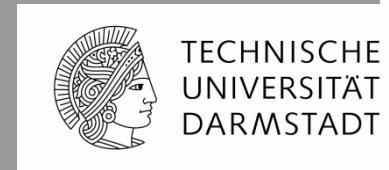


Visual Computing



Farbe



Philipp Urban

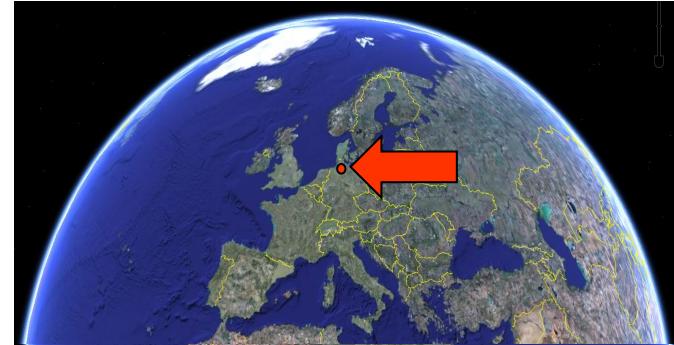
 Fraunhofer
IGD

 TUD
Graphisch-Interaktive Systeme

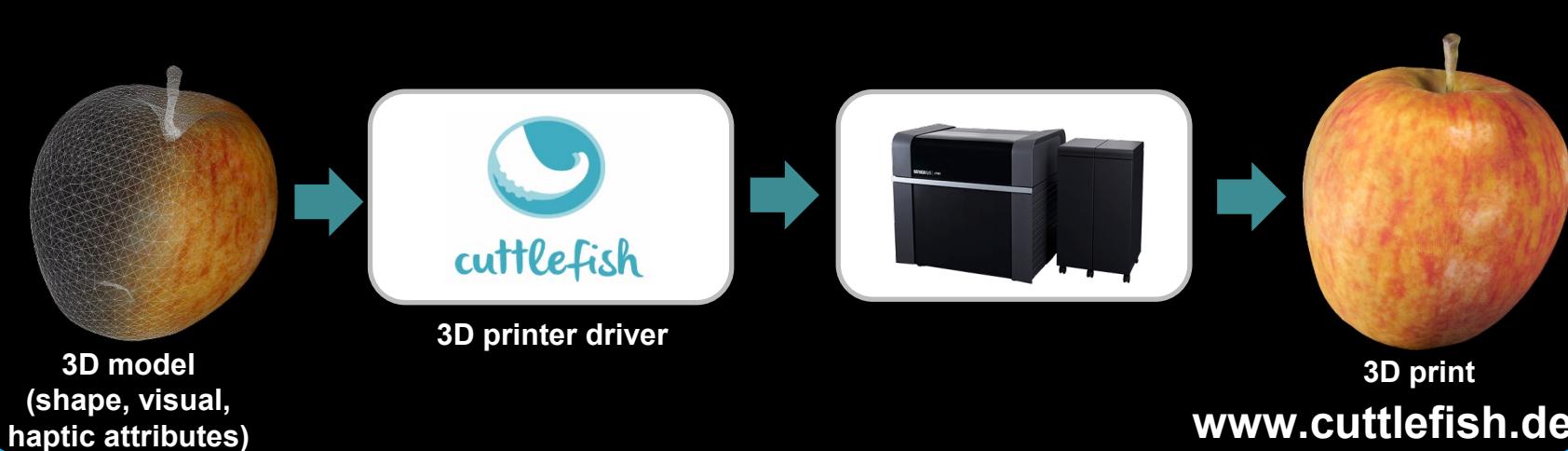
Vorstellung

Kurz Bio

- Mathematikstudium – Uni Hamburg (Dipl. 1999)
- Softwareentwickler – Ratio Entwicklungen GmbH (1999-2006)
- Promotion in Bildverarbeitung - TU Hamburg-Harburg (2005)
- Gastwissenschaftler – Rochester Institute of Technology, NY (2006-2008)
- Forschungsgruppenleiter Farbe – TU Darmstadt (2009-2013)
- Abteilungsleiter 3D Druck Technologie – Fraunhofer IGD
- Professor an der Technisch-Naturwissenschaftlichen Universität Norwegens NTNU



3D Druck Technologie @ Fraunhofer IGD



Einleitung

Farbe ist wichtiger Bestandteil bei der



Aufnahme,



Verarbeitung,



Kommunikation und



Reproduktion von Bildern

Einleitung

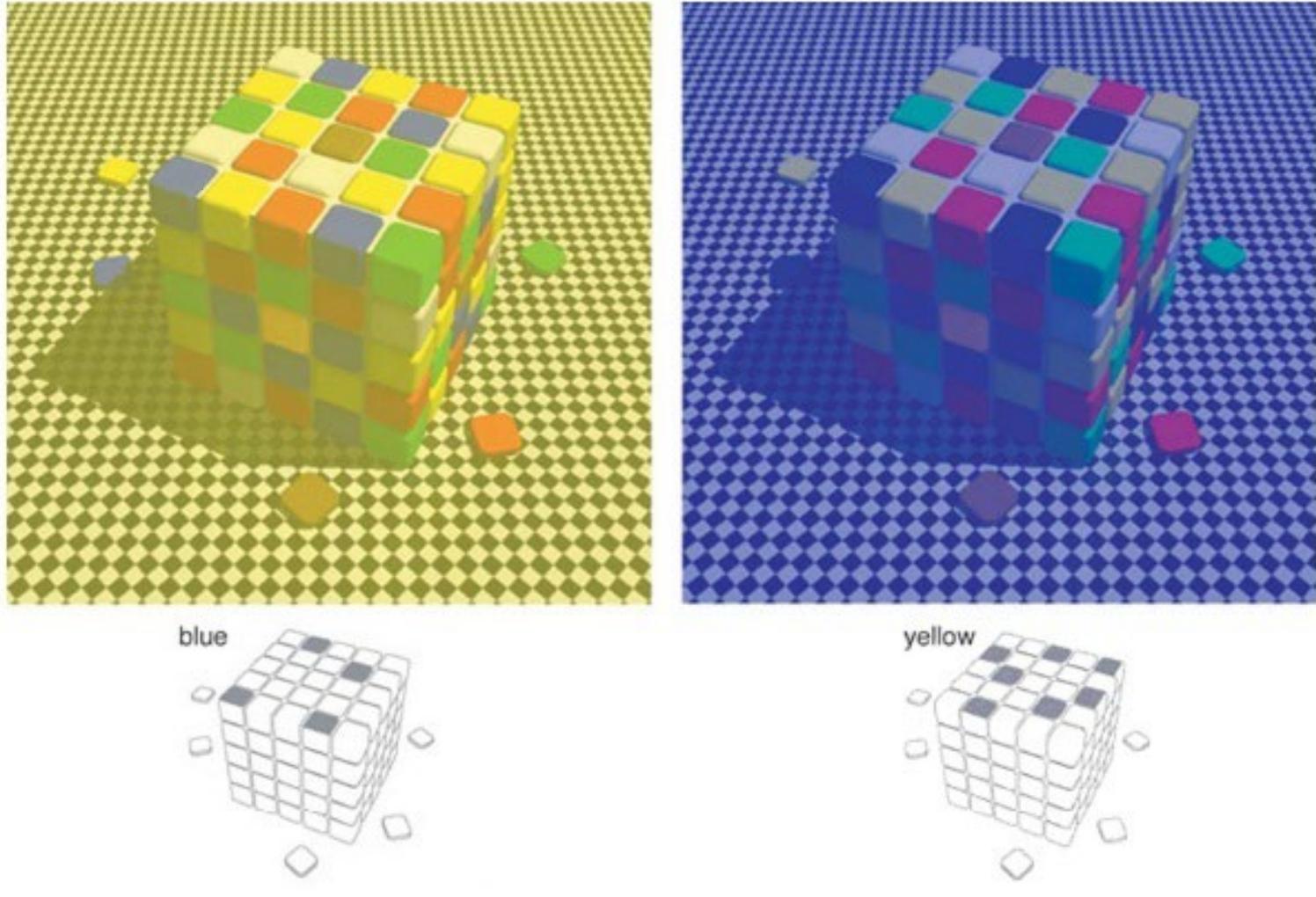
Aber: Was ist Farbe?



Die Farbe ist diejenige Gesichtsempfindung, durch die sich zwei aneinandergrenzende, strukturlose Teile des Gesichtsfeldes bei einäugiger Beobachtung mit unbewegtem Auge allein unterscheiden können.

DIN 5033, Teil 1

Einleitung



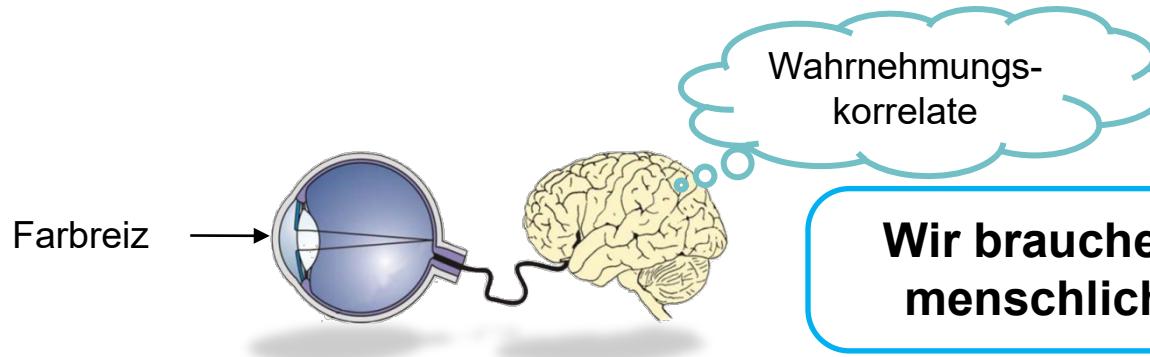
Einleitung



keep staring at the black dot.

Einleitung

Wie können wir Empfindungen aufnehmen, verarbeiten und reproduzieren?



Wir brauchen ein gutes Modell des menschlichen visuellen Systems



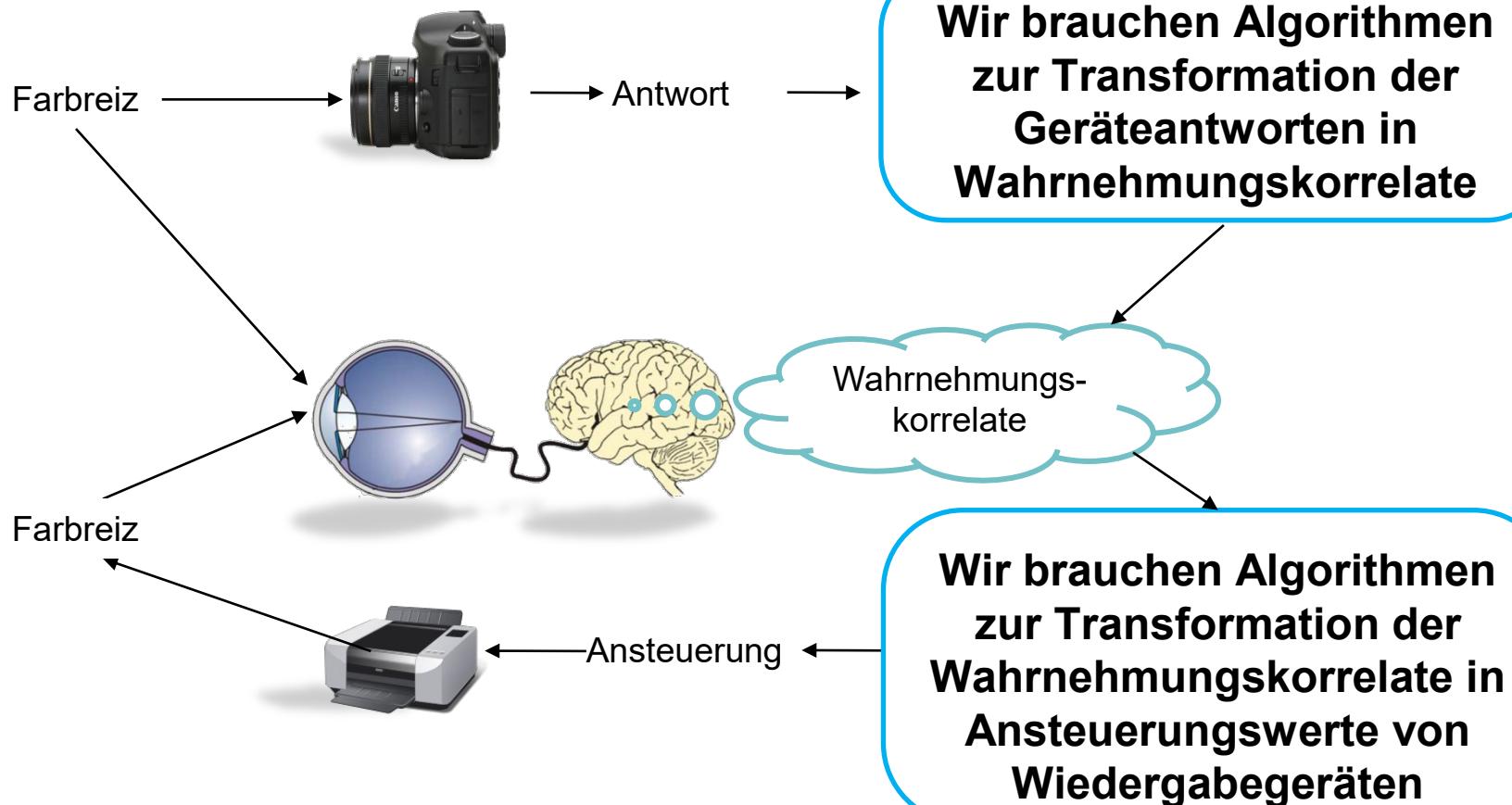
Wir brauchen gute Modelle von Aufnahmegeräten



Wir brauchen gute Modelle von Wiedergabegeräten

Einleitung

Wie können wir Empfindungen aufnehmen, verarbeiten und reproduzieren?



Wie viele Dimensionen hat unsere Farbwahrnehmung?



Farbattribute (Wahrnehmungskorrelate für Farbe)

Wie viele Dimensionen hat unsere Farbwahrnehmung?

Antwort: 5

Welche Farbattribute gibt es?

1. Helligkeit (Brightness)
2. Relative Helligkeit (Lightness)
3. Farbton (Hue)
4. Farbigkeit (Colorfulness)
5. Buntheit (Chroma)

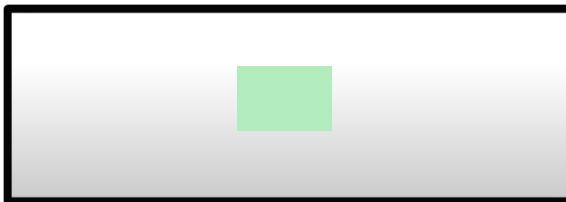


- Sättigung kann durch Helligkeit und Farbigkeit beschrieben werden

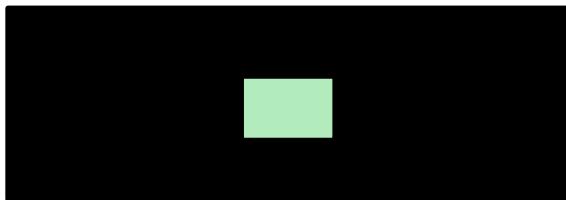
Farbattribute (Wahrnehmungskorrelate für Farbe)

Bezogene und unbezogene Farben

- **Bezogene Farben** werden in Bezug zu anderen Farben wahrgenommen

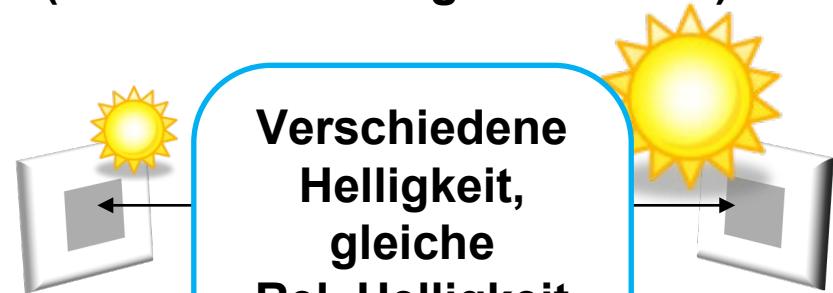


- **Unbezogene Farbe** werden isoliert von anderen Farben wahrgenommen



Brightness and Lightness

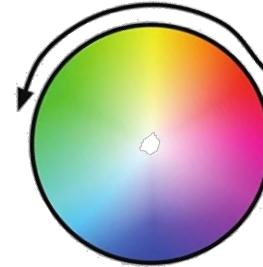
- **Helligkeit (Brightness)**: Attribut der Farbwahrnehmung, nach dem eine Fläche mehr oder weniger Licht abzustrahlen scheint.
- **Relative Helligkeit (Lightness)**: Die Helligkeit einer Fläche relativ zur Helligkeit einer gleich beleuchteten Fläche, die weiß erscheint.
(Gilt nur für bezogene Farben)



Farbattribut (Wahrnehmungskorrelate für Farbe)

Farbton

- **Farbton:** Attribut der Farbwahrnehmung, nach dem eine Fläche gleich den folgenden Farben erscheint: Rot, Gelb Grün und Blau oder einer Kombination von zwei von ihnen.



