

# Einführung in die Computergrafik

Johannes Riesterer

31. Oktober 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
2.4	Labor . . . . .	37
<b>3</b>	<b>Echtzeitvisualisierung und OpenGL</b>	<b>37</b>
3.1	Geschichte . . . . .	37
3.2	GL-Pipeline . . . . .	37
3.3	Lokale Beleuchtungsmodelle . . . . .	37
3.3.1	Ideale Reflexionen und Lichtbrechungen . . . . .	37
3.3.2	Lambert Modell . . . . .	37
3.3.3	Phong Modell . . . . .	37
3.4	Texturen und UV-Mapping . . . . .	37
3.5	Shaderprogrammierung und standard Algorithmen . . . . .	37
3.5.1	Syntax und Funktionsumfang . . . . .	37
3.5.2	Flat shading . . . . .	37
3.5.3	Phong shading . . . . .	37
3.5.4	Bumpmapping . . . . .	37
3.5.5	Displacementmapping . . . . .	37
3.5.6	Shadowmap . . . . .	37
3.6	Labor . . . . .	37
3.6.1	WebGL . . . . .	37
<b>4</b>	<b>Raytracing</b>	<b>37</b>
4.1	Farbwahrnehmung und Farbmodelle . . . . .	37
4.2	Globale Beleuchtungsmodelle und Rendergleichung . . . . .	37
4.3	Raycasting . . . . .	37
4.3.1	”Klassisches”Raytracing . . . . .	37
4.3.2	Monte Carlo Integration und Pathtracing . . . . .	37
4.3.3	Datenstrukturen für Bereichsabfragen . . . . .	37
4.4	Raymarching . . . . .	37
4.5	Labor . . . . .	37
4.5.1	Blender . . . . .	37
4.5.2	Echtzeitfähiges Raymarching in WebGL . . . . .	37

<b>5</b>	<b>Animation und Simulation</b>	<b>37</b>
5.1	Keyframe Animation . . . . .	37
5.2	Partikelsysteme . . . . .	37
5.3	Elemente der Kollisionserkennung . . . . .	37
5.4	Labor . . . . .	37
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>38</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>39</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  $\theta_E = \text{id}$ .

**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.** Sind  $u$  und  $v$  zwei 3-dimensionale Vektoren, dann heißt der Vektor

$$u \times v :=$$

das Kreuzprodukt von  $u$  und  $v$ .

**Bemerkung 7.** Für  $u, v \in \mathbb{R}^n$  gilt

$$\langle u \times v, u \rangle = \langle u \times v, v \rangle = 0.$$

Das Kreuzprodukt steht also senkrecht auf  $u$  und auf  $v$ .

**Definition 19.** 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 20.** 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:

$$b'_i := v_i - \sum_{j=1}^{i-1} \langle v_i, b_j \rangle b_j$$

$$b_i := \frac{1}{\|b'_i\|} b'_i$$

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 21.** 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 8.** 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 9.** Ist  $B := \{b_1, \dots, b_n\}$  eine ONB, so gilt

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

**Definition 22.** 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  $SO(n) := \{O \mid \det(O) = 1, O \text{ orthogonal}\}$  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 23.** 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 10.** Eine  $2 \times 2$ -Drehmatrix ist eine orthogonale Matrix.

**Definition 24.** 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 11.** Die Zerlegung  $O \in SO(3)$  einer Drehung in obiges Produkt ist nicht eindeutig. Ein anschauliches Beispiel dafür liefert der sogenannte "Gimbal lock".

