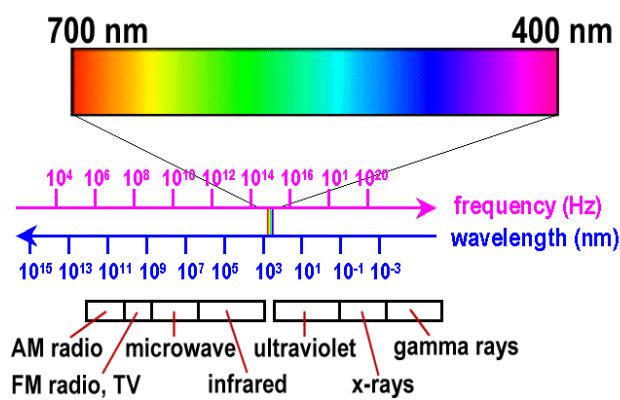


## Licht und Farbe

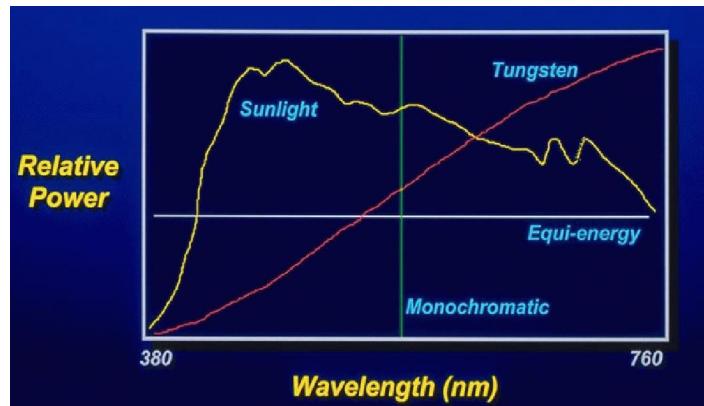
## Licht

Die elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von 400-700 nm wird als *sichtbares Licht* wahrgenommen.

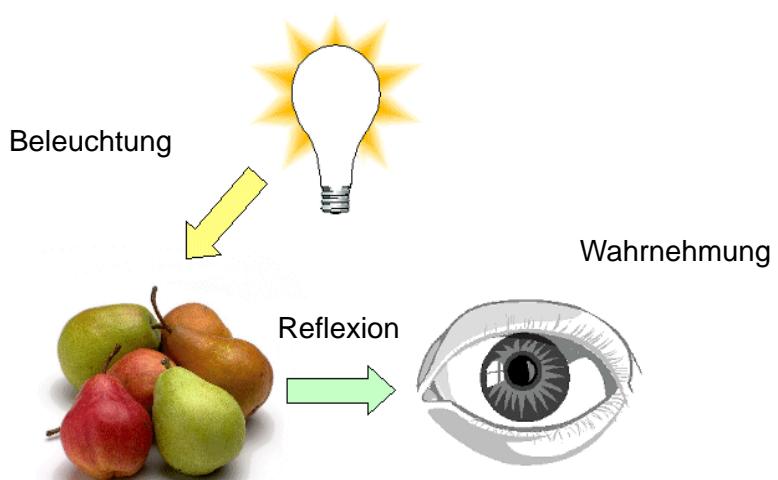


## Verschiedene Lichtquellen

Lichtquellen unterscheiden sich in ihrer spektralen Zusammensetzung und werden durch ihr Spektrum  $I(\lambda)$  beschrieben..



## Komponenten der Farbe



## Farbe Sehen

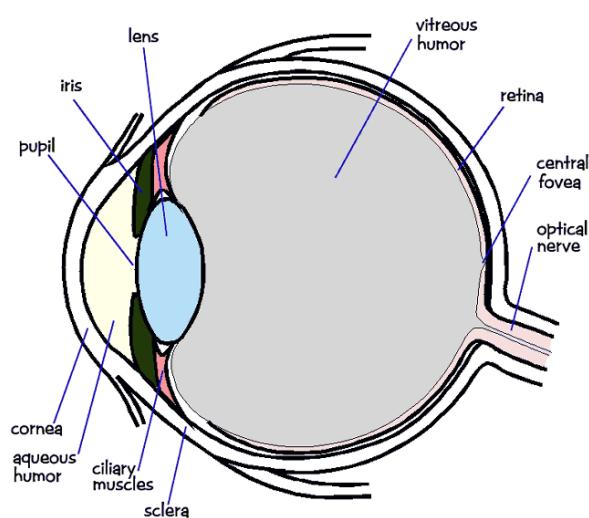
- Licht erreicht das Auge
- Licht wird von Sehzellen absorbiert
- Signale werden an das Gehirn geleitet
- Signale werden zu Farbe verrechnet

Genaue Funktionsweise des  
Gehirns weitgehend unklar!

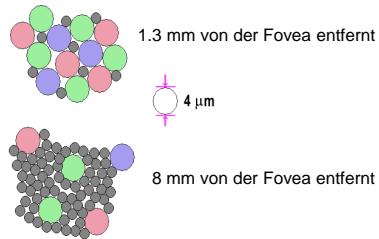
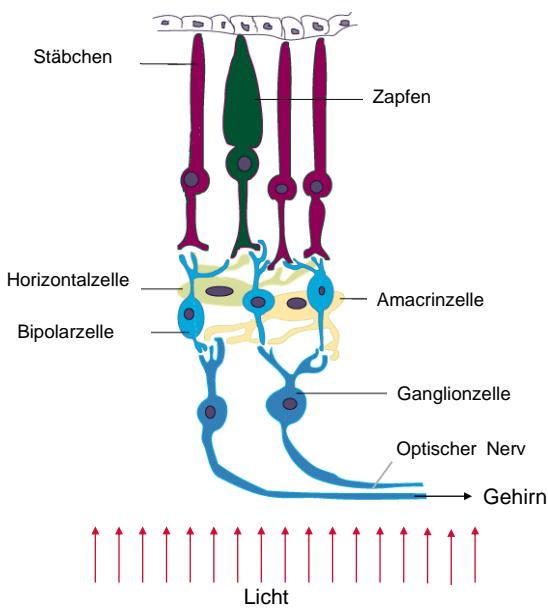
## Das Auge

Der lichtempfindliche Teil des  
Auges ist die *Retina*.