- **Achromatische Farbe:** Wahrnehmte Farbe ohne Farbton

Farbigkeit und Buntheit

- **Farbigkeit (Colorfulness):** Attribut der Farbwahrnehmung, nach dem eine Fläche als mehr oder weniger farbig empfunden wird.
- **Buntheit (Chroma):** Farbigkeit einer Fläche relativ zur Helligkeit einer gleich beleuchteten Fläche, die weiß erscheint.
(Gilt nur für bezogene Farben)



Farbattribut (Wahrnehmungskorrelate für Farbe)

Formeln

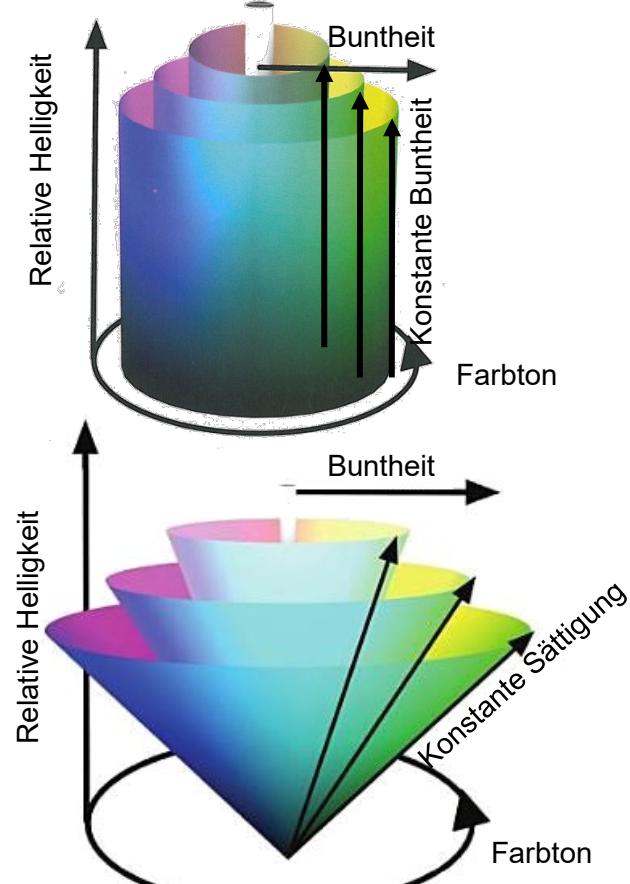
$$\text{Buntheit} = \frac{\text{Farbigkeit}}{\text{Helligkeit(Weiß)}}$$

$$\text{Relative Helligkeit} = \frac{\text{Helligkeit}}{\text{Helligkeit(Weiß)}}$$

Sättigung: Farbigkeit einer Fläche relative zu ihrer Helligkeit:

$$\begin{aligned}\text{Sättigung} &= \frac{\text{Farbigkeit}}{\text{Helligkeit}} \\ &= \frac{\text{Buntheit}}{\text{Relative Helligkeit}}\end{aligned}$$

Visualisierung



Reihard, Khan, Akyüz, Johnson, Color Imaging, 2008

Welche Farbattribute sollte man Reproduzieren?

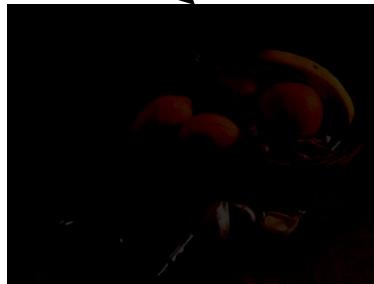
Reproduktion bei
größerer Leuchtdichte

Original (50 cd/m²)



Relative Helligkeit/
Buntheit

Helligkeit/
Farbigkeit



Reproduktionen (5000 cd/m²)

Reproduktion bei
kleinerer Leuchtdichte

Original (5000 cd/m²)



Relative Helligkeit/
Buntheit

Helligkeit/
Farbigkeit

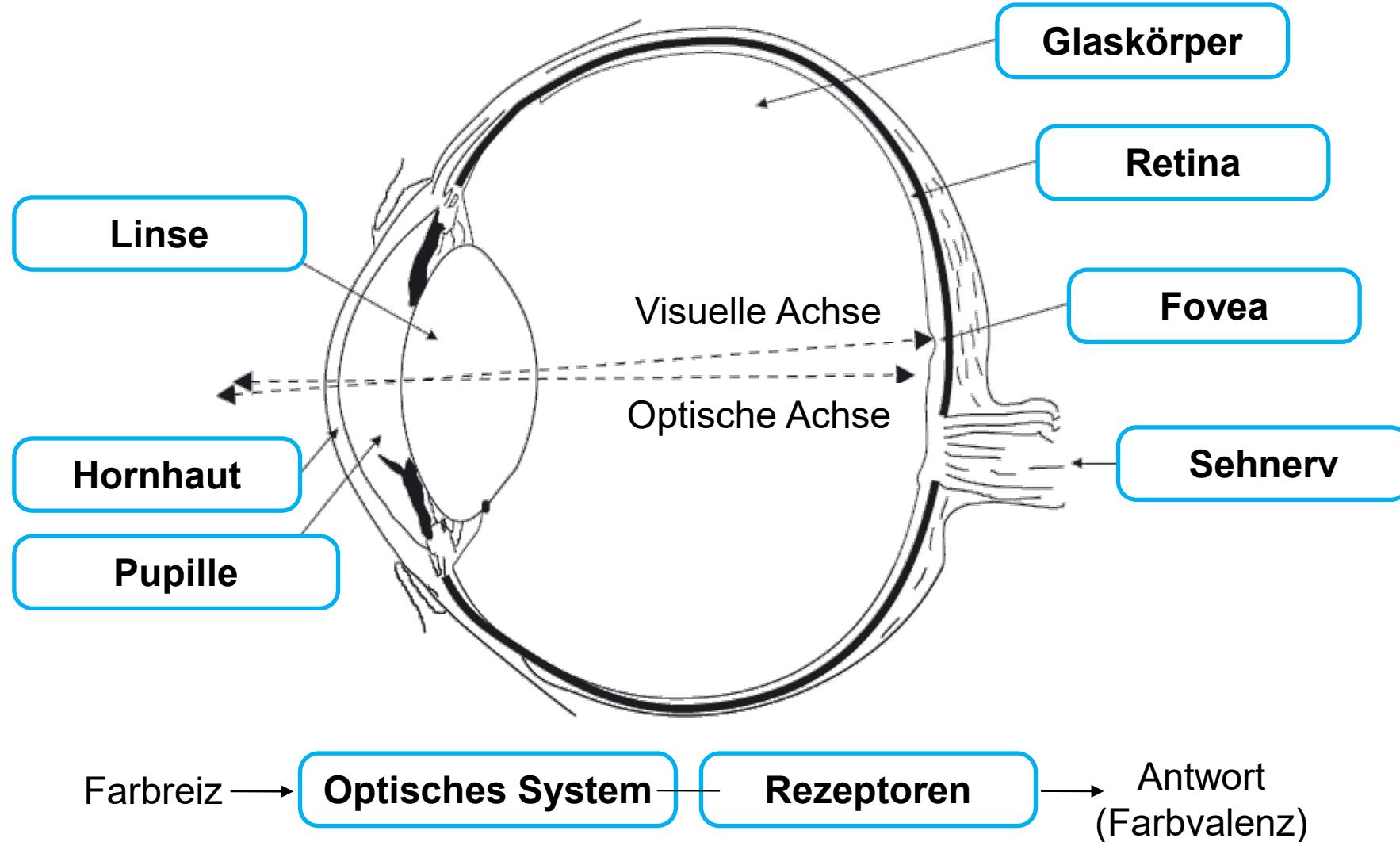


Reproduktionen (50 cd/m²)

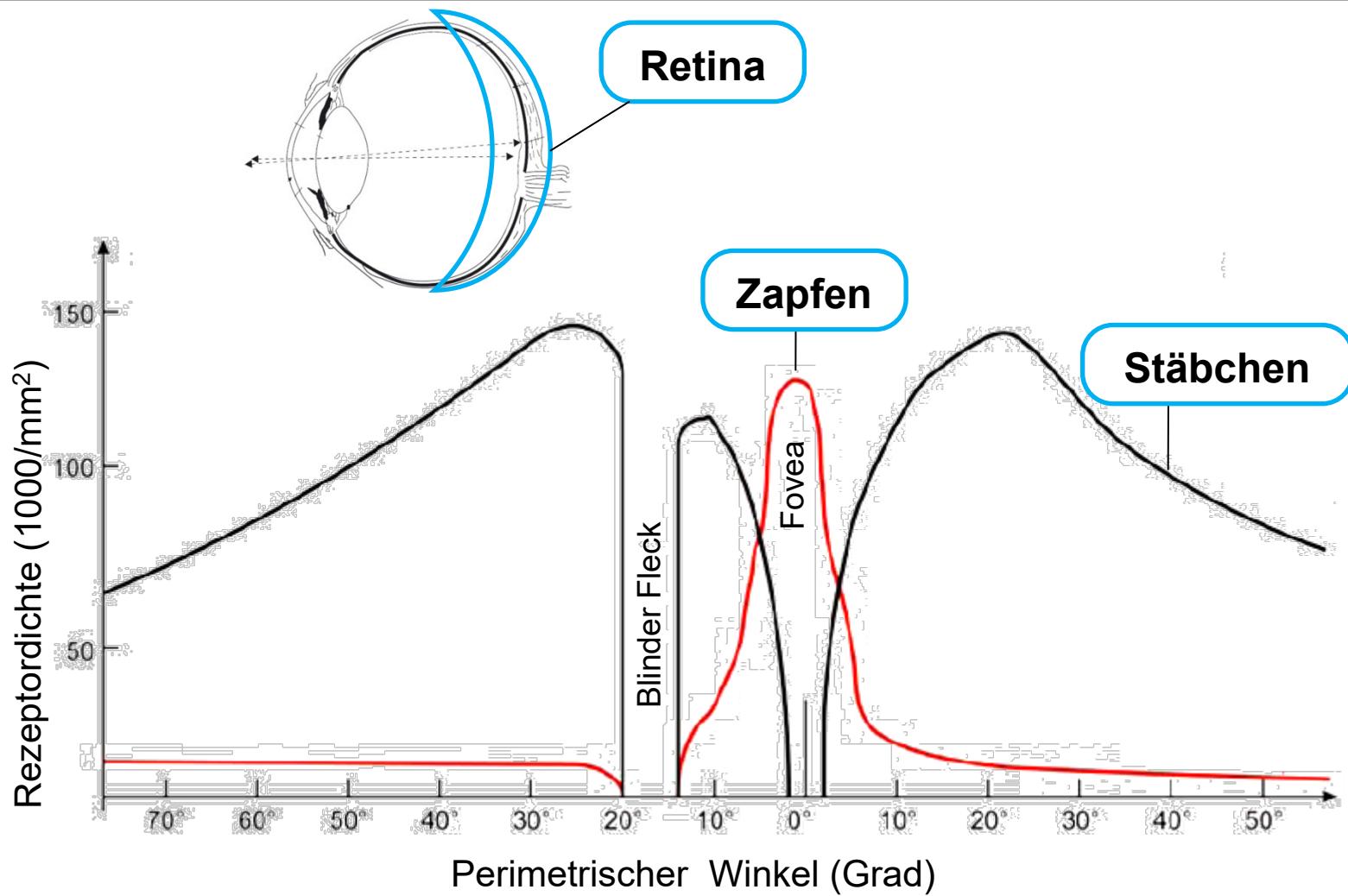
Wie lassen sich die Farbattribut berechnen?



Das Auge

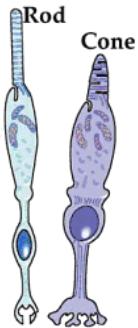


Das Auge



Welsch, N.; Liebermann, C.C.: Farben 2003

Zapfen und Stäbchen



Fotorezeptoren

1. Drei Typen von Zapfen (L, M, S)
2. Ein Typ von Stäbchen

Fairchild M, Color Appearance Models, 2005

Luminanz
 $\sim \text{cd/m}^2$

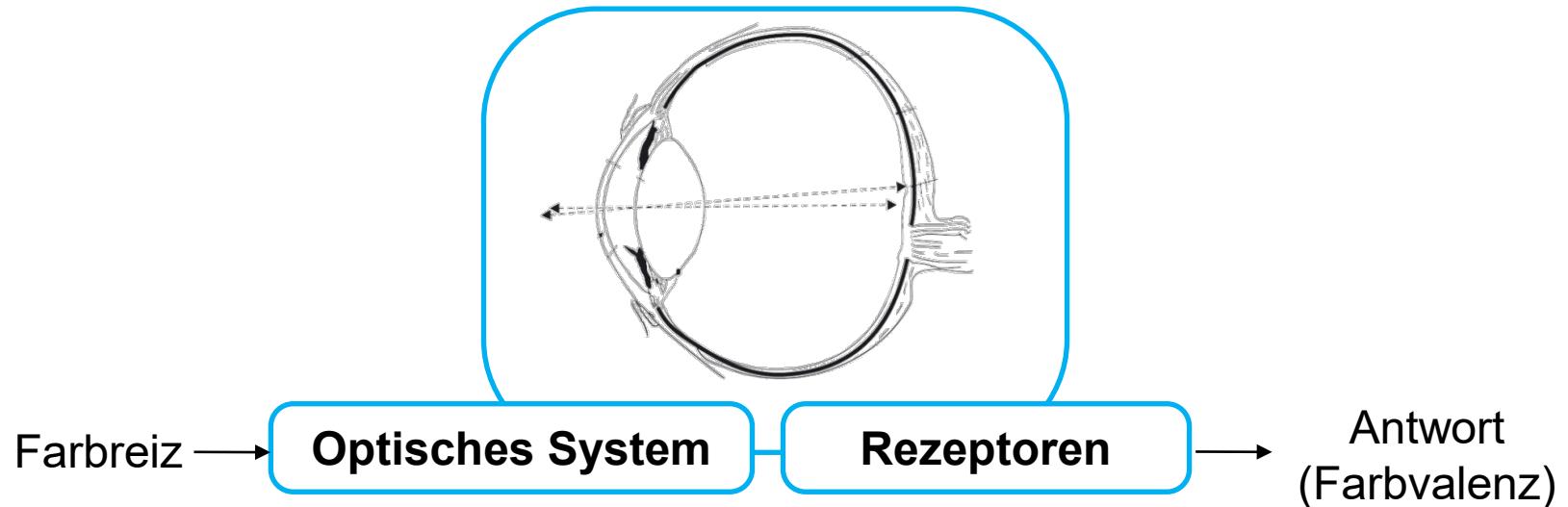


Skotopisches
Sehen
(Stäbchen)

Mesopisches
Sehen
(Zapfen,
Stäbchen)

Photopisches
Sehen
(Zapfen)

Spektrale Charakterisierung des Auges



Kontinuierliches Model

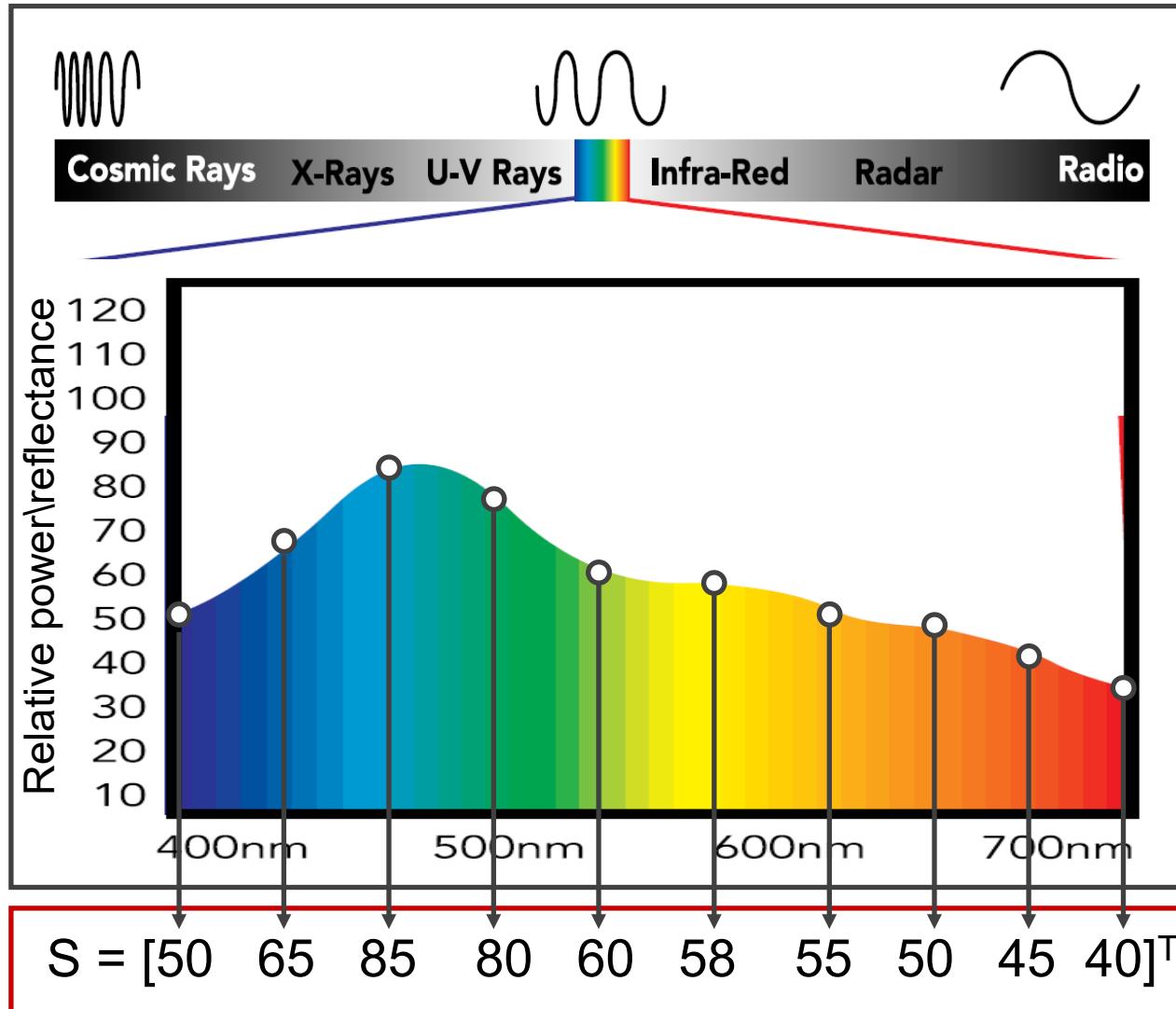
$$y_i = \int_{\Lambda} x(\lambda) s_i(\lambda) d\lambda \quad i = 1, 2, 3$$

y_i = i-te Farbvalenz, $x(\lambda)$ = Farbreiz

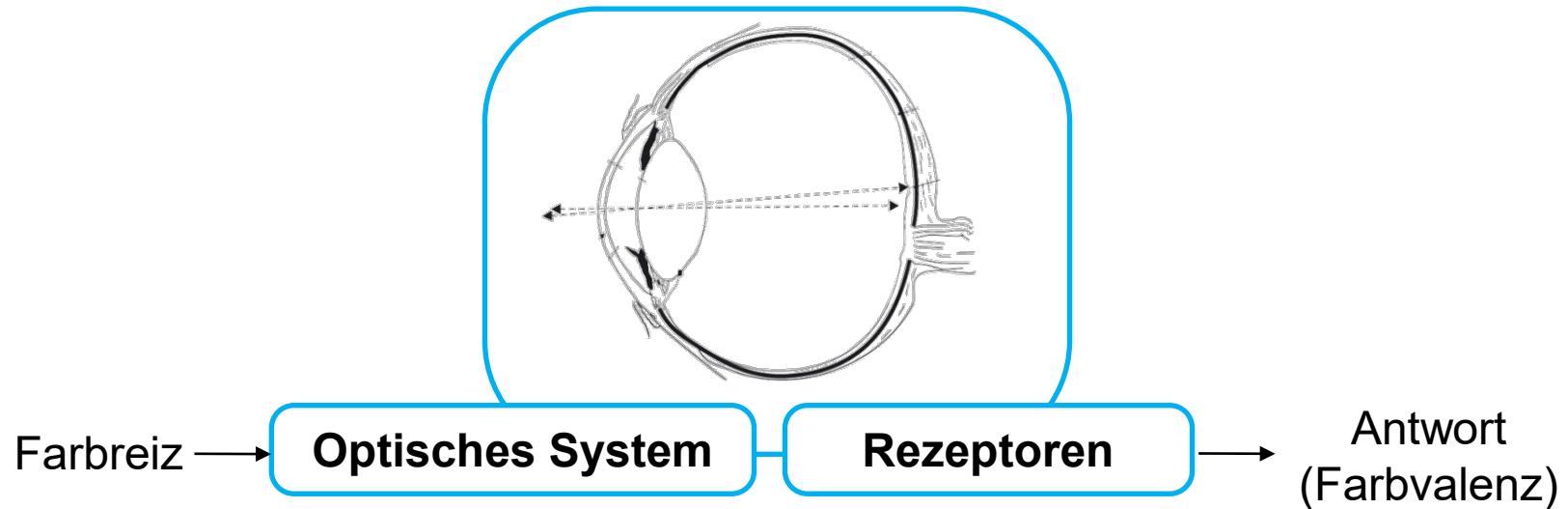
$s_i(\lambda)$ = i-te spektrale Empfindlichkeit

