

**Achtung:** Dieses Dokument ist *nur* eine Mitschrift der Vorlesung "Computergrafik" SoSe2010. Sie wurde während der Vorlesung angefertigt. Es wird aber seitens des Autors keine Garantie auf Vollständigkeit und Richtigkeit des Inhalts gegeben.

## **Mitschrift**

### **Computergrafik**

gehalten von Prof. Dr. Günther Rote

21. Mai 2010



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>5</b>
1.1	Organisatorisches . . . . .	5
1.1.1	Übungsblätter: . . . . .	5
1.1.2	Programmierung . . . . .	5
1.2	Übersicht . . . . .	5
1.2.1	Fahrplan . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Koordinatensysteme, geometrische Transformationen</b>	<b>7</b>
2.1	kartesische Koordinaten . . . . .	7
2.2	Geometrische Transformationen . . . . .	7
2.3	Homogene Koordinaten . . . . .	8
2.3.1	Allgemeine affine Transformation in homogenen Koordinaten . . . . .	9
2.4	Die projektive Ebene . . . . .	9
2.4.1	Geraden in der projektiven Ebene . . . . .	9
2.4.2	Modelle der projektiven Ebene . . . . .	11
2.4.3	Projektive Punkte zu kartesischen Koordinaten . . . . .	12
2.5	Allgemeine projektive Transformationen . . . . .	13
2.6	Transformation im dreidimensionalen Raum . . . . .	15
2.6.1	Affine Transformation im dreidimensionalen Raum . . . . .	15
2.6.2	projektive Transformationen im dreidimensionalen Raum . . . . .	16
2.7	Projektionen und Perspektive . . . . .	16
2.8	Koordinaten in der Praxis . . . . .	17
2.9	„rendering pipeline“ – vom geometrischen Modell zum Rasterbild . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Licht und Farben</b>	<b>23</b>
3.1	Farbsehen im menschlichen Auge . . . . .	23
<b>4</b>	<b>Rasterung von Strecken und Kreisen</b>	<b>25</b>
4.1	Strecken . . . . .	25
4.1.1	Bresenham-Algorithmus . . . . .	27
4.1.2	Midpoint Line Algorithmus . . . . .	28
4.2	Kreise . . . . .	29
4.3	Schwachstellen der Rasterung (Aliasing) . . . . .	32
4.4	Antialiasing . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Helligkeit und Farbe in der Computergrafik</b>	<b>35</b>
5.1	Helligkeit . . . . .	35
5.2	Additive Farbsysteme . . . . .	35
5.2.1	Das RGB-Farbsystem . . . . .	35
5.2.2	Farbsechseck bzw. Farbkreis . . . . .	37
5.2.3	Andere Farbsysteme . . . . .	37
5.2.4	YCrCb/YPrPb-Farbsystem . . . . .	40
5.3	Subtraktive Farbmischung (z. B. beim Drucken) . . . . .	40
5.3.1	CMY-System . . . . .	41
5.3.2	CMYK-System (Vierfarbdruck) . . . . .	41
5.4	Digitale Farbdarstellung . . . . .	41
5.4.1	Farbpaletten . . . . .	41
<b>6</b>	<b>Beleuchtung</b>	<b>43</b>
6.1	Diffuse Reflexion . . . . .	43
6.2	Spiegelnde Reflexion . . . . .	45
6.3	Gesamtbeleuchtung . . . . .	46
6.4	Schattierung (Shading) . . . . .	46
6.4.1	Ausfüllen einer gerasterten Fläche . . . . .	47

6.5	Entfernen verdeckter und teilweise verdeckter Flächen . . . . .	48
6.5.1	Painter's Algorithmus . . . . .	48
6.5.2	Tiefenpuffer (z-Puffer) . . . . .	49





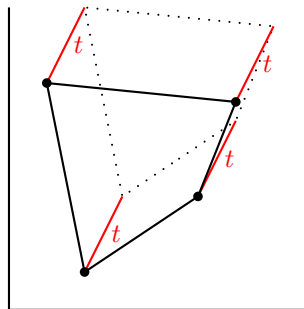
## 2 Koordinatensysteme, geometrische Transformationen

### 2.1 kartesische Koordinaten



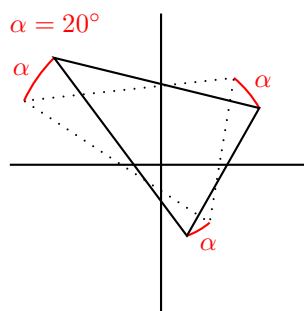
### 2.2 Geometrische Transformationen

- *Translation*:  $p \mapsto p + t$       $t \in \mathbb{R}^2$ , Translationsvektor



- *Rotation* (um den Ursprung  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ ):

$$p \mapsto M \cdot p \quad M = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}, \text{ Rotationsmatrix}$$



- *Rotation* um den Punkt  $c$ :  $p \mapsto M(p - c) + c = Mp + (c - Mc)$ ,      $c \mapsto c$
- *gleichförmige Skalierung*:

$$p \mapsto \lambda \cdot p = \begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix} \cdot p, \quad \lambda \neq 0$$

$$\lambda = 1 \quad p \mapsto -p = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \cdot p = \text{Spiegelung am Ursprung} = \text{Rotation um } 180^\circ$$

- *Ungleichförmige Skalierung*:

$$M = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} \quad p \mapsto M \cdot p$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 x \\ \lambda_2 y \end{pmatrix}$$

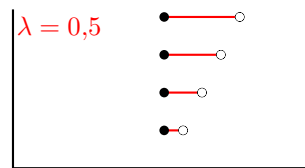
$M = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$  resultiert in der Spiegelung an der  $x$ -Achse

$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$  resultiert in der Spiegelung an der  $y$ -Achse

- *Scherung*

$$M = \begin{matrix} \text{Scherung auf der } x\text{-Achse} \\ \begin{pmatrix} 1 & \lambda \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \left( \text{oder} \begin{matrix} \text{Scherung auf der } y\text{-Achse} \\ \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \lambda & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \right)$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} 1 & \lambda \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x + \lambda y \\ y \end{pmatrix}$$



Flächeninhalt:

- Translationen, Rotationen, Scherungen und Spiegelungen ändern den Flächeninhalt nicht.
- Skalierung ändert den Flächeninhalt um den Faktor  $\lambda_1 \cdot \lambda_2$

**Definition** Eine Verknüpfung mehrerer dieser Transformationen bildet eine **affine Transformation**. Allgemein ist diese:

$$p \mapsto M \cdot p = b, \quad M \in \mathbb{R}^{2 \times 2}, b \in \mathbb{R}^2, \det M \neq 0$$

Der Flächeninhalt ändert sich um den Faktor  $\det M$

**Definition** Die Verknüpfung von Translation, Rotation und Spiegelung heißt **starre Bewegung** oder **Isometrie**. Allgemein ist diese:

$$p \mapsto Mp + t \text{ mit } \textbf{orthogonaler Matrix } M \text{ (d. h. } \det M = \pm 1)$$

die Isometrien zerfallen:

- **orientierungserhaltende** ( $\det M = 1$ ) und
- **orientierungsumkehrende** ( $\det M = -1$ ) Isometrien

## 2.3 Homogene Koordinaten

**Definition** **Homogene Koordinaten:** Statt  $p = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$  verwendet man eine dritte Koordinate  $p = \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}$

**Konvention** Die Koordinaten  $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$  und  $\begin{pmatrix} \lambda x \\ \lambda y \\ \lambda z \end{pmatrix}$  stellen denselben Punkt dar ( $\lambda \neq 0$ )

Der Punkt  $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$  mit  $z \neq 0$  hat die kartesischen Koordinaten  $\begin{pmatrix} \frac{x}{z} \\ \frac{y}{z} \end{pmatrix}$



### 2.3.1 Allgemeine affine Transformation in homogenen Koordinaten

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \mapsto \underbrace{\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & b_1 \\ m_{21} & m_{22} & b_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{M'} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} m_{11}x + m_{12}y + b_1 \\ m_{21}x + m_{22}y + b_2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Die Matrizen  $M'$  und  $\lambda M'$  beschreiben dieselbe Transformation ( $\lambda \neq 0$ )

$$p \mapsto M'p \text{ mit } M' = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ 0 & 0 & m_{33} \end{pmatrix} \text{ und } \det M' \neq 0$$

$$\det M' \neq 0 \Leftrightarrow m_{33} \neq 0 \wedge \begin{vmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{vmatrix} \neq 0$$

$\Rightarrow$  o. B. d. A. kann man auch  $m_{33} = 1$  annehmen (Dann kann man die dritte Zeile auch weglassen).

## 2.4 Die projektive Ebene

**Definition** Die (reelle) **projektive Ebene**  $P^2$  besteht aus den Äquivalenzklassen von Punkten  $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \neq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ ,

wobei  $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$  und  $\begin{pmatrix} \lambda x \\ \lambda y \\ \lambda z \end{pmatrix}$  denselben Punkt darstellen ( $\lambda \neq 0$ )

### 2.4.1 Geraden in der projektiven Ebene

Gerade in  $\mathbb{R}^2$  (kartesische Koordinaten):

$$y = ax + b \text{ (Gerade darf nicht senkrecht sein)}$$

$$ax + by = -c$$

$$\Updownarrow$$

Gerade in Homogenen Koordinaten

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$ax + by + c = 0 \Leftrightarrow \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = 0$$

Allgemeine Gleichung einer Geraden in  $P^2$

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = 0 \Leftrightarrow ax + by + cz = 0 \quad \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \neq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Wenn  $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$  die Gleichung erfüllt, dann erfüllt auch  $\begin{pmatrix} \lambda x \\ \lambda y \\ \lambda z \end{pmatrix}$  die Gleichung.  $\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}$  und  $\begin{pmatrix} \lambda a \\ \lambda b \\ \lambda c \end{pmatrix}$  stellen dieselbe Gerade dar.

**projektive Punkte**  $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \neq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$  Skalierung egal.

**projektive Gerade**  $\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \neq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$  Skalierung egal

**Satz** Punkt  $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$  liegt auf der Geraden  $\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}$ :

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = 0$$

**Satz** Zwei verschiedene Geraden schneiden sich in genau einem Punkt.

**Beweis** Gerade  $\forall \lambda : \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} a_2 \\ b_2 \\ c_2 \end{pmatrix} \neq \lambda \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{pmatrix}$ . Schnittpunkt:

$$a_1 x + b_1 y + c_1 z = 0$$

$$a_2 x + b_2 y + c_2 z = 0$$

Koeffizientenmatrix  $A = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \end{pmatrix}$ ,  $\text{rg } A = 2$

$\Rightarrow$  Lösungsmenge ist eindimensional

$$L = \left\{ \lambda \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} \mid \lambda \in \mathbb{R} \right\} \text{ ist ein projektiver Punkt}$$

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} \text{ kann als } \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a_2 \\ b_2 \\ c_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \begin{vmatrix} b_1 & b_2 \\ c_1 & c_2 \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} c_1 & c_2 \\ a_1 & a_2 \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{vmatrix} \end{pmatrix} \text{ berechnet werden (Kreuzprodukt)}$$



**Satz** Durch zwei verschiedene Punkte gibt es genau eine Geraden

**Beweis** gleich wie oben:  $\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}$  mit  $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$  vertauschen.

**Dualitätsprinzip** Man kann in einem Satz der projektiven Geometrie der Ebene „Punkte“ und „Geraden“ vertauschen und es bleibt ein gültiger Satz.

## 2.4.2 Modelle der projektiven Ebene

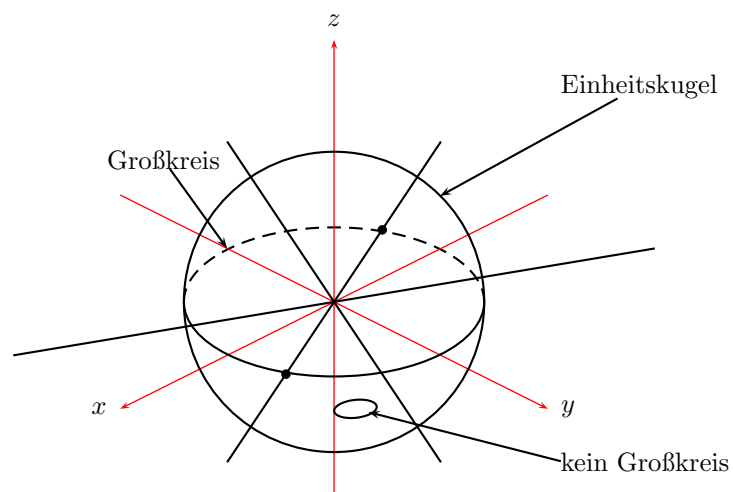
1. *Räumliches Modell der projektiven Ebene*  $\left\{ \lambda \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} \mid \lambda \in \mathbb{R} \right\} \dots$  Geraden durch den Ursprung im  $\mathbb{R}^3$  entsprechen den projektiven Punkten.



