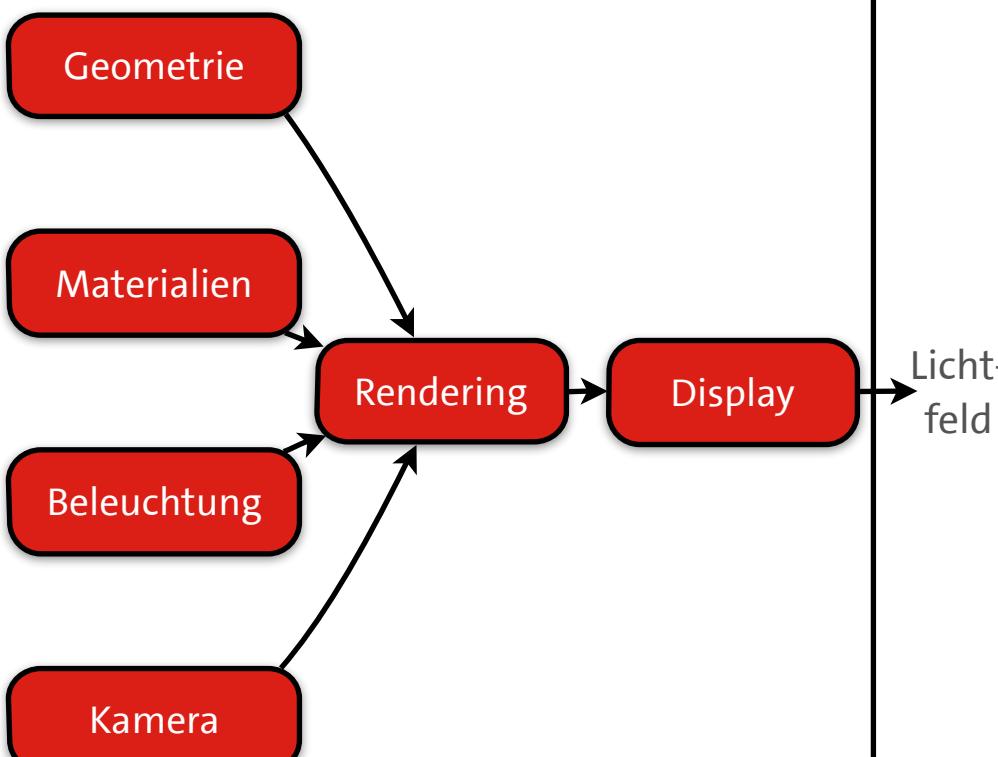


# Interaktive Computergrafik

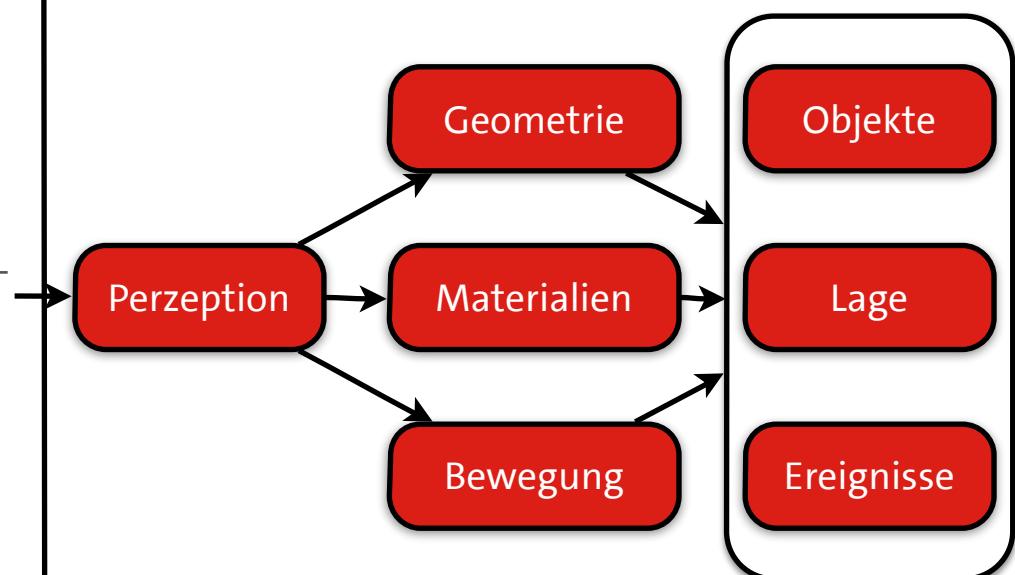


**Prof. Dr. Frank Steinicke**  
Human-Computer Interaction  
Fachbereich Informatik  
Universität Hamburg

# Computergrafik



# Wahrnehmung





# Interaktive Computergrafik

## Kapitel Visuelle Wahrnehmung

**Prof. Dr. Frank Steinicke**

Human-Computer Interaction, Universität Hamburg

# Visuelle Wahrnehmung

*“Visual Perception is defined as the process of acquiring knowledge about environmental objects and events by extracting information from the light they emit or reflect.”*

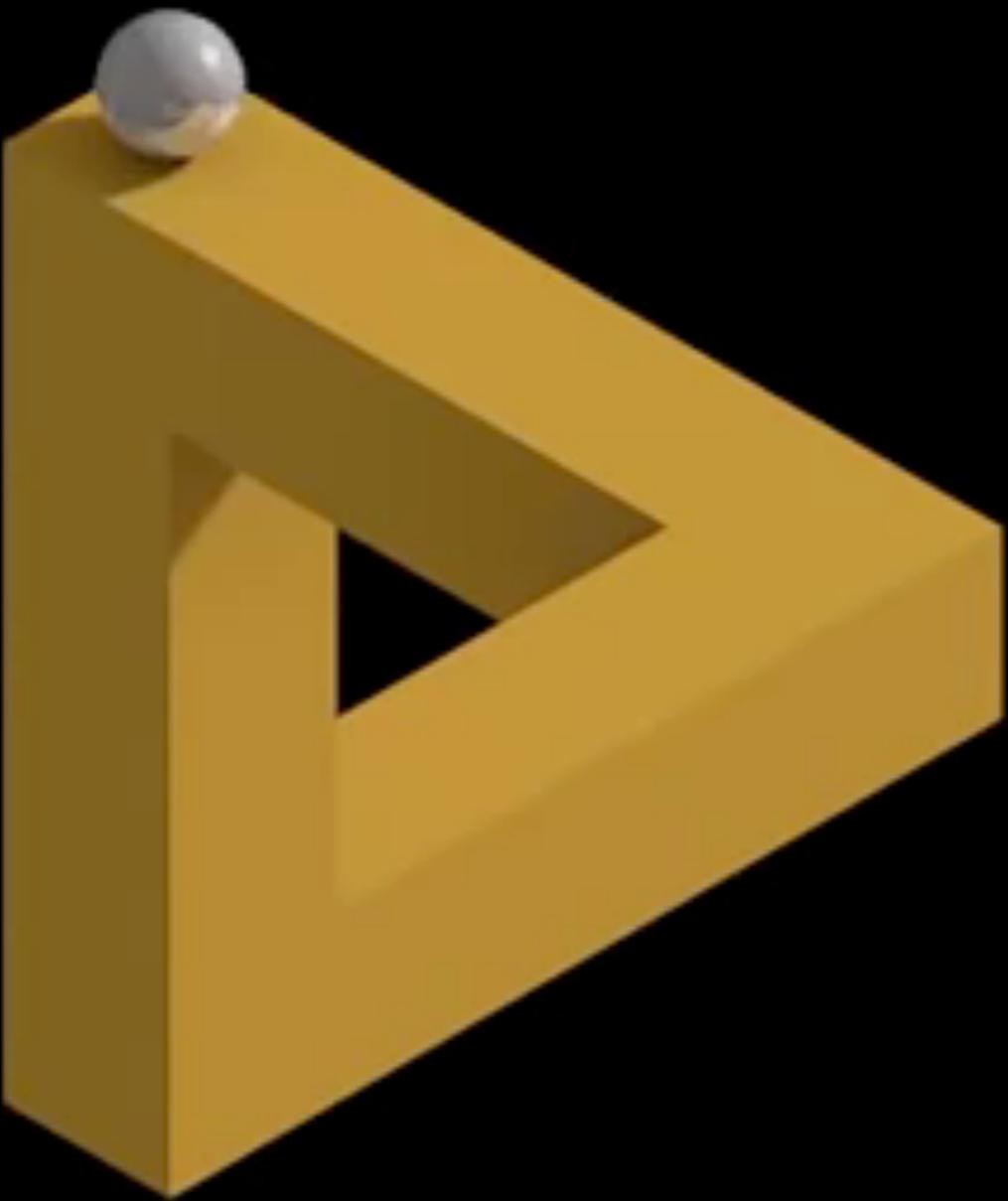
# Visuelle Wahrnehmung

- Visuell wahrgenommene Objekte sind keine direkte Abbildung physikalischer Realität, sondern **Interpretationen** auf **Basis der Struktur von Bildern**

# Visuelle Illusionen

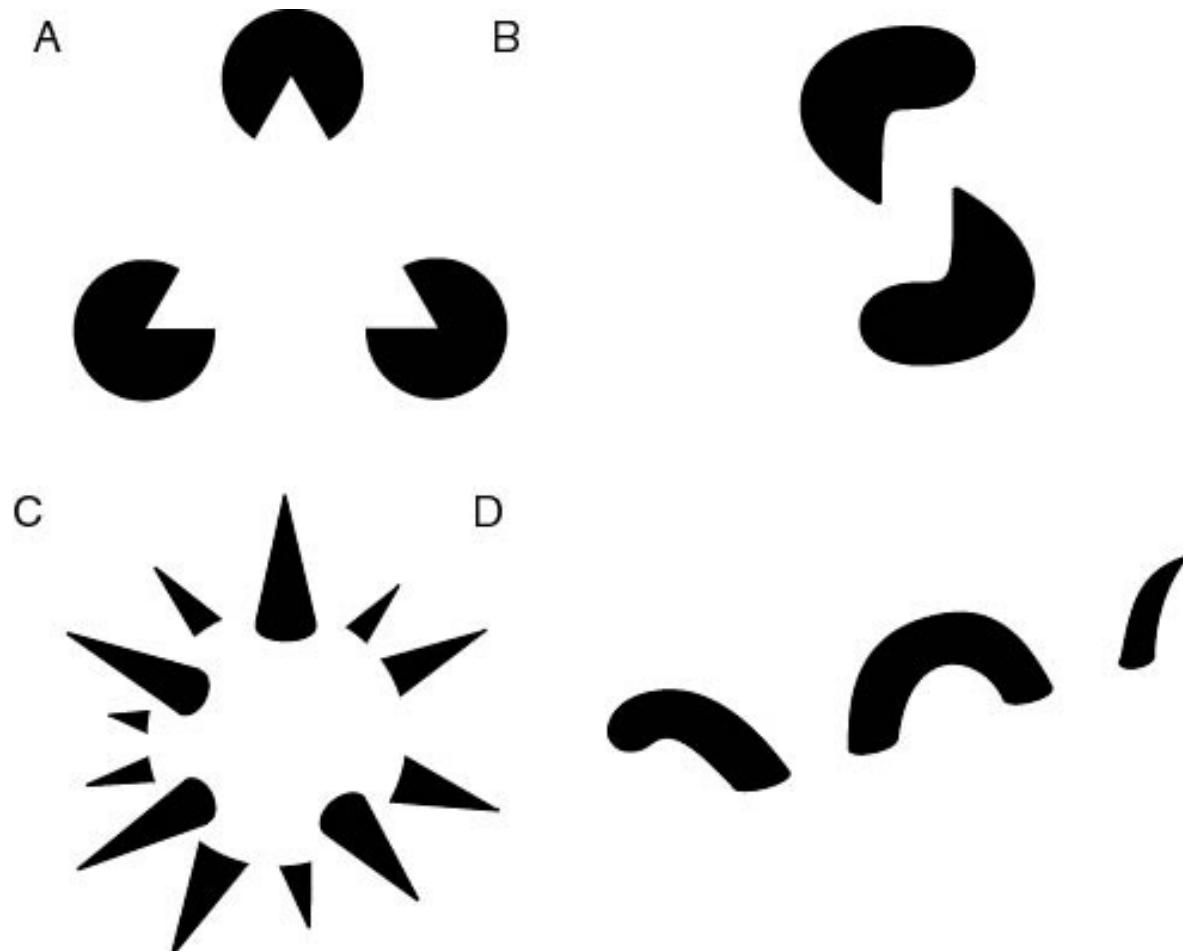
## Beispiel: Penrose Dreieck





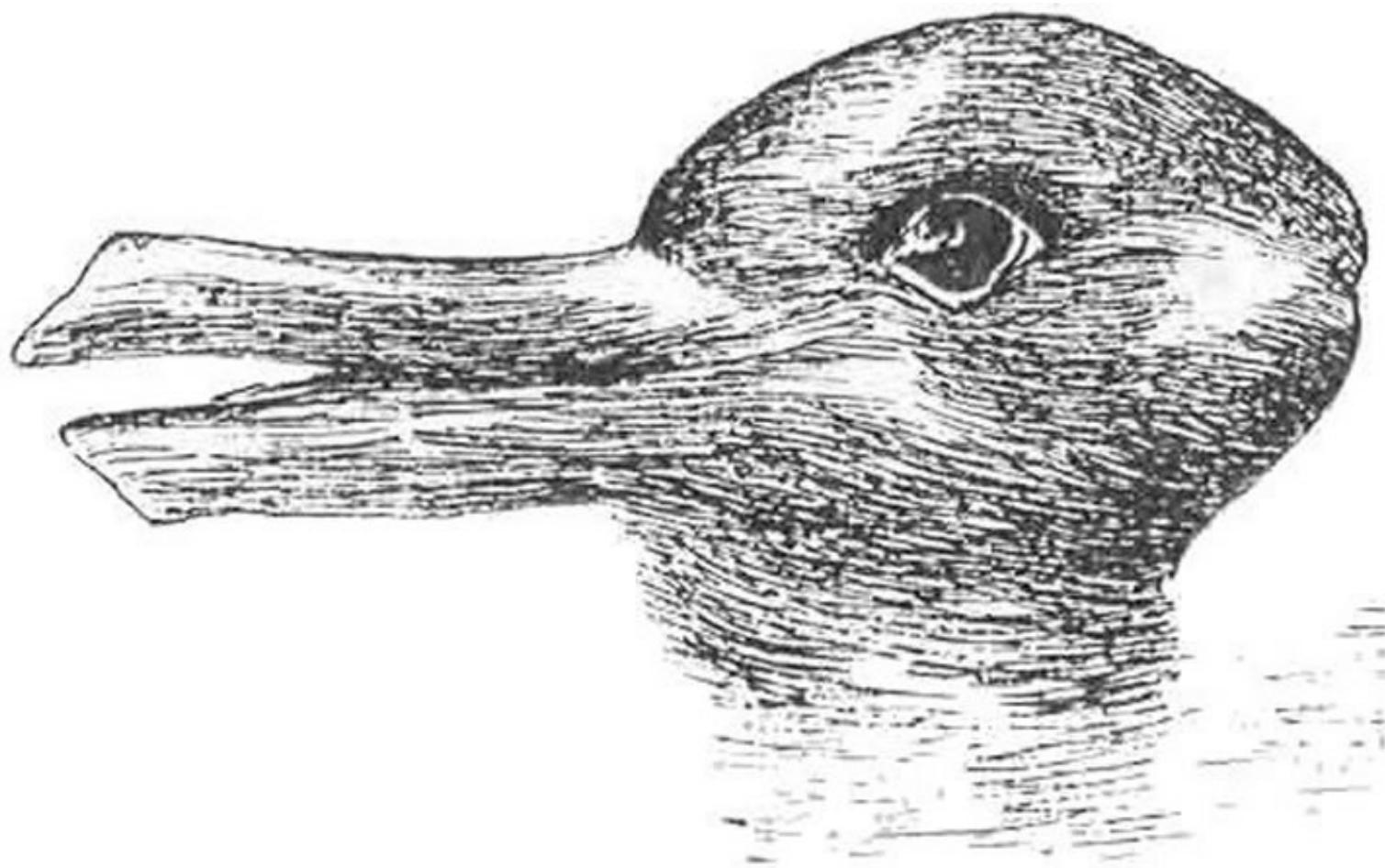
# Visuelle Illusionen

Bsp: Vergegenständlichung



# Visuelle Illusionen

Bsp: Hase oder Ente?





# Interaktive Computergrafik

## Kapitel Visuelle Wahrnehmung

Licht und Photonen

# Es werde Licht ...

*Das Buch Genesis, Kapitel 1, Gen 1,3*

# Welle oder Teilchen?

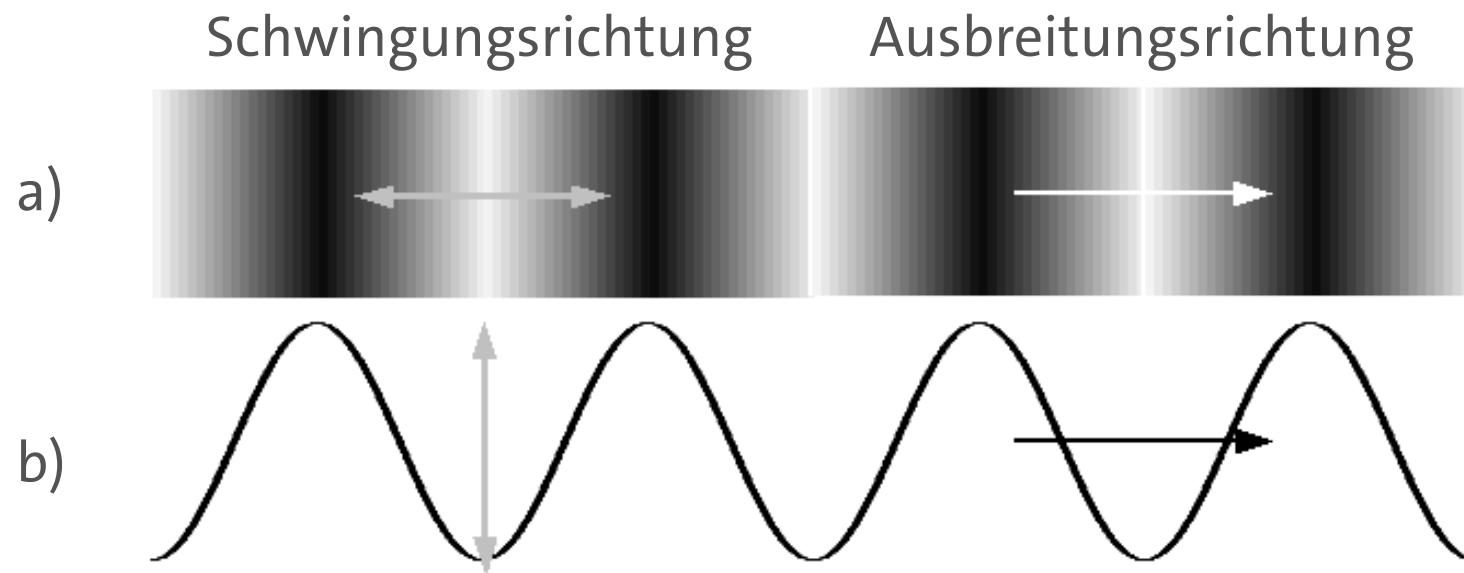
- Licht ist sichtbarer Bereich des **elektromagnetischen Spektrums**
  - **Wellenoptik:** Welle mit Frequenz, Amplitude und Länge
  - **Quantenphysik:** Menge von einzelnen diskreten Energiequanten (**Photonen**)

# Wahrnehmung von Licht

- **Licht wird gefiltert durch unser visuelles System wahrgenommen**
- **Licht, das nicht auf Objekt trifft und von dort zu uns (direkt oder indirekt) reflektiert wird, wird nicht gesehen**

# Wellen

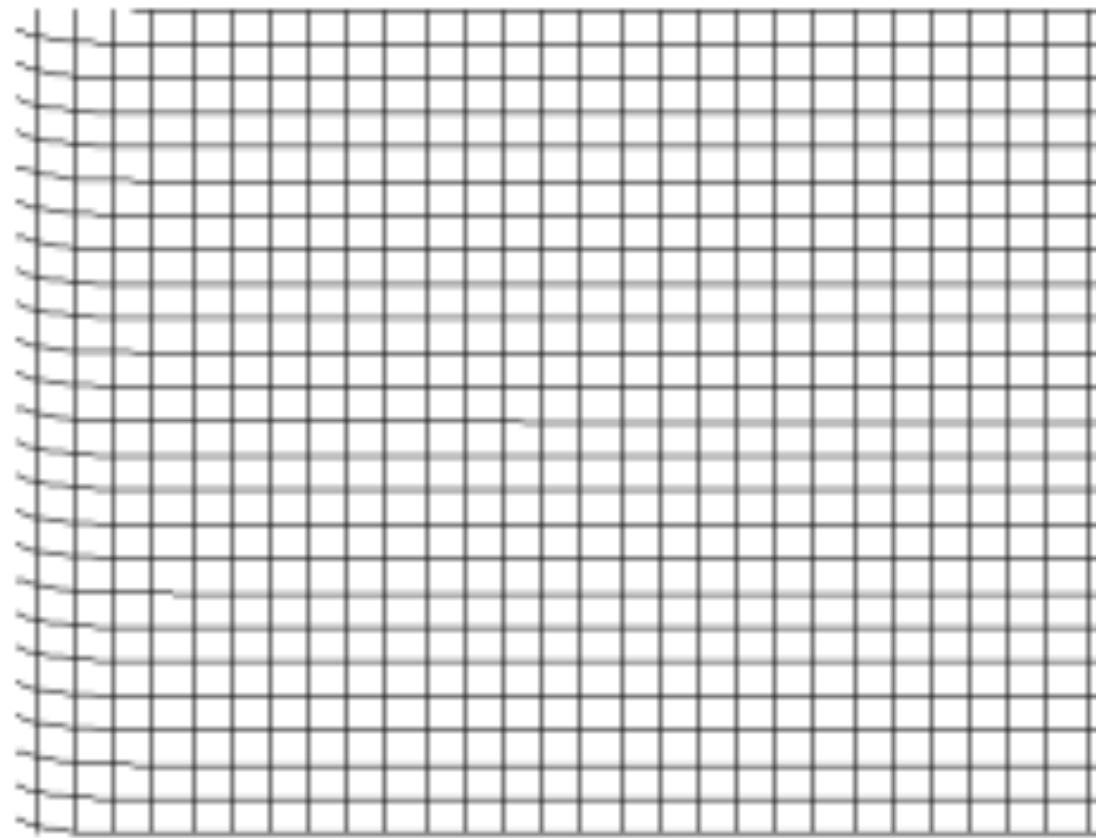
## Longitudinal- und Transversal



- a) **Longitudinalwelle:** Oszillatoren schwingen in der Ausbreitungsrichtung
- b) **Transversalwelle:** Oszillatoren schwingen quer zur Ausbreitungsrichtung

