

# Einführung in die Computergrafik

Johannes Riesterer

20. November 2015

©Johannes Riesterer

Vervielfältigung nur mit ausdrücklicher Erlaubnis des Autors

## **Vorwort**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Mathematische Werkzeuge</b>	<b>5</b>
1.1	Lineare Algebra . . . . .	5
1.1.1	Vektoren und Matrizen . . . . .	5
1.2	Affiner Raum und affine Abbildungen . . . . .	13
1.2.1	Homogene Koordinaten und Projektionen . . . . .	15
<b>2</b>	<b>Kurven, Flächen und Netze</b>	<b>16</b>
2.1	Polygone, Netze und Elemente der diskreten Geometrie . . . . .	17
2.2	Datenstrukturen . . . . .	25
2.2.1	Subdivision . . . . .	28
2.3	Modellierung . . . . .	28
2.3.1	Parameterdarstellungen . . . . .	28
2.3.2	Bezier Kurven und Flächen . . . . .	30
<b>3</b>	<b>Echtzeitvisualisierung und OpenGL</b>	<b>35</b>
3.1	Geschichte . . . . .	35
3.2	GL-Pipeline . . . . .	35
3.2.1	Geometrie . . . . .	36
3.2.2	Rasterung . . . . .	37
3.3	Lokale Beleuchtungsmodelle . . . . .	40
3.3.1	Ideale und diffuse Reflexionen . . . . .	40
3.3.2	Lambert Modell . . . . .	40
3.3.3	Phong Modell . . . . .	41
3.4	Shader und standard Algorithmen . . . . .	42
3.4.1	Programmierung . . . . .	42
3.4.2	shading . . . . .	42
3.4.3	Texturen und UV-Mapping . . . . .	42
3.4.4	Bumpmapping . . . . .	43
3.4.5	Displacementmapping . . . . .	45
3.4.6	Shadowmap . . . . .	46
3.4.7	Bumpmapping . . . . .	46
3.5	GLSL via WebGL . . . . .	49
<b>4</b>	<b>Raytracing</b>	<b>49</b>
4.1	Farbwahrnehmung und Farbmodelle . . . . .	49
4.2	Globale Beleuchtungsmodelle und Rendergleichung . . . . .	49
4.3	Raycasting . . . . .	49
4.3.1	”Klassisches”Raytracing . . . . .	49
4.3.2	Monte Carlo Integration und Pathtracing . . . . .	49
4.3.3	Datenstrukturen für Bereichsabfragen . . . . .	49
4.4	Raymarching . . . . .	49
4.5	Labor . . . . .	49
4.5.1	Blender . . . . .	49
4.5.2	Echtzeitfähiges Raymarching in WebGL . . . . .	49

<b>5</b>	<b>Animation und Simulation</b>	<b>49</b>
5.1	Keyframe Animation . . . . .	49
5.2	Partikelsysteme . . . . .	49
5.3	Elemente der Kollisionserkennung . . . . .	49
5.4	Labor . . . . .	49
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>50</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>51</b>

# 1 Mathematische Werkzeuge

## 1.1 Lineare Algebra

### 1.1.1 Vektoren und Matrizen

Wir wollen zunächst den Vektorraum  $\mathbb{R}^n$  einführen. Hierbei ist  $n$  eigentlich immer 2, 3 oder 4. Zunächst ist der  $\mathbb{R}^n$  eine Menge, nämlich die Menge der  $n$ -dimensionalen Vektoren

$$\mathbb{R}^n := \left\{ \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \mid x_1, x_2, \dots, x_n \in \mathbb{R} \right\}.$$

Auf dieser Menge der Vektoren definiert man die Addition

$$+ : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$$
$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} x_1 + y_1 \\ x_2 + y_2 \\ \vdots \\ x_n + y_n \end{pmatrix}$$

und die sogenannte Skalarmultiplikation

$$\cdot : \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$$
$$\lambda \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} \lambda \cdot x_1 \\ \lambda \cdot x_2 \\ \vdots \\ \lambda \cdot x_n \end{pmatrix}.$$

Das Element  $\lambda \in \mathbb{R}$  nennt man auch Skalar.

**Definition 1.** Der Vektorraum  $\mathbb{R}^n$  ist das Tripel  $(\mathbb{R}^n, +, \cdot)$ .

**Beispiel 1.**

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \\ 4 \\ 4 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ -\frac{1}{2} \\ 2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ -\frac{1}{2} \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$-1 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$\pi \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \pi \\ 2\pi \\ 3\pi \\ 4\pi \end{pmatrix}$$

**Bemerkung 1.** Für alle Skalare  $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$  und Vektoren  $u, v \in \mathbb{R}^n$  gelten die Rechenregeln

$$\begin{aligned} \lambda \cdot (u + v) &= \lambda \cdot u + \lambda \cdot v \\ (\lambda + \mu) \cdot u &= \lambda \cdot u + \mu \cdot u . \end{aligned}$$

**Definition 2.** Für ein  $u, v \in \mathbb{R}^n$  sind die folgenden Kurz-Notationen üblich

$$\begin{aligned} -u &:= -1 \cdot u \\ u - v &:= u + (-v) := u + (-1 \cdot u) \end{aligned}$$

**Definition 3.** Eine  $n \times m$  Matrix ist ein Objekt der Form

$$(a_{ij})_{ij} := \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & \cdots & a_{1,m} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} & \cdots & a_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{i,1} & a_{i,2} & a_{i,3} & \cdots & a_{i,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & a_{n,3} & \cdots & a_{n,m} \end{pmatrix}$$

mit  $a_{i,j} \in \mathbb{R}$  für alle  $i = 1, \dots, n$  und  $j = 1, \dots, m$ .

**Bemerkung 2.** Ein Vektor der dimension  $n$  ist eine  $n \times 1$ -Matrix.

**Definition 4.** Ist  $A = (a_{ij})_{ij}$  eine  $n \times m$  und  $B = (b_{kl})_{kl}$  eine  $m \times p$  Matrix so ist das Matrizenprodukt definiert als die  $n \times p$  Matrix

$$A \cdot B := \left( \sum_{j=1}^m a_{ij} \cdot b_{jl} \right)_{il} .$$

Sind  $A$  und  $B$  zwei  $n \times m$ -Matrizen so ist ihre Summer definiert durch

$$A + B := \left( a_{ij} + b_{ij} \right)_{ij} .$$

Für ein  $\lambda \in \mathbb{R}$  definieren wir die Skalarmultiplikation

$$\lambda \cdot A := \left( \lambda \cdot a_{ij} \right)_{ij} .$$

**Definition 5.** Die  $n$ -dimensionale Einheitsmatrix ist definiert durch

$$I_n := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & & \ddots & & \vdots & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

**Bemerkung 3.** Sind  $A$  und  $B$  beides  $n \times n$ -Matrizen, so ist im Allgemeinen

$$A \cdot B \neq B \cdot A.$$

Für die  $n$ -te Einheitsmatrix  $I_n$  gilt jedoch immer

$$A \cdot I_n = I_n \cdot A = A.$$

**Definition 6.** Für eine  $2 \times 2$ -Matrix definieren wir die Determinante

$$\det : M^{n \times n} \rightarrow \mathbb{R}$$

$$\det \left( \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \right) := ad - bc$$

**Satz 1.** Für eine  $n \times n$  Matrix  $A = (a_{ij})_{ij}$  definieren wir die Determinante durch die Rekursionsformel

$$\det(A) = \sum_{j=1}^n (-1)^{i+j} a_{ij} \det(A_{ij})$$

und  $\det(a) = a$  für eine  $1 \times 1$ -Matrix  $a$ , wobei  $A_{ij}$  die Matrix ist, die aus  $A$  durch Streichen der  $i$ -ten Zeile und der  $j$ -ten Spalte entsteht. Diese Definition ist unabhängig von der Wahl von  $i$ . (Entwickeln nach der  $i$ -ten Zeile).

**Satz 2.** Für alle  $n \times n$ -Matrizen  $A, B$  gilt

$$\det(A \cdot B) = \det(A) \cdot \det(B)$$

**Satz 3.** Sei  $A$  eine  $n \times n$  Matrix. Dann existiert genau dann eine Matrix  $A^{-1}$  mit

$$A \cdot A^{-1} = A^{-1} \cdot A = I_n,$$

wenn  $\det(A) \neq 0$ .  $A^{-1}$  ist eindeutig bestimmt.

**Bemerkung 4.** Ist  $v$  ein  $n$ -dimensionaler Vektor und  $A$  eine  $m \times n$ -Matrix, so ist  $A \cdot v$  ein  $m$ -dimensionaler Vektor.



**Definition 7.** Ist  $A := (a_{ij})_{ij}$  eine  $n \times m$ -Matrix, so heißt die  $m \times n$ -Matrix  $A^t := (a_{ji})_{ij}$  die transponierte Matrix.

**Definition 8.** Ist insbesondere  $v = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_k \end{pmatrix}$  ein  $k$ -dimensionaler Vektor, so heisst

$v^t = (x_1 \ \cdots \ x_n)$  der transponierte Vektor, welcher auch eine  $1 \times n$ -Matrix ist.

**Satz 4.** Für alle  $n \times m$ -Matrizen  $A$  und  $m$ -dimensionale Vektoren  $u, v$  gilt

$$A \cdot (\lambda \cdot u + \mu \cdot v) = \lambda \cdot A \cdot u + \mu \cdot A \cdot v .$$

**Definition 9.** Vektoren  $v_1, \dots, v_k \in \mathbb{R}^n$  heißen linear unabhängig, falls für  $\lambda_i \in \mathbb{R}$ ,  $i = 1, \dots, k$  mit

$$\sum_{i=1}^k \lambda_i \cdot v_i = 0$$

stets  $\lambda_i = 0$  folgt für alle  $i = 1, \dots, k$ .

**Satz 5.** Die Vektoren  $v_1, \dots, v_k \in \mathbb{R}^n$  sind genau dann linear abhängig, wenn man mit Hilfe des Gaußalgorithmus in der Matrix

$$\begin{pmatrix} v_1^t \\ \text{---} \\ \vdots \\ \text{---} \\ v_k^t \end{pmatrix}$$

eine Nullzeile erzeugen kann.

**Bemerkung 5.** Für  $k > n$  sind  $v_1, \dots, v_k \in \mathbb{R}^n$  stets linear abhängig.

**Definition 10.** Für Vektoren  $v_1, \dots, v_k \in \mathbb{R}^n$  heißt die Menge

$$\text{span}(v_1, \dots, v_k) := \left\{ \sum_{i=1}^k \lambda_i \cdot v_i \mid \lambda_i \in \mathbb{R} \right\} \subseteq \mathbb{R}^n$$

der von ihnen aufgespannte lineare Unterraum. Diese Definition ist offensichtlich unabhängig von der Reihenfolge. Eine Menge von Vektoren  $\{w_1, \dots, w_l\}$  heißt Basis von  $\text{span}(v_1, \dots, v_k)$ , falls  $w_1, \dots, w_l$  linear unabhängig sind und  $\text{span}(w_1, \dots, w_l) = \text{span}(v_1, \dots, v_k)$  gilt.  $l$  heißt dann auch die Dimension von  $\text{span}(v_1, \dots, v_k)$ .

**Satz 6.** Ist  $B := \{b_1, \dots, b_n\}$  eine Menge linear unabhängiger  $n$ -dimensionaler Vektoren, so ist

$$\text{span}(b_1, \dots, b_n) = \mathbb{R}^n .$$

Wir nennen dann die geordnete Menge  $B$  eine Basis des  $\mathbb{R}^n$ .

**Definition 11.** Wir bezeichnen die Basis  $E := \{e_1, \dots, e_n\}$  des  $\mathbb{R}^n$  mit

$$e_i := \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \leftarrow i\text{-te Stelle}$$

als Standardbasis des  $\mathbb{R}^n$ .

**Definition 12.** Sei  $B := \{b_1, \dots, b_n\}$  eine Basis des  $\mathbb{R}^n$  und  $v \in \mathbb{R}^n$ . Dann gibt es nach dem letzten Satz Skalare  $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{R}$ , so dass sich  $v$  als Linearkombination

$$v = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot b_i$$

ausdrücken lässt. Schreibt man diese  $\lambda_i$  wieder in einen Vektor, so erhalten wir eine Abbildung

$$\theta_B : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$$

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{pmatrix}.$$

Man nennt  $\theta_B(v)$  die Darstellung von  $v$  zur Basis  $B$ .

**Bemerkung 6.** Für die Standardbasis  $E$  des  $\mathbb{R}^n$  ist  $\theta_E(v) = v$  für alle  $v \in \mathbb{R}^n$ , also  $\theta_S = id$ .