projektive Gerade  $\equiv$  Ebene durch den Ursprung

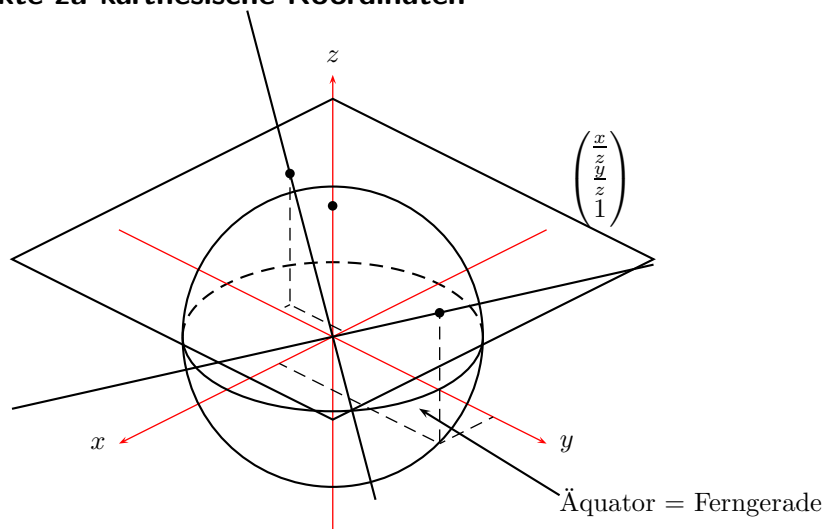
2. *Kugelmodell der projektiven Ebene* entsteht durch Schnitt des räumlichen Modells mit der Einheitskugel

$$S^2 = \left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \mid x^2 + y^2 + z^2 = 1 \right\}$$



projektiver Punkt  $\equiv$  Paar gegenüberliegender Punkte auf der Einheitskugel  
 projektive Gerade  $\equiv$  Großkreise

## 2.4.3 Projektive Punkte zu kartesischen Koordinaten



Schnitt der Geraden  $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \cdot \lambda$  im  $\mathbb{R}^3$  mit Ebene  $z = 1$ :  $z \cdot \lambda = 1 \Rightarrow \lambda = \frac{1}{z}$

$$\rightarrow \begin{pmatrix} x \cdot \frac{1}{z} \\ y \cdot \frac{1}{z} \\ 1 \end{pmatrix}$$

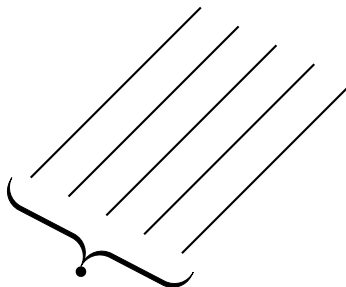
**Satz** Die Punkte  $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$  mit  $z = 0$  haben *keine* Entsprechung in der euklidischen Ebene: Jede projektive Gerade hat als Bild in der euklidischen Ebene eine Gerade, mit einer Ausnahme: die Gerade  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$

**Definition** Die Punkte des projektiven Raumes, die keine euklidische Entsprechung haben, heißen **Fernpunkte**. Die Gerade  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$  **Ferngerade**.

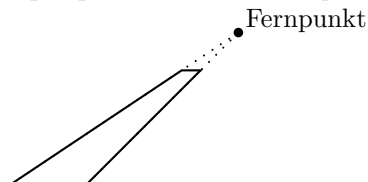
**Satz** Zwei Geraden der euklidischen Ebene sind genau dann *parallel*, wenn ihr Schnittpunkt ein Fernpunkt ist.

**Satz** Die Punkte, die auf der Ferngeraden liegen, sind genau die Fernpunkte

**Satz** Es gibt zu jeder Schaar paralleler Geraden genau einen Fernpunkt.



Anschaulich ist ein Fernpunkt äquivalent zu perspektivischen Sammelpunkten:



## 2.5 Allgemeine projektive Transformationen

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \mapsto M \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \text{ mit } M = \mathbb{R}^{3 \times 3}, \det M \neq 0$$

(Punkte bleiben Punkte, Geraden bleiben Geraden, Inzidenz bleibt erhalten)

**Definition** Affine Transformationen sind jene Transformationen, bei denen die Fernpunkte Fernpunkte bleiben.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \mapsto M \begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} \stackrel{!}{=} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix}$$

$$\forall x, y : m_{31}x + m_{32}y + m_{33} \cdot 0 = 0 \Rightarrow m_{31} = m_{32} = 0$$

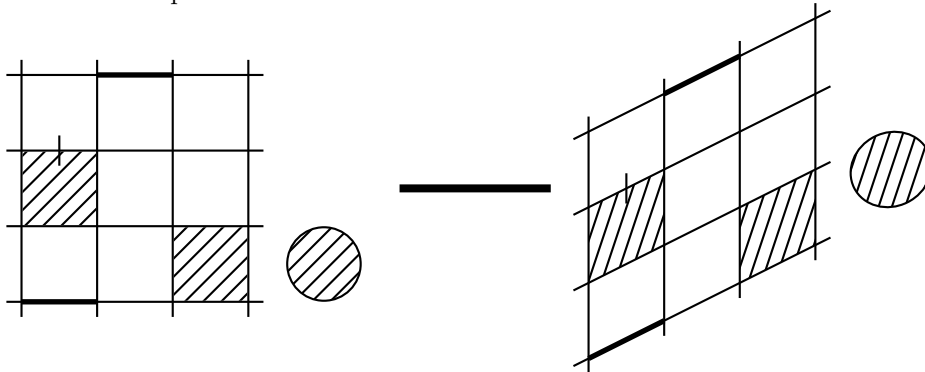
$$\det M \neq 0$$

$$\det M = \underbrace{m_{33}}_{\neq 0} \cdot \underbrace{\begin{vmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{vmatrix}}_0 \Rightarrow \text{o. B. d. A. } m_{33} = 1$$

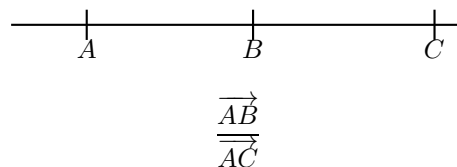
$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \mapsto \overbrace{\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}}^{\text{lineare Transformation}} + \overbrace{\begin{pmatrix} m_{13} \\ m_{23} \end{pmatrix}}^{+ \text{ Translation}}$$

Affine Transformation:

- parallele Geraden bleiben parallel



- erhalten das Teilverhältnis auf parallelen Geraden



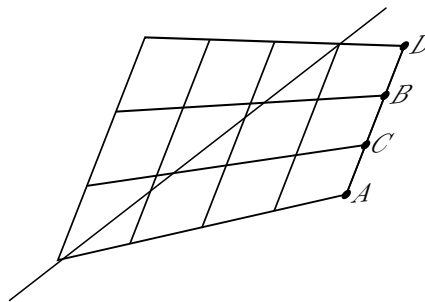
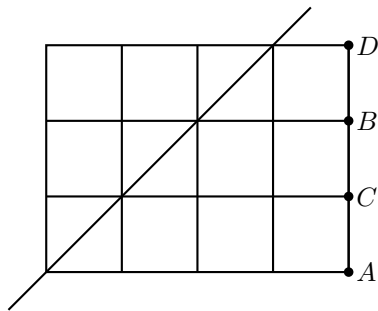
Starre Bewegungen (Isometrien, euklidische Transformationen):

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \text{ ist orthogonal } M^T = M^{-1} \text{ erhalten Längen, Winkel und Flächen}$$

**Doppelverhältnis**

$$\boxed{\frac{\overrightarrow{AC}}{\overrightarrow{BC}} : \frac{\overrightarrow{AD}}{\overrightarrow{BD}}} = \text{Doppelverhältnis}$$

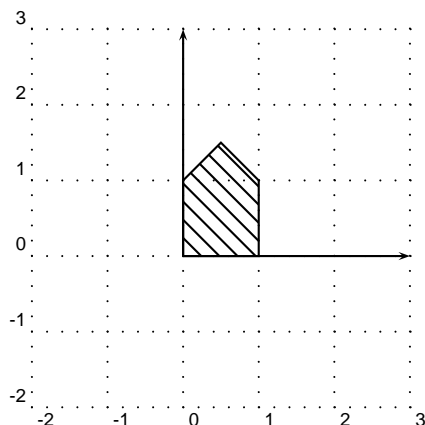
**Bemerkung** projektive Transformationen erhalten das sogenannte Doppelverhältnis



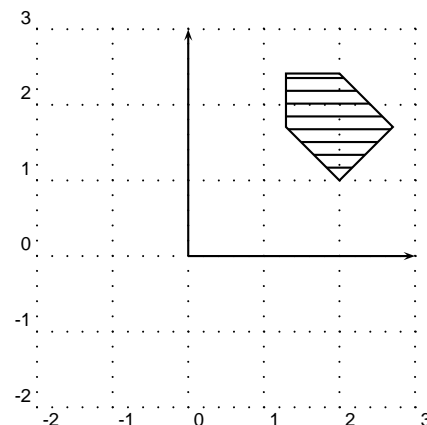
**Ausblick** projektiver Raum; wird beschrieben durch homogene Koordinaten  $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ u \end{pmatrix} \neq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ . Kartesische Koordinaten  $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$  entsprechen homogenen Koordinaten  $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$  oder  $\begin{pmatrix} \lambda x \\ \lambda y \\ \lambda z \\ \lambda \end{pmatrix}$  ( $\lambda \neq 0$ , bel.).

**Bemerkung 1** Transformation  $x \mapsto Mx$  kann man auf zwei Arten interpretieren:

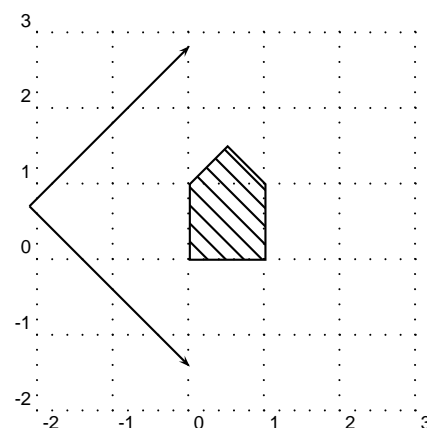
- Wende die transformation  $M$  auf Objekte an. Objekte werden bewegt, Standpunkt/Koordinatensystem bleibt fest.
- Drücke die unveränderte Lage eines Objektes in einem neuen Koordinatensystem aus.



$x \mapsto Mx$



$x \mapsto Mx$



Rechnerisch macht dies keinen Unterschied.

**Bemerkung 2** geometrische Transformationen können verknüpft; Reihenfolge ist wichtig!

$$y = M_1 x$$

$$z = M_2 y$$

$$z = \underbrace{M_2 M_1}_{\text{Matrizenmultiplikation}} x$$

Inverse Transformation wird durch die inverse Matrix ausgedrückt:

$$x = M_1^{-1} y$$

**Bemerkung 3** Bei uns stehen Koordinaten in *Spaltenvektoren*  $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$   $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{pmatrix}$

$\Rightarrow$  Transformation  $\equiv$  Multiplikation mit einer Matrix *von links*

$$Mx = y$$

Alternative: Zeilenvektoren

$\Rightarrow$  Transformation  $\equiv$  Multiplikation mit einer *von rechts* mit der *transponierten Matrix*

$$y^t = x^t M^t = (Mx)^t$$

Diese Schreibweise ist an sich intuitiver (da die Rechnung in der Reihenfolge der Anwendung aufgeschrieben wird), aber mathematisch unüblich:

$$M_2 M_1 x = z \iff x^t M_1^t M_2^t = z^t$$

## 2.6 Transformation im dreidimensionalen Raum

### 2.6.1 Affine Transformation im dreidimensionalen Raum

- allgemeine affine Transformationen:

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ mit } \begin{vmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{vmatrix} \neq 0$$

- Isometrien (starre Bewegungen):

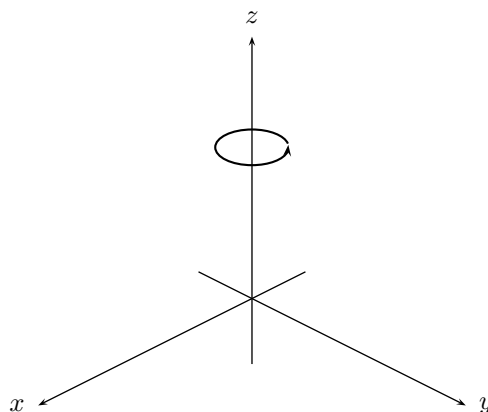
$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \text{ ist eine orthogonale Matrix}$$

- orientierungserhaltende  $\det M = +1$  [Rotation um eine Achse (+ Translation)]
- orientierungsumkehrende  $\det M = -1$  [Spiegelung an einer Ebene, Spiegelung an einem Punkt, Drehspiegelung ...]

