

## 6. Licht, Sehen, Farbe

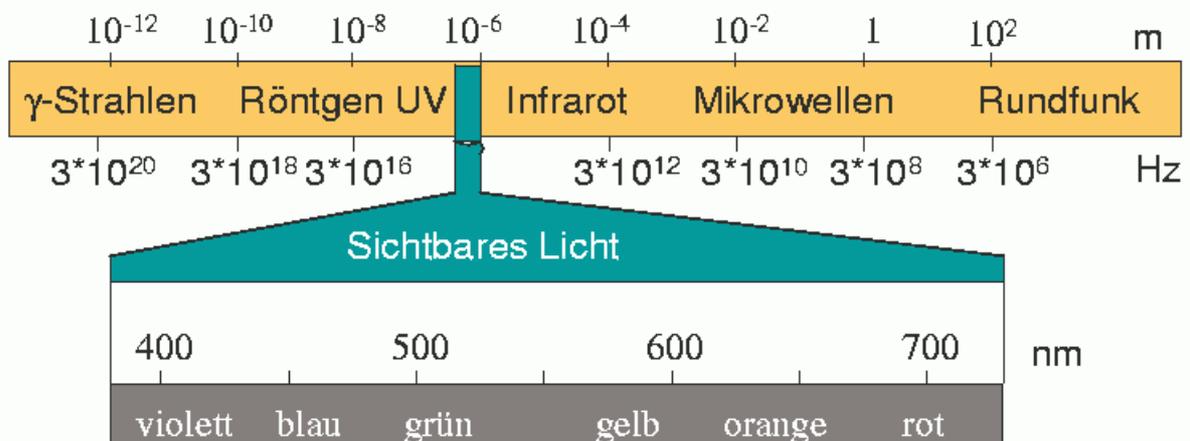
Menschliches visuelles System (Augen + Gehirn!) = entscheidendes Glied in der Kette der Bilderzeugung.  
Merke: *Am Monitorausgang ist nicht das Ende des Informationsflusses.*

### Licht

physikalisch: *elektromagnetische Strahlung*  
charakterisiert durch Frequenz  $\nu$  bzw. Wellenlänge  $\lambda$ .

$\nu \cdot \lambda = c =$  Lichtgeschwindigkeit im Vakuum  $\approx 2,9979 \cdot 10^8$  m/s.

Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts: ca. 380–780 nm (Nanometer = milliardstel Meter),  
entspr. Frequenzbereich um  $10^{15}$  Hz (Hertz, Schwingungen pro Sekunde).



(aus Krömker 2001)

Weitere Eigenschaften: Lichtstärke, Phase, ggf. Schwingungsebene (Polarisation).

### 3 Teilgebiete der Optik:

- Strahlenoptik
- Wellenoptik
- Quantenoptik

In der CG genügt meistens die Strahlenoptik.

Ausnahmen: Arbeiten mit polarisiertem oder kohärentem Licht (Laser); Interferenzerscheinungen. Dort ist der Wellencharakter wesentlich.

Licht aufgebaut aus

- Wellen
  - Teilchen (Photonen = Lichtquanten),  $E = h \cdot \nu$ ,  $h = \text{const.}$
- Einheitliche Beschreibung (formal, unanschaulich) erst in der Quantentheorie möglich.

### Radiometrie und Photometrie

*Radiometrie:* Physikalische Beschreibung.

Elektromagnetische Energie, z.B. Betrag der Lichtenergie je Wellenlänge

*Photometrie:* psychophysikalische Messung der visuellen "Energie", die vom elektromagnetischen Reiz erzeugt wird.

#### Einheiten der Photometrie

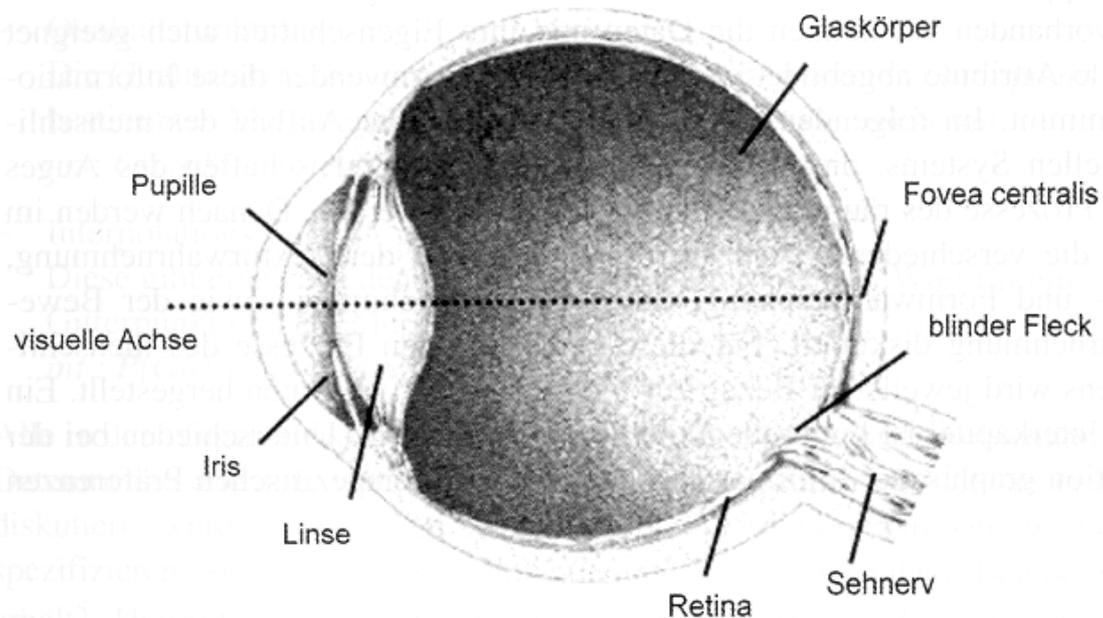
◆ Lichtstärke	luminous intensity	Candela [cd]
◆ Leuchtdichte	brightness	[cd/m <sup>2</sup> ]
auch	1 Stilb = 1 sb	= 1 cd/cm <sup>2</sup>
	1 Apostilb = 1 asb	= 0,3183 cd/m <sup>2</sup>
	1 Lambert = 1 L	= 10 <sup>4</sup> /π cd/m <sup>2</sup>
	1 foot-Lambert = 1 fl	= 3,426 L
	auf der Netzhaut (Retina) oft in:	
	1 troland = 1 cd/cm <sup>2</sup> bei 1 mm Pupillenöffnung	
◆ Beleuchtungsstärke	illuminance	Lux [lx]
◆ Lichtstrom	luminous flux	Lumen [lm]

(aus Krömker 2001)

## Das visuelle System

- Auge: optischer Weg + Netzhaut (Rezeptoren & frühe Verarbeitung)
- Sehnerven
- Sehrinde (visual cortex) im Gehirn

## Das menschliche Auge (Abb. aus Schumann & Müller 2000)



**Iris:** Blendenmechanismus

Teil des Adaptationsmechanismus, 2–8 mm Öffnung

optisch abbildende Elemente: Hornhaut, Kammerwasser, Linse, Glaskörper

**Linse:** Akkomodation (Scharfeinstellung),

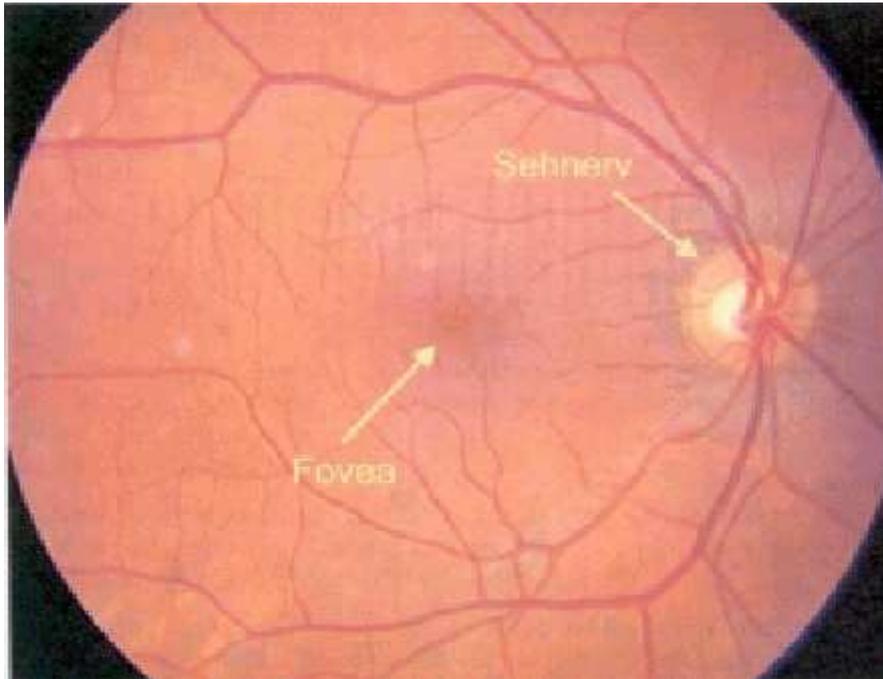
Brennweite: fern  $f = 17$  mm, nah  $f = 14$  mm.

**Netzhaut (Retina):** Rezeptoren (Wahrnehmungszellen), Nervengeflecht und Sehnerv.

Mittlerer Bereich der Netzhaut: "gelber Fleck" (*macula lutea*), ca. 1,5–2 mm Durchmesser, 5° Winkeldurchmesser.

Im Zentrum: Netzhautgrube, ca. 0,2 mm Durchmesser bzw. 1,5° Winkeldurchmesser = Bereich des schärfsten Sehens (dort 80 % der Sehschärfe).

**Blinder Fleck:** Austrittsstelle des Sehnervs.



(aus Schumann & Müller 2000, Krömker 2001).

### Nervenbahnen:

innerhalb der Netzhaut bereits erste Verschaltungen

Sehnerv: ca. 1 Million Ganglienzellen

Kreuzung der beiden Sehnerven (chiasma optica)

Weiterleitung über mehrere Zwischenstationen zum primären visuellen Cortex (im hinteren Teil des Großhirns, beidseitig)

### Aufbau der Netzhaut:

2 Grundtypen von Fotorezeptorzellen

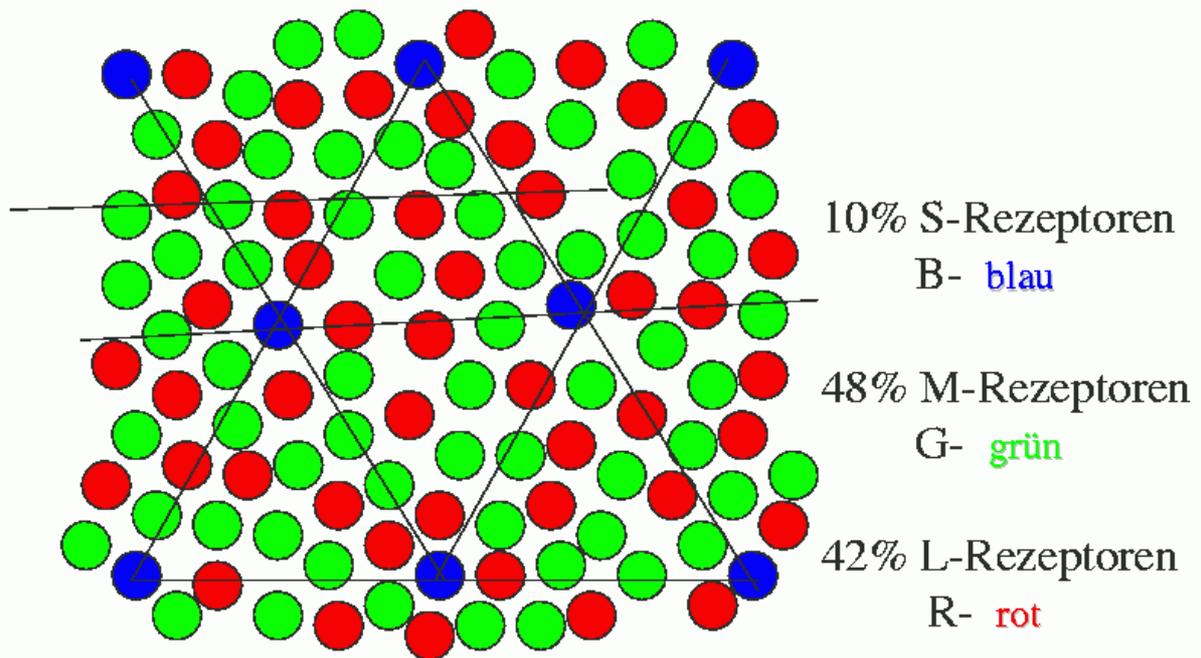
- Nachtsehen: Stäbchen (*rods*), nicht farbsehfähig, ca. 120 Millionen
- Tagsehen: Zäpfchen (*cones*), ca. 6 Millionen, hauptsächlich in der *fovea centralis*

(aus Schumann & Müller 2000)

### 3 Zapfen-Subtypen:

L für Rot-Sehen, M für Grün-Sehen, S für Blau-Sehen.

