



Computer-Graphik I Farben

G. Zachmann
Clausthal University, Germany
zach@in.tu-clausthal.de



*Die Farbe ist ein Mittel, direkten Einfluss auf die Seele auszuüben.
Die Farbe ist die Taste, das Auge ist der Hammer.
Die Seele ist das Klavier mit vielen Saiten.
Der Künstler ist die Hand, die durch diese oder jene Taste
zweckmäßig die menschliche Seele in vibration bringt.*

Wassily Kandinsky (1866 – 1944)



G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 2

Disclaimer

- Farben sind eine Wissenschaft für sich:
 - Es gibt sehr viele Farbräume
 - Involviert Physik, Biologie / Physiologie, Wahrnehmungspsychologie
 - Oft nicht leicht zu erkennen, in welchem Gebiet man sich gerade bewegt
 - Sehr viele Begriffe
- Fredo Durant:
 - *Color is both quite simple and quite complex*
 - *There are two options to teach color:*
 - *Pretend it all makes sense and it's all simple*
 - *Expose the complexity and arbitrary choices*
 - *Unfortunately, I have chosen the latter ...*
- Vereinfachung hier: keine lichttechn. / photometrischen Größen

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 3

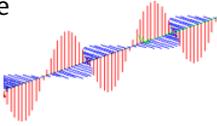
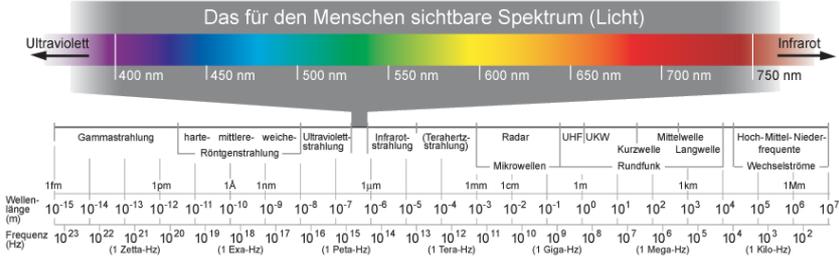
Literatur

- Foley / van Dam, Peter Shirley, Rogers (s. Homepage der VL)
- Gary W. Meyer: *Tutorial on color science*
(siehe Link auf der Homepage der Vorlesung)

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 4

Was ist Licht?

- **Licht** = elektromagnetische Strahlung / Energie im für den Menschen sichtbaren Spektralbereich: 380 – 780 nm

Das für den Menschen sichtbare Spektrum (Licht)

Ultraviolett | 400 nm | 450 nm | 500 nm | 550 nm | 600 nm | 650 nm | 700 nm | Infrarot

Wellenlänge (m): 10⁻¹⁵, 10⁻¹⁴, 10⁻¹³, 10⁻¹², 10⁻¹¹, 10⁻¹⁰, 10⁻⁹, 10⁻⁸, 10⁻⁷, 10⁻⁶, 10⁻⁵, 10⁻⁴, 10⁻³, 10⁻², 10⁻¹, 10⁰, 10¹, 10², 10³, 10⁴, 10⁵, 10⁶, 10⁷

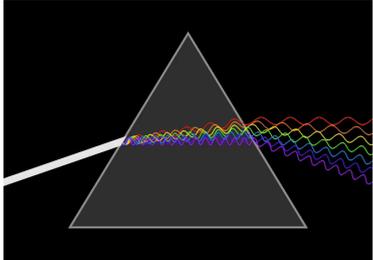
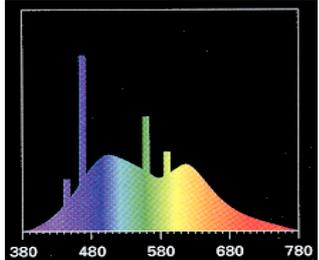
Frequenz (Hz): 10²³, 10²², 10²¹, 10²⁰, 10¹⁹, 10¹⁸, 10¹⁷, 10¹⁶, 10¹⁵, 10¹⁴, 10¹³, 10¹², 10¹¹, 10¹⁰, 10⁹, 10⁸, 10⁷, 10⁶, 10⁵, 10⁴, 10³, 10²