#### Beispiele

- Drehung um die  $z$ -Achse:

$$M = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



- Spiegelung an der  $xy$ -Ebene:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- Spiegelung am Nullpunkt:

$$M = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

## 2.6.2 projektive Transformationen im dreidimensionalen Raum

$$x \mapsto Mx, \quad M \in \mathbb{R}^{4 \times 4}, \det M \neq 0$$

## 2.7 Projektionen und Perspektive

- Sehen mit dem menschlichen Auge



- Lochkamera



- Projektionen



**Projektionen** Verbinde gegebene Punkte mit einem festen *Projektionszentrum* (kann auch ein Fernpunkt sein) und schneide die Strahlen mit einer Ebene (= *Projektionsebene*)

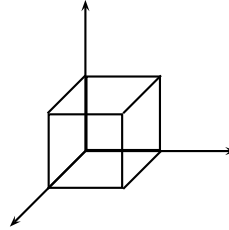
1. Projektionszentrum im Endlichen: Zentralprojektion
2. Projektionszentrum ein Fernpunkt: Parallelprojektion (Parallele Geraden bleiben parallel)



- a) Wenn die Projektion senkrecht auf den Projektionsstrahlen steht, spricht man von *orthographischer Projektion*



- b) andernfalls von *schiefer Projektion*



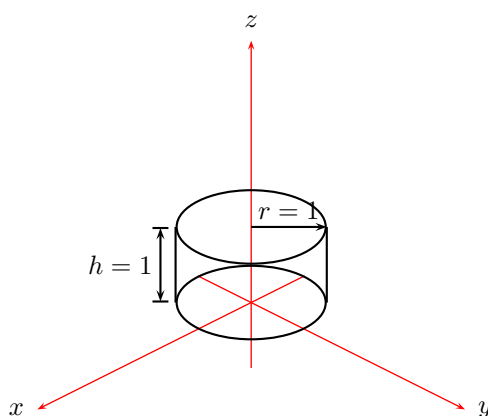
**zu 1. Zentralprojektion** Der *Hauptpunkt* ist der Punkt der Projektionsebene, der dem Auge am nächsten liegt. Ein projiziertes Bild vermittelt den exakten wirklichkeitsgetreuen Eindruck genau dann, wenn man sich so davor stellt, dass das Auge direkt vor dem Hauptpunkt  $H$  liegt und den richtigen Abstand  $d$  und im richtigen Abstand zum Bild, mit dem das Bild berechnet wurde

- Parallele Geraden können in der Projektion zu schneidenden Geraden werden
- Das Bild des entsprechenden Fernpunktes heißt *Fluchtpunkt* (vanishing point)
- Die Fluchtpunkte der horizontalen Gerade liegen auf dem *Horizont* (die Fluchtgerade durch die alle horizontalen Ebenen gehen).
- Wenn die Projektionsgerade senkrecht ist, dann liegt der Hauptpunkt auf dem Horizont  
 $\Rightarrow$  Senkrechte Geraden bleiben dann parallel (und senkrecht)



## 2.8 Koordinaten in der Praxis

- Objektkoordinaten

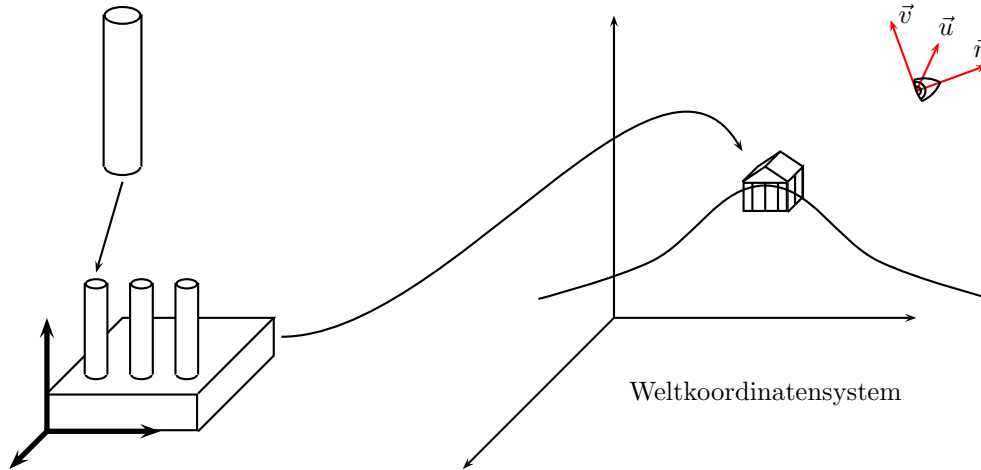


„Standardzylinder“  $x^2 + y^2 \leq 1, 0 \leq z \leq 1$

Durch die affine Transformationen wird die Form des Zylinders angepasst und der Zylinder an die passende Stelle (in einem größeren Modell / in der Umgebung) gesetzt

$$M = \begin{pmatrix} r & & & \\ & r & & \\ & & h & \\ & & & 1 \end{pmatrix} \dots \text{Skalierung} \rightarrow \text{Radius } r \text{ Höhe } h$$

*Translation* (+Rotation) von mehreren Kopien. Zylinder wird Teil eines größeren Objektes mit einem eigenen Koordinatensysteme



- **Weltkoordinaten**

Ein globales Koordinatensystem, das für alle Berechnungen als Referenz dient.

- **Augenkoordinaten** (Kamerakordinaten)

- Ursprung = Augpunkt

- 3 orthogonale Achsen:

- $\vec{n}$  = „Blickrichtung“ vom Objekt zum Betrachter

- $\vec{u}$  = „Horizontale Richtung“ von links nach rechts

- $\vec{v}$  = „Senkrechte Richtung“ von unten nach oben

Die Projektionsebene ist orthogonal zu  $\vec{n}$ . Auf der Projektionsebene wird ein rechteckiges Bild erzeugt, dessen Kanten an  $\vec{u}$  und  $\vec{v}$  ausgerichtet sind.

$$\begin{pmatrix} x_{\text{Welt}} \\ y_{\text{Welt}} \\ z_{\text{Welt}} \\ w_{\text{Welt}} \end{pmatrix} \mapsto M_{AW} \begin{pmatrix} x_{\text{Welt}} \\ y_{\text{Welt}} \\ z_{\text{Welt}} \\ w_{\text{Welt}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{\text{Auge}} \\ y_{\text{Auge}} \\ z_{\text{Auge}} \\ w_{\text{Auge}} \end{pmatrix}$$

Weltkoordinaten  $x, y, z$  bilden ein Rechtssystem. Augenkoordinaten  $u, v, n$  bilden ein Rechtssystem.

$\Rightarrow M_{AW}$  ist Rotation+Translation

$$M_{AW}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{\text{Auge}} \\ y_{\text{Auge}} \\ z_{\text{Auge}} \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$M_{AW}^{-1} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_u \\ y_u \\ z_u \\ 0 \end{pmatrix} = \text{Vektor } \vec{u} \text{ in Weltkoordinaten}$$

$$M_{AW}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \\ 0 \end{pmatrix} = \text{Vektor } \vec{v} \text{ in Weltkoordinaten}$$

$$M_{AW}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \\ 0 \end{pmatrix} = \text{Vektor } \vec{n} \text{ in Weltkoordinaten}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{orthogonal} \\
 M_{AW}^{-1} &= \begin{pmatrix} \boxed{\begin{matrix} x_u & x_v & x_n \\ y_u & y_v & y_n \\ z_u & z_v & z_n \end{matrix}} & \begin{matrix} x_{\text{Auge}} \\ z_{\text{Auge}} \\ y_{\text{Auge}} \end{matrix} \\ & \quad \quad \quad \begin{matrix} 0 & 0 & 0 \end{matrix} & 1 \end{pmatrix} \\
 M_{AW} &= \begin{pmatrix} x_u & y_u & z_u & * \\ x_v & y_v & z_v & * \\ x_n & y_n & z_n & * \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 M_{AW} \begin{pmatrix} x_{\text{Auge}} \\ y_{\text{Auge}} \\ z_{\text{Auge}} \\ 1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Der Punkt  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$  in Augenkoordinaten wird auf  $A + \vec{n}$  in Weltkoordinaten abgebildet.

$$M_{AW}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{\text{Auge}} + x_n \\ y_{\text{Auge}} + y_n \\ z_{\text{Auge}} + z_n \\ 1 \end{pmatrix} \quad M_{AW}^{-1} \left[ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \\ 0 \end{pmatrix}$$

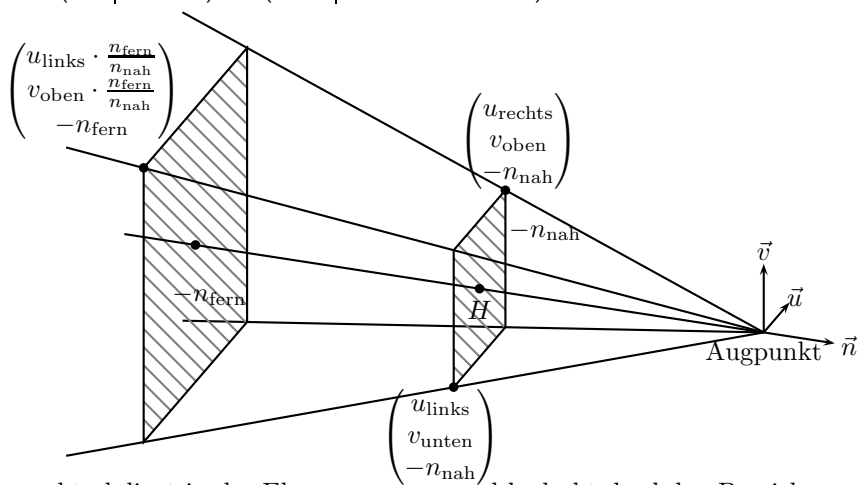
$A = \begin{pmatrix} x_u & x_v & x_n \\ y_u & y_v & y_n \\ z_u & z_v & z_n \end{pmatrix}$  Spalten sind die kartesischen Weltkoordinaten von  $\vec{u}, \vec{v}, \vec{n}$

$$M_{AW}^{-1} = \left( \begin{array}{ccc|c} & & & x_{\text{Auge}} \\ & A & & z_{\text{Auge}} \\ & & & y_{\text{Auge}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right)$$

$$M_{AW} = \left( \begin{array}{ccc|c} & A^T & & -A^T \begin{pmatrix} x_{\text{Auge}} \\ z_{\text{Auge}} \\ y_{\text{Auge}} \end{pmatrix} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right)$$

Probe:

$$\left( \begin{array}{c|c} A & \begin{pmatrix} x_{\text{Auge}} \\ z_{\text{Auge}} \\ y_{\text{Auge}} \end{pmatrix} \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right) \cdot \left( \begin{array}{c|c} A^T & -A^T \begin{pmatrix} x_{\text{Auge}} \\ z_{\text{Auge}} \\ y_{\text{Auge}} \end{pmatrix} \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c|c} A \cdot A^T = I' & 0 \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right) = I \quad \square$$



Projektionsrechteck liegt in der Ebene  $n = n_{\text{nah}}$  und bedeckt dort den Bereich

$$[u_{\text{links}}, u_{\text{rechts}}] \times [v_{\text{unten}}, v_{\text{oben}}]$$

Der Sichtbare Bereich ist alles was hinter diesem Rechteck liegt. Zusätzlich wird alles abgeschnitten, was hinter der Ebene  $n = n_{\text{fern}}$  liegt.

$\Rightarrow$  Pyramidenstumpf (view frustum)

- **Normalisierte Gerätekoordinaten** (normalized device coordinates, NDC) Der sichtbare Pyramidenstumpf wird durch projektive Transformation auf den Würfel  $[-1, +1]^3$  transformiert.  $x, y, z$  bilden ein Linkssystem.



$$\begin{pmatrix} * \\ * \\ -n_{\text{nah}} \\ 1 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} * \\ * \\ -1 \\ +1 \end{pmatrix} \cdot \lambda \quad (\text{Ebene } z = -1)$$

$$\begin{pmatrix} * \\ * \\ -n_{\text{fern}} \\ 1 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} * \\ * \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot \lambda_2$$

Fernpunkt auf der  $z$ -Achse:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ * \\ 0 \end{pmatrix}$$

Horizontale Linien (Richtung  $u$ ) bleiben parallel und horizontal (Richtung  $x$ ):

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} * \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Vertikale Linien

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} 0 \\ * \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Transformation

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ n \\ w \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} * & 0 & * & 0 \\ 0 & * & * & 0 \\ 0 & 0 & * & * \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ n \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} * & 0 & * & 0 \\ 0 & * & * & 0 \\ 0 & 0 & a & b \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ n \\ w \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} * \\ * \\ -n_{\text{nah}} \\ 1 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} * \\ * \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot \lambda = \begin{pmatrix} * \\ * \\ -n_{\text{nah}}a + b \\ n_{\text{nah}} \end{pmatrix} \Rightarrow -n_{\text{nah}}a + b = -n_{\text{nah}}$$

$$\begin{pmatrix} * \\ * \\ -n_{\text{fern}} \\ 1 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} * \\ * \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot \lambda = \begin{pmatrix} * \\ * \\ -n_{\text{fern}}a + b \\ n_{\text{fern}} \end{pmatrix} \Rightarrow -n_{\text{fern}}a + b = n_{\text{fern}}$$

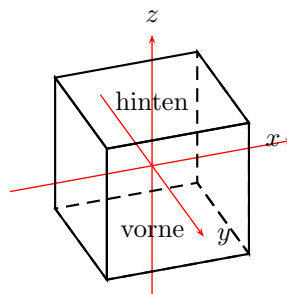
$$\begin{aligned}
 & -n_{\text{nah}}a + b = -n_{\text{nah}} \\
 & -n_{\text{fern}}a + b = n_{\text{fern}} \\
 \hline
 & a(-n_{\text{nah}} + n_{\text{fern}}) = -n_{\text{nah}} - n_{\text{fern}} \\
 & a = -\frac{n_{\text{nah}} + n_{\text{fern}}}{n_{\text{nah}} - n_{\text{fern}}} \\
 & \Rightarrow b = -\frac{2 \cdot n_{\text{fern}} \cdot n_{\text{nah}}}{n_{\text{fern}} - n_{\text{nah}}}
 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow M = \begin{pmatrix} \frac{2n_{\text{nah}}}{u_{\text{rechts}} - u_{\text{links}}} & 0 & \frac{u_{\text{rechts}} + u_{\text{links}}}{v_{\text{oben}} + v_{\text{unten}}} & 0 \\ 0 & \frac{2n_{\text{nah}}}{v_{\text{oben}} - v_{\text{unten}}} & \frac{u_{\text{rechts}} - u_{\text{links}}}{n_{\text{fern}} + n_{\text{nah}}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{v_{\text{oben}} - v_{\text{unten}}}{n_{\text{fern}} - n_{\text{nah}}} & -\frac{2n_{\text{fern}} \cdot n_{\text{nah}}}{n_{\text{fern}} - n_{\text{nah}}} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$M^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{u_{\text{rechts}} - u_{\text{links}}}{2n_{\text{nah}}} & 0 & 0 & \frac{u_{\text{rechts}} - u_{\text{links}}}{2n_{\text{nah}}} \\ 0 & \frac{v_{\text{oben}} - v_{\text{unten}}}{2n_{\text{nah}}} & 0 & \frac{v_{\text{oben}} - v_{\text{unten}}}{2n_{\text{nah}}} \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2n_{\text{fern}}} - \frac{1}{2n_{\text{nah}}} & \frac{1}{2n_{\text{fern}}} + \frac{1}{2n_{\text{nah}}} \end{pmatrix}$$