**Definition 13.** Sei  $B := \{b_1, \dots, b_n\}$  eine Basis des  $\mathbb{R}^n$  und  $v \in \mathbb{R}^n$ . Dann definieren wir

$$M_B = \left( b_1 \mid b_2 \mid \dots \mid b_n \right)^{-1}.$$

**Satz 7.** Sei  $B := \{b_1, \dots, b_n\}$  eine Basis des  $\mathbb{R}^n$  und  $v \in \mathbb{R}^n$ . Dann ist

$$\theta_B(v) = M_B \cdot v$$

**Definition 14.** Seien  $B := \{b_1, \dots, b_n\}$  und  $B' := \{b'_1, \dots, b'_n\}$  zwei Basen des  $\mathbb{R}^n$ . Dann heißt  $M_B^{B'} := M_{B'} \cdot M_B^{-1}$  die Basiswechselmatrix von  $B$  nach  $B'$ . Wir haben also folgende Situation:

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{R}^n & \xleftarrow{M_B^{-1}} & \mathbb{R}^n \\ \downarrow I_n & & \downarrow M_B^{B'} \\ \mathbb{R}^n & \xrightarrow{M_{B'}} & \mathbb{R}^n \end{array}$$

**Definition 15.** Die Abbildung

$$\langle \cdot, \cdot \rangle: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$$

$$\left\langle \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \right\rangle := \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}^t \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = (x_1 \quad \cdots \quad x_n) \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i$$

heißt Skalarprodukt.

**Satz 8.** Für alle  $u, v, w, l \in \mathbb{R}^n$  und  $\lambda, \mu, \tau, \nu \in \mathbb{R}$  gilt

$$\begin{aligned} \langle \lambda u + \mu v, \tau w \rangle &= \lambda \tau \langle u, w \rangle + \mu \tau \langle v, w \rangle \\ \langle \lambda u, \tau w + \nu l \rangle &= \lambda \tau \langle u, w \rangle + \lambda \nu \langle u, l \rangle \end{aligned}$$

**Definition 16.** Die Abbildung

$$\begin{aligned} \|\cdot\|: \mathbb{R}^n &\rightarrow \mathbb{R} \\ \|v\| &:= \sqrt{\langle v, v \rangle} \end{aligned}$$

heißt Norm.

**Definition 17.** Zwei vom Nullvektor verschiedene Vektoren  $u, v \in \mathbb{R}^n$  heißen orthogonal, falls  $\langle u, v \rangle = 0$  ist. Man sagt auch sie stehen senkrecht aufeinander und benutzt auch die Bezeichnung  $u \perp v$ .

**Definition 18.** Ein Vektor  $v \in \mathbb{R}^n$  heißt normal, falls  $\|v\| = 1$  ist. Ist  $w \in \mathbb{R}^n$  ein beliebiger Vektor, so heißt  $\frac{1}{\|w\|}w$  die Normalisierung von  $w$ .

**Definition 19.** Eine Basis  $B := \{b_1, \dots, b_n\}$  heißt Orthonormalbasis (kurz ONB), falls

$$\langle b_i, b_j \rangle = \begin{cases} 1 & \text{falls } i = j \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

gilt. Insbesondere sind alle  $b_i$  normal.

**Algorithmus 1.** Seien  $v_1, \dots, v_n$  linear unabhängige Vektoren. Dann lässt sich daraus durch folgenden Algorithmus eine ONB generieren:

$$\begin{aligned} b'_i &:= v_i - \sum_{j=1}^{i-1} \langle v_i, b_j \rangle b_j \\ b_i &:= \frac{1}{\|b'_i\|} b'_i \end{aligned}$$

und Rekursionsanfang  $b'_1 = v_1$ .

Im  $\mathbb{R}^3$  gibt es eine besonders einfache Methode aus zwei Vektoren einen Vektor zu generieren, der auf den Ausgangs-Vektoren senkrecht steht.

**Definition 20.** Für  $u = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$  und  $v = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix}$  heißt

$$u \times v := \begin{pmatrix} u_2 v_3 - u_3 v_2 \\ u_3 v_1 - u_1 v_3 \\ u_1 v_2 - u_2 v_1 \end{pmatrix}$$

das Kreuzprodukt von  $u$  und  $v$ .

**Bemerkung 7.** Es gilt

- $\langle u \times v, u \rangle = \langle u \times v, v \rangle = 0$
- $u \times v = -(v \times u)$
- $u \times v = 0$  genau dann, wenn  $u$  und  $v$  linear abhängig sind.

**Bemerkung 8.** Ist  $B := \{b_1, \dots, b_n\}$  eine ONB, so gilt

$$M_B^{-1} = M_B^t$$

**Definition 21.** Eine Matrix  $O \in \mathbb{M}^{n \times n}$  heißt orthogonal, falls  $O^{-1} = O^t$  ist.

**Satz 9.** Eine Matrix  $O \in \mathbb{M}^{n \times n}$  ist genau dann orthogonal, falls

$$\det(O) \in \{-1, 1\}.$$

Ist  $\det(O) = 1$ , so nennen wir  $O$  eine Drehung und  $SO(n) := \{O \in \mathbb{M}^{n \times n} \mid \det(O) = 1\}$  die Drehgruppe (oder auch spezielle orthogonale Gruppe).

**Satz 10.** Sei  $O \in \mathbb{M}^{n \times n}$  eine orthogonale Matrix, dann gilt für alles  $v, w \in \mathbb{R}^n$

$$\langle O \cdot v, O \cdot w \rangle = \langle v, w \rangle$$

und somit insbesondere

$$\|O \cdot v\| = \|v\|.$$

**Definition 22.** Eine  $2 \times 2$ -Drehmatrix ist eine Matrix der Form

$$\begin{pmatrix} \cos(\varphi) & \pm \sin(\varphi) \\ \mp \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix}$$

für ein  $\varphi \in [0, 2\pi]$ .

**Bemerkung 9.** Eine  $2 \times 2$ -Drehmatrix ist eine orthogonale Matrix.

**Definition 23.** Eine elementare  $3 \times 3$ -Drehmatrix ist eine Matrix der Form

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi) & \pm \sin(\varphi) \\ 0 & \mp \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & 0 & \pm \sin(\varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \mp \sin(\varphi) & 0 & \cos(\varphi) \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & \pm \sin(\varphi) & 0 \\ \mp \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

für ein  $\varphi \in [0, 2\pi]$ .

**Satz 11.** Jede Drehung  $O \in SO(3)$  lässt sich zerlegen in ein Produkt

$$O = \begin{pmatrix} \cos(\xi) & \sin(\xi) & 0 \\ -\sin(\xi) & \cos(\xi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\psi) & 0 & \sin(\psi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\psi) & 0 & \cos(\psi) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) & 0 \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Die Winkel  $\phi, \psi, \xi$  heißen Eulerwinkel.

**Bemerkung 10.** Die Zerlegung  $O \in SO(3)$  einer Drehung in obiges Produkt ist nicht eindeutig. Ein anschauliches Beispiel dafür liefert der sogenannte "Gimbal lock".

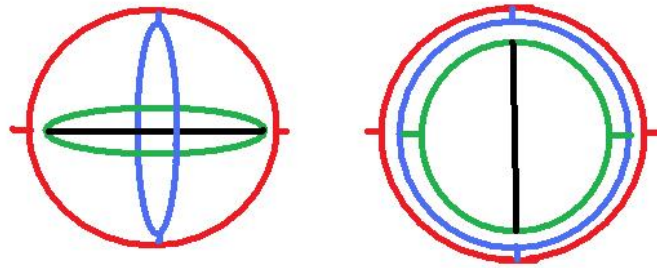


Abbildung 1: Kardansche Aufhängung und Gimbal lock

**Bemerkung 11.** Man kann bei der Produktzerlegung auch andere elementare Drehmatrizen (elementare Drehachsen) wählen, wobei eine spezielle Wahl zu den in der Luft und Raumfahrt verwendeten "Roll, Nick, Gier" Winkeln führen.

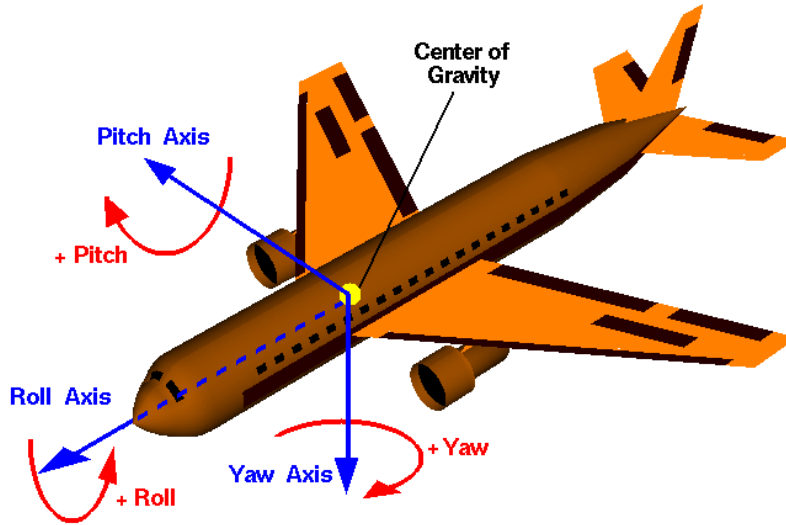


Abbildung 2: Roll, Nick und Gier Winkel

## 1.2 Affiner Raum und affine Abbildungen

Der Affine Raum  $\mathbb{A}^n$  ist ein Tupel

$$(\mathbb{R}^n, (\mathbb{R}^n, +, \cdot))$$

zusammen mit den Abbildung

$$\begin{aligned} - : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n &\rightarrow (\mathbb{R}^n, +, \cdot) \\ \overline{PQ} &:= Q - P \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} + : \mathbb{R}^n \times (\mathbb{R}^n, +, \cdot) &\rightarrow \mathbb{R}^n \\ \begin{pmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} &:= \begin{pmatrix} P_1 + v_1 \\ \vdots \\ P_n + v_n \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Die Elemente (Vektoren) aus  $\mathbb{R}^n$  nennt man auch Punkte in Abgrenzung zu den Vektoren aus  $(\mathbb{R}^n, +, \cdot)$ . Für Punkte  $P, Q \in \mathbb{R}^n$  ist also  $\overline{PQ}$  ein Vektor, auch Verbindungsvektor genannt.

**Definition 24.** Ist  $B := \{b_1, \dots, b_n\}$  eine Basis des Vektorraums  $(\mathbb{R}^n, +, \cdot)$  und  $P \in \mathbb{A}$  ein Punkt, so nennen wir das Tupel  $(P, B)$  eine affine Basis. Für jeden Punkt  $Q$  gibt es dann also Skalare  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  mit

$$Q = P + \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot b_i.$$

Der Punkt  $\begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{pmatrix}$  heißt die Darstellung von  $Q$  bezüglich der affinen Basis  $(P, B)$ .

**Definition 25.** Abbildungen der Form

$$\begin{aligned}\phi &: \mathbb{A} \rightarrow \mathbb{A} \\ \phi(P) &:= A \cdot P + t\end{aligned}$$

mit  $A \in M^{n \times n}$  und  $t \in (\mathbb{R}^n, +, \cdot)$  heißen affine Abbildungen. Insbesondere heißt eine affine Abbildung mit  $A = I_n$  und  $t \neq 0$  Translation.

**Bemerkung 12.** Eine Affine Abbildung

$$\begin{aligned}\phi &: \mathbb{A}^n \rightarrow \mathbb{A}^n \\ \phi(P) &:= A \cdot P + t\end{aligned}$$

ist genau dann invertierbar, falls  $\det(A) \neq 0$  ist und die Inverse Abbildung ist dann

$$\begin{aligned}\phi^{-1} &: \mathbb{A} \rightarrow \mathbb{A} \\ \phi^{-1}(P) &:= A^{-1} \cdot P - A^{-1} \cdot t.\end{aligned}$$

**Definition 26.** Sind  $(P, B := \{b_1, \dots, b_n\})$  und  $(P', B' := \{b'_1, \dots, b'_n\})$  zwei affine Basen und definieren wir die Abbildung

$$\begin{aligned}\theta_{(P,B)} &: \mathbb{A}^n \rightarrow \mathbb{A}^n \\ \theta_{(P,B)}(Q) &:= M_B \cdot Q - M_B \cdot P,\end{aligned}$$

so erhalten wir analog zu der Situation in Vektorräumen

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{A}^n & \xleftarrow{\theta_{(P,B)}^{-1}} & \mathbb{A}^n \\ \downarrow id & & \downarrow \theta_{(P,B)}^{(P',B')} \\ \mathbb{A}^n & \xrightarrow{\theta_{(P',B')}} & \mathbb{A}^n \end{array}$$

mit  $\theta_{(P,B)}^{(P',B')}(Q) := \theta_{(P',B')} \left( \theta_{(P,B)}^{-1}(Q) \right)$ .

