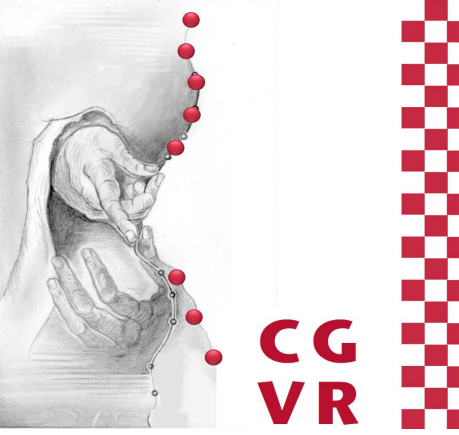
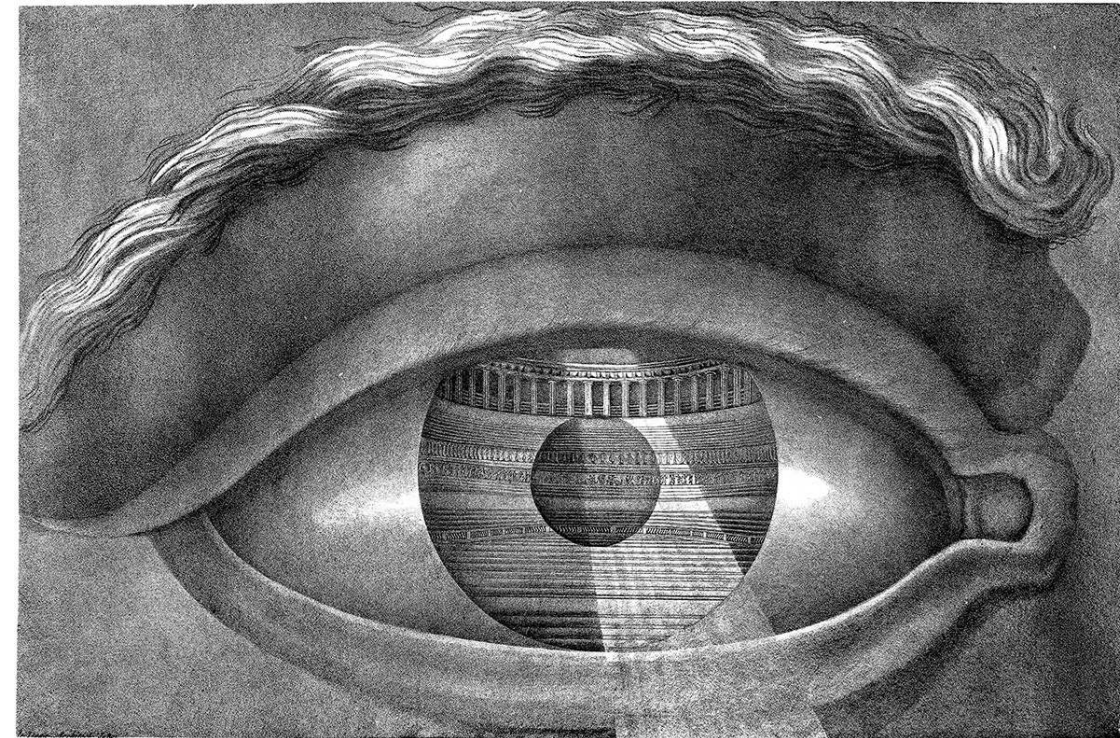




Computer-Graphik I

Farben & menschliche Wahrnehmung



G. Zachmann
University of Bremen, Germany
cgvr.cs.uni-bremen.de



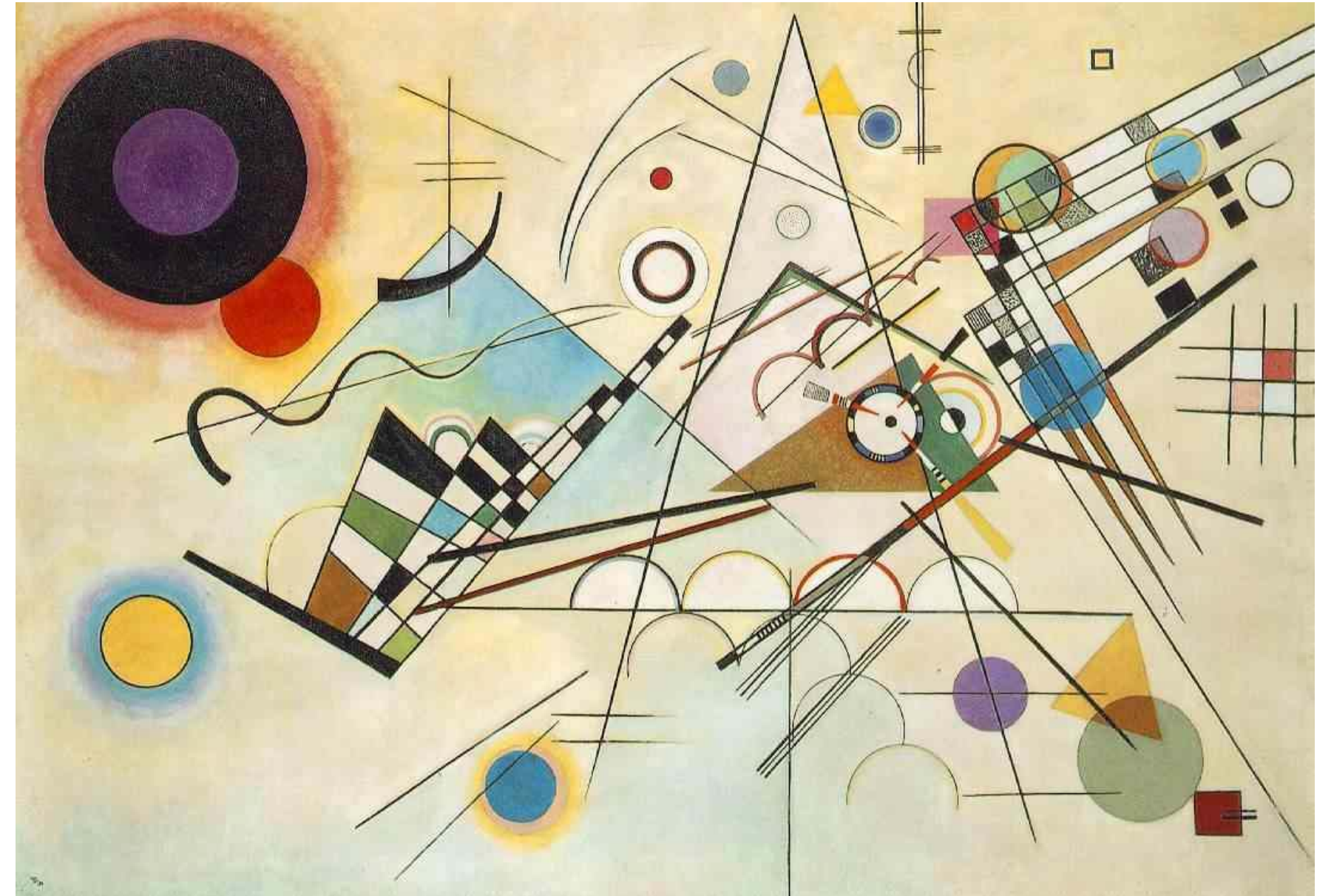
Warum ist Farbensehen so wichtig?

- Next, you'll see a black-and-white version of a jungle scene. Try to find the predator that's about to jump out at you. If it takes you more than a second, you are dead!



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)

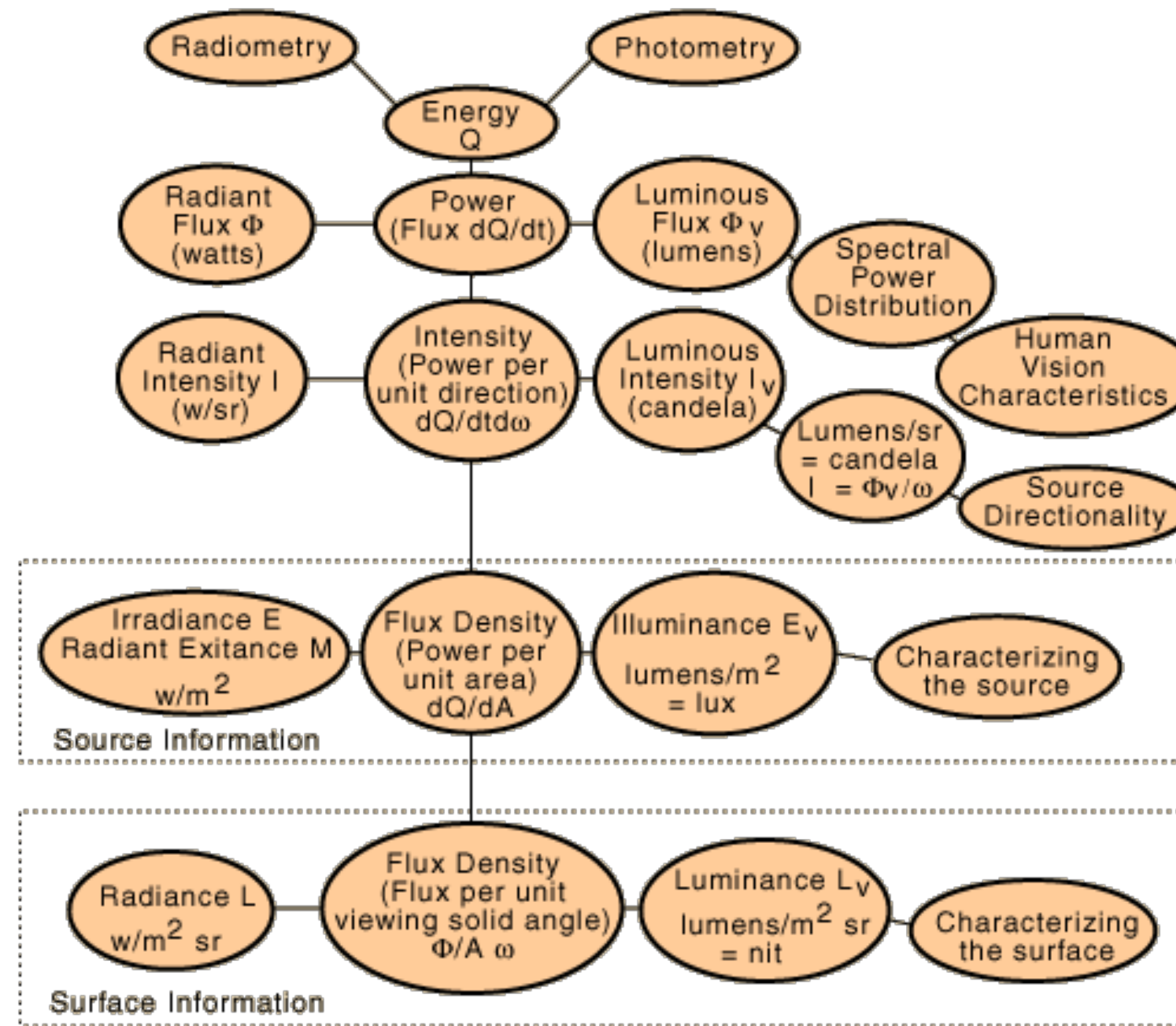


Disclaimer

- Farben sind eine Wissenschaft für sich:
 - Es gibt sehr viele Farbräume
 - Farbsehen 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 lichttechnischen/photometrischen Größen

Einige photo-/radiometrische Größen

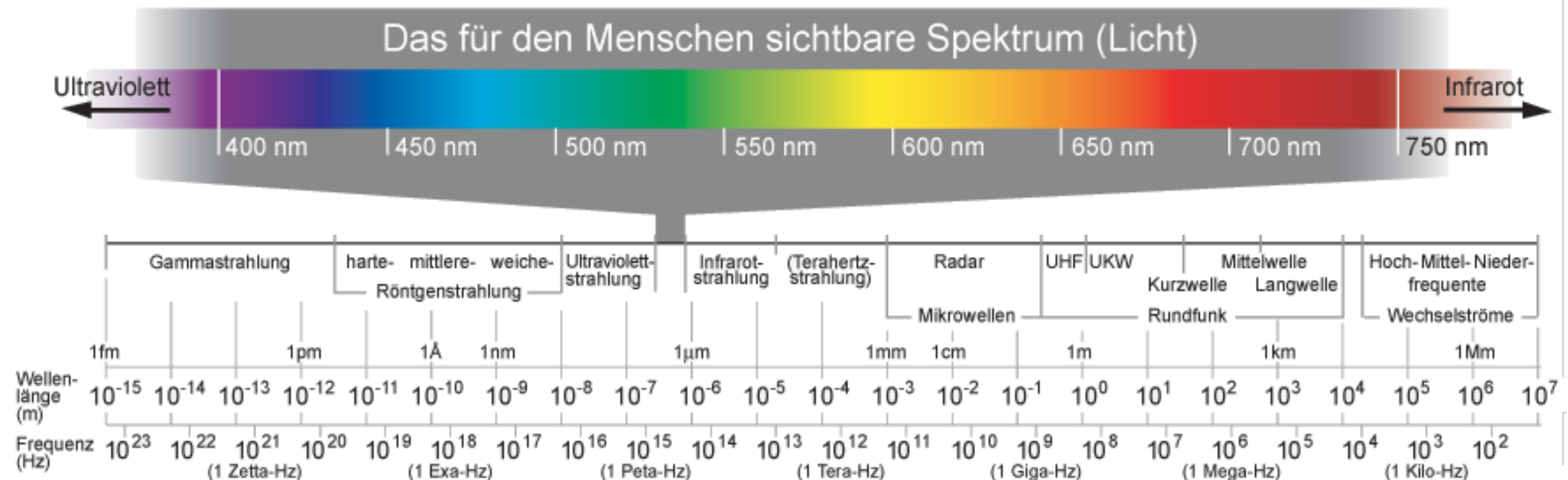
FYI



<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/vision/photomcon.html>

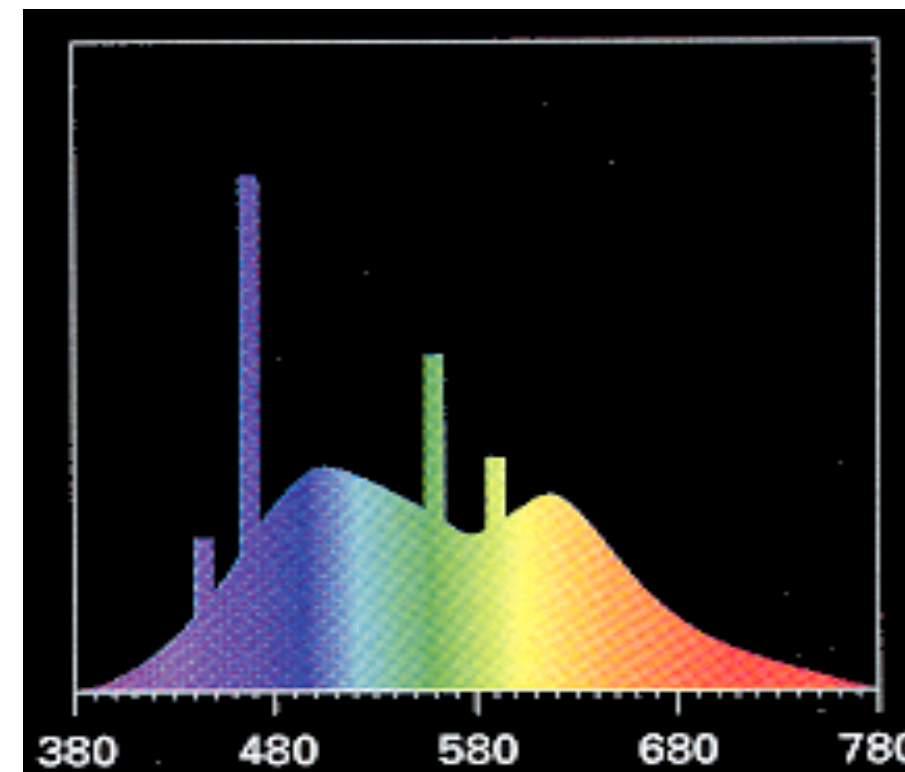
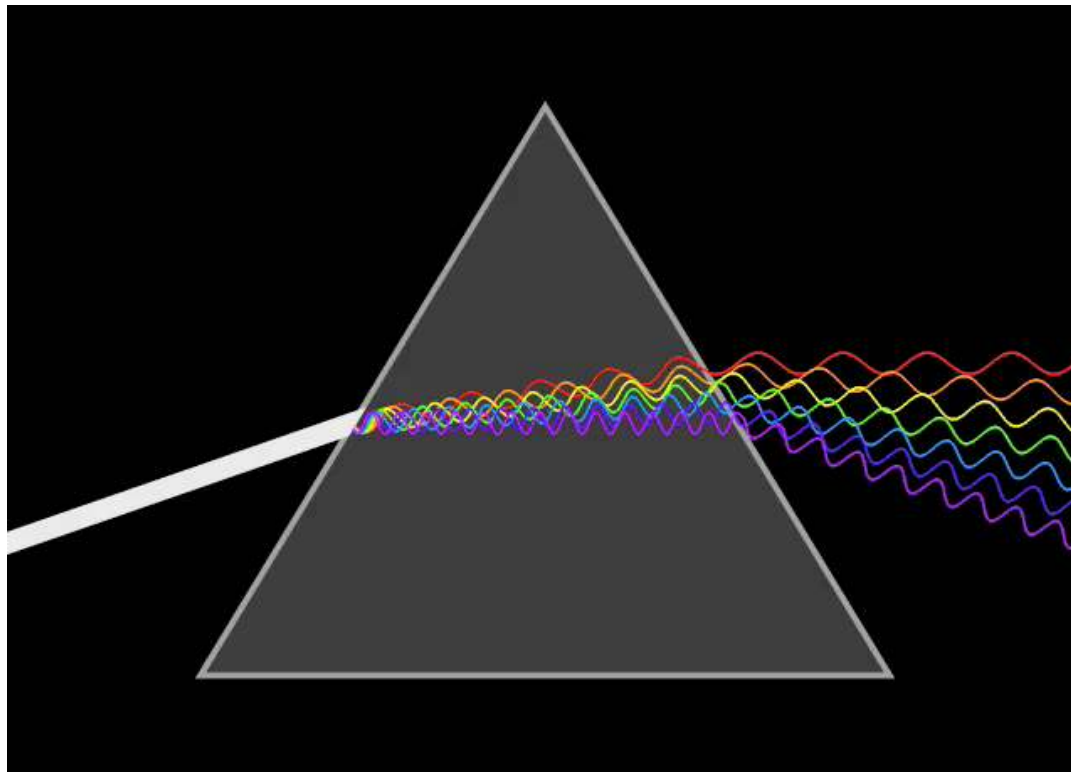
Was ist Licht?

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

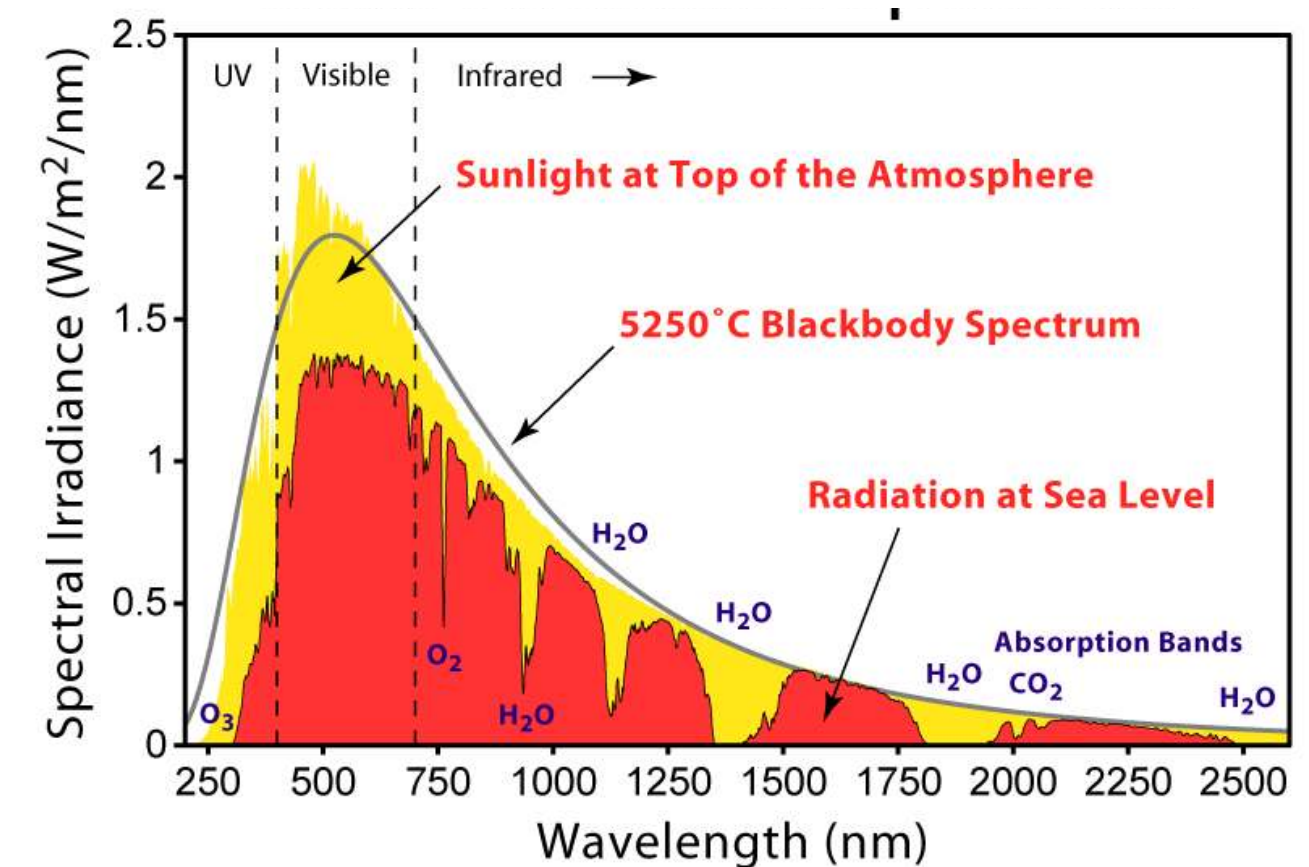


Lichtquellen

- 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:

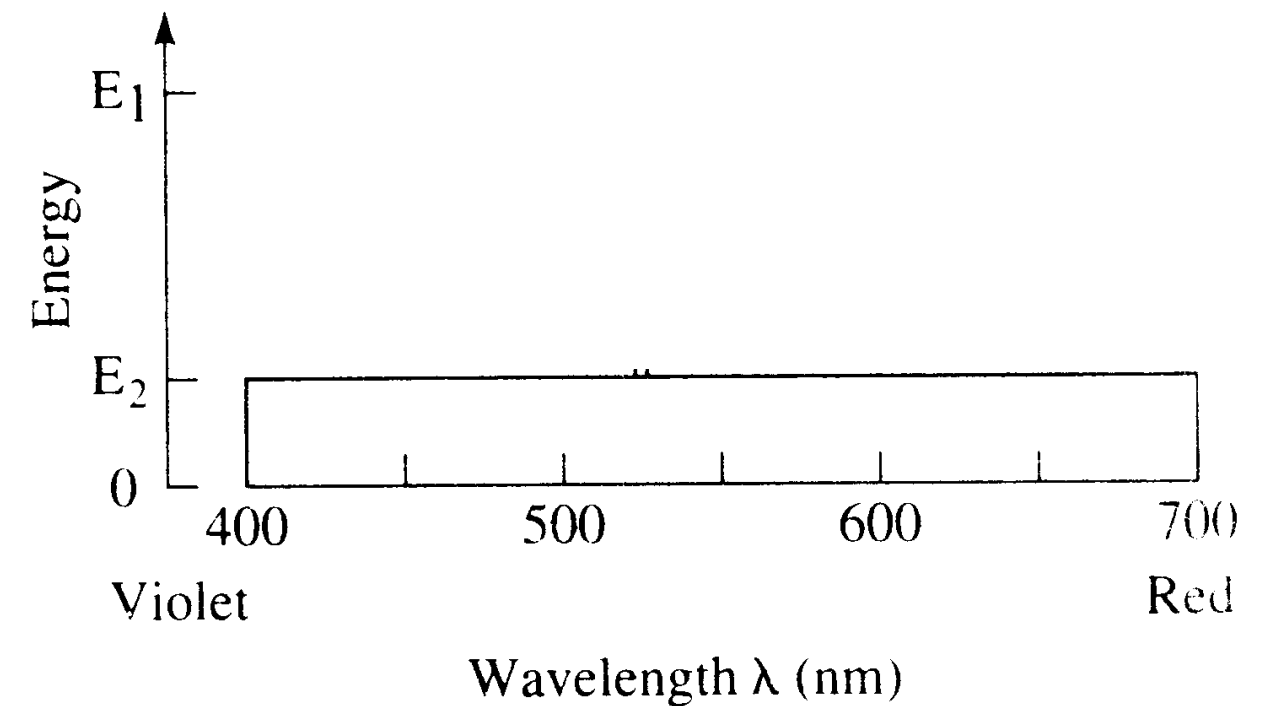
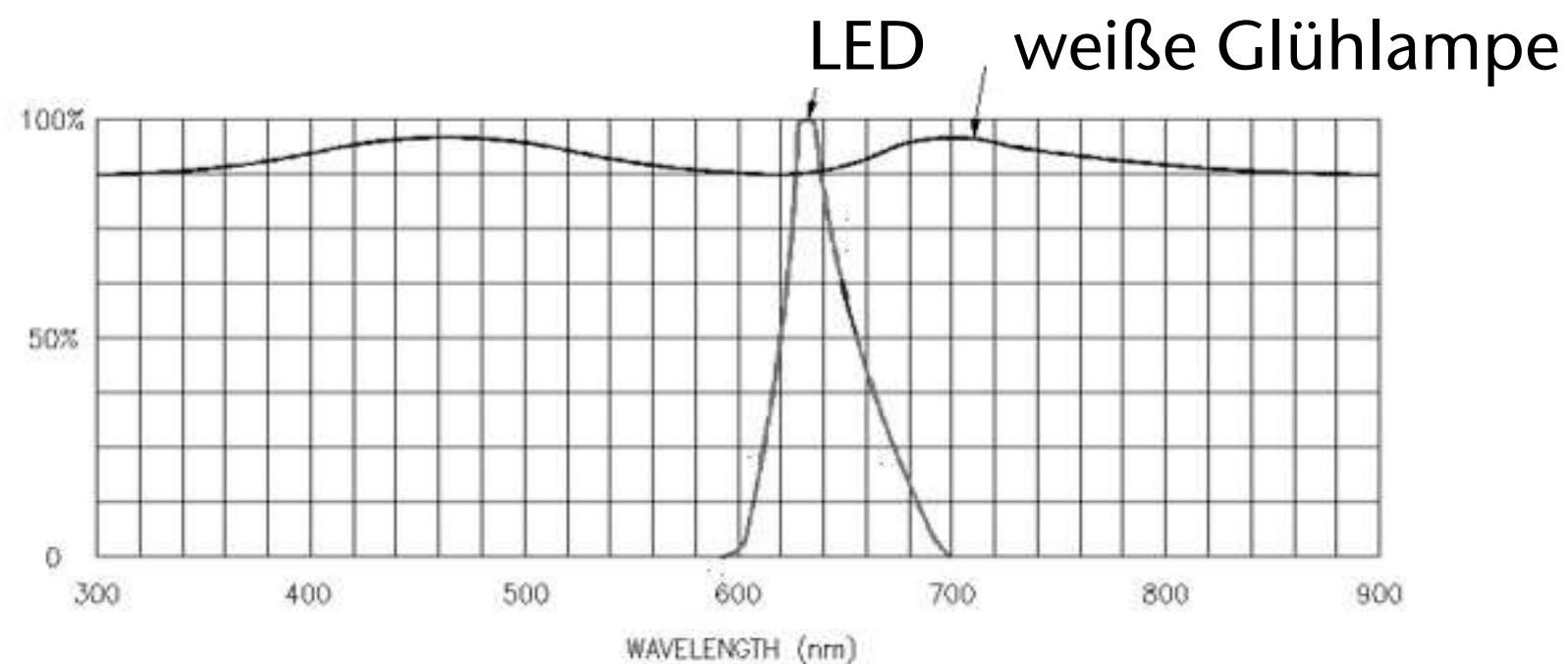
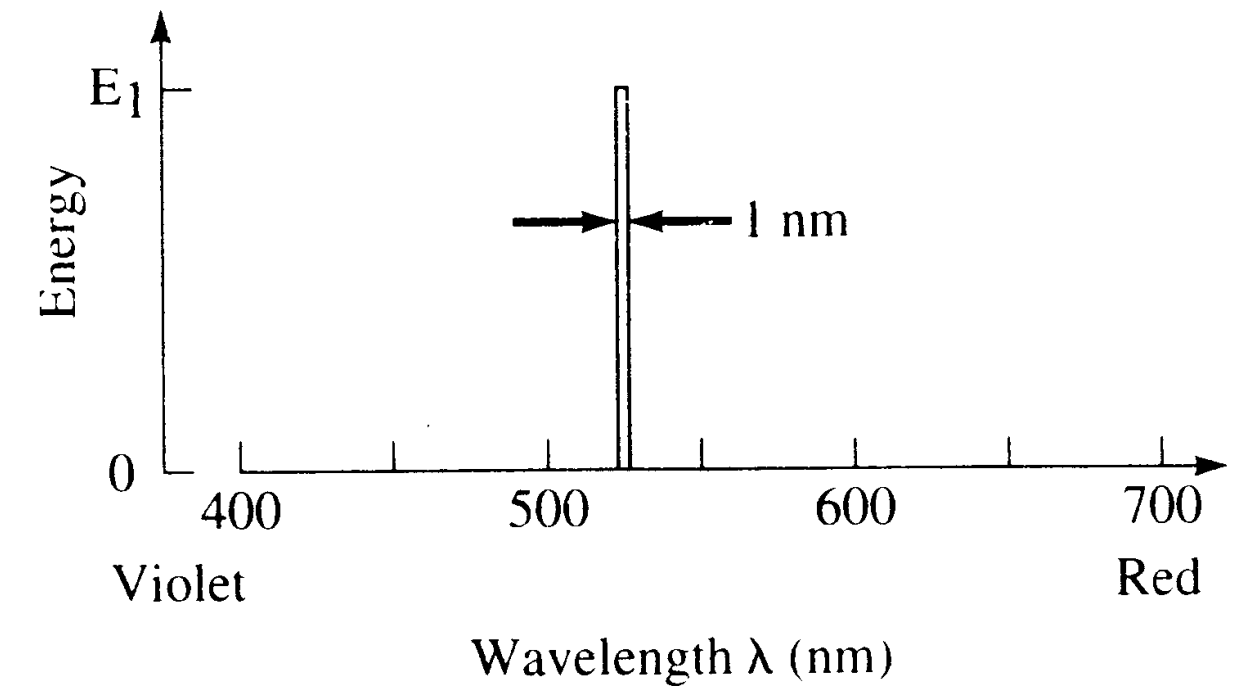


Leuchtstoffröhre

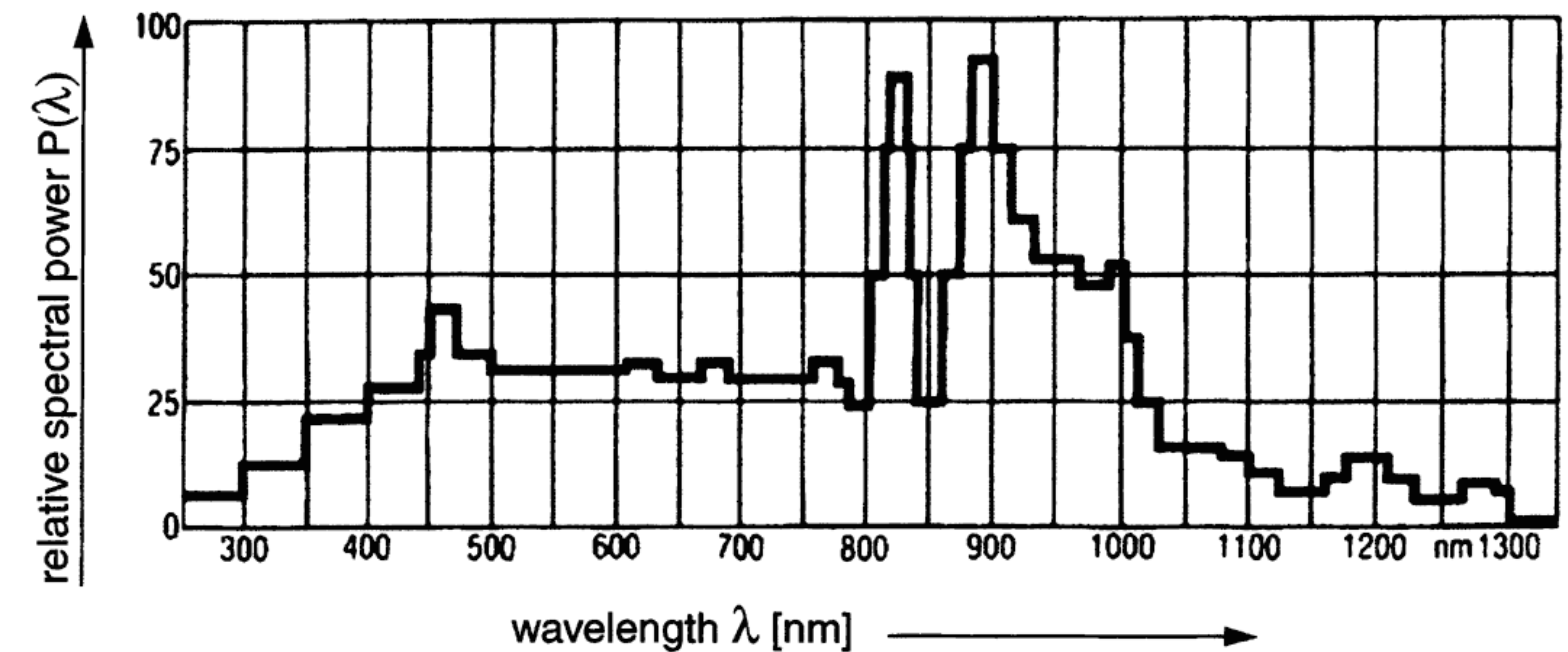
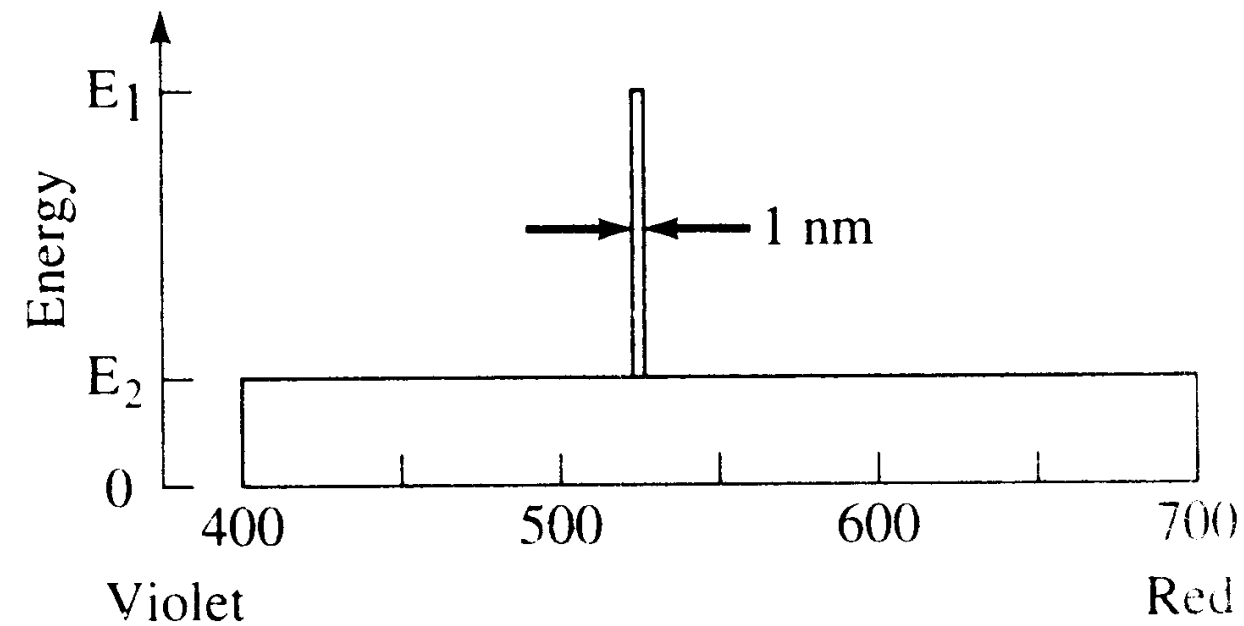


3 Parameter idealer Lichtquellen, Chromaticity ("Chromatizität")

- **Monochromatisches** Licht = genau eine Wellenlänge (z.B. Laser)
- **Achromatisches** Licht = alle Wellenlängen ungefähr gleich stark → weiß

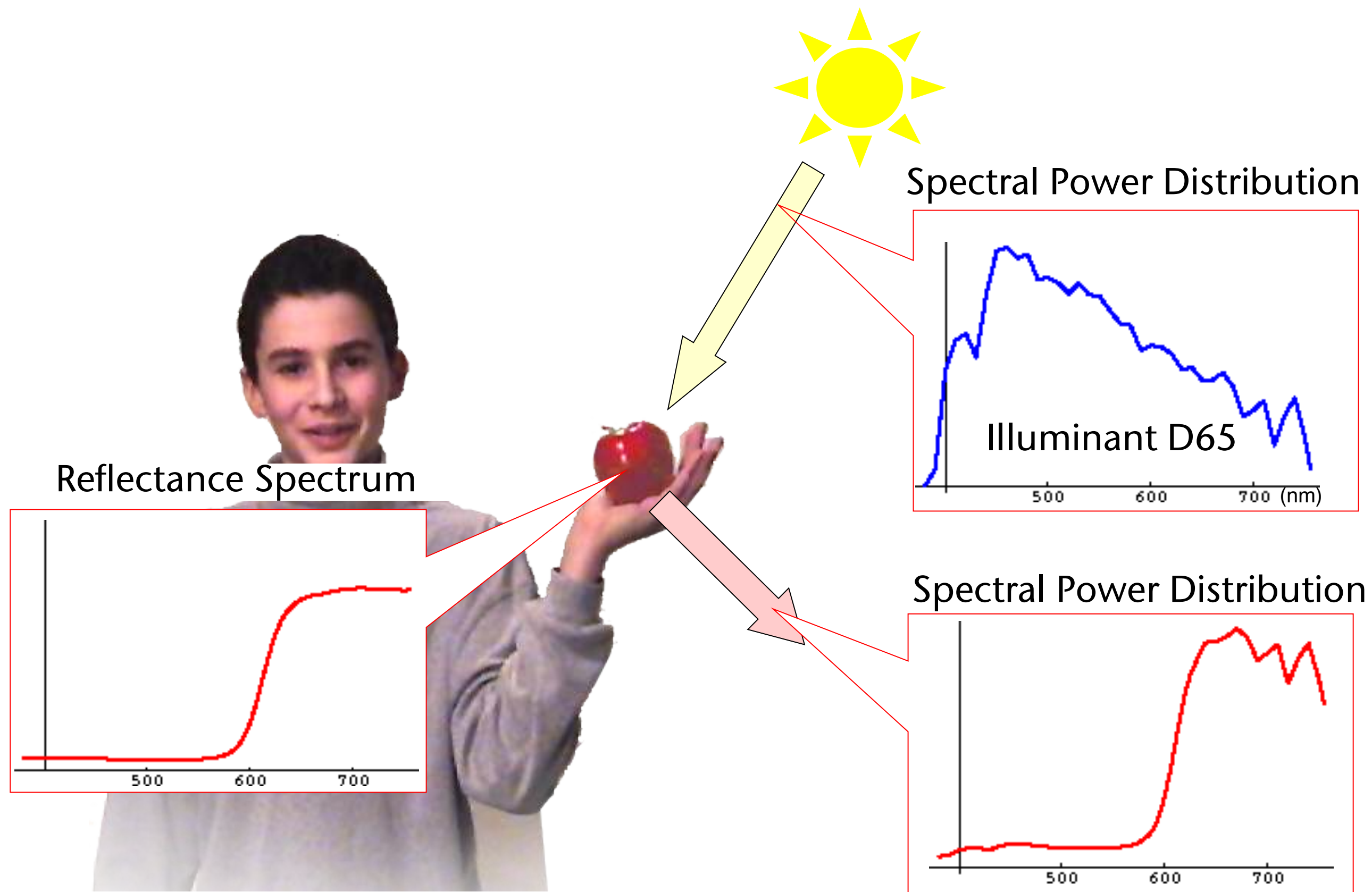


- **Chromatisches** Licht: ganzes Spektrum, aber eine **dominante Wellenlänge** (farbiges Licht)

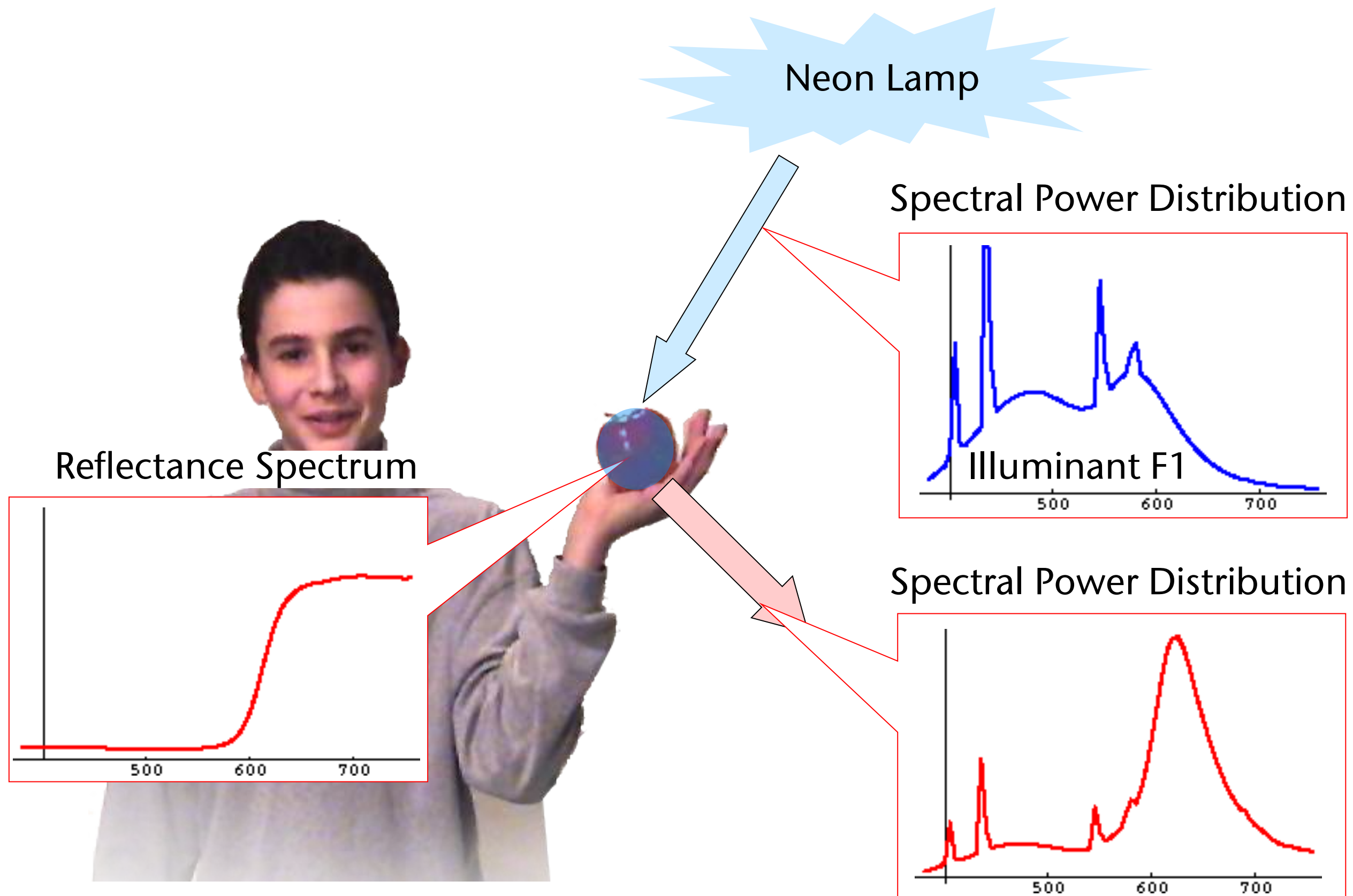


- Wesentliche, beschreibende Charakteristika:
 1. Dominante Wellenlänge = "Farbe", **Hue**
 2. Verhältnis E_1 / E_2 = Anteil des weißen Lichtes = Reinheit, **Sättigung**, **Saturation**
 3. Fläche unter der Spektralkurve = Helligkeit = **Intensität**, **Brightness**

Das *Reflectance Spectrum*



Das *Reflectance Spectrum*

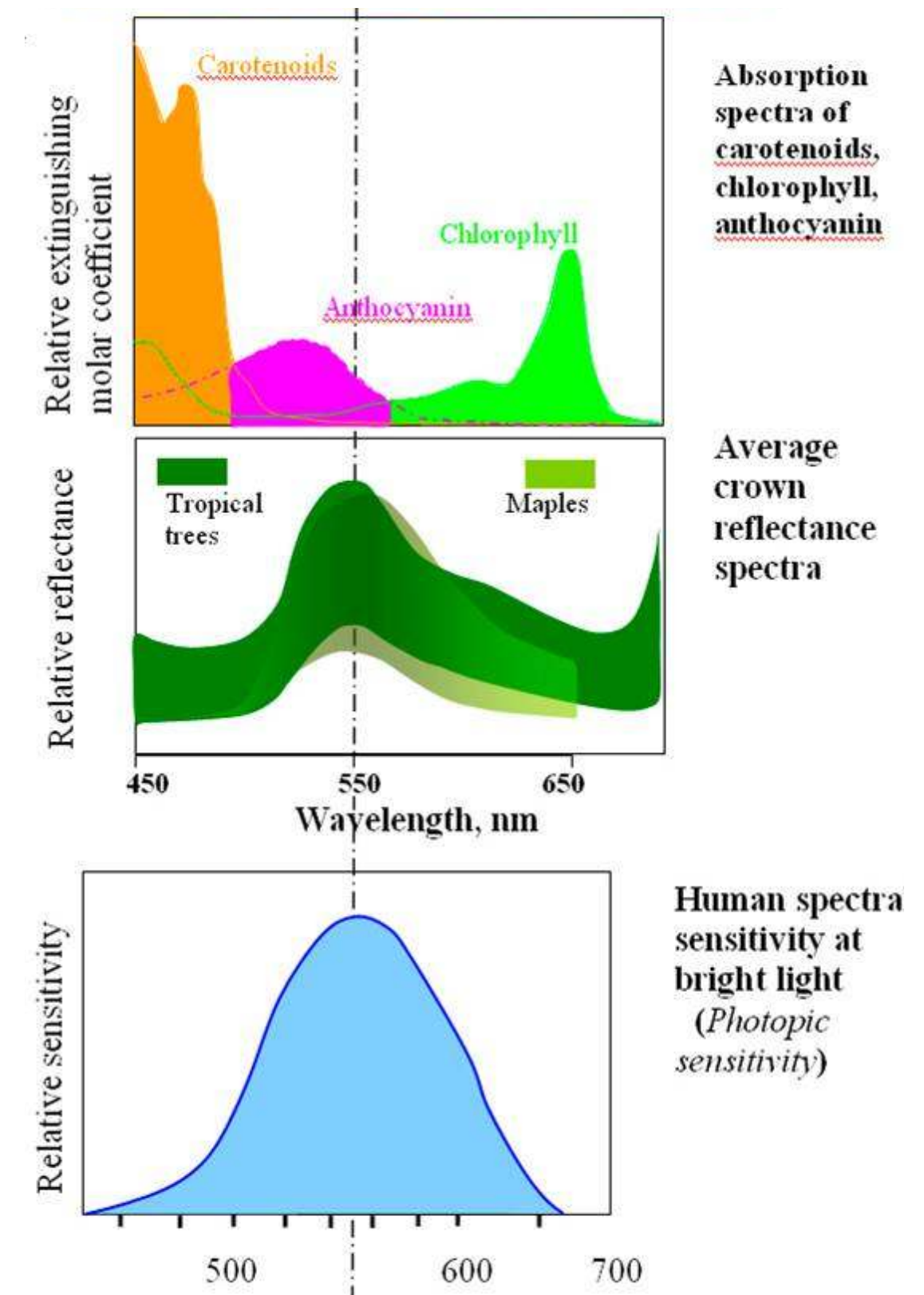


Demo



Warum sieht der Wald grün aus?

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

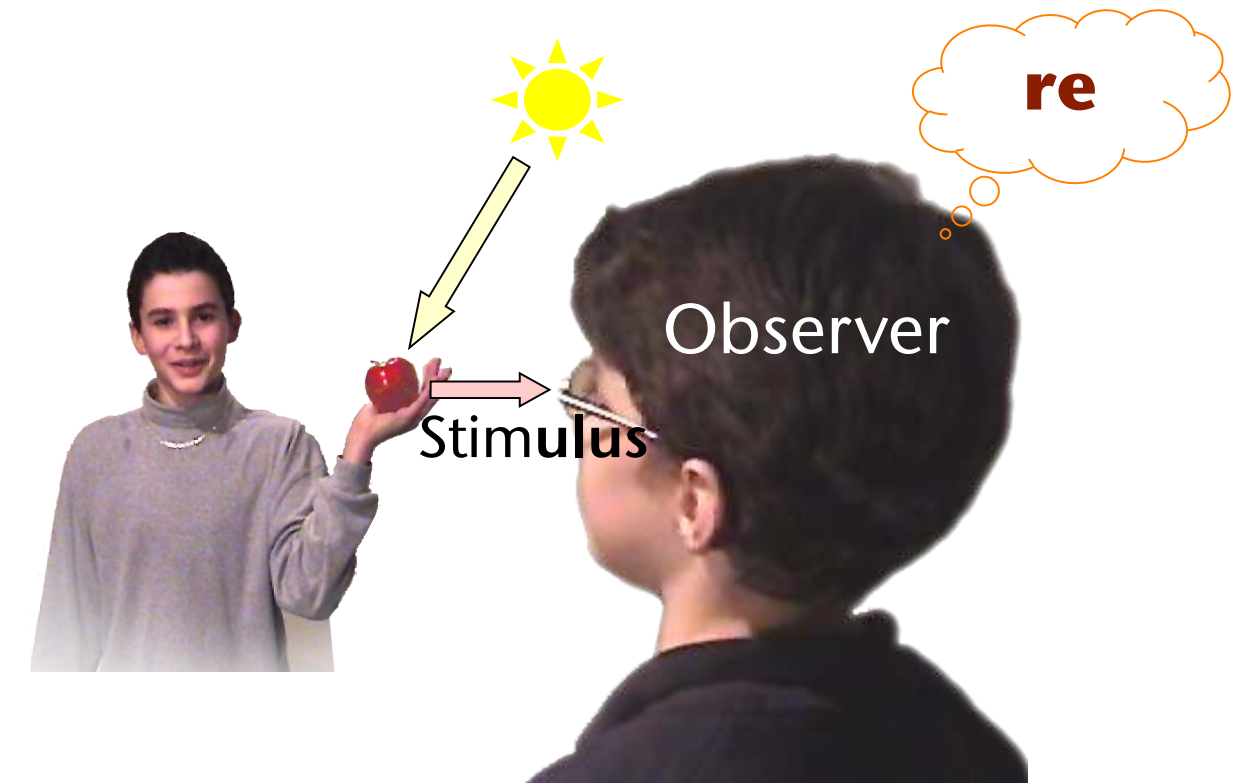


Gibt es Farben wirklich?