## Zapfenmosaik in der Fovea Centralis



(aus Krömker 2001)

## Farbe

- seit Jahrhunderten Thema von Physikern, Physiologen, Psychologen und Philosophen
- bis heute nicht vollständig verstanden und durchdrungen

DIN-Definition von "Farbe" (Standard 5033 von 1979):

*"Farbe... ist ein durch das Auge vermittelter Sinnes-  
eindruck, also eine Gesichtsempfindung. Die Farbe ist  
diejenige Gesichtsempfindung eines dem Auge struk-  
turlos erscheinenden Teiles des Gesichtsfeldes, durch  
die sich dieser Teil bei einäugiger Betrachtung mit un-  
bewegtem Auge von einem gleichzeitig gesehenen,  
ebenfalls strukturlosen angrenzenden Bereich allein  
unterscheiden kann."*

### Beachte:

- Farbe ist das Ergebnis der Wahrnehmung elektro-  
magnetischer Wellen durch Netzhaut und Gehirn.
- Lichtstrahlen besitzen keine Farbe, nur eine spektrale  
Leistungsverteilung (spectral power distribution, SPD), die  
angibt, welche Wellenlänge mit welchem Anteil vertreten ist.
- SPDs existieren in der physikalischen Welt, Farbe nur im  
Gehirn.

### Objektive Farbmerkmale:

- *dominante Wellenlänge* – diejenige Wellenlänge aus dem  
Spektrum, bei der die höchste Leistung abgestrahlt wird.
- *Reinheit* – physikalisches Maß, das angibt, in welchem  
Verhältnis weißes Licht zu einem monochromatischen Licht  
zu mischen ist, um ein gegebenes Licht zu erzeugen.
- *Luminanz* – beschreibt die Strahlungsenergie (Intensität bez.  
auf den Flächeninhalt eines unendlich kleinen Flächen-  
elements, das sich auf der Lichtquelle befindet).

## Subjektive Farbmerkmale:

- *Helligkeit* – physiologisch-psychologisches Maß für die Stärke des durch einen Beobachter wahrgenommenen Gesamtenergieflusses. Man unterscheidet:
  - *Lightness*: Helligkeit eines reflektierenden Objektes,
  - *Brightness*: Helligkeit eines selbstleuchtenden Objektes (Lampe, Sonne, Bildschirm...).
- *Farbton (hue)* – physiologisch-psychologischer Begriff zur Unterscheidung verschiedener charakteristischer Spektralmuster; unterscheidet zwischen "reinen Farben" (rot, gelb, grün, blau usw.).
- *Sättigung (saturation)* – physiologisch-psychologisches Maß für den Grad, in dem für einen Beobachter der Farbton eines gegebenen Lichtes von dem Farbton eines weißen Lichtes gleicher Luminanz abweicht.

## Farbspezifikation:

3 Fotorezeptor-Zelltypen  $\Rightarrow$  3 Zahlenwerte ausreichend zur quantitativen Spezifikation von Farben.

## Grassmannsche Gesetze (1853)

*Erstes: Zwischen je vier Farben besteht immer eine eindeutige lineare Beziehung. Eine Farbe braucht zu ihrer Beschreibung drei voneinander unabhängige Bestimmungsstücke, d.h. die Farbe ist eine dreidimensionale Größe.*

- Farben können als Vektoren eines dreidimensionalen Vektorraumes aufgefasst werden.
- Die Vektoren dieses Farbraums heißen **Farbvalenzen**.
- Die Länge eines Vektors ist ein Maß für die Leuchtdichte und heißt **Farbwert**, seine Richtung bestimmt die **Farbart**.

Folgerung:

- ◆ Wie in jedem dreidimensionalen Vektorraum benötigt man drei voneinander linear unabhängige Basisvektoren (**Primärvalenzen**), um den Raum aufzuspinnen.
- ◆ In diesem Fall bedeutet linear unabhängig, daß eine **Primärvalenz nicht durch Mischung** der beiden anderen Primärvalenzen darstellbar ist.

Folgerung: Farbmischung

- ◆ Mit drei Primärvalenzen R, G, B läßt sich also für jede Farbvalenz F eine Farbgleichung aufstellen:

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

- ◆ Mit Farbvalenzen kann man also wie mit Vektoren rechnen, insbesondere ist die Umrechnung der Darstellung bezüglich verschiedener Primärvalenztripel (Basiswechsel) möglich

Grassmannsche Gesetze (Fortsetzung)

**Zweites:** *Gleich aussehende Farben ergeben mit einer dritten Farbe stets gleich aussehende Farbmischungen.*

Das heißt, dass es bei der Beurteilung von Gleichheit zweier Farben

- **nur** auf die Farbvalenz,
- **nicht** auf ihre spektrale Verteilung ankommt.

Die spektrale Verteilung und die Wahl der Primärvalenzen spielen keine Rolle.

Mischexperimente zeigen: Ganz unterschiedliche Spektralverteilungen können dieselben Farbreize erzeugen!  
("Metamerie")

(z.T. aus Krömker 2001)

Farbmischung:  
*Additive Mischung*

Addition von Licht: 2 oder mehr Farben werden dem Auge gleichzeitig angeboten

- ◆ “Echte” Überlagerung
- ◆ Sukzessiv (zeitliche Integration): Farbkreisel
- ◆ Simultan (örtliche Integration): Monitor

Grundfarben: **Rot** **Grün** **Blau**

Hintergrund: **Schwarz** unbunt

Summenfarbe: **Weiß**

Basis für die Farbdarstellung mit Kathodenstrahlröhren oder LCD-Displays.

◆ Subtraktive Mischung:

- Farbige Gläser (Filter)
- Druckpigmente

Grundfarben: **Cyan** **Magenta** **Gelb** CMY

Hintergrund: **Weiß** unbunt

Summenfarbe: **Schwarz**

Hilfsfarbe: **Schwarz** CMYK

(Krömker 2001)

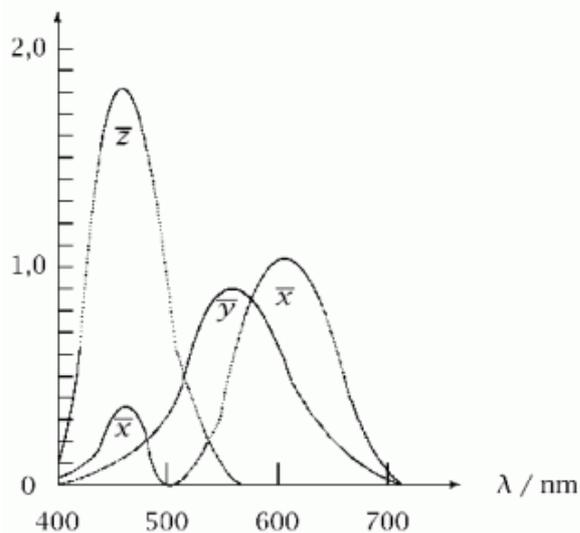
Basis für die Farbdarstellung im Druck.



## Messen von Farben: Colorimetrie

- ◆ CIE: Commission International de l'Eclairage  
Internationale Beleuchtungskommission
- ◆ Normalbeobachter für Farbmischversuche
- ◆ 2<sup>o</sup> Sehfeld CIE 1931  
(Ergänzung 10<sup>o</sup> Sehfeld CIE 1964 → andere Ergebnisse)
- ◆ Hellempfindlichkeit Y
- ◆ 3 reale Lichtquellen ("monochromatisch")
  - 700 nm CIE Rot
  - 546,1 nm CIE Grün
  - 435,8 nm CIE Blau(Spektrallinien einer Quecksilberdampf Lampe)

## CIE Farbdiagramm



- ausgehend von drei hypothetischen Standardprimärfarben  $X, Y, Z$  und drei Funktionen  $x_\lambda, y_\lambda, z_\lambda$
- Funktionen geben an, in welchem Verhältnis  $X, Y, Z$  zu mischen sind, um Farben einer Wellenlänge  $\lambda$  zu erhalten

Folgende Bedingungen werden erfüllt:

- $y_\lambda$  entspricht exakt der Helligkeitsreaktion des menschlichen Auges
- $x_\lambda$  und  $z_\lambda$  so konstruiert daß zum Mischen aller existierenden Farben nur Farbadditionen notwendig sind
- Das Integral jeder Funktion über alle sichtbaren Wellenlängen ist jeweils 1

(Beschreibung hier nach Schlechtweg 2001.)

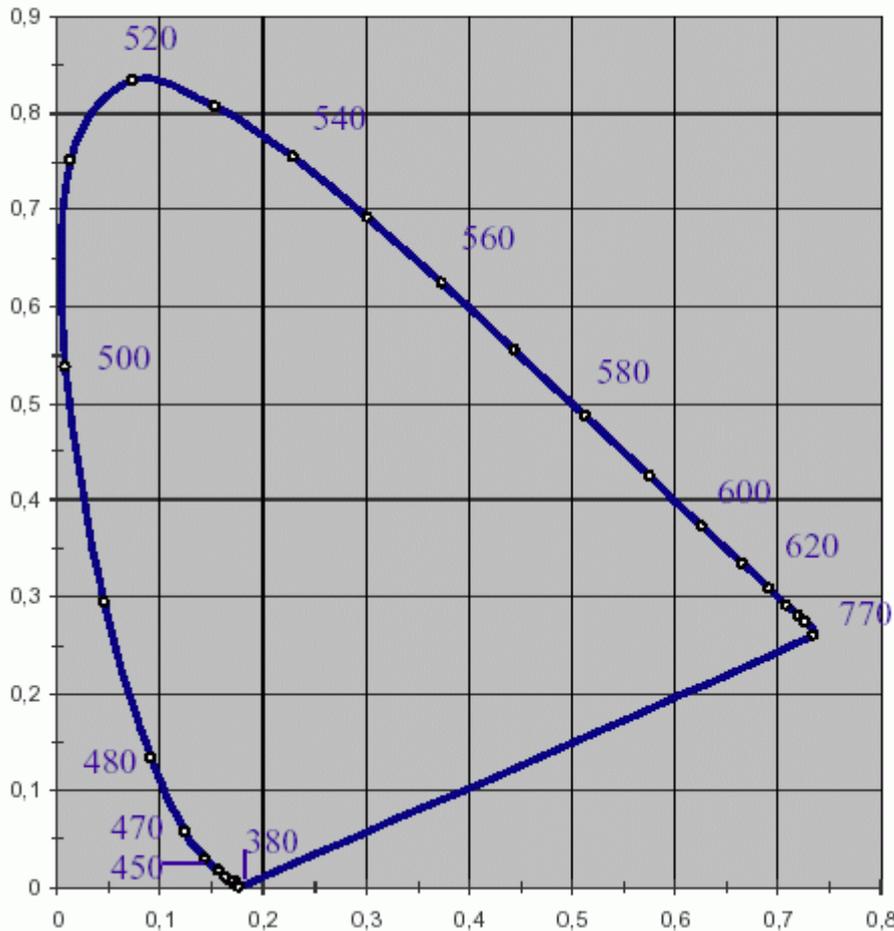
Im CIE-Farbdiagramm (Normfarbtafel, *chromaticity diagram*) wird der Helligkeitsanteil  $Y$  weggelassen.

Die physikalisch reinen Spektralfarben bilden eine geschwungene, etwa parabelförmige Kurve im  $x, y$ -Diagramm. Diese Kurve ist nicht geschlossen (rot  $\neq$  blauviolett!).

Auf der Verbindungslinie der Enden liegen *keine* reinen Spektralfarben, sondern Mischfarben aus Rot und Blauviolett ("Purpurgerade").

Alle wahrnehmbaren Farben liegen innerhalb des durch die reinen Spektralfarben und durch die Purpurgerade gegebenen geschlossenen Kurvenzugs.