**Definition 27.** Der Abstand von  $P, Q \in \mathbb{A}$  ist definiert durch

$$\begin{aligned}d &: \mathbb{A} \times \mathbb{A} \rightarrow \mathbb{R} \\ d(P, Q) &:= \|\overline{PQ}\|.\end{aligned}$$

### 1.2.1 Homogene Koordinaten und Projektionen

**Definition 28.** Der projektive Raum ist definiert als

$$\mathbb{P}^n := \mathbb{R}^{n+1} / \sim$$

$$v \sim w \Leftrightarrow v = \lambda w \text{ für ein } \lambda \neq 0 \in \mathbb{R}.$$

Wir haben die Abbildung

$$\mathbb{A}^n \rightarrow \mathbb{P}^n$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_n \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_n \\ 1 \end{pmatrix}$$

und nennen das Bild eines Punktes unter dieser Abbildung die homogenen Koordinaten. Auf der Menge der homogenen Koordinaten haben wir die Umkehrabbildung

$$\mathbb{P}^n - \left\{ \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_n \\ p_{n+1} \end{pmatrix} \mid p_{n+1} \neq 0 \right\} \rightarrow \mathbb{A}^n$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_n \\ p_{n+1} \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} \frac{p_1}{p_{n+1}} \\ \frac{p_2}{p_{n+1}} \\ \vdots \\ \frac{p_n}{p_{n+1}} \end{pmatrix}.$$

Die Matrizenmultiplikation

$$\mathbb{R}^{n+1} \rightarrow \mathbb{R}^{n+1}$$

$$v \mapsto A \cdot v$$

setzt sich wegen der Eigenschaft  $A \cdot (\lambda v) = \lambda A \cdot v$  zu einer Abbildung

$$\mathbb{P}^n \rightarrow \mathbb{P}^n$$

$$p \mapsto A \cdot p$$

fort. Wir können damit und mit der Definition der Matrix-Vektor-Multiplikation eine affine Abbildung

$$\phi : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$$

$$\phi(v) := A \cdot v + t$$



in homogenen Koordinate ausdrücken durch eine Matrizenmultiplikation

$$\begin{pmatrix} v \\ 1 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} A & t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v \\ 1 \end{pmatrix}.$$

**Definition 29.** *Die Abbildung*

$$\begin{aligned} \text{persp}_{xy} : \mathbb{A}^3 &\rightarrow \mathbb{A}^2 \\ \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} &\mapsto \begin{pmatrix} \frac{X}{\frac{Z}{d}+1} \\ \frac{Y}{\frac{Z}{d}+1} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

die Zentralprojektion auf die  $X - Y$ -Ebene mit Augendistanz  $d$ .

**Bemerkung 13.** *Die Zentralprojektion auf die  $X - Y$ -Ebene mit Augendistanz  $d$  lässt sich nicht durch Multiplikation mit einer  $2 \times 3$ -Matrix realisieren.*

Definieren wir die Matrix

$$K_{\text{persp}_{xy}} := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{d} & 1 \end{pmatrix}$$

und

$$K_{\text{orth}_{xy}} := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

so können wir die Zentralprojektion auf die  $X - Y$ -Ebene mit Augendistanz  $d$  durch die Hintereinanderausführung folgender Abbildungen darstellen:

$$\begin{aligned} \text{persp}_{xy} : \mathbb{R}^3 &\rightarrow \mathbb{A}^3 \rightarrow \mathbb{A}^3 \rightarrow \mathbb{A}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2 \\ \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} &\mapsto \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \mapsto K_{\text{persp}_{xy}} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ \frac{z}{d} + 1 \end{pmatrix} \\ &\mapsto K_{\text{orth}_{xy}} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ \frac{z}{d} + 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ \frac{z}{d} + 1 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} \frac{x}{\frac{z}{d}+1} \\ \frac{y}{\frac{z}{d}+1} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

## 2 Kurven, Flächen und Netze

Die rechnergestützte Beschreibung von Kurven und Flächen ist ein wichtiges Gebiet der Computergrafik. Es ermöglicht die Berechnung geometrischer und physikalischer Eigenschaften von Körpern so wie deren graphische Darstellung.

Eine zentrale Rolle spielen hierbei geometrische Objekte, die durch Punkte, Kanten und einfache Flächen, wie zum Beispiel Dreiecke oder Vierecke, beschrieben werden können. Man spricht dann auch entsprechend von Dreiecks- bzw. Vierecksnetzen. Häufig sind dabei nicht alle möglichen Konstruktionen zulässig und es hat sich ein Struktur herausgebildet, die für die Computergrafik besonders geeignet ist. Zum einen, weil seine grafische Darstellung besonders schnell und einfach möglich ist und zum anderen, weil viele Berechnungen bestimmte Voraussetzungen benötigen, man denke da zum Beispiel an die Oberfläche oder das Volumen eines Körpers. Von Bedeutung sind in diesem Kontext auch geeignete Datenstrukturen, mit deren Hilfe sich diese Strukturen und gängige Berechnungen effizient verarbeiten lassen. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist das generieren und modellieren solcher Strukturen. Hierbei treten häufig sogenannte Interpolationsprobleme auf. Sie entstehen aus dem Wunsch heraus, Kurven und Flächen nur durch die Angabe von Punkten zu generieren.

## 2.1 Polygone, Netze und Elemente der diskreten Geometrie

**Definition 30.** *Ein geschlossenes Polygon ist ein Paar  $P := (V_P, E_P)$ , wobei*

$$E_P := \{e_0, \dots, e_k\} \subset \mathbb{A}^3,$$

*eine geordnete Menge von paarweise verschiedenen Punkten, die auch Ecken genannt werden, und*

$$K_P := \left\{ (e_0, e_1) \dots, (e_{k-1}, e_k), (e_k, e_0) \right\} \subset \mathbb{A}^3 \times \mathbb{A}^3$$

*die zugehörige Menge der gerichteten Kanten ist. Ist  $(e_{l-1}, e_l) \in K_P$  eine gerichtete Kante, so bezeichnen wir mit*

$$|(e_{l-1}, e_l)| := \{e_{l-1} + t \cdot \overline{e_{l-1}e_l} \mid t \in [0, 1]\}$$

*ihre geometrische Realisierung oder einfach Kante und mit*

$$|P| := \bigcup_{(e_{l-1}, e_l) \in K_P} |(e_{l-1}, e_l)|$$

*die geometrische Realisierung des Polygons oder geometrisches Polygon.*

*Ein (geschlossenes) Polygon heißt **einfach**, falls der Schnitt zweier geometrischer Kanten entweder leer oder genau ein Punkt aus  $V$  ist. Es heißt **planar**, falls alle Punkte  $e \in V_P$  in einer Ebene liegen.*

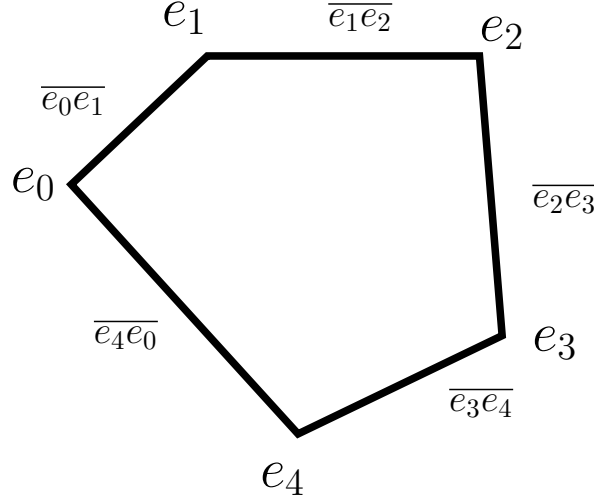


Abbildung 3: Geschlossenes Polygon

**Definition 31.** Wir nennen ein geschlossenes Polygon  $P'$  eine **Nummerrierung** von  $P$ , falls  $E_{P'} = E_P$  (als Mengen) und  $|P'| = |P|$  ist.

Wie wir gleich sehen werden, definiert die Reihenfolge der Punkte eines einfachen, geschlossenen, planaren Polygons eine Orientierung. Um diesen Sachverhalt präzise definieren zu können, benötigen wir einen Satz, der auf den ersten Blick als selbstverständlich erscheint aber rein mathematisch betrachtet tatsächlich schwer zu beweisen ist. Es handelt sich um den Jordanschen Kurvensatz:

**Satz 12.** Sei  $P$  ein einfaches, geschlossenes, planares Polygon und  $U$  die Ebene, in der alle seine Punkte liegen. Dann unterteilt die geometrische Realisierung  $|P|$  die Ebene  $U$  in genau zwei Gebiete, ein beschränktes, das das Innere des Polygons genannt wird, und ein unbeschränktes, das das Äußere des Polygons genannt wird.

**Definition 32.** Wir bezeichnen das Innere eines Polygons  $P$  mit  $|\overset{\circ}{P}|$ .

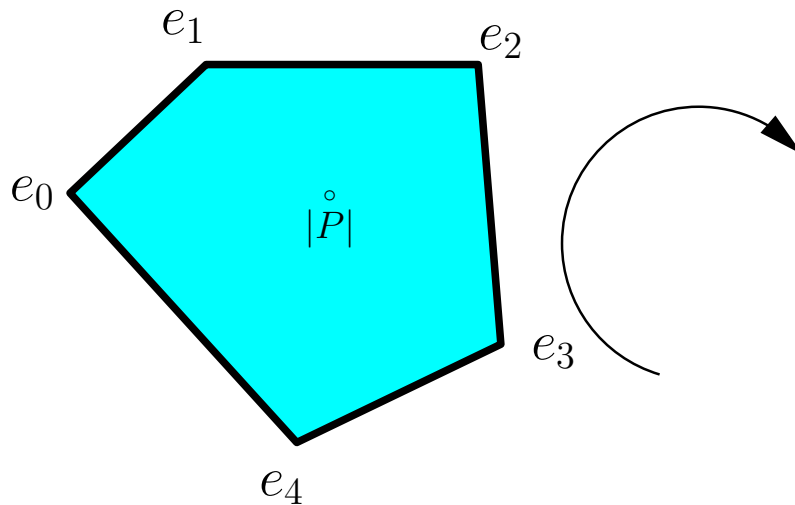
Mit Hilfe des Jordanschen Kurvensatzes können wir nun sagen, was die Durchlaufrichtung einer Kante ist und schließlich ob ein Polygon mit oder gegen den Uhrzeigersinn orientiert ist.

**Definition 33.** Sei  $P$  ein einfaches, geschlossenes, planares Polygon. Eine gerichtete Kante  $(e_{l-1}, e_l) \in E_P$  hat **positive Durchlaufrichtung**, falls beim Durchlaufen der Kante  $|(e_{l-1}, e_l)|$  von  $e_{l-1}$  nach  $e_l$  das innere des Polygons stets rechts von der Kante liegt und **negative Durchlaufrichtung**, falls es stets links von ihr liegt.

