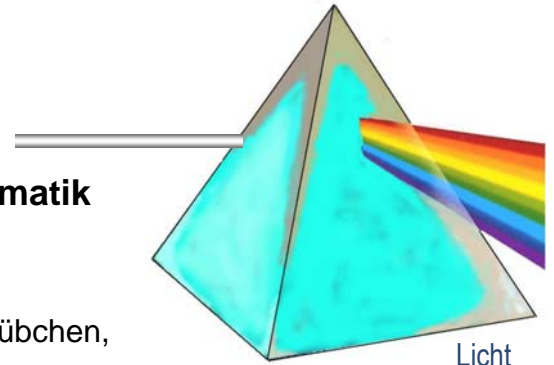


# Strahlung, Licht, Hellempfinden und Farbe



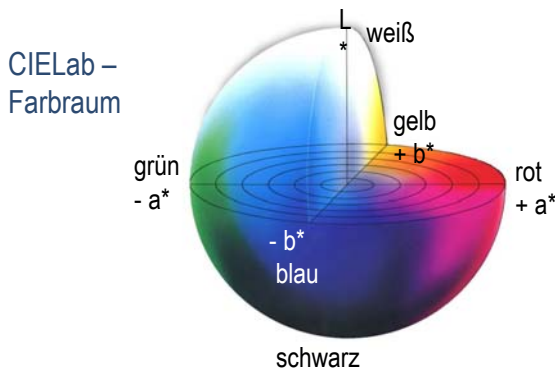
Privatdozent (PD) Dr.-Ing. habil. K.-H. Franke

Technische Universität Ilmenau  
Fakultät für Informatik und Automatisierung  
Institut für Praktische Informatik und Medieninformatik  
Fachgebiet Graphische Datenverarbeitung



Licht und Farbe

ZBS, Werner-von-Siemens-Str. 10, Sekretariat, Monika Stübchen,  
Tel.: (03677) 6897 680  
oder Sekretariat FG GDV, Frau Franziska Katzki, Zusebau, Zi. 2039,  
Tel.: (03677) 69 4119



Tel.: (03677) 6897 681 (680)  
(0172) 36 27 701  
Fax: (03677) 6897 682  
email: karl-heinz.franke@tu-ilmenau.de  
Internet: <http://www.zbs-ilmenau.de>

Ilmenau, 20.10.2013



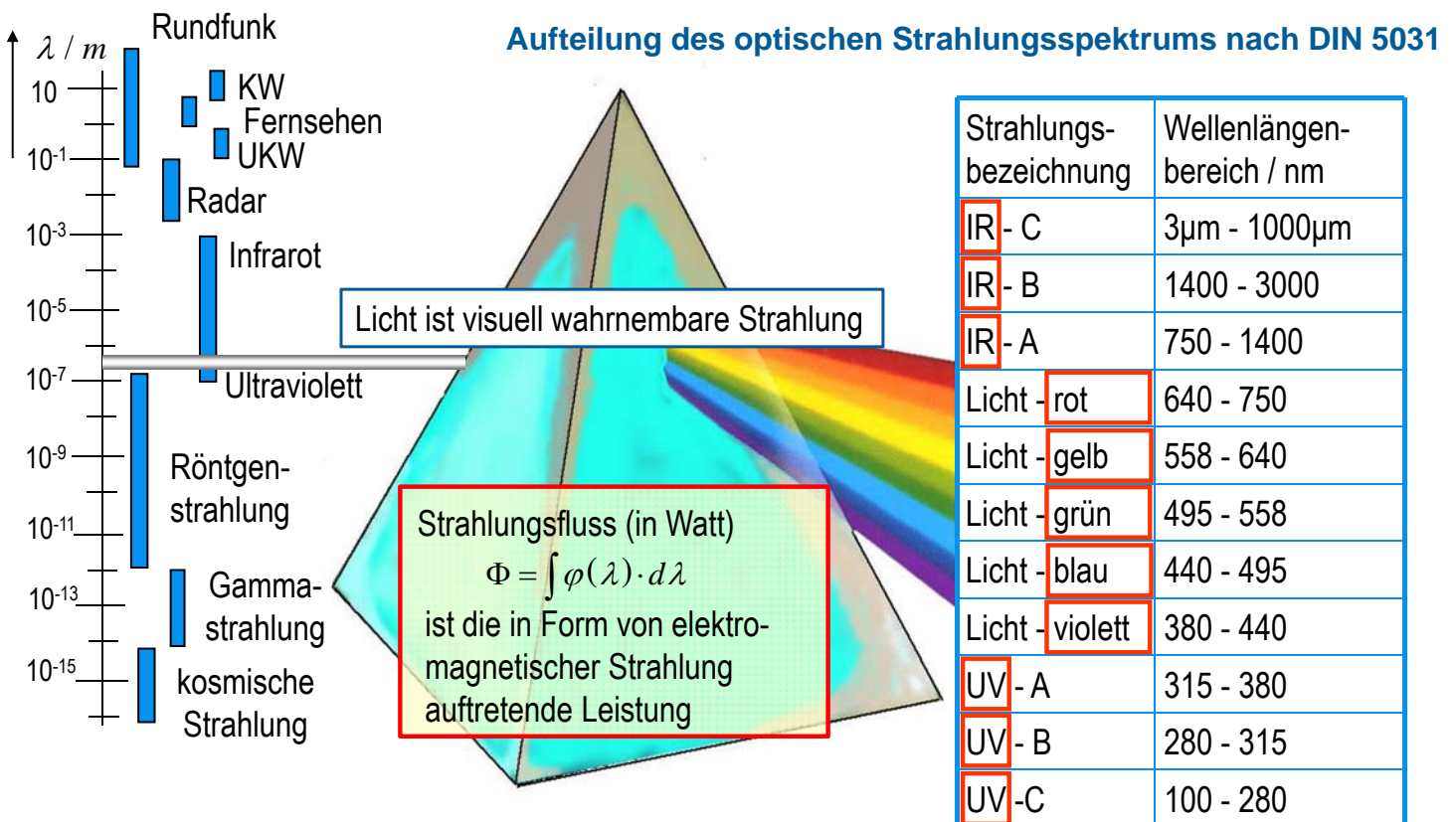
- ▶ **Bildverarbeitung & Mustererkennung (2V/1Ü, Medientechnologie / Informatik / Ingenieurinformatik / ..)**  
*Primärwahrnehmung, Vektorräume, Bildtransformationen* (Fourier ... Wavelets), *Grauwertstatistik* (1D / 2D, Texturen), *Punktoperationen* (Kontrast, Shading), *lokale Faltungsoperatoren, adaptive nicht-lineare Filter, Morphologie, Luminanzkanten, Segmentierung* (regional), *Merkmale* und *Klassifikation*  
*Termine:* V: Dienstag 17<sup>00</sup>- 18<sup>30</sup> Uhr, LdVHS2 / Ü.: Montag(U)17<sup>00</sup> – 18<sup>30</sup> Uhr, Ort: SrHu 211/212
- ▶ **Vertiefung Bildverarbeitung und Mustererkennung (2V / 1S; Master)**  
*Adaptiven Bildverbesserung*, inverse Probleme und *Bildrestauration*, Kontursegmentierung und *Vektorisierung, multikanalige Bildverarbeitung und –analyse, Bildfolgen, Merkmalextraktion für Segmente, Charakterisierung unterschiedlicher Klassifikationsansätze, Bildkodierung*  
*Termine:* Sommersemester
- ▶ **Erfassung und Verarbeitung von 3D-Daten (2V / 1S)**  
*Wahrnehmungsphysiologische Aspekte*, klassische Methoden, *Nanomesstechnik, passives Stereo, Streifenlichtverfahren, Schnitttechnologien (CT, MRT, PET), Fokusserien, konfokale Mikroskopie, Laufzeittechniken, Weißlichtinterferometrie, Subpixeling, 3D-Punktewolken*  
*Termine:* → V: Mittwoch, 17:00 -18:30 Uhr, SrHu 013 / Ü.: Montag(u) 13:00-14:30 Uhr, SrHu 129

