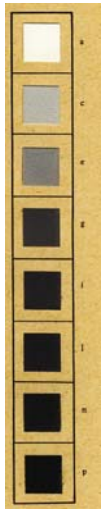
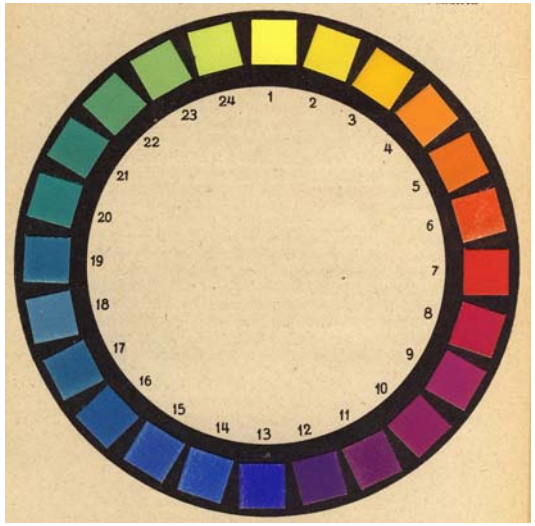
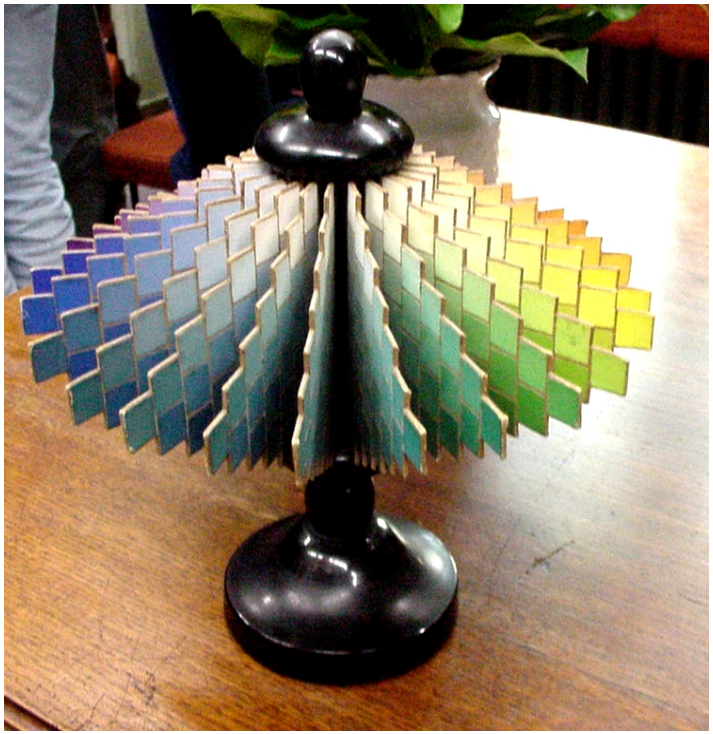
Wilhelm Ostwalds Farbenlehre

- von der Grauleiter zum empfindungsgemäßen Farbkörper







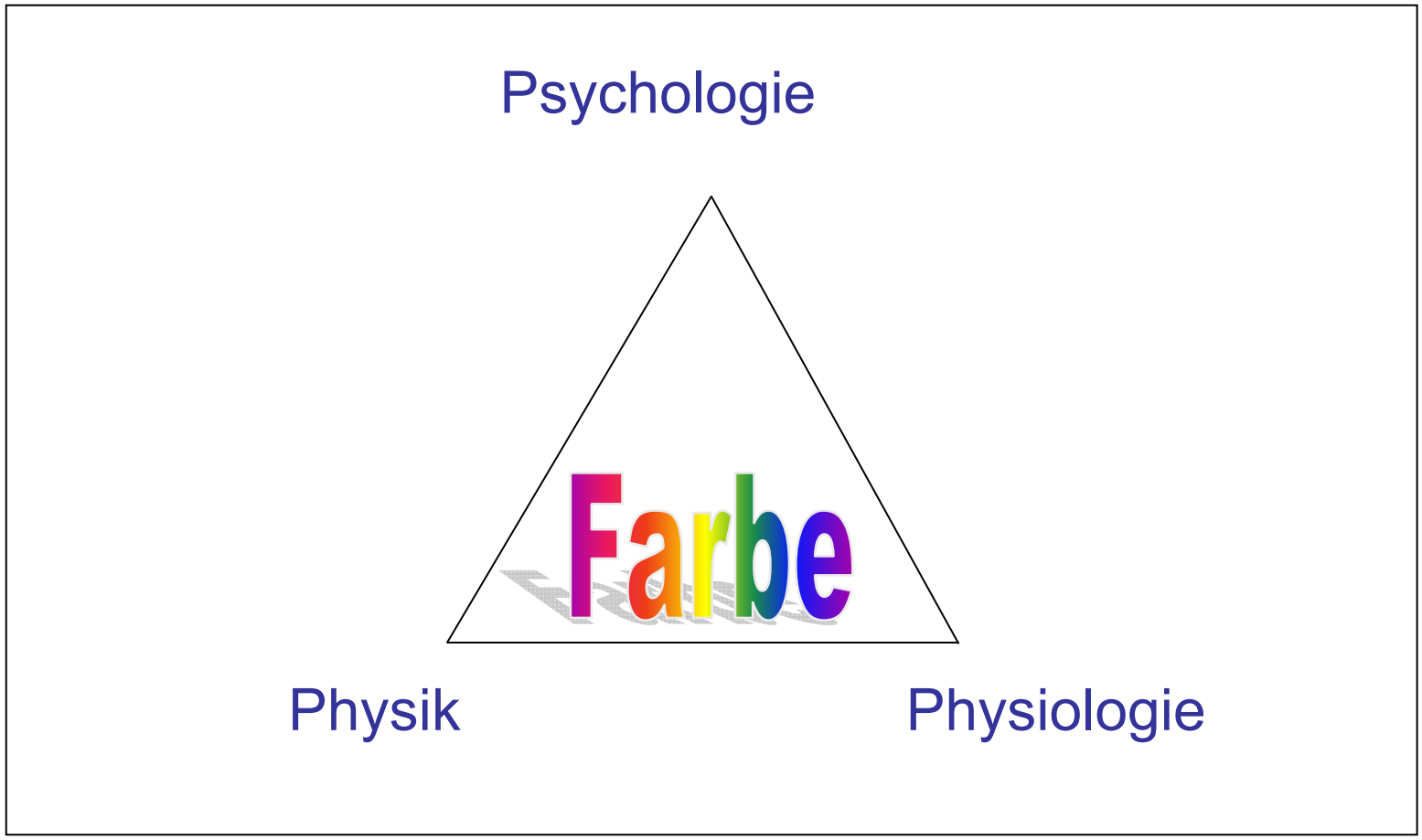
W. Oehme, J. Gabke, A. Märcker

Universität Leipzig

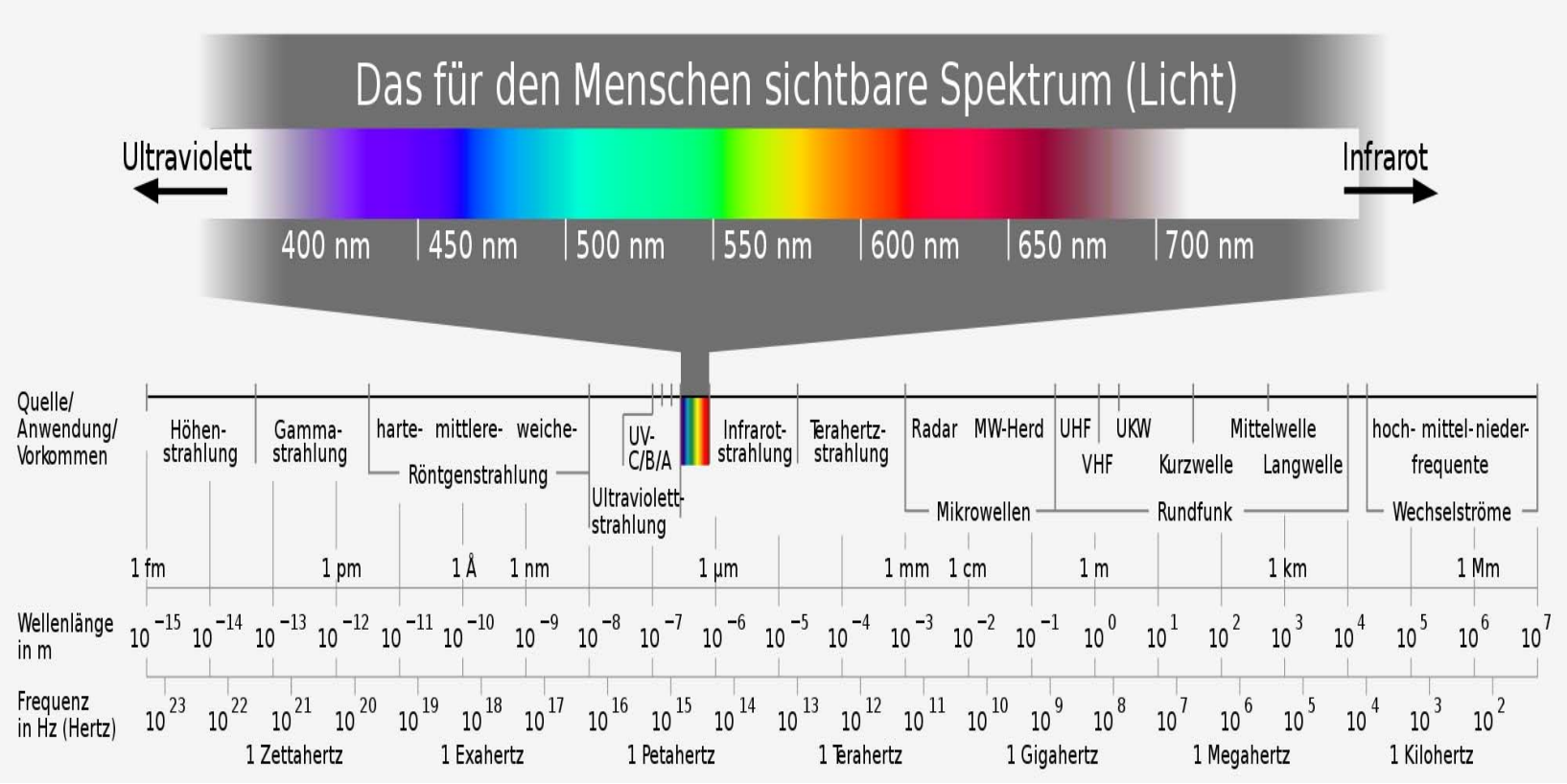
Inhalt

- Einstieg
- Newtons Farbexperimente und ihre Bedeutung
- Goethes Farbenlehre
- Zwischengedanken: Drei- und Vierfarbentheorie
  Wilhelm Ostwalds Umfeld
- Wilhelm Ostwalds Weg zu Farbkegel und Farbnormung
- Reflexion und Ausstieg

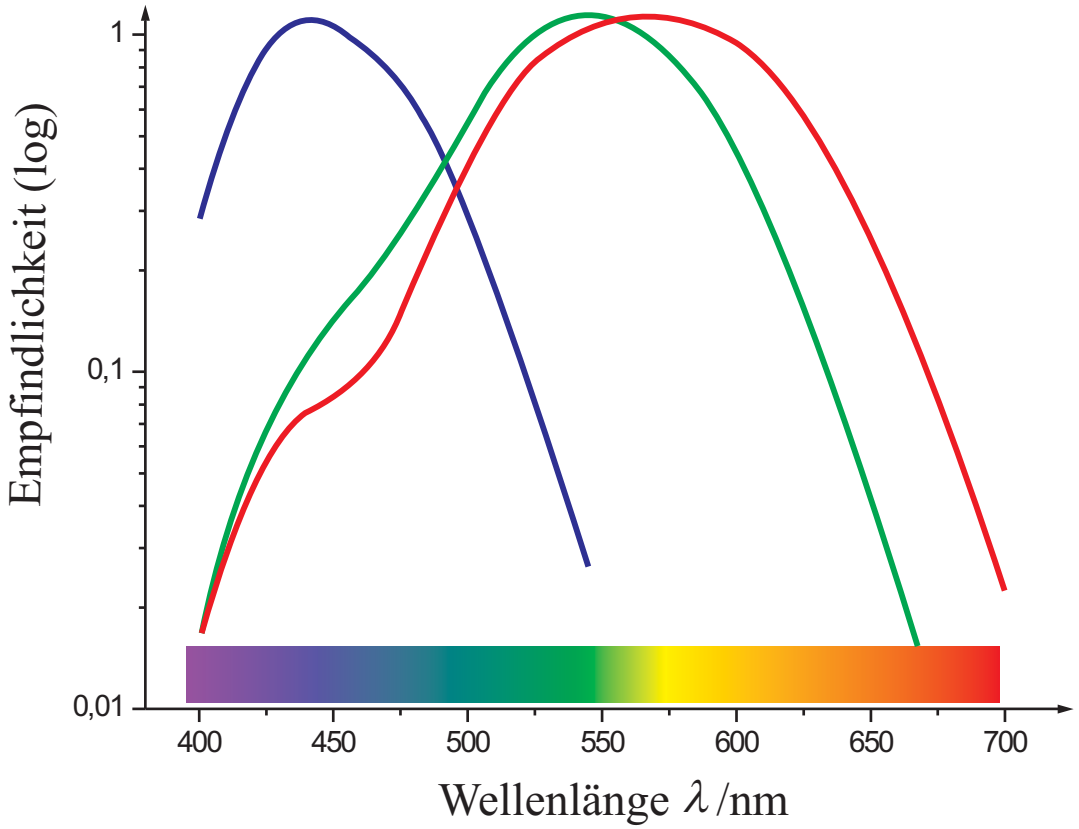
Farbe als Sinnesempfindung



Sichtbares Licht



Rezeptoren auf der Netzhaut



Netzhaut: 5 Millionen Zapfen
120 Millionen Stäbchen (alle in Peripherie)
Sehpigmente: Opsin trägt lichtempfindliches Molekül Retinal

Wilhelm Ostwald (1853 – 1932)

1887 Professur in Leipzig
Zusammentreffen mit Karl Theodor Fechner
1906 Rückzug nach Großbothen
1909 Nobelpreis für Chemie
(chemische Reaktionen, Katalyse)

Zitat aus einen Brief an Svante Arrhenius (1919):

Ich habe inzwischen die Farbenlehre von Grund aus neu erarbeitet
und bin jetzt so weit in der quantitativ begründeten Chromatik gelangt,
daß ich auch das alte Problem der Harmonie der Farben grundsätzlich gelöst habe.

Ich habe ungefähr fünf Jahre unausgesetzt und mit aller Anspannung
an dieser Sache gearbeitet und glaube, es ist das beste geworden,
was ich in meinem Leben gemacht habe.

Ausgewählte historische Bezüge

Antike

Pythagoras (ca. 550 v. Chr.): Farben werden Tönen zugeordnet

Platon (ca. 400 v. Chr.): Sehstrahlen,
Weiß – Schwarz, Rot – Goldgelb („Glänzendes“)

Aristoteles (ca. 350 v. Chr., Schüler Platons): Farben im Tagesverlauf,
Weiß – Gelb – Rot – Violett – Grün – Blau – Schwarz

Renaissance

Leonardo da Vinci (1452 – 1519):

farbige Schatten

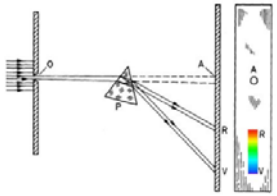
6 Primärfarben	unbuntes Paar:	Weiß – Schwarz
	2 bunte Paare:	Blau – Gelb
		Rot – Grün

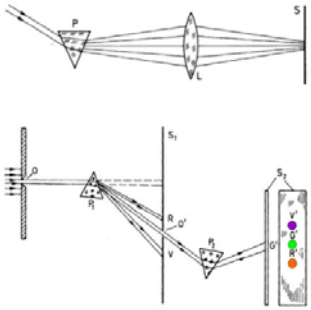
Newtons Farbexperimente und ihre Bedeutung

Isaac Newton
(1643 – 1727)