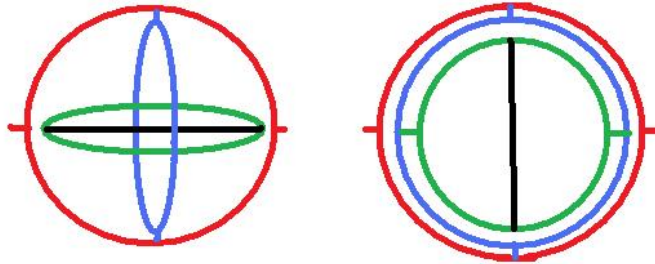


Abbildung 1: Kardansche Aufhängung und Gimbal lock

**Bemerkung 12.** 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.

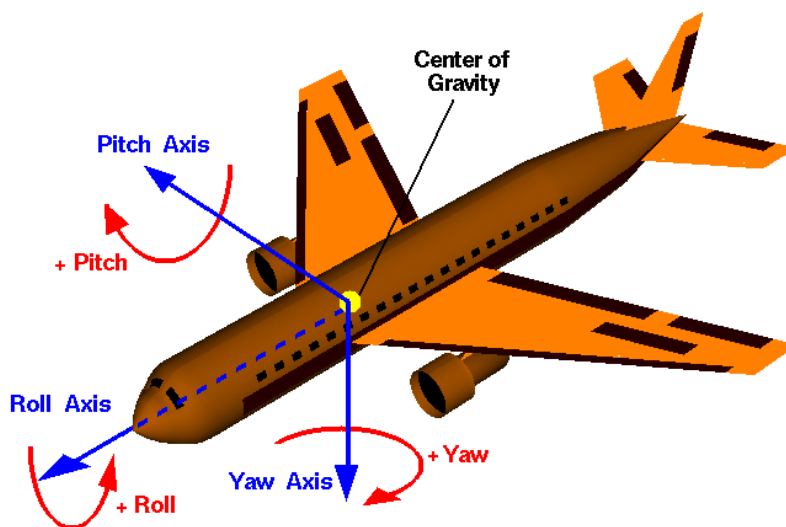


Abbildung 2: Roll, Nick und Gier Winkel

## 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 25.** 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 26.** 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 13.** 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 27.** 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

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

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

**Definition 28.** 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 29.** 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 30.** *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 14.** *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 31.** *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*

$$|(e_{l-1}, e_l)| := \overline{e_{l-1}e_l}$$

*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.*

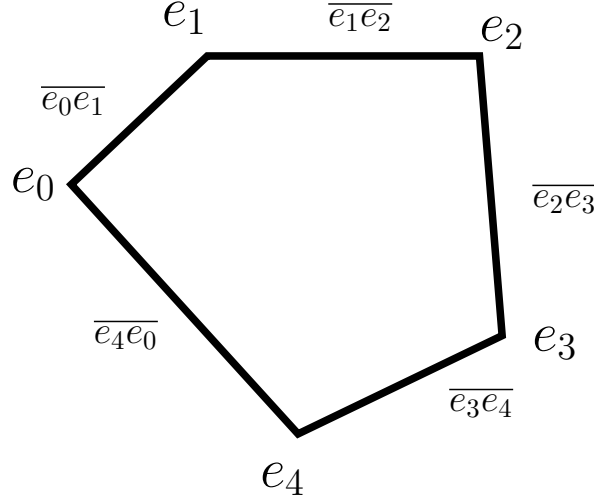


Abbildung 3: Geschlossenes Polygon

**Definition 32.** 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 33.** Wir bezeichnen das Innere eines Polygons  $P$  mit  $|\overset{\circ}{P}|$ .

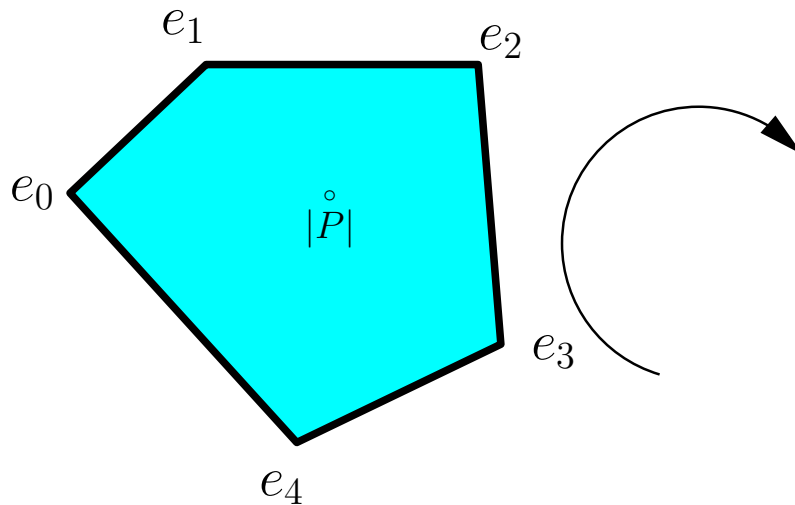
Mit Hilfe des Jordanschen Kurvensatzes können wir nun sagen, was die Durchlaufrichtung einer Kante ist und schließlich ob ein Polygon mit oder gegen den Uhrzeigersinn orientiert ist.