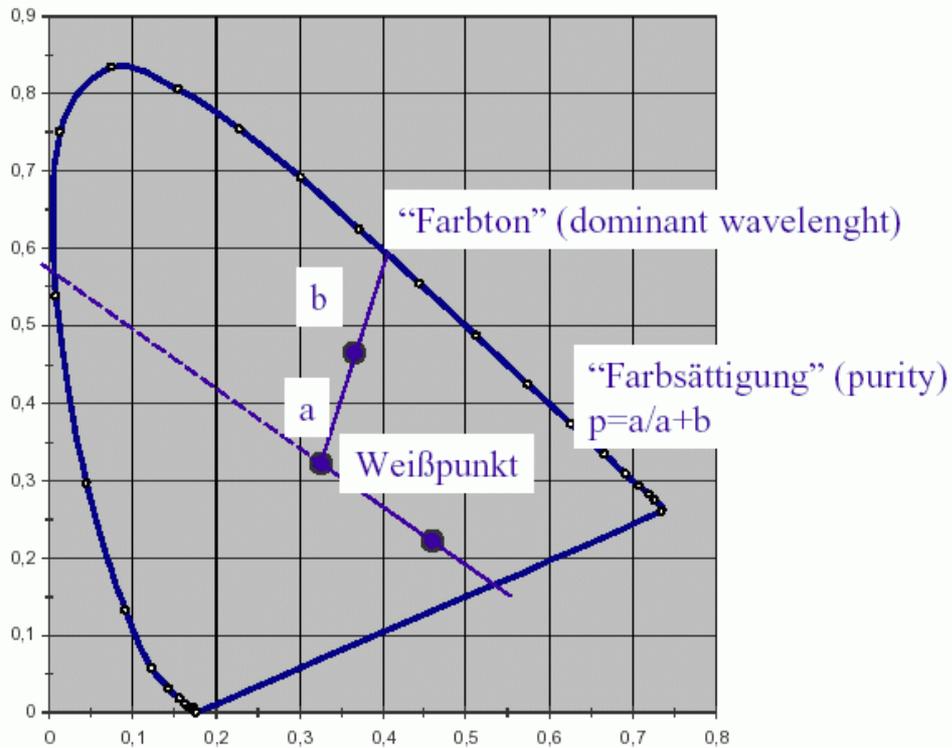
### **Normfarbtafel - Chromaticity Diagram**



Zahlen auf der Kurve: Wellenlängen in nm. (aus Krömker 2001)

Das Innere der Normfarbtafel ergibt sich durch additive Farbmischung aus den Randfarben (ganz innen = weiß).

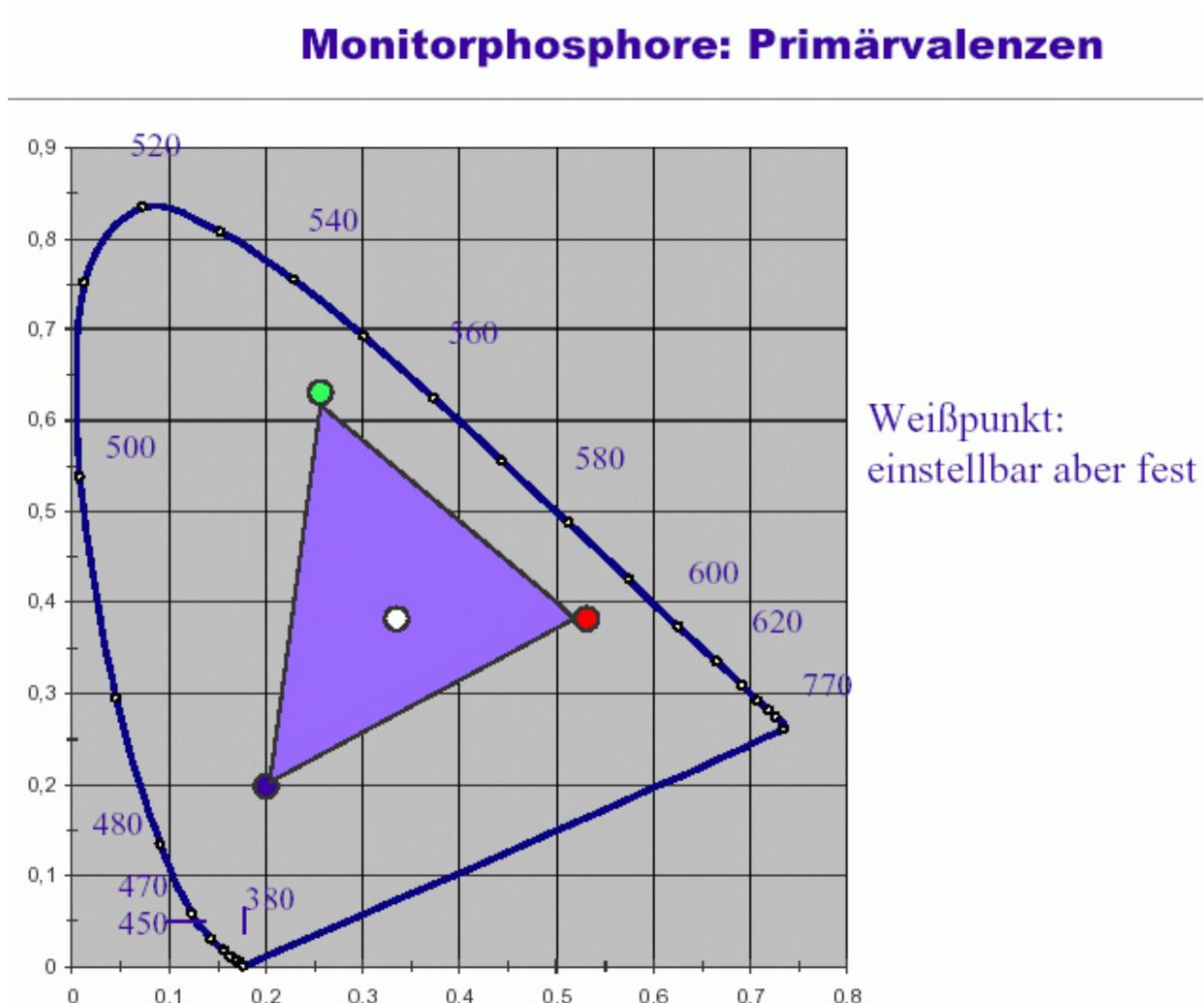
## Zusammenhänge: Mischung



Die Grundfarben (R, G, B) der üblichen Monitore sind *keine* reinen Spektralfarben, d.h. sie liegen nicht auf der Außenlinie.

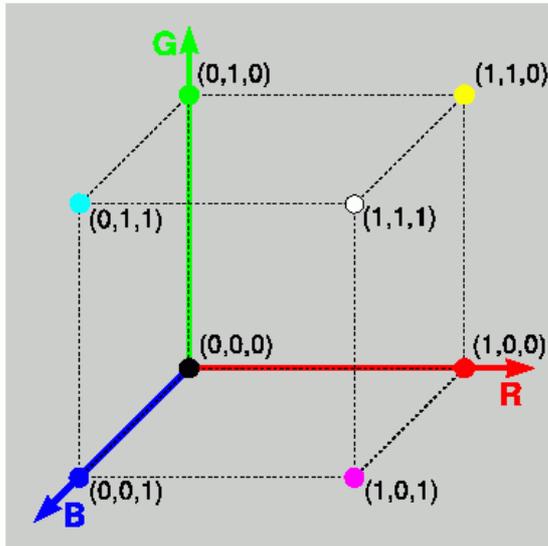
*Folgerung:* Es sind *nicht* alle Farben des Diagramms durch Mischung aus diesen Farben darstellbar, sondern nur diejenigen innerhalb des von den Grundfarben aufgespannten Dreiecks!

**Inneres des Dreiecks = Gamut des Monitors.**



(Krömker 2001)

## Farbmodelle – RGB



- additives Farbmodell
- für Ausgabe auf Farbbildschirmen
- Grundfarben Rot, Grün, Blau
- RGB-Einheitswürfel

(Schlechtweg 2001)

Alle darstellbare Farben sind Punkte eines Einheitswürfels. Auf den positiven Halbachsen liegen die Primärfarben :

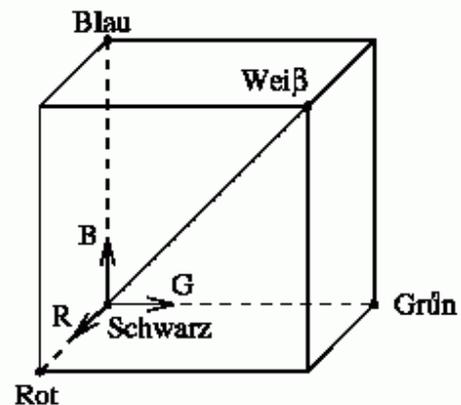
**Rot**, **Grün** und **Blau**.

Erste Eigenschaften:

**Schwarz** liegt im Ursprung  $(0,0,0)$

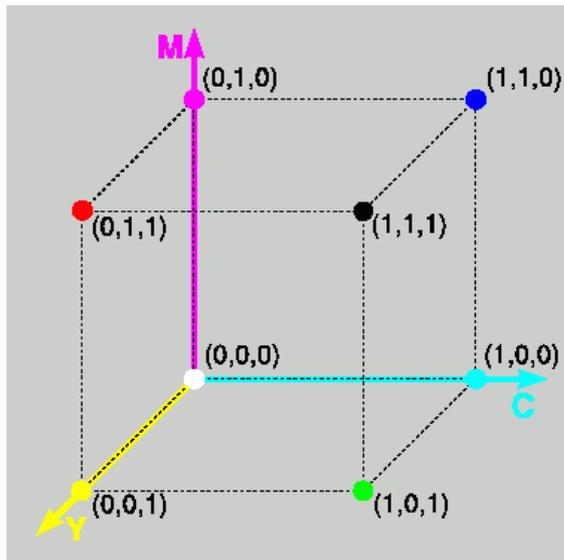
**Weiss** im Punkt  $(1,1,1)$

**Grauwerte** darstellbar durch gleichgroße Anteile von R, G und B, liegen **auf der Hauptdiagonalen** des Einheitswürfels



(Krömker 2001)

## Farbmodelle – CMY(K)



- subtraktives Farbmodell
- für Ausgabe auf Druckern
- Grundfarben Türkis (Cyan), Magenta, Gelb (Yellow)
- beim Druck Hinzunahme von reinem Schwarz (K) – Vierfarbdruck

## Konvertierung RGB ↔ CMY

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

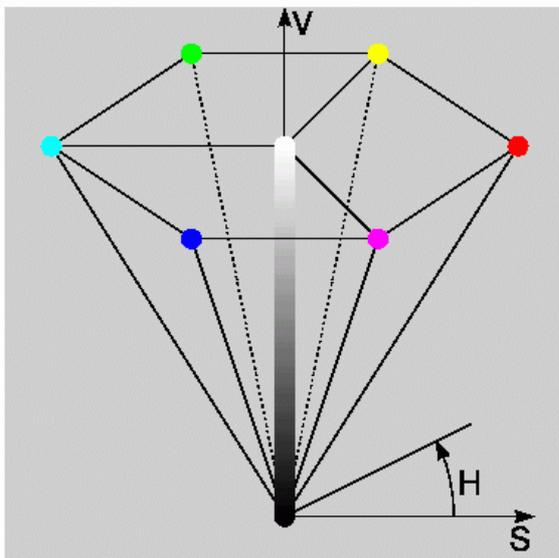
$$\begin{pmatrix} C \\ M \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

- gilt nur theoretisch
- kompliziertere Verfahren in der Druckindustrie

(Schlechtweg 2001)

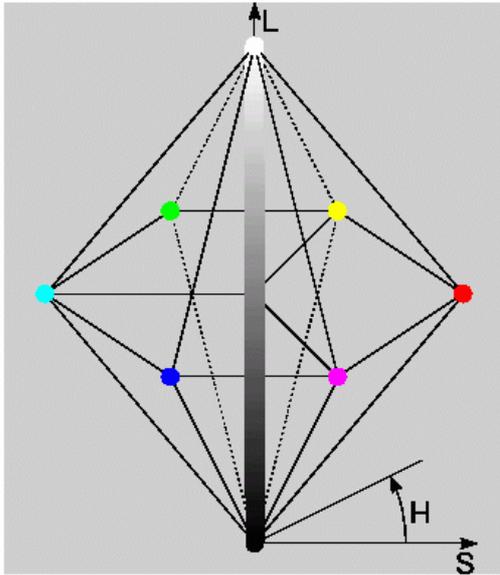
Die technisch-physikalischen Farbmodelle (RGB, CMY, YIQ...) entsprechen den technischen Gegebenheiten, sind aber zur direkten Farbdefinition durch den Benutzer wenig geeignet. Deshalb wurden Farbmodelle entwickelt, die näherungsweise (sehr grob) den Größen der menschlichen Farbwahrnehmung entsprechen, nämlich Helligkeit, Farbton und Farbsättigung.

