

Julius-Maximilians-Universität Würzburg
Fakultät für Mathematik und Informatik

Differentialgeometrie

Prof. Pabel

Andreas Rosenberger, Nils Wisiol
andreas@rosenberger-home.de, info@nils-wisiol.de

27. Juni 2012

Inhaltsverzeichnis

0	Grundbegriffe und Bezeichnungen aus der linearen Algebra und analytischen Geometrie	3
0.1	Strukturen	3
1	Lokale Kurventheorie im euklidischen Raum	6
1.1	Grundbegriffe der Kurventheorie	6
1.2	Kurven in der euklidischen Ebene \mathbb{R}^2	13
1.3	Kurven im euklidischen Raum \mathbb{R}^3	14
1.3.1	FRENET-Begleitbasis, Krümmung und Torsion	14
1.3.2	Approximierter Kurvenverlauf	19
1.3.3	Krümmungskreis und Schmiegekugel (oskulierende Kugel)	21
1.3.4	Der Fundamentalsatz der Kurventheorie (im \mathbb{R}^3)	23
1.3.5	Spezielle Kurvenklassen	27
1.4	Kurven im euklidischen \mathbb{R}^n	31
2	Lokale Flächentheorie im euklidischen Raum	35
2.1	Grundbegriffe der Flächentheorie	35
2.1.0	p -dimensionale Flächen im affinen \mathbb{R}^n	35
2.1.1	Flächeninterne Metrik auf p -Flächen im euklidischen \mathbb{R}^n	38
2.1.2	Hyperflächen im euklidischen \mathbb{R}^n : Ableitungsgleichungen	42
2.2	Zur inneren Geometrie der Flächen im \mathbb{R}^3	50
2.2.1	Geodätische Parallelverschiebung	50
2.2.2	Geodätische Linien	52
2.2.3	Abbildungen von Flächen, Kartographie	56
2.3	Krümmungstheorie der Flächen im \mathbb{R}^3	59
2.3.1	Erste geometrische Bedeutungen der Krümmungsgrößen	59
2.3.2	Approximativer Flächenverlauf, Klassifikation der Flächenpunkte	61
2.4	Kurven und spezielle Parameter auf einer Fläche im \mathbb{R}^3	67
2.4.1	Theorie der Flächenkurven	67
2.4.2	Spezielle Parameter	73
2.5	Vertauschbarkeitsrelationen, BONNETscher Fundamentalsatz	76
2.5.1	Der Riemannsche Krümmungstensor	77
2.5.2	Weitere kovariante Ableitungen	78
2.5.3	Die Gauß- und Codazzigleichungen	79
2.5.4	Der BONNETsche Fundamentalsatz	82
3	Definitionen	88

0 Grundbegriffe und Bezeichnungen aus der linearen Algebra und analytischen Geometrie

Die klassische Differentialgeometrie der Kurven und Flächen benutzt als umgebenden Raum einen n -dimensionalen, orientierten, euklidischen Raum E^n mit zugehörigem euklidischem Richtungsvektorraum V^n .

0.1 Strukturen

V^n ist mit einem Skalarprodukt $(X, Y) \mapsto \langle X, Y \rangle \in \mathbb{R}$ ausgestattet. Damit lassen sich messen:

- die Länge von Vektoren X : $|X| = \sqrt{\langle X, X \rangle}$
- die Orthogonalität von Vektoren X, Y : $X \perp Y \Leftrightarrow \langle X, Y \rangle = 0$
- der Winkel zwischen zwei Vektoren X, Y : $\cos \angle(X, Y) = \left\langle \frac{X}{|X|}, \frac{Y}{|Y|} \right\rangle$
- Flächeninhalte, Volumina, usw.

Ist zusätzlich eine feste Orthonormalbasis $(\hat{e}_1, \dots, \hat{e}_n)$ (definiert durch $\langle \hat{e}_i, \hat{e}_k \rangle = \delta_{ik}$) ausgezeichnet als positiv orientiert, erhält man eine Orientierung des Raumes und kann alle Basen in positiv und negativ orientierte einteilen.

Standard-Modell: $E^n = V^n = \mathbb{R}^n$, ausgestattet mit dem Standard-Skalarprodukt $\langle X, Y \rangle = \sum_{i=1}^n X^i Y^i$ und der (positiv orientierten) Standardbasis $\hat{e}_1, \dots, \hat{e}_n$ mit $\hat{e}_i = (0, \dots, 1, \dots, 0)^T$. Dieses Standardmodell reicht bei uns meist aus: Bezüglich eines kartesischen Koordinatensystems $(0; e_1, \dots, e_n)$ in einem abstrakten, orientierten euklidischen Raum E^n , bestehend aus

- einem „Ursprung“ („Nullpunkt“) $0 \in E^n$
- einer positiv orientierten Orthonormalbasis (e_1, \dots, e_n) im V^n

kann man jedem Punkt und jedem Vektor eindeutig reelle Koordinaten zuordnen:

- Vektor: $X = \sum_{i=1}^n X^i e_i \in V^n \mapsto (X^1, \dots, X^n) \in \mathbb{R}^n$
- Punkt: $p = 0 + \sum_{i=1}^n p^i e_i \mapsto (p^1, \dots, p^n) \in \mathbb{R}^n$

Aus einem Skalarprodukt in V^n wird in Koordinaten

$$\langle X, Y \rangle = \left\langle \sum X^i e_i, \sum Y^k e_k \right\rangle = \sum_i \sum_k X^i Y^k \langle e_i, e_k \rangle = \sum_{i=1}^n X^i Y^i$$

das Standard-Skalarprodukt im \mathbb{R}^n . Man ist im Standard-Modell angelangt. Ein Wechsel des kartesischen Koordinatensystems im E^n induziert im Koordinatenraum \mathbb{R}^n eine Bewegung

$$p \mapsto p' = Dp + t$$

bestehend aus einer eigentlichen orthogonalen Drehmatrix $D \in SO(n, \mathbb{R})$ mit $\det D = +1$ und einem Translationsvektor $t \in \mathbb{R}^n$. In der euklidischen Differentialgeometrie werden Eigenschaften von Objekten (Kurven, Flächen, ...) untersucht, die invariant gegenüber solchen Transformationen sind, also nicht vom gewählten kartesischen Koordinatensystem abhängig sind.

Bemerkung:

In der sogenannten affinen Differentialgeometrie untersucht man Eigenschaften von Objekten, die (in Koordinaten) invariant sind gegenüber beliebigen affinen Transformationen $p \mapsto p' = Ap + t$, A regulär. Man ignoriert dort vollständig die metrische Struktur des \mathbb{R}^n . Der umgebende Raum ist dann ein affiner Punktraum (bei uns nur am Rande betrachtet).

Zum Vektorprodukt (Kreuzprodukt) im orientierten euklidischen \mathbb{R}^n :

Zu je $n - 1$ Vektoren $X_1, \dots, X_{n-1} \in \mathbb{R}^n$ ($n \geq 2$) gibt es genau einen Vektor $Y \in \mathbb{R}^n$ mit den Eigenschaften

1. $Y \perp X_k, (k = 1, \dots, n - 1)$
2. $|Y| = a_{n-1}(X_1, \dots, X_{n-1}) = \sqrt{\det(\langle X_i, X_k \rangle)_{i,k=1, \dots, n-1}}$
 $= (n-1)$ -dimensionaler Flächeninhalt des von X_1, \dots, X_{n-1} aufgespannten $n-1$ -dimensionalen Parallelogramms
 $=$ Wurzel aus der Gramschen Determinanten $G(X_1, \dots, X_{n-1})$
3. $\det(X_1, \dots, X_{n-1}, Y) \geq 0$ (d.h. (X_1, \dots, X_{n-1}, Y) ist positiv orientiert)

Bezeichnung: $Y = X_1 \times \cdots \times X_{n-1}$

Eine explizite Formel ist (mit der Standardbasis (e_1, \dots, e_n) des \mathbb{R}^n):

$$\begin{aligned} X_1 \times \cdots \times X_{n-1} &= \sum_{i=1}^n \det(X_1, \dots, X_{n-1}, e_i) e_i \\ &= \sum_{i=1}^n \begin{vmatrix} X_1^1 & \cdots & X_{n-1}^1 & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ \vdots & & \vdots & 1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ X_1^n & \cdots & X_{n-1}^n & 0 \end{vmatrix} (i) e_i = \begin{vmatrix} X_1^1 & \cdots & X_{n-1}^1 & e_1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ X_1^n & \cdots & X_{n-1}^n & e_n \end{vmatrix} \end{aligned}$$

Beispiel:

$n = 2$

$$\begin{aligned} X = \begin{pmatrix} X^1 \\ X^2 \end{pmatrix} &\Rightarrow X^x = \begin{vmatrix} X^1 & e_1 \\ X^2 & e_2 \end{vmatrix} = -X^2 e_1 + X^1 e_2 = \begin{pmatrix} -X^2 \\ X^1 \end{pmatrix} \\ |X^x| &= a_1(X) = |X| \end{aligned}$$

Beispiel:

$n = 3$:

$$X \times Y = \begin{vmatrix} X^1 & Y^1 & e_1 \\ X^2 & Y^2 & e_2 \\ X^3 & Y^3 & e_3 \end{vmatrix} = (X^2 Y^3 - X^3 Y^2) e_1 + \dots$$

$$|X \times Y| = a_2(X, Y) = \sqrt{\det \begin{pmatrix} \langle X, X \rangle & \langle X, Y \rangle \\ \langle Y, X \rangle & \langle Y, Y \rangle \end{pmatrix}}$$

Anwendung:

Jedes Orthonormalsystem (e_1, \dots, e_{n-1}) im \mathbb{R}^n lässt sich durch $e_n := e_1 \times \cdots \times e_{n-1}$ eindeutig zu einer positiv orientierten Orthonormalbasis (e_1, \dots, e_n) ergänzen.

1 Lokale Kurventheorie im euklidischen Raum

1.1 Grundbegriffe der Kurventheorie

Wir betrachten zunächst (kurzzeitig) rein affinegeometrische Begriffe/Invarianten.

Definition:

Ein \mathcal{C}^r -Weg oder eine parametrisierte \mathcal{C}^r -Kurve ($r \geq 0$) [$\mathcal{C}^r = r$ -mal stetig differenzierbar] im (affinen) \mathbb{R}^n ist eine \mathcal{C}^r -Abbildung

$$c: t \in I \subset \mathbb{R} \mapsto c(t) \in \mathbb{R}^n$$

eines offenen Intervalls I in den \mathbb{R}^n .

t heißt Parameter, die Bildmenge $c[I] \subset \mathbb{R}^n$ die Spur des Weges.

Ein \mathcal{C}^r -Weg ($r \geq 1$) heißt regulär, wenn überall der Tangentenvektor $\dot{c}(t) = \frac{dc}{dt}(t) \neq 0$ ist. Nichtreguläre Punkte $c(t_0)$ mit $\dot{c}(t_0) = 0$ heißen Singularitäten.

Kinematische Interpretation:

$t \mapsto c(t)$ beschreibt die zeitabhängige Bewegung eines Punktes im \mathbb{R}^n . \dot{c} ist die vektorielle Geschwindigkeit (und im euklidischen \mathbb{R}^n $w := |\dot{c}|$ die skalare Geschwindigkeit).

Beispiel:

1. Peano-Kurve: Stetiger (\mathcal{C}^0 -)Weg im \mathbb{R}^2 , dessen Spur jeden Punkt eines Gebietes $G \subseteq \mathbb{R}^2$ ausfüllt (nirgends differenzierbar, „unbrauchbar“)
2. Konstanter Weg: $t \in I \mapsto c(t) = x_0 \in \mathbb{R}^n$ (nirgends regulär, „unbrauchbar“)
3. Neil'sche Parabel: $c: t \in \mathbb{R} \mapsto c(t) = \begin{pmatrix} t^2 \\ t^3 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2$ (\mathcal{C}^∞ -Weg), in $c(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ nicht regulär („Spitze“) ($w(0) = |\dot{c}(0)| = 0$, „man hat Zeit, sich umzudrehen“)
4. Kreislinie: $c: t \in \mathbb{R} \mapsto c(t) = \begin{pmatrix} \cos t \\ \sin t \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2$ (∞ -oft durchlaufbar) [Affin gesehen ist das eine

Ellipse!]

Aber auch $t \mapsto \tilde{c}(t) = \begin{pmatrix} t \\ \pm\sqrt{1-t^2} \end{pmatrix}$ und $t \mapsto \tilde{\tilde{c}}(t) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\cosh t} \\ \tanh t \end{pmatrix}$ sind Parametrisierungen von Kreisstücken.

Wege, die nur mit veränderlicher „Zeitskala“ durchlaufen werden, sollen nicht als verschieden angesehen werden.

Definition:

$I, \tilde{I} \subset \mathbb{R}$ seien offene Intervalle.

Zwei Wege $c: I \rightarrow \mathbb{R}^n, \tilde{c}: \tilde{I} \rightarrow \mathbb{R}^n$ heißen C^r -äquivalent ($r \geq 0$), wenn ein orientierungstreuer (d.h. monoton wachsender) C^r -Diffeomorphismus $\Phi: I \rightarrow \tilde{I}$ existiert, mit

$$c = \tilde{c} \circ \Phi, \text{ d.h. } \forall_t c(t) = \tilde{c}(\Phi(t))$$

Bemerkung:

0. Φ C^r -Diffeomorphismus $\Leftrightarrow \Phi$ bijektiv und Φ und Φ^{-1} C^r -differenzierbar. [Bsp.: $\Phi: t \in \mathbb{R} \rightarrow t^3 \in \mathbb{R}$ ist kein C^1 -Diffeomorphismus]

Bei C^r -Diffeomorphismus ist stets $\dot{\Phi}(t) \neq 0$ (falls $r \geq 1$)

1. Φ ist (für $r \geq 1$) genau dann orientierungstreu, wenn überall $\dot{\Phi}(t) > 0$ ist.
2. Äquivalente Wege besitzen (für $r \geq 1$) das gleiche Regularitätsverhalten.

$$\dot{c}(t) = \dot{\tilde{c}}(\Phi(t)) \cdot \underbrace{\dot{\Phi}(t)}_{>0}$$

3. Die Äquivalenz von Wegen ist wirklich eine Äquivalenzrelation (reflexiv, symmetrisch, transitiv)

Definition:

Eine (orientierte, reguläre) C^r -Kurve ($r \geq 1$) im (affinen) \mathbb{R}^n ist eine Äquivalenz-klasse $[c]$ von regulären C^r -Wegen $c: I \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$. Ein Repräsentant heißt eine (zulässige) Parametrisierung der C^r -Kurve, eine die Äquivalenz vermittelnde Abbildung Φ eine (zulässige) Parametertransformation.

Beispiel:

Die „Kreis“-Darstellungen

$$t \mapsto c(t) = \begin{pmatrix} \cos t \\ \sin t \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2, \left(|t| < \frac{\pi}{2}\right)$$

und

$$\tilde{t} \mapsto \tilde{c}(\tilde{t}) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\cosh \tilde{t}} \\ \tanh \tilde{t} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2 (\tilde{t} \in \mathbb{R})$$

sind \mathcal{C}^∞ -äquivalente Parametertransformationen:

$$\Phi(t) = \operatorname{Artanh} \sin t = \tilde{t}$$

mit

$$\dot{\Phi}(t) = \frac{\cos t}{1 - \sin^2 t} = \frac{1}{\cos t} > 0$$

Bemerkung:

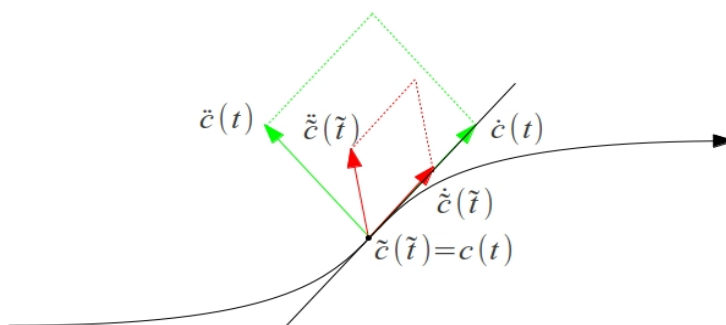
Nicht jedes 1-dimensionale „Gebilde“ im \mathbb{R}^n (z.B. eine vollständige Kreislinie) lässt sich global und injektiv als Bild eines offenen Intervalls darstellen.

Objekte, die sich nur lokal so parametrisieren lassen, heißen (1-dimensionale) differenzierbare Mannigfaltigkeiten. Für lokale Untersuchungen ist eine solche Erweiterung der Kurvenbegriffs nicht nötig.

Die bisher eingeführten Begriffe sind offensichtlich affin-invariant. Aber im Folgenden sind auch nur Eigenschaften von Kurven von Interesse, also Eigenschaften, die nicht von der Parametrisierung abhängen.

Hier ein Beispiel aus der rein affinen Differentialgeometrie.

Beispiel:



Satz 1.1.1:

$t \mapsto c(t)$ sei Parameterdarstellung einer \mathcal{C}^r -Kurve im (affinen) \mathbb{R}^n mit $r \geq n$. Dann sind die Ableitungsvektoren

$$c_p := \frac{d^p c}{d t^p} \quad (p = 1, \dots, n)$$

nicht invariant gegenüber Parametertransformationen, jedoch die (punktualen, orientierten) Schmiegräume (oskulierende Räume, „osculating spaces“)

$$S_p(t) := c(t) + \langle\langle c_1(t), \dots, c_p(t) \rangle\rangle$$

Spezialfälle:

Tangente $S_1(t) = c(t) + \langle\langle \dot{c}(t) \rangle\rangle$

Schmiegeebene $S_2(t)c(t) + \langle \dot{c}(t), \ddot{c}(t) \rangle$

Beweis (von Satz 1.1.1):

Aus $c = \tilde{c} \circ \Phi$ folgt nach der Kettenregel

$$\begin{aligned}\dot{c} &= \dot{\Phi} \left(\dot{\tilde{c}} \circ \Phi \right) \\ \ddot{c} &= \dot{\Phi}^2 \left(\ddot{\tilde{c}} \circ \Phi \right) + Q_2^1 \left(\dot{\Phi}, \ddot{\Phi} \right) \cdot \dot{\tilde{c}}(t)\end{aligned}$$

allgemein

$$c_p = \dot{\Phi}^p (\tilde{c}_p \circ \Phi) + \sum_{k=1}^{p-1} \underbrace{Q_p^k \left(\dot{\Phi}, \ddot{\Phi} \right)}_{\text{„Kettenregelpolynome“}} (\tilde{c}_k \circ \Phi)$$

Also hat man die Transformationsformel

$$\begin{pmatrix} c_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ c_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\Phi} & 0 & \cdots & 0 \\ Q_2^1 & \dot{\Phi}^2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ Q_p^1 & \cdots & Q_p^k & \dot{\Phi}^p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{c}_1 \circ \Phi \\ \vdots \\ \vdots \\ \tilde{c}_p \circ \Phi \end{pmatrix}$$

mit einer regulären Transformationsmatrix positiver Determinante.

Das zeigt

$$\langle \langle c_1, \dots, c_p \rangle \rangle = \langle \langle \tilde{c}_1 \circ \Phi, \dots, \tilde{c}_p \circ \Phi \rangle \rangle$$

und die weiteren Behauptungen.

□

Bemerkung:

Die Regularitätsforderung $\dot{c}(t) \neq 0$ bedeutet, dass in jedem Punkt die Tangenten als 1-dimensionale Unterräume existieren.

Die Schmiegräume kann man dazu benutzen, um festzustellen, ob eine Kurve in einem echten affinen Teilraum $U_p \subset \mathbb{R}^n$ liegt, in einer Geraden, einer Ebene usw. (affin-invariant!)

Zunächst gilt offensichtlich

$$S_1(t) \subseteq S_2(t) \subseteq \cdots \subseteq S_n(t) \leq p$$

Satz 1.1.2:

- a) Liegt eine \mathcal{C}^{p+1} -Kurve in einem p -dimensionalen affinen Unterraum des \mathbb{R}^n ($1 \leq p \leq n-1$), so ist

$$\forall_t \dim S_{p+1}(t) < p+1$$

d.h. der $(p+1)$ -te Schmiegraum degeneriert.

b) Gilt umgekehrt

$$\forall_t \dim S_{p+1}(t) = \dim S_p(t) \stackrel{!}{=} p$$

so liegt die Kurve in einem p -dimensionalen, aber keinem niedriger dimensionalen affinen Unterraum.