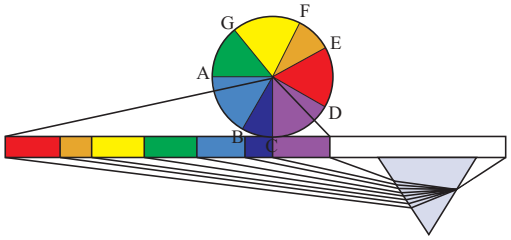
Drei berühmte Grundexperimente

- Zerlegung weißen Lichts
- Wiedervereinigung
- keine weitere Zerlegbarkeit



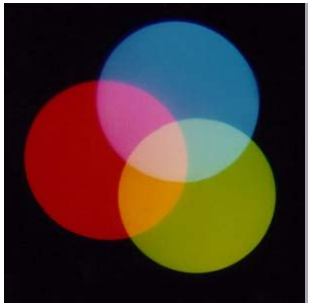


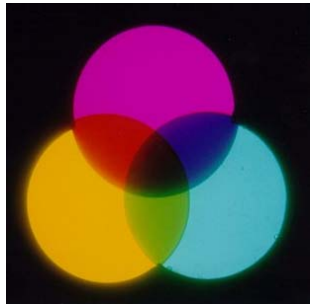
Spektrum und Farbkreis



7 Farben – 7 Töne

Additive und subtraktive Farbmischung





Komplementärfarben

blauviolett

gelb

↔ weiß

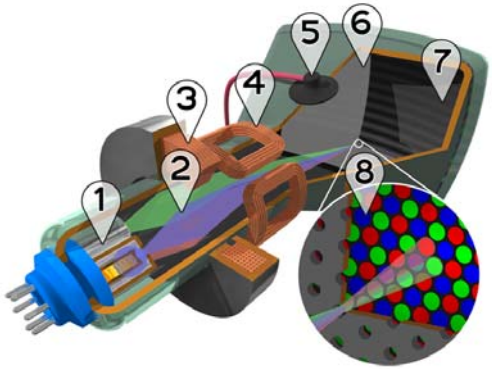
Körperfarben

weißes Licht
und
grünes Licht

Anwendung der additiven Farbmischung

- Farbfernsehen, Computermonitore

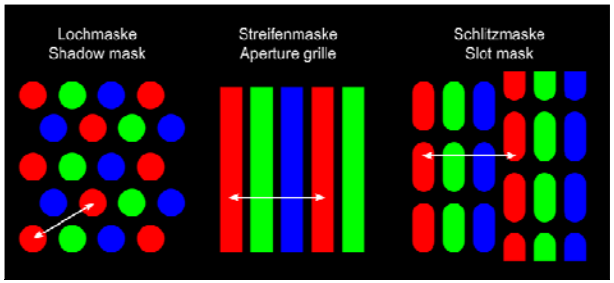
  (Elektronenstrahl)



Prinzip

1. Glühkathoden
2. Elektronenstrahlen
3. Bündelungsspulen
4. Ablenkungsspulen
5. Anodenanschluss
6. Lochblende
7. Phosphorschicht mit roten, grünen und blauen Subpixeln
8. Nahansicht der phosphorbeschichteten Innenseite des Bildschirms

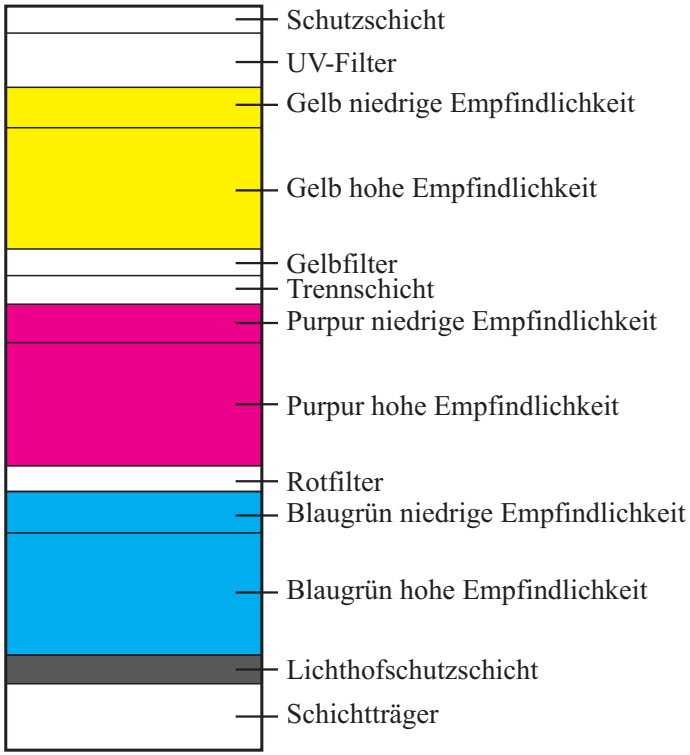
- LCD-Bildschirme
- Digitalkamera



Bildschirm

Anwendung der subtraktiven Farbmischung

- Mischung von Farbpigmenten
- Farbfilm
- Farbdrucker (Gelb, Cyan, Magenta)

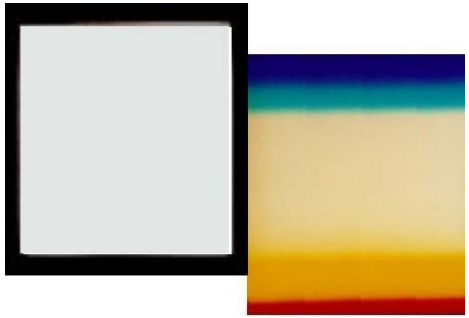


Schichten des Farbfilms

Goethes Farbenlehre

Johann Wolfgang Goethe
(1749 – 1832)

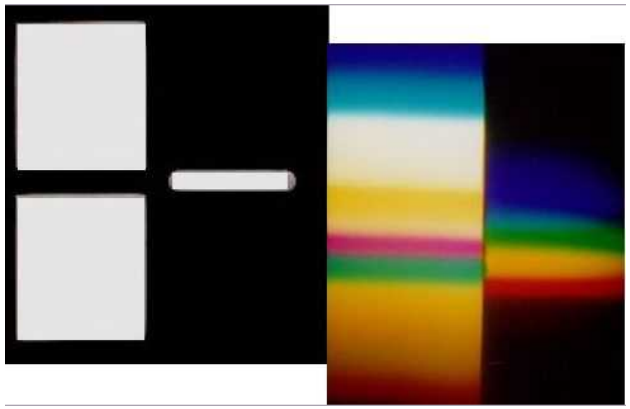
Experimente mit dem Prisma:
Kantenspektren und Farbkreis
Hell-Dunkel-Kampf und Farben

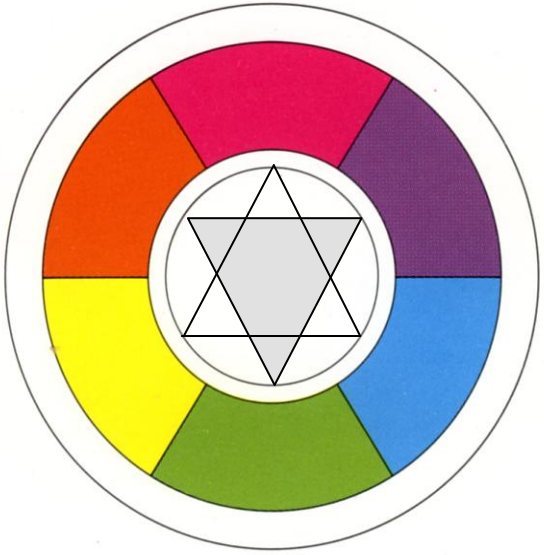


Experimente mit dem bloßen Auge:
Farbige Schatten,
farbige Nachbilder,
Farbkontraste

Goethes Farbkreis

Komplementäre Spektren

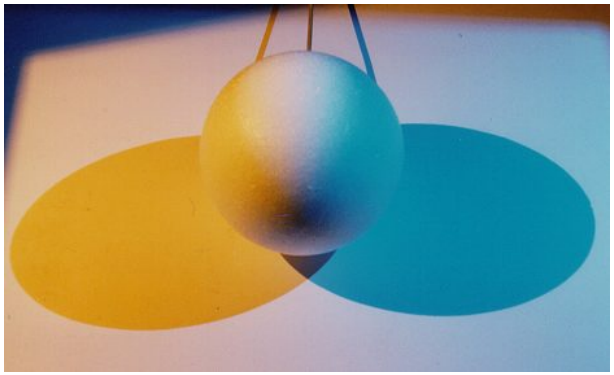


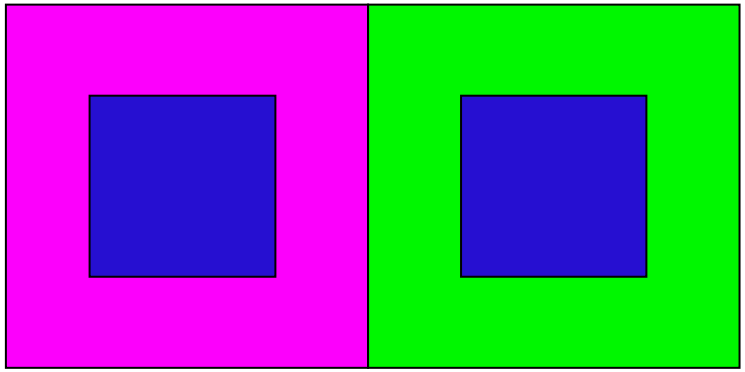


Polarität und Steigerung

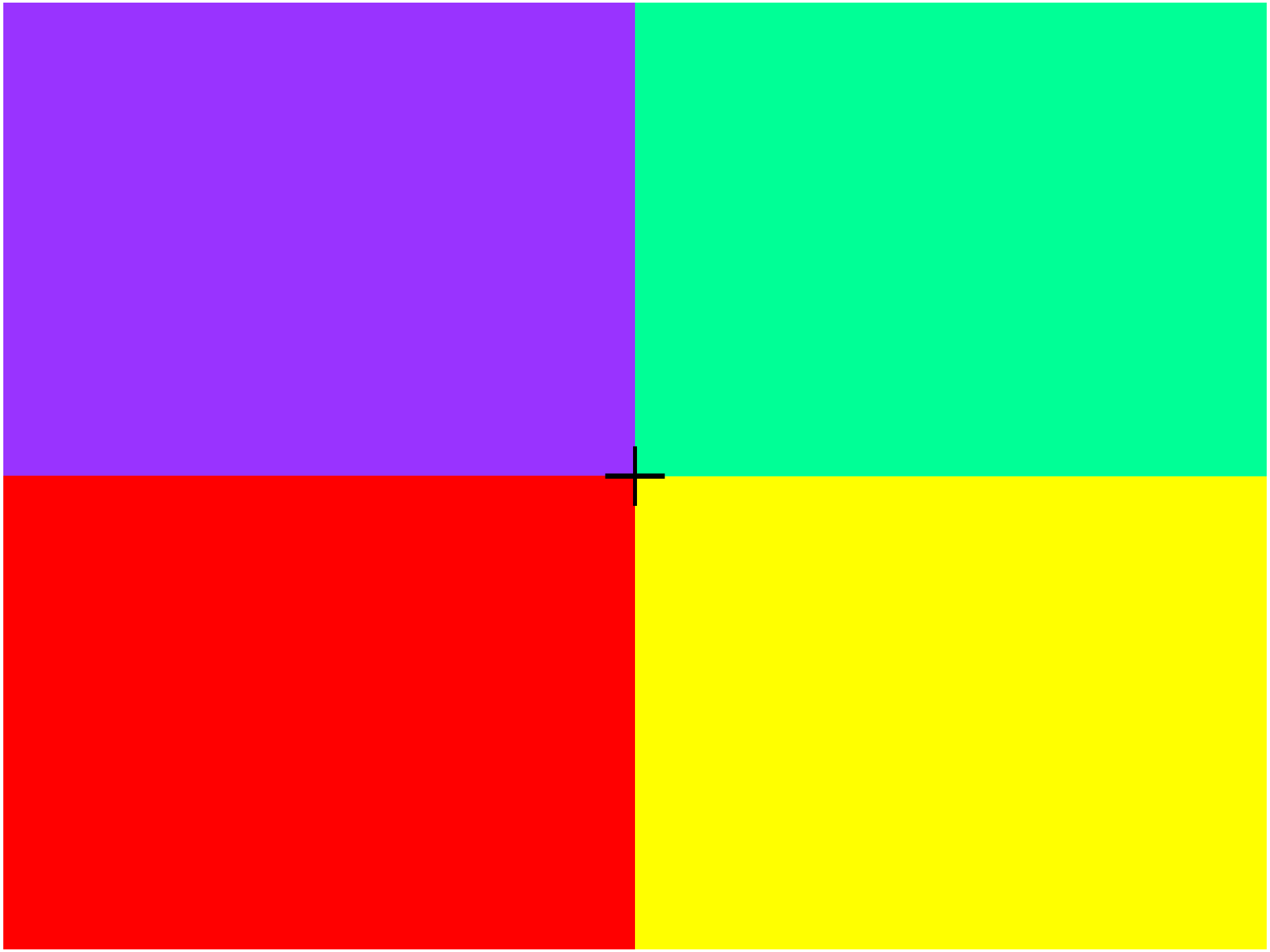
nach: R. Matthaei, Goethes Farbenlehre, Otto Maier Verlag Ravensburg

Farbige Schatten, farbige Nachbilder und Farbkontraste

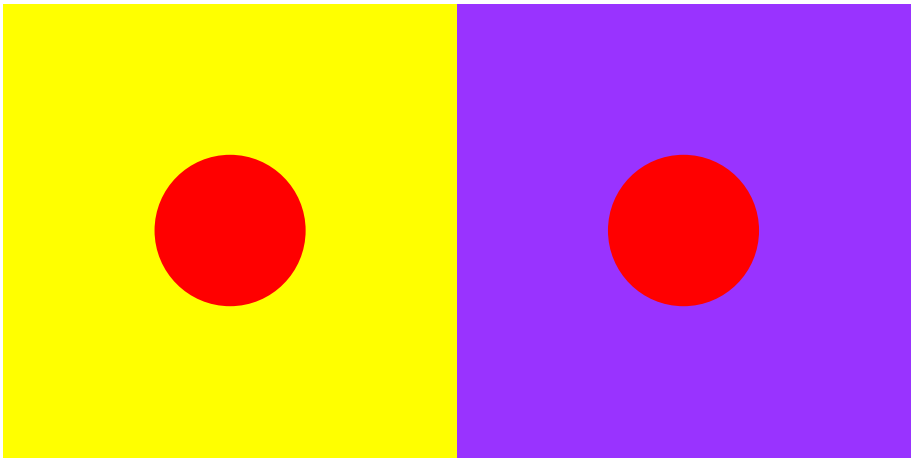




Wir sind gefragt!

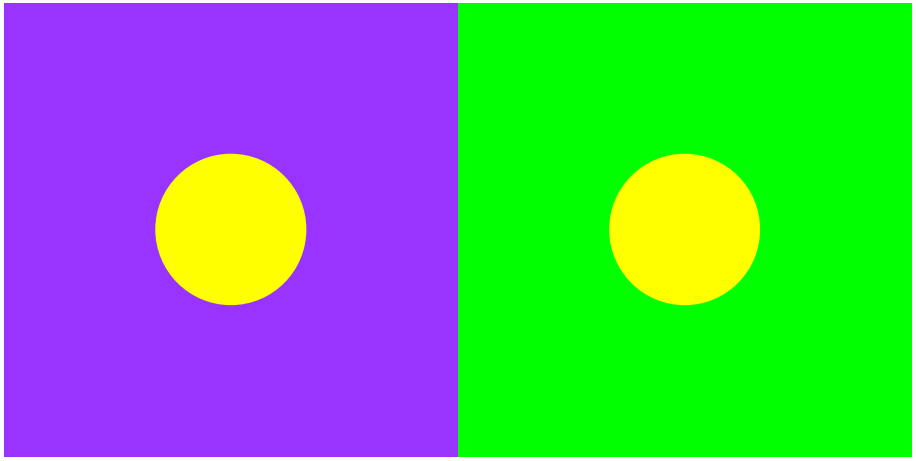


Simultankontrast



Gleiches Rot?

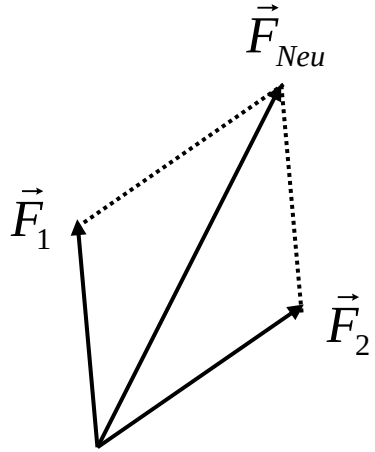
Sauberes und
schmutziges Gelb?