**Definition 34.** Ein einfaches, geschlossenes, planares Polygon  $P$  heißt im Uhrzeigersinn orientiert, falls eine und damit alle gerichteten Kanten positive Durchlaufrichtung haben und entsprechend gegen den Uhrzeigersinn orientiert bei negativer Durchlaufrichtung.

$$P = \{e_0, e_1, e_2, e_3, e_4\}$$

$$K_P = \{(e_0, e_1), (e_1, e_2), (e_2, e_3), (e_3, e_4), (e_4, e_0)\}$$



$$P' = \{e_0, e_4, e_3, e_2, e_1\}$$

$$K_{P'} = \{(e_0, e_4), (e_4, e_3), (e_3, e_2), (e_2, e_1), (e_1, e_0)\}$$

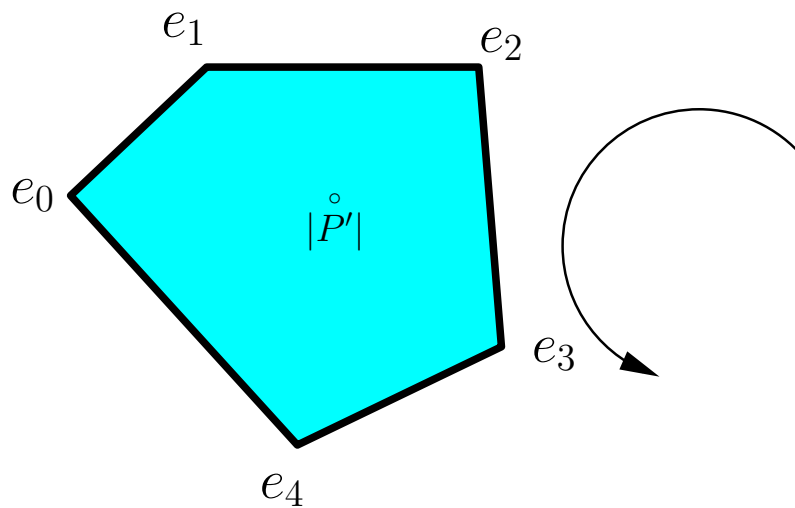


Abbildung 4: Gerichtete Polygone

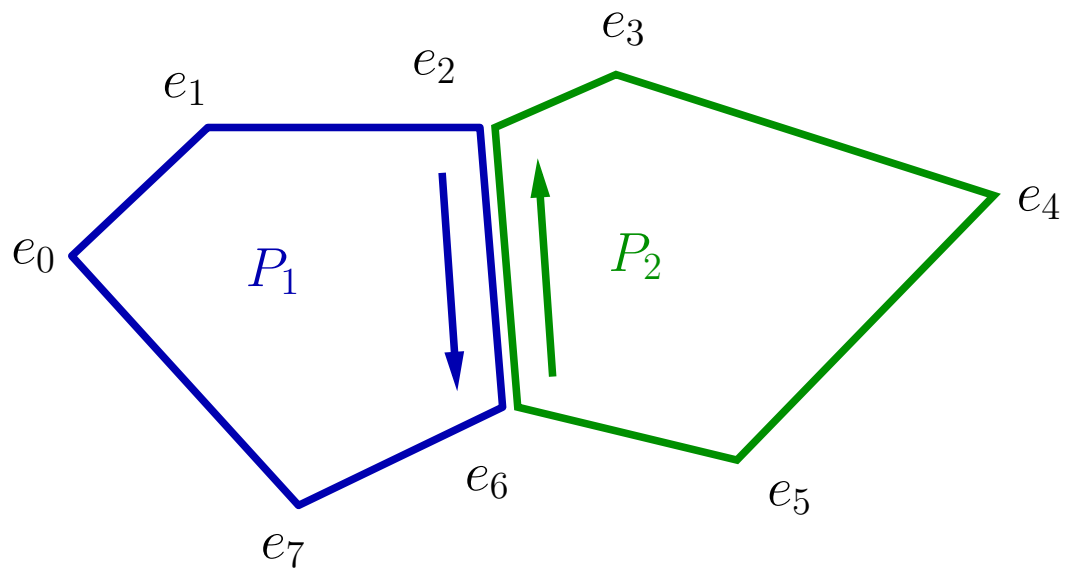
Netze bestehen nun im wesentlichen aus an den Kanten zusammengeklebten, einfachen, geschlossenen, planaren Polygonen.

**Definition 35.** Sei  $N := \bigcup P_i$  die Vereinigung endlich vieler, einfacher, geschlossener, planarer Polygone,  $E_N := \bigcup E_{P_i}$  und  $K_N := \bigcup E_{P_i}$  die Vereinigung der Ecken beziehungsweise der Kantenmengen. Analog zu der Definition eines Polygons definieren wir die geometrischen Realisierungen  $|K_N| := \bigcup |P_i|$  und  $|N| := \bigcup |\overset{\circ}{P}_i| \bigcup |K_N|$

- Dann heißt  $N$  **Netz**, falls Der Schnitt zweier Polygone entweder leer, ein Punkt in  $E_N$  oder eine Kante in  $K_N$  ist.
- Die Menge aller Kanten, die nur zu einem Polygon gehören, heißt Rand von  $N$  und wird mit  $\partial N$  bezeichnet.
- Ein Netz heißt **geschlossen**, falls es keinen Rand gibt, in Zeichen  $\partial N = \emptyset$ .
- Die Polygone des Netzes werden auch als Facetten bezeichnet.

Durch die Orientierung von Polygonen können wir nun den Begriff der Orientierung und der Orientierbarkeit eines Netzes einführen.

**Definition 36.** Ein Netz  $N$  heißt orientierbar, falls man alle seine Polygone so nummerieren kann, dass jede gemeinsame Kante zweier Polygone jeweils entgegengesetzt gerichtet ist.



$$P_1 = \{e_0, e_1, e_2, e_6, e_7\}$$

$$P_2 = \{e_2, e_3, e_4, e_5, e_6\}$$

Abbildung 5: Orientierbare Fläche

**Bemerkung 14.** Ist eine Fläche orientierbar und nummeriert man die Polygone so, dass benachbarte Kanten entsprechend der Definition immer entgegengesetzt gerichtet sind, so sind entweder alle seine Polygone im oder alle seine Polygone gegen den Uhrzeigersinn orientiert.

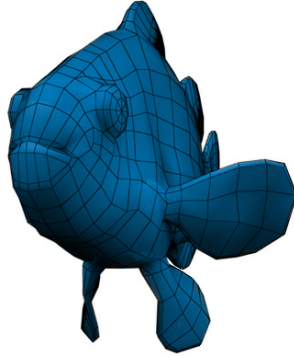


Abbildung 6: Ein geschlossenes, orientierbares Netz. Quelle:CGAL

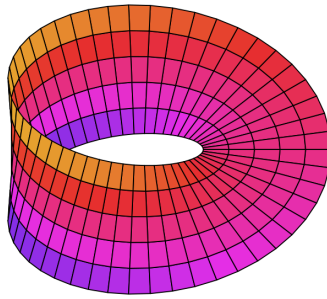


Abbildung 7: Das sogenannte Möbiusband ist hingegen nicht orientierbar. Es ist nicht geschlossen, sondern hat einen zusammenhängenden Rand. Quelle:Wikipedia

**Definition 37.** Eine Orientierung ist die Wahl einer Klasse von Nummerierungen, so dass alle Polygone entweder im oder gegen den Uhrzeigersinn orientiert sind.

**Bemerkung 15.** Ein Netz hat entweder genau zwei oder keine Orientierung.

**Definition 38.** Sei  $N$  ein orientierbares Netz mit einer Orientierung so gewählt, dass alle Polygone gegen den Uhrzeigersinn orientiert sind. Wählt man für jedes Polygon  $P_i \in N$  drei benachbarte Ecken  $e_{j-1}^{P_i}$ ,  $e_j^{P_i}$  und  $e_{j+1}^{P_i}$ , so erhalten wir mit  $n_{P_i} = e_j^{P_i} e_{j+1}^{P_i} \times e_j^{P_i} e_{j-1}^{P_i}$  einen Vektor, der Senkrecht auf der Ebene steht in der das Polygon liegt. Wir nennen die Menge  $\{P_0, \dots, P_n\}$  das äußere Normalenfeld des Netzes.



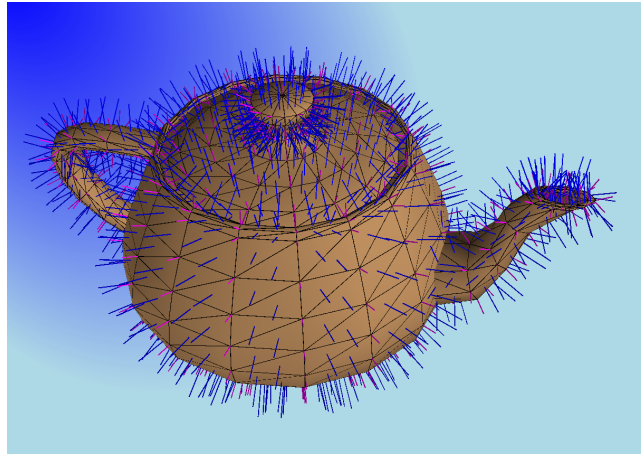


Abbildung 8: Das äußere Normalenfeld

Eine wichtige Größe für ein Netz ist die sogenannte Eulercharakteristik, welche in direkter Beziehung zum sogenannten Geschlecht eines Netzes steht.

**Definition 39.**  $N := \bigcup P_i$  ein Netz. Dann ist die Eulercharakteristik definiert als

$$\chi(N) := \#(E_N) - \#(|K_N|) + \#(N)$$

Sie ist also die Anzahl der Punkte, minus die Anzahl der geometrischen Kanten, plus die Anzahl der Facetten.

Das Geschlecht eines geschlossenen Netzes ist anschaulich gesprochen die Anzahl an Löchern, die durch das geometrische Netz hindurch gehen. Dies lässt sich mit einigem Aufwand mathematisch präzise definieren, jedoch für unsere Zwecke reicht eine Definition durch Beispiele.

**Definition 40.** Sei  $N$  ein geschlossenes Netz. Dann bezeichnen wir mit

$$g(N) := \text{Anzahl der Löcher in } |N|$$

Beispiele:

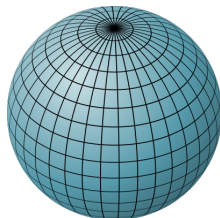


Abbildung 9: Geschlossenes Netz vom Geschlecht 0. Quelle:Wikipedia

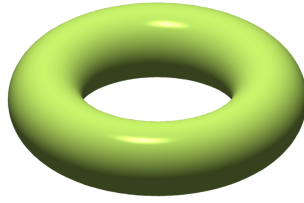


Abbildung 10: Geschlossenes Netz vom Geschlecht 1. Quelle:Wikipedia



Abbildung 11: Geschlossenes Netz vom Geschlecht 2. Quelle:Wikipedia

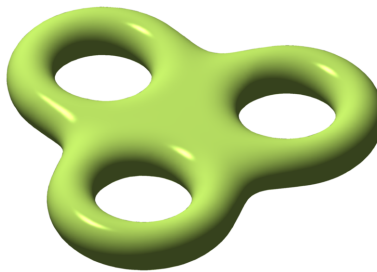


Abbildung 12: Geschlossenes Netz vom Geschlecht 3. Quelle:Wikipedia

Der Zusammenhang zwischen der Eulercharacteristik und dem Geschlecht wurde im allgemeinen Fall von dem Mathematiker Henri Poincare und vorher in einem Spezialfall von Leonard Euler bewiesen.

**Satz 13.** Für ein geschlossenes Netz  $N$  gilt  $\chi(N) = 2 - 2g(N)$ .

**Bemerkung 16.** Nach dem Satz lässt sich das Geschlecht und somit die Anzahl der Löcher via  $g(N) = \frac{2 - \chi(N)}{2}$  berechnen.

## 2.2 Datenstrukturen

**Definition 41.** Eine Liste ist eine Datenstruktur, in der man Objekte unter Beachtung der Reihenfolge speichern kann. Für eine Liste von Objekten

$O_1, \dots, O_n$  verwenden wir die Notation

$$E = (O_1, \dots, O_n)$$

Jedes Element kennt seinen Vorgänger und Nachfolger und man kann direkt auf das  $i$ -te Element zugreifen:

$$\begin{aligned} E[i] &:= O_i \\ \text{prev}(E[i]) &:= O_{i-1} \\ \text{next}(E[i]) &:= O_{i+1} \end{aligned}$$

Dabei bezeichnet  $\text{prev}(E[i])$  den Vorgänger und  $\text{next}(E[i])$  den Nachfolger, wobei

$$\forall l \in \mathbb{N} : \{E[l] = \text{NULL} \mid (l > n) \vee (l < 0)\}$$

$i$  wird auch als Index des  $i$ -ten Listenelements bezeichnet.

**Definition 42** (Eckenliste). In einer Liste  $E = (e_1, e_2, \dots, e_n)$  werden Referenzen auf die Ecken gespeichert. Eine Referenz im  $\mathbb{R}^3$  könnte so aussehen:

$$e_k = \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{pmatrix}$$

Die  $i$ -te Facette wird als Liste  $F_i = (i_1, \dots, i_l)$  von Referenzen auf die Eckenliste gespeichert. Die  $k$ -te Ecke der  $i$ -ten Facette kann so z.B. mit  $E[F_i[k]]$  referenziert werden.

Vor- und Nachteile:

- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>+ Einfach zu implementieren</li> <li>+ Orientierung kann durch Konvention gespeichert werden</li> <li>- Nachbarschaftsbeziehungen</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>nicht enthalten / schwierig zu berechnen</li> <li>- Die Zugehörigkeit einer Ecke zu einer Kante muss immer berechnet werden</li> <li>- Point-in-Mesh, Abstandsberechnungen, Schnittprobleme und ähnliches fast unmöglich zu berechnen</li> </ul> |
|---|---|

**Definition 43** (Kantenliste). In einer Liste  $E = (e_1, e_2, \dots, e_n)$  werden Referenzen auf die Ecken gespeichert. In einer Liste  $K$  werden die Kanten in einer zwei Elementen Liste von Indizes auf die Eckenliste abgespeichert:

$$K = ((i_{e_1}, i_{e_n}), \dots, (i_{e_1}, i_{e_m}))$$

Die  $k$ -te Facette wird als Liste von Indizes auf die Kantenliste gespeichert:

$$F_k = (j_1, \dots, j_l)$$

In einer Liste  $M$  werden die Indizes auf Facetten in einer zwei Elementen Liste abgespeichert, die die entsprechende Kante in der Kantenliste als Kante haben:

$$M = ((i_1, i_2), \dots, (l_1, l_2))$$

$M[i] \in M$  sind also zwei Facetten, die  $K[i] \in K$  als Kante haben. Der erste Eintrag der Facette befindet sich links und der zweite rechts von der Kante. Ist die Kante eine Randkante, so wird der andere Wert auf  $-1$  gesetzt.