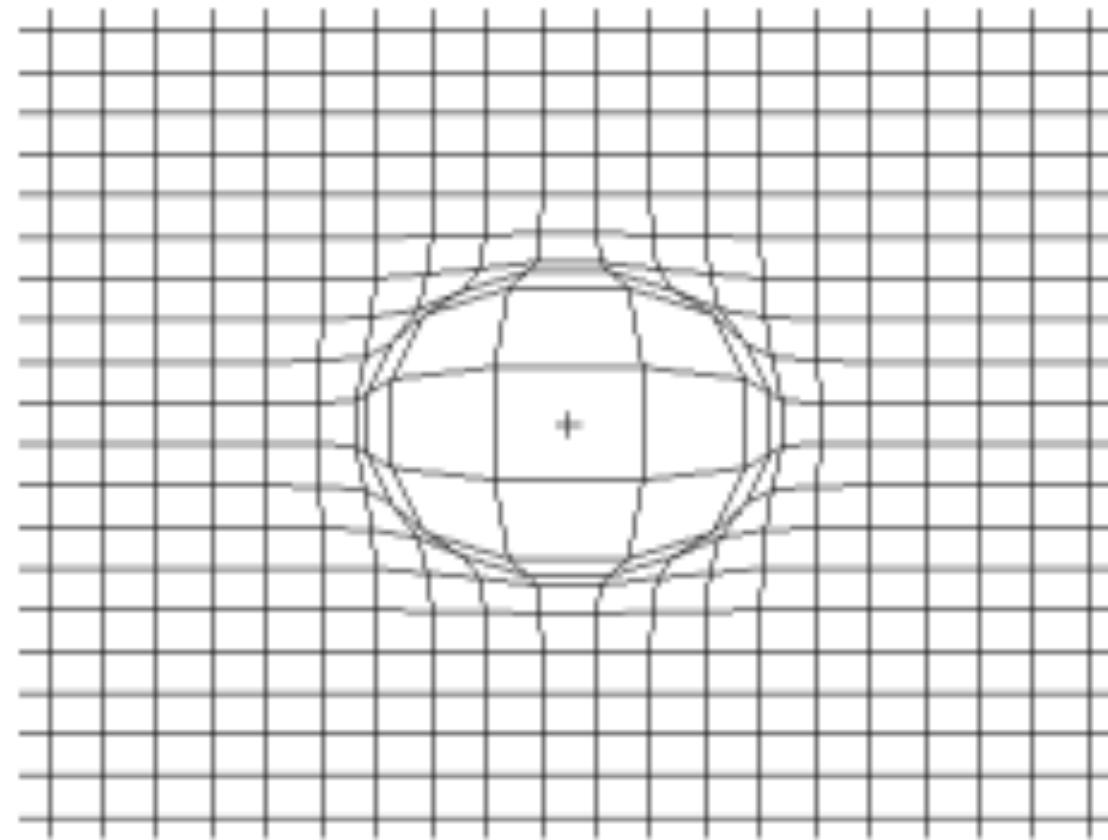
# Transversalwelle

Bspiel: Licht



# Longitudinalwelle

## Bispiel: Audio



# Analoges Signal

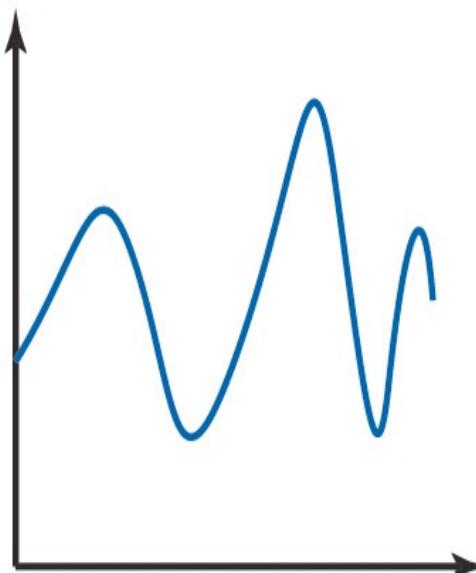
## Definition

- **Analoges Signal** ist gegeben durch **deterministische Änderungen** einer physikalischen Größe entsprechend einem Messwert der zu übertragenden Information

# Analoge Signale

## Beispiele

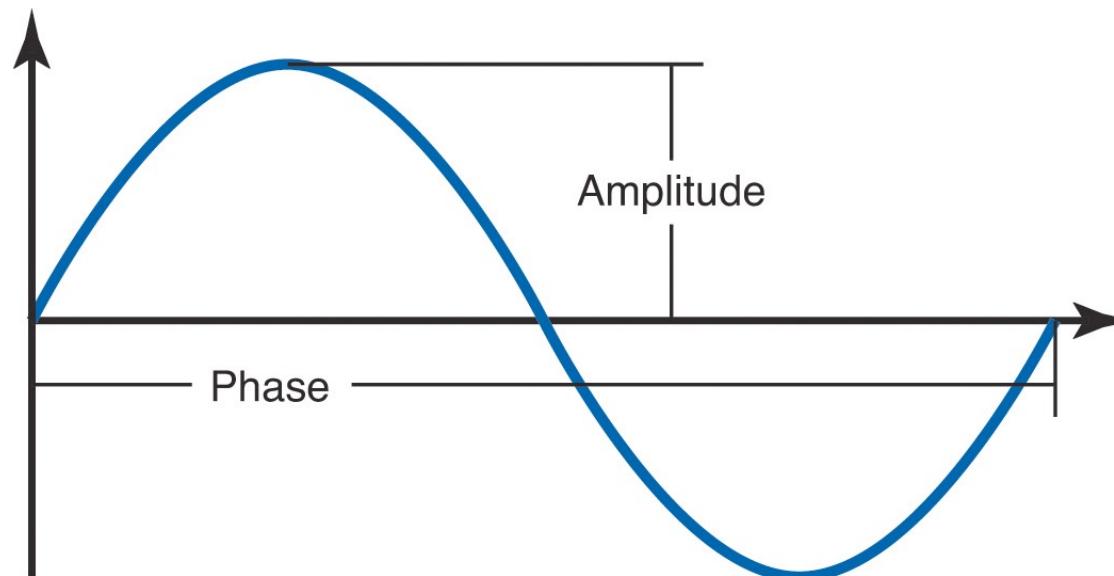
- Schall- oder Lichtwellen liegen meist als **periodische Signale**
- Verlauf wiederholt sich nach festen Zeitabständen (**Phasen**)



# Analoge Signale

## Begriffe

- **Phase** beschreibt sich wiederholenden Verlauf in festem zeitlichen Abstand
- **Amplitude** ist durch maximalen Wert der Phase gegeben



# Analoge Signale

- **Wellenlänge** gibt Weg an, den Signal bei gegebener Ausbreitungsgeschwindigkeit innerhalb einer Phase zurücklegt
- **Frequenz** gibt Anzahl von sich wiederholenden Schwingungen pro Zeiteinheit an

# Analoge Signale

- **Periodendauer T** (in Sekunden) gibt an, wie lange eine vollständige Schwingung dauert

$$T = \frac{1}{f}$$

- **Frequenz f** ist Kehrwert der Periodendauer in Hz

$$1\text{Hz} = \frac{1}{s}$$

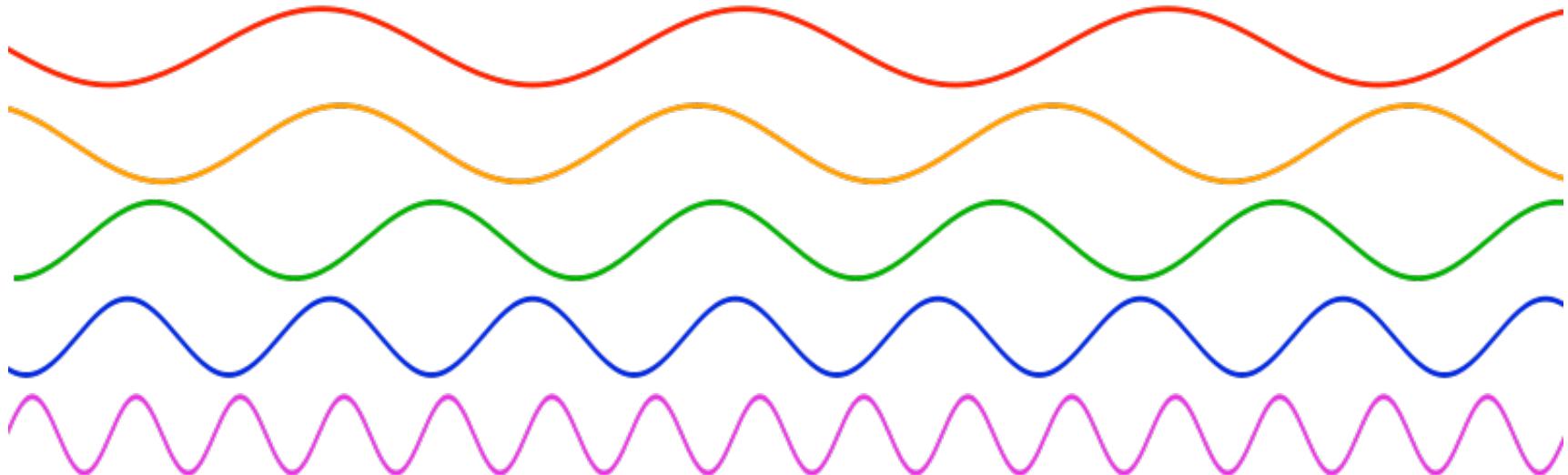
# Diskussion



Wie lange ist die Periodendauer für ein analoges Signal mit  $f=0.5 \text{ Hz}$ ?

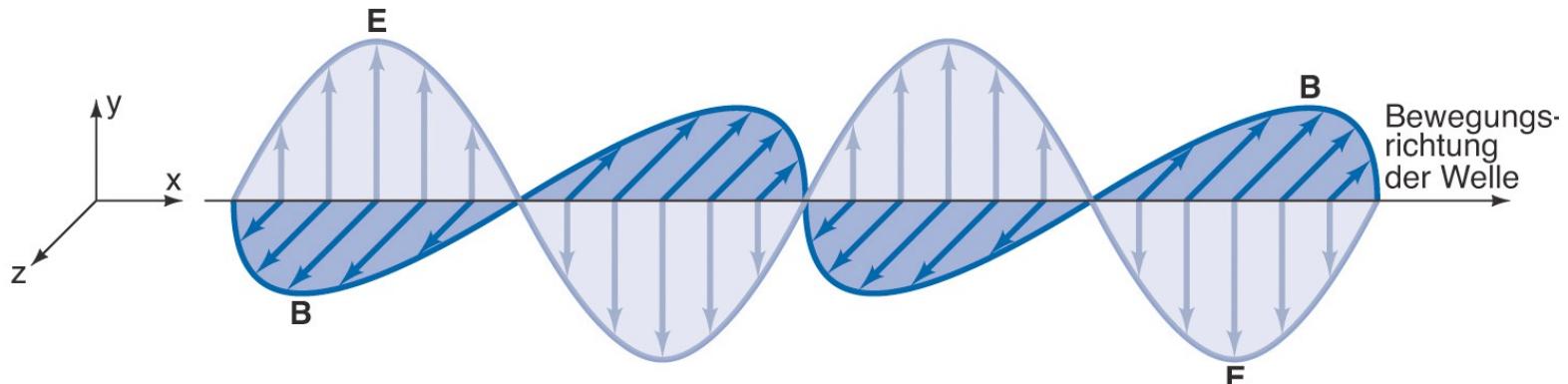
# Licht

- **Licht als elektromagnetische Welle**
  - **Frequenz definiert Farbe**
  - **Amplitude definiert Helligkeit**



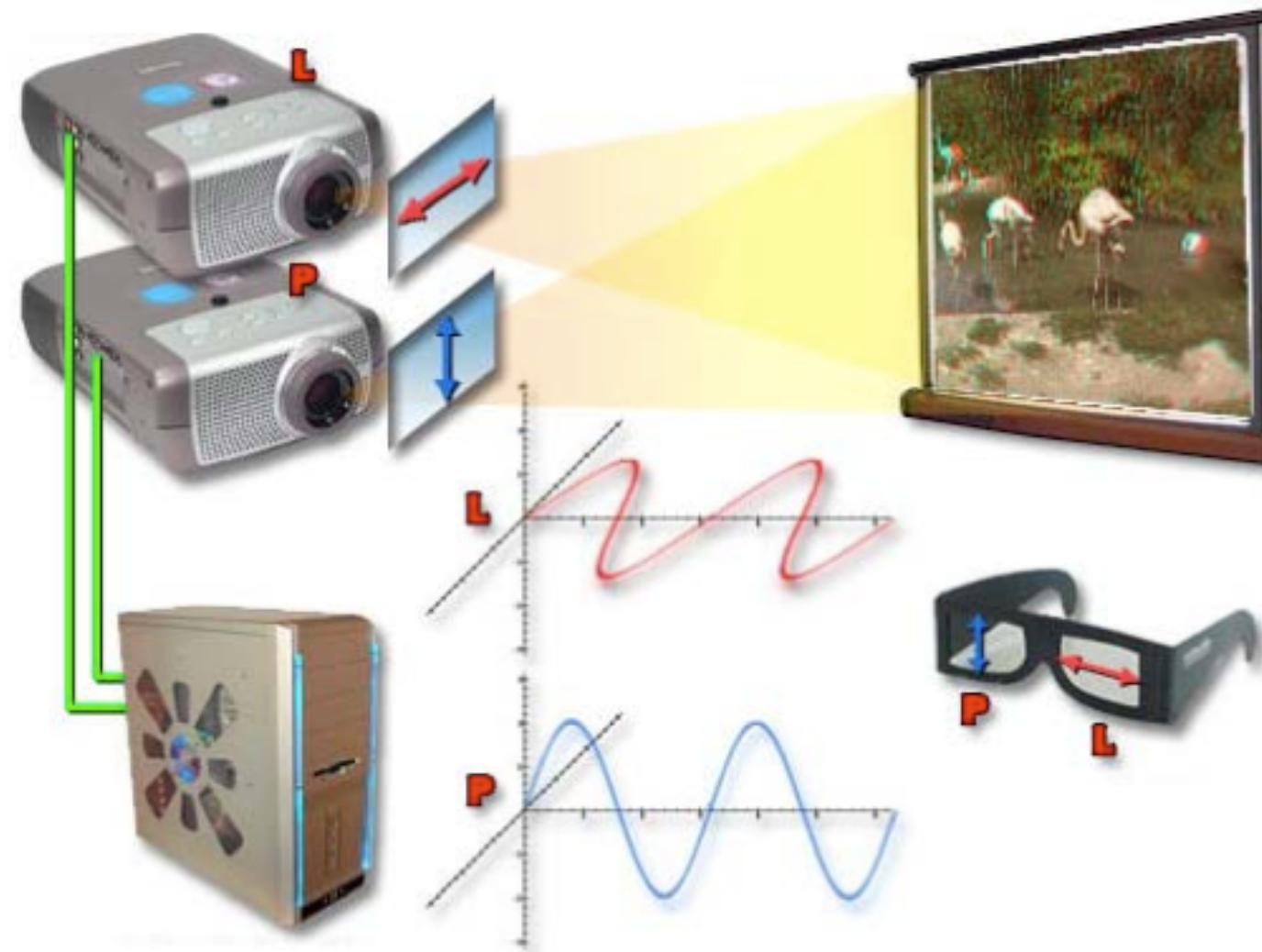
# Polarisation

- Wellen E und B haben zwar gleiche **Amplitude (Helligkeit)** und **Wellenlänge (Farbe)**, sind aber unterschiedlich gedreht, d.h. **polarisiert**
  - wichtig z.B. für stereoskopische Verfahren



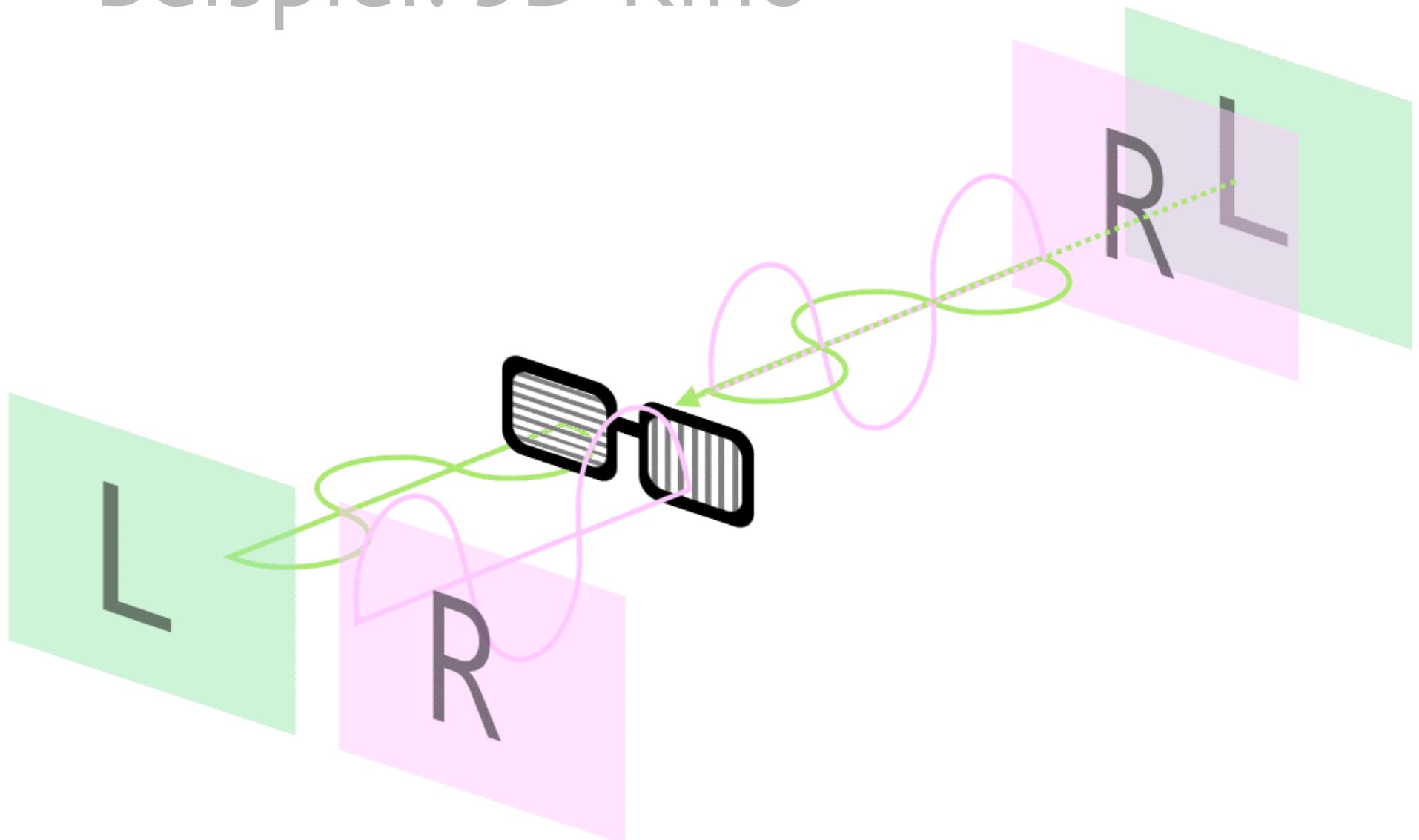
# Polarisation

## Beispiel: 3D-Kino



# Polarisation

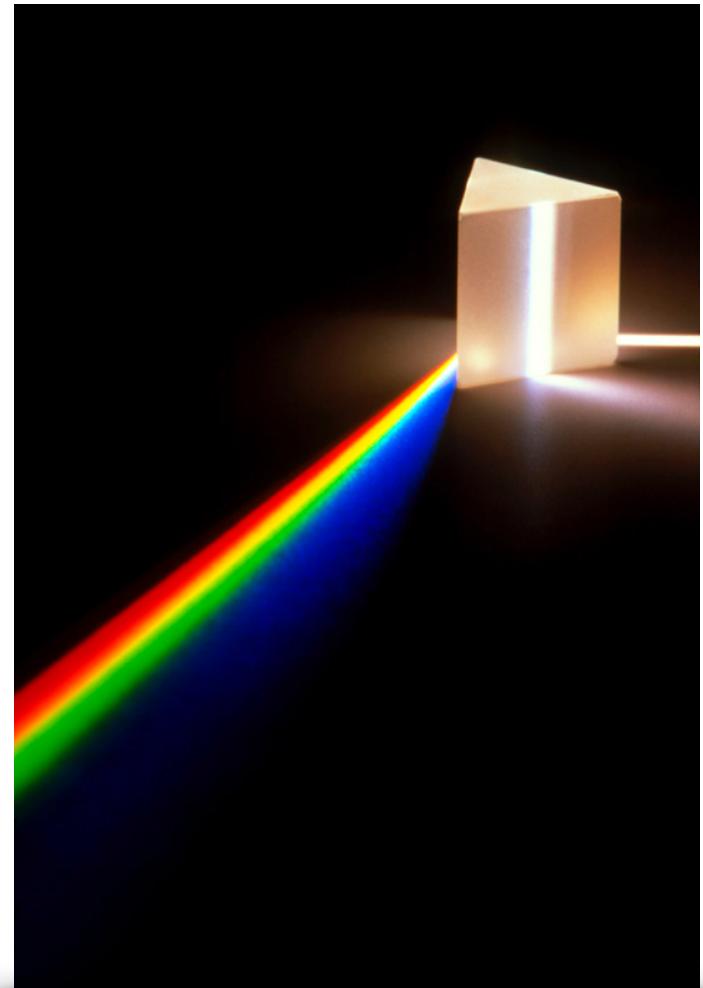
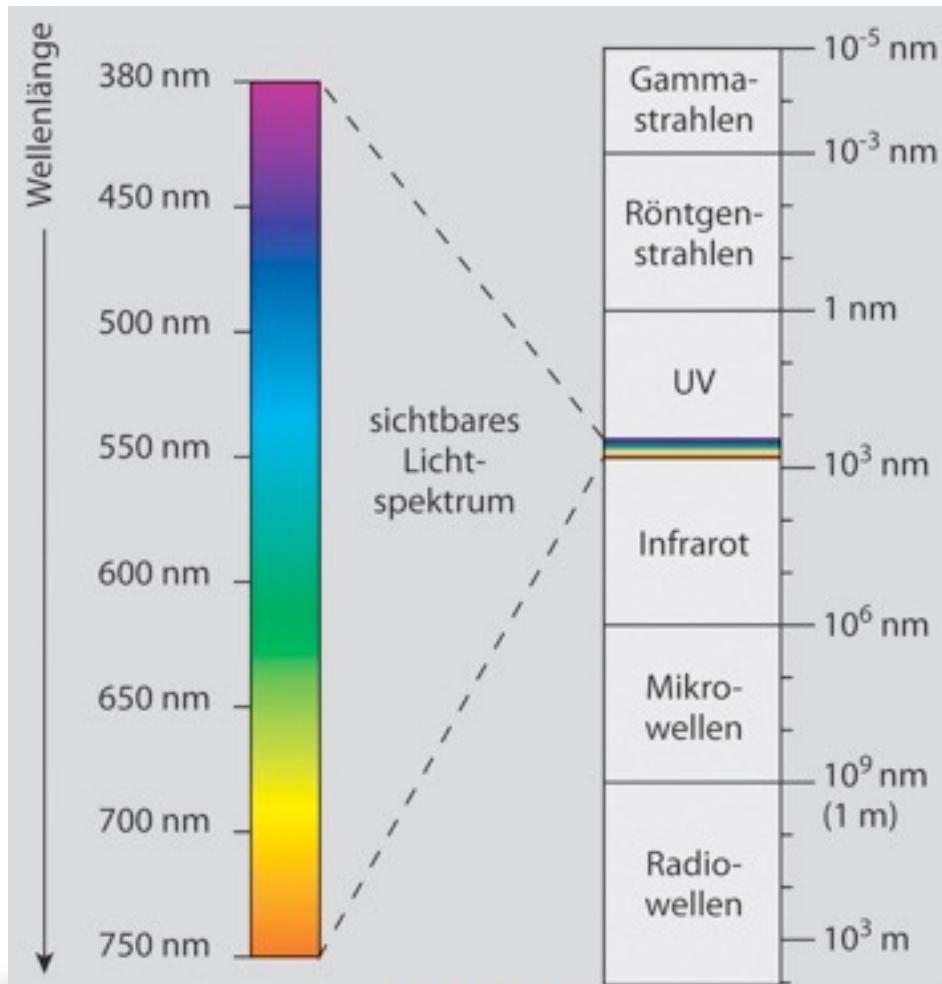
## Beispiel: 3D-Kino