**Definition 34.** 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 35.** 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.

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

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



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

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

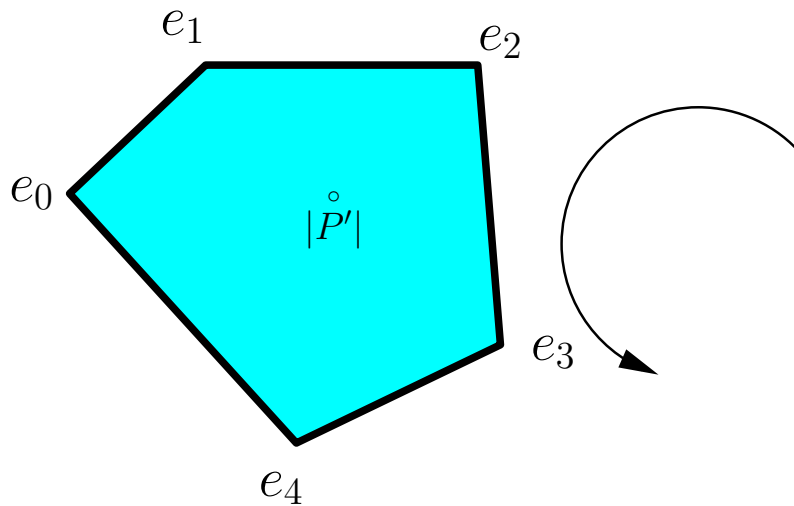


Abbildung 4: Gerichtete Polygone

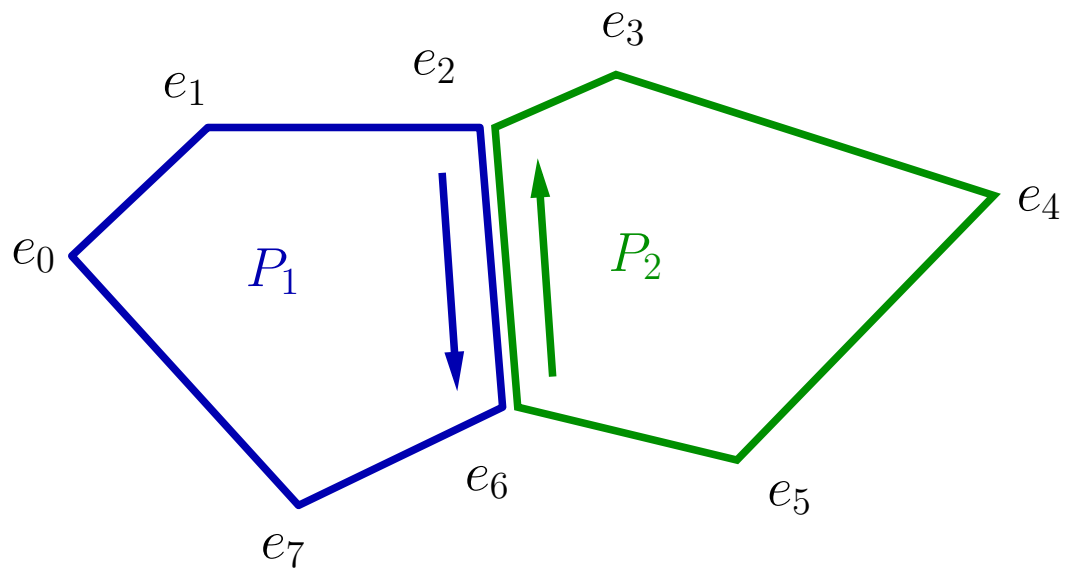
Netze bestehen nun im wesentlichen aus an den Kanten zusammengeklebten, einfachen, geschlossenen, planaren Polygonen.

**Definition 36.** 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  $|N| := \bigcup |\mathring{P}_i| \bigcup |K_N|$

- 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 37.** 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 15.** 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.