Vor- und Nachteile:

- |   |  |
|---|--|
| + Nachbarschaftsbeziehungen der Polygone werden gespeichert | - Orientierung der Kanten geht verloren (schwierig zu speichern) |
|---|--|

**Definition 44** (Halfedge). In einer Liste  $E = (e_1, e_2, \dots, e_n)$  werden Referenzen auf die Ecken gespeichert. Es wird eine Datenstruktur namens Halfedge eingeführt. Eine Halfedge  $e$  besitzt<sup>1</sup>:

- Index auf den Anfangs- und Endpunkt ( $i_b$  und  $i_e$ )
- Referenzen auf die gegenüberliegende Kante  $\text{twin}(e)$   
(Bei dieser sind die Anfangs- und Endpunkte vertauscht.)
- Referenzen auf die vorangehende  $\text{prev}(e)$  und die folgende  $\text{next}(e)$  Halfedge
- Referenz auf die Facette, die sie berandet

Die unendliche oder äußere Zelle wird wieder mit  $-1$  bezeichnet. Eine Facette ist dann eine Liste mit Referenzen von Halfedges, beziehungsweise reicht auch die Referenz auf eine Halfedge.

Vor- und Nachteile:

- |  |                                       |
|--|---------------------------------------|
| + Alle kombinatorischen Daten werden effizient gespeichert | - Die Implementierung ist komplex     |
|  | - Overhead durch große Datenmengen    |
| + Auch die Orientierung der Kanten bleibt erhalten         | - Nur für orientierbare Netze nutzbar |

---

<sup>1</sup>Siehe auch Abbildung 13 auf der nächsten Seite

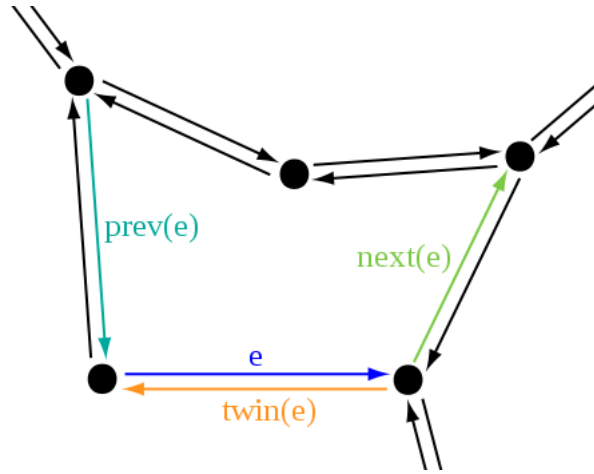


Abbildung 13: Halfedge. Quelle:Wikipedia

### 2.2.1 Subdivision

## 2.3 Modellierung

### 2.3.1 Parameterdarstellungen

**Definition 45.** Eine Kurve ist eine Abbildung

$$c : I \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^3$$

$$c(t) := \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix}$$

bei der die Funktionen  $x, y, z : I \rightarrow \mathbb{R}$  stetig sind. Sie heisst differenzierbar, falls  $x, y, z$  differenzierbar sind und die Ableitung ist dann definiert als

$$c' : I \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^3$$

$$c'(t) := \begin{pmatrix} x'(t) \\ y'(t) \\ z'(t) \end{pmatrix}.$$

**Beispiel 2.** Die Kurve  $c : [0, 2\pi] \rightarrow \mathbb{R}^3$ ,  $c(t) := \begin{pmatrix} r \cos(t) \\ r \sin(t) \\ 0 \end{pmatrix}$  beschreibt einen Kreis mit Radius  $r$ , der in der  $XY$ -Ebene liegt. Die Ableitung ist

$$c'(t) = \begin{pmatrix} (r \cos(t))' \\ (r \sin(t))' \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r \sin(t) \\ r \cos(t) \\ 0 \end{pmatrix}.$$

**Beispiel 3.** Die Kurve  $c : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^3$ ,  $c(t) := \begin{pmatrix} \cos(t) \\ \sin(t) \\ t \end{pmatrix}$  beschreibt eine sogenannte *Helix*. Die Ableitung ist

$$c'(t) = \begin{pmatrix} \cos'(t) \\ \sin'(t) \\ t' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin(t) \\ \cos(t) \\ 1 \end{pmatrix}.$$

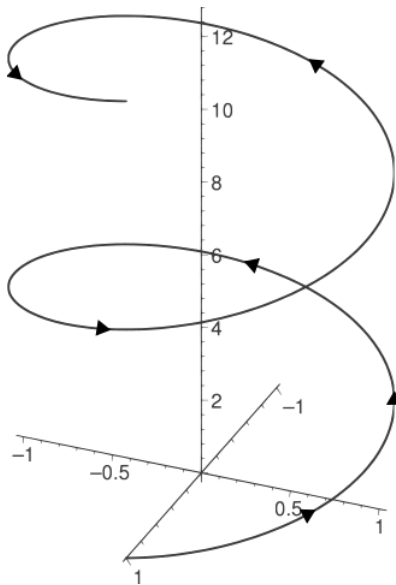


Abbildung 14: Eine Helix. Quelle:Wikipedia

**Definition 46.** Ist  $c : I \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^3$  eine stückweise differenzierbare Kurve, so heißt

$$l(c) := \int_I \|c'(t)\| dt$$

ihre Länge.

**Definition 47.** Ein Fläche ist eine Abbildung

$$s : U \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$$

$$s(u, v) := \begin{pmatrix} x(u, v) \\ y(u, v) \\ z(u, v) \end{pmatrix}$$

bei der die Abbildungen  $x, y, z : U \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$  stetig sind. Sie heißt differenzierbar, falls die partiellen Ableitungen

$$\frac{\partial}{\partial u} s(u, v) = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial u} x(u, v) \\ \frac{\partial}{\partial u} y(u, v) \\ \frac{\partial}{\partial u} z(u, v) \end{pmatrix}$$

und

$$\frac{\partial}{\partial v} s(u, v) = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial v} x(u, v) \\ \frac{\partial}{\partial v} y(u, v) \\ \frac{\partial}{\partial v} z(u, v) \end{pmatrix}$$

existieren. Die Ebene

$$T_s(u, v) := \left\{ s(u, v) + \lambda \cdot \frac{\partial}{\partial u} s(u, v) + \mu \cdot \frac{\partial}{\partial v} s(u, v) \mid \lambda, \mu \in \mathbb{R} \right\}$$

heißt Tangentialebene am Punkt  $(u, v)$  und der Vektor

$$n(u, v) := \frac{\partial}{\partial u} s(u, v) \times \frac{\partial}{\partial v} s(u, v),$$

welcher Senkrecht auf dieser Ebene steht, die Normale.

### 2.3.2 Bezier Kurven und Flächen

**Definition 48.** Die Bernsteinpolynome vom Grad  $n$  sind definiert als

$$B_i^n(t) := \binom{n}{i} (1-t)^{n-i} t^i$$

mit  $i = 0, \dots, n$ ,  $t \in [0, 1]$  und dem Binomialkoeffizient

$$\binom{n}{i} := \frac{n!}{i!(n-i)!} = \frac{n(n-1) \cdots 1}{i(i-1) \cdots 1 (n-i)(n-i-1) \cdots 1}.$$

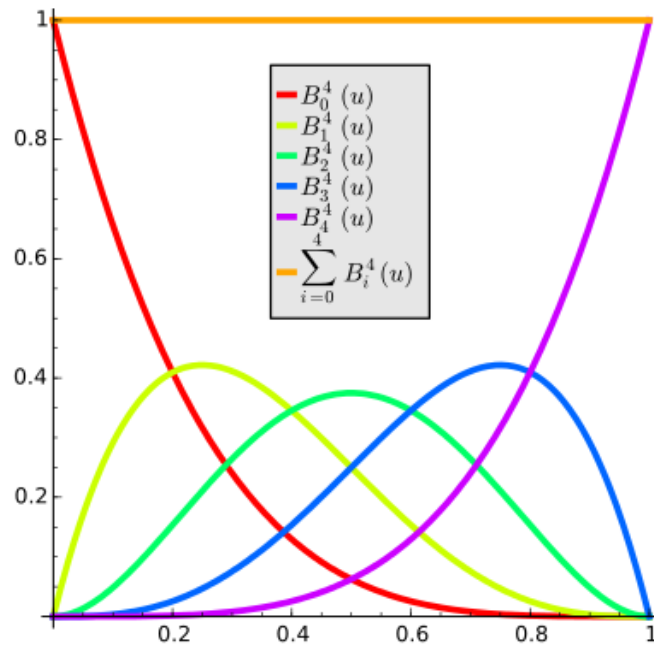


Abbildung 15: Die Bernsteinpolynome  $B_i^4$  und deren Summe. Quelle:Wikipedia

**Bemerkung 17.** Die Bernsteinpolynome vom Grad  $n$  bilden eine Basis des Vektorraums der Polynome vom Grad  $n$  im Intervall  $[0, 1]$ .

**Satz 14.** Es gilt die Rekursionsformel

$$B_i^n(t) = (1 - t) \cdot B_i^{n-1}(t) + t \cdot B_{i-1}^{n-1}(t)$$

mit  $B_0^0(t) = 1$  und  $B_n^i(t) = 0$  für  $i < 0$  oder  $i > n$ .

*Beweis.* Folgt fast direkt aus der Rekursionsformel des Binomialkoeffizienten

$$\binom{n}{i} = \binom{n-1}{i} + \binom{n-1}{i-1}$$

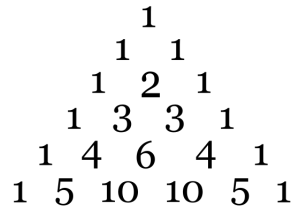


Abbildung 16: Pascalsches Dreieck



□

**Definition 49.** Seien  $b_0, \dots, b_n \in \mathbb{R}^3$ . Dann heißt die Kurve

$$B^n(t) := \sum_{i=0}^n B_i^n(t) \cdot b_i, t \in [0, 1]$$

eine Bezierkurve vom Grad  $n$ . Die  $b_i$  werden auch Kontrollpunkte genannt. Für ein beliebiges Intervall  $[a, b]$  definieren wir

$$B_{[a,b]}^n(t) := B^n\left(\frac{t-a}{b-a}\right), t \in [a, b].$$

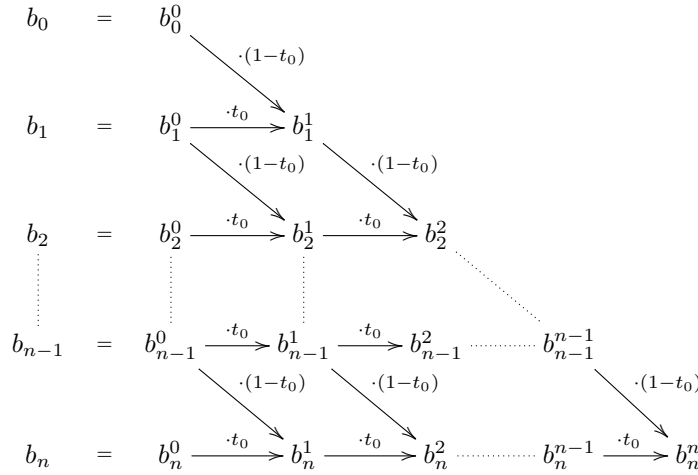
**Satz 15.** Eine Bezierkurve hat die Ableitung

- $(B^n)'(t) = n \cdot \sum_{j=0}^{n-1} B_j^{n-1}(t) \cdot (b_{j+1} - b_j)$ , und nach der Kettenregel
- $(B_{[a,b]}^n)'(t) = \frac{1}{b-a} (B^n)'(\frac{t-a}{b-a})$  für ein beliebiges Parameterintervall.

**Satz 16** (Algorithmus von de Casteljau). Sei  $B^n(t) := \sum_{i=0}^n B_i^n(t) \cdot b_i$  eine Bezierkurve. Für ein  $t_0 \in [0, 1]$  definieren wir rekursiv

$$b_i^k := \begin{cases} b_i & i = 0, \dots, n \\ (1-t_0) \cdot b_{i-1}^{k-1} + t_0 \cdot b_i^{k-1} & i = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, i \end{cases}$$

was sich schematisch folgendermaßen darstellen lässt:



Dann gilt  $b_n^n = B^n(t_0)$ .