Die Retina setzt sich in der  
Hauptsache aus zwei Zelltypen  
zusammen, den Stäbchen und  
den Zäpfchen. Wobei nur die  
Zäpfchen farbempfindlich sind



## Die Retina



Es gibt etwa:

120-150 Millionen Stäbchen

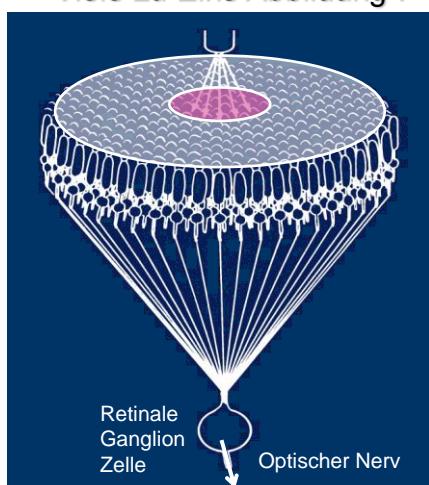
7- 8 Millionen Zäpfchen

Aber nur etwa 1 Million

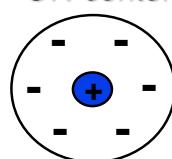
Nerven verlassen das Auge!

## Retinale Rezeptive Felder

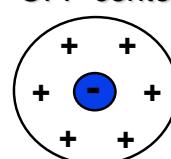
Viele zu Eins Abbildung :



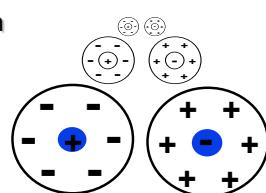
ON-center



OFF-center



Die Grösse der Rezeptiven  
Felder ist sehr  
unterschiedlich.

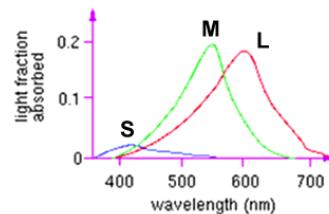
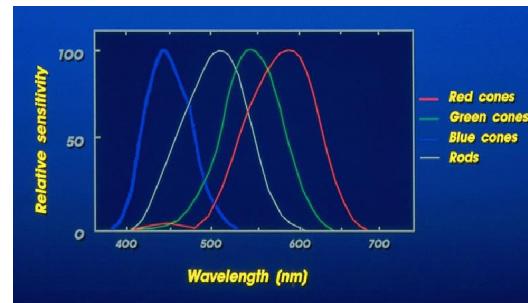


RF's kontrollieren die lokale  
Lichempfindlichkeit.

## Lichtabsorption der Sehzellen

Die verschiedenen Sehzellen unterscheiden sich in ihrem Absorptionsverhalten als auch ihrer Empfindlichkeit.

Die Stäbchen sind bei Tageslicht in Sättigung und die drei Zapfentypen sind für ein Sehen in der Dämmerung zu unempfindlich



## Der Rezeptorraum

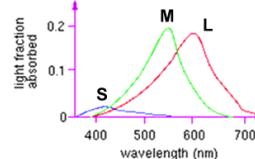
Die Erregung eines einzelner Rezeptorzelle ist das Produkt aus spektraler Empfindlichkeit und spektraler Lichtanregung.

$$e_k = \int \varphi_k(\lambda) \cdot I(\lambda) d\lambda$$

$$e_m = \int \varphi_m(\lambda) \cdot I(\lambda) d\lambda \quad \longrightarrow [e_k, e_m, e_l]^T$$

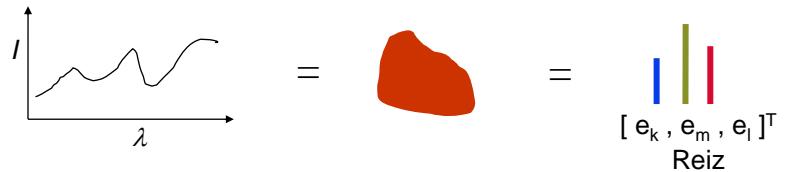
$$e_l = \int \varphi_l(\lambda) \cdot I(\lambda) d\lambda$$

Das Gehirn „sieht“ nur die Reaktion der drei Rezeptoren!



Metamerie ==>

## Metamerie, die Mehrdeutigkeit eines Reizes



Lichter verschiedenen Spektrums, welche die selbe Farbwahrnehmung hervorrufen heißen metamer

Fundamentales Prinzip der Farbreproduktion!

Ziel: Mischen jeder beliebigen Farbe aus drei Grundfarben (Primärvalenzen).

