

03-05-H  
-709.53

# Echtzeitbildverarbeitung (4)

Prof. Dr. Udo Frese

Differenzbild

Was ist Farbe?

Farbsegmentierung als statistische Klassifikation

# Was bisher geschah

- ▶ **Lineare Beleuchtungsinvarianz** heißt unabhängig von  $i \mapsto \alpha i + \beta$
- ▶ **Automatischer Schwellwert nach Otsu aus Histogramm:**
  - ▶ Minimiert den quadratischen Fehler beim Zuordnen zu zwei Grauwerten
  - ▶ Qualitätsschwelle im Vergleich zu Fehler beim Zuordnen zu einem Grauwert
  - ▶ Echtzeitimplementierung durch Laufsummen
- ▶ **Momente 0.-2. Ordnung bestimmen Position (Schwerpunkt), Orientierung (Hauptträgheitsachse) und Gestalt (Hauptträgheitsmomente)**
- ▶ **Symbolisiert durch äquivalente Ellipse (Halbmesser)**
- ▶  $(I, I_x, I_y, I_{xx}, I_{xy}, I_{yy})$  als Integral definiert, Summe über Intervallformel
- ▶ **Hauptträgheitseigenschaften aus Eigensystem von** 
$$\begin{pmatrix} I'_{xx} & I'_{xy} \\ I'_{xy} & I'_{yy} \end{pmatrix}$$

## Binarisierung durch Schwellwert

- ▶ Frage an das Auditorium: Könnte man das Schachbrett mit einem Schwellwert erkennen?



Quelle: wikipedia „Optische Täuschung“  
Mit vielen Beispielen und Links.

## Binarisierung durch Schwellwert

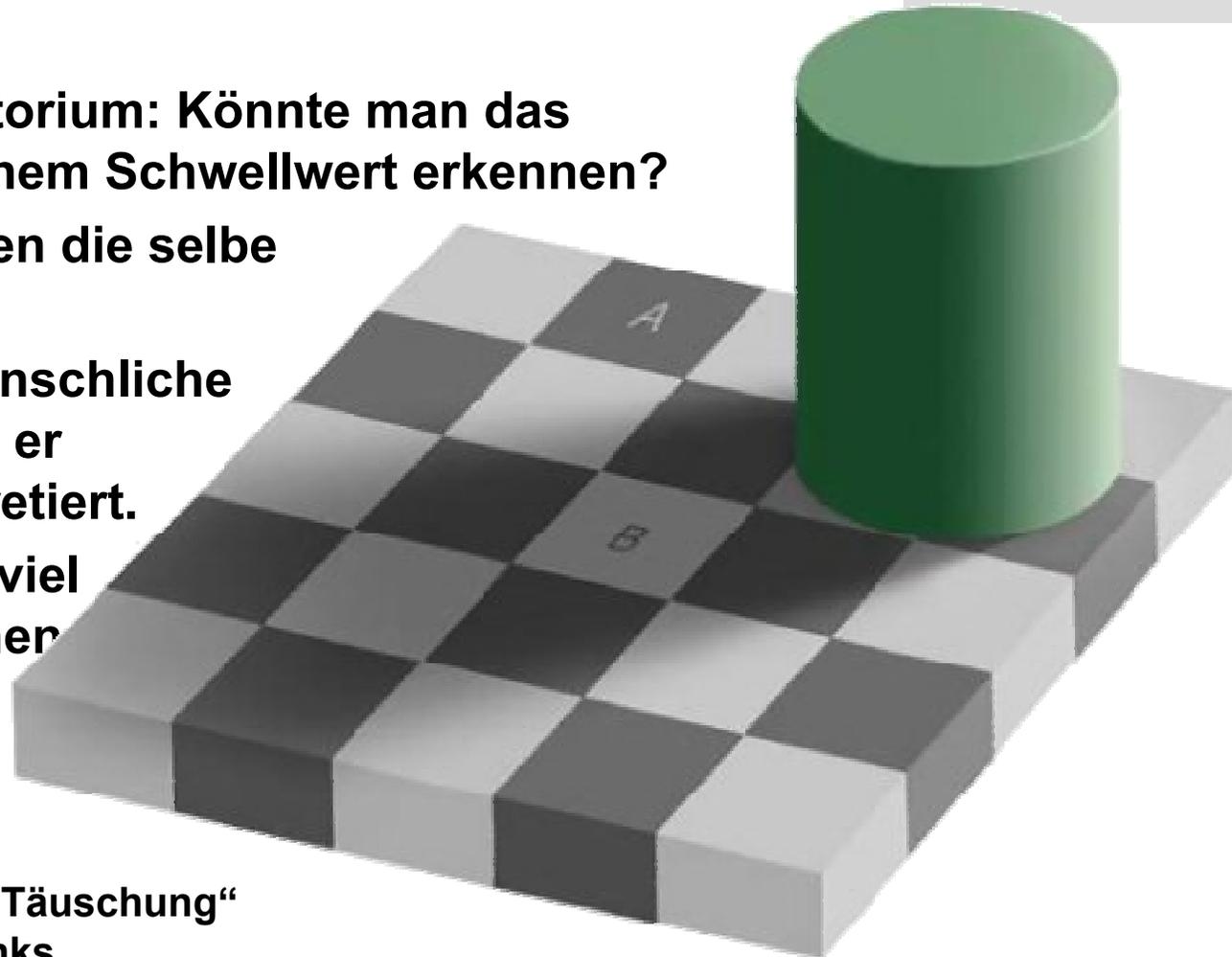
- ▶ Frage an das Auditorium: Könnte man das Schachbrett mit einem Schwellwert erkennen?
- ▶ Nein! A und B haben die selbe Helligkeit!



Quelle: wikipedia „Optische Täuschung“  
Mit vielen Beispielen und Links.

## Binarisierung durch Schwellwert

- ▶ Frage an das Auditorium: Könnte man das Schachbrett mit einem Schwellwert erkennen?
- ▶ Nein! A und B haben die selbe Helligkeit!
- ▶ Folgerung: Der menschliche Blick trügt oft, weil er unbewusst interpretiert.
- ▶ Szenarien können viel einfacher aussehen als sie sind.



Quelle: wikipedia „Optische Täuschung“  
Mit vielen Beispielen und Links.

# Differenzbild

# Differenzbild

## Erkennen von Bewegung in einer statischen Szene

- ▶ Z.B. für einen fliegenden Ball
- ▶ Voraussetzung: statische Szene und Kamera
- ▶ ziehe das aktuelle Bild von einem festen Referenzbild ab
- ▶ wo Differenz ist, hat sich etwas bewegt

$I(x,y)$



-

$I_{ref}(x,y)$



=

$I_{dif}(x,y)$



# Differenzbild

Frage an das Auditorium: Welche Probleme könnten auftreten?

# Differenzbild

## Frage an das Auditorium: Welche Probleme könnten auftreten?

- ▶ **Teile des Objektes haben zufällig dieselbe Helligkeit, wie der Hintergrund. Deshalb fehlen im Differenzbild Teile des Objektes.**
  - ▶ Lücken im Binärbild auffüllen
- ▶ **Hintergrund, oder Beleuchtung des Hintergrundes ändert sich (langsam)**
  - ▶ Referenzbild gleitend nachführen  $I_{\text{ref}} \pm \alpha (I - I_{\text{ref}})$ , für  $\alpha \approx 0.02$
- ▶ **Schatten oder Reflexionen**
  - ▶ Problemabhängiges Kriterium zum ausscheiden falscher Regionen

# Differenzbild

- ▶ **An Kontrastkanten reichen schon kleinste Kamerabewegungen um die Helligkeit eines Pixels zu ändern**
  - ▶ Differenz relativ zum Kontrast an dieser Stelle betrachten
  - ▶ Z.B. nach unterer Formel (Vorgriff auf Vorlesung über Kantenerkennung)

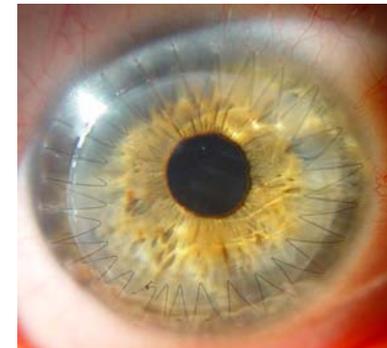
$$I_{dif}(x, y) = \frac{I(x, y) - I_{ref}(x, y)}{\frac{1}{2} \sqrt{(I_{ref}(x+1, y) - I_{ref}(x-1, y))^2 + (I_{ref}(x, y+1) - I_{ref}(x, y-1))^2}}$$

$$I_{dif}(x, y) = \frac{I(x, y) - I_{ref}(x, y)}{\frac{1}{8} \sqrt{SobelX^2 + SobelY^2}}$$

# Was ist Farbe?

# Was ist Farbe?

- ▶ **Verschiedene Begriffe werden als „Farbe“ bezeichnet**
  - ▶ Eigenschaft des Lichtes (Spektrum)
  - ▶ Eigenschaft von Objekten (ausgesandtes Spektrum abhängig vom empfangenen Spektrum)
  - ▶ Technische Farbdarstellung (Rechner / Fernseher)
  - ▶ Farbwahrnehmung (Auge / Gehirn)



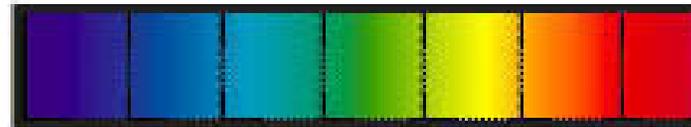
← **Physik**

**Physiologie** →

# Was ist Farbe?

## Farbe des Lichtes

- ▶ Licht ist eine elektromagnetische Welle
- ▶ Schwingungen verschiedener Wellenlänge / Frequenz überlagert
- ▶ sichtbar (vom Auge): rot 720nm / 420THz, violett 380nm / 790THz
- ▶ Farbe bzw. Spektrum: Energiemenge über Frequenz
- ▶ Astronomie: bestimmen von chem. Elementen, Temperatur, Entfernung
- ▶ Spektralfarben, Regenbogenfarben, Monochromatisches Licht, Laserlicht: nur eine einzige Wellenlänge