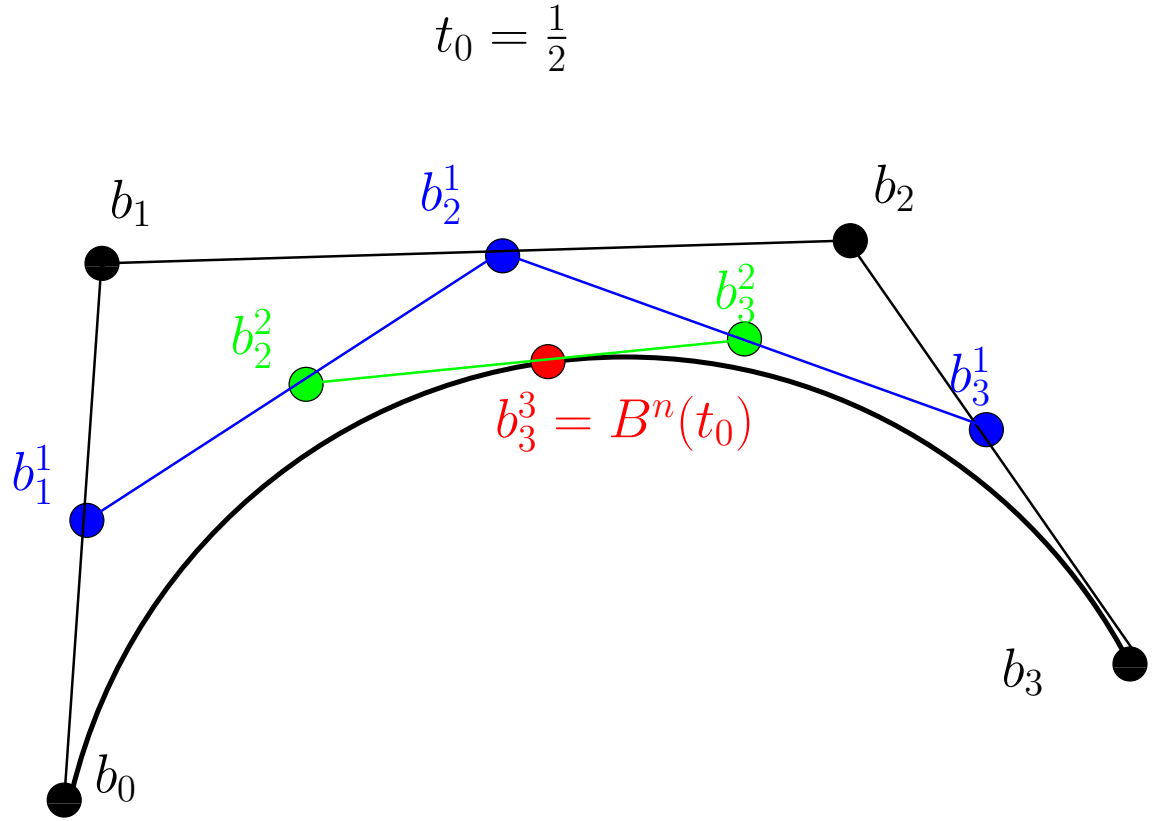


Abbildung 17: Auswertung einer Beziervurve zum Zeitpunkt  $t_0$  durch iterative Streckenteilung nach de Casteljau

**Definition 50** (Patching). Seien  $B^n(t)$  und  $(B^*)^m(t)$  Beziervurven. Man spricht von einem  $C^0$ -Patching (an der Stelle  $B^n(1)$ ), falls  $B^n(1) = (B^*)^m(0)$  gilt. Stimmen auch die Ableitungen überein, also  $(B^n)'(1) = ((B^*)^m)'(0)$ , dann spricht man von einem  $C^1$ -Patching und stimmen noch für  $k > 1$  auch die höheren Ableitungen  $(B^n)^k(1) = ((B^*)^m)^k(0)$  überein, so spricht man von einem  $C^k$ -Patching .

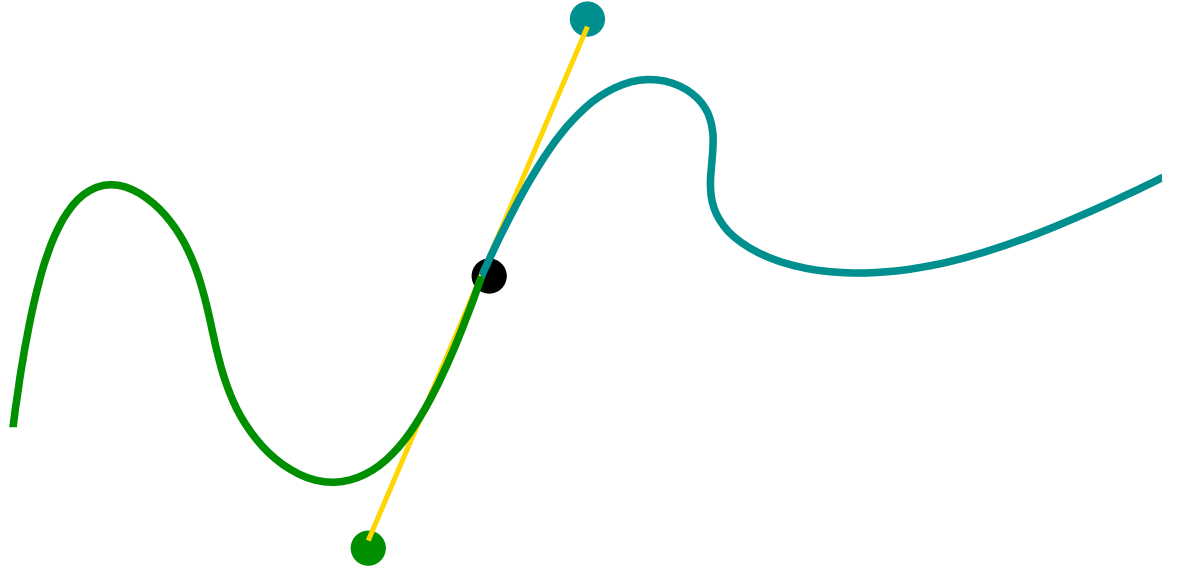


Abbildung 18: Bezier Patch

**Bemerkung 18.** Zwei Bezierkurven  $B^n(t) := \sum_{i=0}^n B_i^n(t) \cdot b_i$  und  $(B^*)^m(t) := \sum_{i=0}^m B_i^m(t) \cdot b_i^*$  bilden genau dann einen  $C^1$ -Patch (an der Stelle  $B^n(1)$ ), wenn  $B^n(1) = (B^*)^m(0)$  und  $\left(B^n(1) - b_{n-1}\right) = -\frac{m}{n} \left((B^*)^m(0) - (b^*)_1\right)$  gilt.

**Definition 51.** Ist  $B^n(t)$  eine Bezierkurve, so bilden die Bezierkurven  $(B^*)^n(t) := \sum_{i=0}^n B_i^n(t/2) \cdot b_i^i$  und  $(B^{**})^n(t) := \sum_{i=0}^n B_i^n(\frac{t+1}{2}) \cdot b_i^{n-i}$  einen  $C^1$ -Patch.

**Definition 52.** Ersetzt man in einer Bezierkurve

$$B^m(v) := \sum_{j=0}^m B_j^m(v) \cdot b_j$$

von Grad  $m$  die Kontrollpunkte  $b_j$  durch  $m+1$  Bezierkurven

$$b_j(u) = \sum_{i=0}^n B_i^n(u) \cdot b_{ij}$$

von Grad  $n$  mit jeweils  $n+1$  Kontrollpunkten  $b_{ij}$  für  $i = 0, \dots, n$ , so erhält man eine Fläche

$$F(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_i^n(u) B_j^m(v) \cdot b_{ij},$$

welche auch Tenorprodukt-Fläche der Bezierkurven oder einfach Bezierfläche genannt wird.



Abbildung 19: Ein Rendering der Utah Teekanne, eines der weit verbreitetsten 3D-Modelle in der Computergrafik. Sie wurde mit Bezierflächen modelliert.

## 3 Echtzeitvisualisierung und OpenGL

### 3.1 Geschichte

OpenGL entstand ursprünglich aus dem von Silicon Graphics (SGI) entwickelten IRIS GL. Im sogenannten Fahrenheit-Projekt versuchten Microsoft und SGI ihre 3D-Standards zu vereinheitlichen, das Projekt wurde jedoch wegen finanzieller Schwierigkeiten auf Seiten von SGI abgebrochen.

Der OpenGL-Standard wird vom OpenGL ARB (Architecture Review Board) festgelegt. Das ARB existiert seit 1992 und besteht aus einer Reihe von Firmen. Stimmberechtigte Mitglieder sind die Firmen 3DLabs, Apple, AMD/ATI, Dell, IBM, Intel, Nvidia, SGI und Sun (Stand Nov. 2004). Weiter mitwirkende Firmen sind Evans and Sutherland, Imagination Technologies, Matrox, Quantum3D, S3 Graphics, Spinor GmbH, Tungsten Graphics, und Xi Graphics. Microsoft, eines der Gründungsmitglieder, hat das ARB im März 2003 verlassen.

Neue Funktionen in OpenGL werden meist zuerst als herstellerspezifische Erweiterungen eingeführt und gehen dann den Weg über herstellerübergreifende Erweiterungen und ARB-Erweiterungen zu Kernfunktionalität. Dies erlaubt es, neueste Möglichkeiten der Grafikhardware zu nutzen und dennoch OpenGL abstrakt genug zu halten.

Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/OpenGL>

### 3.2 GL-Pipeline

Eine Computergrafik-Pipeline besteht im Wesentlichen aus den folgenden Schritten:

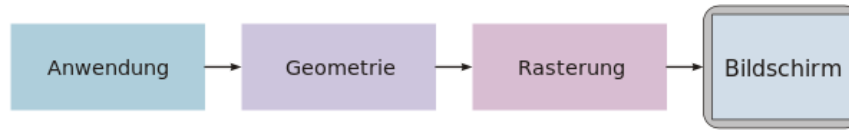


Abbildung 20: Computergrafik-Pipeline

Eine solche Pipeline wird auch von OpenGL implementiert. Es besteht jedoch die Besonderheit, dass die Geometrie und die Rasterung in Hardware realisiert ist und man durch kleine Programme, sogenannte Shader, auf diese Hardware zugreifen und Manipulationen vornehmen kann beziehungsweise seit OpenGL 2.0 sogar muss.

### 3.2.1 Geometrie

Die Geometrieverarbeitung besteht aus der Hintereinanderausführung der folgenden affinen/homogenen Abbildungen und Algorithmen:

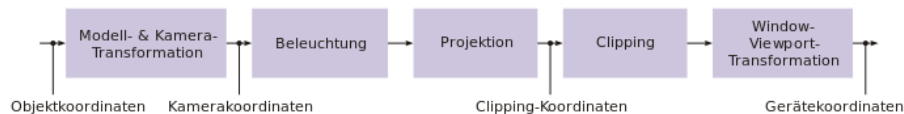


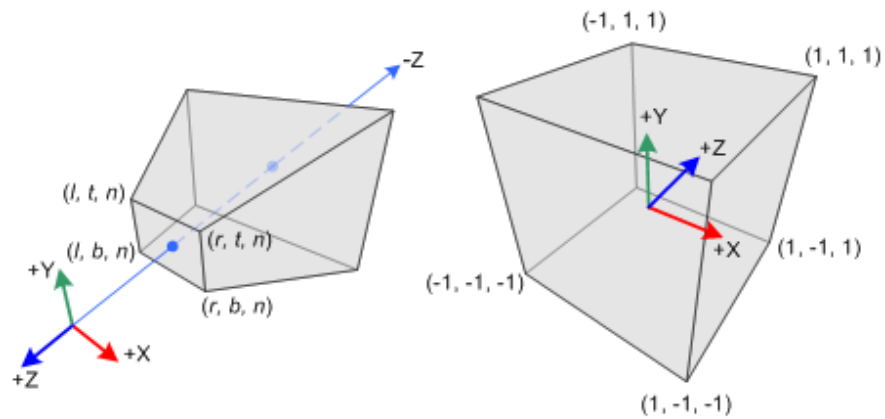
Abbildung 21: Geometrie-Pipeline

#### Modell und Kameratransformationen

Die Transformationen von Objektkoordinaten in das Kamerakoordinatensystem werden durch affine Transformationen beschrieben, welche durch Multiplikation durch homogene  $4 \times 4$ -Matrizen realisiert werden.