Gammastrahlung, harte Röntgenstrahlung, mittlere Röntgenstrahlung, weiche Röntgenstrahlung, Ultraviolettstrahlung, Infrarotstrahlung (Terahertzstrahlung), Radar, Mikrowellen, UHF/UKW, Kurzwelle, Mittelwelle, Langwelle, Rundfunk, Hochfrequente Wechselströme, Mittel-, Niederfrequente Wechselströme

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 5

Lichtquellen

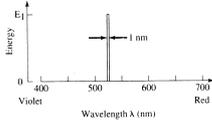
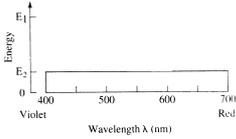
- Licht entsteht durch Emission von elektromagnetischer Strahlung
 - Normalerweise durch hohe Temperatur, z.B.: Sonne, Kerze, schwarzer Strahler, ...
 - Ausnahmen: Fluoreszenz, Laser, ...
- Eine Lichtquelle hat (fast) immer ein komplettes Spektrum:

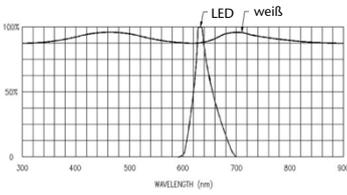



Leuchtstoffröhre

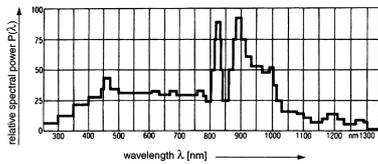
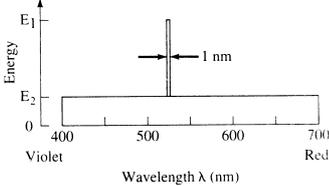
G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 6

Chromaticity ("Chromatizität")

- Monochromatisches Licht = genau 1 Wellenlänge (Laser)**

- Achromatisches Licht = alle Wellenlängen ungefähr gleich stark → weiß**




G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 7

- Chromatisches Licht: ganzes Spektrum, eine dominante Wellenlänge (farbiges Licht)**


- Wesentliche, beschreibende Charakteristika:**
 - Dominante Wellenlänge = "Farbe", *Hue*
 - Verhältnis E_1 / E_2 = Anteil des weißen Lichtes = Reinheit, *Sättigung, Saturation*
 - Fläche unter der Spektralkurve = Helligkeit = *Intensität, Brightness*

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 8

Das Licht auf dem Weg ... (das *Reflectance Spectrum*)

The diagram illustrates the process of light reflecting off an object. A sun icon at the top emits a yellow arrow representing light towards a person holding a red apple. Three spectral graphs are shown:

- Reflectance Spectrum:** A graph with a red curve showing the apple's reflectance across wavelengths from 500 to 700 nm. The curve is low in the blue and green regions and rises sharply in the red region.
- Spectral Power Distribution (Illuminant D65):** A blue curve representing the sun's light, with a broad peak in the blue-green region and a secondary peak in the red region. A color bar below it shows the visible spectrum.
- Spectral Power Distribution (Apple under D65):** A red curve representing the light reflected from the apple. It is the product of the sun's SPD and the apple's reflectance spectrum, showing a broad peak in the red region.

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 9

Neon Lamp

The diagram illustrates the process of light reflecting off an object under a specific illuminant. A neon lamp icon at the top emits a blue arrow representing light towards a person holding a red apple. Four spectral graphs are shown:

- Reflectance Spectrum:** A red curve showing the apple's reflectance across wavelengths from 500 to 700 nm, identical to the one in the previous slide.
- Spectral Power Distribution (Illuminant F1):** A blue curve representing the neon lamp's light, showing several sharp peaks in the blue and green regions and a smaller peak in the red region.
- Spectral Power Distribution Under F1:** A red curve representing the light reflected from the apple under the neon lamp. It shows the sharp peaks of the neon lamp filtered by the apple's reflectance spectrum.
- Spectral Power Distribution Under D65:** A red curve representing the light reflected from the apple under the sun, identical to the one in the previous slide.