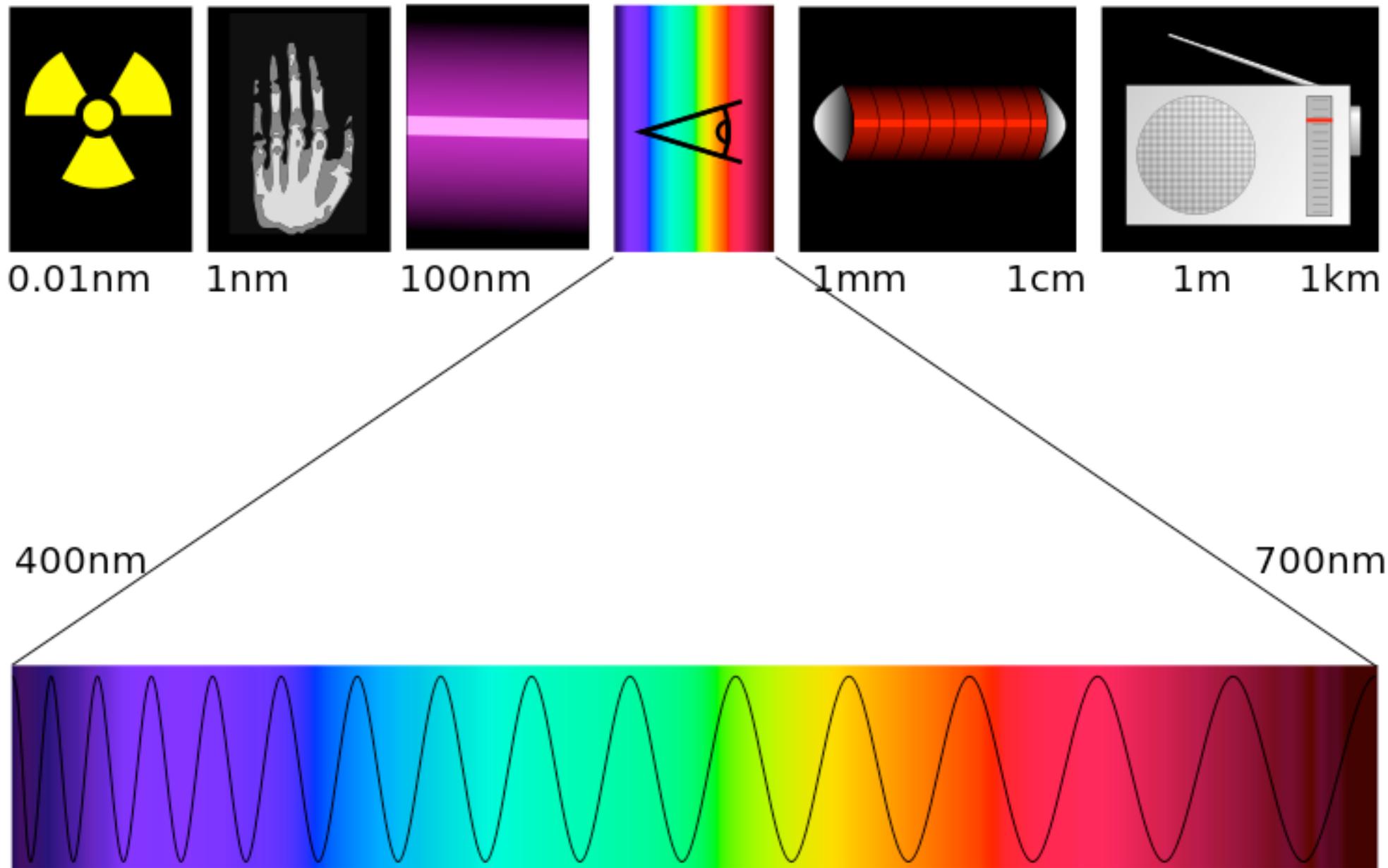




# Lichtspektrum

## Bsp: Sichtbare Anteil





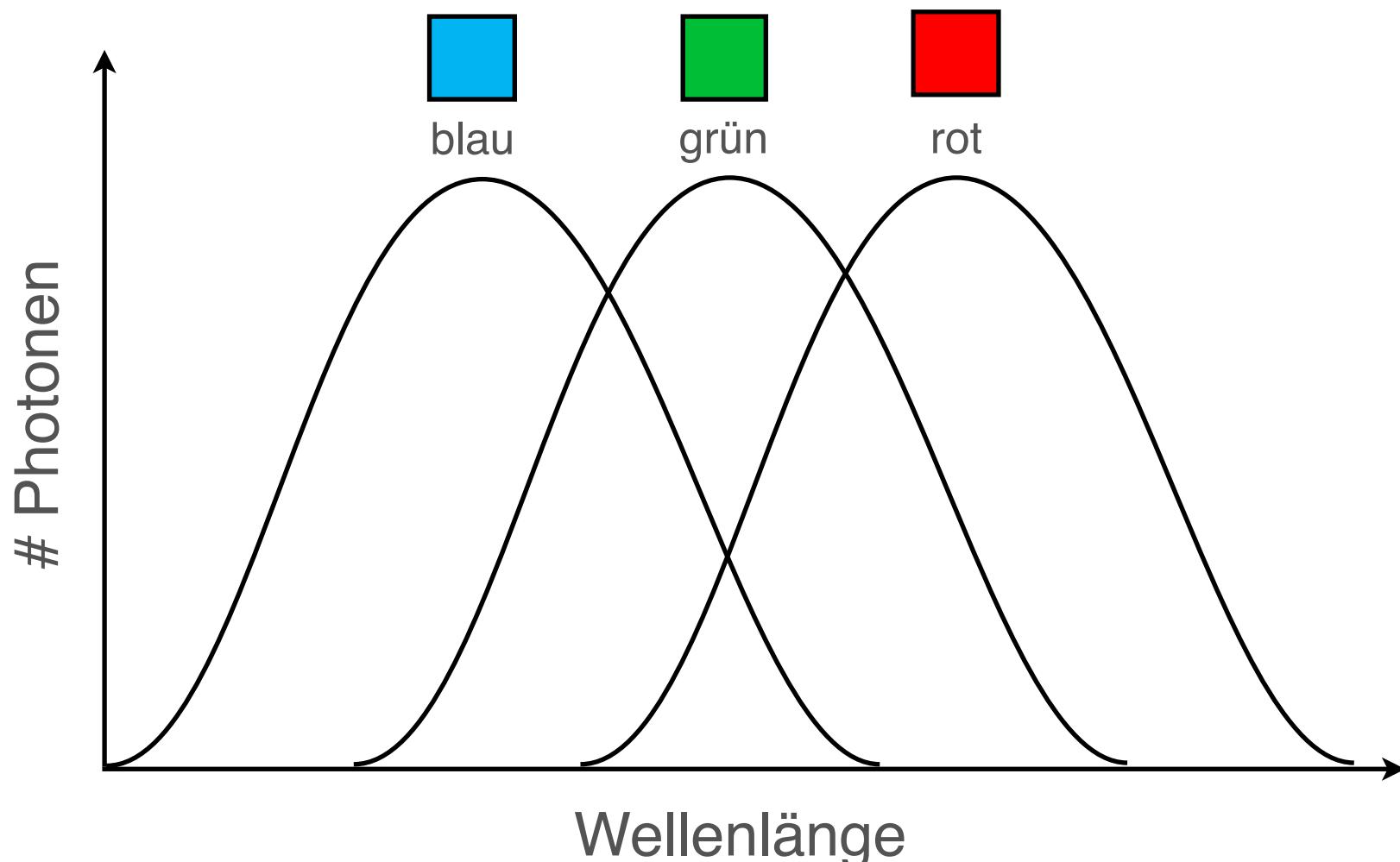
# Think! Pair! Share!



Lichtgeschwindigkeit  $c = 300.000.000 \text{ m/s}$   
Welche Frequenz hat somit sichtbares Licht?

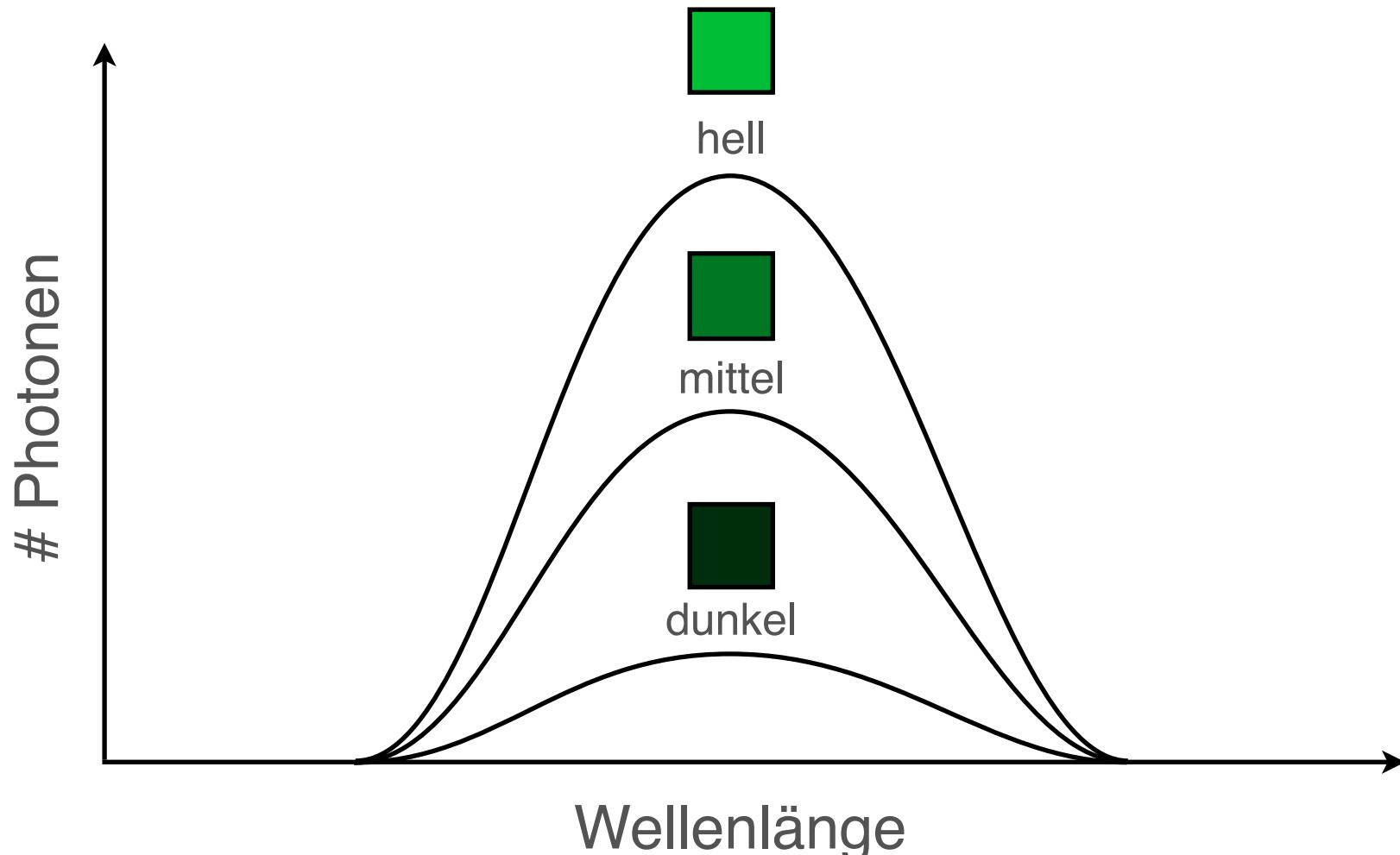
# Visuelle Psychophysik

## Wahrnehmung: Farbton



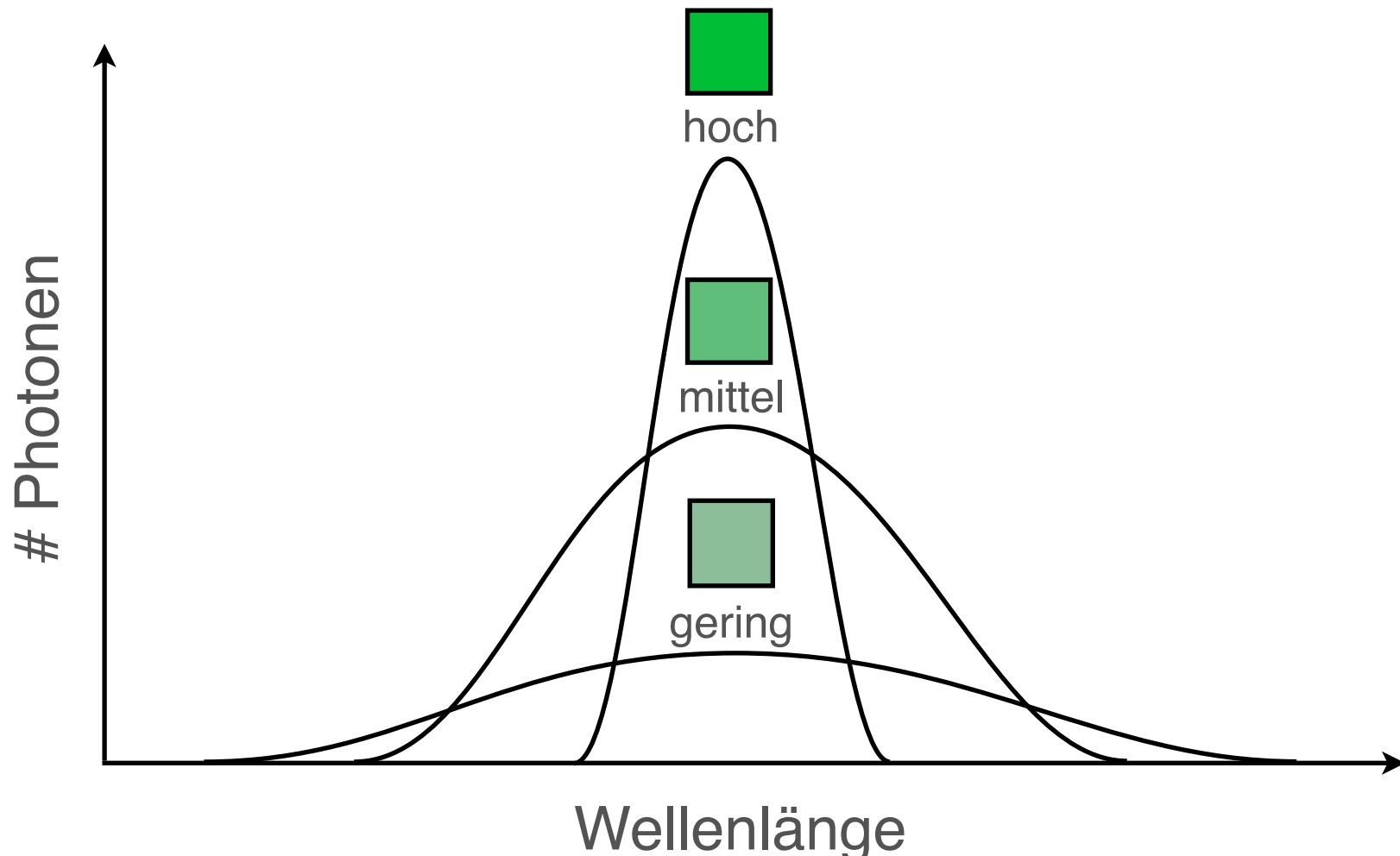
# Visuelle Psychophysik

## Wahrnehmung: Helligkeit



# Visuelle Psychophysik

## Wahrnehmung: Sättigung

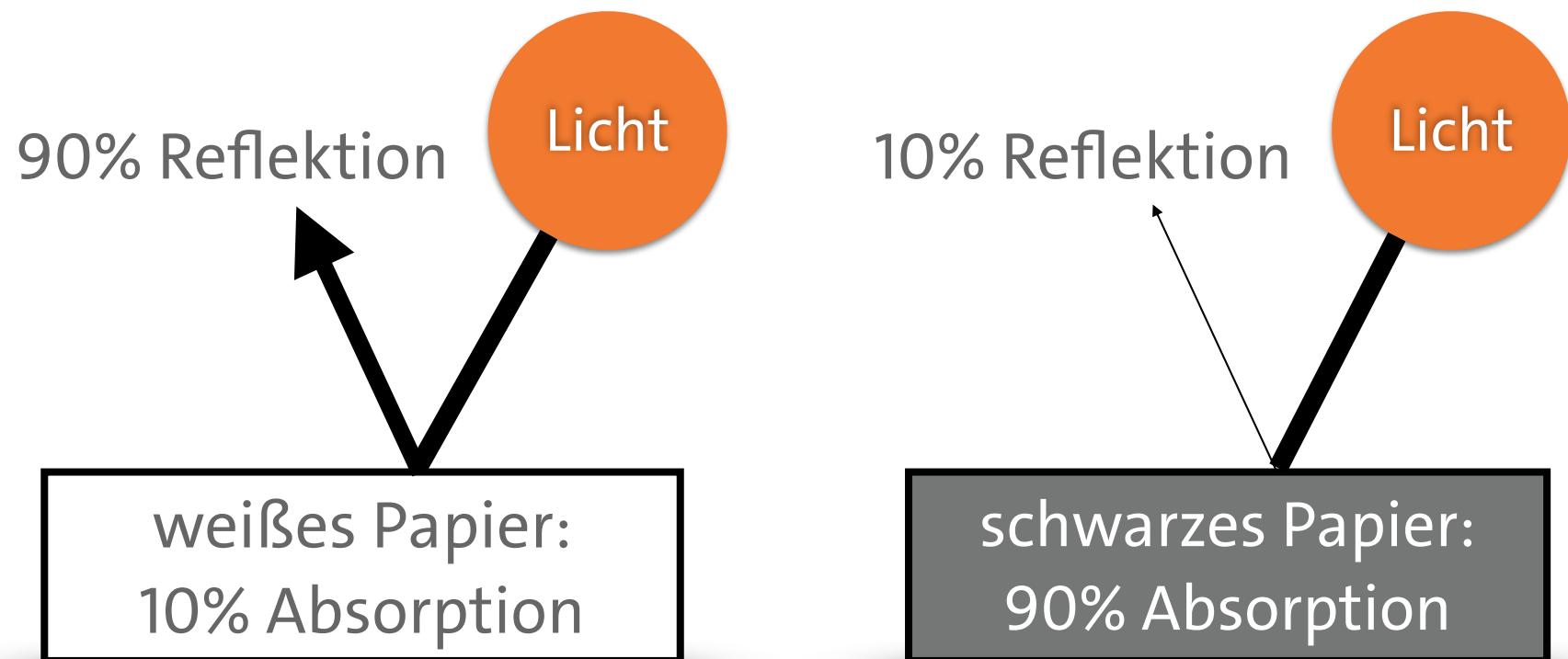


# Ausbreitungsrichtung

- **Elektromagnetische Wellen** breiten sich **transversal** von Quelle in Richtung mit konstanter Geschwindigkeit aus
- Je nach Wellenlänge und Beschaffenheit von Hindernissen, kann Welle **abgelenkt** bzw. **reflektiert, absorbiert** oder **Hindernis durchdringen**