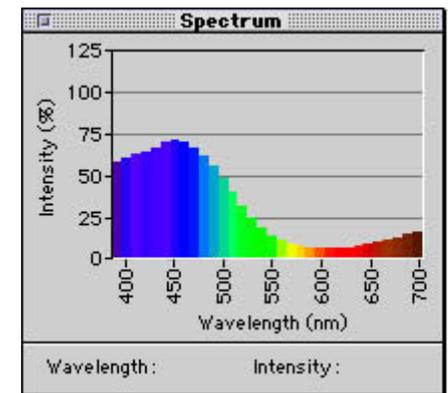
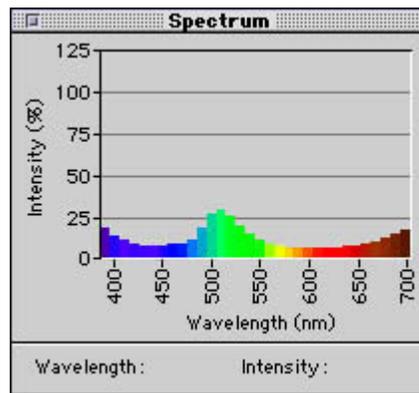
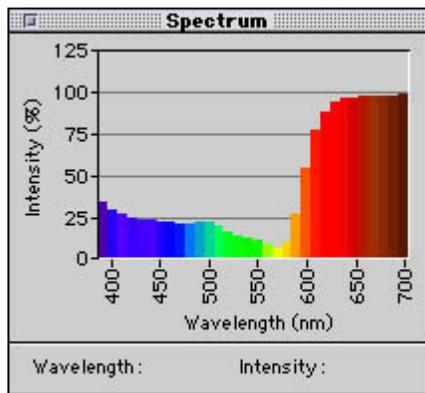
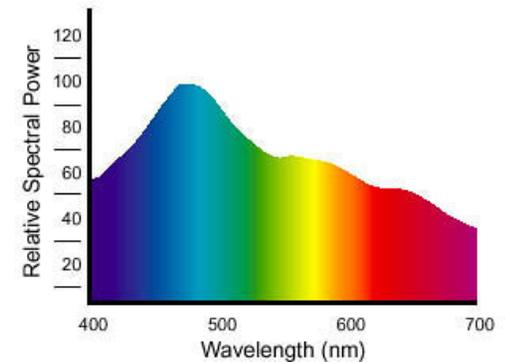


380 430 480 530 580 630 680 720

Wavelength (nm)

# Was ist Farbe?

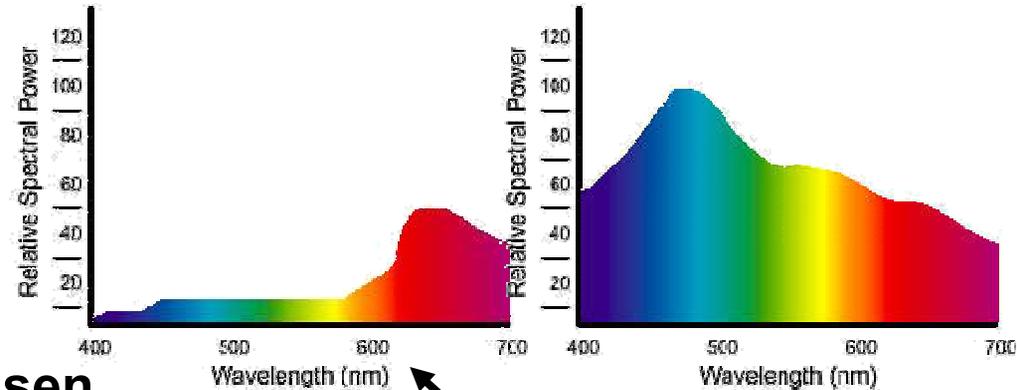
- ▶ **Spektrum: Unendlich dimensionale Information**
- ▶ **Verschiedene Lichtquellen haben verschiedene Spektren**
- ▶ **Scheinen zwei Lichtquellen aufeinander addieren sich die Spektren**



# Was ist Farbe?

## Farbe eines Objektes

- ▶ Farbe des vom Objekt zurückgeworfenen Lichtes
- ▶ Abhängig von Beleuchtung
- ▶ Normal: Für jede Wellenlänge strahlt ein Objekt einen gewissen Anteil des einfallenden Lichtes in der selben Wellenlänge in alle Richtungen zurück
- ▶ Beispiel: Ein rotes Objekt strahlt im roten Bereich des Spektrums mehr zurück als im grünen/blauen. Dadurch kommt rotes Licht zurück, wenn man weißes einstrahlt.



# Was ist Farbe?

- ▶ **Multiplikation des Licht Spektrums mit dem Reflexionsspektrum ergibt das Spektrum des zurückgeworfenen Lichtes**
- ▶ **Basis für Farbsegmentierung**
- ▶ **Frage an das Auditorium: Gibt es Fälle, bei denen eine Wellenlänge vom Objekt zurückgeworfen wird, die nicht im beleuchtenden Licht vorhanden ist?**

# Was ist Farbe?

- ▶ **Multiplikation des Licht Spektrums mit dem Reflexionsspektrum ergibt das Spektrum des zurückgeworfenen Lichtes**
- ▶ **Basis für Farbsegmentierung**
- ▶ **Frage an das Auditorium: Gibt es Fälle, bei denen eine Wellenlänge vom Objekt zurückgeworfen wird, die nicht im beleuchtenden Licht vorhanden ist?**
- ▶ **Fluoreszenz: Atome werden von kurzwelligem Licht angeregt (z.B. UV) und strahlen dann langwelliges Licht ab (z.B. grün)**

## Was ist Farbe?

- ▶ **Oft zusätzlich: Ein Teil des Lichtes wird unabhängig von der Wellenlänge grob reflektiert (Einfallswinkel ungefähr gleich Ausfallswinkel)**
- ▶ **Erzeugt einen hellen / weißen Glanzfleck abhängig von der Betrachterposition**
- ▶ **Stört erheblich für Farbsegmentierung**
- ▶ **Insgesamt kann dasselbe Material selbst in einem Bild sehr verschiedene Farben haben**

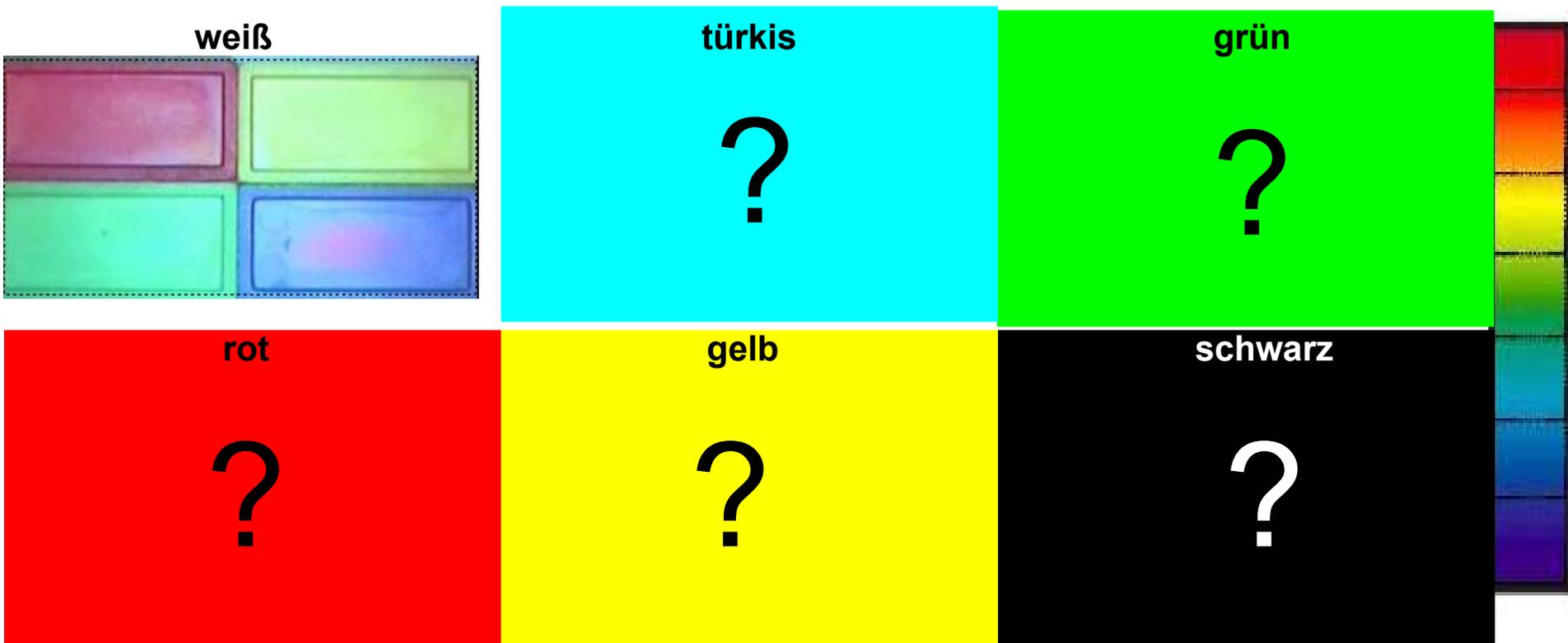




# Was ist Farbe?

Frage an das Auditorium: Wie erscheinen die folgenden Legosteine unter verschiedenen Beleuchtungen?