## Farbmehrheit

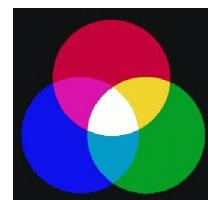
Messen und Vergleich von Farben

- Farbvergleich durch Mischen
- CIE -Normierung
- Grassmann'sche Gesetze zur Farbmischung

# Farbmischung

## Additive Farbmischung

Aus drei Basis-Farvalenzen  $R, G, B$ , soll ein unbekanntes Licht  $U$  gemischt werden.  
(z.B. mit  $R = 700\text{nm}$ ,  $G = 546.1\text{nm}$ ,  $B = 435.8\text{nm}$ )

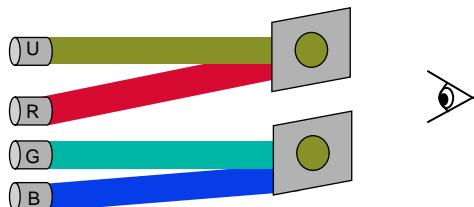


$$U = c_1R + c_2G + c_3B$$

Nicht immer möglich. In manchen Fällen gelingt nur

$$U + c_1R = c_2G + c_3B$$

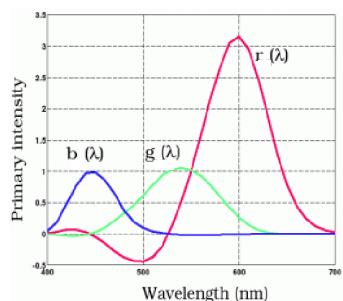
$$\Rightarrow U = -c_1R + c_2G + c_3B$$



# Spektralwerte

Aus den Primärvalenzen ( $R = 700\text{nm}$ ,  $G = 546.1\text{nm}$ ,  $B = 435.8\text{nm}$ ) sollen nun alle reinen Spektalfarben  $F(\lambda)$  gemischt werden.

$$F(\lambda) = r(\lambda)R + g(\lambda)G + b(\lambda)B$$



$r(\lambda)$ ,  $g(\lambda)$ ,  $b(\lambda)$  sind die Spektralwertkurven (*Primary Intensities*) zu bestimmten Primärvalenzen.

## Das Farbdreieck

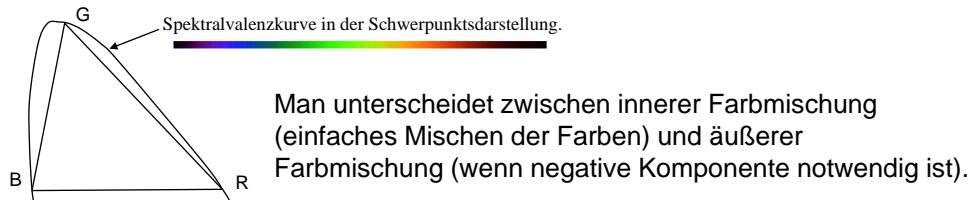
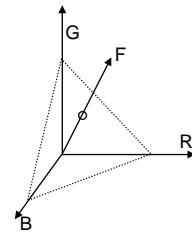
$$F = r_F R + g_F G + b_F B$$

Wechseln in normiertes Koordinatensystem

$$\bar{r}_F = \frac{r_F}{r_F + g_F + b_F}, \quad \bar{g}_F = \frac{g_F}{r_F + g_F + b_F}, \quad \bar{b}_F = \frac{b_F}{r_F + g_F + b_F}$$

$$\text{mit } \bar{r}_F + \bar{g}_F + \bar{b}_F = 1$$

können die Farben zweidimensional dargestellt werden.



## Grassmann'sche Gesetze

### Superposition

$S$  sei das Spektrum eines Lichts

$rgb$  seine drei Farbkoeffizienten

$$S_{a+b} = S_a + S_b$$

$$rgb_{a+b} = rgb_a + rgb_b$$

### Lineares System

3x3 Transformationsmatrix zwischen verschiedenen Basisvalenzsystemen.

====>

# Wechsel zwischen Farbsystemen

Gegeben zwei Primärvalenzsysteme  $S = R, G, B$  und  $S' = XYZ$

Gesucht  $T: S \rightarrow S'$

$$X = x_R R + x_G G + x_B B$$

$$Y = y_R R + y_G G + y_B B$$

$$Z = z_R R + z_G G + z_B B$$

$$\Rightarrow X = \begin{pmatrix} x_R \\ x_G \\ x_B \end{pmatrix}_S, Y = \begin{pmatrix} y_R \\ y_G \\ y_B \end{pmatrix}_S, Z = \begin{pmatrix} z_R \\ z_G \\ z_B \end{pmatrix}_S$$

$$T: S \rightarrow S' = \begin{bmatrix} x_R & x_G & x_B \\ y_R & y_G & y_B \\ z_R & z_G & z_B \end{bmatrix}$$

## XYZ-Farbsystem (CIE-Norm 1931)

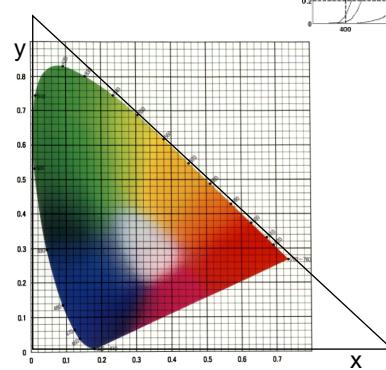
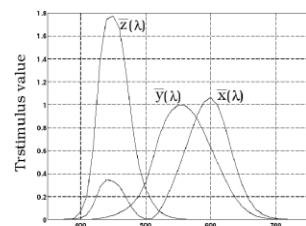
Es werden hypothetische Primärvalenzen  $X, Y, Z$  mit nur positiven Spektralwertkurven definiert.

