

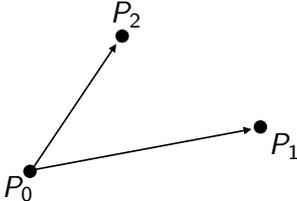



Computer-Graphik I

Baryzentrische Koordinaten

G. Zachmann
 Clausthal University, Germany
zach@in.tu-clausthal.de




- Def.: **affin unabhängig**
 Geg.: $k+1$ Punkte $P_i \in \mathbb{R}^n$, $0 \leq i \leq k$, $k \leq n$. Seien dadurch k Vektoren v_i definiert: $v_i := P_i - P_0$, $i = 1, \dots, k$
 Die Punkte P_i heißen **affin unabhängig** \Leftrightarrow die Vektoren v_i linear unabhängig sind.
- Beispiel:
 

G. Zachmann Computer-Graphik 1 - WS 09/10 Baryzentrische Koordinaten 2

Baryzentrische Koordinaten

- Def.: **affines Koordinatensystem**
Wenn $k + 1$ Punkte $P_0, \dots, P_k \in \mathbb{R}^n$, $n \geq k$ affin unabhängig sind, so definieren sie ein **affines Koordinatensystem**.
- Def.: **affine Kombination, baryzentrische Koordinaten**
Seien $k + 1$ Punkte $P_0, \dots, P_k \in \mathbb{R}^n$, $k \leq n$ gegeben. Daraus kann man weitere Punkte definieren mittels einer **affinen Kombination**:

$$P = \sum_{i=0}^k \lambda_i P_i, \quad \text{mit} \quad \sum_{i=0}^k \lambda_i = 1, \quad \lambda_i \in \mathbb{R}$$
 Die λ_i heißen **baryzentrische Koordinaten** von P bzgl. des Koordinatensystems $[P_0, P_1, \dots, P_k]$.

G. Zachmann Computer-Graphik 1 - WS 09/10 Baryzentrische Koordinaten 3

- Satz (o. Bew.):
Die Punkte $P_0, \dots, P_k \in \mathbb{R}^n$, $k \leq n$ sind **affin unabhängig** \Leftrightarrow jede affine Kombination bzgl. dieser Punkte ist eindeutig, d.h.

$$\forall s_i, t_i \in \mathbb{R} \text{ mit } \sum s_i = \sum t_i = 1 :$$

$$\sum s_i P_i = \sum t_i P_i \Leftrightarrow \forall i = 0, \dots, k : s_i = t_i$$

G. Zachmann Computer-Graphik 1 - WS 09/10 Baryzentrische Koordinaten 4

Erinnerung: affine Abbildungen

- Affine Abbildungen := {lineare Abbildungen + Translationen}
- Affine Abbildung** := Abbildung, die affine Kombinationen invariant lassen, d.h.

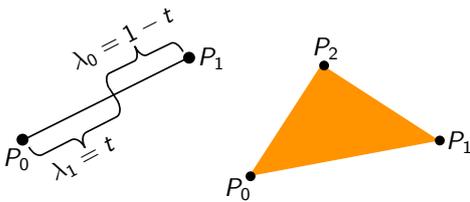
$$P = \sum \lambda_i P_i \Leftrightarrow \phi(P) = \phi\left(\sum \lambda_i P_i\right) = \sum \lambda_i \phi(P)$$
- M.a.W.: eine affine Abbildung ist eindeutig durch die Bilder der affinen Basis festgelegt.