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 10

Warum ist der Wald grün?

- Weil der grüne Teil des Spektrums nicht absorbiert wird:
- Würden Pflanzen alle Wellenlängen gleich gut absorbieren, sähe das so aus:

A Absorption spectra of carotenoids, chlorophyll, and anthocyanin. The y-axis is 'Relative extinguishing molar coefficient' and the x-axis is 'Wavelength, nm'. Carotenoids (orange) peak at ~450 nm, Anthocyanin (magenta) at ~530 nm, and Chlorophyll (green) at ~660 nm.

B Average crown reflectance spectra. The y-axis is 'Relative reflectance' and the x-axis is 'Wavelength, nm'. Tropical trees (dark green) and Maples (light green) both show high reflectance in the 500-650 nm range, corresponding to the green light not absorbed by chlorophyll.

C Human spectral sensitivity at bright light (Photopic sensitivity). The y-axis is 'Relative sensitivity' and the x-axis is 'Wavelength, nm'. The curve peaks at approximately 555 nm.

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 11

Woher kommen die Farben?

- Kennen Sie diese Szene?
 - "There is no spoon"

The Matrix

- Merke: **ES GIBT KEINE FARBEN!**
 - In der physikalischen Welt gibt es nur Spektren!
 - Farben entstehen erst im Auge bzw. im Kopf!

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 12

Das Auge

The diagram illustrates the visual pathway. Light from the apple enters the eye through the cornea and lens, hitting the retina. The retina contains rods and cones, which connect to bipolar cells, amacrine cells, and ganglion cells. The optic nerve carries the signals to the Lateral Geniculate Nucleus (LGN) in the brain, which then sends signals to the Visual Cortex. The brain scan shows the Right LGN and Left LGN, with the LGN defined as the Lateral Geniculate Nucleus. The distribution of rods and cones is shown in a separate diagram, with rods being more numerous in the peripheral retina and cones being more numerous in the central retina.

Rods Cones Distribution of Cones and Rods

LGN = Lateral Geniculate Nucleus Visual Cortex

Right LGN Left LGN

Ganglion Horizontal Cells Bipolar Cells Rod Cone

Amacrine Cells Retina Optic Nerve

Light Light

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 13

Human Spectral Sensitivity

The graph shows the spectral sensitivity of the human eye. The x-axis represents Wavelength (nm) from 400 to 700. The y-axis represents Lumens per watt from 0 to 1500. Two curves are shown: a dark green curve for scotopic vision (dark adapted) peaking at 507 nm with 1700 lumens per watt, and a light green curve for photopic vision (light adapted) peaking at 555 nm with 683 lumens per watt.

- Nachts: **scotopic** (Rods, Stäbchen)
- Tags: **photopic** (Cones, Zäpfchen)

507 nm 1700 lumens per watt

555 nm 683 lumens per watt

Lumens per watt

Wavelength (nm)

Scotopic vision (dark adapted)

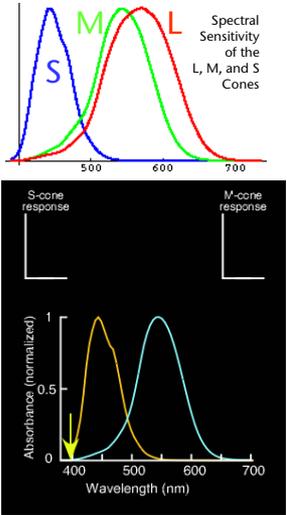
Photopic vision (light adapted)

- Daher: "Nachts sind alle Katzen grau."