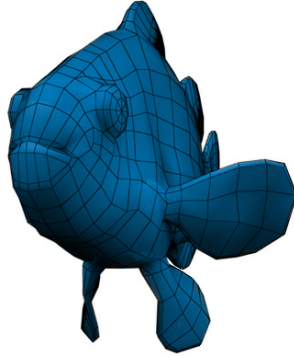


Abbildung 6: Ein geschlossenes, orientierbares Netz. Quelle:CGAL

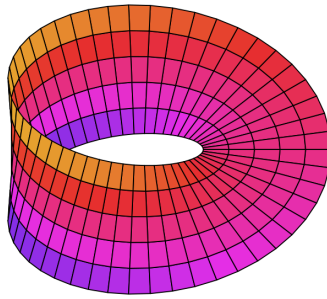


Abbildung 7: Das sogenannte Möbiusband ist hingegen nicht orientierbar. Es ist nicht geschlossen, sondern hat einen zusammenhängenden Rand. Quelle:Wikipedia

**Definition 38.** Eine Orientierung ist die Wahl einer Klasse von Nummerierungen, so dass alle Polygone entweder im oder gegen den Uhrzeigersinn orientiert sind.

**Bemerkung 16.** Ein Netz hat entweder genau zwei oder keine Orientierung.

**Definition 39.** 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.



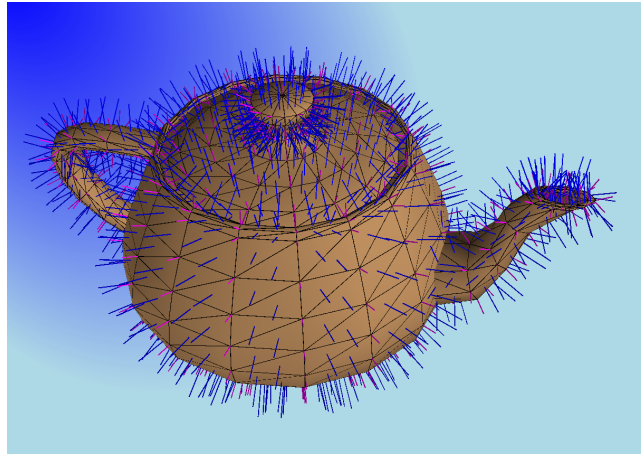


Abbildung 8: Das äußere Normalenfeld

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

**Definition 40.**  $N := \bigcup P_i$  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 41.** Sei  $N$  ein geschlossenes Netz. Dann bezeichnen wir mit

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

Beispiele:

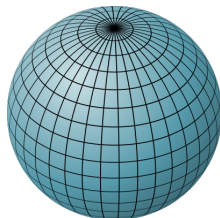


Abbildung 9: Geschlossenes Netz vom Geschlecht 0. Quelle:Wikipedia

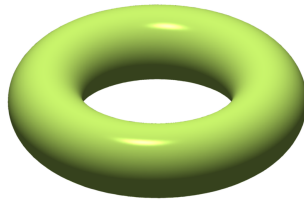


Abbildung 10: Geschlossenes Netz vom Geschlecht 1. Quelle:Wikipedia



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

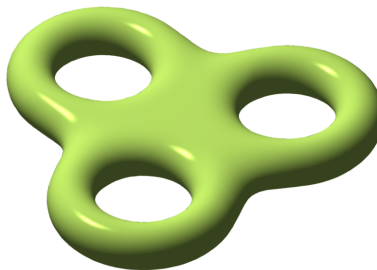


Abbildung 12: Geschlossenes Netz vom Geschlecht 3. Quelle:Wikipedia

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 17.** 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 42.** 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 43** (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> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nachbarschaftsbeziehungen nicht enthalten / schwierig zu berechnen</li> <li>- Die Zugehörigkeit einer Ecke zu einer Kante muss immer berechnet werden</li> <li>- Point-in-Mesh fast unmöglich zu berechnen</li> </ul> |
|--|--|

**Definition 44** (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 als Tupel von Referenzen auf die Eckenliste abgespeichert:

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

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

$$F_k = (K[j_1], \dots, K[j_l])$$

In einer Liste  $M$  werden die Referenzen auf Facetten in Tupeln abgespeichert, die die entsprechende Kante in der Kantenliste als Kante haben:

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

$M[i] \in M$  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 des Tupels auf  $-1$  gesetzt.