#### Projektion

Die Projektion wird durch Matrizen ähnlich der Projektionsmatrix  $K_{persp_{xy}}$  und  $K_{orth_{xy}}$  aus Abschnitt 1.2.1 realisiert. Es werden jedoch noch Translationen, Rotationen Stauchungen dazwischengeschaltet, die ebenfalls als  $4 \times 4$ -Matrizen realisiert werden können und mit denen diese Matrizen multipliziert werden. Man erreicht damit, dass der Kegelstumpf zwischen der vorderen Projektionsebene, auch 'nearplane' genannt, und der hinteren Ebene, auch 'farplane' genannt, in den  $[-1, 1] \times [-1, 1] \times [-1, 1]$  Würfel abgebildet wird, welcher auch Sichtvolumen genannt wird.



Die Multiplikation all diese Matrizen wird auch die MODEL-VIEW-PROJECTION-MATRIX genannt.

### Windows-Viewport-Transformation

Zuletzt müssen die zweidimensionalen Punkte noch mit Hilfe einer zweidimensionalen affine Transformation in das Koordinatensystem des Anzeigenfensters auf dem Ausgabegerät transformiert werden. Diese Transformation wird auch Windows-Viewport-Transformation genannt.

### 3.2.2 Rasterung

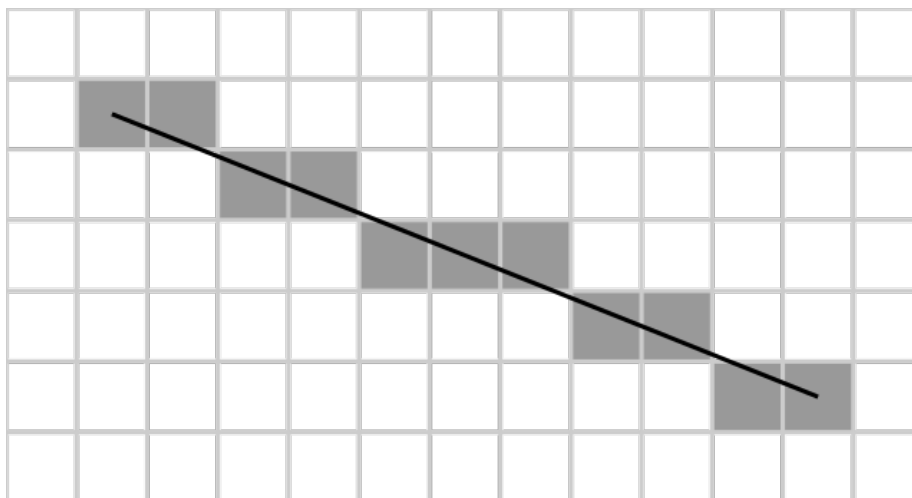


Abbildung 22: Bresenham Algorithmus

Als Rasterung bezeichnet man das transformieren kontinuierlicher, zweidimensionaler Daten auf diskrete Pixel. Anhand der gegebenen Daten muss also entschieden werden, welche Farbe ein Pixel des Ausgabegerätes erhält. Wir haben also eine Funktion  $Frame-Buffer : \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow Farbe$ . Im Bereich Echtzeitvisualisierung sind alle gängigen Rasterverfahren für Dreiecke und andere primitiven im wesentlichen Abwandlungen und Weiterentwicklungen von Algorithmen, die von Bresenham eingeführt wurden. Wir wollen uns den Bresenham Algorithmus für Linien/Strecken dazu exemplarisch anschauen.

**Algorithmus 2** (Bresenham für Strecken mit positiver Steigung).

Das Rastern erzeugt oft harte, kantige und ausgefrante Übergänge. Diese Effekte bezeichnet man auch als Aliasing. Algorithmen, die diesen Aliasing-Effekten entgegenwirken nennt man auch Antialiasing.



Abbildung 23: Eine Schrift mit und ohne Antialiasing

## Sichtbarkeitsprobleme

### Clipping

Beim 3D-Clipping werden alle Polygone verworfen, die nach der Transformation in Clipping-Koordinaten vollständig ausserhalb des Sichtvolumens  $[-1, 1] \times [-1, 1] \times [-1, 1]$  liegen. Das 2D-Clipping findet nach der Projektion der Polygone statt. Polygone, die über das Viewportfenster hinaus ragen, werden an den Fensterkanten abgeschnitten. Der wichtigste Schritt ist hierbei das Abschneiden von Strecken an diesen Kanten. Wir betrachten dazu exemplarisch den Cohen-Sutherland-Algorithmus:

**Algorithmus 3** (Cohen-Sutherland).

### Culling

Als Culling bezeichnet man das Entfernen von Polygonen anhand Ihrer Orientierung. Man definiert, welche Orientierung eine Rückseite darstellt und verwirft dann Polygone mit dieser Orientierung.

### z-Buffer

Der Z-Buffer enthält für jedes Pixel  $(u, v)$  nach der Rasterung einen Wert zwischen  $-1$  und  $1$ . Dieser Wert ist der Abstand zum nächsten Punkt eines Polygons in Clipping-Koordinaten von diesem Pixel auf der Projektionsebene. Wir haben somit eine Funktion

$$Z - Buffer : \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow [-1, 1] .$$

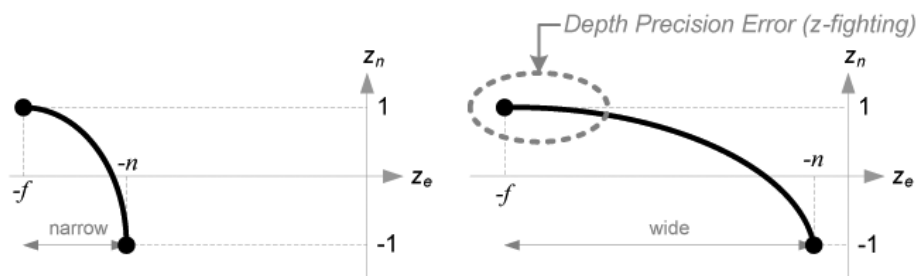


Abbildung 24: Z-Buffer-War

**Algorithmus 4** (z-Buffer Algorithmus). Setze Alle Einträge im Z-Buffer auf 1 (Hintergrund). Setze alle Einträge im Framebuffer auf die Hintergrundfarbe.  
 $\forall$  Polygone  $P$ :

begin:

Transformiere das Polygon in Clipping-Koordinaten.

Transformiere das Polygon in Rasterkoordinaten.

$\forall$  erhaltenen Pixel  $(u, v)$ :

begin:

$pz :=$  Z-Koordinate des Polygons in Clipping-Koordinaten zum entsprechenden Pixel

$zz :=$  Eintrag im Z-Buffer für das Pixel  $(u, v)$

if  $pz < zz$ :

begin:

$Z - Buffer(u, v) := pz$

$Frame - Buffer(u, v) := Farbe(P, (u, v))$

end

end

end



### 3.3 Lokale Beleuchtungsmodelle

#### 3.3.1 Ideale und diffuse Reflexionen

#### 3.3.2 Lambert Modell



Abbildung 25: Lambert Modell diffuser Reflektion

### 3.3.3 Phong Modell

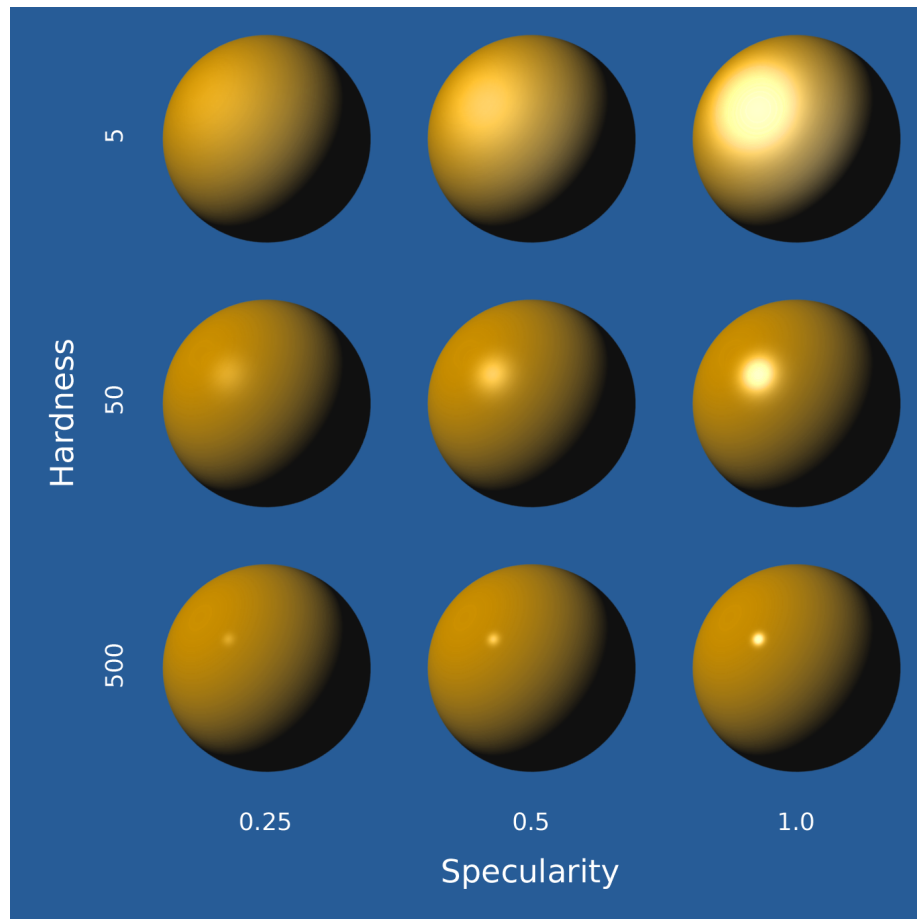


Abbildung 26: Phong Modell mit spiegelnder Reflexion

### 3.4 Shader und standard Algorithmen

#### 3.4.1 Programmierung

#### 3.4.2 shading

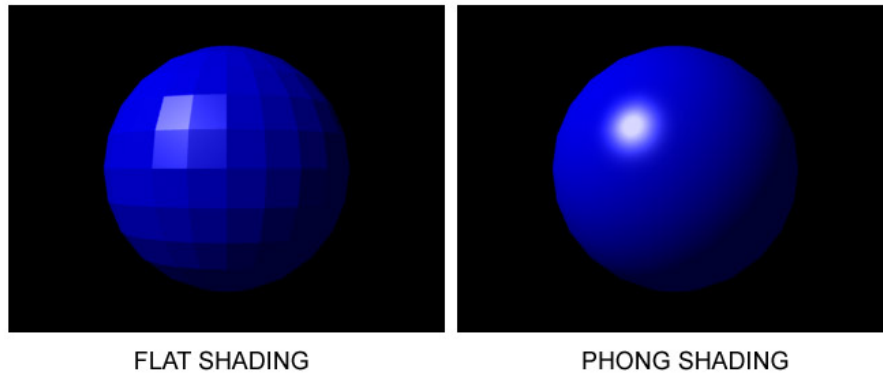


Abbildung 27: shadowmap

#### 3.4.3 Texturen und UV-Mapping

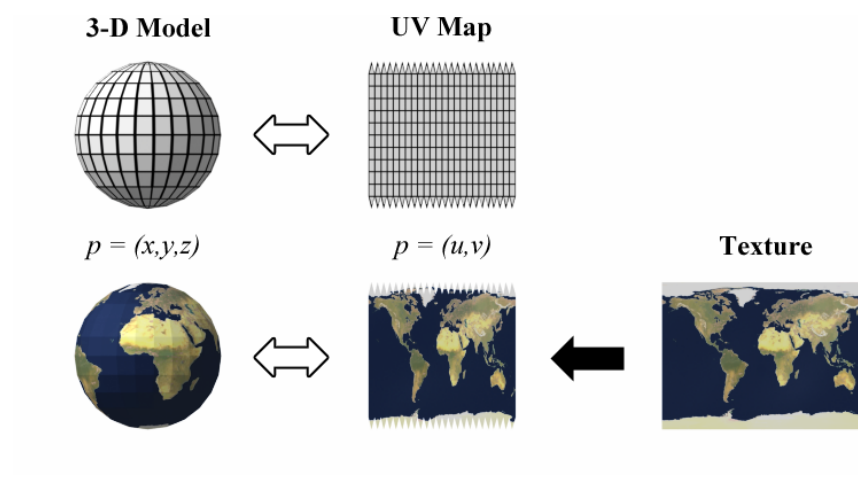


Abbildung 28: uv mapping



Abbildung 29: uv mapping

#### 3.4.4 Bumpmapping

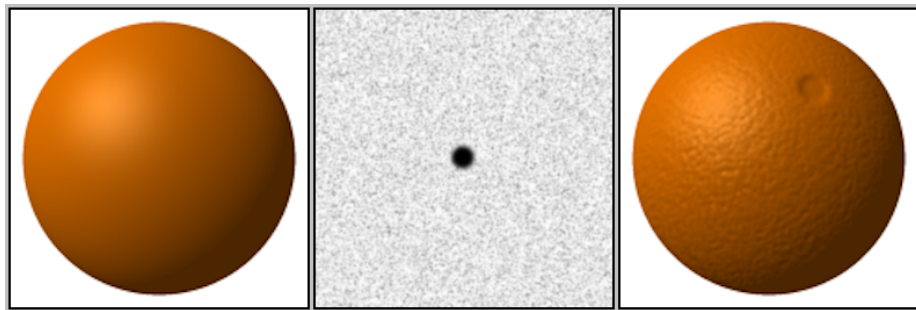
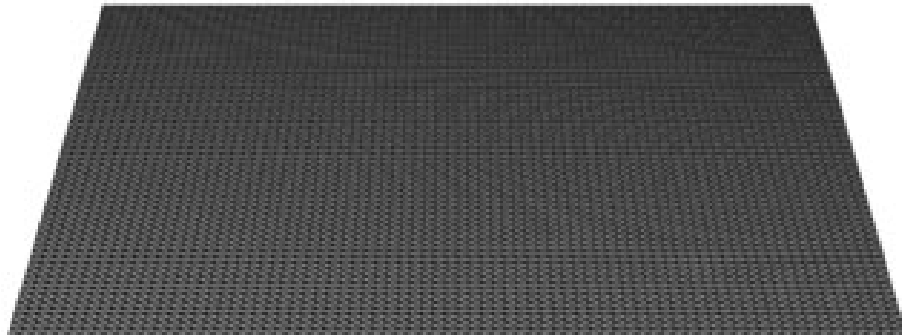