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 14

Cone spectral sensitivity

- 3 Arten von Cones: L-, M-, S-Cones; steht für "long", "medium", "short" wavelength
- Jede Cone-Art hat eine eigene Empfindlichkeitskurve; Maxima entsprechen **ungefähr** Gelb, Grün, Blau
- Erstaunlich:
 - Manche Tiere sehen UV- oder IR-Licht
 - Der Fangschreckenkrebs hat 8 verschiedene Cones im sichtbaren Bereich und 4 im UV!
 - Hund und Katze haben nur 2 Cone-Arten (blau & rot)
 - Es gibt vermutlich **Tetrachromaten!**
 - (Wenn, dann nur Frauen ...)



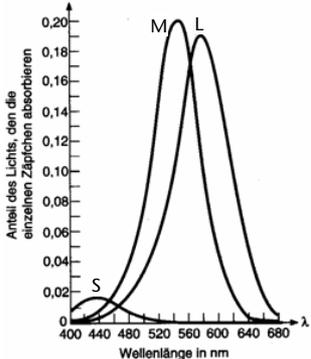
Spectral Sensitivity of the L, M, and S Cones

Animation

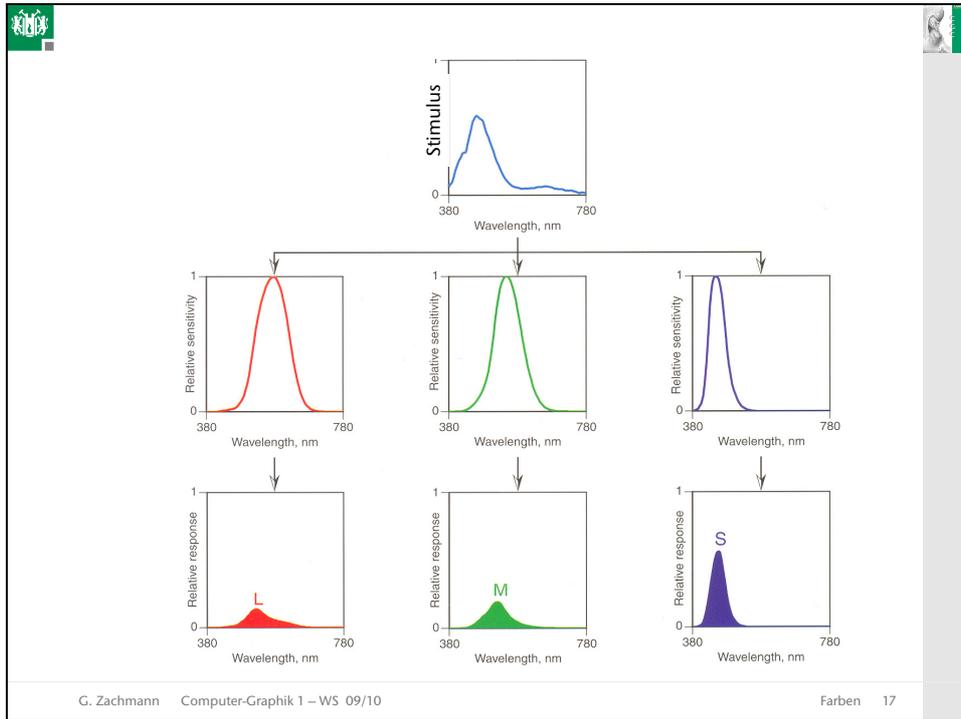
G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 15

Der wahrgenommene Stimulus

- Die "wahren" Empfindlichkeitskurven
- Der "Output" (*Response*) eines Cones:
 - Sei $P(\lambda)$ das Spektrum des einfallenden Lichtes
 - Sei $w(\lambda)$ die Empfindlichkeitskurve
 - Dann ist die Antwort des Cones:

$$\Phi = k \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} w(\lambda) \cdot P(\lambda)$$


G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 16

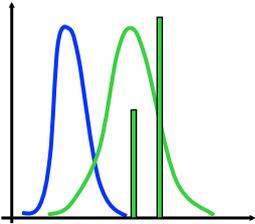


- Achtung: Cones können keine Farben "sehen"!
- Beispiel:
 - Verschiedene Wellenlänge, aber trotzdem gleiche Response
 - Wg. verschiedener Intensität
- Aber: mit mehr Cone-Arten kann man mehr Farben unterscheiden!
- Beispiel:
 - Stimulus wie oben
 - Verschiedene Cones haben verschiedene Response