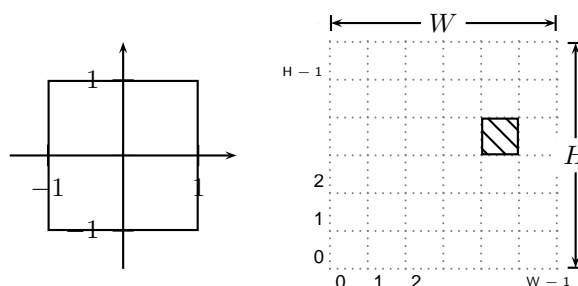
- **Rasterkoordinaten** - Koordinaten auf dem Bildschirm  
von normalisierten Gerätekoordinaten (NDC) zu Rasterkoordinaten:

**zur Erinnerung** NDC Linkssystem

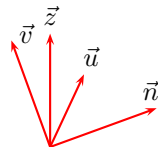


$$[-1, 1] \times [-1, 1] \times [-1, 1]$$

1. Projektion:  $z$ -Koordinaten weglassen. ( $z$  gibt Informationen über die Tiefe, größerer  $z$ -Wert ist weiter hinten)
2. Skalierung des  $x$ - $y$ -Quadrates und Runden auf  $W \times H$ -Gitter



$$\text{Pixelkoordinaten: } \begin{pmatrix} \lfloor (x+1) \cdot \frac{W}{2} \rfloor \\ \lfloor (y+1) \cdot \frac{H}{2} \rfloor \end{pmatrix}$$



Berechnung des Augkoordinatensystems  
Gegeben ist der Einheitsvektor  $\vec{n}$  (und der Augpunkt)

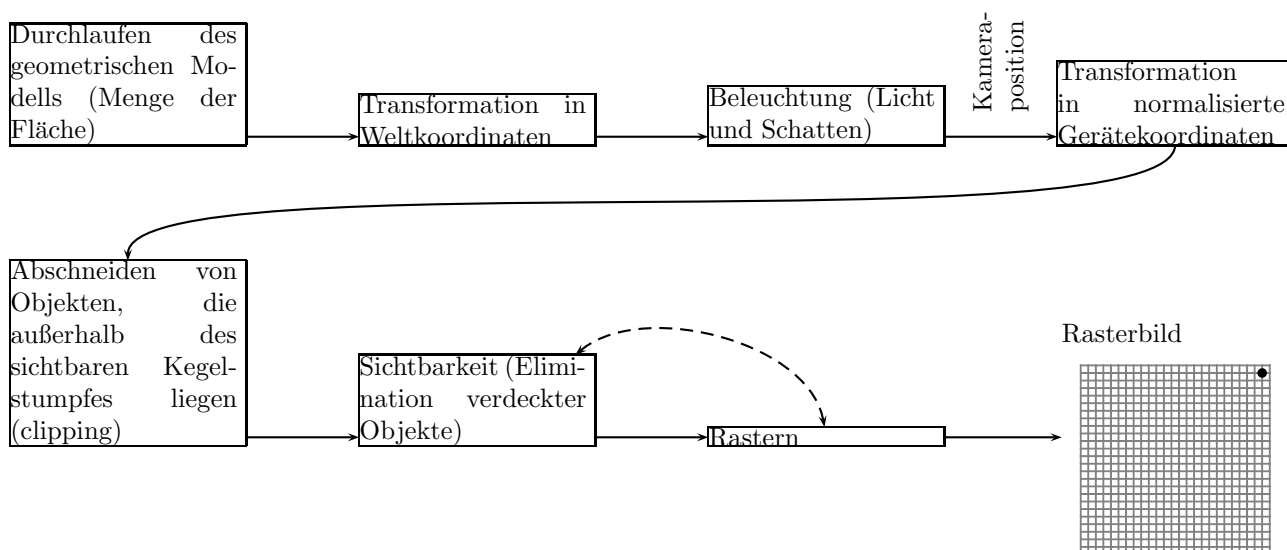
Setze  $\vec{u}_0 := \vec{z} \times \vec{n}$

$\vec{z} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$  senkrecht nach oben

$$\vec{u} := \frac{\vec{u}_0}{\|\vec{u}_0\|}$$

$$\vec{v} := \vec{n} \times \vec{u}$$

## 2.9 „rendering pipeline“ – vom geometrischen Modell zum Rasterbild



nur *eine* mögliche Organisation; andere Reihenfolgen sind möglich

# 3 Licht und Farben

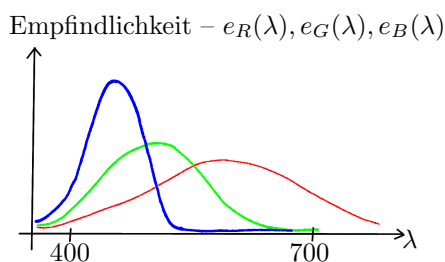
**Definition** (sichtbares) **Licht** sind elektromagnetische Wellen verschiedener Wellenlänge (ca. zwischen 400–700 nm) Die Wellenlänge  $\lambda$  entscheidet über die **Farbe**. Das meiste Licht ist eine Mischung von verschiedenen Wellenlängen.



Wenn Licht auf einen Gegenstand trifft, dann wird es in unterschiedlichem Maß zurückgeworfen, je nach Wellenlänge Wenn Licht einen filter durchdringt, ist es analog (subtraktive Farbmischung).

## 3.1 Farbsehen im menschlichen Auge

Es gibt drei Arten von lichtempfindlichen *Zapfen* (R, G, B)



Erregung der „roten“ Zapfen bei einer Lichtquelle mit Intensitätsfunktion  $f(\lambda)$

$$r = \int f(\lambda) \cdot e_R(\lambda) \, d\lambda$$

analog „grün“:  $g = \int f(\lambda) \cdot e_G(\lambda) \, d\lambda$

analog „blau“:  $b = \int f(\lambda) \cdot e_B(\lambda) \, d\lambda$

- Verschiedene Lichtquellen mit verschiedenen spektraler Zusammensetzung erzeugen den gleichen Farbeindruck, wenn sie die gleichen  $(r, g, b)$ -Werte hervorbringen.
- Dreidimensionaler Farbraum, aber nicht alle  $(r, g, b)$ -Werte erreichbar (Wenn  $g > 0 \Rightarrow r > 0$  oder  $b > 0$ ,  $(r, g, b) = (0, 1, 0)$  gibt es nicht)
- Wenn man  $f(\lambda)$  mit einem Skalar  $c > 0$  multipliziert, dann ändert sich nur die Helligkeit, nicht die Farbe. Entsprechend wird  $(r, g, b)$  mit einem Skalar multipliziert.
- Normalisierung auf  $r + b + g = 1$  führt auf einen zweidimensionalen Farbraum, bei dem die Helligkeit konstant ist.

In der Computergrafik tut man so, als ob es nur *drei* verschiedene Wellenlängen (Grundfarben) gibt: Rot, Grün und Blau







## 4 Rasterung von Strecken und Kreisen

### 4.1 Strecken

- Rendering pipeline wurde durchlaufen
- Koordinaten sind ganzzahlige Pixelkoordinaten



**Problemstellung** Gegeben sind zwei Punkte  $p_1 = (x_1, y_1)$  und  $p_2 = (x_2, y_2)$ . Zeichne Strecke zwischen  $p_1$  und  $p_2$ .  $x_1, y_1, x_2, y_2$  sind ganzzahlig.

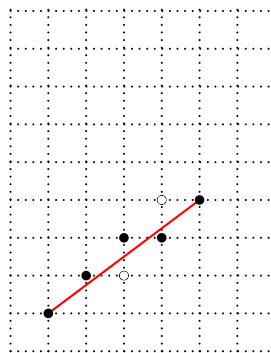
**Vereinfachung** Strecken die durch den Nullpunkt gehen  $(0,0), p_1 = (x_1, y_1)$

- Beschränkung auf Strecken im ersten Quadranten des Koordinatensystems. Alle anderen Strecken (im Quadranten II, III, IV) können durch Spiegelung an  $x$ - oder  $y$ -Achse erzeugt werden
- Beschränkung auf ersten Oktanten, alle anderen Strecken erhält man wie oben durch Vertauschen von  $x$ - und  $y$ -Koordinate

**Vereinfachte Problemstellung** Gegeben ist ein Punkt  $p_1 = (x_1, y_1)$  mit ganzzahligen Koordinaten.  $x_1 \geq y_1, x_1 \geq 0, y_1 \geq 0$ . Zeichne Strecke zwischen  $(0,0)$  und  $(x, y)$ .

$$\text{Geradengleichung: } g(x) = \frac{y_1}{x_1}x$$

$$\text{Steigung: } m = \frac{y_1}{x_1}, 0 \leq m \leq 1$$



**Idee** Werte für jeden Wert  $i$  zwischen 0 und  $x_1$  die Funktion  $g$  aus. Runde das Ergebnis  $g(i)$  und nimm diesen Wert als  $j$ -Wert

```
double m = y1/x1;
for (i = 0; i <= x1, i++) {
    j = round(i*m); // auf- bzw. abrunden
    setPixel(i, j);
}
```

- ersetze `j = round(i * m);` durch `y = y + m; j = round(y);`
- im  $i$ -ten Schritt  $y_i = m \cdot i$

- im  $(i + 1)$ -ten Schritt  $y_{i+1} = m \cdot (i + 1)$
- $y_{i+1} - y_i = m(i + 1 - 1) = m$
- $0 \leq m \leq 1 \Rightarrow y_{i+1} \leq y_i + 1$
- Wert von  $j$  steigt pro Schleifendurchlauf um höchstens 1.

$$y_{i+1} = y_i + m$$

$$j = \text{round}(y_i)$$

$$y_i = j + r_i$$

$$y_{i+1} = y_i + m = j + \underbrace{r_i + m}_{r_{i+1}}$$

$$m = \frac{y_1}{x_1}$$

$$\text{Rest: } -\frac{1}{2} \leq r_i \leq \frac{1}{2}$$

```
double m = y1/x1;
double r = 0;
int j = 0;
for (i = 0; i <= x1; i++) {
    r = r + m; // y = y + m;
    if (r >= 1/2) { // j = round(y)
        j = j+1,
        r = r - 1;
    }
    setPixel(i, j);
}
```

z. B:

$$y = 0.6$$

$$y = j_{alt} + r_{alt}$$

$$y = j_{neu} + r_{neu}$$

$$r_{alt} = 0.6$$

$$j_{neu} = j_{alt} + 1$$

$$r_{neu} = r_{alt} + 1$$

Immer noch ein Problem: **double**-Werte sind zu ungenau

Wir wissen, dass  $x_1$  und  $y_1$  ganzzahlig sind.

$\Rightarrow$  Multiplikation mit  $2x_1$  liefert **int**-Werte

```
int m = 2*y1;
int r = 0;
int j = 0;
setPixel(0,0);
for(int i = 1; i <= x1; i++) {
    r = r + m;
    if (r >= x1) {
        j = j+1;
        r = r - 2*x1;
    }
    setPixel(i, j);
}
```

$$r_{i+1} + 2y_1 \geq x_1 \Leftrightarrow r \geq x_1 - 2y_1$$

```
int j = 0;
int m = 2*y1;
int r = 2*y1 - x1;
int c1 = m - 2*x1;
int c2 = m;
for (int i = 1; i <= x1; i++) {
    if (r >= 0) {
        j++;
        r = r + c1;
    } else {
        r = r + c2;
    }
    setPixel(i, j);
}
```

### 4.1.1 Bresenham-Algorithmus



Wähle eine Spalte  $i + 1$  das Pixel, das am nächsten an  $q_{i+1}$  liegt, also

$$\begin{aligned} d'_{i+1} \leq d''_{i+1} &\Leftrightarrow \text{wähle } j_{i+1} = j_i \\ d''_{i+1} < d'_{i+1} &\Leftrightarrow \text{wähle } j_{i+1} = j_i + 1 \end{aligned}$$

oder äquivalent

$$\begin{aligned} d'_{i+1} - d''_{i+1} \leq 0 &\Leftrightarrow j_{i+1} = j_i \\ d'_{i+1} - d''_{i+1} > 0 &\Leftrightarrow j_{i+1} = j_i + 1 \end{aligned}$$

$y$ -Koordinaten von  $q_{i+1}$   $\frac{y_1}{x_1}(i + 1)$

$$\begin{aligned} d'_{i+1} &= \frac{y_1}{x_1}(i + 1) - j_i & d''_{i+1} &= j_i + 1 - \frac{y_1}{x_1}(i + 1) \\ d'_{i+1} - d''_{i+1} &= 2\frac{y_1}{x_1}(i + 1) - 2j_i - 1 & & \text{ | multipliziere mit } x_1 \end{aligned}$$

(ändert nichts an der Bedingung  $\leq 0$ )

Wir erhalten eine Fehler-/Entscheidungsvariable für  $(i + 1)$ -te Spalte

$$\begin{aligned} e_{i+1} &= x_i(d'_{i+1} - d''_{i+1}) = 2y_1(i + 1) - 2j_i x_1 - x_1 \\ e_{i+1} \leq 0 &\Leftrightarrow j_{i+1} = j_i \\ e_{i+1} > 0 &\Leftrightarrow j_{i+1} = j_i + 1 \end{aligned}$$