Vor- und Nachteile:

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

**Definition 45** (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>:

- Referenzen 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     |
| + Auch die Orientierung der Kanten bleibt erhalten         | - Overhead durch große Datenmengen    |
|  | - Nur für orientierbare Netze nutzbar |

---

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

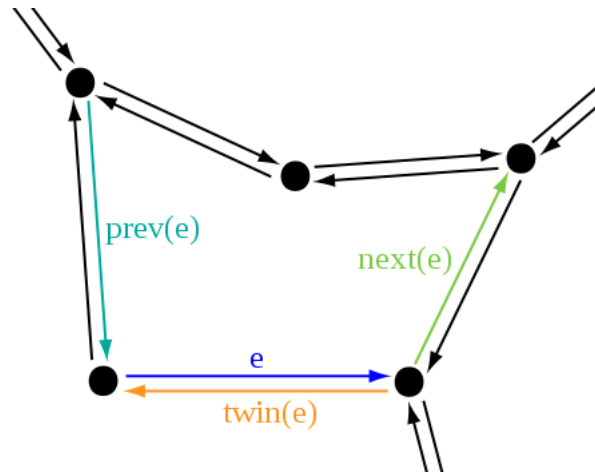


Abbildung 13: Halfedge. Quelle:Wikipedia

### 2.2.1 Subdivision

## 2.3 Modellierung

### 2.3.1 Parameterdarstellungen

**Definition 46.** 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

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

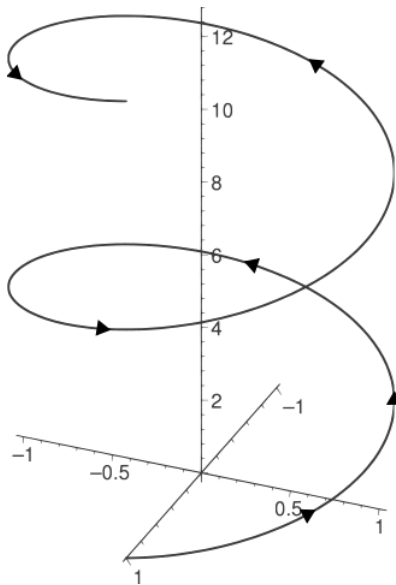


Abbildung 14: Eine Helix. Quelle:Wikipedia

**Definition 47.** 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 48.** 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

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

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 49.** 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

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

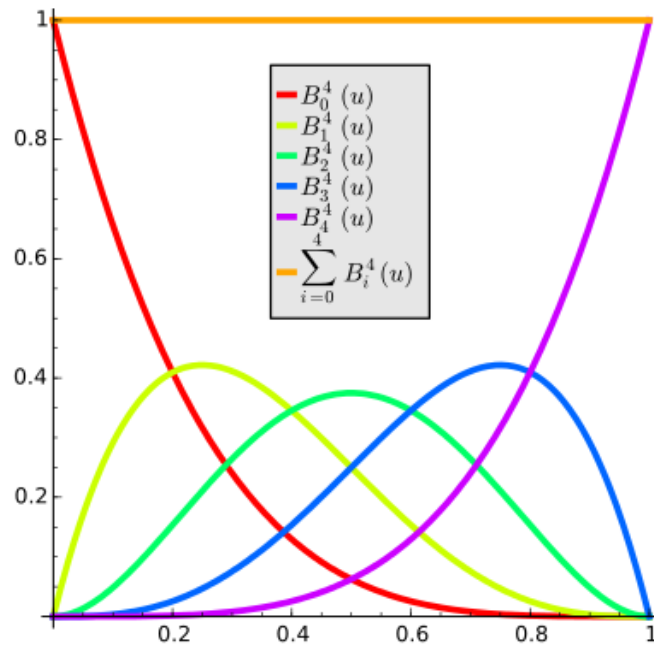


Abbildung 15: Die Bernsteinpolynome  $B_i^4$  und deren Summe. Quelle:Wikipedia

**Bemerkung 18.** 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

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

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & & & 1 & & & \\
 & & & 1 & & 1 & & \\
 & & 1 & & 2 & & 1 & \\
 & 1 & & 3 & & 3 & & 1 \\
 & & 1 & & 4 & & 6 & & 4 & & 1 \\
 & & & 1 & & 5 & & 10 & & 10 & & 5 & & 1
 \end{array}$$