Projektion von  $X, Y, Z$  in die  $X+Y+Z=1$  Ebene

$$x = X/(X+Y+Z)$$

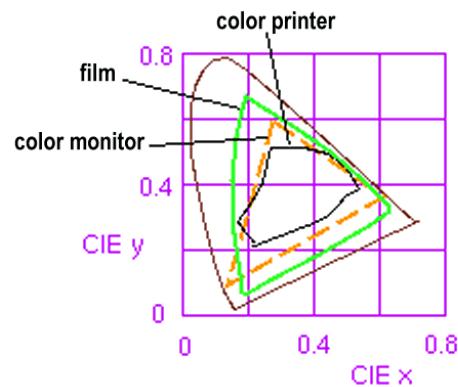
$$y = Y/(X+Y+Z)$$

$$z = 1 - (x+y)$$



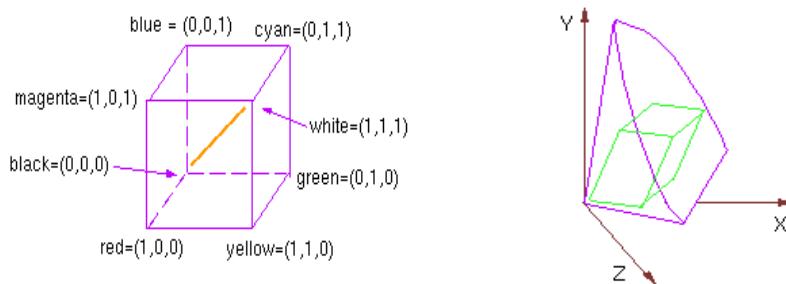
## Color Gamuts

Über die Farbwertanteile (chromaticities) lassen sich die verschiedensten Ausgabegeräte vergleichen.



## Der RGB Farbwürfel

Das additive Farbmodell der Computer Graphik wird durch den RGB-Würfel repräsentiert. Die Primärvalenzen sind durch den roten, grünen und blauen Phosphor gegeben.



## Das HLS-System

Hue      - Bunton

Lightness - Helligkeit

Saturation - Sättigung



## Bisher

wurde die Farbe nur bei isolierten Lichtpunkten betrachtet.

Frage: Ist Farbe ein lokales Phänomen, oder gibt es Wechselwirkungen gleichzeitig wahrgenommener Punkte ?

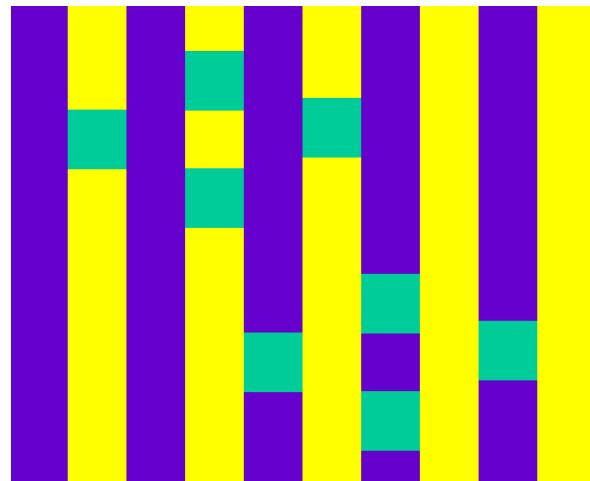
## Perzeption von Farbe

- Simultankontrast
- Adaption
  - *Hell/Dunkel-Adaption*
  - *Farbadaption*
- Geometrische Einflüsse
  - *2D-Umrundung*
  - *3D-Interpretation*

## Simultankontrast

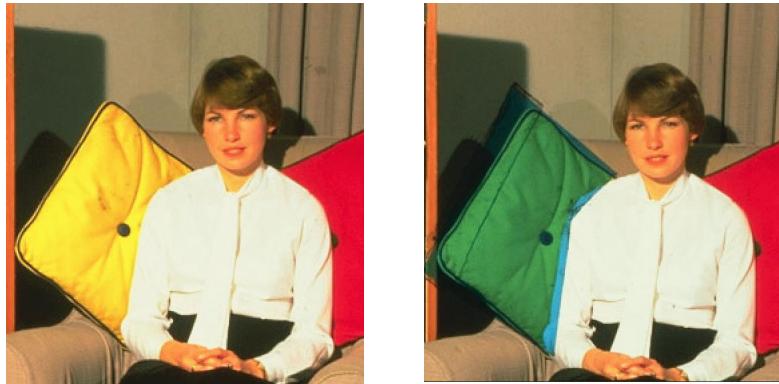


## Simultankontrast (2)



## Adaptation

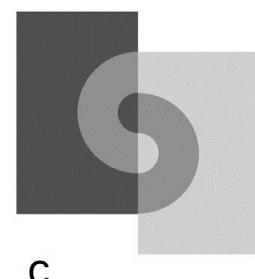
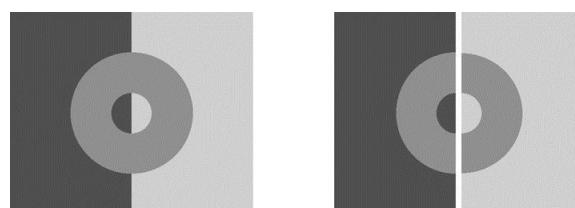
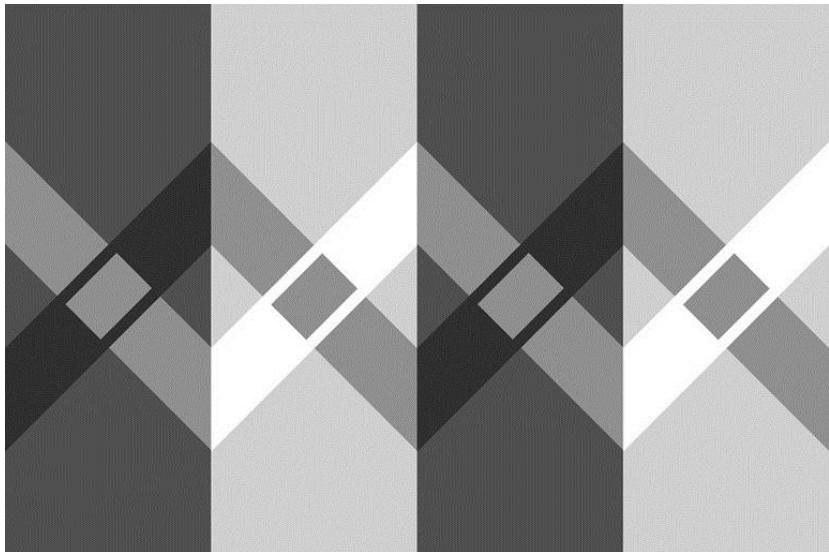