G. Zachmann Computer-Graphik 1 - WS 09/10 Baryzentrische Koordinaten 5

Kleiner Exkurs: die **konvexe Hülle**

- Definition: **konvexe Hülle**
 Seien P_0, \dots, P_k affin unabhängige Punkte.
 Dann ist die **konvexe Hülle** dieser Punkte definiert als:

$$\text{CH}(P_0, \dots, P_k) := \left\{ P \mid P = \sum \lambda_i P_i, \sum \lambda_i = 1, \forall i : \lambda_i \geq 0 \right\}$$
 In diesem Fall gilt $\forall i : 0 \leq \lambda_i \leq 1$.
 Eine solche Summe heißt auch **konvexe Kombination**.
- Beispiele:
 - $P_0, P_1 \rightarrow$ Strecke
 - $P_0, P_1, P_2 \rightarrow$ Dreieck



G. Zachmann Computer-Graphik 1 - WS 09/10 Baryzentrische Koordinaten 6

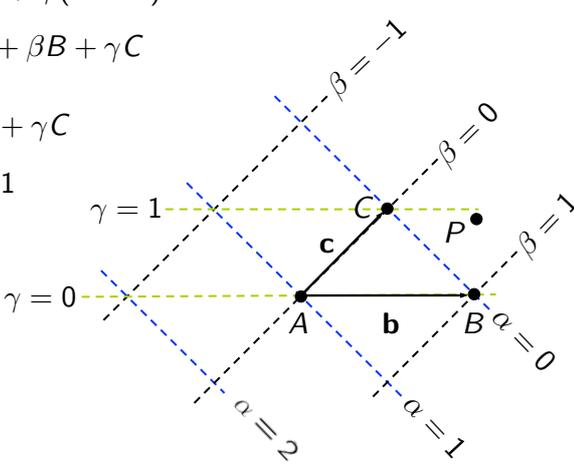
Physikalische Interpretation

- Gegeben $k + 1$ Punkte $P_0, \dots, P_k \in \mathbb{R}^n$ mit den Massen m_i , $\sum m_i \neq 0$
- Definiere die „normierten Massen“ $\lambda_i = \frac{m_i}{\sum m_i}$
- Dann ist der Punkt $P = \sum \lambda_i P_i$ genau der **Schwerpunkt** der $k + 1$ Punkte



G. Zachmann Computer-Graphik 1 - WS 09/10 Baryzentrische Koordinaten 7

Beispiel: Dreieck im \mathbb{R}^n

$$\begin{aligned}
 P &= A + \beta \mathbf{b} + \gamma \mathbf{c} \\
 &= A + \beta(B - A) + \gamma(C - A) \\
 &= \underbrace{(1 - \beta - \gamma)}_{\alpha} A + \beta B + \gamma C \\
 &= \alpha A + \beta B + \gamma C \\
 &\text{mit } \alpha + \beta + \gamma = 1
 \end{aligned}$$


G. Zachmann Computer-Graphik 1 - WS 09/10 Baryzentrische Koordinaten 8

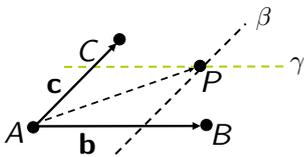
Häufige Aufgabe

- Bestimme die baryzentrischen Koordinaten eines Punktes P bzgl. des Dreiecks A, B, C .

■ Lösung 1:

- $\beta(B - A) + \gamma(C - A) \stackrel{!}{=} P - A = q$
- Löse das LGS

$$\begin{pmatrix} b_x & c_x \\ b_y & c_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta \\ \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_x \\ q_y \end{pmatrix}$$
- Setze $\alpha = 1 - \beta - \gamma$



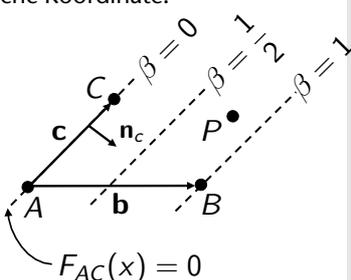
G. Zachmann Computer-Graphik 1 - WS 09/10 Baryzentrische Koordinaten 9

■ Lösung 2:

- Verwende Beobachtung: alle Punkte P mit dem selben Abstand von der Geraden \overline{AC} haben dieselbe baryzentrische Koordinate.
- Setze $n_c := \begin{pmatrix} c_y \\ -c_x \end{pmatrix}$

$$F_{AC}(P) := \frac{n_c \cdot (P - A)}{n_c \cdot (B - A)}$$

Normierung ↷
- Damit ist $F_{AC}(A) = F_{AC}(C) = 0$,
 $F_{AC}(B) = 1$ (wegen Normierung)
- Definiere analog F_{AB} und F_{BC}
- Damit ist $\alpha = F_{BC}(P)$, $\beta = F_{AC}(P)$, $\gamma = F_{AB}(P)$



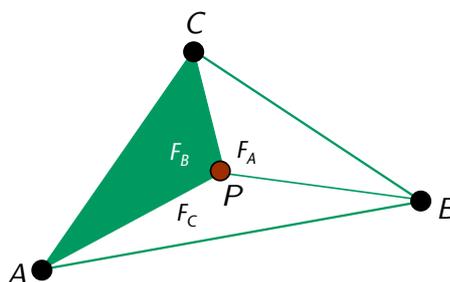
G. Zachmann Computer-Graphik 1 - WS 09/10 Baryzentrische Koordinaten 10

▪ Lösung 3:

- Nutze geometrischen Zusammenhang zwischen Flächeninhalten und baryzentrische Koordinaten:

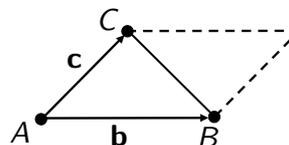
$$\alpha = \frac{F_B}{F} \quad \beta = \frac{F_C}{F} \quad \gamma = \frac{F_A}{F}$$

$$F = F_A + F_B + F_C$$



- Flächeninhalt eines Dreiecks A, B, C

$$\begin{aligned} \mathcal{F}(\triangle ABC) &= \frac{1}{2} \|\mathbf{b} \times \mathbf{c}\| \\ &= \frac{1}{2} \|(B - A) \times (C - A)\| \\ &= \frac{1}{2} \begin{vmatrix} B_x - A_x & C_x - A_x \\ B_y - A_y & C_y - A_y \end{vmatrix} \\ &= \frac{1}{2} \begin{vmatrix} A_x & B_x & C_x \\ A_y & B_y & C_y \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \end{aligned}$$



- Achtung: Achte auf den korrekten Umlaufsinn !!
- Beobachtung: Flächeninhalt = 0 \Leftrightarrow Det = 0 \Leftrightarrow Dreieck ist degeneriert \Leftrightarrow Punkte sind nicht affin unabhängig

Geometrischer Beweis der Flächenformel

- Zu zeigen:

$$\mathcal{F}(\Delta ABC) = \frac{1}{2} [(B_x - A_x)(C_y - A_y) - (C_x - A_x)(B_y - A_y)]$$

$\frac{1}{2} \left[\begin{array}{c} C_y \\ A_y \\ B_y \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} (B_x - A_x)(C_y - A_y) \\ (C_x - A_x)(A_y - B_y) \end{array} \right] + \dots = \frac{1}{2} \left[\begin{array}{c} C_y \\ A_y \\ B_y \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} C_x - A_x \\ C_x - A_x \end{array} \right] = \dots$

denn $\mathcal{F}(\text{Dreieck}) = \frac{1}{2} \cdot \text{Basis} \cdot \text{Höhe}$

G. Zachmann Computer-Graphik 1 - WS 09/10 Baryzentrische Koordinaten 13

Beweis der Lösung 3

- Sei A, B, C ein Dreieck, darin ein Dreieck P, Q, R
- Die baryzentrischen Koordinaten von P, Q, R bzgl. A, B, C seien
 $P : (\alpha_P, \beta_P, \gamma_P) \quad Q : (\alpha_Q, \beta_Q, \gamma_Q) \quad R : (\alpha_R, \beta_R, \gamma_R)$
d.h.
 $P = \alpha_P A + \beta_P B + \gamma_P C$
- Wir beweisen den etwas allgemeineren Satz:

$$\mathcal{F}(\Delta PQR) = \begin{vmatrix} \alpha_P & \beta_P & \gamma_P \\ \alpha_Q & \beta_Q & \gamma_Q \\ \alpha_R & \beta_R & \gamma_R \end{vmatrix} \cdot \mathcal{F}(\Delta ABC)$$