Abbildung 16: Pascalsches Dreieck



□

**Definition 50.** 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

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

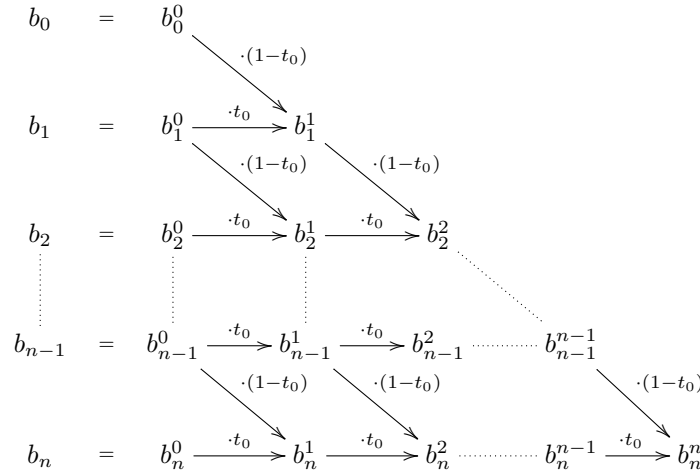
**Satz 15.** Eine Bezierkurve hat die Ableitung

- $(B^n)'(t) = n \cdot \sum_{j=0}^{n-1} B_j^{n-1}(t) \cdot (b_{j+1} - b_j)$ , 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  $b_n^n = B^n(t_0)$ .

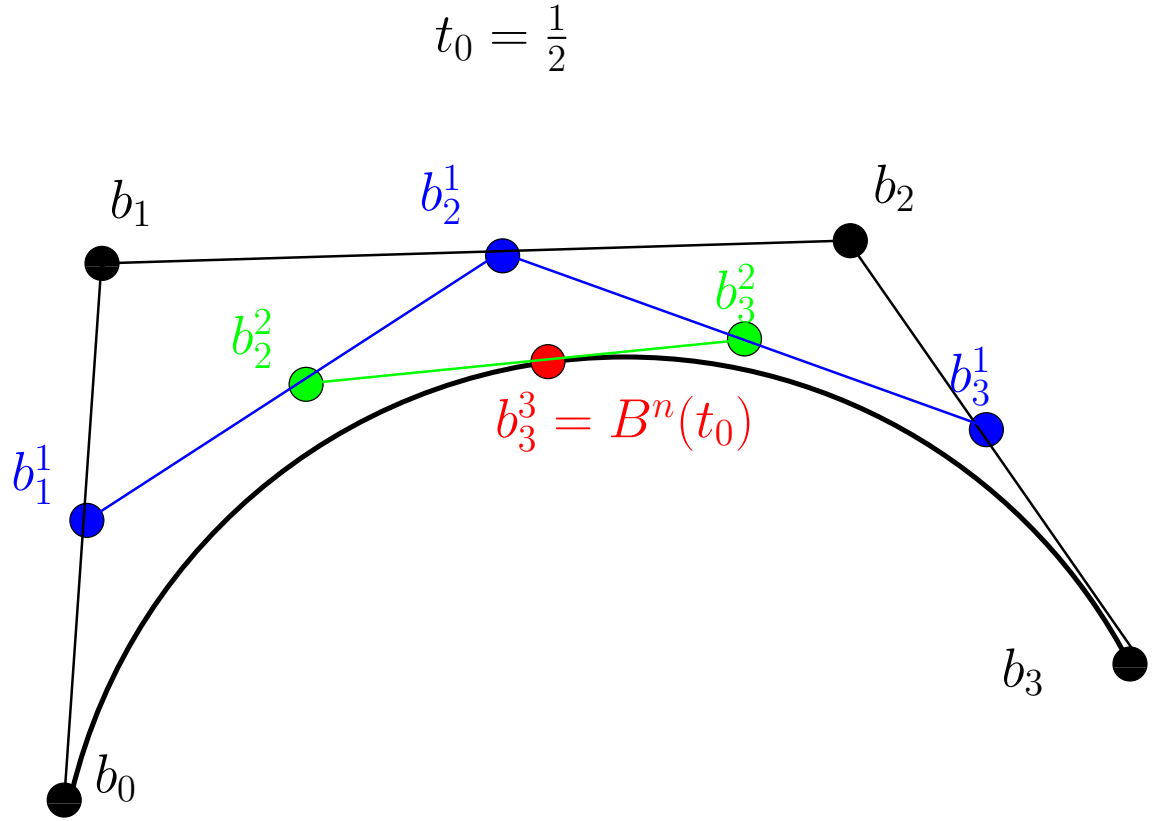


Abbildung 17:

**Definition 51** (Patching). Seien  $B^n(t)$  und  $(B^*)^m(t)$  Bezierkurven. 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.