- ▶ **Grundlagen der Farbbildverarbeitung (2V / 1S)**  
*Wahrnehmungsphysiologie und –psychologie*, Modell der Farbe, *Spektralwertmetrik, Farbräume, Farbmessung, Color-Management*, Vektorfelder und Statistik, Farbraumtransformationen, Normalisierung und *referenzfreie Farbkorrektur*, Farbkanten, *Farbklassifikation, Clusterung, Farbsegmentierung, Hyperspektraltechnik*  
*Termine:* Sommersemester
- ▶ **Wissenschaftlich-Technische Visualisierung (1V)**  
*Mapping, Überführung von Topologien, Isolinien und 2D-Isflächen, Volumenvisualisierung, Radon-Transformation, Ray Casting)*  
*Termine:* Sommersemester
- ▶ **Analyse von Volumenbildern (1V)**  
*Connectivity und verbundene Komponenten, Operationen auf 3D-Labelbildern), Oberflächen- und Regionensegmentierung in 3D, Modellierung und Registrierung von Objekten*  
*Termine:* Sommersemester

# Warum das Kapitel „Strahlung, Licht, Hellempfinden und Farbe“

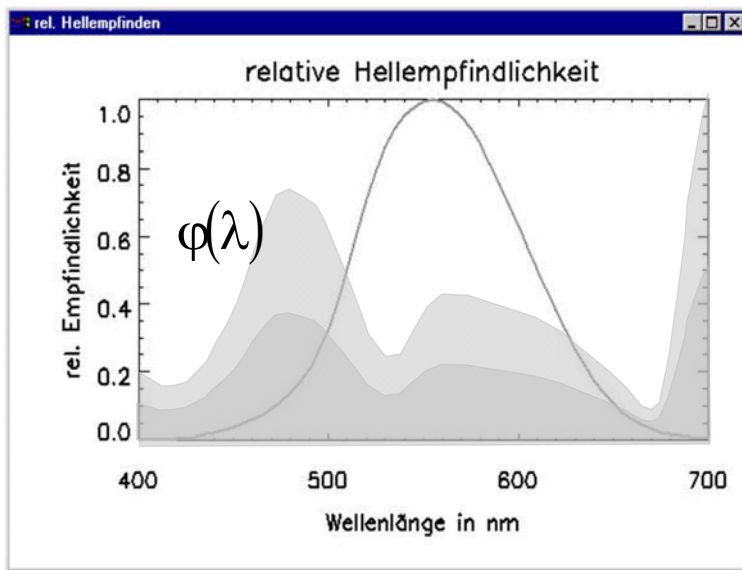
- ▶ **Fotorealistisches Rendern spielt eine zunehmende Rolle** bei der Planung (Gebäude, Möbel, Designs von Kleidung), in der Werbung, beim Verkauf, bei Computerspielen und im Bereich Foto / Video  
→ kurz **bei allen Anwendungen von der einfachen Visualisierung bis zu Virtual (VR) und Augmented Reality (AR)**
- ▶ Die Bedeutung der **Wechselwirkung zwischen Beleuchtung und Farbstoffen** sowie die Wirkung auf das Auge bei unterschiedlicher Adaption ist **aus der täglichen Erfahrung**, z.B. beim Kauf von Konsumgütern **bekannt**.
- ▶ Anspruchsvolle Systeme der VR und AR müssen allen physikalischen und physiologischen Wirkungen bei der Wahrnehmung von Objekten und Szenen entsprechen! Das gilt insbesondere auch und in zunehmendem Maße für dynamische Szenen mit **veränderlichen Lichtern** und **bewegten Objekten**.
  - Wird z.B. eine Glühlampenszene durch hinzukommendes Sonnenlicht „erhellt“, so ändern nicht alle Objekte ihre Farbe in gleicher Weise! Breitbandig weiße Objekte werden z.B. von rötlich in Richtung weiß oder bläulich verschoben, langwellig rot reflektierende Objekte behalten ihren Farbton und werden nur heller.