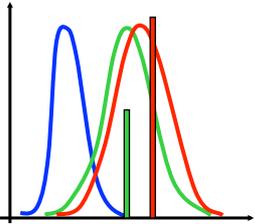
G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 18

Farbenblindheit

- Klassischer Fall: eine Cones-Art fehlt
- Z.B.: "rote" Cones fehlen



Gleiche Response



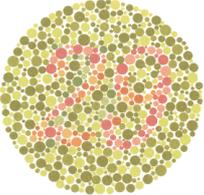
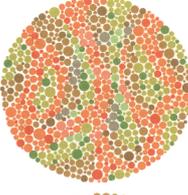
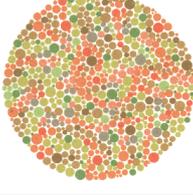
Wird differenziert

- Folge: Rot-Grün-Blindheit
- Häufigkeit:
 - 99% aller Farbsehschwächen, 10% aller Menschen sind rot-grün-blind
 - Davon 90% Männer, 10% Frauen

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 19

Test zur Farbenblindheit

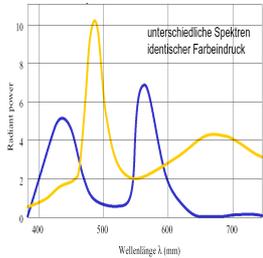
1. Beispiel:
 - Normalsichtige sehen hier "29"
 - Rot-grün-Blinde sehen hier "70"
2. Beispiel:
 - Normalsichtige sehen hier nichts
 - Rot-grün-Blinde sehen hier "5"
3. Beispiel:
 - Normalsichtige: nichts
 - Rot-grün-Blinde: eine Art Irrweg von links nach rechts

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 20

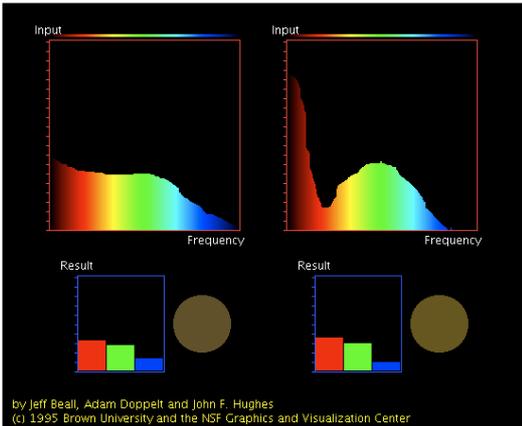
Metamere

- Merke: wir sind alle "farbenblind"!!
- Man kann unendlich viele Paare von Spektren konstruieren, so daß die selbe Response für alle 3 Cones entsteht
- Solch ein Paar von Spektren heißt **Metamer**
- Hintergrund:
 - Die Menge aller Spektren ist ein unendlich-dim. Raum
 - Die Wahrnehmung durch 3 Sensor-Arten (Cones) stellt eine Projektion auf einen 3-dim. Raum dar!
 - Folge: man verliert Information
- Das Gute daran: nur so ist es möglich, mit nur 3 Primärfarben im Monitor (fast) alle Farbeindrücke zu "erzeugen", die wir sehen können!