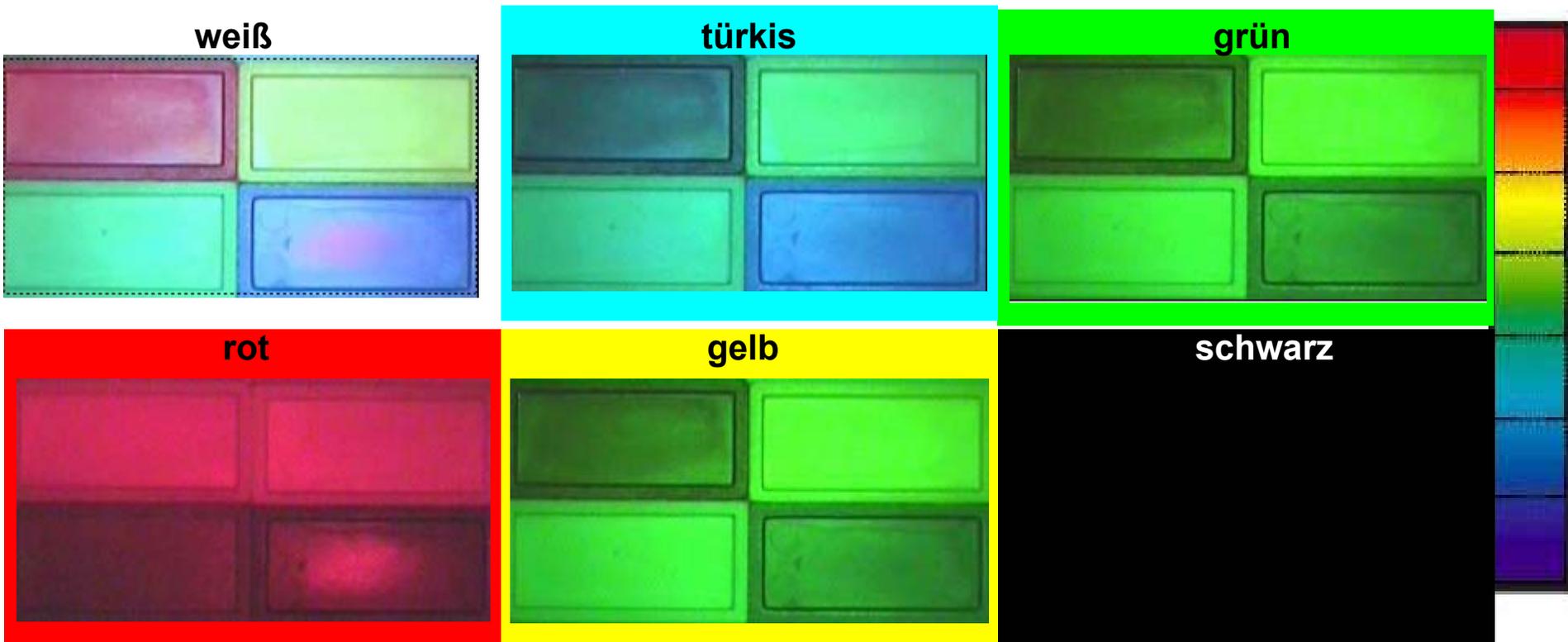
Quelle: Noordelijke Hogeschool Leeuwarden, 2005



# Was ist Farbe?

Frage an das Auditorium: Wie erscheinen die folgenden Legosteine unter verschiedenen Beleuchtungen?

Quelle: Noordelijke Hogeschool Leeuwarden, 2005



# Was ist Farbe?

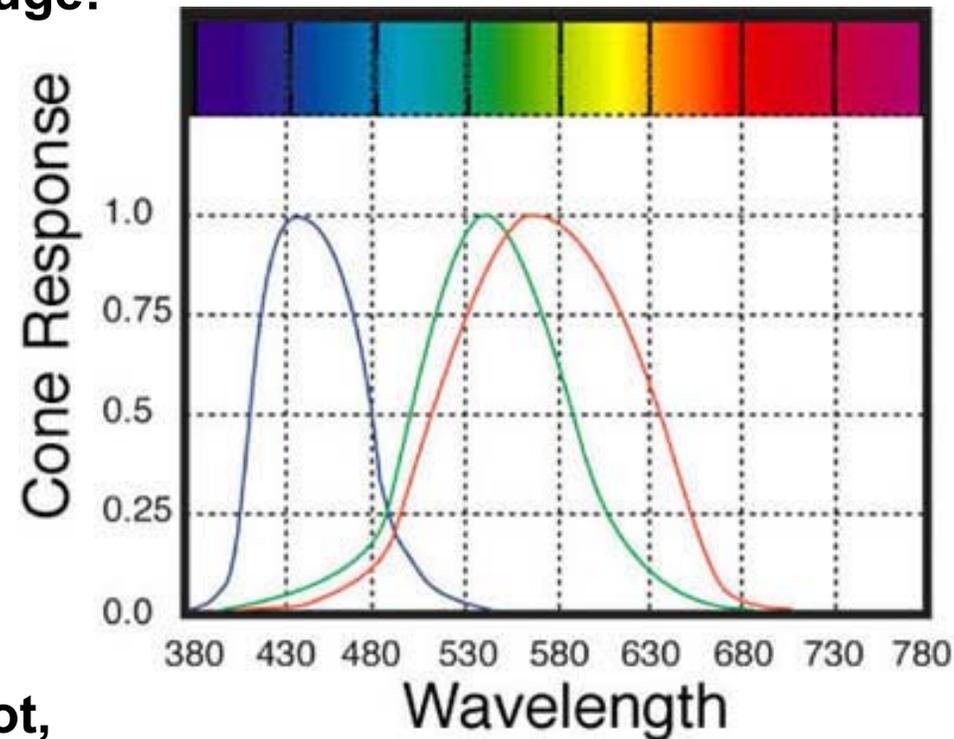
## Farbwahrnehmung

### ▶ Vier Sorten Photorezeptoren im Auge:

- ▶ Stäbchen (Licht aller Wellenlängen, nur nachts)
- ▶ Blau-Zapfen (Licht mit kurzen Wellenlängen)
- ▶ Grün-Zapfen (Licht mit mittleren Wellenlängen)
- ▶ Rot-Zapfen (Licht mit langen Wellenlängen)

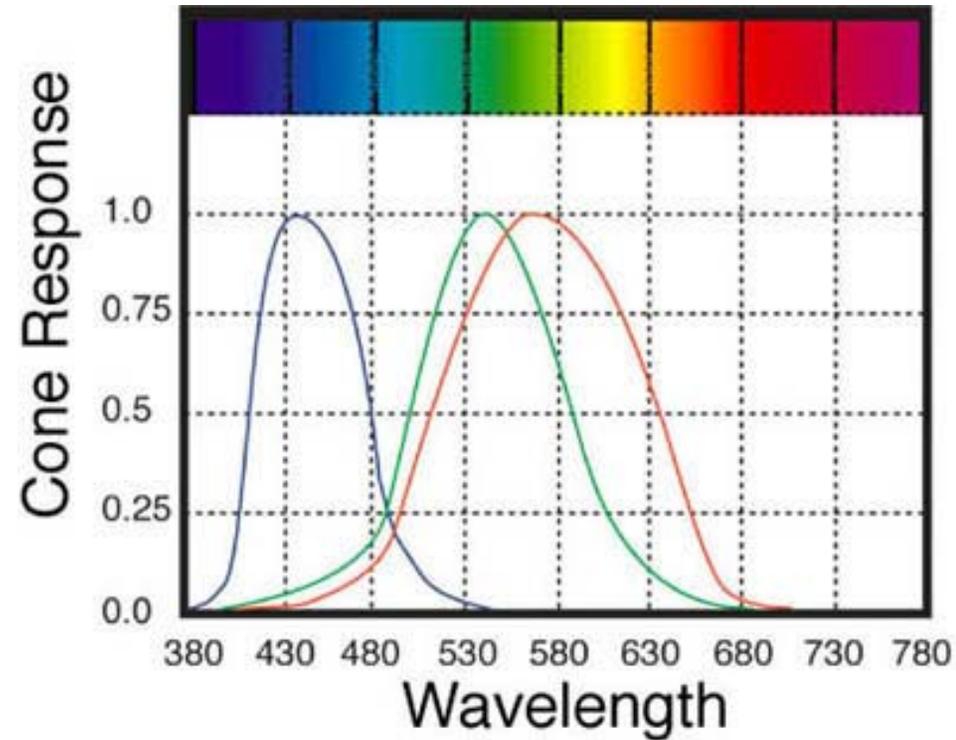
### ▶ Rezeptor meldet absorbierte Lichtmenge (siehe Kurve)

### ▶ 3D Raum der Wahrnehmungen (Rot, Grün, Blau)



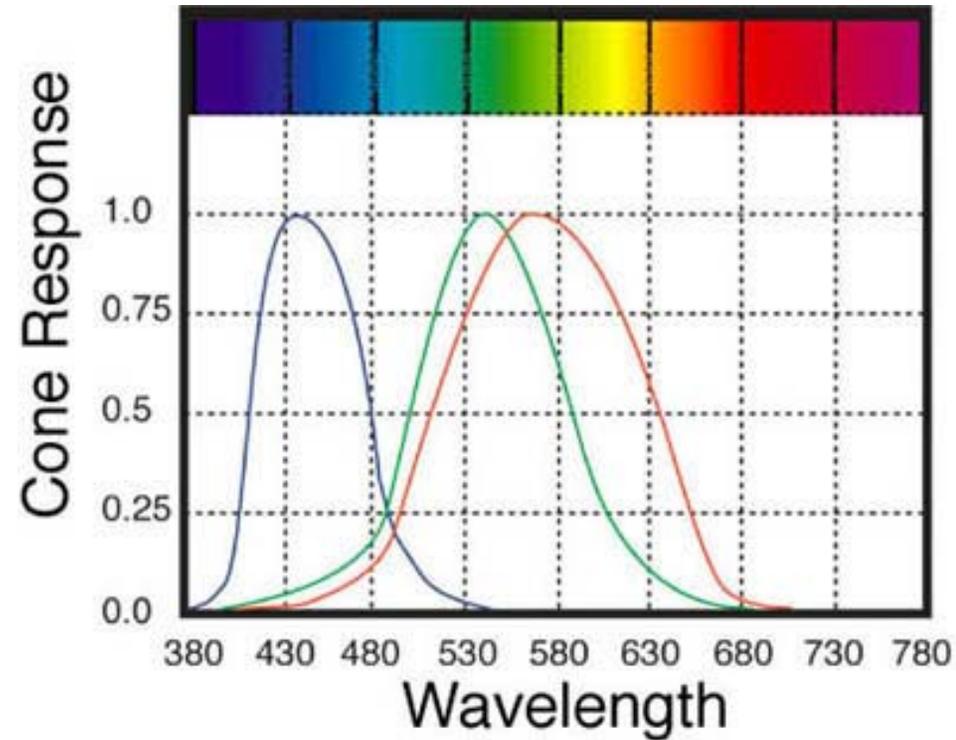
# Was ist Farbe?

- ▶ Frage an das Auditorium: Gibt es eine Farbwahrnehmung, die durch kein physikalisches Spektrum erzeugt werden kann?