  - Die **spektrale Zusammensetzung der Bestrahlung**, das **spektrale Reflexionsverhalten** der Farbstoffe und die Fähigkeit, **Farbwahrnehmungen** zu entfalten, müssen also im Zusammenhang betrachtet werden!!
- ▶ **Die physikalischen und physiologischen Zusammenhänge finden deshalb im Methoden-Repertoire der Computergraphik in zunehmenden Maße Widerspiegelung.**

## elektromagnetische Strahlung und Licht



## Leuchtdichte (Luminanz) als Vorstufe der Helligkeit

CIE-Definition: Die Luminance  $Y$  ist Strahlungsleistung, bewertet mit der **spektralen Empfindlichkeitsfunktion des menschlichen Auges** für das Hellempfinden ( $V(\lambda)$ -Kurve, mechanische Lichtäquivalent).

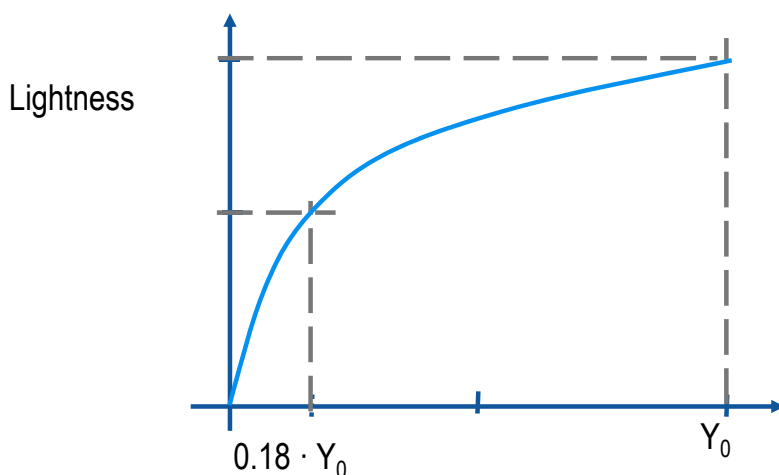


$$Y = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \varphi(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot M^{-1} \cdot d\lambda$$

Die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Sinnessystems ist in der Leuchtdichte (Luminanz  $Y$ ) berücksichtigt, nicht aber die nichtlineare Bewertung der Strahlungsleistung beim Hellempfinden. **Die Luminanz stellt deshalb eine Vorstufe zur Wahrnehmung von Helligkeit dar.**

## Leistungsabhängigkeit des Hellempfindens

Eine Quelle, die nur 18% der Luminanz  $Y_0$  einer Referenz hat, erscheint uns immer noch halb so hell wie die Referenz. Die perzeptuelle Antwort unseres Auges auf die Luminanz wird Helligkeit (Lightness) genannt (siehe Weber-Fechnersches Gesetz  $\Delta Y/Y = \text{const.} \approx 0.01$ , **Hellempfinden zeigt näherungsweise log- oder  $\sqrt{\quad}$ -Abhängigkeit, genauer nach CIE  $\rightarrow L^*$ , vertiefte Darstellung in Vorlesung „Grundlagen der Farbbildverarbeitung“**)

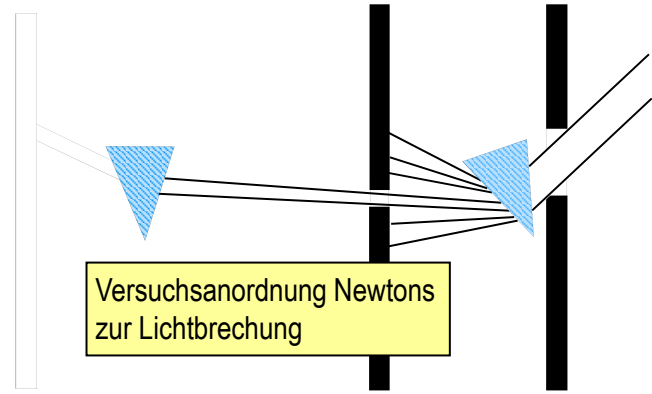


$L^* \in [0, 100]$  und ein  $\Delta L^*$  von 1 stellt etwa die Sichtbarkeitsgrenze dar.