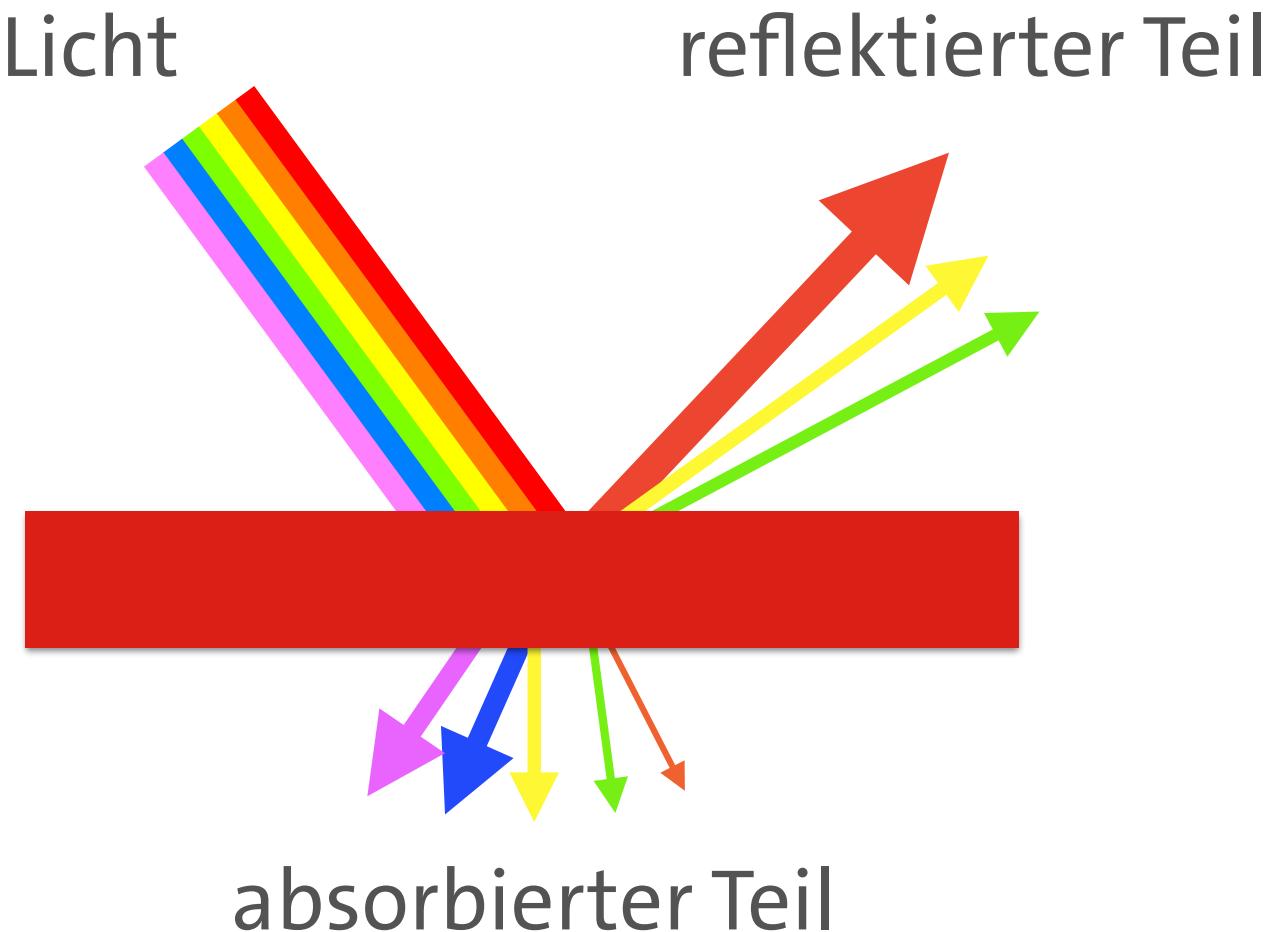
# Absorption & Reflektion

## Beispiel



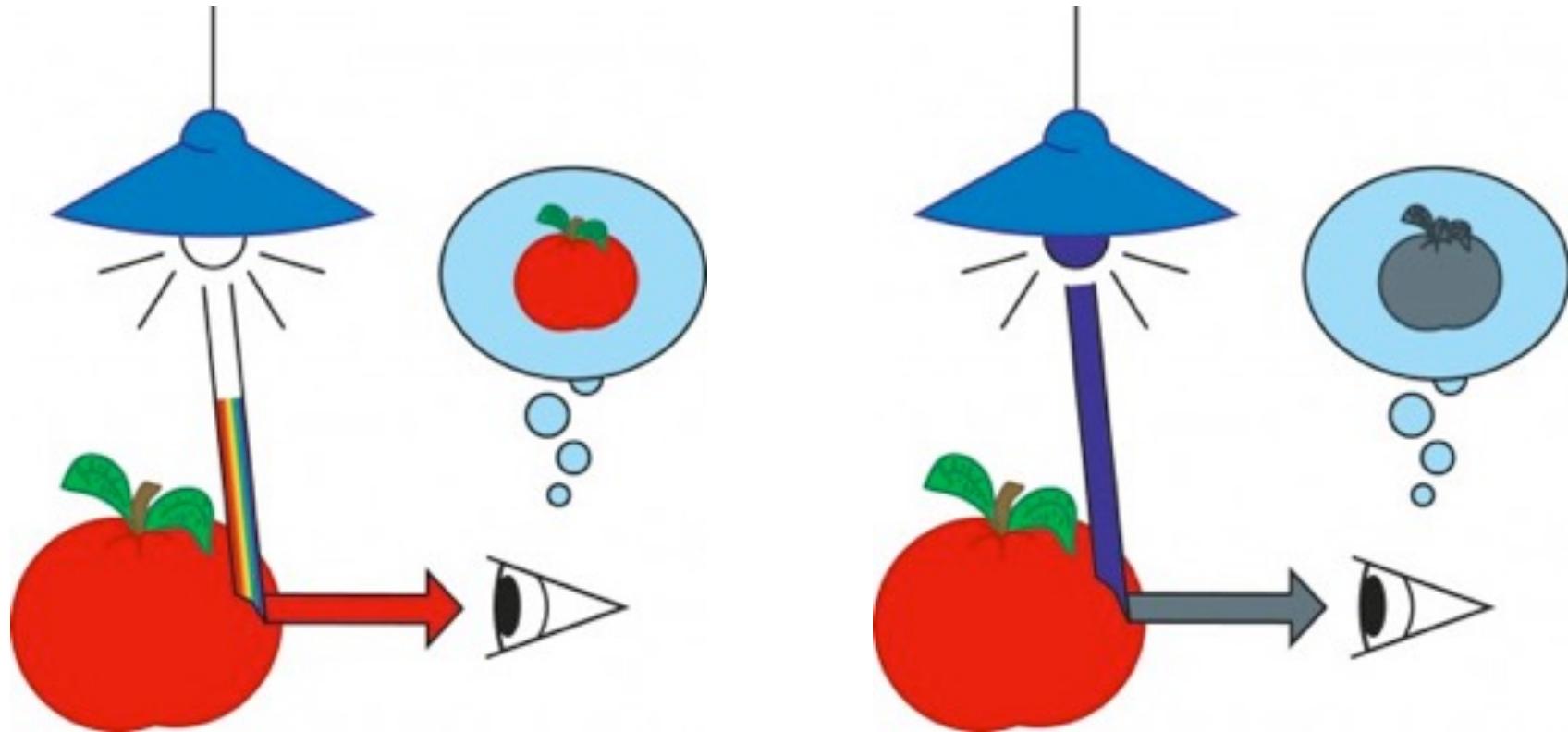
# Absorption & Reflektion

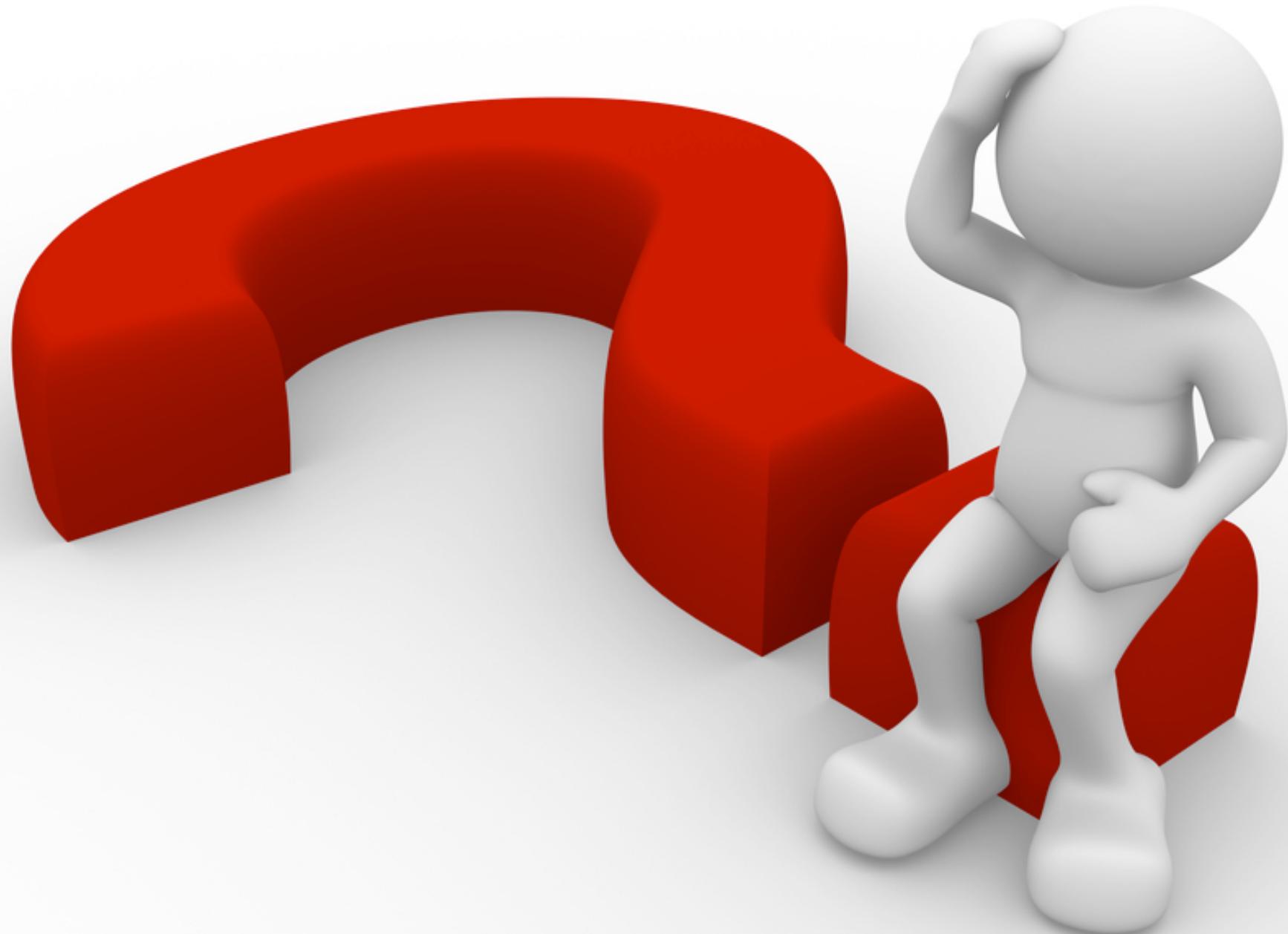
## Beispiel



# Absorption & Reflektion

## Beispiel: Tomate







# Interaktive Computergrafik

## Kapitel Visuelle Wahrnehmung

Visuelles System

# Visuelles System

- **Visuelles System** ist Teil des **zentralen Nervensystems** und *interpretiert* Information der sichtbaren Welt
  - Rezeption von Licht
  - Konstruktion von binokularen Bildern
  - Identifikation und Kategorisierung
  - Führung von Benutzerbewegungen
  - ...

# Visuelles System

- Sehen ist komplexe Aktivität mit **physikalischen und perzeptuellen Limitierungen**
  - Aufbau des visuellen System führt dazu dass “*einiges*” nicht gesehen werden kann
  - Fähigkeiten zur Interpretation des visuellen System erlauben, dass Bilder trotz unvollständiger Information “gesehen” werden können



# Visuelles System

- **Visuelle System** arbeitet nach **zweistufigem Modell**
  1. **Physikalische Rezeption** von Stimuli der sichtbaren Welt
  2. **Verarbeitung und Interpretation** des Stimulus

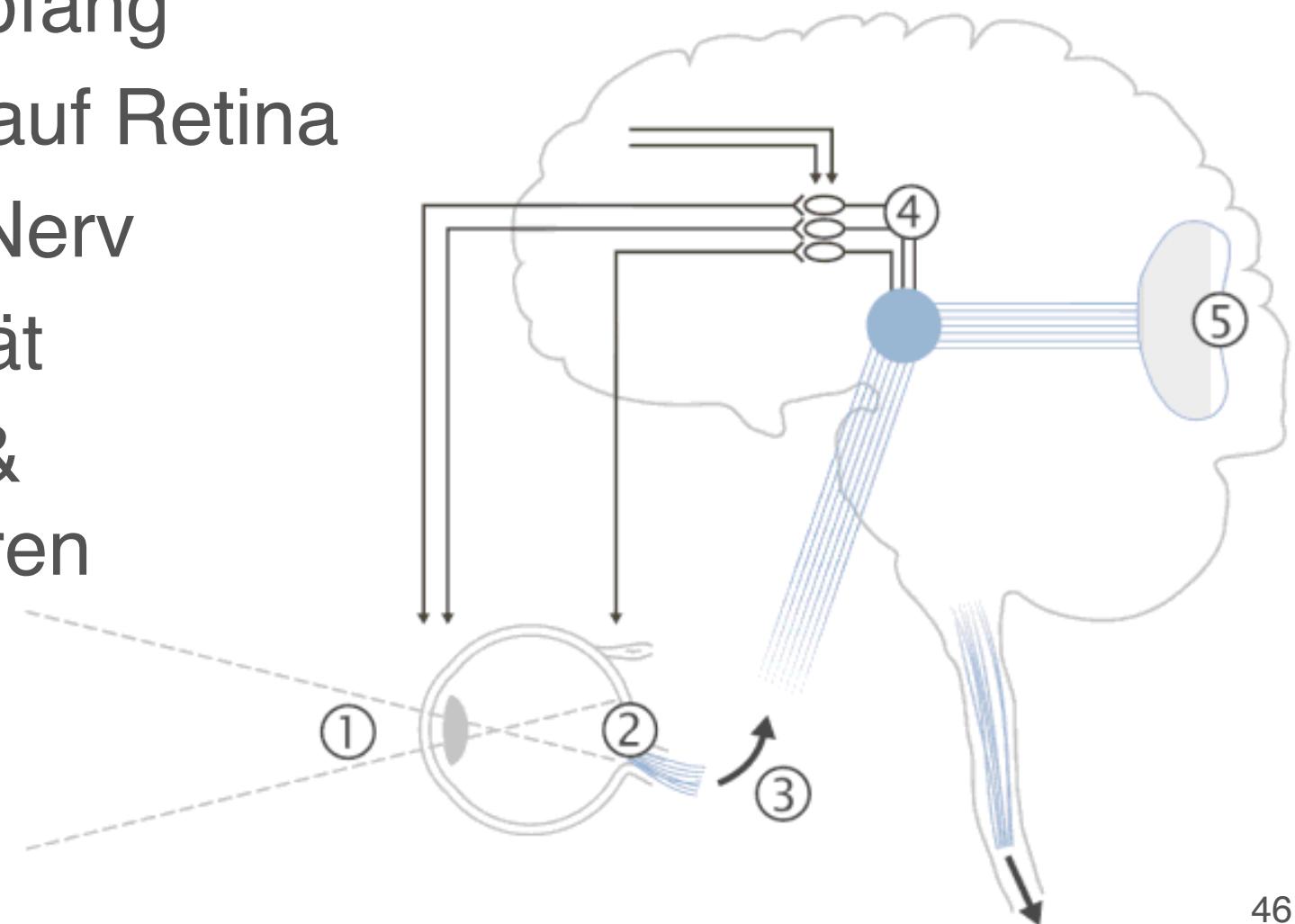
# Visuelles System

- Licht wird von Objekten in realer Welt **reflektiert**
- Bild wird **umgekehrt** auf **Retina** abgebildet
- **Rezeptoren** transformieren Licht-Signale in **elektrische Signale**, die an Gehirn weitergegeben werden

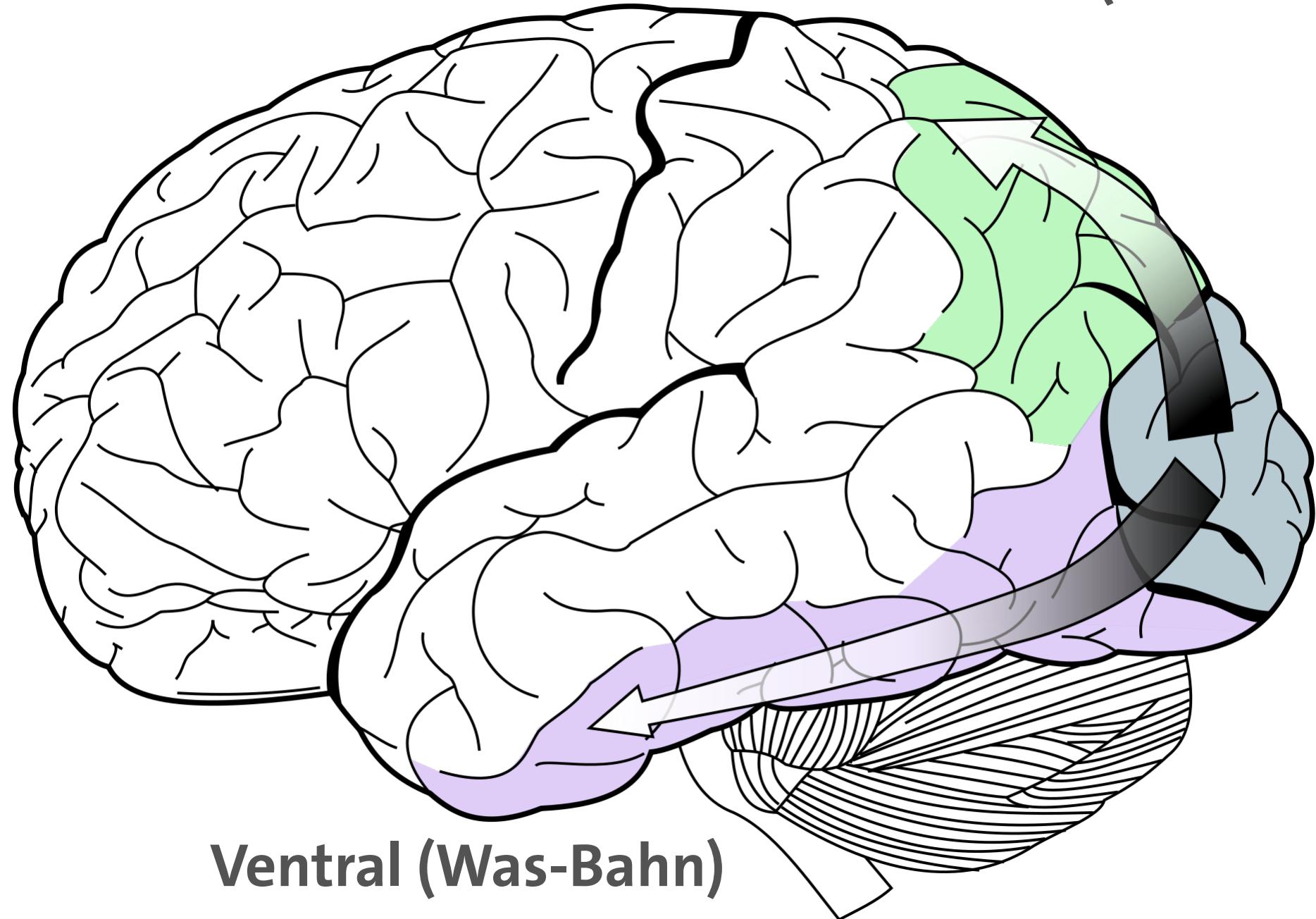
# **Animation des visuellen Systems**

# Visuelles System

- (1) Signal-Empfang
- (2) Projektion auf Retina
- (3) Optischer Nerv
- (4) Binokularität
- (5) Erkennen & Interpretieren



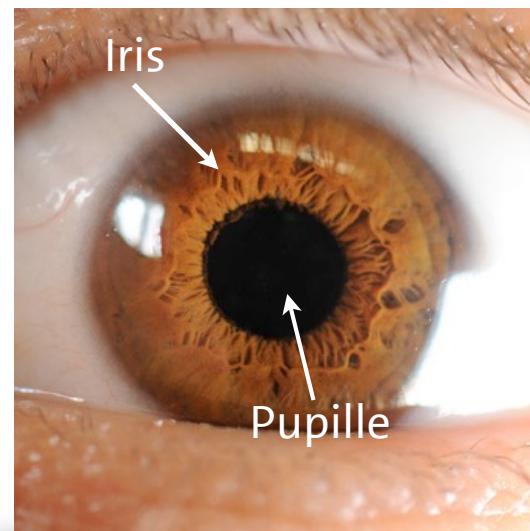
Dorsal (Wo-Bahn)



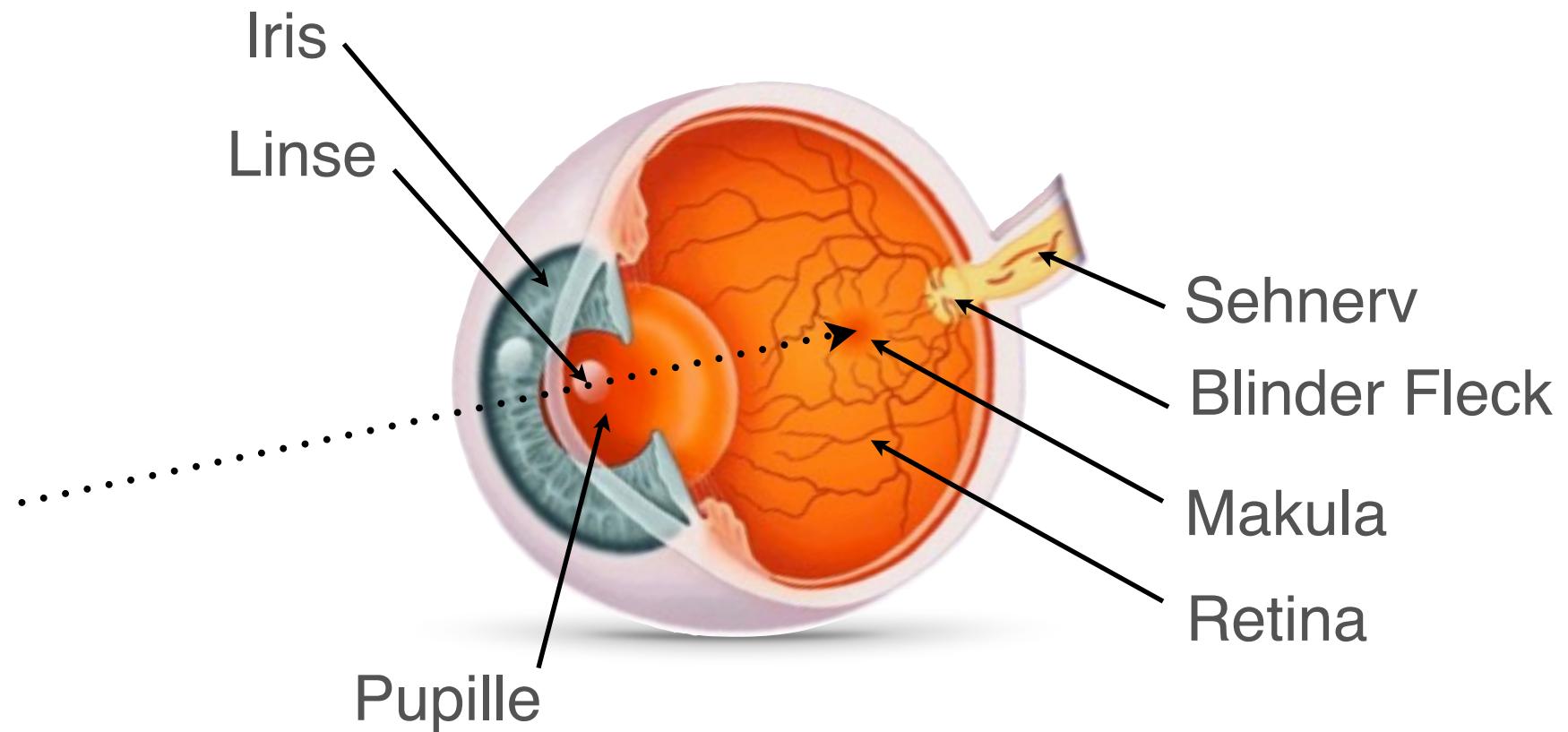
Ventral (Was-Bahn)

# Menschliches Auge

- **Menschliche Auge** ist Teil des visuellen Systems
- **Menschliche Auge** ist Sinnesorgan zur Wahrnehmung von Lichtreizen

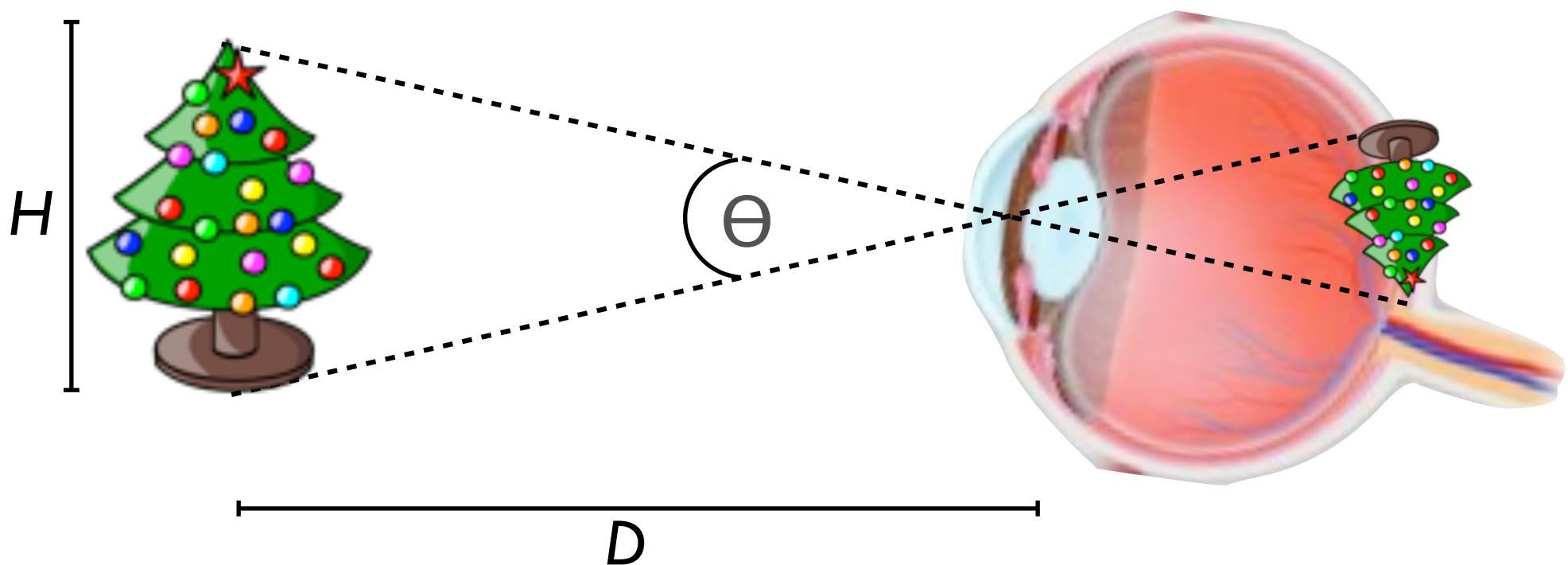


# Menschliches Auge

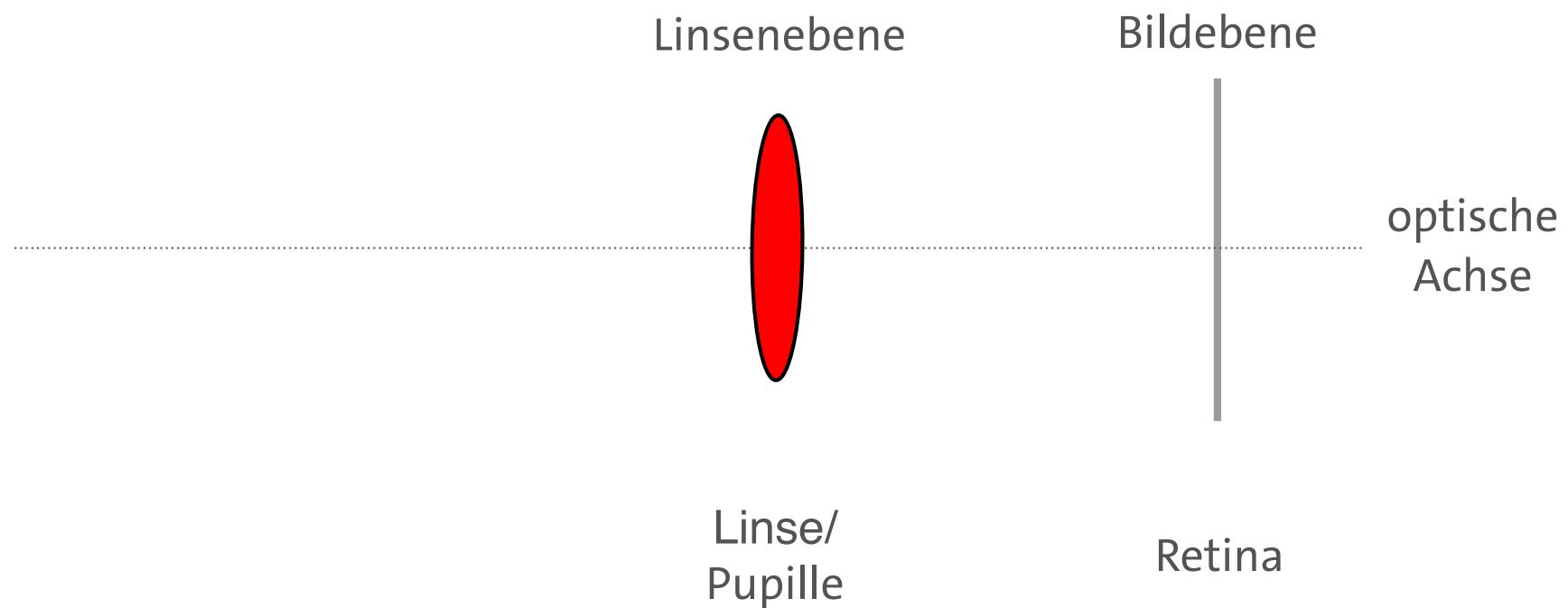


# Optik

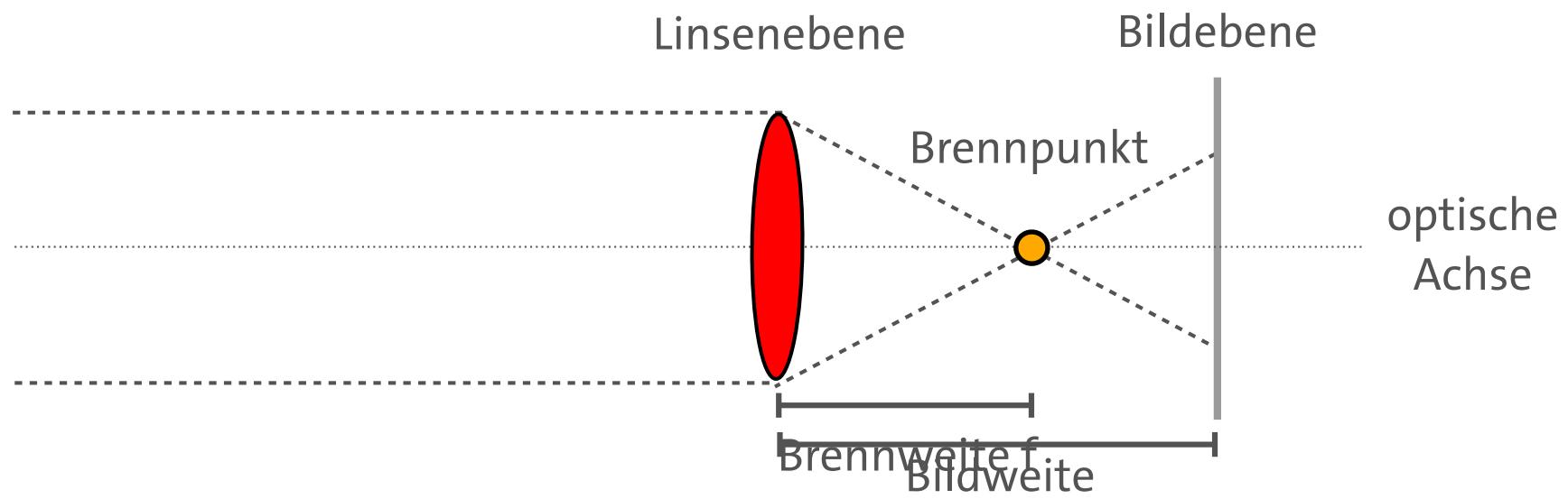
- **Sehwinkel  $\Theta$  hängt von Distanz  $D$  und Größe  $H$  des betrachteten Objekts ab**