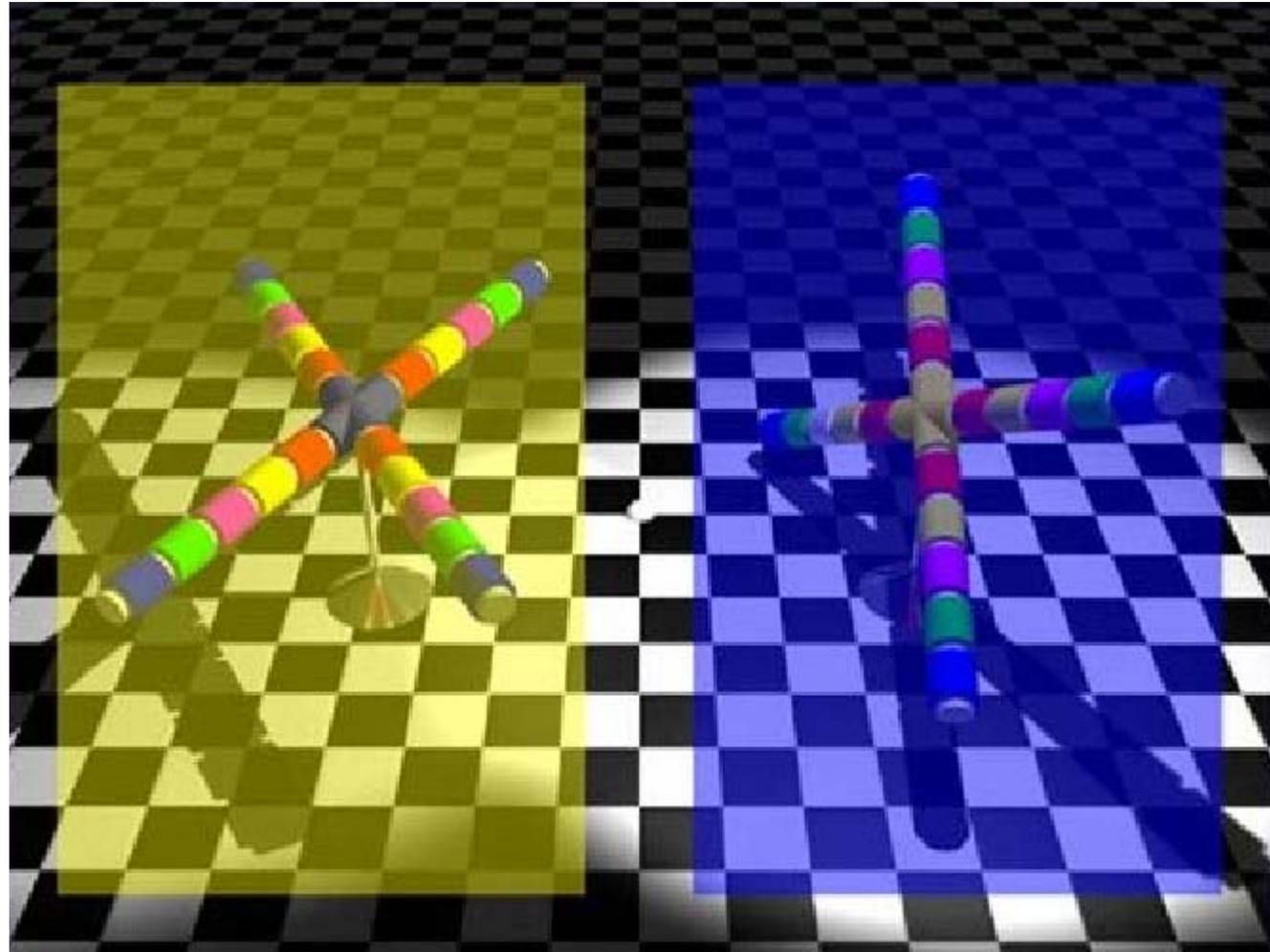
# Was ist Farbe?

- ▶ Frage an das Auditorium: Gibt es eine Farbwahrnehmung, die durch kein physikalisches Spektrum erzeugt werden kann?
- ▶ Aktivität des Grünrezeptors ohne Aktivität des Rot oder Blaurezeptors ist unmöglich



# Was ist Farbe?

- ▶ Frage an das Auditorium:  
Welche Farbe haben die Kreuzungen?



Quelle:  
<http://www.echalk.co.uk/amusements/OpticalIllusions/colourPerception/colourPerception.html>

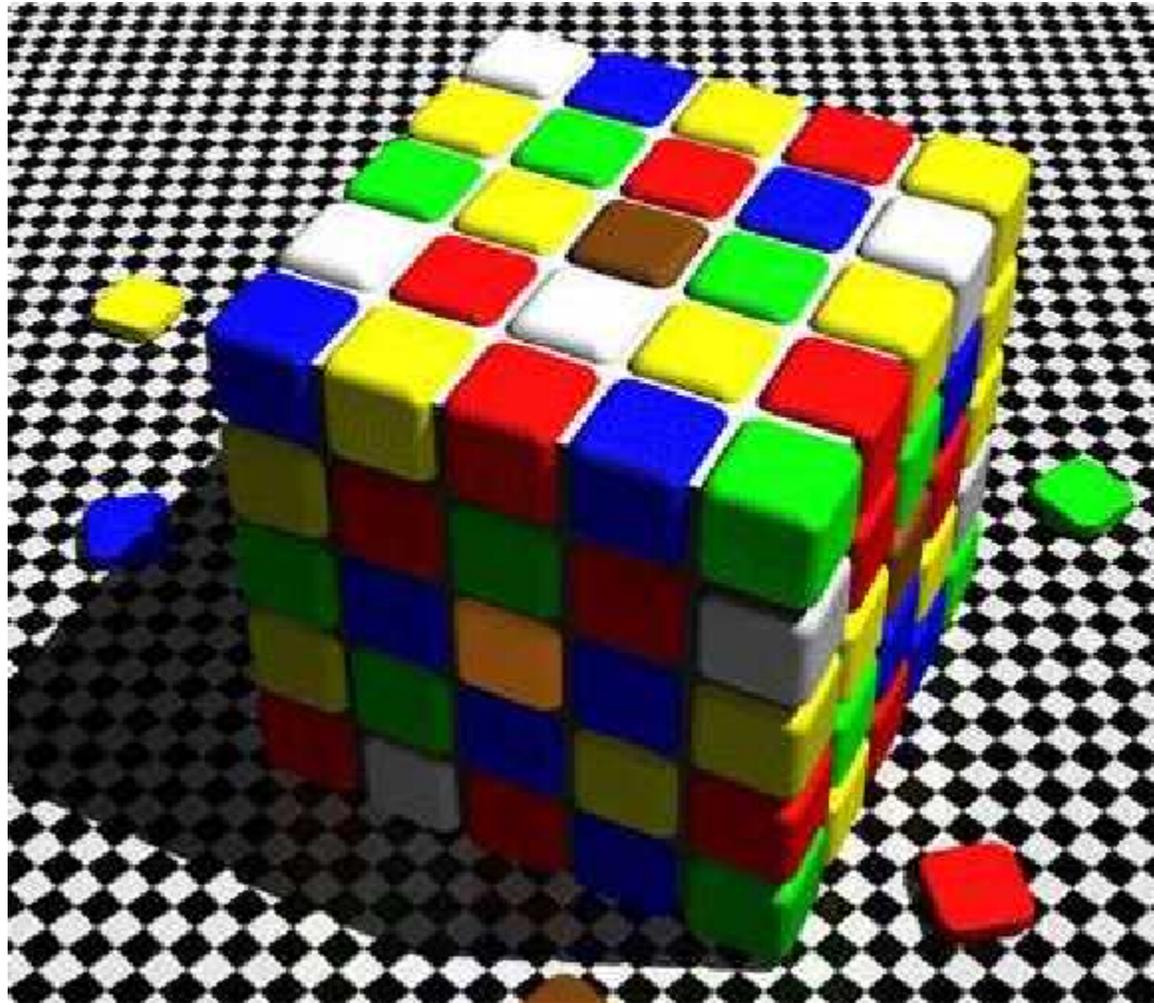
## Was ist Farbe?

- ▶ Frage an das Auditorium:  
Welche Farbe haben die Kreuzungen?
- ▶ Das selbe Grau!



## Was ist Farbe?

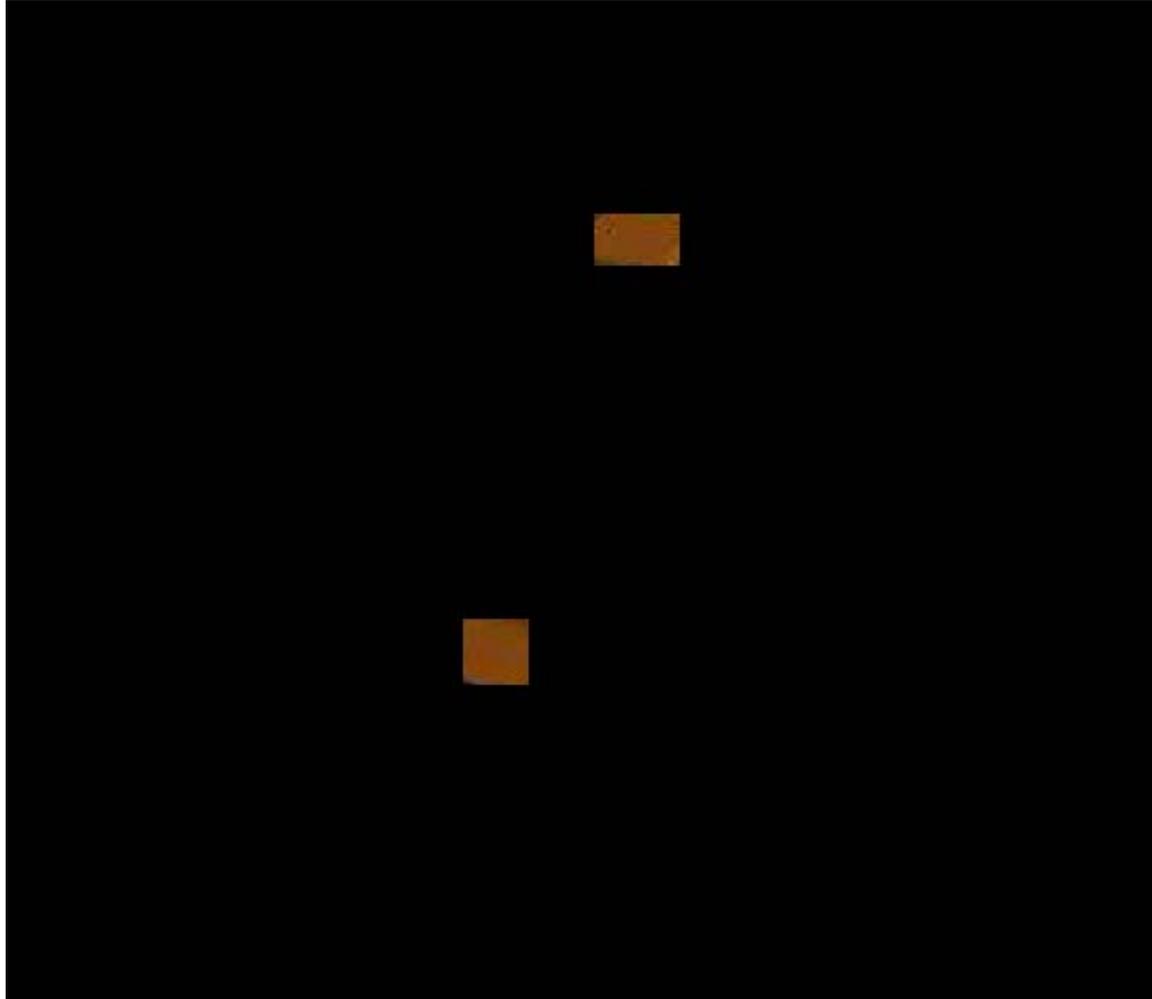
- ▶ Welche Farbe haben die mittleren Quadrate der oberen und vorderen Fläche?