Anwendung:

1. Eine C^2 -Kurve $[c]$ im \mathbb{R}^n verläuft genau dann geradlinig, wenn $\forall_t (\dot{c}(t), \ddot{c}(t))$ linear abhängig ist.
[„ \Rightarrow “ nach a), „ \Leftarrow “ nach b), da $[c]$ regulär]

Definition:

Ein (regulärer) Kurvenpunkt $c(t)$ heißt Wendepunkt (WP, inflection point), falls $(\dot{c}(t), \ddot{c}(t))$ linear abhängig ist.

2. Eine wendepunktfreie C^3 -Kurve $[c]$ im \mathbb{R}^n verläuft genau dann in einer Ebene, wenn $\forall_t (\dot{c}(t), \ddot{c}(t), \dddot{c}(t))$ linear abhängig ist.

Definition:

Ein Nicht-Wendepunkt $c(t)$ heißt „Henkelpunkt“ (handle point), wenn $(\dot{c}(t), \ddot{c}(t), \dddot{c}(t))$ linear abhängig ist.

Beweis (von Satz 1.1.2):

a)

$$\forall_t \quad c(t) = p_0 + \sum_{k=1}^p \lambda_k(t) \cdot a_k \in U_p = p_0 + \langle\langle a_1, \dots, a_p \rangle\rangle \Rightarrow$$

$$\forall_{l=1}^{p+1} \forall_t \quad c_l(t) = c^{(l)}(t) = \sum_{k=1}^p \lambda_k^{(l)}(t) \cdot a_k \in \langle\langle a_1, \dots, a_p \rangle\rangle \Rightarrow$$

$$\forall_t \quad \dim S_{p+1}(t) \leq p < p$$

- b) Nach Voraussetzung ist $(c_1, \dots, c_p)(t)$ linear unabhängig, aber $(c_1, \dots, c_{p+1})(t)$ linear abhängig. Es existieren also Funktionen $t \mapsto \lambda_0(t), \dots, \lambda_{p-1}(t)$ mit

$$c_{p+1} = \sum_{k=1}^p \lambda_{k-1} c_k \quad \text{bzw.} \quad \underbrace{(\dot{c})^{(p)}}_{(*)} = \sum_{k=0}^{p-1} \lambda_k (\dot{c})^k \quad (*)$$

Die Funktionen sind stetig auf I , denn $(*)$ kann nach $\lambda_0, \dots, \lambda_{p-1}$ aufgelöst werden (Inhomogenes lineares Gleichungssystem mit vollrangiger Koeffizientenmatrix, da c_1, \dots, c_p linear

unabhängig; Einträge und „rechte Seite“ stetig).

Die Koeffizientenfunktionen $t \mapsto \dot{c}^i(t)$ ($i = 1, \dots, n$) genügen also der linearen Differentialgleichung p -ter Ordnung

$$y^{(p)} = \sum_{k=0}^{p-1} \lambda_k y^{(k)}$$

mit stetigen Koeffizienten. für sie existiert ein Fundamentalsystem $y_1, \dots, y_p: I \rightarrow \mathbb{R}$, so dass für jede Lösung gilt

$$y(t) = \sum_{k=1}^p a_k y_k(t)$$

also auch

$$\dot{c}^i(t) = \sum_{k=1}^p a_k^i y_k(t)$$

und damit

$$\dot{c}(t) = \sum_{k=1}^p y_k(t) a_k$$

mit konstanten Vektoren $a_1, \dots, a_p \in \mathbb{R}^n$.

Integration liefert $\forall t \in I$

$$c(t) = c(t_0) + \sum_{k=1}^p \left(\int_{t_0}^t y_k(\tau) d\tau \right) a_k \in c(t_0) + \langle\langle a_1, \dots, a_p \rangle\rangle =: U_p$$

Es ist schließlich

$$\underline{\dim U_p = p}$$

denn aus $\dim U_p = k < p$ folgt nach a), dass $\dim S_{k+1} < k + 1$, also auch $\dim S_p < p$ im Widerspruch zur Voraussetzung.

□

Ab jetzt arbeiten wir im orientierten, euklidischen Raum. Hier gibt es zum Glück in jeder Äquivalenzklasse von Wegen einen ausgezeichneten Repräsentanten, die Bogenlängenparametrisierung (kurz: BLP).

Satz 1.1.3:

Sei $t \mapsto c(t)$ Parameterdarstellung einer \mathcal{C}^1 -Kurve im euklidischen \mathbb{R}^n . Dann gibt es (bis auf eine additive Konstante) genau eine zulässige Parametertransformation

$$t \mapsto s(t) = \int |\dot{c}(t)| dt [+s_0]$$

(genannt Bogenlängenfunktion), so dass in der neuen Bogenlängenparametrisierung $\bar{c} = c \circ s^{-1}$ gilt

$$\underline{|\bar{c}'| = 1}$$

Die Konstruktion ist unabhängig von der Ausgangsparametrisierung.

Kinematische Interpretation:

In Bogenlängenparametrisierung wird die Kurve mit konstanter Geschwindigkeit $w = |\vec{c}'| \equiv 1$ durchlaufen („Zeit = Weg“). Solche Wege heißen auch normal.

Beweis (von Satz 1.1.3):

Für die gesuchte Transformation s muss wegen

$$c = \bar{c} \circ s \Rightarrow |\dot{c}| = \underbrace{|\bar{c}' \circ s|}_{=1} \underbrace{\dot{s}}_{>0}$$

gelten:

$$\dot{s} = |\dot{c}|$$

Eine Stammfunktion

$$s = \int |\dot{c}|$$

leistet das Gewünschte, da sie \mathcal{C}^1 -differenzierbar ist, mit $\dot{s} = |\dot{c}| > 0$ (wegen der Regularität von c).

Für eine äquivalente Parametrisierung \tilde{c} mit $c = \tilde{c} \circ \Phi$ der Kurve erhält man

$$\dot{s} = |\dot{c}| = |\dot{\tilde{c}} \circ \Phi| \underbrace{\dot{\Phi}}_{>0} = (\tilde{s} \circ \Phi) \cdot \dot{\Phi}$$

also gilt

$$s = \tilde{s} \circ \Phi (+s_0)$$

und damit

$$\bar{c} = c \circ s^{-1} = (\tilde{c} \circ \Phi) \circ (\tilde{s} \circ \Phi)^{-1} = \tilde{c} \circ \Phi \circ \Phi^{-1} \circ \tilde{s}^{-1} = \tilde{c} \circ \tilde{s}^{-1} = \tilde{\bar{c}}$$

□

Bemerkung:

Mit der Bogenlängenfunktion $t \mapsto s(t)$ kann man die Länge eines \mathcal{C}^1 -Wegstücks

$t \in [a, b] \subset I \mapsto c(t) \in \mathbb{R}^n$ messen.

$$L_a^b(c) = s(b) - s(a) = \int_a^b |\dot{c}(t)| \, dt$$

Diese erhält man aus den Längen eingeschriebener Polygonzüge durch Verfeinern und Grenzübergänge. \mathcal{C}^1 -Wege sind rektifizierbar.

Praktische Berechnung der Bogenlängenparametrisierung (Schreibweise schlampig):

1. Man berechne $s = s(t) = \int |\dot{c}(t)| \, dt$
2. bilde die Umkehrfunktion $t = t(s)$
3. und bilde $c(s) = c(t(s))$

Beispiel:

Ellipse $t \mapsto c(t) = \begin{pmatrix} a \cos t \\ b \sin t \end{pmatrix}$ im \mathbb{R}^2 mit Halbachsen $0 < a < b$

$$\begin{aligned} \frac{ds}{dt}(t) &= |\dot{c}(t)| = \sqrt{a^2 \sin^2 t + b^2 \cos^2 t} \\ &= b \cdot \sqrt{1 - \left[1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2\right] \sin^2 t} = b \cdot \sqrt{1 - k^2 \sin^2 t} \end{aligned}$$

$\Rightarrow s(t) = b \cdot E(k, t) [+s_0]$ (Elliptisches Integral 2. Gattung, nicht elementar integrierbar)

Für einen Kreis ($a = b = r$) gilt $k = 0$ also

$$(1.) \quad s = s(t) = r \cdot t$$

$$(2.) \quad t = t(s) = \frac{s}{r} \quad \text{also}$$

$$(3.) \quad c(s) = \begin{pmatrix} r \cos \frac{s}{r} \\ r \sin \frac{s}{r} \end{pmatrix}$$

Ergebnis:

Bei Verwendung der Bogenlängenparametrisierung erhält man zwar immer sofort Größen, die invariant gegenüber Parametertransformationen sind.

Aber meist lässt sie sich nicht explizit bestimmen und ist nur für theoretische Zwecke brauchbar.

Ausweg: siehe später

Allgemein zu Bezeichnungen (schlampig, aber praktisch)

	bei bel. Par.-Darst.	in BLP
Parameter	t [Zeit]	s [Weg]
Parameterdarstellung	$t \mapsto c(t)$	$s \mapsto c(s)$
Ableitungen	$\dot{c}, \ddot{c}, \ddot{\ddot{c}}, \dots$ [Zeitabl.]	c', c'', c''', \dots [Abl. nach BL]

Es gilt

$$\dot{c} = c' \circ \dot{s}, \ddot{c} = c'' \cdot \dot{s}^2 + c' \ddot{s}, \dots$$

1.2 Kurven in der euklidischen Ebene \mathbb{R}^2

siehe Übungen

1.3 Kurven im euklidischen Raum \mathbb{R}^3

Vorgehensweise (in jeder Kurven- und Flächentheorie):

Konstruktion einer (möglichst invarianten) Begleitbasis der Kurve („moving frame“). Ihre Ableitungs-
gleichungen liefern Invarianten für die Kurve, u.a. ihre Krümmungen.

1.3.1 FRENET-Begleitbasis, Krümmung und Torsion

Die Krümmung einer Raumkurve in Bogenlängenparametrisierung $s \mapsto c(s)$ soll deren Abweichung vom geradlinigen Verlauf messen. Diese wird bestimmt durch die Änderung des (invarianten) Tangenteneinheitsvektors

$$T := c' = \frac{dc}{ds}$$

Satz 1.3.1:

Für die Krümmung

$$s \mapsto \kappa(s) := |T'(s)| = |c''(s)| \geq 0$$

einer \mathcal{C}^2 -Kurve in Bogenlängenparametrisierung $s \mapsto c(s)$ gilt

- a) $\kappa(s_0) = 0 \Leftrightarrow c(s_0)$ Wendepunkt
- b) $\kappa \equiv 0 \Leftrightarrow$ die Kurve verläuft geradlinig

Beweis (von Satz 1.3.1):

- a) $\kappa(s_0) = 0 \Leftrightarrow T'(s_0) = 0 \stackrel{\leftarrow}{\Rightarrow} (c', c'')(s_0) = (T, T')(s_0)$ linear abhängig
 $\Leftrightarrow c(s_0)$ ist Wendepunkt

Für die **Rückrichtung** wird benötigt:

$$|T|^2 = \langle T, T \rangle = 1 \Rightarrow 2\langle T', T \rangle = 0 \Rightarrow T' \perp T$$

also $(T, T')(s_0)$ linear abhängig $\Rightarrow T'(s_0) = 0$

- b) nach Satz 1.1.2, Anwendung 1 oder direkt

$$\kappa \equiv 0 \Leftrightarrow T' = c'' = 0 \Leftrightarrow c(s) = x_0 + s \cdot X$$

□

Noch ein Test, ob der Name „Krümmung“ gerechtfertigt ist:

Für einen Kreis in Bogenlängenparametrisierung $s \mapsto c(s) = r \begin{pmatrix} \cos \frac{s}{r} \\ \sin \frac{s}{r} \\ 0 \end{pmatrix}$ im \mathbb{R}^3 gilt

$$T(s) = \begin{pmatrix} -\sin \frac{s}{r} \\ \cos \frac{s}{r} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$T'(s) = \frac{1}{r} \begin{pmatrix} -\cos \frac{s}{r} \\ -\sin \frac{s}{r} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\kappa(s) = \frac{1}{r}$$

Satz 1.3.2:

Sei $s \mapsto c(s)$ Bogenlängenparametrisierung einer wendepunktfreien \mathcal{C}^2 -Kurve im orientierten, euklidischen \mathbb{R}^3 . Dann bilden die Vektorfelder

$$s \mapsto T(s) := c'(s) \quad [\text{Tangentenvektor}]$$

$$s \mapsto H(s) := \frac{T'(s)}{|T'(s)|} \quad [\text{Hauptnormalenvektor}]$$

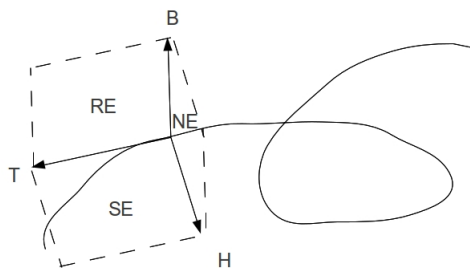
$$s \mapsto B(s) := (T \times H)(s) \quad [\text{Binormalenvektor}]$$

eine orthonormierte, positiv orientierte \mathcal{C}^0 -Begleitbasis der Kurve, genannt FRENET-Begleitbasis.

Beweis (von Satz 1.3.2):

$$T' \perp T, T' \neq 0 \Rightarrow H \text{ definiert; Rest klar}$$

□



Folgerung:

In jedem Kurvenpunkt $c(s)$ hat man die paarweise orthogonalen Begleitebenen

$$\begin{array}{ll} c(s) + \langle\langle T, H \rangle\rangle(s) & (\perp B(s)) & [\text{Schmiegeebene}] \\ c(s) + \langle\langle H, B \rangle\rangle(s) & (\perp T(s)) & [\text{Normalebene}] \\ c(s) + \langle\langle B, T \rangle\rangle(s) & (\perp H(s)) & [\text{rektifizierende Ebene}] \end{array}$$

Die Torsion (Windung, 2. Krümmung) einer wendepunktfreien \mathcal{C}^3 -Kurve ($\Rightarrow (T, H, B)\mathcal{C}^1$ -differenzierbar) soll deren Abweichung vom ebenen Verlauf messen. Diese wird bestimmt durch die Änderung des Binormalenvektors B (= Normalenvektor der Schmiegeebene).

$$\text{Wegen } \left\{ \begin{array}{lll} B^2 = 1 & \Rightarrow \langle B, B' \rangle = 0 & \Rightarrow B' \perp B \\ B = T \times H & \Rightarrow B' = \underbrace{T' \times H}_{=0} + T \times H' & \Rightarrow B' \perp T \end{array} \right\} \text{ gilt}$$

$B' = -\tau H$ mit einer \mathcal{C}^0 -Funktion

$$\tau = -\langle B', H \rangle$$

Satz 1.3.3:

Für die durch $B' = -\tau H$ definierte Torsion

$$s \mapsto \tau(s) = -\langle B', H \rangle(s) \stackrel{H \perp B}{=} \langle H', B \rangle(s) \stackrel{B = T \times H}{=} \det(T, H, H')(s)$$

einer wendepunktfreien \mathcal{C}^3 -Kurve in Bogenlängenparametrisierung $s \mapsto c(s)$ gilt

$$\text{a) } \tau(s_0) = 0 \Leftrightarrow c(s) \text{ Henkelpunkt} \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{ll} (c', c'', c''')(s_0) & \text{linear abhängig} \\ (c', c'')(s_0) & \text{linear unabhängig} \end{array} \right\}$$

$$\text{b) } \tau \equiv 0 \Leftrightarrow \text{die Kurve verläuft eben.}$$

Beweis (von Satz 1.3.3):

a) Allgemein gilt

$$\begin{aligned} \langle X \times Y, Z \rangle &= \sum_i (X \times Y)^i Z^i = \sum_{i=1}^3 \det(X, Y, e_i) Z^i \\ &= \det(X, Y, Z) \end{aligned}$$

Daraus folgt

$$\begin{aligned} \tau(s_0) &= \det(T, H, H')(s_0) = \det\left(c', \frac{c''}{\kappa}, \left(\frac{c''}{\kappa}\right)'\right)(s_0) \\ &= \det\left(c', \frac{c''}{\kappa}, \left(\frac{1}{\kappa}\right)' c'' + \frac{1}{\kappa} c'''\right)(s_0) = \frac{1}{\kappa^2(s_0)} \det(c', c'', c''')(s_0) = 0 \end{aligned}$$

$\Rightarrow (c', c'', c''')(s_0)$ linear abhängig

b) Nach Satz 1.1.2, Anwendung 2

□

Satz 1.3.4:

Für die Frenet-Begleitbasis $s \mapsto (T, H, B)(s)$ einer wendepunktfreien \mathcal{C}^3 -Kurve gelten die Frenet-schen Ableitungsgleichungen

$$\left\{ \begin{array}{lcl} T' & = & \kappa \cdot H \\ H' & = & -\kappa T + \tau B \\ B' & = & -\tau H \end{array} \right\} \text{ bzw. } \begin{pmatrix} T \\ H \\ B \end{pmatrix}' = \begin{pmatrix} 0 & \kappa & 0 \\ -\kappa & 0 & \tau \\ 0 & -\tau & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T \\ H \\ B \end{pmatrix}$$

mit der \mathcal{C}^1 -Krümmung $s \mapsto \kappa(s) > 0$ und der \mathcal{C}^0 -Torsion $s \mapsto \tau(s)$.

Beweis (von Satz 1.3.4):

Da $(T_1, T_2, T_3) := (T, H, B)$ ein Orthonormalbasisfeld ist, gilt $\langle T_i, T_k \rangle = \delta_{ik}$
 $\Rightarrow \langle T'_i, T_k \rangle = -\langle T'_k, T_i \rangle$, d.h. die Ableitungsmatrix $(\langle T'_i, T_k \rangle)_{i,k=1,2,3}$ ist schief-symmetrisch. Damit kann die nach Definition bekannte 1. und 3. Zeile ergänzt werden.

□

Problem: Wie berechnet man Begleitbasis, Krümmung und Torsion, wenn man die Bogenlängen-parametrisierung nicht explizit kennt?

Lösung: „Rücktransformation“

Folgerung:

Bezüglich einer beliebigen Parametrisierung $t \mapsto c(t)$ einer wendepunktfreien \mathcal{C}^3 -Kurve gilt

$$\begin{aligned} T &= \frac{\dot{c}}{|\dot{c}|} \\ B &= \frac{\dot{c} \times \ddot{c}}{|\dot{c} \times \ddot{c}|} \\ H &= B \times T = \frac{\ddot{c} - \langle \ddot{c}, T \rangle T}{|\ddot{c} - \langle \ddot{c}, T \rangle T|} \\ \kappa &= \frac{|\dot{c} \times \ddot{c}|}{|\dot{c}|^3} \\ \tau &= \frac{\det(\dot{c}, \ddot{c}, \ddot{\ddot{c}})}{|\dot{c} \times \ddot{c}|^2} \end{aligned}$$

Beweis (der Folgerung):

$$\begin{aligned}\dot{c} &= c' \cdot \dot{s} = c' \cdot |\dot{c}| \Rightarrow T = c' = \frac{\dot{c}}{|\dot{c}|} = \frac{1}{w} \dot{c} \\ B = T \times H &= \frac{1}{\kappa} T \times T' = \frac{1}{w\kappa} T \times \dot{T} = \frac{1}{w\kappa} \left(\frac{1}{w} \dot{c} \times \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{w} \dot{c} \right) \right) = \frac{1}{w^3 \kappa} \dot{c} \times \ddot{c} = \frac{\dot{c} \times \ddot{c}}{|\dot{c} \times \ddot{c}|} \\ \Rightarrow w^3 \kappa &= |\dot{c} \times \ddot{c}| \Rightarrow \kappa = \frac{|\dot{c} \times \ddot{c}|}{w^3} = \frac{\dot{c} \times \ddot{c}}{|\dot{c}|^3}\end{aligned}$$

usw. (siehe auch Übungen)

□

Bemerkung:

Als Funktionen sind z.B. $s \mapsto \kappa(s)$ und $t \mapsto \kappa(t)$ im Allgemeinen völlig verschieden, obwohl gleich bezeichnet.

Zusammenhang: $\kappa(s(t)) = \kappa(t)$

Analog für τ, T, H, B .

Zusatz: (später wichtig)

Die Basis (T, H, B) erhält man durch Anwendung des Schmidtschen Orthonormalisierungsverfahrens auf die Basis (\dot{c}, \ddot{c}) der Schmiegebene $(\rightarrow (T, H))$ und Ergänzung durch $B = T \times H$.