Λ = Sensitivitätsbereich [380nm,730nm]

Diskrete Spektren



Spektrale Charakterisierung des Auges



Annahmen

1. Anzahl der Fotorezeptoren ist 3
2. Lineares System



Diskretes Model

$$y = Sx$$

y = 3 dim. Vektor (Farbvalenz)
 x = N dim. Vektor (Farbreiz)
 S = 3xN dim. Systemmatrix

Spektrale Charakterisierung des Auges

Farbabgleichsexperiment

1. Drei linear unabhängige Lichtquellen p_1, p_2, p_3 (N dim. Vektoren)
2. Intensität kann linear verstellt werden durch a_1, a_2, a_3 (Skalare)
3. Testlichtquelle f (N dim. Vektor)

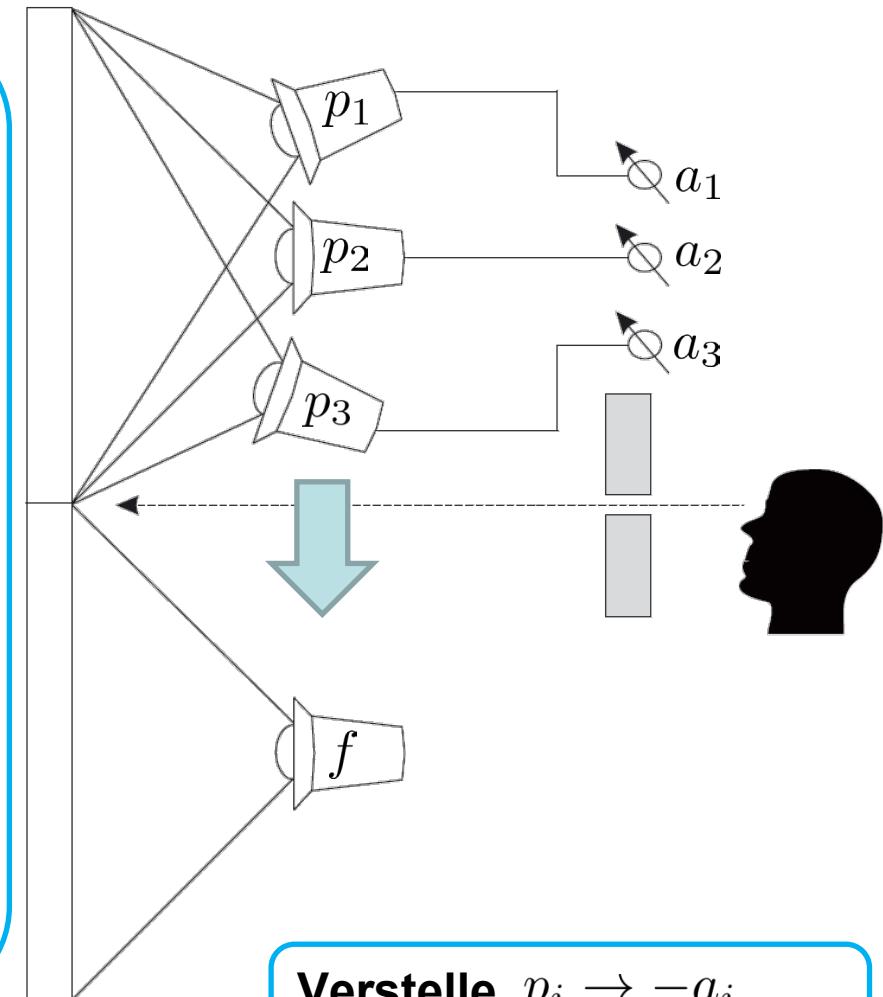
Probanden sollen Farben abgleichen:

$$Sf = SPA$$

mit

$$P = (p_1, p_2, p_3)$$

$$a = (a_1, a_2, a_3)^T$$



Verstelle $p_i \rightarrow -a_i$

Spektrale Charakterisierung des Auges

Farbabgleichsexperiment

Abgleich mit monochromatischem Licht
 $f = e_i, i = 1, \dots, N$

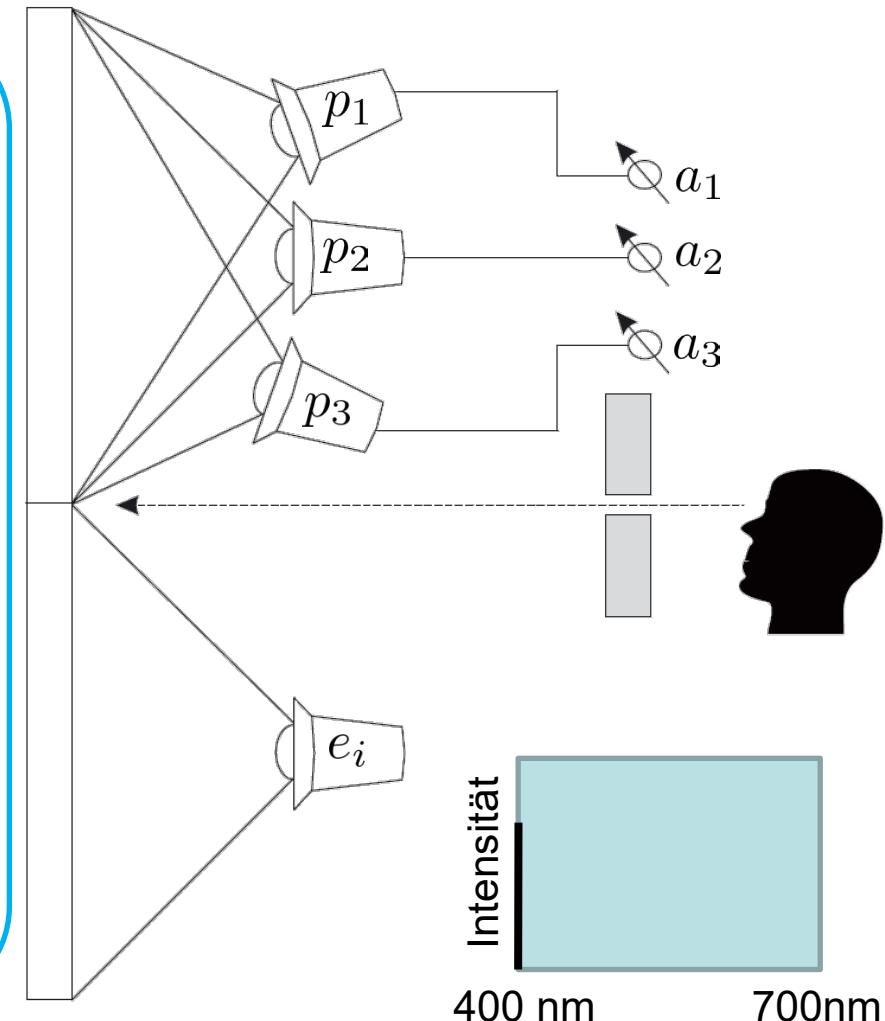
und abspeichern aller Einstellungen

$$a^i = (a_1^i, a_2^i, a_3^i)$$

resultiert in

$$\begin{aligned} SI_N &= S = SPA \\ \Leftrightarrow A &= (SP)^{-1}S \end{aligned}$$

A = Spektralwertmatrix (engl. Color Matching Matrix) für die Primärlichtarten $P = (p_1, p_2, p_3)$



Spektralwertfunktionen (Color Matching Functions)

Eigenschaften

- Wenn zwei Farbreize g, f gleich erscheinen, dann gilt

$$Sg = Sf$$

$$\Leftrightarrow (SP)^{-1}Sg = (SP)^{-1}Sf$$

$$\Leftrightarrow Ag = Af$$

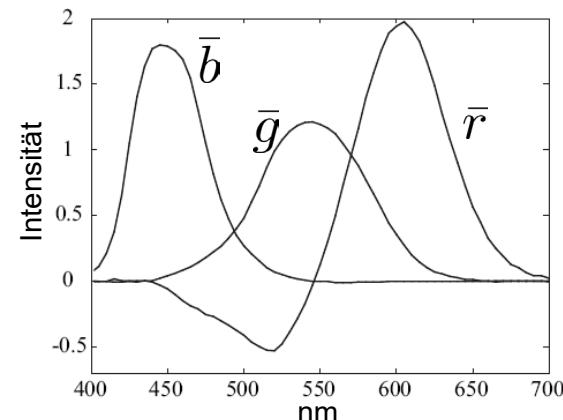
- Die Zeilen von A heißen Spektralwertfunktionen (engl. Color Matching Functions - CMF)

- Multiplikation mit einer regulären 3×3 matrix M erzeugt neue CMFs

$$B = MA$$

CIE 1931 $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$ CMFs

Farbabgleichsexperiment mit monochromatischen Primärlightarten p_1, p_2, p_3 (700.0nm, 546.1nm, 435.8nm)



CMFs: $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$

Spektralwertmatrix: $A = (\bar{r}, \bar{g}, \bar{b})^T$

Spektralwertfunktionen (Color Matching Functions)

Hilfreiche CMF Eigenschaften

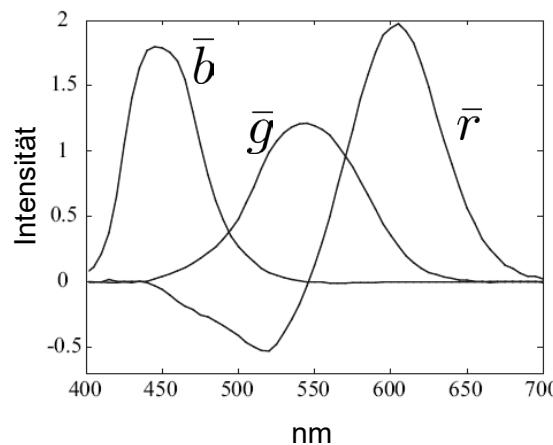
- **Positivität**
- **Eine CMF ist die Hellempfindlichkeitsfunktion $V(\lambda)$**
- **Viele Nullen (einfache Berechnung)**

CIE 1931 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ CMFs

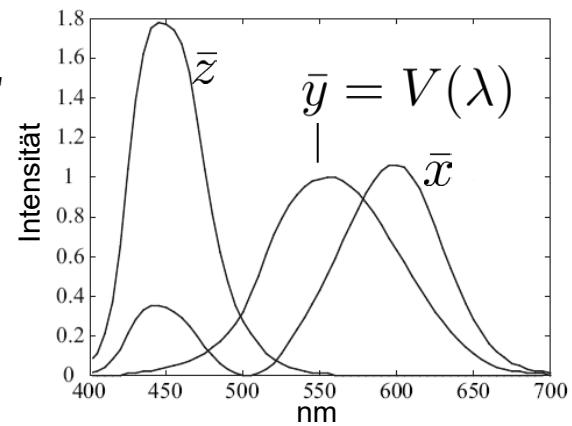
$$(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})^T = M(\bar{r}, \bar{g}, \bar{b})^T$$

$$M = \begin{pmatrix} 0.4674162 & 0.2944512 & 0.1886026 \\ 0.2410115 & 0.6835475 & 0.0754410 \\ 0.0219101 & 0.0736128 & 0.9933071 \end{pmatrix}$$

CIE 1931 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ CMFs



$$(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})^T = M(\bar{r}, \bar{g}, \bar{b})^T$$



Cone (=Zapfen) Fundamentals

Definition

“Cone Fundamentals” sind die spektralen Empfindlichkeiten der Zapfen multipliziert mit der Transmission der Augenoptik (Linse, Macula, etc.).

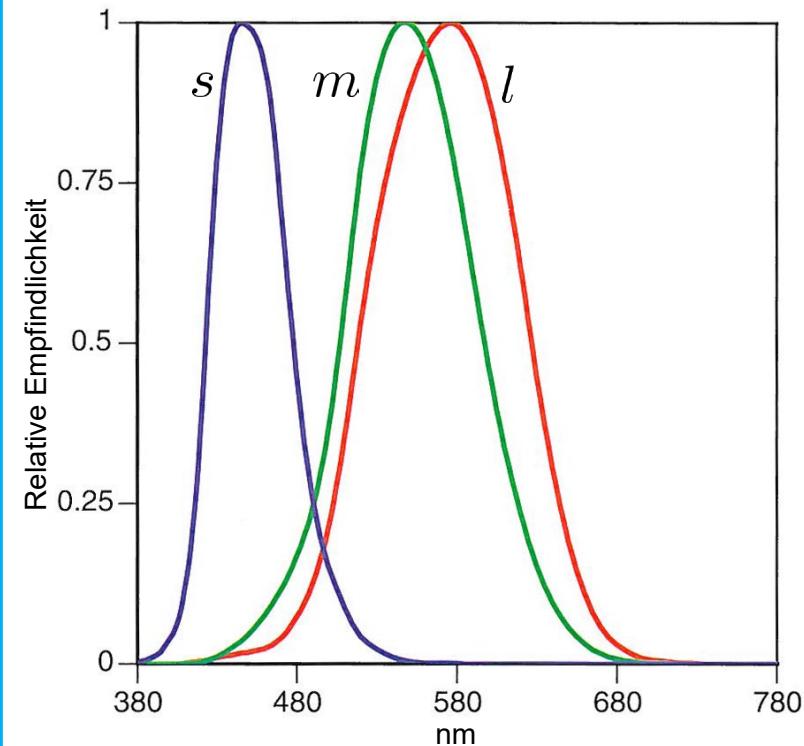
Beziehung zu den CIE 1931 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ CMFs

Linear Transformation:

$$\begin{pmatrix} l^T \\ m^T \\ s^T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.3897 & 0.6890 & -0.0787 \\ -0.2298 & 1.1834 & 0.0464 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{x}^T \\ \bar{y}^T \\ \bar{z}^T \end{pmatrix}$$

(Hunt-Pointer-Estevez Transformation)

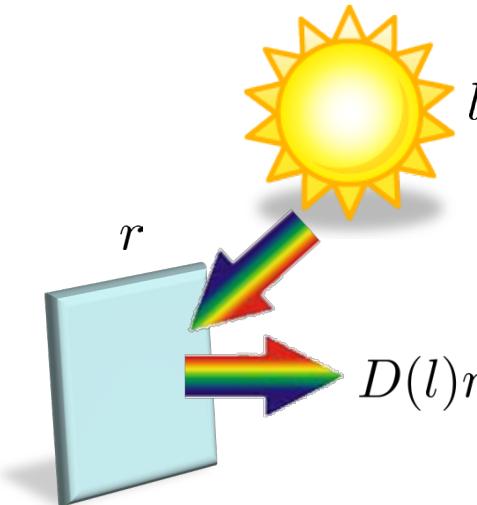
Cone Fundamentals



Roy Berns, Principles of Color Technology, 2000

Objektfarben und Lichtmatrix

Reflektionsbasierte Farbreize



l = Spektrale Dichteverteilung der Lichtart (N dim. Vektor)

r = Reflektionsspektrum (N dim. Vektor)

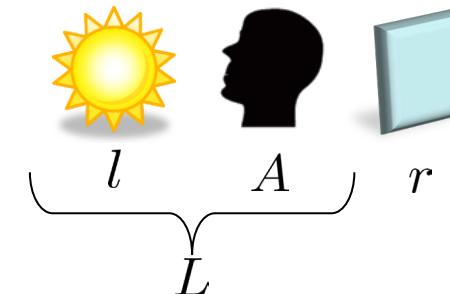
$D(\cdot)$ = Operator, der einen N dim. vektor in eine NxN dim. Diagonalmatrix konvertiert

Lichtmatrix

Für eine Spektralwertmatrix A wird die reflektionsbasierte Farbvalenz y wie folgt berechnet

$$\begin{aligned}y &= AD(l)r \\&= Lr\end{aligned}$$

$L = AD(l)$ heißt Lichtmatrix



Der CIEXYZ Farbraum

CIEXYZ für Objektfarben

CIEXYZ Farbkoordinaten (Farbvalenzen) für die Lichtart l sind definiert als:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \frac{100}{\bar{y}^T l} L r$$

L = **Lichtmatrix**, d.h.

$$L = (\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})^T D(l)$$

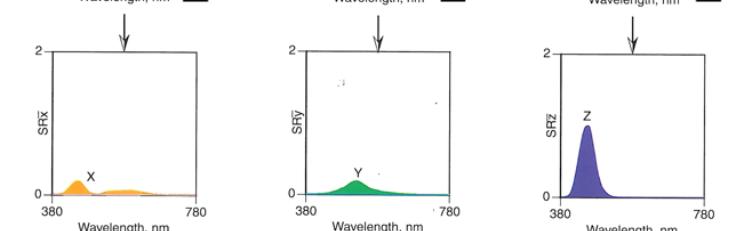
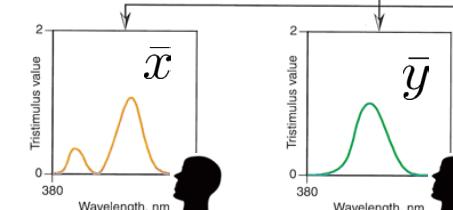
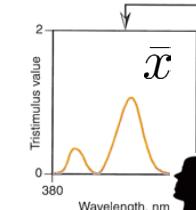
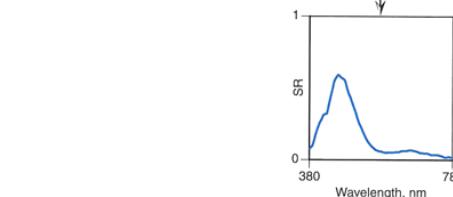
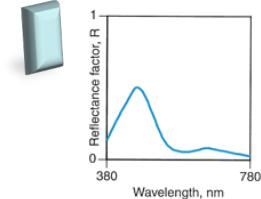
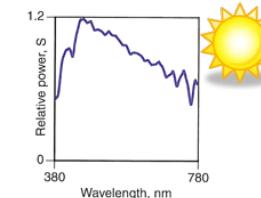
r = **Reflektionsspektrum**