## Farbmodelle – HSV



- Hue / Saturation / Value
- Hue – Winkel um vertikale Achse,  $0^\circ \equiv$  g rot
- Änderung der Sättigung: Änderung des Weißanteils
- Änderung der Helligkeit: Änderung des Schwarzanteils
- z. B. dunkelblau:  $H = 240^\circ$ ,  $S = 1$ ,  $V = 0.3$

## Farbmodelle – HLS



- Hue / Lightness / Saturation
- Strategie von Malern: nimm reines Pigment (H), Weiß dazu (S), Schwarz dazu (1-L)
- Komponenten nicht unabhängig voneinander
- Graustufen:  $S = 0$
- vollgesättigte Farben:  
 $L = 0.5, S = 1$

(Schlechtweg 2001)

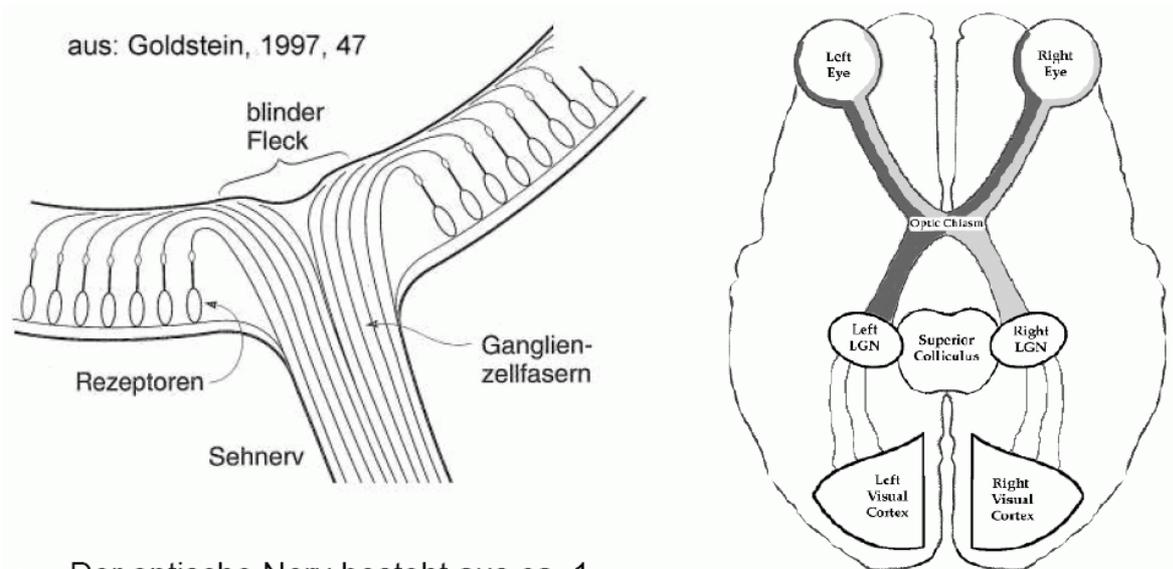
Achtung: Durch die unterschiedlichen Farbräume liefert die lineare Interpolation zwischen zwei identischen, aber in verschiedenen Farbräumen definierten Farben völlig unterschiedliche Ergebnisse.

## Interaktive Farbselektion

- Auswahl aus einem Menü (Palette)
  - nur sinnvoll bei geringer Farbanzahl
  - Farben auf kleinen Flächen schwer zu erkennen
- namentliche Nennung („gelblich-grün“, „blaugrau“)
  - mehrdeutig und subjektiv
  - Abhilfe: Color Naming Scheme CNS
- Koordinatenangaben in einem Farbraum
  - textuell, Slider
- Interaktion mit graphischer Darstellung des Farbmodells

## Weiterverarbeitung der elektrochemischen Reize aus den Sinneszellen der Netzhaut:

- Verschaltung in der Netzhaut selbst
- Weiterleitung im Sehnerv, dort weitere Verschaltungen
- Weiterverarbeitung in verschiedenen Zentren des Gehirns



- Der optische Nerv besteht aus ca. 1 M Fasern, 10% davon sind der Fovea zugeordnet
- Blinder Punkt ca.  $17^\circ$  zur Nasenseite von Fovea

(Woessner, o.J.)

Durch die Weiterverarbeitung kommt es zu spezifischen Wahrnehmungsleistungen, z.T. aber auch zu Täuschungen ("optische Täuschungen" = eigentlich Wahrnehmungstäuschungen)

- Was wir zu sehen glauben, ist nicht was wirklich **ist**.
- Unser Sehapparat aus Augen und Gehirn bestimmen mit.
- Schon die 3-D Präsentation auf 2-D Schirm/Papier ist eine Täuschung.

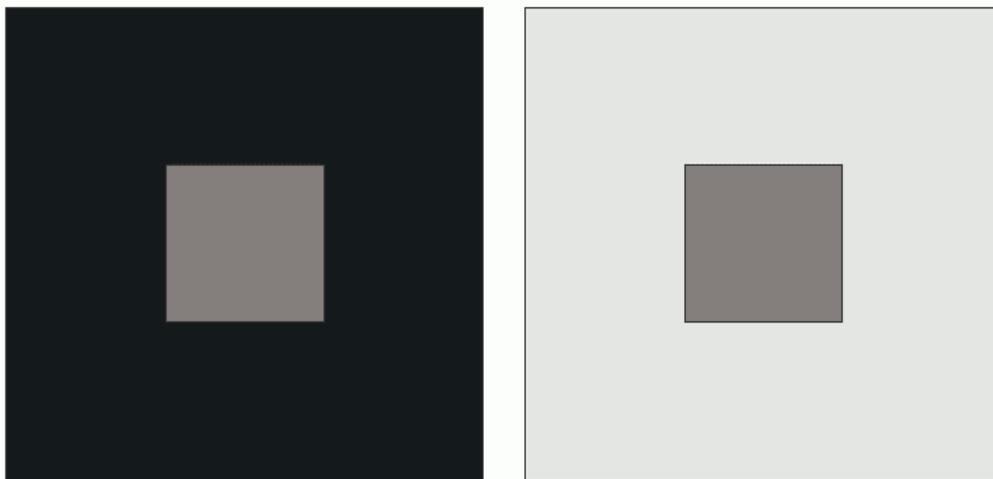
(Weimar 2005)

## Resultierende Eigenheiten der visuellen Wahrnehmung

### Helligkeit:

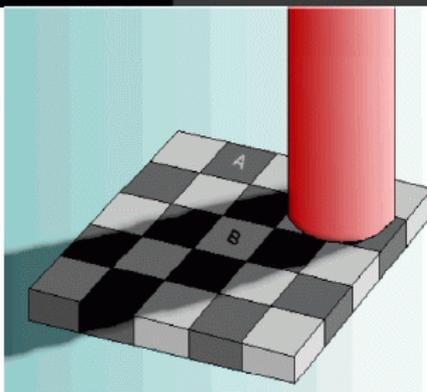
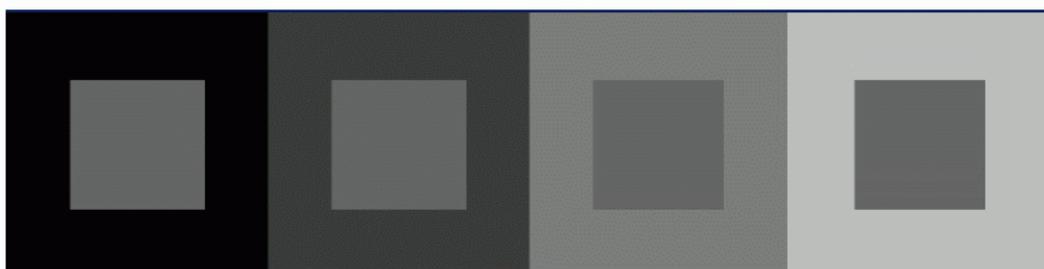
keine absolute Wahrnehmungsgröße  
abhängig von:

- Reizstärke (Leuchtdichte)
- Reizstärke zuvor (Adaptation!)
- Leuchtdichte in der Umgebung



die beiden mittleren Quadrate haben dieselbe Graustufe

(aus Krömker 2001)

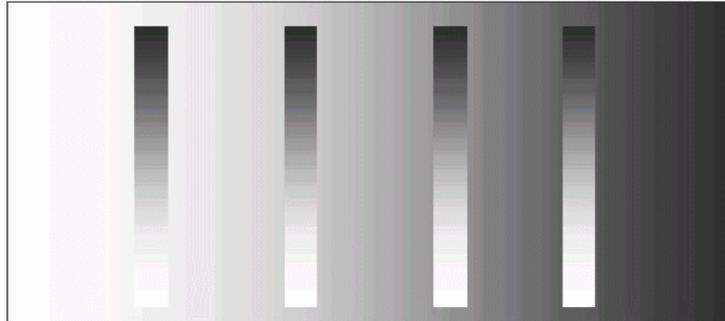


A und B haben dieselbe Farbe

(Woessner, o.J.)

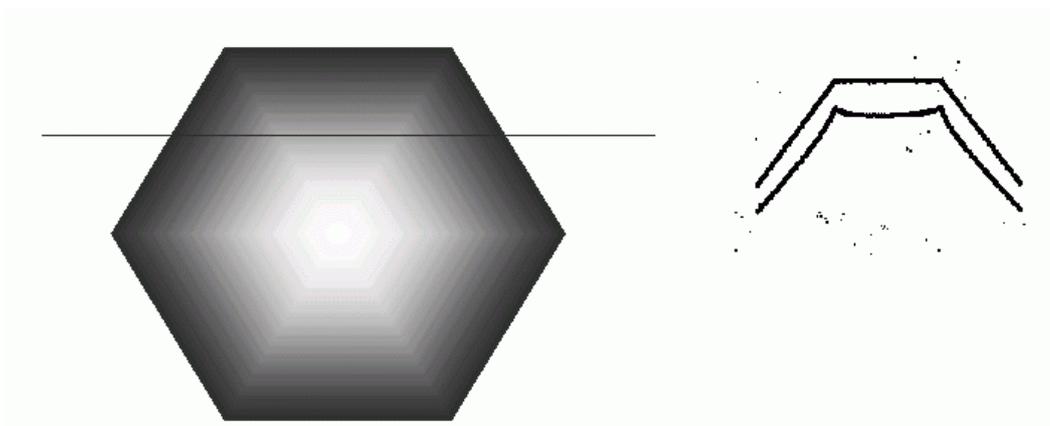
### *Kontrastverstärkung:*

Differenzen werden umso stärker wahrgenommen, je näher sie an der Hintergrundhelligkeit liegen.



### *Unstetige Helligkeitsänderungen:*

#### *Mach-Bänder*



(Krömker 2001)

Im Bild ist die (physikalische) Helligkeit linear interpoliert, keine "Strahlen" vorhanden! Die "Strahlen" erscheinen dort, wo die 1. Ableitung eine un stetige Änderung aufweist.

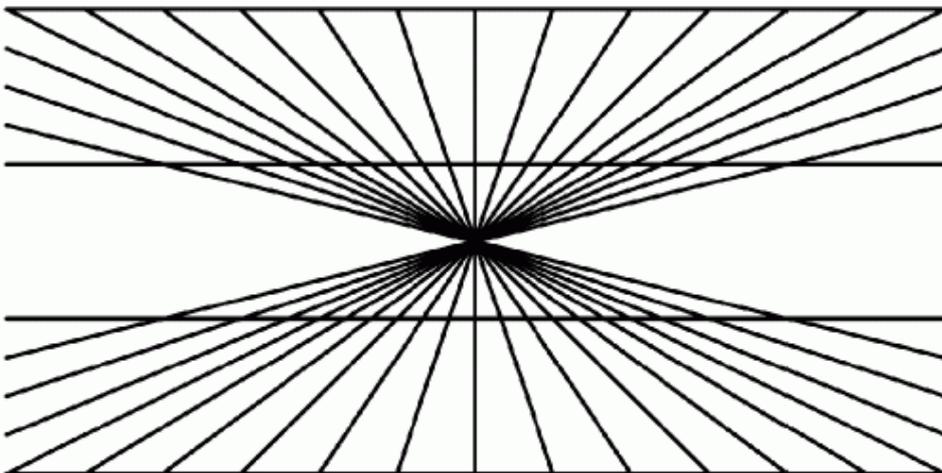
Effekt (in frühen Verarbeitungsschritten in der Netzhaut verursacht) ist Basis für Kanten- und Konturerkennung.