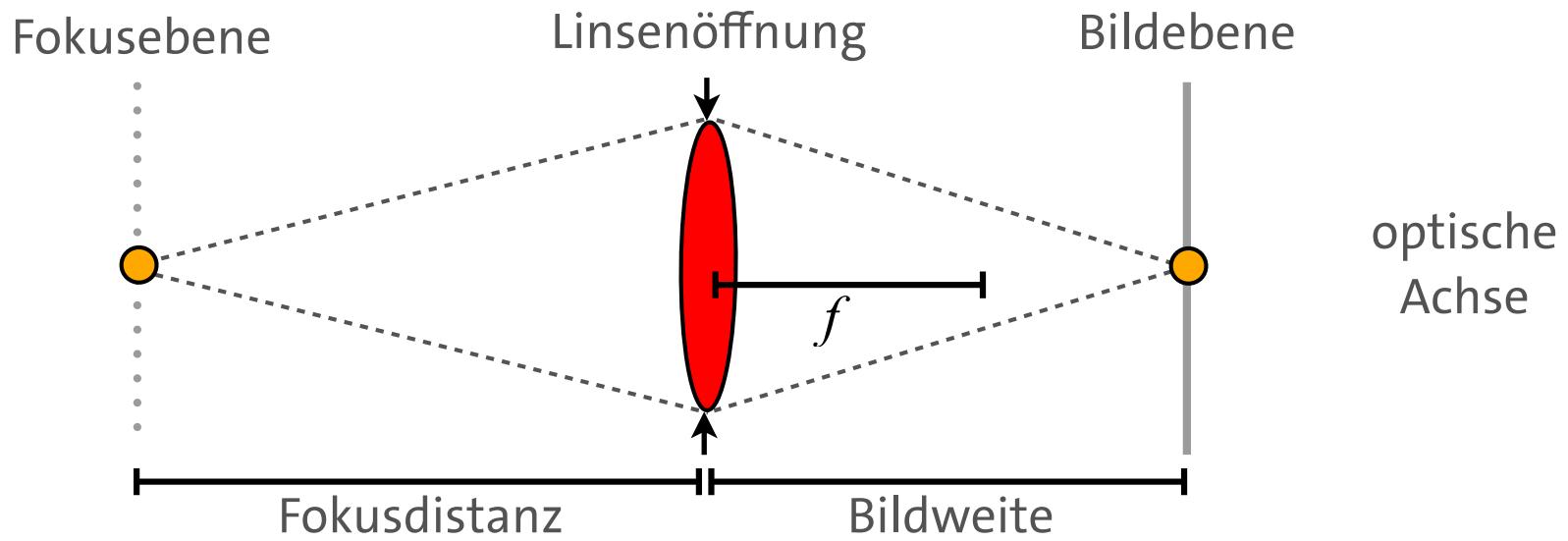
# Optik



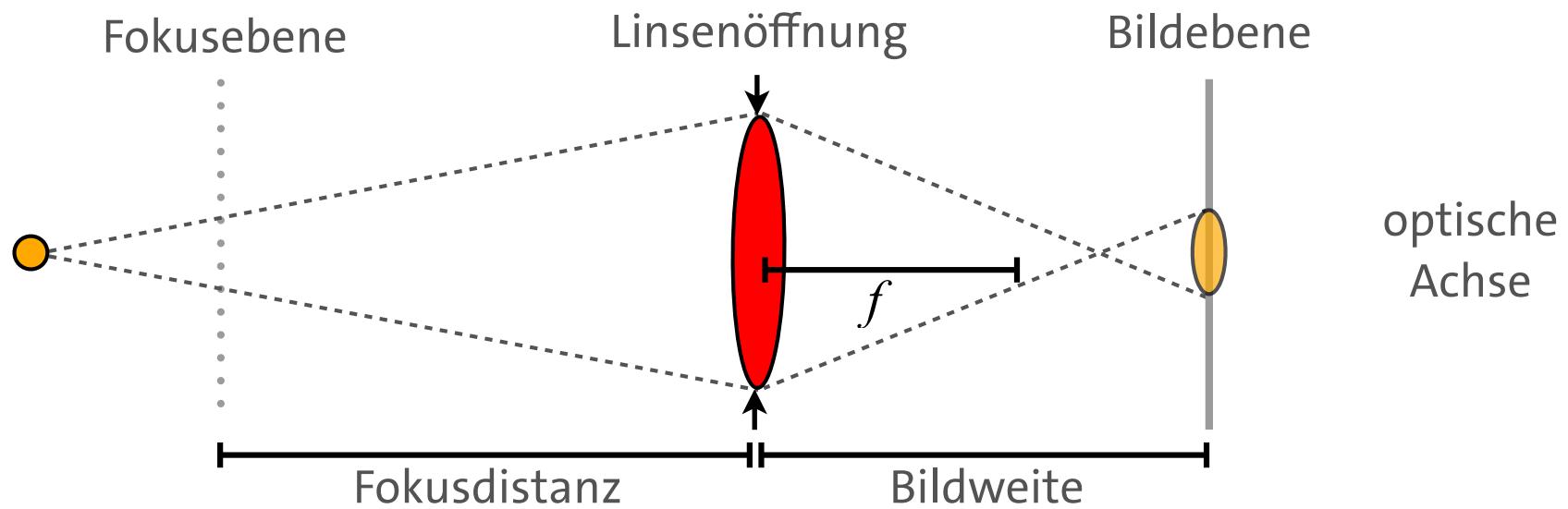
# Visuelle Optik



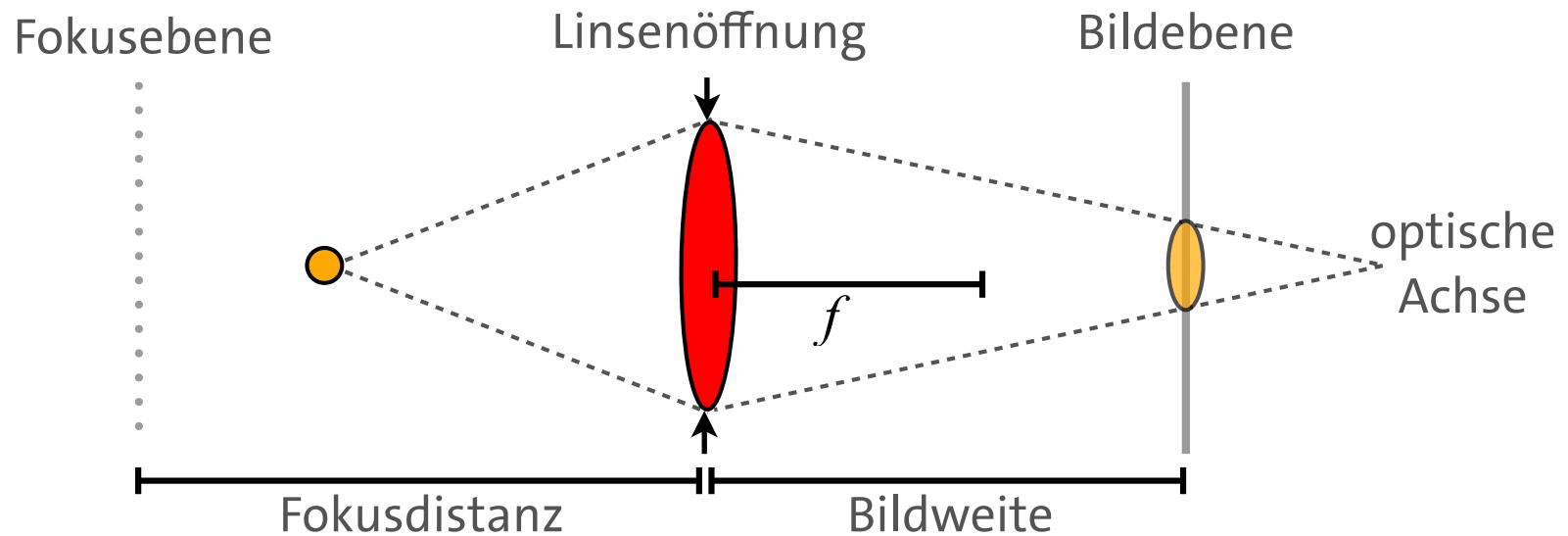
# Visuelle Optik



# Visuelle Optik

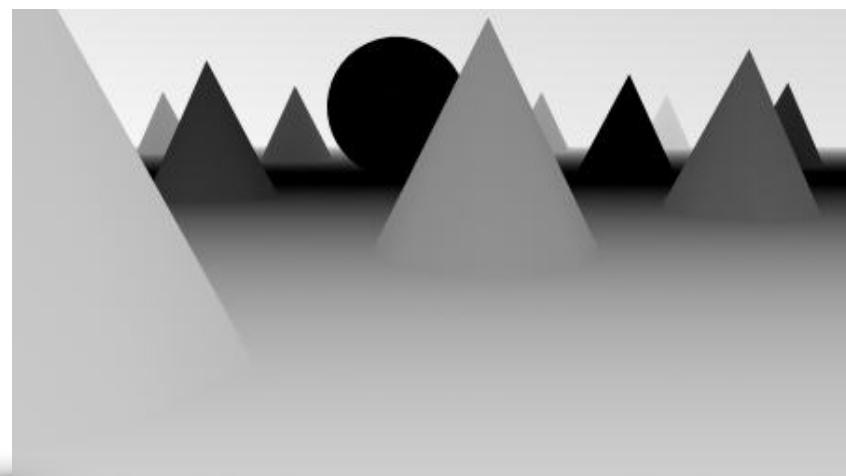
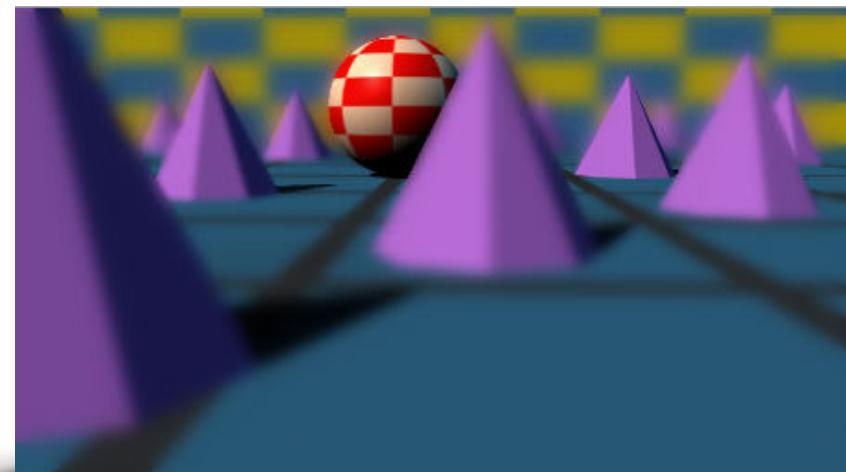
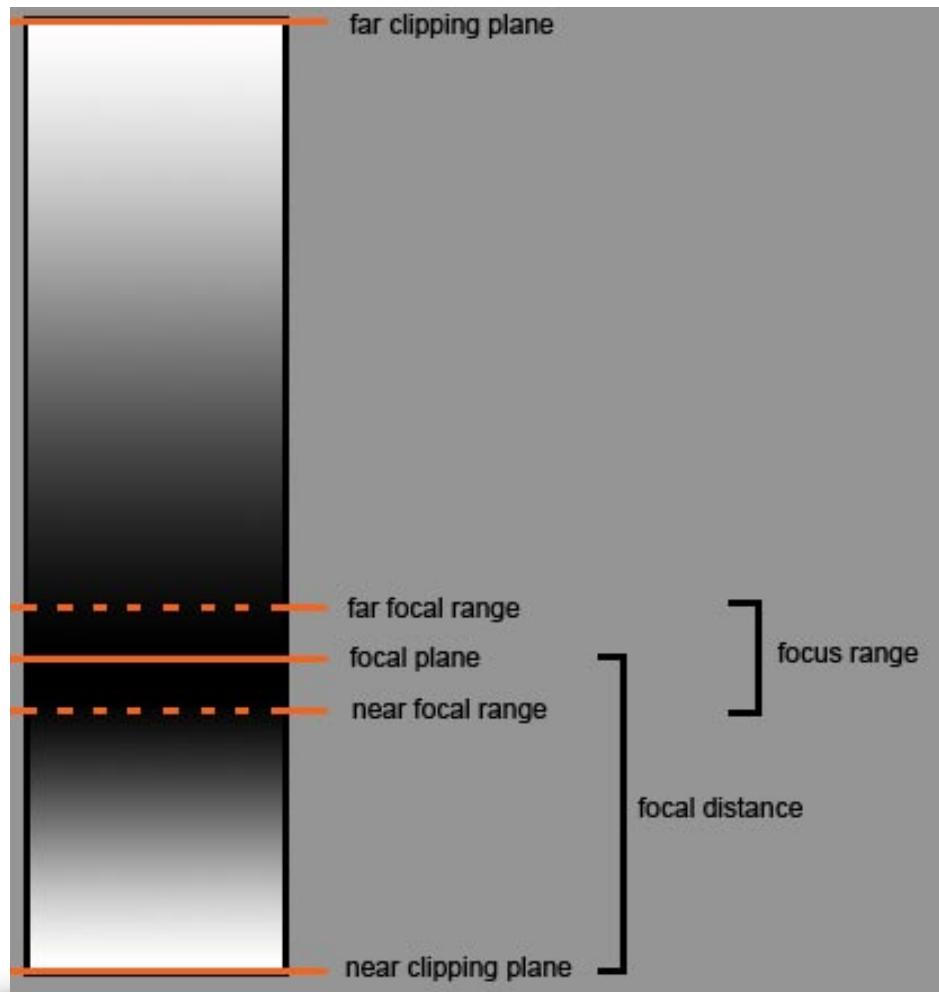


# Visuelle Optik



# Fokus: Grafikdesign

## Bspiel: Unschärfe



# Sehschärfe

- **Sehschärfe** bezeichnet Fähigkeit Konturen und Muster zu erkennen
- **Sehschärfe** hängt ab vom Auflösungsvermögen, Abbildungsqualität, optischen Eigenschaften des Objekts und Umgebung (Kontrast, Farbe, Form des Objekts)

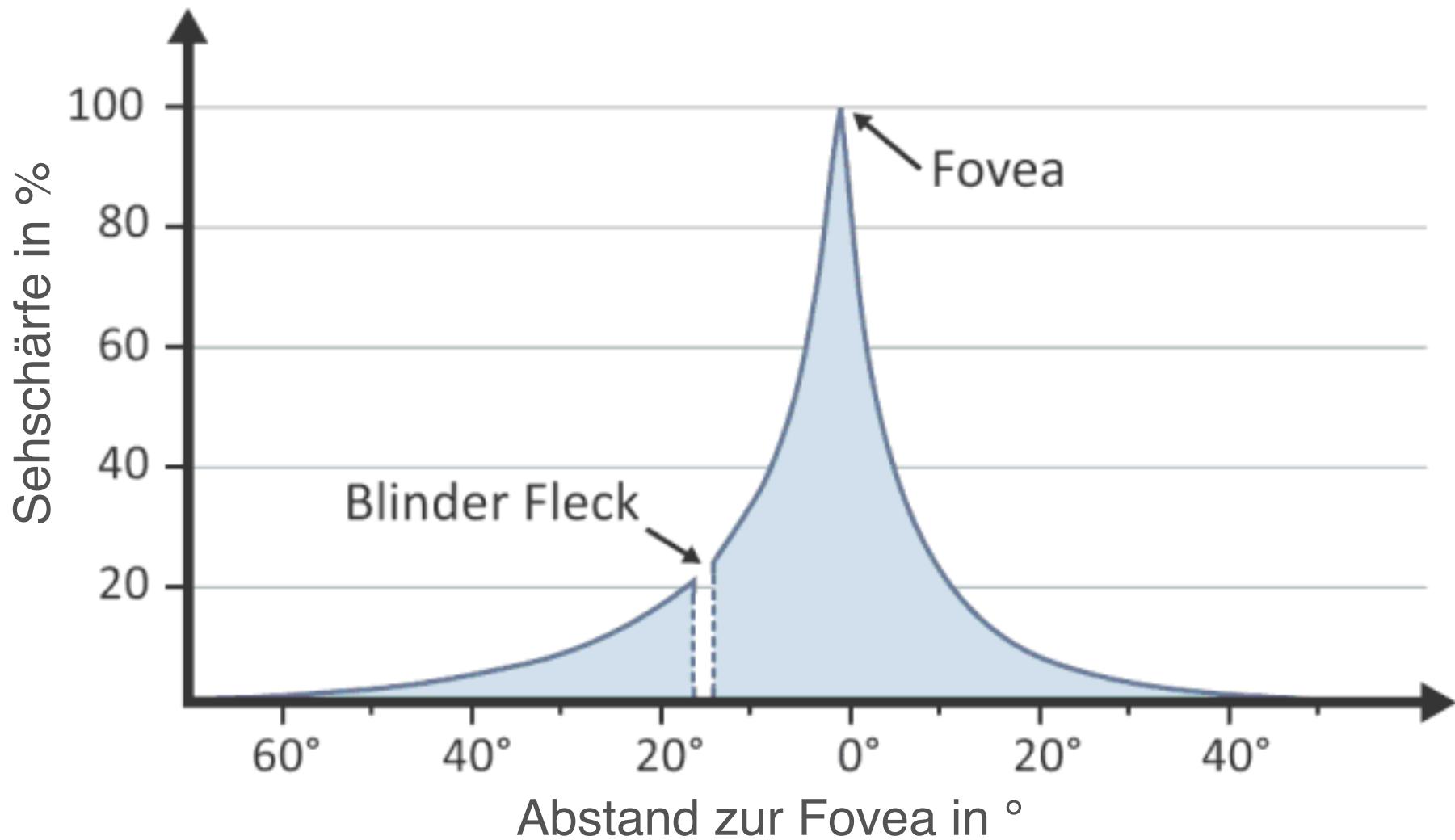
# Sehschärfe

## Quantifizierung

- **Quantifizierung** bspw. durch **Winkel-Sehschärfe**, d.h. Auflösungsvermögen, bei dem zwei Sehobjekte noch als getrennt wahrgenommen werden
- Beispiel: Auflösung von  $1'$  (**Bogenminute**) entspricht einer Ortsauflösung von etwa 1,5 mm bei 5 m Abstand

	Snellen- Index	Bogen- minute
E	1	20/200
F P	2	20/100
T O Z	3	20/70
L P E D	4	20/50
P E C F D	5	20/40
E D F C Z P	6	20/30
F E L O P Z D	7	20/25
D E F P O T E C	8	20/20
L E F O D P C T	9	
F D P L T C E O	10	
P E Z O L C F T D	11	

# Foveales Sehen



# Foveales Sehen

## Beispiel: Lesen

Around the fixation point only four to five letters are seen with 100% acuity.



# Fokus: Grafikdesign

## Beispiel

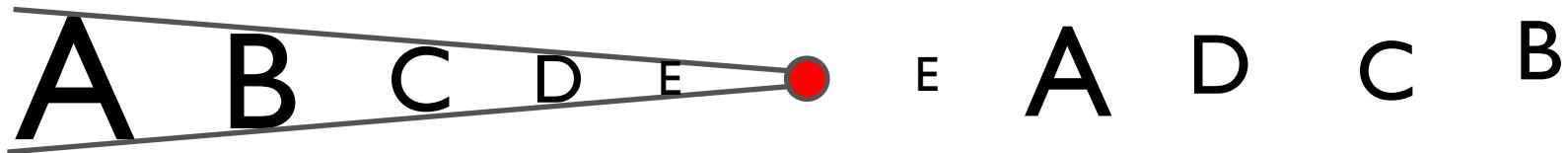
- Fähigkeit, scharf zu sehen, fällt mit Distanz der Projektion zur Fovea

● A D F G Q R S G H K L M B G U T H T R Y V H N U O G P O Q

# Fokus: Grafikdesign

## Beispiel

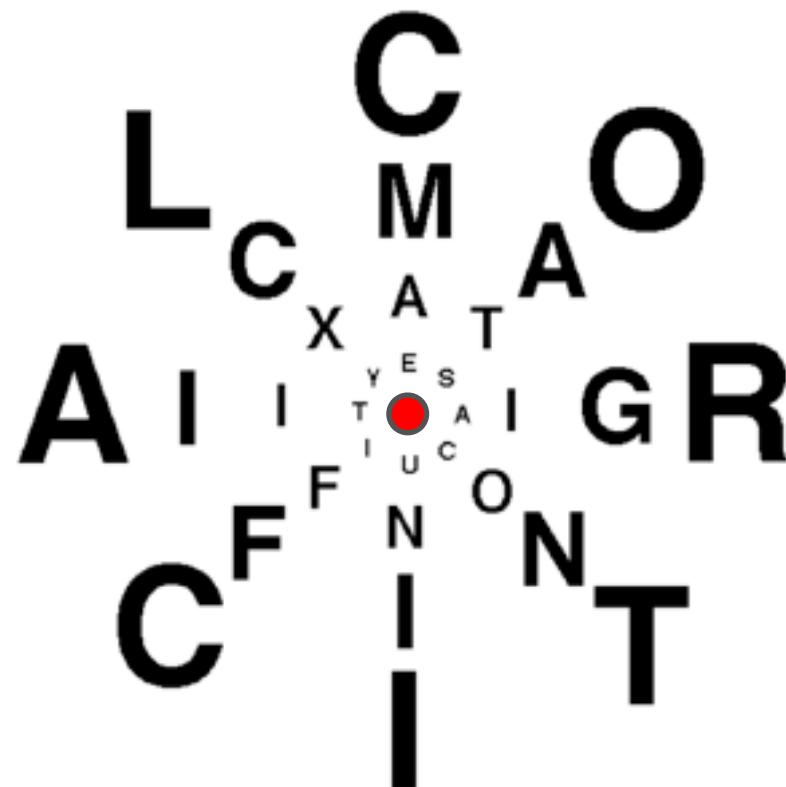
- Fähigkeit, scharf zu sehen, fällt mit Distanz der Projektion zur Fovea