Beachte: $r \equiv 1 \Rightarrow Y = 100$

Farbvalenzen (X, Y, Z) heißen
Normfarbwerte

Beispiel



Roy Berns, Principles of Color Technology, 2000

Das CIE xy Chromaticity Diagramm (Normfarbtafel)

Chromaticity Koordinaten

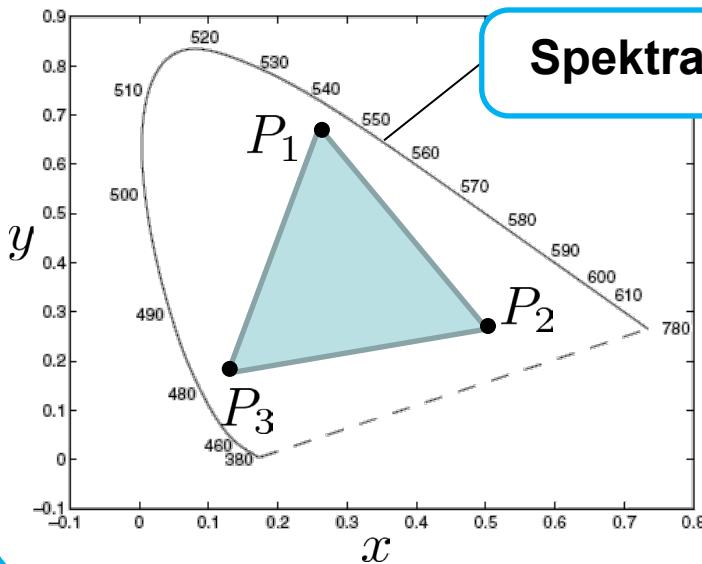
Chromaticity Koordinaten

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

Chromaticity Diagramm

Die x, y Koordinaten der monochromatischen Farbreize erzeugen die Spektralfarblinie

Eigenschaften



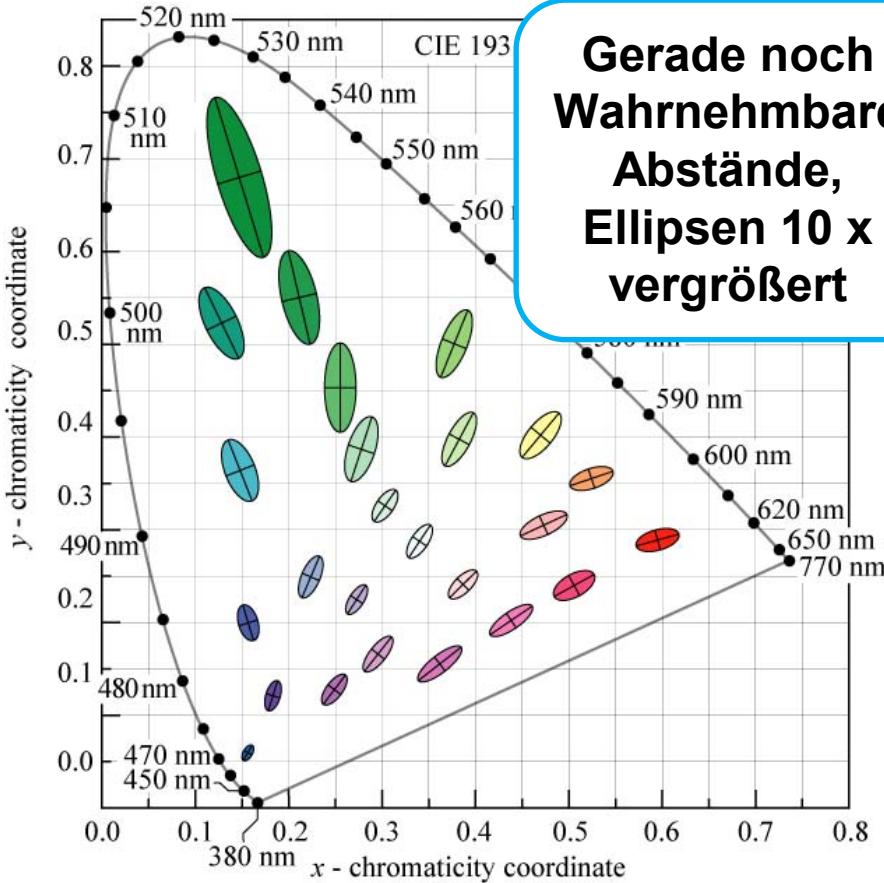
Spektralfarblinie

Die x, y Chromaticity Koordinaten einer additiven Mischung von Farbreizen liegen in der konvexen Hülle der Chromaticity Koordinaten der Farbreize.

Häufig benutzt für die Darstellung des Farbumfangs von Monitoren.

Der CIEXYZ Farbraum - Limitierungen

MacAdam Ellipsen



**Gerade noch
Wahrnehmbare
Abstände,
Ellipsen 10 x
vergrößert**

Farbabstände

**CIEXYZ is nicht wahrnehmungs-
gleichabständig:** $\exists q, p \in \text{CIEXYZ}$

$$\Delta V(q, p) \neq \|q - p\|_2$$

ΔV = Wahrgenommener Farb-
abstand

Farbattribute

**CIEXYZ modelliert nur die erste
Phase des Farbensehens (Auge).**

**Erlaubt keinen einfachen Zugriff
auf Farbattribute**

Metamerie

Definition

Zwei Farbreize g, f ($g \neq f$) für die gilt

$$Ag = Af$$

heißen Metamere.

f = Farbreiz (N dim. Vektor)

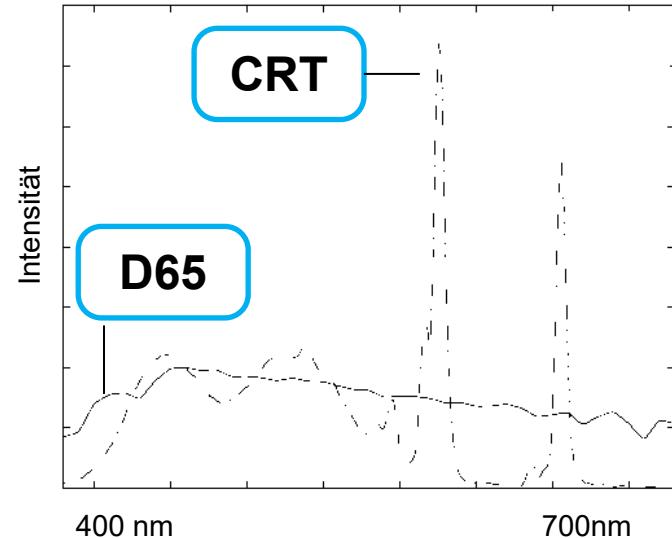
g = Farbreiz (N dim. Vektor)

A = Spektralwertmatrix

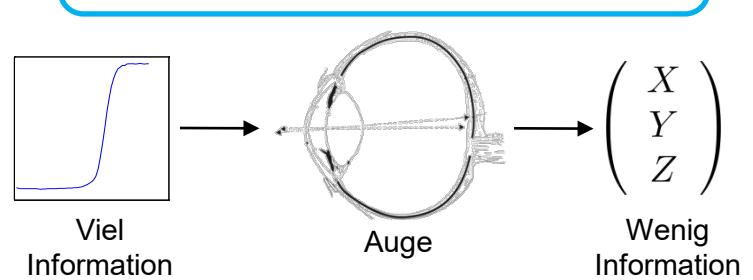
(3xN dim. Matrix)

$$\text{z.B. } A = (\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})^T$$

Beispiel



Informationsverlust



Beleuchtungsmetamerie für Objektfarben

Definition

Zwei Reflektionsspektren $r_1, r_2 (r_1 \neq r_2)$ heißen **metamere Reflektionsspektren unter der Lichtart l** , falls gilt:

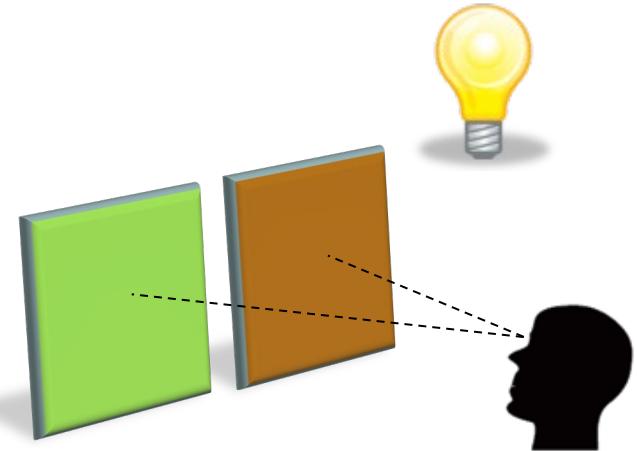
$$Lr_1 = Lr_2$$

L = **Lichtmatrix**, d.h. $L = (\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})^T D(l)$

Tageslicht



Glühlampenlicht



Beobachtermetamerie

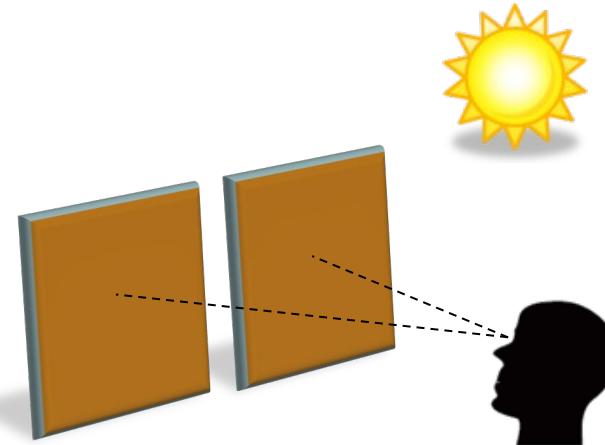
Definition

Zwei Farbreize $g, f (g \neq f)$ erzeugen bei gleichen Betrachtungsbedingungen für eine Person die gleichen, für eine andere unterschiedliche Farbvalenzen, d.h.

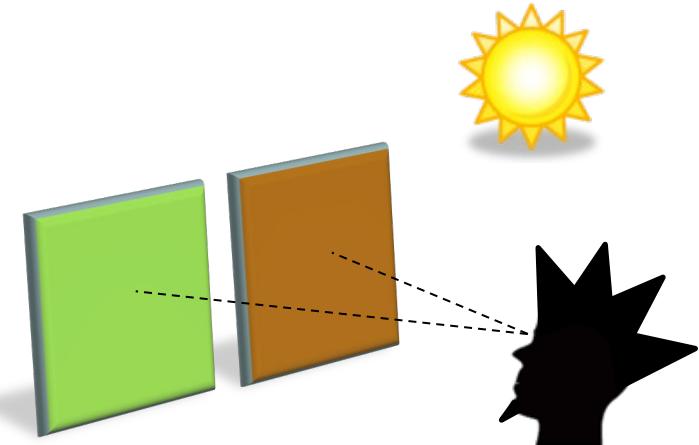
$$A_1 g = A_1 f \text{ aber } A_2 g \neq A_2 f$$

A_i = Spektralwertmatrix für Person i

Person 1



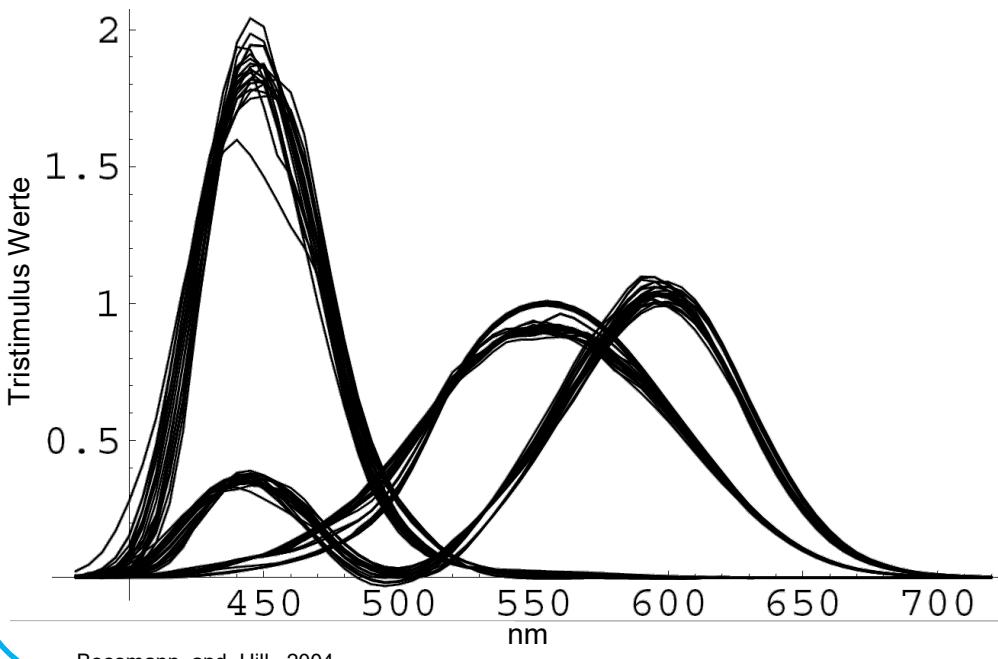
Person 2



Beobachtermetamerie

Individuelle Spektralwertfunktionen

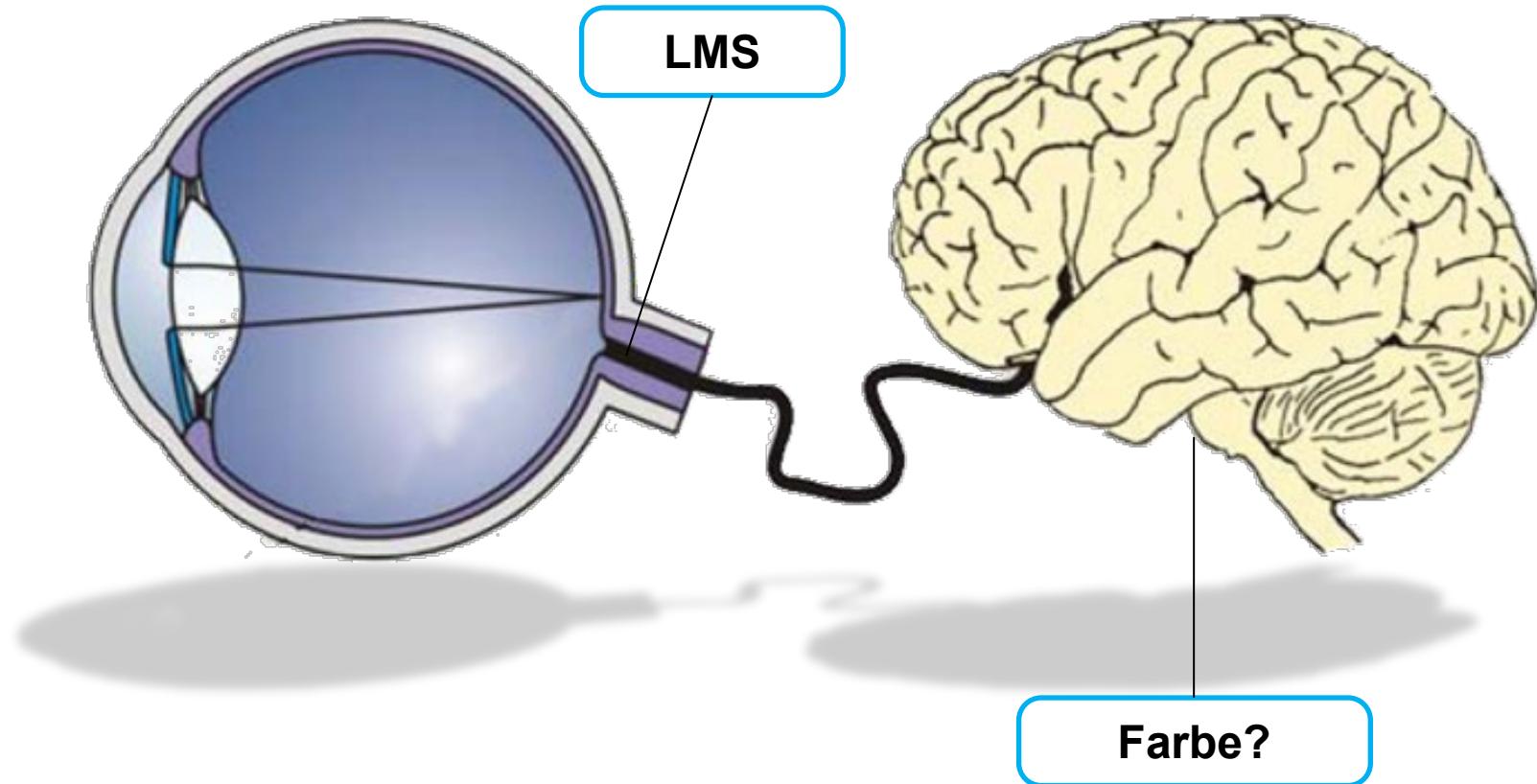
Spektralwertfunktionen von 24 unterschiedlichen Personen



Einflussfaktoren

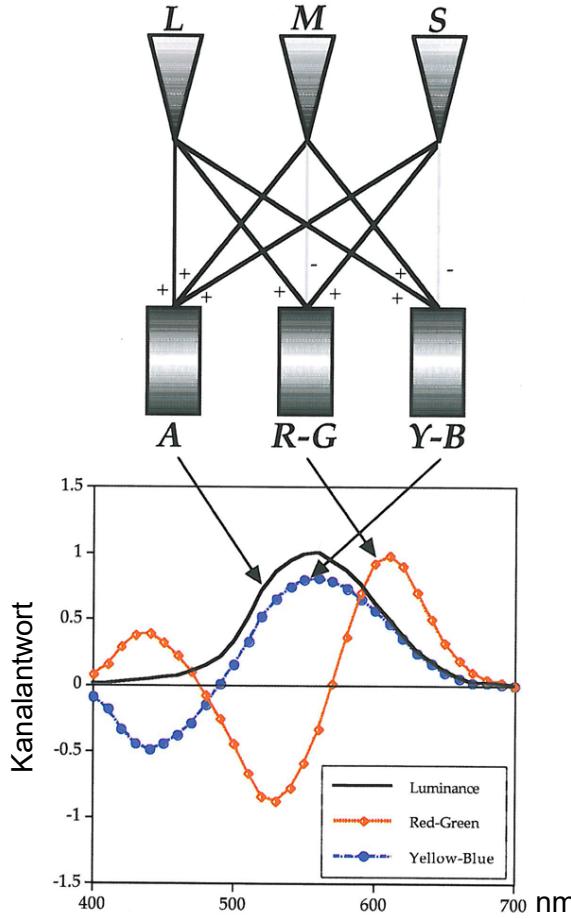
- Dichte der Linse.
Variationen werden verursacht durch:
 - Alter
 - Ernährung
 - Ethnie
 - Starkes Rauchen
- Polymorphismus:
Maxima spektraler Empfindlichkeiten variieren zwischen Personen (bis zu 9nm)

Wie werden die LMS Signale weiterverarbeitet?