G. Zachmann Computer-Graphik 1 - WS 09/10 Baryzentrische Koordinaten 14

- Zur Erinnerung: Determinanten sind linear, d.h.

$$\begin{vmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{sa} + t\mathbf{b} & \mathbf{c} & \mathbf{d} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{vmatrix} = s \cdot \begin{vmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{a} & \mathbf{c} & \mathbf{d} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{vmatrix} + t \cdot \begin{vmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{b} & \mathbf{c} & \mathbf{d} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{vmatrix}$$

- Damit braucht man $\mathcal{F}(\Delta PQR)$ nur noch ausrechnen:

$$2\mathcal{F}(\Delta PQR) =$$

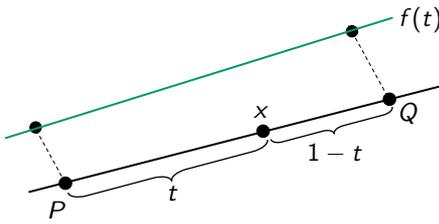
(1)

$$\begin{vmatrix} \alpha_P A_x + \beta_P B_x + \gamma_P C_x & \alpha_Q A_x + \beta_Q B_x + \gamma_Q C_x & \alpha_R A_x + \beta_R B_x + \gamma_R C_x \\ \alpha_P A_y + \beta_P B_y + \gamma_P C_y & \alpha_Q A_y + \beta_Q B_y + \gamma_Q C_y & \alpha_R A_y + \beta_R B_y + \gamma_R C_y \\ \underbrace{\alpha_P + \beta_P + \gamma_P}_1 & \alpha_Q + \beta_Q + \gamma_Q & \alpha_R + \beta_R + \gamma_R \end{vmatrix}$$

$$\begin{aligned} &= \alpha_P \cdot \begin{vmatrix} A_x & \dots \text{s. eq. (1)} \dots & \dots \\ A_y & \dots & \dots \\ 1 & \dots & \dots \end{vmatrix} + \beta_P \cdot \begin{vmatrix} B_x & \dots & \dots \\ B_y & \dots & \dots \\ 1 & \dots & \dots \end{vmatrix} + \gamma_P \cdot \begin{vmatrix} C_x & \dots & \dots \\ C_y & \dots & \dots \\ 1 & \dots & \dots \end{vmatrix} \\ &= \alpha_P \cdot \left(\underbrace{\alpha_Q \begin{vmatrix} A_x & A_x & \dots \\ A_y & A_y & \dots \\ 1 & 1 & \dots \end{vmatrix}}_0 + \beta_Q \begin{vmatrix} A_x & B_x & \dots \\ A_y & B_y & \dots \\ 1 & 1 & \dots \end{vmatrix} + \gamma_Q \begin{vmatrix} A_x & C_x & \dots \\ A_y & C_y & \dots \\ 1 & 1 & \dots \end{vmatrix} \right) \\ &+ \beta_P \cdot \left(\alpha_Q \begin{vmatrix} B_x & A_x & \dots \\ B_y & A_y & \dots \\ 1 & 1 & \dots \end{vmatrix} + \underbrace{\beta_Q \begin{vmatrix} B_x & B_x & \dots \\ B_y & B_y & \dots \\ 1 & 1 & \dots \end{vmatrix}}_0 + \gamma_Q \begin{vmatrix} B_x & C_x & \dots \\ B_y & C_y & \dots \\ 1 & 1 & \dots \end{vmatrix} \right) \\ &+ \gamma_P \cdot \left(\alpha_Q \begin{vmatrix} C_x & A_x & \dots \\ C_y & A_y & \dots \\ 1 & 1 & \dots \end{vmatrix} + \beta_Q \begin{vmatrix} C_x & B_x & \dots \\ C_y & B_y & \dots \\ 1 & 1 & \dots \end{vmatrix} + \underbrace{\gamma_Q \begin{vmatrix} C_x & C_x & \dots \\ C_y & C_y & \dots \\ 1 & 1 & \dots \end{vmatrix}}_0 \right) \\ &= \dots \end{aligned}$$