Satz 1.3.5:

Äquivalent zu den Frenetschen Formeln ist

$$\begin{pmatrix} T \\ H \\ B \end{pmatrix}' = \omega \cdot D \times \begin{pmatrix} T \\ H \\ B \end{pmatrix}$$

mit der Gesamtkrümmung

$$\omega = \sqrt{\kappa^2 + \tau^2}$$

und dem (normierten) Darboux-Vektor

$$D = \frac{1}{\omega} (\tau \cdot T + \kappa \cdot B)$$

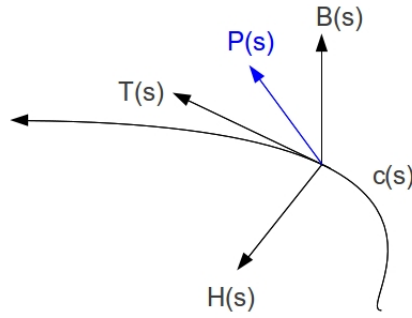
Beweis (von Satz 1.3.5):

Nachrechnen unter Verwendung von

$$B = T \times H, \quad H = B \times T, \quad T = H \times B$$

□

Kinematische Interpretation:



$s \mapsto c(s)$ beschreibt die Bewegung aus Punkten mit konstanter Geschwindigkeit $w = |c'| = 1$. Die Bewegung aus starr mit der Begleitbasis $(T_1, T_2, T_3) = (T, H, B)$ verbundenen Punktes

$$P(s) = c(s) + \sum_{i=1}^3 \lambda_i T_i(s) = c(s) + X(s)$$

setzt sich zusammen aus einer Translation (mit der Kurve) und einer Drehung um eine momentane Drehachse. Für seine Geschwindigkeit gilt

$$\begin{aligned} P'(s) &= c'(s) \sum_{i=1}^3 \lambda_i T_i'(s) = c'(s) + \sum_{i=1}^3 \lambda_i w(s) D(s) \times T_i(s) \\ &= \underline{c'(s) + w(s) D(s) \times X(s)} \end{aligned}$$

mit der

- (vektoriellen) Bahngeschwindigkeit $c'(s)$ der Kurve und der
- (vektoriellen) Winkelgeschwindigkeit $w \cdot D(s)$ des Vektors $X(s) = P(s) - c(s)$
wobei $D(s)$ der Einheitsvektor der momentanen Drehachse ist
und $w(s)$ die skalare Winkelgeschwindigkeit beschreibt

1.3.2 Approximierter Kurvenverlauf

$s \mapsto c(s)$ sei Bogenlängenparametrisierung einer \mathcal{C}^3 -Kurve mit $\kappa > 0$. Um einen Parameterwert s_0 (ohne Einschränkung sei $s_0 = 0$) besitzt sie die Taylorentwicklung

$$c(s) = c(0) + c'(0)s + \frac{1}{2}c''(0)s^2 + \frac{1}{6}c'''(0)s^3 + \mathcal{O}(s^3)$$

Mit $x_0 := c(0)$, $T_0 := T(0)$, \dots , $\kappa_0 := \kappa(0)$, \dots folgt wegen $c' = T$, $c'' = T' = \kappa H$, $c''' = \kappa' H + \kappa(-\kappa T + \tau B)$

Satz 1.3.6:

Eine wendepunktfreie \mathcal{C}^3 -Kurve in Bogenlängenparametrisierung $s \mapsto c(s)$ im \mathbb{R}^3 besitzt um $s = 0$

die Taylorentwicklung

$$\begin{aligned} c(s) = & x_0 + \left(s - \frac{1}{6}\kappa_0^2 s^3 \right) T_0 \\ & + \left(\frac{1}{2}\kappa_0 s^2 + \frac{1}{6}\kappa'_0 s^3 \right) H_0 \\ & + \left(\frac{1}{6}\kappa_0 \tau_0 s^3 \right) B_0 \\ & + \mathcal{O}(s^3) \end{aligned}$$

genannt lokale kanonische Form der Kurve bzgl. des kartesischen Koordinatensystems $(x_0; T_0, H_0, B_0)$ in der Umgebung von $s = 0$. Berücksichtigt man nur Terme niedriger Ordnung, so verhält sie sich in Koordinaten wie

$$s \mapsto \left(s, \frac{1}{2}\kappa_0 s^2, \frac{1}{6}\kappa_0 \tau_0 s^3 \right)$$

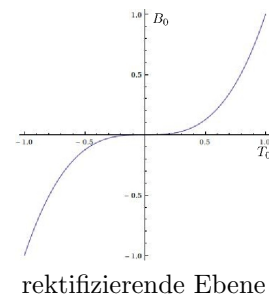
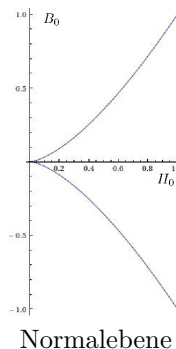
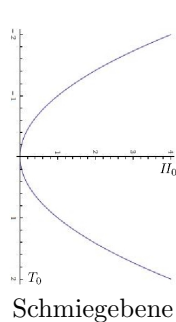
Folgerung (aus Satz 1.3.6):

a) Eine Kurve im \mathbb{R}^3 verläuft in 1. Näherung in ihrer Tangente, in 2. Näherung in ihrer Schmiegene. Abweichungen davon sind durch Krümmung und Torsion bestimmt.

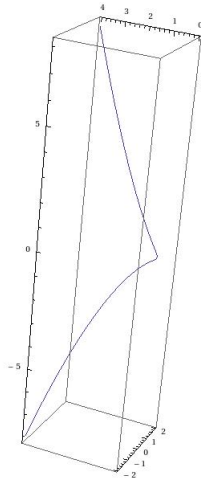
b) Ihre Orthogonalprojektion

- in die Schiegeebene verhält sich wie eine (quadratische) Parabel
- in die Normalebene verhält sich wie eine Neil'sche Parabel
- in die rektifizierende Ebene verhält sich wie eine kubische Parabel

Skizze für $\tau > 0$



c) Sie durchdringt ihre Normalebene $x_0 + \langle\langle H_0, B_0 \rangle\rangle$ in Richtung von T_0 und ihre Schmiegenebene



$x_0 + \langle\langle T_0, H_0 \rangle\rangle$ für $\tau_0 > 0$ in Richtung von B_0 . (Geometrische Bedeutung des Vorzeichens der Torsion)

Sie durchdringt die rektifizierende Ebene $x_0 + \langle\langle B_0, T_0 \rangle\rangle$ niemals, sondern bleibt auf der Seite, in die H_0 zeigt.

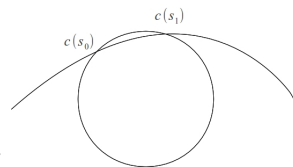
1.3.3 Krümmungskreis und Schmiegekugel (oskulierende Kugel)

Wir bestimmen alle Kugeln $K_r(m) = \{y \in \mathbb{R}^3 \mid |y - m| = r\}$, die eine vorgegebene Kurve in Bogenlängenparametrisierung $s \mapsto c(s)$ in einem Punkt $c(s_0)$ von 2. und 3. Ordnung berühren.

Berührbedingungen an die Abstandsfunktion $s \mapsto F(s) := d^2(s) = |c(s) - m|^2$

$F(s_0) = r^2$	(Berührung 0. Ordnung: $c(s_0) \in K_r(m)$)
zusätzlich $F'(s_0) = 0$	(Berührung 1. Ordnung)
zusätzlich $F''(s_0) = 0$	(Berührung 2. Ordnung)
zusätzlich $F'''(s_0) = 0$	(Berührung 3. Ordnung)

Begründung:



- Berührung 1. Ordnung = „2-punktige Berührung“

$$F(s_0) = F(s_1) = r^2 \xrightarrow{\text{MWS}} \exists_{\overline{s_0} \in \overline{s_0 s_1}} F'(\overline{s_0}) = 0$$

Grenzübergang $s_1 \rightarrow s_0 (\Rightarrow \overline{s_0} \rightarrow s_0)$ liefert $F'(s_0) = 0$

- Berührung 2. Ordnung = „3-punktige Berührung“

$$F(s_0) = F(s_1) = F(s_2) = r^2 \xrightarrow{\text{MWS}} \exists_{\overline{s_0}, \overline{s_1}} F'(\overline{s_0}) = F'(\overline{s_1}) = 0 \xrightarrow{\text{MWS}} \exists_{\overline{s_0}} F''(\overline{s_0}) = 0.$$

Grenzübergang $s_1, s_2 \rightarrow s_0 (\Rightarrow \overline{s_1}, \overline{s_2} \rightarrow s_0)$ liefert $F'(s_0) = F''(s_0) = 0$

Auswertung der Bedingungen:

$$(0) \quad F(s_0) = |c(s) - m|^2 = r^2$$

$$(1) \quad F'(s_0) = 2\langle c - m, T \rangle(s_0) = 0$$

$$(2) \quad F''(s_0) = 2[1 + \kappa\langle c - m, H \rangle](s_0) = 0$$

$$(3) \quad F'''(s_0) = 2[\kappa'\langle c - m, H \rangle + \kappa\langle c - m, -\kappa T + \tau B \rangle](s_0) = 0$$

Der Ansatz $m = c(s_0) + \alpha T(s_0) + \beta H(s_0) + \gamma B(s_0)$ liefert

$$\alpha = -\langle c - m, T \rangle(s_0)$$

$$\beta = -\langle c - m, H \rangle(s_0)$$

$$\gamma = -\langle c - m, B \rangle(s_0)$$

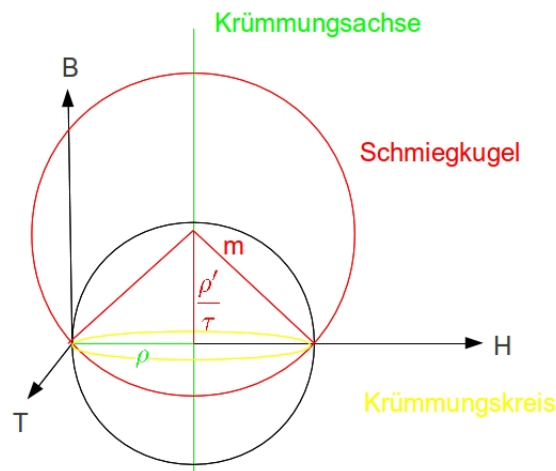
$$(0) \quad \alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = r^2$$

$$(1) \Rightarrow \alpha = 0$$

$$(2) \Rightarrow \beta = \frac{1}{\kappa(s_0)} = \varrho(s_0) > 0 \text{ (falls } \kappa(s_0) > 0 \text{)}$$

$$(3) \quad (\kappa'\varrho + \kappa\tau\gamma)(s_0) = 0 \Rightarrow \gamma = -\frac{\kappa'}{\kappa^2\tau}(s_0) = \frac{\varrho'}{\tau}(s_0) \text{ [falls } \tau(s_0) \neq 0 \text{]}$$

Satz 1.3.7:



1. Bei einer \mathcal{C}^2 -Kurve in Bogenlängenparametrisierung $s \mapsto c(s)$ existiert in einem Nicht-Wendepunkt $c(s_0)$ (mit $\kappa(s_0) > 0$) genau eine 1-parametrische Kugelschar, die dort von 2.

Ordnung berührt. Die Mittelpunkte dieser Kugel liegen auf einer Geraden

$$c(s_0) + \varrho(s_0)H(s_0) + \langle\langle B(s_0) \rangle\rangle \quad \left(\text{mit } \varrho := \frac{1}{\kappa} \right)$$

genannt Krümmungsachse der Kurve in $c(s_0)$.

Alle diese Kugeln schneiden die Schmiegenebene in einem Kreis mit Mittelpunkt

$$\bar{m} = c(s_0) + \varrho(s_0)H(s_0)$$

und Radius

$$\bar{r} = \varrho(s_0) \quad [\text{Krümmungsradius}]$$

genannt Krümmungskreis der Kurve in s_0 .

2. Bei einer \mathcal{C}^3 -Kurve in Bogenlängenparametrisierung $s \mapsto c(s)$ existiert in einem Nicht-Henkelpunkt $c(s_0)$ (mit $\kappa(s_0) > 0, \tau(s_0) \neq 0$) genau eine Kugel, die dort von 3. Ordnung berührt. Sie besitzt den Mittelpunkt

$$m = c(s_0) + \varrho(s_0)H(s_0) + \frac{\varrho'}{\tau}(s_0)B(s_0)$$

und den Radius

$$r = \sqrt{\varrho^2 + \left(\frac{\varrho'}{\tau}\right)^2}(s_0)$$

und heißt Schmiegkugel der Kurve in $c(s_0)$.

1.3.4 Der Fundamentalsatz der Kurventheorie (im \mathbb{R}^3)

Vorbemerkung: Frenet-Theorie ist grundsätzlich nur möglich für wendepunktfreie Kurven ($\kappa > 0$).

Ausreichende Differentiationsordnung			aber auch möglich		
c	\mathcal{C}^3	(vorausgesetzt)	c	\mathcal{C}^2	(vorausgesetzt)
T	\mathcal{C}^2		T	\mathcal{C}^1	
H	\mathcal{C}^1		H	\mathcal{C}^1	(zusätzlich vorausgesetzt)
B	\mathcal{C}^1		B	\mathcal{C}^1	
κ	\mathcal{C}^1		κ	\mathcal{C}^0	
τ	\mathcal{C}^0		τ	\mathcal{C}^0	

Schon für solche „ \mathcal{C}^2 -Kurven mit \mathcal{C}^1 -Begleitbasis“ („Frenet-Kurven“) lässt sich beweisen:

Satz 1.3.8 (Fundamentalsatz der Kurventheorie im euklidischen \mathbb{R}^3):

- a) Seien $s \in I \mapsto \kappa(s) > 0$, $s \in I \mapsto \tau(s) \in \mathbb{R}$ beliebige \mathcal{C}^0 -Funktionen, $s_0 \in I$ ein Parameterwert, $x_0 \in \mathbb{R}^3$ ein Punkt und (T_0, H_0, B_0) eine positiv orientierte Orthonormalbasis des \mathbb{R}^3 . Dann gibt es genau eine \mathcal{C}^2 -Kurve in Bogenlängenparametrisierung $s \in I \mapsto c(s) \in \mathbb{R}^3$ mit \mathcal{C}^1 -Begleitbasis $s \mapsto (T, H, B)(s)$, welche die Krümmung $s \mapsto \kappa(s)$ und die Torsion $s \mapsto \tau(s)$ besitzt, sowie die Anfangsbedingungen

$$(*) \quad c(s_0) = x_0, (T, H, B)(s_0) = (T_0, H_0, B_0)$$

erfüllt.

- b) Zwei \mathcal{C}^2 -Kurven in Bogenlängenparametrisierung $s \mapsto c(s)$, $s \mapsto \tilde{c}(s)$ mit \mathcal{C}^1 -Begleitbasis mit gleicher Krümmung $s \mapsto \kappa(s) = \tilde{\kappa}(s)$ und Torsion $s \mapsto \tau(s) = \tilde{\tau}(s)$ besitzen, stimmen überein bis auf eine (eigentliche) Bewegung (Drehung + Translation) des \mathbb{R}^3 , d.h. es gilt

$$\tilde{c} = Dc + t$$

mit einer Drehmatrix $D \in SO(3, \mathbb{R})$ und einem Translationsvektor $t \in \mathbb{R}^3$.

Beweis (von Satz 1.3.8):

- a) **Eindeutigkeit:** Das lineare Differentialgleichungssystem der Frenet-Formeln

$$c' = T_1, \quad \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{pmatrix}' = \begin{pmatrix} 0 & \kappa & 0 \\ -\kappa & 0 & \tau \\ 0 & -\tau & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{pmatrix} \quad \text{bzw.} \quad T_i' = \sum_{k=1}^3 a_{ik} T_k$$

besitzt zu den Anfangsbedingungen $(*)$ (bzw. hier $(T_1, T_2, T_3)(s_0) = (T_0, H_0, B_0)$) genau eine \mathcal{C}^1 -Lösung

$$s \mapsto (T_1, T_2, T_3)(s)$$

und damit genau eine \mathcal{C}^2 -Lösung

$$s \mapsto c(s) = x_0 + \int_{s_0}^s T_1(\sigma) d\sigma$$

, definiert auf ganz I .

Existenz: Es muss noch überprüft werden, ob diese Lösung $s \mapsto c(s)$ Bogenlängenparametrisierung einer \mathcal{C}^2 -Kurve mit \mathcal{C}^1 -Begleitbasis ist und wirklich $s \mapsto \kappa(s), \tau(s)$ als Krümmung und Torsion besitzt.

- (α) Wir zeigen: Die Lösungsfelder $s \mapsto T_1(s), T_2(s), T_3(s)$ bilden überall (nicht nur für $s = s_0$) eine positiv orientierte Orthonormalbasis:

Für die Skalarprodukte $\langle T_i, T_k \rangle$ gilt:

$$\langle T_i, T_k \rangle' = \langle T_i', T_k \rangle + \langle T_i, T_k' \rangle = \sum_{j=1}^3 a_{ij} \langle T_j, T_k \rangle + \sum_{k=1}^3 a_{kj} \langle T_i, T_j \rangle$$

Dieses lineare Differentialgleichungssystem besitzt zu den Anfangsbedingungen

$$\langle T_i, T_k \rangle(s_0) = \delta_{ik}$$

genau eine Lösung und diese ist $\langle T_i, T_k \rangle \equiv \delta_{ik}$, denn

$$0 = \delta'_{ik} = a_{ik} + a_{ki}$$

weil die Ableitungsmatrix schiefssymmetrisch ist.

Weiter muss für das Orthonormalbasisfeld $s \mapsto (T_1, T_2, T_3)(s)$ gelten:

$$\det(T_1, T_2, T_3) = \pm 1$$

, wobei aus Stetigkeitsgründen nur $+1$ möglich ist (denn $\det(T_1, T_2, T_3)(s_0) = +1$).

(β) Für die Lösung $s \mapsto c(s)$ gilt jetzt $|c'| = |T_1| = 1$, d.h. sie ist Bogenlängenparametrisierung einer Kurve im \mathbb{R}^3 . Weiter ist

$$\begin{aligned} T &= c' = T_1 \\ H &= \frac{T'}{|T'|} = \frac{T_1'}{|T_1'|} = \frac{\kappa T_2}{\kappa |T_2|} = T_2 \\ B &= T \times H = T_1 \times T_2 = T_3 \end{aligned}$$

Es gelten also die Frenet-Formeln für (T, H, B) , sodass κ die Krümmung und τ die Torsion ist.

b) Sei s_0 ein fester Parameterwert sowie

$$\begin{aligned} x_0 &:= c(s_0) \\ (T_0, H_0, B_0) &:= (T, H, B)(s_0) \\ \tilde{x}_0 &:= \tilde{c}(s_0) \\ (\tilde{T}_0, \tilde{H}_0, \tilde{B}_0) &:= (\tilde{T}, \tilde{H}, \tilde{B})(s_0) \end{aligned}$$

Dann gibt es genau eine Drehmatrix D und einen Vektor $t \in \mathbb{R}^3$ mit

$$\begin{aligned} \tilde{x}_0 &= Dx_0 + t \\ \tilde{T}_0 &= D \cdot T_0 \\ \tilde{H}_0 &= D \cdot H_0 \\ \tilde{B}_0 &= D \cdot B_0 \end{aligned}$$

(Transformation zweier kartesischer Koordinatensysteme ineinander).
Das lineare Differentialgleichungssystem

$$c' = T_1, \quad \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{pmatrix}' = \begin{pmatrix} 0 & \kappa & 0 \\ -\kappa & 0 & \tau \\ 0 & -\tau & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{pmatrix}$$

hat nun die Lösungssysteme

$$(1) \quad s \mapsto c(s), \quad s \mapsto (T, H, B)(s_0)$$

und wegen der Linearität

$$(1a) \quad s \mapsto D \cdot c(s) + t, \quad s \mapsto (D \cdot T, D \cdot H, D \cdot B)$$

sowie natürlich auch

$$(2) \quad s \mapsto \tilde{c}(s), \quad s \mapsto (\tilde{T}, \tilde{H}, \tilde{B})(s)$$

wobei (1a) und (2) in s_0 die gleichen Anfangsbedingungen besitzen

$$\tilde{c}(s_0) = \tilde{x}_0 = Dx_0 + t, \dots$$

Also gilt identisch

$$\tilde{c} = D \cdot c + t$$

und $(\tilde{T}, \tilde{H}, \tilde{B}) = (D \cdot T, D \cdot H, D \cdot B)$

□

Ergebnis: Krümmung und Torsion als Funktionen der Bogenlänge bilden ein vollständiges System unabhängiger Invarianten für eine Frenet-Kurve im \mathbb{R}^3 .