Gegenfarbentheorie

Kodierung der LMS Signale



Fairchild M, Color Appearance Models, 2005

Gegenfarben

$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} = (l, m, s)^T f$$

l, m, s = Cone fundamentals
(N dim. Vekoren)
 f = Farbreiz
(N dim. Vektor)

Achromatisch $L + M + S$

Rot-Grün $L - M + S$

Gelb-Blau $L + M - S$

Stevenssche Potenzfunktion

Stevenssche Potenzfunktion

Beziehung der Reizstärke mit der Empfindungsstärke nach Stevens:

$$\psi = k(I - I_0)^n$$

ψ = Wahrnehmungskorrelat

I = Reiz

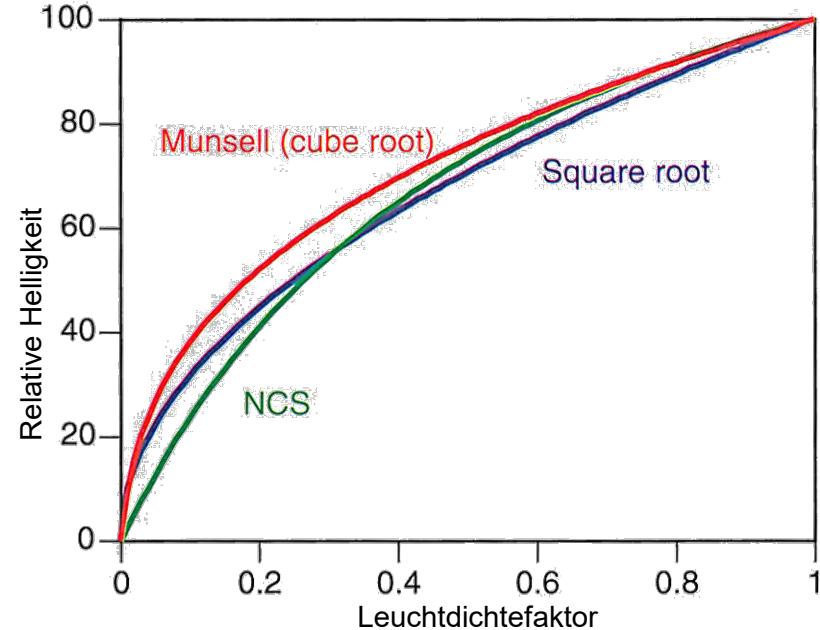
I_0 = Gerade noch wahrnehmb. Reiz

k = Anpassbare Verstärkung

n = Anpassbarer Exponent

Gilt nicht nur für Farbe

Leuchtdichte – Rel. Helligkeit



Verschiedene Adaptationen von Stevensscher Potenzfunktion

Roy Berns, Principles of Color Technology, 2000

CIELAB Farbraum - Definition

Definition (1976)

Eingabe:

(X, Y, Z) = XYZ Farbvalenz
 (X_n, Y_n, Z_n) = XYZ Farbvalenz
des Weißpunktes

Farbraumtransformation:

$$L^* = 116f(Y/Y_n) - 16$$

$$a^* = 500(f(X/X_n) - f(Y/Y_n))$$

$$b^* = 200(f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n))$$

$$f(\omega) = \begin{cases} \omega^{1/3} & \omega > 0.008856 \\ 7.787\omega + 16/116 & \omega \leq 0.008856 \end{cases}$$

Ausgabe:

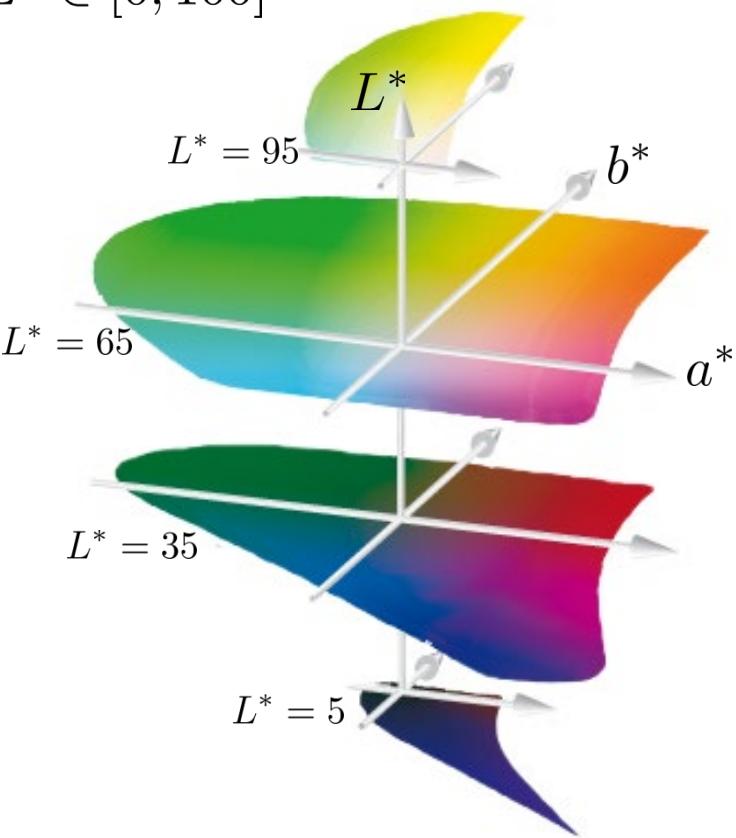
L^* = Relative Helligkeit

a^* = Rot-Grün Komponente

b^* = Blau-Gelb Komponente

Visualisierung

$$L^* \in [0, 100]$$



CIELAB Farbraum

Eigenschaften

1. Gegenfarbenraum
2. Modelliert Nichtlinearitäten des visuellen Systems

3. Nahezu wahrnehmungsgleichabständig, d.h. :

$$\forall q, p \in \text{CIELAB}$$

$$\begin{aligned}\Delta V(q, p) &= \|q - p\|_2 \\ &= \Delta E_{ab}^*(q, p)\end{aligned}$$

ΔV = Empfundener Farbabstand

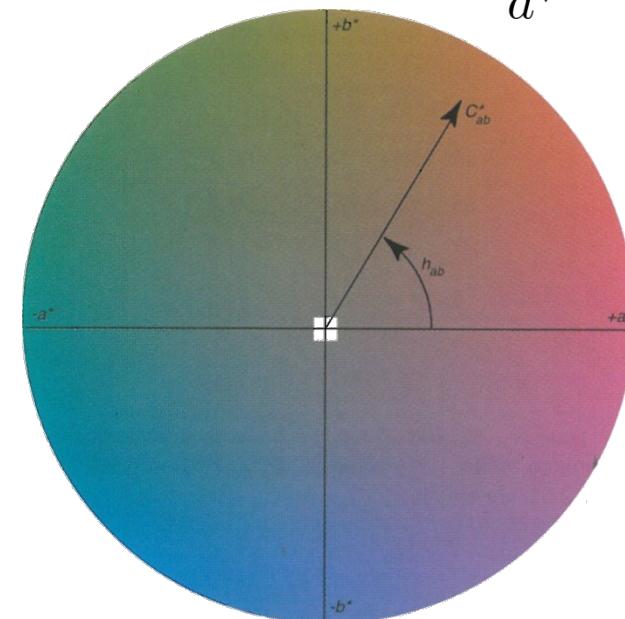
Euklidische Metrik in CIELAB
heißt ΔE_{ab}^*

LCh Farbraum

Zylindrische Koordinaten von CIELAB

Buntheit: $C_{ab}^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$

Farnton: $h_{ab} = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$



Technische Farbräume



Technische Farbräume

Geräte RGB



**RGB = Zahlenwerte der Geräteantwort
oder zur Ansteuerung (meist 8 Bit/Ka.)**

Geräteunabhängige RGB

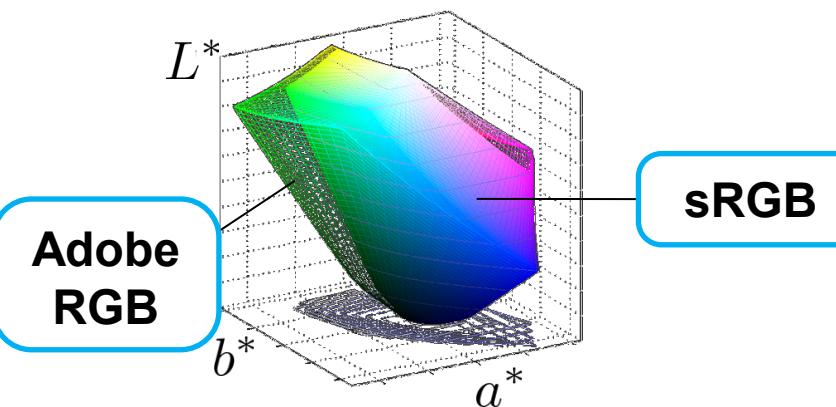
Bezug zum menschlichen visuellen System

$$\text{CIEXYZ} \xleftrightarrow{\text{Transformation}} \text{RGB}$$

Meist:

$$\begin{aligned} \text{CIEXYZ} &\xleftrightarrow{\text{lin}} \text{RGB}_{\text{lin}} \\ (\text{R}_{\text{lin}}, \text{G}_{\text{lin}}, \text{B}_{\text{lin}}) &\xleftrightarrow{\text{non-lin}} (\text{F}(\text{R}_{\text{lin}}), \text{F}(\text{G}_{\text{lin}}), \text{F}(\text{B}_{\text{lin}})) \end{aligned}$$

Beispiele: sRGB, Adobe RGB



Technische Farbräume

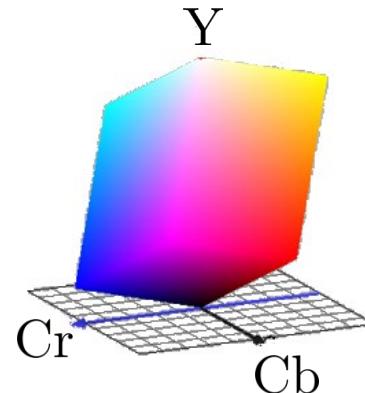
YCbCr

Gegenfarbenraum

Y = "Luminanz"

Cb = "Blau-Gelb"

Cr = "Rot-Grün"



Definiert über lin. Transformation aus RGB Farbraum.

Einsatz: JPEG

Vorsicht:

- Kein eindeutiger Bezug zum visuellen System

HSI (HSV, HSL)

Achsen sind Farbattribute

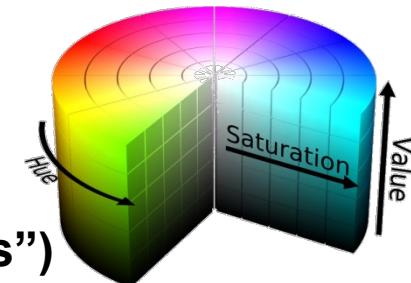
H = "Hue"

S = "Saturation"

I = "Intensity"

(**V** = Value,

L = "Lightness")



Einsatz: Zur "intuitiven" Auswahl von Farben in Grafikprogrammen

Vorsicht:

- Kein eindeutiger Bezug zum visuellen System
- HSI Farbattribute stimmen nicht mit tatsächlichen überein (Kreuzkontamination)

Technische Farbräume

CMY / CMYK

C = Cyan
M = Magenta
Y = Yellow
K = Black

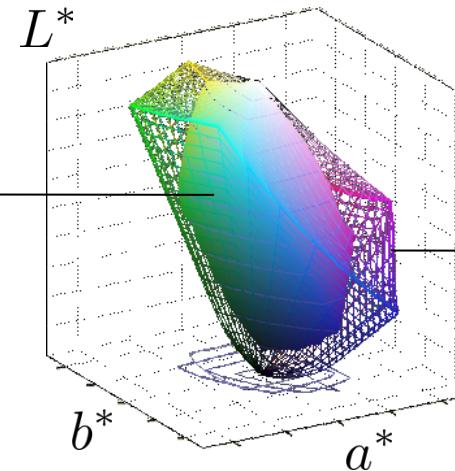
Drucker
CMYK
(Beispiel)

Ansteuerungswerte zur Tintenauswahl
bei Drucksystemen (i.A. 8 Bit/Kanal)
(Subtraktive Farbmischung)

Charakterisierung des Drucksystems bedeutet die Bestimmung der Transformation:

$$\text{CMYK} \xrightarrow{\text{Transformation}} \text{CIEXYZ}$$

Transformation aller durch das Drucksystem reproduzierbaren Farben nach CIELAB erzeugt den sog. Druckergamut.



sRGB

Ist Farbe so einfach?



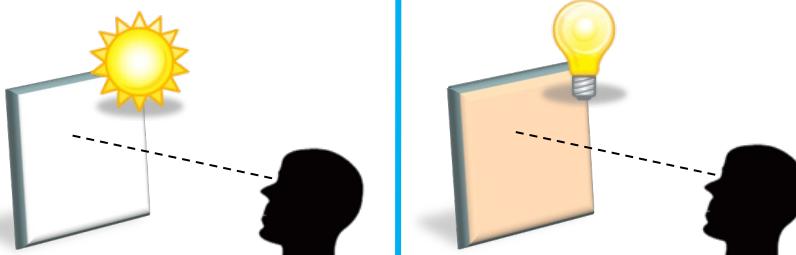


Chromatische Adaptation

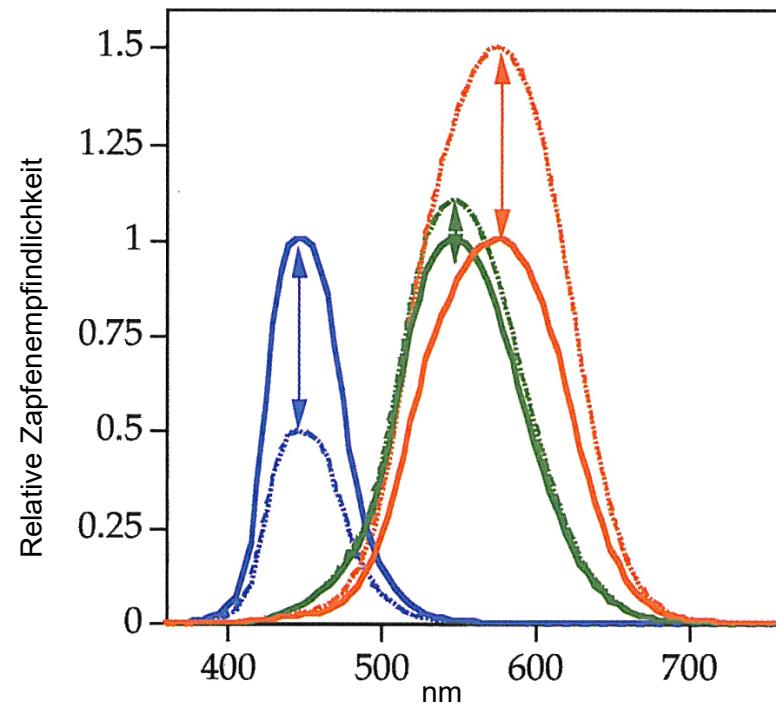
Definition

Chromatische Adaptation beschreibt die weitgehend  unabhängige Regulierung der Mechanismen beim Farbensehen.

