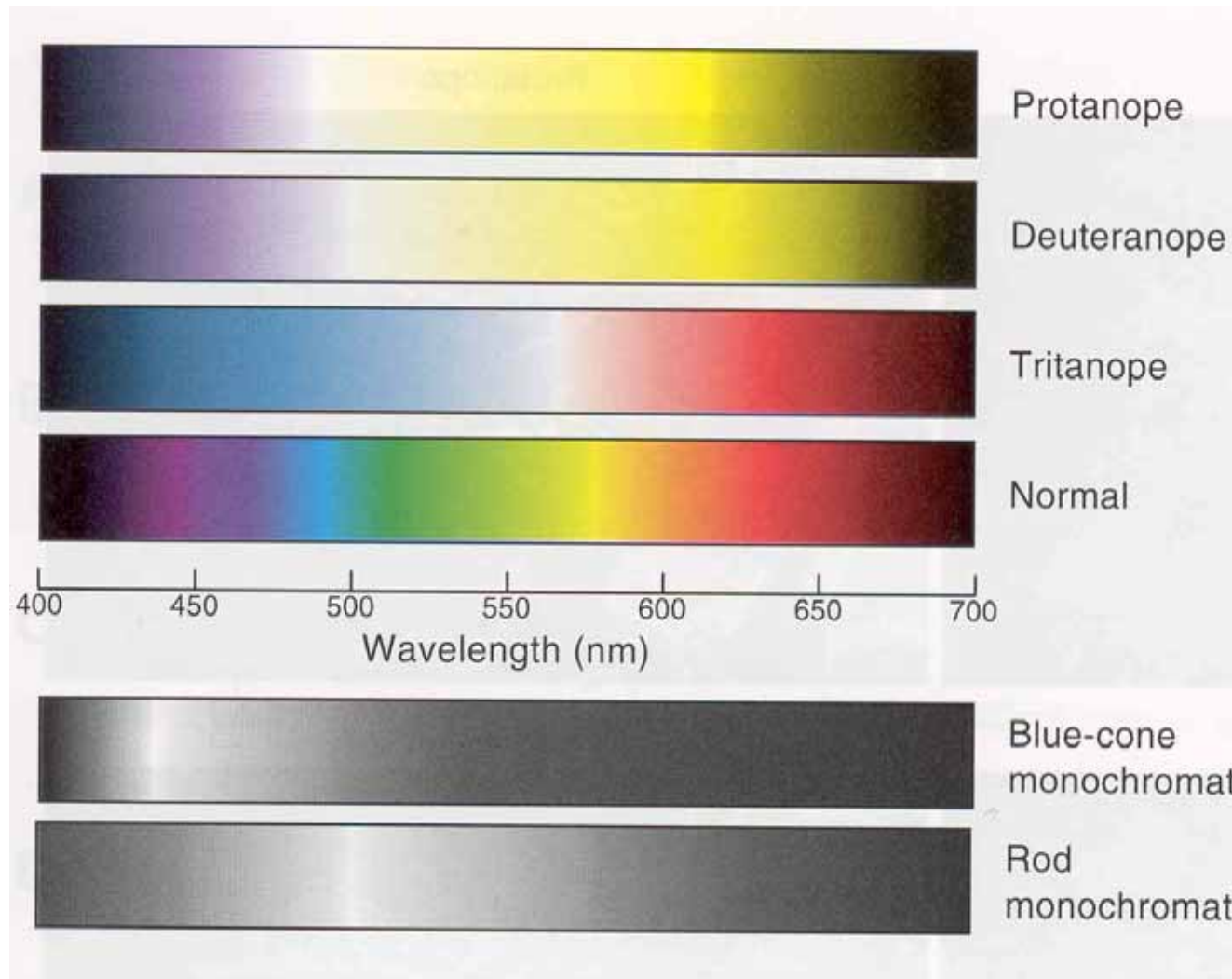
Eine Hypothese lautet, dass der evolutionäre Vorteil der Rot-Grün-Unterscheidung darin besteht, dass reife Früchte vor grünen Blättern entdeckt werden können