Bemerkung:

Das Differentialgleichungssystem der Frenet-Formeln lässt sich nur in einfachen Fällen explizit lösen, etwa bei ebenen Kurven als Spezialfälle von Böschungslinien.

Variante (des Fundamentalsatzes):

Vorgabe von

$$\begin{cases} t \mapsto w(t) > 0 & \text{(Geschwindigkeit)} \\ t \mapsto \kappa(t) > 0 & \text{(in Abhängigkeit von der Zeit)} \\ t \mapsto \tau(t) \end{cases}$$

bestimmen eine Kurve in einer Parameterdarstellung $t \mapsto c(t)$ mit $|\dot{c}| = w$ eindeutig. Das Differentialgleichungssystem

$$\begin{aligned} \dot{c} &= wT_1 \\ \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{pmatrix} &= w \begin{pmatrix} 0 & \kappa & 0 \\ -\kappa & 0 & \tau \\ 0 & -\tau & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

ist zu lösen.

1.3.5 Spezielle Kurvenklassen

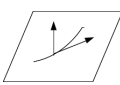
A. Böschungslinien

Definition:

Eine Böschungslinie im \mathbb{R}^3 ist eine \mathcal{C}^1 -Kurve, ohne Einschränkung in Bogenlängenparametrisierung $s \mapsto c(s)$, deren Tangenten mit einer festen Richtung E (mit $|E| = 1$) einen festen Böschungswinkel γ einschließen. Es ist also \forall_s

$$\langle T(s), E \rangle = \cos \gamma$$

Beispiel:

1. Ebene Kurven ($\gamma = 90^\circ$) 

2. Gewöhnliche Schraubenlinien 

Bemerkung:

Bei Frenet-Böschungslinien folgt aus $\langle T, E \rangle = \text{const.}$ sofort $\kappa \langle H, E \rangle = 0$, sodass E in der rektifizierenden Ebene $c + \langle T, B \rangle$ liegt. Der Böschungswinkel γ kann dann eindeutig so festgelegt werden, dass

$$(*) \quad E = \cos \gamma T + \sin \gamma B \quad \text{mit} \quad -\pi < \gamma \leq \pi$$

Durch Übergang von E zu $-E$ bei Bedarf kann erreicht werden, dass $\sin \gamma = \langle E, B \rangle \geq 0$, also $0 \leq \gamma \leq \pi$. Ableiten von $(*)$ liefert

$$0 = (\kappa \cos \gamma - \tau \sin \gamma) \cdot H, \quad \text{also} \quad \underline{\kappa \cos \gamma - \tau \sin \gamma = 0}$$

sodass nur $0 < \gamma < \pi$ möglich ist.

Satz 1.3.9:

Für eine Frenet-Kurve im \mathbb{R}^3 sind äquivalent

- (a) Die Kurve ist Böschungslinie. ($\langle T, E \rangle = \text{const.}$)
- (b) Die konische Krümmung $\frac{\tau}{\kappa} (= \varrho\tau)$ ist konstant.
- (c) Der Darboux-Vektor $D = \frac{1}{\omega}(\tau T + \kappa B)$ ist konstant [und ohne Einschränkung gleich der festen Richtung]
- (d) Der Winkel zwischen Tangentenrichtung und Darboux-Richtung ist konstant: $\langle T, D \rangle = \text{const}$ [und ohne Einschränkung gleich dem Böschungswinkel]

Beweis (von Satz 1.3.9):

(a) \Rightarrow (b) Nach obiger Bemerkung gilt

$$\begin{aligned}\kappa \cos \gamma - \tau \sin \gamma &= 0 \\ \Rightarrow \frac{\tau}{\kappa} &= \cot \gamma = \text{const.}\end{aligned}$$

(b) \Rightarrow (c)

$$\begin{aligned}\frac{\tau}{\kappa} = \lambda = \text{const.} &\Rightarrow \begin{cases} \frac{\kappa}{\omega} = \frac{\kappa}{\sqrt{\kappa^2 + \tau^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda^2}} = \text{const.} \\ \frac{\tau}{\omega} = \frac{\tau}{\sqrt{\kappa^2 + \tau^2}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \lambda^2}} = \text{const.} \end{cases} \\ \Rightarrow D' = \left(\frac{\tau}{\omega} T + \frac{\kappa}{\omega} B \right)' &= \left(\frac{\tau}{\omega} \kappa - \frac{\kappa}{\omega} \tau \right) H = 0\end{aligned}$$

(c) \Rightarrow (d) $D = \text{const.} \Rightarrow \langle T, D \rangle' = \kappa \langle H, D \rangle = 0$

(d) \Rightarrow (a)

$$\begin{aligned}\langle T, D \rangle = \frac{\tau}{\omega} = \text{const.} &\Rightarrow \left(\frac{\kappa}{\omega} \right)^2 = 1 - \left(\frac{\tau}{\omega} \right)^2 = \text{const} \\ \Rightarrow \frac{\tau}{\omega}, \frac{\kappa}{\omega} &= \text{const.} \Rightarrow D' = \dots = 0 \\ \Rightarrow D &= \text{const.} \Rightarrow \text{Die Kurve ist Böschungslinie mit fester Richtung } E := D\end{aligned}$$

□

A. Sphärische Kurven

Satz 1.3.10:

- a) Eine wendepunktfreie \mathcal{C}^2 -Kurve in Bogenlängenparametrisierung $s \mapsto c(s)$ ist genau dann sphärisch (liegt auf einer Kugel), wenn eine \mathcal{C}^1 -Funktion $s \mapsto a(s)$ existiert mit

$$\begin{array}{l} \varrho' = a\tau \\ a' = -\varrho\tau \end{array}$$

Für Mittelpunkt m und Radius r der Kugel gilt dann

$$m = c + \varrho H + aB, \quad r = \sqrt{\varrho^2 + a^2}$$

- b) Äquivalent dazu ist: Es existiert eine \mathcal{C}^1 -(Winkel)-Funktion $s \mapsto \lambda(s)$ mit $|\lambda| < \frac{\pi}{2}$ und eine Zahl $r > 0$ mit $\varrho = r \cos \lambda$, $\lambda' = -\tau$. Dabei gilt

$$m = c + r(\cos \lambda H + \sin \lambda B)$$

Beweis (von Satz 1.3.10):

a)

$$\begin{aligned} \forall_s |c(s) - m|^2 = r^2 &\Rightarrow \forall_s \langle c(s) - m, T(s) \rangle = 0 \\ &\Rightarrow c = m - bH - aB \end{aligned}$$

mit \mathcal{C}^1 -Funktionen a, b . Aus

$$T = -b'H - b(-\kappa T + \tau B) - a'B + a\tau H$$

folgt durch Koeffizientenvergleich

$$b \cdot \kappa = 1 \quad (\Rightarrow b = \varrho)$$

$$b' = a \cdot \tau$$

$$a' = -b \cdot \tau$$

Rückrichtung: Aus $\varrho' = a\tau$, $a' = -\varrho\tau$ folgt für $m := c + \varrho H + aB$:

$$m' = \dots = 0 \quad \text{also} \quad m = \text{const.}$$

und für $r^2 := |c - m|^2 = \varrho^2 + a^2$ folgt:

$$\frac{d}{ds}(r^2) = 2\varrho\varrho' + 2aa' = 0 \quad \text{also} \quad r = \text{const.}$$

b) „ \Rightarrow “ Setze $\begin{cases} \rho = r \cos \lambda & (> 0) \\ a = r \sin \lambda \end{cases}$, also

$$\lambda = \arctan \frac{a}{\varrho} \in \left] -\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2} \right[$$

$$\text{Dann ist } \tau = -\frac{a'}{\varrho} = -\frac{r(\cos \lambda)\lambda'}{r \cos \lambda} = -\lambda'$$

„ \Leftarrow “ ...

□

Folgerung:

a) Sphärische C^4 -Kurven mit $\forall_s \kappa(s) > 0, \forall_s \tau \neq 0$ sind durch

$$\left(\frac{\varrho'}{\tau} \right)' + \varrho\tau = 0$$

definiert.

b) Äquivalent dazu ist, wenn zusätzlich „verrat ich net“

$$\left(\frac{\varrho'}{\tau} \right)^2 + \varrho^2 = \text{const}(= r^2)$$

Die Kugel, auf der die Kurve verläuft, ist ihre Schmiegekugel.

Beweis (der Folgerung):

a) Elimination von a

b) siehe Übungen

□

1.4 Kurven im euklidischen \mathbb{R}^n

Hier ist Frenet-Theorie möglich für \mathcal{C}^n -Kurven, ohne Einschränkung in Bogenlängenparametrisierung $s \mapsto c(s)$, deren Schmiegyperebenen

$$S_{n-1} = c + \langle\langle c_1, \dots, c_{n-1} \rangle\rangle \quad \left(\text{mit } c_p := \frac{d^p c}{ds^p} \right)$$

nirgends degenerieren, also überall (c_1, \dots, c_{n-1}) linear unabhängig ist.

Begleitbasis:

Anwendung des Schmidt'schen Orthonormalisierungsverfahrens auf die Basis (c_1, \dots, c_{n-1}) der Schmiegyperebene liefert dort eine Orthonormalbasis (T_1, \dots, T_{n-1}) , die durch $T_n := T_1 \times \dots \times T_{n-1}$ zu einer positiv orientierten, orthonormierten Begleitbasis (T_1, \dots, T_n) der Kurve ergänzt werden kann.

Ableitungsgleichungen:

Aus $\langle T_i, T_k \rangle = \delta_{ik} \Rightarrow \langle T'_i, T_k \rangle = -\langle T'_k, T_i \rangle$ folgt die Schiefsymmetrie der Ableitungsmatrix

$$(\langle T'_i, T_k \rangle)_{i,k=1,\dots,n}$$

Wegen

$$\begin{aligned} T_p \in \langle\langle c_1, \dots, c_p \rangle\rangle &\Rightarrow T'_p \in \langle\langle c_1, \dots, c_{p+1} \rangle\rangle \\ &= \langle\langle T_1, \dots, T_{p+1} \rangle\rangle \end{aligned}$$

für $\forall_{q>p+1} \langle T'_p, T_q \rangle = 0$.

So folgt nun der Satz:

Satz 1.4.1:

Sei $s \mapsto c(s)$ Bogenlängenparametrisierung einer \mathcal{C}^n -Kurve im \mathbb{R}^n mit $\forall_s (c_1, \dots, c_{n-1})(s)$ linear unabhängig. Dann genügt die durch

$$\begin{aligned} T_1 &:= c' \\ \forall_{p=1}^{n-2} T_{p+1} &:= \frac{c_{p+1} - \sum_{k=1}^p \langle c_{p+1}, T_k \rangle T_k}{|\dots|} = \frac{[c_{p+1}]_{\perp}}{|[c_{p+1}]_{\perp}|} \\ T_n &:= T_1 \times \dots \times T_{n-1} \end{aligned}$$

rekursiv definierte Frenet-Begleitbasis $s \mapsto (T_1, \dots, T_n)(s)$ den Ableitungsgleichungen

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ T_n \end{pmatrix}' = \begin{pmatrix} 0 & \kappa_1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ -\kappa_1 & 0 & \kappa_2 & \ddots & & \vdots \\ 0 & -\kappa_2 & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \kappa_{n-2} & 0 \\ \vdots & & \ddots & -\kappa_{n-2} & \ddots & \tau \\ 0 & \dots & \dots & 0 & -\tau & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ T_n \end{pmatrix}$$

mit den $n - 2$ Krümmungen

$$s \mapsto \kappa_p(s) = \langle T'_p, T_{p+1} \rangle(s) \quad (p = 1, \dots, n - 2)$$

und der Torsion

$$s \mapsto \tau(s) = \langle T'_{n-1}, T_n \rangle(s)$$

Zusatz:

Es gilt auch

$$\begin{aligned} \kappa_p &= |[T'_p]_{\perp}| = \left| T'_p - \sum_{k=1}^p \langle T'_p, T_k \rangle T_k \right| > 0 \quad (p = 1, \dots, n - 2) \\ \tau &= \det(T_1, \dots, T_{n-1}, T'_{n-1}) \gtrless 0 \end{aligned}$$

Beweis (des Zusatzes):

1. Es ist

$$T_p = \lambda \left(c_p + \sum_{k=1}^{p-1} \lambda_k c_k \right) = [c_p]_{\perp} \text{ mit } \lambda = \frac{1}{|[c_p]_{\perp}|} > 0$$

also

$$T'_p = \lambda c_{p+1} + \sum_{k=1}^p \tilde{\lambda}_k c_k \Rightarrow \underline{[T'_p]_{\perp} = \lambda [c_{p+1}]_{\perp}}$$

Ebenso ist

$$\underline{T_{p+1} = \mu [c_{p+1}]_{\perp}} \text{ mit } \mu = \frac{1}{|[c_{p+1}]_{\perp}|} > 0$$

Es folgt

$$\begin{aligned} \kappa_p &= \langle T'_p, T_{p+1} \rangle = \langle [T'_p]_{\perp}, T_{p+1} \rangle \\ &= \lambda \cdot \mu |[c_{p+1}]_{\perp}|^2 = \underline{\frac{|[c_{p+1}]_{\perp}|}{|[c_p]_{\perp}|}} = [T'_p]_{\perp} > 0 \end{aligned}$$

$$2. \tau = \langle T'_{n-1}, T_n \rangle = \langle T_1 \times \dots \times T_{n-1}, T'_{n-1} \rangle = \det(T_1, \dots, T_{n-1}, T'_{n-1})$$

□

Geometrische Bedeutung

- der Krümmung κ_p : Abweichung vom Verlauf in der Schmiegeebene S_p
- der Torsion τ : Abweichung vom Verlauf in der Schmiegehyperebene S_{n-1} mit Orientierung!
(Vorzeichen)

Satz 1.4.2 (Fundamentalsatz):

$$\kappa_1, \dots, \kappa_{n-2}, \tau$$

als Funktionen der Bogenlängen bilden ein vollständiges System unabhängiger Invarianten.

Berechnung der Größen bezüglich einer beliebigen Parametrisierung:

Folgerung:

Bezüglich einer beliebigen, zulässigen Parametrisierung $t \mapsto c(t)$ einer Frenet-Kurve im \mathbb{R}^n gilt mit $c_p := \frac{d^p c}{dt^p}(p = 1, \dots, n)$

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{c_1}{|c_1|} \\ \bigvee_{p=1}^{n-2} T_{p+1} &= \frac{c_{p+1} - \sum_{k=1}^p \langle c_{p+1}, T_k \rangle T_k}{|\dots|} = \frac{[c_{p+1}]_{\perp}}{|[c_{p+1}]_{\perp}|} \\ T_n &= T_1 \times \dots \times T_{n-1} \end{aligned}$$

sowie mit

$$\begin{aligned} A_0 &:= 1 \\ A_p &:= a_p(c_1, \dots, c_p) = \sqrt{\det(\langle c_i, c_k \rangle)_{i,k=1, l[c_{p+1}]_{\perp} dots, p}} > 0 \quad (p = 1, \dots, n-1) \\ V_n &:= \det(c_1, \dots, c_n) \begin{matrix} \geq \\ \leq \end{matrix} 0 \\ \bigvee_{p=1}^{n-2} \kappa_p &= \frac{1}{|\dot{c}|} \frac{A_{p+1}}{A_p} \bigg/ \frac{A_p}{A_{p-1}} > 0 \\ \tau &= \frac{1}{|\dot{c}|} \frac{V_n}{A_{n-1}} \bigg/ \frac{A_{n-1}}{A_{n-2}} \begin{matrix} \geq \\ < \end{matrix} 0 \end{aligned}$$

Spezialfälle:

$$\begin{aligned}
\underline{n=2}: \quad \tau = k &= \frac{1}{|\dot{c}|} \frac{V_2}{A_1} \bigg/ \frac{A_1}{A_0} = \frac{\det(\dot{c}, \ddot{c})}{|\dot{c}|^3} \quad (A_1 = |\dot{c}|, V_2 = \det(\dot{c}, \ddot{c})) \\
\underline{n=3}: \quad \kappa &= \frac{1}{|\dot{c}|} \frac{A_2}{A_1} \bigg/ \frac{A_1}{A_0} = \frac{a_2(\dot{c}, \ddot{c})}{|\dot{c}|^3} = \frac{|\dot{c} \times \ddot{c}|}{|\dot{c}|^3} \\
\tau &= \frac{1}{|\dot{c}|} \frac{V_3}{A_2} \bigg/ \frac{A_2}{A_1} = \frac{\det(\dot{c}, \ddot{c}, \ddot{\ddot{c}})}{|\dot{c} \times \ddot{c}|^2}
\end{aligned}$$

Beweis (Beweisskizze zu Satz 1.4.2):

Darstellung von T_1, \dots, T_n klar, da das Orthonormalisierungsverfahren unabhängig von der Ausgangsbasis ist, wenn $\langle\langle c_1, \dots, c_p \rangle\rangle = \langle\langle \tilde{c}_1, \dots, \tilde{c}_p \rangle\rangle$ samt Orientierung

$$\begin{aligned}
\kappa_p = \langle T'_p, T_{p+1} \rangle &= \frac{1}{w} \langle \dot{T}_p, T_{p+1} \rangle \stackrel{*}{=} \frac{1}{w} \frac{|[c_{p+1}]_{\perp}|}{|[c_p]_{\perp}|} \\
* &= \text{siehe Beweis des Zusatzes}
\end{aligned}$$

Nach der Formel „Volumen = Grundfläche \times Höhe“ gilt

$$\begin{aligned}
a_{p+1}(c_1, \dots, c_{p+1}) &= a_p(c_1, \dots, c_p) \cdot |[c_{p+1}]_{\perp}|, \text{ also} \\
|[c_{p+1}]_{\perp}| &= \frac{A_{p+1}}{A_p}
\end{aligned}$$

□

2 Lokale Flächentheorie im euklidischen Raum

2.1 Grundbegriffe der Flächentheorie

2.1.0 p -dimensionale Flächen im affinen \mathbb{R}^n

Sei $1 < p < n$ fest gewählt (in Anwendungen meist $p = 2, n = 3$).

Definition (Parametrisierte \mathcal{C}^r - p -Fläche ($r \geq 0$)):

\mathcal{C}^r -Abbildung $x: G \subset \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}^n$

$$u = (u^1, \dots, u^p) \mapsto x(u) = (x^1(u), \dots, x^n(u))$$

wobei G ein Gebiet des \mathbb{R}^p (d.h. offen und zusammenhängend) ist.

Parameter:

$$u^1, \dots, u^p \quad \text{bei } n = 3 \text{ meist } (u, v)$$

Parameterlinien:

$$u^\varrho \mapsto x(u_0^1, \dots, u^\varrho, \dots, u_0^p)$$

Spur:

$$M := x[G] \subset \mathbb{R}^n$$

Regularität $r \geq 1$: Die partiellen Ableitungen

$$x_\varrho := \partial_\varrho x = \frac{\partial x}{\partial u^\varrho} \quad (\varrho = 1, \dots, p)$$

sind überall linear unabhängig (sonst Singularitäten).

Bemerkung:

1. Regularität bedeutet: Die partiellen Ableitungen x_ϱ ($\varrho = 1, \dots, p$) [Tangentialvektoren] spannen überall einen p -dimensionalen Tangentialraum auf. Es gibt keine „Grate“ oder schlimmeres.

2. Reguläre parametrisierte p -Flächen sind lokal injektiv; die Funktionalmatrix

$$Dx = \left(\frac{\partial(x^1, \dots, x^n)}{\partial(u^1, \dots, u^p)} \right) = (x_1, \dots, x_p)$$

besitzt überall den Höchstrang p (Satz über implizite Funktionen). Bei lokalen Untersuchungen kann man stets annehmen, dass $x: G \subset \mathbb{R}^p \rightarrow x[G] = M \subset \mathbb{R}^n$ bijektiv ist, also keine Selbstdurchdringungen auftreten. Eine parametrisierte Hyperfläche ($p = n - 1$) im euklidischen \mathbb{R}^n ist genau dann regulär, wenn $\forall_u (x_1 \times \dots \times x_{n-1})(u) \neq 0$, d.h. wenn überall der Normalen(einheits)vektor

$$N = \frac{x_1 \times \dots \times x_{n-1}}{|x_1 \times \dots \times x_{n-1}|}$$

existiert.