Häufig betrachtet als die unabhängige Anpassung der Zapfenempfindlichkeiten an den dominanten Farbreiz der Umgebung

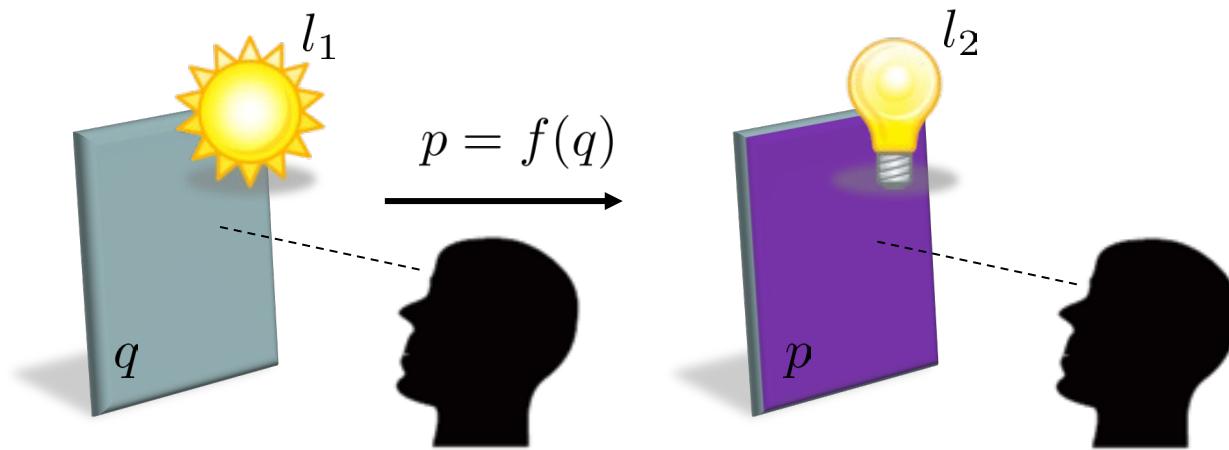


Vereinfachte Darstellung



Chromatische Adaptation

Modell der chromatischen Adaptation



q = CIEXYZ Werte für die Lichtart l_1

p = CIEXYZ Werte für die Lichtart l_2

f = Modell der chromatischen Adaptation

Einfaches Modell der chromatischen Adaptation

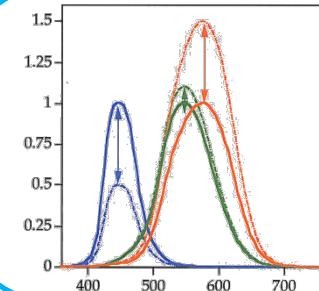
Von Kries Modell

Hypothese: 1. Jeder Zapfen wird individuell adaptiert
2. Lineare Transformation

Von Kries Transformation



$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = K^{-1} \begin{pmatrix} \frac{L_{w,2}}{L_{w,1}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{M_{w,2}}{M_{w,1}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{S_{w,2}}{S_{w,1}} \end{pmatrix} K \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix}$$



$(L_{w,1}, M_{w,1}, S_{w,1})$ = **Zapfenantworten des Weißpunktes für Lichtart l_1**

$(L_{w,2}, M_{w,2}, S_{w,2})$ = **Zapfenantworten des Weißpunktes für Lichtart l_2**

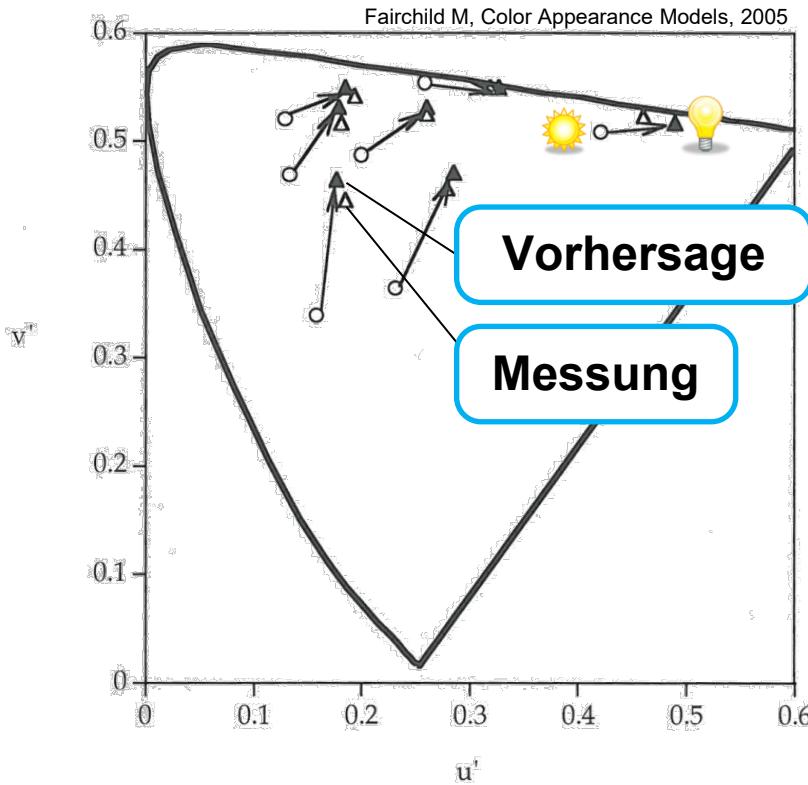
und

$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.3897 & 0.6890 & -0.0787 \\ -0.2298 & 1.1834 & 0.0464 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

Hunt-Pointer-Estevez Transformation

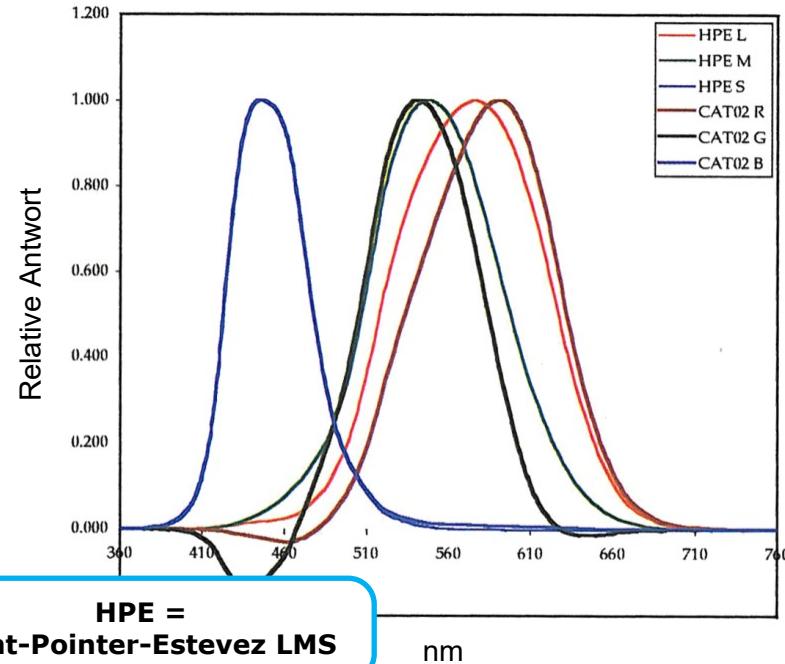
Einfaches Modell der chromatischen Adaptation

Von Kries Fehler



Zapfenregulierung ist nicht der einzige Mechanismus

Von Kries vs. CIECAT02



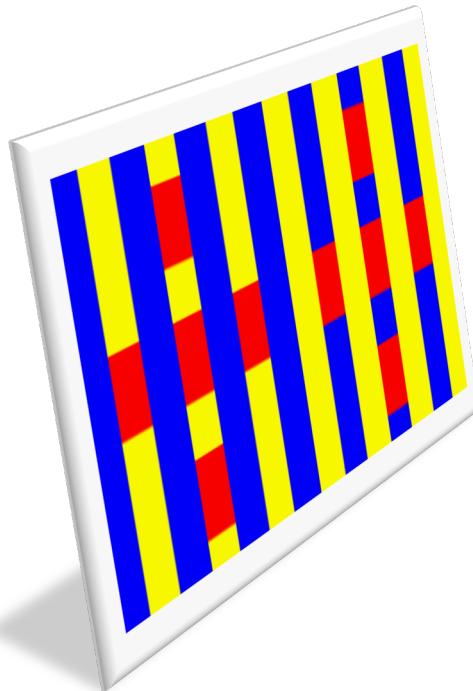
Optimierung der Matrix K führt zu spitzeren Zapfenantworten und besserer Vorhersagegenauigkeit

Fairchild M, Color Appearance Models, 2005



Farbwahrnehmungsphänomene

Simultankontrast



Der Hintergrund, auf dem ein Farbreiz präsentiert wird, beeinflusst die wahrgenommene Farbe.

Farbverschiebungen folgen der Gegenfarbentheorie:

- Heller Hintergrund induziert dunklere Farbe und umgekehrt
- Rot induziert grün und grün induziert rot
- Blau induziert gelb und gelb induziert blau

Farbwahrnehmungsphänomene

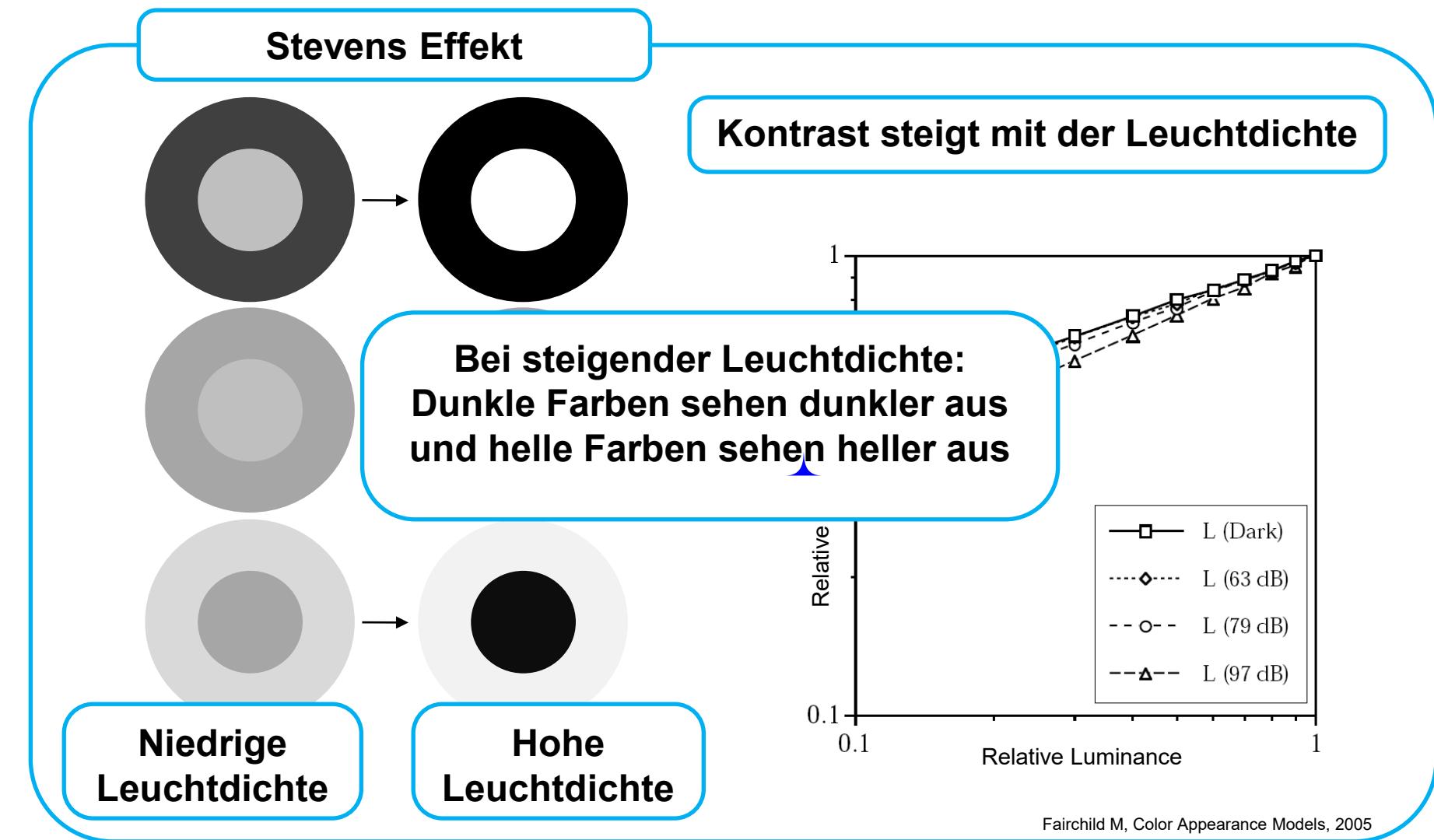
Crispening-Effekt



**Der wahrgenommene
Farbunterschied zweier Farbreize
wird durch einen ähnlichen
Hintergrund vergrößert.**

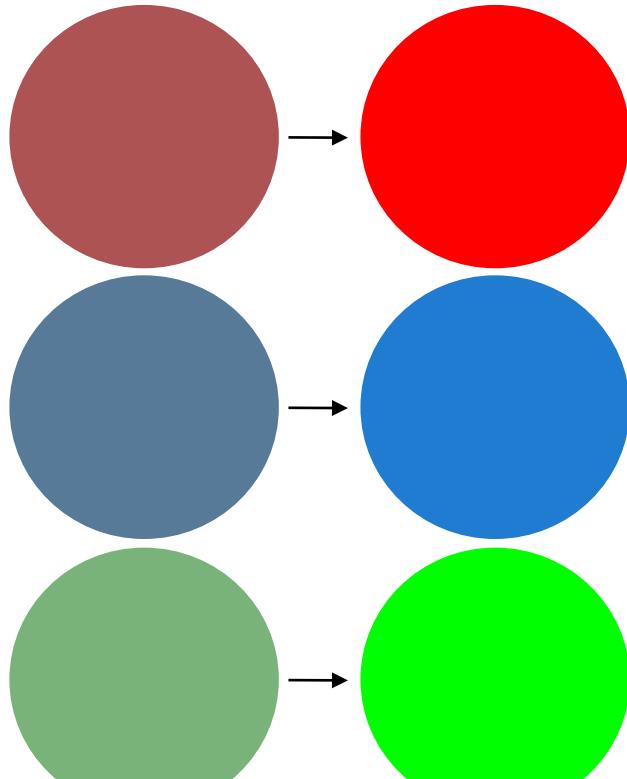


Farbwahrnehmungsphänomene

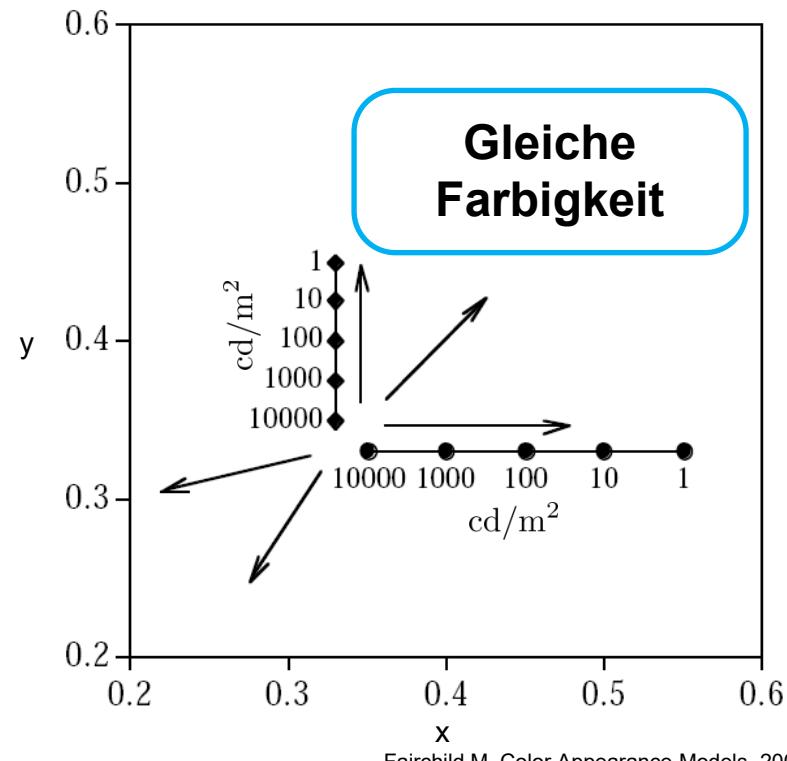


Farbwahrnehmungsphänomene

Hunt Effekt

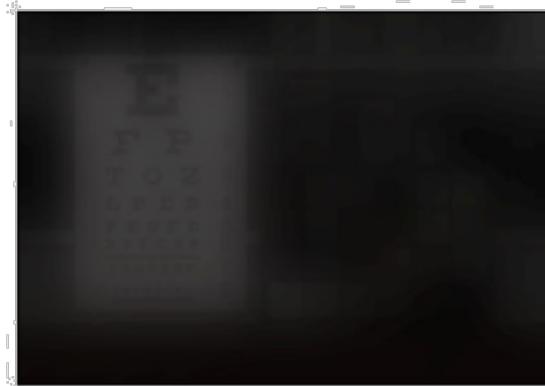


Farbigkeit steigt mit der Leuchtdichte

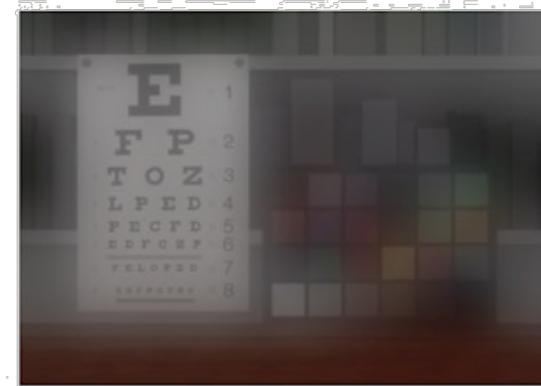


Farbwahrnehmungssphänomene

Hunt und Stevens Effekt - Beispiel



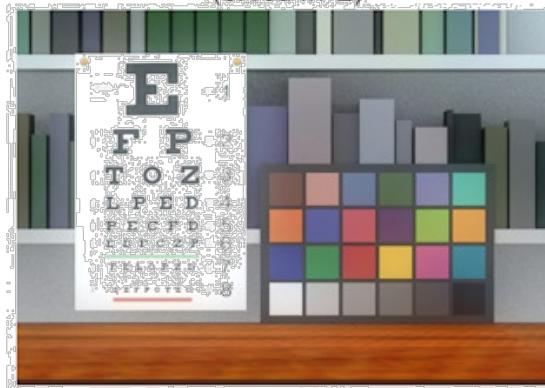
(0.1 cd/m²)



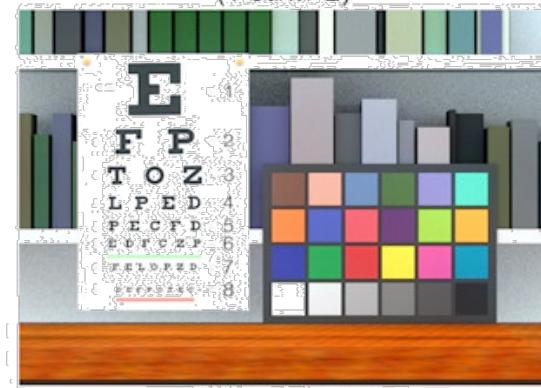
(1 cd/m²)



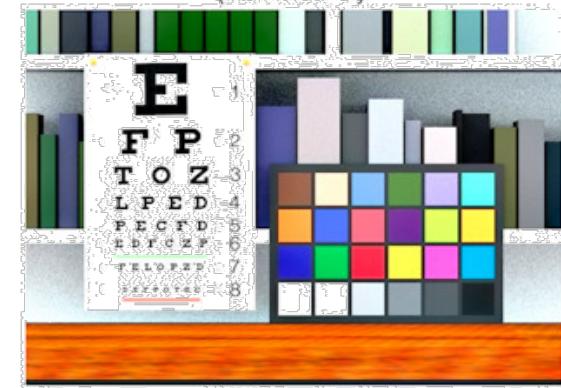
(10 cd/m²)



(100 cd/m²)



(1000 cd/m²)

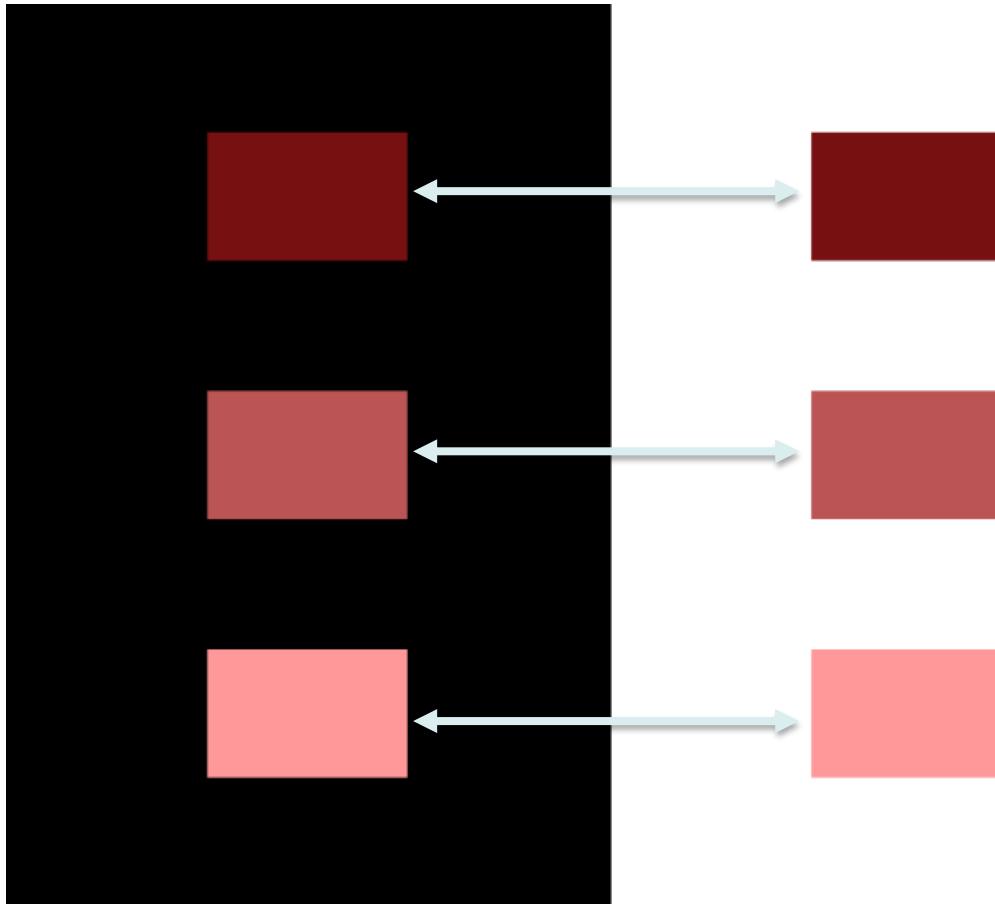


(10 000 cd/m²)

Pattanaik et al. 1998

Farbwahrnehmungsmodelle

Wozu brauchen wir Farbwahrnehmungsmodelle?