Quelle:  
<http://www.echalk.co.uk/amusements/OpticalIllusions/colourPerception/colourPerception.html>

## Was ist Farbe?

- ▶ Welche Farbe haben die mittleren Quadrate der oberen und vorderen Fläche?
- ▶ Dieselbe!

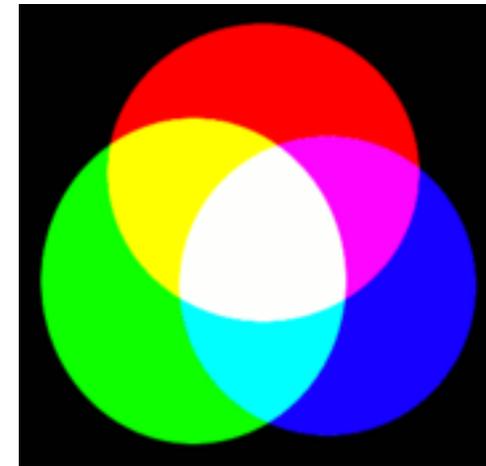




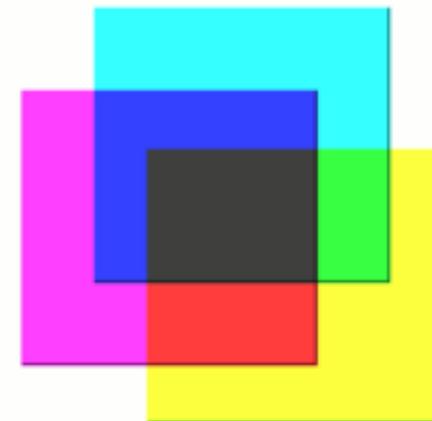
# Was ist Farbe?

## Technische Farbdarstellung

- ▶ **Aufgabe: Erzeuge (in Grenzen) alle möglichen Farbwahrnehmungen steuerbar mit einem Gerät (Farbfernsehen, Farbfotographie, Farbdruck)**
- ▶ **Da der Mensch drei Rezeptoren hat, durch Überlagerung von drei Primärfarben (Rot, Grün, Blau) unterschiedlicher Helligkeit**
- ▶ **Technisch durch**
  - ▶ Übereinanderblenden (additiv, alte Beamer, teure DLP Beamer)
  - ▶ Feine Punkte nebeneinander (additiv, TV, LCD)
  - ▶ Zeitlich hintereinander (additiv, günstige DLP Beamer)
  - ▶ Farbpigmente hintereinander (subtraktiv, Farbfotographie, Farbdruck)



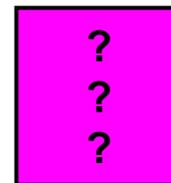
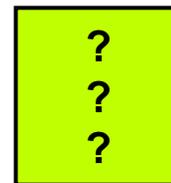
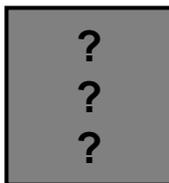
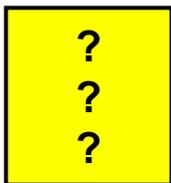
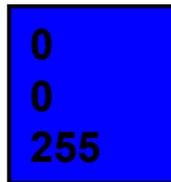
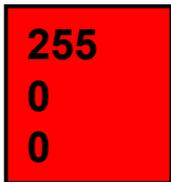
**Additiv**



**Subtraktiv**

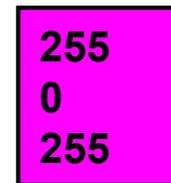
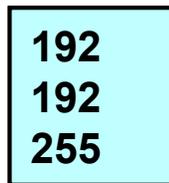
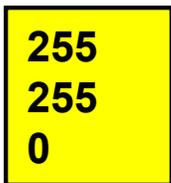
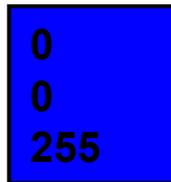
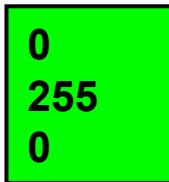
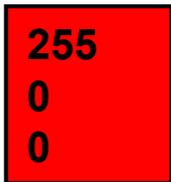
# Was ist Farbe?

- ▶ Frage an das Auditorium: Wie mischt man die folgenden Farben additiv aus Rot [0..255], Grün [0..255] und Blau [0..255]?



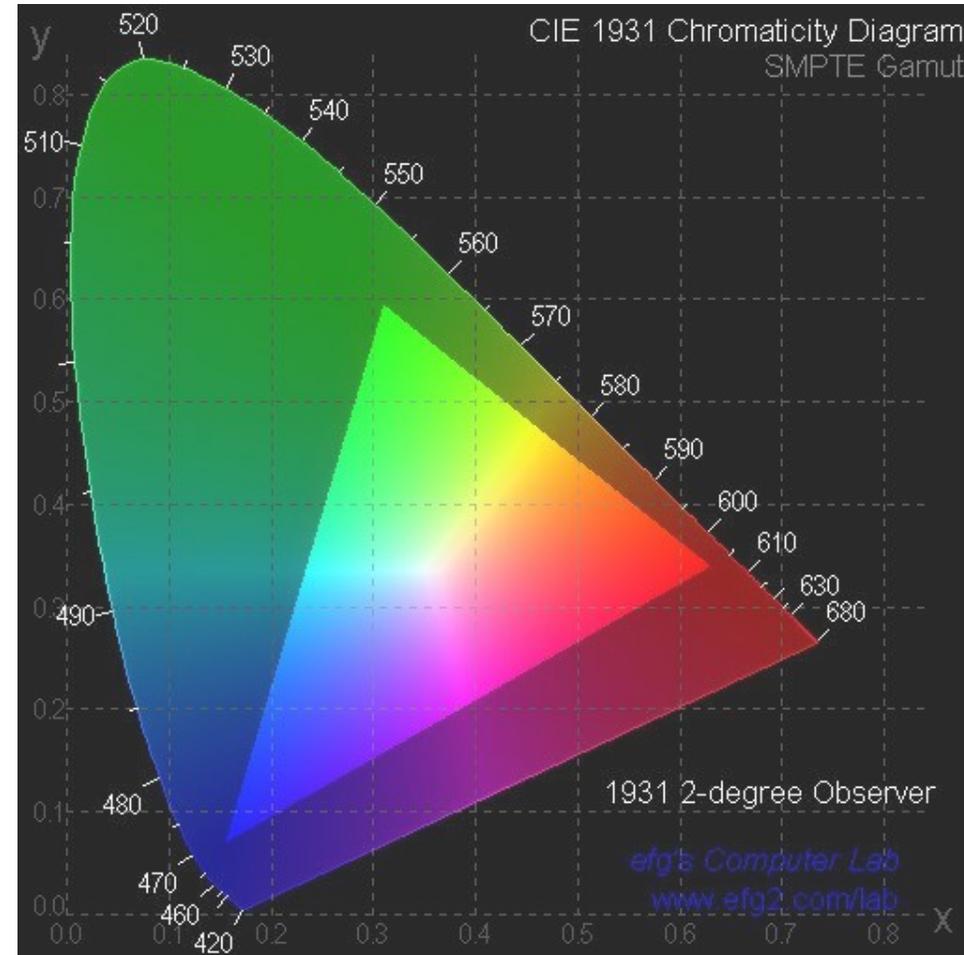
# Was ist Farbe?

- ▶ Frage an das Auditorium: Wie mischt man die folgenden Farben additiv aus Rot [0..255], Grün [0..255] und Blau [0..255]?



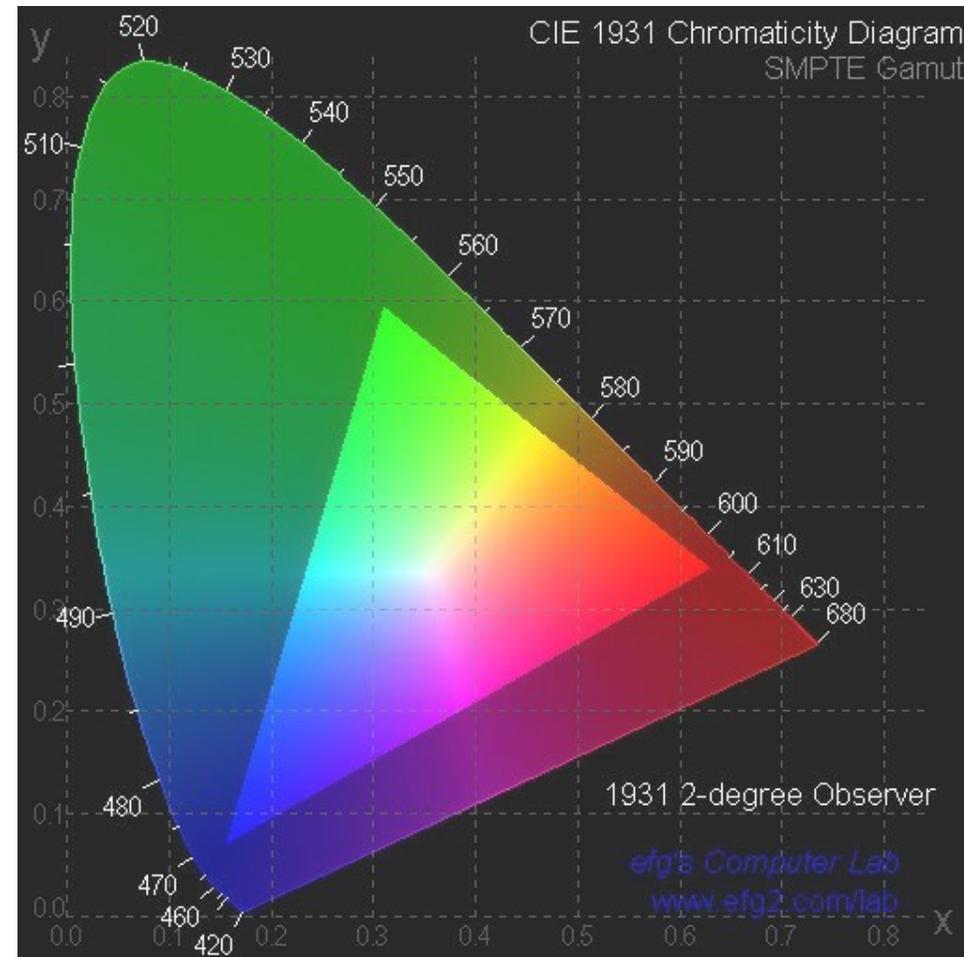
# Was ist Farbe?