Zwischengedanken: Drei- und Vierfarbentheorie

Thomas Young (1773 – 1829)

3 Farbzentren des Auges

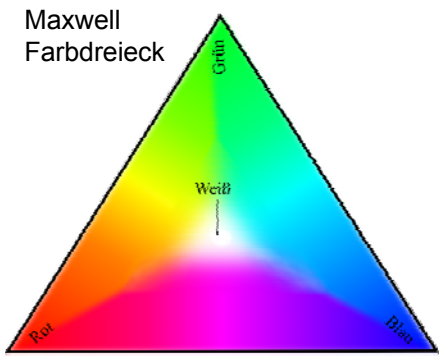


Hermann Graßmann (1809 – 1877)

4 Farbgesetze

James C. Maxwell (1831 – 1879)

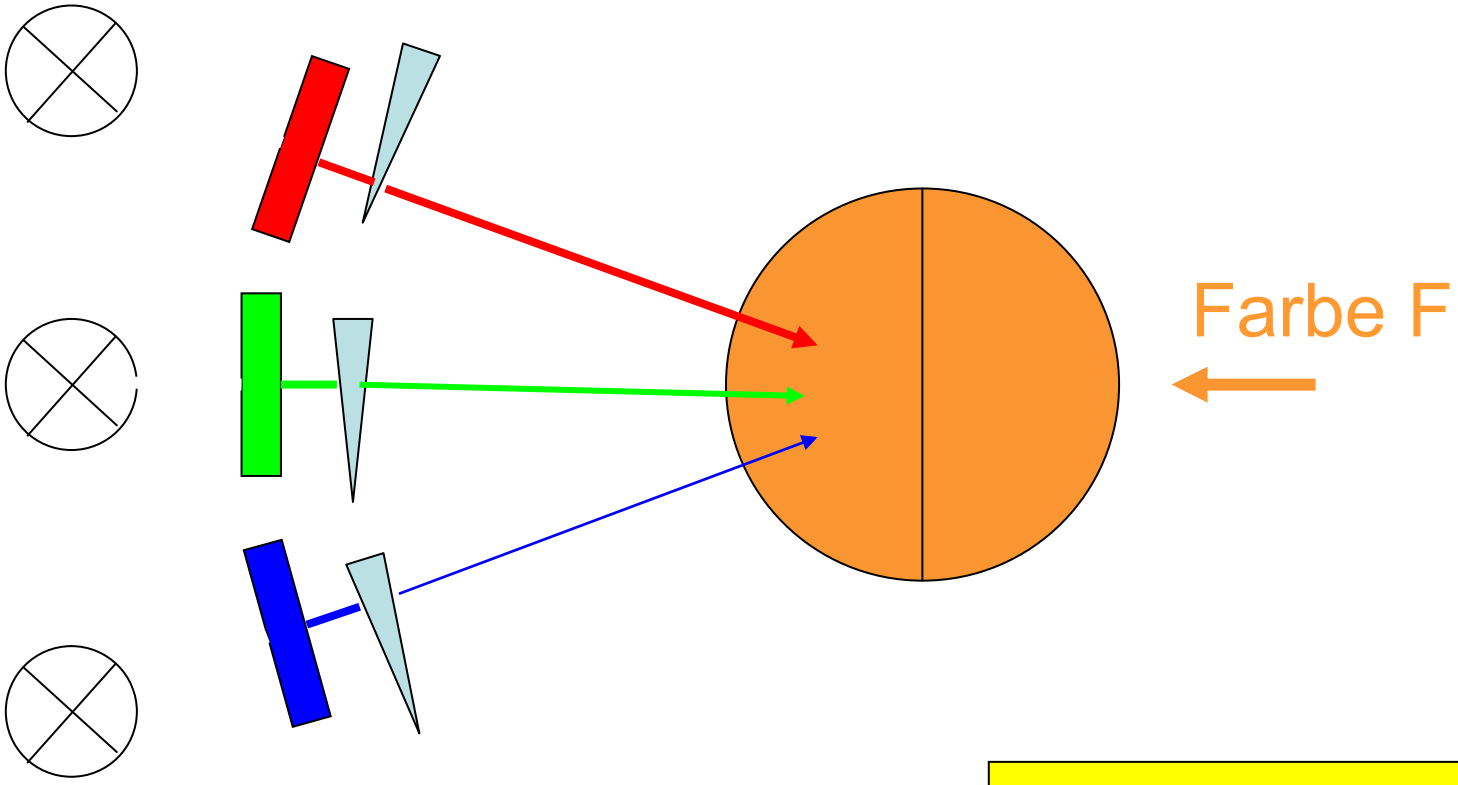
Farbdreieck



Hermann L. F. v. Hermholtz (1821 – 1894)

Helmholtz-Koordinaten: Farbton, Sättigung, Helligkeit

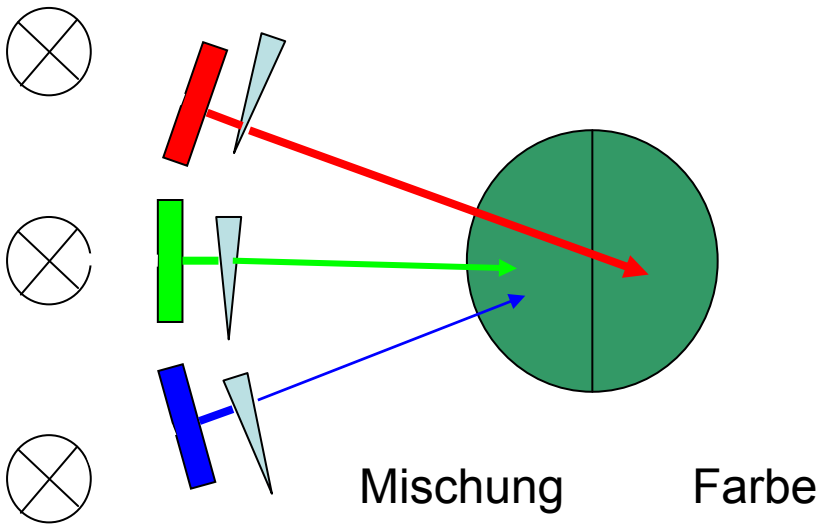
Farbmischer nach H. v. Helmholtz



r*R+g*G+b*B=F

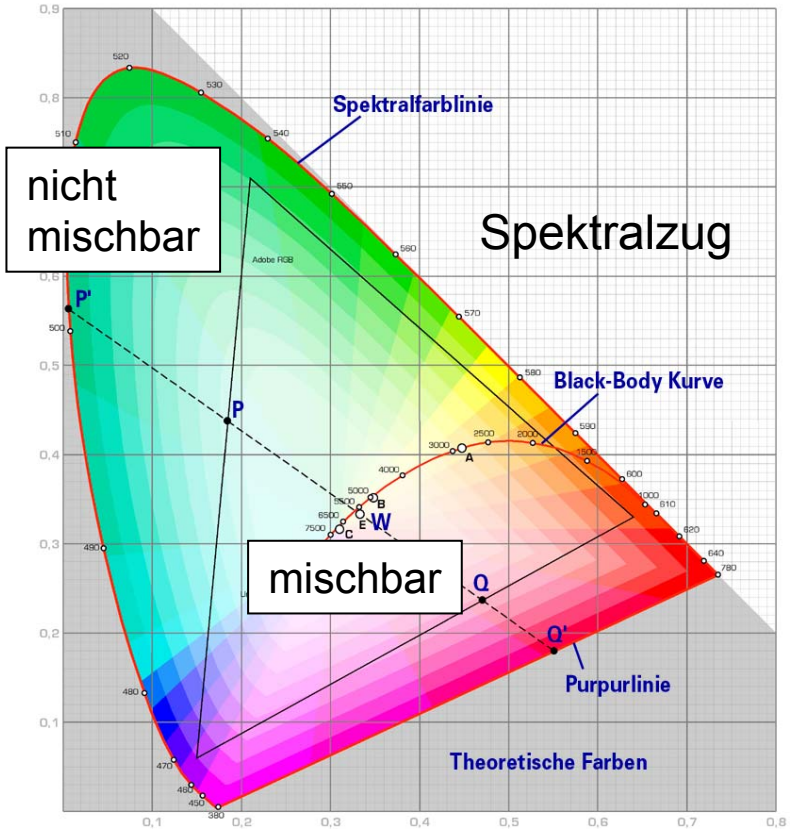
Farbmischung

Problem: uneigentliche Farbmischung



$$- r*R+g*G+b*B=F$$

Hilfsmittel: CIE-Diagramm mit Spektralzug



Ausweg: CIE-Koordinaten X Y Z

Wilhelm Ostwalds Leipziger Umfeld

Ernst Heinrich Weber
(1795 – 1878)

Gustav Theodor Fechner
(1801 – 1887)

Wilhelm Ostwald
(1853 – 1932)
1887 Professur in Leipzig

Ewald Hering (1834 – 1918)
studierte in Leipzig bei Weber und Fechner
1895 Carl Ludwigs Nachfolger in Leipzig

Weber-Fechner-Gesetz:
Die Empfindungsstärke wächst langsamer als die Reizstärke.

$$E_2 - E_1 = c \cdot (\ln R_2 - \ln R_1)$$

Vierfarbenlehre oder Gegenfarbentheorie

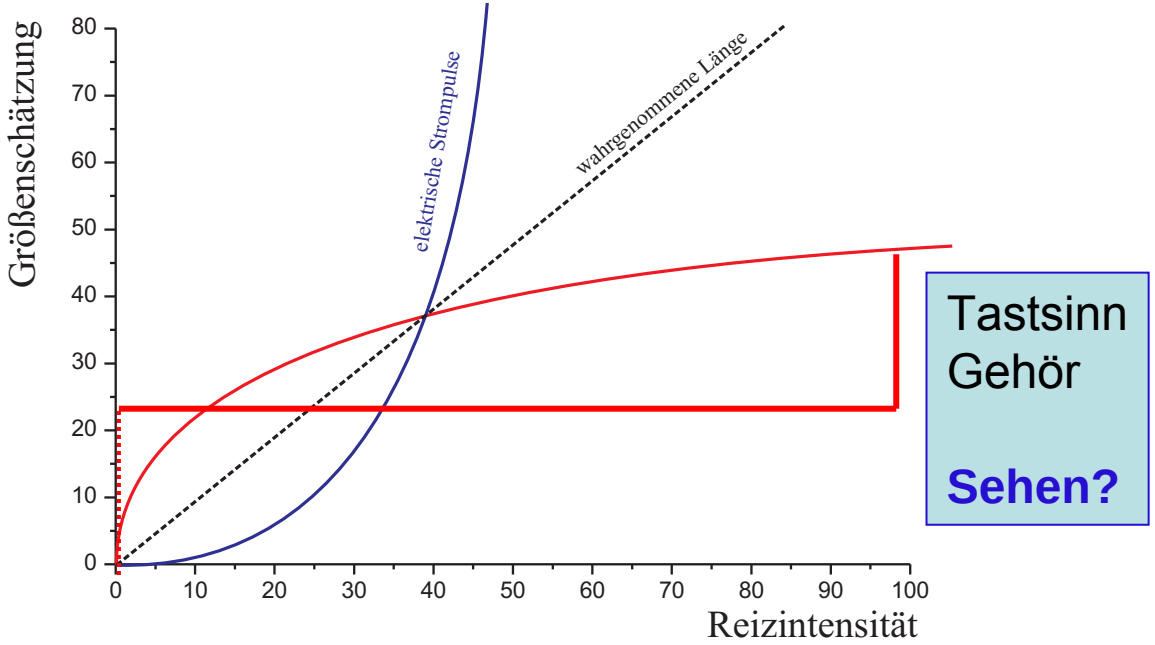
Weber-Fechner-Gesetz

100g 110g

Δm=10g

200g 220g

Δm=20g



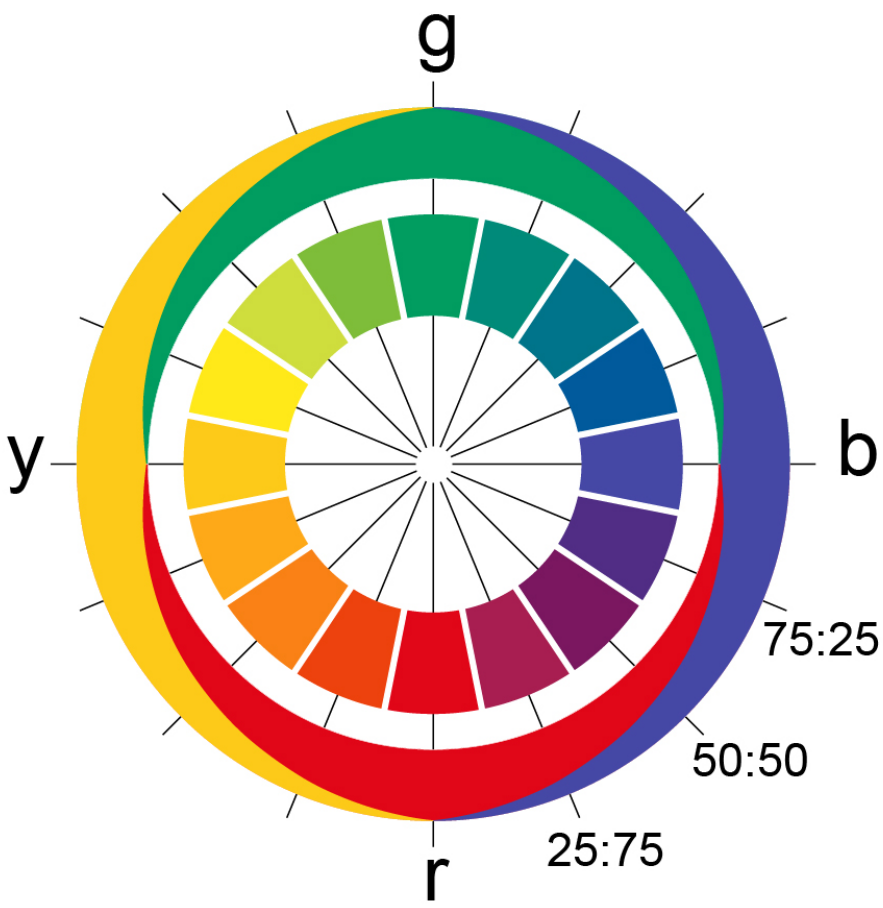
$$E_2 - E_1 = c \cdot (\ln R_1 - \ln R_2) = c \cdot \ln\left(\frac{R_2}{R1}\right)$$

Empfindungstärke Reizstärke

nach: Goldstein, Wahrnehmungspsychologie, Spektrum Verlag

Farbkreis und Gegenfarbenpaare

Ewald Hering (1834 – 1918)



Sehen und Hören

- Töne können getrennt wahrgenommen werden.
- Farbanteile können nicht getrennt wahrgenommen werden.

Vergleich: Kontinuierliches Spektrum und Linienspektrum

Verallgemeinerung: Als weiß oder farbig empfundenes Licht kann unterschiedlich zusammengesetzt sein (metamere Farben).

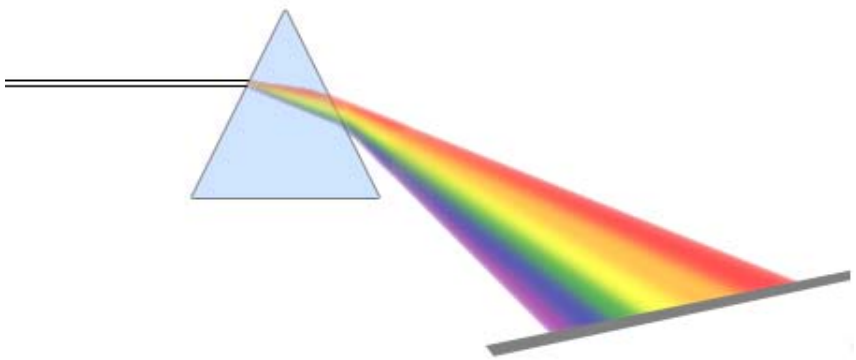
Frage: Gilt das Weber-Fechner-Gesetz auch für das Sehen?

Kontinuierliches Spektrum und Linienspektrum

Prisma und optisches Gitter

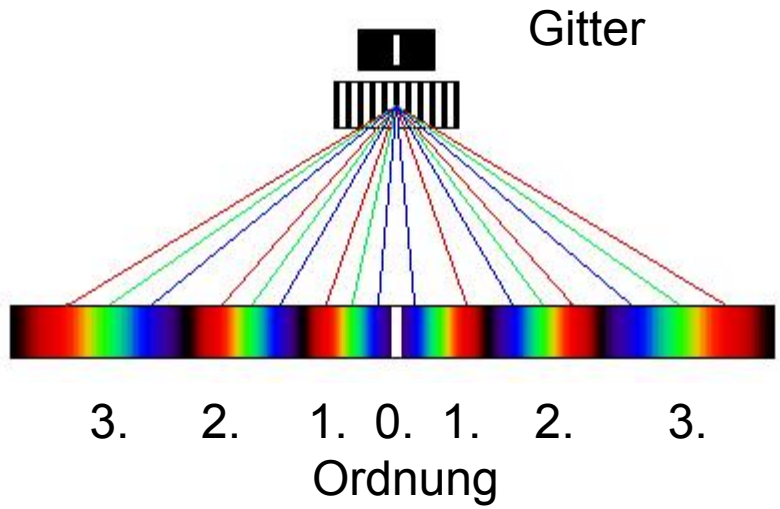
Prisma

Brechung



Optisches Gitter

Beugung

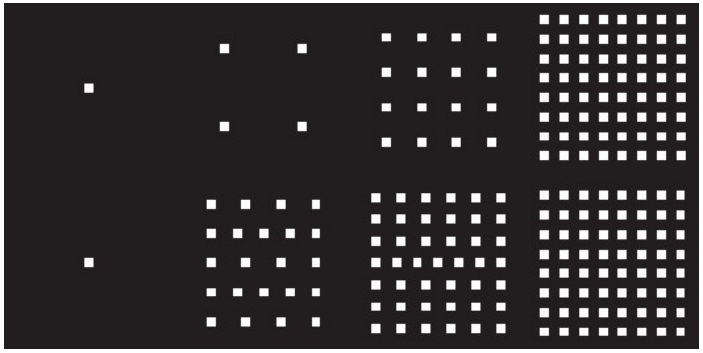


$$n \cdot \lambda = g \cdot \sin \alpha$$

Der Weg zur Grauleiter

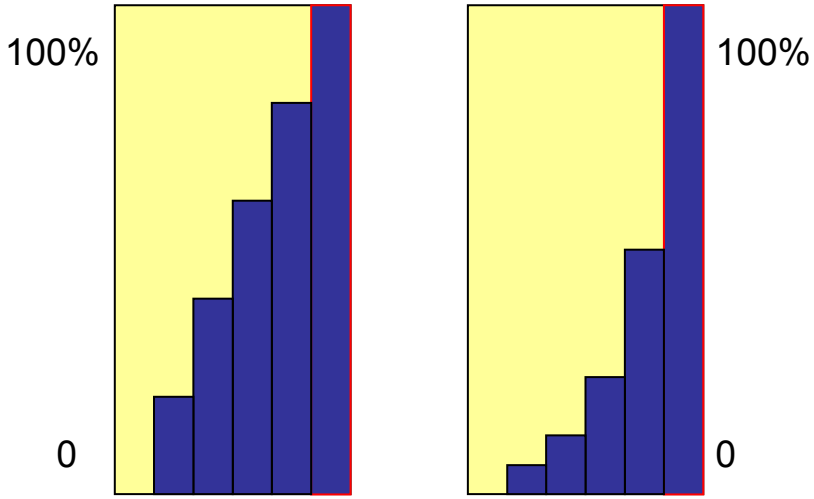
„Lichttreppe“

Geometrische Reihe: konstanter Faktor 4



Arithmetische Reihe: konstante Differenz 21

Verdünnung



Arithmetische Reihe
Differenz: 20%

Geometrische Reihe
Faktor: 1/2

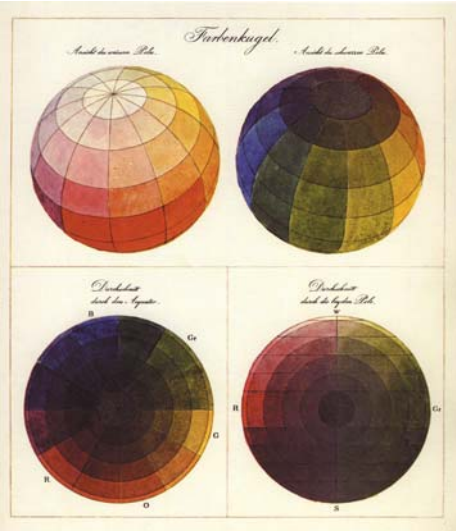
Wilhelm Ostwalds Farbenlehre

Wilhelm Ostwald
(1853 – 1932)