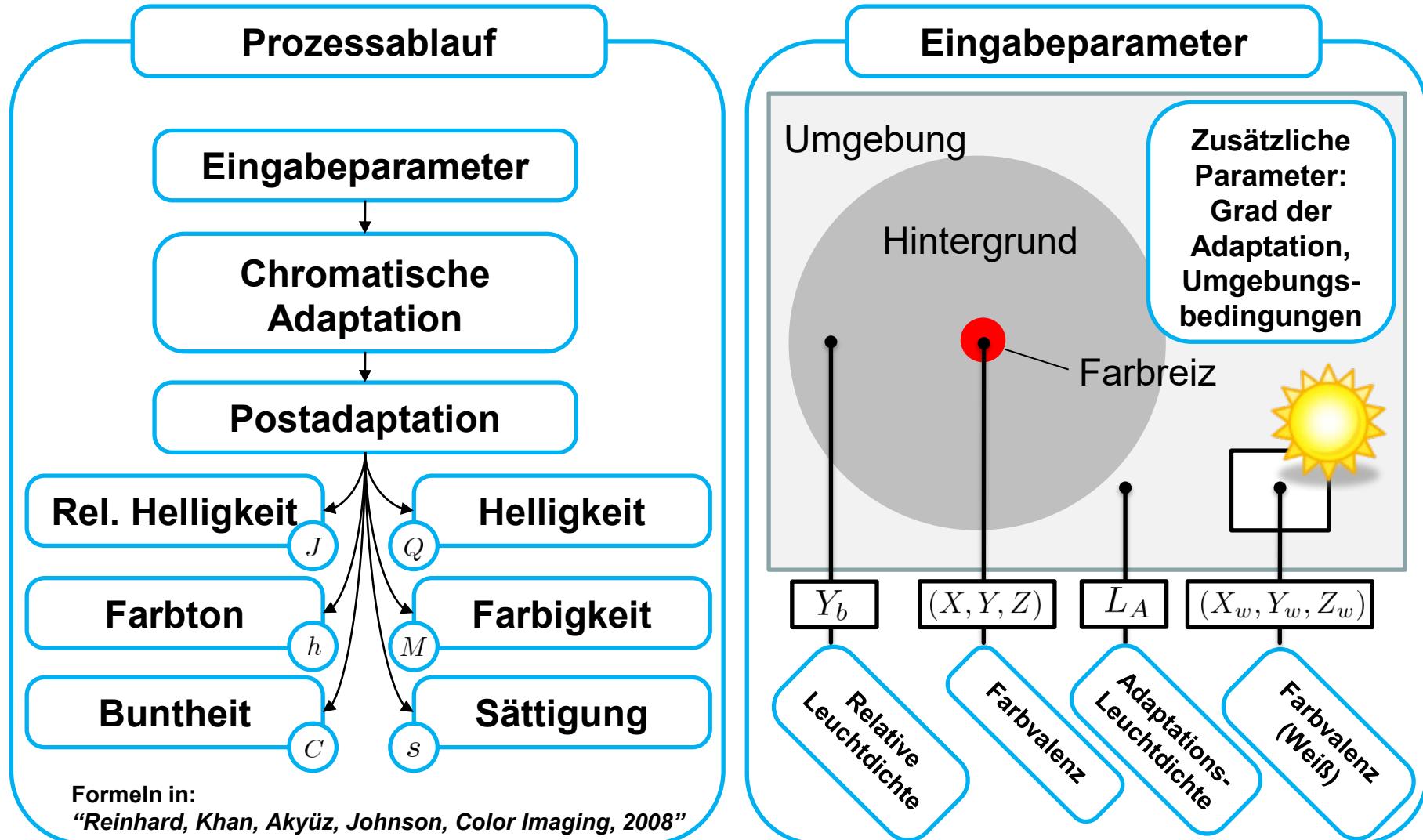
<http://scanline.ca/ciecam02/surround-red.png>

Gleiche Farbreize
Unterschiedliche Farben

Farbwahrnehmungsmodelle ermöglichen eine Anpassung der Farbreize für den Farbabgleich bei unterschiedlichen Betrachtungsbedingungen



Farbwahrnehmungsmodell CIECAM02



Farbwahrnehmungsmodell CIECAM02



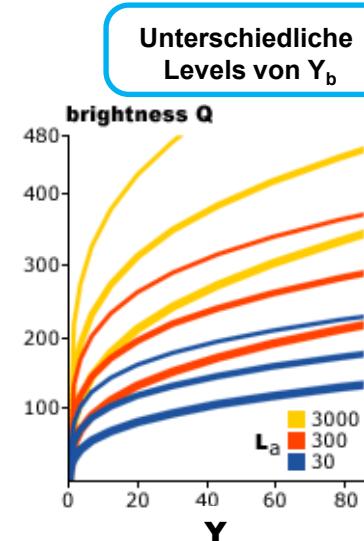
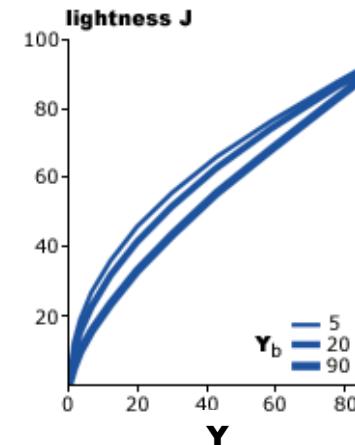
Eigenschaften

- CIECAM02 ist invertierbar
- Gegenfarbendarstellung

$$J = \text{Rel. Helligkeit}$$
$$a_C = C \cos(h) = \text{Rot-Grün}$$
$$b_C = C \sin(h) = \text{Blau-Gelb}$$

- Euklidische Metrik im Gegenfarbenraum erlaubt eine Vorhersage über den empfundenen Farbabstand (ca. gleiche Genauigkeit wie bei CIELAB ΔE_{ab}^*)

Helligkeit / Rel. Helligkeit

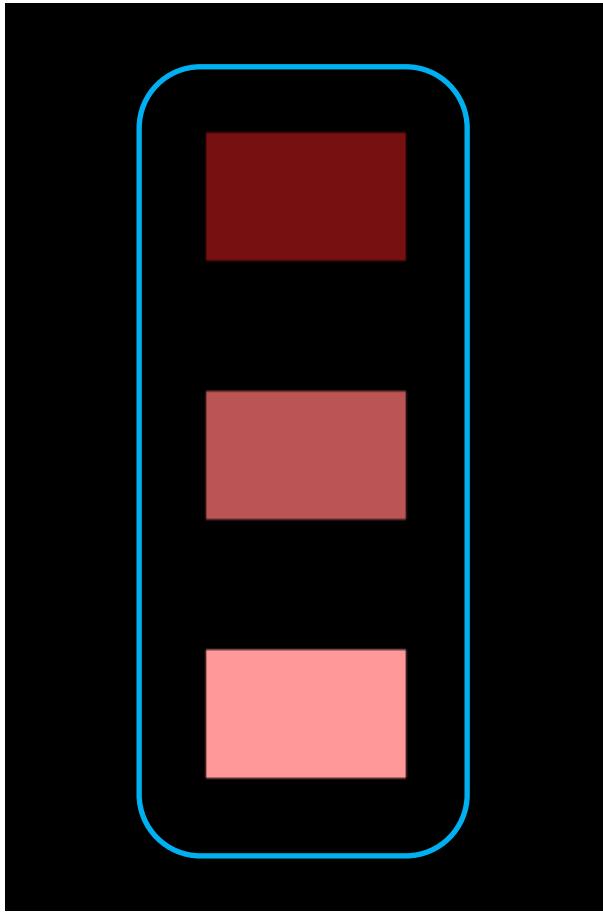


www.handprint.com

Von den Betrachtungsbedingungen abhängige Nichtlinearitäten zur Relation der Leuchtdichte Y mit der (Rel.) Helligkeit

Farbwahrnehmungsmodell CIECAM02

Farbanpassung



<http://scanline.ca/ciecam02/surround-red-ciecam02>

Berechne Farbattribute
mit dem CIECAM02
Modell für Betrach-
tungsbedingung 1

$$(J, C, h) = \text{CIECAM02}(X, Y, Z)$$

Berechne CIEXYZ
Werte mit dem
inversen CIECAM02
Modell für Betrach-
tungsbedingung 2

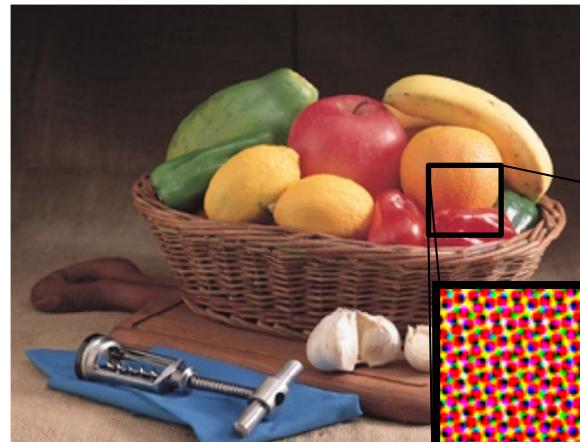
$$(X, Y, Z) = \text{CIECAM02}^{-1}(J, C, h)$$

Kontrastsensitivität

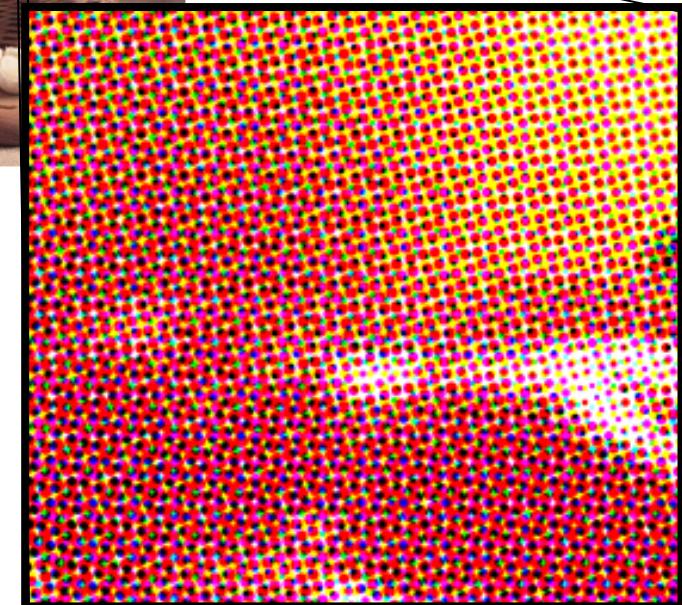
Vollflächenbild



Halftone-Bild



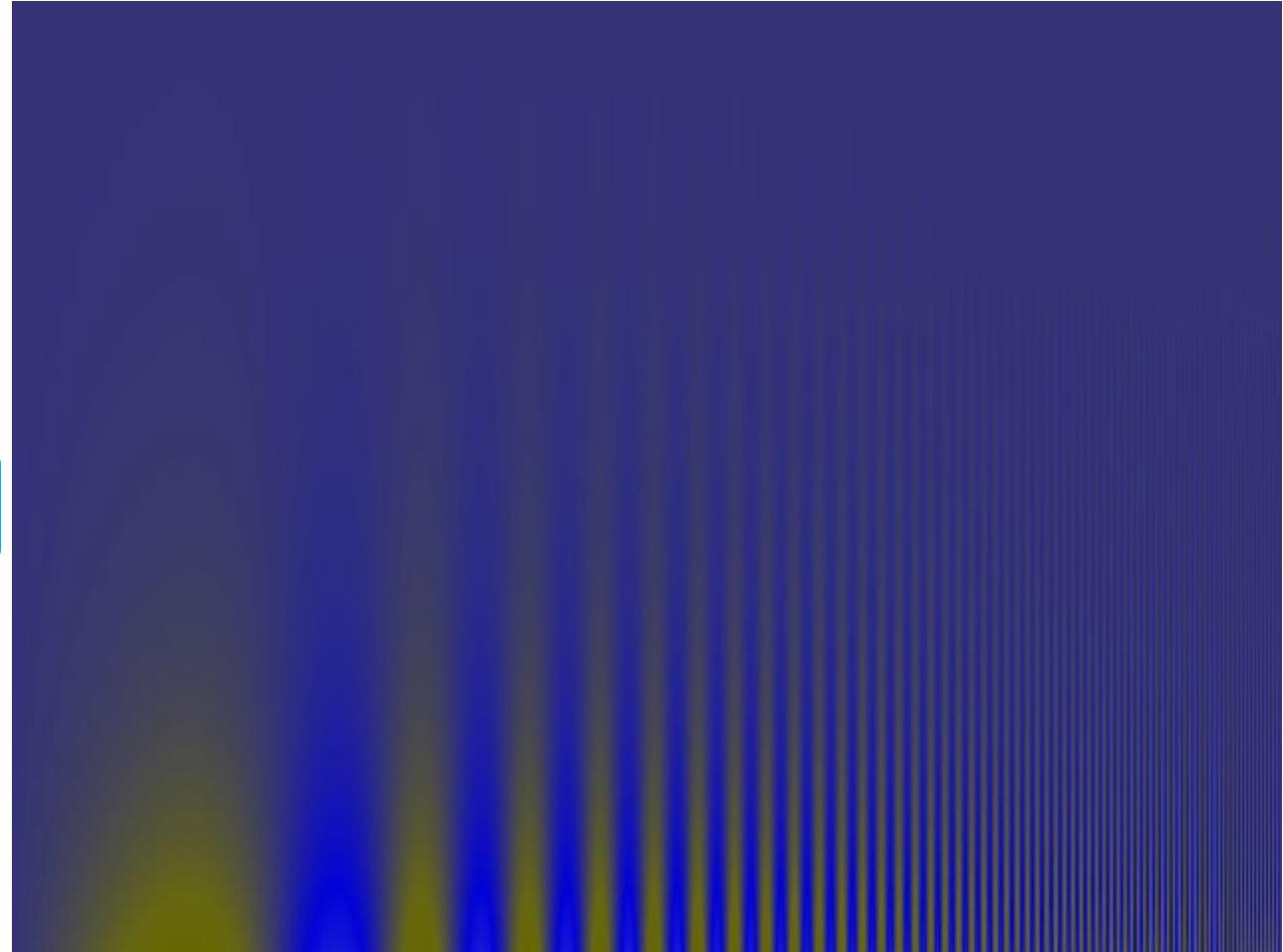
Wie lassen sich Halftone- mit Vollflächenbildern vergleichen?