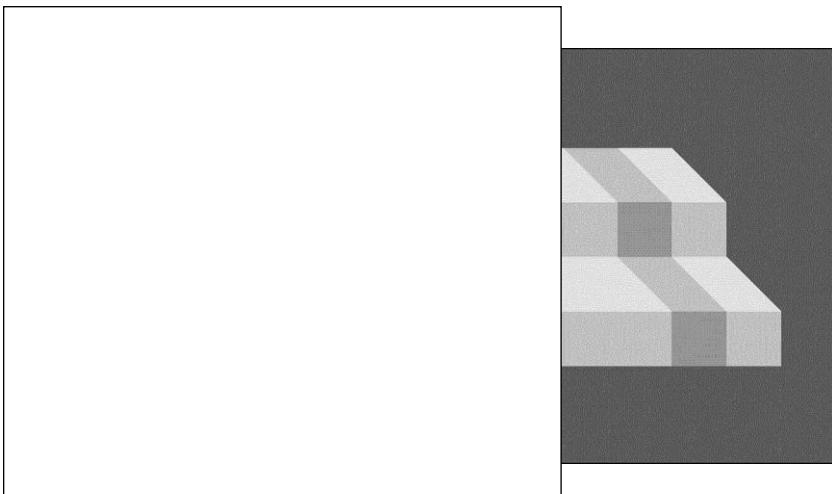
## Umrandungseffekte



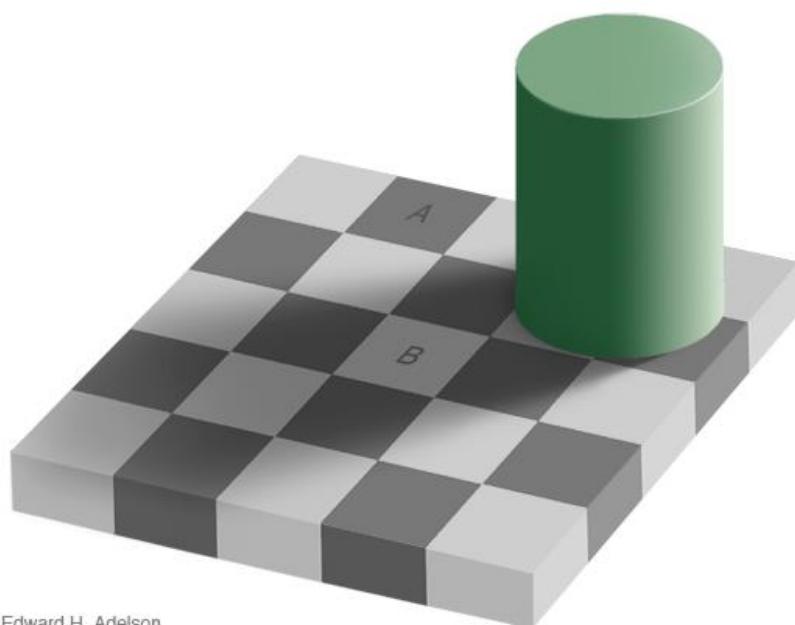
<http://persci.mit.edu/people/adelson/publications/gazzan.dir/gazzan.htm>



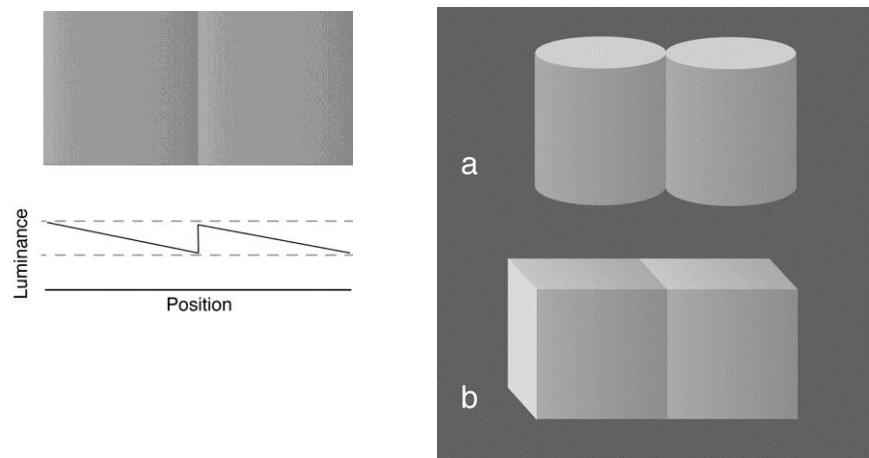
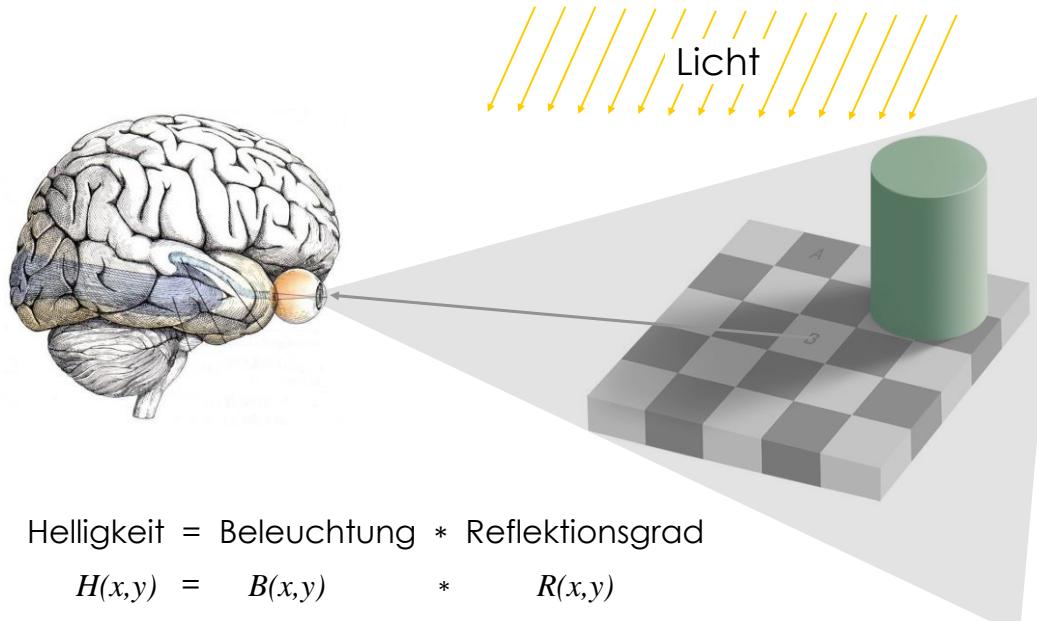
3D