Betrachte Differenz zwischen aufeinanderfolgenden Entscheidungsvariablen

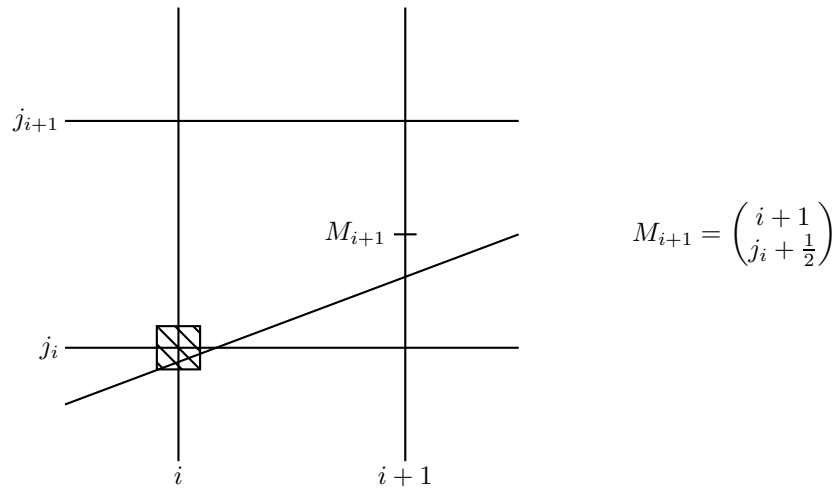
$$\begin{aligned} e_{i+1} - e_i &= \underline{2y_1(i + 1)} - 2j_i x_1 - \underline{x_1} - \underline{2y_1 i} + 2j_{i-1} x_1 + \underline{x_1} \\ e_{i+1} - e_i &= 2y_1 - 2x_1 \underbrace{(j_i - j_{i-1})} \\ &= \begin{cases} 0, & \text{falls } e_i \leq 0 \\ 1, & \text{falls } e_i > 0 \end{cases} \end{aligned}$$

Also

$$\begin{aligned} e_i > 0, j_i &= j_{i-1} + 1 \text{ und } e_{i+1} = e_i + 2y_1 - 2x_1 \\ e_i \leq 0, j_i &= j_{i-1} \text{ und } e_{i+1} = e_i + 2y_1 \end{aligned}$$

Anfangswerte:  $i = 0, j_0 = 0, e_1 = 2y_1 - x_1$

## 4.1.2 Midpoint Line Algorithmus



Wenn  $M_{i+1}$  über der Strecke liegt  $\Rightarrow$  wähle  $j_{i+1} = j_i$  Wenn  $M_{i+1}$  unter der Strecke liegt  $\Rightarrow$  wähle  $j_{i+1} = j_i + 1$

$$\text{Geradengleichung: } y = \frac{y_1}{x_1}x \Leftrightarrow y_1x - x_1y = 0$$

$$(x, y) \text{ liegt über der Geraden} \Leftrightarrow y > \frac{y_1}{x_1}x \Leftrightarrow y_1x - x_1y < 0$$

$$(x, y) \text{ liegt unter der Geraden} \Leftrightarrow y < \frac{y_1}{x_1}x \Leftrightarrow y_1x - x_1y > 0$$

Setze  $F(x, y) = xy_1 - x_1y$ , dann gilt also:

- $(x, y)$  über Geraden  $\Leftrightarrow F(x, y) < 0$
- $(x, y)$  auf Geraden  $\Leftrightarrow F(x, y) = 0$
- $(x, y)$  unter Geraden  $\Leftrightarrow F(x, y) > 0$

Entscheidungsvariable

$$d_{i+1} = F(M_{i+1}) = (i+1)y_1 - x_i \left( j_i + \frac{1}{2} \right) \leq 0 \Leftrightarrow j_{i+1} = j_i$$

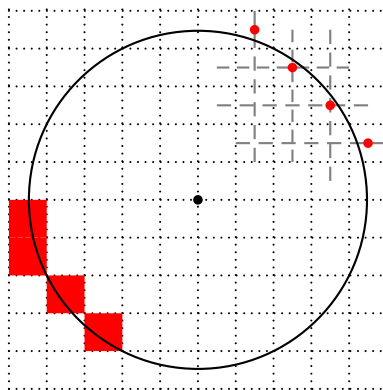
$$d_{i+1} = F(M_{i+1}) = (i+1)y_1 - x_i \left( j_i + \frac{1}{2} \right) > 0 \Leftrightarrow j_{i+1} = j_i + 1$$

$$\begin{aligned} d_{i+1} - d_i &= y_1(i+1) - x_1 \left( j_i + \frac{1}{2} \right) - y_1i + x_1 \left( j_{i+1} + \frac{1}{2} \right) \\ &= y_1 - x_1 \underbrace{(j_i - j_{i-1})} \\ &= \begin{cases} 0, & \text{falls } d_i \leq 0 \\ 1, & \text{falls } d_i > 0 \end{cases} \\ d_1 &= y_1 - \frac{x_1}{2} \end{aligned}$$

Für Ganzzahligkeit multipliziere mit 2

$$\begin{aligned} e_i &= 2d_i \Rightarrow e_{i+1} - e_i = 2y_1 - 2x_1(j_i - j_{i-1}) \\ e_1 &= 2y_1 - x_1 \end{aligned}$$

## 4.2 Kreise



### Annahme

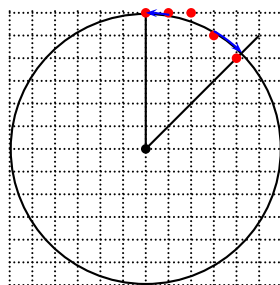
- Radius  $r$  ist ganzzahlig
- Mittelpunkt  $(c_x, c_y)$  ist ein Gitterpunkt

Kreisgleichung:

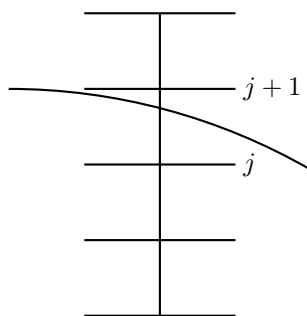
$$(x - c_x)^2 + (y - c_y)^2 = r^2$$

Betrachte den Fall, wo der Mittelpunkt  $(0,0)$  ist (anschließend alles um  $(c_x, c_y)$  verschieben). Wir zeichnen den Bereich  $x \geq 0, y \geq 0, y \geq x$  auf diesem Achtelkreis zeichnen wir auf jeder senkrechten Gittergeraden *einen* Punkt.

Ausnutzung der Symmetrie:



$x = i$  ist fest, Kreis verläuft zwischen  $(i, j)$  und  $(i, j + 1)$ .



Welchen dieser beiden Punkte soll man auswählen?

- (1). Wähle den Punkt, der kleineren *Abstand* vom Kreis hat
- (2). Berechne den Schnittpunkt mit der Geraden  $x = i$  und  $r$  und runde zum nächsten Gitterpunkt.
  - (Äquivalent: vergleiche den *senkrechten Abstand* zum Kreis)
  - (Äquivalent: Liegt  $(i, j + \frac{1}{2})$  über oder unter dem Kreisbogen?)
- (3). Wähle den Punkt der die *Kreisgleichung*  $x^2 + y^2 = r^2$  am besten erfüllt.

$$|x^2 + y^2 - r^2| \rightarrow \text{MIN}$$

Für Geraden sind alle drei Bedingungen äquivalent

Für (3). gibt es beliebig viele Varianten:

$$\sqrt{x^2 + y^2} = r \Rightarrow |r - \sqrt{x^2 + y^2}| \rightarrow \text{MIN führt auf (1)}$$

$$(x^2 + y^2)^2 = r^4 \Rightarrow |r^4 - (x^2 + y^2)^2| \rightarrow \text{MIN führt auf (1)}$$



**Satz** Wenn der Mittelpunkt  $(c_x, c_y)$  und der Radius  $r$  ganzzahlig sind, dann sind Bedingung (1),(2) und (3) äquivalent.

Algebraische Formulierung von (1), (2), (3):

- Punkt  $(i, j + 1)$  liegt außerhalb

$$i^2 + (j + 1)^2 \geq r^2$$

- Punkt  $(i, j)$  liegt innerhalb

$$i^2 + (j + 1)^2 < r^2$$

$$(1). \quad r - \sqrt{i^2 + j^2} \underset{<}{\overset{\geq}{\cong}} \sqrt{i^2 + (j + 1)^2} - r$$

$$(2). \quad i^2 + \left(j + \frac{1}{2}\right)^2 \underset{<}{\overset{\geq}{\cong}} r^2$$

$$(3). \quad r^2 - (i^2 + j^2) \underset{<}{\overset{\geq}{\cong}} i^2 + (j + 1)^2 - r^2$$

$$(3) \iff \begin{aligned} 2r^2 &\underset{<}{\overset{\geq}{\cong}} i^2 + j^2 + 2j + 1 + i^2 + j^2 \\ &= 2i^2 + 2j^2 + 2j + 1 \end{aligned}$$

$$\iff i^2 + j^2 + j - r^2 + \frac{1}{2} \underset{<}{\overset{\geq}{\cong}} 0$$

$\Rightarrow$  „ $\cong$ “ kommt nicht vor für  $i, j \in \mathbb{Z}$

$$(2) \iff i^2 + j^2 + j + \frac{1}{4} - r^2 \underset{<}{\overset{\geq}{\cong}} 0$$

Für  $i, j, r \in \mathbb{Z}$  sind (2) und (3) äquivalent:

$\overbrace{i^2 + j^2 + j - r^2}^{g(i, j+1), \text{ s. Algorithmus}} \geq 0$	$\Rightarrow$ Zeichne $(i, j)$
$\leq -1$	$\Rightarrow$ Zeichne $(i, j + 1)$

**Behauptung**

$$(a). \quad i^2 + \left(j + \frac{1}{2}\right)^2 \geq r^2 \Rightarrow \sqrt{i^2 + (j + 1)^2} - r > r - \sqrt{i^2 + j^2}$$

$$(b). \quad i^2 + j^2 + j + \frac{1}{2} \leq r^2 \Rightarrow \sqrt{i^2 + (j + 1)^2} - r < r - \sqrt{i^2 + j^2}$$

Daraus folgt, dass Regel (1) mit den beiden anderen Regeln (2), (3) konsistent ist.

**Beweis** (von (b).) Die Funktion  $f(t) = \sqrt{t}$  ist für  $t > 0$  konkav



$$\text{(daraus folgt: } f\left(\frac{u+v}{2}\right) \geq \frac{f(u) + f(v)}{2})$$

Eine differenzierbare Funktion  $f$  ist konkav  $\Leftrightarrow f'$  monoton fallen  $\Leftrightarrow f'' \leq 0$

$$f'(t) = \frac{1}{2\sqrt{t}} \searrow \text{konkav}$$

$$u = i^2 + j^2$$

$$v = i^2 + (j+1)^2 = i^2 + j^2 + 2j + 1$$

$$\frac{u+v}{2} = i^2 + j^2 + j + \frac{1}{2}$$

$$r \underset{\text{N.V.}}{\geq} \sqrt{i^2 + j^2 + j + \frac{1}{2}} \geq \frac{1}{2} \left[ \sqrt{i^2} + \sqrt{i^2 + (j+1)^2} \right]$$

$$2r \geq \sqrt{i^2 + j^2} + \sqrt{i^2 + (j+1)^2}$$

**Beweis** (von (a).) Funktion  $h(y) = \sqrt{i^2 + y^2}$  ist *konvex*

$$h'(y) = \frac{1 \cdot 2y}{2\sqrt{i^2 + y^2}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{i^2}{y^2} + 1}} \nearrow \text{monoton wachsend}$$

$$g\left(\frac{u+v}{2}\right) \leq \frac{1}{2}(g(u) + g(v)) \quad u = j, v = j+1$$

$$r^2 \underset{\text{N.V.}}{\leq} \sqrt{i^2 + \left(j + \frac{1}{2}\right)^2} \leq \frac{1}{2} \left( \sqrt{i^2 + j^2} + \sqrt{i^2 + (j+1)^2} \right)$$

**Algorithmus** beginnt mit  $(0, r)$  und zeichnet Punkte von links nach rechts.

- letzter gezeichneter Punkt =  $(i-1, j)$
- soll nächster  $(i, j)$  oder  $(i, j-1)$  gezeichnet werden?

$$g(i, j) = i^2 + (j-1)^2 + (j-1) - r^2 = i^2 + j^2 - 2j + 1 + j - r^2$$

$$g(i, j) := i^2 + j^2 - j - r^2 \begin{cases} \geq 0 & \Rightarrow \text{zeichne } (i, j-1) \\ \leq -1 & \Rightarrow \text{zeichne } (i, j) \end{cases}$$

$$g(i+1, j) - g(i, j) = (i+1)^2 - i^2 = 2i + 1$$

$$\begin{aligned} g(i, j-1) - g(i, j) &= (j-1)^2 - (j-1) - j^2 + j \\ &= j^2 - 2j + 1 - j + 1 - j^2 + j = -2j + 2 \end{aligned}$$



```

i := 0; j := r, g := -r; // Invariante: g = g(i,j)

loop
  SetPixel(i,j)
  g := g + 2i + 1; i := i + 1
  if g ≥ 0 then j := j - 1; g := g - 2j
until j < i

SetPixel(cx+i,cy+j)
SetPixel(cx+j,cy+i)
SetPixel(cx-i,cy+j)
SetPixel(cx-j,cy+i)
SetPixel(cx-i,cy-j)
SetPixel(cx-j,cy-i)
SetPixel(cx+i,cy-j)
SetPixel(cx+j,cy-i)

```

Die Pixel in den 4 Himmelsrichtungen werden doppelt gezeichnet.