# Fokus: Grafikdesign

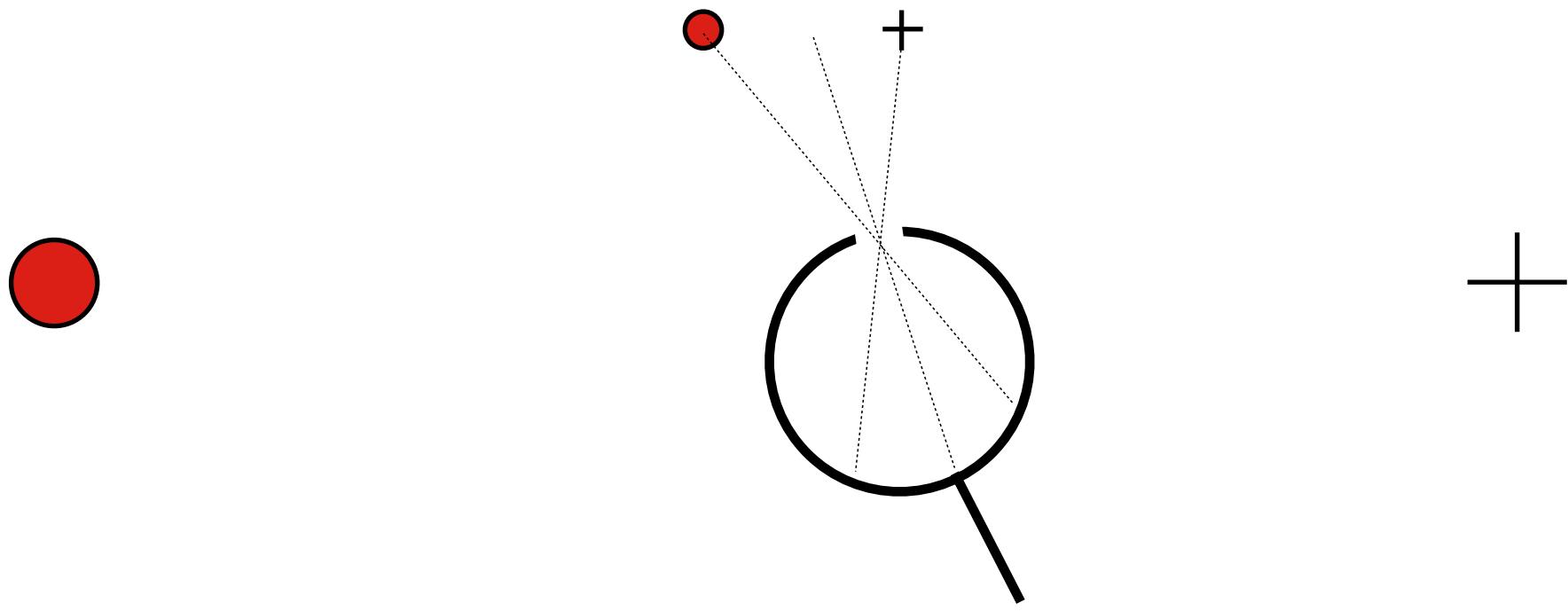
## Beispiel

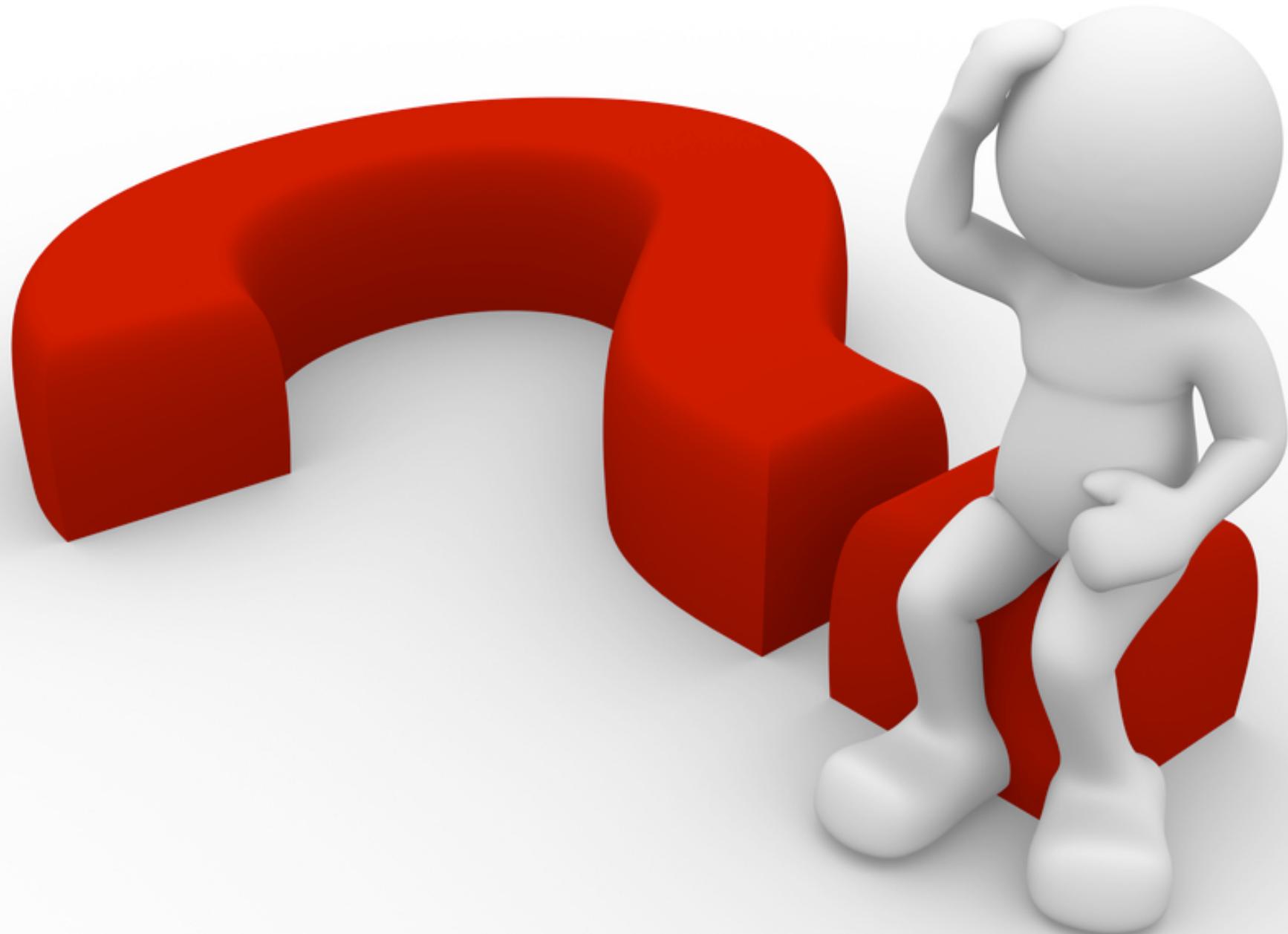
- Fähigkeit, scharf zu sehen, fällt mit Distanz der Projektion zur Fovea



# Demonstration

## Bsp: Blinder Fleck







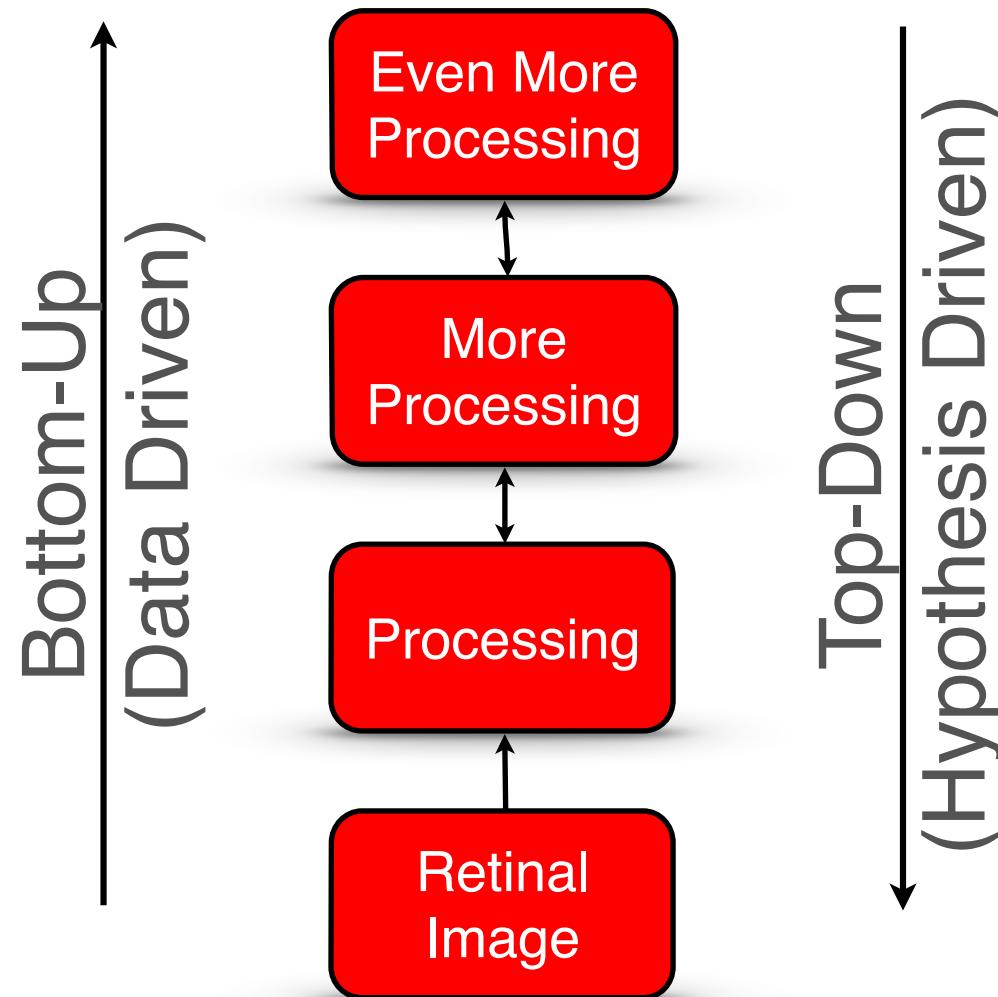
# Interaktive Computergrafik

## Kapitel Visuelle Wahrnehmung

### Visuelle Objekterkennung

# Visuelle Wahrnehmung

## Stufenmodell



# Visuelle Wahrnehmung

Bsp: Top-Down processing



# Visuelle Wahrnehmung

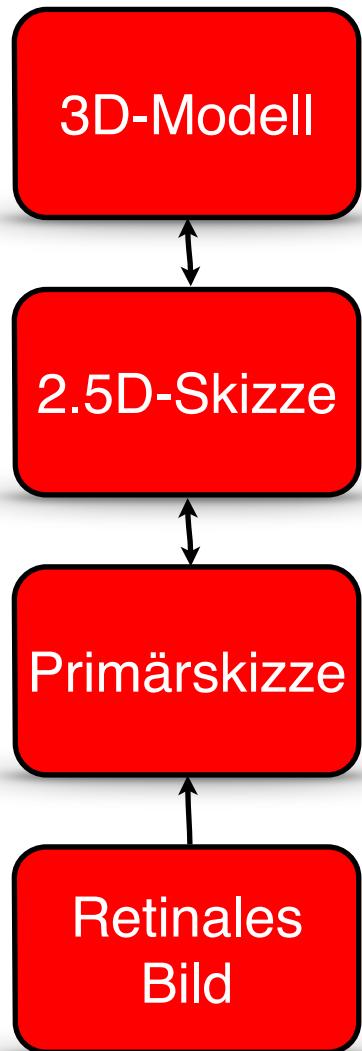
Bsp: Rat-Man



*B. Bugelski, D. Alampay: The role of frequency in developing preceptual sets,  
Canadian Journal of Psychology (15), 1961*

# Visuelle Wahrnehmung

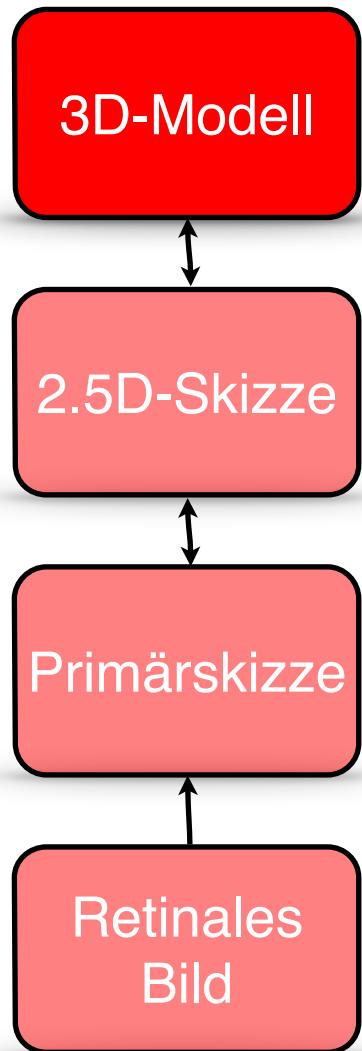
## Stufenmodell



D. Marr: Vision, 1982

# Visuelle Wahrnehmung

## Stufenmodell



D. Marr: Vision, 1982

# Diskussion



Welches Objekt wird hier dargestellt?





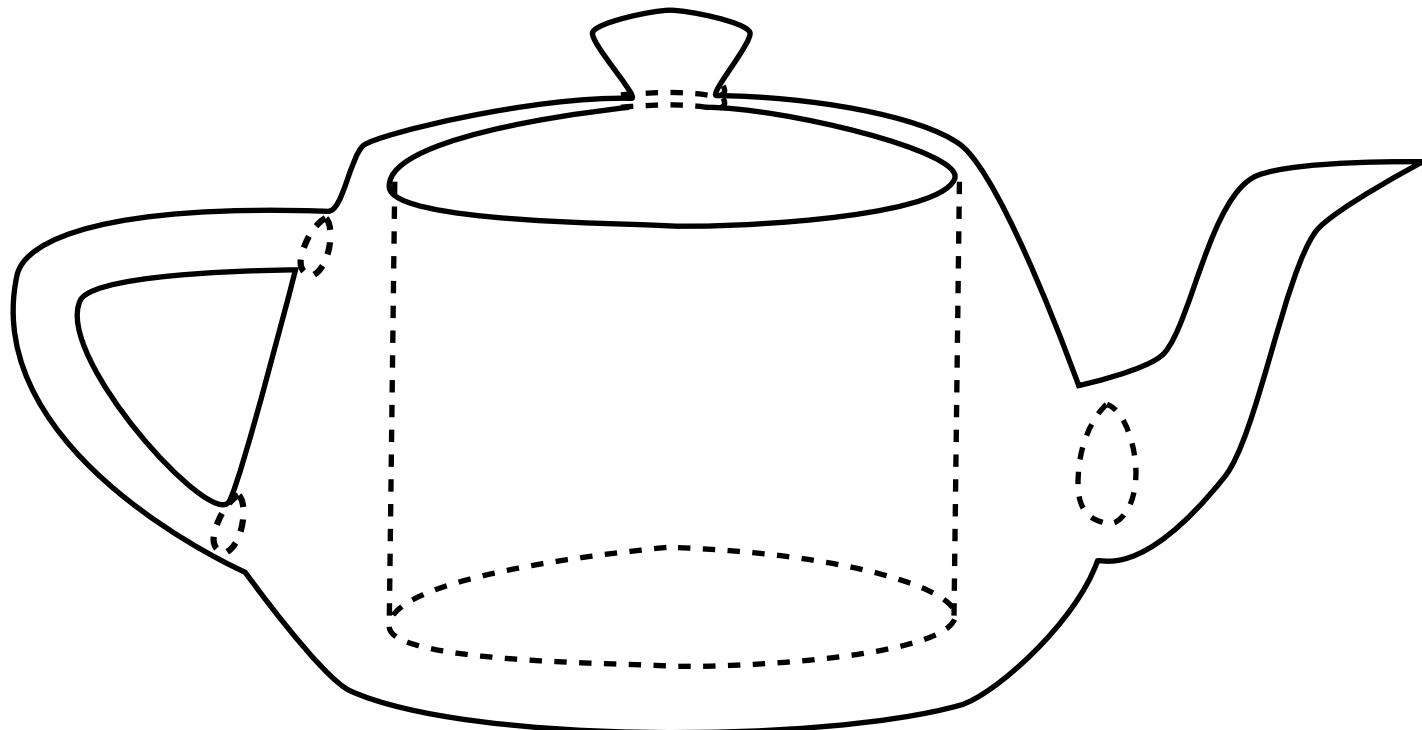
### The Utah Teapot, Melitta, Germany, ca. 1974

Martin Newell bought this teapot—later famous as a computer graphics model—in a Utah department store. The actual teapot is skinnier than many of its computerized images because the data was created for the rectangular pixels of early displays.



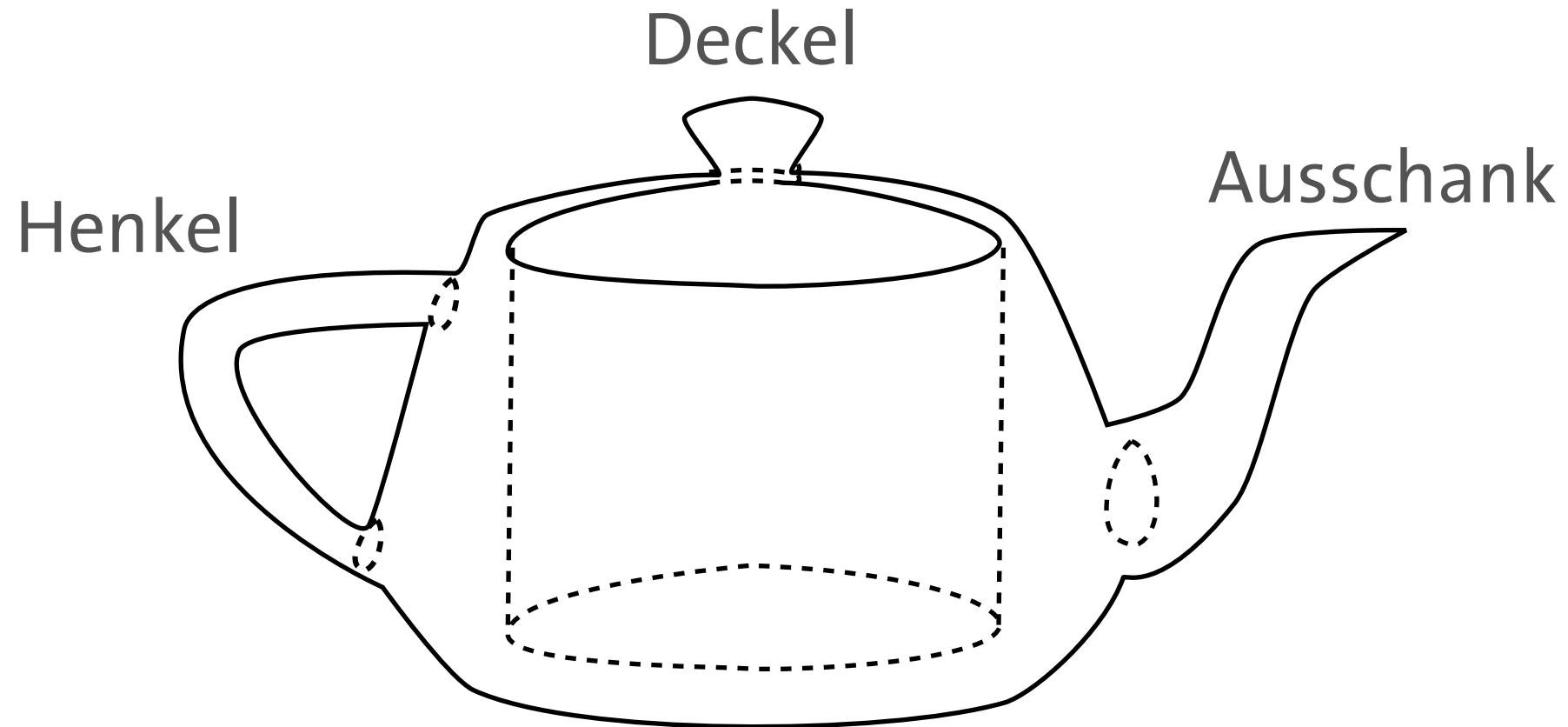
# Visuelle Wahrnehmung

## Bsp: Objekt Repräsentation



# Visuelle Wahrnehmung

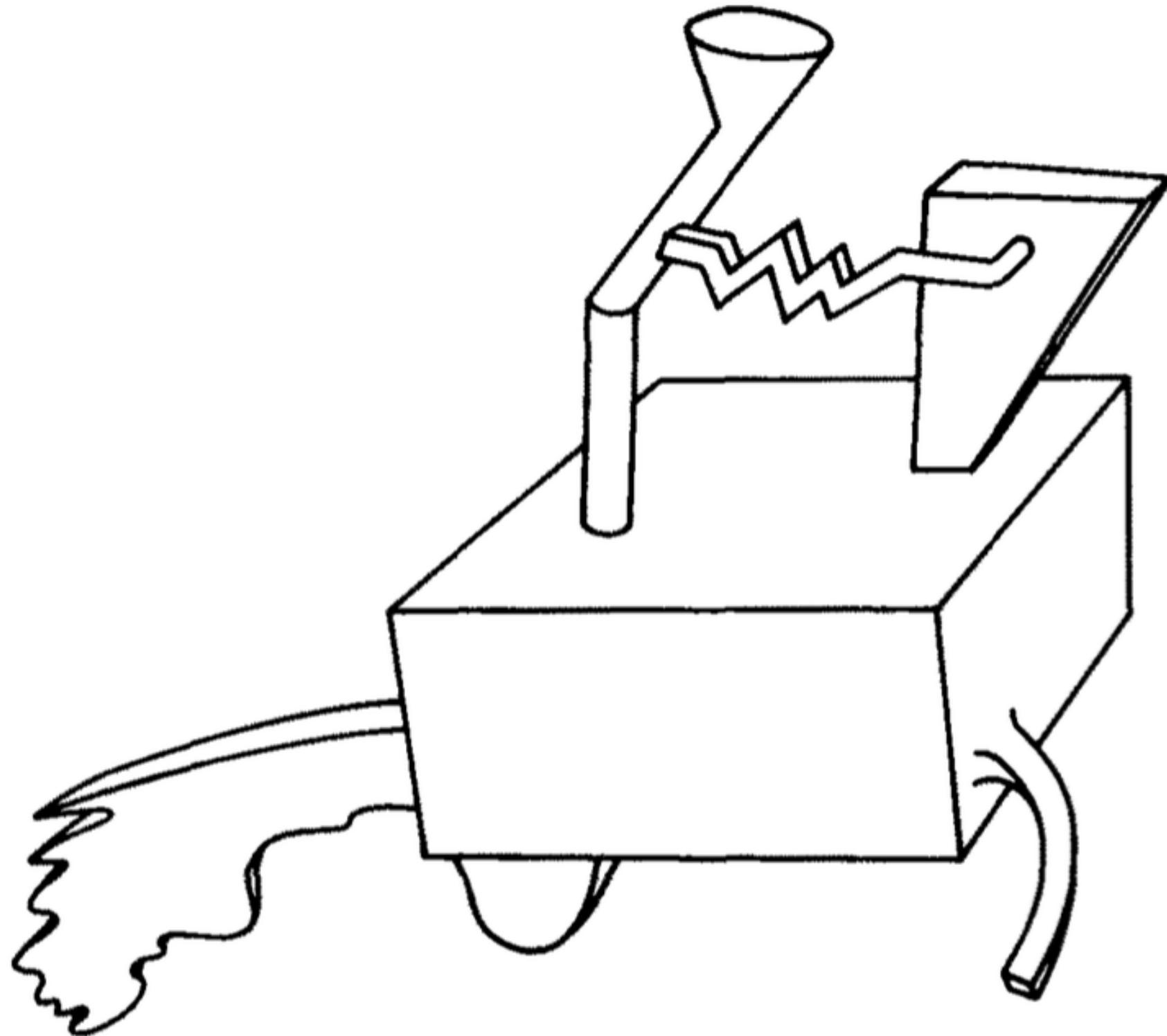
## Bsp: Objekt Repräsentation



# Diskussion



Welches Objekt wird hier dargestellt?