*Richtung:*

Geneigte Linien in der Umgebung erzeugen eine entgegengesetzte Neigung senkrechter Linien



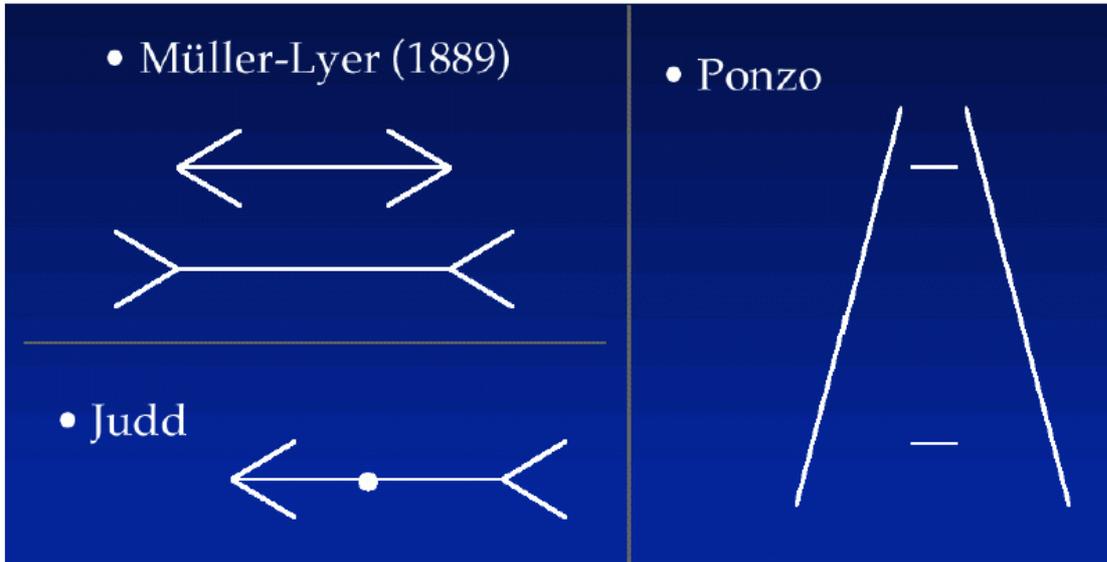
*Parallelität:*



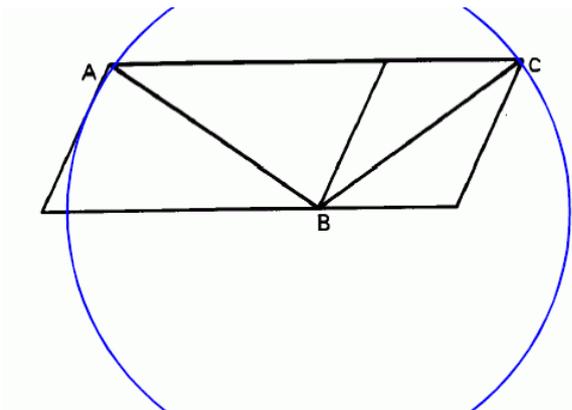
(Weimar 2005)

## Länge:

- Eindruck von Strichlängen durch Umgebung verändert

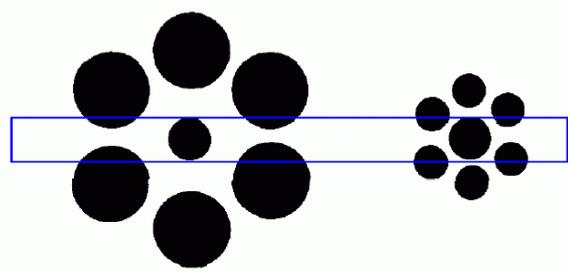
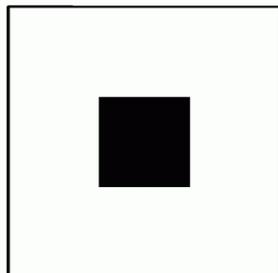
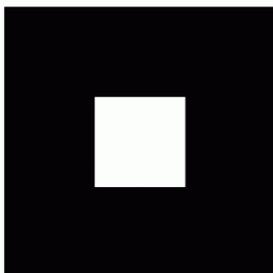


(Woessner, o.J.)



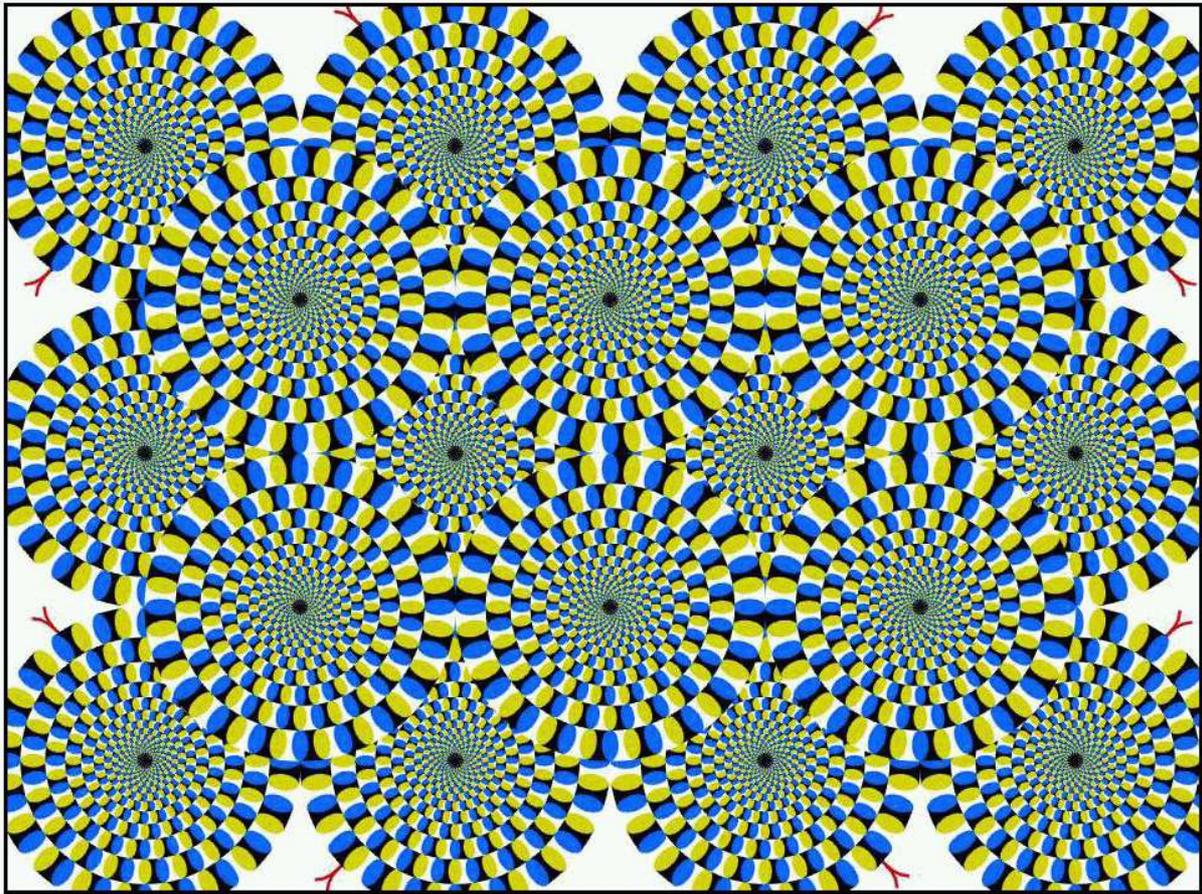
$$|AB| = |BC| \quad (\text{Weimar 2005})$$

## Flächen:



(Weimar 2005)

*Bewegungsillusion:*



(Bartz 2005)

## ***Formwahrnehmung***

Grundlegende Arbeiten zur Organisation der menschlichen Wahrnehmung: *Gestaltpsychologie* (frühes 20. Jh., besonders Wertheimer)

- das Ganze ist verschieden von der Summe seiner Teile;
- das visuelle System des Menschen fasst Elemente nach Gruppierungsregeln zusammen.

### ***Beispiel:***

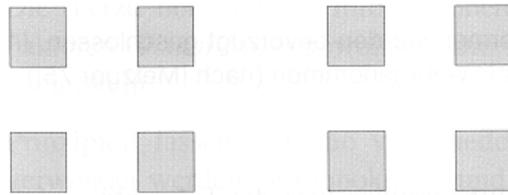
der Dalmatiner (aus Schumann & Müller 2000, nach Thurston 1986) – keine Konturlinie vorgegeben, diese konstruiert das visuelle System!



## Gestaltprinzipien

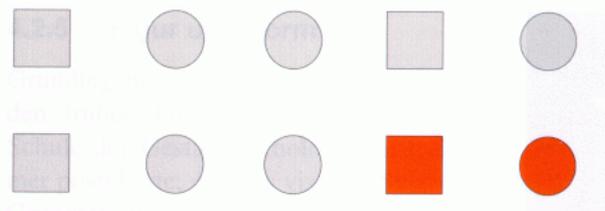
### *Gestaltprinzip der Nähe*

Nahes wird als zusammengehörig empfunden:



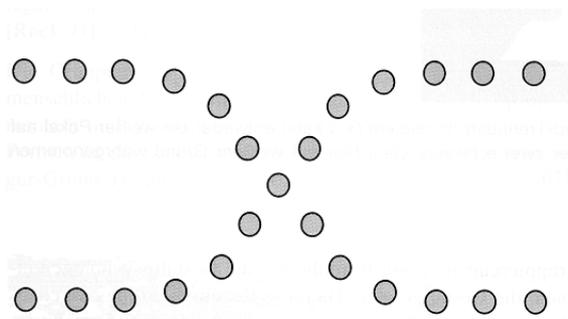
### *Gestaltprinzip der Ähnlichkeit*

Gleiches oder fast gleiches wird als zusammengehörig empfunden. Farbe gruppiert dabei stärker als Form:



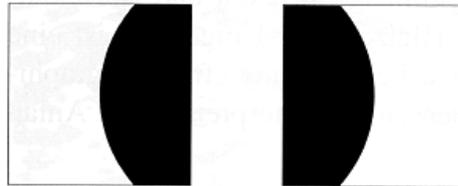
### *Gestaltprinzip der stetigen Fortsetzung*

Unter mehreren Möglichkeiten, Musterelemente in eine Gestalt einzuordnen, wird die einfachere und regelmäßigere bevorzugt. In diesem Fall werden zwei sich kreuzende Kurven wahrgenommen, nicht zwei sich berührende Halbkreise:



### *Gestaltprinzip der Konvexität*

Konvexe Formen werden bevorzugt geschlossen. Hier wird automatisch ein schwarzer Kreis wahrgenommen:



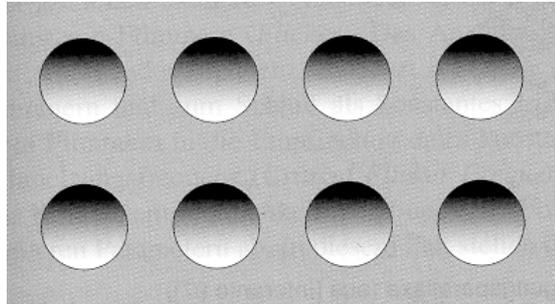
### *Kontextabhängigkeit der Formwahrnehmung*

Der zweite Buchstabe wird im ersten Wort als "H", im zweiten als "A" erkannt, obwohl in beiden Fällen identische Stimuli vorliegen