### 4.3 Schwachstellen der Rasterung (Aliasing)

- merkbare Sprünge bei fast achsenparallelen Geraden



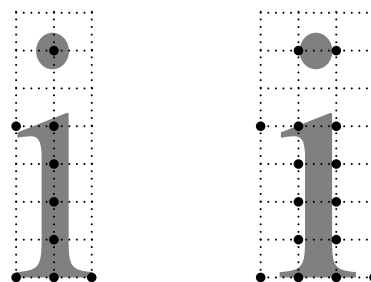
- unterschiedliche Helligkeitsverteilung in Abhängigkeit von der Steigung



- horizontale/vertikale Linie hat 1 Pixel pro Längeneinheit
- schräge Linie ( $45^\circ$ ) hat 1 Pixel pro  $\sqrt{2}$  Längeneinheiten

⇒ schräge Linien erscheinen dünner

- Buchstaben können verschieden breit werden

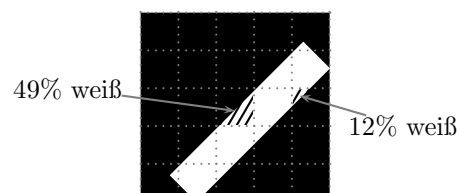


**Lösung (Antialiasing)** Verschiedene Graustufen für Pixel, statt nur schwarz und weiß

### 4.4 Antialiasing

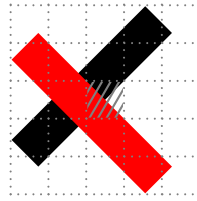
verschiedene Ansätze:

1. Betrachte den Bildpunkt als quadratische Fläche und nicht als Punkt, betrachte eine Kurve (1-dimensional) als Fläche (2-dimensional). z. B. Strecke als Rechtecke



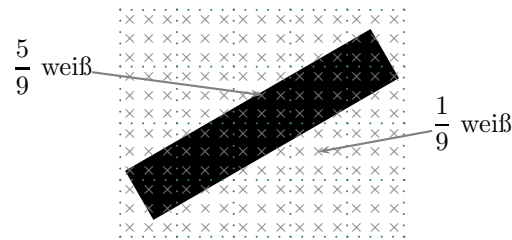


Pixel wird entsprechend hell- oder dunkelgrau gefärbt. (im Allgemeinen als proportionale Mischung aller Farben, die im Pixelquadrat vorkommen).



Aufwendig zu rechnen.

2. Supersampling: Man rechnet mit einer höheren Pixeldichte als tatsächlich vorhanden.



die verfeinerten Pixel werden „binär“ zugeordnet (in Fläche und außerhalb) und entsprechend gesetzt. Die Werte der tatsächlichen Pixel ergeben sich als Mittelwert der in ihnen enthaltenen verfeinerten Pixel.

3. Glättung:

**Idee**



Helligkeitswerte „strahlen“ auf die Nachbarn ab.

- a) berechne die Pixelweite zunächst ohne Antialiasing.
- b) Verteile die Helligkeit von jedem Pixel auf seinen Nachbarn nach einem festen Schema.

z. B.

$\frac{1}{36}$	$\frac{4}{36}$	$\frac{1}{36}$
$\frac{4}{36}$	$\frac{16}{36}$	$\frac{4}{36}$
$\frac{1}{36}$	$\frac{4}{36}$	$\frac{1}{36}$

3. lässt sich auch mit 2. kombinieren



# 5 Helligkeit und Farbe in der Computergrafik

## 5.1 Helligkeit

**Definition** Helligkeit in der schwarz/weiß-Grafik bezeichnet einen Grauwert auf der Skala zwischen schwarz und weiß

$$\text{schwarz} = 0, \quad \text{weiß} = 1 \quad (5.1)$$

$$\text{oder schwarz} = 0, \quad \text{weiß} = 255 \quad (8\text{-Bit-Integer}) \quad (5.2)$$

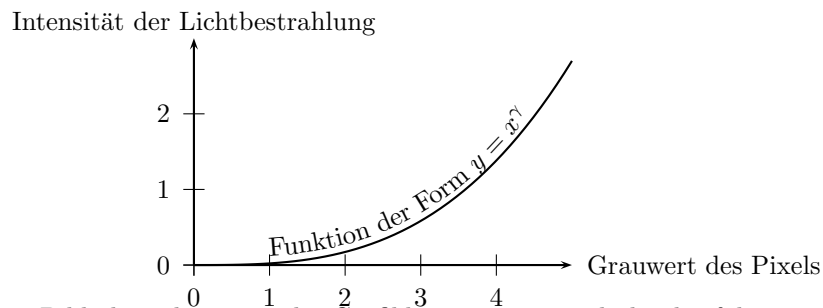
**Problem** tatsächliche Mischung 50% weiß und 50% schwarz  $\rightarrow$  sehr hellesgrau

**Weber-Fechner'sches Gesetz** beschreibt die Nichtlinearität der Sinneswahrnehmungen (für Optik und Akustik gleichermaßen). Vergrößerung der Energie um einen *konstanten Faktor* wird als Vergrößerung des Reizes in *konstanten Schritten* wahrgenommen.

**Beispiel** Eine Vergrößerung von 10 auf 12 Energieeinheiten wird genauso groß wahrgenommen wie eine Vergrößerung von 5000 auf 6000.

**Beispiel** Lautstärke wird in deziBel (dB) gemessen: Logarithmus aus der Schallenergie (oder Druck?). (Logarithmus aus konstanten Faktoren konstante Differenzen).

**Beispiel** Eine Oktave in der Musik (z. B. Abstand zwischen tiefen C und hohen C) entspricht einer Verdoppelung der Schallfrequenz.



„ $\gamma$ -Korrektur“, wird vom Bildschirm bzw. von der Grafikkarte automatisch durchgeführt.

## 5.2 Additive Farbsysteme

### 5.2.1 Das RGB-Farbsystem

In der Computergrafik geht man von einem 3-Komponenten-Modell aus: Farbe ist aus 3 Grundfarben zusammengemischt

rot (R), grün (G), blau (B)

(In Wirklichkeit: unendlich viele Grundfarben, für jede sichtbare Wellenlänge eine)



Auf einem Bildschirm sind Lichtpunkte (Phosphore) in drei Farben R, G, B nahe aneinander gitterförmig angeordnet. Die Bildpunkte werden unabhängig von einander angesteuert.

Eine Farbe in der Computergrafik ist durch 3 RGB-Werte zwischen 0 und 1 (0,1, ..., 255) charakterisiert. 24 bit pro Pixel,  $2^{24} \approx 16$  Millionen Farben

Farbe	$(r, g, b)$
rot	$(1, 0, 0)$
grün	$(0, 1, 0)$
blau	$(0, 0, 1)$
gelb (Y)	$(1, 1, 0)$
magenta (M)	$(1, 0, 1)$
cyan (C)	$(0, 1, 1)$
schwarz (K)	$(0, 0, 0)$
weiß	$(1, 1, 1)$
Grauwerte	$(x, x, x)$ alle drei Werte sind gleich

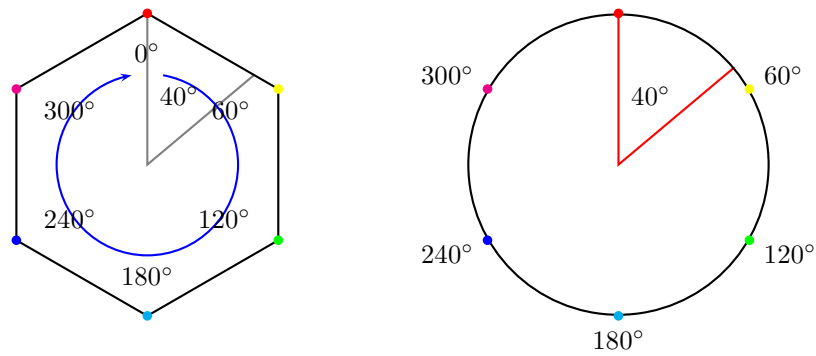


- Das RGB-System ist für die intuitive Behandlung von Farben nicht geeignet
- die Grauwerte bilden die Grauachse  $K$ -Weiß im Farbwürfel.
- die übrigen Ecken bilden das Farbsechseck RYGCMB. Auf diesem Sechseck liegen die „reinsten“/„stärksten“ Farben, alle anderen Farben kann man durch beimischen von Grau konstruieren.



Diese „stärksten Farben“ sind die Farben die mindestens eine Komponente 0 und mindestens eine Komponente 1 haben (Farben ohne Grau/Weiß/Schwarz-Anteil).

### 5.2.2 Farbsechseck bzw. Farbkreis



- Die Punkte auf diesem Sechseck werden häufig durch einen Winkel ( $0^\circ - 360^\circ$ ) parametrisiert.
- Startpunkt willkürlich ( $R = 0^\circ$ ,  $Y = 60^\circ$ , ...)
- Dieser Parameter heißt „Farbton“, „Unbuntart“ (engl. *hue* ( $H$ )).

$$\begin{aligned}
 40^\circ \text{ entspricht dann } & \frac{1}{3} \cdot R + \frac{2}{3} \cdot Y \left( \frac{1}{3} \cdot 0^\circ + \frac{2}{3} \cdot 60^\circ \right) \\
 & = \frac{1}{3} \cdot (1, 0, 0) + \frac{2}{3} \cdot (1, 1, 0) = \left( 1, \frac{2}{3}, 0 \right)
 \end{aligned}$$

Wir erhalten ein neues Farbsystem HSV

### 5.2.3 Andere Farbsysteme

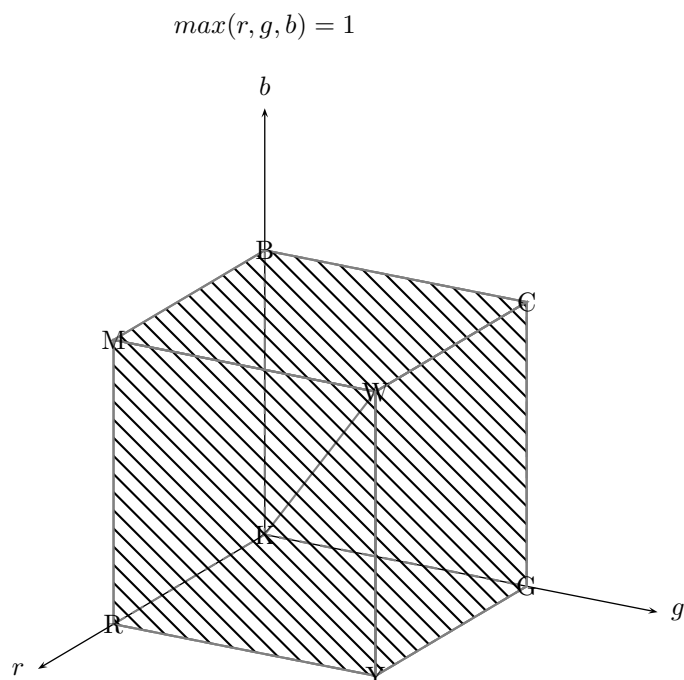
#### HSV-System

**hue** (Farbton)  $0^\circ \leq H \leq 360^\circ$

**saturation** (Sättigung)  $0 \leq S \leq 1$

**value** ( $\approx$  Helligkeit)  $0 \leq B \leq 1$

$V = 1$  sind die Farben auf den drei Deckseiten des Würfels: mindestens einer der drei Werte ist 1



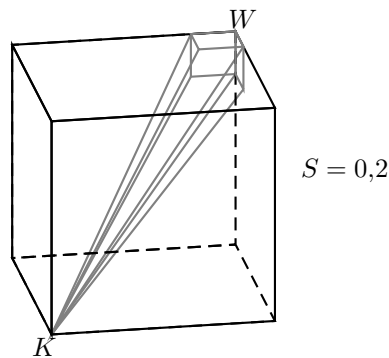
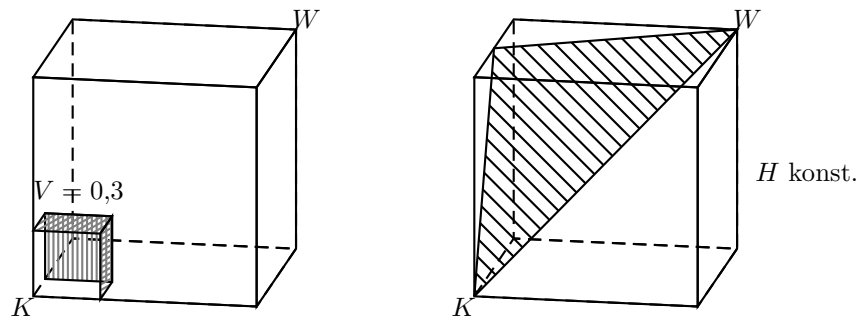
Umrechnung HSV  $\rightarrow$  RGB:

$\begin{pmatrix} r'' \\ g'' \\ b'' \end{pmatrix}$  sei die reine Farbe, die  $H$  entspricht.

$$\begin{pmatrix} r' \\ g' \\ b' \end{pmatrix} = S \begin{pmatrix} r'' \\ g'' \\ b'' \end{pmatrix} + (1 - S) \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Ergebnis  $\begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix} = V \begin{pmatrix} r' \\ g' \\ b' \end{pmatrix}$

Umrechnung RGB  $\rightarrow$  HSV



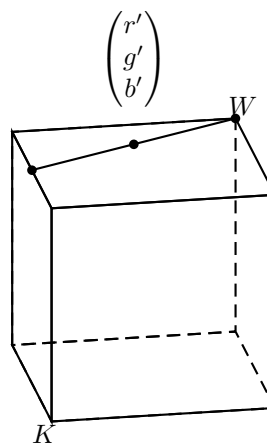
$$V = \max(r, g, b)$$

$$\begin{pmatrix} r' \\ g' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{V}$$

$$S = 1 - \min(r', g', b')$$

$$\begin{pmatrix} r'' \\ g'' \\ b'' \end{pmatrix} = \left[ \begin{pmatrix} r' \\ g' \\ b' \end{pmatrix} - (1 - S) \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right] \cdot \frac{1}{S}$$

reine Farbe  $\rightarrow$  Umwandlung in  $H$



$\begin{pmatrix} r'' \\ g'' \\ b'' \end{pmatrix}$  ist tatsächlich eine reine Farben

1. Wir wissen  $\max(r', g', b') = 1$  z. B.  $r' = 1$

$$r'' = [1 - (1 - S)1] \cdot \frac{1}{S} = S \frac{1}{S} = 1$$

2. Nehmen wir nun an  $(r', g', b') = g' = 1 - S$

$$g'' = [g' - (1 - S)1] \cdot \frac{1}{S} = [-1 + S + 1 - S] \frac{1}{S} = 0$$

Für  $V = 0$  setze  $S, H$  beliebig.