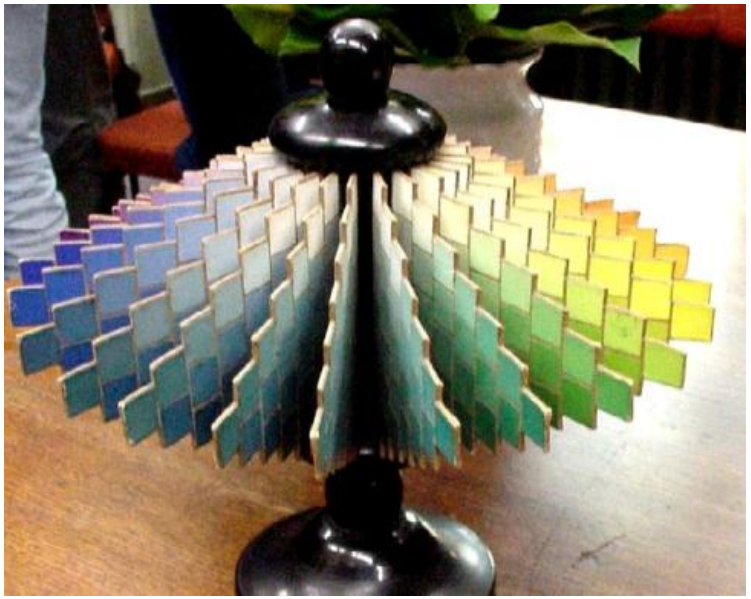
Suche nach dem empfindungsgemäßen Farbkörper:

Körperfarben, Komplementärfarben

Farbkoordinaten: Schwarz – Weiß – Vollfarbe

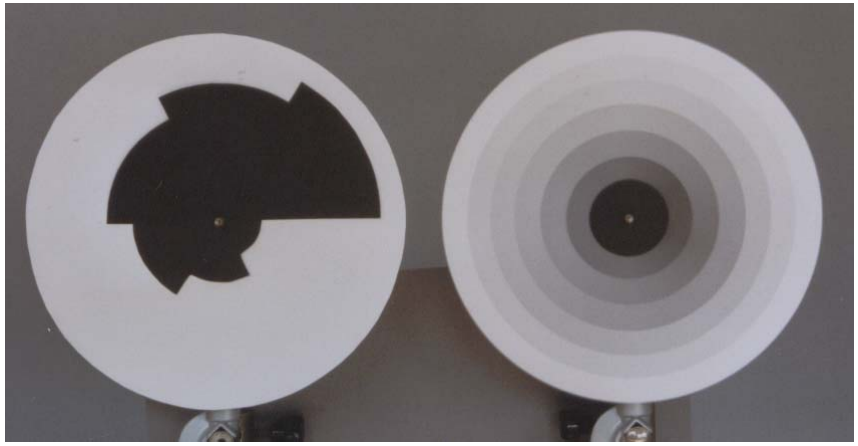


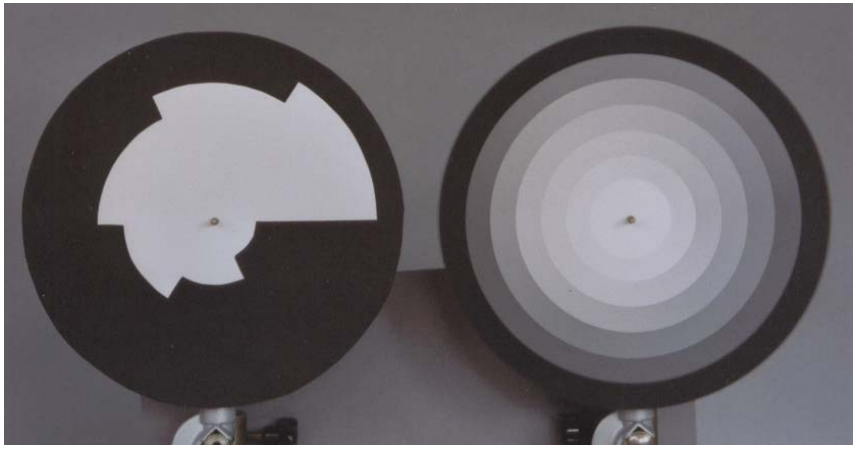
Farbkugel
Philipp Otto Runge (1777 - 1810)

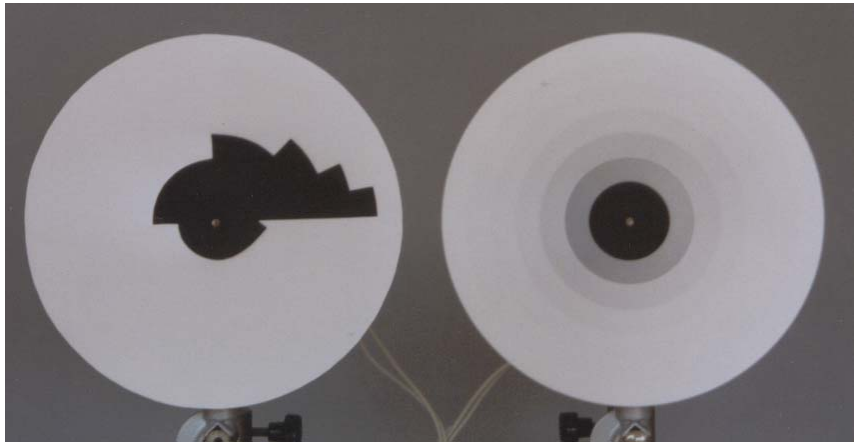


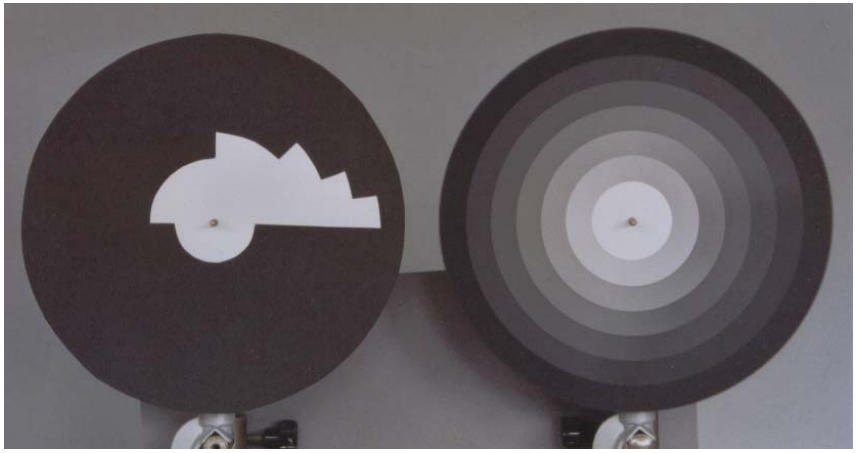
Farbkegel

Weiß-Schwarz-Übergänge
(Grauleiter)

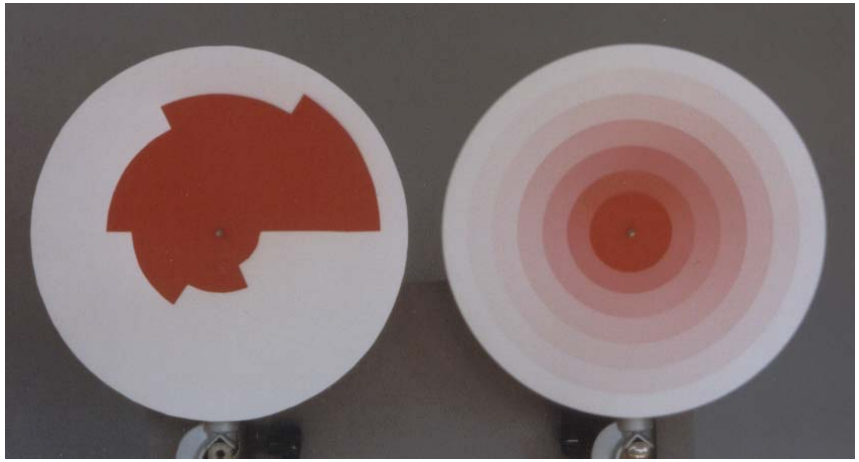


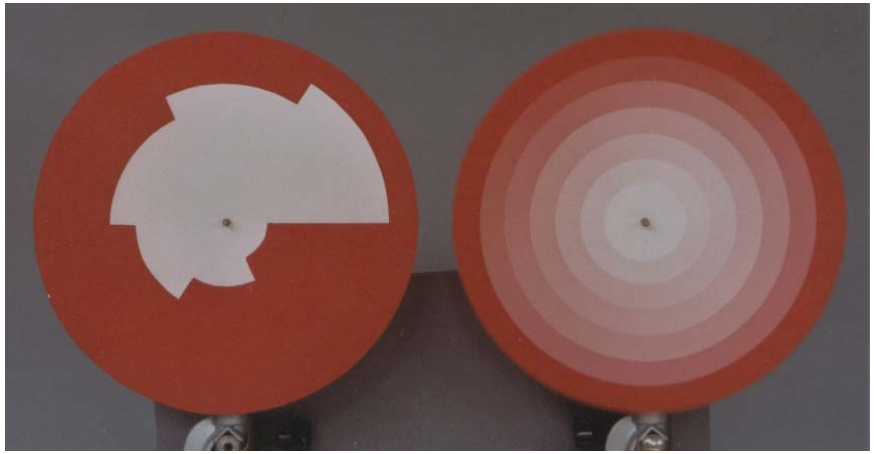


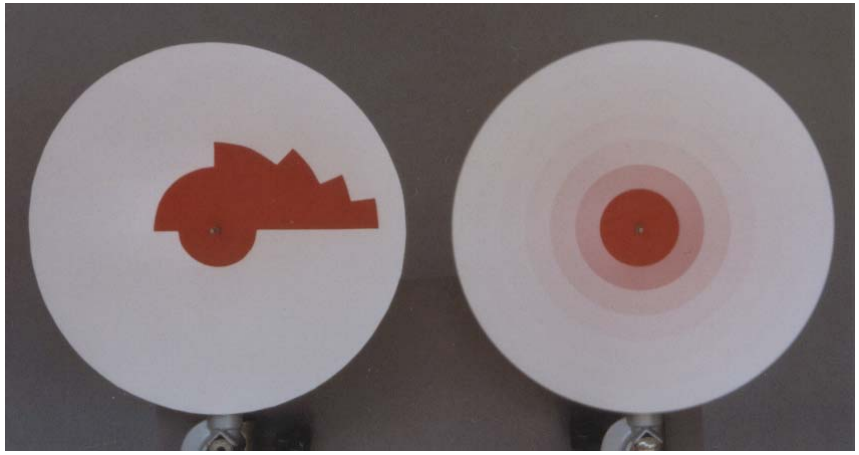


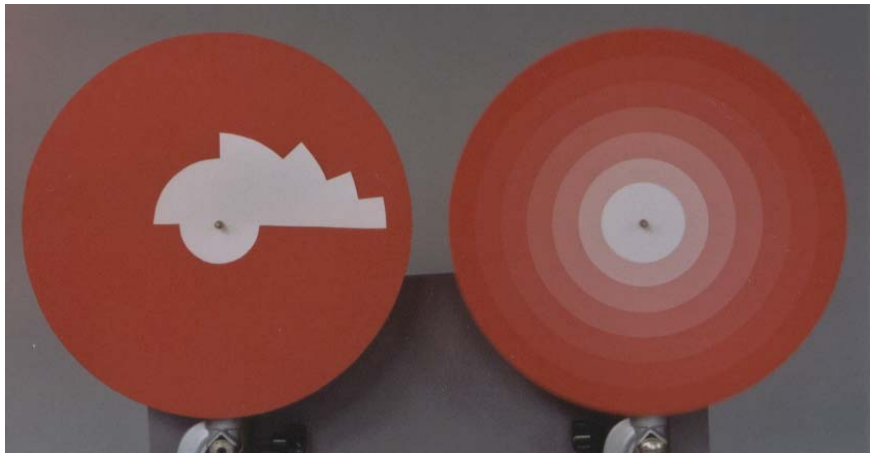


Weiß-Vollfarbe-Übergänge
(hellklare Farben)

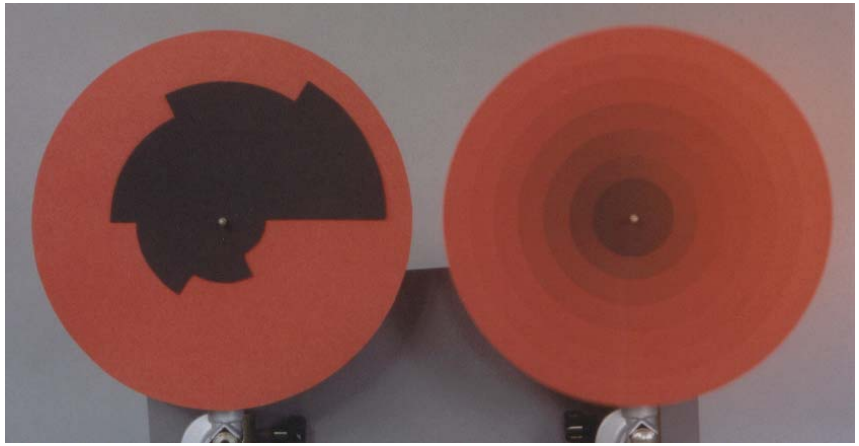


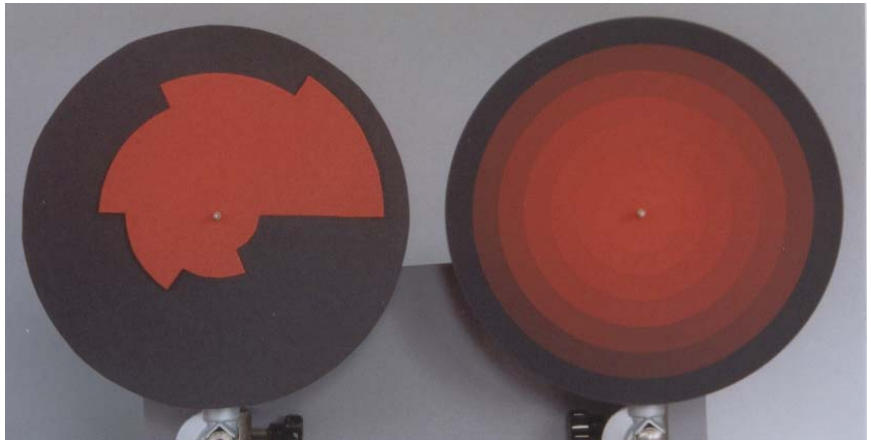


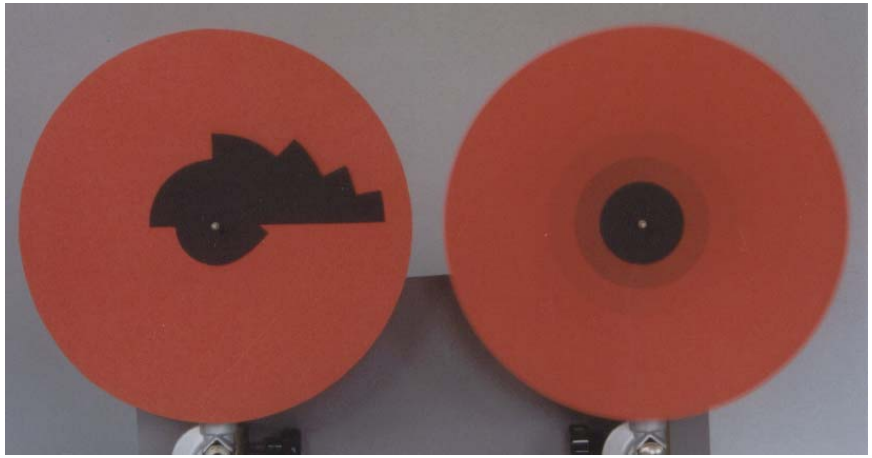


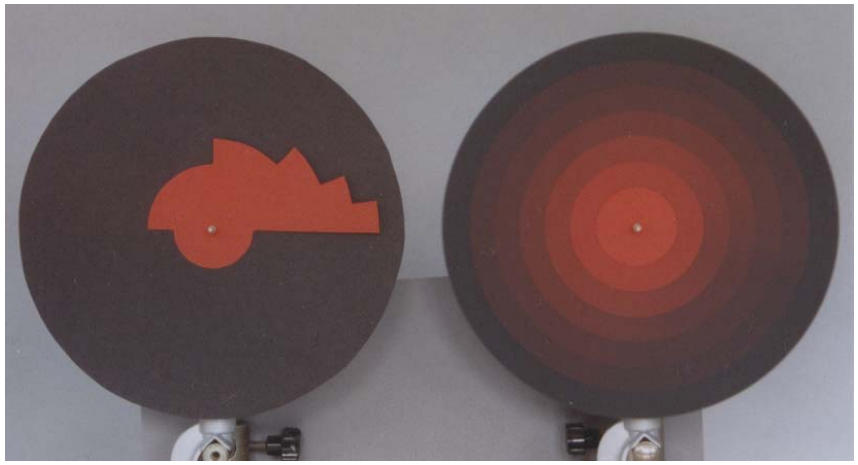


Schwarz-Vollfarbe-Übergänge
(dunkelklare Farben)