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



- Behauptung: **ES GIBT KEINE FARBEN!**
 - In der physikalischen Welt gibt es nur Spektren!
 - "Farben" entstehen erst im Auge! (genauer gesagt: im Kopf)
 - "Die Gegenstände sind farblos" (Wittgenstein, Tractatus Logico-Philosophicus, 2.0232)

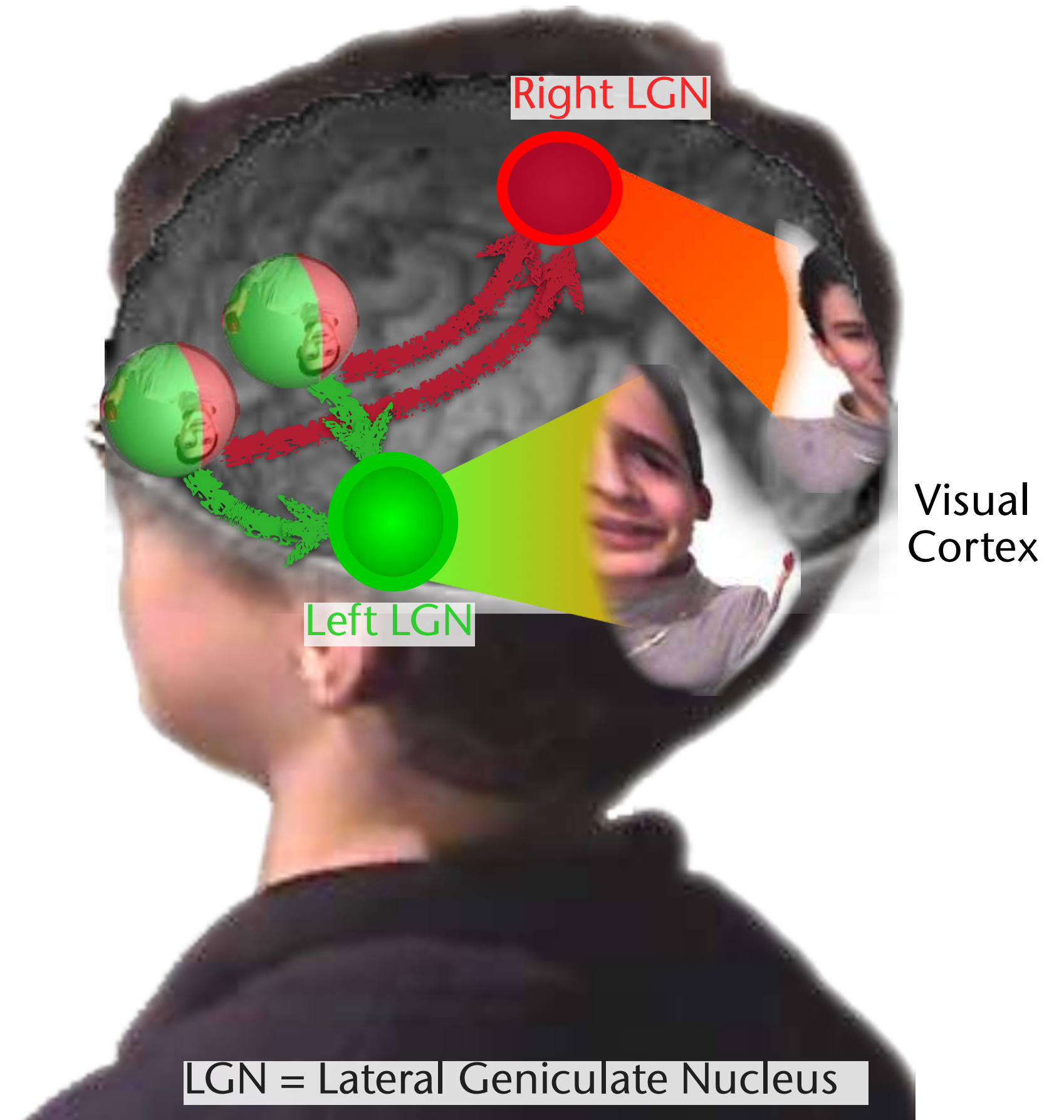
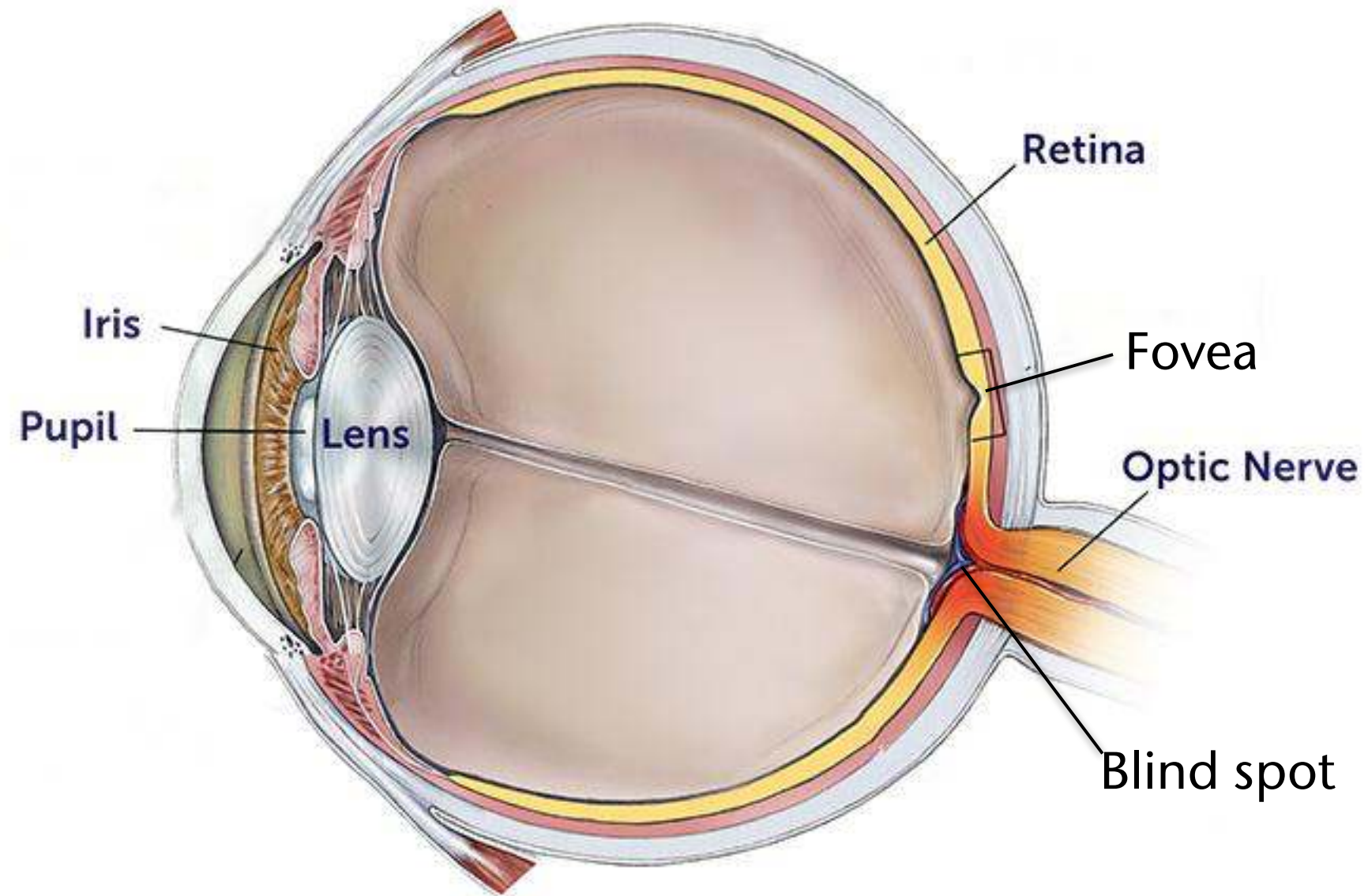


Philosophischer Exkurs

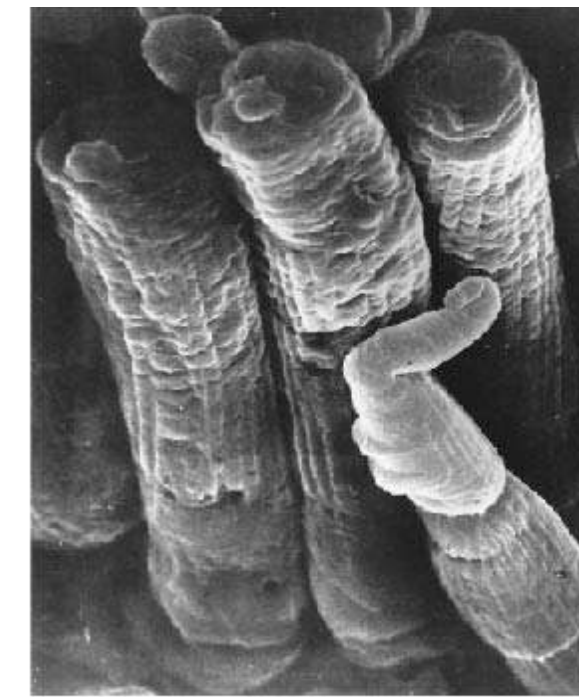
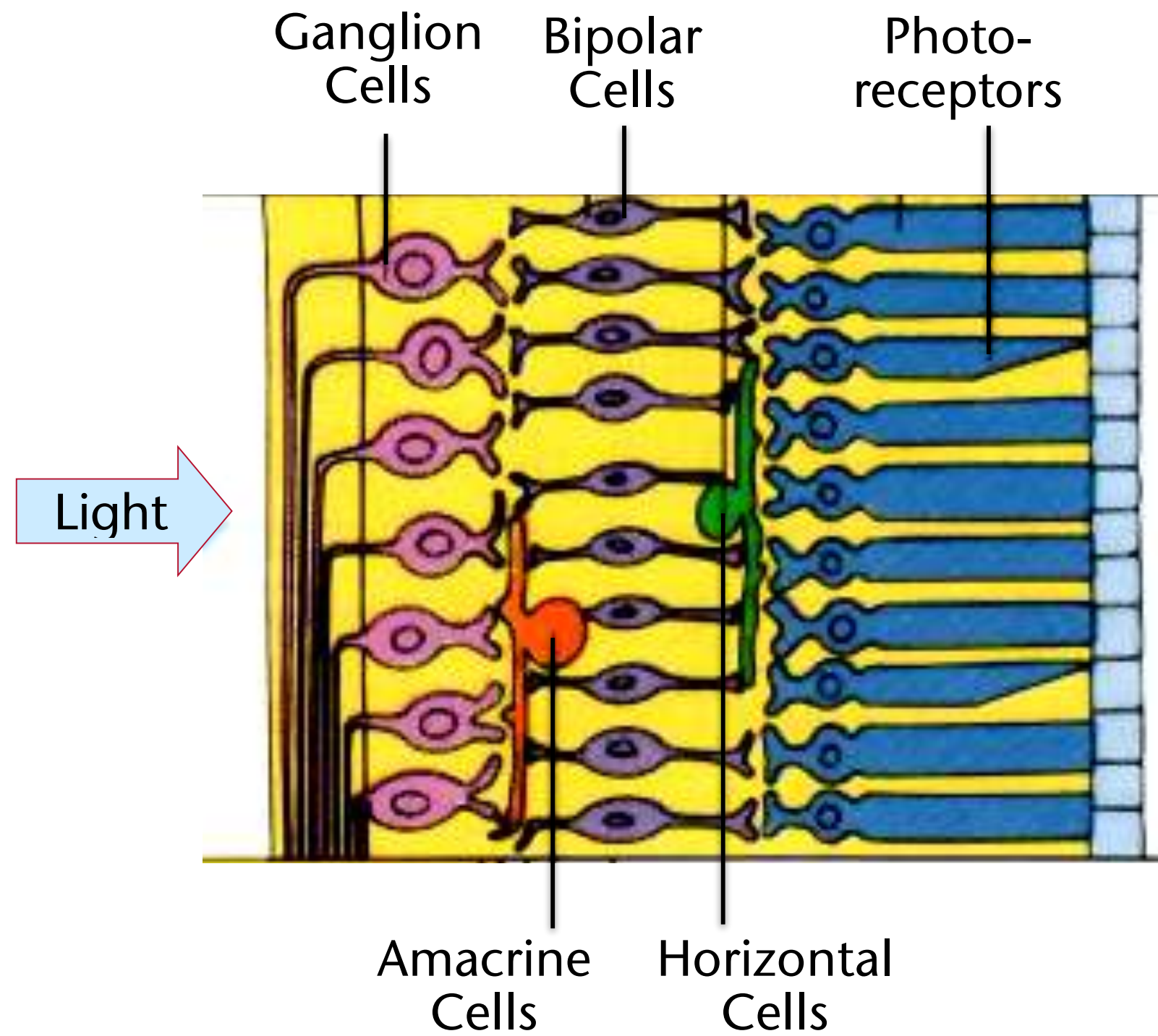
- Gedankenexperiment: *What Mary didn't know*
 - Mary ist Super-Wissenschaftlerin zum Thema Farbsehen
 - Weiß alles über die Physik elektromagnetischer Wellen (= Licht)
 - Weiß alles über die Funktionsweise unserer Retina
 - Weiß alles über die Verschaltung unserer Neuronen im Gehirn
 - Aber: Mary wächst in einem Labor auf, in dem alle Gegenstände und alles Licht nur Schwarz-Weiß-Grau ist, und sie durfte niemals Experimente anstellen, bei denen chromatisches Licht entsteht (z.B. Prisma) → sie hat noch nie in ihrem Leben Farben gesehen
 - Wie erklären Sie Mary, wie sich die Farbe Rot "anfühlt" ??
- **Erklärungslücke** (*explanatory gap*): Bewusstseinszustände lassen sich nicht vollständig mitteilen
- **Qualia**: Eigenschaften von Objekten, die man *erfahren* kann, aber letzten Endes nicht *mitteilen* kann (und nicht *an und für sich* messen kann)



Das Auge

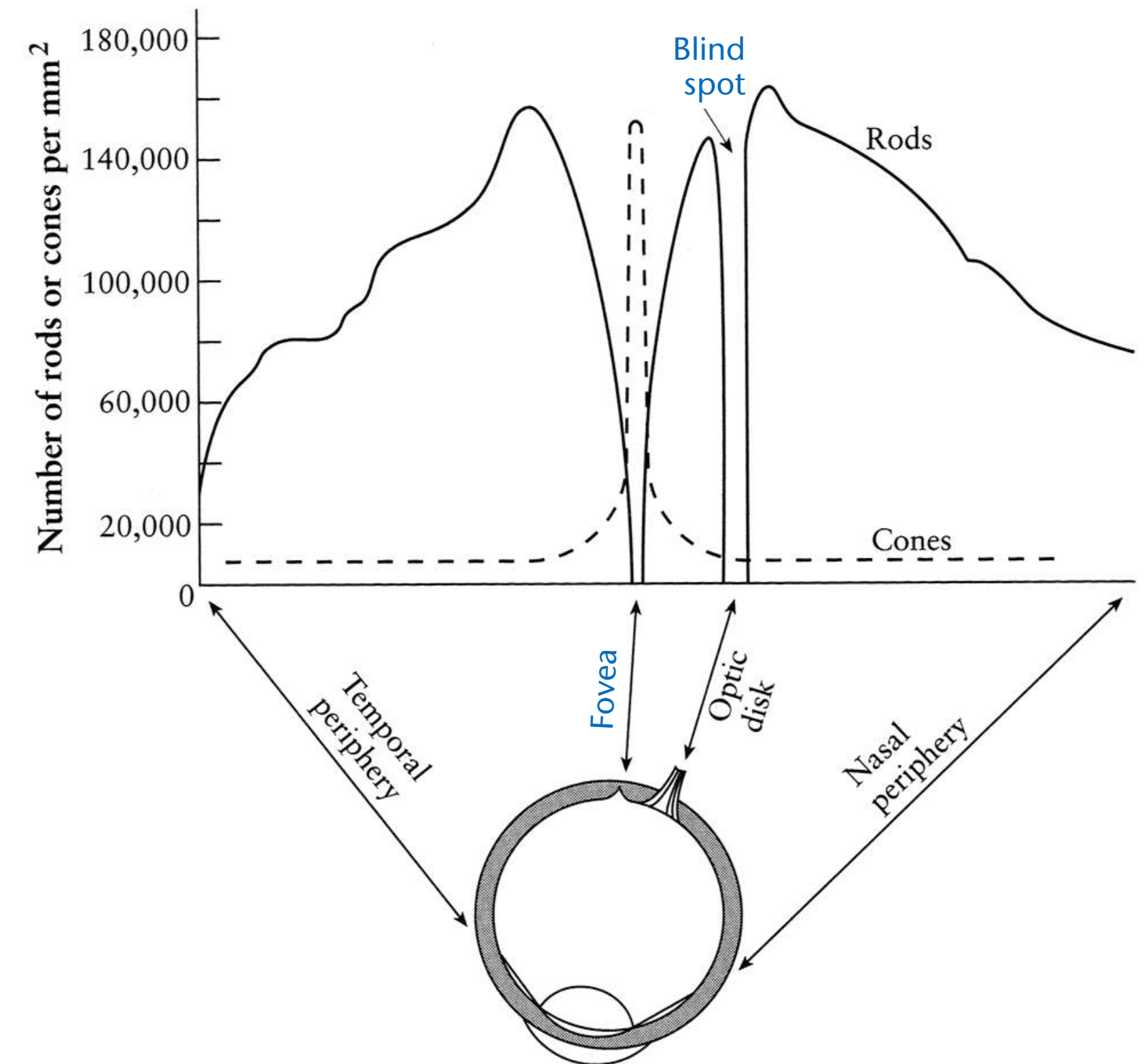
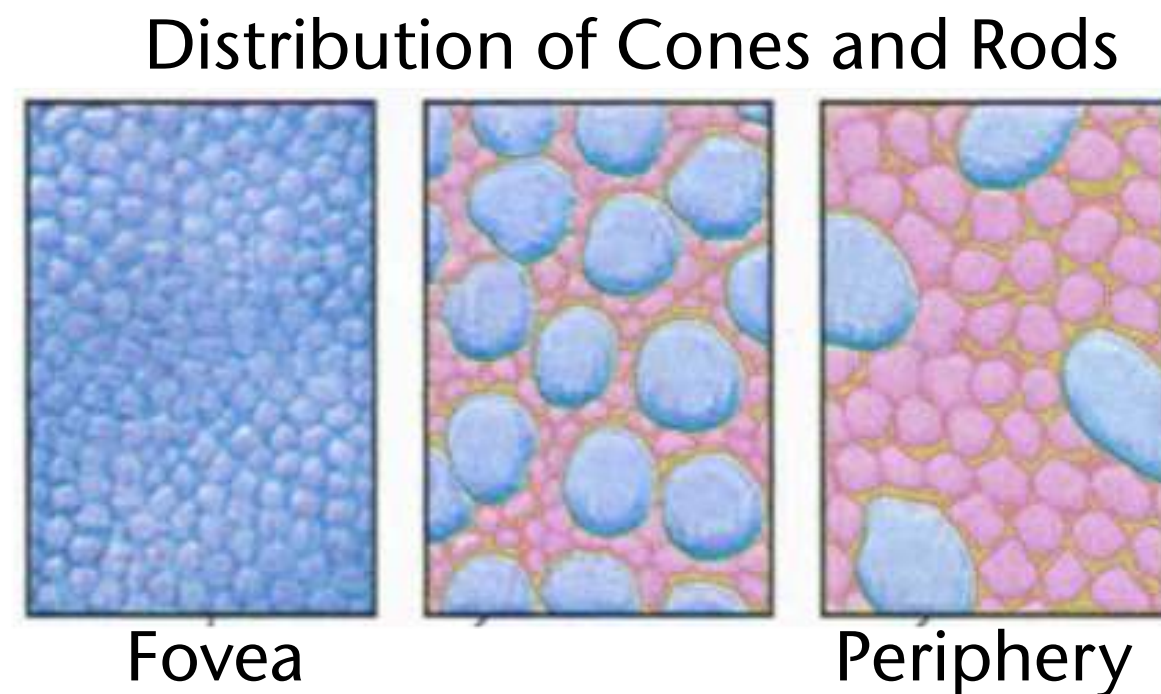


Die Retina



Die Retina

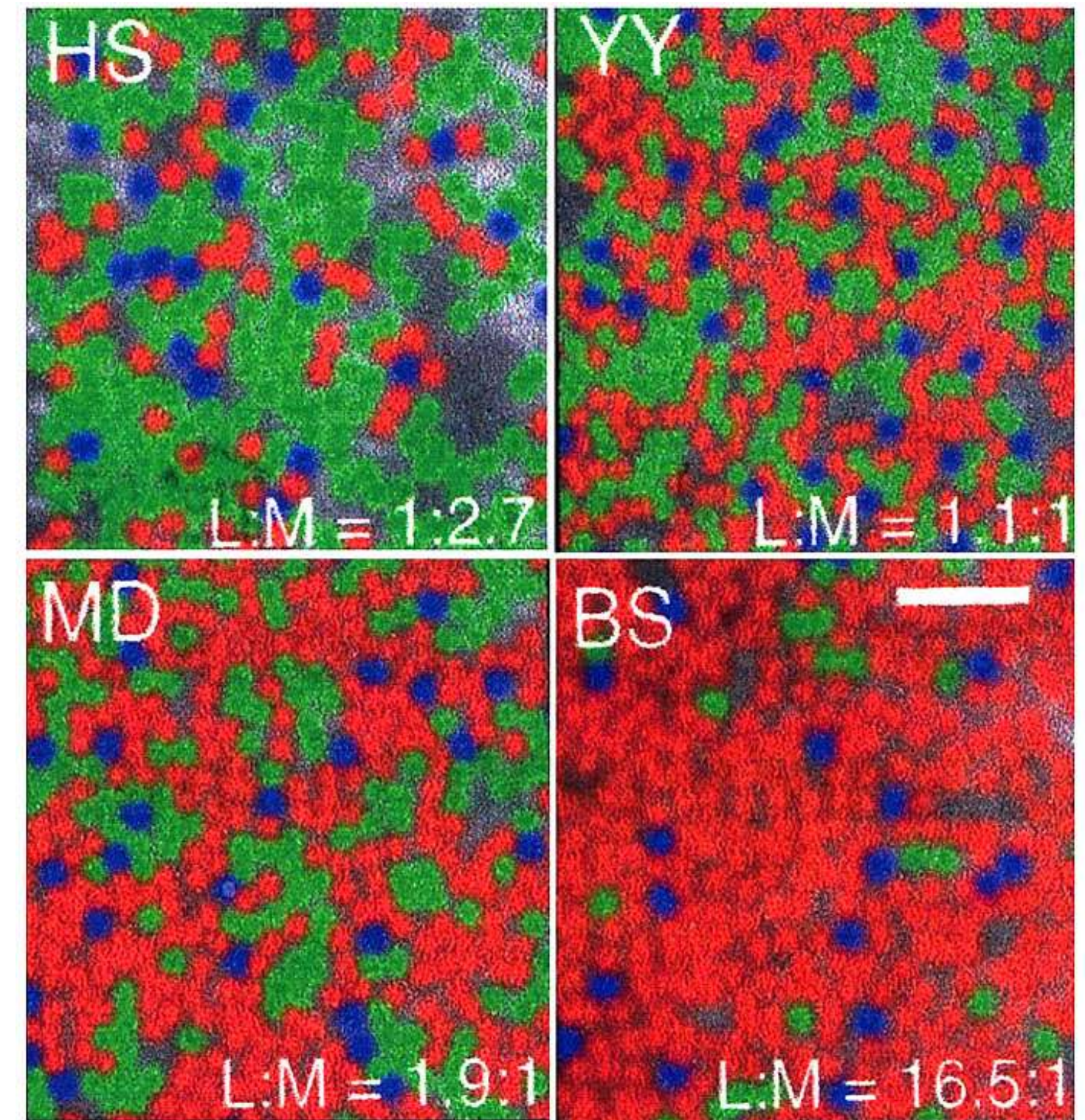
- Auflösungsvermögen auf der Retina (*visual acuity*)
- **Fovea** = kleine Region auf der Netzhaut mit höchster Cones-Dichte und ohne Rods, ca. 1-2° Durchmesser





Verzerrung entspricht ungefähr der lokalen Auflösung auf der Retina; entspricht außerdem ungefähr der Fläche im visuellen Cortex, die jeweils der entsprechenden Fläche auf der Retina zugeordnet ist.

- View of the mosaic of L, M, and S cones in four human subjects with normal color vision. The ratio of S to L+M cones is constant, but that of L to M cones varies from 1:2.7 (M:L) to 1:16.5 (M:L)!
[adapted from Williams]



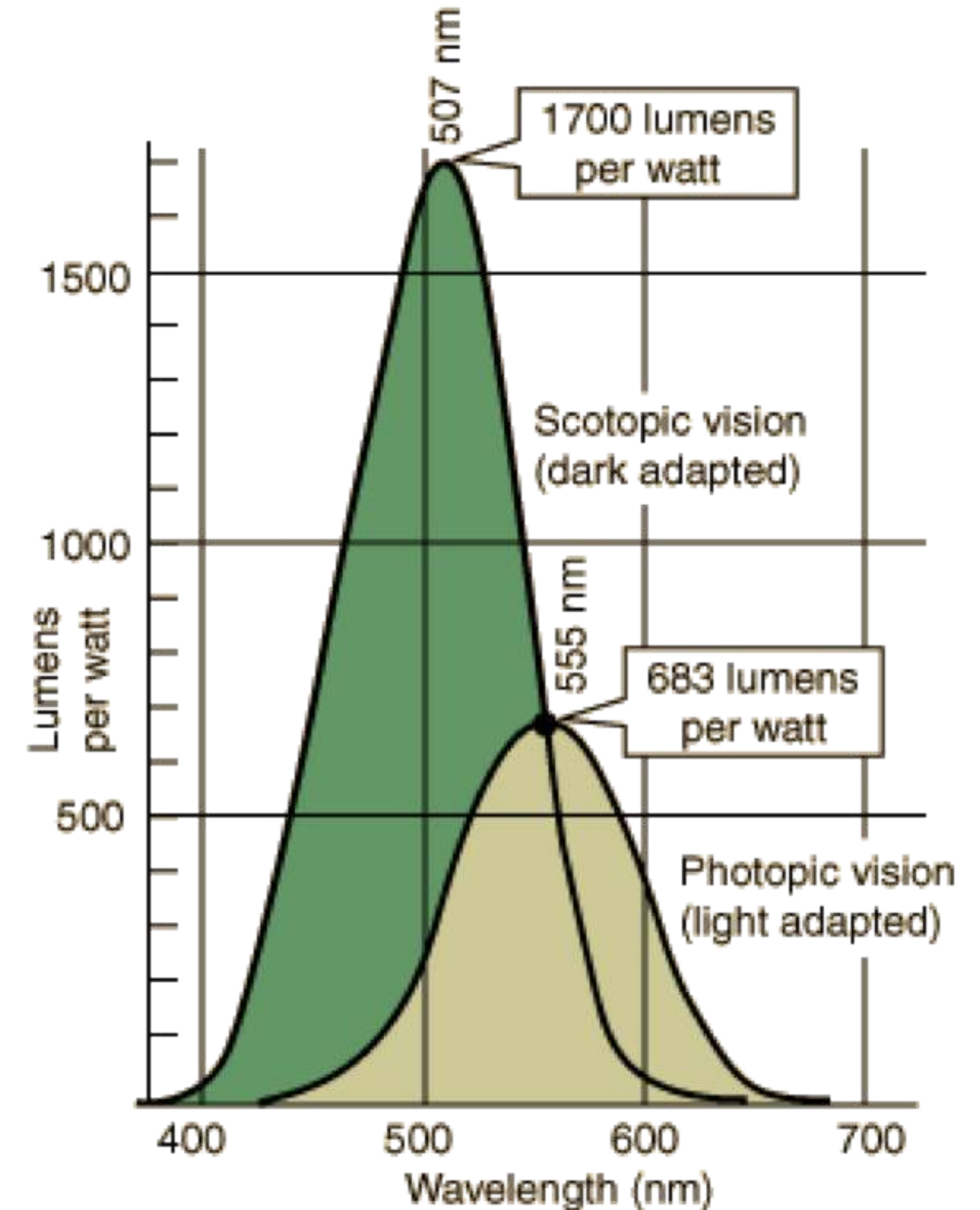
Ist das Kunst ... oder Wissenschaft ...?



Gary Schneider: Retinas, 1998, Museum of Fine Arts, Boston.

Human Spectral Sensitivity

- Nachts: **scotopic vision** durch *Rods* (Stäbchen)
- Tags: **photopic vision** durch *Cones* (Zapfen)
- Nacht-Adaption:
 - Damit die Rods ihre volle Empfindlichkeit erreichen können, müssen sie sich erst adaptieren
 - Die volle Adaption dauert mindestens ½ Stunde!
- Erklärt das Sprichwort: "*Nachts sind alle Katzen grau.*"



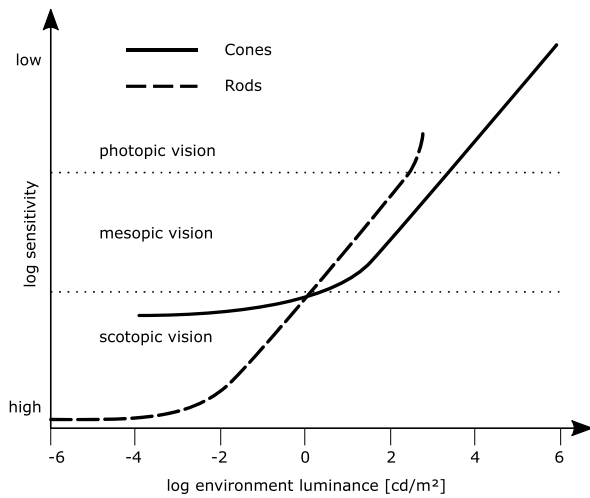
Welche Farbe sollte die Instrumentenbeleuchtung auf einer Schiff-Brücke bei Nacht haben?



<https://www.menti.com/rt5s3k7vy3>

FYI: Einige (erstaunliche) Unterschiede zwischen Rods und Cones

	<i>Cones and photopic vision</i>	<i>Rods and scotopic vision</i>
Overall contribution	Cones underlie almost all our vision (under twenty-first century metropolitan light levels)	Rods contribute only under restricted conditions: after a considerable time at very low light levels
Spatial acuity	Extremely high (in the fovea)	Very low
Speed of response	Very fast (flicker detectable beyond 100 Hz)	Slow
Operating range	Enormous (twilight upwards, without limit)	Restricted (twilight downwards several log units)
Saturation	Cones do not saturate in steady light, no matter how bright	Rods saturate at roughly twilight levels, and are unresponsive at daytime lighting levels
Light adaptation	Cones adapt rapidly, exhibiting Weber Law desensitisation over a huge range of intensities	Rods adapt more slowly and over a narrower range of intensities; at the lowest intensities scotopic adaption follows approximately a square-root law
Contrast sensitivity	High (detect contrasts of 0.5%)	Low (need contrasts of ~5%)
Recovery of photocurrent after full bleach	Cones recover circulating current within 20 ms	Rods take 20 min to recover circulating current; that is, ~60 000 × slower than cones
Dark adaptation of visual system after full bleach	Photopic vision recovers full sensitivity in ~5 min	Scotopic vision takes ~40 min to recover full sensitivity
Colour vision	Trichromatic colour vision mediated by comparison of signals from three spectral classes of cone	–
Proportion of photoreceptors over entire retina	5%	95%
Proportion of photoreceptors in foveola	100%	0%



Aus: TD Lamb: *Why rods and cones*. Eye (Nature) 2016.
Kopie auf der VL-Homepage

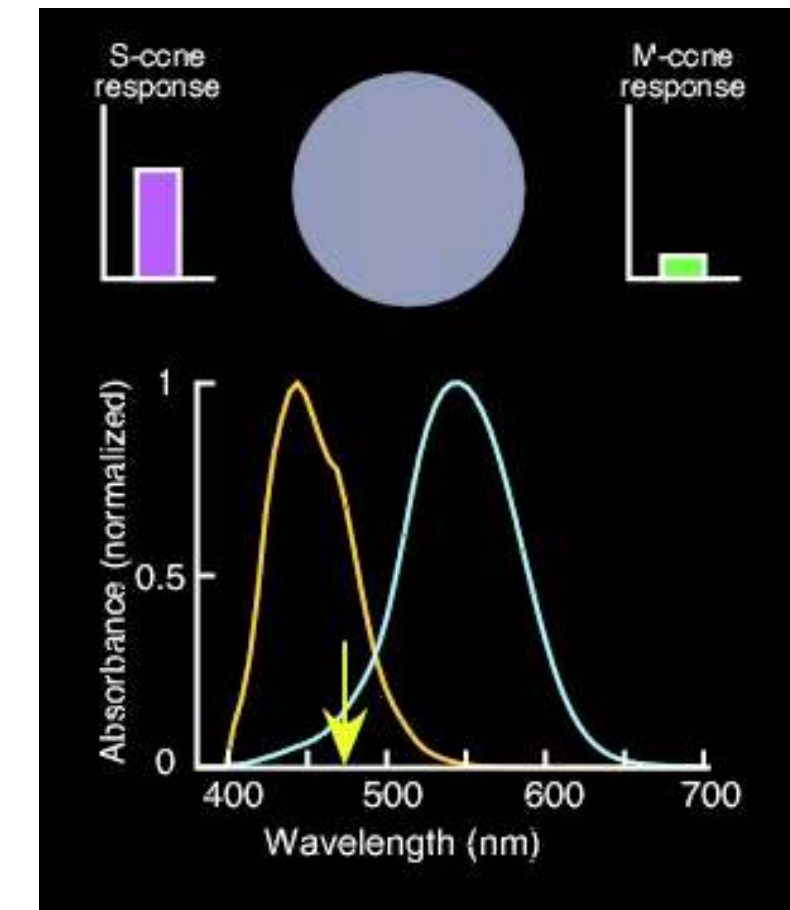
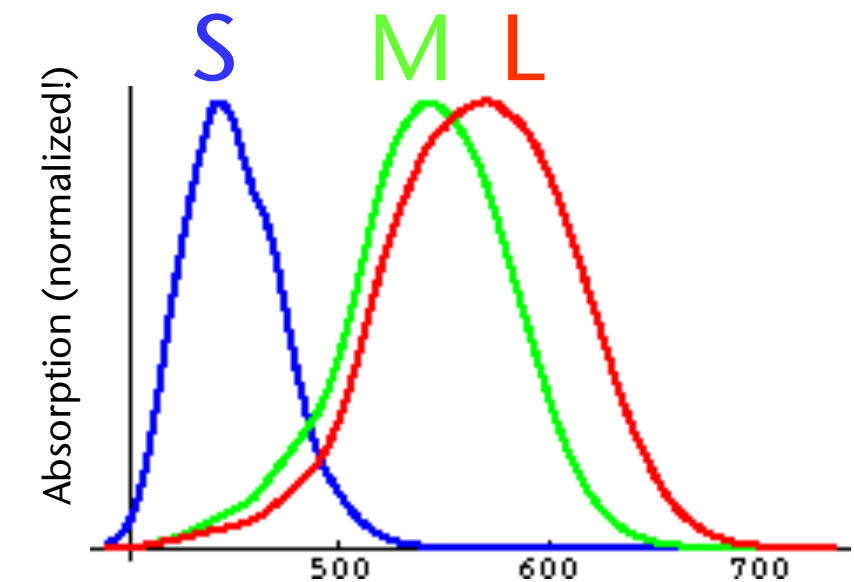
The rods are more numerous of the photoreceptors, some 120 million, and are the more sensitive than the cones. However, they are not sensitive to color. They are responsible for our dark-adapted, or scotopic, vision. The rods are incredibly efficient photoreceptors. More than one thousand times as sensitive as the cones, they can reportedly be **triggered by individual photons under optimal conditions**. The optimum dark-adapted vision is obtained only after a considerable period of darkness, say 30 minutes or longer, because the rod adaption process is much slower than that of the cones. The rod sensitivity is shifted toward shorter wavelengths compared to daylight vision, accounting for the growing apparent brightness of green leaves in twilight. While the visual acuity or visual resolution is much better with the cones, the rods are better motion sensors. Since the rods predominate in the peripheral vision, that peripheral vision is more light sensitive, enabling you to see dimmer objects in your peripheral vision. If you see a dim star in your peripheral vision, it may disappear when you look at it directly since you are then moving the image onto the cone-rich fovea region which is less light sensitive. You can detect motion better with your peripheral vision, since it is primarily rod vision.

[Hecht, Eugene: *Optics*. 2nd ed, Addison Wesley, 1987, Section 5.7]

Cone Spectral Sensitivity

- 3 Arten von Cones: L-, M-, S-Cones = "*long*", "*medium*", "*short*" wavelength
- Jede Cone-Art hat eine eigene **Empfindlichkeitskurve**; die Maxima entsprechen **ungefähr** Gelb [sic!], Grün, Blau
- Erstaunlich:
 - Es gibt wahrscheinlich(!) **Tetrachromaten!**
 - Aber nur bei Frauen ...
 - 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)

Spectral Sensitivity of the L, M, and S Cones

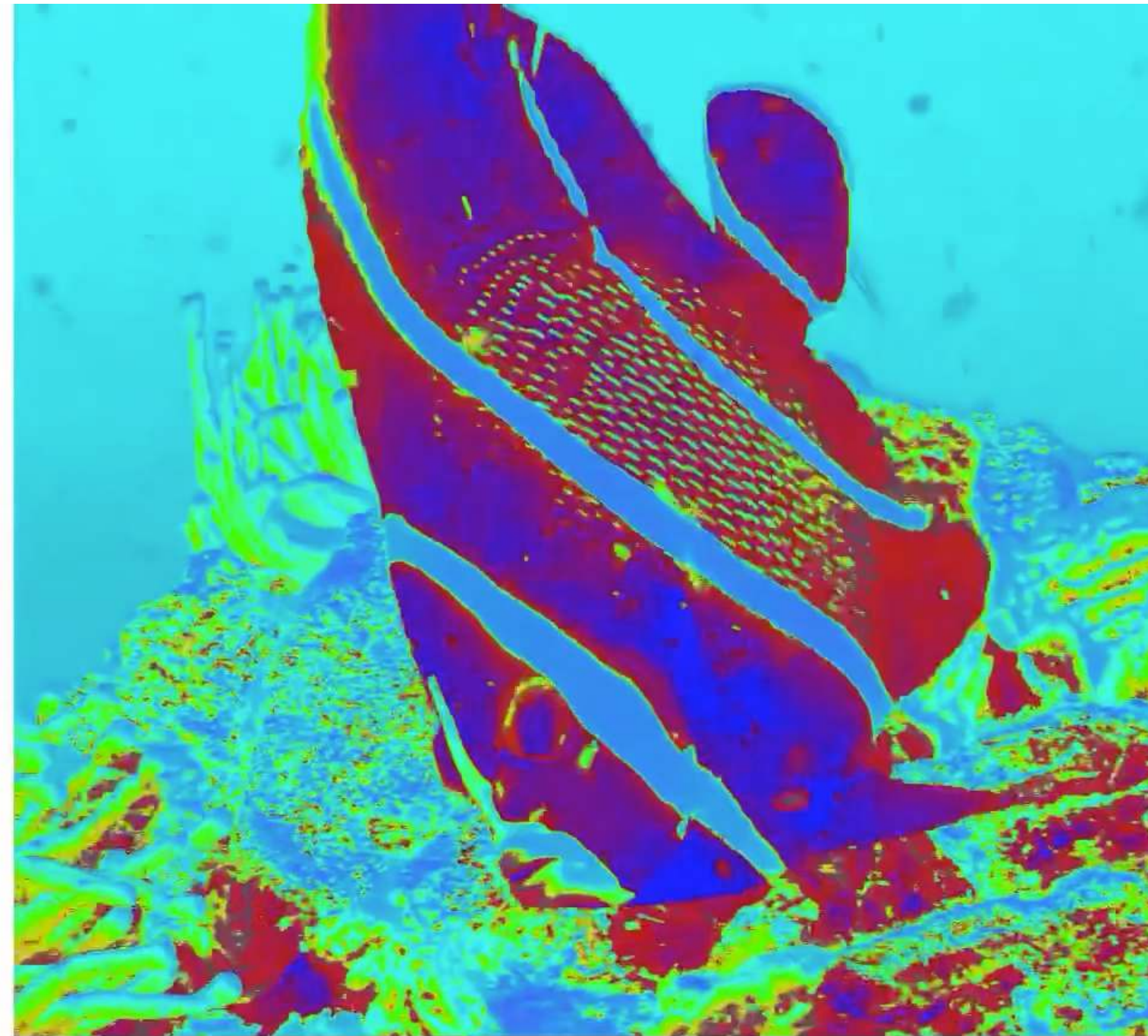


Animation

How Animals See the World



HUMAN VISION

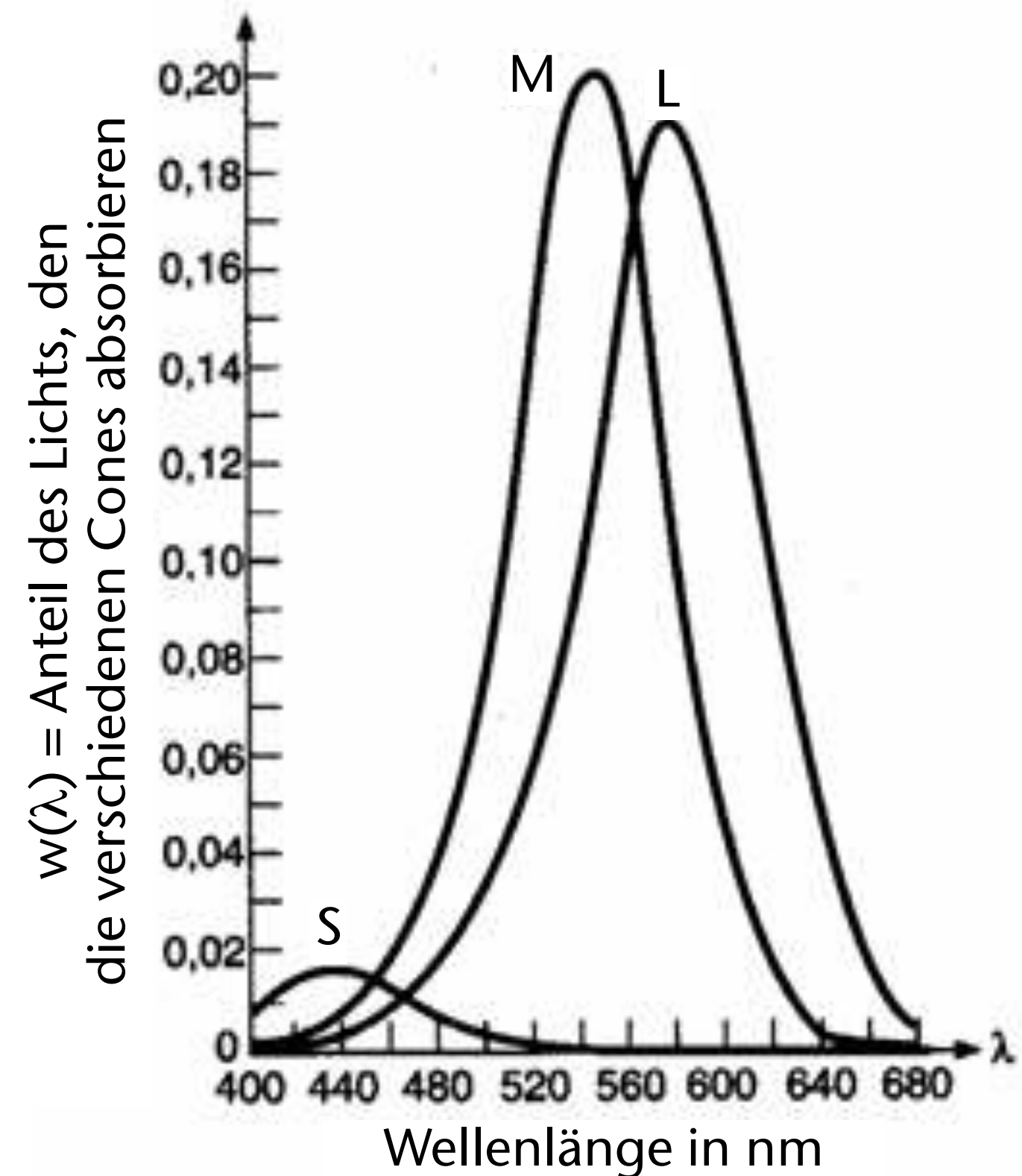


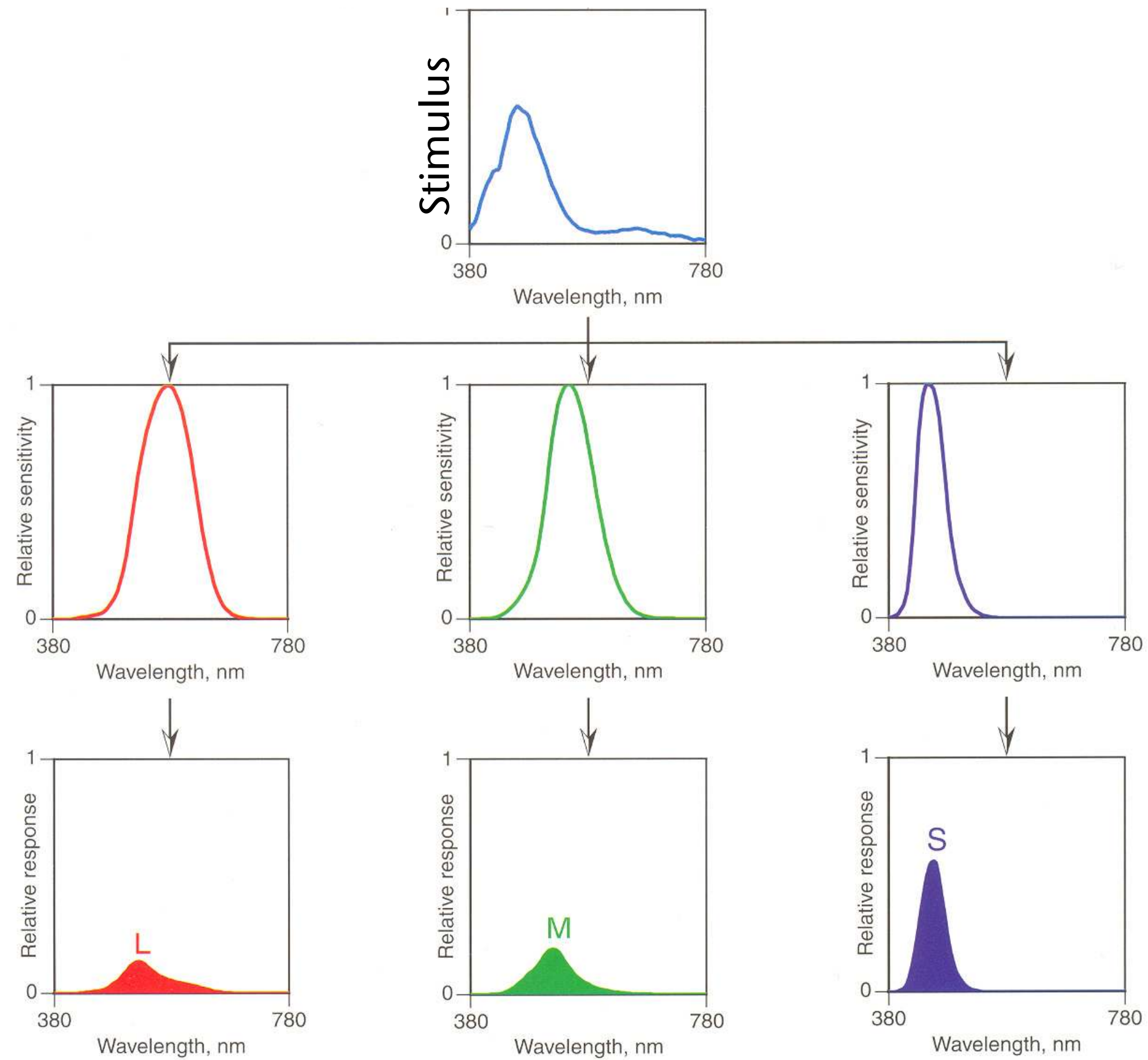
**MANTIS SHRIMP
VISION**

Der wahrgenommene Stimulus

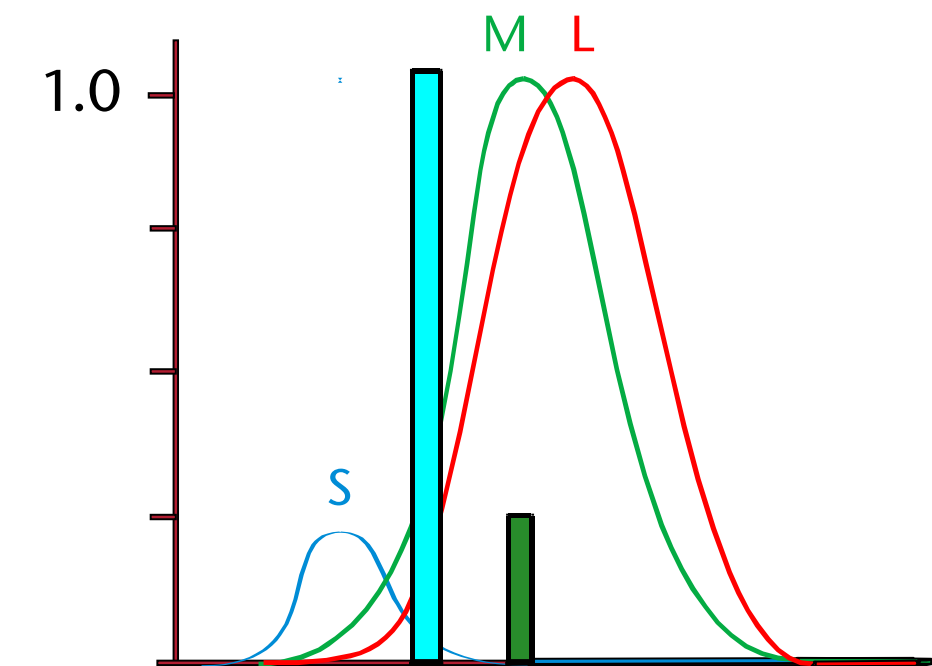
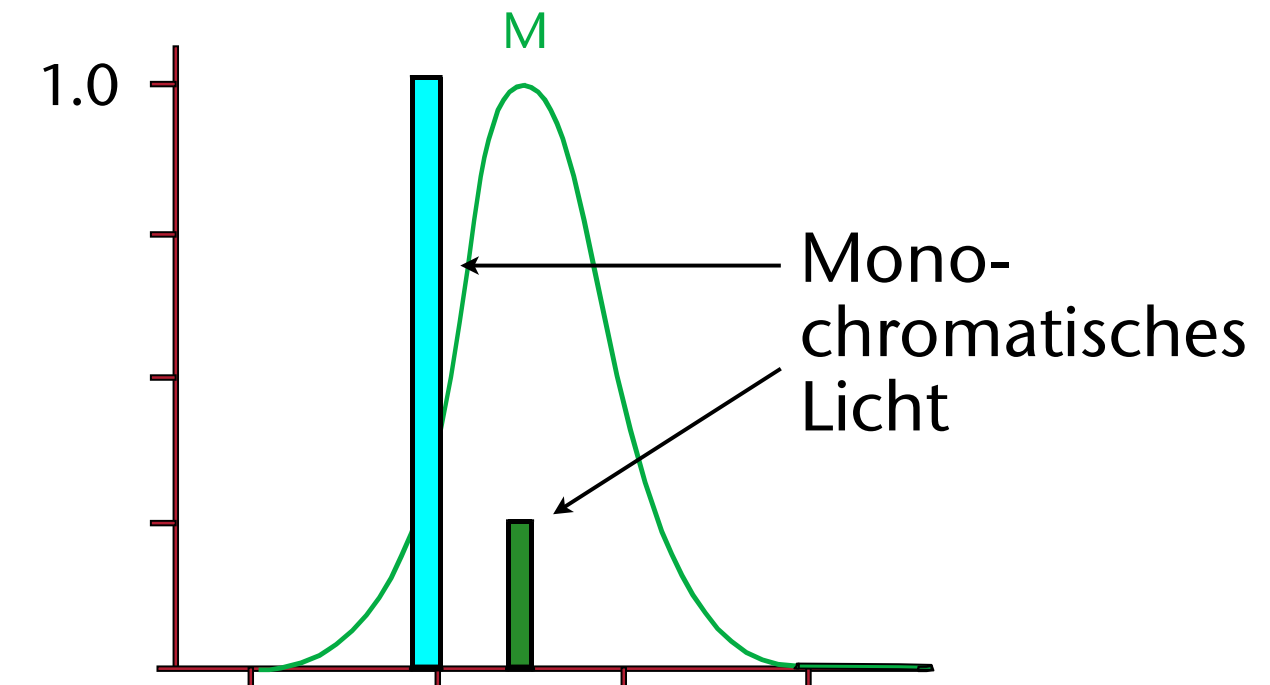
- Die "wahren" Empfindlichkeitskurven
- Der "Output" (*Response*) eines Cones:
 - Sei $P(\lambda)$ das Spektrum des einfallenden Lichtes
 - Sei $w(\lambda)$ die Empfindlichkeitskurve
 - Dann ist die Antwort des Cones:

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



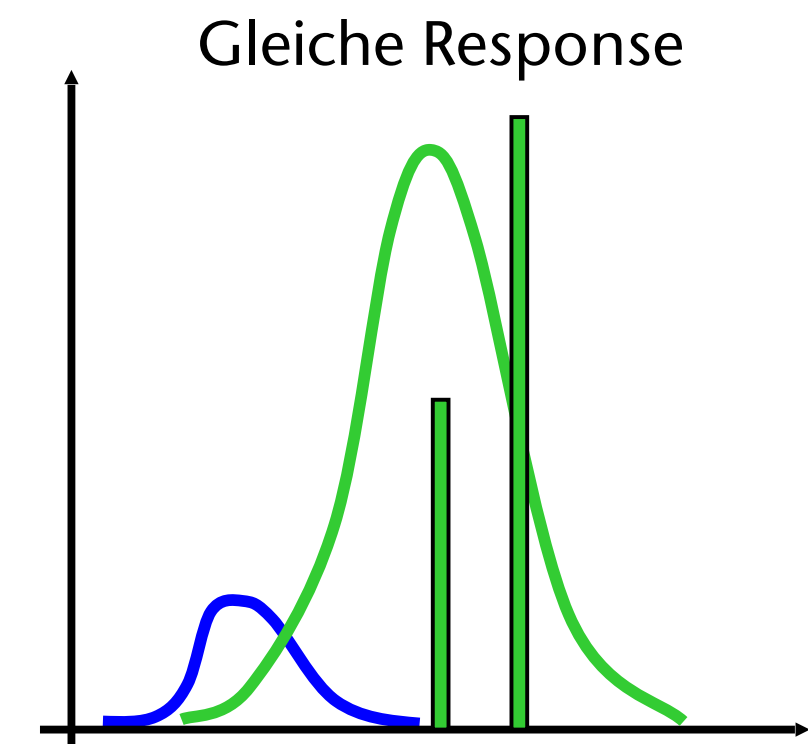
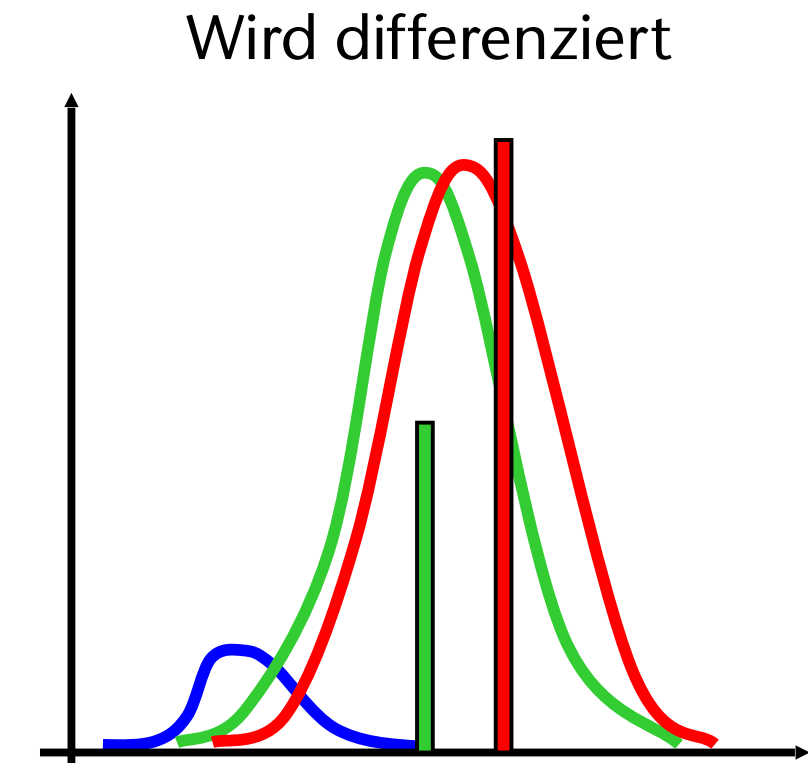


- Achtung: Cones können keine Farben "sehen"!
- Beispiel:
 - Verschiedene Wellenlänge, aber trotzdem gleiche Response, wegen verschiedener Intensität
- Aber: mit mehr Cone-Arten kann man mehr Lichtquellen unterscheiden!
- Beispiel:
 - Stimulus wie oben
 - Verschiedene Cones liefern verschiedene Response



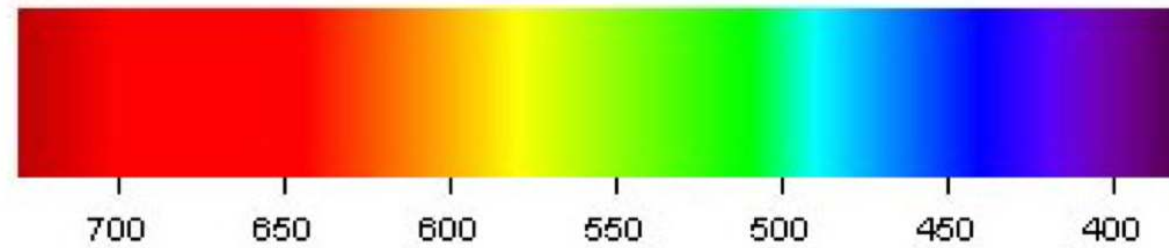
Farbenblindheit

- Klassischer Fall: eine Cones-Art fehlt
- Z.B.: "rote" Cones fehlen
- Folge: Rot-Grün-Blindheit
- Häufigkeit:
 - 99% aller Farbsehschwächen
 - 10% aller Menschen sind rot-grün-blind
 - Davon sind 90% Männer, 10% Frauen

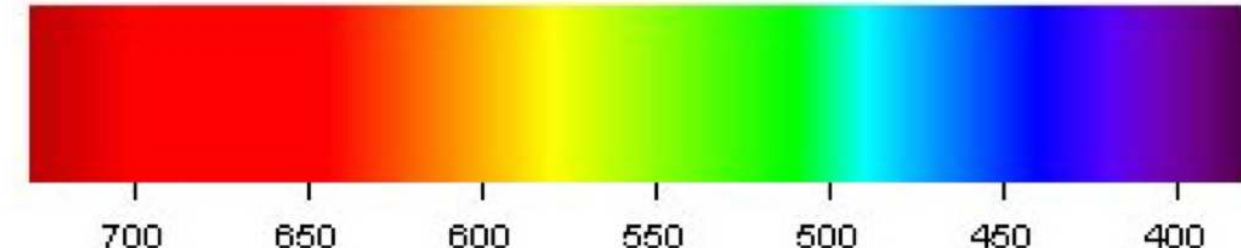


Wie Farbenblinde die Welt sehen (vielleicht!)