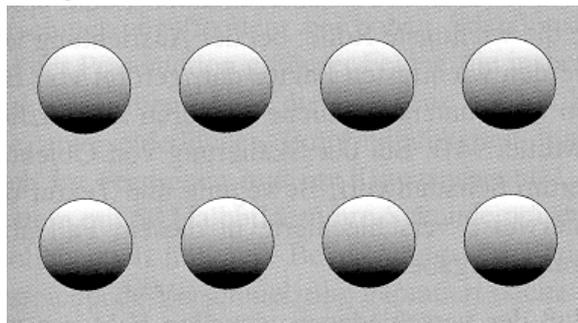
**TAE CAT**

### *3D-Formwahrnehmung (Tiefenwahrnehmung) aus Schattierung:*

Kreise werden als kugelförmige Vertiefungen wahrgenommen (Schattierung entspricht hier den üblichen Verhältnissen bei einer Beleuchtung von oben):



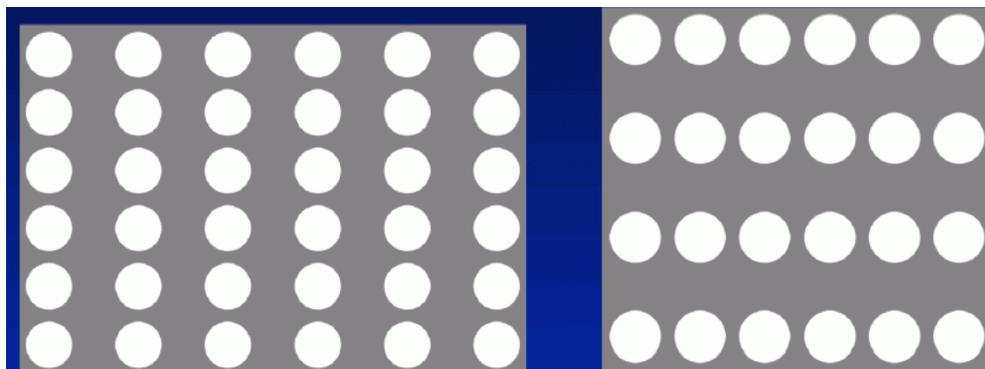
Die gleichen Kreise, gedreht, werden als kugelförmige Erhebungen wahrgenommen:



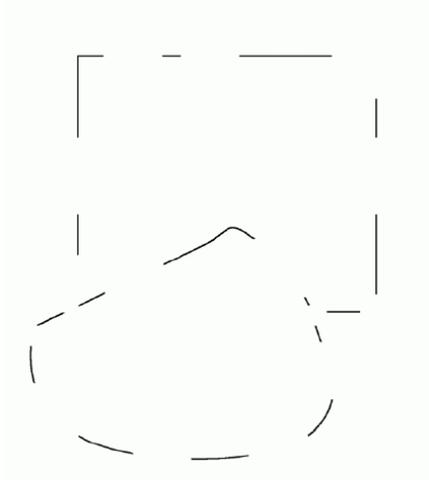
(Gestalt-Beispielbilder aus Schumann & Müller 2000)

### *Abstand zwischen Objekten:*

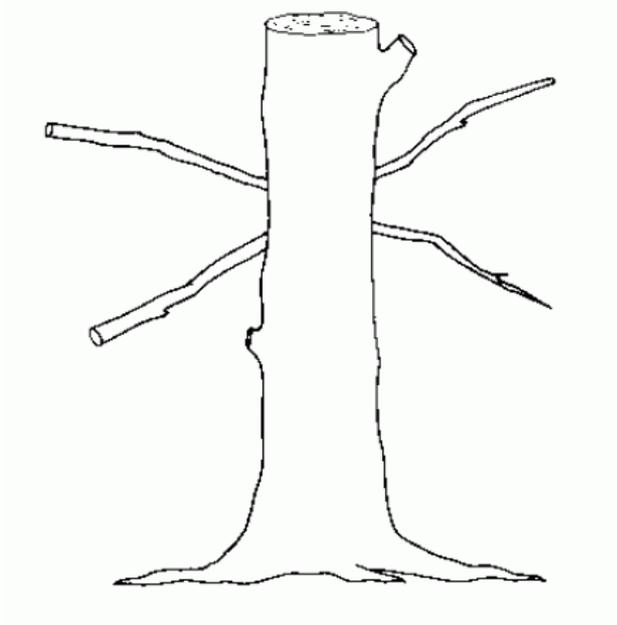
Gruppierung als Spalten oder Zeilen

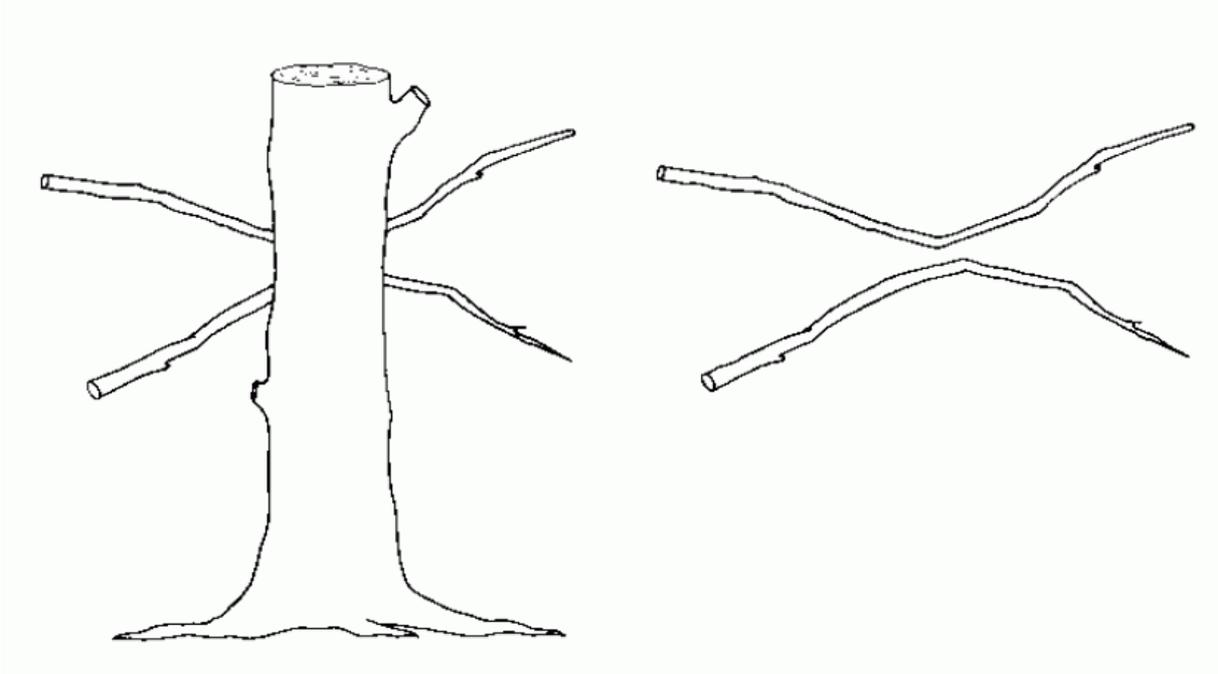


## *Linienfortsetzung*



stetige Fortsetzung, "Prinzip der guten Gestalt"





## 7. Technische Anmerkungen zu grundlegender grafischer Hardware

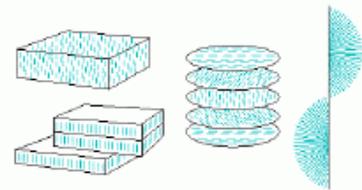
### **Flüssigkristallanzeigen (LCD)** **(Liquid Crystal Display),** **seit 1970 in Bildanzeigesysteme eingesetzt**

#### Grundlagen:

Flüssigkristalle wurden schon 1888 von Reinitzer entdeckt. Ihre organischen Moleküle weisen eine Orientierungsordnung auf, wie sie für Kristalle typisch ist. Ihre Form ist langgestreckt oder scheibenförmig. Achsen sind einheitlich ausgerichtet. Eine Ausrichtung der Moleküle auf eine der üblichen kristallinen Gitterstrukturen besteht jedoch nicht.

#### Einteilung der Flüssigkristalle je nach Ausrichtung:

- smekmatische      schichtenförmig
- nematische      fadenförmig
- cholesterinische      wendelförmig

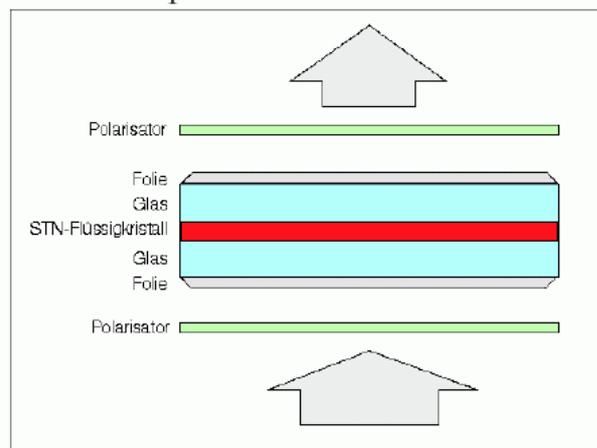


## Aufbau/Funktionsweise

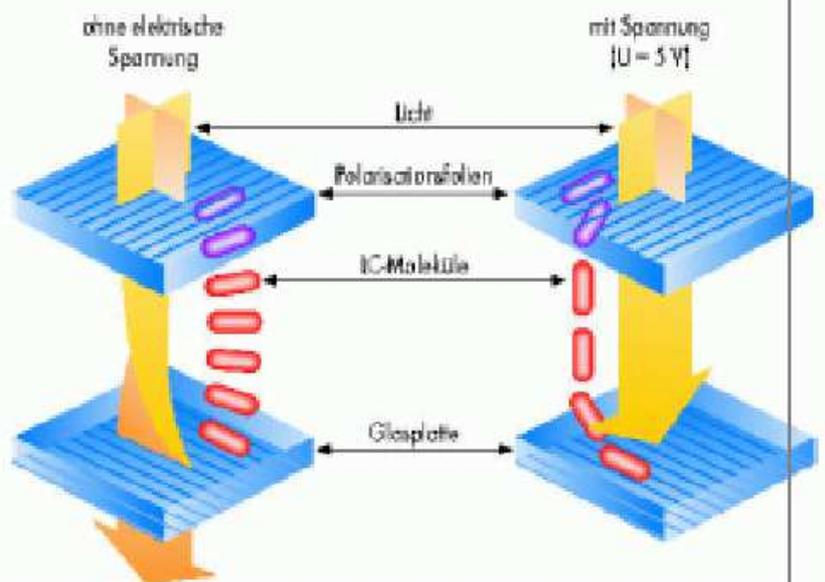
### Verdrillter nematischer Flüssigkristall (twisted nematic cells)

Flüssigkristallzellen werden mit **zwei parallelen Glasplatten** aufgebaut, die sich im Abstand von 5-10  $\mu\text{m}$  voneinander entfernt befinden und den **Flüssigkristall einschließen**. Zur Ausrichtung der Moleküle ohne angelegtes elektrisches Feld, werden die Glasplatten auf der Innenseite mit mikroskopisch feinen **Längsriffelungen** versehen. Zusätzlich sind die Glasplatten mit einem feinen **Elektrodenmaterial bedampft**, das sowohl durchsichtig, als auch leitend ist.

(Meist wird Indiumzinnoxid (ITO indium tin oxid) verwendet.