# Gesichtserkennung

- **Gesichtserkennung** unterscheidet sich signifikant von Objekterkennung
- **Gesichtserkennung** passiert in besonderer Spindelwindung (*Gyrus fusiformis*) in Großhirnrinde, die bei Defekt zur Gesichtsblindheit (**Prosopagnosie**) führen kann

# Gesichtserkennung

## Bsp: Thatcher Illusion



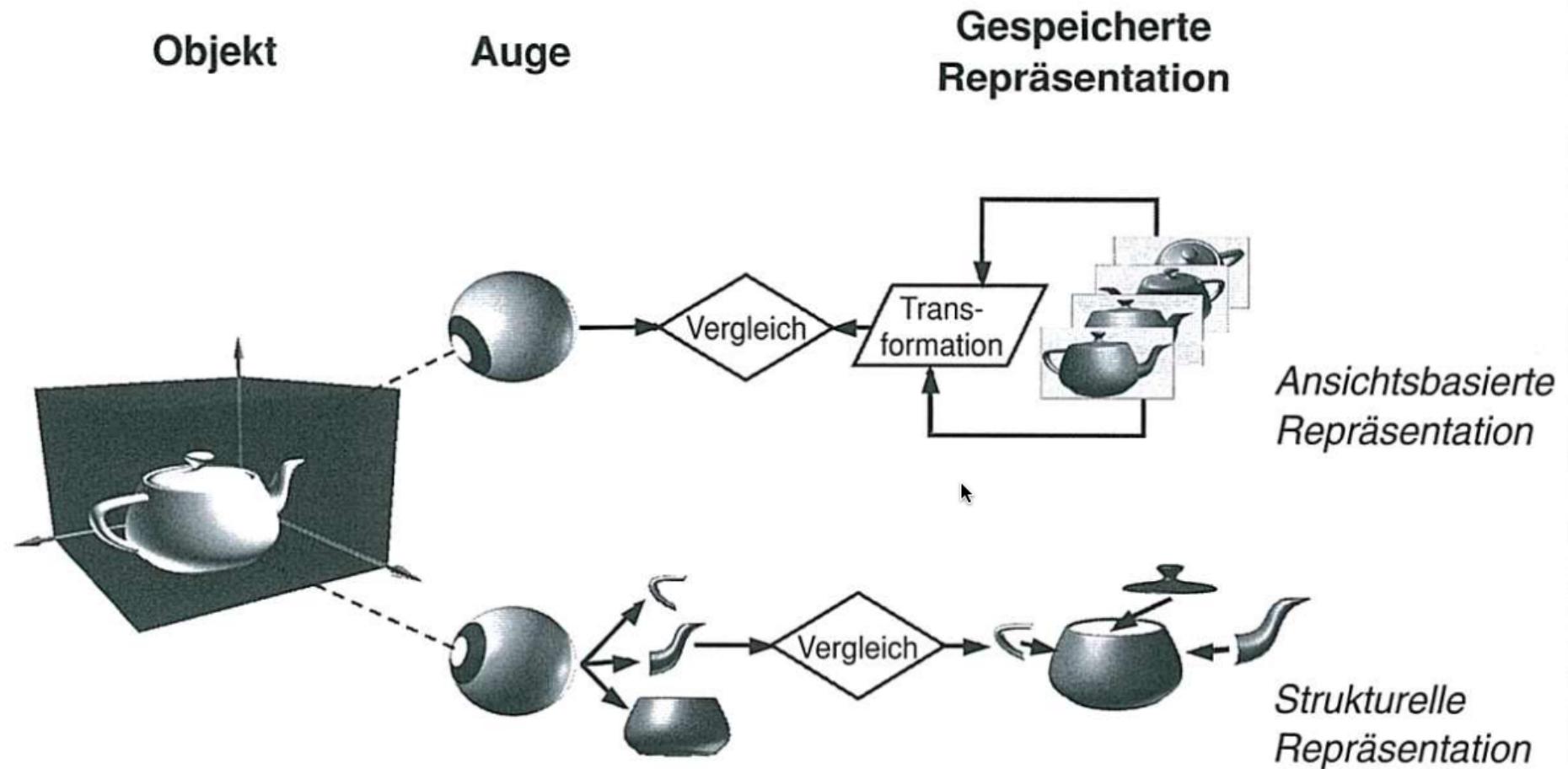
# Objekterkennung

## Erkennungsmodelle

- **Alternative Erkennungsmodelle** von 3D-Objekten im visuellen System:
  1. **Ansichtsbasierte Erkennungsmodelle** basieren auf interpolierten bildbasierten Repräsentationen
  2. **Strukturelle Erkennungsmodelle** beruhen auf strukturellen Beschreibungen von 3D-Objekten

# Objekterkennung

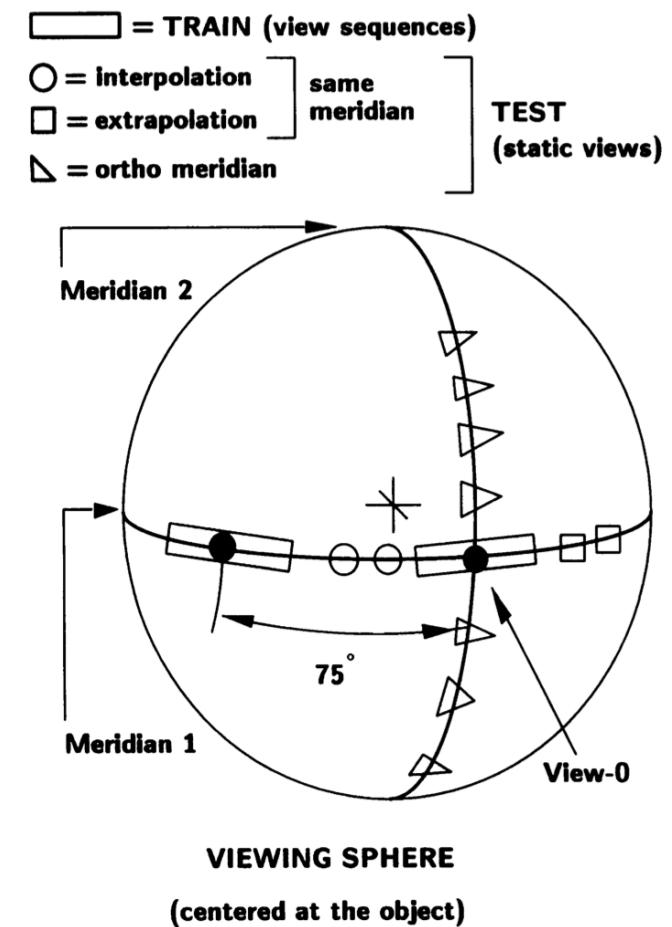
## Erkennungsmodelle



# Objekterkennung

## Ansichtsbasierte Modelle

- Ansichtsbasierte Erkennungsmodelle gehen davon aus, dass mehrere Ansichten von Objekte abgespeichert wurden
- Erkennung auf Basis von Linearkombinationen, Inter- und Extrapolation



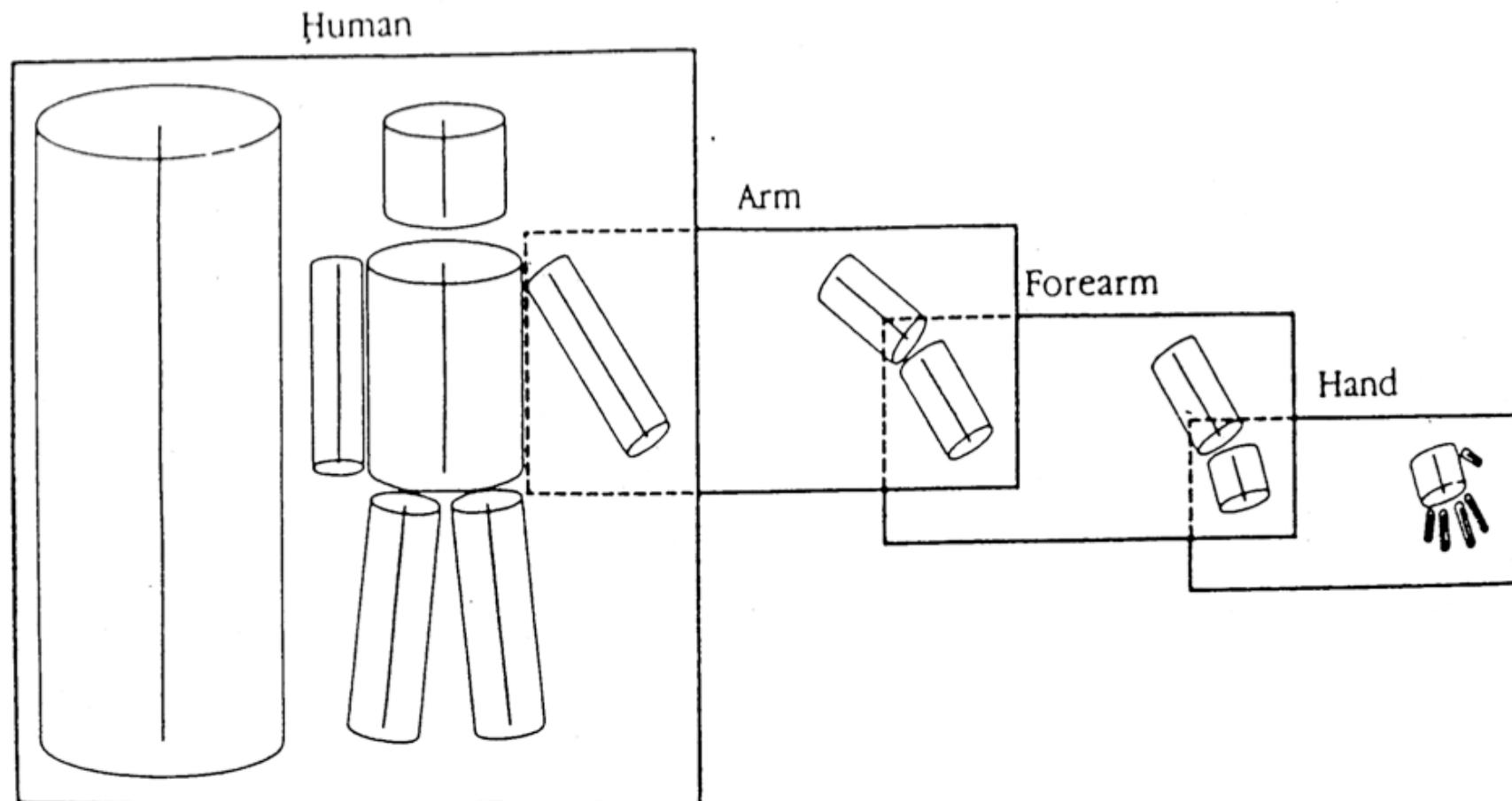
# Objekterkennung

## Strukturelle Modelle

- **Strukturelle Erkennungsmodelle** gehen davon aus, dass Objekte als zusammengesetzte Strukturen wahrgenommen werden
- Zerlegung in Einzelstrukturen
- Bewertung der Zusammensetzung

# Objekterkennung

Bsp: Generalisierte Zylinder



# Objekterkennung

## Geonen-Theorie

- Objekte setzen sich durch Kombination aus geringer Anzahl von geometrischen Primitiven (**Geone**) zusammen
- **Geone** zeichnen sich durch Projektionsinvarianz / Stabilität aus, d.h. durch **invariante** (engl. *non-accidental*) **Eigenschaften**

# Objekterkennung

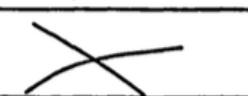
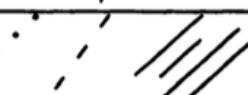
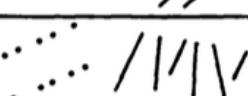
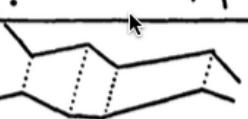
## Invariante Eigenschaften



I. Biederman: Recognition-by-components: a theory of human image understanding.  
Psychological Review; 94(2):115-47, 1987

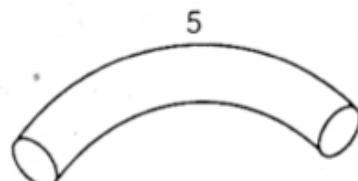
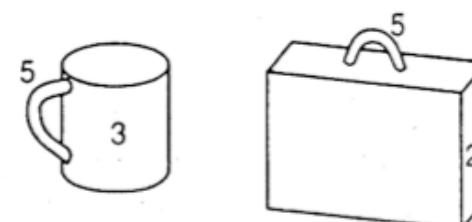
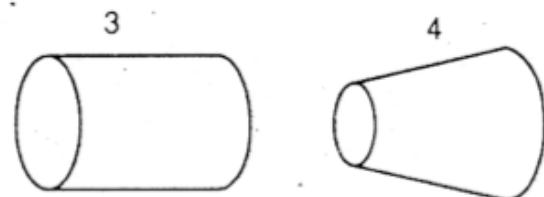
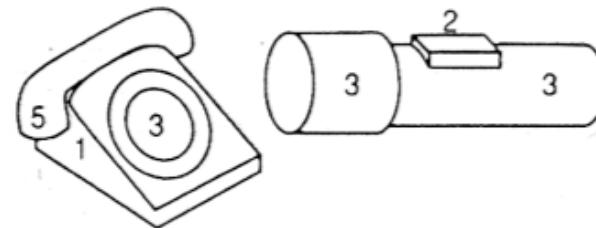
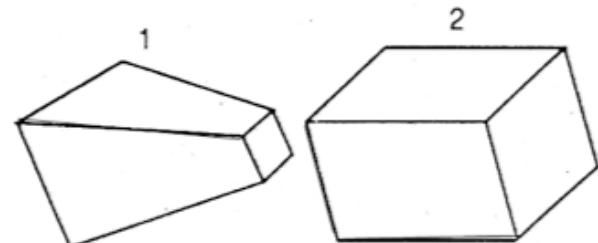
# Objekterkennung

## Invariante Eigenschaften

2-D relation	3-D inference	Examples
1. Collinearity of points or line segments	Collinearity in three-space	
2. Curvilinearity of points or arcs	Curvilinearity in three-space	
3. Two or more terminations at a common point	Curves terminate at a common point in three-space	
4. Termination at a continuous curve	Terminating curve is no closer to the camera than the continuous curve	
5. Crossing of continuous curves	Both curves cannot be occluding geometric edges	
6. Parallel curves	Curves are parallel in three-space	
7. Three or more lines converge to a common point	Lines are parallel (seen in perspective) or converge to a common point in three-space	
8. Equal spacing of collinear points or parallel lines	Equal spacing in three-space and parallel lines are coplanar	
9. Relations hold between terminations or virtual lines	Same relation holds between virtual features in three-space	
10. Virtual lines between tangent discontinuities in curves converge to an illumination convergence point	Curves correspond to geometric edges and their cast shadow boundaries	

# Objekterkennung

Bsp: Von Geonen zu Objekten

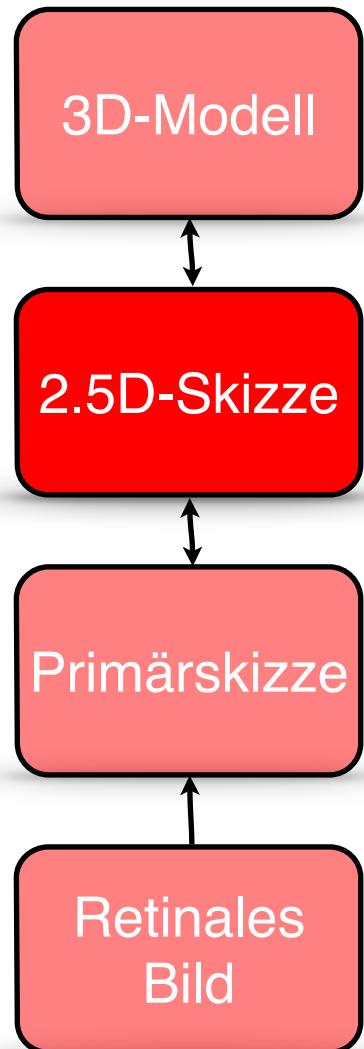


Geone

Objekte

# Visuelle Wahrnehmung

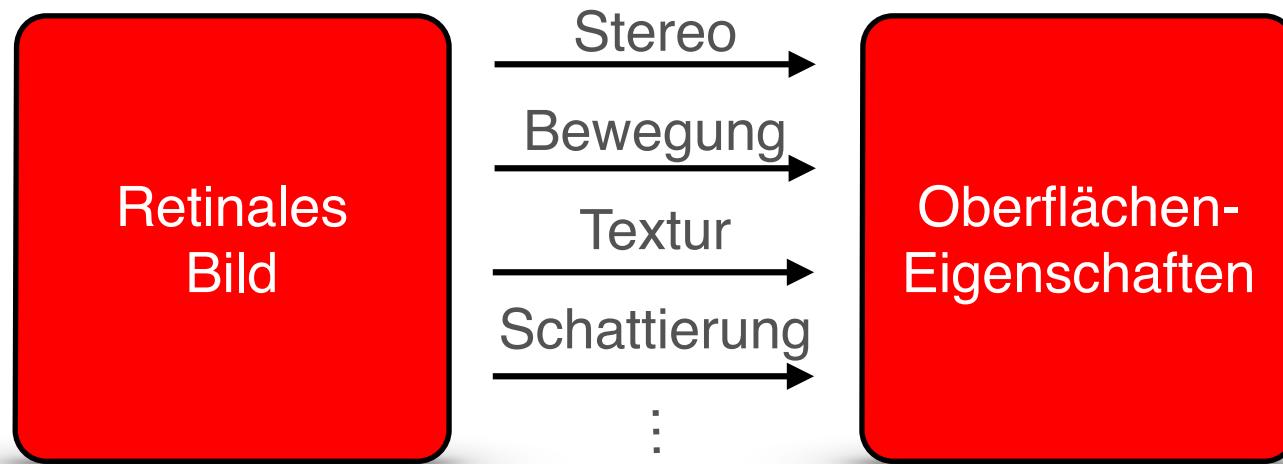
## Stufenmodell



D. Marr: Vision, 1982

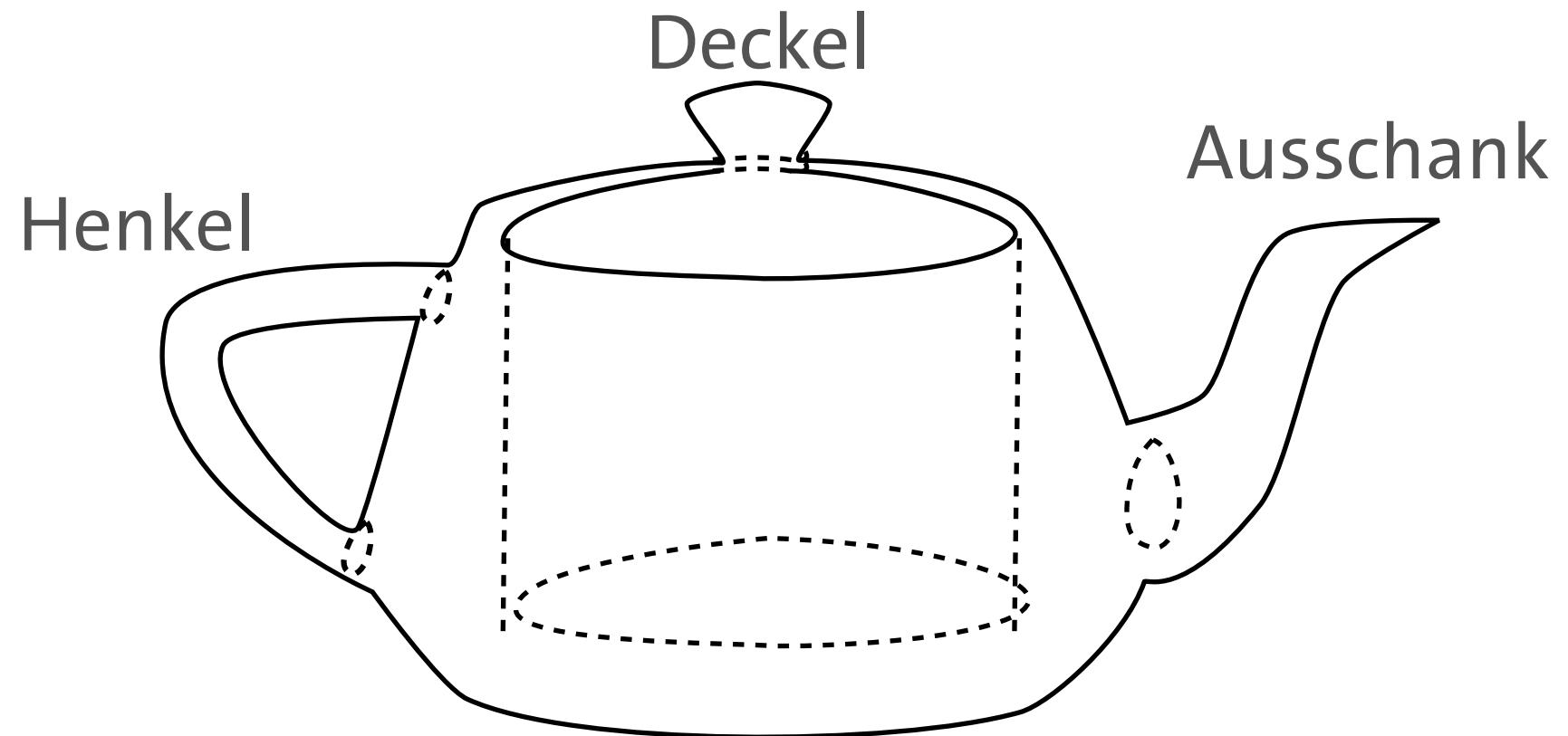
# 2D zu 2.5D

- Generierung von Oberflächen-Eigenschaften aus der skizzenhaften Repräsentation des retinalen Bildes



# Visuelle Wahrnehmung

## Bsp: Objekt Repräsentation



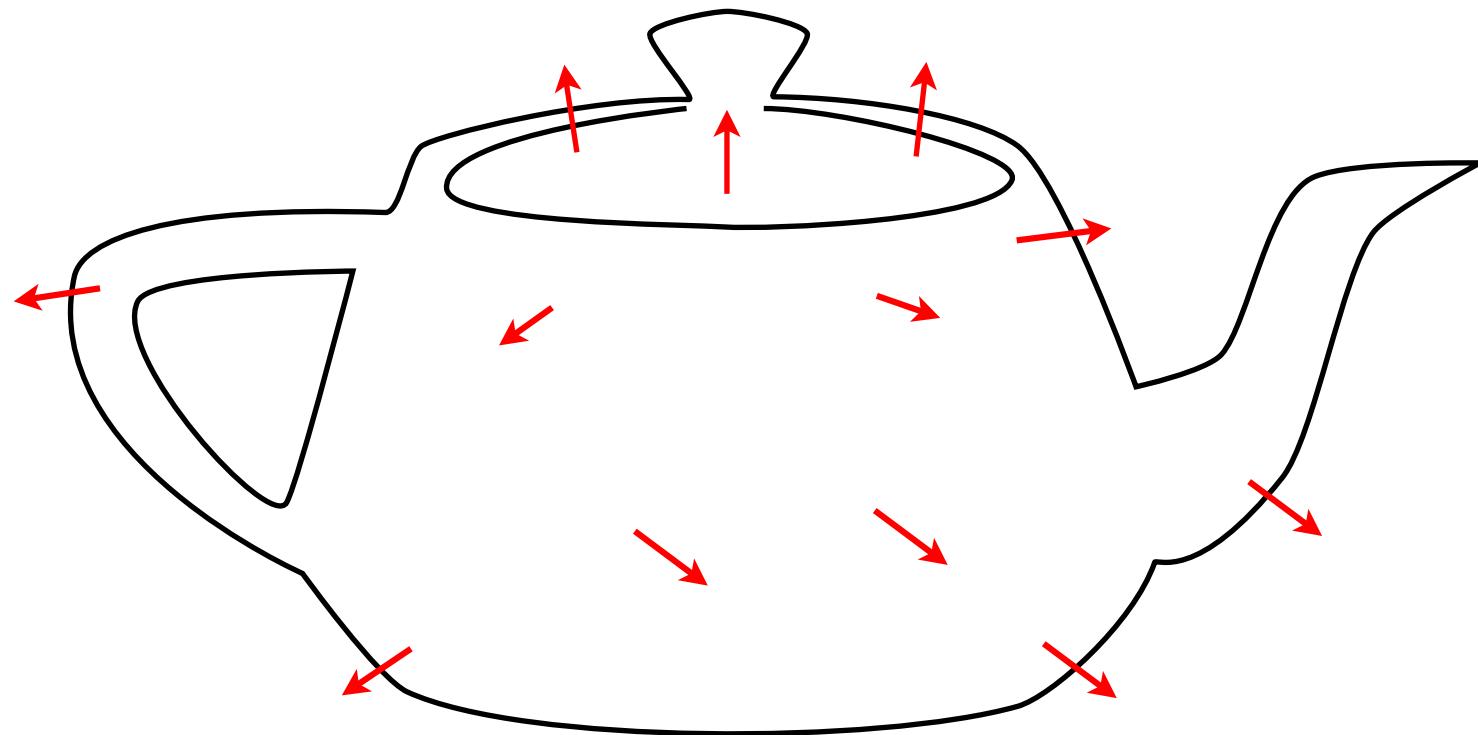
# Visuelle Wahrnehmung

## 2.5D-Skizze

- Verarbeitung globaler Flächen aus skizzenhafter Repräsentation resultiert in **orientierten Oberflächen mit Richtungszuweisungen**
- Ergebnis ist vom Blickwinkel des Beobachters unabhängige **2.5D-Skizze**