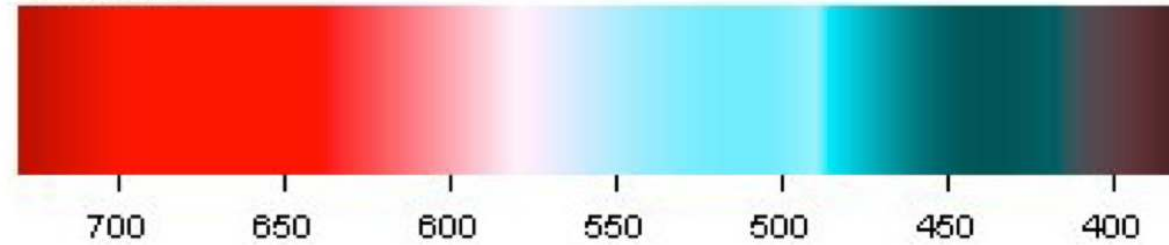
Normal



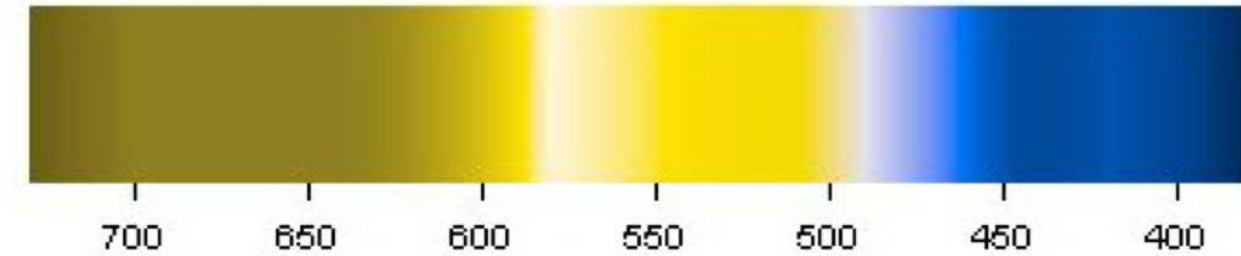
Normal



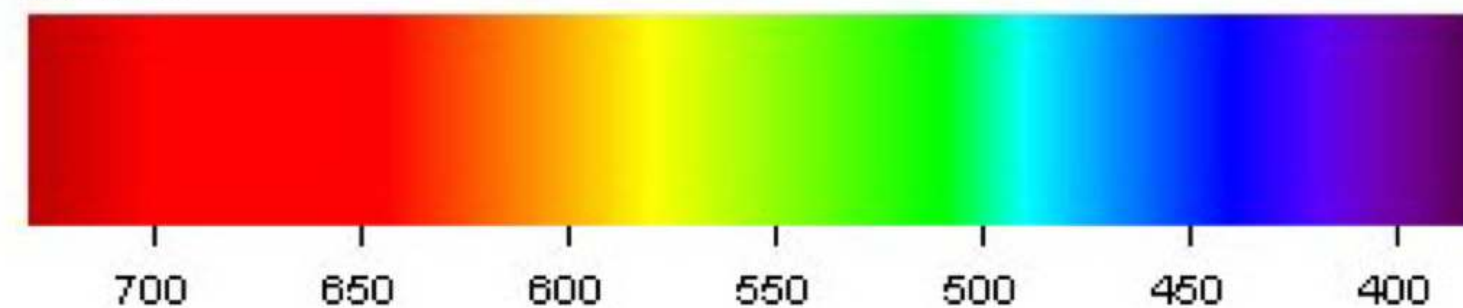
Tritanopia



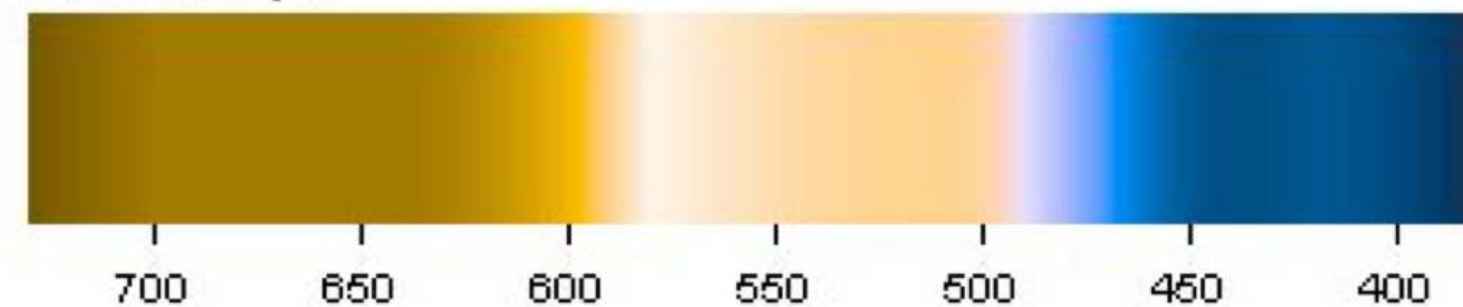
Protanopia



Normal



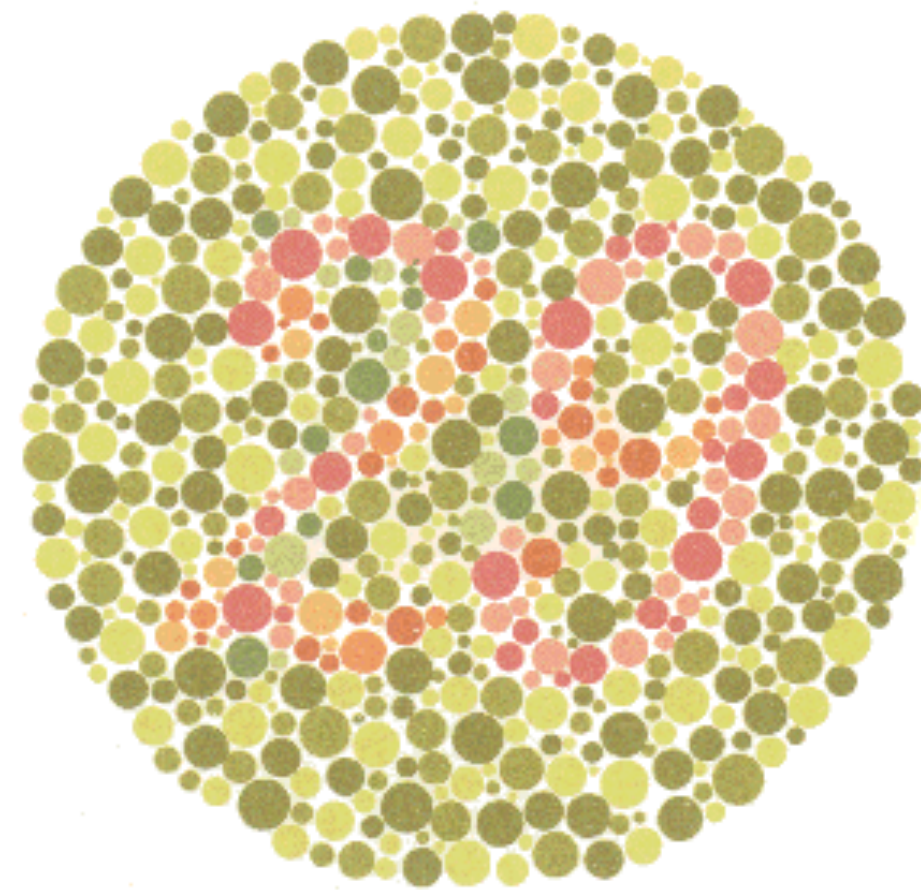
Deuteranopia



Tests zur Farbsehschwäche

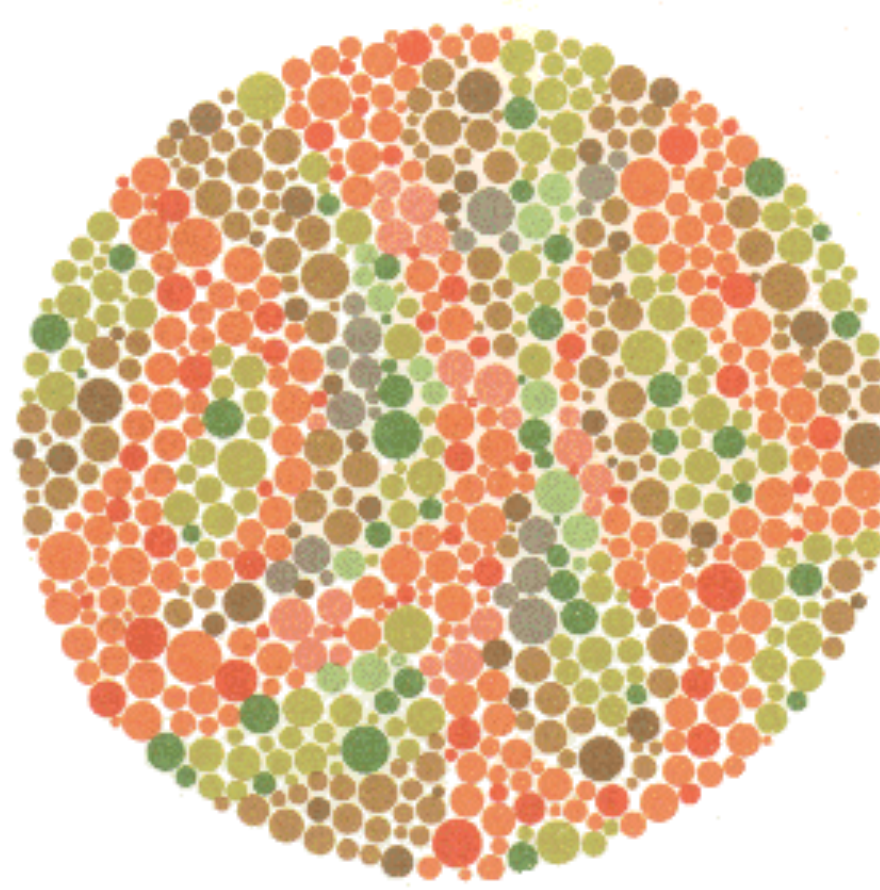
Normalsichtige sehen hier "29"

Rot-grün-Blinde sehen hier "70"



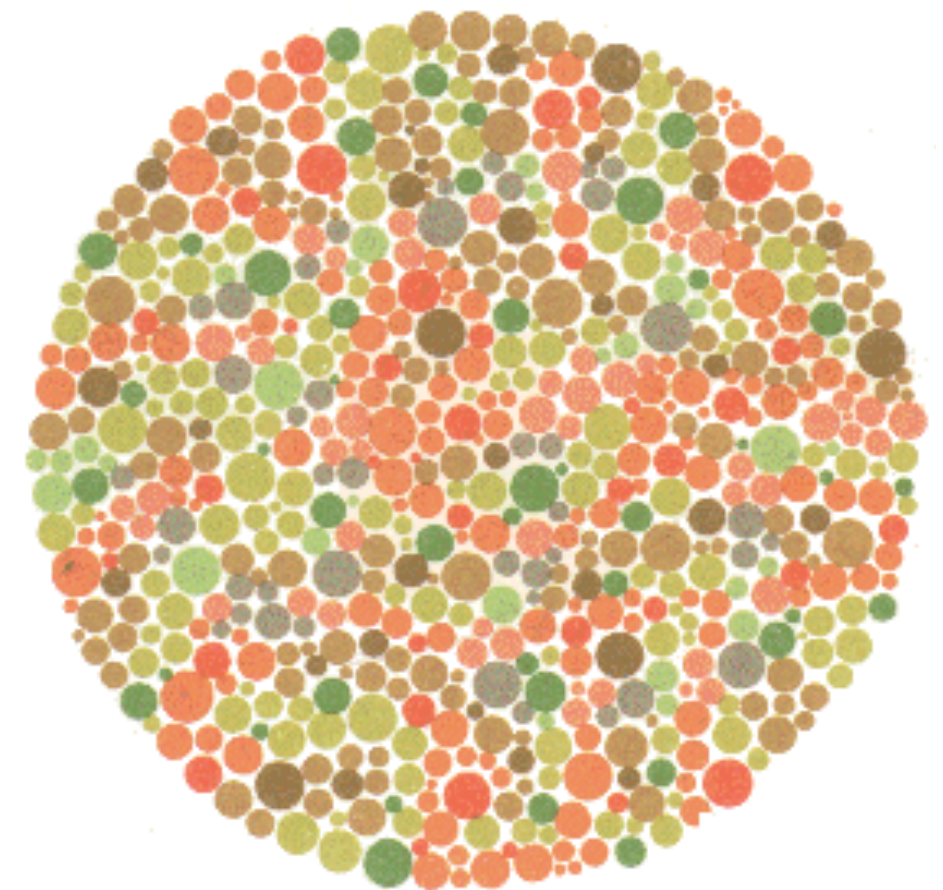
Normalsichtige sehen hier nichts

Rot-grün-Blinde sehen hier "5"



Normalsichtige: nichts

Rot-grün-Blinde: eine Art Irrweg
von links nach recht

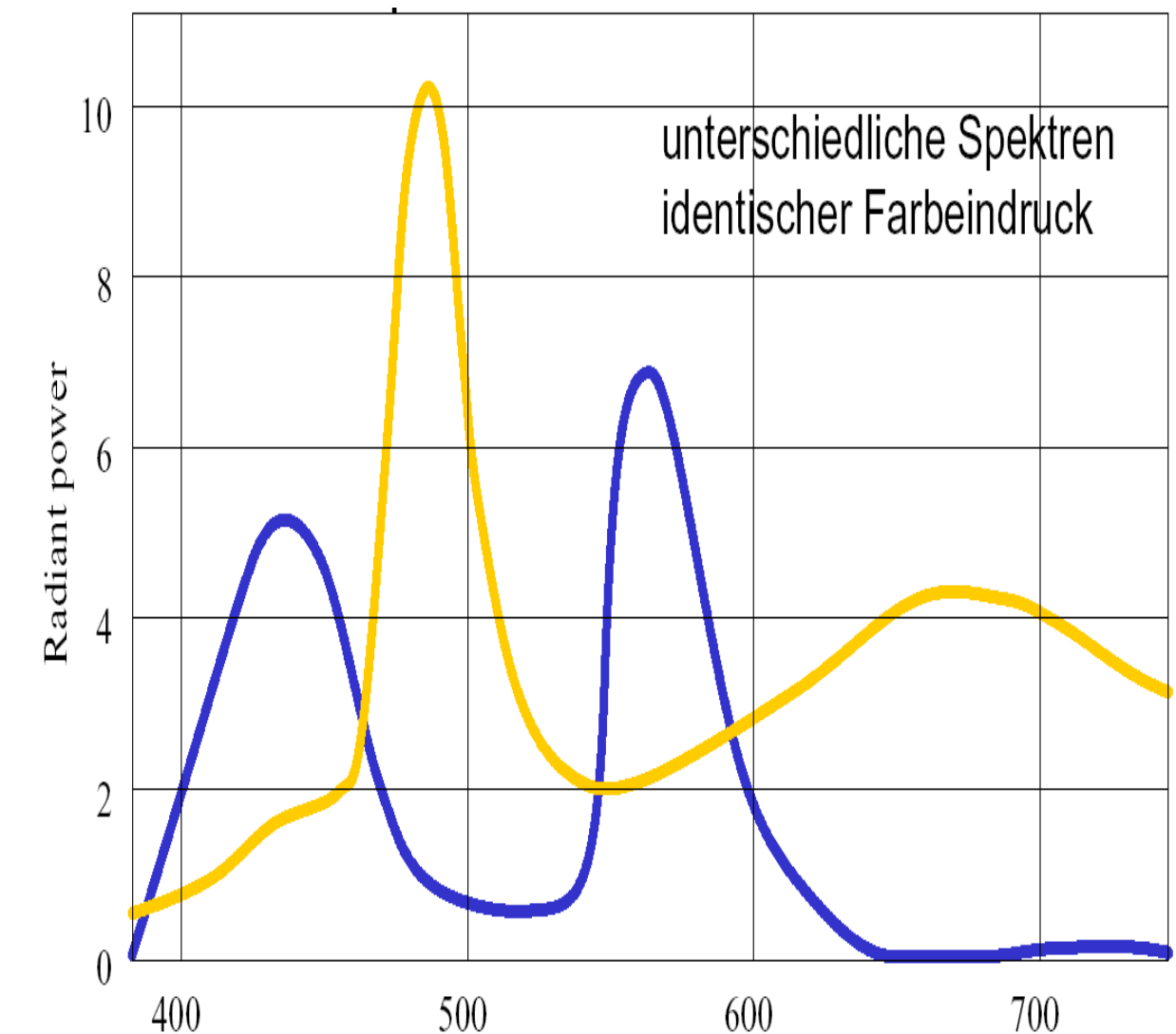


Funktioniert nur, wenn der Monitor die Farben korrekt wiedergibt!

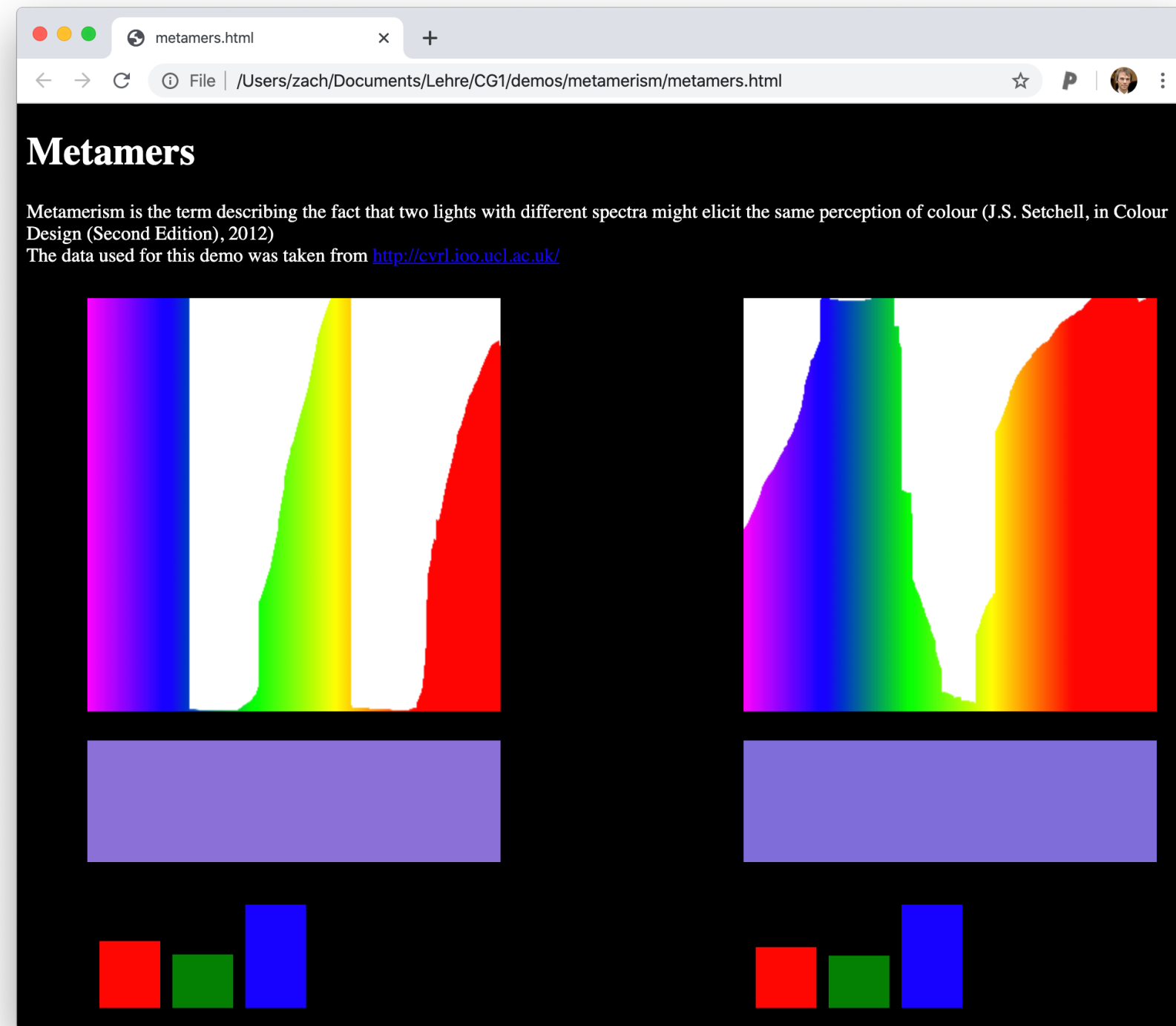
Differenziertere, und unterhaltsamere online Version von X-Rite: <https://www.xrite.com/hue-test>

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-dimensionaler 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!



Demo



Baue eigene Metamere unter
cgvr.cs.uni-bremen.de/teaching

→ Computergraphik

→ "Tools and Demos"

→ "demo on metamerism"

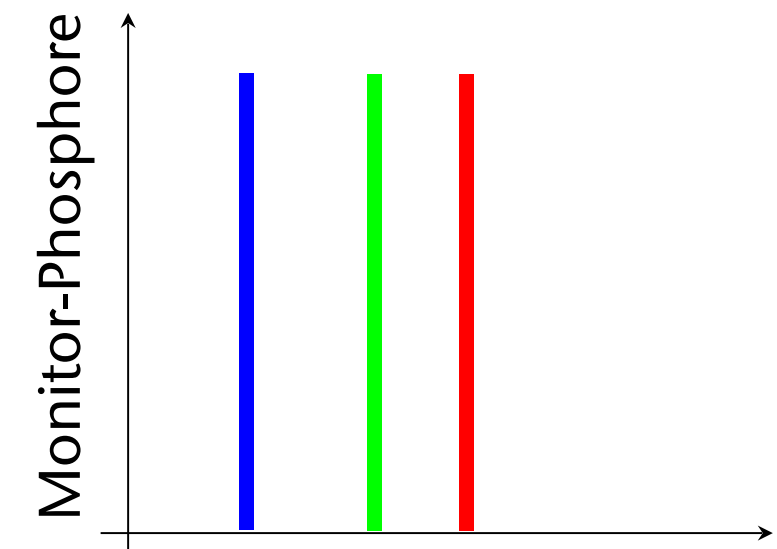
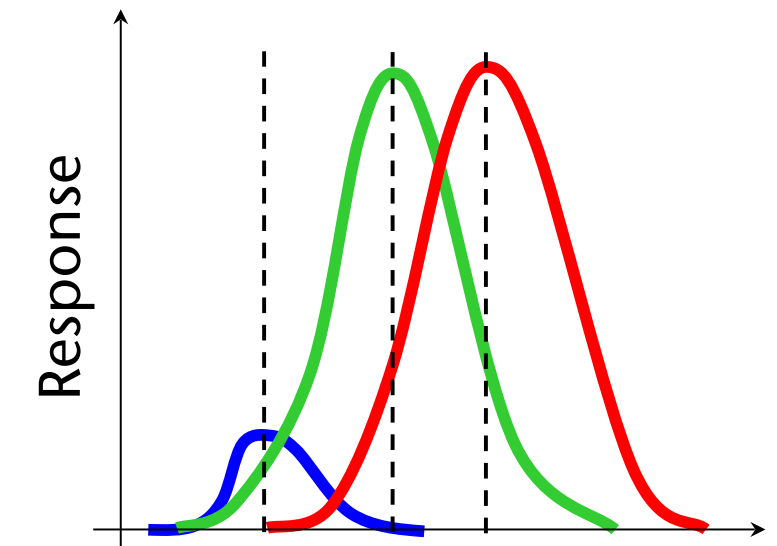
Ein "virales" Kleid: schwarz & blau oder weiß & gold ?



It started on a Tumblr page, where a user posted a photo of the dress with the caption: "guys please help me - is this dress white and gold, or blue and black? Me and my friends can't agree and we are freaking the f--k out."

Ein kleiner Trugschluss

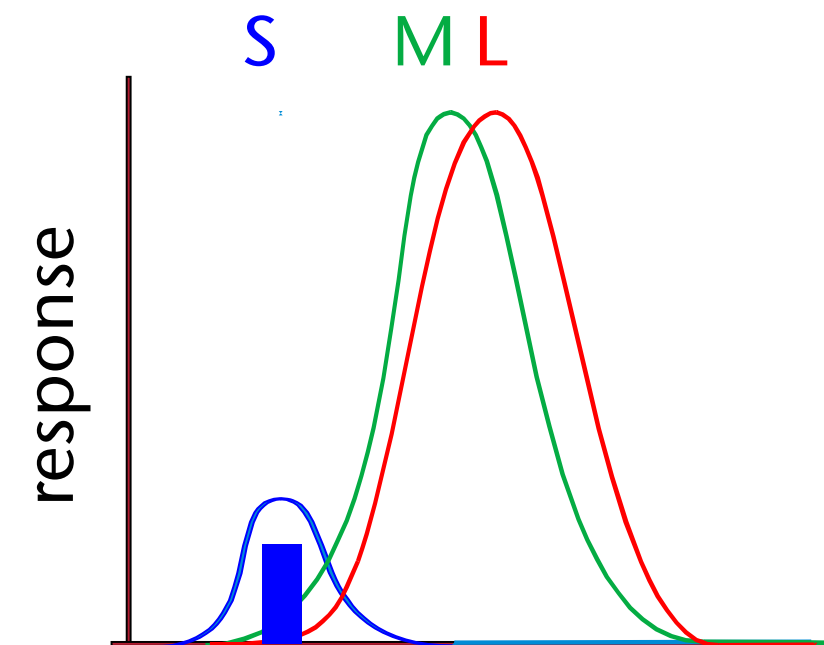
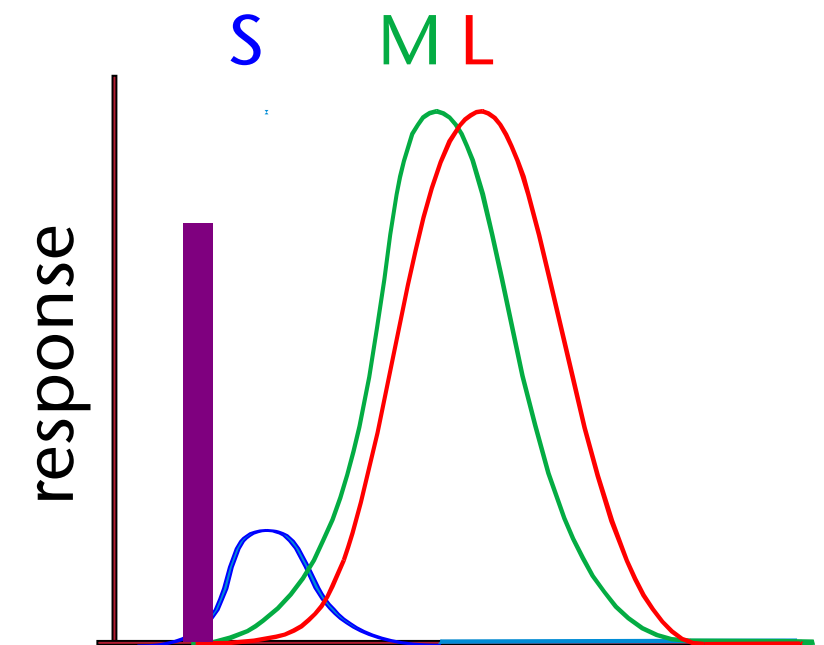
- Welche monochromatischen Lichtquellen soll man im Monitor wählen, und wie berechnet man deren Lichtstärke, so dass man den selben Farbeindruck wie ein gegebenes Spektrum erzeugen kann?
- Man könnte folgende Idee haben:
 - Wähle Phosphore im Monitor so, daß diese genau diejenige Wellenlänge abstrahlen, die genau den Peaks der Empfindlichkeitskurven der menschlichen Cones entsprechen
 - Integriere das zu imitierende Spektrum mit den Empfindlichkeitskurven (s. Folie 28)
 - Aktiviere die 3 Monitor-Phosphore mit den Beträgen dieser 3 Integrale
- Leider **KLAPPT DAS NICHT**



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

Gegenbeispiel

- Versuche, folgenden Stimulus mit den 3 o.g. monochromatischen Lichtquellen zu erzeugen:
 - Synthese: Integriere den gegebenen Stimulus mit den 3 Empfindlichkeitskurven
 - Ergibt hier z.B.: $0.2 \times \text{S-Phosphor}$
 - Monitor: "S"-Pixel mit Stärke 0.2 anschalten
 - Analyse: im Auge werden die anderen beiden Cones **doch** erregt
 - Ergibt **andere** Farbe!
 - Grund: die Kurven überlappen sich, sind also (bis zu einem gewissen Grad) **korreliert**!

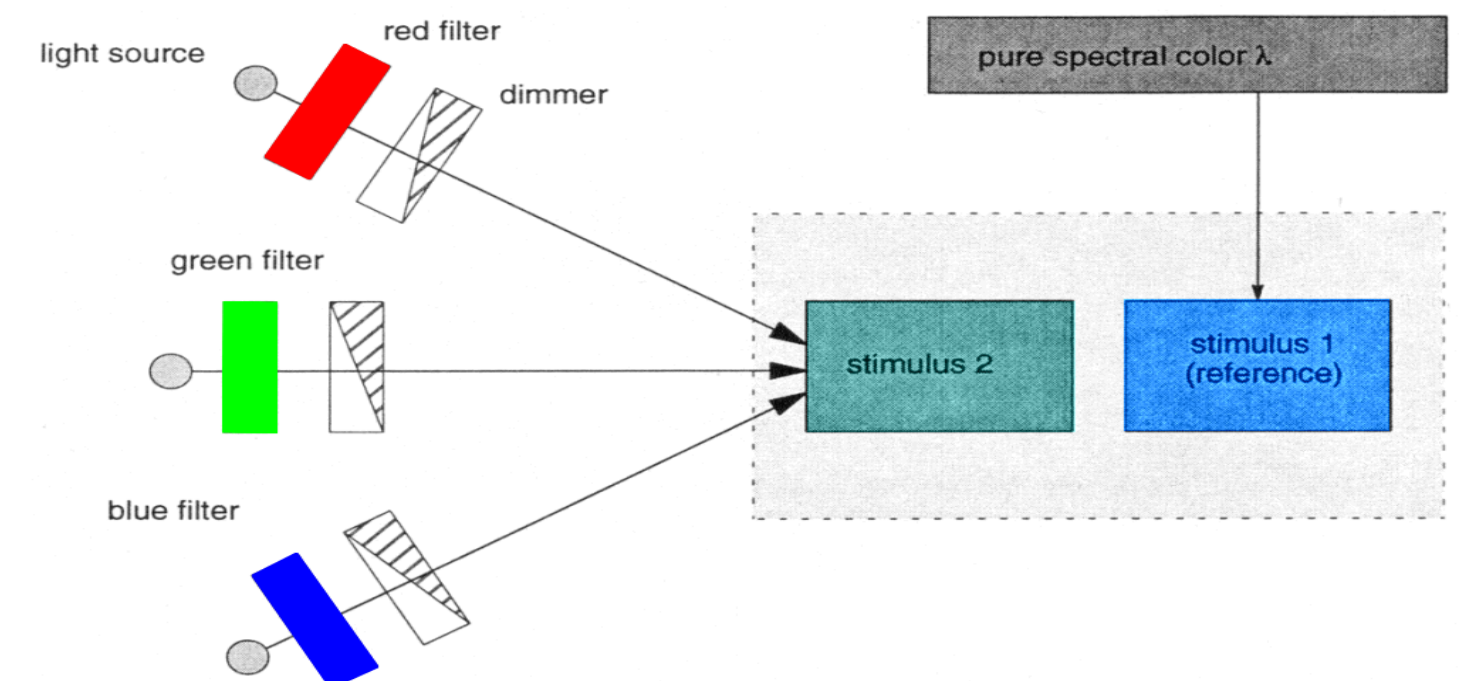
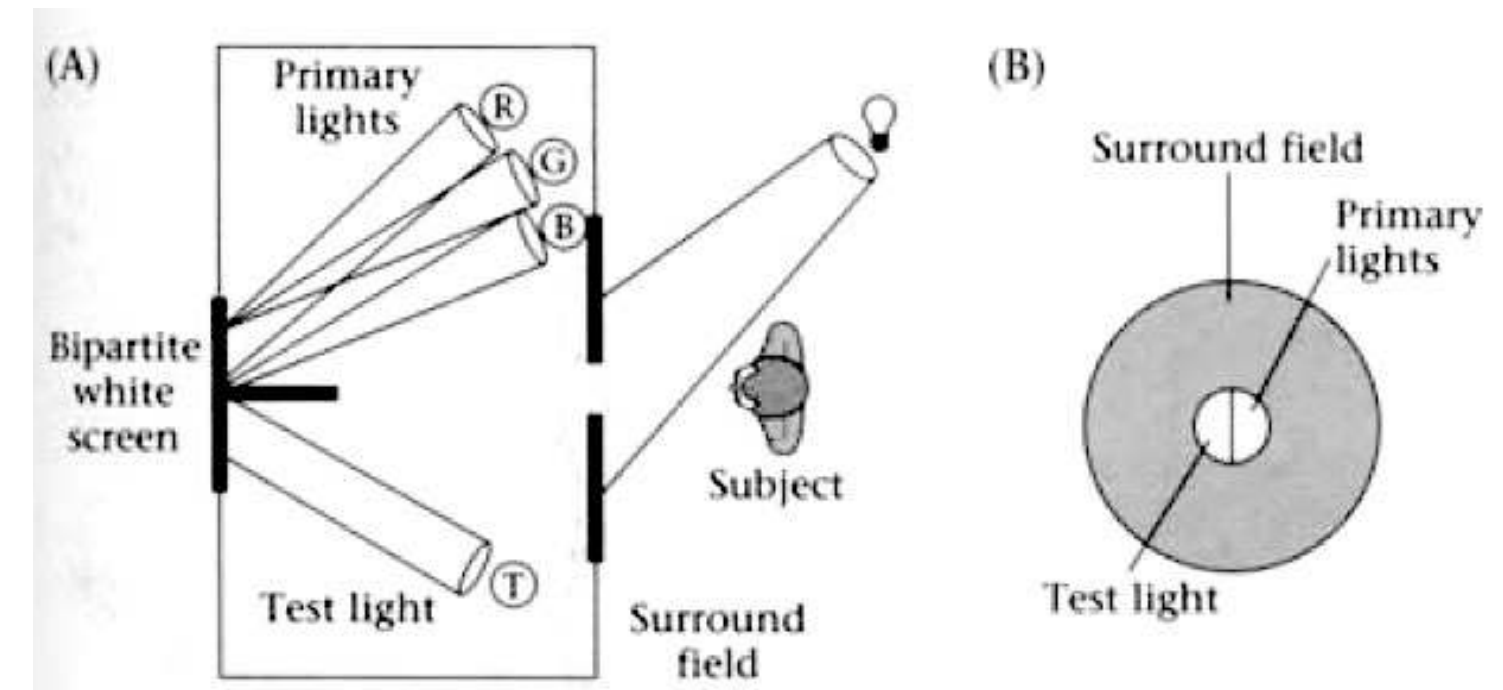


Das Grassmann'sche Farbmischexperiment [1853]

- 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.

$$C_\lambda \text{ "==" } r_\lambda R + g_\lambda G + b_\lambda B$$

- Definition: die Werte $r_\lambda, g_\lambda, b_\lambda$ nennt man **Tristimulus-Werte** (bzgl. festgelegter Primärfarben R, G, B !)



Beobachtungen

1. Das klappt mit (fast) allen C_λ (und Helligkeiten von C_λ), vorausgesetzt:
 - R, G, B sind weit über das Spektrum verteilt; und
 - keine der 3 Primärfarben läßt sich durch Kombination der anderen beiden erzeugen
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. $2C_\lambda = (2r)R + (2g)G + (2b)B$
3. Zwei Primärfarben alleine genügen *nicht*
4. Ändert man *stetig* die Intensität einer der 3 Primärlichtquellen und hält die beiden anderen fest, so ändert sich die Mischfarbe auch *stetig*

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

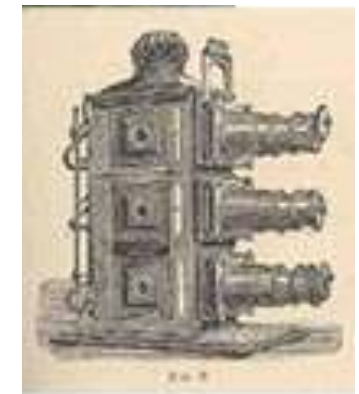
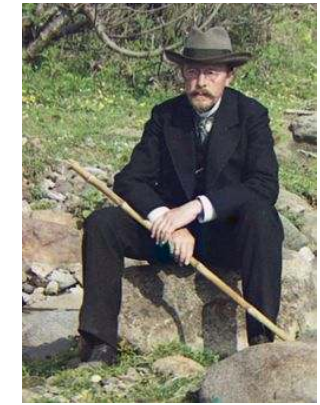
Quiz: zweimal dasselbe Gemälde?



<https://www.menti.com/rt5s3k7vy3>

Exkurs: Prokudin-Gorskii

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



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

Wahrgenommene "Gleichheit" von Spektren

- Sei $A(\lambda)$ ein gegebenes Spektrum
- Seien $R(\lambda), G(\lambda), B(\lambda)$ Primärlichtquellen, und $r, g, b \in [0, 1]$ die Tristimuluswerte, wie im Grassmann-Experiment bestimmt

- Man hat also zwei Metamere:

$$A(\lambda) \text{ "="} r \cdot R(\lambda) + g \cdot G(\lambda) + b \cdot B(\lambda)$$

- Welche Signalstärke kommt jeweils von den Sensoren ins Gehirn?
- Seien $s(\lambda), m(\lambda), l(\lambda) : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$ die Response-Kurven der S-, M-, und L-Sensoren

- 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

- Zusammen:

$$\begin{pmatrix} S_A \\ M_A \\ L_A \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} S_R & S_G & S_B \\ M_R & M_G & M_B \\ L_R & L_G & L_B \end{pmatrix}}_M \cdot \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix}$$

- 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)

Bemerkungen und Konsequenzen

- 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 *bestimmte* Primärlichtquellen $R(\lambda)$, $G(\lambda)$, $B(\lambda)$, und ein bestimmtes Auge - **konstant**

- Für eine bestimmte Sensorantwort (S_A, M_A, L_A) ist die notwendige Skalierung r , g , b unserer (fest) gewählten Primärlichtquellen eindeutig bestimmt (mit M^{-1} multiplizieren)
- Spektrum $A(\lambda)$ und das Spektrum $r \cdot R(\lambda) + g \cdot G(\lambda) + b \cdot B(\lambda)$ sind **Metamere**
- Wir können somit - theoretisch - jedes Spektrum $A(\lambda)$ mit R , G , B wiedergeben

Farb-Basiswechsel

- Eine Folge der Grassmann'schen Gesetze:
 - Man kann (fast) jedes beliebige Tripel von Primärlichtquellen (= Basis) wählen
 - Hat man eine Farbe bzgl einer Basis gegeben, so kann man diese in jede andere Basis umrechnen (= Basistransformation)
- Beispiel:
 - Originale Basis R, G, B (Erinnerung: $R = R(\lambda), G = G(\lambda), \dots$)
 - Neue Basis U, V, W , wobei $U = u_1 R + u_2 G + u_3 B, \quad V = \dots$

- Also:

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

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

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

- Also

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

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

Definition des Begriffs "Farbe"

- Sei C eine Lichtquelle mit *irgendeinem* Spektrum $C(\lambda)$. Die Sensorantwort dazu bekommt man, wie eben gesehen, mittels der "Sensor-Matrix":

$$\begin{pmatrix} S_C \\ M_C \\ L_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_R & S_G & S_B \\ M_R & M_G & M_B \\ L_R & L_G & L_B \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix}$$

- Diese Gleichung können wir auch schreiben als

$$C = rR + gG + bB. \quad (*)$$

- Mit der "Farbe C " meinen wir den Vektor (r, g, b) , m.a.W., die Farbe $C=(r,g,b)$ ist eigtl. nur eine **Kurzschreibweise** für den Vektor (S_C, M_C, L_C) **bzgl. dreier bestimmter** Primärlichtquellen ("Primärfarben")!
- **Achtung:** C , R , G und B in Gleichung (*) sind hier in Wahrheit Sensor-Output-Vektoren, und das "=" ist ein "=" zwischen Vektoren

Entwicklung standardisierter Farbräume

- Damit die Farbe $C=(r,g,b)$ eine **sinnvolle Bedeutung** hat, ist es notwendig, die Primärlichtquellen zu standardisieren
- Quantitative und reproduzierbare Bestimmung von Farben ist 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
- Problem: mit 3 Primärfarben kann man **nicht alle** Farben (C_λ) erzeugen!
 - Egal welche Primärfarben man wählt, es gibt immer ein C_λ , dessen Farbeindruck man nicht durch die 3 Primärfarben erzeugen kann

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

$$C_\lambda = \bar{r}R + \bar{g}G + \bar{b}B \quad \text{oder}$$

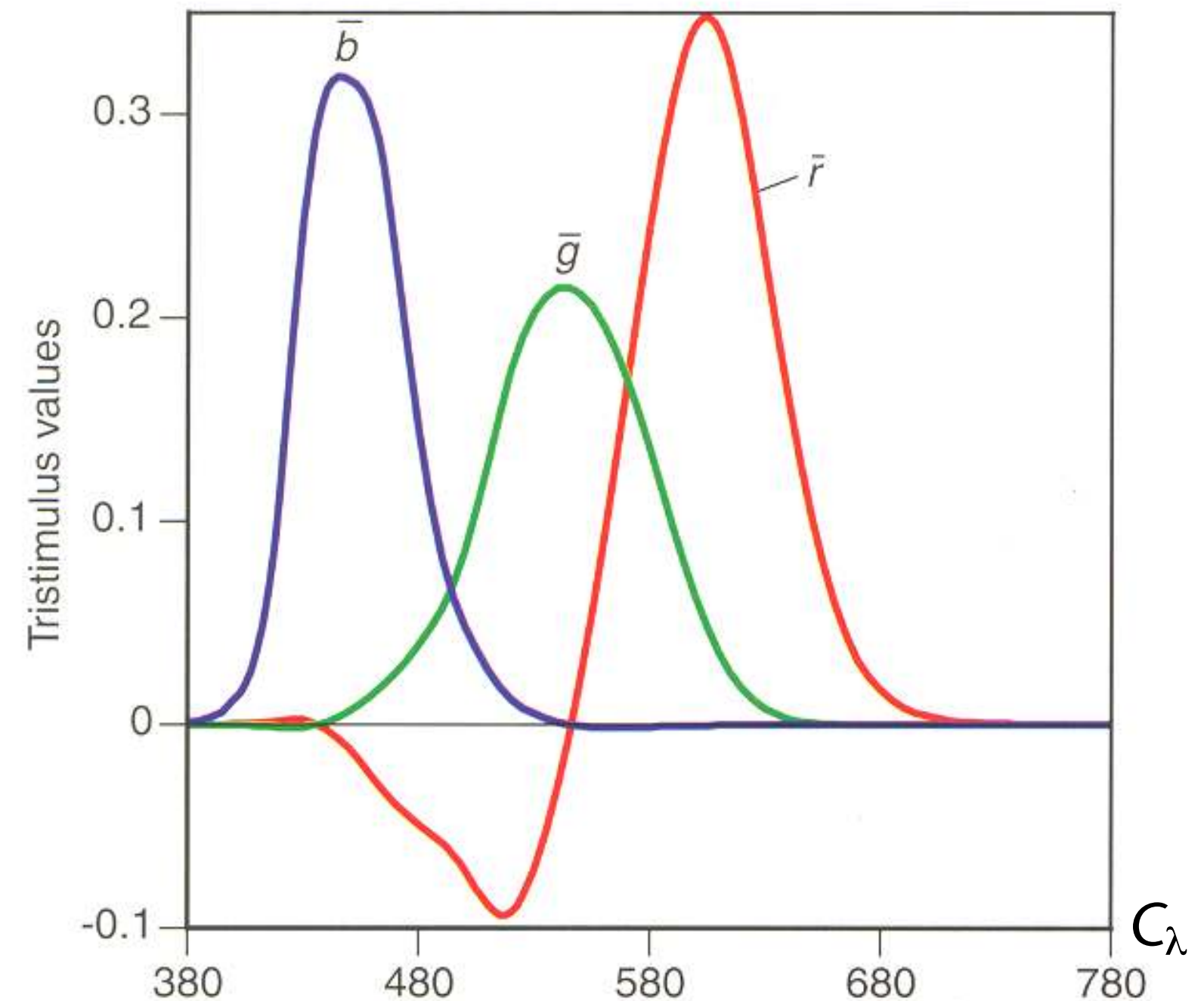
$$C_\lambda + \bar{r}R = \bar{g}G + \bar{b}B \quad (*) \quad \text{oder}$$

$$C_\lambda + \bar{g}G = \bar{r}R + \bar{b}B \quad \text{oder}$$

$$C_\lambda + \bar{b}B = \bar{r}R + \bar{g}G$$
- Mathematische Schreibweise: $C_\lambda = -\bar{r}R + \bar{g}G + \bar{b}B$ (z.B. im Falle von Gl. (*))
- Achtung: solche negativen Koeffizienten haben keine physikalische Entsprechung! (man kann Licht nicht voneinander abziehen)

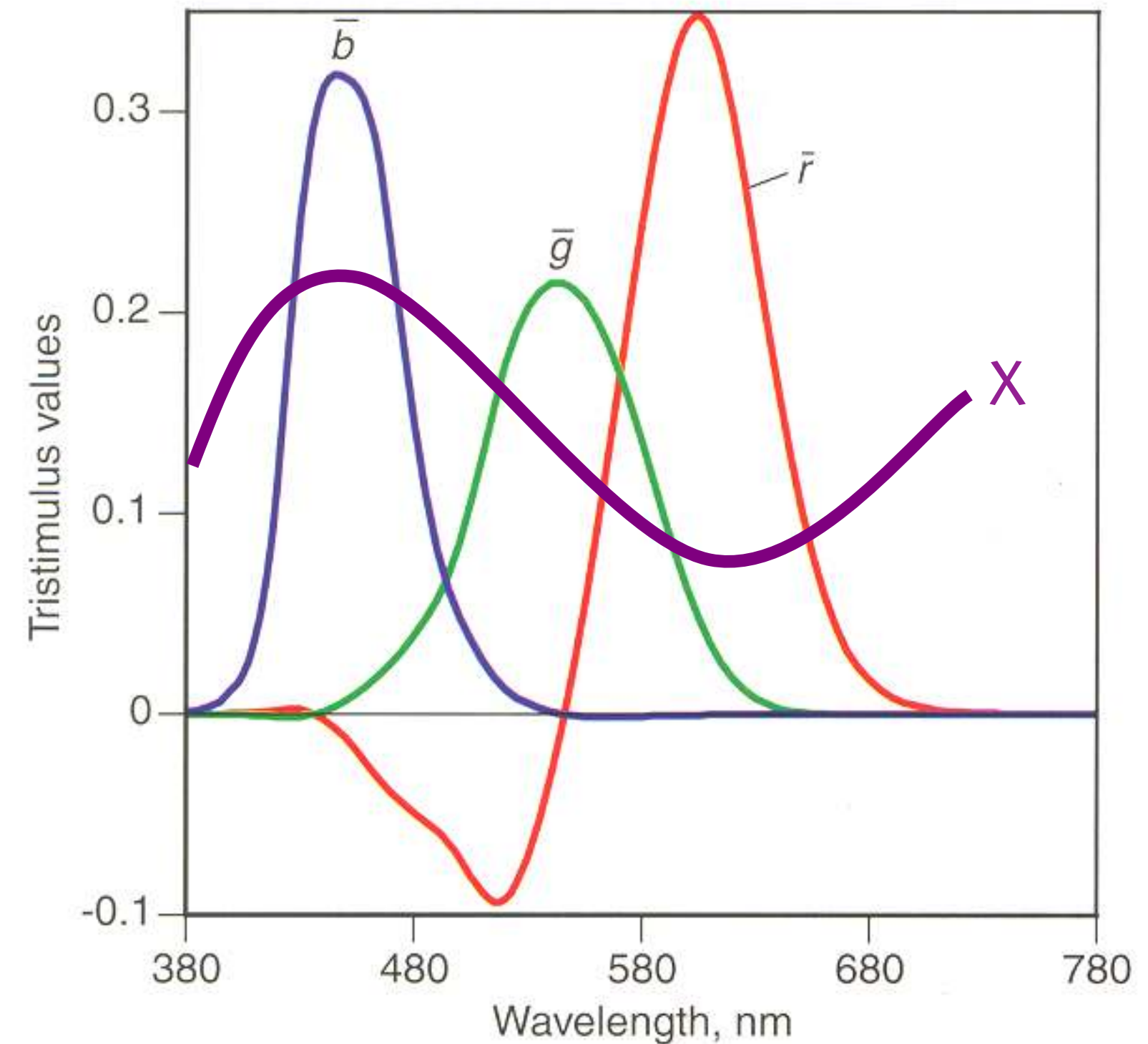
Die Beobachterfunktionen (Matching Curves)

- Die CIE hat sehr viele Tests mit vielen Probanden durchgeführt
- Resultat bei **monochromatischen** Primärlichtquellen R_{700} , G_{546} , B_{436} (700, 546, 436 nm): *Beobachterfunktionen (matching curves)* $\bar{r}$, $\bar{g}$, $\bar{b}$
- Leider: egal, welche Primärlichtquellen man wählt, eine der Kurven $\bar{r}$, $\bar{g}$, $\bar{b}$ wird immer irgendwo negativ



Was macht man mit den CIE-Kurven?