G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 21

Applet



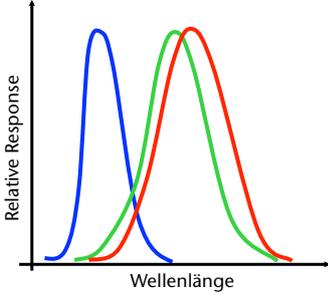
by Jeff Beall, Adam Doppelt and John F. Hughes
(c) 1995 Brown University and the NSF Graphics and Visualization Center

http://www.cs.brown.edu/exploratories/freeSoftware/catalogs/color_theory.html

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 22

Das Fundamentalproblem der Farben

- Man könnte folgende Idee haben:
 - Wähle Phosphore im Monitor so, daß diese exakt dasselbe Spektrum abstrahlen wie die Empfindlichkeitskurven der menschlichen Cones
 - Verwende diese Spektren direkt zur Erzeugung verschiedener Farben
- Leider: **DAS KLAPPT NICHT**



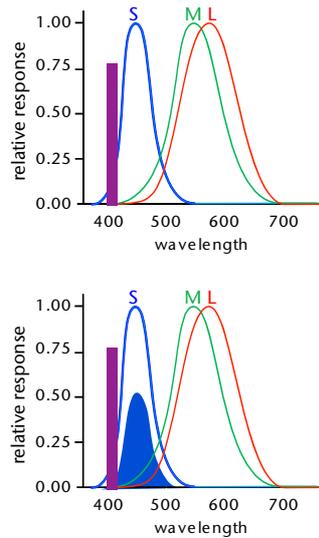
Relative Response

Wellenlänge

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 24

Gegenbeispiel

- Versuche folgenden Stimulus mit den 3 o.g. Spektren zu erzeugen:
 - Synthese: Integriere den geg. Stimulus mit den 3 Empfindlichkeitskurven
 - Ergibt hier: 0.5·S-Kurve
 - Monitor: "S"-Pixel mit halber Stärke anschalten
 - Analyse: im Auge werden die anderen beiden Cones **doch** erregt
 - Ergibt **andere** Farbe!
 - Grund: die Kurven überlappen sich, sind also **korreliert** (gekoppelt)!



relative response

wavelength

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 25

Entwicklung standardisierter Farbräume

- Quantitative und wiederholbare Bestimmung von Farben zwingend notwendig in vielen Industriezweigen:
 - Fernsehen, Druck, Farbenhersteller, Leuchtenhersteller, ...
- Wurde ca. 1920 begonnen von der CIE
 - = Commission Internationale de l'Eclairage
- Erster Standard-Farbraum 1931 von der CIE: CIEXYZ-Farbraum

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 26

Linearkombinationen und Gleichheit von Lichtquellen

- Seien

$$s(\lambda), m(\lambda), l(\lambda) : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$$
 die Response-Kurven der S-, M-, und L-Sensoren
- Annahme:
 - Wir leuchten mit 3 Primärlichtquellen R, G, B auf eine perfekt weiße, perfekt diffuse Fläche
 - Bei voller Leuchtstärke gelangen davon die Spektren

$$R(\lambda), G(\lambda), B(\lambda)$$
 ins Auge
 - Diese Spektren können "gedimmt" werden mit Skalaren

$$r, g, b \in [0, 1]$$
 (z.B. durch teilweise Abschattung)
- Welche Signalstärke kommt jeweils von den Sensoren ins Gehirn?

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 27

- Sei A das Misch-Spektrum von der weißen, diffusen Fläche:

$$A(\lambda) = r \cdot R(\lambda) + g \cdot G(\lambda) + b \cdot B(\lambda)$$
- Erinnerung: Sensoren liefern die "gewichtete Fläche"
- Sei S_A die Antwort des S-Sensors auf das Spektrum A :

$$\begin{aligned} S_A &= \int s(\lambda) A(\lambda) d\lambda \\ &= \int s(\lambda) (rR(\lambda) + gG(\lambda) + bB(\lambda)) d\lambda \\ &= r \int s(\lambda) R(\lambda) d\lambda + g \int s(\lambda) G(\lambda) d\lambda + b \int s(\lambda) B(\lambda) d\lambda \\ &= rS_R + gS_G + bS_B \end{aligned}$$
- Analog für M_A und L_A