# Visuelle Wahrnehmung

## Bsp: 2.5D-Skizze



# Tiefenhinweise

## Basisdilemma

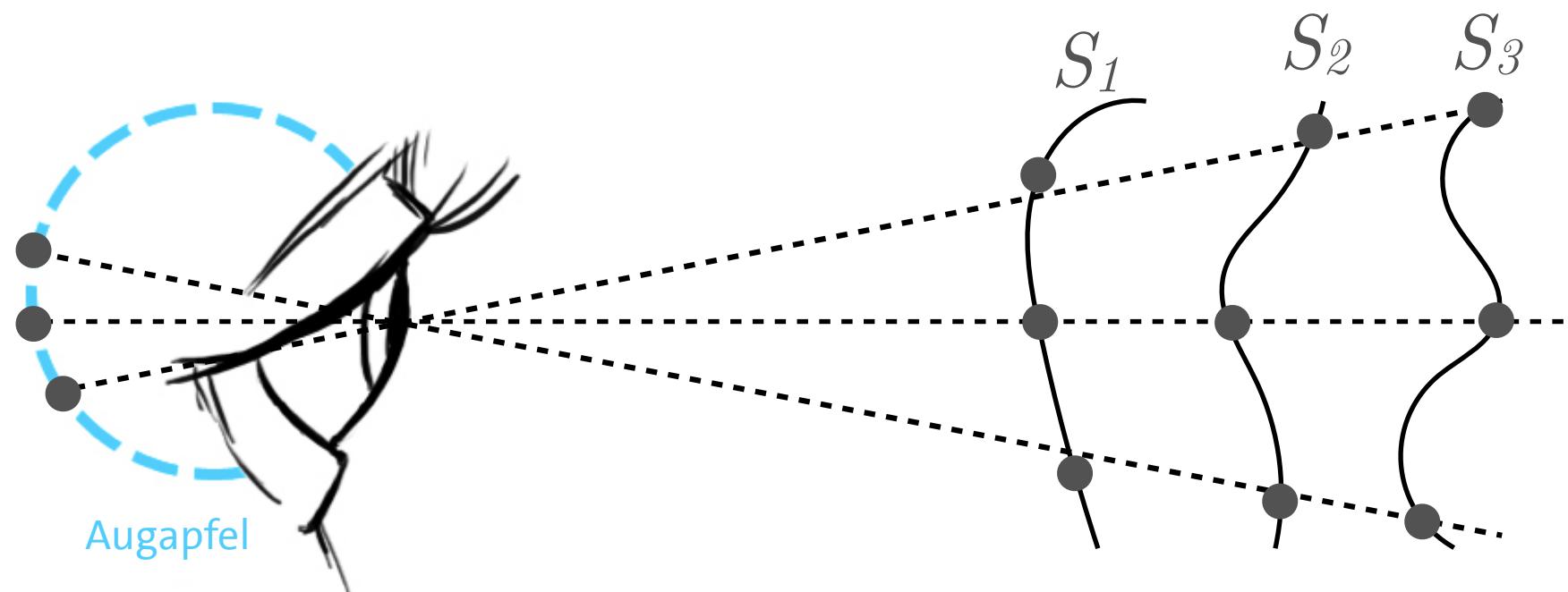
- Beide Punkte  $P_1$  und  $P_2$  werden auf denselben Punkt der Retina projiziert



# Tiefenhinweise

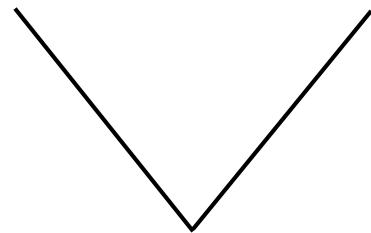
## Basisdilemma

- Oberflächen  $S_1$ ,  $S_2$  und  $S_3$  werden auf denselben Bereich der Retina projiziert

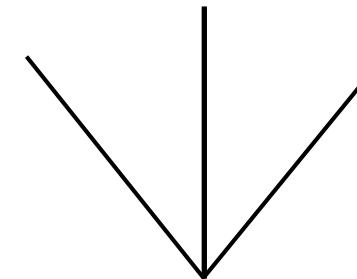


# Kanteninterpretation

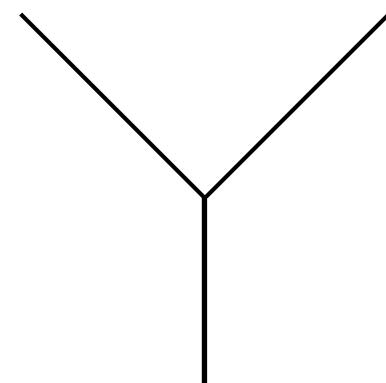
## Beispiel: Trihedrale Flächen



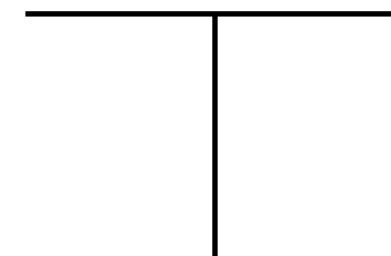
L- Vertex



Arrow-Vertex



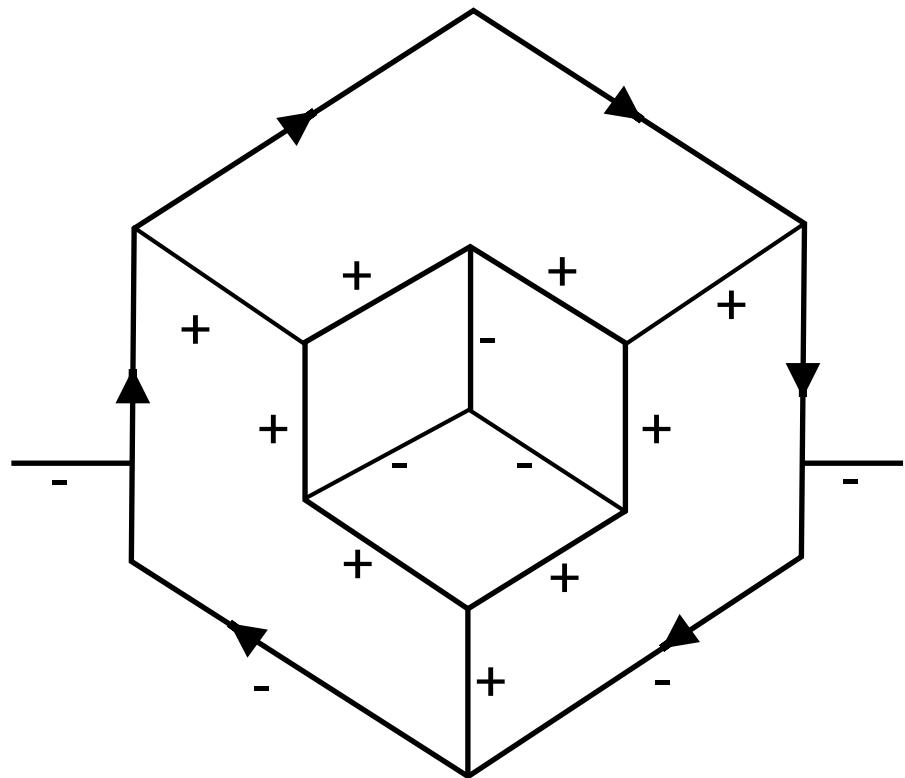
Y-Vertex



T-Vertex

# Kanteninterpretation

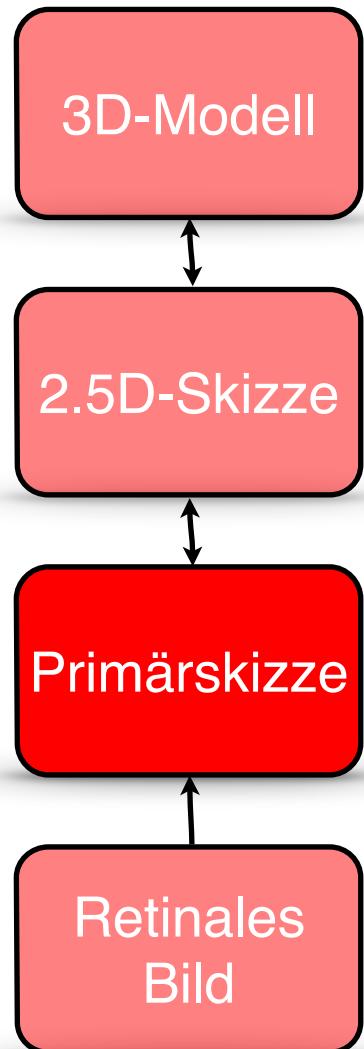
## Beispiel



- **konvexe Orientierungskanten:** +
- **konkave Orientierungskanten:** -
- **Tiefenkanten (Pfeile):**  
nähere verdeckende Oberfläche ist auf rechter Seite der Kante

# Visuelle Wahrnehmung

## Stufenmodell



D. Marr: Vision, 1982

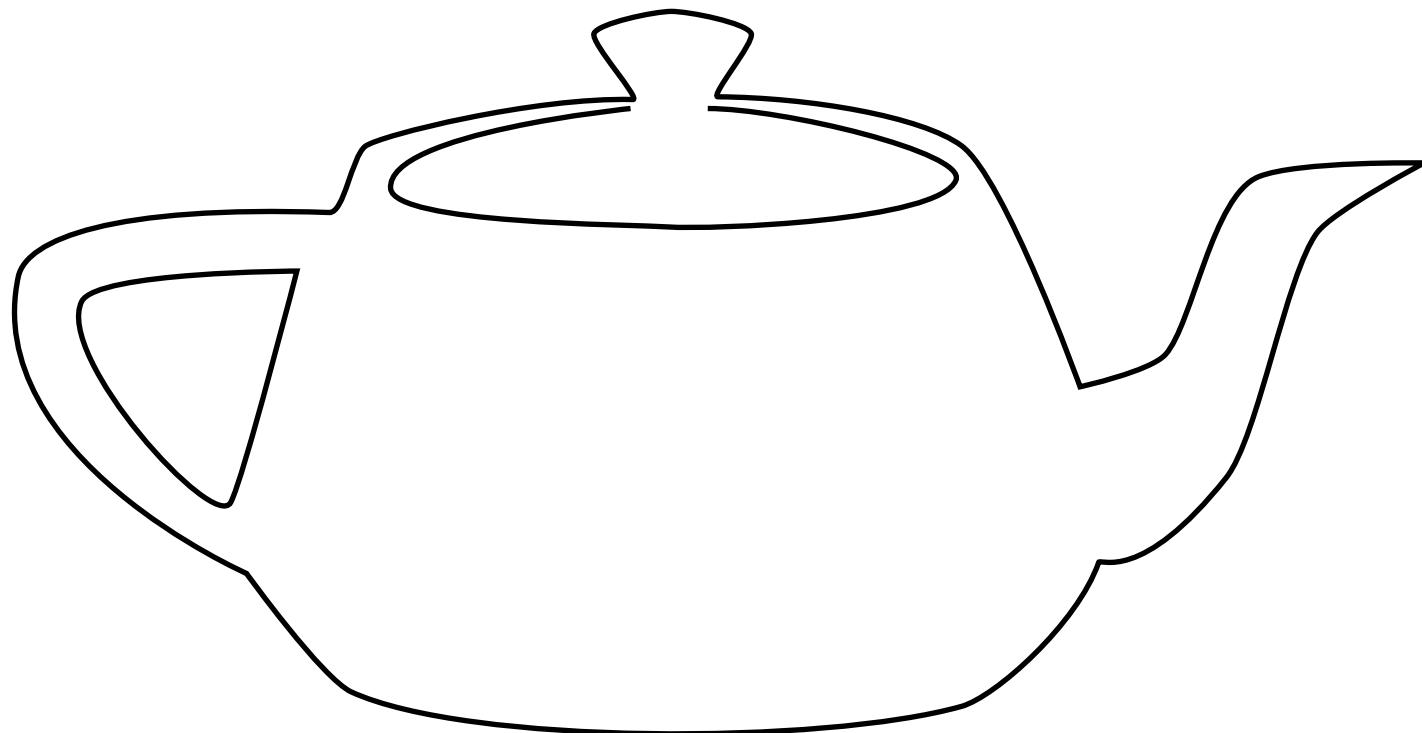
# Visuelle Wahrnehmung

## Primärskizzen

- Kontraste erlauben Extraktion von Kanten und Silhouetten, die zu zwei Arten von Primärskizze führen:
  1. **Rohe Primärskizze** (engl. *Raw Primal Sketch*)
  2. **(Volle) Primärskizze** (engl. *Full Primal Sketch*)

# Visuelle Wahrnehmung

Bsp: (Volle) Primärskizze

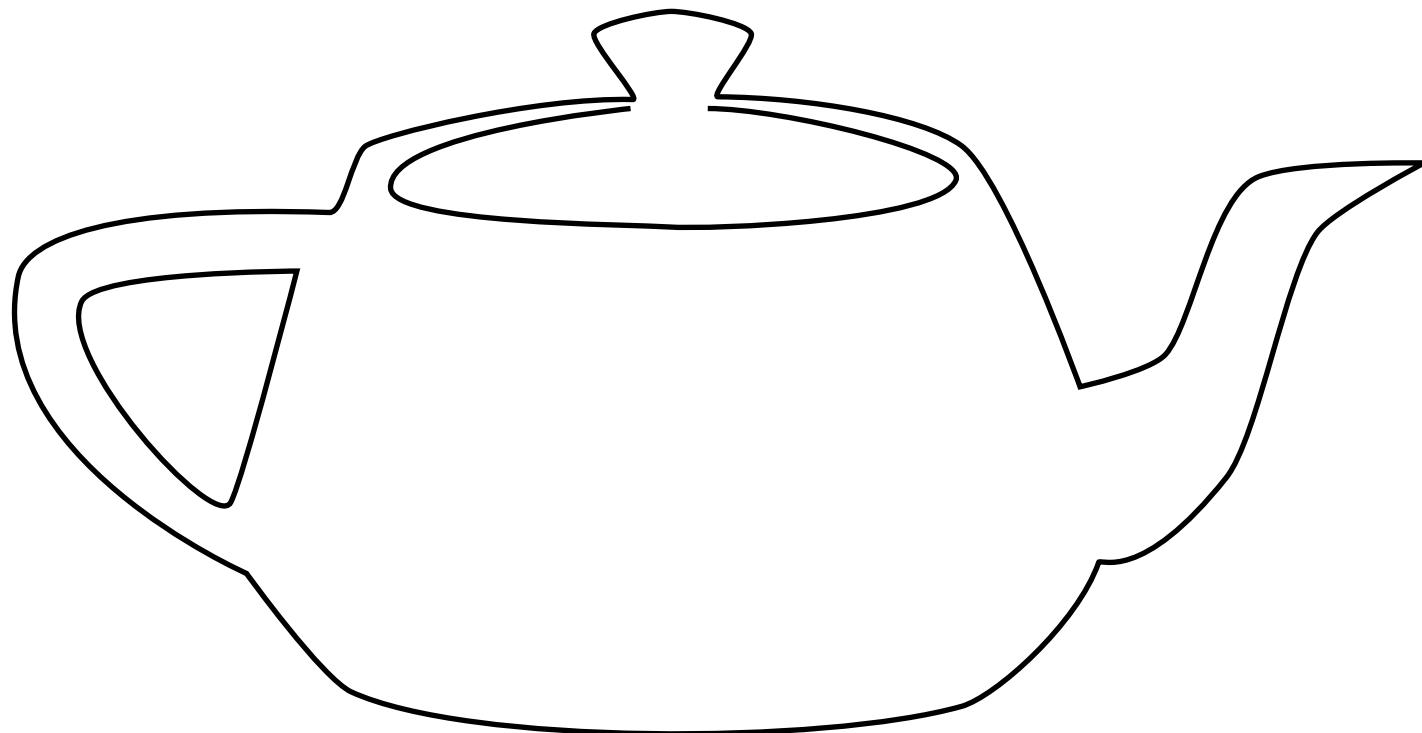


# Primärskizze

- Kanten können aus unterschiedlichen Helligkeitsgraden, Farben, Flecken und Linien extrahiert werden
- Beschreibung der Elementarmerkmale liegen allerdings zunächst noch in ungeordneter Form vor, d.h. **rohe Primärskizze**

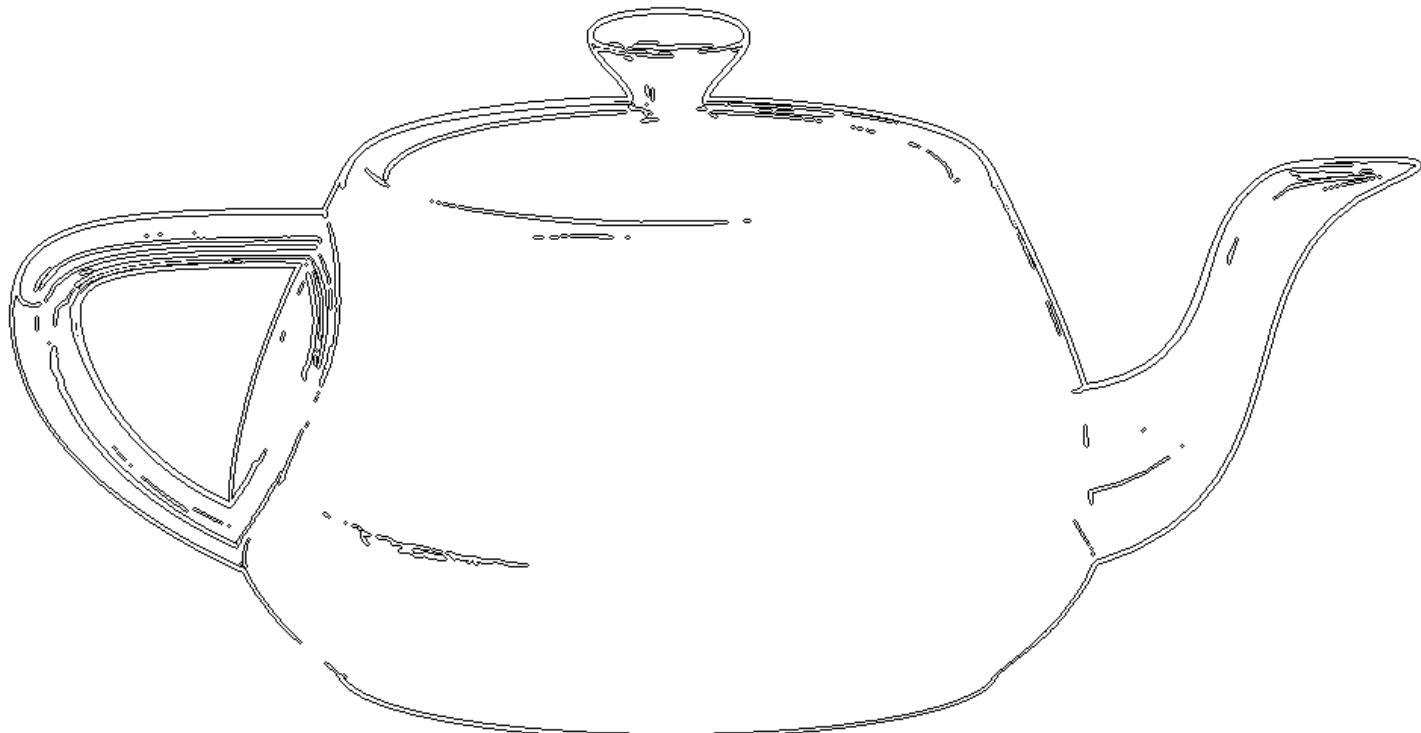
# Visuelle Wahrnehmung

Bsp: Primärskizze



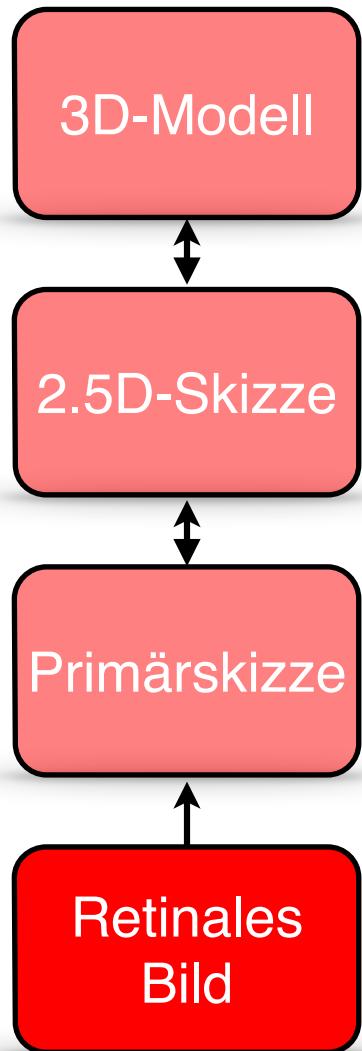
# Visuelle Wahrnehmung

## Bsp: Rohe Primärskizze



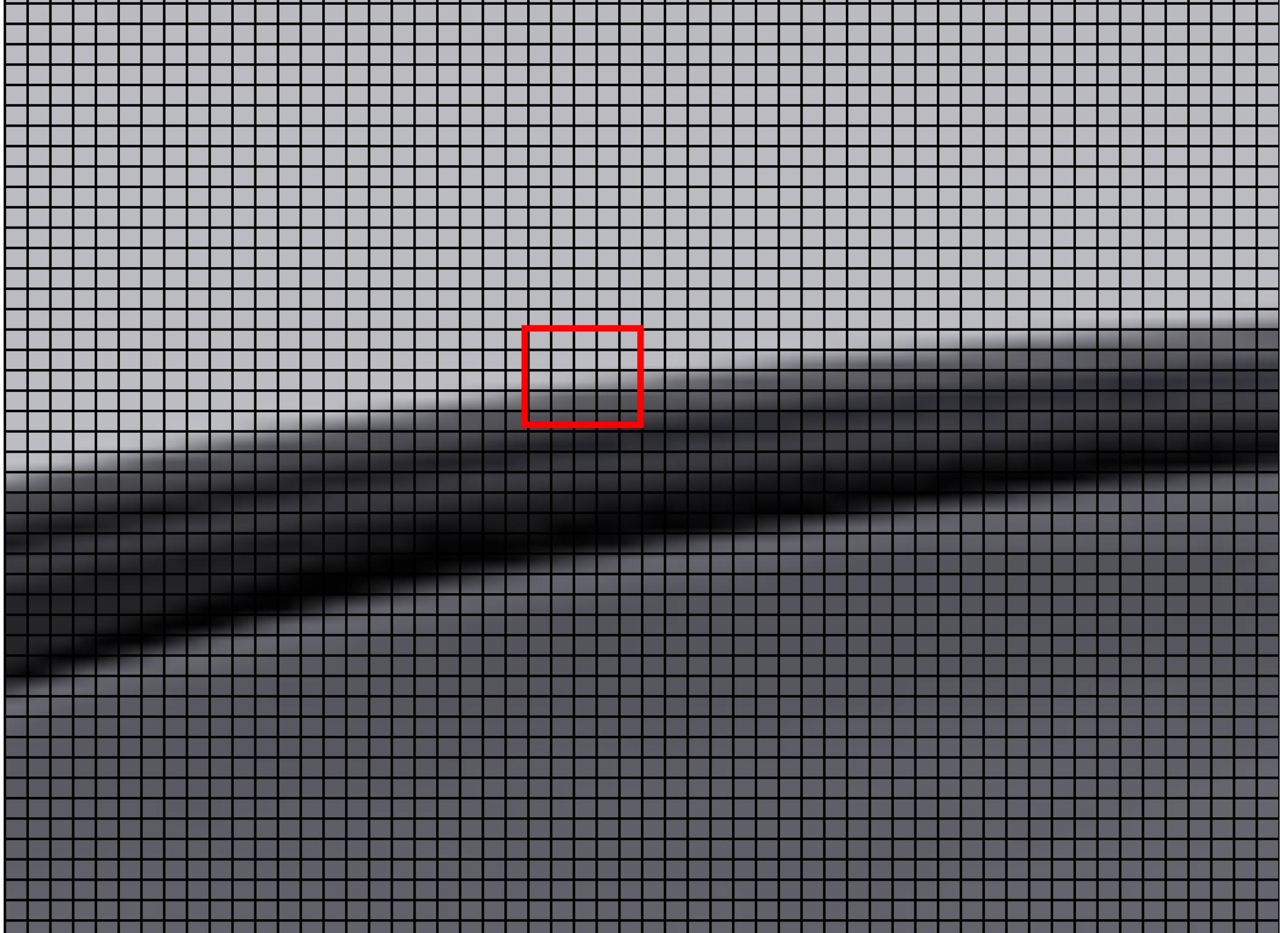
# Visuelle Wahrnehmung

## Stufenmodell



D. Marr: Vision, 1982







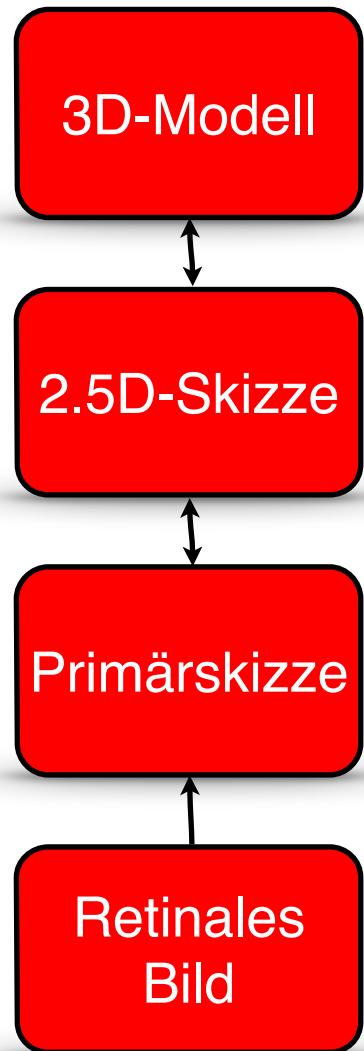
# Visuelle Wahrnehmung

## Retinales Bild

- Visuelle Merkmale, die in getrennten Gehirnarealen parallel verarbeitet werden:
  - Form, Farbe und Größe
  - Richtung und Krümmung
  - Geschlossenheit
  - Bewegung
  - ...

# Visuelle Wahrnehmung

## Stufenmodell



D. Marr: Vision, 1982