- Sei Spektrum X gegeben
- Berechne die Tristimulus-Werte r, g, b 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: einer der 3 Tristimulus-Werte kann **negativ** sein!

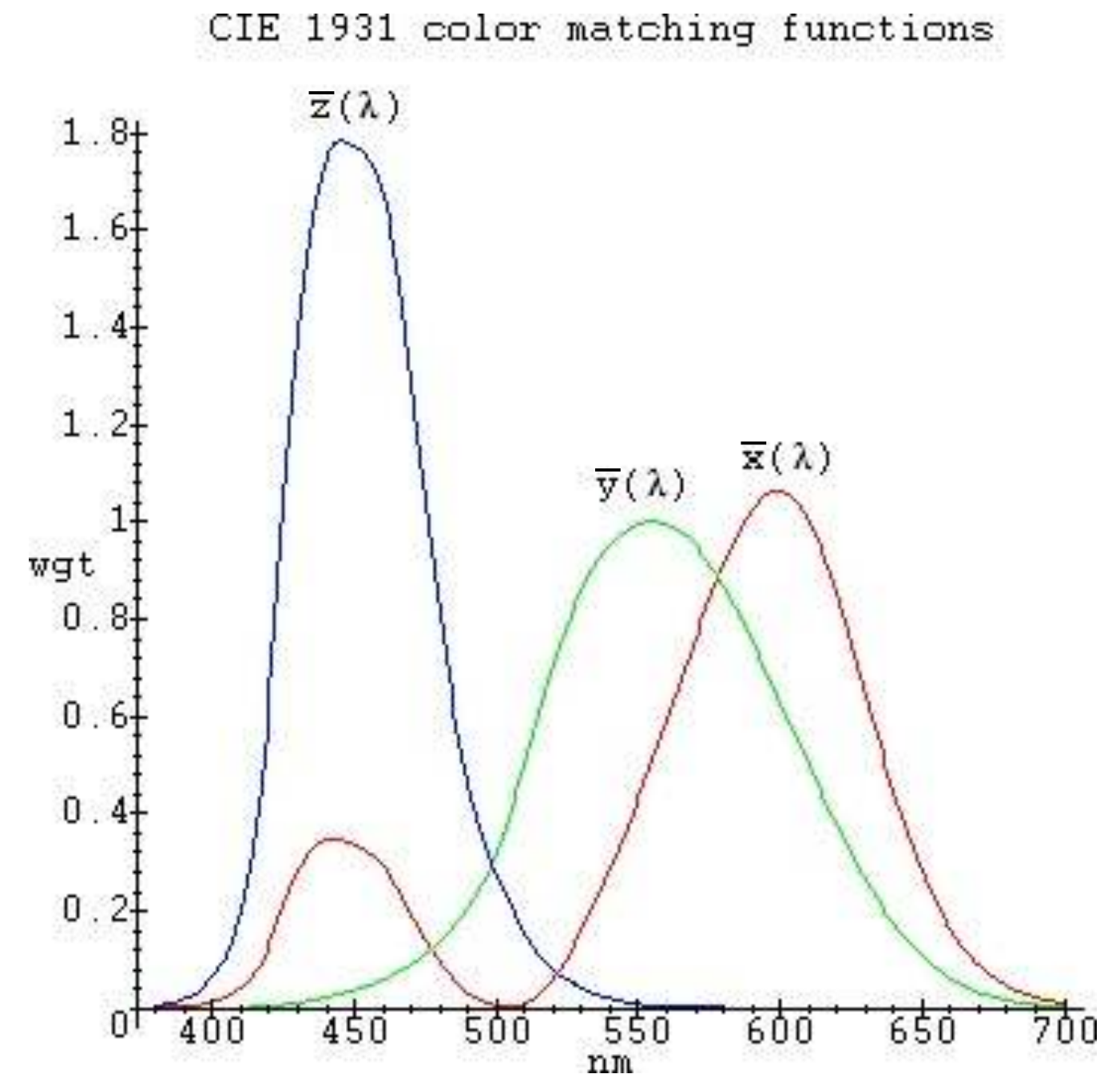


Der CIE XYZ-Farbraum

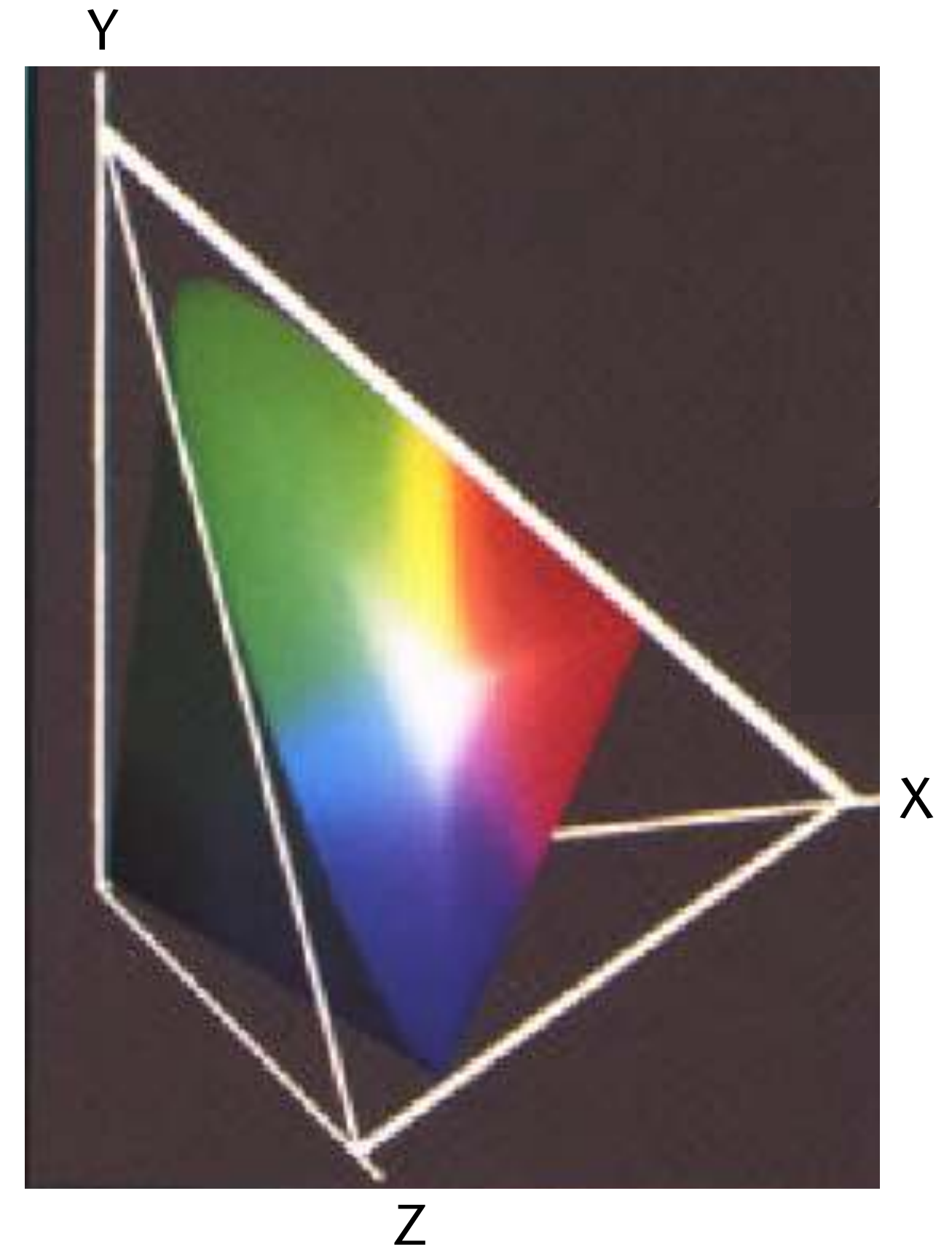
- Negative Tristimulus-Werte sind lästig!
- Ziel: ein Farbraum XYZ, so daß Tristimulus-Werte überall positiv
- Lösung: wähle geeignete , **überall positive** "Beobachterfunktionen" (*matching curves*), und damit (gedachte, hypothetische, nicht-physikalische!) Primärlichtquellen
- Diese **Standard-Beobachter-Funktionen** sind:

$$\begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.36 & -0.515 & 0.005 \\ -0.89 & 1.42 & 0.014 \\ -0.46 & 0.088 & 1.009 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{r}(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) \\ \bar{b}(\lambda) \end{pmatrix}$$

- In der Praxis: $\bar{x}$ - , $\bar{y}$ - , $\bar{z}$ - Kurven sind als Tabelle mit $\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$ festgelegt



- Achsen sind:
$$X = k \int \bar{x}(\lambda) \cdot P(\lambda)$$
$$Y = k \int \bar{y}(\lambda) \cdot P(\lambda)$$
$$Z = k \int \bar{z}(\lambda) \cdot P(\lambda)$$
- Kleiner Nachteil: nicht alle (positiven) Punkte entsprechen tatsächlich Farben!
- Erinnerung: die X-,Y-,Z-Werte sind für alle Spektren positiv
 - Weil Beobachterkurven (*matching curves*) überall positiv sind, und physikalisches Spektrum sowieso.

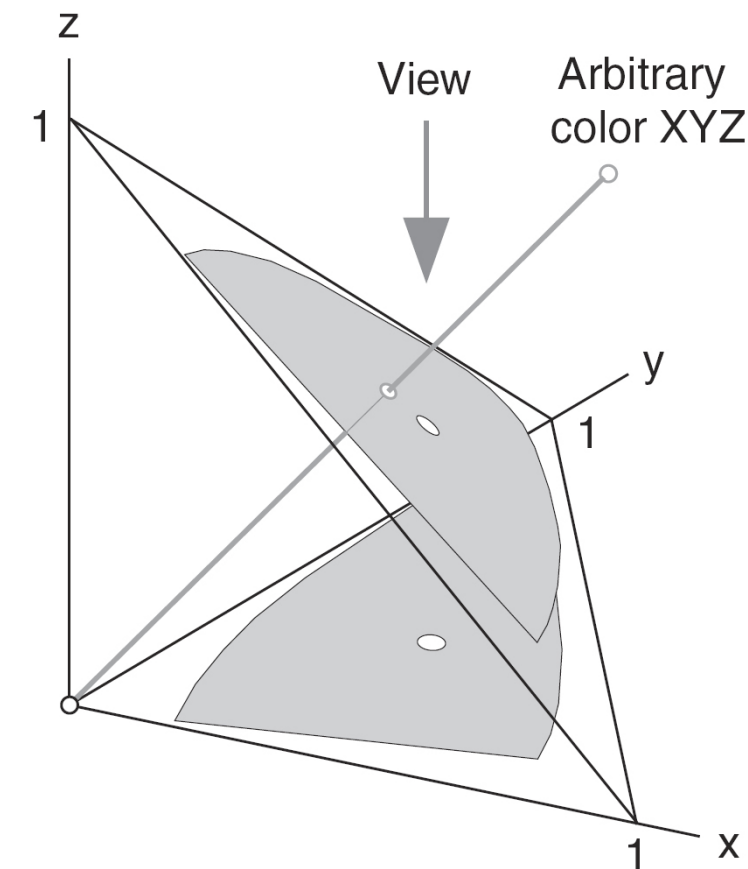
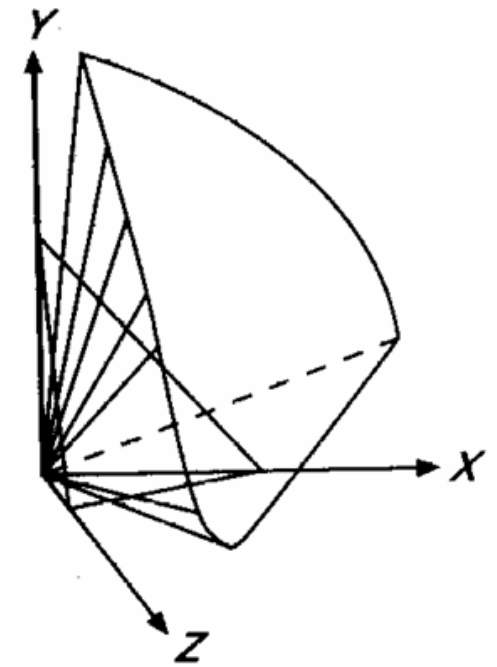


Das CIE-Chromatizitätsdiagramm

- Der XYZ-Raum ist etwas unhandlich; oft interessiert nur der Farbton
- Beobachtung aus den Grassmann'schen Experimenten:
 - (X,Y,Z) und $(\alpha X, \alpha Y, \alpha Z)$, $\alpha > 0$, haben denselben Farbton (*hue*) und verschiedene Helligkeit (*luminance*)
- Lösung:
 1. Projektion auf die Ebene $X+Y+Z=1$:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \frac{1}{X + Y + Z} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

2. Orthogonale Projektion auf die XY-Ebene:
da $x+y+z=1$, reicht die Angabe von (x,y)

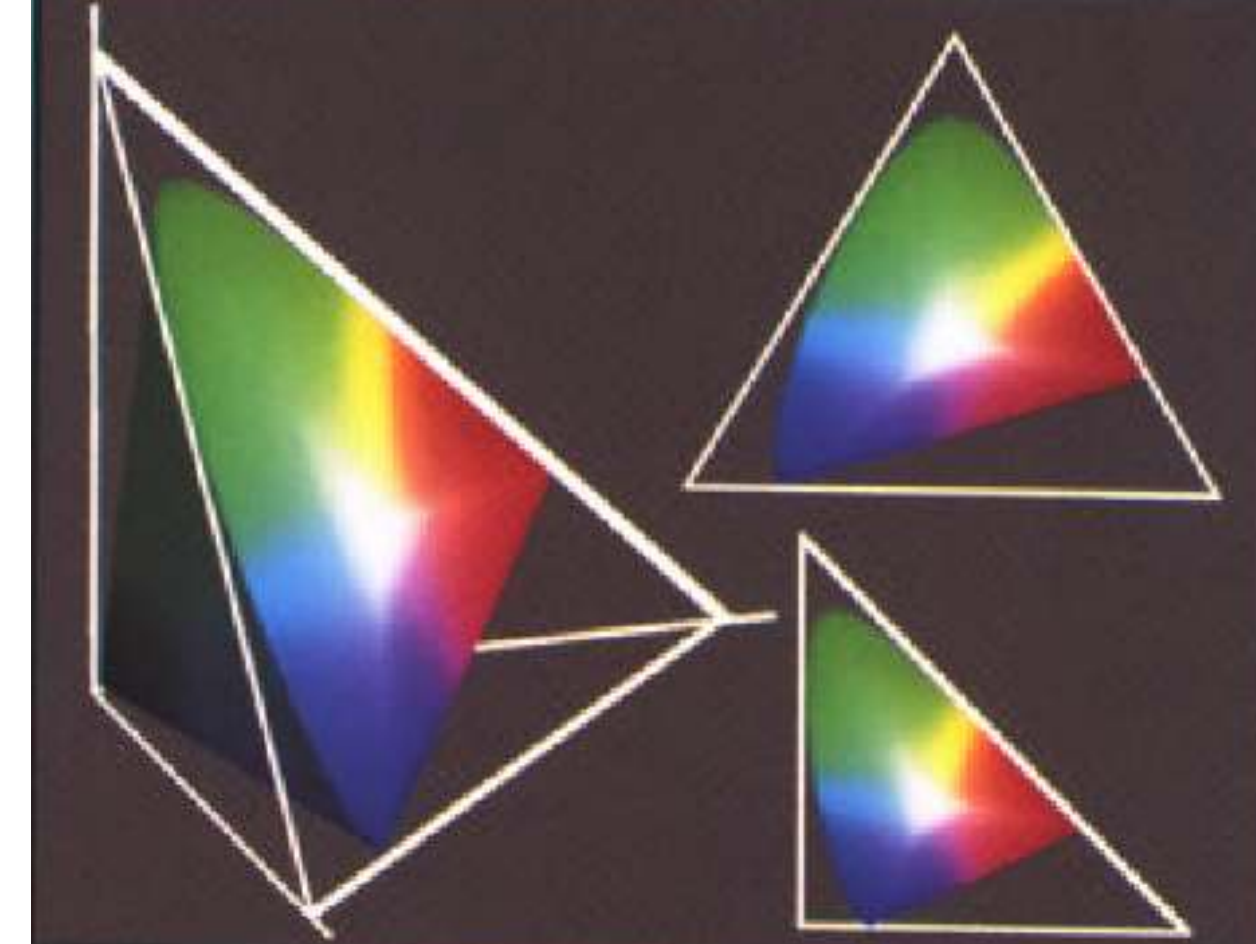
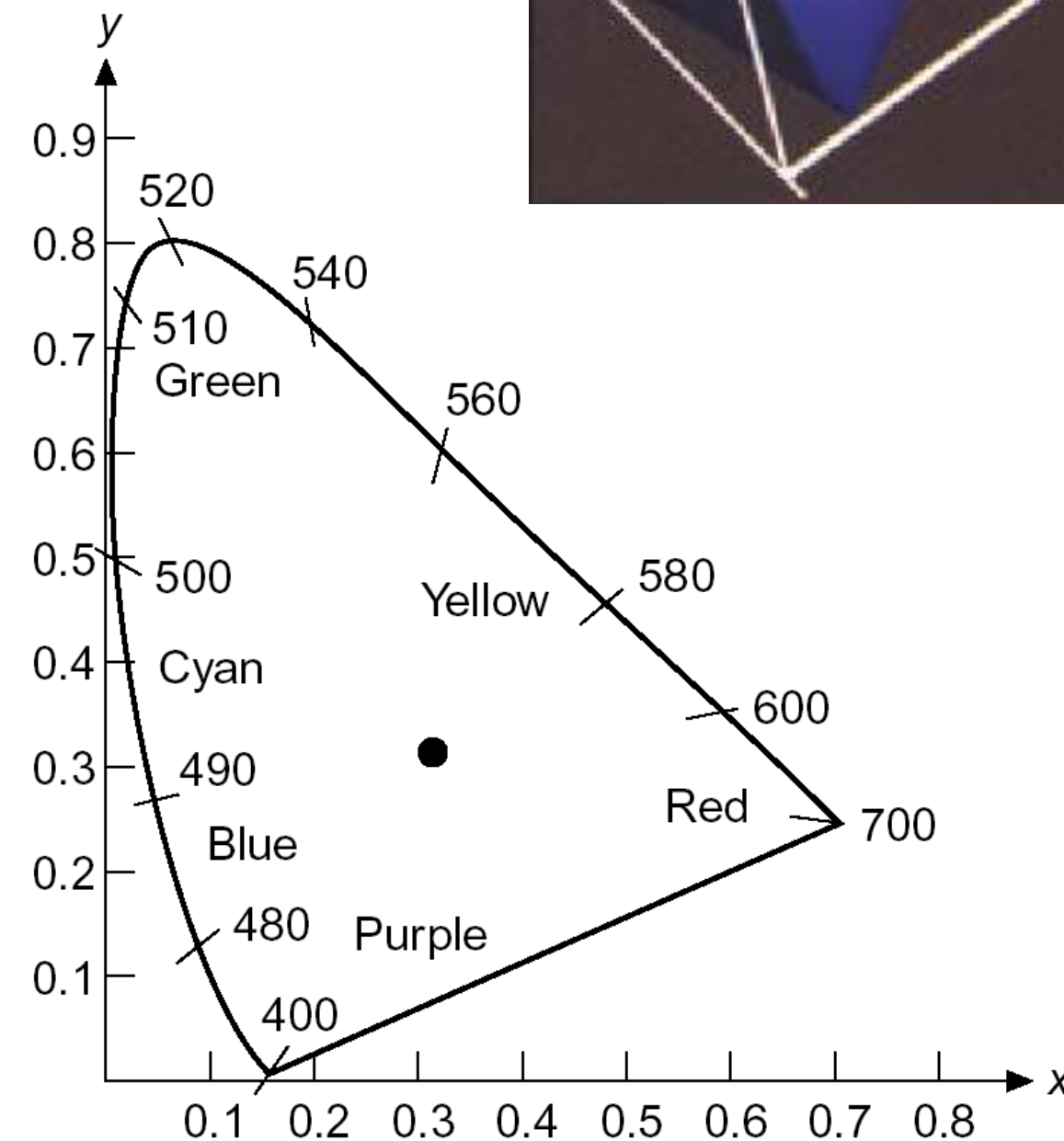


- Zur vollen Spezifikation der Farbe verwendet man oft (Y, x, y)
- Rücktransformation:

$$X = \frac{x}{y} Y ; \quad z = 1 - x - y ; \quad Z = \frac{z}{y} Y$$

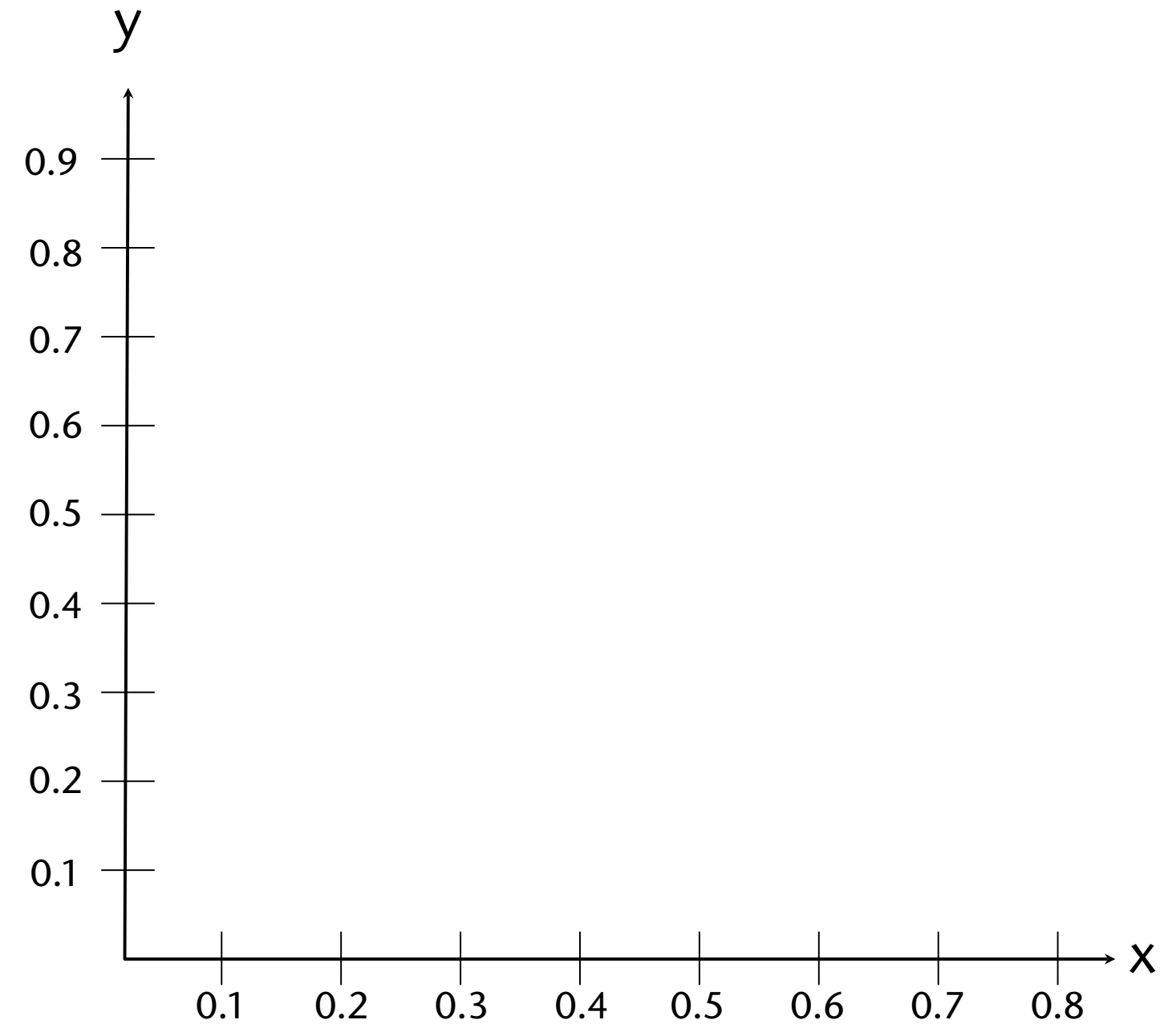
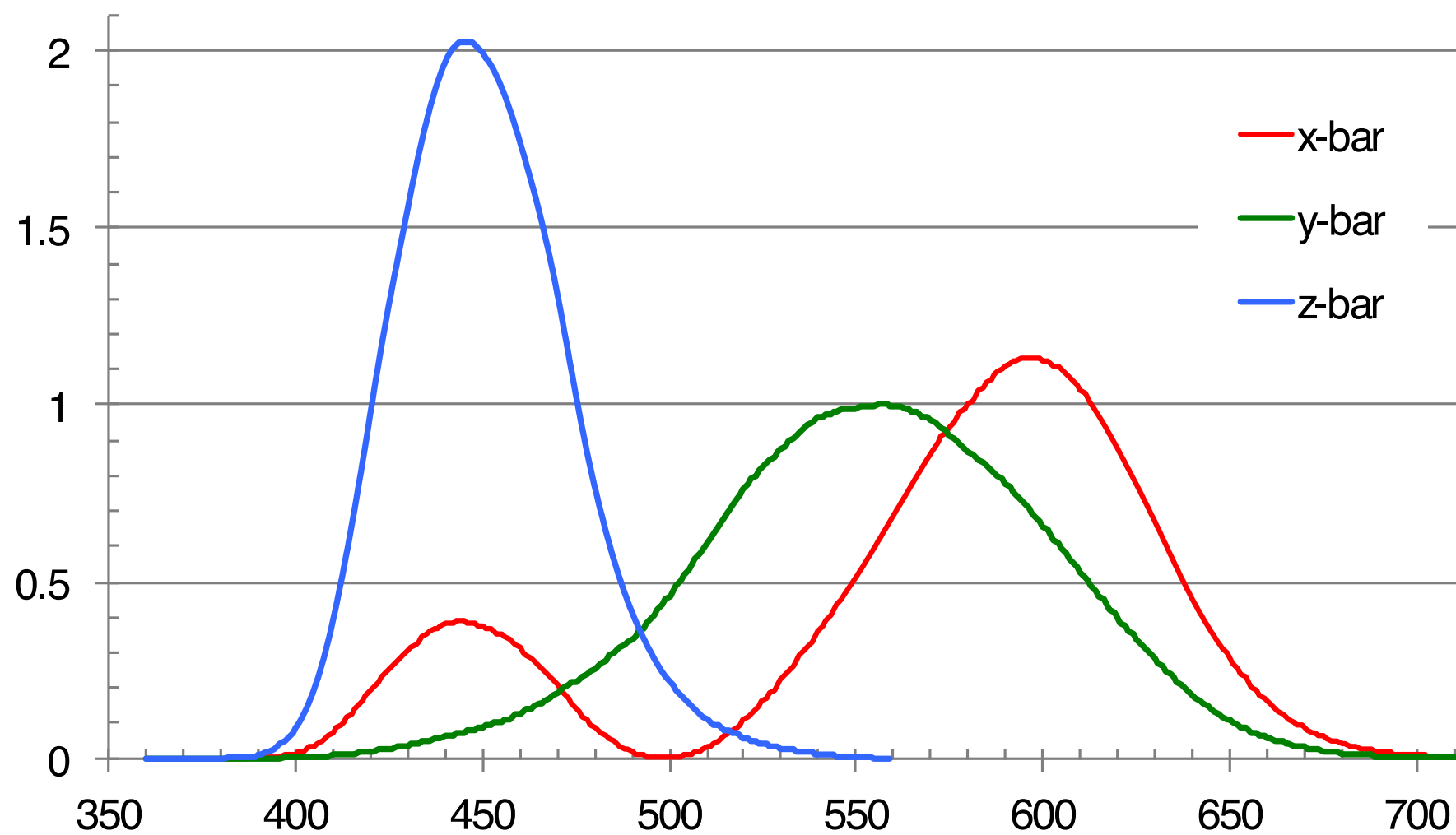
Eigenschaften

- (X,Y,Z) und $(\alpha X, \alpha Y, \alpha Z)$, $\alpha > 0$, haben dieselben Chromatizitätskoordinaten (x,y)
- Geraden in XYZ bleiben Geraden in xy
- Die typ. "Hufeisenform" kommt von der Form der *matching curves*
- Reine Farben liegen auf dem Rand



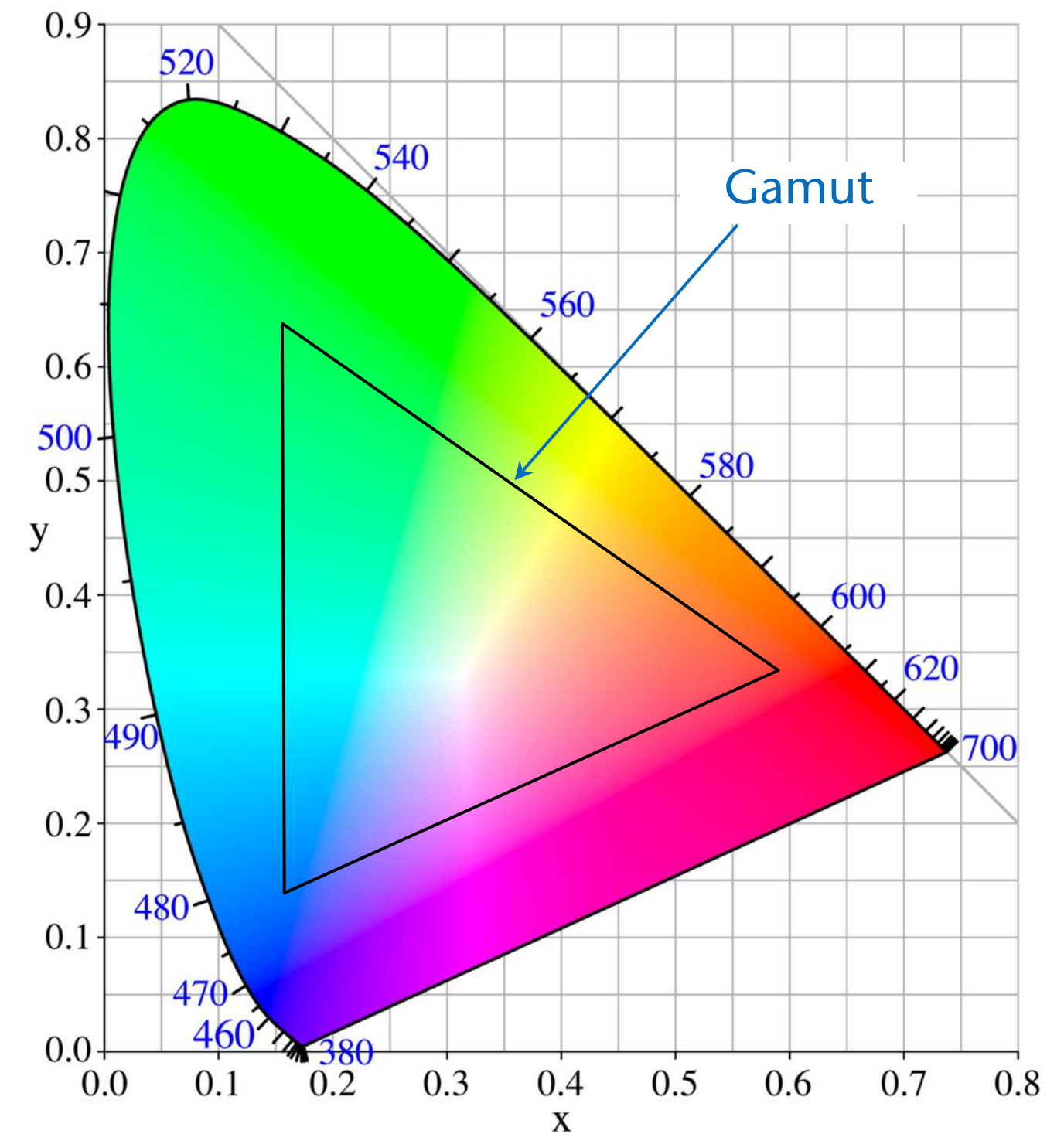
Plausibilitätsbetrachtung für das "Hufeisen"

1964 CIE Standard Colorimetric Observer

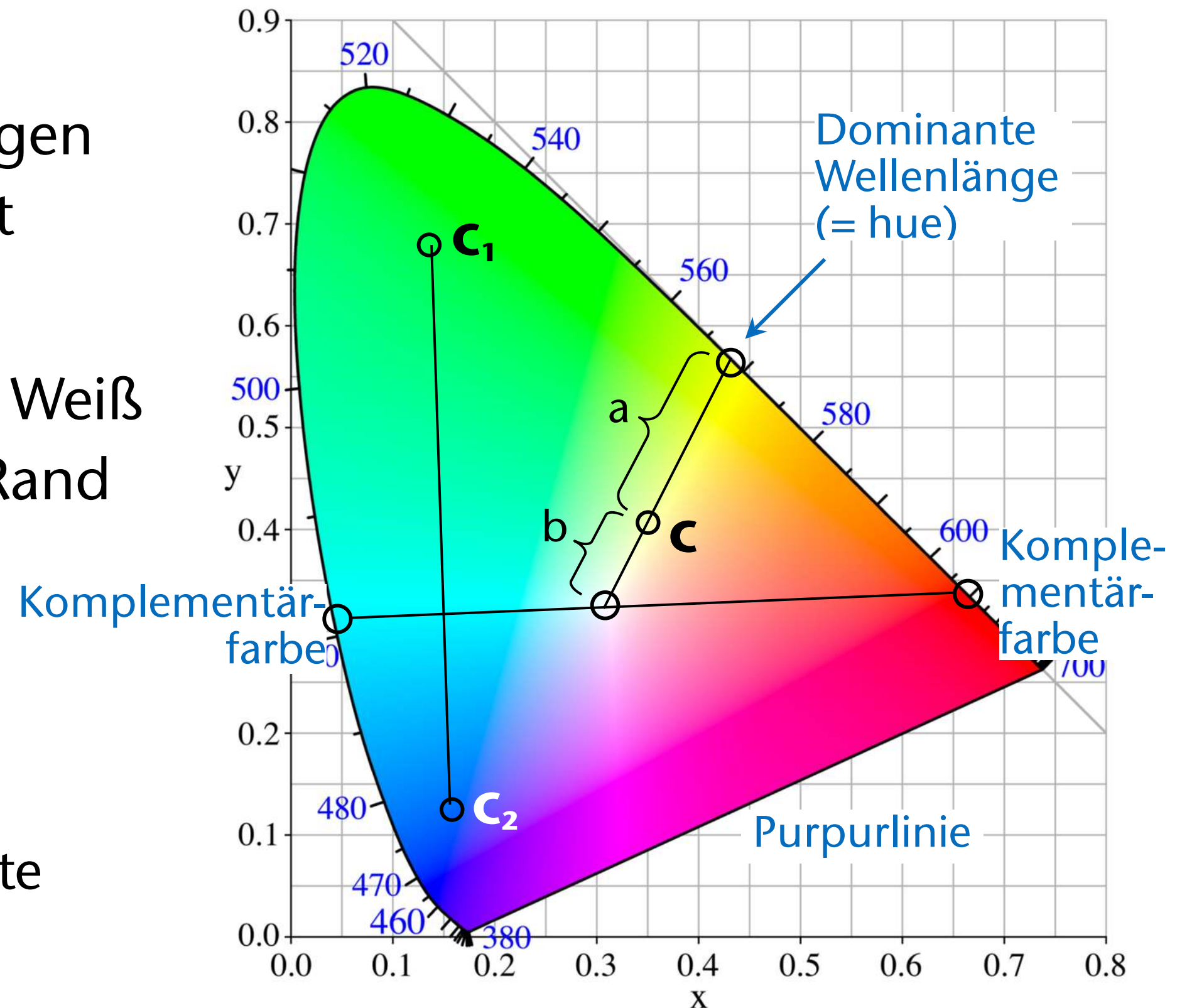


Interpretation des Chroma-Diagramms

- Standard-Weiß C_w : $x = y = z \approx 1/3$
- Achtung:
 - Kein Monitor/Drucker kann das Chroma-Diagramm korrekt darstellen!
 - Der **Gamut** umreißt alle diejenigen Farben, die der Monitor/Projektor darstellen kann!
 - Alle anderen Farben sind höchstwahrscheinlich falsch dargestellt!

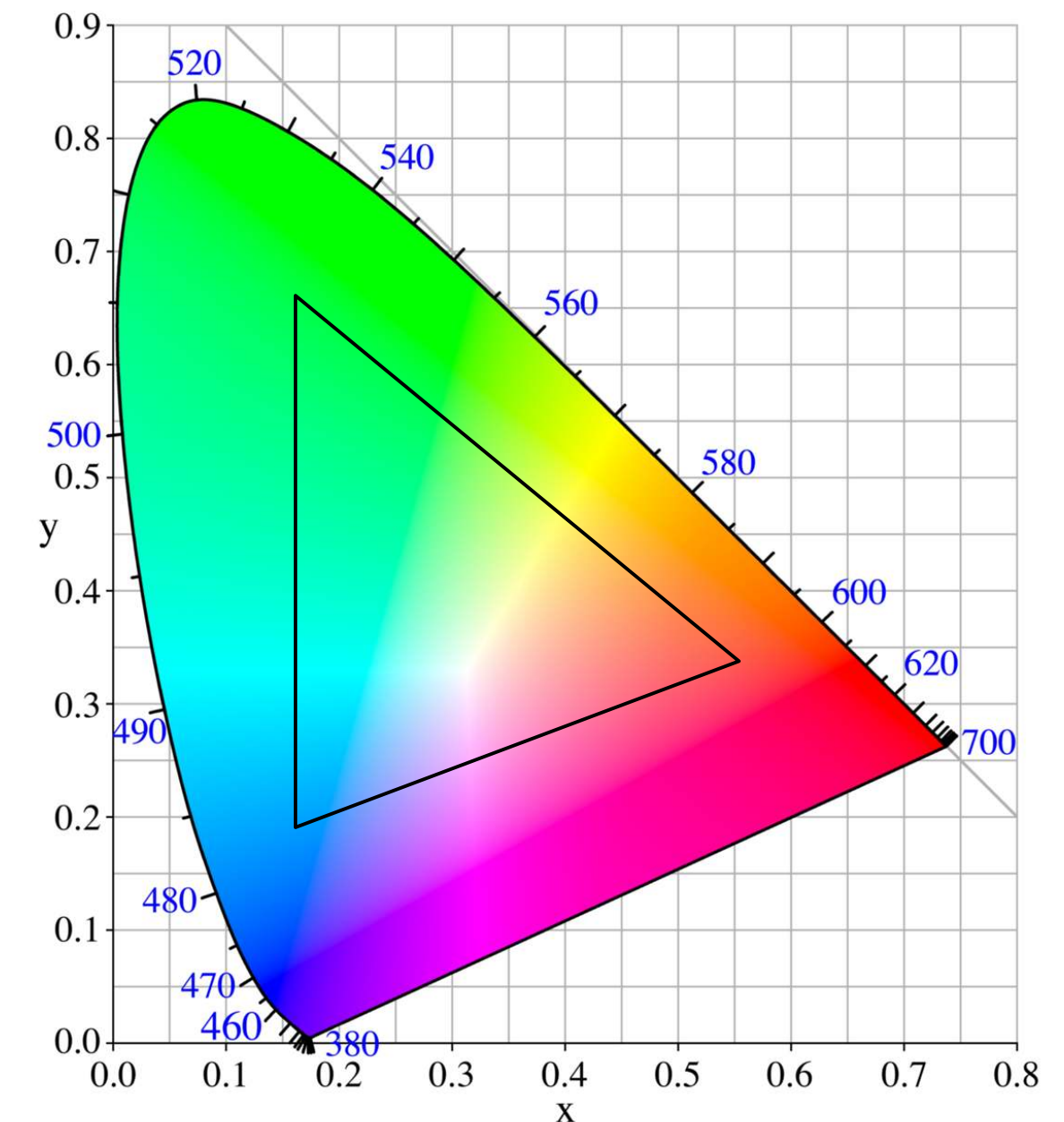


- Mischfarben liegen auf Gerade
- Komplementäre Spektralfarben liegen einander "gegenüber", Weißpunkt dazwischen
- Dominante Wellenlänge: verbinde Weiß mit Farbe, bilde Schnittpunkt mit Rand
- Sättigung (Reinheit) = Verhältnis der Abstände a:b
- Purpurlinie:
 - Diese Farben haben **keine** dominante Wellenlänge!



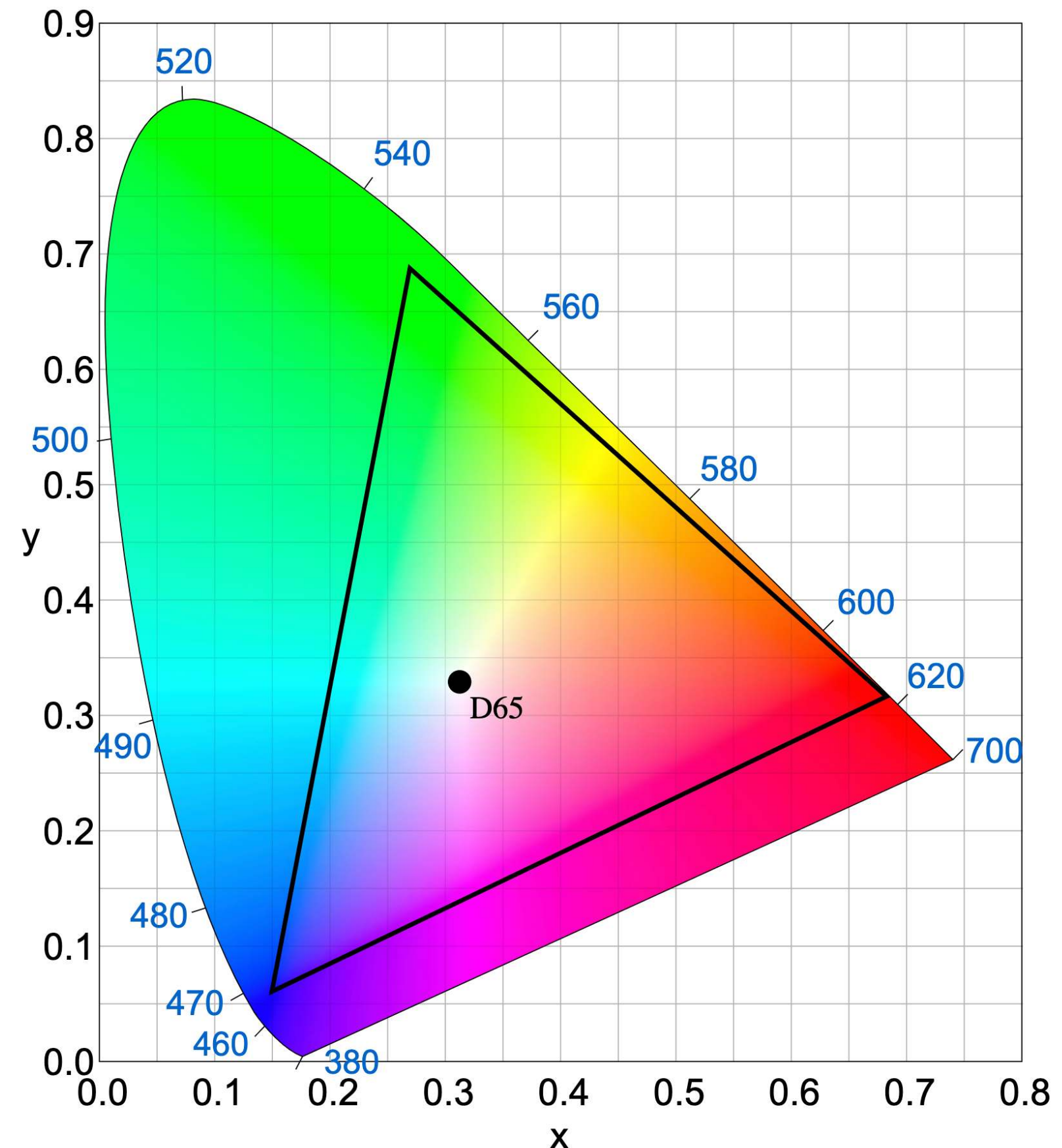
Der Gamut

- **Gamut** = Bereich all derjenigen Farben, der von einem Gerät (Monitor, Drucker, ...) dargestellt werden kann
- **Lemma:**
Jedes Gerät mit 3 Primärfarben kann nur Farben innerhalb des durch diese 3 Farben definierten Dreiecks produzieren!
- **Corollar:**
Kein Gerät mit 3 Primärfarben kann alle Farben produzieren!

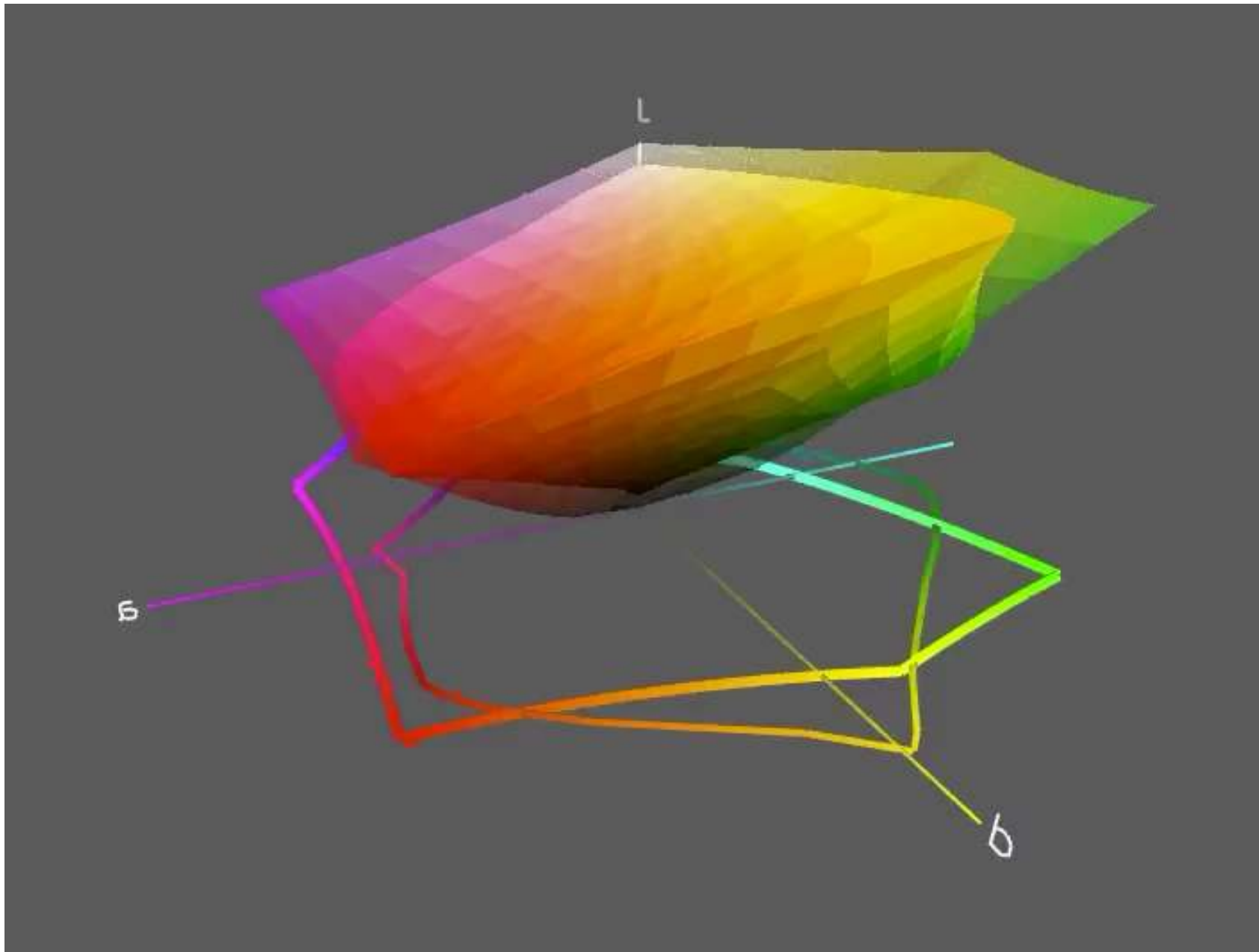


Beispiel: der DCI-P3 Gamut

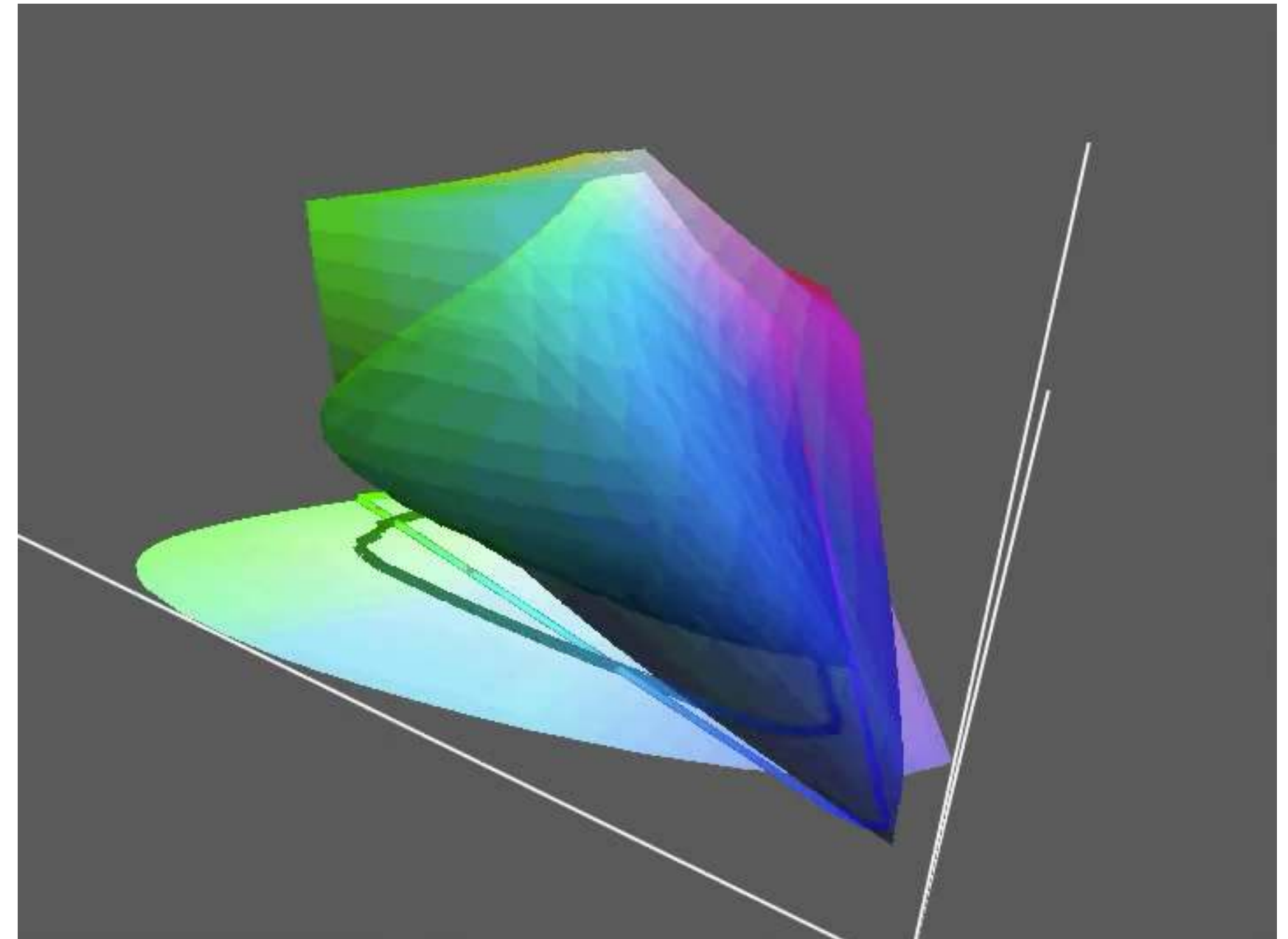
- Standardisiert durch die Digital Cinema Initiatives (DCI) in 2010
 - Blaue Primärfarbe = sRGB, rote Primärfarbe = 615 nm (monochrom.)
 - Weißpunkt etwas grüner als D65 (Farbtemperatur = 6300K)
- Enthält 45.5% des Chroma-Diagramms von 1931, und 42% des Diagramms von 1976
- Relativ weit verbreitet (in vielen Profi-Displays, iPhone's und Galaxy's, u.a.)