Beispiel:

Die Abbildung

$$(u, v) \in]-\pi, +\pi[\times \left] -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right[\mapsto x(u, v) = \begin{pmatrix} \cos u \cos v \\ \sin u \cos v \\ \sin v \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3$$

ist (wegen $|x_1 \times x_2|(u, v) = \dots = \cos v > 0$) eine reguläre Parametrisierung der Kugelfläche (2-Sphäre $S^2 \subset \mathbb{R}^3$), die aber einen Meridian (samt Polen) auslässt. (u = geographische Länge, v = geographische Breite, Würzburg: $u \approx 10^\circ$, $v \approx 50^\circ$)

Es gibt keine globale, injektive Parametrisierung der S^2 . Als ganzes ist sie eine „differenzierbare Mannigfaltigkeit“, die sich nur lokal so parametrisieren lässt.

Definition (C^r -Äquivalenz):

$$C^r\text{-Äquivalenz zweier } C^r\text{-}p\text{-Flächen} \begin{cases} x: G \rightarrow \mathbb{R}^n, u \mapsto x(u) \\ \tilde{x}: \tilde{G} \rightarrow \mathbb{R}^n, \tilde{u} \mapsto \tilde{x}(\tilde{u}) \end{cases}.$$

Es existiert ein orientierungstreuer C^r -Diffeomorphismus

$$\Phi: G \rightarrow \tilde{G}, u \mapsto \tilde{u}(u) = \Phi(u)$$

mit $x = \tilde{x} \circ \Phi$, d.h.

$$\forall_n x(u) = \tilde{x}(\Phi(u)) = \tilde{x}(\tilde{u})$$

Bemerkung:

- Für $r \geq 1$ bestimmt die Funktionalmatrix

$$D\Phi = \left(\frac{\partial \tilde{u}^\sigma}{\partial u^\varrho} \right)_{\sigma, \varrho=1, \dots, p}$$

den Übergang zwischen den Tangentialvektoren x_1, \dots, x_p und $\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_p$ bezüglich verschiede-

dener Parametrisierungen. Nach der Kettenregel gilt

$$x_\varrho(u) = \sum_{\sigma=1}^p \tilde{x}_\sigma(\Phi(u)) \frac{\partial \tilde{u}^\sigma}{\partial u^\varrho}(u) = \sum_{\sigma=1}^p \tilde{u}_\varrho^\sigma(u) \tilde{x}_\sigma(\Phi(u))$$

(Basistransformationsformel im Tangentialraum)

- Φ orientierungstreu $\Leftrightarrow \det D\Phi = \det(\tilde{u}_\varrho^\sigma) > 0$

Definition:

Eine (orientierte, reguläre) \mathcal{C}^r - p -Fläche im affinen \mathbb{R}^n ist eine Äquivalenzklasse regulärer, parametrisierter \mathcal{C}^r - p -Flächen $x: G \subset \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}^n$.

Bedauerlich: In der Flächentheorie gibt es keine ausgezeichnete Parametrisierung vgl. der Bogenlängenparametrisierung in der Kurventheorie.

Deswegen: möglichst parameterunabhängige Formulierung von Eigenschaften/Größen.

Beispiel:

Die Tangentialräume (für $p = 2$ die Tangentialebenen)

$$T_u x := [\cancel{x(u)}+] \langle\langle x_1(u), \dots, x_p(u) \rangle\rangle$$

sind von der Parametrisierung unabhängig,

$$T_u x = T_{\tilde{u}} \tilde{x} = \langle\langle \tilde{x}_1(\tilde{u}), \dots, \tilde{x}_p(\tilde{u}) \rangle\rangle$$

nicht aber die Basisvektoren x_1, \dots, x_p .

Tangentialvektoren

$$X \in T_u x = T_{\tilde{u}} \tilde{x} \quad (\text{invariante Objekte})$$

besitzen dann verschiedene Basisdarstellungen:

$$X = \sum_{\varrho=1}^p X^\varrho x_\varrho(u) = \sum_{\sigma=1}^p \tilde{X}^\sigma \tilde{x}_\sigma(\tilde{u})$$

und aus der Basistransformation

$$x_\varrho = \sum_{\sigma} \tilde{u}_\varrho^\sigma \tilde{x}_\sigma$$

folgt die Koordinatentransformation

$$\tilde{X}^\sigma = \sum_{\varrho} \tilde{u}_\varrho^\sigma X^\varrho$$

für Vektoren.

Bemerkung:

Zur Vereinfachung der Schreibweise benutzt man beim Rechnen in Koordinaten („Tensorkalkül“) meist (wir nicht immer, aber immer öfter) die sogenannte EINSTEINSche Summationskonvention.

In einem Term wird über Indizes, die einmal „oben“, einmal „unten“ vorkommen generell summiert.

Beispiel:

$$\sum X^\varrho \tilde{x}_\varrho, \quad \sum_\mu a^{\varrho\mu} b_{\mu\sigma}, \quad \sum b^\varrho_\varrho \text{ Spur}$$

$$\sum_{\varrho,\sigma} X^\varrho \gamma^\mu_{\varrho\sigma} Y^\sigma, \quad \sum_\mu g_{\mu\nu} R^\mu_{\varrho\sigma\tau} = R_{\varrho\nu\sigma\tau}$$

2.1.1 Flächeninterne Metrik auf p -Flächen im euklidischen \mathbb{R}^n

Die euklidische Struktur im \mathbb{R}^n induziert in den p -dimensionalen Tangentialräumen $T_u x \subset: \mathbb{R}^n$ punktale Skalarprodukte.

Satz 2.1.1:

In jedem Punkt $x(u)$ einer \mathcal{C}^1 - p -Fläche im euklidischen \mathbb{R}^n wird durch

$$I_u: T_u x \times T_u x \rightarrow \mathbb{R}, (X, Y) \mapsto I_u(X, Y) := \langle X, Y \rangle$$

ein (von der Parametrisierung unabhängiges) Skalarprodukt definiert.

Das Feld $u \mapsto I_u$ dieser Bilinearformen heißen 1. Grundform (1. Fundamentalform) der p -Fläche.

Die (parameterabhängigen) Koordinatenfunktionen

$$u \mapsto \underline{g_{\varrho\sigma}}(u) := I_u(x_\varrho, x_\sigma) = \underline{\langle x_\varrho, x_\sigma \rangle}$$

bilden überall eine symmetrische, positiv definite Matrix $(g_{\varrho\sigma}(u))$ mit Determinante

$$g(u) := \det(g_{\varrho\sigma}(u)) = a_p^2(x_1, \dots, x_p)(u) > 0$$

und für Tangentialvektoren

$$X = \sum X^\varrho x_\varrho(u), Y = \sum Y^\sigma x_\sigma(u)$$

erhält man die Koordinatendarstellung

$$I_u(X, Y) = \sum g_{\varrho\sigma}(u) X^\varrho Y^\sigma$$

Beweis (von Satz 2.1.1):

I_u ist die Einschränkung des Skalarproduktes im \mathbb{R}^n auf den Teilraum $T_u x \subset: \mathbb{R}^n$ und $(g_{\varrho\sigma}(u))$ ist die Darstellungsmatrix von I_u bezüglich der speziellen Basis $(x_1, \dots, x_p)(u)$. Weiter gilt

$$I(X, Y) = \left\langle \sum X^\varrho x_\varrho, \sum Y^\sigma x_\sigma \right\rangle = \sum X^\varrho Y^\sigma \underbrace{\langle x_\varrho, x_\sigma \rangle}_{g_{\varrho\sigma}}$$

□

Früher oft übliche Bezeichnung bei $p = 2$:

$$(g_{\varrho\sigma}) = \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix}$$

Mit Hilfe der 1. Grundform lassen sich flächenintern berechnen

→ bei tangentialen Objekten

- die Länge eines Tangentialvektors $X = \sum X^\varrho x_\varrho(u) \in T_u x$

$$|X| = \sqrt{\sum g_{\varrho\sigma}(u) X^\varrho X^\sigma} \quad (\text{analog der Winkel zwischen Tangentialvektoren } X, Y \neq 0)$$

- den p -dimensionalen Flächeninhalt eines von Vektoren $X_1, \dots, X_p \in T_u x$ aufgespannten p -dimensionalen Parallelogramms

$$\underline{a_p(X_1, \dots, X_p)} = \sqrt{\det(\langle X_\varrho, X_\sigma \rangle)} = \underline{\sqrt{g(u)} \det(X_\beta^\alpha)}$$

denn

$$\begin{aligned} X_\varrho &= \sum X_\varrho^\mu x_\mu(u) \Rightarrow \langle X_\varrho, X_\sigma \rangle = \sum g_{\mu\nu}(u) X_\varrho^\mu X_\sigma^\nu \\ &\Rightarrow \det(\langle X_\varrho, X_\sigma \rangle) = \det(g_{\mu\nu}(u)) \det^2(X_\varrho^\mu) \end{aligned}$$

Die explizite Kenntnis der räumlichen Basisvektoren $x_\varrho(u) \in \mathbb{R}^n$ ist jeweils unnötig.

→ bei Objekten innerhalb der Fläche

- die Länge eines Kurvenstücks

$$L_a^b(c) = \int_a^b \sqrt{\sum g_{\varrho\sigma}(u(t)) \dot{u}^\varrho(t) \dot{u}^\sigma(t)} \, dt$$

Wegen $c = x \circ u$ gilt

$$\begin{aligned} \dot{c}(t) &= \sum_{\varrho} x_\varrho(u(t)) \dot{u}^\varrho(t) \\ \Rightarrow |\dot{c}(t)|^2 &= \sum g_{\varrho\sigma}(u(t)) \dot{u}^\varrho(t) \dot{u}^\sigma(t) \end{aligned}$$

(Ähnlich der Winkel zwischen Flächenkurven)

- der p -dimensionale Flächeninhalt eines Bereiches $x[K] \subset M$

$$\underline{A_p(x[K])} = \int_K a_p(x_1(u), \dots, x_p(u)) \, du^1 \dots du^p = \int_K \sqrt{g(u)} \, du$$

Man braucht die Kurve bzw. den Bereich nur in der Parameterebene zu kennen.

Ergebnis: Lassen sich zwei (im Raum völlig verschiedene) Flächen so auf gleiche Parameter beziehen, dass sie überall die gleiche 1. Grundform-Matrix besitzt, so erhält man gleiche Ergebnisse beim Messen von Längen, Winkeln, Flächeninhalten usw.

Durch solche Messungen innerhalb der Fläche kann man nicht entscheiden, auf welcher Fläche man sich wirklich befindet.

Definition:

- a) Zwei \mathcal{C}^1 - p -Flächen heißen isometrisch, wenn Parametrisierungen

$$u \in G \mapsto x(u) \in M \quad \text{und} \quad u \in G \mapsto \bar{x}(u) \in \bar{M}$$

existieren mit

$$\forall_u (g_{\rho\sigma}(u)) = (\bar{g}_{\rho\sigma}(u))$$

- b) Zwei isometrische \mathcal{C}^1 - p -Flächen mit Parametrisierungen

$$u \in G \mapsto x(u) \in M \quad \text{und} \quad u \in G \mapsto \bar{x}(u) \in \bar{M}$$

heißen ineinander verbiegbar (abwickelbar), wenn eine stetige Schar

$$\alpha \in [a, b] \mapsto ({}^\alpha x: G \rightarrow M_\alpha)$$

isometrischer \mathcal{C}^1 - p -Flächen existiert mit

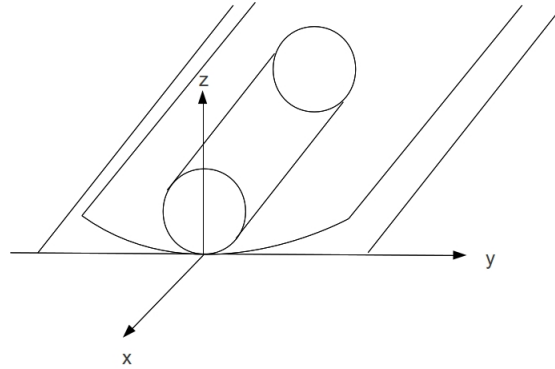
$${}^a x = x, \quad {}^b x = \bar{x}$$

Bemerkung:

1. Flächengrößen, die sich rein aus der 1. Grundform berechnen lassen, also für alle isometrischen Flächen dieselben sind, heißen innergeometrische Größen.
2. Nicht alle isometrischen Flächen sind ineinander verbiegbar. (Es gibt komplizierte Gegenbeispiele)

Beispiel:

1. Der Kreiszyylinder.



$$(u, v) \in]-\pi, \pi[\times \mathbb{R} \mapsto x(u, v) = \begin{pmatrix} h \cdot v \\ r \sin u \\ r(1 - \cos u) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3$$

ist in die Ebene verbiegbar: Eine stetige Verbiegungsschar ist

$${}^\alpha x(u, v) = \begin{pmatrix} hv \\ r \frac{1}{\alpha} \sin \alpha u \\ r \frac{1}{\alpha} (1 - \cos \alpha u) \end{pmatrix} \quad \alpha \in]0, 1]$$

$${}^0 x(u, v) = \lim_{\alpha \rightarrow 0} {}^\alpha x(u, v) = \begin{pmatrix} hv \\ ru \\ 0 \end{pmatrix} \quad [\text{Ebenenstück}], \text{ denn}$$

$${}^\alpha x_1(u, v) = \begin{pmatrix} 0 \\ r \cos \alpha u \\ r \sin \alpha u \end{pmatrix}$$

$${}^\alpha x_2(u, v) = \begin{pmatrix} h \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow ({}^\alpha g_{\varrho\sigma}(u, v)) = \begin{pmatrix} r^2 & 0 \\ 0 & h^2 \end{pmatrix}$$

Die Tangentialfläche

$$(s, v) \in I \times \mathbb{R} \mapsto x(s, v) = c(s) + vT(s) \in \mathbb{R}^3$$

einer beliebigen wendepunktfreien Kurve $s \mapsto c(s)$ ist in die Ebene verbiegbar. Es gilt

$$(g_{\varrho\sigma}(s, v)) = \begin{pmatrix} 1 + v^2 \kappa^2(s) & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Die Torsion τ der Kurve taucht nicht auf! Nach dem Fundamentalsatz der Kurventheorie kann eine von einem Parameter α stetig abhängende Kurvenschar $s \mapsto {}^\alpha c(s)$ ($\alpha \in [0, 1]$)

durch Vorgabe von $s \mapsto {}^\alpha\kappa(s) := \kappa(s)$ und $s \mapsto {}^\alpha\tau(s) := \alpha \cdot \tau(s)$ konstruiert werden. Die zugehörigen Tangentenflächen bilden eine stetige Verbindungsschar zwischen einem Ebenenstück (= Tangentenfläche der ebenen Kurve 0c) und der Ausgangsfläche ($\alpha = 1$).

Bemerkung:

Wir zeigen später, dass die

- allgemeinen Zylinder, die
- allgemeinen Kegel und
- Tangentenflächen von Kurven

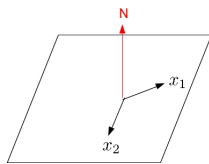
im wesentlichen die einzigen Flächen im \mathbb{R}^3 sind, die in die Ebene verbiegbare sind.

Name: „Torsen“

Die Kugel ist nicht isometrisch zur Ebene. Deswegen Ärger bei Atlanten (Atlassen).

2.1.2 Hyperflächen im euklidischen \mathbb{R}^n : Ableitungsgleichungen

Im Folgenden sei $p = n - 1$



Offensichtlich gilt

Satz 2.1.2:

Ist $u \in G \mapsto x(u) \in \mathbb{R}^n$ Parameterdarstellung einer \mathcal{C}^1 -Hyperfläche, so bilden die

- tangentialen Vektorfelder

$$x_1, \dots, x_{n-1}$$

- das Normalen(einheits)vektorfeld

$$N := \frac{x_1 \times \dots \times x_{n-1}}{|x_1 \times \dots \times x_{n-1}|}$$

eine parameterabhängige, positiv orientierte Begleitbasis mit den Eigenschaften

$$\forall_\varrho \langle x_\varrho, N \rangle = 0, \quad |N|^2 = 1$$

$$\det(x_1, \dots, x_{n-1}, N) = \langle x_1 \times \dots \times x_{n-1}, N \rangle = |x_1 \times \dots \times x_{n-1}| = \sqrt{g} = a_{n-1}(x_1, \dots, x_{n-1})$$

Das Vektorfeld $N: G \rightarrow S^{n-1} \subset \mathbb{R}^n$ ist dabei invariant gegenüber (zulässiger) Parametertransfor-

mationen und heißt auch sphärisches Bild oder Gaußabbildung der Hyperfläche.

Bemerkung:

In jedem Punkt $x(u)$ ist die orthogonale Zerlegung

$$\mathbb{R}^n = T_u x \oplus^\perp \langle\langle N \rangle\rangle$$

parameterunabhängig.

Satz 2.1.3:

Für die Begleitbasis (x_1, \dots, x_{n-1}, N) einer parametrisierten \mathcal{C}^2 -Hyperfläche gelten (parameterabhängige) Ableitungsgleichungen der Form

$$\forall_{\varrho, \sigma} x_{\varrho\sigma} = \sum \gamma_{\varrho}^{\mu}{}_{\sigma} x_{\mu} + b_{\varrho\sigma} N$$

[Gaußsche Ableitungsgleichungen]

$$N_{\sigma} := \partial_{\sigma} N = - \sum b^{\mu}{}_{\sigma} x_{\mu} [+0 \cdot N]$$

[Weingartenschen Ableitungsgleichungen]

Beweis (von Satz 2.1.3):

Klar wegen

$$|N|^2 = 1 \Rightarrow \langle N_{\sigma}, N \rangle = 0$$

□

Berechnung der Koeffizienten

a) Mit den Christoffelsymbolen 1. Art

$$\gamma_{\varrho\nu\sigma} := \langle x_{\varrho\sigma}, x_{\nu} \rangle = \sum_{\mu} \gamma_{\varrho}^{\mu}{}_{\sigma} g_{\mu\nu}$$

erhält man die Christoffelsymbole 2. Art durch

$$\gamma_{\varrho}^{\mu}{}_{\sigma} = \sum_{\nu} g^{\mu\nu} \gamma_{\varrho\nu\sigma}$$

wenn $(g^{\mu\nu})$ die zur $(g_{\varrho\sigma})$ inverse Matrix (mit $\sum_{\nu} g^{\mu\nu} g_{\nu\sigma} = \delta^{\mu}_{\sigma}$) berechnet.

b) Es gilt

$$b_{\varrho\sigma} = \langle x_{\varrho\sigma}, N \rangle = -\langle x_{\varrho}, N_{\sigma} \rangle = + \sum_{\mu} b^{\mu}_{\sigma} g_{\mu\varrho}$$

$$\Rightarrow b^{\mu}_{\sigma} = \sum_{\varrho} g^{\mu\varrho} b_{\varrho\sigma}$$

Bemerkung:

1. Mit den Matrizen $(g_{\varrho\sigma})$ und ihrer Inversen $(g^{\varrho\sigma})$ lassen sich im Tensorkalkül Indizes „herauf- und herunterziehen“.
2. $(\gamma_{\varrho\nu\sigma}), (\gamma_{\varrho}^{\mu\sigma}), (v_{\varrho\sigma})$ sind in dem Indexpaar (ϱ, σ) symmetrisch.

$$(b^{\mu}_{\sigma}) = (g^{\mu\nu}) \cdot (b_{\varrho\sigma})$$

braucht nicht symmetrisch sein, obwohl Produkt symmetrischer Matrizen!

3. Bei $n = 3$ denke man an $N = \frac{1}{\sqrt{g}} x_1 \times x_2$

$$(g^{\varrho\sigma}) = \frac{1}{g} \begin{pmatrix} g_{22} & -g_{12} \\ -g_{21} & g_{11} \end{pmatrix}$$

$$(b^{\mu}_{\sigma}) = \begin{pmatrix} b^1_1 & b^1_2 \\ b^2_1 & b^2_2 \end{pmatrix}$$

Fragen

1. Welche geometrische und algebraische Bedeutung haben die Koeffizienten $\gamma_{\varrho}^{\mu\sigma}, b_{\varrho\sigma}, b^{\mu}_{\sigma}$?
2. Wie ändern sie sich bei Parametertransformationen? (z.T. kompliziert, Berechnung soll vermieden werden)
3. Wie kann man die Ableitungsgleichungen parameterunabhängig formulieren?

Idee (zu 3.)