- ▶ **2D Ebene im 3D Raum der Farbwahrnehmungen**
- ▶ **3. Dimension: Helligkeit**
- ▶ **Hufeisenlinie: Spektral- oder Regenbogenfarben**
- ▶ **Überlagern von Licht führt zu überlagerten Spektren und überlagerten Wahrnehmungen, in diesem Diagramm linear interpoliert**
- ▶ **Aus zwei Farben lassen sich alle Farben auf der Verbindungslinie überlagern**



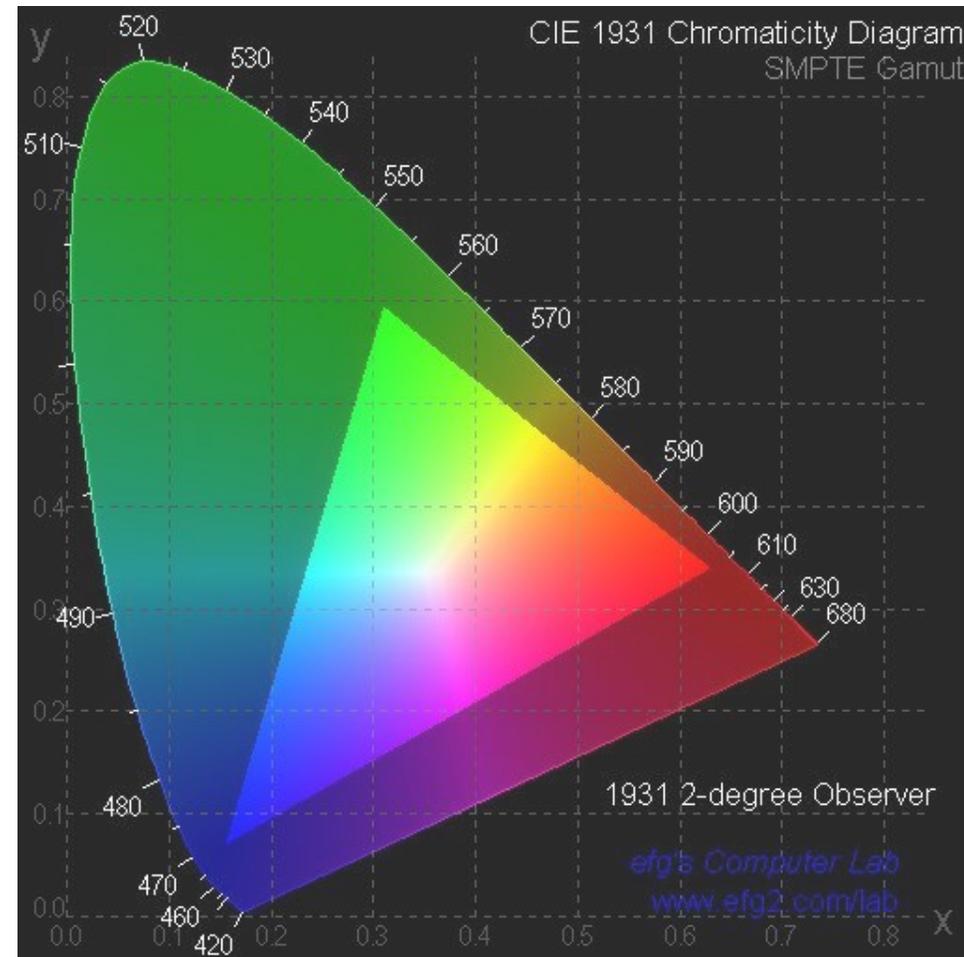
# Was ist Farbe?

- ▶ Bereich im Hufeisen lässt sich aus Spektralfarben überlagern
- ▶ Dies sind reale Farben.
- ▶ Bereich außerhalb gibt es nicht.
- ▶ Drei Grundfarben (Rot, Grün, Blau) erlauben alle Farben im aufgespannten Dreieck zu erzeugen
- ▶ Dreieck sind die von einem Monitor darstellbaren Farben (Gamut)
- ▶ Nur ein Teil der realen Farben!



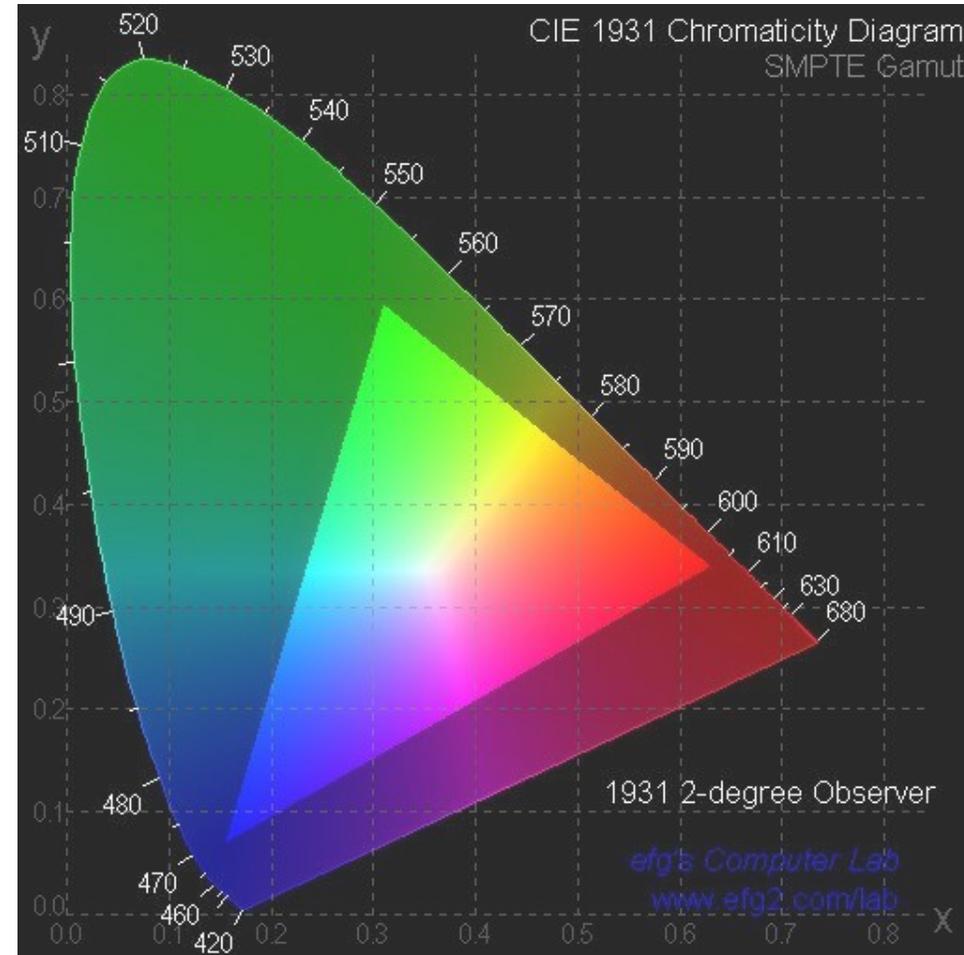
# Was ist Farbe?

- ▶ Frage an das Auditorium: Wo schwindelt das Diagramm?