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 28

- Zusammen:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} S_A \\ M_A \\ L_A \end{pmatrix} &= \underbrace{\begin{pmatrix} S_R & S_G & S_B \\ M_R & M_G & M_B \\ L_R & L_G & L_B \end{pmatrix}}_M \cdot \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix} \\ &= M \cdot \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix} \end{aligned}$$
- Matrix M beschreibt also eine Art "Sensor-Abbildung", nämlich von den physikalischen Größen r, g, b (der "Skalierung" der Primärlichtquellen) auf die physiologischen Größen S_A, M_A, L_A (den Sensor-Outputs)

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 29

- Bemerkung: die Matrix

$$M = \begin{pmatrix} S_R & S_G & S_B \\ M_R & M_G & M_B \\ L_R & L_G & L_B \end{pmatrix}$$
 ist (für ein bestimmtes Auge) konstant!
- Bemerkung: für eine bestimmte Sensorantwort (S_C, M_C, L_C) ist die notwendige Skalierung r, g, b unserer (fest) gewählten Primärlichtquellen eindeutig bestimmt
 - Spektrum C und Spektrum $r \cdot R + g \cdot G + b \cdot B$ sind **Metamere!**
- Achtung: keine Garantie, daß diese $r, g, b \in [0, 1]$ wären!!

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 30

Definition des Begriffs "Farbe"

- Definition **Farbe**:
Sei C eine Lichtquelle mit irgendeinem Spektrum.
Mit der "**Farbe C**" meinen wir die Sensorantwort (S_C, M_C, L_C) ,
m.a.W., die **Farbe C** ist eigtl. nur eine **Kurzschreibweise** für den Vektor (S_C, M_C, L_C) !
- Mit dieser Kurzschreibweise kann man nun die vorige Formel

$$S_C = rS_R + gS_G + bS_B$$
 so schreiben:

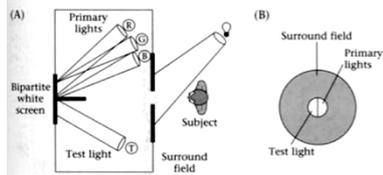
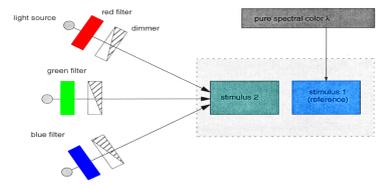
$$C = rR + gG + bB$$
- **Achtung**: C, R, G und B sind hier in Wahrheit Sensor-Output-Vektoren, und das "=" ist ein in Wahrheit ein "=" zwischen Vektoren!

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 31

Das Grassmann'sche Farbmischexperiment [1853]

- Gegeben:
 - Primärlichtquellen R, G, B
 - Monochromatische Testlichtquelle C_λ mit genau der Wellenlänge λ
 - User soll mit den Reglern r, g, b die Farbe C_λ matchen, d.h.

$$C_\lambda = r_\lambda R + g_\lambda G + b_\lambda B$$
- Definition: die Werte $r_\lambda, g_\lambda, b_\lambda$ nennt man **Tristimulus-Werte** (zu festgelegten R, G, B !)

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10
Farben 33

- Beobachtung 1: Das geht mit (fast) allen C_λ (und Helligkeiten von C_λ), vorausgesetzt:
 - R, G, B sind halbwegs weit über das Spektrum verteilt; und
 - keine der 3 Primärfarben läßt sich durch Kombination der anderen beiden erzeugen
- Problem: man kann so **nicht alle** Farben erzeugen!

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10
Farben 34

- Trick / Beobachtung: es klappt aber, wenn man zulässt, daß auch bei C_λ noch etwas von R, G, B beigemischt wird!
- M.a.W.:

$$C_\lambda = rR + gG + bB \quad \text{oder}$$

$$C_\lambda + rR = gG + bB \quad \text{oder}$$

$$C_\lambda + gG = rR + bB \quad \text{oder}$$

$$C_\lambda + bB = rR + gG$$
- Mathematische Schreibweise:

$$C_\lambda = -rR + gG + bB$$
- Achtung: solche negativen Koeffizienten haben keine physikalische Entsprechung! (man kann Licht nicht voneinander abziehen)