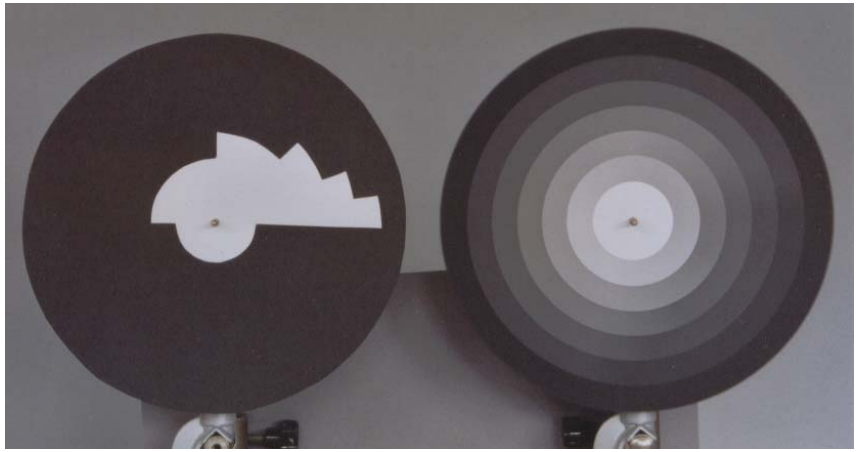


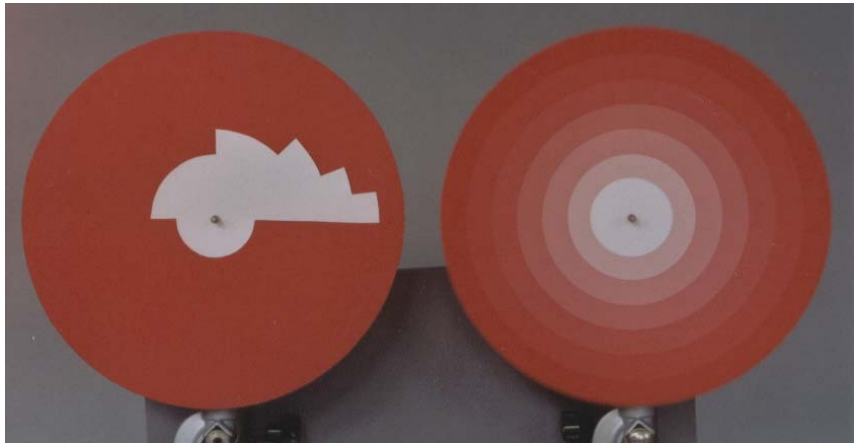


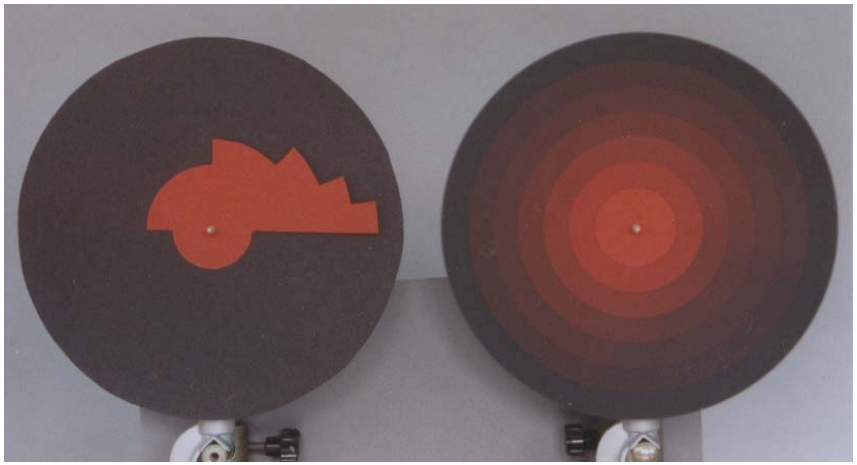




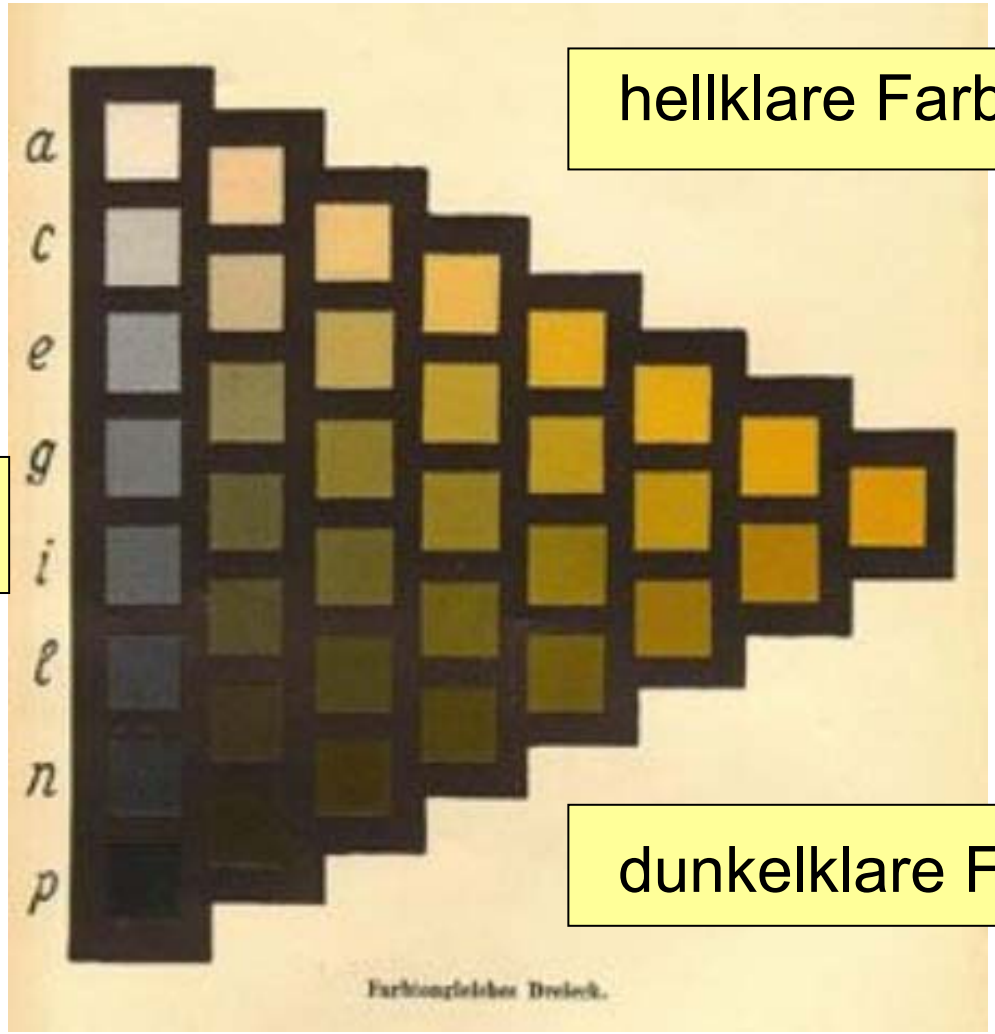
empfindungsgemäße Übergänge







Farbtongleiches Dreieck



Weiß

hellklare Farben

Grauleiter

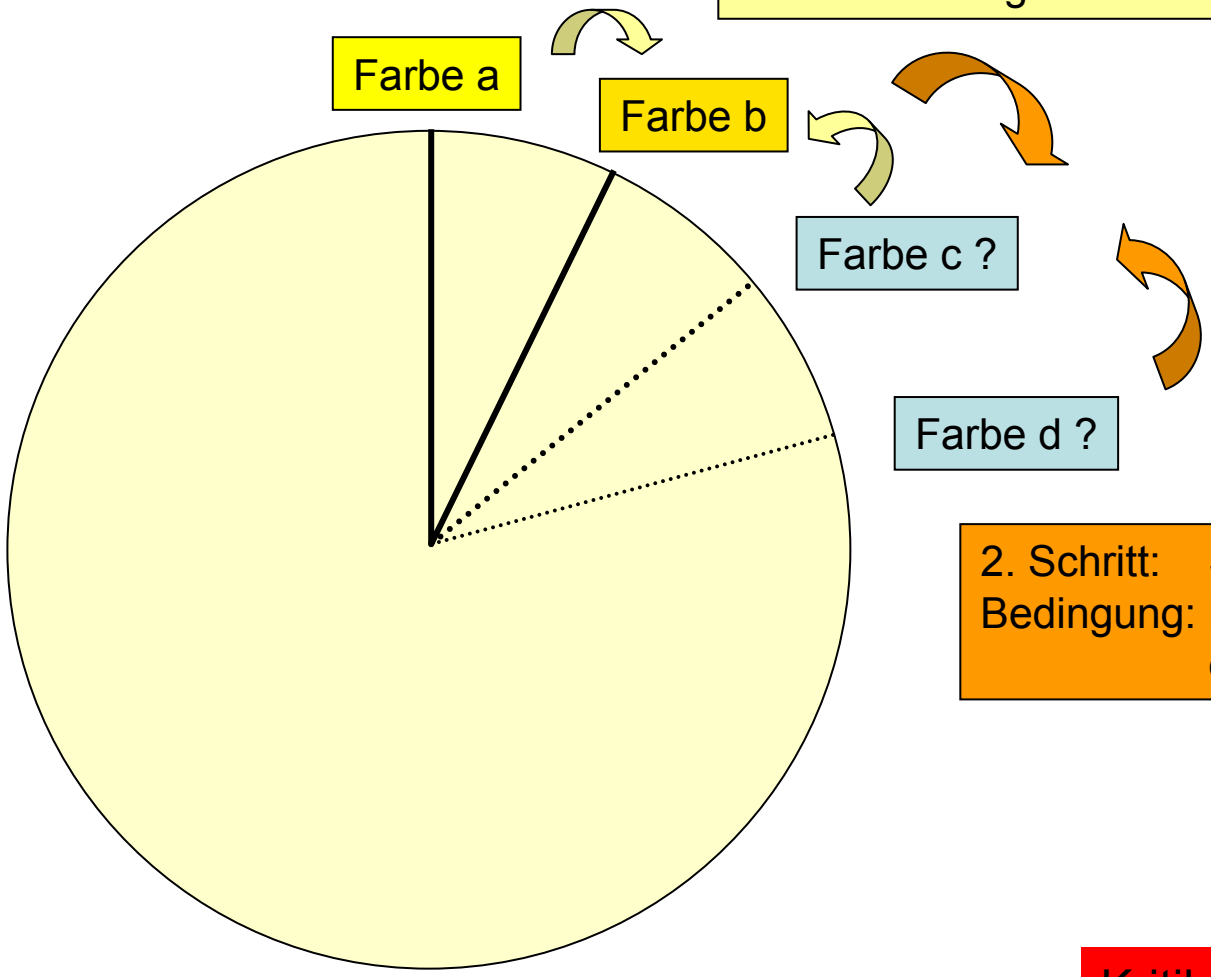
Vollfarbe

Schwarz

dunkelklare Farben

Konstruktion des Farbkreises

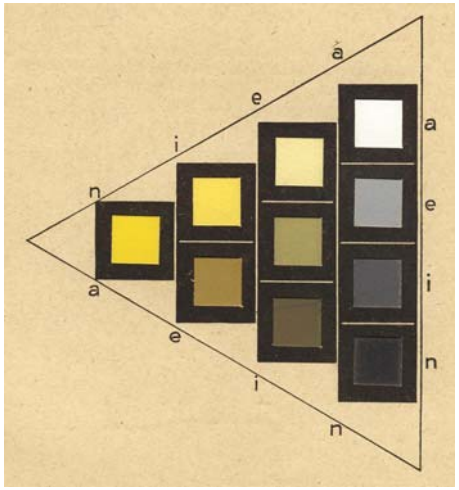
1. Schritt: Suche nach Farbe c
Bedingung: Mischung der Farben a und c ergibt Farbe b

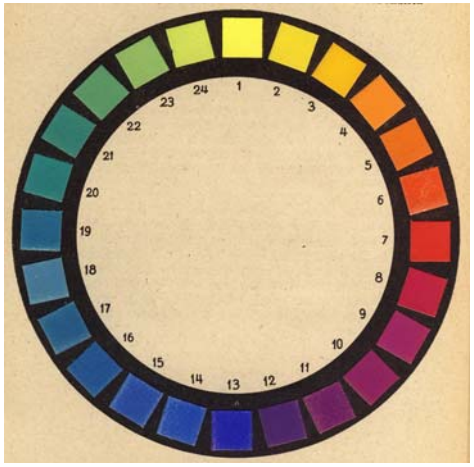


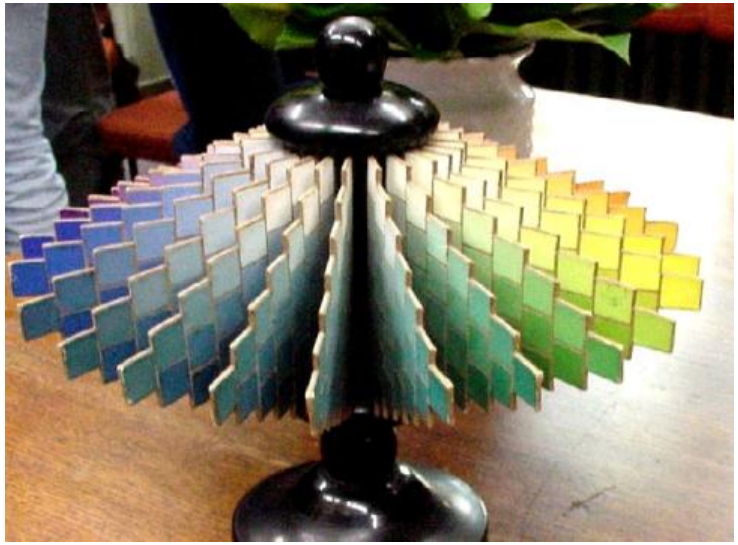
2. Schritt: Suche nach Farbe d
Bedingung: Mischung der Farben b und d ergibt Farbe c

Kritik: Mischung und Mitte ?