Für  $V \neq 0, S = 0$ , setze  $H$  beliebig.



Nachteil:

$$R = (1, 0, 0)$$

$$Y = (1, 1, 0)$$

$$W = (1, 1, 1)$$

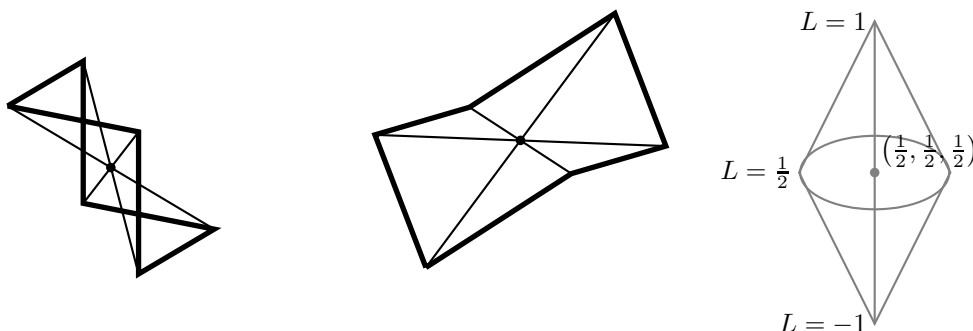
haben denselben  $V$ -Wert.

### HSL-System

**hue** (Farbton)  $0^\circ \leq H \leq 360^\circ$

**saturation** (Sättigung)  $0 \leq S \leq 1$

**lightness** (oder „luminance“)  $L = \frac{1}{2}$  enthält das reine Farbensechseck und den Graupunkt  $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$



Umrechnung HSL  $\rightarrow$  RGB:

$\begin{pmatrix} r'' \\ g'' \\ b'' \end{pmatrix}$  sei die reine Farbe, die  $H$  entspricht.

$$\begin{pmatrix} r' \\ g' \\ b' \end{pmatrix} = S \begin{pmatrix} r'' \\ g'' \\ b'' \end{pmatrix} + (1 - S) \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{Für } 0 \leq L \leq \frac{1}{2} : \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r' \\ g' \\ b' \end{pmatrix} \cdot 2L$$

$$\text{Für } \frac{1}{2} \leq L \leq 1 : \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r' \\ g' \\ b' \end{pmatrix} \cdot (2 - 2L) + \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot (2L - 1)$$



$S = 1$  Farben auf allen 6 Seitenflächen des Würfels

## 5.2.4 YCrCb/YPrPb-Farbsystem

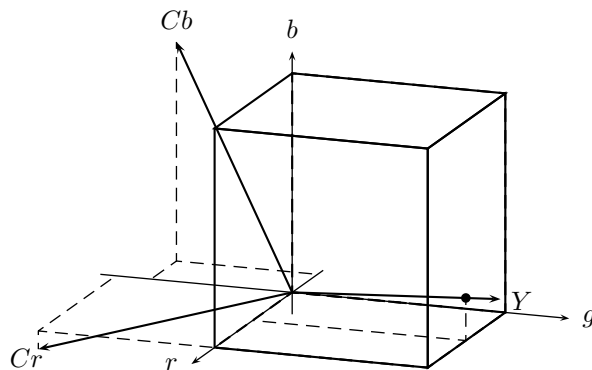
Einsatz beim Farbfernsehen

$$Y = 0,299 \cdot R + 0,587 \cdot G + 0,114 \cdot B \quad (\text{Helligkeit})$$

$$\left. \begin{array}{l} Cr = \dots \\ Cb = \dots \end{array} \right\} \text{lineare Ausdrücke in } R, G, B \text{ (Chromanz, Farbigkeit)}$$

$$0 \leq R, G, B \leq 1$$

$$0 \leq Y \leq 1 - \frac{1}{2} \leq Cr, Cb \leq +\frac{1}{2}$$



## 5.3 Subtraktive Farbmischung (z. B. beim Drucken)

3 Grundfarben



$C$  = cyan,  $B, G$  wird durchgelassen,  $R$  wird absorbiert

$M$  = magenta,  $B, R$  wird durchgelassen,  $G$  wird absorbiert

$Y$  = gelb,  $R, G$  wird durchgelassen,  $B$  wird absorbiert

$C + M$  nur Blau bleibt übrig

$C + M + Y$  = schwarz

### 5.3.1 CMY-System

$$0 \leq C, M, Y \leq 1$$



### 5.3.2 CMYK-System (Vierfarbdruck)

Zusätzlich  $K$  =schwarz. (Das Schwarz von  $K$  wird dunkler als von  $C + M + Y$  oder um Druckfarbe zu sparen.)

$$K' := \min(C, M, Y)$$

$$C' := C - K'$$

$$M' := M - K'$$

$$Y' := Y - K'$$

(möglichst viel Farbe durch  $K$  ersetzen)

## 5.4 Digitale Farbdarstellung

heutzutage:

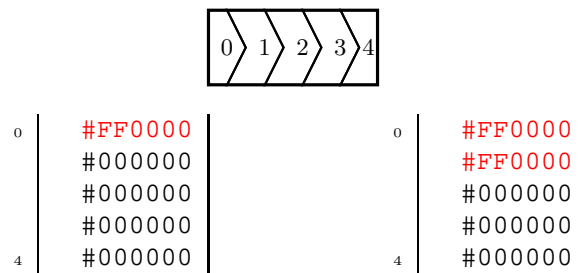
- 8 Bit pro Farbkanal ( $r, g, b$ ) ... 24 Bit pro Bildpunkt  
 $\Rightarrow 2^{24} = 16$  Mio. Farben (True Color)
  - 4-Kanal-Darstellung ( $r, g, b, \alpha$ )  $\alpha$  ist für Transparenz:
    - $\alpha = 0$ ... durchsichtig; Farbe wird vom Hintergrund genommen,
    - $\alpha = 1$ ... Farbe wird von ( $r, g, b$ ) bestimmt
    - $0 < \alpha < 1$ ... teilweise transparent
- $\rightarrow 32$  bit pro Pixel

### 5.4.1 Farbpaletten

Es wird nicht für jeden Bildpunkt eine unabhängige Farbe gespeichert (24 Bit) sonder ein Index in einer Tabelle (8 Bit, = Farbpaletten).



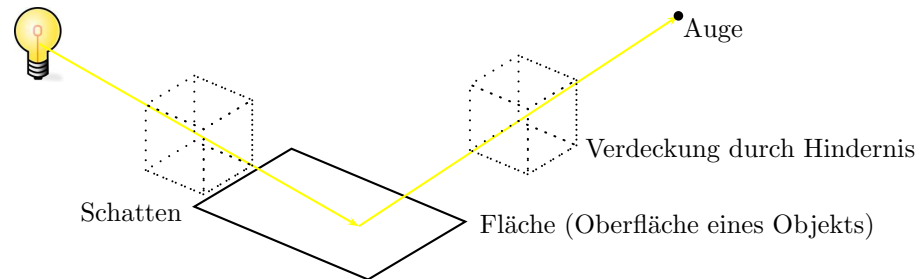
Animation ganz einfach und schnell möglich.



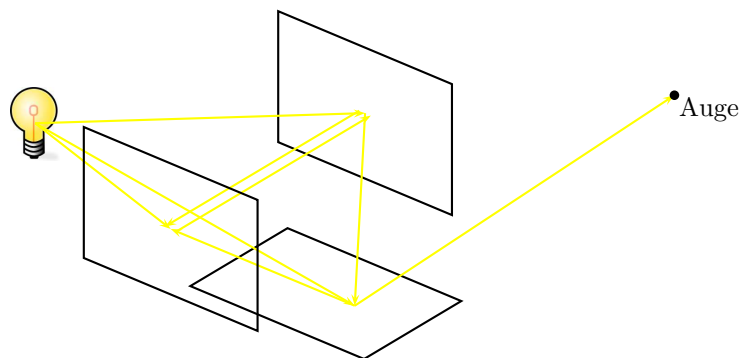
Heutzutage eher historisch.

# 6 Beleuchtung

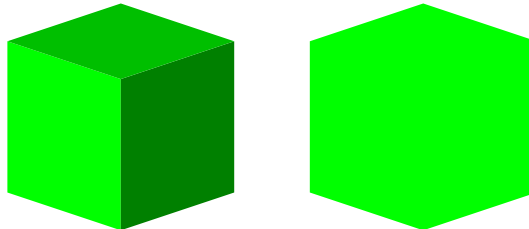
Standardfall:



In Wirklichkeit sehr komplex, in der Computergrafik aber eher selten angewandt:



Beleuchtung ist wichtig um einen räumlichen Eindruck zu erzeugen



Flächenbeschaffenheit:

- 1) diffuse Reflexion; „sieht aus allen Richtungen gleich aus“
  - 2) spiegelndes Reflexion;
- } treten auch kombiniert auf

## 6.1 Diffuse Reflexion

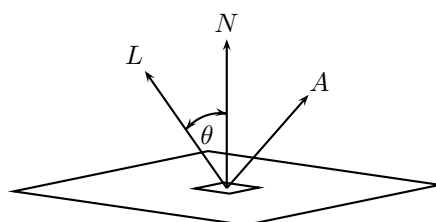
$L, N, A$  sind Einheitsvektoren:

$N$ ...Normalvektor der Fläche

$L$ ...Vektor zur Lichtquelle

$A$ ...Vektor zum Auge

$\theta$ ...Einfallswinkel (zwischen  $L$  und  $N$ )



Wie erscheint ein Punkt (Flächenstück) für das Auge?

$I$  = Intensität

zusätzliche Daten:

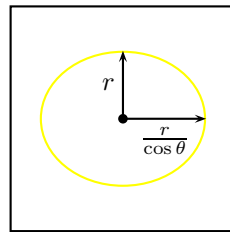
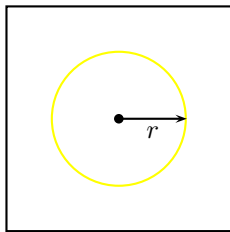
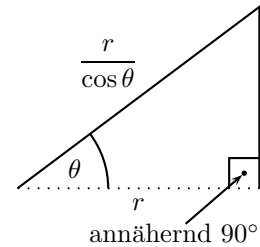
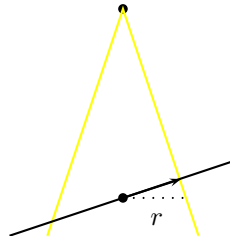
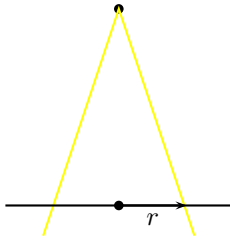
$r_L$ ...Abstand zur Lichtquelle

$I_L$ ...Intensität der Lichtquelle

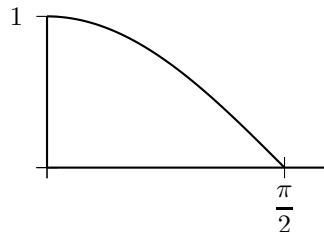
$K_D$ ...diffuser Reflexionskoeffizient der Fläche

Abhängigkeit von  $\theta$  (Lambert'sches Gesetz)

$$I = \cos \theta \cdot (\dots) \quad \cos \theta \langle N, L \rangle$$



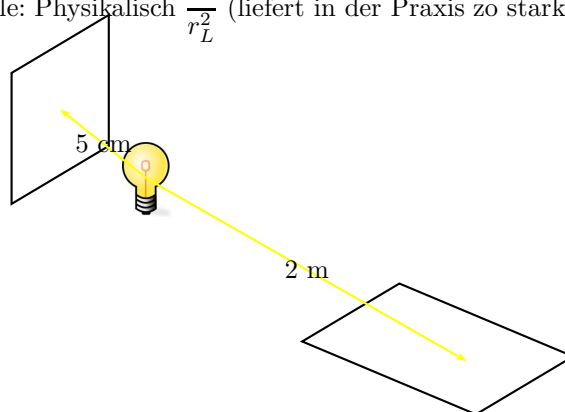
**Begründung:** Die Menge an Lichtenergie, die auf eine Fläche auftrifft, hängt vom räumlichen Winkel ab, unter dem die Fläche von der Lichtquelle aus erscheint.



Die gleiche Menge an Licht, die vorher auf eine Fläche von  $r^2\pi$  gefallen ist, fällt jetzt auf eine Fläche von  $r \cdot r \frac{1}{\cos \theta} \cdot \pi \dots$ , pro Flächeneinheit kommt um den Faktor  $\cos \theta$  beim Auge weniger an.