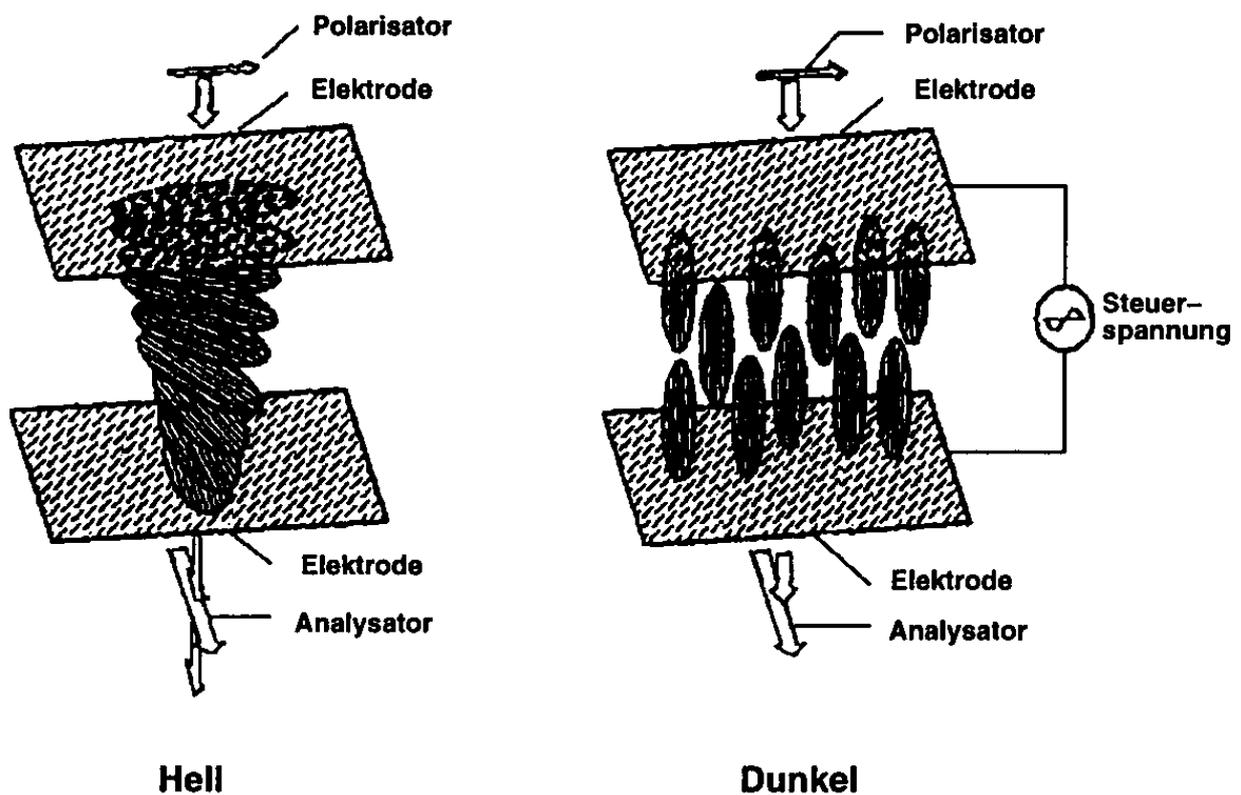
Die Außenseiten der Glasplatten sind mit **Polarisationsschichten** belegt, die nur Licht in der Wellenebene des Polarisationsfilters durchlassen. Die Wellenebenen des einen Polarisators ist zu der des gegenüberliegenden um **90° verdreht**. Infolge der Riffelungen in beiden Platten, die rechtwinklig zueinander ausgerichtet sind, werden die Achsen der Flüssigkristallmoleküle so beeinflusst, daß sich diese gleichfalls im rechten Winkel einstellen.



(aus Krömker 2001)

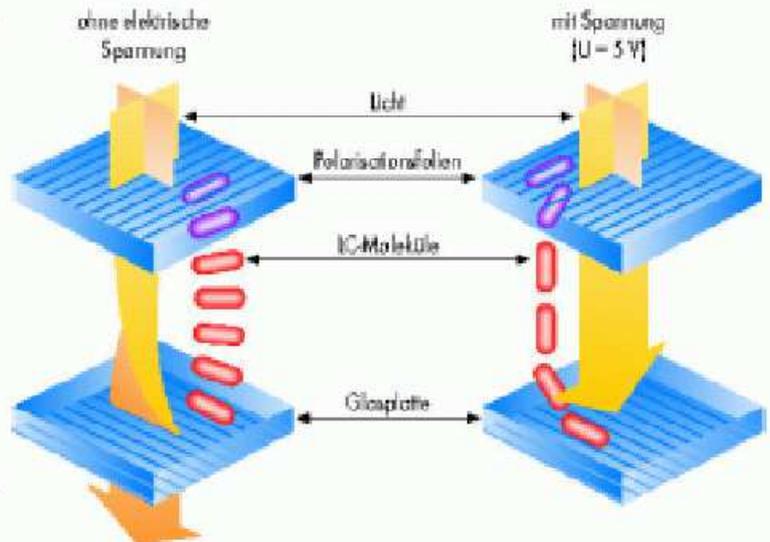
So entstehen (bei nicht angelegter Spannung) um  $90^\circ$  verdrehte "Molekülfäden", die die Polarisationssebene des Lichts so verändern, dass sie mit der Polarisationsrichtung der "Austritts-Seite" ("Analysator"-Platte) übereinstimmt  $\Rightarrow$  minimale Lichtabschwächung.

Bei Anlegen eines elektr. Feldes werden die Molekülachsen aus ihrer Ruhelage gedreht  $\Rightarrow$  Polarisationssebene wird nicht mehr verändert  $\Rightarrow$  Analysator wirkt stark absorbierend, Flüssigkristallzelle wirkt lichtundurchlässig.



## Blickwinkelabhängigkeit

Für einen Lichtstrahl, der schräg durch das Display geht, verlängert sich der Weg durch die Flüssigkristallschicht. Die kritisch abgestimmte Schichtdicke der LCs, die zu einer Polarisationsdrehung von genau  $90^\circ$  führen soll, gilt nur für senkrechten Einfall. Die längere Wegstrecke bei schrägem Einfall führt zu einer anderen Polarisationsrichtung und damit zu unerwünschter Transmission und somit zu einem schlechteren Kontrast.



Problem: Ansteuerung der Zellen

### TFT (Thin Film Transistor)-Technik

Bei aktuellen Bildschirmen müssen mindestens  $1024 \times 768 \times 3 \approx 2,3$  MPixel (pro Bildpunkt drei Pixel für die Grundfarben) schnell genug angesteuert werden. Erst mit TFT (Thin Film Transistor)-Technik konnte Lichtdurchlässigkeit jedes Pixels von einem eigenen Transistor als Schalter gesteuert werden.

### Pixel

Um Pixel zu erhalten bleibt eine der leitenden ITO-Schichten auf den Substraten unverändert, die andere Schicht bildet dagegen ein **Array aus ITO-Rechtecken**, an die jeweils ein TFT angeschlossen ist. Senkrechte und waagrechte Leitungen verbinden die Transistoren. Die Maße der ITO-Rechtecke bestimmen die Pixelgröße.

Herstellung des Arrays mit Ätztechniken und Fotolithografie. Der Transistor wird klein in der Ecke des Pixels positioniert, um möglichst wenig Licht wegzunehmen.

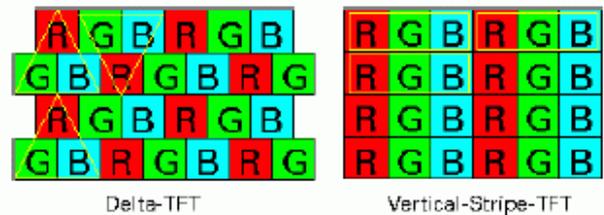
# Farben

Ein **Bildpunkt** setzt sich zusammen aus drei benachbarten Pixeln mit rotem, grünem und blauem **Farbfilter**.

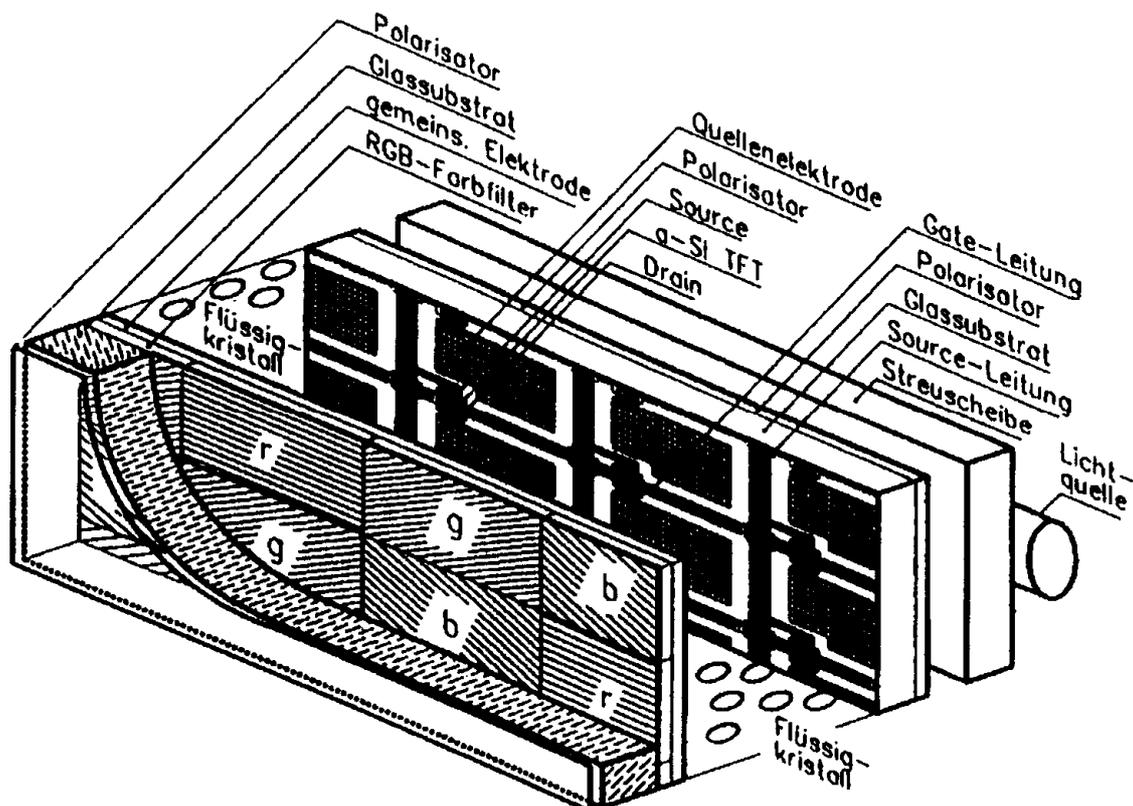
Das Leuchtmittel selbst ist eine schmale **Leuchtstofflampe**, die neben etwas sichtbarem Licht vor allem ein UV-Spektrum liefert. Erst die Beschichtung an der Innenseite der

Glasröhre macht daraus sichtbares Licht. Um die Farbsättigung zu erhöhen, wird die Beschichtung so gewählt, daß vor allem Licht in den drei Grundfarben (rot, grün, blau) die Lampe verläßt. Eine flacher **Lichtleiter plus Diffuser-Scheibe** verteilt das Licht der dünnen Leuchtstofflampe (dünne Röhre oben) an der Seite des Displays gleichmäßig über die gesamte Fläche.

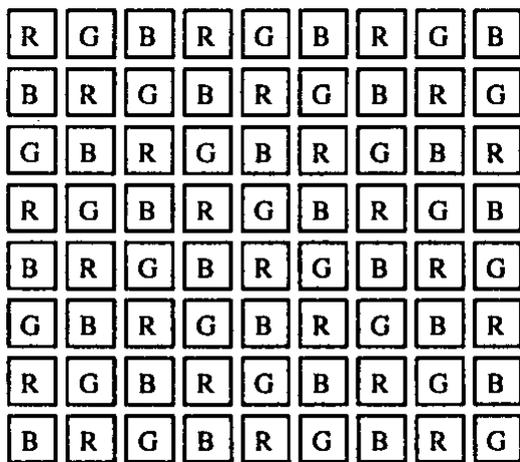
Desktop-Displays sind mit bis zu vier Röhren bestückt, an jeder Seite eine. Notebook-Displays begnügen sich dagegen i.d.R. mit zwei.



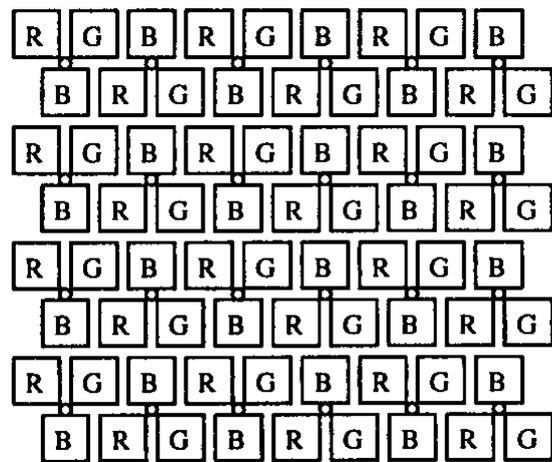
Aufbau einer LC-Anzeige:



Zellenanordnungen bei Farb-LCDs:



(a)

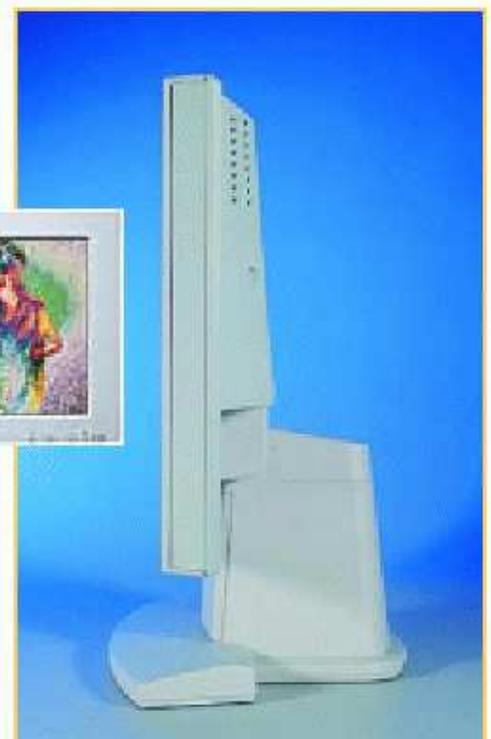


(b)

(a) orthogonal, (b) deltaförmig.