Diese Früchte sind etwa zur gleichen Zeit entstanden. Primaten halfen bei der Verbreitung der Samen. Man spricht von Ko-Evolution

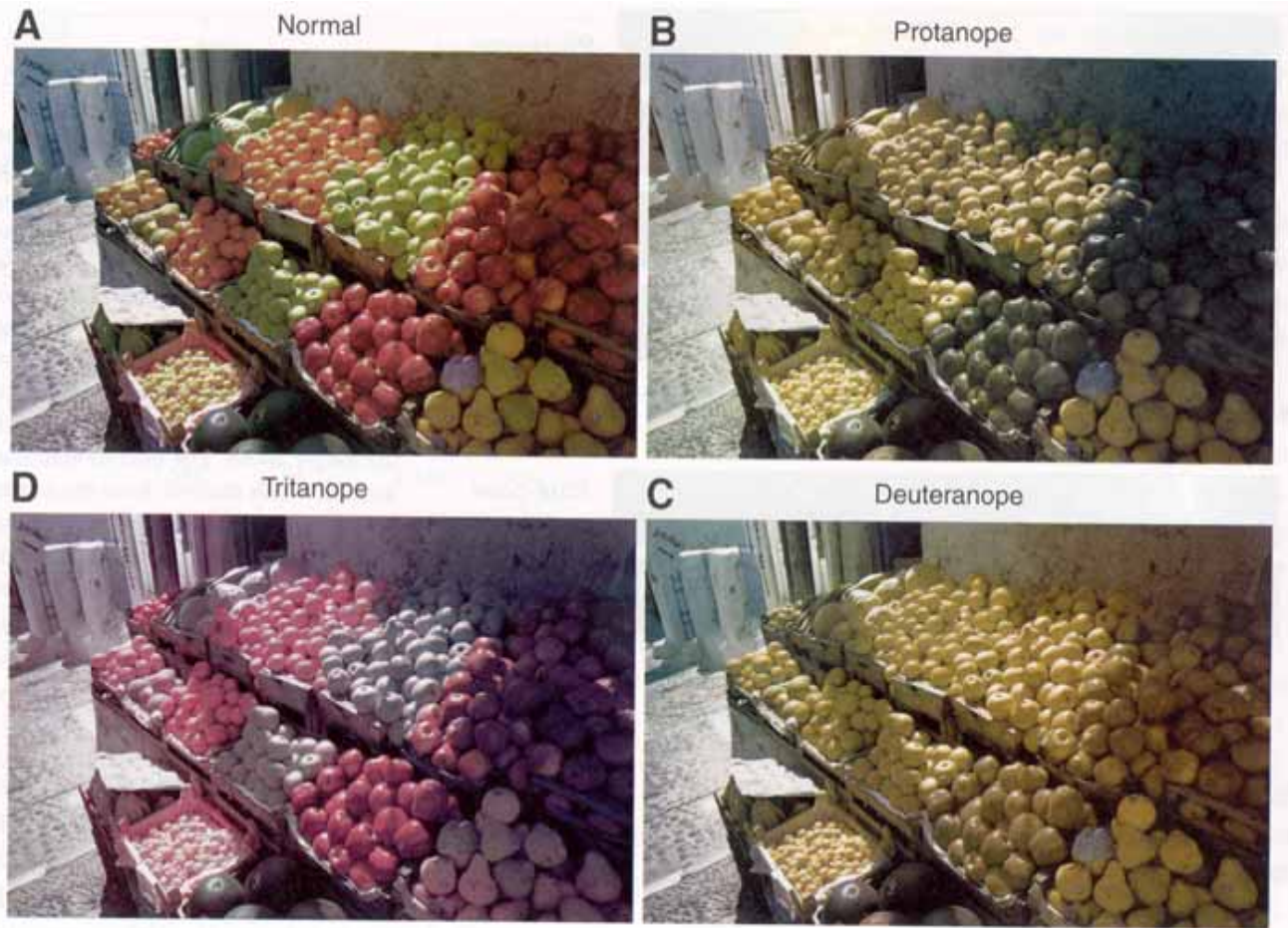
In anderen Worten:
Primaten sind eine Erfindung der Bäume 😊