$\Rightarrow I$  hängt *nicht* von  $A$  ab. (Das ist spezifisch für die diffuse Reflexion)

Abstand zur Lichtquelle: Physikalisch  $\frac{1}{r_L^2}$  (liefert in der Praxis zu starke Kontraste)



Mit der Formel  $\frac{1}{r_L^2}$  würde das einen Faktor 400 bedeuten. Man nimmt stattdessen eine Formel der Gestalt:

$$\frac{1}{C_1 + C_2 r_L^2 + C_3 r_L^2} \quad \text{für passende Konstanten } C_1, C_2, C_3$$

- Formel für diffuse Reflexion

$$I = I_L \frac{1}{C_1 + C_2 r_L^2 + C_3 r_L^2} \cos \theta \cdot K_D \quad \left(0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}\right)$$

- Diese Formel wird für jede Farbkomponente **R**, **G**, **B** angewandt

$$I^R = I_L^R \frac{1}{C_1 + C_2 r_L^2 + C_3 r_L^2} \cos \theta \cdot K_D^R$$

$$I^G = I_L^G \frac{1}{C_1 + C_2 r_L^2 + C_3 r_L^2} \cos \theta \cdot K_D^G$$

$$I^B = I_L^B \frac{1}{C_1 + C_2 r_L^2 + C_3 r_L^2} \cos \theta \cdot K_D^B$$

- In Wirklichkeit müsste man das für jede Wellenlänge  $\lambda$  getrennt ausrechnen.

$$\cos \theta \text{ durch } \max(0, \langle N, L \rangle)$$

- Für unendlich ferne *Lichtquellen* lässt man den Term  $\frac{1}{C_1 + C_2 r_L^2 + C_3 r_L^2}$  weg.  $I_L$  hat eine andere Bedeutung.  $L$  ist dann konstant.
- Man betrachtet auch „diffuses Licht“. Es kommt aus allen Richtungen gleich stark.

$$I = I_{L,D} \cdot K_D \quad \text{für } R, G, B \text{ getrennt}$$

- Um die Helligkeit eines Flächenstücks (in  $R, G, B$ ) zu berechnen, werden die Ergebnisse der verschiedenen Lichtquellen und der diffusen Beleuchtung aufsummiert.

[Bilder für die nachfolgenden Vorlesungen werden später hinzugefügt]

## 6.2 Spiegeln Reflexion

$L'$  ist der an  $N$  gespiegelte Vektor, die der „idealen Spiegelung“

$$\alpha = \angle(A, L')$$

Modell von BUI-TONG PHONG: Intensität ist proportional zu  $\cos^n \alpha$

Formel für spiegelnde Reflexion:

$$I^X = I_L^X \cdot \frac{1}{C_0 + C_1 r + C_2 r^2} \cdot K_S \cdot \cos^n \alpha, \quad X = R, G, \text{ oder } B$$

$I_L$ ... Intensität der Lichtquelle ( $I_L^R, I_L^G, I_L^B$ )

$\frac{1}{C_0 + C_1 r + C_2 r^2}$ ... Abhängigkeit von der Entfernung der Lichtquelle

$K_S$ ... spiegelnde Reflexionskoeffizient *unabhängig von der Farbe!*

$n$ ... Exponent: gibt an wie glatt die Spiegelung ist

$\frac{1}{C_0 + C_1 r + C_2 r^2}$ ... Abhängigkeit von der Entfernung der Lichtquelle

$I^R, I^G, I^B$ ... Ergebnis-Intensität aus Sicht des Auges

$L_0$ ... Projektion von  $L$  auf  $N$

$$= \langle L, N \rangle \cdot N$$

$$L' = -(L - L_0) + L_0 = 2L_0 - L, \|L'\| = 1$$

$$\cos \alpha = \langle A, L' \rangle = \langle A, 2L_0 \rangle - \langle A, L \rangle$$

$$= 2\langle L, N \rangle \langle N, A \rangle - \langle A, L \rangle$$

$$= \cos \alpha$$

**Näherungsmodell** (einfacher zu rechnen)

$H$  der Vektor, der symmetrisch zwischen  $A$  und  $L$  liegt.

$$H_0 = A + L$$

$$H = \frac{H_0}{\|H_0\|}$$

Statt  $\cos \alpha$  nimmt man  $\cos \beta, \beta = \angle(H, N)$

$$\cos \beta = \langle H, B \rangle \quad \beta = 0 \Leftrightarrow \alpha = 0$$

$\beta = \frac{\alpha}{2}$ , wenn  $L, N, A$  in einer Ebene liegen. Im Raum ist das nicht immer der Fall.

## 6.3 Gesamtbeleuchtung

- mehrere Lichtquellen an bestimmten Orten (bzw. aus bestimmten Richtungen) mit Intensität  $I_L^R, I_L^G, I_L^B$
- eine diffuse Lichtquelle mit Intensität  $I_D^R, I_D^G, I_D^B$

Für jede Fläche:

- diffuse Reflexionskoeffizienten  $K_D^R, K_D^G, K_D^B$
- spiegelnde Reflexionskoeffizienten  $K_S$ , Exponent  $n$
- möglicherweise eine Eigenleuchtintensität  $I_E^R, I_E^G, I_E^B$  (z. B. Leuchtschirm, glühendes Ofenrohr, flächig leuchtende Lichtquelle)

Für jedes Flächenstück addiert man alle Beleuchtungskomponenten zusammen (falls die Fläche sichtbar vom Auge ist).

$$\begin{aligned} I^R = & \sum \text{diffuse Reflexionen von allen Lichtquellen, die das Flächenstück beleuchten.} \\ & + I_D^R \cdot K^R \\ & + \text{spiegelnde Reflexionen von allen Lichtquellen, die das Flächenstück beleuchten.} \\ & + I_E^R \end{aligned}$$

analog für  $I^G, I^B$

eigentlich liefert die Rechnung in jedem Punkt der Fläche ein anderes Ergebnis.

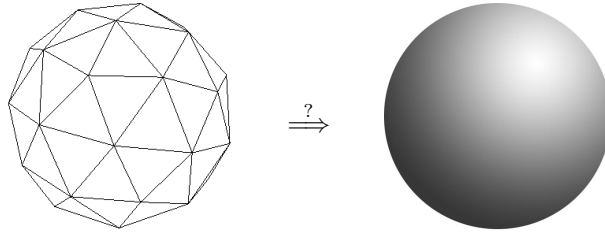
**Problem** Die Intensität kann in einzelnen Punkten des Bildes  $> 1$  werden. 2 Möglichkeiten

1. herunterskalieren aller Werte  
z. B.  $(r; g; b) = (3; 1; 0,5) \rightarrow (1, \frac{1}{3}, \frac{1}{6})$
2. zu große Werte werden auf 1 gesetzt (dadurch können auch Farben verfälscht werden)  
z. B.  $(r; g; b) = (3; 1; 0,5) \rightarrow (1, 1, 0,5)$   
(sehr rotes orange) (helles gelb)

## 6.4 Schattierung (Shading)

Alle folgenden Rechnungen in Weltkoordinaten

**Definition** Unter *Shading* versteht man die Anwendung der Beleuchtungsregeln auf jeden Punkt einer Fläche, sodass sich eine abgestufte Farbverteilung ergibt, die realistisch aussieht.



- Gekrümmte Flächen können durch ein genügend feines *Dreiecksnetz* (oder Vierecksnetz) approximiert werden.
- Große flache Flächen können in kleinere Dreiecke zerlegt werden.

GOURAUD-Schattierung für ein Dreiecksnetz:

- Berechne die Beleuchtung für jede Ecke eines Dreiecks, mit einem Normalvektor, der für jede Ecke fest ist (unabhängig von dem Dreieck zu dem es gehört). z. B. der Normalvektor der glatten Fläche, die durch das Dreiecksnetz approximiert wird.
- Interpoliere die Beleuchtung linear auf jedem Dreieck

Die Gouraud-Schattierung, versagt z. B. bei Glanzlichtern (können verschwinden oder unnatürlich vergrößert werden) und sehr großen Flächen:

PHONG-Schattierung:

~~diffuse Lichtquelle~~ *Umgebungslicht* (ambient light)

- An den Ecken werden die Normalen genommen. Dazwischen werden die Normalenrichtungen angenähert interpoliert und mit diesen Normalen in jedem Punkt die Beleuchtungsrechnung durchgeführt

Am Punkt  $P = \lambda P_2 + (1 - \lambda)P_1$  wird der folgende Normalvektor genommen:

$$N = \frac{\lambda N_2 + (1 - \lambda)N_1}{\|\lambda N_2 + (1 - \lambda)N_1\|}$$

$$P = \lambda P_1 + \lambda_2 P_2 + \lambda_3 P_3 \rightarrow N = \frac{\lambda_1 N_1 + \lambda_2 N_2 + \lambda_3 N_3}{\|\lambda_1 N_1 + \lambda_2 N_2 + \lambda_3 N_3\|}, \quad (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1)$$

Aufwendiger zu rechnen als Gouraud-Schattierung

### 6.4.1 Ausfüllen einer gerasterten Fläche

**Annahme** Fläche ist ein Dreieck

$$y_1 \leq y_2 \leq y_3$$

$P_2$  links von  $P_1 P_3$

in  $P_1, P_2, P_3$  sind Intensitätswerte  $I_1, I_2, I_3$  berechnet worden, diese sollen linear interpoliert werden. (z. B. bei Gouraud-Schattierung) eigentlich sollte man die Interpolation in Weltkoordinaten machen, und für  $R, G, B$  getrennt.

Setpixel( $x, y, I$ )  
 ↑  
 ganzzahlig

Wir füllen das Dreieck zeilenweise

```
FuelleZeile( $x_{\text{links}}$ ,  $x_{\text{rechts}}$ ,  $y$ ,  $I_{\text{links}}$ ,  $\Delta I$ )
    //  $\Delta I = I(x+1, y) - I(x, y)$  = unabhaengig von  $x$  und  $y$ ,
    // weil  $I$  eine lineare Funktion ist

     $x := \lceil x_{\text{links}} \rceil$ 
     $I := I_{\text{links}} + \Delta I \cdot (x - x_{\text{links}})$ 
    while  $x \leq x_{\text{rechts}}$ 
        Setpixel( $x, y, I$ )
         $x := x + 1$ 
         $I := I + \Delta I$ 
```

äußere Schleife:

1. untere Hälfte

$$\Delta x_{\text{links}} = \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1}$$

Ziel: auf der Geraden  $P_1P_2$  gilt  $x = x_1 + (y - y_1) \cdot \Delta x_{\text{links}}$

$$\Delta x_{\text{links}} = \frac{x_3 - x_1}{y_3 - y_1}$$

$$\Delta I_{\text{links}} = \frac{I_2 - I_1}{y_2 - y_1}$$

Ziel: auf der Geraden  $P_1P_2$  gilt  $I = I_1 + (y - y_1) \cdot \Delta I_{\text{links}}$

$$\Delta I = \frac{(I_1 + \Delta I_{\text{rechts}}) - (I_1 + \Delta I_{\text{links}})}{(x_1 + \Delta x_{\text{rechts}}) - (x_1 + \Delta x_{\text{links}})}$$

$$= \frac{\Delta I_{\text{rechts}} - \Delta I_{\text{links}}}{\Delta x_{\text{rechts}} - \Delta x_{\text{links}}}$$

$$\text{mit } \Delta I_{\text{rechts}} = \frac{I_3 - I_1}{y_3 - y_1}$$

```
 $y = \lceil y_1 \rceil$ ;  $x_{\text{links}} := x_1 + (y - y_1) \cdot \Delta x_{\text{links}}$ 
 $x_{\text{rechts}} := x_1 + (y - y_1) \cdot \Delta x_{\text{rechts}}$ 
 $I_{\text{links}} := I_1 + (y - y_1) \cdot \Delta I_{\text{links}}$ 
while  $y \leq y_2$ 
    FuelleZeile( $x_{\text{links}}$ ,  $x_{\text{rechts}}$ ,  $y$ ,  $I_{\text{links}}$ ,  $\Delta I$ )
     $y := y + 1$ 
     $x_{\text{links}} := x_{\text{links}} + \Delta x_{\text{links}}$ 
     $x_{\text{rechts}} := x_{\text{rechts}} + \Delta x_{\text{rechts}}$ 
     $I_{\text{links}} := I_{\text{links}} + \Delta I_{\text{links}}$ 
```

2. obere Hälfte

$$\Delta x_{\text{links}} := \frac{x_3 - x_2}{y_3 - y_2}; \Delta I_{\text{links}} := \frac{I_3 - I_2}{y_3 - y_2}$$

$$y := y + 1; x_{\text{rechts}} := x_{\text{rechts}} + \Delta x_{\text{links}}$$

$$x_{\text{links}} := x_2 + (y - y_2) \cdot \Delta x_{\text{links}}$$

$$I_{\text{links}} := I_2 + (y - y_2) \cdot \Delta I_{\text{links}}$$

```
while  $y \leq y_3$ 
    FuelleZeile( $x_{\text{links}}$ ,  $x_{\text{rechts}}$ ,  $y$ ,  $I_{\text{links}}$ ,  $\Delta I$ )
     $y := y + 1$ 
     $x_{\text{links}} := x_{\text{links}} + \Delta x_{\text{links}}$ 
     $x_{\text{rechts}} := x_{\text{rechts}} + \Delta x_{\text{rechts}}$ 
     $I_{\text{links}} := I_{\text{links}} + \Delta I_{\text{links}}$ 
```

## 6.5 Entfernen verdeckter und teilweise verdeckter Flächen

1. Painter's Algorithmus
2. Tiefenpuffer
3. Überstreichen (swap)

### 6.5.1 Painter's Algorithmus

Finde eine Reihenfolge der Flächen nach vorn, „male“ die Flächen in dieser Reihenfolge.

**Problem** zyklische Abhängigkeiten:



**Lösung** Flächen in kleinere Flächen zerlegen

### 6.5.2 Tiefenpuffer (z-Puffer)

Jeder Bildpunkt speichert zusätzlich einen  $z$ -Wert (größere Werte sind weiter hinten)

$\text{Setpixel}(x, y, z, I)$  bzw.  $\text{Setpixel}(x, y, z, I^R, I^G, I^B)$

Vergleiche  $z$  mit dem für  $(x, y)$  gespeicherten  $z$ -Wert, wenn kleiner, dann überschreibe  $z, I$ , andernfalls ignoriere.

Beim zeichnen eines ebenen Flächenstückes ist  $z$  linear von  $x$  und  $y$  abhängig.  $z$  interpoliert zwischen den 3 Ecken  $P_i(x_i, y_i, z_i), i = 1, 2, 3$

**Nachteil** (von beiden Verfahren) Aufwand ist proportional zu gezeichneten Gesamtfläche und nicht zur sichtbaren Fläche (nicht sichtbare Flächen werden auch gezeichnet bzw. zu zeichnen versucht).