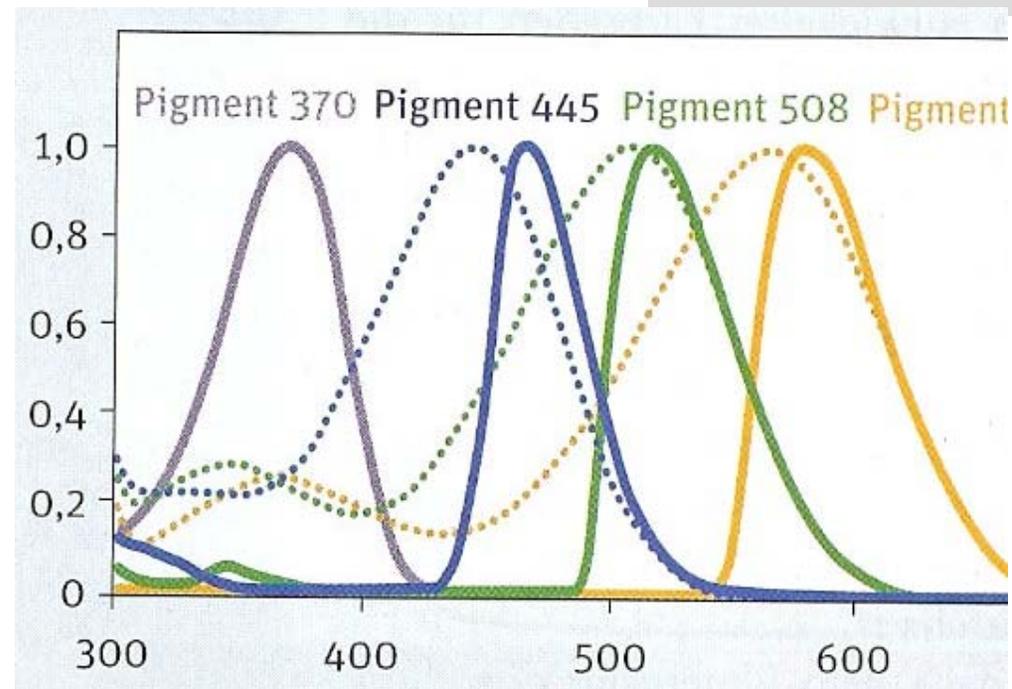
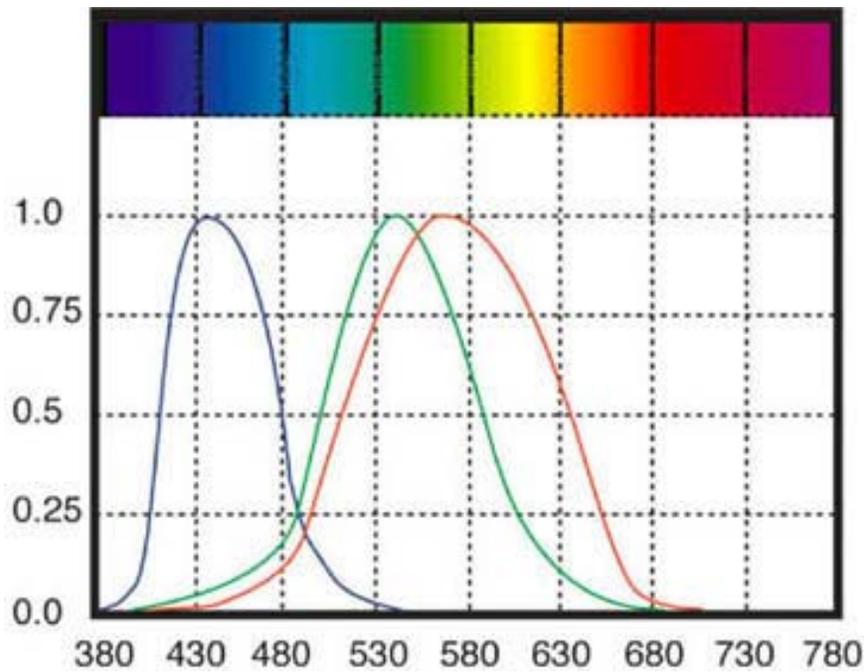


# Was ist Farbe?

- ▶ Frage an das Auditorium: Wo schwindelt das Diagramm?
- ▶ Das Diagramm wird gerade von einem Monitor bzw. Beamer dargestellt. Deshalb können eigentlich nur Farben im Dreieck zu sehen sein. Um Farben im ganzen Hufeisen darstellen zu können, sind die Farbtöne entsprechend entsättigt.



# Was ist Farbe?



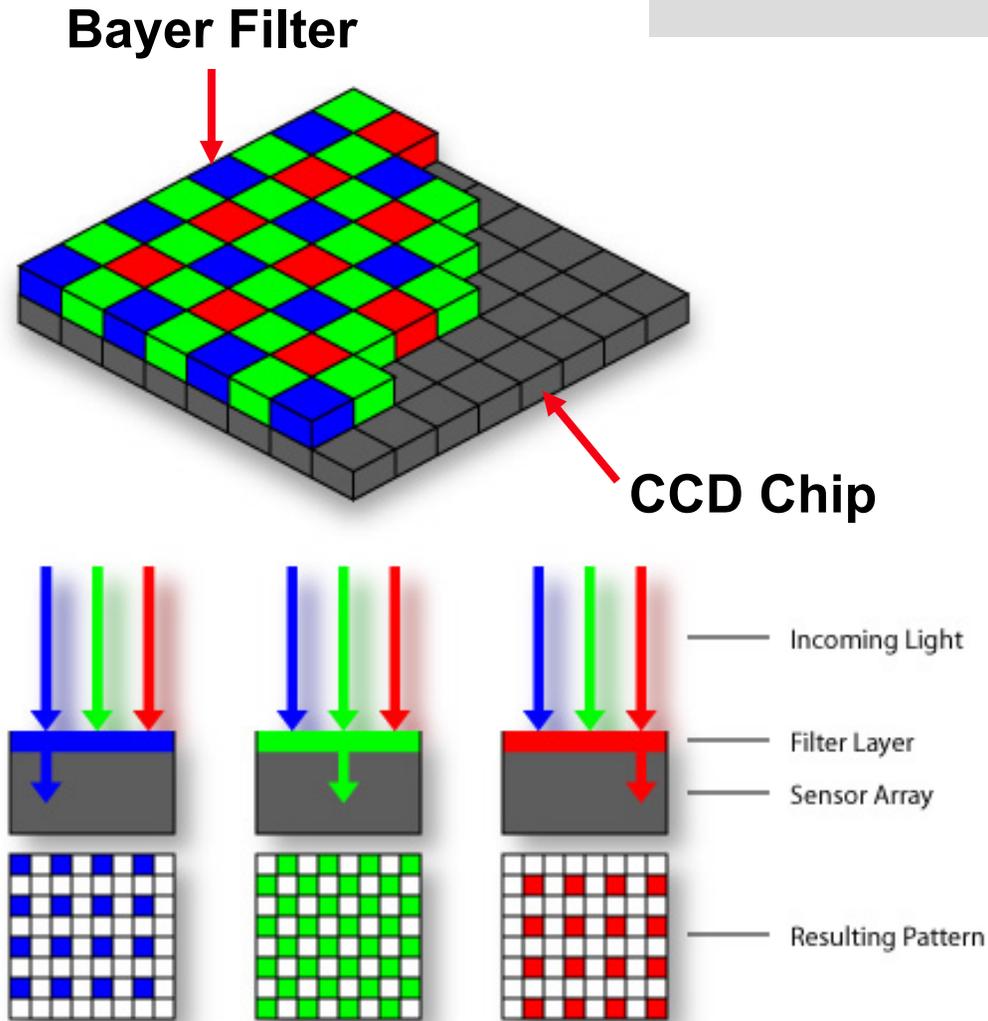
**Vögel (rechts) sehen anders als Menschen (links)**

- ▶ 4 statt 3 Rezeptoren
- ▶ eingelagerte Öltröpfchen ziehen Kurven auseinander
- ▶ wesentlich bessere Differenzierung

Quelle: Spektrum der Wissenschaft 1/07

# Was ist Farbe?

- ▶ **Farbkamera: Mosaik-Farbfilter vor dem CCD Chip**
- ▶ **„Bayer Filter“**
- ▶ **2× grün, 1× rot, 1× blau, weil Menschen grünempfindlicher**
- ▶ **Achtung: R, G, B Werte werden an verschiedenen Stellen gemessen. Dadurch Farbartefakte**



Quelle: [wikipedia.org/wiki/Bayer\\_pattern](https://wikipedia.org/wiki/Bayer_pattern)



Original



Bild durch  
Bayer Filter:  
Rote, Grüne  
und Blaue  
Punkte



Rekonstruiertes  
Bild durch  
Interpolation:  
Farbartefakte an  
Rändern



# Was ist Farbe?

## Darstellung im Rechner

### ▶ **RGB24**

- ▶ 1 Byte für R, G, B je Pixel
- ▶ 16 Millionen Farben
- ▶ meist verbreitet

### ▶ **RGB32**

- ▶ 1 Byte frei, dadurch Pixel von 4 Bytes
- ▶ Zugriff einfacher und schneller (Übungen)

### ▶ **YUV,**

- ▶ Linearkombination aus RGB
- ▶  $Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B$  (menschliches Helligkeitsempfinden)
- ▶  $U = 0.492(B - Y)$ ,  $V = 0.877(R - Y)$ , willkürlich mit  $U = V = 0 \Leftrightarrow R = G = B \Leftrightarrow$  grau
- ▶ TV/Videocodecs
- ▶ U/V mit geringerer Auflösung, weil vom Menschen nicht wahrgenommen

# Was ist Farbe?

## Darstellung im Rechner

- ▶ **HSV**
  - ▶ Gestalterisches Farbmodell
  - ▶ Hue (Farbton),
  - ▶ Saturation (Sättigung, weiss beimischen)
  - ▶ Value (Wert/Helligkeit, schwarz beimischen)

# Was ist Farbe?

## Zusammenfassung

- ▶ **Farbe ist physikalisch das Spektrum des Lichtes (wie viel Energie bei welcher Wellenlänge)**
- ▶ **Farbe eines Objektes ist die Farbe des von ihm abgestrahlten Lichtes und hängt sehr stark von der Beleuchtung und manchmal vom Betrachtungswinkel ab**
- ▶ **Menschen haben 3 verschiedene Farbrezeptoren, deshalb können (in Grenzen) alle Farbwahrnehmungen aus 3 Primärfarben (Rot, Grün, Blau) kombiniert werden.**
- ▶ **Darstellung im Rechner meistens als RGB32: 1 Byte Rot, 1 Byte Grün, 1 Byte Blau, 1 Byte frei.**
- ▶ **Farbkameras nutzen Mosaik - Farbfilter (Bayer Filter) vor dem CCD Chip.**

# Farbs. als statistische Klassifikation

# Farbs. als statistische Klassifikation

- ▶ **Bisher:**
  - ▶ Einzelner Pixel klassifiziert
  - ▶ Helligkeit → {Objekt, Hintergrund}
- ▶ **Jetzt:**
  - ▶ Einzelnen Pixel klassifizieren
  - ▶ (Rot, Grün, Blau) → {RotesObjekt, GrünesObjekt, LilaObjekt}
  - ▶ Weiterhin: Kein Kontext, jeder Pixel unabhängig
- ▶ **Nur möglich bei kontrollierter (konstanter) Beleuchtung und großem Farbkontrast**

## Farbs. als statistische Klassifikation

- ▶ Sony Four-legged Robot League
- ▶ Vierbeinige Roboterhunde spielen Fußball
- ▶ Umgebung präpariert für Farbsegmentierung
  - ▶ kontrolliertes Licht
  - ▶ satte und gut unterscheidbare Farben
- ▶ GermanTeam (HU Berlin, U Bremen, TU Darmstadt, U. Dortmund) 2 mal Weltmeister
- ▶ B-Human: Europameister!