Grauleiter, empfindungsgemäßes Farbdreieck, Farbkreis und Farbkegel







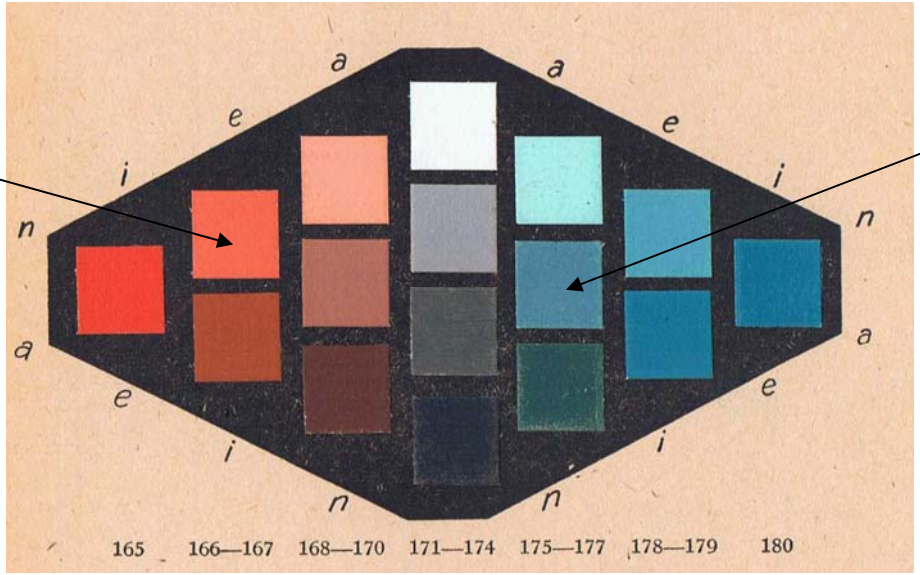
Kopien aus: W. Ostwald, Die Farbenfibel, Verlag Unesma Berlin 1944

Ostwald-Koordinaten
Farbkennzeichnung

- Farbkreis mit 24 Farben: Farbnummern 1 bis 24
- Grauleiter mit 8 Grauwerten: Buchstabencode

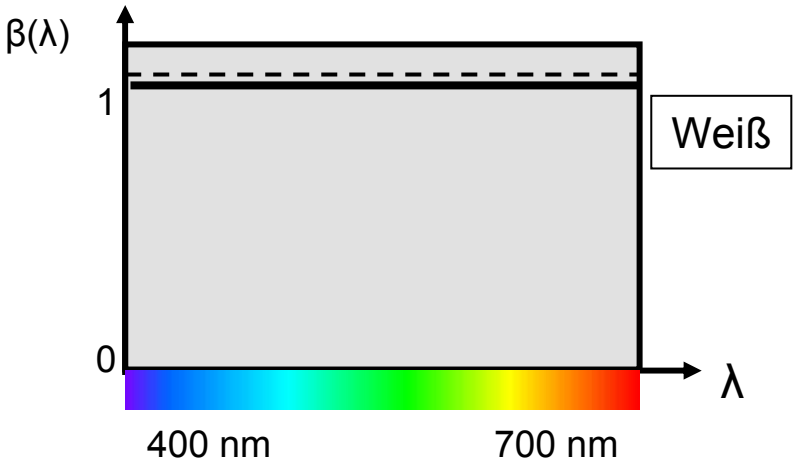
	a	c	e	g	i	l	n	p
w in Prozent	89	56	35	22	14	8,9	5,6	3,5
s in Prozent	11	44	65	78	86	91,1	94,4	96,5

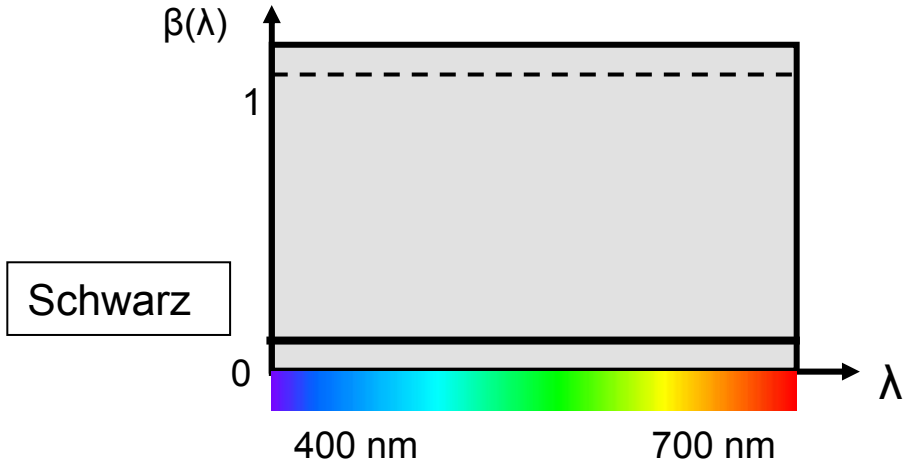
Farbprobe: **5 i a**
mittleres Rot
14% Weiß,
11% Schwarz,
75% Vollfarbe



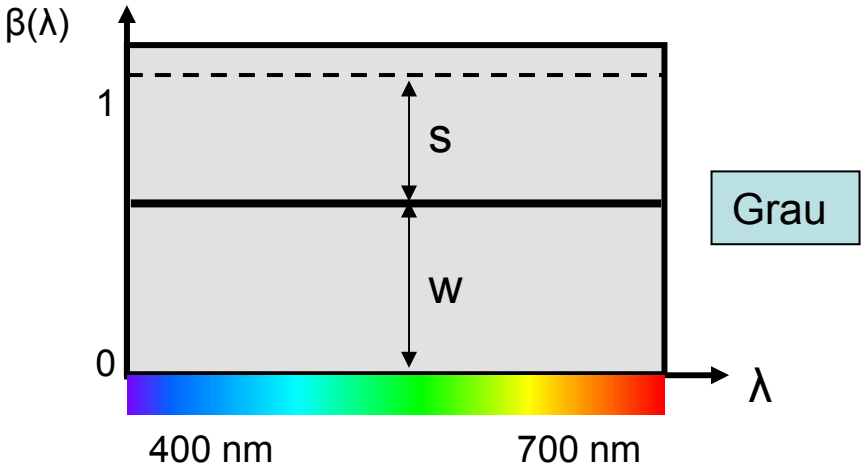
Farbprobe: **17 i e**
mittleres Eisblau
14% Weiß,
65% Schwarz,
21% Vollfarbe

Ostwald-Koordinaten 1
Grauleiter



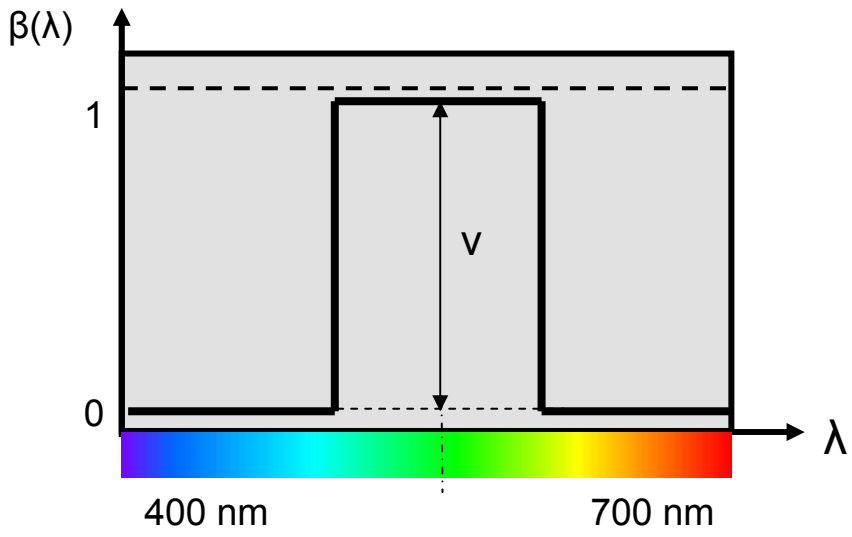


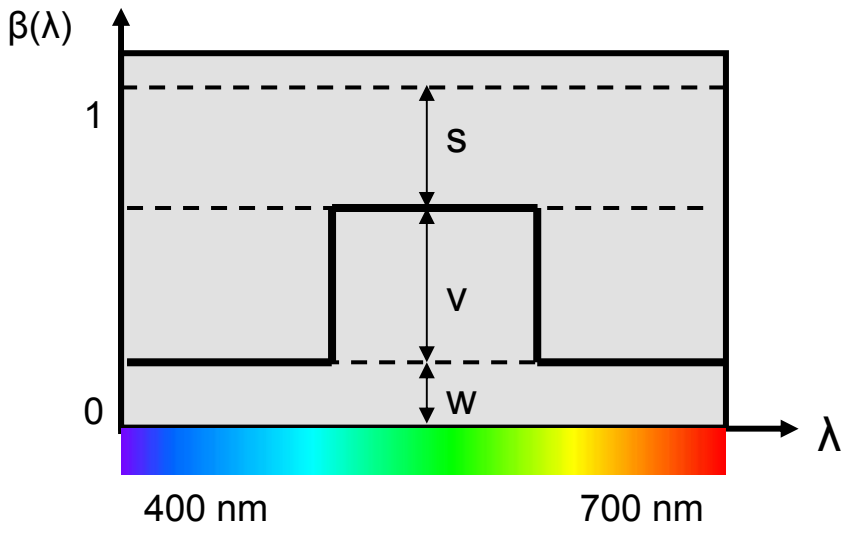
Normweiß:
$BaSO_4$, MgO



s+w=1

Ostwald-Koordinaten 2
Kantenspektren





(ideale) Vollfarbe

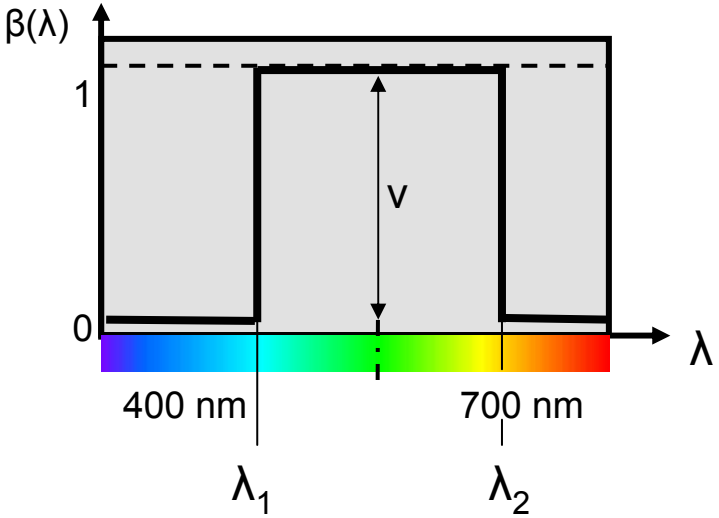
(ideale) Farbprobe

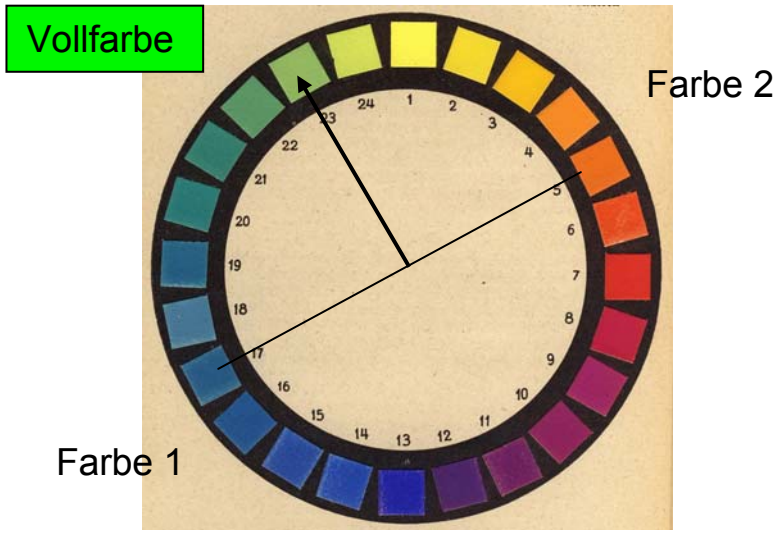
v = 1

s+w+v=1

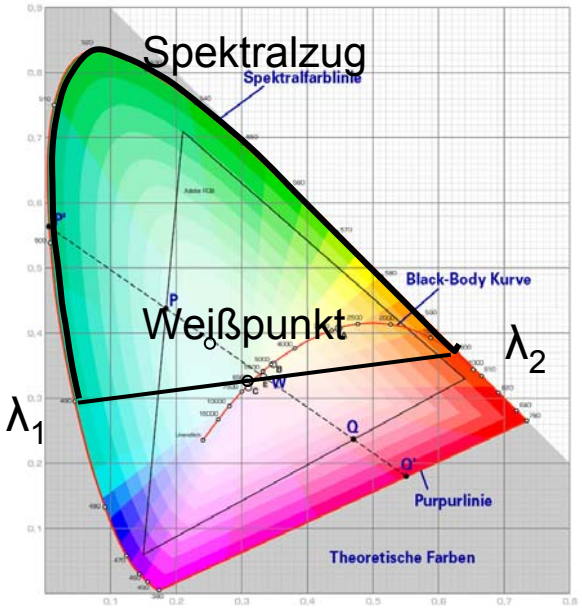
Wilhelm Ostwalds Vollfarben

Vollfarbe als Optimalfarbe





Hilfsmittel: CIE-Diagramm mit Spektralzug



Bestimmung einer unbunten Farbprobe

Halbschatten-Photometer

s + w = 1

Fig. 23.

Beobachtungsfeld

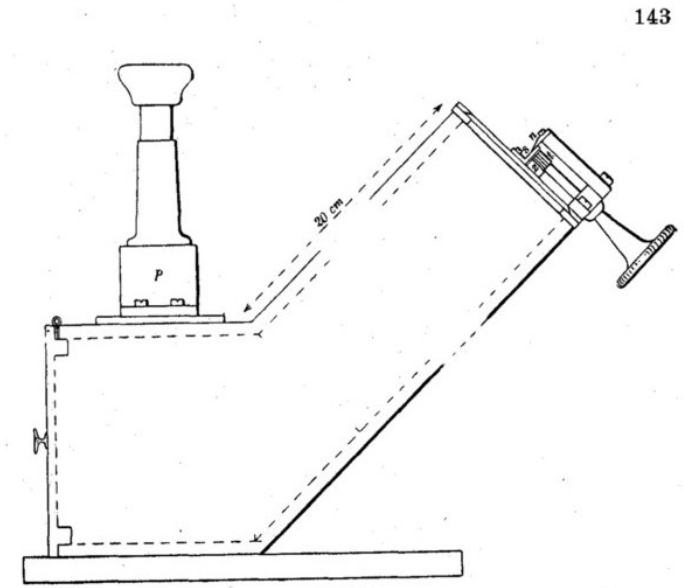


Fig. 24.

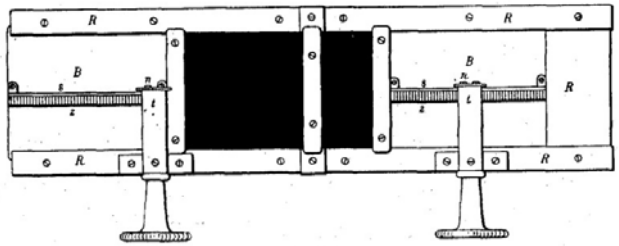


Fig. 25.

Intensitätsreglung

Vergleich der Probe mit abgeschattetem Normweiß ($BaSO_4$, MgO)

Bestimmung einer bunten Farbprobe

1. Weg nach Wilhelm Ostwald (Farbfilter)

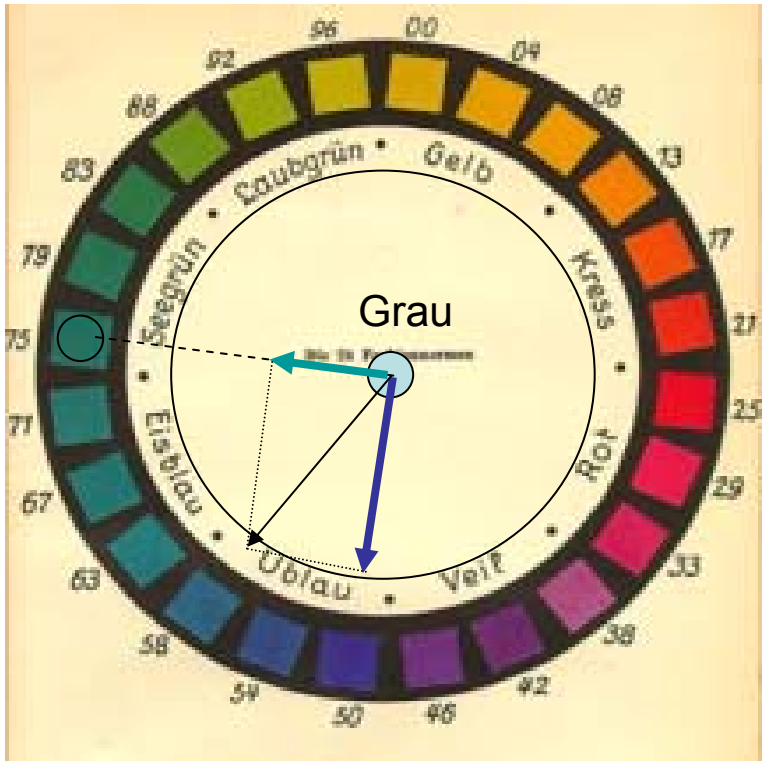
   Farbnummer; Schwarz-, Weiß- und Vollfarbgehalt

$$s + w + v = 1$$

2. Spektralphotometer

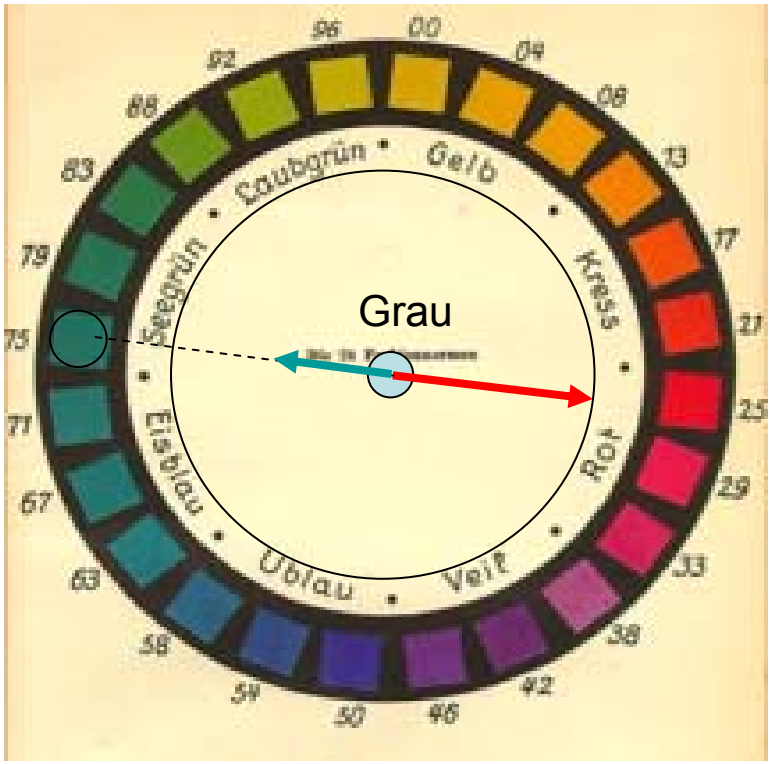
1. Schritt: Farbtonbestimmung
Grundidee: Lichtmischung zu Grau