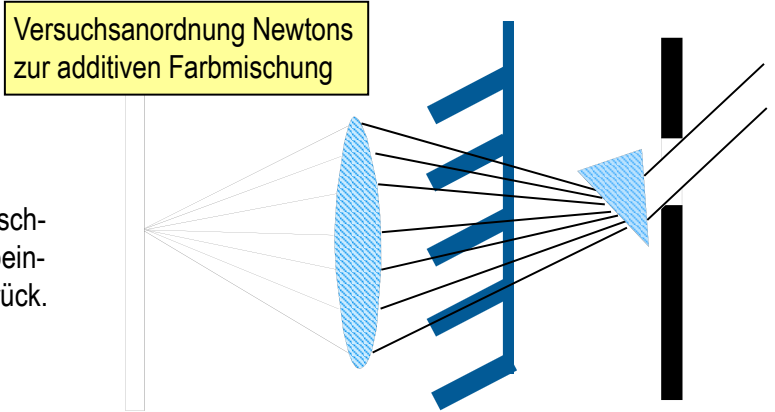


# Farbe: Geschichtliches, physikalische Aspekte

- ▶ Bis Newton (1643 - 1727) waren die Erklärungen der mannigfaltigen Farbeffekte mangelhaft.
- ▶ Newton 1672: A New Theory about Light and Colours?
  - ✓ Korpuskular- bzw. Emissionstheorie
  - ✓ Sonnenlicht ist eine Mischung von einzelnen Farben
  - ✓ Spektralfarben sind objektive Eigenschaft des Lichtes
  - ✓ umstürzlerisch, es gab keinen Vorgänger, Theorien bisher nur von Malern wie Leonardo da Vinci



- ▶ Durch Sammellinse lässt sich aus dem Spektrum wieder weißes Sonnenlicht erzeugen.
- ▶ Langsames kammartiges Ausblenden führt zu bunten Mischfarben. Schnelles Durchkämmen führt zu unbuntem Farbeindruck. Newton führte dies auf die Trägheit des Auges zurück.



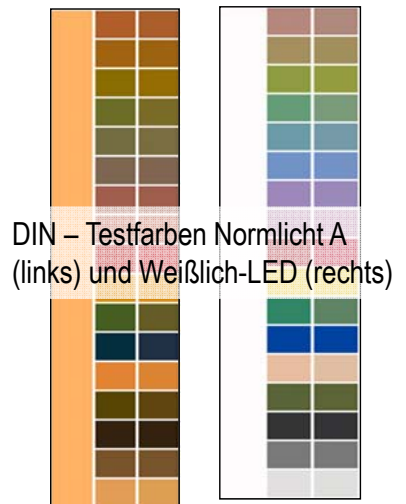
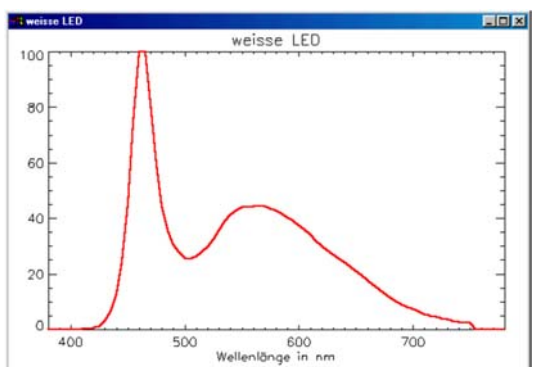
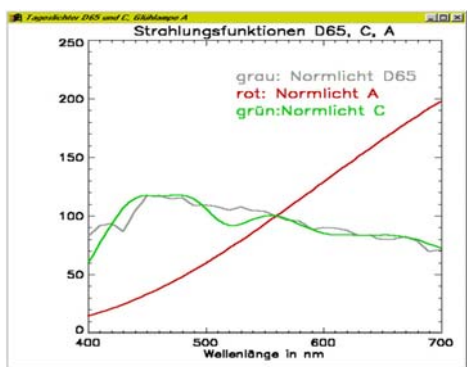
# Begriffe: Farbe, Farbreiz, Farbstoff

▶ Elektromagnetische Wellen zwischen 380 und 780 nm rufen **Sinneswahrnehmungen** des menschlichen visuellen Systems hervor, die als **Farbe (Color)** bezeichnet werden.

▶ Der ins Auge fallende physikalische **Farbreiz**  $\varphi(\lambda)$  entsteht in der Regel durch **Modifikation der spektralen Charakteristik**  $S(\lambda)$  **der Lichtquelle** mittels **Farbstoff (Colorant)**  $\beta(\lambda)$  oder  $\tau(\lambda)$ .