Edward H. Adelson



## Das formale Problem

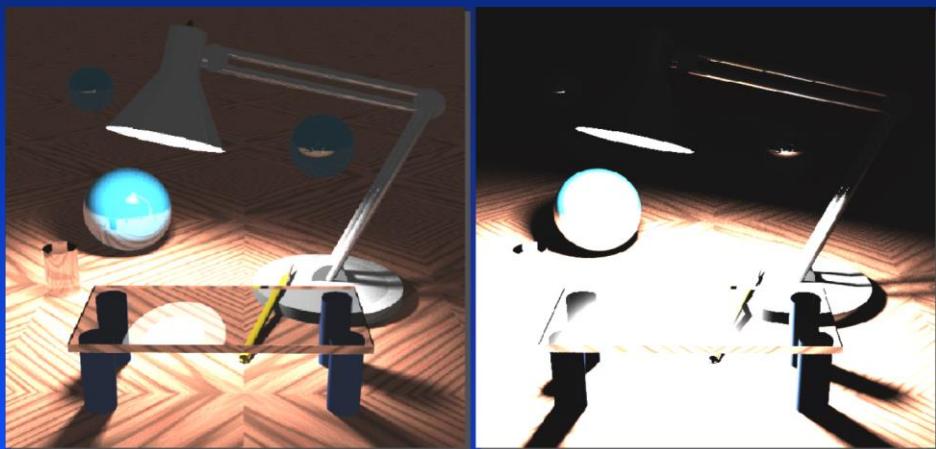


Farbwahrnehmung ist eine sehr komplexe Informationsverarbeitung

Lichter mit *unterschiedlichen* Spektren können den *gleichen* Farbeindruck erzeugen.

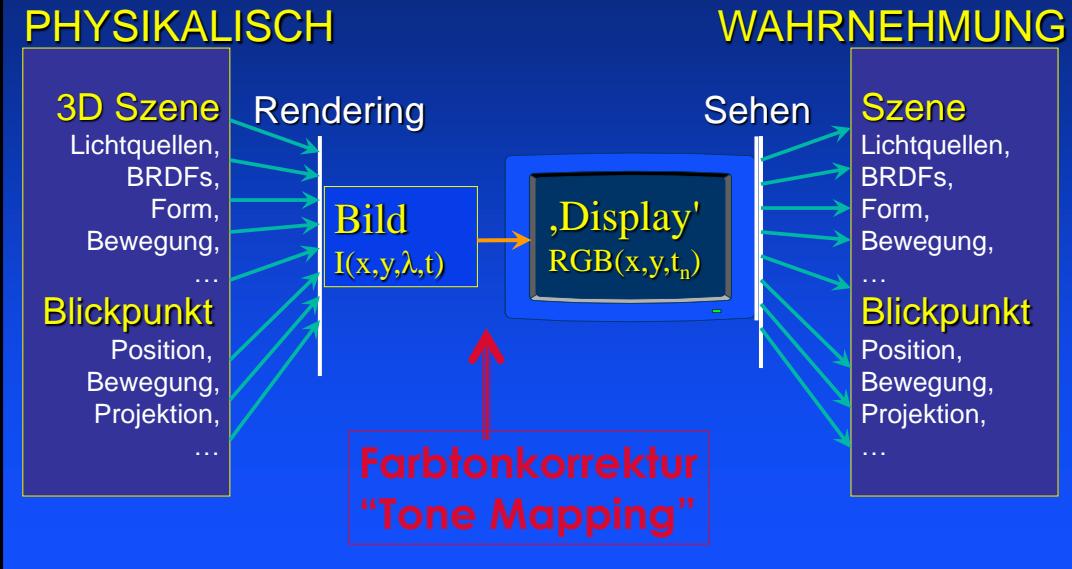
Lichter mit *gleichen* Spektren können einen *unterschiedlichen* Farbeindruck erzeugen.

Sichtbare Mängel der Computer Graphik ?



Was wir gern hätten und was wir oft erhalten!

# Bild Synthese



## Farbtonkorrektur „Tone Mapping“

Mit der Farbtonkorrektur ist man bemüht die Wahrnehmung eines synthetischen Bildes der Wahrnehmung einer realen Szene anzupassen:

### Problem:

Nicht alle Mechanismen der menschlichen Bildverarbeitung sind bekannt.