Farbenfehlsichtigkeit

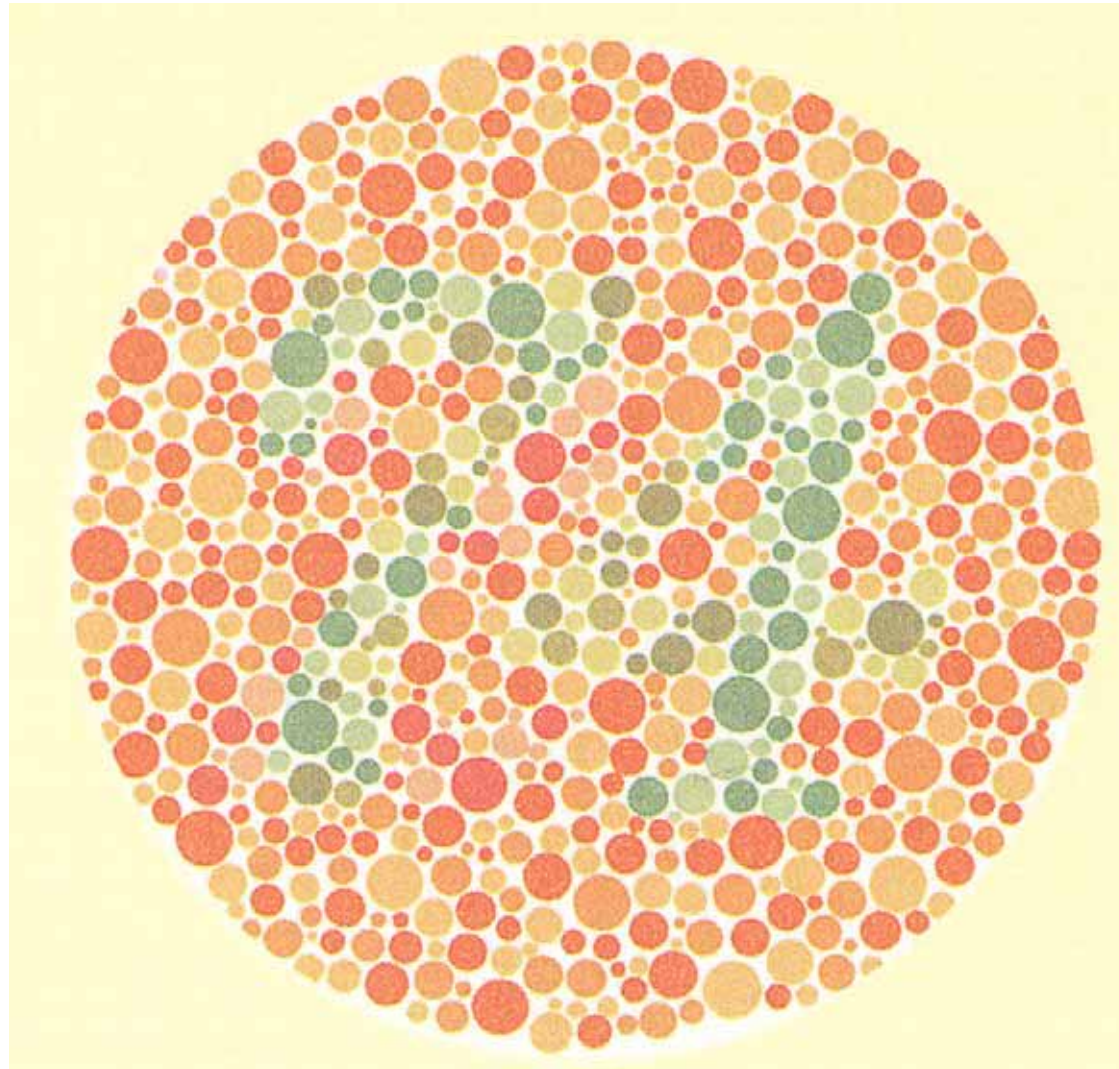
Störungen der Farbwahrnehmung



Die Welt der Farbenblinden

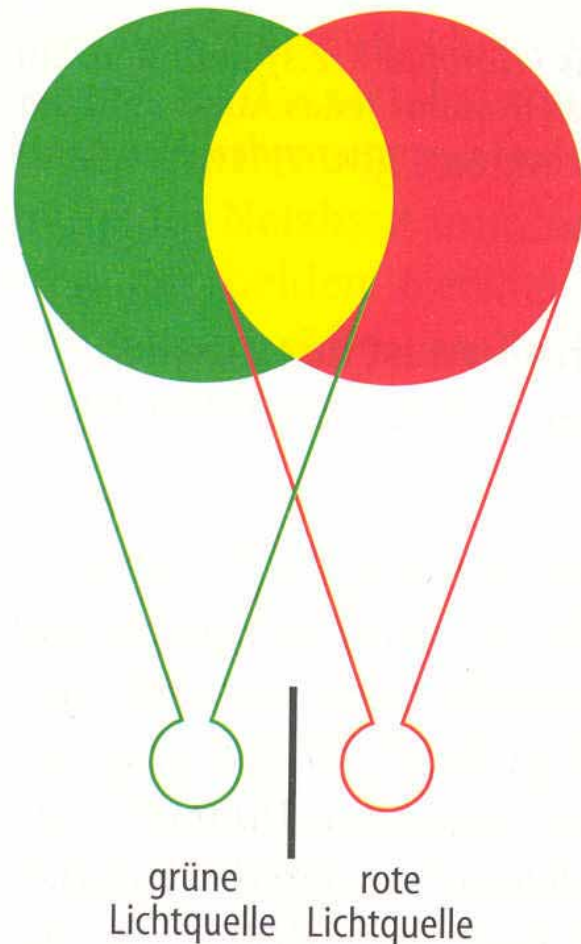


Ishihara-Tafeln



Anomaloskop von Nagel

Additive Farbmischung

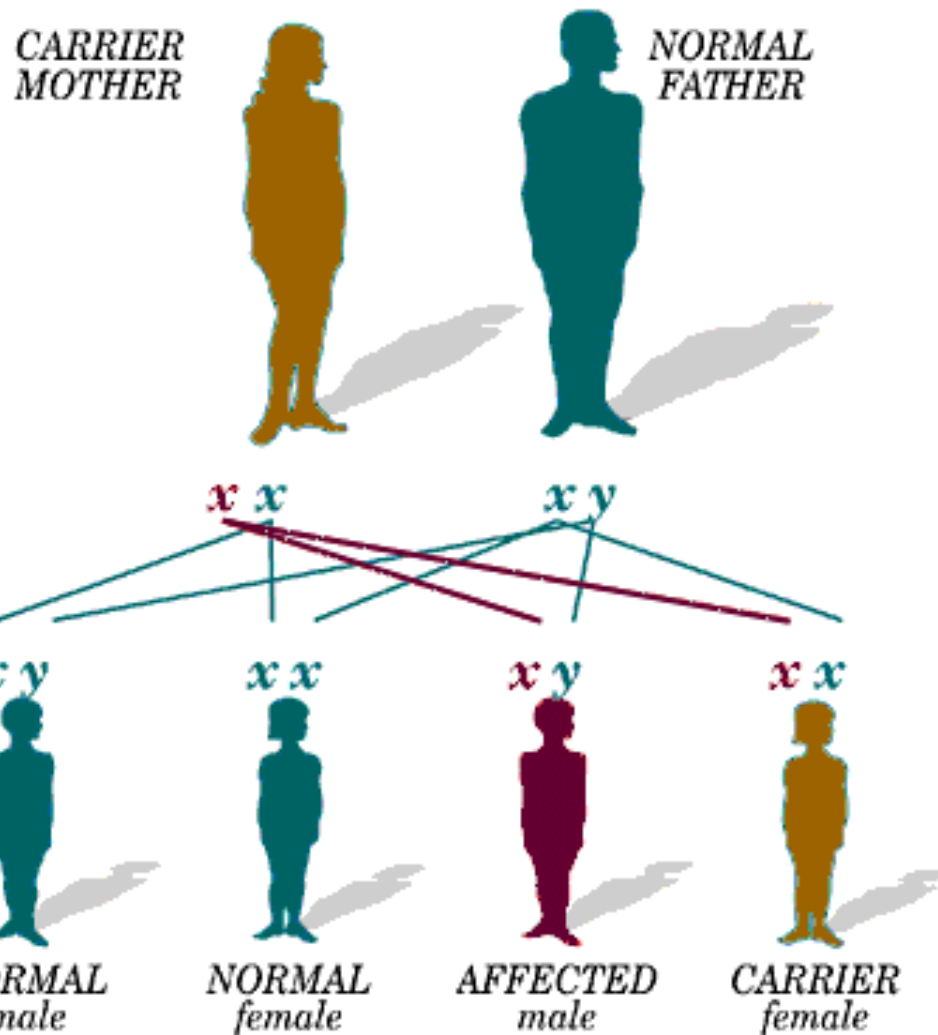


- Foveale additive Farbmischung eines 2 Grad grossen Feldes
- Rot (671 nm) + Grün (546 nm) ~ gelb (589 nm)
- Normal: Grün/Rot ~ 1
AQ = 0.7–1.4
- Protanomalie (mehr rot):
AQ = 0.6–0.11
- Deutanomalie (mehr grün):
AQ = 2.0–20.0

Verbreitung von Farbfehlsichtigkeiten

| | Männer | Frauen |
|-------------------------------|---------------|---------------|