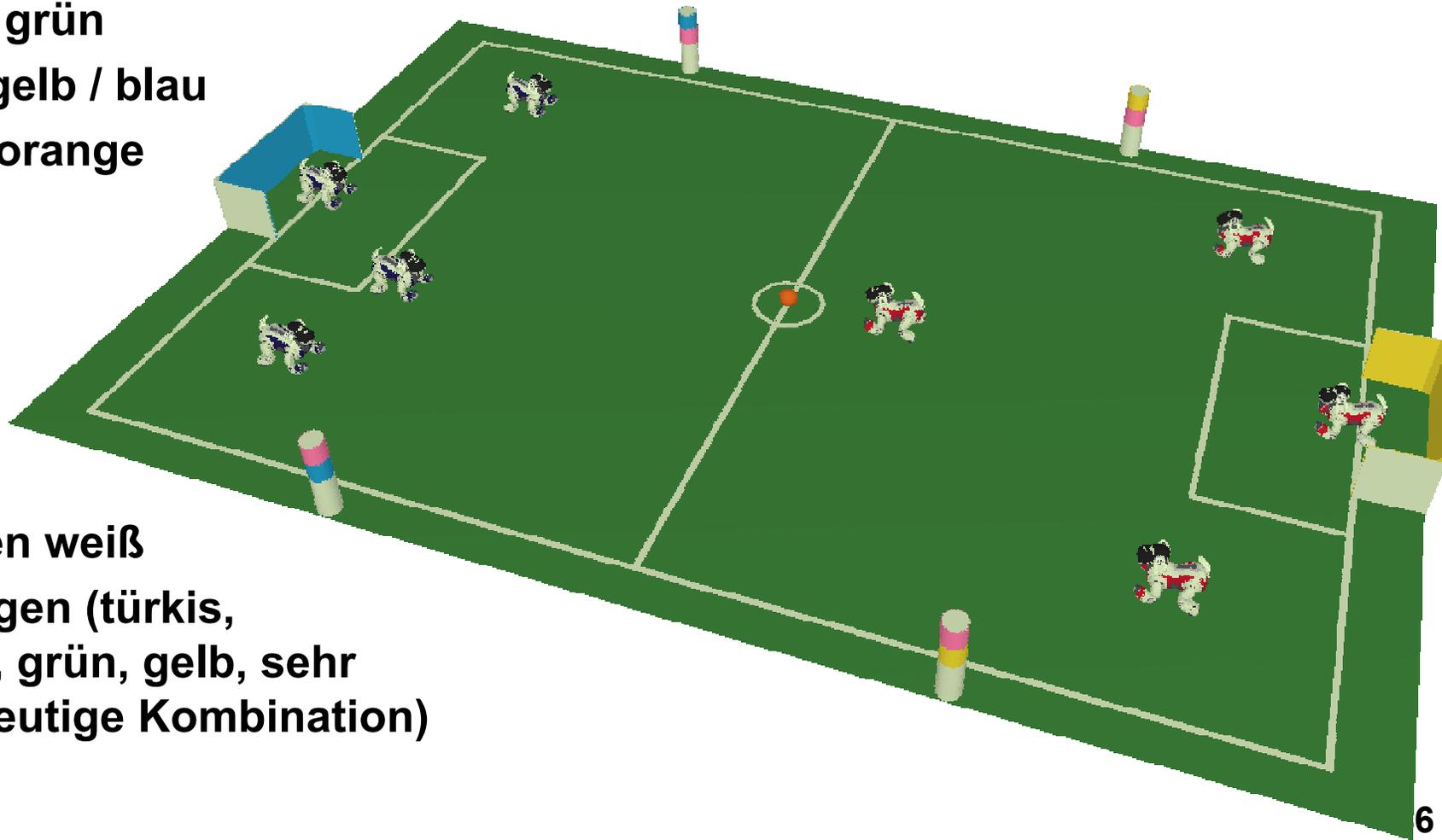
**GERMANTTEAM**



# Farbs. als statistische Klassifikation

## Four-legged Feld

- ▶ Feld grün
- ▶ Tor gelb / blau
- ▶ Ball orange



- ▶ Linien weiß
- ▶ Flaggen (türkis, pink, grün, gelb, sehr eindeutige Kombination)

# Farbs. als statistische Klassifikation

- ▶ Manchmal hat man aber auch Pech



# Farbs. als statistische Klassifikation

Bilder aus der AIBO Kamera



# Farbs. als statistische Klassifikation

## Statistische Klassifikation

### ▶ **Klassifikation**

- ▶ Zuordnung Vektor von Merkmalen → endlichen Menge von Klassen
- ▶ „Unbekannte“ Vektoren müssen zurückgewiesen werden
- ▶ Beispiel: (Länge, Breite, Fläche) → {Unbekannt, Teller, Messer, Gabel, Löffel}

### ▶ **Heuristische Klassifikation**

- ▶ Anwendungsspezifische Bedingungen
- ▶ Für jeden Spezialfall neu überlegen
- ▶ Nicht unbedingt schlecht!
- ▶ Aber gelegentlich doch!
- ▶ Heuristiken für Farben erscheint schwierig.

# Farbs. als statistische Klassifikation

## Statistische Klassifikation

- ▶ Die „Regeln“ zur Klassifikation werden automatisch aus einem großen Satz von Hand klassifizierter Trainingsvektoren gelernt
- ▶ Vorteil: Anpassen auf neue Situation ist nur noch Fleiß
- ▶ Schwierig, wenn „Generalisierung“ nötig ist, d.h. Testdaten anders sind als Trainingsdaten
- ▶ Meist enthalten „Regeln“ keine Einsicht
- ▶ **Verschiedene Klassifikationsverfahren:**
  - ▶ Neuronale Netze, Support Vektor Maschinen, Boost-Algorithmen
  - ▶ hier: m-Nearest Neighbour

# Farbs. als statistische Klassifikation

- ▶ **Fragen an das Auditorium:**
- ▶ **Wie hoch bei Farbsegmentierung die Dimension des Merkmalsvektors?**
- ▶ **Wie kann man sich Trainingsdaten für Farbsegmentierung beschaffen?**

# Farbs. als statistische Klassifikation

- ▶ **Fragen an das Auditorium:**
- ▶ **Wie hoch bei Farbsegmentierung die Dimension des Merkmalsvektors?  
3 (Rot, Grün, Blau)**
- ▶ **Wie kann man sich Trainingsdaten für Farbsegmentierung beschaffen?  
Bilder von Hand segmentieren**

# Farbs. als statistische Klassifikation

## Von Hand segmentierte Trainingsbilder

- ▶ Flächen die zu einer Klasse gehören mit Malprogramm einfärben
- ▶ Bequem große Mengen an Trainingsdaten erzeugen



# Farbs. als statistische Klassifikation

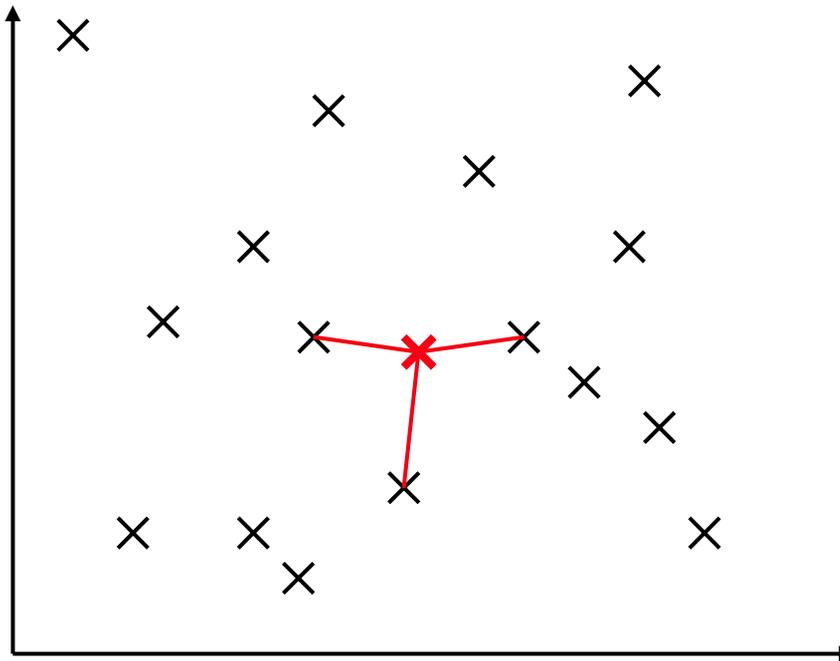
## m-Nearest Neighbour Klassifikation

- ▶ Für Testvektor  $x$  suche  $m$  nächsten Trainingsvektoren.
- ▶ Wurde Mehrzahl ( $> m/2$ ) zur selben Klasse zugeordnet?
  - ▶ Ja: Klasse ist Ergebnis für  $x$
  - ▶ Sonst: weise  $x$  zurück
- ▶ Ist Entfernung über einem Schwellwert: weise  $x$  zurück
- ▶ Übliche Werte für  $m$ : 1..13
- ▶ Vor- & Nachteile
  - ▶ einfach zu implementieren
  - ▶ konvergiert gegen den optimalen Klassifikator bei unendlich vielen Trainingsdaten
  - ▶ braucht meist viele Trainingsdaten
  - ▶ muss alle Trainingsdaten speichern

# Farbs. als statistische Klassifikation

## m-Nearest Neighbour Klassifikation

- ▶ Algorithmisches Unterproblem: Finde zu einem Vektor  $x$  die  $m$  nächsten Vektoren in einer großen Menge von Vektoren



Beispiel  $x$  (rot),  $m=3$

# Zusammenfassung

- ▶ **Szenarien können viel einfacher aussehen, als sie sind!**
- ▶ **Differenzbilder zur Bewegungserkennung**
  - ▶ Differenz zu gleitend nachgeführtem Referenzbild
- ▶ **Farbe**
  - ▶ physikalisch das Lichtspektrum (Energie vs. Wellenlänge)
  - ▶ Objektfarbe abhängig von Beleuchtung und Betrachtungswinkel
  - ▶ 3 menschliche Farbrezeptoren  $\Rightarrow$  Farbwahrnehmung aus Rot, Grün, Blau
  - ▶ Im Rechner RGB32: 1 Byte Rot, 1 Byte Grün, 1 Byte Blau, 1 Byte frei
  - ▶ Farbkamera: Mosaik - Farbfilter (Bayer Filter) vor dem CCD Chip
- ▶ **Farbsegmentierung**
  - ▶ Klassifikation (Rot, Grün, Blau)  $\rightarrow$  Klasse
  - ▶ Handsegmentierte Bilder für viele Trainingsvektoren
  - ▶ m-nearest Neighbour Klassifikator: Liefert die Klasse, die der Mehrzahl der m nächstgelegenen Trainingsvektoren entspricht