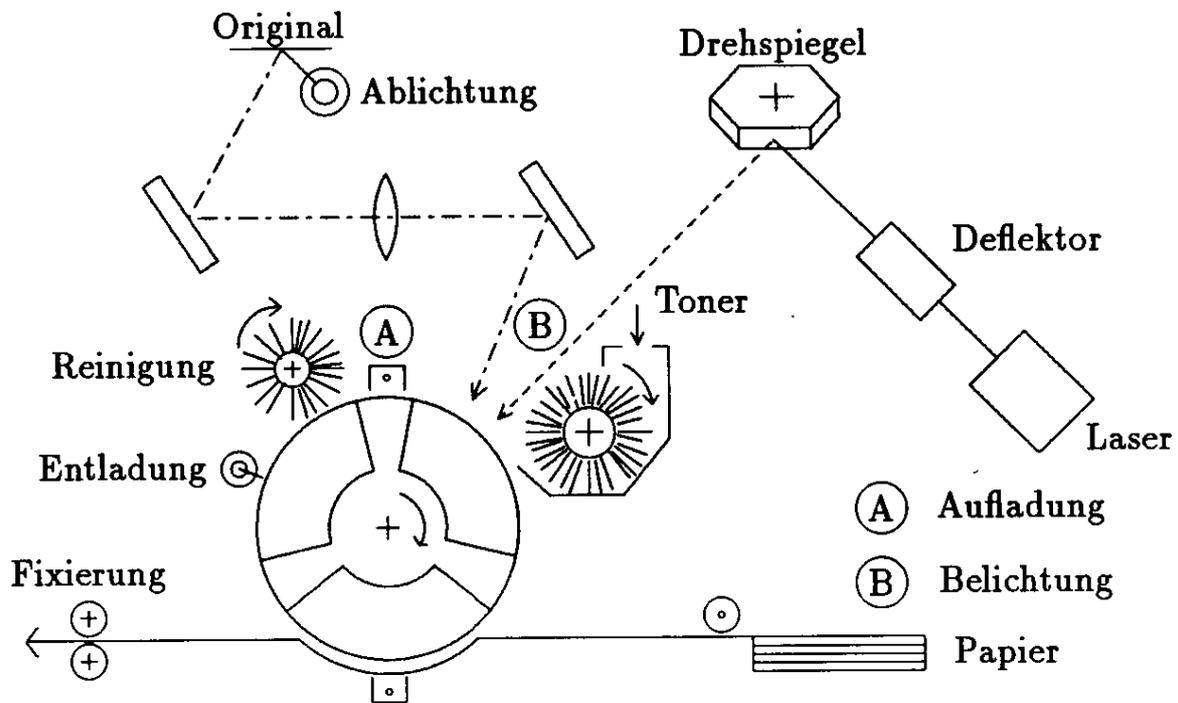
## Flüssigkristallanzeigen (LCD) Zusammenfassung

- + Geringe Leistungsaufnahme (25 W)
- + niedrige Betriebsspannung
- + flimmerfrei
- + gute Kontrastwerte
- + digital (keine digital-analog Wandlung notwendig)
- + leicht
- + klein
- + notwendig für mobile Geräte
  
- passiver Arbeitsweise Anzeigeelemente lassen Licht durch, oder reflektieren es: zusätzliche LQ sind nötig.
- Geringer Betrachtungsbereich
- aufwendige Herstellung
- teuer



## Drucker

Prinzip des xerographischen Druckverfahrens (Laserdrucker, Kopierer):



In einem Dunkelraum wird mittels einer Coronaentladung die fotoleitfähige Selenschicht auf einer sich ständig drehenden Aluminiumtrommel mit einer positiven Flächenladung versehen.

Dieser fotoleitfähigen Schicht, die sich im Dunkeln wie ein Isolator und im Hellen wie ein Halbleiter verhält, wird die zu druckende Information durch entspr. Belichtung mittels Laser als latentes Entladungsbild aufgeprägt.

Dieses wird anschließend in einer Tonerstation mit einem positiven Toner sichtbar gemacht.

Hinter dem Toner wird dieses Bild mit dem synchron laufenden Normalpapier in Kontakt gebracht. Dabei werden die Tonerpartikel durch Anlegen eines elektrostatischen Feldes auf das Papier übertragen und anschließend durch Hitze fixiert.

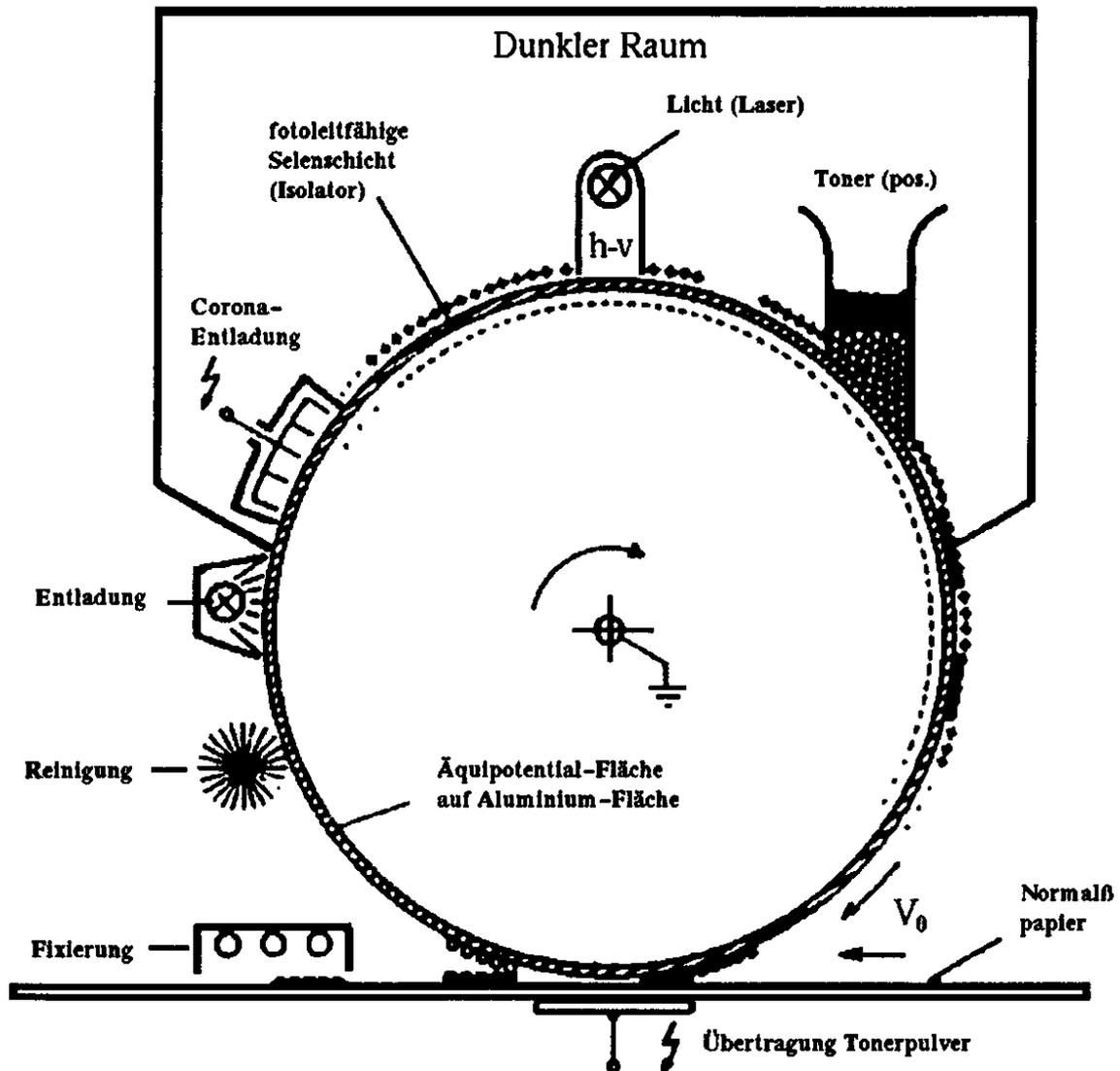
Vor einer erneuten Aufladung wird die fotoleitfähige Schicht von restlichen Tonerpartikeln gereinigt und entladen.

Farbdarstellung durch Kopplung mehrerer Stationen mit verschiedenfarbigen Tonern.

Laserdrucker sind Seitendrucker, denn der Druckvorgang lässt sich jeweils nur zum Seitenende stoppen.

(aus Encarnaçao et al. 1996)

realitätsnähere Darstellung:



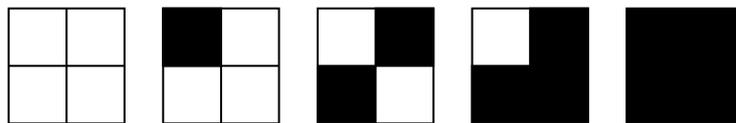
## Maße für die Auflösung von Druckern: DPI, LPI und PPI

DPI = dots per inch (oft 70–100 dpi), Angabe der tatsächlichen (physikalischen) Bildpunkte pro inch Länge. Information kann irreführend sein, da ein Teil dieser Pixel für Grauwert- oder Farbwert-Matrizen verbraucht werden kann!

LPI = lines per inch, unabhängig ansteuerbare Bildzeilen pro inch (wichtiger zur Qualitätsbeurteilung eines Druckers als die dpi-Zahl!).

PPI = pixels per inch (ein Pixel kann Grauwert- oder Farbinformation enthalten und aus mehreren dots bestehen).

Beispiel: Drucker mit 10 dpi und Halbtonmatrix aus 2x2 Punkten



⇒ 5 Grauwerte sind darstellbar; 10 dpi : 2 Punkte pro Pixel = 5 ppi.

Realistisch sind 7x7- oder 8x8-Halbtonmatrizen, d.h. 600 dpi entsprechen ca. 80 ppi.

Darstellung von Farbtönen:

Tintenstrahldrucker: nur eine CMYK-Grundfarbe pro Rasterpunkt, da das Papier nicht zu feucht werden darf.  
⇒ Mehr als 4 Farbpatronen bringen hier einen Vorteil!

Mischfarben durch Halbtonmatrizen (vgl. Graustufen).  
Bei einem einfachen CMY-Drucker (3 Farbpatronen) gilt folgende Tabelle:

Matrixgröße	Farbenzahl
1 x 1	4
2 x 2	35
3 x 3	220
4 x 4	969
5 x 5	3 276
6 x 6	9 139
7 x 7	22 100
8 x 8	47 905
9 x 9	95 284
10 x 10	176 851

(nach Wagenführ 2001)

⇒ man braucht relativ große Matrizen, um viele Farben darstellen zu können. Der Farbraum von Druckern ist kleiner als der von Grafikdateien.

Farblaserdrucker können auf 1 Rasterpunkt die CMY-Farben mischen (jedoch nur mit jeweils voller Intensität)

⇒ Halbtonmatrix kann kleiner gewählt werden

⇒ dpi-Zahl darf für gleiche Qualität kleiner ausfallen!

Ausschnitte aus:

Krömker 2001, Schlechtweg 2001, Schumann & Müller 2000,  
van Dam 2001; genaue Quellenangaben siehe

[http://www.uni-forst.gwdg.de/~wkurth/cg08\\_lit.htm](http://www.uni-forst.gwdg.de/~wkurth/cg08_lit.htm)