Beispiele für Gamut's im 3D Farbraum



Monitor- vs. Drucker-Gamuts im Lab-Raum

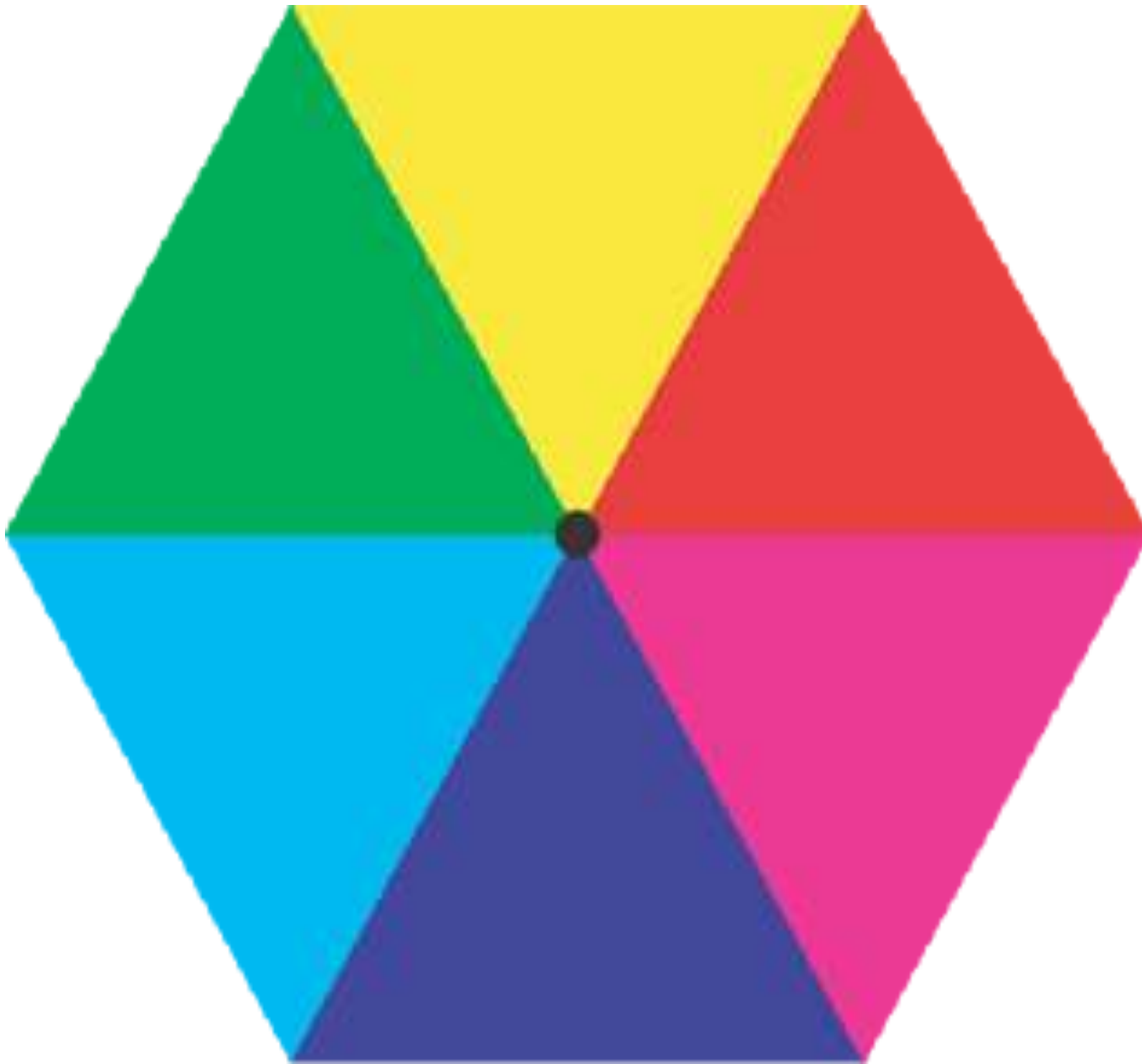


Monitor- vs. Drucker-Gamuts im Yxy-Raum





Bild

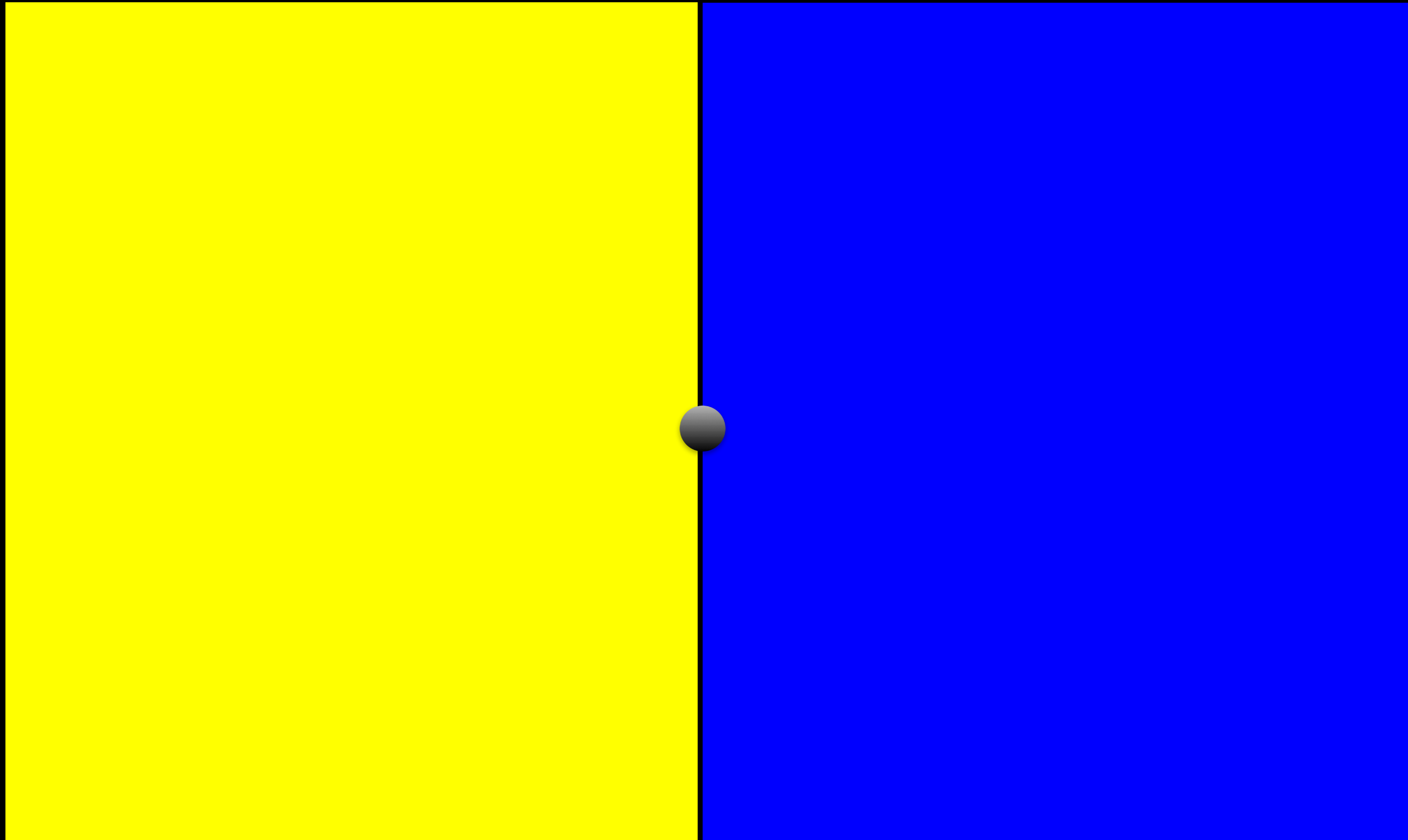


"Nachbild" (*Afterimage*)



Eine mögliche Anwendung: Vermeidung eines schlechten ersten Eindrucks

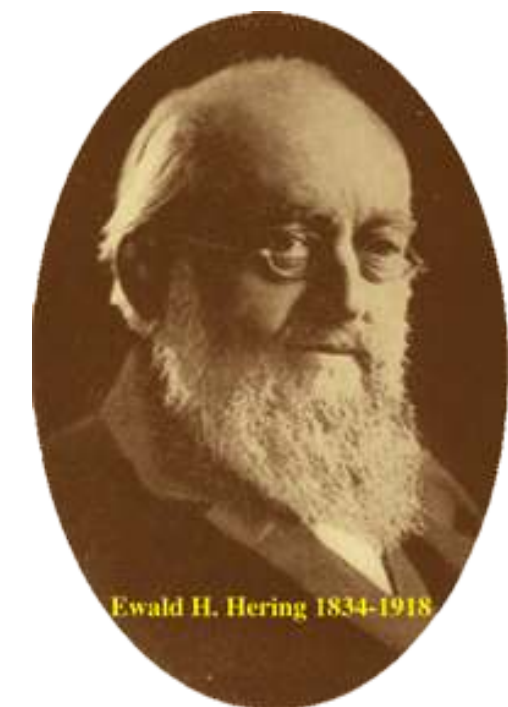
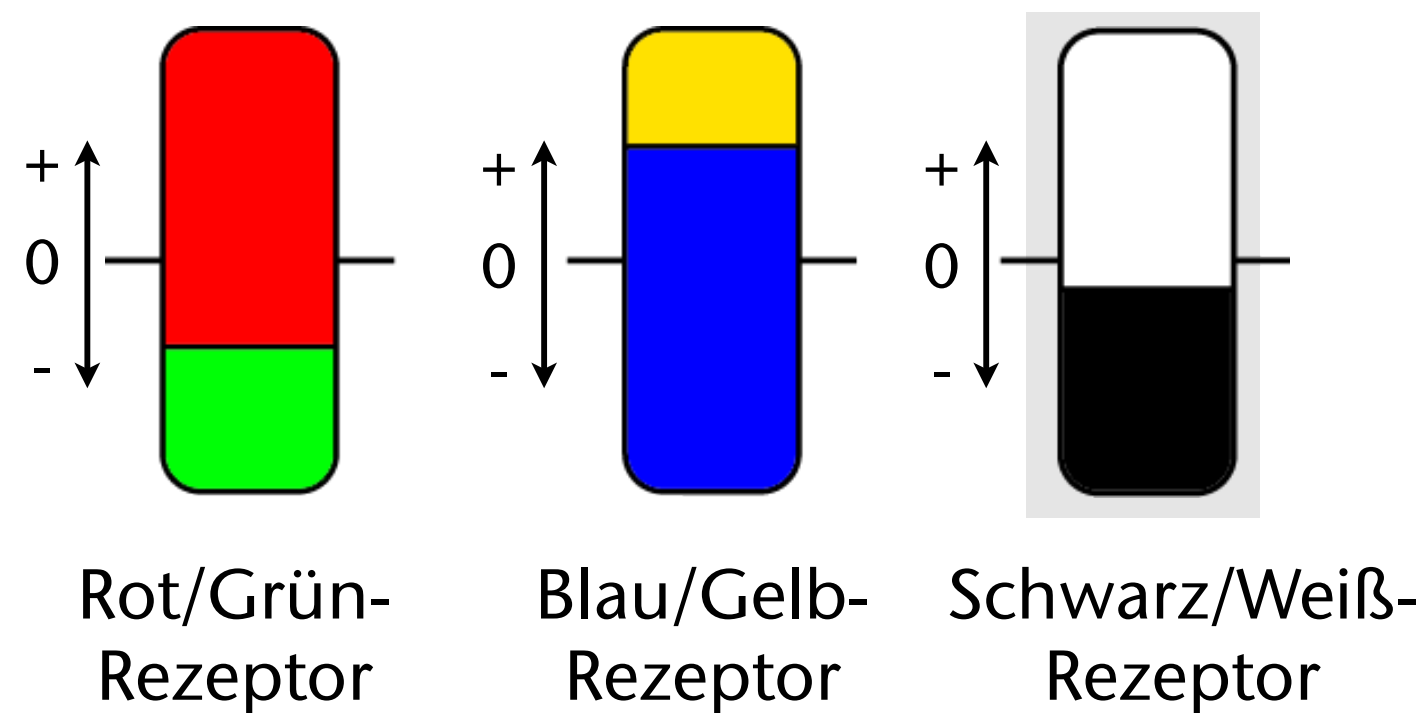




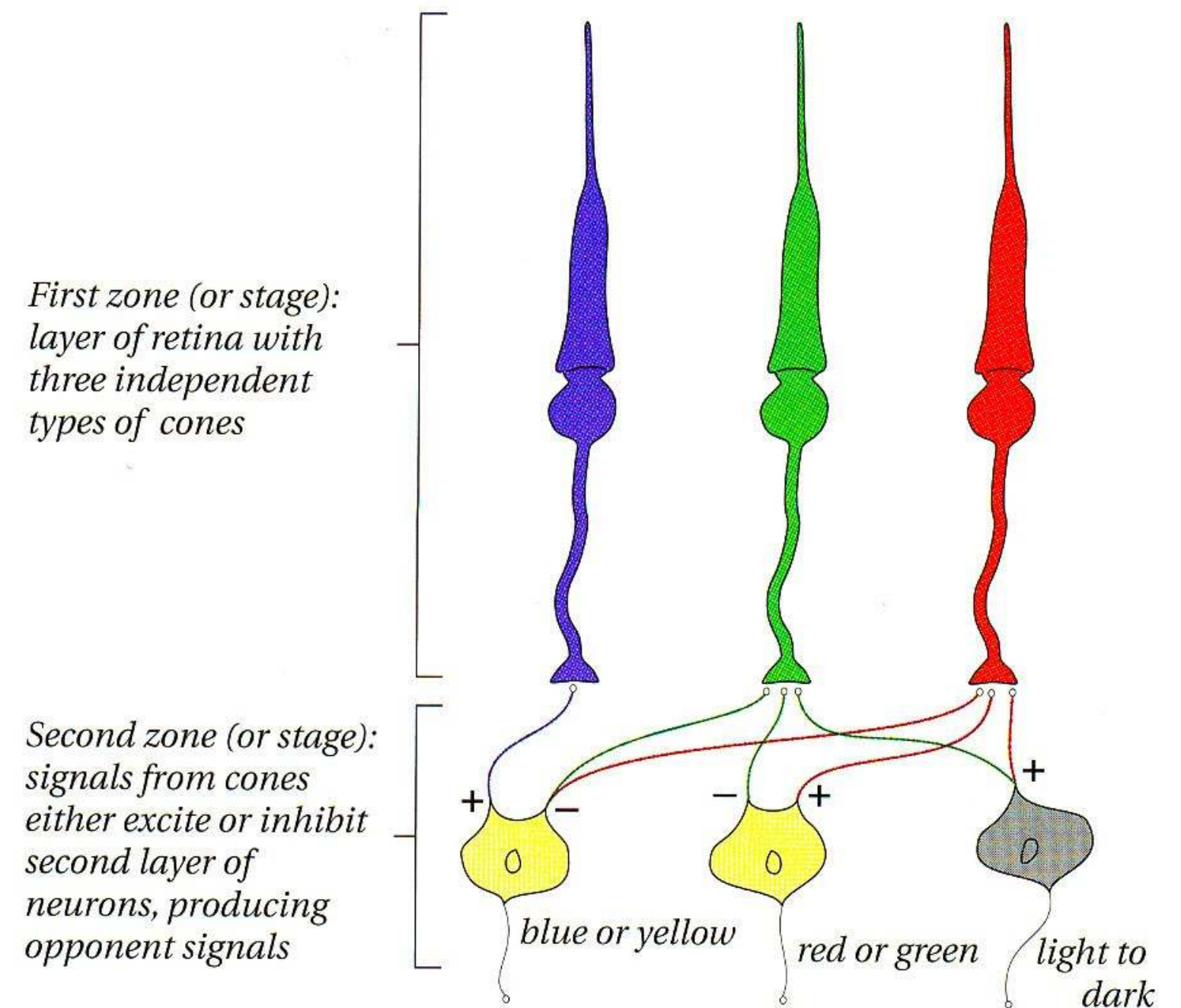


Das Gegenfarbenmodell

- Helmholtz (u.a.) postulierte die **Tristimulus-Theorie**, d.h., das LMS- (= RGB-) Farbmodell
- Etliche Phänomene konnte man damit nicht erklären
- Hering (1874) postulierte das "**Gegenfarbenmodell**" (*Opponent Colors*)

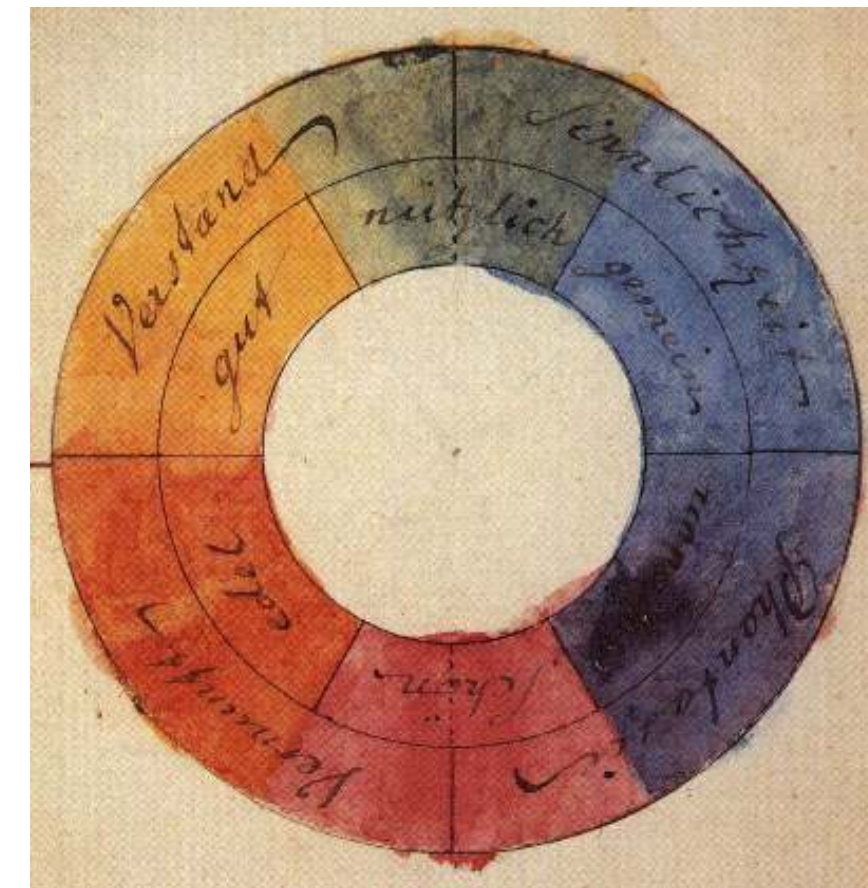


- Findet tatsächlich seine neuronale Entsprechung in einer "Verschaltung" direkt nach den Rezeptoren:
- Kann man durch eine einfache 3x3-Matrix abbilden (also ein Basiswechsel)

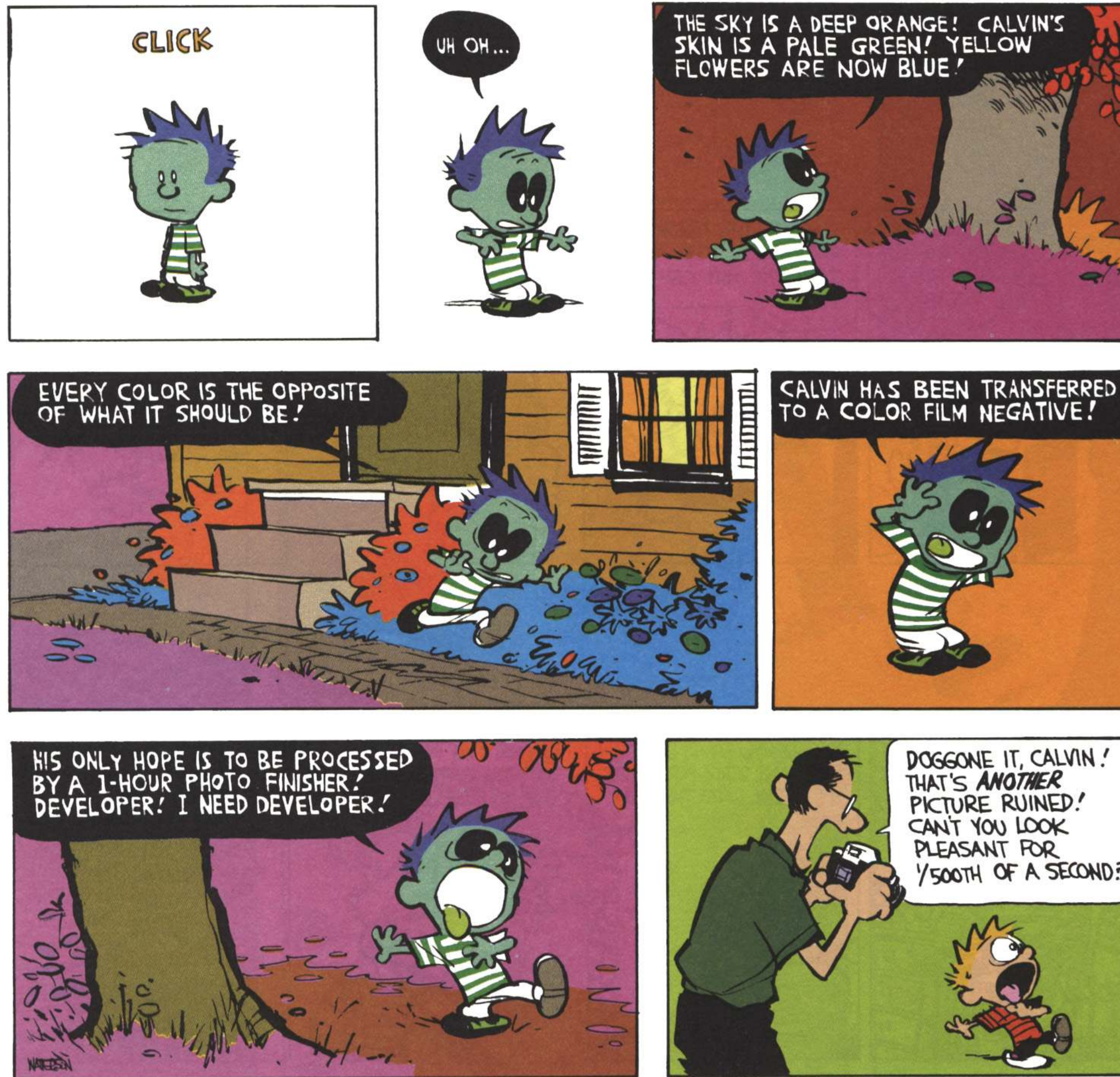


Historische Randnotiz

- Gegenfarben und Kontraste wurden schon von Leonardo da Vinci (1500) beschrieben
- Farbkreis mit Gegenfarben von Isaac Newton (1672)
- Erweitert um subjektive/emotionale Wahrnehmung & Kontraste von Johann Wolfgang von Goethe (1810)



[Goethe, *Farbenlehre*, 1810]



Exkurs: ein (kognitives) Experiment (Stroop Effect)

- Lesen Sie folgende Wörter (möglichst schnell) vor:

Introduction

Background

Theory

Lemma

Proof

- Nun lesen Sie folgende Wörter (möglichst schnell) vor:

Schwarz

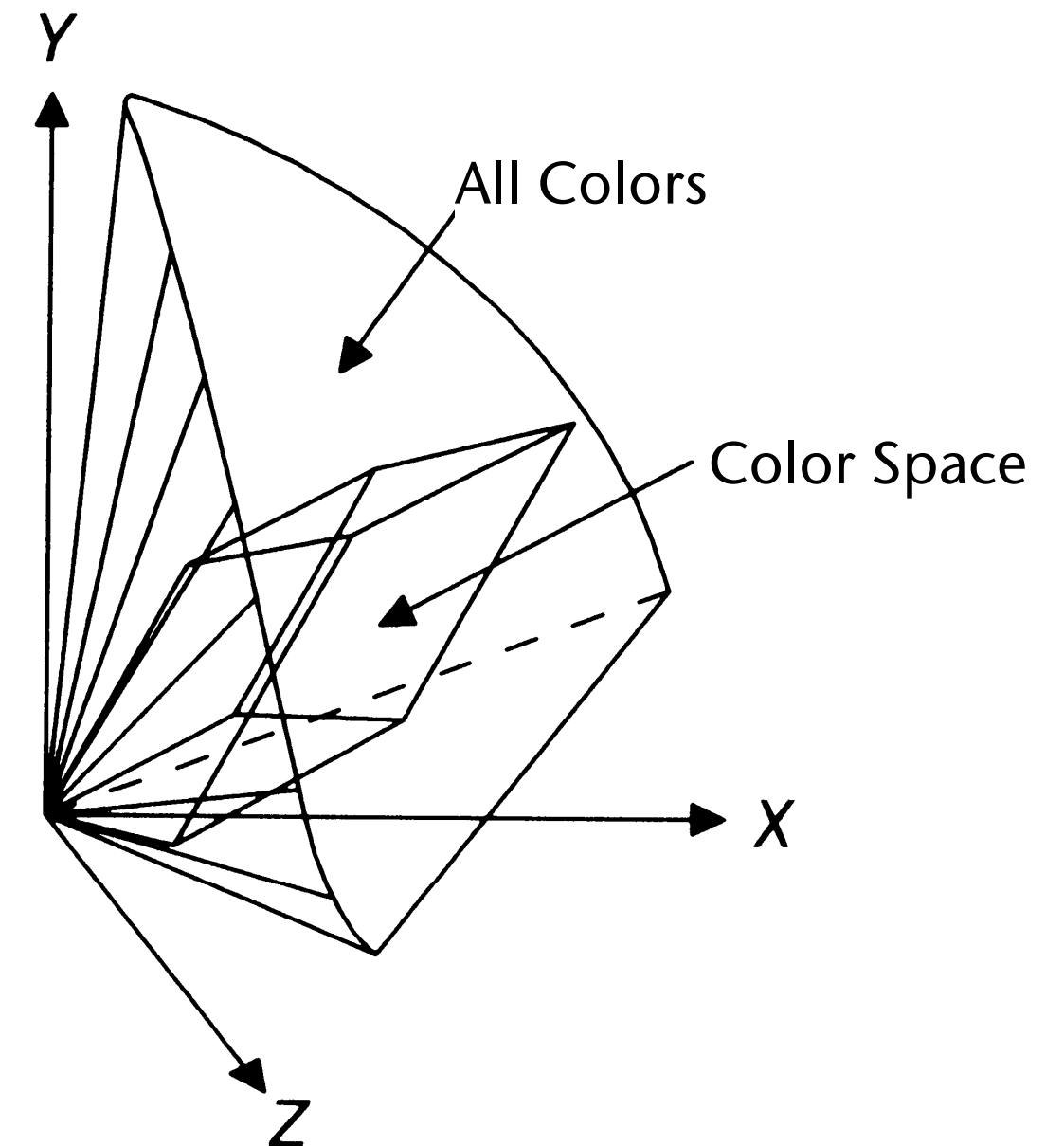
Rot

Orange

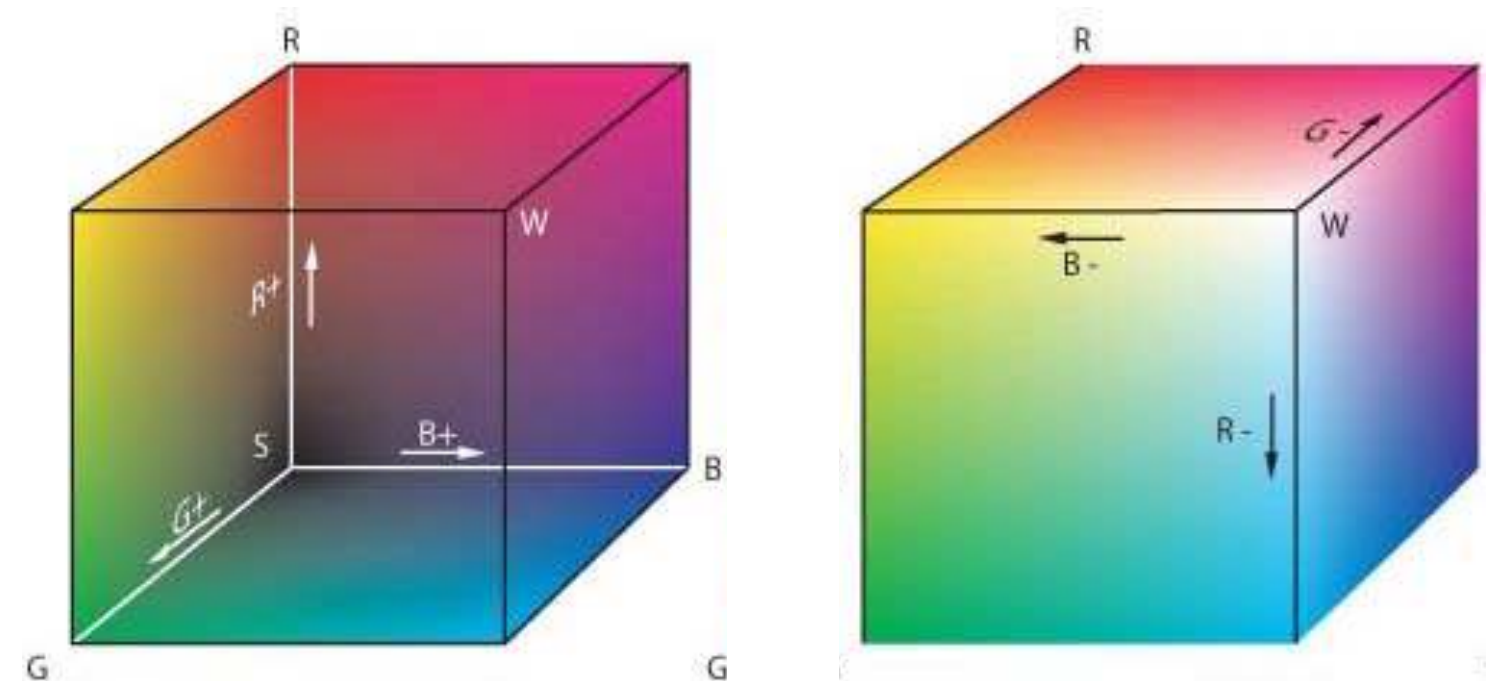
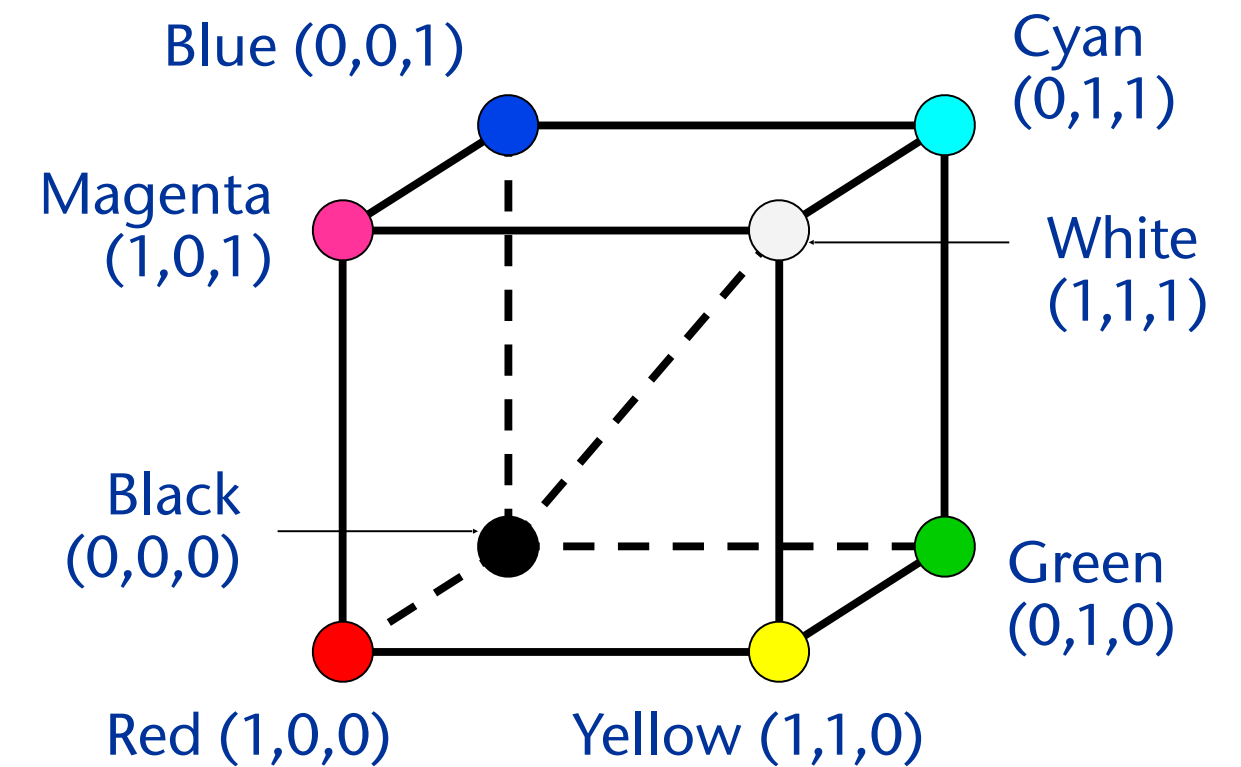
Gelb

Blau

- XYZ ist zwar die Mutter aller Farb-Standards, aber doch recht unpraktisch
- Je nach Aufgabe / Situation haben sich andere Farbmodelle bewährt
- Hardwareorientiert:
 - Geräte produzieren Farben durch Mischen von Grundfarben
 - RGB, CMY, YIQ, Yuv, ...
- Wahrnehmungsorientiert:
 - Wahrnehmungsempfinden des Menschen orientiert sich eher an den Parametern Farbton, Helligkeit und Sättigung
 - CIE Lab, HSV, HLS
- Immer nur eine Teilmenge des CIE XYZ-Raums



- Der "kanonische" Monitor-Farbraum
 - Jede andere Darstellung muss vor der Darstellung am Monitor ins RGB-Modell umgewandelt werden
- RGB = Einheitswürfel
- Es gibt viele Varianten
 - Ein Standard-RGB-Farbraum ist sRGB
- Graustufen sind auf der Diagonalen
- Bemerkung/Achtung: die Grundfarbe "Blau" kann auch ein Violett sein (z.B., wenn $B = 400 \text{ nm}$)!

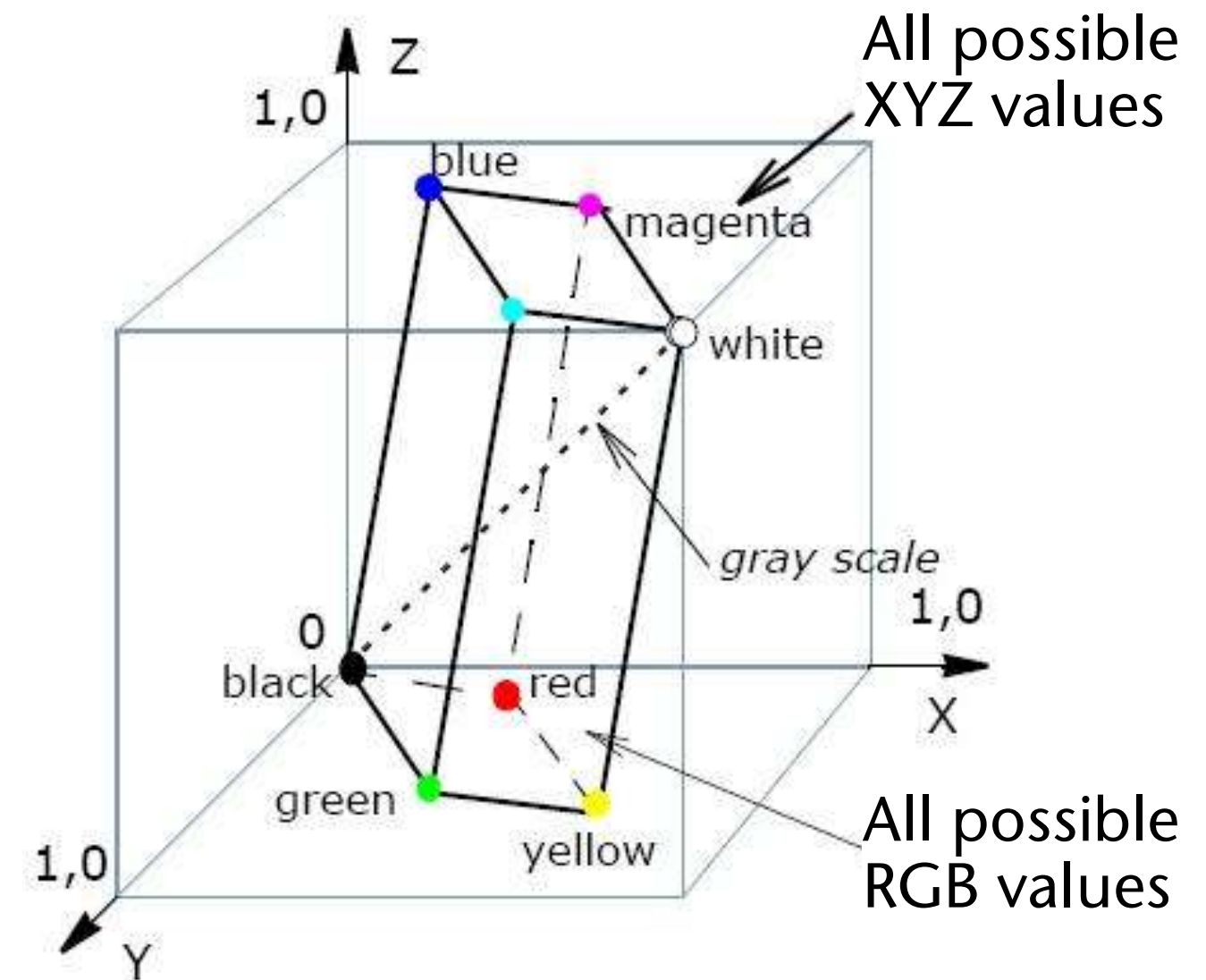


- Monitor-Hersteller geben i.A. Chromatizitäten der Phosphore und des "Weißpunktes" an: (x_r, y_r) , (x_g, y_g) , (x_b, y_b) , (x_w, y_w) .
- Daraus kann man die lineare Transformation $XYZ \longrightarrow RGB$ berechnen (o.Bew.)

- Für sRGB:

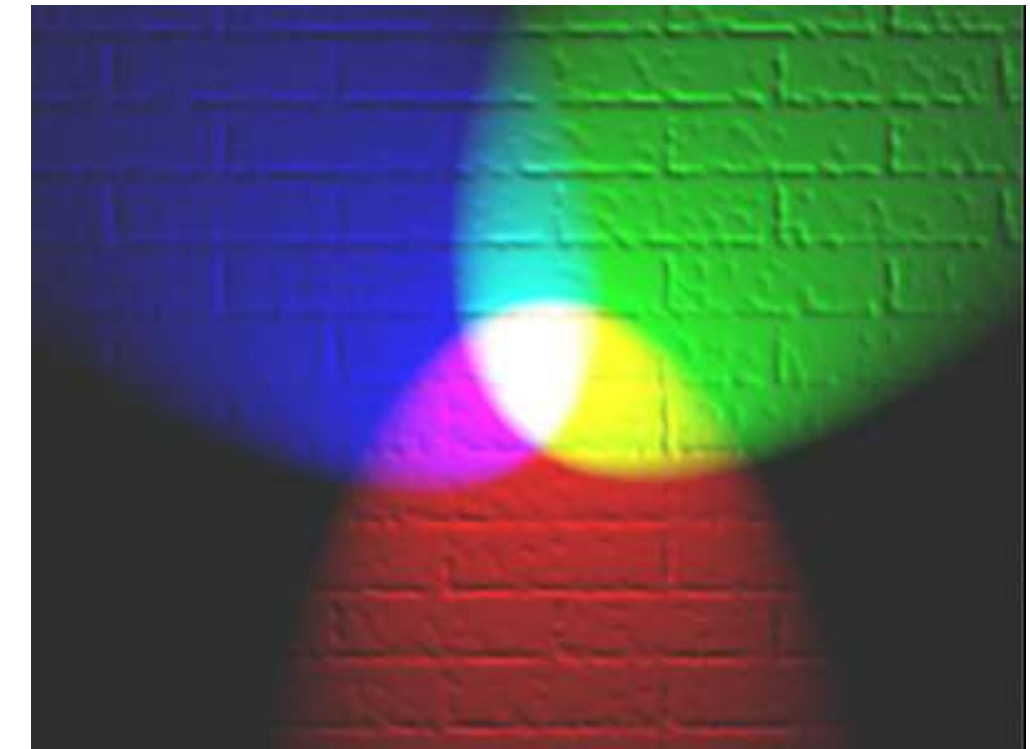
$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.241 & -1.537 & -0.497 \\ -0.969 & 1.876 & 0.042 \\ 0.056 & -0.204 & 1.057 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

- Erinnerung: es können durchaus Werte außerhalb $[0,1]$ herauskommen!
 - Führt zum großen Problem des "Gamut-Mapping" bzw. "Tone-Mapping"



CMY / subtraktive Farbmischung

- Bislang immer **additive Farbmodelle** bzw. **additive Farbmischung**
 - "Addition" von "Farben" = Addition von Spektren
- Beobachtung: bei Überlagerung von Mal-Farben oder Farbfiltern passiert etwas anderes!
 - Offensichtlich passiert eine Art von Subtraktion



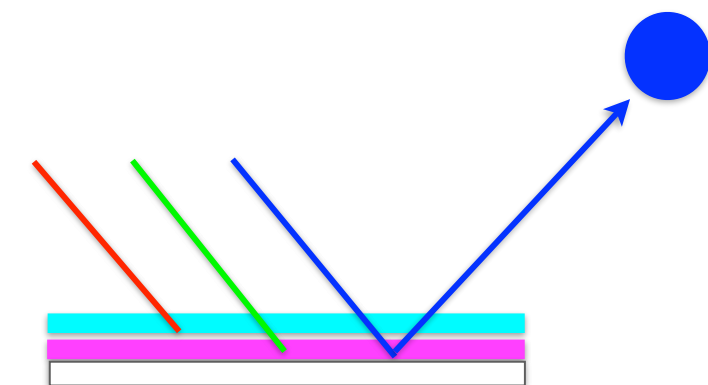
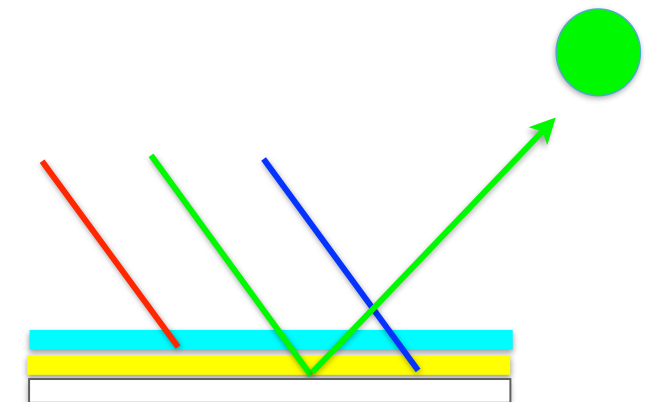
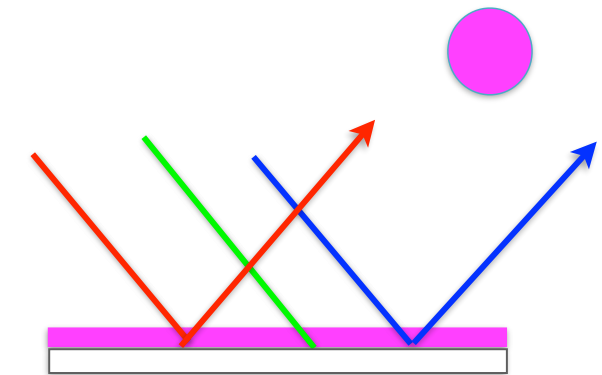
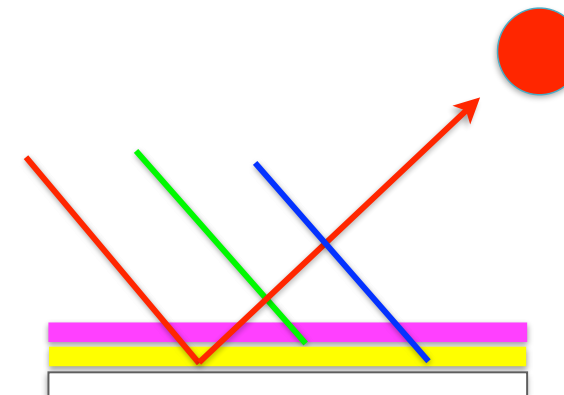
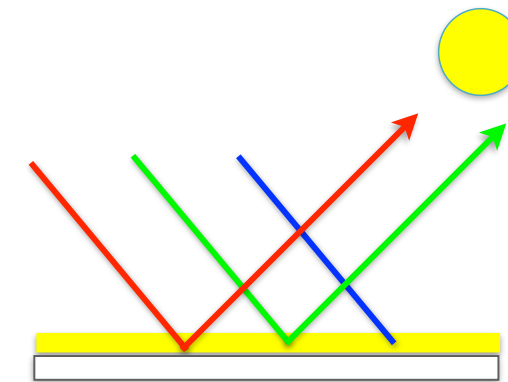
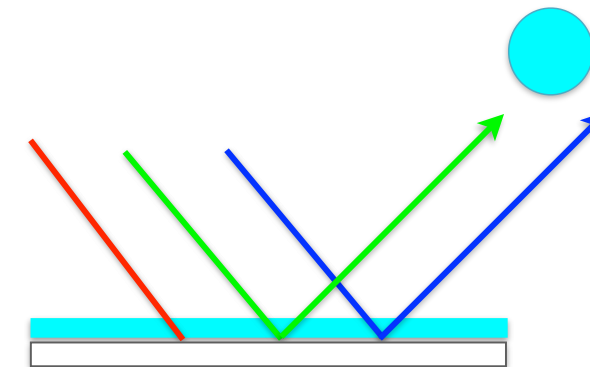
Beachte: "Paint Color $\neq$ Light Color" !