Statt die parameterabhängigen Vektorfelder x_1, \dots, x_{n-1}, N in Richtung von Parameterlinien (nach u^{σ}) zu differenzieren, Ableiten eines beliebigen (tangentialen oder normalen) Vektorfeldes $u \mapsto Z(u)$ in Richtung eines beliebigen Vektors $Y \in T_u x$. Diese Richtungsableitung

$$\boxed{d_Y Z = \sum (\partial_{\sigma} Z) Y^{\sigma}}$$

(mit $Y = \sum Y^\sigma x_\sigma$) [vergleiche im \mathbb{R}^n : $d_Y f = \langle \text{grad } f, Y \rangle = \sum \partial_\rho f \cdot Y^\rho$]

ist parameterunabhängig, denn aus $x = \tilde{x} \circ \Phi$, $Z = \tilde{Z} \circ \Phi$, $Y = \tilde{Y} \circ \Phi$ folgt

$$d_Y Z(u) = \sum_\sigma \partial_\sigma \left(\tilde{Z}(\Phi(u)) \right) Y^\sigma(u) = \sum_{\mu, \sigma} \left(\partial_\mu \tilde{Z} \right) (\Phi(u)) \underbrace{\frac{\partial \tilde{u}^\mu}{\partial u^\sigma} Y^\sigma(u)}_{\tilde{Y}^\mu(\Phi(u))} = d_{\tilde{Y}} \tilde{Z}(\Phi(u))$$

$$\left(\text{weil } x_\rho = \sum \tilde{u}_\rho^\sigma \tilde{x}_\sigma \Leftrightarrow \tilde{Y}^\sigma = \sum \tilde{u}_\rho^\sigma Y^\rho \right)$$

Eigenschaften des linearen Differentialoperators

$$d: (Z, Y) \mapsto d_Y Z$$

1a) Additivität in Z :

$$d_Y (Z_1 + Z_2) = d_Y Z_1 + d_Y Z_2$$

1b) Derivativität in Z :

$$d_Y (f \cdot Z) = (d_Y f) Z + f d_Y Z$$

2) Linearität in Y :

$$d_{f_1 Y_1 + f_2 Y_2} Z = f_1 d_{Y_1} Z + f_2 d_{Y_2} Z$$

Da auch die Zerlegung von $u \mapsto d_Y Z(u)$ in Tangential- und Normalanteil parameterunabhängig ist, erhält man folgende invariante Darstellung:

Für $Z = X$ selbst tangential gilt

$$\begin{aligned} d_Y X &= \sum \partial_\sigma \left(\sum X^\mu x_\mu \right) Y^\sigma = \sum (\partial_\sigma X^\rho) Y^\sigma x_\rho + \sum X^\rho x_{\rho\sigma} X^\sigma \\ &= \underbrace{\sum [(\partial_\sigma X^\mu + X^\rho \gamma_\rho^\mu{}_\sigma) Y^\sigma] x_\mu}_{d_Y X|_\perp} + \underbrace{\left[\sum b_{\rho\sigma} X^\rho Y^\sigma \right]}_{\langle d_Y X, N \rangle = \langle -X, d_Y N \rangle \text{ (Bilinearform)}} N \\ &=: \nabla_Y X + \Pi(X, Y) N \end{aligned}$$

und für $Z = N$:

$$d_Y N = \sum (\partial_\sigma N) Y^\sigma = - \sum b^\mu{}_\sigma Y^\sigma x_\mu = -A(Y) \quad (\text{lineare Abbildung})$$

Ergebnis:

Satz 2.1.4:

Auf einer \mathcal{C}^2 -Hyperfläche in einer Parametrisierung $u \mapsto x(u)$ erfüllen tangentielle \mathcal{C}^1 -Vektorfelder

$u \mapsto X(u)$ und das Normalenvektorfeld $u \mapsto N(u)$ die (parameterunabhängigen) Ableitungsgleichungen

$$d_Y X = \nabla_Y X + \Pi(X, Y)N \quad (\text{Gaußsche Ableitungsgleichung})$$

$$d_Y N = -A(Y) \quad (\text{Weingartensche Ableitungsgleichung})$$

in Richtung tangentialer Vektorfelder $u \mapsto Y(u)$.

Dabei gilt:

- a) Durch $(X, Y) \mapsto \nabla_Y X = d_Y X|_T$ wird ein linearer Differentialoperator definiert, der je zwei tangentialen Vektorfeldern X, Y wieder ein tangentes Vektorfeld $\nabla_Y X$ zuordnet, genannt kovariante Ableitung von X in Richtung Y .
(Andere Bezeichnung: Durch ∇ wird ein linearer Zusammenhang (linear connection) definiert)

- b) Durch $(X, Y) \mapsto \Pi(X, Y) = \langle d_Y X, N \rangle = -\langle X, d_Y N \rangle = -I(X, d_Y N)$ wird ein Feld symmetrischer Bilinearformen

$$\Pi_u: T_u x \times T_u x \rightarrow \mathbb{R}, (X, Y) \mapsto \Pi_u(X, Y)$$

definiert, genannt 2. Grundform (2. Fundamentalform) der Hyperfläche

- c) Durch $Y \mapsto A(Y) := -d_Y N$ wird ein Feld linearer Abbildungen $A_u: T_u x \rightarrow T_u x$ definiert, genannt Weingarten-Endomorphismus (shape operator) der Hyperfläche.

Folgerung (Interpretation von $\gamma_\rho^\mu{}_\sigma, b_{\rho\sigma}, b^\mu{}_\sigma$):

Bezüglich einer festen Parametrisierung $u \mapsto x(u)$ einer \mathcal{C}^2 -Hyperfläche hat man die Basisdarstellung (setze $X = X_\rho, Y = X_\sigma$)

$$\begin{aligned} \nabla_\sigma X_\rho &:= \nabla_{x_\sigma} x_\rho = \sum \gamma_\rho^\mu{}_\sigma x_\mu \\ \Pi(x_\rho, x_\sigma) &= b_{\rho\sigma} \\ A(x_\sigma) &= + \sum b^\mu{}_\sigma x_\mu \end{aligned}$$

Die Christoffelsymbole $\gamma_\rho^\mu{}_\sigma$ sind also die Darstellungskoeffizienten der kovarianten Ableitung ∇ (auch als Zusammenhangskoeffizienten bezeichnet),

die symmetrische Matrix $(b_{\rho\sigma})$ ist die Darstellungsmatrix der 2. Grundform Π und

die (im Allgemeinen nicht symmetrische) Matrix $(b^\mu{}_\sigma)$ die Darstellungsmatrix des Weingarten-Endomorphismus A , jeweils bezüglich der Basisfelder $u \mapsto (x_1, \dots, x_{n-1})(u)$

Umgekehrt gilt (bezüglich jeder Parametrisierung):

$$\begin{aligned}\nabla_Y X &= \sum [\partial_\sigma X^\mu + X^\varrho \gamma_\varrho^\mu{}_\sigma Y^\sigma] x_\mu \\ \Pi(X, Y) &= \sum b_{\varrho\sigma} X^\varrho Y^\sigma \\ A(Y) &= \sum b^\mu{}_\sigma Y^\sigma x_\mu\end{aligned}$$

Früher übliche Bezeichnung für $p = 2, n = 3$

$$(b_{\varrho\sigma}) = \begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e & f \\ f & g \end{pmatrix}$$

(Für Profis: ∇ ist der von der Metrik I induzierte Levi-Civita-Zusammenhang.)

Grundlegende Eigenschaften von ∇, Π, A

- (1) Die kovariante Ableitung ∇ (bezüglich ihrer Koeffizienten $\gamma_\varrho^\mu{}_\sigma$) ist eine innergeometrische Größe

Satz 2.1.5:

Die Christoffelsymbole 1. und 2. Art einer \mathcal{C}^2 -(Hyper)Fläche lassen sich allein aus den Komponenten $g_{\varrho\sigma}$ der 1. Grundform bestimmen. Und zwar gilt

$$\begin{aligned}\gamma_{\varrho\nu\sigma} &= \frac{1}{2} (\partial_\varrho g_{\nu\sigma} - \partial_\nu g_{\varrho\sigma} + \partial_\sigma g_{\varrho\nu}) \\ \gamma_\varrho^\mu{}_\sigma &= \sum g^{\mu\nu} \gamma_{\varrho\nu\sigma}\end{aligned}$$

Beweis (von Satz 2.1.5):

Aus

$$\begin{aligned}\partial_\varrho g_{\nu\sigma} &= \partial_\varrho \langle x_\nu, x_\sigma \rangle = \langle x_{\nu\varrho}, x_\sigma \rangle + \langle x_\nu, x_{\sigma\varrho} \rangle &= \gamma_{\nu\sigma\varrho} + \gamma_{\sigma\nu\varrho} \\ \partial_\nu g_{\varrho\sigma} &= \dots &= \gamma_{\varrho\sigma\nu} + \gamma_{\sigma\varrho\nu} \\ \partial_\sigma g_{\varrho\nu} &= \dots &= \gamma_{\nu\varrho\sigma} + \gamma_{\varrho\nu\sigma}\end{aligned}$$

und der Symmetrie $\gamma_{\varrho\nu\sigma} = \gamma_{\sigma\nu\varrho}$ die Behauptung.

□

- (2) Die Weingarten-Matrizen $(b^\mu{}_\sigma)$ bezüglich verschiedener Parametrisierungen sind (als Darstellungsmatrizen desselben Endomorphismus A) ähnlich zueinander.
(Parameterunabhängige) Invarianten sind also ihre elementarsymmetrischen Funktionen (= Koeffizienten des charakteristischen Polynoms), insbesondere Spur und Determinante.

Definition:

Bei einer \mathcal{C}^2 -Hyperfläche im \mathbb{R}^n heißt

$$H := \frac{1}{n-1} \operatorname{tr} A = \frac{1}{n-1} \sum b_{\varrho}^{\varrho}$$

die mittlere Krümmung und

$$\kappa := \det A = \det(b_{\sigma}^{\mu})$$

die Gaußsche Krümmung

Bemerkung:

Aus $(b_{\sigma}^{\mu}) = (g_{\varrho\sigma}^{\alpha\beta}) \cdot (b_{\varrho\sigma})$ folgt

$$\kappa = \frac{b}{g} = \frac{\det(b_{\varrho\sigma})}{\det(g_{\varrho\sigma})}$$

- (3) Der Weingarten-Endomorphismus A ist selbstadjungiert. Für tangentielle Vektorfelder X, Y gilt $\langle X, Y \rangle = 0$, also

$$\begin{aligned} d_Y [\langle X, N \rangle] &= \langle d_Y X, N \rangle + \langle X, d_Y N \rangle = \Pi(X, Y) - \langle X; A(Y) \rangle \\ &= \Pi(X, Y) - \mathbf{I}(Y, A(Y)) = 0 \end{aligned}$$

$$(\text{in Koordinaten: } = b_{\varrho\sigma} - \sum g_{\varrho\mu} b_{\sigma}^{\mu})$$

Die Symmetrie von Π liefert

Satz 2.1.6:

Die Weingartenabbildung $A_u: T_u x \rightarrow T_u x$ ist in jedem Punkt $x(u)$ einer Hyperfläche selbstadjungiert bezüglich des Skalarprodukts \mathbf{I}_u auf $T_u x$, d.h. es gilt überall

$$\mathbf{I}(X, A(Y)) = \mathbf{I}(A(X), Y)$$

Sie besitzt demnach nur reelle Eigenwerte und eine Orthonormalbasis aus Eigenvektoren.

Bemerkung:

Obwohl A selbstadjungiert ist, sind die Darstellungsmatrizen (b_{σ}^{μ}) in A nicht symmetrisch.

Bezeichnungen

Eigenwert von A_u :

$$\kappa_1(u), \dots, \kappa_{n-1}(u) \quad \underline{\text{Hauptkrümmungen}}$$

Orthonormierte Eigenvektoren dazu:

$$Y_1(u), \dots, Y_{n-1}(u) \quad \underline{\text{Hauptkrümmungsrichtungen}}$$

Zusammenfassung Krümmungsinvarianten aus den Weingartenabbildungen

$$Y \mapsto A(Y) = -d_Y N$$

$H = \frac{1}{n-1} \operatorname{tr} A$	Mittlere Krümmung
$\kappa = \det A$	Gaußsche Krümmung
$\kappa_1, \dots, \kappa_{n-1}$	Hauptkrümmungen = Eigenwerte von A
Y_1, \dots, Y_{n-1}	Hauptkrümmung = Eigenvektoren von A (Orthonormalbasis!)

Folgerung:

Wegen $A(Y_\varrho) = \kappa_\varrho Y_\varrho$ ($\varrho = 1, \dots, n-1$) gilt

$$H = \frac{1}{n-1} (\kappa_1 + \dots + \kappa_{n-1}) \quad (\text{deswegen } \underline{\text{mittlere}} \text{ Krümmung})$$

$$\kappa = \kappa_1 \cdot \dots \cdot \kappa_{n-1}$$

Zur geometrischen Bedeutung: siehe Kapitel 2.3

Vorgriff ($n = 3$)

Flächen mit $H \equiv 0$ heißen Minimalflächen

Flächen mit $\kappa \equiv 0$ heißen Torsen (= “flache Flächen”)

Formelsammlung: siehe Homepage J. König.

Ergänzung

Oft sind tangentielle Vektorfelder nur längs einer Flächenkurve $t \mapsto c(t) = x(u(t))$ in der Form

$$t \mapsto X(t) = \sum X^\varrho(t) x_\varrho(u(t))$$

gegeben.

Beispiel:

$X(t) := \dot{c}(t) = \sum \dot{u}^\varrho(t) x_\varrho(u(t))$ kovariante Ableitung:

$$\begin{aligned} \frac{\nabla X}{dt} &:= \left. \frac{dX}{dt} \right|_T = \sum \left[\dot{X}^\mu x_\mu(u) + X^\varrho x_{\varrho\sigma}(u) \dot{u}^\sigma \right] \\ &= \sum \left(\dot{X}^\mu + X^\varrho \gamma_\varrho^\mu{}_\sigma(u) \dot{u}^\sigma \right) x_\mu(u) \end{aligned}$$

2.2 Zur inneren Geometrie der Flächen im \mathbb{R}^3

Im Folgenden sei $p = 2, n = 3$; das meiste gilt für beliebige p .

In der euklidischen Ebene sind wohldefinierte:

- die Parallelverschiebung eines Vektors X_0 längs einer Kurve $t \mapsto c(t)$. Sie liefern ein Parallelfeld $t \mapsto X(t)$ mit $\frac{dX}{dt} = 0$, d.h. $X = X_0 = \text{const}$.
- gerade Linien, etwa mit der Kennzeichnung $\frac{dT}{dt} \equiv 0$, d.h. $T = \text{const}$.

Übertragung der Begriffe auf "krumme" Flächen durch Rückprojektion der Ableitungsvektoren $\frac{dX}{dt}$ bzw. $\frac{dT}{dt}$ in die Tangentialebene, d.h. Benutzung der (innergeometrischen) kovarianten Ableitung $\frac{\nabla X}{dt}$ bzw. $\frac{\nabla T}{dt}$.

(Vektorfelder sind nur so parallel bzw. Kurven nur so gerade, wie die Fläche es zulässt.

2.2.1 Geodätische Parallelverschiebung

Definition:

Ein tangentiales \mathcal{C}^1 -Vektorfeld $t \mapsto X(t) = \sum X^\varrho(t)x_\varrho(u(t))$ längs einer \mathcal{C}^1 -Flächenkurve $t \mapsto c(t) = x(u(t))$ heißt geodätisch parallel, wenn gilt

$$\begin{aligned} \frac{\nabla X}{dt} = \frac{dX}{dt} \Big|_T &\equiv 0, \text{ also} \\ \dot{X}^\mu + \sum X^\varrho \gamma_{\varrho\sigma}^\mu(u) \dot{u}^\sigma &= 0 \quad (\mu = 1, 2) \end{aligned} \quad (*)$$

(d.h. der innergeometrisch nur sichtbare Anteil der Ableitung verschwindet)

(*) ist ein lineares Differentialgleichungssystem 1. Ordnung für die Komponentenfunktionen $t \mapsto X^\mu(t)$ ($\mu = 1, 2$), das unter Anfangsbedingungen $X^\mu(t_0) = X_0^\mu$ ($\mu = 1, 2$) eindeutig gelöst werden kann.⁵

Folgerung:

Ein Tangentialvektor auf einer \mathcal{C}^2 -Fläche lässt sich längs jeder \mathcal{C}^1 -Flächenkurve eindeutig geodätisch parallelverschieben. Bei Parallelverschiebung bleiben metrische Größen erhalten:

Satz 2.2.1:

Sind $t \mapsto X(t) = \sum X^\varrho(t)x_\varrho(u(t))$, $Y(t) = \sum X^\sigma(t)x_\sigma(u(t))$ geodätisch parallele \mathcal{C}^1 -Vektorfelder längs derselben \mathcal{C}^1 -Flächenkurve $t \mapsto c(t) = x(u(t))$, so gilt

$$t \mapsto I_{u(t)}(X(t), Y(t)) = \sum g_{\varrho\sigma}(u(t)) X^\varrho(t) Y^\sigma(t) = \text{const}.$$

d.h. Längen, Winkel, Flächeninhalt bleiben erhalten.

Der Satz kann “innergeometrisch” bewiesen werden.
 kürzer: “außergeometrisch”

Beweis (von Satz 2.2.1):

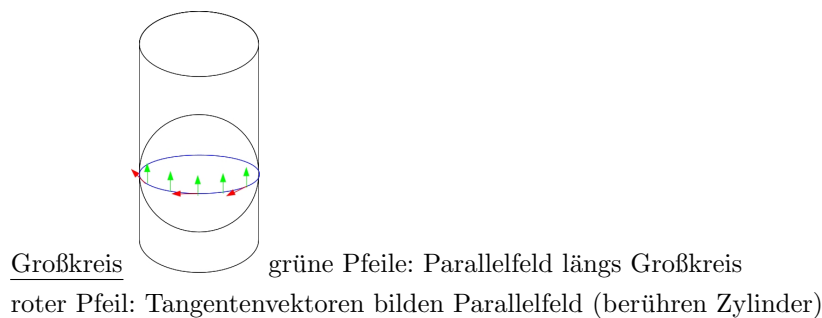
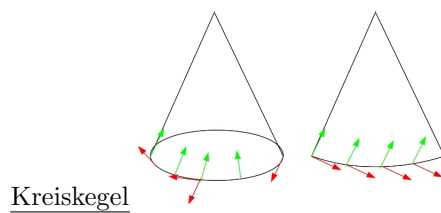
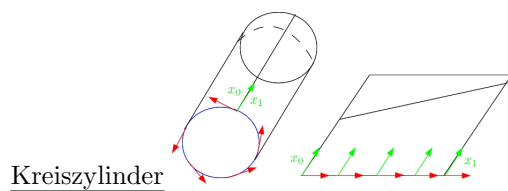
$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (I_{u(t)}(X(t), Y(t))) &= \frac{d}{dt} \langle X(t), Y(t) \rangle = \left\langle \frac{dX}{dt}(t), Y(t) \right\rangle + \left\langle X(t), \frac{dY}{dt}(t) \right\rangle \\ &= \left\langle \underbrace{\frac{\nabla X}{dt}(t)}_{=0}, Y(t) \right\rangle + \left\langle X(t), \underbrace{\frac{\nabla Y}{dt}(t)}_{=0} \right\rangle = 0 \end{aligned}$$

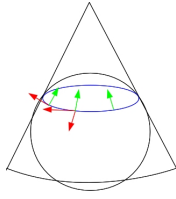
□

Beispiel (für geodätische Parallelfelder (ohne Rechnung!)):

Benutzte Eigenschaften:

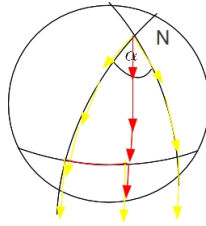
1. In der Ebene gilt “parallel” = “geodätisch parallel”
2. Berühren sich zwei Flächen längs einer Flächenkurve, so ist der geodätische Parallelismus bezüglich dieser Kurven für beide Flächen derselbe (denn es wird in die gleiche Tangential-ebene projiziert)





Kleinkreis grüner Pfeil: Parallelfeld längs Kleinkreis
 roter Pfeil: Tangentenvektoren bilden kein Parallelfeld

Geodätische Parallelverschiebung ist im Allgemeinen nicht wegunabhängig.



2.2.2 Geodätische Linien

Definition:

Eine Geodätische (Autoparallele, “Geodäte”) auf einer \mathcal{C}^2 -Fläche ist eine \mathcal{C}^2 -Flächenkurve mit geodätisch parallelem Tangenteneinheitsfeld, d.h. mit

$$\boxed{\frac{\nabla T}{dt} \equiv 0}$$

Beispiel:

1. Schraubenlinien auf Kreiszylindern ($\hat{=}$ Geraden in der Abwickelebene)
2. Großkreise auf Kugeln, aber nicht andere Kreise.