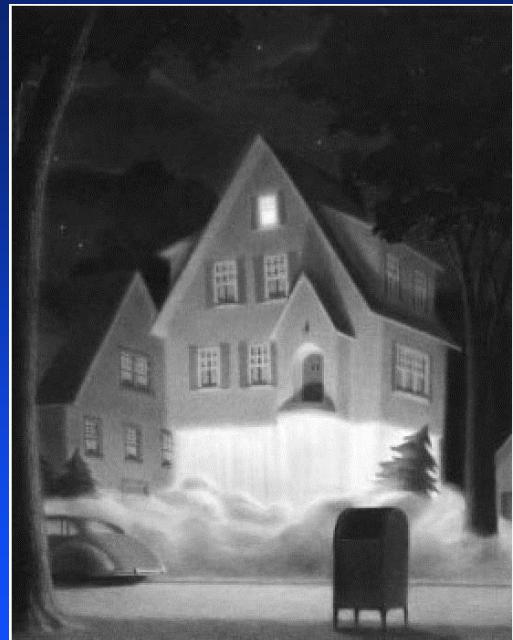
### Herausforderung:

Lokale Anpassung des Kontrasts und des Farbraums.

## Es gibt Hoffnung!

Künstler sind in der Lage einen hohen Kontrastumfang darzustellen!

- Darstellung:  
Kontrast  $\sim 20 : 1$
- Szene  
 $\sim 1\ 000\ 000 : 1$
- Details überall sichtbar!



© 1984 Chris Van Allsburg

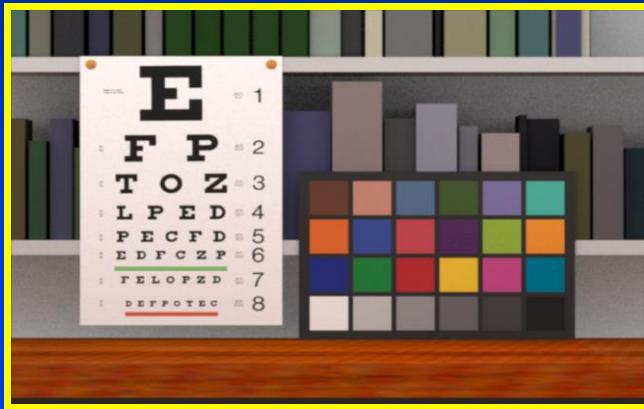
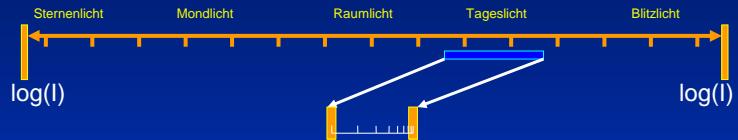
## Beschränkte Dynamik!

**Menschliches Sehen:**  
von  $\sim 10^{-6}$  bis  $\sim 10^{+8} \text{ cd/m}^2$

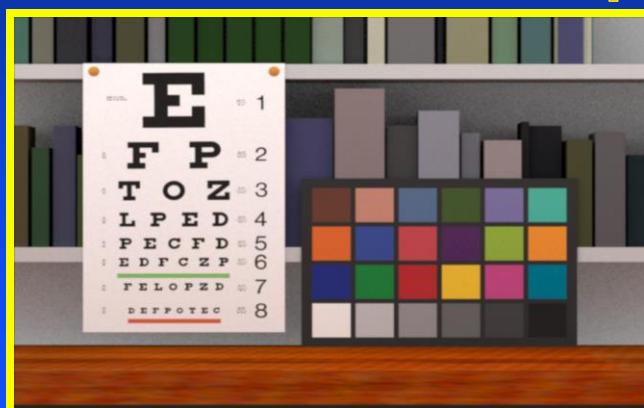


**typische Bildschirme:**  
von  $\sim 1$  bis  $\sim 100 \text{ cd/m}^2$

## Tageslicht Szene: Normiert

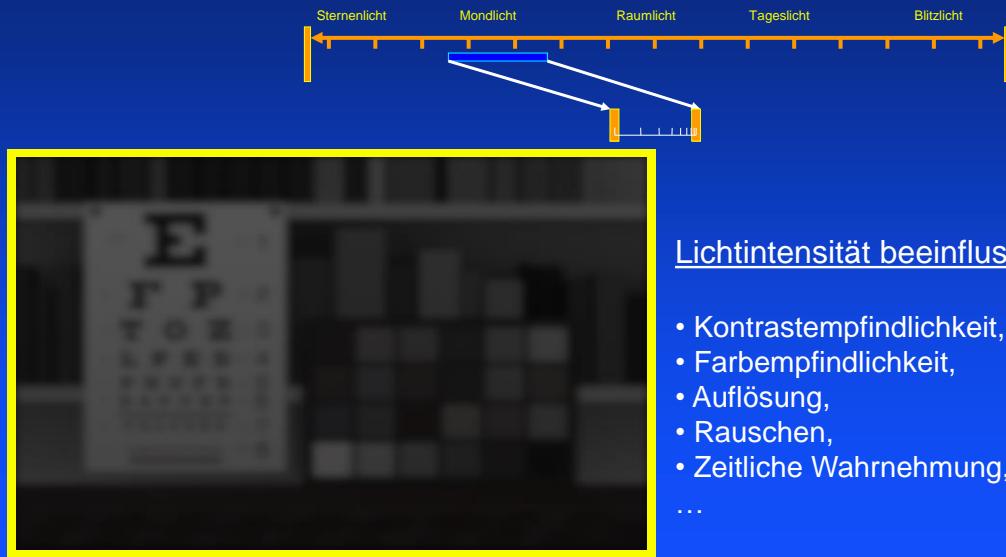


## Mondlicht Szene: Normiert



Das  
identische  
Bild!