Gesuchter Farbton der Farbprobe sei trübes Seegrün



Ungeeignete Vergleichsprobe

aus Farbkreis: **Blau**

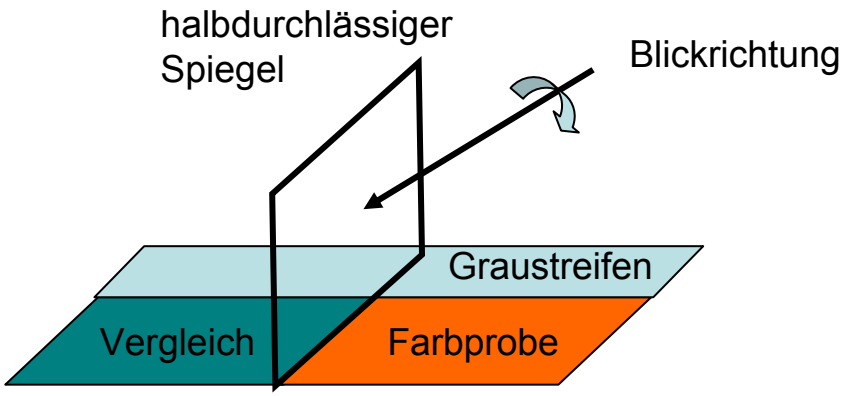


Geeignete Vergleichsprobe

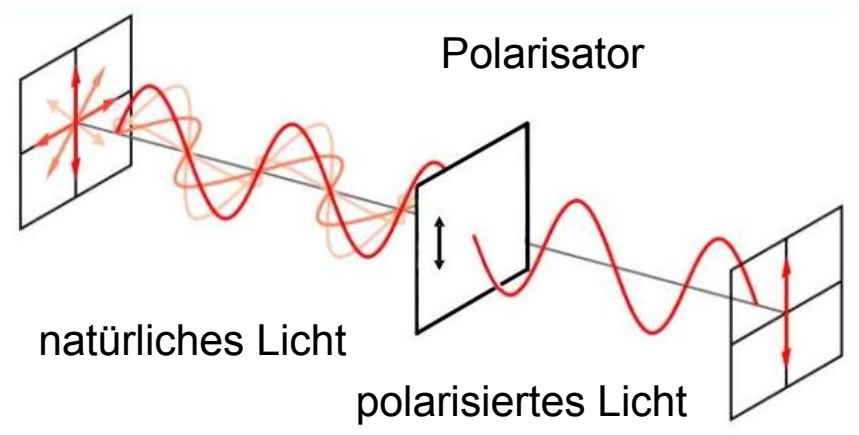
aus Farbkreis: **Rot**

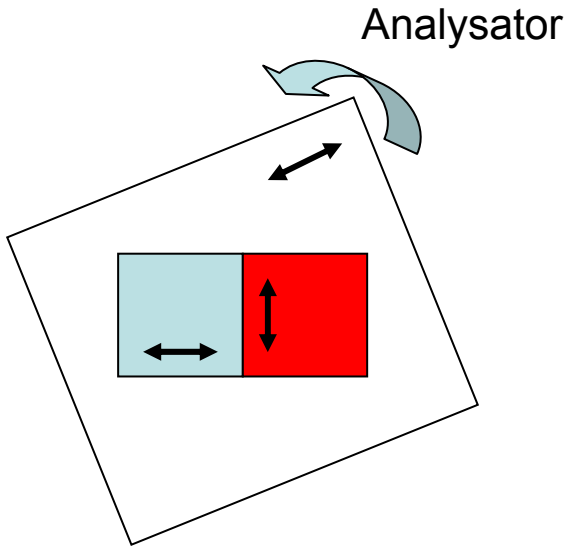
Farbtonbestimmung
physikalische Umsetzung

1. Farbkreisel
2. Lambert-Spiegel



3. Polarisiertes Licht





Überlagerung des polarisierten Lichts von Farbprobe und Vergleichsprobe

2. Schritt: Bestimmung des Schwarz- und Weiß-gehaltes (Filtermethode)

Grundideen:

1. Weiß remittiert alle Farben
2. Schwarz absorbiert alle Farben
3. Vollfarbprobe remittiert „Eigenlicht“ wie Weiß
4. Vollfarbe absorbiert „Gegenlicht“ wie Schwarz

Experimentelle Umsetzung: Helligkeit im Filterlicht

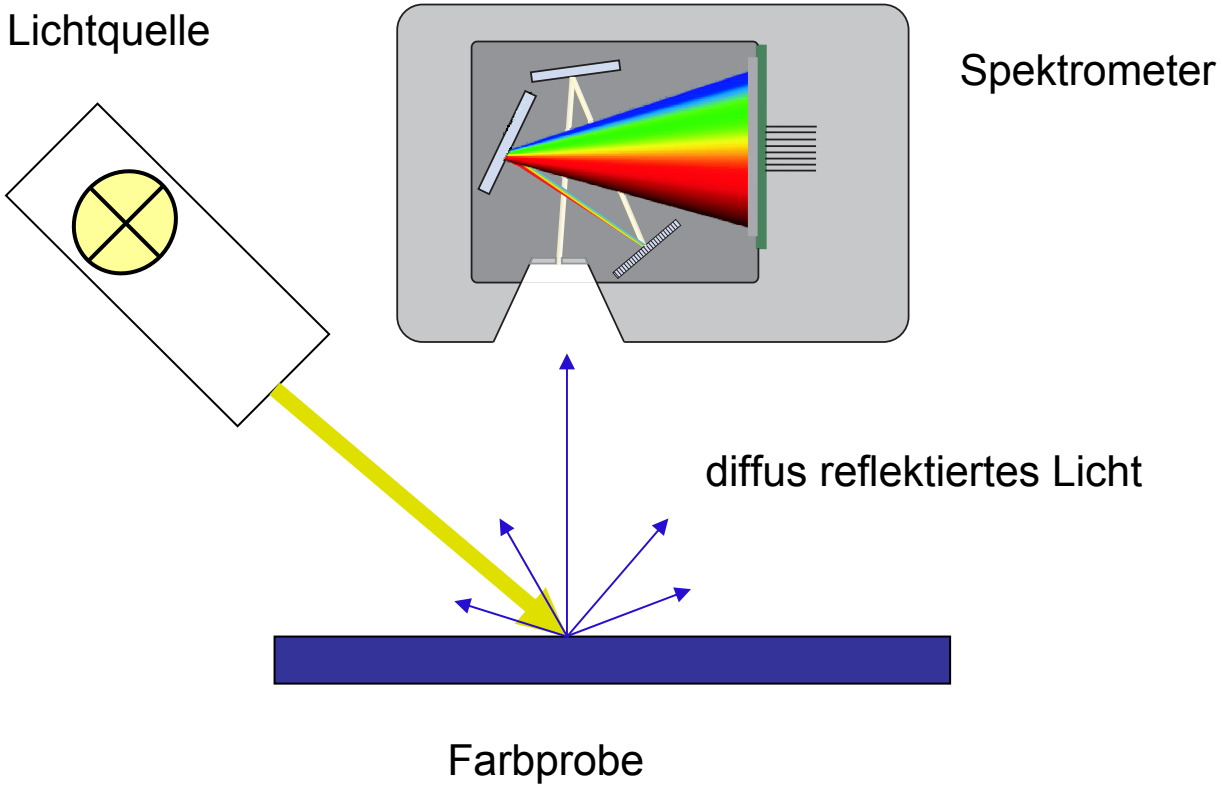
Beispiel: Orangerote Probe

1. Filter Orangerot: Helligkeit durch Weiß und Vollfarbe
2. Filter Blaugrün: Helligkeit nur durch Weiß

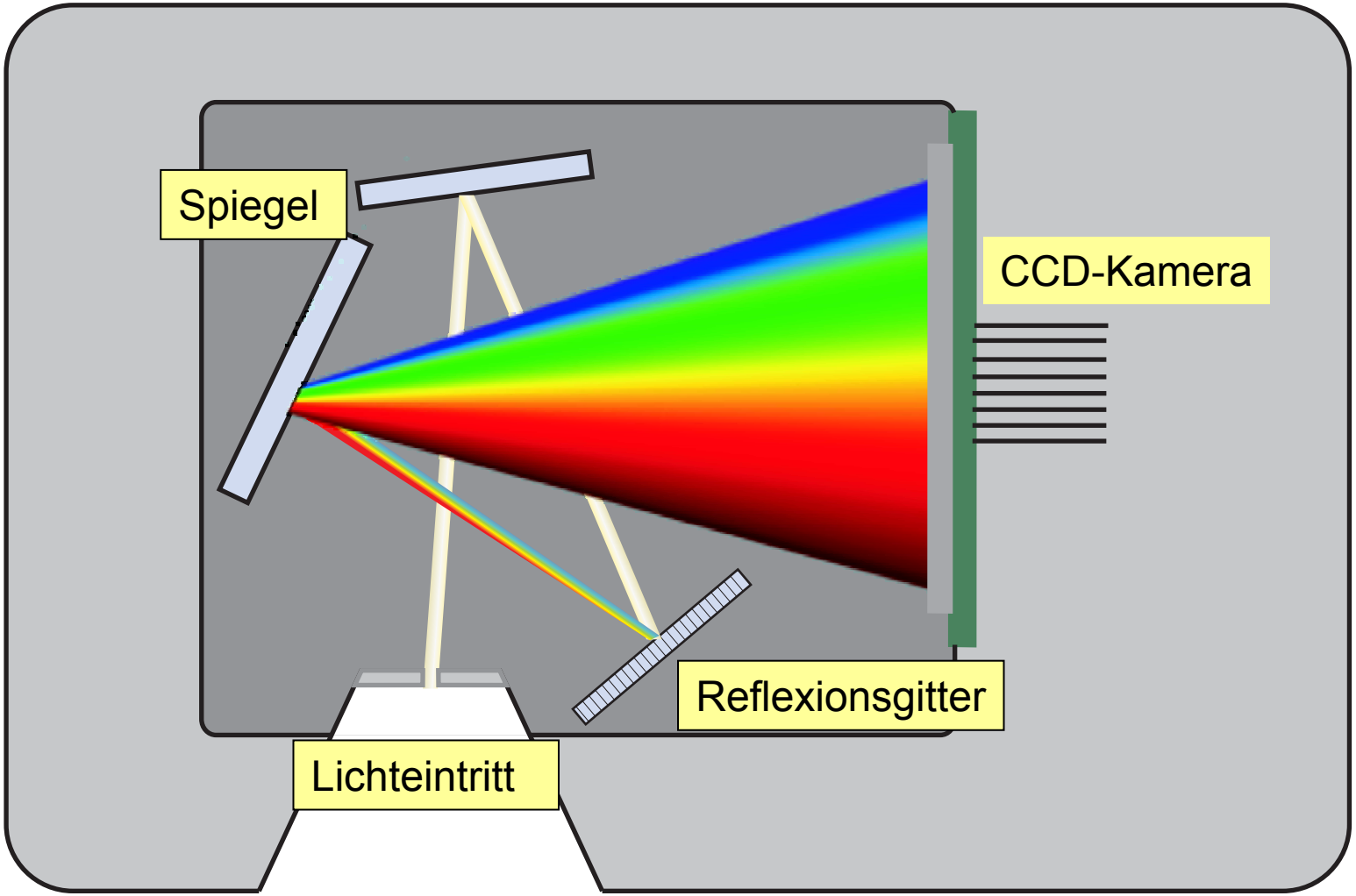
$$s + w + v = 1$$

Spektralphotometer

Versuchsanordnung

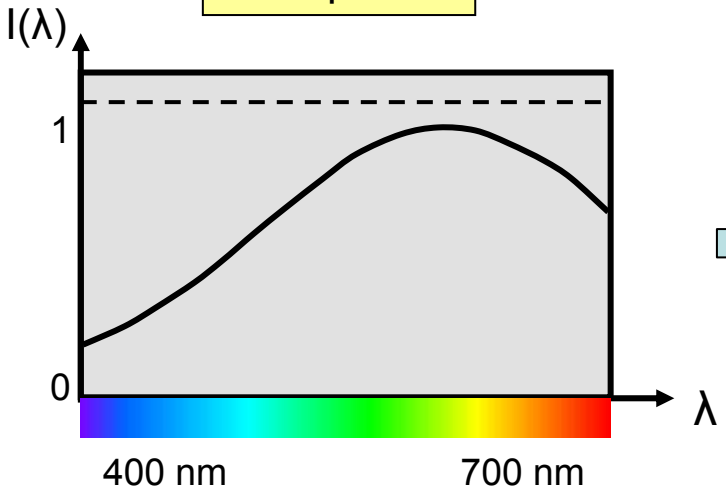


Spektrometer

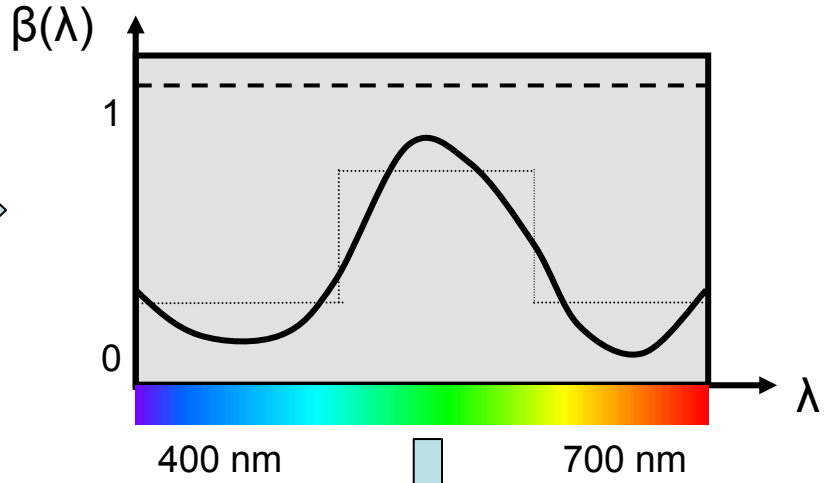


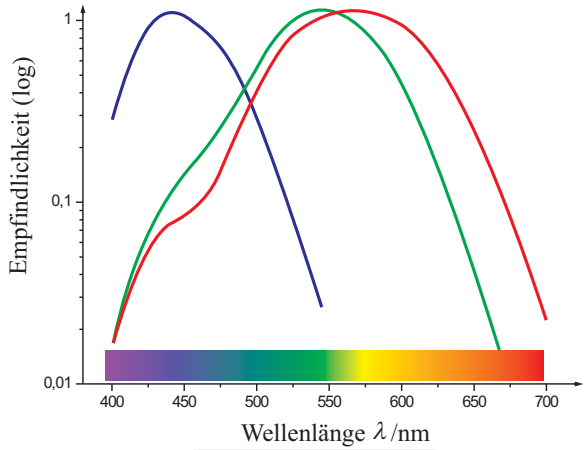
Körperfarbe als Sinneseindruck

Lichtquelle



Farbprobe/Körper





Auge

Farbeindruck/Farbvalenz

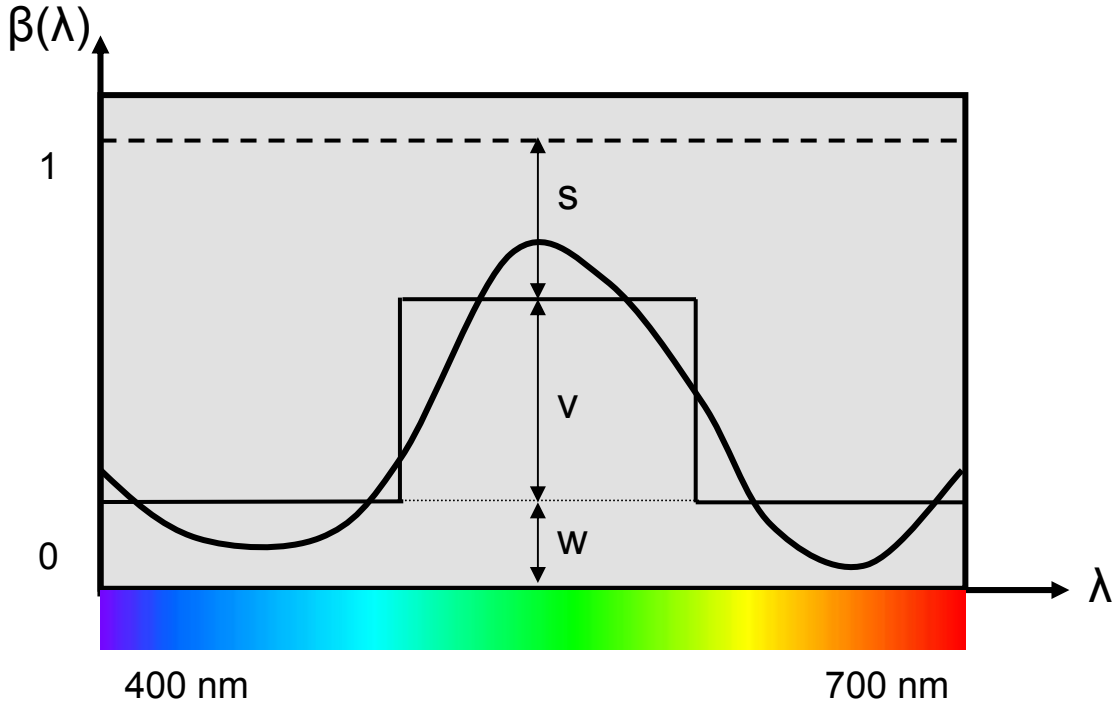
drei Reize: K-Zapfen, M-Zapfen, L-Zapfen