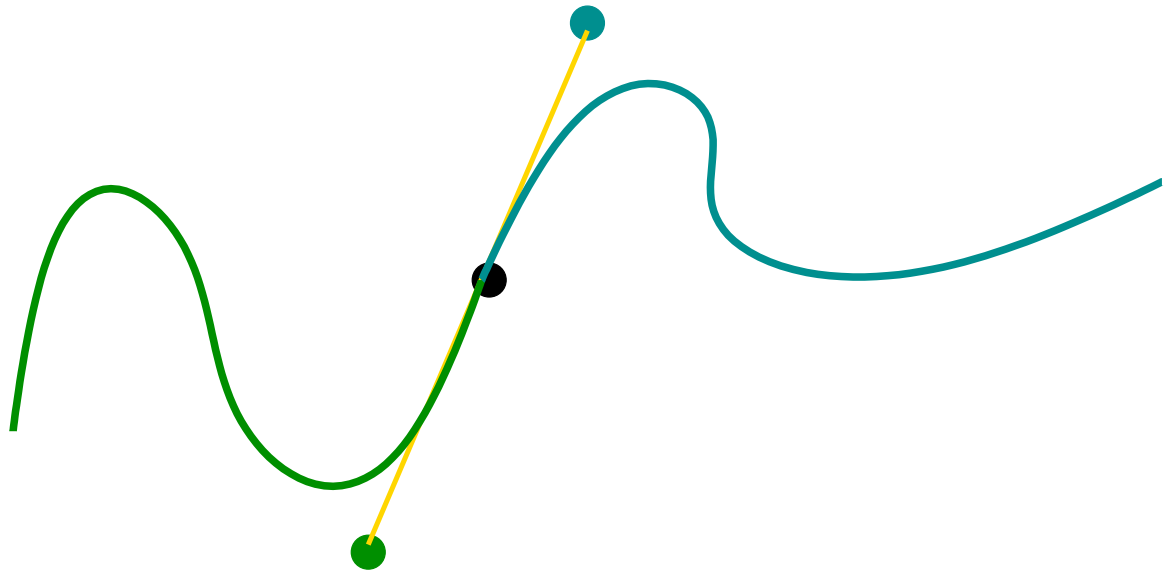


Abbildung 18: Bezier Patch

**Bemerkung 19.** 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.

~~~~~ master

**Definition 52.** Ist  $B^n(t)$  eine Bezierkurve, so bilden die Bezierkurven  $(B^*)^n(t) := \sum_{i=0}^n B_i^n(t/2) \cdot b_i^*$  und  $(B^{**})^n(t) := \sum_{i=0}^n B_i^n(t/2) \cdot b_n^{n-i}$



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



## 2.4 Labor

# 3 Echtzeitvisualisierung und OpenGL

## 3.1 Geschichte

## 3.2 GL-Pipeline

## 3.3 Lokale Beleuchtungsmodelle

### 3.3.1 Ideale Reflexionen und Lichtbrechungen

### 3.3.2 Lambert Modell

### 3.3.3 Phong Modell

## 3.4 Texturen und UV-Mapping

## 3.5 Shaderprogrammierung und standard Algorithmen

### 3.5.1 Syntax und Funktionsumfang

### 3.5.2 Flat shading

### 3.5.3 Phong shading

### 3.5.4 Bumpmapping

### 3.5.5 Displacementmapping

### 3.5.6 Shadowmap

## 3.6 Labor

### 3.6.1 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

## 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 | . . . . .                                                                 | 33 |
| 18 | Bezier Patch . . . . .                                                    | 34 |
| 19 | Ein Rendering der Utah Teekanne . . . . .                                 | 35 |