Kontrastsensitivität

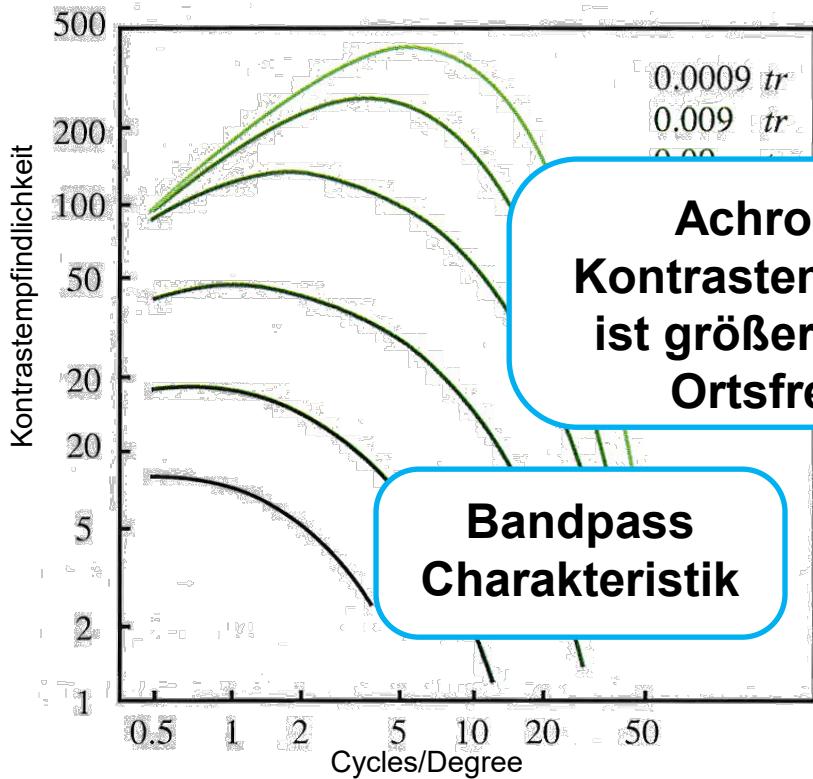
Campbell-Robson Kontrastempfindlichkeits-Testmuster

Blau-Gelb
Kanal



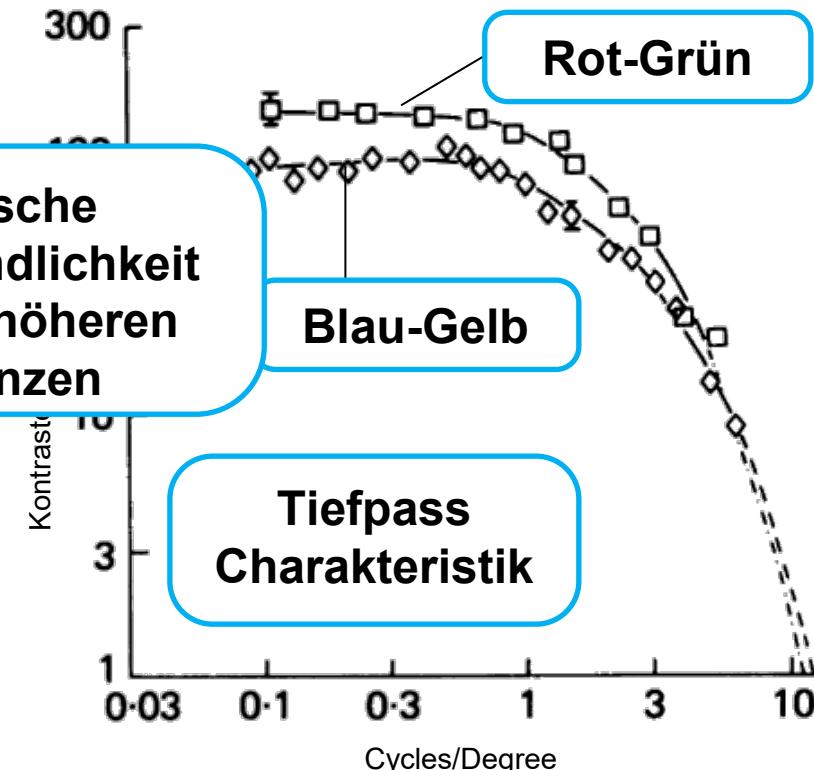
Kontrastsensitivität

Achromatische Kontrastempfindlichkeit



Reihard, Khan, Akyüz, Johnson, Color Imaging, 2008

Chromatische Kontrastempfindlichkeit

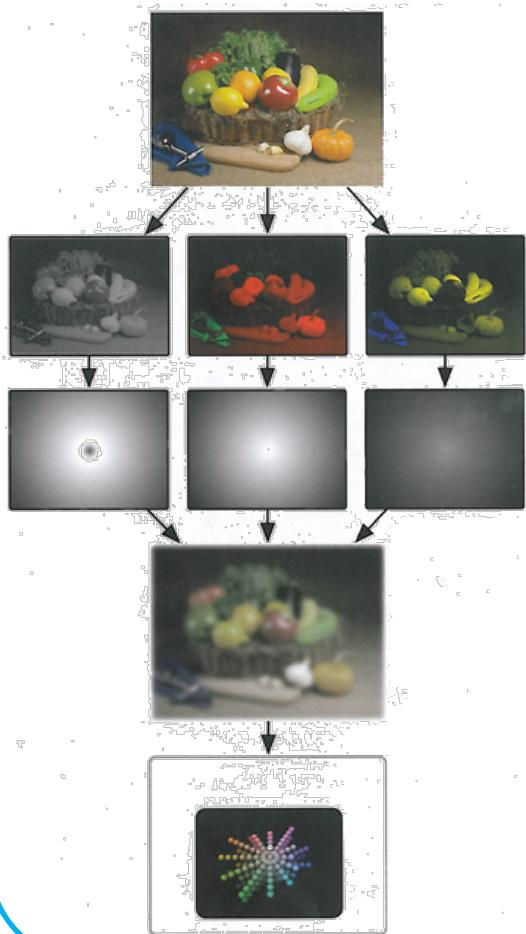


Mullen, J. Physiol. 1985

tr = Trolland = Leuchtdichte multipliziert mit der Pupillenfläche

S(patial)-CIELAB

S-CIELAB



Eingabebild

AC₁C₂ Space

Ortsfilter

CIEXYZ

CIELAB

AC₁C₂ Gegenfarbenraum

$$\begin{pmatrix} A \\ C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.279 & 0.720 & -0.107 \\ -0.449 & 0.290 & 0.0077 \\ 0.086 & 0.590 & -0.501 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

Ortsfilter

$$f(x, y) = k \sum_i \omega_i E_i(x, y)$$

$$E_i(x, y) = k_i \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\sigma_i^2}\right)$$

**Abhängig von der
Betrachtungsentfernung**

S(patial)-CIELAB

Filtern mit Kontrastsensitivitätsfunktionen

Original Image

10 Pixels/Degree



Halftone Image

50 Pixels/Degree



100 Pixels/Degree



x-degrees

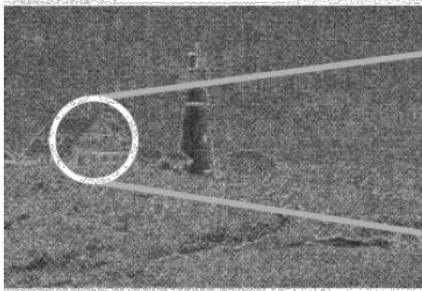
-x/5-degrees

-x/10-degrees

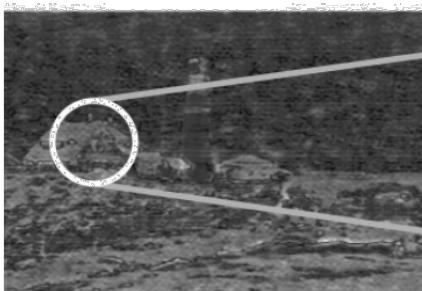
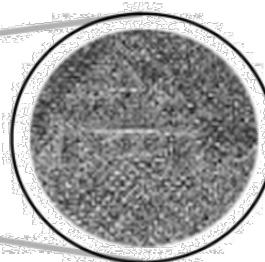
Johnson and Fairchild, 2003

S(patial)-CIELAB

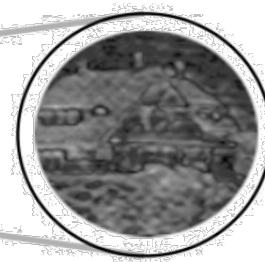
Bilddifferenzkarte



10 Pixel/Grad



50 Pixel/Grad



100 Pixel/Grad



Johnson and Fairchild, 2003

image Color Appearance Model (iCAM)

iCAM-Framework

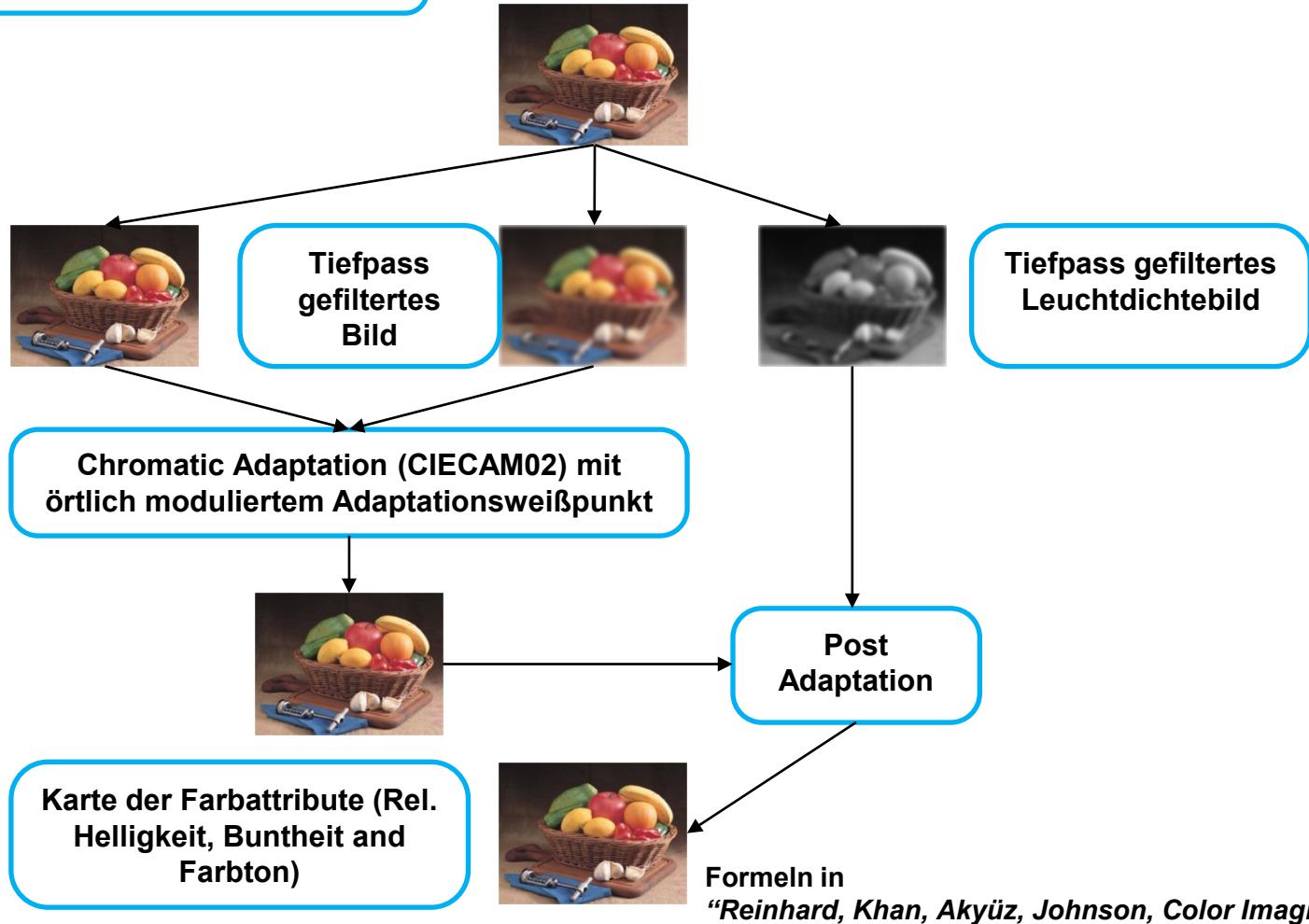
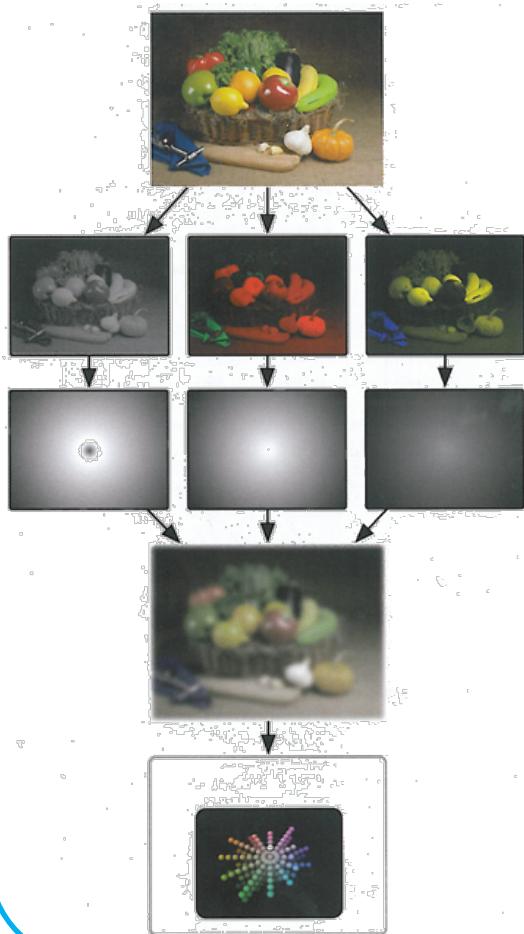


image Color Appearance Model (iCAM)

Vorfilterung mit Kontrastsensitivitäten



Eingabebild

Y'C₁C₂ Raum

Ortsfilter

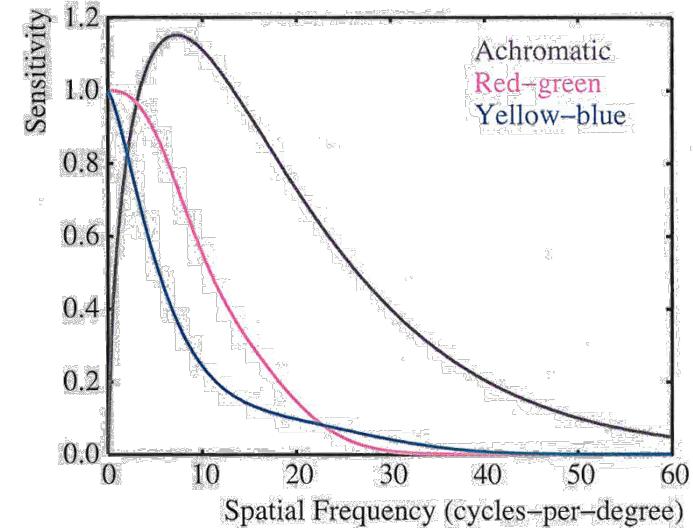
CIEXYZ

iCAM

**Y'C₁C₂
Gegenfarbenraum**

$$\begin{pmatrix} Y' \\ C_1 \\ C_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0556 & 0.9981 & -0.0254 \\ 0.9510 & -0.9038 & 0.0000 \\ 0.0386 & 1.0822 & -1.0276 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{D65}$$

Ortsfilter



Reihard, Khan, Akyüz, Johnson, Color Imaging, 2008

image Color Appearance Model (iCAM)

Anwendungen (Beispiele)

Bilddifferenzmodell

High Dynamic Range Tone Mapping

Tone Mapping Challenge



Range of luminance:

100 000 000:1

in the natural world

10 000:1

that the eye can accommodate in a single view

100:1

that a typical CRT monitor can display

Anwendungen (Beispiele)



Linear

Manuell

iCAM

An was sollte ich mich erinnern?

- 1 Farbattribute (Definition, Reproduktion)
- 2 Auge: Spektralwertfunktionen, Farbvalenzen, Metamerie (Beobachter, Lichtart), CIEXYZ Farbraum, Chromaticity Diagramm
- 3 Postretinale Signalverarbeitung:
Stevenssche Potenzfunktion, Gegenfarbenraum (CIELAB), Wahrnehmungsgleichabständigkeit
- 4 Technische Farträume: RGB, YCbCr, HSI
- 5 Chromatische Adaptation (*Von Kries Modell*)

An was sollte ich mich erinnern?

6

Farbwahrnehmungsphänomene

Simultankontrast, Crispening Effekt, Stevens Effekt, Hunt Effekt

7

Farbwahrnehmungsmodelle

CIECAM02 (Grundlegende Struktur)

8

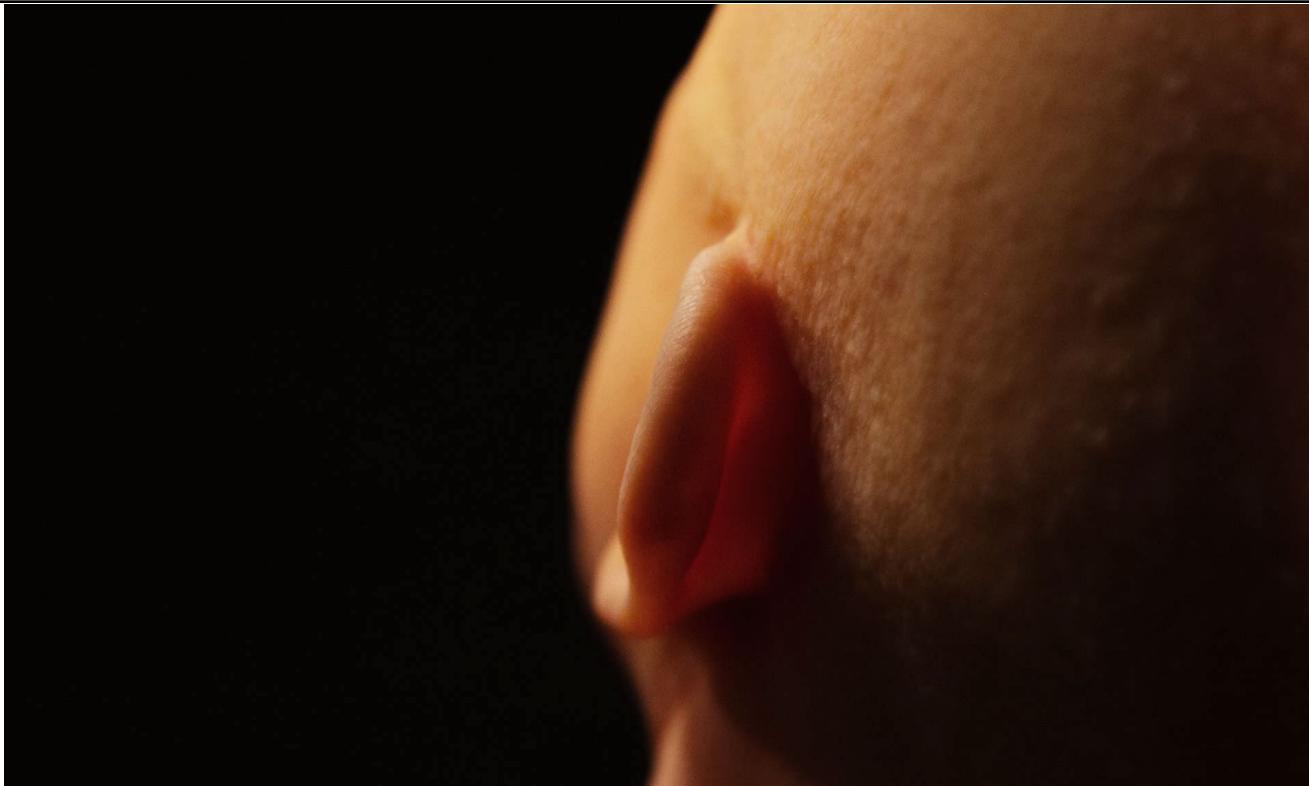
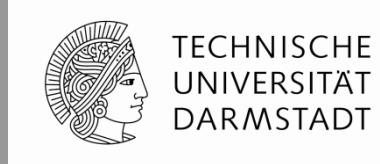
Kontrastsensitivität (chromatisch, achromatisch)

9

Bildwahrnehmungsmodelle

S-CIELAB, iCAM (Grundlegende Struktur)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.



Multimaterial 3D Druck erzeugt am Fraunhofer IGD

 **Fraunhofer**
IGD

 **TUD**
Graphisch-Interaktive Systeme