- Daraus ergibt sich folgende Tabelle:

Tinte	Absorbiert	Reflektiert	Erscheint
Cyan	Rot	Grün + Blau	Cyan
Magenta	Grün	Rot + Blau	Magenta
Gelb	Blau	Rot + Grün	Gelb
Magenta + Gelb	Grün + Blau	Rot	Rot
Cyan + Gelb	Rot + Blau	Grün	Grün
Cyan + Magenta	Rot + Grün	Blau	Blau

- Folgerungen:

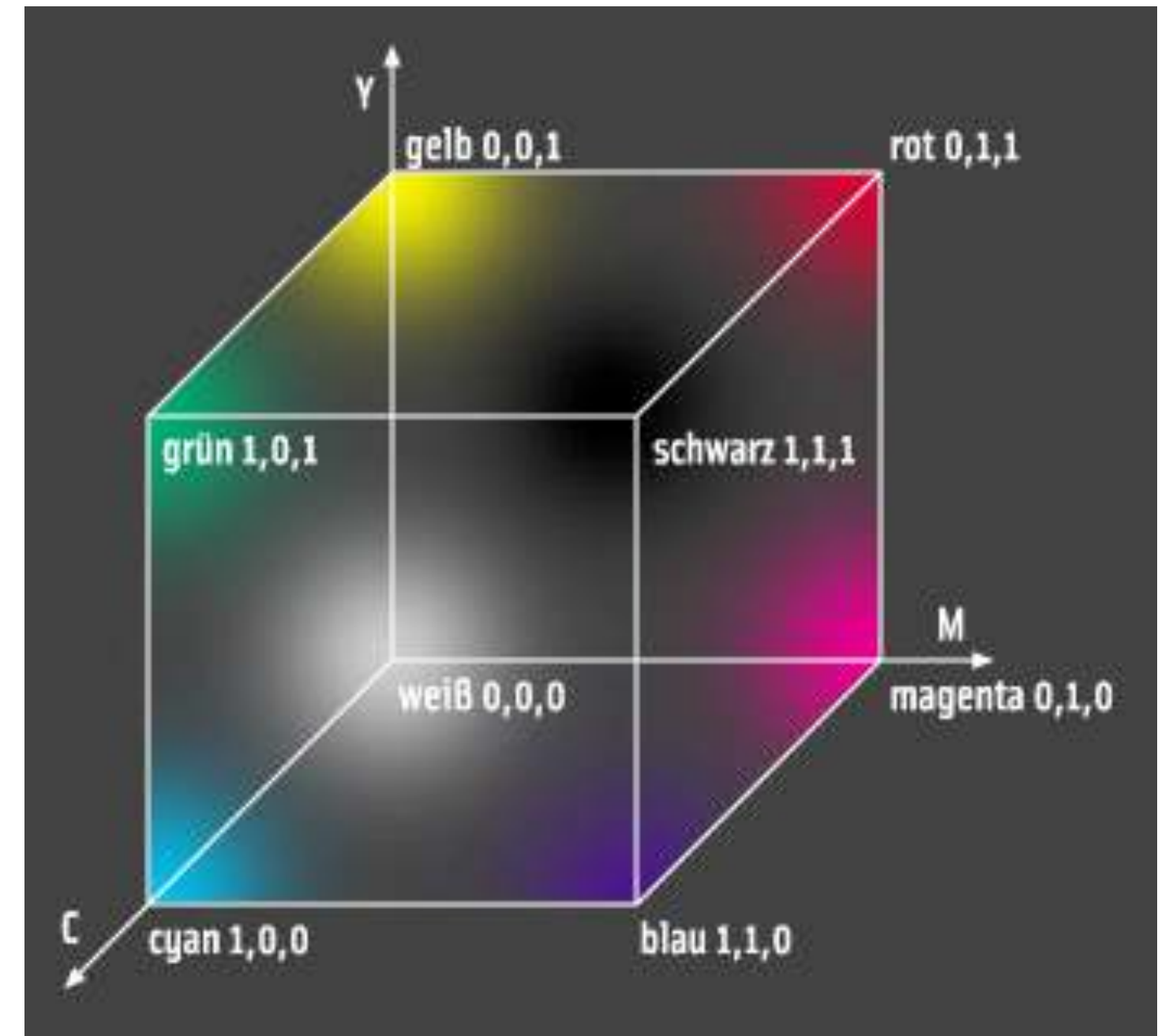
- Basis besteht aus Cyan, Magenta, Gelb $\rightarrow$ CMY
- "Addition" von Farben = Subtraktion von Spektren



- Der CMY-Farbraum
- Umrechnung RGB-CMY:

$$\begin{pmatrix} C \\ M \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

- Achtung: keine lineare Transformation!
- "Null"-Punkt = (0,0,0) = Weiß
- (1,1,1) = Schwarz



Erweiterung: CMYK

- Erweiterung des CMY-Modells
- Löst verschiedene Probleme:
 1. C + M + Y ergibt kein perfektes Schwarz (eher schmutziges Braun)
 2. Alle drei Farben übereinander drucken macht Papier sehr naß
 3. Text ist i.A. schwarz →
 - würde Farben verschwenden
 - exakte Überlagerung schwierig (man denke an die Serifen)
- Vierter Farbkanal K = "key" = Black → CMYK



Rogier
van der
Weyden:
Deposition,
ca. 1435

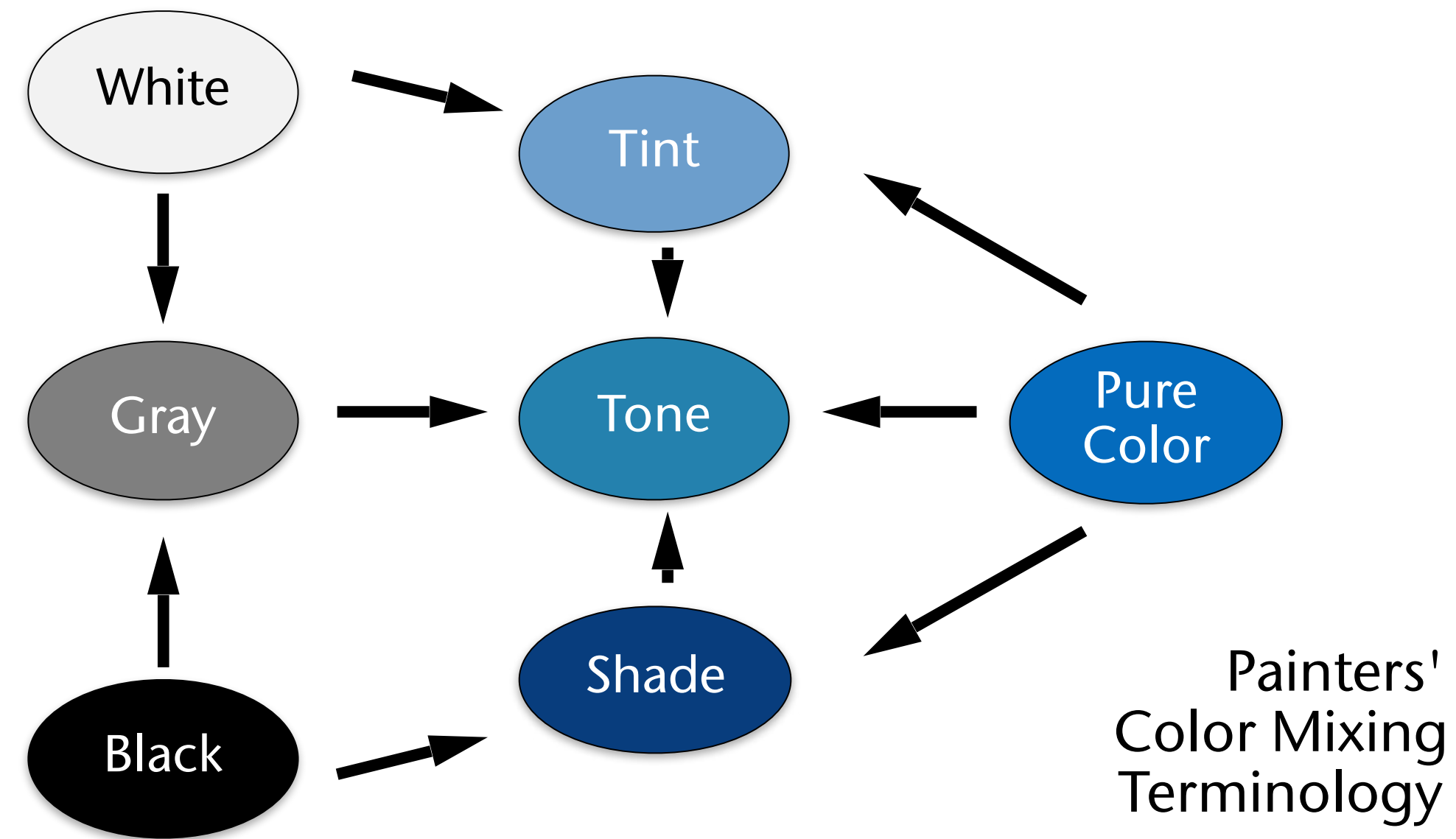




Unbekannter flämischer Meister, 16. Jahrhundert

Die Betrachtungsweise der Farben durch Maler

- Maler haben eine ganz andere Sichtweise und Methode zur Erzeugung von (gemischten) Farben:

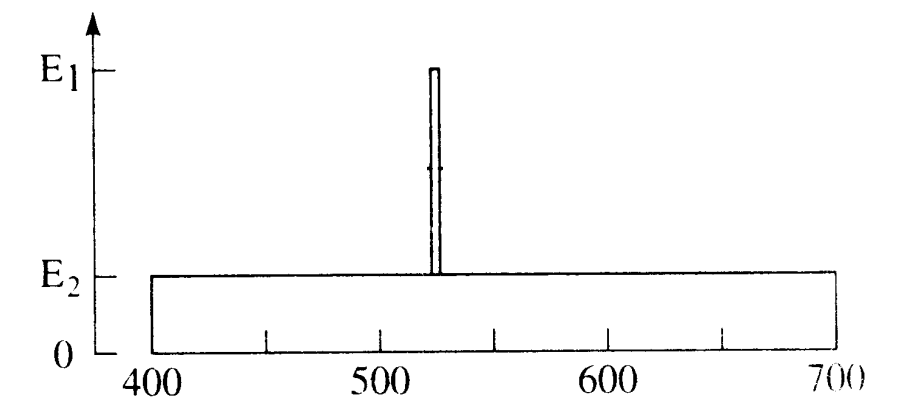
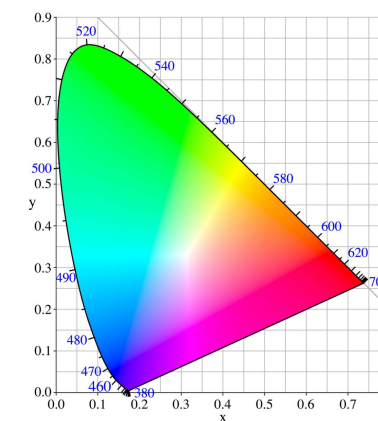
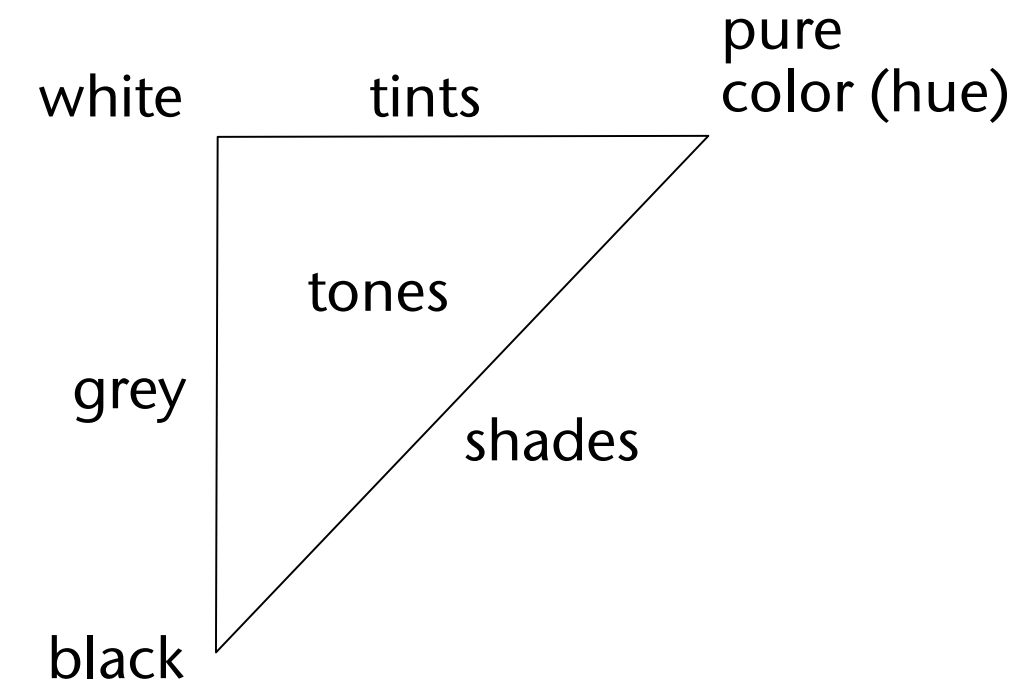


HSV

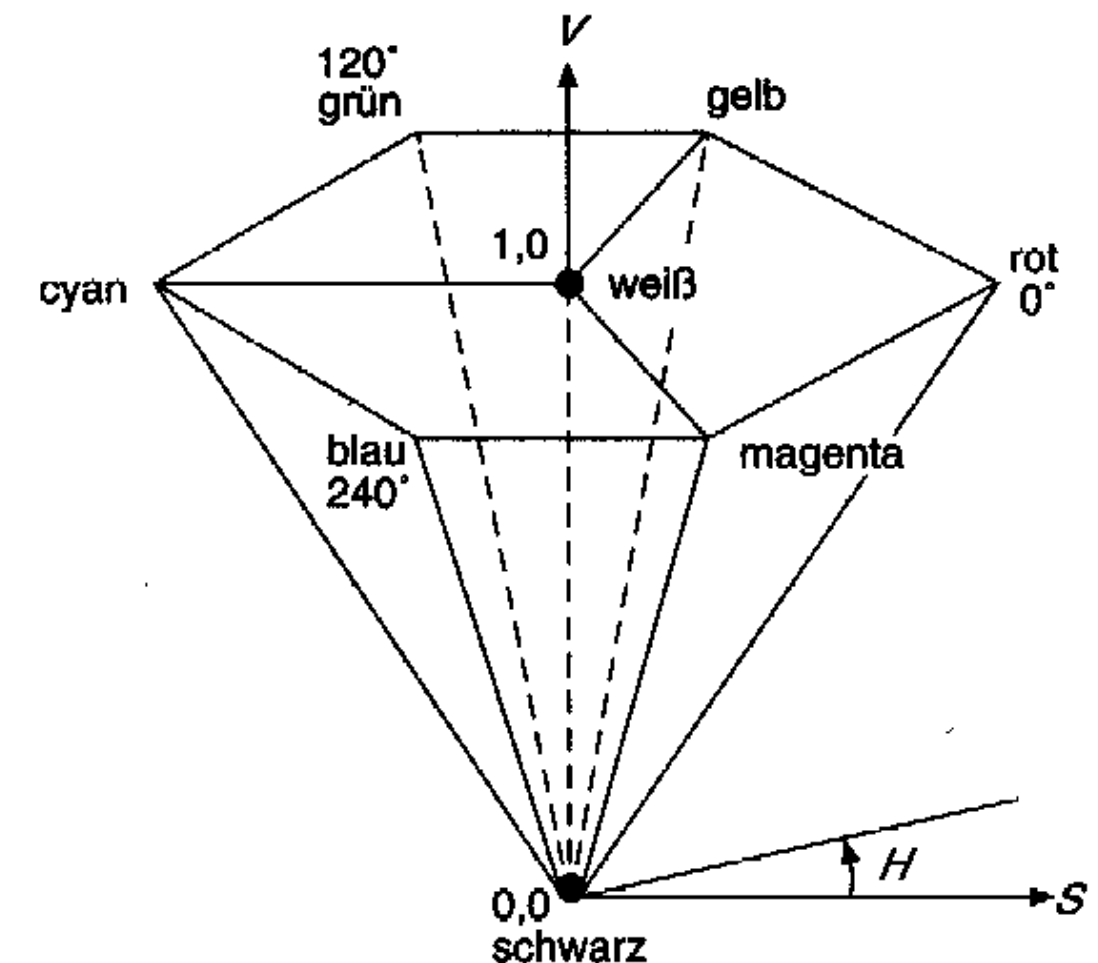
[Alvy Ray Smith, 1978]



- Problem: RGB & CMY sind sehr unintuitiv
- Menschliche Farbspezifikation arbeitet eher mit
 - "Farbton" (rot, gelb, grün-blau, ...)
 - "Reinheit" ("satte Farbe", "pastell-...")
 - "Helligkeit" (hell-dunkel)
- Entspricht auch eher den Parametern zur Beschreibung von chromatischem Licht
- ... und eher dem CIE-Chroma-Diagramm

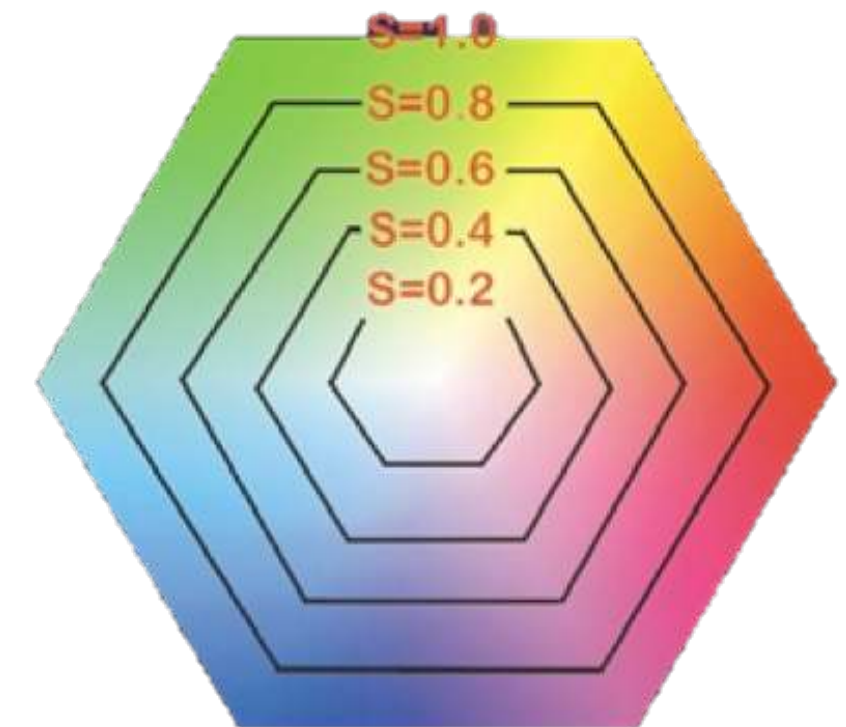
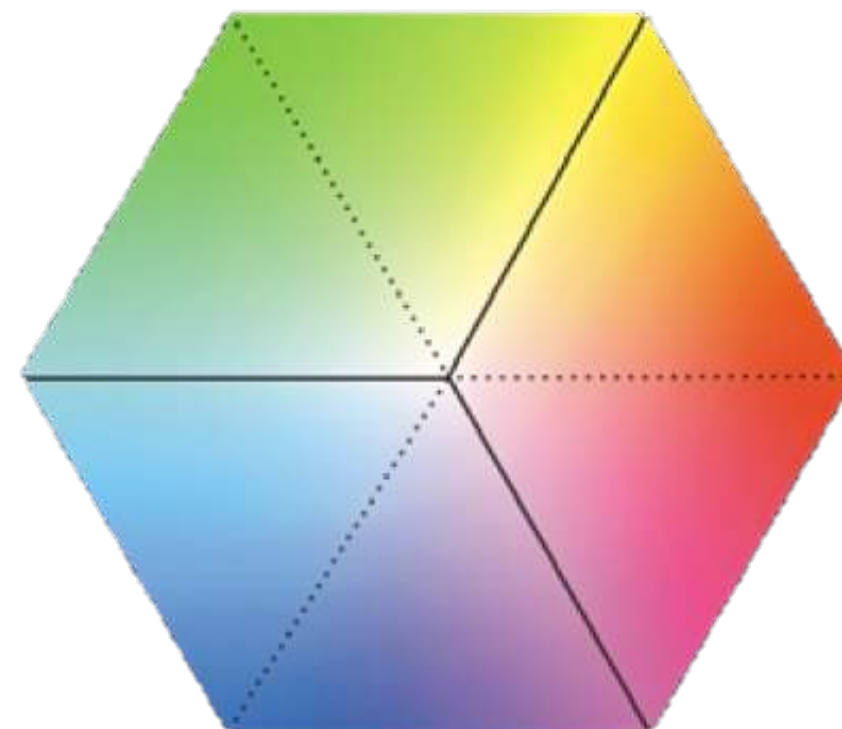
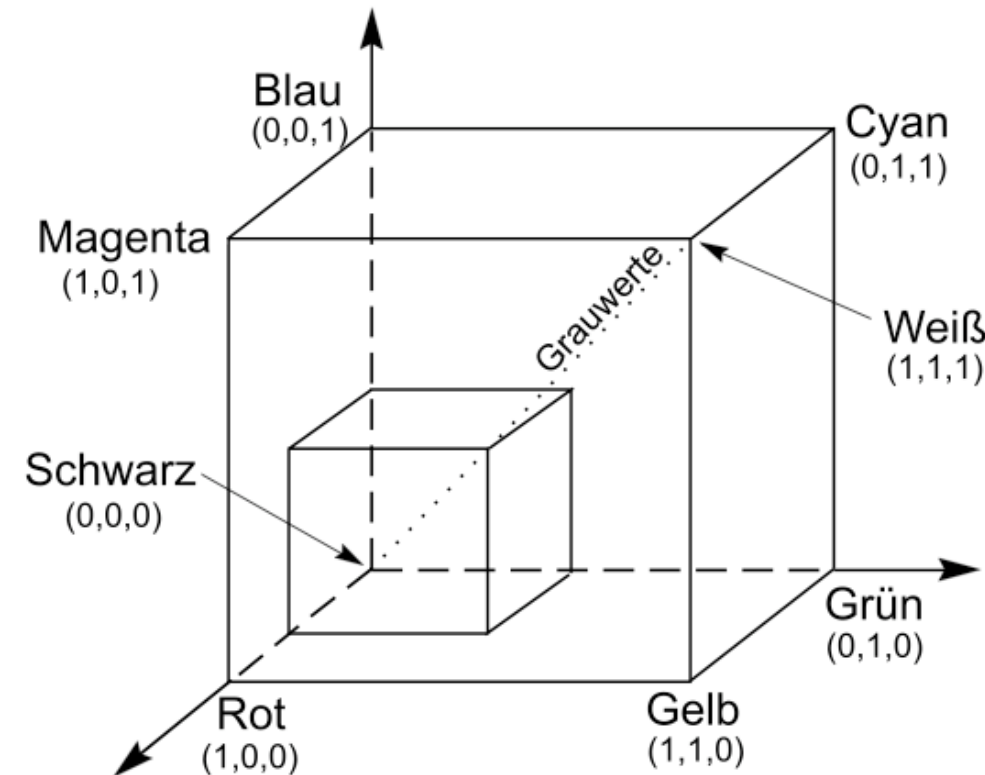


-



Geometrischer Zusammenhang zwischen HSV-Kegel und RGB-Würfel

- Stelle RGB-Würfel auf die schwarze Spitze, so daß die Grau-Achse senkrecht steht
- Projiziere die "obere Hülle" des Würfels auf die Ebene
- Jede horizontale Schnittfläche durch den HSV-Kegel entspricht den 3 "oberen" Seiten eines Teilwürfels des RGB-Würfels



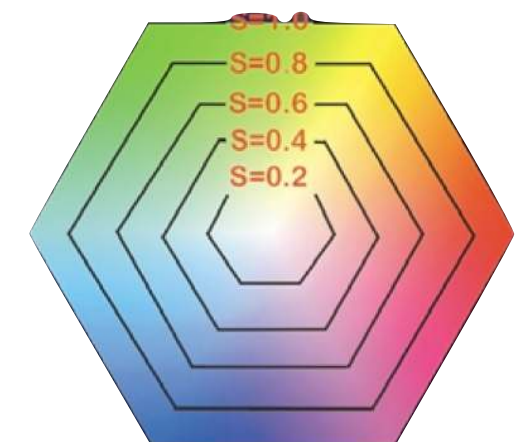
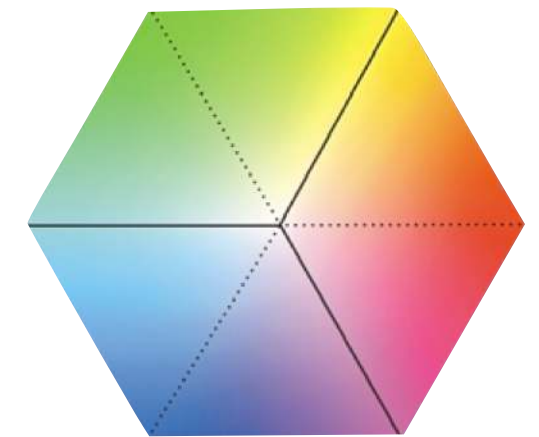
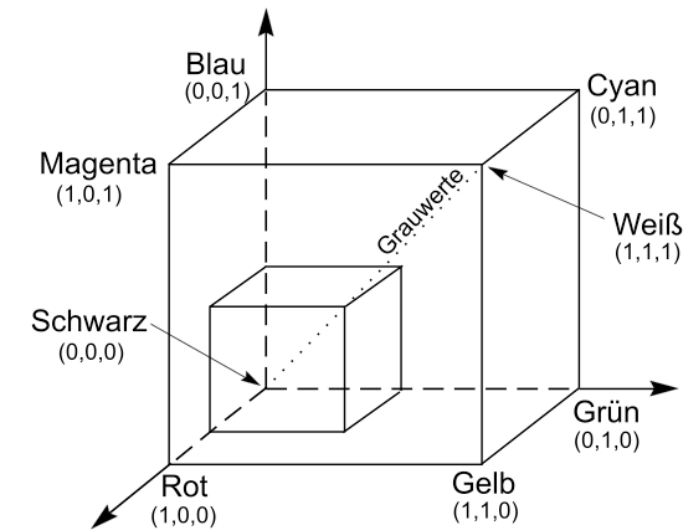
Umrechnung RGB → HSV

- Keine lineare Transformation mehr (logischerweise)
 - Die oberen/vorderen 3 Seiten des Würfels sind definiert durch $\max(R,G,B) = 1$
 - Falls $\min(R,G,B) = 0 \rightarrow$ Farbe liegt auf einer der unteren/hinteren 3 Seiten des RGB-Würfels

- Algo:

1. $V = \max(R, G, B)$

2.
$$S = \begin{cases} \frac{V - \min(R,G,B)}{V} & , V > 0 \\ 0 & , V = 0 \end{cases}$$



3. Falls $S > 0$:

$$H = \begin{cases} 0 + \frac{G-B}{\max - \min} & , R = \max(R, G, B) \\ 2 + \frac{B-R}{\max - \min} & , G = \max(R, G, B) \\ 4 + \frac{R-G}{\max - \min} & , B = \max(R, G, B) \end{cases}$$

(falls $S=0$ ist, dann ist H =beliebig)

4. $H = H \cdot 60^\circ$

5. Falls $H < 0 \rightarrow H += 360$

- HSV $\longrightarrow$ RGB: ähnlich

Questions on Color Spaces



<https://www.menti.com/rt5s3k7vy3>

Anwendungen

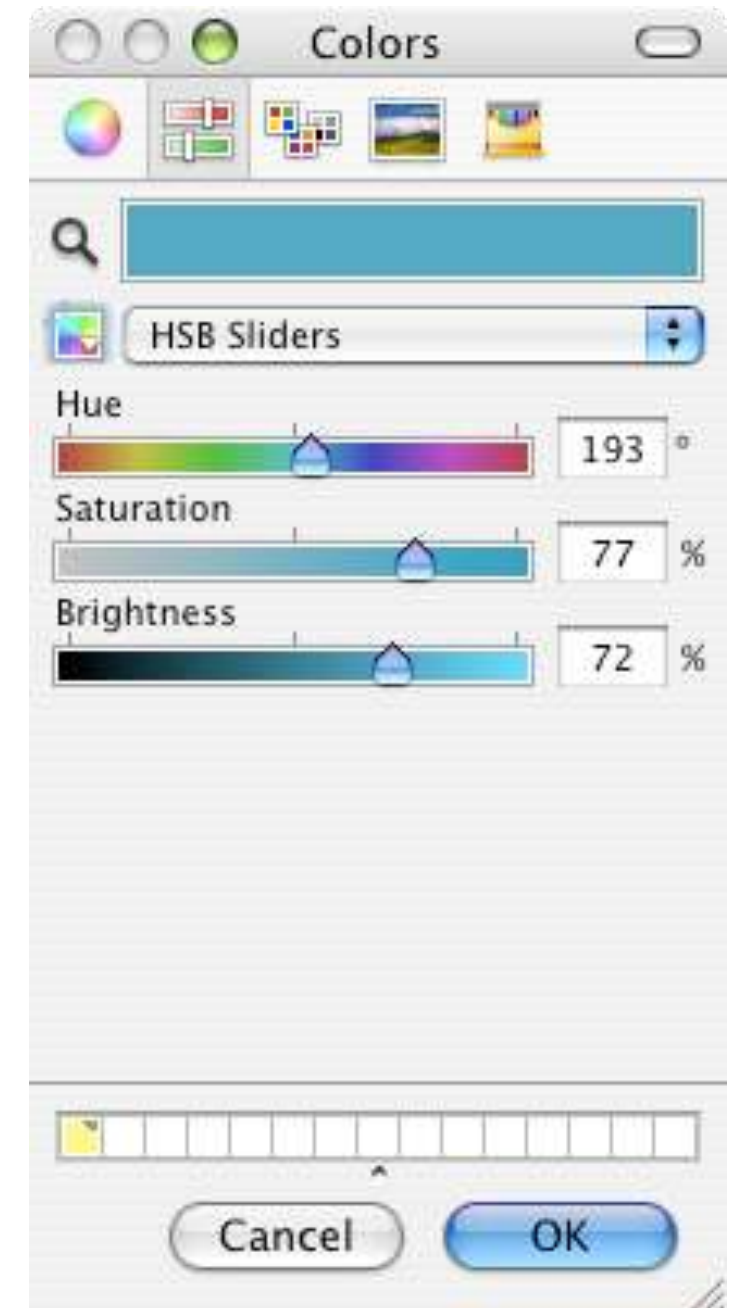
- Color Picker: heute Standard in jedem GUI zur Farbauswahl
- "Enhance colors" in Photo-Bearbeitungs-Software



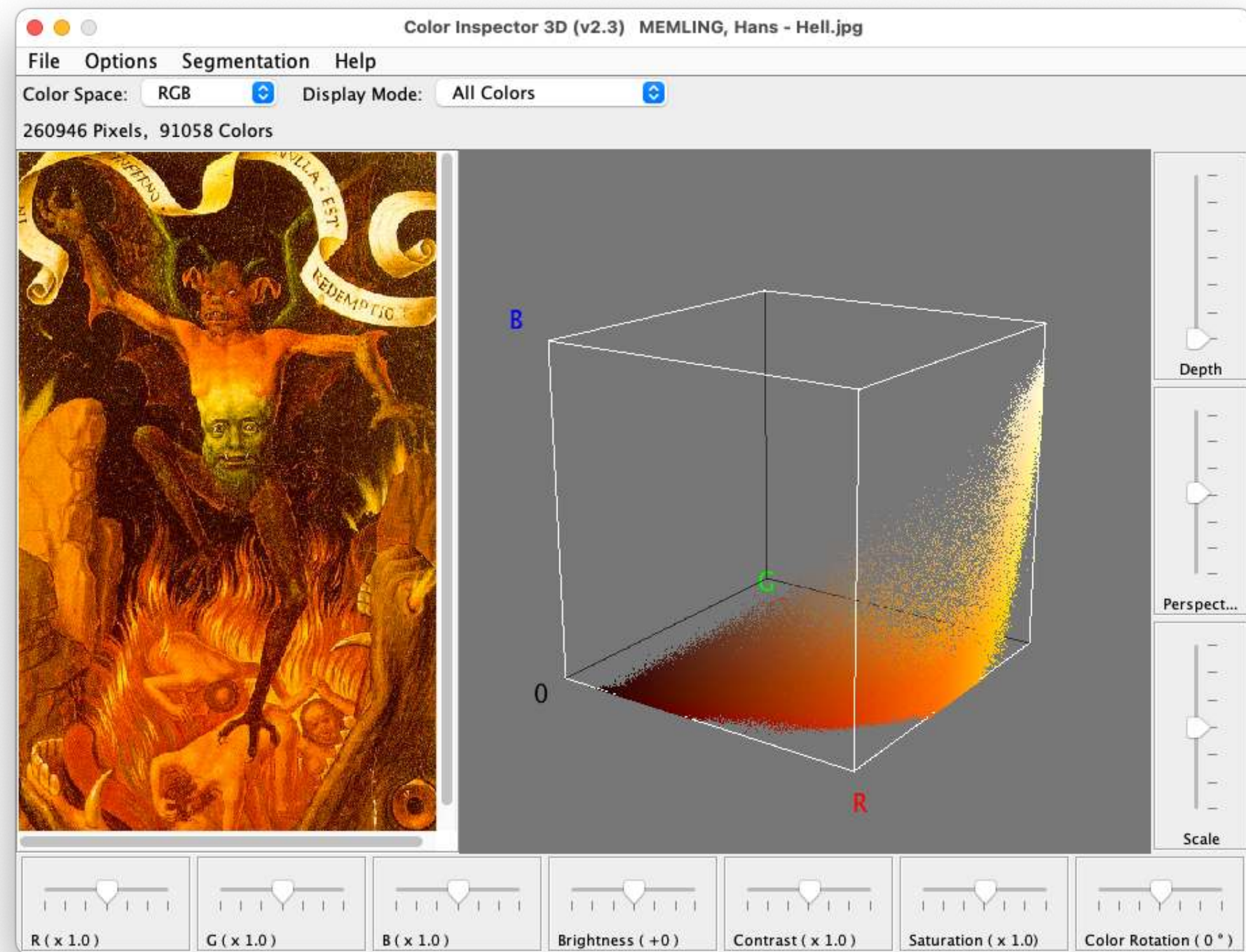
vorher



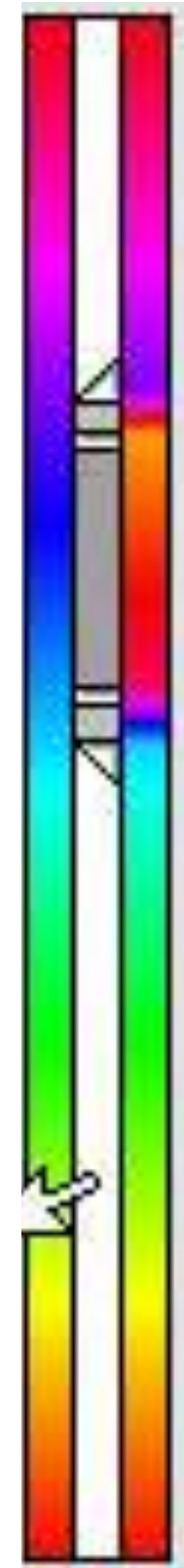
nachher



Demo

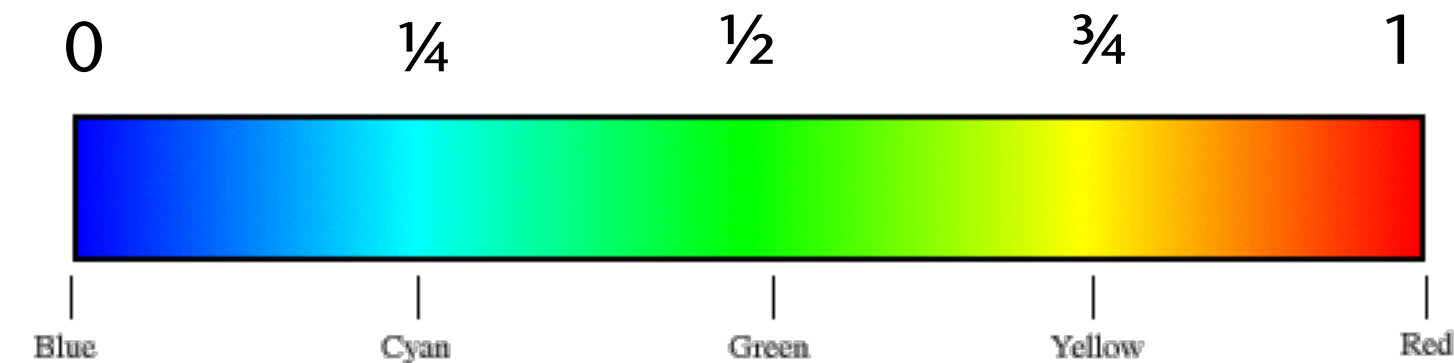
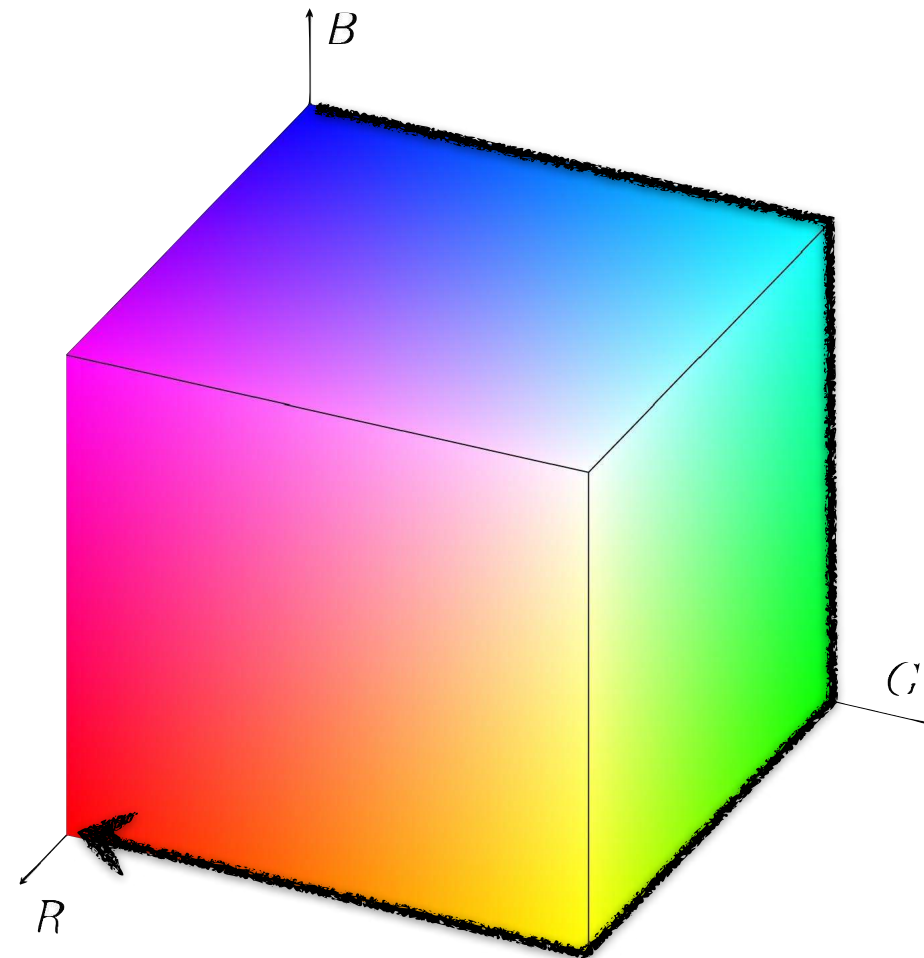
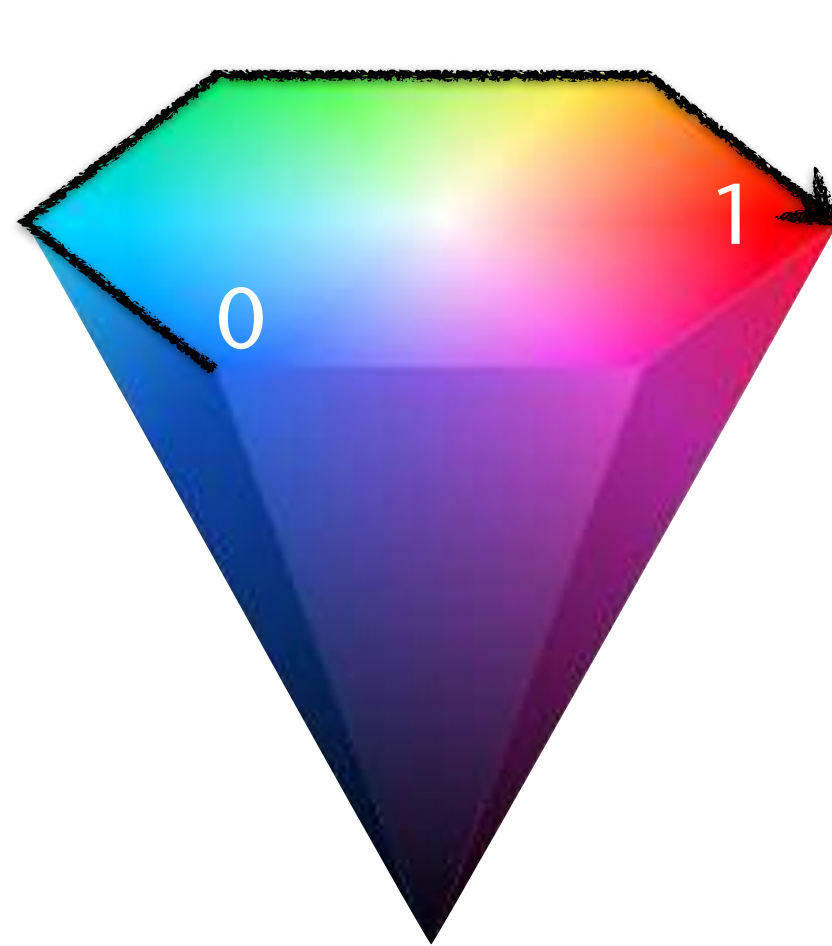


Color Shifting



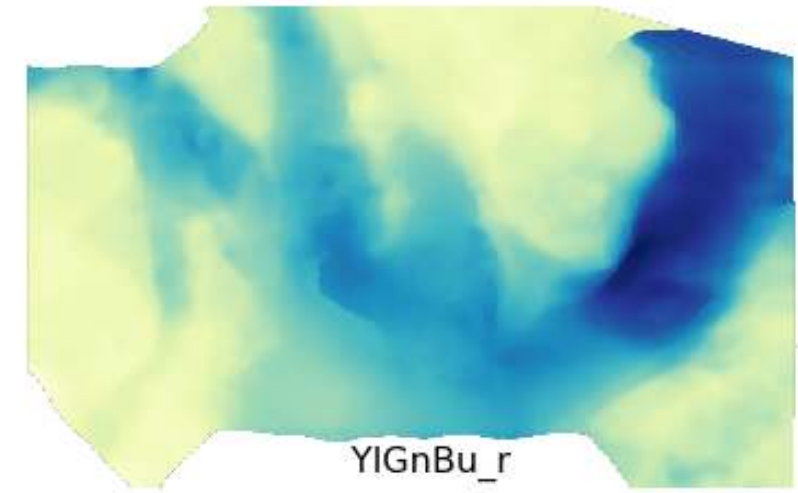
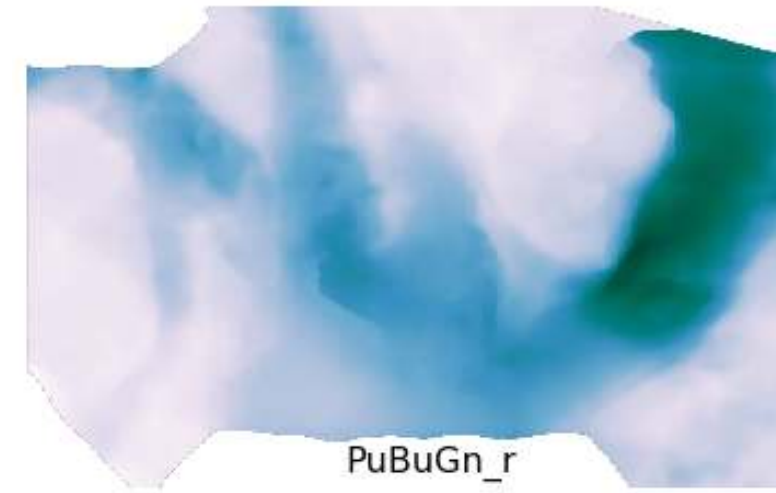
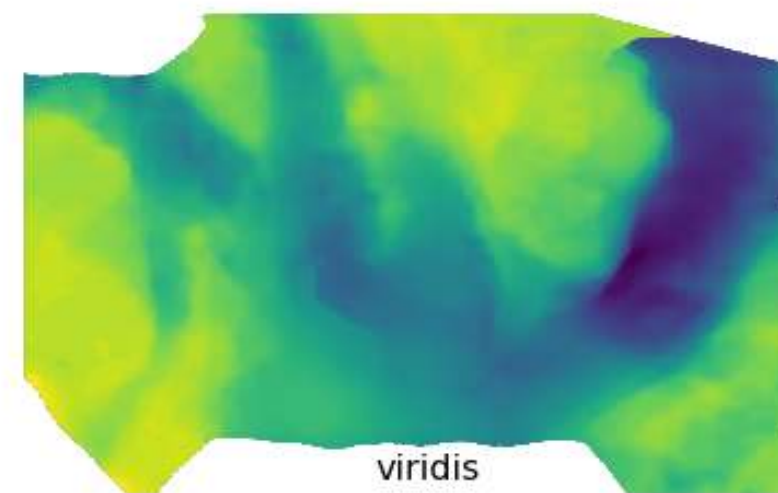
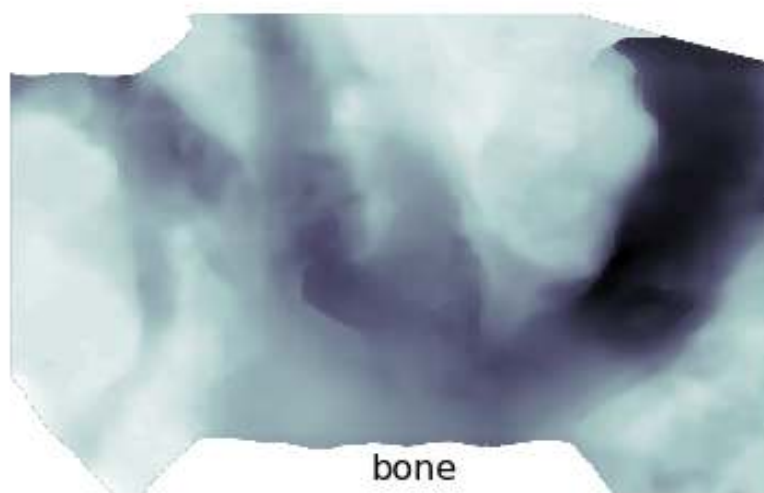
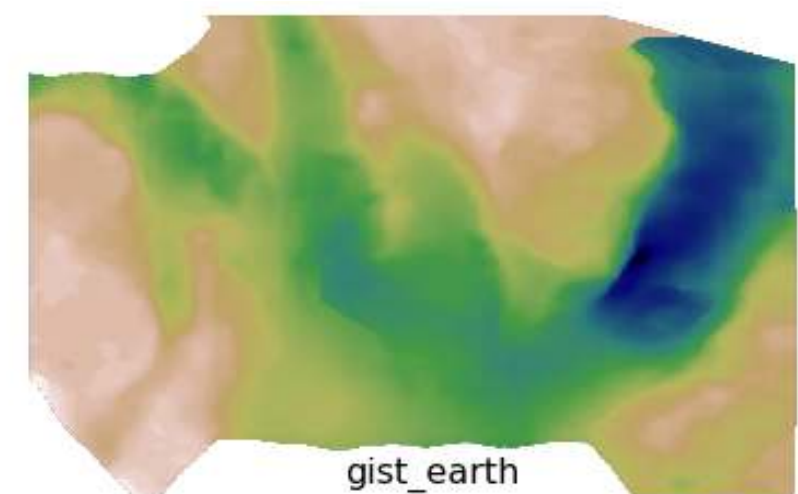
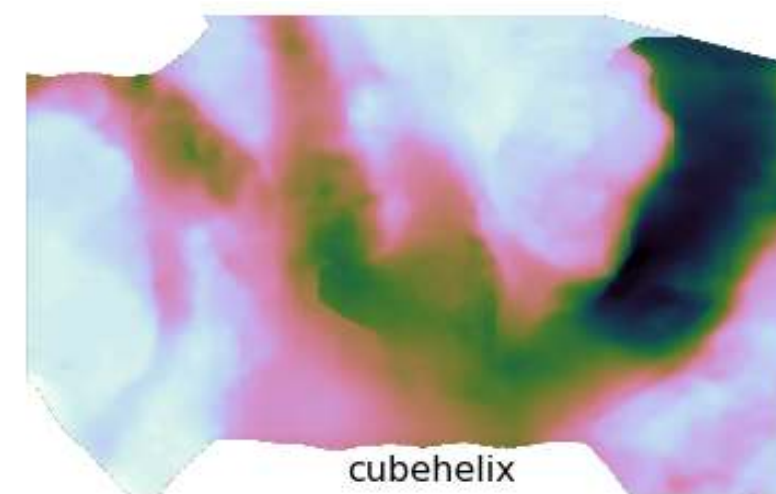
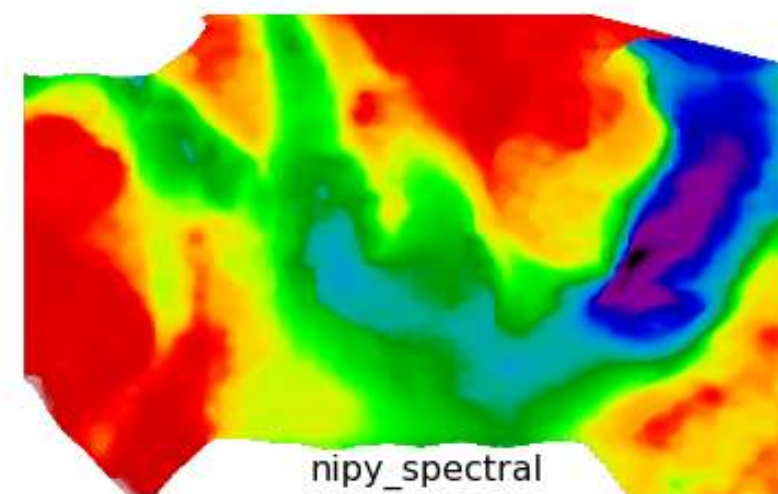
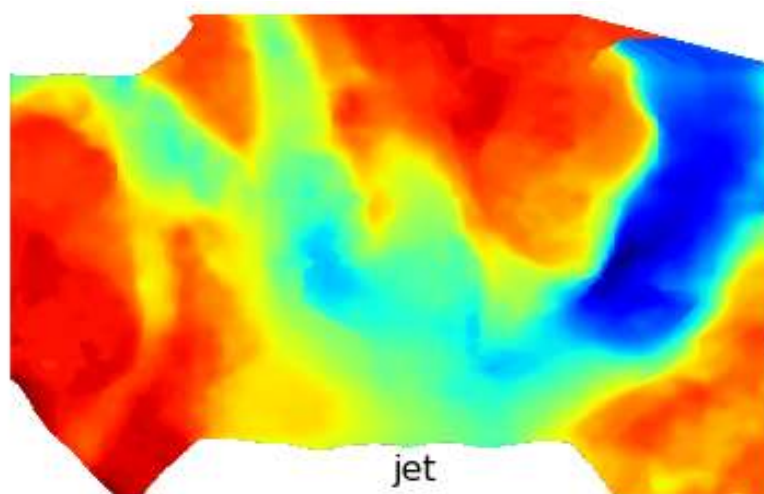
Falschfarben-Darstellung (False Colors, Color Coding)

- Häufigste Interpretation: ein skalarer Wertebereich (obdA. $[0,1]$) wird auf eine Farbrampe gemappt $\longrightarrow$ **Color-Map**
- Einfachste Color-Map: die "Jet"-Funktion = "kalt-zu-warm" Farbrampe
 - Skalar $\in [0,1] \longrightarrow$ Hue $H \in [240,0]$, $S = V = 1$ (then convert to RGB)



Inzwischen wurden sehr viele Color-Maps entwickelt

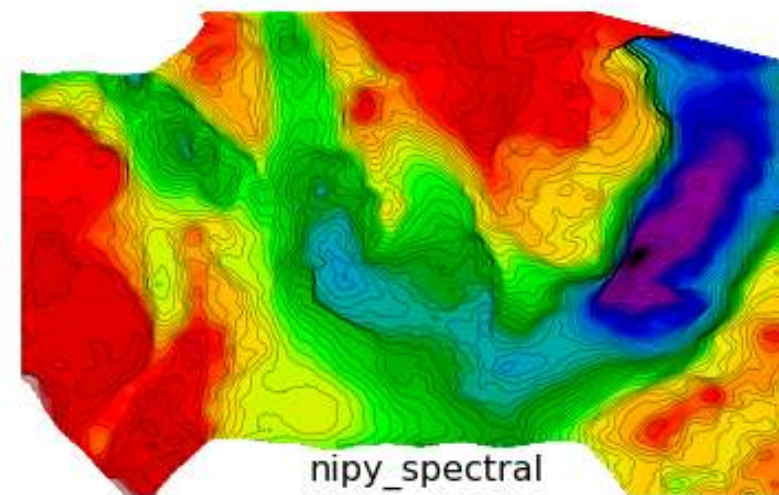
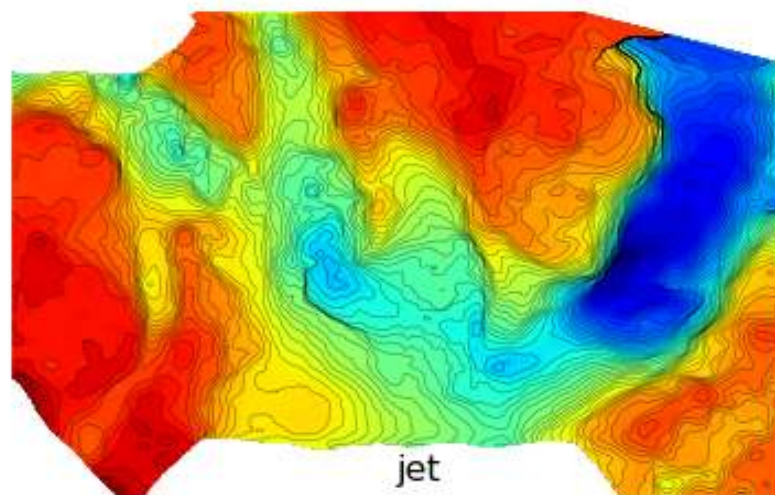
Beispiel: Terrain-Visualisierung



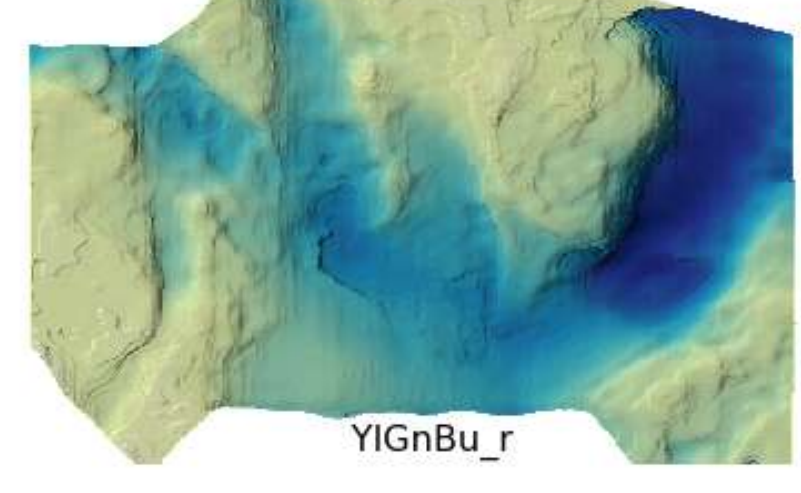
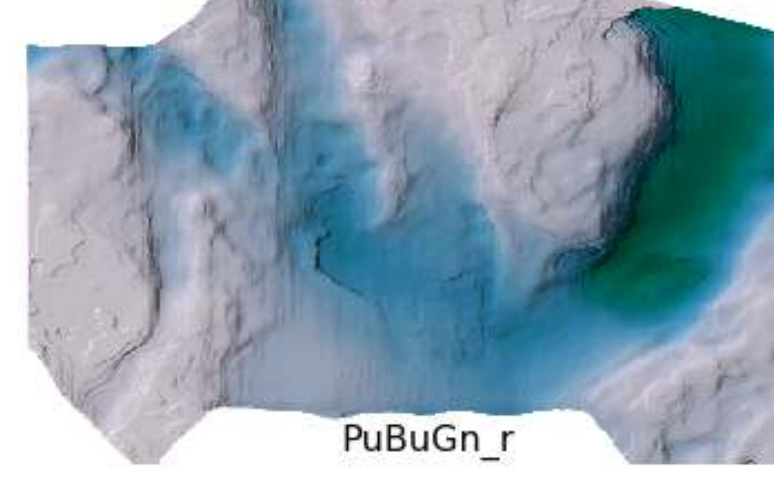
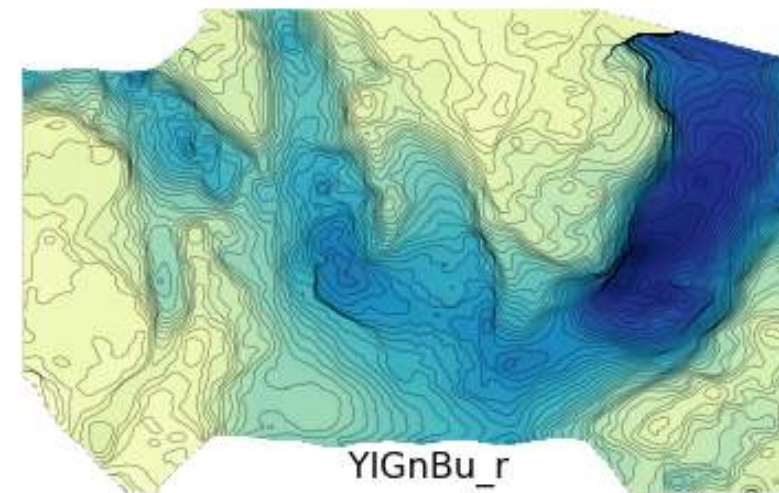
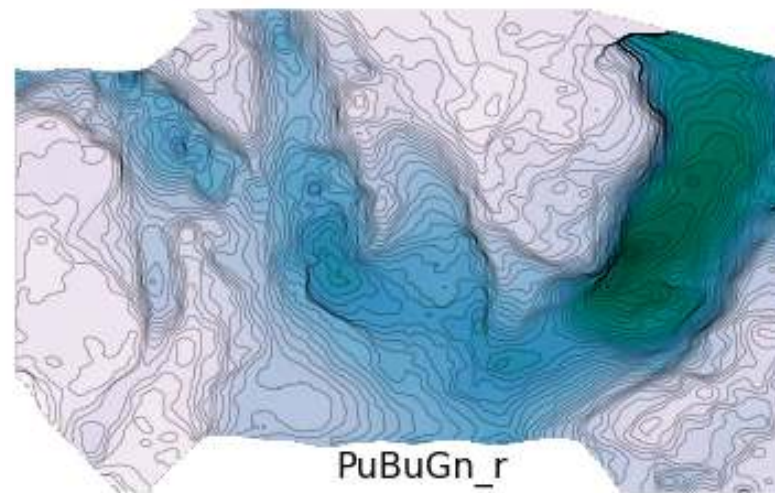
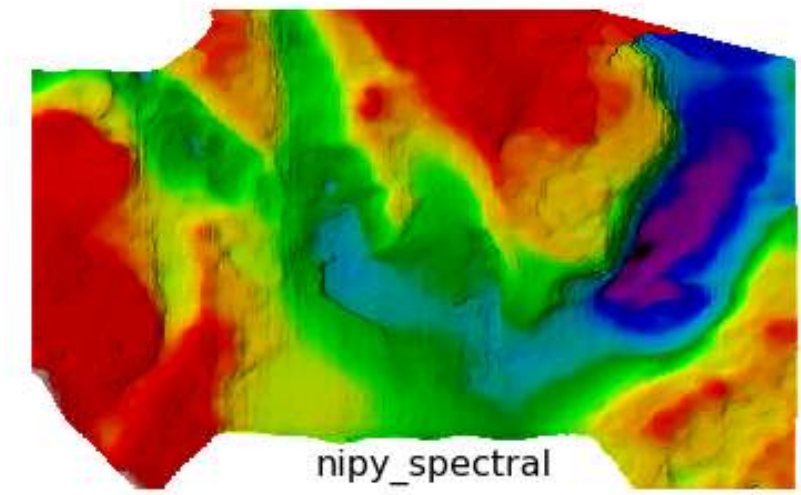
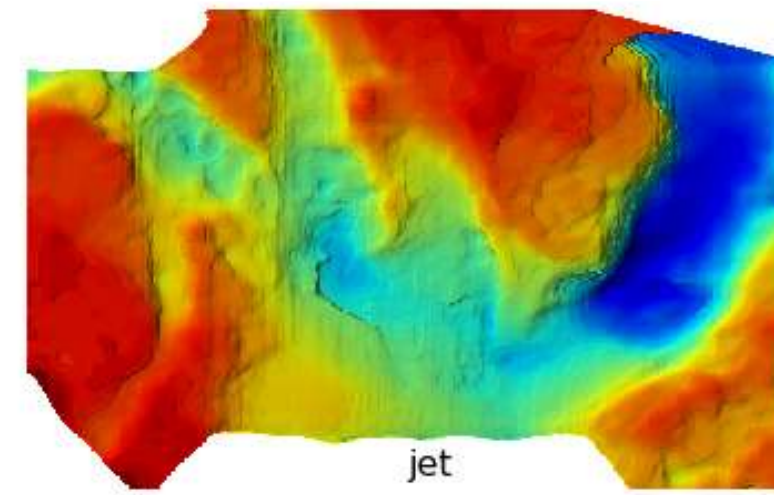
Nebenbemerkung

- Verwende Color-Maps mit Bedacht! Oft ist eine Kombination mit anderen Techniken wesentlich besser!