Aus $\dot{c} = wT$ (mit $w = |\dot{c}|$) folgt

$$\frac{\nabla \dot{c}}{dt} = w \cdot \frac{\nabla T}{dt} + \dot{w}T$$

und wegen

$$I\left(T, \frac{\nabla T}{dt}\right) = \left\langle T, \frac{dT}{dt} \right\rangle = 0$$

gilt

$$\frac{\nabla \dot{c}}{dt} \equiv 0 \Leftrightarrow \frac{\nabla T}{dt} = 0 \wedge \dot{w} = 0$$

$\Leftrightarrow c$ ist Geodätische, proportional zur Bogenlänge parametrisiert

Für Flächenkurven in BLP $s \mapsto c(s)$ gilt natürlich:

$$c \text{ Geodätische} \Leftrightarrow \frac{\nabla c'}{ds} \equiv 0$$

Folgerung:

Geodätische in \mathcal{C}^2 -BLP $s \mapsto c(s)$, d.h. mit

$$|c'|^2 = \sum g_{\varrho\sigma}(u) u'^\varrho u'^\sigma \equiv 1$$

sind (in der Parameterebene) gekennzeichnet durch

$$(*) \quad u''^\mu + \sum_{\varrho, \sigma} \gamma_{\varrho\sigma}^\mu(u) u'^\varrho u'^\sigma \equiv 0 \quad (\mu = 1, 2)$$

(Differentialgleichungssystem für $s \mapsto u^1(s), u^2(s)$)

Beweis (der Folgerung):

$$\begin{aligned} \frac{\nabla c'}{ds} &= \frac{\nabla}{ds} \left(\sum u'^\varrho x_\varrho(u) \right) = \sum u''^\mu x_\mu(u) + \sum u'^\varrho \nabla_\sigma x_\varrho(u) u'^\sigma \\ &= \sum (u''^\mu + \gamma_{\varrho\sigma}^\mu(u) u'^\varrho u'^\sigma) x_\mu(u) \equiv 0 \Leftrightarrow (*) \end{aligned}$$

□

Zur Existenz von Geodätischen:

Satz 2.2.2:

Auf einer \mathcal{C}^3 -Fläche verläuft durch jeden Flächenpunkt in jede Tangentialrichtung genau eine Geodätische.

Beweis (von Satz 2.2.2):

(*) bildet ein im Allgemeinen nichtlineares autonomes Differentialgleichungssystem 2. Ordnung für die Funktionen $s \mapsto u^1(s), u^2(s)$ (transformierbar in ein System 1. Ordnung). Es besitzt etwa für \mathcal{C}^3 -Flächen (mit \mathcal{C}^1 -Christoffelsymbolen \Rightarrow lokale Lipschitzbeschränktheit) zu vorgegebenen Anfangsbedingungen $u^\mu(0) = u_0^\mu, u'^\mu(0) = X_0^\mu$ ($\mu = 1, 2$) genau eine auf einem maximalen Intervall um $s = 0$ definierte Lösung $s \in I \mapsto u(s) = (u^1(s), u^2(s)) \in G \subset \mathbb{R}^2$. Also existiert genau eine Geodätische $s \in I \mapsto c(s) = x(U(s)) \in M \subset \mathbb{R}^3$ mit $c(0) = x(u_0) = x_0$ und $c'(0) = \sum X_0^\mu x_\mu(u_0) = X_0 \in T_{u_0}x$ (wenn $|X_0| = 1$)

□

Bemerkung:

Die maximal fortgesetzte Lösung $s \in I \mapsto u(s) \in G \subset \mathbb{R}^2$ braucht nur auf einem endlichen Intervall $I =]s_-; s_+[$ definiert zu sein. Die zugehörige Geodätische besitzt dann endliche Länge. Flächen,

auf denen jede Geodätische ∞ -lang ist ($I = \mathbb{R}$) heißen geodätisch vollständig.

Geodätische sind nach Definition “möglichst gerade”. Sind sie auch “möglichst kurz”?

Satz 2.2.3:

Auf einer \mathcal{C}^2 -Fläche ist eine kürzeste Verbindungskurve zwischen zwei festen Flächenpunkten notwendig eine Geodätische.

$$\text{“möglichst kurz”} \Rightarrow \text{“möglichst gerade”}$$

Beweis (von Satz 2.2.3):

Gegeben: \mathcal{C}^2 -Flächenkurve $st \mapsto c(t) = x(u(t))$ mit $\begin{cases} c(a) = x(u_a) = x_a \\ c(b) = x(u_b) = x_b \end{cases}$.

Wir konstruieren \mathcal{C}^2 -Vergleichsflächenkurven $t \mapsto {}^\varepsilon c(t)$ ($\varepsilon \in U(0)$) mit

$$\forall \varepsilon \quad {}^\varepsilon c(a) = x_a, \quad {}^\varepsilon c(b) = x_b, \quad {}^\varepsilon c|_{\varepsilon=0} = c$$

und untersuchen ihre Längen $L_a^b({}^\varepsilon c)$.

Ansatz: ${}^\varepsilon c(t) = x({}^\varepsilon u(t)) = x(u(t) + \varepsilon v(t))$ mit einer \mathcal{C}^2 -Abbildung $t \in [a, b] \mapsto v(t) \in \mathbb{R}^2$, wobei $v(a) = v(b) = 0$ (diese sind regulär für genügend kleine ε , d.h. $|{}^\varepsilon \dot{c}(t)| > 0$).

Die Kurven definieren ein \mathcal{C}^1 -Variationsvektorfeld

$$t \in [a, b] \mapsto V(t) := \frac{\partial}{\partial \varepsilon} ({}^\varepsilon c(t)) \Big|_{\varepsilon=0} = \sum v^q(t) x_q(u(t)) \in T_{u(t)}x$$

mit $V(a) = V(b) = 0$.

Falls c kürzeste Verbindung zwischen x_a und x_b , muss gelten

$$\boxed{\frac{d}{d\varepsilon} L_a^b({}^\varepsilon c) \Big|_{\varepsilon=0} = 0}$$

(und zwar für alle Abbildungen $t \mapsto v(t)$) Berechnung:

$$\begin{aligned}
\frac{d}{d\varepsilon} L_a^b(\varepsilon c)|_{\varepsilon=0} &= \frac{d}{d\varepsilon} \left[\int_a^b |\varepsilon \dot{c}(t)| dt \right]_{\varepsilon=0} \\
&= \int_a^b \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \underbrace{|\varepsilon \dot{c}(t)|}_{>0} dt \bigg|_{\varepsilon=0} = \int_a^b \frac{1}{|\varepsilon c(t)|} \left\langle \varepsilon c(t), \underbrace{\frac{\partial \varepsilon \dot{c}(t)}{\partial \varepsilon}}_{\partial_\varepsilon \partial_t \varepsilon c(t)} \right\rangle dt \bigg|_{\varepsilon=0} \\
&= \int_a^b \frac{1}{|\dot{c}(t)|} \left\langle \dot{c}(t), \dot{V}(t) \right\rangle dt \\
&= \int_a^b \left\langle T(t), \dot{V}(t) \right\rangle dt = \int_a^b \frac{d}{dt} \langle T(t) V(t) \rangle dt - \int_a^b \left\langle \dot{T}(t), V(t) \right\rangle dt \\
&= \langle T(t), V(t) \rangle \big|_a^b - \int_a^b \left\langle \frac{\nabla T}{dt}(t), V(t) \right\rangle dt \\
&= - \int_a^b I_{u(t)} \left(\frac{\nabla T}{dt}(t), V(t) \right) dt = - \int_a^b \sum g_{\varrho\sigma}(u(t)) \frac{\nabla T^\varrho}{dt}(t) v^\sigma(t) dt
\end{aligned}$$

(1. Variation der Länge einer Flächenkurve)

Dies ist (nach dem sog. Fundamentallemma der Variationsrechnung) nur möglich, wenn $\forall_\varrho \frac{\nabla T^\varrho}{dt}(t) = 0$ auf $[a, b]$, also $\frac{\nabla T}{dt} \equiv 0$ ist, sonst kann man Gegenbeispiele konstruieren.

Annahme:

$$\frac{\nabla T^\mu}{dt}(t_0) > 0 \text{ für ein } t_0 \in]a, b[\text{ und ein festes } \mu = 1, 2$$

also wegen der Stetigkeit:

$$\frac{\nabla T^\mu}{dt}(t) > 0 \text{ in } U(t_0) \subset]a, b[$$

Wir rechnen mit

$$w_\varrho(t) := \sum g_{\varrho\sigma}(u(t)) v^\sigma(t)$$

umgekehrt ist dann

$$V^\sigma(t) = \sum g^{\varrho\sigma}(u(t)) w_\varrho(t)$$

Wähle $w_\varrho \equiv 0$ und $w_\mu > 0$ so, dass

$$W_\mu(t) \begin{cases} > 0 & \text{für } t \in U(t_0) \\ = 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$\int_a^b \sum g_{\varrho\sigma}(u(t)) \frac{\nabla T^\varrho}{dt}(t) V^\sigma(t) dt = \int_{U(t_0)} \underbrace{\frac{\nabla T^\mu}{dt}(t) \cdot w_\mu(t)}_{>0} dt > 0 \quad \text{Widerspruch}$$

□

Bemerkung:

1. Die Umkehrung (Anm. d. Redaktion: von Satz 2.2.3) ist im Allgemeinen nicht richtig.

Beispiel:

Großkreise auf Kugeln

Aber: Jeder Flächenpunkt besitzt eine Umgebung, in der auch die Umkehrung gilt. (ohne Beweis!)

2. Geodätische sind auch Kurven minimaler Krümmung κ .
3. Auf Rotationsflächen lässt sich das Differentialgleichungssystem für Geodätische explizit lösen. (Clairaut-Gleichungen) [siehe Übung]
4. Geodätische können auch “experimentell” bestimmt werden.
“Aufwickeln” eines Papierstreifens auf eine Fläche ($\hat{=}$ Berührung). Mittellinie (= Geodätische auf dem Streifen) ist dann auch Geodätische auf der Fläche.

2.2.3 Abbildungen von Flächen, Kartographie

Definition:

$x: G \rightarrow M, \bar{x}: G \rightarrow \bar{M}$ seien *injektive* Parametrisierungen zweier \mathcal{C}^1 -Flächen. Dann heißt die durch $\Psi = \bar{x} \circ x^{-1}: M \rightarrow \bar{M}$ definierte *Flächenabbildung*

- a) *längentreu*, wenn zugeordnete Kurvenstücke stets gleiche Länge besitzen,
- b) *winkeltreu* (konform), wenn zugeordnete Kurvenstückpaare in zugeordneten Schnittpunkten stets gleiche Winkel einschließen,
- c) *flächentreu* (arealtreu), wenn zugeordnete Flächenstücke stets den gleichen Flächeninhalt besitzen.

Diese Eigenschaften kann man an den 1. Grundformen $(g_{\varrho\sigma})$ und $(\bar{g}_{\varrho\sigma})$ erkennen:

Satz 2.2.4:

Für eine Abbildung $\Psi = \bar{x} \circ x^{-1}: M \rightarrow \bar{M}$ zwischen injektiven \mathcal{C}^1 -Flächen in Parametrisierungen $x: G \rightarrow M, \bar{x}: G \rightarrow \bar{M}$ gilt

- a) Ψ *längentreu* $\Leftrightarrow \forall_{u \in G} (g_{\varrho\sigma})(u) = (\bar{g}_{\varrho\sigma})(u) \Leftrightarrow \Psi$ Isometrie
- b) Ψ *winkeltreu* $\Leftrightarrow \forall_{u \in G} (g_{\varrho\sigma})(u) = \lambda(u) \cdot (\bar{g}_{\varrho\sigma})(u)$ mit einer \mathcal{C}^0 -Funktion $\lambda > 0$

$$c) \quad \Psi \text{ flächentreu} \Leftrightarrow \forall_{u \in G} \det(g_{\varrho\sigma})(u) = \det(\bar{g}_{\varrho\sigma})(u)$$

Beweis (von Satz 2.2.4):

a)

$$\int_a^b \sqrt{\sum g_{\varrho\sigma}(u(t)) \dot{u}^\varrho(t) \dot{u}^\sigma(t)} \, dt = \int_a^b \sqrt{\sum \bar{g}_{\varrho\sigma}(u(t)) \dot{u}^\varrho(t) \dot{u}^\sigma(t)} \, dt$$

für alle Kurven $t \mapsto u(t)$ in dem Parametergebiet $G \Rightarrow \forall_{u \in G} (g_{\varrho\sigma})(u) = (\bar{g}_{\varrho\sigma})(u)$, sonst ließen sich Gegenbeispiele konstruieren.

c)

$$\int_B \sqrt{g(u)} \, du = \int_B \sqrt{\bar{g}(u)} \, du$$

für alle Bereiche B in G

$$\Leftrightarrow \forall_{u \in G} \sqrt{g(u)} = \sqrt{\bar{g}(u)}$$

b) Für den Winkel δ zwischen zwei Flächenkurven $t \mapsto c_1(t) = x(u_1(t))$, $t \mapsto c_2(t) = x(u_2(t))$ gilt zunächst

$$\cos \delta = \frac{\langle \dot{c}_1, \dot{c}_2 \rangle}{|\dot{c}_1| |\dot{c}_2|}$$

$$\text{also } \sin \delta = \pm \frac{\sqrt{|\dot{c}_1|^2 |\dot{c}_2|^2 - \langle \dot{c}_1, \dot{c}_2 \rangle^2}}{|\dot{c}_1| |\dot{c}_2|} = \pm \frac{|\dot{c}_1 \times \dot{c}_2|}{|\dot{c}_1| |\dot{c}_2|}$$

und folglich

$$\cot \delta = \pm \frac{\langle \dot{c}_1, \dot{c}_2 \rangle}{|\dot{c}_1 \times \dot{c}_2|} = \pm \frac{\sum g_{\varrho\sigma}(u) \dot{u}_1^\varrho \dot{u}_2^\sigma}{\det(\dot{u}_1^\varrho, \dot{u}_2^\sigma) \sqrt{g(u)}}$$

Bei einer winkeltreuen Flächenabbildung ist also

$$\frac{\sum g_{\varrho\sigma}(u) \dot{u}_1^\varrho \dot{u}_2^\sigma}{\sqrt{g(u)}} = \frac{\sum \bar{g}_{\varrho\sigma}(u) \dot{u}_1^\varrho \dot{u}_2^\sigma}{\sqrt{\bar{g}(u)}}$$

für alle Kurven $t \mapsto u_1(t)$, $t \mapsto u_2(t)$ im Parametergebiet G

$$\Rightarrow \forall_{u \in G} \left(\frac{g_{\varrho\sigma}}{\sqrt{g}} \right) (u) = \left(\frac{\bar{g}_{\varrho\sigma}}{\sqrt{\bar{g}}} \right) (u) \Rightarrow \forall_{u \in G} (g_{\varrho\sigma})(u) = \lambda(u) \cdot (\bar{g}_{\varrho\sigma})(u)$$

mit einer Funktion $u \mapsto \lambda(u) > 0$. Diese Bedingung ist auch hinreichend für Winkeltreue.

□

Folgerung:

Ψ längentreu $\Leftrightarrow \Psi$ winkeltreu und Ψ flächentreu.

Anwendung: Es gibt keine Karte der Erdkugel, die gleichzeitig winkeltreu und flächentreu ist!

Beispiel (für Abbildungen eines Kugelstücks):

$$(u, v) \mapsto x(u, v) = r \begin{pmatrix} \cos u \cos v \\ \sin u \cos v \\ \sin v \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad (g_{\varrho\sigma}(u, v)) = r^2 \begin{pmatrix} \cos^2 v & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

in die Ebene:

- a) *Winkeltreue Abbildung durch stereographische Projektion* vom Nordpol $N = (0, 0, r)^T$ auf die Äquatorebene $x^3 = 0$.

Der Ansatz $N + \lambda(x(u, v) - N) = (\bar{x}^1(u, v), \bar{x}^2(u, v), 0)^T$ liefert $r + \lambda r(\sin v - 1) = 0$, also $\lambda = \frac{1}{1 - \sin v}$.

Ergebnis:

$$\bar{x}(u, v) = \frac{r \cos v}{1 - \sin v} \begin{pmatrix} \cos u \\ \sin u \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{mit}$$

$$(\bar{g}_{\varrho\sigma}(u, v)) = \frac{r^2}{(1 - \sin v)^2} \begin{pmatrix} \cos^2 v & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{(1 - \sin v)^2} (g_{\varrho\sigma}(u, v))$$

- b) *Flächentreue Abbildung durch den Kartenentwurf von Archimedes/Lambert.*

Prinzip: Projektion eines Kugelpunktes auf einen am Äquator berührenden Kreiszylinder und Abwicklung dieses Zylinders in die Ebene.

Der Ansatz $\bar{x} = x_0 + \lambda(x - x_0)$ mit $x_0 = r(0, 0, \sin v)^T$ liefert

$$\lambda = \frac{|\bar{x} - x_0|}{|x - x_0|} = \frac{r}{|x - x_0|} = \frac{1}{\cos v}$$

Ergebnis:

$$\bar{x}(u, v) = r \begin{pmatrix} \cos u \\ \sin u \\ \sin v \end{pmatrix} \quad (\text{auf dem Zylinder}) \text{ bzw.}$$

$$\bar{\bar{x}}(u, v) = r \begin{pmatrix} u \\ 0 \\ \sin v \end{pmatrix} \quad (\text{in der Ebene}) \text{ mit}$$

$$(\bar{g}_{\varrho\sigma}(u, v)) = (\bar{\bar{g}}_{\varrho\sigma}(u, v)) = r^2 \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \cos^2 v \end{pmatrix}, \text{ also } \bar{g}(u, v) = \bar{\bar{g}}(u, v) = g(u, v)$$

2.3 Krümmungstheorie der Flächen im \mathbb{R}^3

(Einiges ist problemlos auf Hyperflächen im \mathbb{R}^n zu verallgemeinern)

2.3.1 Erste geometrische Bedeutungen der Krümmungsgrößen

Bei $p = 2, n = 3$ vereinfacht sich doch einiges:

Für die beiden Hauptkrümmungen $\kappa_1(u), \kappa_2(u)$ in einem Punkt $x(u)$ [= Eigenwerte von A] gibt es nur zwei Möglichkeiten

1. $\kappa_1(u) \neq \kappa_2(u) \Rightarrow Y_1(u) \perp Y_2(u)$ für die zugehörigen Hauptkrümmungsrichtungen (= Eigenvektoren von A) ohne Einschränkung

$$|Y_1(u)| = |Y_2(u)|, \det(Y_1(u), Y_2(u), N(u)) = 1$$

gut!

2. $\kappa_1(u) = \kappa_2(u) \Rightarrow$ Jede Tangentialrichtung ist Hauptkrümmungsrichtungen (der Eigenraum von $\lambda(u) := \kappa_1(u) = \kappa_2(u)$ ist ganz $T_u x$)

$$\Rightarrow \forall_Y A_u(Y) = \lambda(u) \cdot Y \text{ bzw. } (b^\mu_\sigma(u) = \lambda(u)(\delta^\mu_\sigma))$$

Eine Orthonormalbasis $(Y_1(u), Y_2(u))$ kann willkürlich gewählt werden.

schlecht!

Bezeichnungen für solche Ausnahmepunkte mit 2):

Definition:

Auf einer \mathcal{C}^2 -Fläche im \mathbb{R}^3 heißen Flächenpunkte $x(u)$

- a) $\kappa_1(u) = \kappa_2(u) = \lambda(u) \in \mathbb{R}$ Nabelpunkte [umbilics] mit der Kennzeichnung

$$A_u = \lambda(u) \text{ Id}|_{T_u x} \text{ bzw. } \Pi_u = \lambda(u) \cdot \text{I}_u$$

(“symmetrisches Krümmungsverhalten”)

- b) $\kappa_1(u) = \kappa_2(u) = 0$ Flachpunkte mit der Kennzeichnung

$$A_u = 0 \text{ bzw. } \Pi_u = 0$$

(“keine Krümmung”)

Test für die Interpretation

Satz 2.3.1:

Eine \mathcal{C}^3 -Fläche, die nur Nabelpunkte enthält, ist entweder Stück einer Kugelfläche mit Gaußscher Krümmung $K = \frac{1}{R^2} > 0$, wenn R der Kugelradius ist, oder ein Ebenenstück mit Gaußscher Krümmung $K \equiv 0$. Im zweiten Fall besitzt sie nur Flachpunkte.