$\varphi(\lambda) = S(\lambda) = c \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda}$	$\varphi(\lambda) = \beta(\lambda) \cdot S(\lambda)$	$\varphi(\lambda) = \tau(\lambda) \cdot S(\lambda)$
Selbstleuchtendes Objekt	Auflichtvorlage	Durchlichtvorlage

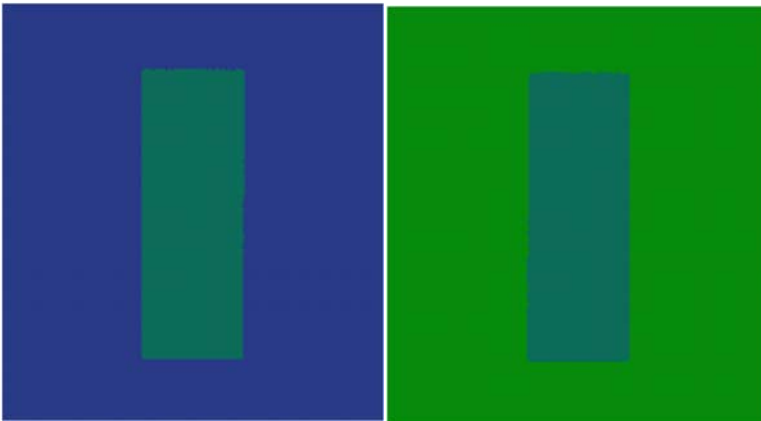
**WICHTIG !!** Gegenstände (hier DIN - Testfarbkarten) sehen bei unterschiedlicher Beleuchtung unterschiedlich aus → deshalb Normlichter.



- ▶ Die menschliche **Sinneswahrnehmung Farbe** (z.B. Buntton, Sättigung und Helligkeit) ist, wie noch gezeigt wird, unter Berücksichtigung der **Physiologie der Zapfen** im Auge **aus dem physikalischen Farbreiz berechnen- oder messbar**.
- ▶ **So eindeutig** ist die Zuordnung zwischen Physik und Wahrnehmung **allerdings nur, wenn wir die (bunten) Dinge isoliert betrachten**.

Werden bunte Flächen oder Objekte **in bunte Umgebungen eingebettet** und / oder **bewegt**, dann können abweichende Farbwahrnehmungen auftreten, die oft als Farbtäuschung bezeichnet werden. (besser: „**Farbwahrnehmungen können sich ändern**“ / Farbinduktion – Farbkonflikt – Subjektive Farben, **ausführlichere Darstellung in „Grundlagen der Farbbildverarbeitung“** )

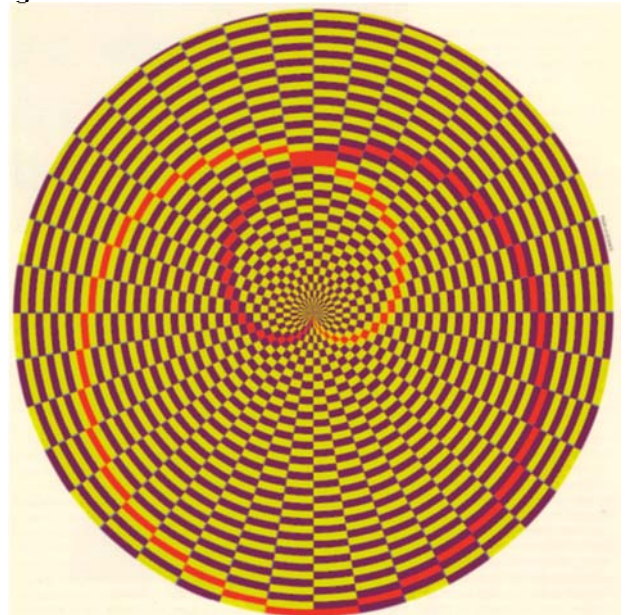
## Farbtäuschung (Farbinduktion / simultaner Farbkontrast)



- ▶ Farben werden im Ton durch ihre Umgebung modifiziert. Das Blaugrün in der Mitte der beiden Quadrate ist exakt identisch!
- ▶ Kein Fehler unserer Sinnesorgane → Aufgabe des visuellen Systems besteht nicht im Messen, sondern im **optimalen Erkennen von Objekten** → **Ähnlichkeiten abschwächen, Unterschiede verstärken** (Evolution)!

Bei **kleinteiligen, sich wiederholenden Strukturen** → **Angleichung** statt Kontrastverstärkung ! Dies kann zur **Rauschunterdrückung** oder zur **Unterdrückung von Feintexturen** zugunsten der **Erkennung größerer Objekte** wichtig sein!

- ▶ Die beiden roten Spiralen weisen exakt die gleichen Farbwerte auf !