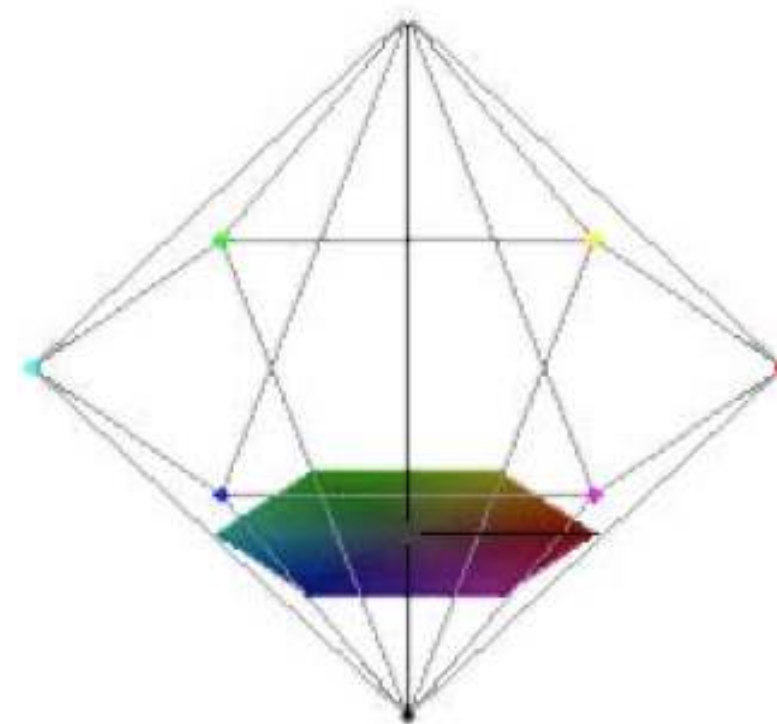
Mit Konturlinien



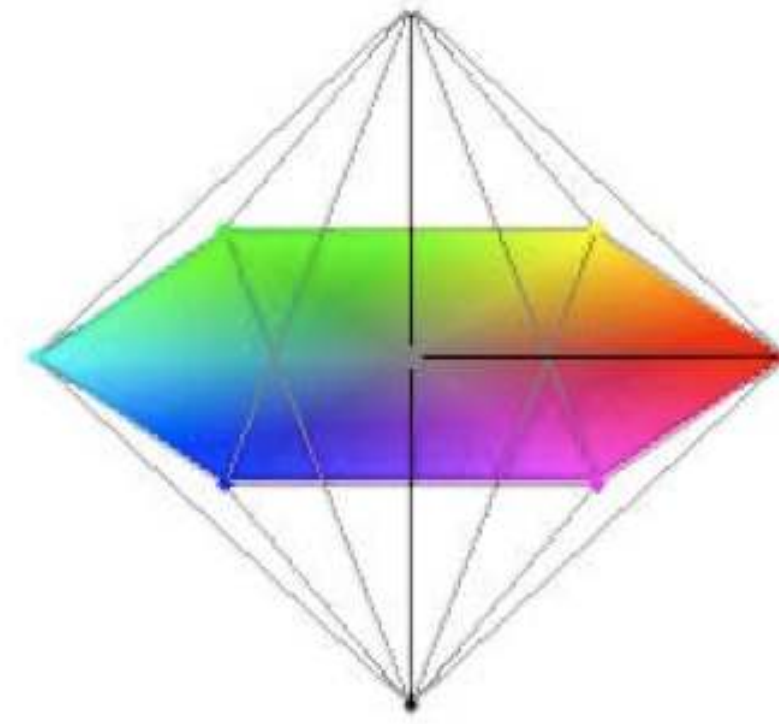
Mit Shading



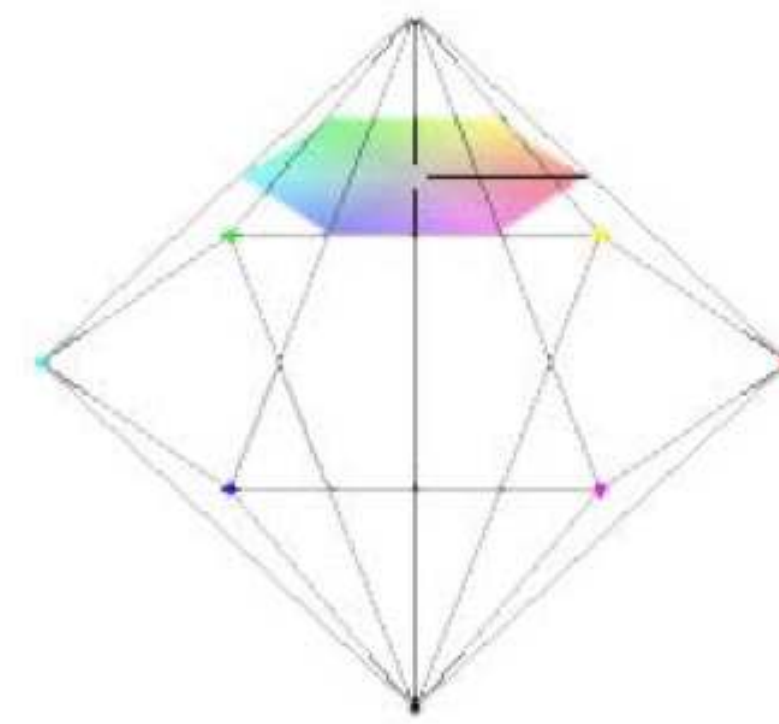
- HLS = *Hue, Lightness, Saturation*
- Manchmal auch HSL oder HIS
- Etwas "symmetrischer" aufgebaut:
 - Weiß als auch Schwarz bilden eine Spitze
 - Größte "Breite" bei 50% Grau



L= 0.25

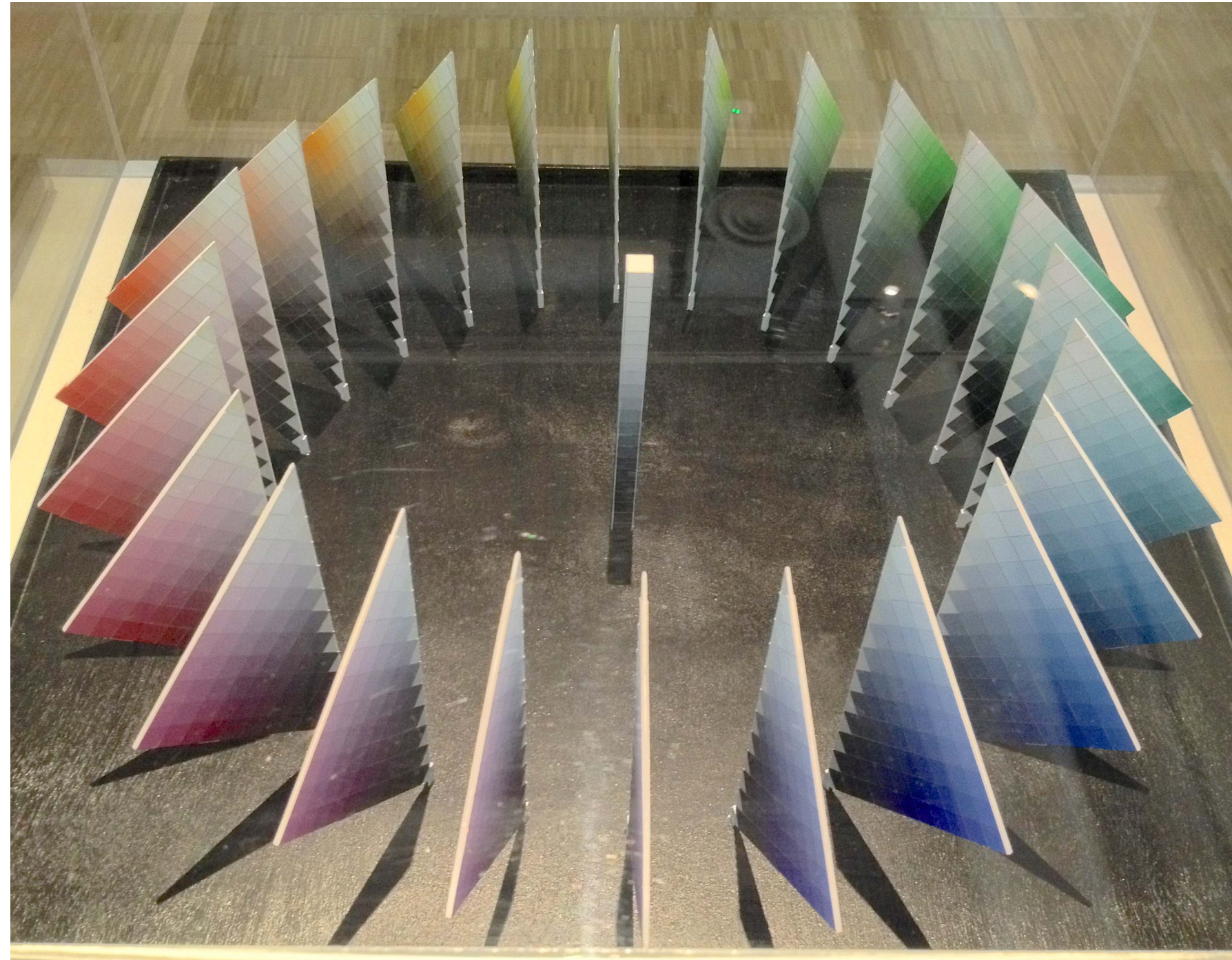


L= 0.5



L= 0.75

"Ist das Kunst ... ?"



André Lemonnier: Volume de couleurs, 1972
(im Centre George Pompidou, Paris)

Interpolation von Farben

- Häufiges Problem:
 - Farben C_1 und C_2 sind gegeben
 - Gesucht: alle Farben "dazwischen"
- Lineare Interpolation

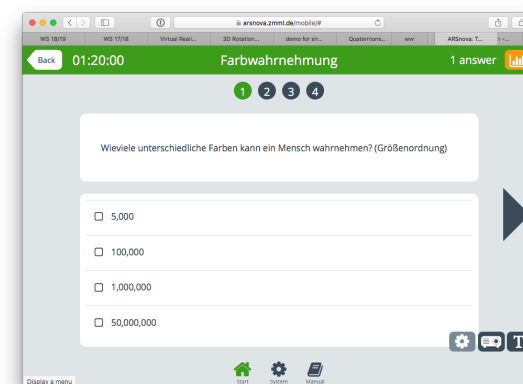
$$C(t) = t \cdot C_1 + (1-t) \cdot C_2$$

liefert "irgendwelche" Farben (auf der Geraden zwischen C_1 und C_2)

- Je nach Anwendung:
 - Richtigen Farbraum wählen!
 - Egal, weil C_1 und C_2 sowieso dicht beieinander liegen

Anzahl wahrnehmbarer Farben

- Anzahl unterschiedlicher wahrnehmbarer Wellenlängen = 200
- Anzahl unterschiedlicher wahrnehmbarer Helligkeiten = 500
- Anzahl unterschiedlicher wahrnehmbarer Sättigungen = 20
- Fazit: $200 \times 500 \times 20 = 2 \text{ Millionen Farben}$



Ähnlichkeit (Abstand) von Farben

- Beobachtung:

- Diese Farben mit verschiedenen Hues, aber Value = Saturation = 1, haben diese *wahrgenommene* Helligkeiten
- Ähnliches passiert bei Farbrampen (in beiden Rampen sind die Deltas zwischen den V-Werten gleich):

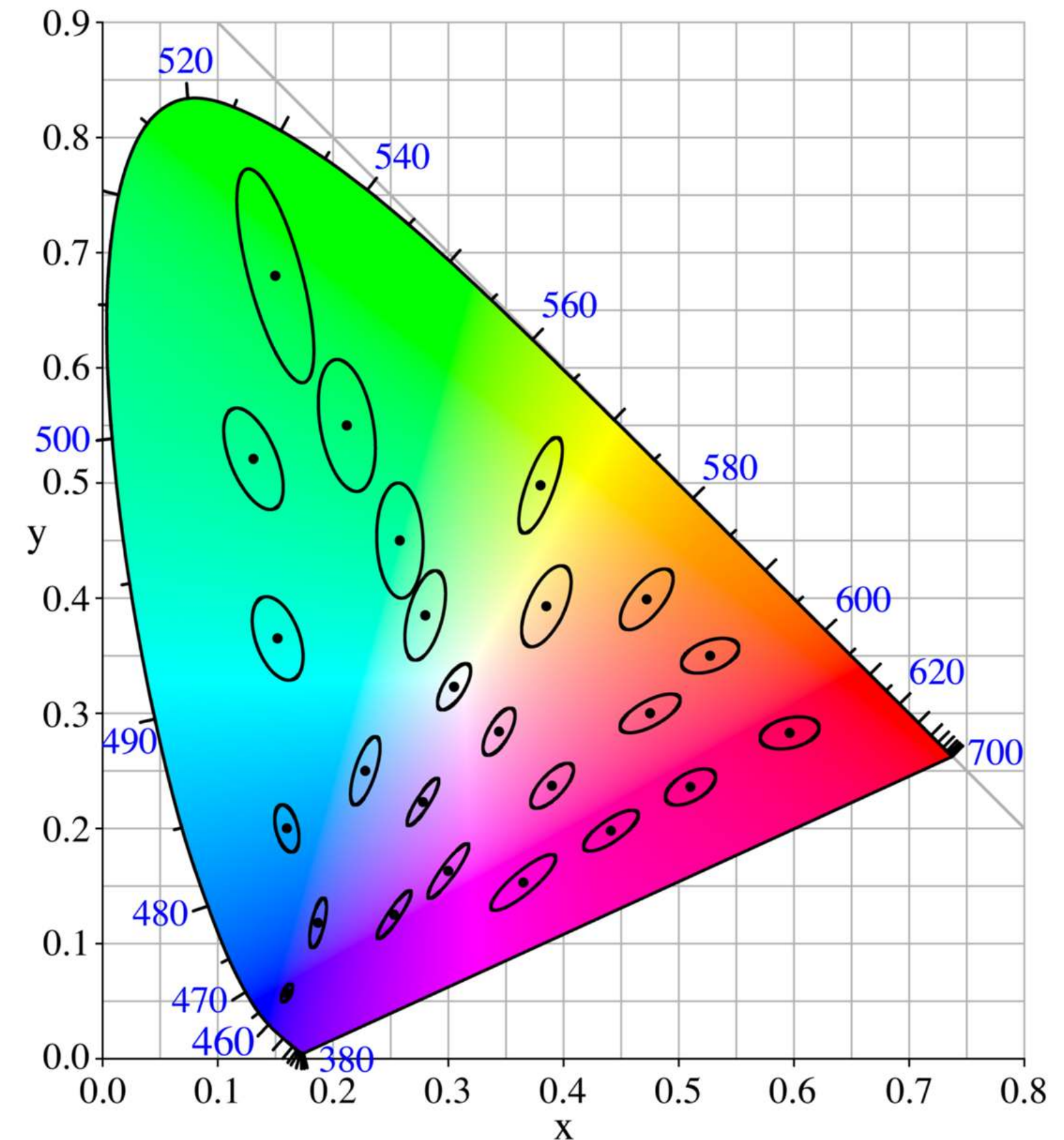


- Häufiges Problem:

- Maß für den wahrgenommenen "Abstand" zwischen zwei Farben wird benötigt
- "Äquidistante" Farben gesucht
- Wie kann man den wahrgenommenen "Abstand" zwischen zwei Farben berechnen?

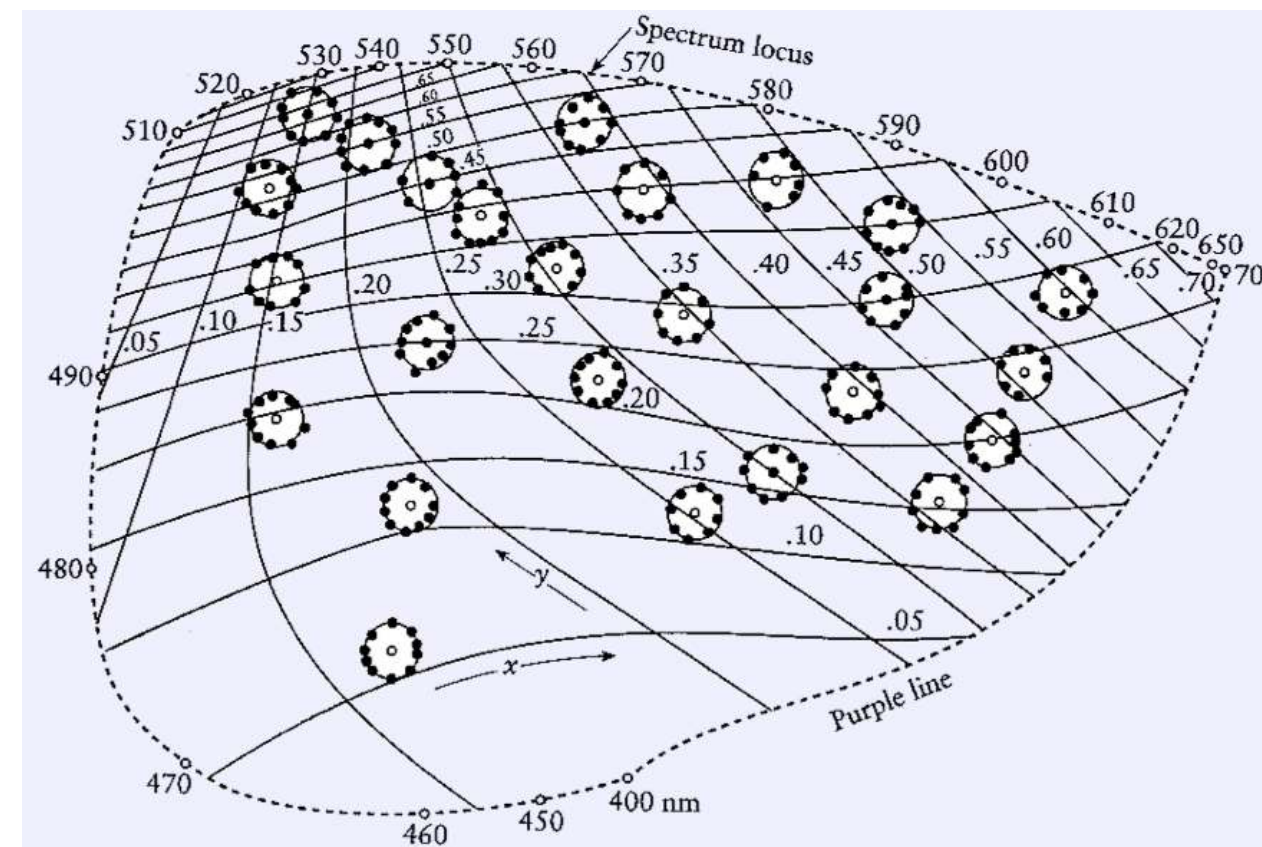
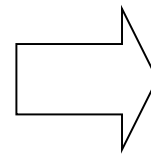
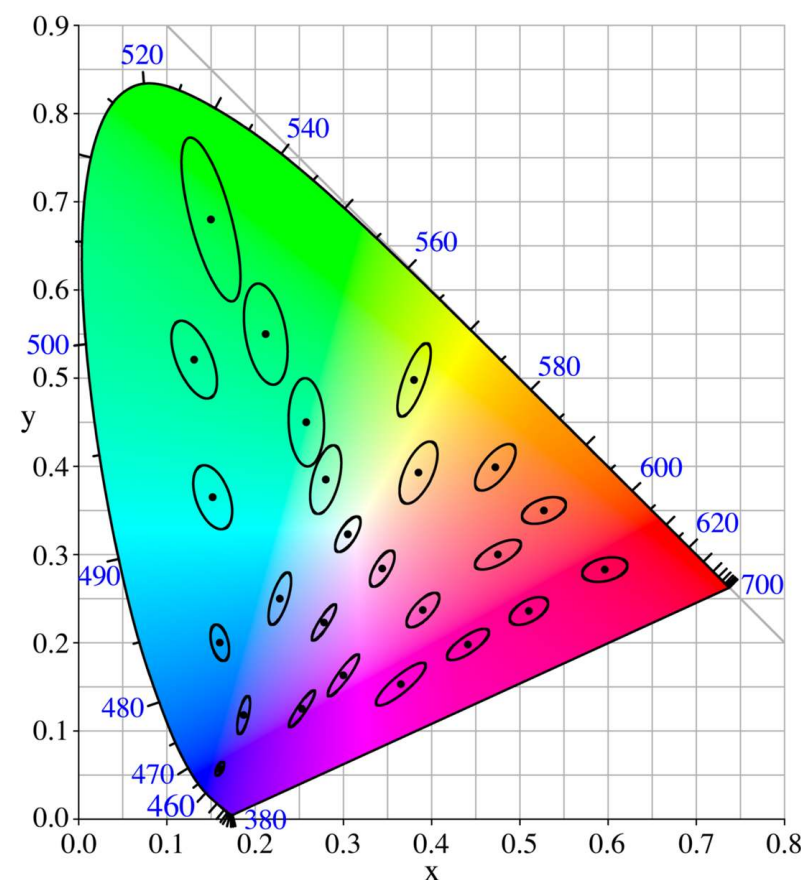
Mac-Adams-Ellipsen

- Ausgangspunkt: ausgehend von einer bestimmten Farbe - wo liegen alle Farben, die den gleichen Abstand haben?
- **MacAdams-Ellipsen:**
 - Zeigen die "*just noticeable difference*" im CIE xy-Diagramm
 - Alle Farben auf dem Rand einer Ellipse haben den gleichen, gerade noch wahrnehmbaren Abstand vom Zentrum
- Bemerkung: In jedem "linearen" Farbraum (= Farbraum, der durch eine lineare Transformation aus XYZ hervorgeht) sind äquidistante Farbkreise solche MacAdams-Ellipsen



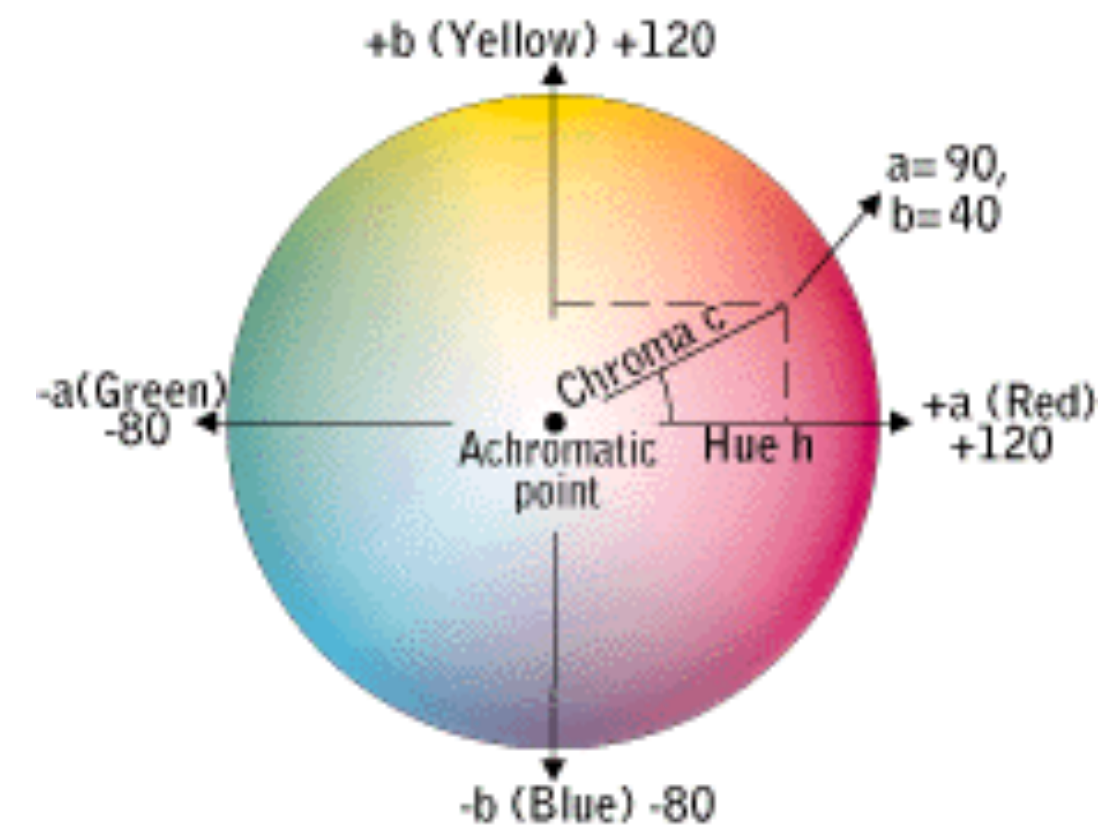
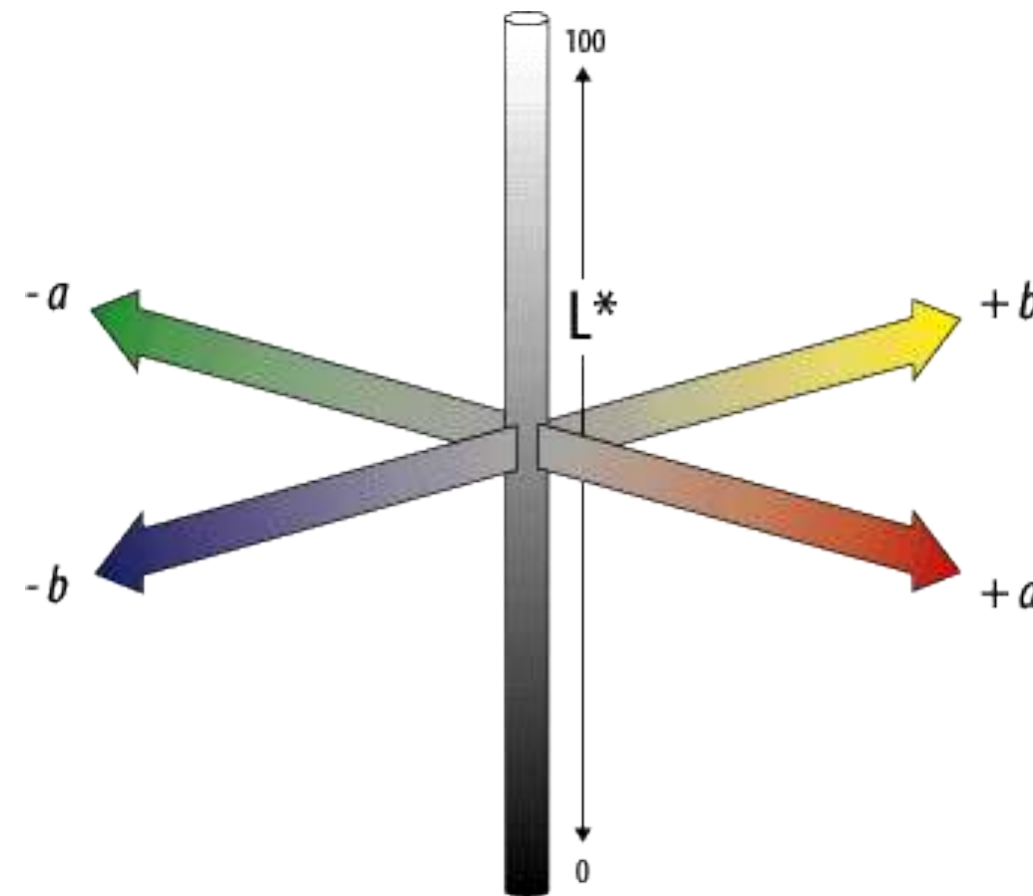
Uniforme Farbräume

- **Uniformer Farbraum** = Farbraum, in dem der Ort aller Farben mit gleicher wahrgenommener Distanz zu einer beliebigen gegebenen Farbe einen Kreis ergibt (d.h., die MacAdams-Ellipsen werden zu Kreisen)
 - M.a.W.: wahrgenommene Distanz = euklidische Distanz
- Läßt sich nur durch **nicht-lineare Transformation** erreichen



Beispiel: der CIE Lab-Farbraum (aka L*a*b*)

- Verwendete Achsen:
 - L = Luminanz
 - a,b = Gegenfarbenachsen

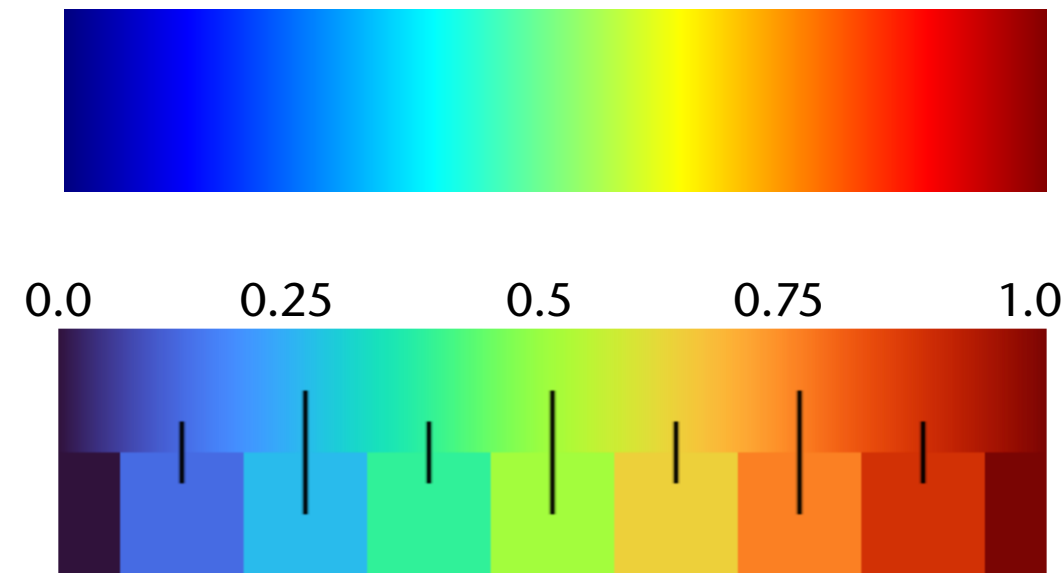


- Transformation (o.Bew.)
von XYZ $\longrightarrow$ Lab,
wobei der Weißpunkt
(X_w, Y_w, Z_w) gegeben sein muss

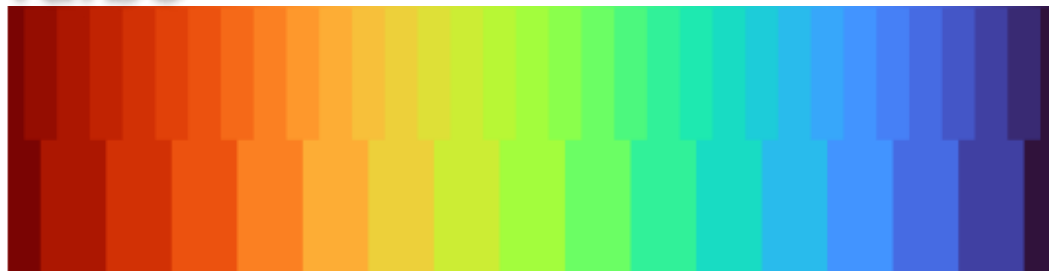
$$L = 116 \left(\frac{Y}{Y_w} \right)^{\frac{1}{3}} \quad a = 500 \left[\left(\frac{X}{X_w} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_w} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad b = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_w} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_w} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$$

Nochmal Color-Maps (Falschfarben)

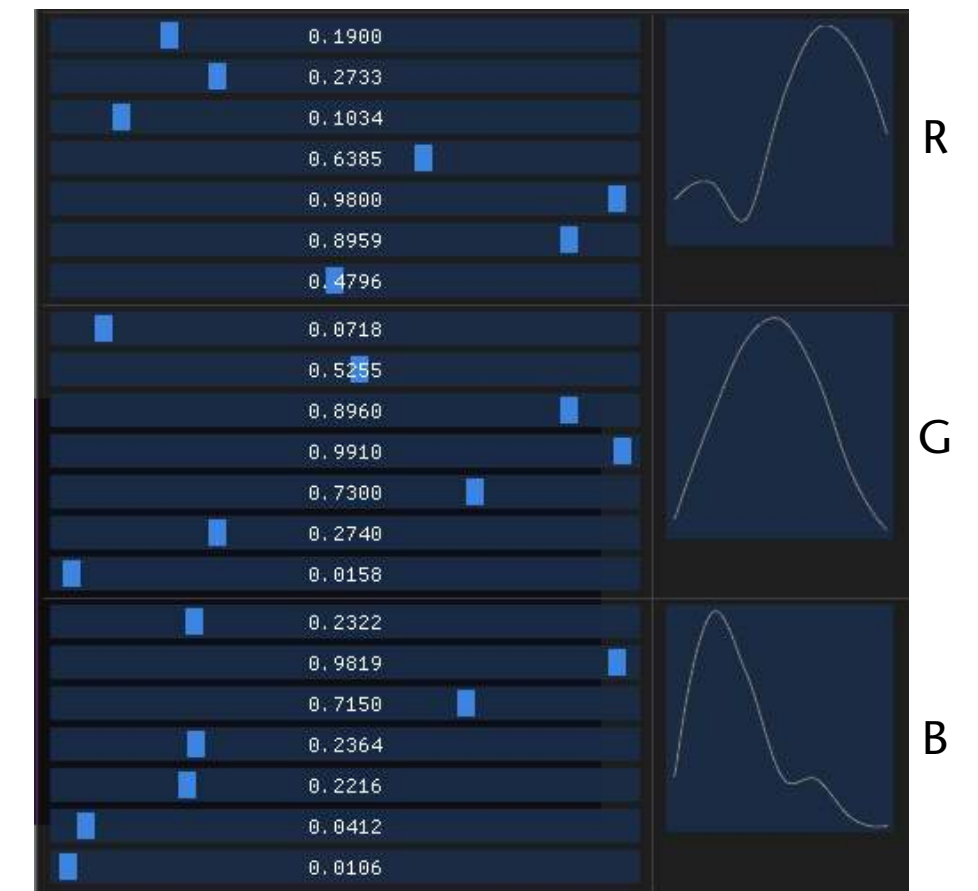
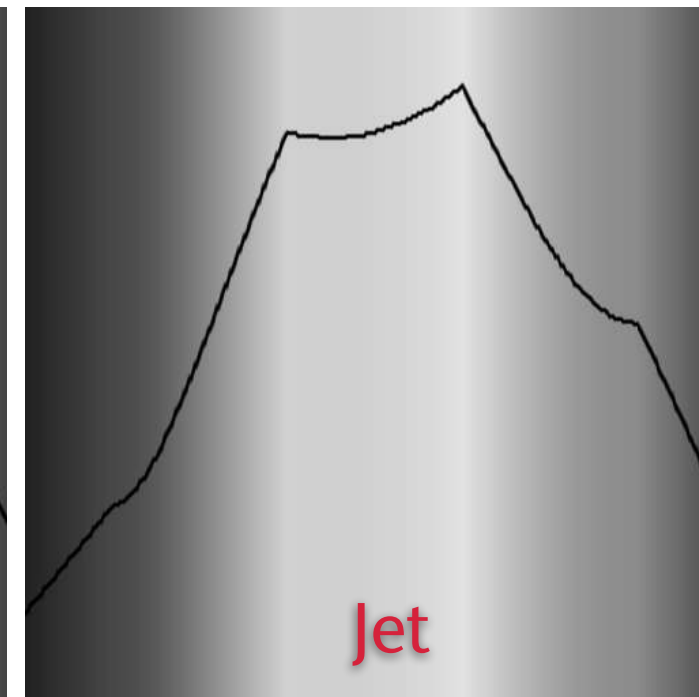
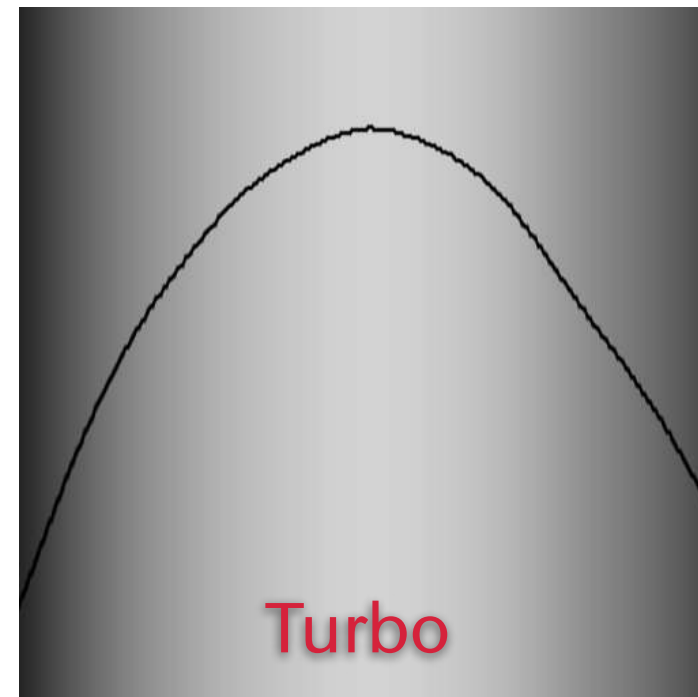
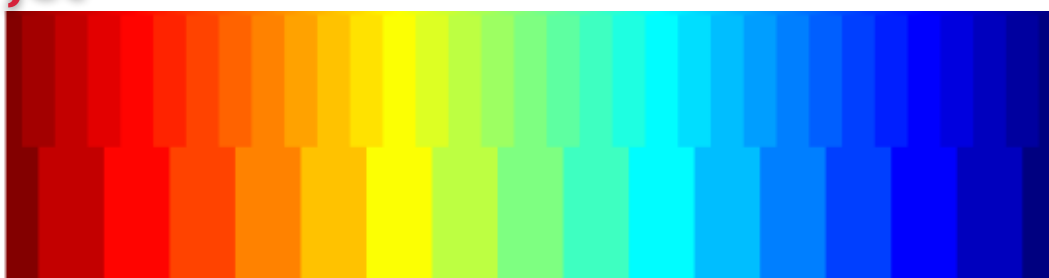
- Problem der "Jet"-Funktion: sehr ungleichmäßiger perzeptuell wahrgenommener Helligkeitsverlauf → "Banding"-Artefakte, besonders in Gelb und Cyan
- Bessere Color-Map: "Turbo" [Google 2019]
 - Manuell konstruiert mittels 3 Transferfunktionen für R,G,B
 - Wahrgenommene Helligkeit ist glatter
 - Gleichmäßigere Abstände zwischen den Farben