## “Tone Mapped” Mondlicht Szene



Lichtintensität beeinflusst:

- Kontrastempfindlichkeit,
- Farbempfindlichkeit,
- Auflösung,
- Rauschen,
- Zeitliche Wahrnehmung,
- ...

## Zwei gängige Methoden

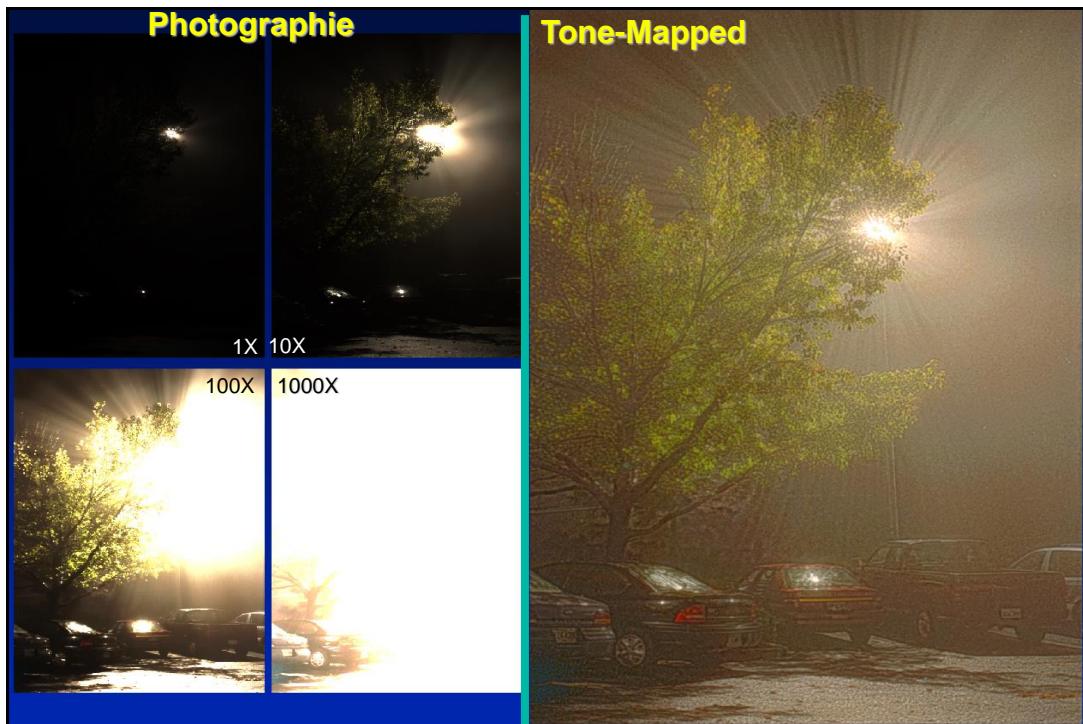
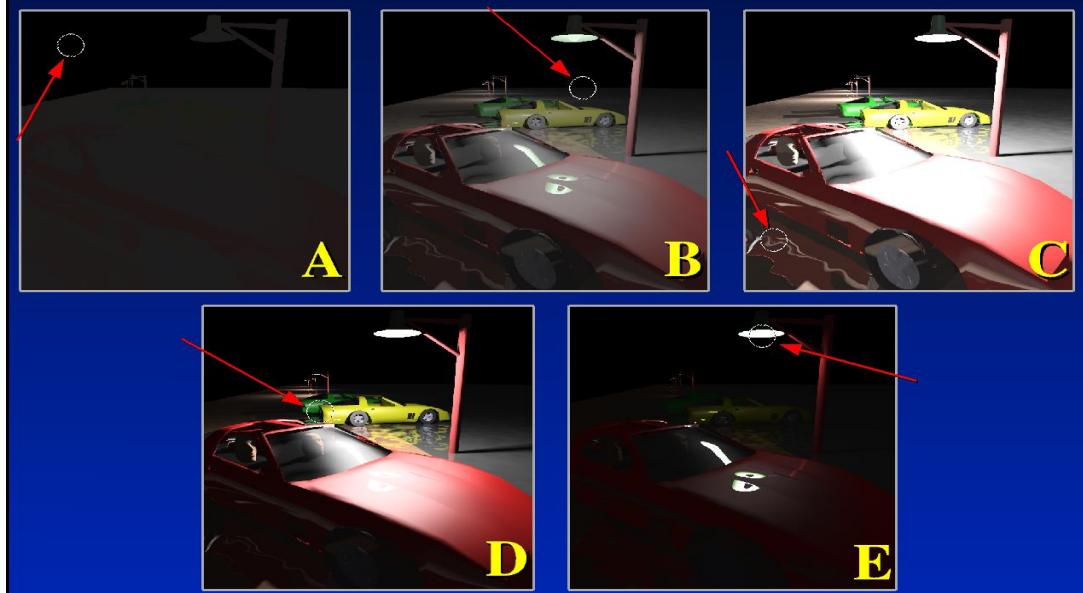
### 1.) Lokale Kontrastanpassung , foveale Methoden‘.

- verwendet kein 3D Wissen, kann auf alle Bildern mit hohem Kontrast angewendet werden.
- oft Haloeffekte!

### 2.) Komponenten Zerlegung „Layering Method“.

- verwendet 3D Wissen!
- Bildintensität wird verschiedene Komponenten zerlegt.  
z.B. in die diffuse, glänzende und transparente Reflexion
- Der Kontrast jeder Komponenten wird separat angepasst.
- Dann werden die Komponenten wieder zum Bild aufaddiert.

## Foveal Viewer Images



## Solution II: Layering