Abbildung 30: uv mapping



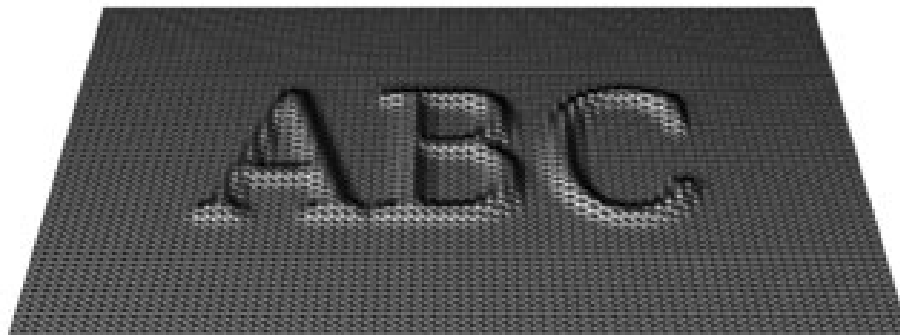
### 3.4.5 Displacementmapping



ORIGINAL MESH



DISPLACEMENT MAP



MESH WITH DISPLACEMENT

Abbildung 31: Displacementmapping

#### 3.4.6 Shadowmap

#### 3.4.7 Bumpmapping

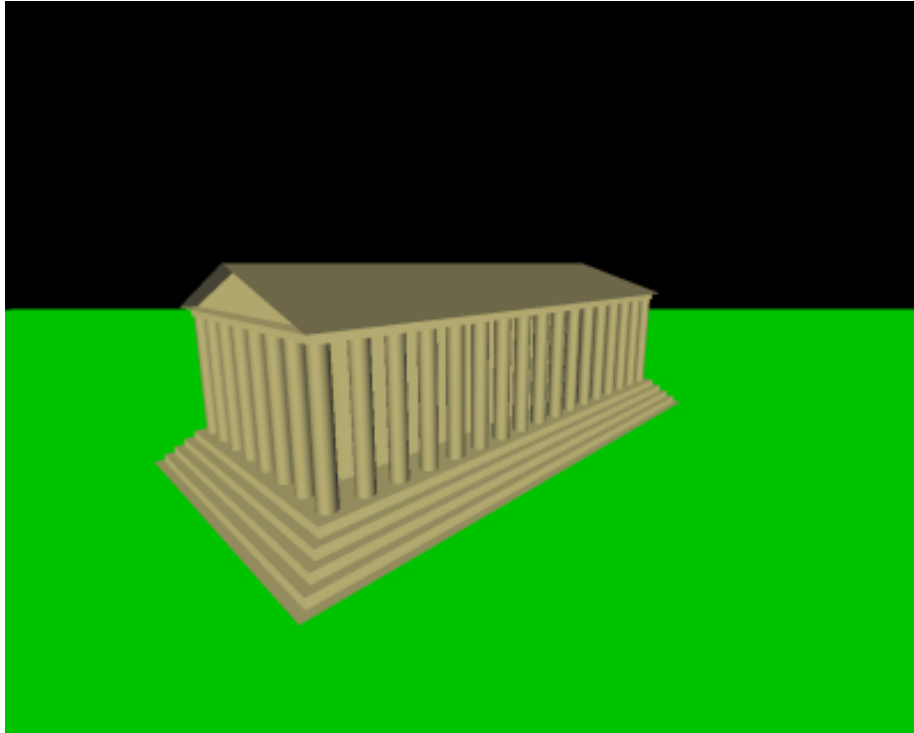


Abbildung 32: shadowmap

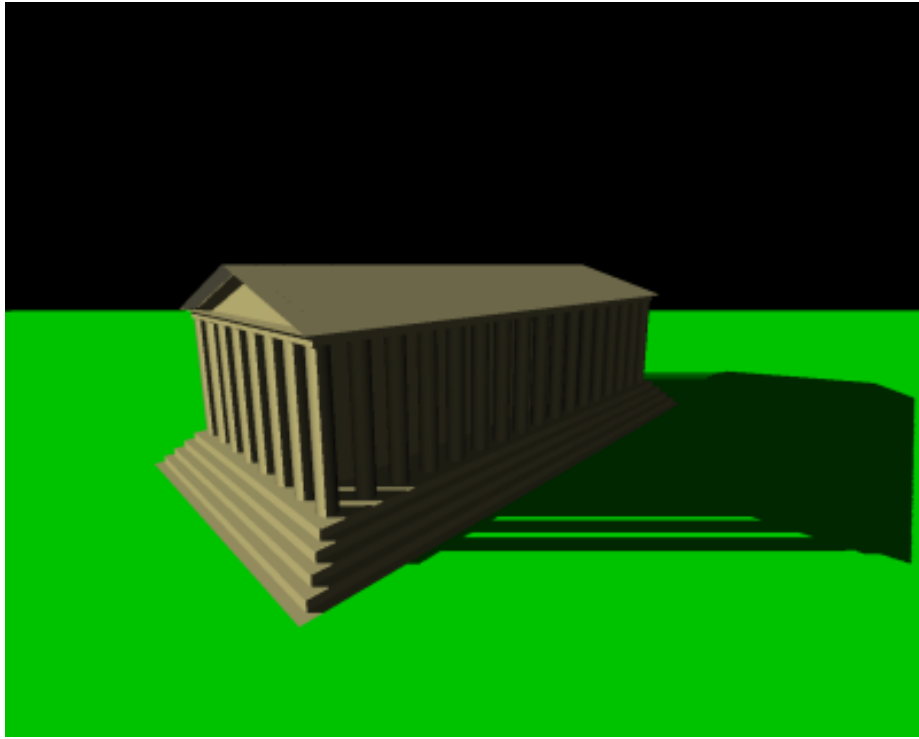


Abbildung 33: shadowmap



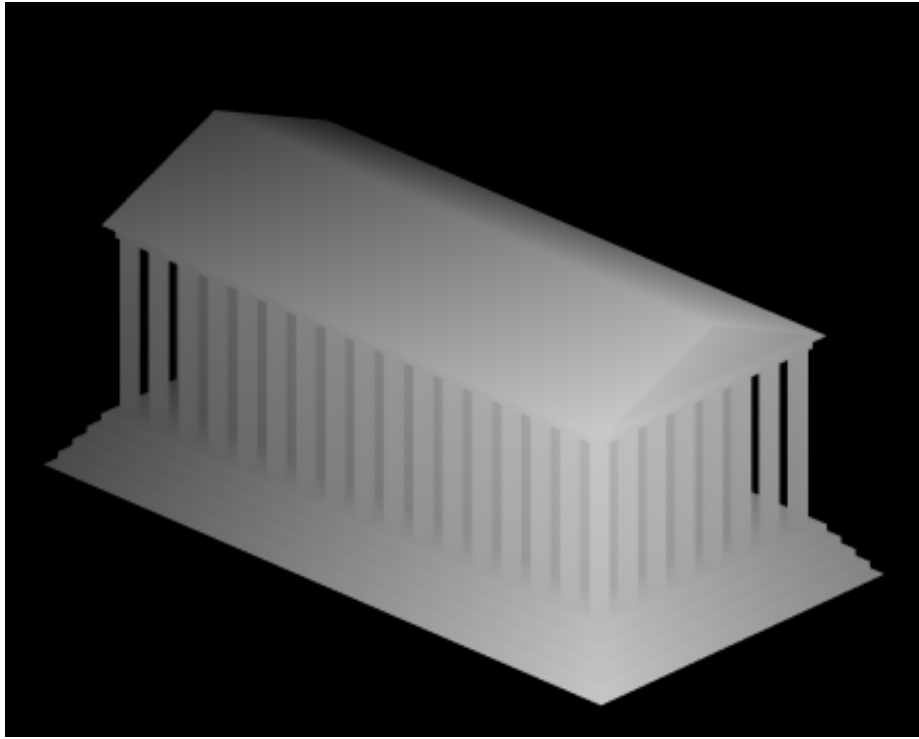


Abbildung 34: shadowmap

### 3.5 GLSL via WebGL

## 4 Raytracing

### 4.1 Farbwahrnehmung und Farbmodelle

### 4.2 Globale Beleuchtungsmodelle und Rendergleichung

### 4.3 Raycasting

#### 4.3.1 "Klassisches" Raytracing

#### 4.3.2 Monte Carlo Integration und Pathtracing

#### 4.3.3 Datenstrukturen für Bereichsabfragen

### 4.4 Raymarching

### 4.5 Labor

#### 4.5.1 Blender

#### 4.5.2 Echtzeitfähiges Raymarching in WebGL

## 5 Animation und Simulation

### 5.1 Keyframe Animation

### 5.2 Partikelsysteme

### 5.3 Elemente der Kollisionserkennung

### 5.4 Labor

## Tabellenverzeichnis

## Abbildungsverzeichnis

1	Kardansche Aufhängung und Gimbal lock . . . . .	12
2	Roll, Nick und Gier Winkel . . . . .	13
3	Geschlossenes Polygon . . . . .	18
4	Gerichtete Polygone . . . . .	20
5	Orientierbare Fläche . . . . .	22
6	Ein geschlossenes, orientierbares Netz. Quelle:CGAL . . . . .	23
7	Möbiusband. Quelle:Wikipedia . . . . .	23
8	Das äußere Normalenfeld . . . . .	24
9	Geschlossenes Netz vom Geschlecht 0. Quelle:Wikipedia . . . . .	24
10	Geschlossenes Netz vom Geschlecht 1. Quelle:Wikipedia . . . . .	25
11	Geschlossenes Netz vom Geschlecht 2. Quelle:Wikipedia . . . . .	25
12	Geschlossenes Netz vom Geschlecht 3. Quelle:Wikipedia . . . . .	25
13	Halfedge. Quelle:Wikipedia . . . . .	28
14	Eine Helix. Quelle:Wikipedia . . . . .	29
15	Die Bernsteinpolynome $B_i^4$ und deren Summe. Quelle:Wikipedia . . . . .	31
16	Pascalsches Dreieck . . . . .	31
17	Auswertung einer Beziervurve zum Zeitpunkt $t_0$ durch iterative Streckenteilung nach de Casteljau . . . . .	33
18	Bezier Patch . . . . .	34
19	Ein Rendering der Utah Teekanne . . . . .	35
20	Computergrafik-Pipeline . . . . .	36
21	Geometrie-Pipeline . . . . .	36
22	Bresenham Algorithmus . . . . .	37
23	Eine Schrift mit und ohne Antialiasing . . . . .	38
24	Z-Buffer-War . . . . .	39
25	Lambert Modell diffuser Reflektion . . . . .	40
26	Phong Modell mit spiegelnder Reflektion . . . . .	41
27	shadowmap . . . . .	42
28	uv mapping . . . . .	42
29	uv mapping . . . . .	43
30	uv mapping . . . . .	43
31	Displacementmapping . . . . .	45
32	shadowmap . . . . .	46
33	shadowmap . . . . .	47
34	shadowmap . . . . .	48