| Protanopen (keine L-Zapfen) | 1.0 % | 0.02 % |
| Deuteranopen (keine M-Zapfen) | 1.1 % | 0.01 % |
| Tritanopen (keine S-Zapfen) | 0.002 % | 0.001 % |
| Protanomal | 1.0 % | 0.02 % |
| Deuteranomal | 4.9 % | 0.38 % |
| Tritanomal | 0.002 % | 0.001 % |
| Stäbchen-Monochromaten | 0.003 % | 0.002 % |

Vererbung der Farbfehlsichtigkeit



Mary Challinor

Rot-Grün-Blindheit wird auf dem X-Chromosom vererbt

Männer haben nur ein X-Chromosom

Daher ist Farbenblindheit bei Männern wesentlich häufiger als bei Frauen

Trägerinnen des defekten X-Chromosoms weisen manchmal eine ganz leichte Farbfehlsichtigkeit auf

Wiederholung: Zapfen

- Farbe ist nicht gleich Wellenlänge
- Die erste Stufe der Verarbeitung von Farbe läuft in drei verschiedenen Typen von Zapfen ab
- Bei Farbfehlsichtigen fehlen meistens entweder die Rot- oder die Grün-Zapfen
- Diese Verarbeitungsstufe wurde von Young und Helmholtz entdeckt

Farbwahrnehmung

- Farbe ist eine Empfindung
- Im Auge gibt es drei Arten von Zapfen, die Licht in Nervenimpulse umwandeln
- Diese werden in den Ganglienzellen der Retina in Gegenfarben transformiert
- Im Gehirn werden diese Erregungsmuster dann als Farben interpretiert