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 35

Beispiel

- Die CIE hat sehr viele Tests mit vielen Probanden (engl. *subjects*) gemacht
- Resultat bei monochromatischen Primärlichtquellen $R_{700}, G_{546}, B_{436}$ (700, 546, 436 nm):

- Beobachtung: egal, welche Primärlichtquellen man wählt, eine der Kurven r, g, b wird immer irgendwo negativ

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 36

- Beobachtung 2: verdoppelt man die Intensität der Testlichtquelle C_λ , dann muß man auch die Intensität der Primärlichtquellen verdoppeln (indem man die Tristimulus-Werte verdoppelt), d.h.

$$2C_\lambda = (2r)R + (2g)G + (2b)B$$
- Beobachtung 3: 2 Primärfarben alleine genügen nicht
- Beobachtung 4: ändert man stetig die Intensität einer der 3 Primärlichtquellen und hält die beiden anderen fest, so ändert sich die Mischfarbe stetig

▪ Bemerkung: o.g. Beobachtungen sind eigtl. klar nach unseren Betrachtungen zur Linearkombination von Lichtquellen / Farben

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 37

Die Grassmann'schen Gesetze

- Der (menschlich wahrnehmbare) Farbraum ist ein **stetiger, 3-dimensionaler Vektorraum** mit der Basis R, G, B , d.h.

$$\forall C : C = rR + gG + bB$$
- Die Gleichheits-Relation zwischen Farben ist **transitiv**, d.h.

$$C_1 = C_2 \wedge C_2 = C_3 \Rightarrow C_1 = C_3$$

und zwar völlig unabhängig von den Spektren der Lichtquellen, die die Stimulus-Vektoren C_1, C_2, C_3 hervorgerufen haben.

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 38

Exkurs: Prokudin-Gorskii

- Russischer Photograph um 1900
- Entwickelte Farb-Photoapparat und Farb-Projektor
 - 3 Einzelbilder rel. schell hintereinander mit verschiedenen Farbfiltern

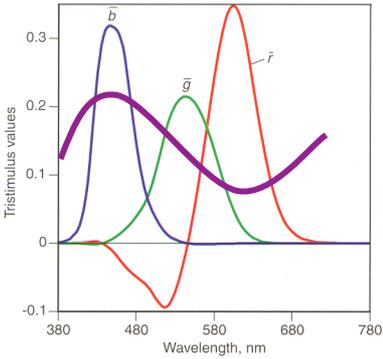


<http://www.loc.gov/exhibits/empire/>

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 39

Was macht man mit den CIE-Kurven?

- Sei Spektrum X gegeben
- Berechne die Tristimulus-Werte mittels der 3 Kurven (multiplizieren & integrieren)
- Skaliere mit diesen 3 Werten die 3 Primärlichtquellen (700, 546, 436 nm)
- Man erhält ein Metamer zu X (die gleiche Farbe)
- Achtung: eine der 3 Tristimulus-Werte könnte negativ sein



G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 40

Basiswechsel

- Folge der Grassmann'schen Gesetze:
 - Man kann (fast) jedes beliebige Tripel von Primärlichtquellen (= Basis) wählen
 - Hat man Farbe bzgl einer Basis gegeben, so kann man diese in jede andere Basis umrechnen (= Basistransformation)
- Beispiel:
 - Orig. Basis R, G, B , neue Basis U, V, W , wobei

$$U = u_1R + u_2G + u_3B, \quad V = \dots$$

m.a.W.

$$\begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \\ v_1 & v_2 & v_3 \\ w_1 & w_2 & w_3 \end{pmatrix}}_M \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 41

- Nun kann man die Farbe C vom RGB- in den UVW-Farbraum umrechnen:

$$C = uU + vV + wW = rR + gG + bB$$
- Also

$$C = (uvw) \begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix} = (uvw)M \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = (rgb) \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

$$(uvw) = (rgb)M^{-1}$$

G. Zachmann Computer-Graphik 1 – WS 09/10 Farben 42