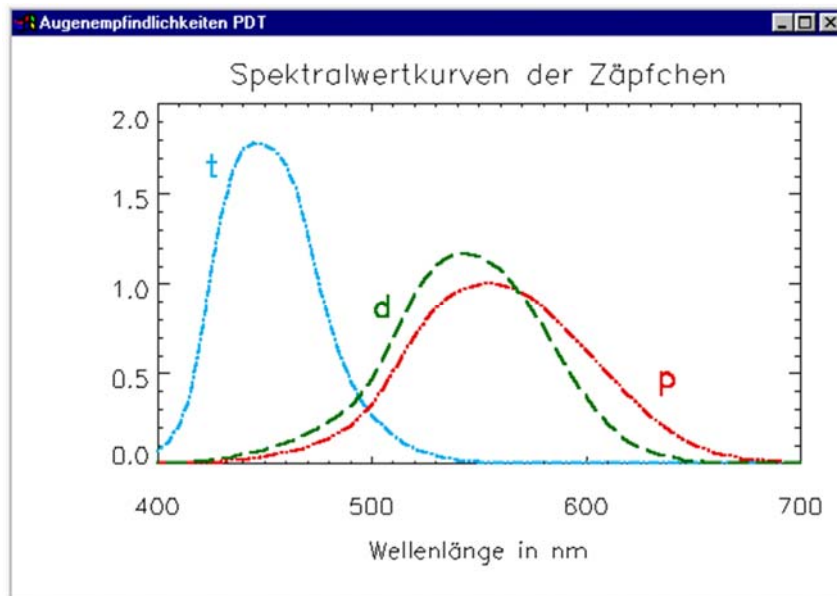


## Farbwahrnehmung beim Menschen (physiologische Aspekte)

### Rezeptive Wahrnehmung

T. Young 1807: Hypothese, dass Farbsehen auf drei Arten von Sinneszellen beruht (rot, grün, blau)

Graßmann 1853: ein und dieselbe Farbwahrnehmung kann durch unendlich viele unterschiedliche Farbreize  $\varphi(\lambda)$  erzeugt werden, Farbwahrnehmungen sind durch drei beliebige, linear unabhängige Größen darstellbar.



## Farbwahrnehmung (psychologische und physiologische Aspekte)

### Postrezeptive Kodierung

- ▶ Additive Farbmischung und Farbfehlsichtigkeiten durch Zapfenausfall konnten durch Dreifarbentheorie erklärt werden. **Nicht zu erklären waren eine Reihe weiterer psychologischer Beobachtungen:** qualitativer Unterschied zwischen unbunten und bunten Farben / vier bunte Farben werden als besonders rein empfunden (Rot, Gelb, Grün, Blau) / Gleichberechtigung von schwarz und weiß.
- ▶ Hering 1905: Gegenfarbentheorie mit den gegenläufigen Prozessen (ausführlicher in „Grundlagen der Farbbildverarbeitung“)

## Farbwahrnehmung (psychologische und physiologische Aspekte)

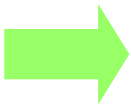
### Kortikale Kodierung

- ▶ Weder die Helmholtzsche Dreifarbentheorie noch die Heringsche Gegenfarbentheorie beschreiben die Farbe, wie sie vom Menschen bewusst wahrgenommen bzw. beschrieben wird.
- ▶ Deshalb erweitertes Modell: Farbton oder besser Bunton + Sättigung + Helligkeit (ausführlicher in „Grundlagen der Farbbildverarbeitung“).

## Begriff der Farbe

**Farbe** im engeren Sinne stellt eine **spezielle menschliche Sinneswahrnehmung** dar !!

- ▶ Farbwahrnehmung beruht auf einer speziellen (menschlichen) physiologischen und psychologischen Basis
- ▶ Hellempfinden ist (für helladaptiertes Auge) aus den Farben abzuleiten!
- ▶ Durch das menschliche Auge unterscheidbar: ca. 100 Graustufen      ca. 300 000 Farben
- ▶ Dieses ausgeprägte Farbdifferenzierungsvermögen, der damit verbundene höhere Informationsgehalt unterstreichen die Bedeutung der Farbe
- ▶ Drei grundsätzliche Anwendungen von Farbinformation
  - Pseudokolorierung      } wissenschaftlich-technische
  - Falschfarbdarstellung } Visualisierung
  - Echtfarbdarstellung (true color) - Farbbildreproduktion, photorealistisches Rendering, VR, **AR**



Schwerpunkt der weiteren Darstellungen ist : **True Color**

## Das Modell der Farbe

Definition: (DIN 5033)

**Farbe ist diejenige Gesichtsempfindung** eines dem Auge strukturlos erscheinenden Teils eines Gesichtsfeldes, durch die sich dieser Teil bei einäugiger Beobachtung mit unbewegtem Auge von einem gleichzeitig gesehenem, ebenfalls strukturlos angrenzendem Bezirk allein unterscheidet. (unbunten Farben: Schwarz, Weiß und die Grautöne; bunten Farben: Helligkeit; Buntheit setzt sich aus Buntton und Farbsättigung zusammen)

**Farbe** (in unbunter Umgebung) **ist durch Helligkeit, Buntton und Sättigung eindeutig bestimmt.**  
**Dieses oder ein ähnliches dreidimensionales (3D) Modell ist für das Verständnis der Farbe erforderlich.**



Wir benötigen drei (linear) unabhängige Größen (Graßmann)

- ▶ zur Beschreibung der Farbempfindung
- ▶ zur (technischen) Reproduktion der Farbempfindung



Wir wählen zunächst

- ▶ die additive Mischung als Reproduktionsmethode
- ▶ drei Primärfarben (farbige Lichter) Rot, Grün und Blau



- ▶ Drei linear unabhängige Größen spannen stets einen 3D-Raum auf
- ▶ Wir ordnen R,G,B drei orthogonalen Achsen dieses Raumes zu

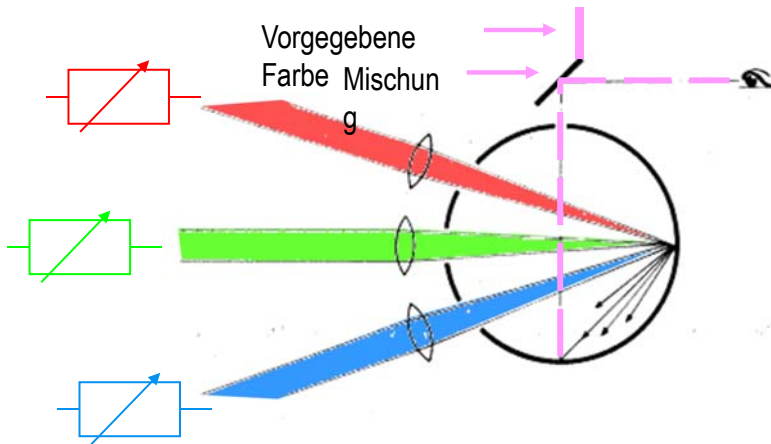
$$\underline{F} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} \stackrel{z.B.}{=} \begin{Bmatrix} R \\ G \\ B \end{Bmatrix}$$