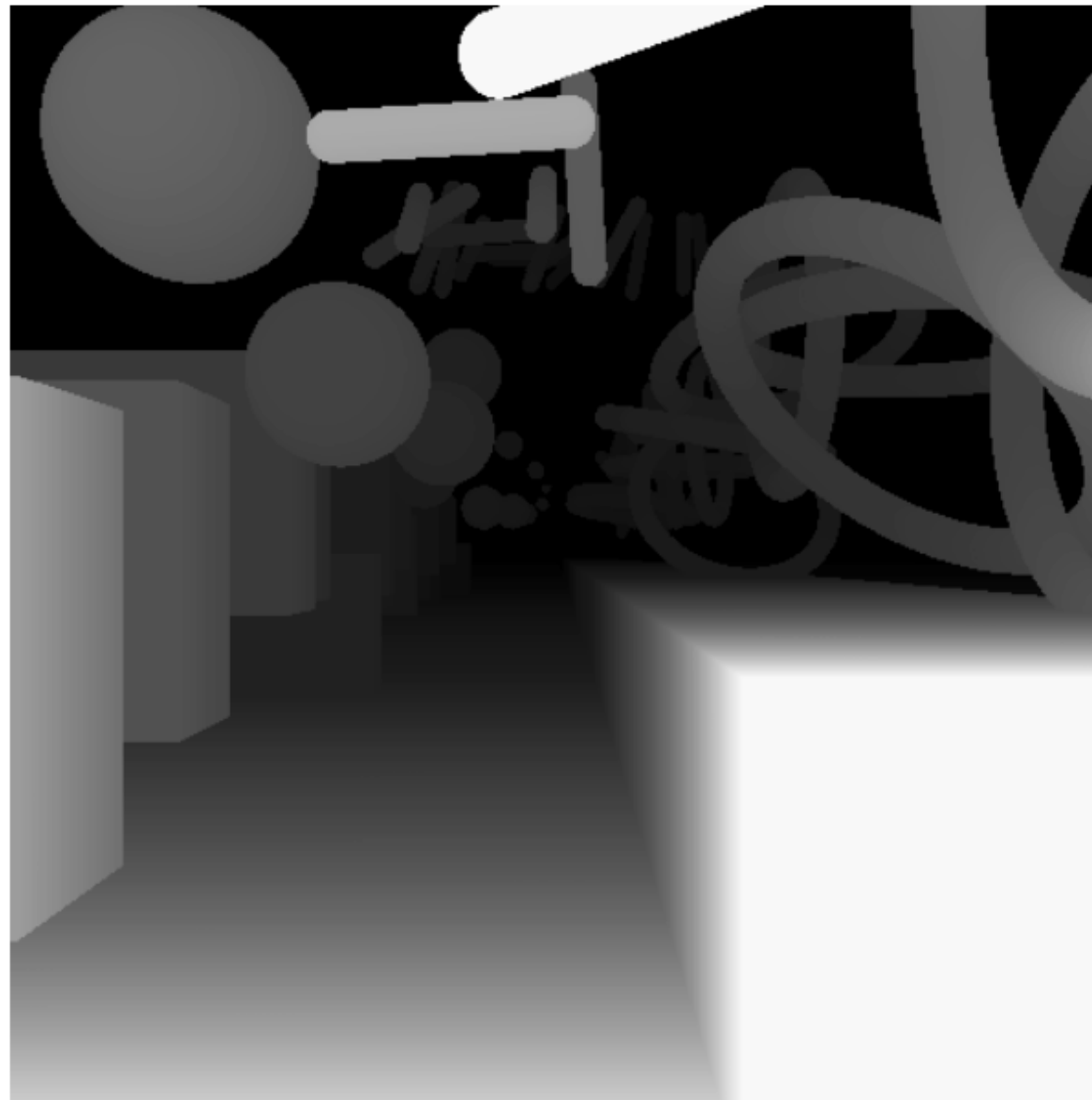


Turbo

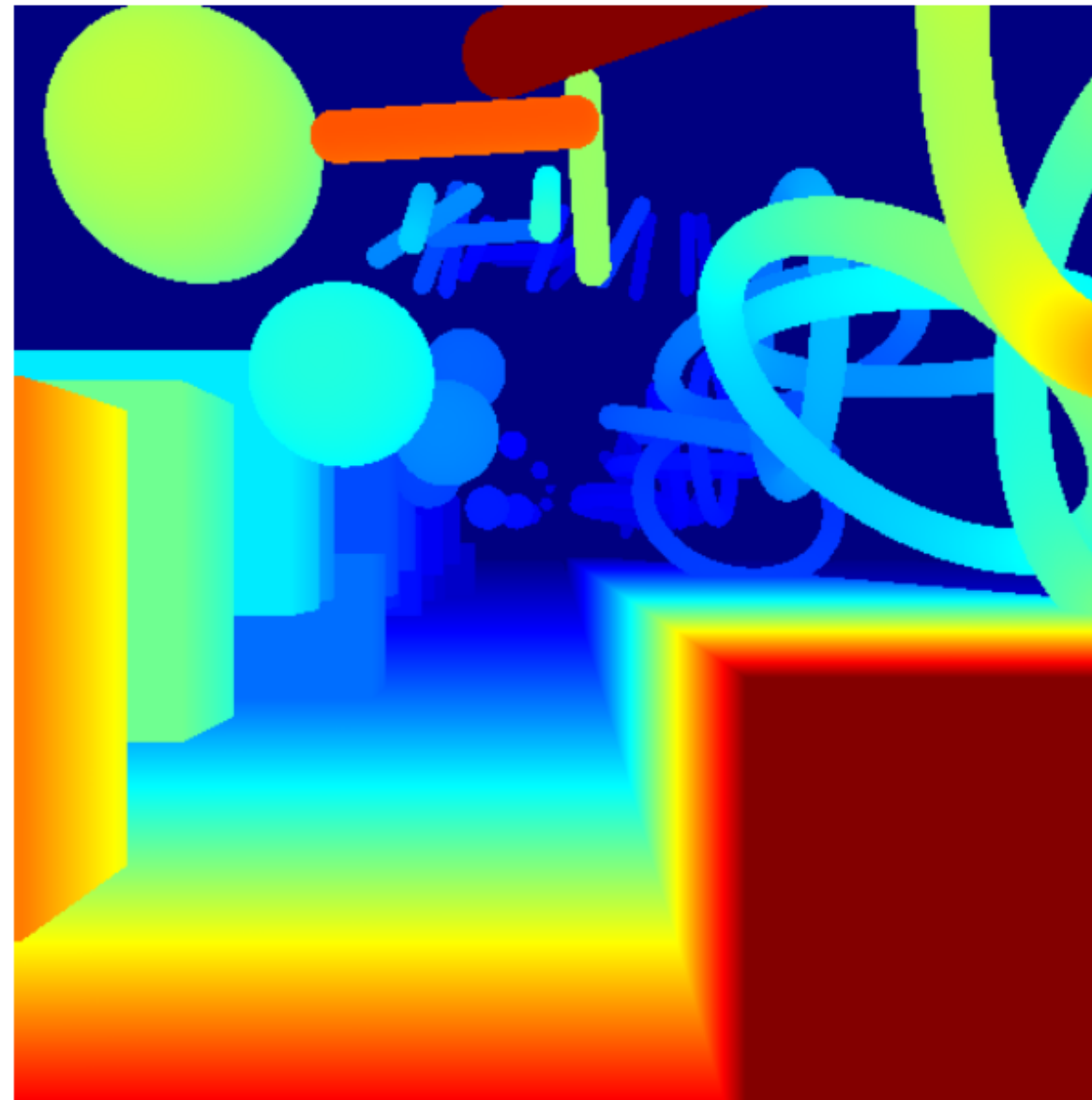


Jet

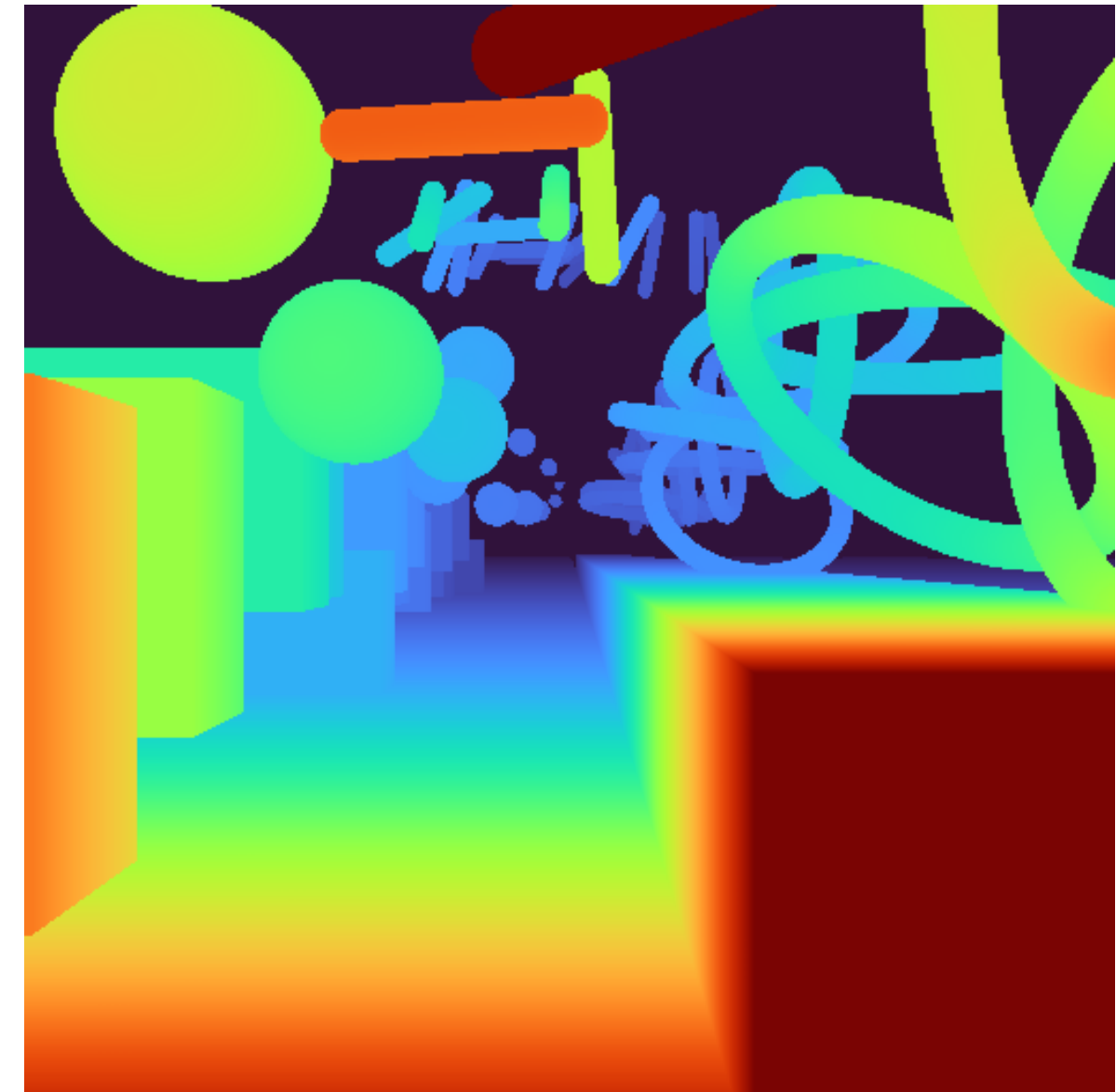




Grayscale



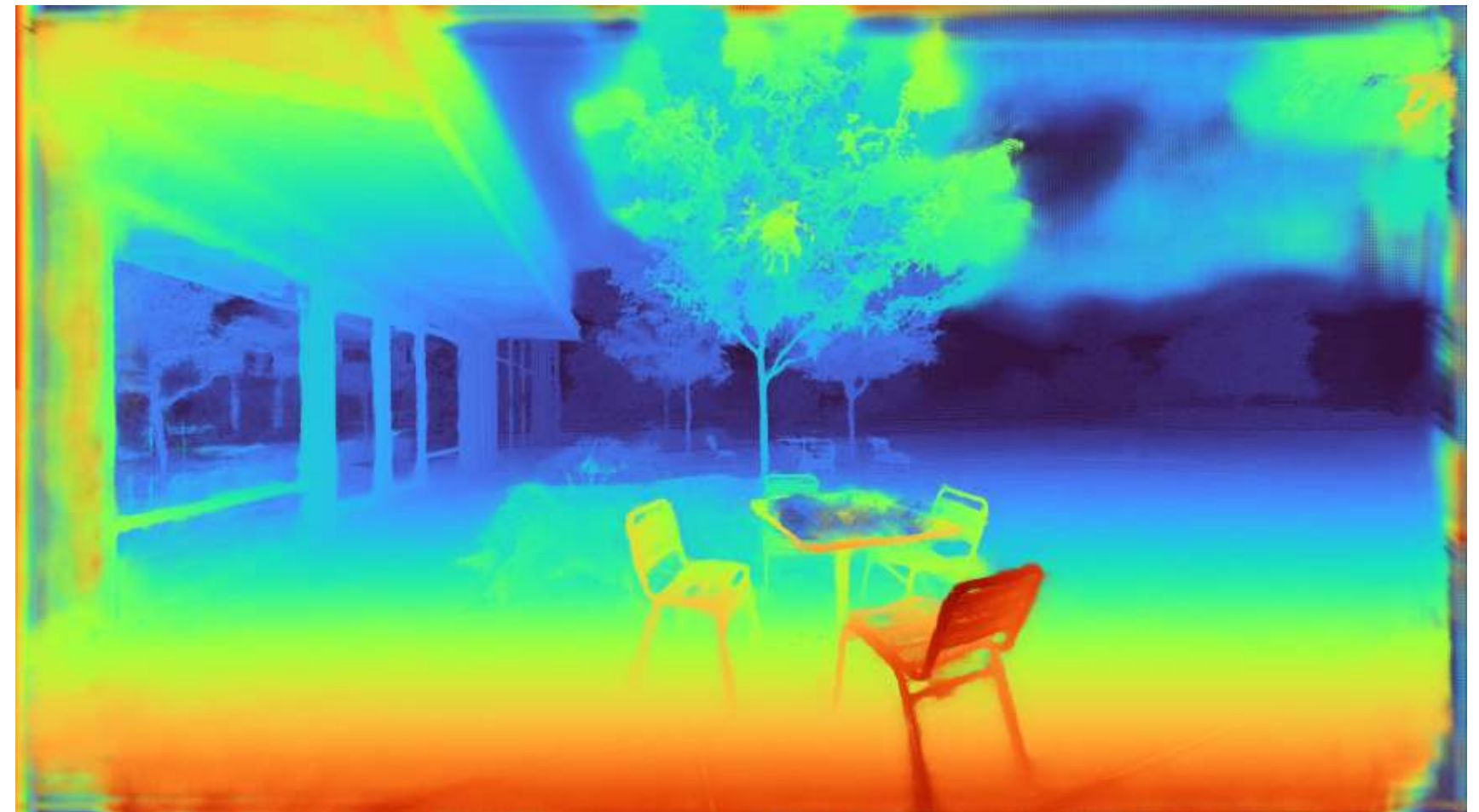
Jet



Turbo



Inferno (Matlab)

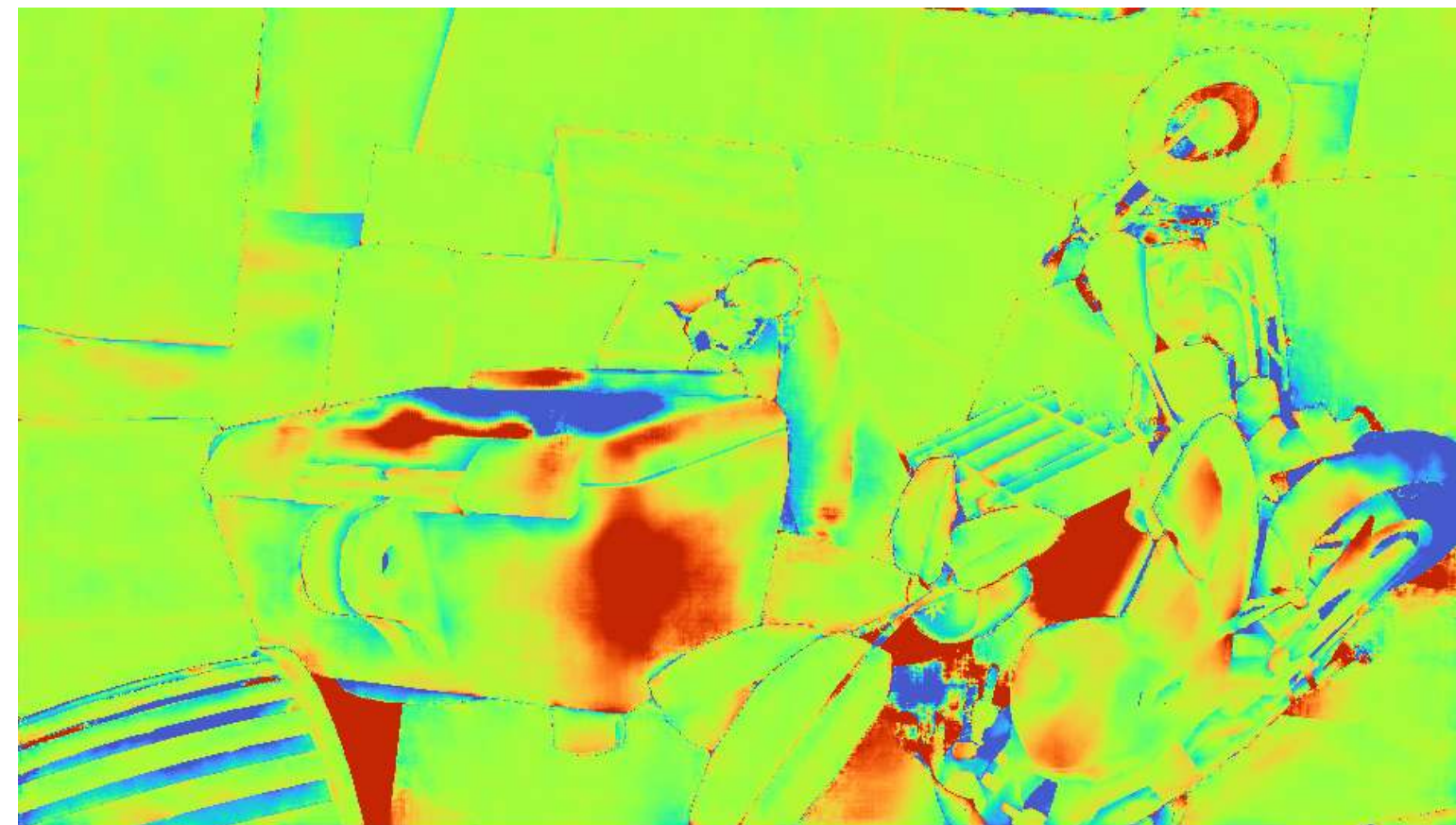


Turbo

Ground truth



Estimated



Difference color coded:

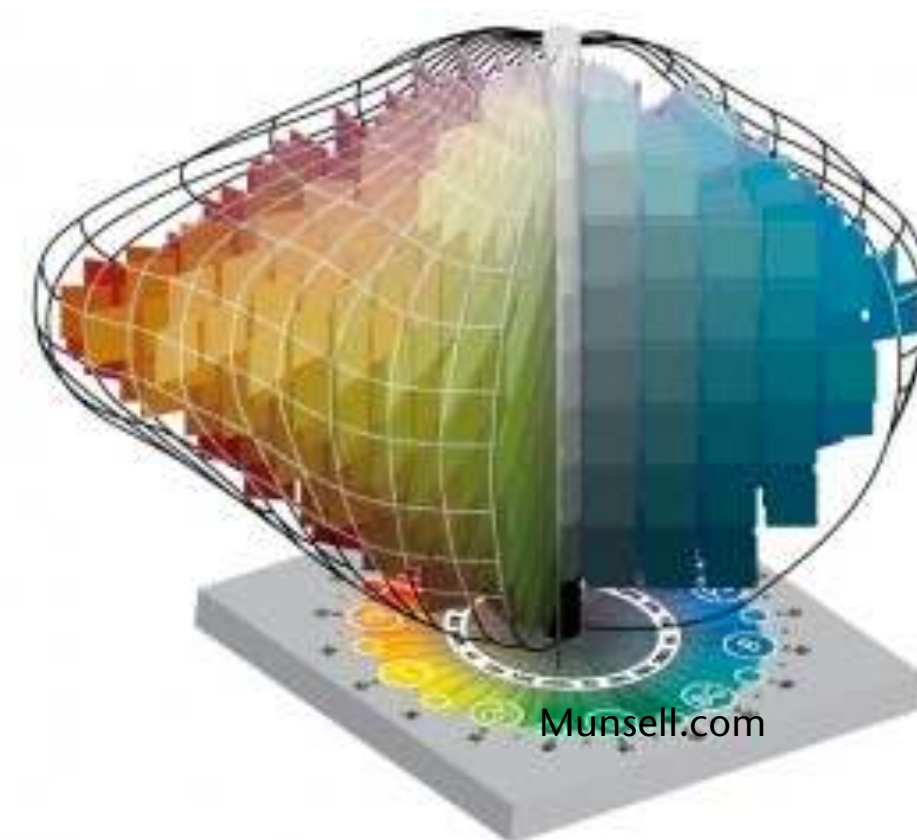
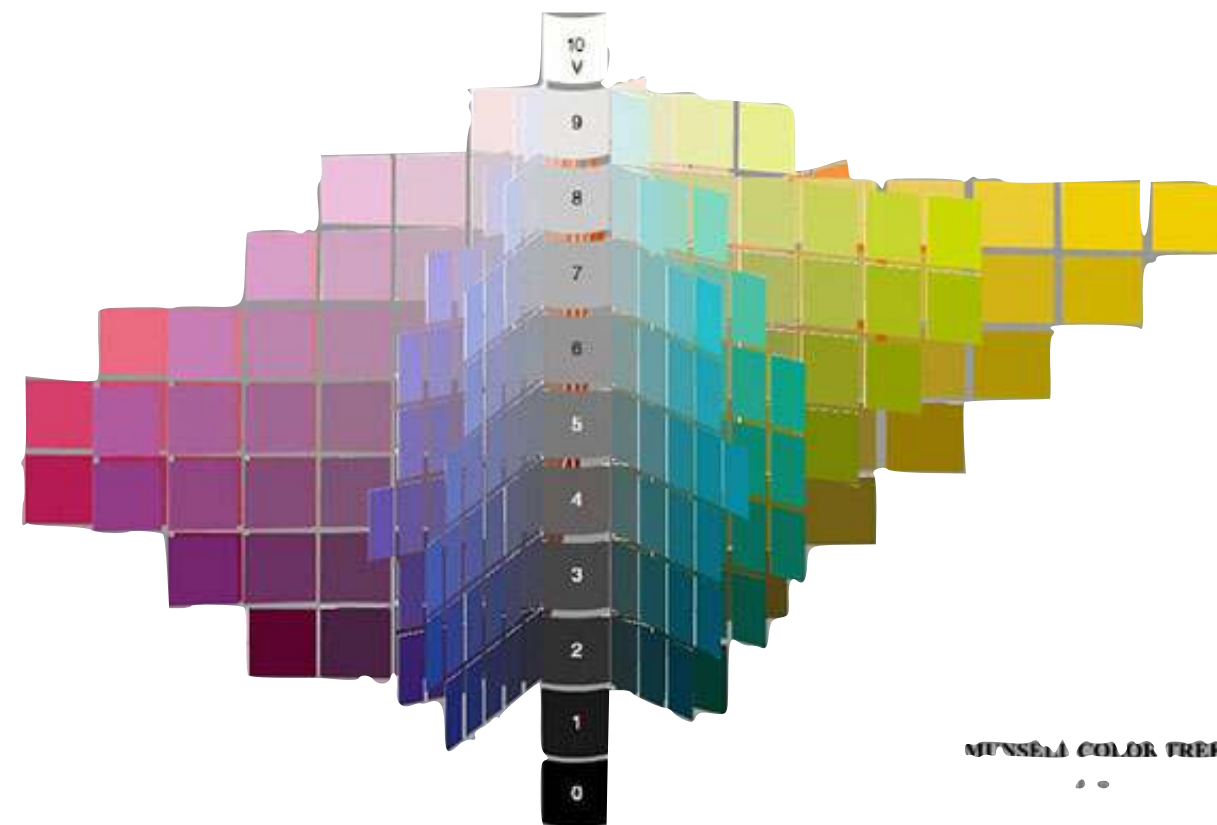
0 → grün

<0 → blau

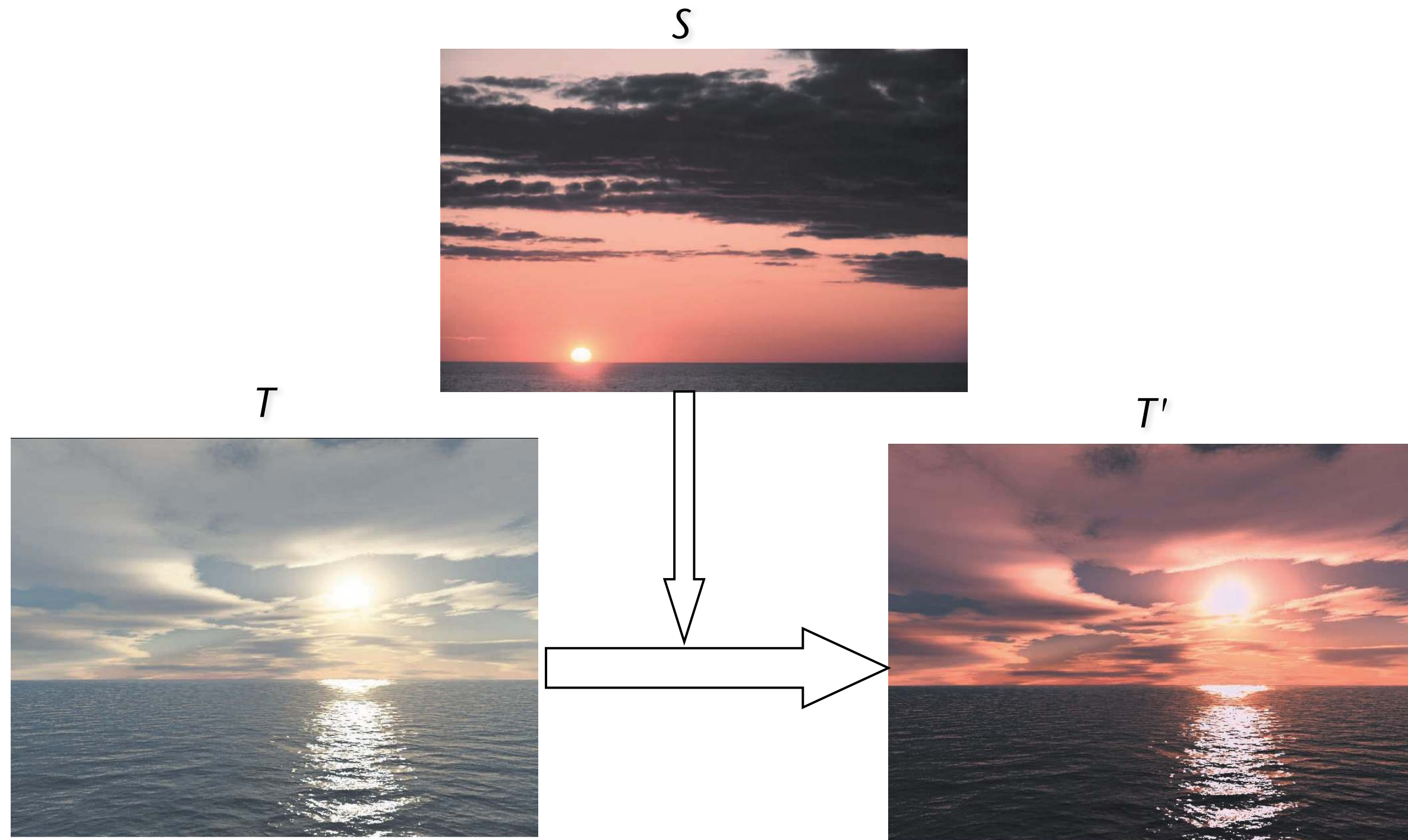
>0 → rot

Der Munsell Color Space

- Ca. 1905 entwickelt durch sehr viele Untersuchungen an Probanden
- 3 Koordinaten: Hue, Value, Chroma
 - Sehr schwer damit zu rechnen, daher für Algorithmen nicht geeignet
- Sehr beliebt bei Innenarchitekten, Textil- und Lack-Industrie, etc.



- Aufgabe: Farben eines Quellbildes S (Source) auf ein Zielbild T (Target) übertragen

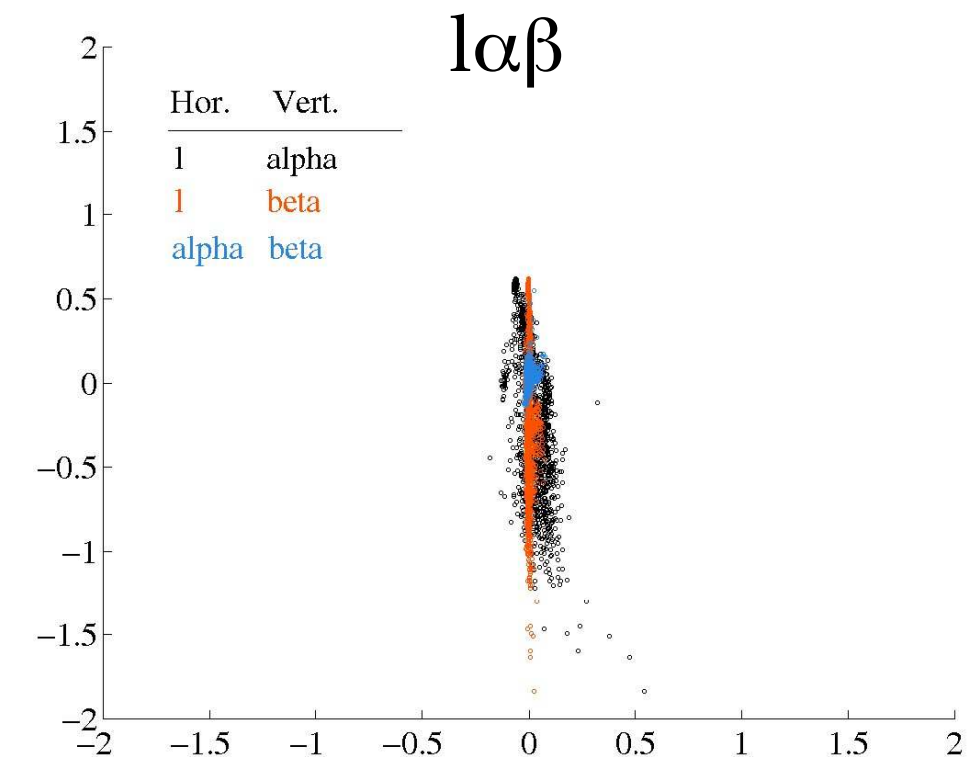
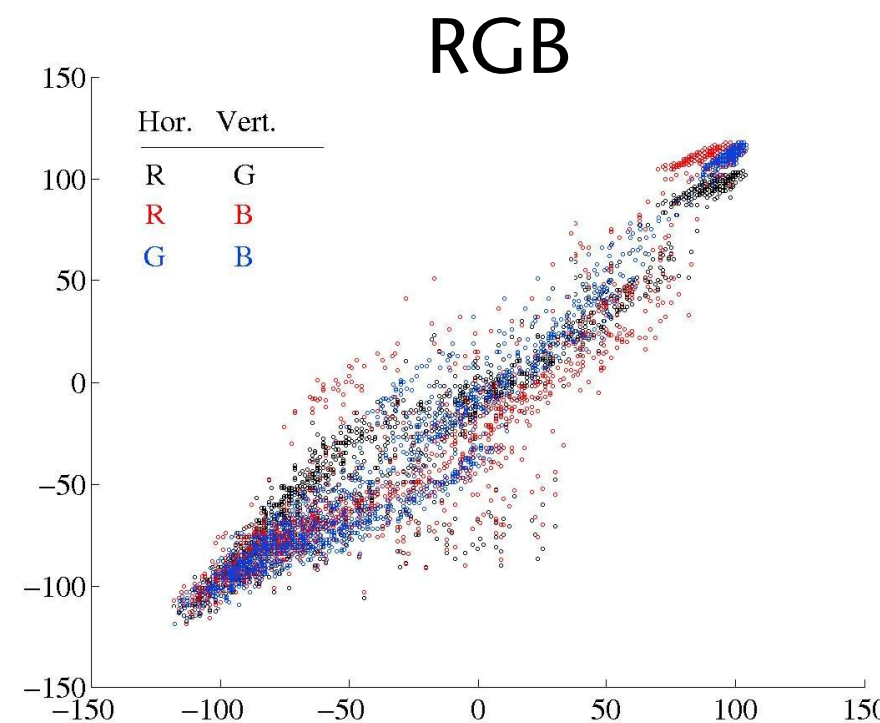


Problem

- R-, G- und B-Werte sind normalerweise stark korreliert
 - Beispiel: Histogramm eines natürlichen Bildes im RGB-Raum
- Für Color-Transfer nötig: Farbraum mit minimaler Korrelation der Kanäle
- Der $l\alpha\beta$ -Farbraum erfüllt diese Eigenschaft rel. gut

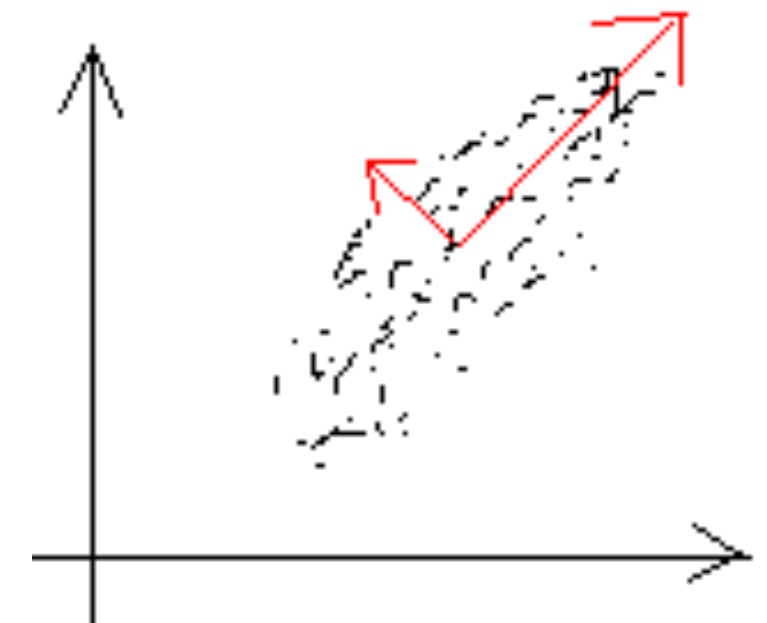


Pixel des Bildes, dargestellt als Scatterplot im Farbraum



Der $l\alpha\beta$ - Farbraum

- Entstanden bei Untersuchung der menschlichen Farbwahrnehmung
- 1. Konvertierung der RGB-Bilder in einen an die LMS-Cones angelehnten Farbraum
- 2. Logarithmierung der Farbkanäle
 - Wegen Weber-Fechner Gesetz: Stärke von Sinneseindrücken verläuft logarithmisch zur Intensität des physikalischen Reizes
- 3. Koordinatentransformation, so dass Korrelation minimal:
 - Nähere Histogramm über die Farben durch Ellipsoid an
 - Dann Hauptachsentransformation (PCA)



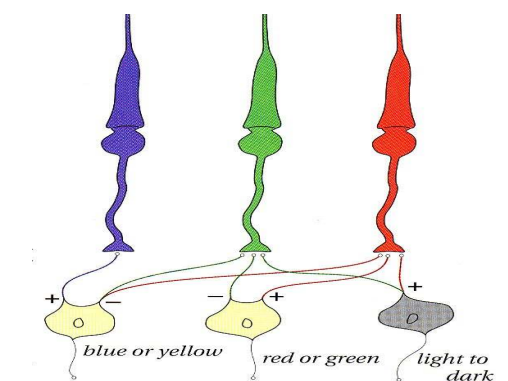
Konvertierung vom RGB- in den $l\alpha\beta$ -Raum

$$1. \quad \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5141 & 0.3239 & 0.1604 \\ 0.2651 & 0.6702 & 0.0641 \\ 0.0241 & 0.1228 & 0.8444 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

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

$$2. \quad \begin{bmatrix} \mathcal{L} \\ \mathcal{M} \\ \mathcal{S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \log L - \langle \log L \rangle \\ \log M - \langle \log M \rangle \\ \log S - \langle \log S \rangle \end{bmatrix} \quad \langle x \rangle = \text{Mittelwert}$$

$$3. \quad \begin{bmatrix} l \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{6}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{L} \\ \mathcal{M} \\ \mathcal{S} \end{bmatrix}$$



Der Farbtransfer-Algorithmus

- Quellbild S und Zielbild T in den $l\alpha\beta$ -Farbraum konvertieren
- Berechne Mittelwert $\langle (I^S, \alpha^S, \beta^S) \rangle$, $\langle (I^T, \alpha^T, \beta^T) \rangle$ und Standardabweichung $(\sigma_I^S, \sigma_\alpha^S, \sigma_\beta^S)$, $(\sigma_I^T, \sigma_\alpha^T, \sigma_\beta^T)$ aller Pixel
- Für alle Pixel des Zielbildes T :

1. Erwartungswert (DC-Komponente) aus T subtrahieren:

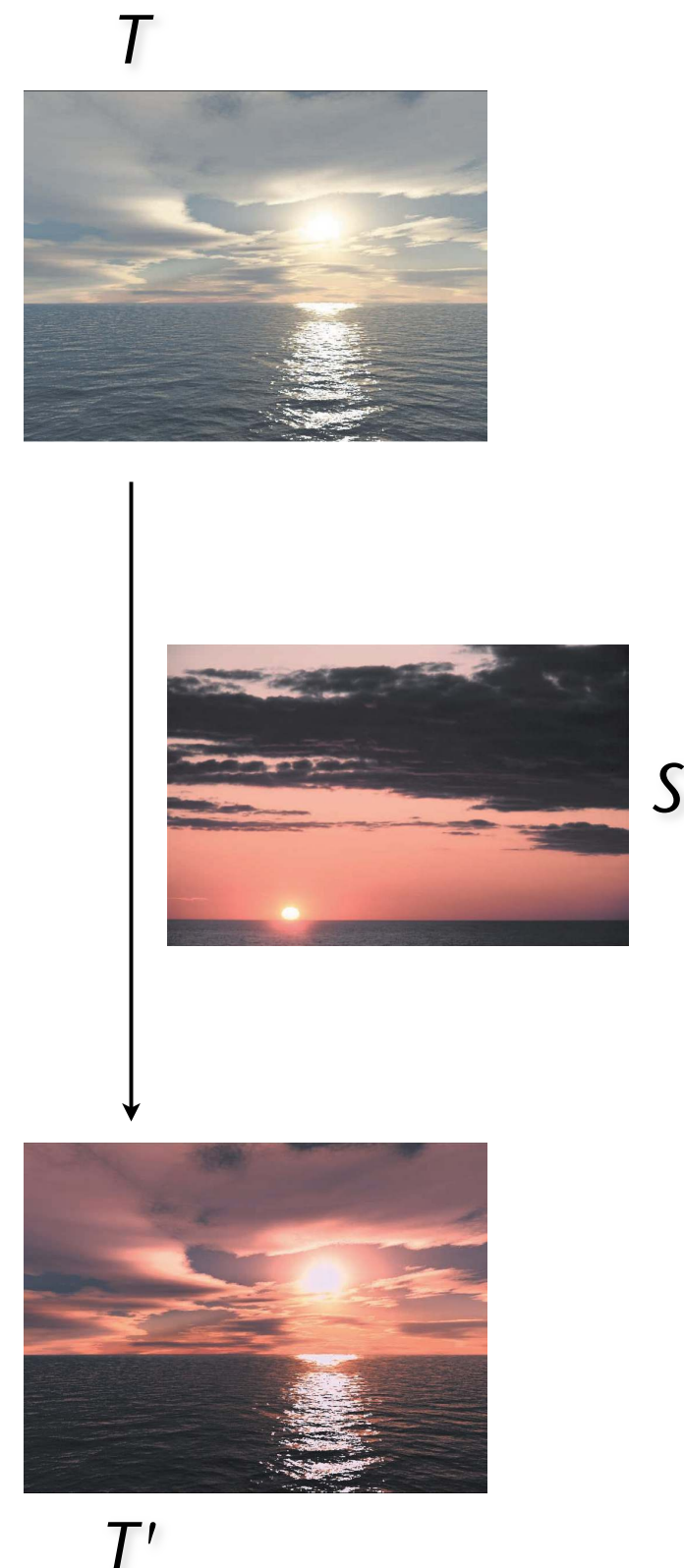
$$(l_i^1, \alpha_i^1, \beta_i^1) = (l_i^T, \alpha_i^T, \beta_i^T) - \langle (I^T, \alpha^T, \beta^T) \rangle$$

2. Standardabweichung ($\propto$ Varianz) von T an S anpassen:

$$(l_i^2, \alpha_i^2, \beta_i^2) = \left(\frac{\sigma_I^S}{\sigma_I^T} \cdot l_i^1, \frac{\sigma_\alpha^S}{\sigma_\alpha^T} \cdot \alpha_i^1, \frac{\sigma_\beta^S}{\sigma_\beta^T} \cdot \beta_i^1 \right)$$

3. Pixelwerte um Erwartungswert von S verschieben:

$$(l_i^3, \alpha_i^3, \beta_i^3) = (l_i^2, \alpha_i^2, \beta_i^2) + \langle (I^S, \alpha^S, \beta^S) \rangle$$



- Ergebnis: Zielbild T hat dieselben statistischen Momente wie das Source-Bild S (aber natürlich andere konkrete Farbwerte in den Pixeln!)

Beispiele

T



S



T'



jetzt mit "dramatischem" Effekt

T



S



T'



Integration computer-generierter Bilder in natürliche Aufnahmen

unkorrigiert



korrigiert



unkorrigiert

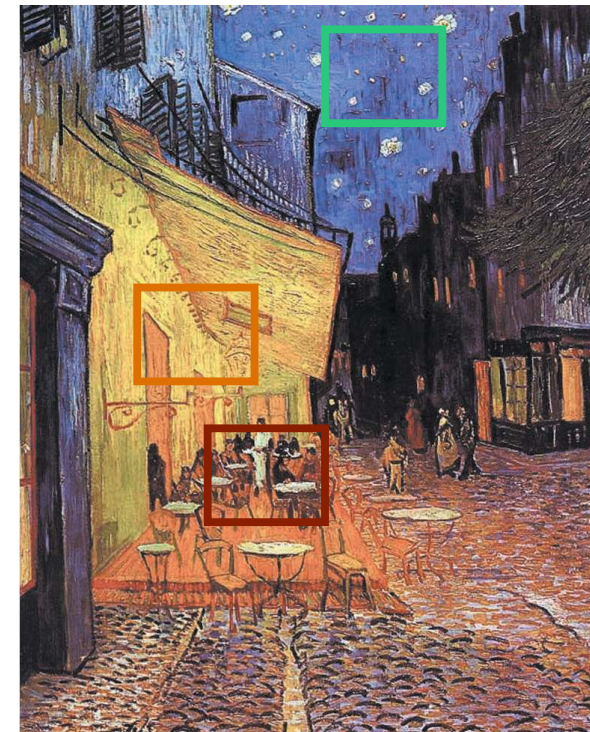
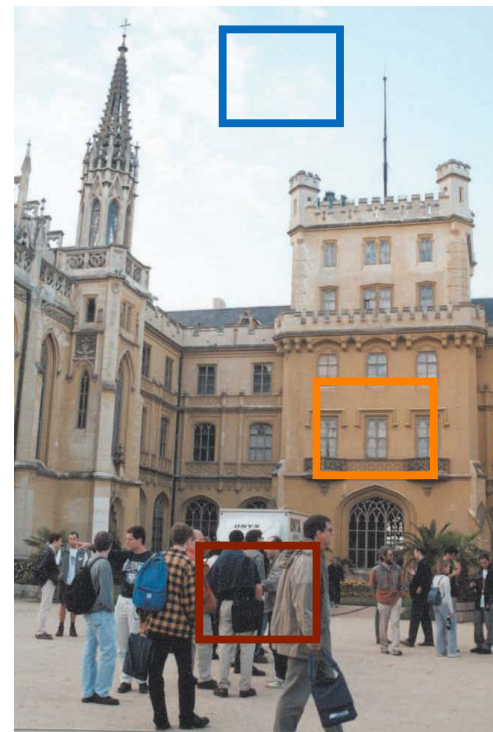


korrigiert



Verbesserungen

- Probleme bei stark unterschiedlichen Bildern (s.u.)
- Bilder in sinnvolle Bereiche aufteilen (Cluster hier: Himmel, Waende, Umgebung der Caffee-Tische/Personen)
- Color-Transfer gemäß den Statistiken der Cluster bestimmen
- Für jedes Pixel alle Transformationen durchführen und mit inversem Abstand der Pixel von Clusterzentren gewichten
- Was ist sinnvoller: Abstand im Bild oder im Farbraum?



Select Bibliography



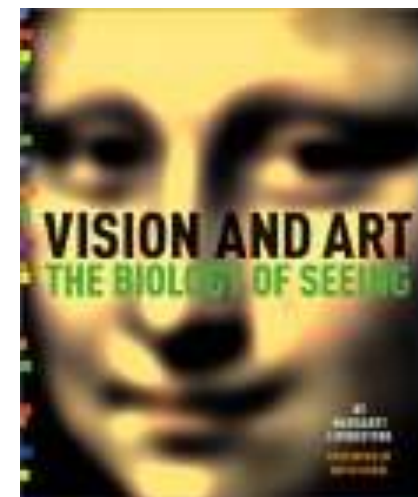
Vision Science

by Stephen E. Palmer
MIT Press; ISBN: 0262161834
760 pages (May 7, 1999)



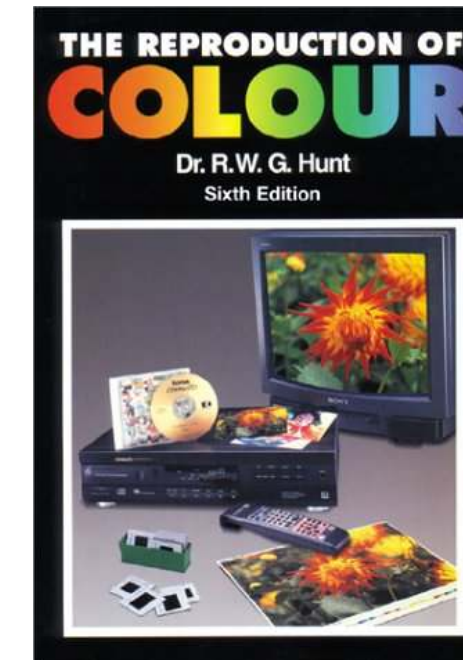
Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology

by Roy S. Berns, Fred W. Billmeyer, Max Saltzman
Wiley-Interscience; ISBN: 047119459X
304 pages 3 edition (March 31, 2000)



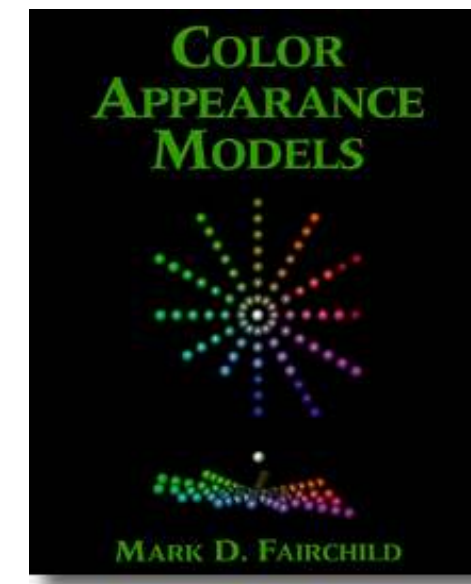
Vision and Art : The Biology of Seeing

by Margaret Livingstone, David H. Hubel
Harry N Abrams; ISBN: 0810904063
208 pages (May 2002)



The Reproduction of Color

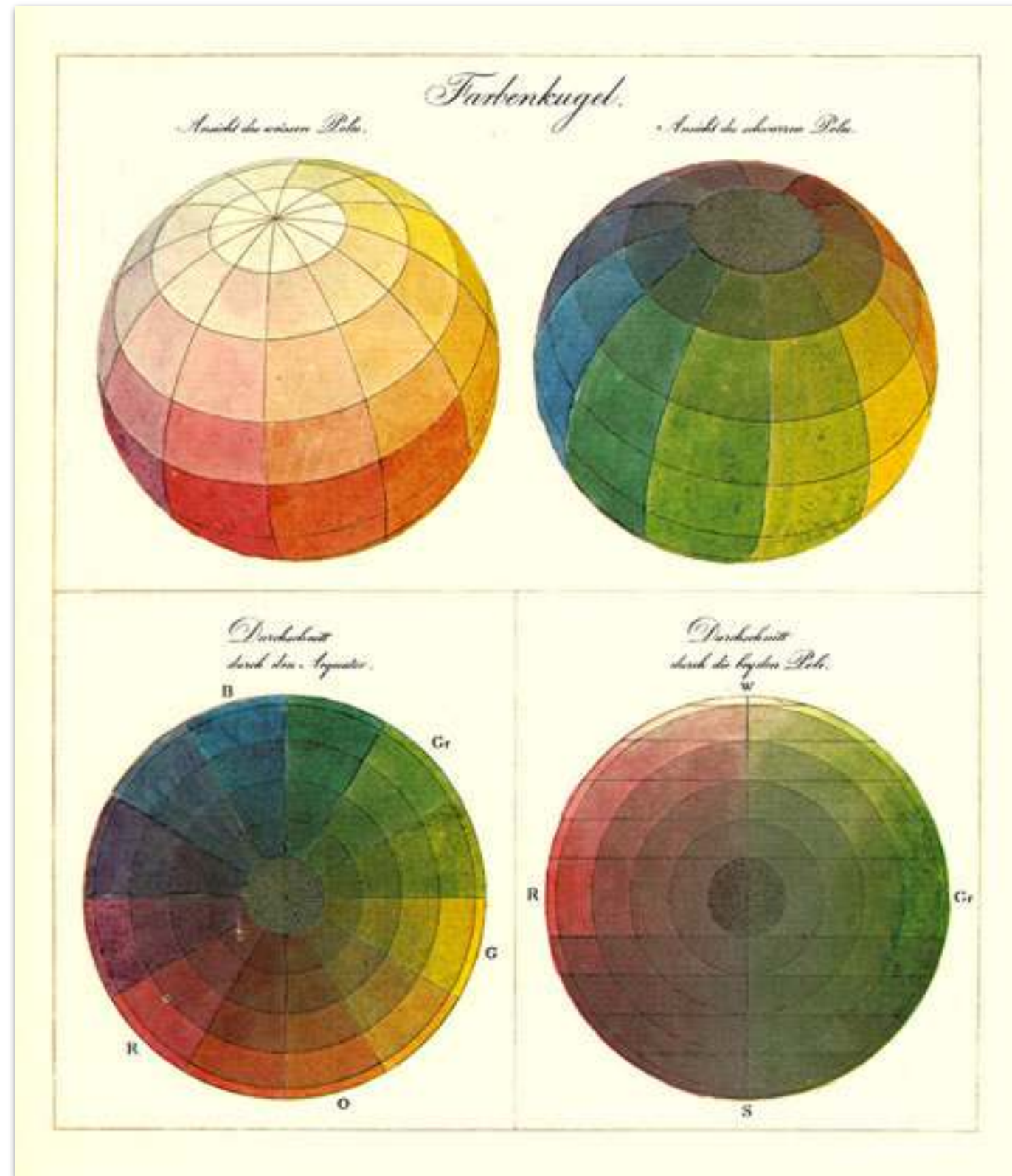
by R. W. G. Hunt
Fountain Press, 1995



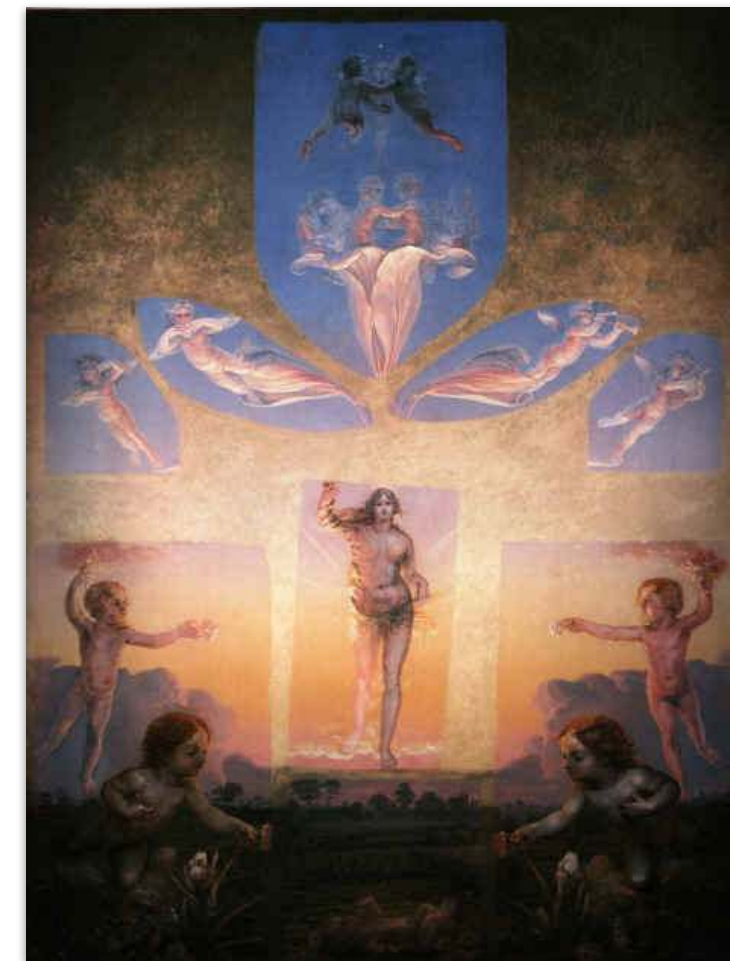
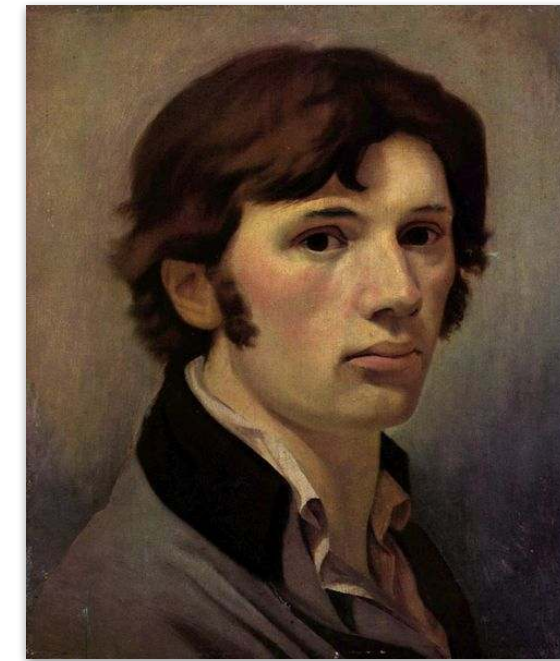
Color Appearance Models

by Mark Fairchild
Addison Wesley, 1998

Phillip Otto Runge



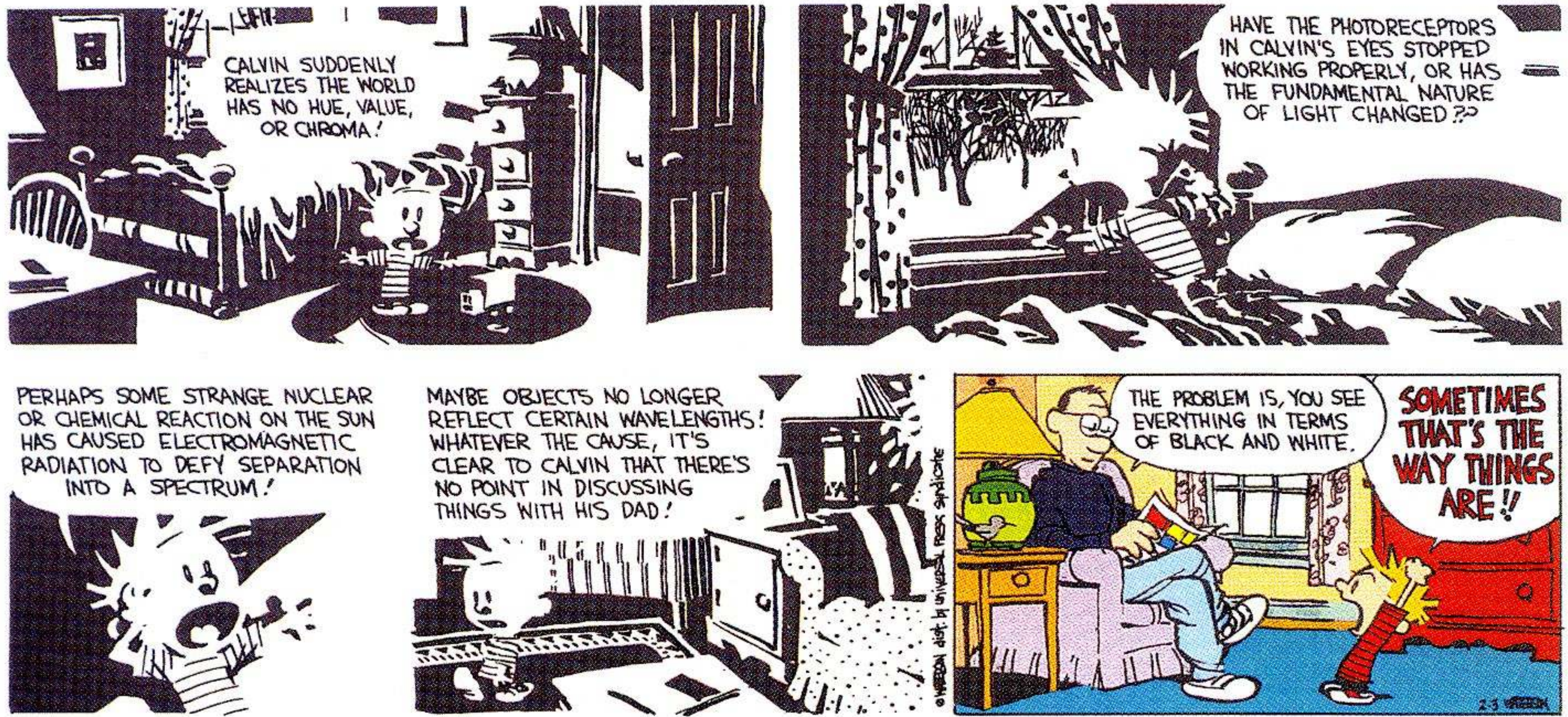
[Runge: *Farbenkugel*, Hamburg 1810]



“Wär nicht das Auge sonnenhaft,
die Sonne könnte es nie erblicken.
Läg nicht in uns des Gottes eigne Kraft,
wie könnte uns Göttliches entzücken?”

– *Goethe, Zahme Xenien III*

Calvin and Hobbes



CALVIN AND HOBBS © 1991 Watterson. Reprinted with permission of UNIVERSAL PRESS SYNDICATE. All rights reserved.