Lineare Interpolation

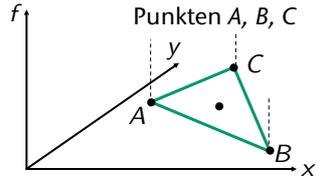
- Sei ein skalarer Wert f an P, Q vorgegeben: $f(P)=f_1, f(Q)=f_2$
- Dann kann man jedem Punkt X auf der Geraden \overline{PQ} einen Wert $f(X)$ zuordnen
- Sei t der Parameter von X , also $f(X) = (1 - t) \cdot f(P) + t \cdot f(Q)$
- Dann setze $X = (1 - t) \cdot P + t \cdot Q$



G. Zachmann Computer-Graphik 1 - WS 09/10 Baryzentrische Koordinaten 17

Anwendung: Baryzentrische Interpolation

- Gegeben: „Höhen“ f_A, f_B, f_C an den (oder irgendwelche anderen Werte)
- Gesucht: Funktion f , so daß f_A, f_B, f_C interpoliert werden
- Idee: bestimme baryzentrische Koordinaten eines beliebigen Punktes X , interpoliere damit die Funktionswerte
- Sei $X = \alpha A + \beta B + \gamma C$
- Setze $f(X) = \alpha f_A + \beta f_B + \gamma f_C$
- Funktioniert auch für X außerhalb $\triangle ABC$
- Funktioniert auch für $f_A, f_B, f_C \in \mathbb{R}^m$
- Auf den Kanten entspricht dies gerade einer linearen Interpolation



G. Zachmann Computer-Graphik 1 - WS 09/10 Baryzentrische Koordinaten 18

Weitere Anwendung: Punkt-in-Dreieck-Test

- Der Punkt X ist im Inneren des Dreiecks $\Leftrightarrow \alpha, \beta, \gamma > 0$

G. Zachmann Computer-Graphik 1 - WS 09/10
Baryzentrische Koordinaten 19

Geometrische Verhältnisse im Dreieck

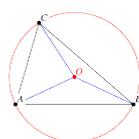
<http://i33www.ibds.uni-karlsruhe.de/applets/>

G. Zachmann Computer-Graphik 1 - WS 09/10
Baryzentrische Koordinaten 20

Spezielle Punkte im Dreieck

- Viele spezielle Punkte im Dreieck lassen sich mittels baryzentrischer Koordinaten sehr leicht angeben / ausrechnen (o. Bew.):

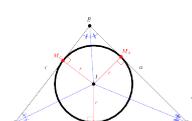
Punkt	α	β	γ
Schwerpkt.	1	1	1
Außenkreis zu A	$-a$	b	c
Inkreis	a	b	c
Umkreis	$a^2(b^2 + c^2 - a^2)$	$b^2(c^2 + a^2 - b^2)$	$c^2(a^2 + b^2 - c^2)$



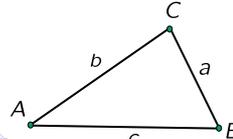
Umkreis



Außenkreis



Inkreis



Bezeichnungen

- Achtung: die Koordinaten sind ohne Normierung angegeben (sog. "homogene baryzentrische Koord.") — die muß man also vor eine tatsächlichen Berechnung noch durchführen