# Farbwahrnehmung und Farbvalenz

Vergleichsmethode zur Ermittlung der Farbwerte der Primärvalenzen:

**Innere Farbmischung:**  $\underline{F} = R \cdot \underline{r} + G \cdot \underline{g} + B \cdot \underline{b} \quad R, G, B \in [0, 1]$



**Äußere Farbmischung:**

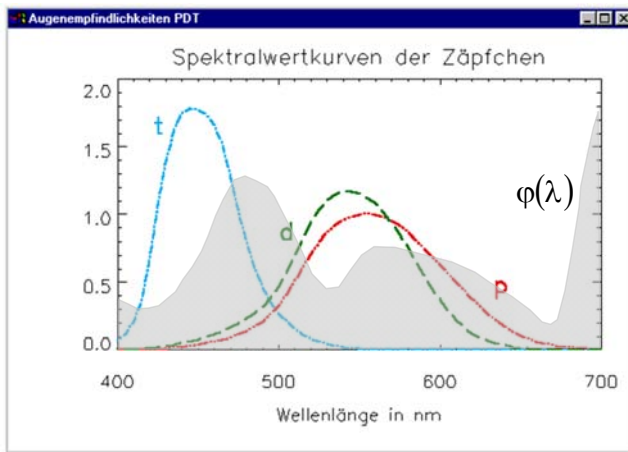
$$\underline{F} + B \cdot \underline{b} = R \cdot \underline{r} + G \cdot \underline{g}$$

$$\underline{F} = R \cdot \underline{r} + G \cdot \underline{g} - B \cdot \underline{b}$$

**Wichtig:** Für eine Reihe von Farbwahrnehmungen nehmen die beschreibenden Farbwerte geräteabhängiger Farbräume (RGB) negative Farbwerte an. Solche Farbwahrnehmungen lassen sich durch die zugehörigen Lichter der gewählten Primärvalenzen **nicht** additiv synthetisieren (ausführlicher in Grundlagen der Farbbildverarbeitung). Die negativen Bereiche in den entsprechenden Spektralwertkurven (und demzufolge in den Kameras) dürfen aber nicht geklippt werden, da sonst die spektralen Integrale (und damit die Farbwiedergabe) falsch werden !!!!

## Farbreizmetrik → die PDT- Farbwerte

Nutzt man die Zapfenempfindlichkeiten  $\bar{p}, \bar{d}, \bar{t}$  unmittelbar, so folgen für einen Farbreiz  $\varphi(\lambda)$  die PDT-Valenzen:

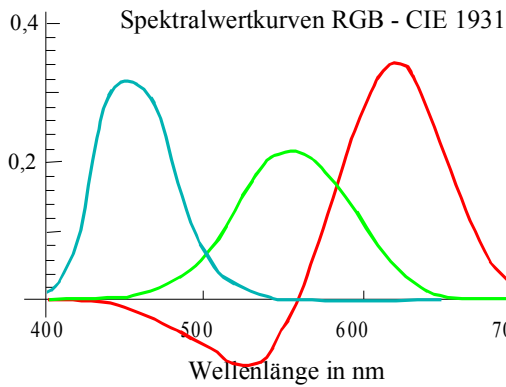
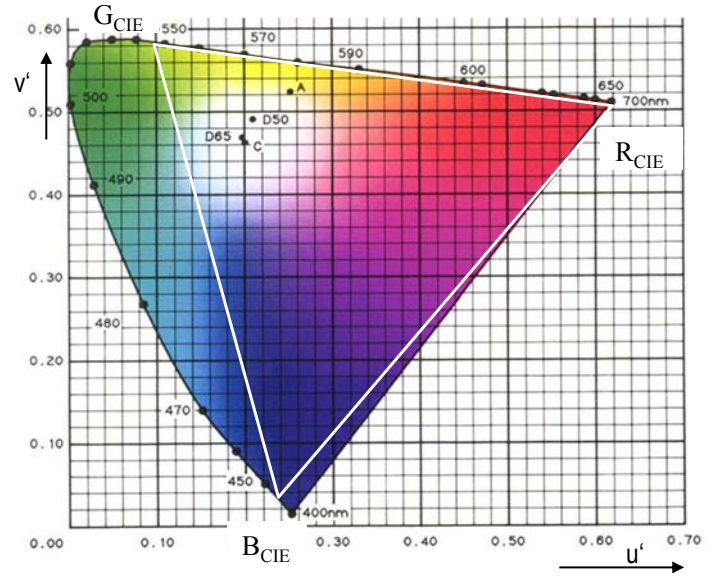
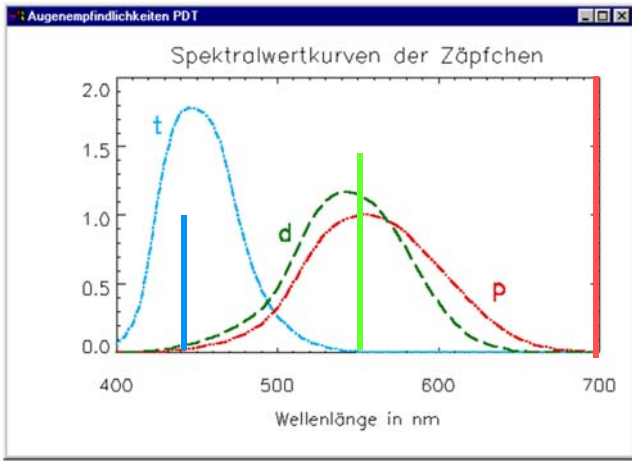