Prinzip:

$$R \sim \int I(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \cdot k(\lambda) \cdot d\lambda$$

Lichtquelle Farbprobe Auge/Gehirn

Reale Farbproben



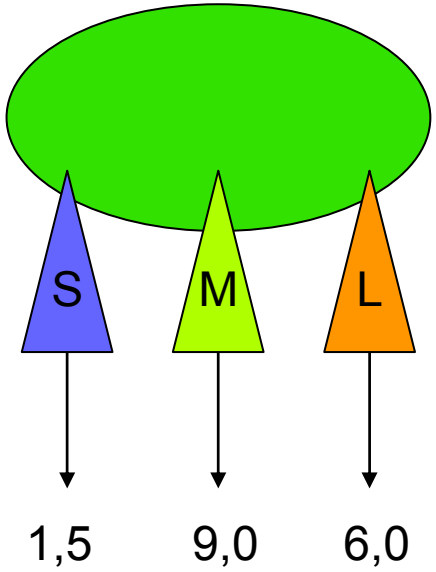
Ostwald-Koordinaten
s+w+v=1

Umrechnung

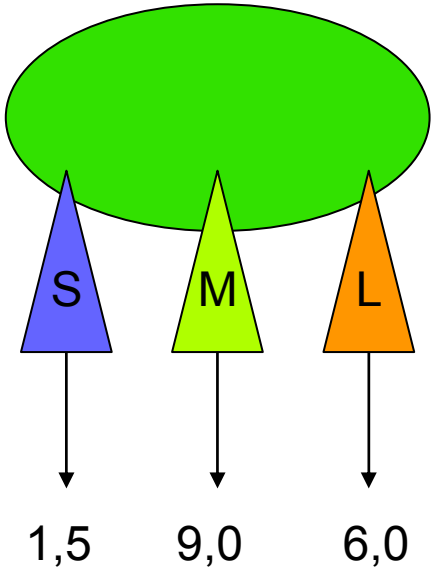
Remissionskurve β(λ)

Dreifarbentheorie

monochromatisches Licht
500 nm



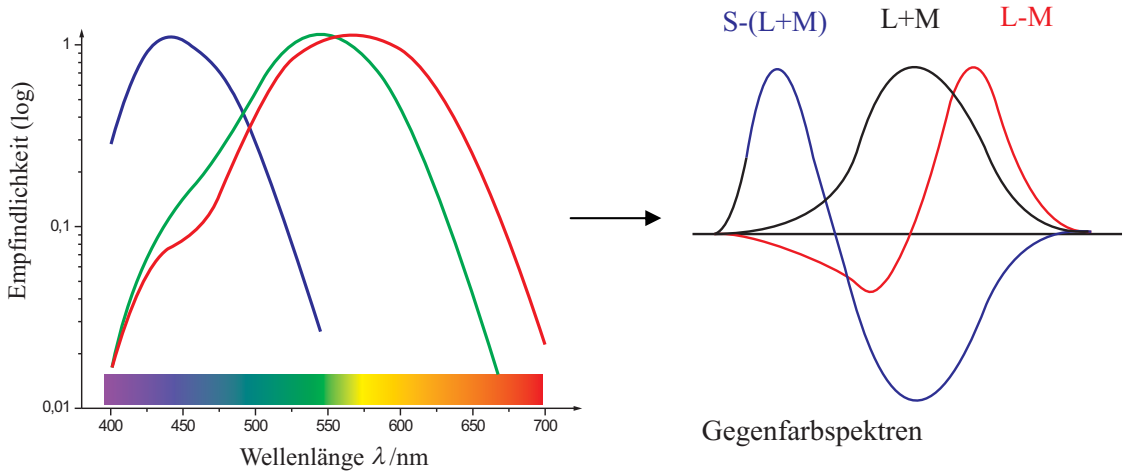
Mischlicht
420 nm + 560 nm + 640 nm



gleicher Farbeindruck

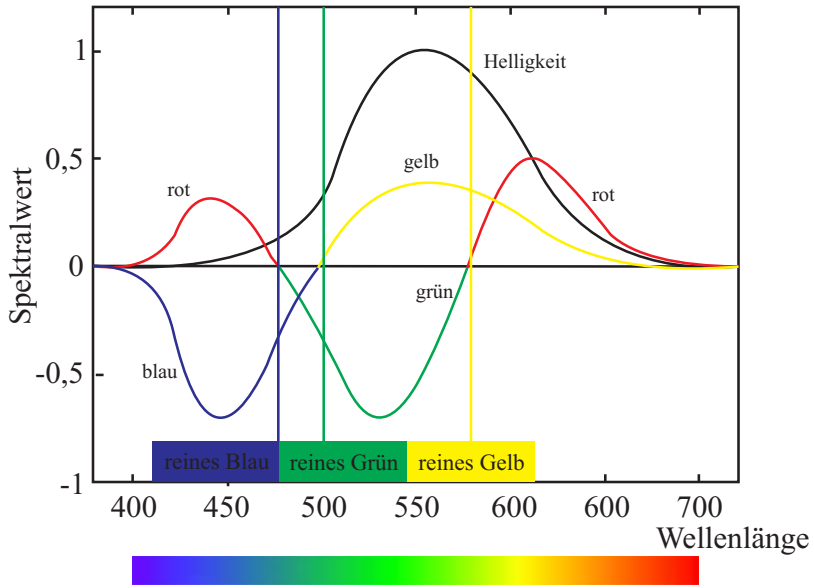
Drei- und Vierfarbentheorie

drei Zapfen



zwei Farbpaare

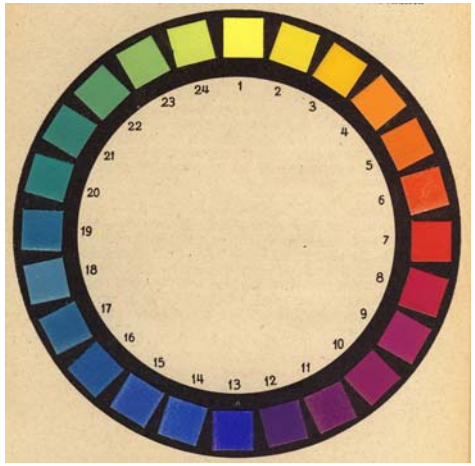
Gegenfarbenanteile nach Judd

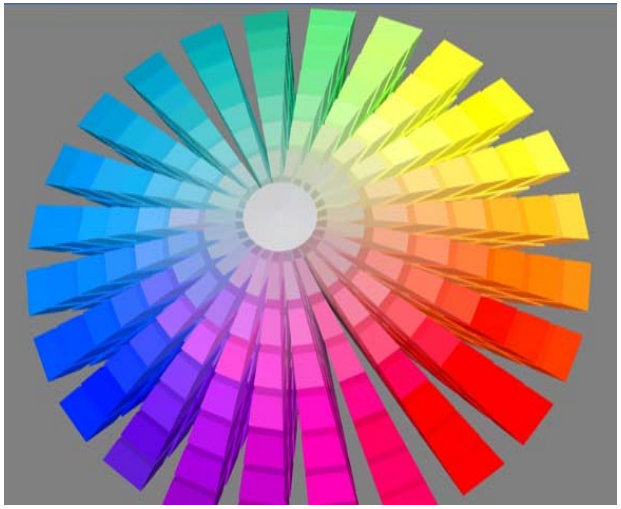


Kritische Blicke auf Wilhelm Ostwalds Farbkreis

(Farbton und Sättigung)

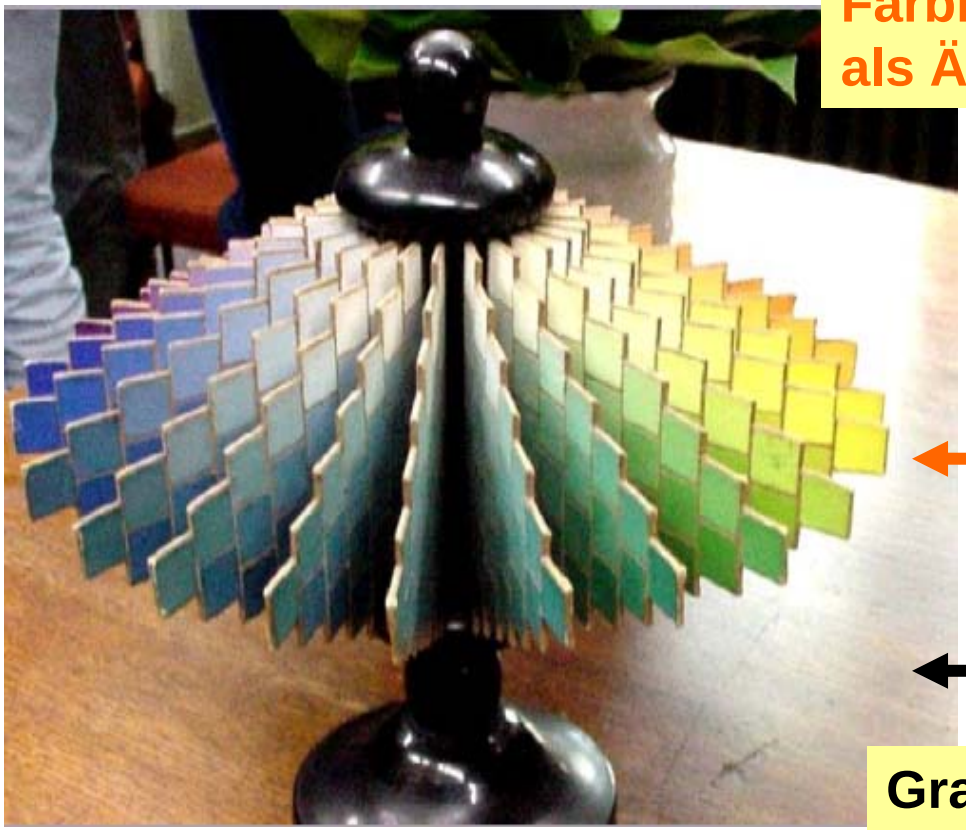
- Gelbbereich ist heller als Blaubereich
- Grünbereich ist weniger gesättigt als Blau- und Rotbereich
- Abstände im Farbkreis sind nicht exakt empfindungsgemäß gleich



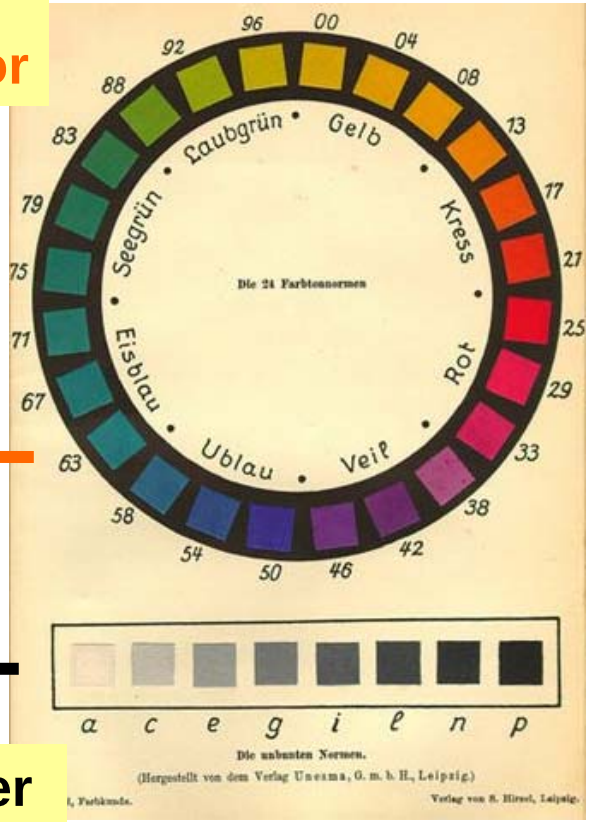


Farbkegel

aus 24 Farbdreiecken

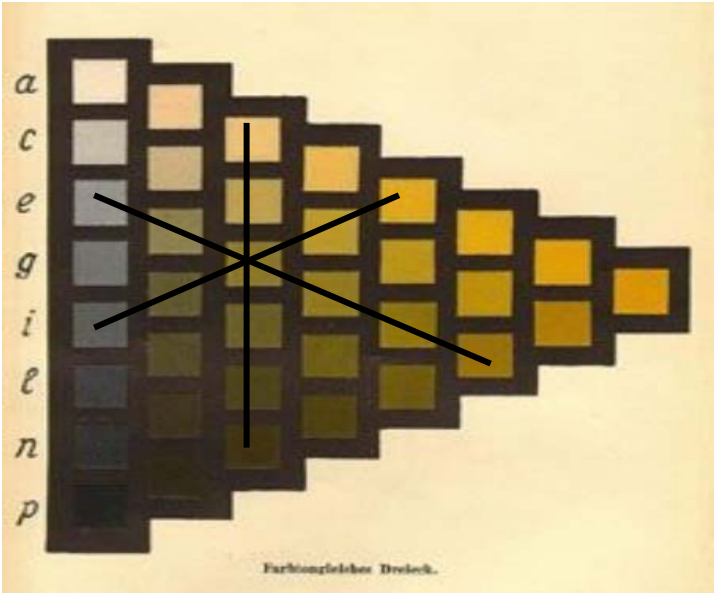


Farbkreis als Äquator



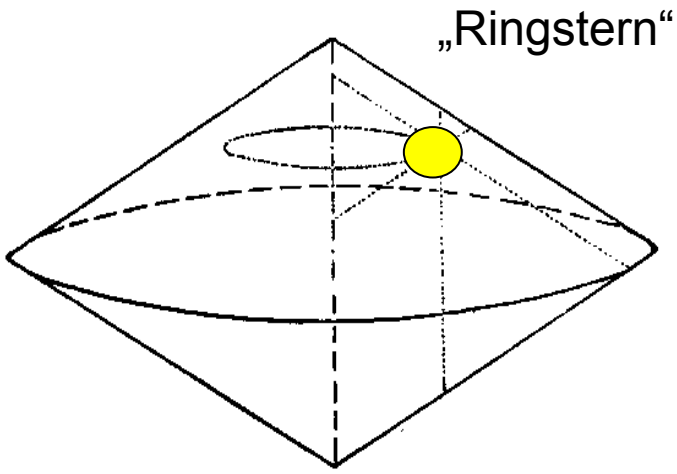
Grauleiter als Achse

Harmonie = Ordnung



Farbdreieck mit hervorgehobenen harmonischen Farben

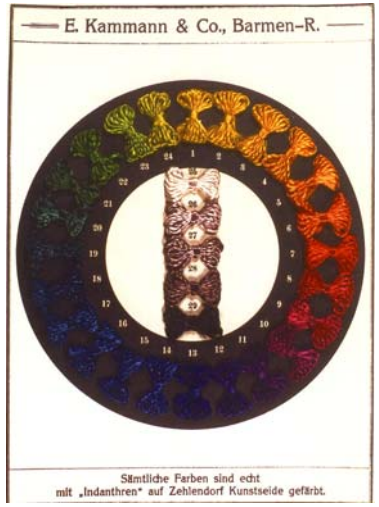
Vertikale: Schattenreihe



Internationale Farbnormung

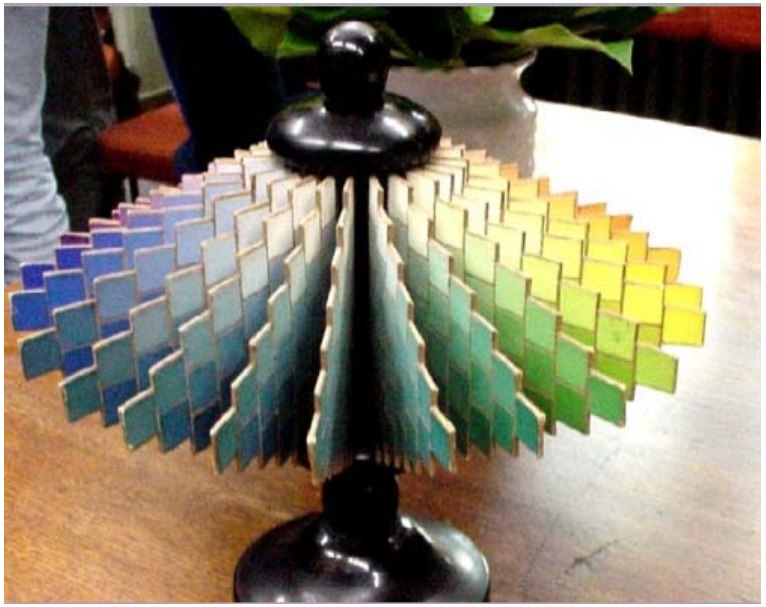
Wilhelm Ostwald Park Großbothen
Haus Energie

Gerda und Klaus Tschira-Stiftung



Ostwaldsche Normungen aus: Die Ostwaldsche Farbenlehre und ihre Anwendung in der Praxis; X-Rite 2003

Wilhelm Ostwalds Farbenlehre



Eberhard Buchwald (1954):

… sie (Ostwalds Farbenlehre) hat weite Kreise gezogen und zieht sie weiter, sie hat fruchtbare Fortbildungen erfahren und erfährt sie noch, und sie nimmt nach den nötigen Korrekturen einen ehrenvollen Platz in der heutigen Farbenlehre ein.

Ein „ganzer Kerl“ steht dahinter, mit allen Frage-, aber auch mit allen Ausrufungszeichen eines ganzen Kerls.

Quelle: Physikalische Blätter 6/1954