$$\begin{Bmatrix} P \\ D \\ T \end{Bmatrix} = k \int_{380nm}^{780nm} d\lambda \cdot \varphi_\lambda \cdot \begin{Bmatrix} \bar{p}(\lambda) \\ \bar{d}(\lambda) \\ \bar{t}(\lambda) \end{Bmatrix}$$

Aus den spektralen Charakteristiken der drei gewählten Lichtquellen und den Zapfenempfindlichkeiten  $p, d, t$  lassen sich die Spektralwertkurven des geräteabhängigen Farbsystems (z.B. RGB<sub>EBU</sub>) errechnen, so dass sich die Spektralwertmetrik für diesen Raum ergibt (ausführlicher in „Grundlagen der Farbbildverarbeitung“):

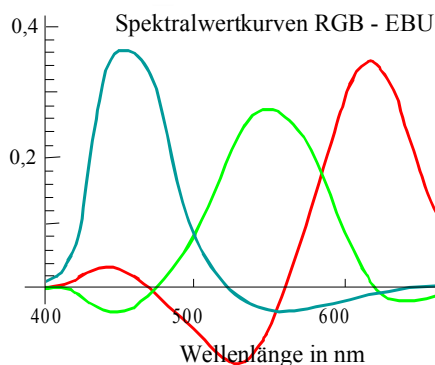
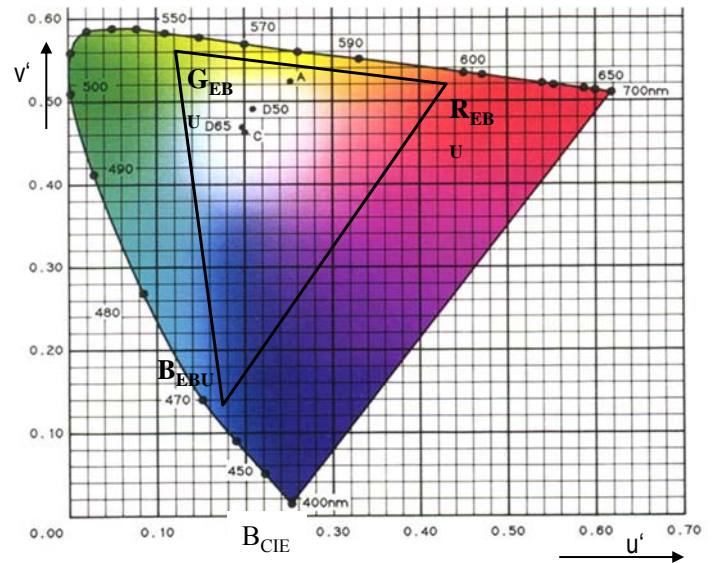
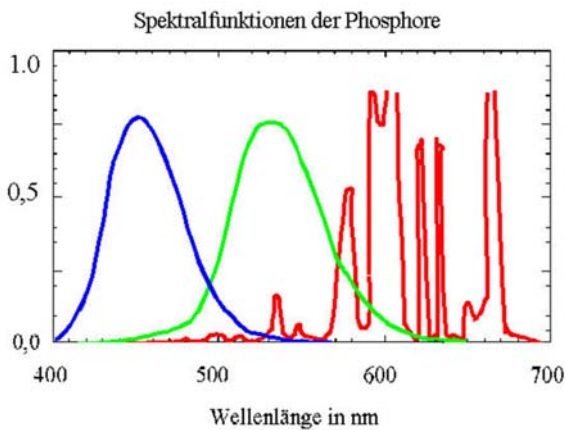
$$\underline{F} = \begin{Bmatrix} R \\ G \\ B \end{Bmatrix} = k \cdot \int_{380nm}^{780nm} \underline{f}(\lambda) \cdot \varphi(\lambda) d\lambda = \begin{Bmatrix} k \cdot \int_{380nm}^{780nm} r(\lambda) \cdot \varphi(\lambda) d\lambda \\ k \cdot \int_{380nm}^{780nm} g(\lambda) \cdot \varphi(\lambda) d\lambda \\ k \cdot \int_{380nm}^{780nm} b(\lambda) \cdot \varphi(\lambda) d\lambda \end{Bmatrix}$$

# RGB<sub>CIE</sub>-Lichter, RGB<sub>CIE</sub>-Spektralwertkurven und ermischarer Bereich



RGB-Empfindlichkeitskurven der „CIE-Kamera“

# EBU-Bildschirmphosphore, RGB<sub>EBU</sub>-Spektralwertkurven und ermischarer Bereich



RGB-Empfindlichkeitskurven der „EBU-Kamera“