Beweis (von Satz 2.3.1):

$$\begin{aligned} \forall_u A_u = \lambda(u) \text{Id} &\Rightarrow \forall_u \partial_\varrho N(u) = -\lambda(u) \cdot x_\varrho(u) \quad \text{oder kurz} \\ (*) \quad N_\varrho &= -\lambda x_\varrho \quad (\varrho = 1, 2) \end{aligned}$$

Daraus folgt

$$\begin{aligned} N_{\varrho\sigma} &= -\lambda_\sigma x_\varrho - \lambda x_{\varrho\sigma} \quad , \text{ insbesondere} \\ N_{12} - N_{21} &= -\lambda_2 x_1 - \lambda_1 x_2 - \underbrace{\lambda(x_{12} - x_{21})}_{=0} = 0 \end{aligned}$$

Dies zeigt: $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$, d.h.

$$\lambda = \text{const.}$$

1. Fall: $\lambda \neq 0$ (nur echte Nabelpunkte). Dann liefert (*)

$$\begin{aligned} N &= -\lambda(x - x_0) \quad , \text{ also} \\ |x - x_0| &= \frac{1}{|\lambda|} = \text{const.} > 0 \end{aligned}$$

Die Fläche liegt auf einer Kugel mit Radius

$$R = \frac{1}{|\lambda|} = \frac{1}{\sqrt{K}} \text{ bzw. } K = \frac{1}{R^2} > 0$$

Fall: $\lambda = 0$ (nur Flachpunkte). Dann liefert (*)

$$N = \text{const.}$$

Die Fläche ist eine Ebene mit

$$K = \lambda^2 = 0$$

□

Folgerung:

Kugel und Ebene sind nicht isometrisch, da K innergeometrisch.

Definition:

Die 3. Grundform (Fundamentalform) einer \mathcal{C}^2 -Fläche sei das Feld von symmetrischen, positiv semidefiniten Bilinearformen

$$\text{III}_u: T_u x \times T_u x \rightarrow \mathbb{R}, (X, Y) \mapsto \underline{\text{III}_u(X, Y) = \text{I}_u(A_u(X), A_u(Y))}$$

mit den Darstellungsmatrizen

$$(c_{\varrho\sigma}(u)) = (\text{III}_u(x_\varrho(u), x_\sigma(u))) = \left(\sum_{\mu\nu} g_{\mu\nu} b_\varrho^\mu b_\sigma^\nu \right)$$

Geometrische Bedeutung:

$$\begin{aligned} \text{III}(X, Y) &= \langle d_Y N, d_Y N \rangle \Rightarrow c_{\varrho\sigma} = \langle N_\varrho, N_\sigma \rangle \\ &\quad (\text{vergleiche } g_{\varrho\sigma} = \langle x_\varrho, x_\sigma \rangle) \end{aligned}$$

Daraus folgt:

Die 3. Grundform einer Fläche $u \mapsto x(u)$ ist die 1. Grundform ihres Normalenfeldes $u \mapsto 0 + N(u)$

Satz 2.3.2:

Zwischen den Grundformen einer Fläche besteht die Identität

$$\begin{aligned} \text{III} - 2H \cdot \text{II} + K \cdot \text{I} &= 0 \\ \text{bzw. } c_{\varrho\sigma} - 2H b_{\varrho\sigma} + K g_{\varrho\sigma} &= 0 \end{aligned}$$

Beweis (von Satz 2.3.2):

Der Endomorphismus A annulliert nach dem Satz von Cayley-Hamilton sein eigenes charakteristisches Polynom

$$\begin{aligned} \chi_A(t) &= t^2 - \text{tr } A \cdot t + \det A = t^2 - 2H \cdot t + K, \text{ d.h. es gilt} \\ A^2 - 2H \cdot A + K \cdot \text{Id} &= 0 \end{aligned}$$

Daraus folgt:

$$\begin{aligned} \text{III}(X, Y) &= \text{I}(A(X), A(Y)) \stackrel{A \text{ selbstadjungiert}}{=} \text{I}(X, A^2(Y)) = \text{I}(X, 2H \cdot A(Y)) - K \cdot \text{I}(X, Y) \\ &= 2H \cdot \text{II}(X, Y) - K \cdot \text{I}(X, Y) \end{aligned}$$

□

2.3.2 Approximativer Flächenverlauf, Klassifikation der Flächenpunkte

Gegeben: \mathcal{C}^2 -Fläche in Parameterdarstellung $u \mapsto x(u)$, $\overset{0}{x} = x(\overset{0}{u})$

Gesucht: Eulersche Parametrisierung, $\bar{u} = \bar{x}(\bar{u}) = \bar{x}^0 + \bar{u}^1 e_1 + \bar{u}^2 e_2 + F(\bar{u}^1, \bar{u}^2) e_3$ in der Umgebung von $\overset{\circ}{x}$ (“ $z = F(x, y)$ ”)

Konstruktion: Wähle eine Orthonormalbasis (e_1, e_2) in $T_{\overset{\circ}{u}} x$, so dass mit $e_3 := N\left(\overset{\circ}{u}\right)\left(\overset{\circ}{x}; e_1, e_2, e_3\right)$ ein kartesisches Koordinatensystem bildet (z.B. Hauptkrümmungsrichtung $e_\varrho := Y_\varrho(\varrho = 1, 2)$)

Darstellung der Fläche in diesem Koordinatensystem

$$u \mapsto x(u) = x_0 + x^1(u)e_1 + x^2(u)e_2 + x^3(u)e_3$$

mit

$$(a) \quad x^i\left(\overset{\circ}{u}\right) = 0 \quad (i = 1, 2, 3)$$

$$(b) \quad x_\varrho^3\left(\overset{\circ}{u}\right) = 0, \text{ denn } x_\varrho\left(\overset{\circ}{u}\right) = \sum_{i=1}^3 x_\varrho^i\left(\overset{\circ}{u}\right) e_i \in \langle\langle e_1, e_2 \rangle\rangle = T_{\overset{\circ}{u}} x$$

Mit (b) folgt weiter

$$x_1 \times x_2\left(\overset{\circ}{u}\right) = 0 \cdot e_1 + 0 \cdot e_2 + \begin{vmatrix} x_1^1 & x_1^2 \\ x_2^1 & x_2^2 \end{vmatrix} \left(\overset{\circ}{u}\right) \cdot e_3 = \underbrace{\lambda}_{>0} N\left(\overset{\circ}{u}\right), \text{ also}$$

$$\det \begin{pmatrix} x_1^1 & x_1^2 \\ x_2^1 & x_2^2 \end{pmatrix} \left(\overset{\circ}{u}\right) > 0 \text{ und damit in einer Umgebung von } \overset{\circ}{u}$$

Durch $u \mapsto \Phi(u) := (x^1(u), x^2(u)) = (\bar{u}^1(u), \bar{u}^2(u))$ wird also eine in der Umgebung von $\overset{\circ}{u}$ zulässige Parametertransformation definiert (mit $\Phi\left(\overset{\circ}{u}\right) = 0$ nach (a)) [lokaler Umkehrsatz]

Neue Darstellung der Fläche in einer Umgebung von $\bar{u} = 0$

$$\bar{u} \mapsto \bar{x}(\bar{u}) = x \circ \Phi^{-1}(\bar{u}) = x_0 + \bar{u}^1 e_1 + \bar{u}^2 e_2 + \underbrace{x^3(\Phi^{-1}(\bar{u}))}_{F(\bar{u})} e_3$$

mit

$$F(0) = x^3\left(\underbrace{\Phi^{-1}(0)}_{\overset{\circ}{u}}\right) = 0 \text{ (nach (a)), und}$$

$$\partial_\varrho F(0) = \sum \underbrace{\partial_\sigma x^3\left(\overset{\circ}{u}\right)}_{=0} \frac{\partial u^\sigma}{\partial \bar{u}^\varrho}(0) = 0$$

Hilfssatz:

Jede \mathcal{C}^2 -Fläche im \mathbb{R}^3 besitzt lokal um jeden Punkt $\overset{\circ}{x}$ eine Eulersche Parametrisierung

$$u \mapsto x(u) = \overset{\circ}{x} + u^1 e_1 + u^2 e_2 + (u^1, u^2) e_3$$

bezüglich eines geeigneten Koordinatensystems mit

$$F(0) = \partial_1 F(0) = \partial_2 F(0) = 0$$

Eigenschaften:

$$\begin{aligned} x(0) &= \overset{\circ}{x} \\ x_\varrho(0) &= e_\varrho \quad (\varrho = 1, 2) \\ N(0) &= e_3 \\ x_{\varrho\sigma}(0) &= F_{\varrho\sigma}(0)e_3 \end{aligned}$$

Daraus ergeben sich

$$\begin{aligned} (g_{\varrho\sigma}(0)) &= (\delta_{\varrho\sigma} \gamma_{\varrho}^\mu{}_\sigma(0)) = 0 \\ (b_{\varrho\sigma}(0)) &= (b^\mu{}_\sigma(0)) = (F_{\varrho\sigma}(0)) \\ &[= \text{HESSE-Matrix von } F \text{ in } u = 0] \end{aligned}$$

Die Taylorentwicklung dieser Parametrisierung um $u = 0$ ist

$$x(u) = x(0) + \sum_{\varrho=1}^2 x_\varrho(0)u^\varrho + \frac{1}{2} \sum x_{\varrho\sigma}(u)u^\varrho u^\sigma + R(u)$$

wobei $\frac{R(u)}{|u|^2} \xrightarrow{u \rightarrow 0} 0$. Einsetzen obiger Eigenschaften liefert

Satz 2.3.3:

Eine \mathcal{C}^2 -Fläche im \mathbb{R}^3 in der Eulerschen Parametrisierung des Hilfssatzes besitzt um $u = 0$ die Taylorentwicklung

$$u \mapsto x(u) = \overset{\circ}{x} + \sum_{i=1}^2 u^i e_i + \frac{1}{2} \sum b_{\varrho\sigma}(0)u^\varrho u^\sigma + o(|u|^2)$$

Die in 2. Ordnung approximierende Fläche

$$u \mapsto \tilde{x}(0) = \overset{\circ}{x} + \sum_{i=1}^2 u^i e_i + \frac{1}{2} \sum b_{\varrho\sigma}(0)u^\varrho u^\sigma e_3$$

ist eine (möglicherweise entartete) parabolische Quadrik, genannt Schmiegeparaboloid (oskulierendes Paraboloid) der Fläche in $u = 0$.

$$\left[\text{in Koordinaten: } 2x^3 = \sum_{\varrho,\sigma=1}^2 b_{\varrho\sigma}(0)x^\varrho x^\sigma \right]$$

Diskussion des Schmiegeparaboloids

Aus

$$\tilde{x}(u^1, u^2) = \overset{\circ}{x} + \underbrace{\sum u^\varrho x_\varrho(0)}_{=Y \in T_0x} + \frac{1}{2} \sum \overset{\circ}{\Pi}(x_\varrho(0), x_\sigma(0)) u^\varrho u^\sigma \cdot \overset{\circ}{N}$$

folgt die Darstellung

$$\tilde{x}(Y) = \overset{\circ}{x} + Y + \frac{1}{2} \overset{\circ}{\Pi}(Y, Y) \cdot \overset{\circ}{N} \quad \text{mit } Y \in T_0x$$

(Parameterebene = Tangentialebene in $u = 0$)

Die Zerlegung $Y = s \cdot \overset{\circ}{Y}_1 + t \cdot \overset{\circ}{Y}_2$ bezüglich orthonormierter Hauptkrümmungsrichtung ($\hat{=}$ Wahl von $e_\varrho := \overset{\circ}{Y}_\varrho$ bei der Konstruktion der Eulerschen Parametrisierung) liefert wegen $\overset{\circ}{A}(\overset{\circ}{Y}_\varrho) = \overset{\circ}{\kappa}_\varrho \cdot \overset{\circ}{Y}_\varrho$, also $\overset{\circ}{A}(Y) = s \overset{\circ}{\kappa}_1 \overset{\circ}{Y}_1 + t \overset{\circ}{\kappa}_2 \overset{\circ}{Y}_2$ und damit

$$\overset{\circ}{\Pi}(Y, Y) = \overset{\circ}{I}(Y, \overset{\circ}{A}(Y)) = \overset{\circ}{\kappa}_1 s^2 + \overset{\circ}{\kappa}_2 t^2$$

Folgerung:

Wählt man in der Tangentialebene T_0x Hauptkrümmungsrichtungen $\overset{\circ}{Y}_1, \overset{\circ}{Y}_2$ also (orthonormierte) Basisvektoren, lässt sich das Schmiegeparaboloid schreiben in der Form

$$(s, t) \mapsto \tilde{x}(s, t) = \overset{\circ}{x} + s \overset{\circ}{Y}_1 + t \overset{\circ}{Y}_2 + \frac{1}{2} \left(\overset{\circ}{\kappa}_1 s^2 + \overset{\circ}{\kappa}_2 t^2 \right) \overset{\circ}{N}$$

mit den Hauptkrümmungen $\overset{\circ}{\kappa}_1, \overset{\circ}{\kappa}_2$ in $\overset{\circ}{x} = x(0)$

(Hauptachsentransformation des Schmiegeparaboloids)

$$\left["z = \frac{1}{2} \left(\overset{\circ}{\kappa}_1 x^2 + \overset{\circ}{\kappa}_2 y^2 \right)" \right]$$

Daraus ist abzulesen:

Satz 2.3.4 (Klassifikation der Flächenpunkte):

Eine \mathcal{C}^2 -Fläche im \mathbb{R}^3 verhält sich in 2. Näherung in der Umgebung eines Punktes mit

- (a) $K = \kappa_1 \kappa_2 > 0$ (elliptischer Punkt)
wie ein elliptisches Paraboloid
- (b1) $K = \kappa_1 \kappa_2 = 0$ aber nicht $\kappa_1 = \kappa_2 = 0$ (parabolischer Punkt)
wie ein parabolischer Zylinder
- (b2) $K = \kappa_1 = \kappa_2 = 0$ (Flachpunkt) wie eine Ebene
- (c) $K = \kappa_1 \kappa_2 < 0$ (hyperbolischer Punkt) wie ein hyperbolisches Paraboloid ("Sattelfläche")

Bemerkung:

Echte Nabelpunkte ($\kappa_1 = \kappa_2 \neq 0$) sind stets elliptisch ($K > 0$) mit rotationssymmetrischem Querschnitt.

Wir betrachten jetzt Parallelschnitte des Schmiegeparaboloids im Abstand $\pm\varepsilon$ ($\varepsilon > 0$), genauer die Mengen

$$\tilde{J}_\varepsilon = \left\{ Y \in T_0 x \mid \frac{1}{2} \overset{\circ}{\Pi}(Y, Y) = \pm\varepsilon \right\}$$

Sie sind ähnlich zur Menge

$$J = \frac{\tilde{J}_\varepsilon}{\sqrt{2\varepsilon}} = \left\{ Y \in T_0 x \mid \overset{\circ}{\Pi}(Y, Y) = \pm 1 \right\}$$

genannt DUPINSche Indikatrix

(denn $Y \in \tilde{J}_\varepsilon \Leftrightarrow \overset{\circ}{\Pi}(Y, Y) = \pm 2\varepsilon \Leftrightarrow \frac{Y}{\sqrt{2\varepsilon}} \in J$)

Für Parallelschnitte der Fläche selbst, also für

$$J_\varepsilon = \left\{ Y \in T_0 x \mid \frac{1}{2} \overset{\circ}{\Pi}(Y, Y) + R(Y) = \pm\varepsilon \right\}$$

gilt zumindest

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{J_\varepsilon}{\sqrt{2\varepsilon}} = J$$

d.h. sie konvergiert gegen die Dupinsche Indikatrix für $\varepsilon \rightarrow 0$.

Beweis:

$$\begin{aligned} Y \in \frac{J_\varepsilon}{\sqrt{2\varepsilon}} &\Leftrightarrow \frac{1}{2} \overset{\circ}{\Pi}(\sqrt{2\varepsilon}Y, \sqrt{2\varepsilon}Y) + R(\sqrt{2\varepsilon}Y) = \pm\varepsilon \\ &\Leftrightarrow \overset{\circ}{\Pi}(Y, Y) + \underbrace{\frac{R(\sqrt{2\varepsilon}Y)|Y|^2}{2\varepsilon|Y|^2}}_{\rightarrow 0 \text{ für } \varepsilon \rightarrow 0} = \pm 1 \quad \text{denn } \frac{R(u)}{|u|^2} \xrightarrow{u \rightarrow 0} 0 \end{aligned}$$

□

Es gilt

$$Y = dY_1 + tY_2 \in J = \overset{\circ}{\Pi}(Y, Y) = \overset{\circ}{\kappa}_1 s^2 + \overset{\circ}{\kappa}_2 t^2 = \pm 1$$

Daraus folgt

Satz 2.3.5:

Die Dupinsche Indikatrix in einem Punkt einer \mathcal{C}^2 -Fläche ist

- (a) in einem elliptischen Punkt ($K > 0$)

eine Ellipse mit den Hauptachsrichtungen Y_1, Y_2 und den Halbachslängen $\frac{1}{\sqrt{|\kappa_1|}}, \frac{1}{\sqrt{|\kappa_2|}}$

(insbesondere in einem echten Nabelpunkt ein Kreis)

(b1) in einem parabolischen Punkt (etwa $\kappa_1 = 0, \kappa_2 \neq 0$)

ein Paar paralleler Geraden (etwa parallel zur Y_1 -Achse im Abstand $\frac{2}{\sqrt{|\kappa_2|}}$)

(b2) in einem Flachpunkt

leer

(c) in einem hyperbolischen Punkt ($K < 0$)

ein Hyperbelpaar mit gleichen Asymptoten, den Hauptachsrichtungen Y_1, Y_2 und den Halbachslängen $\frac{1}{\sqrt{|\kappa_1|}}, \frac{1}{\sqrt{|\kappa_2|}}$.

Die Asymptotenrichtungen Z (in den Fällen (b1) und (c)) sind jeweils durch $\text{II}(Z, Z) = 0$ gegeben.

Bemerkung:

Bei Minimalflächen ($H = 0, \kappa_2 = -\kappa_1$) erhält man symmetrische Hyperbeln, falls $\kappa_1 \neq 0$.

Alternative: Flachpunkte

In der ursprünglichen Eulerschen Parametrisierung " $z = F(x, y)$ " des Hilfssatzes war $\text{grad } F(0) = 0$ (d.h. F ist in 0 stationär) und $(b_{\varrho\sigma}(0)) = (F_{\varrho\sigma}(0))$ die Hesse-Matrix von F in $x(0)$.

Sätze aus der Analysis liefern sofort die

Folgerung: (a) In einem elliptischen Punkt (II definit) liegt eine hinreichend kleine Umgebung des Flächenpunktes ganz auf einer Seite der Tangentialebene. ("Relatives Extremum")

(b) In einem parabolischen Punkt oder Flachpunkt (II semidefinit) wird das Flächenverhalten in der Umgebung vom Restglied mitbestimmt.

(c) In einem hyperbolischen Punkt (II indefinit) gibt es in jeder Umgebung Flächenpunkte, die auf verschiedenen Seiten der Tangentialebene liegen.

Beispiel (zu (b)): 1. $F(s, t) = s^3 + t^2 = t^2 + R(s, t) \Rightarrow (b_{\varrho\sigma}(0, 0)) = (F_{\varrho\sigma}(0, 0)) = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$

$\Rightarrow (0, 0)$ ist parabolischer Punkt.

$$2. F(s, t) = s(s^2 - t^2) = R(s, t) \Rightarrow (b_{g\sigma}(0, 0)) = (F_{g\sigma}(0, 0)) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$\Rightarrow (0, 0)$ ist Flachpunkt. (“Affensattel”)

2.4 Kurven und spezielle Parameter auf einer Fläche im \mathbb{R}^3

2.4.1 Theorie der Flächenkurven

Bei Flächenkurven konstruieren wir eine an die Fläche angepasste Begleitbasis und betrachten deren Ableitungsgleichungen.

Satz 2.4.1:

Auf einer \mathcal{C}^2 -Fläche sei eine \mathcal{C}^2 -Flächenkurve in BLP $s \mapsto c(s) = x(u(s))$ gegeben. Dann bilden die Vektorfelder

$$s \mapsto T(s) := c'(s) \quad [\text{Tangentenvektor}]$$

$$s \mapsto S(s) := N(u(s)) \times T(s) = T^\times(s) \quad [\text{Seitenvektor}]$$

$$s \mapsto \hat{N}(s) := N(u(s)) \quad [\text{Normalenvektor}]$$

eine orthonormierte, positiv orientierte \mathcal{C}^1 -Begleitbasis, genannt Streifen- oder Darboux-Begleitbasis $s \mapsto (T(s), S(s), \hat{N}(s))$.

Für sie gelten die Ableitungsgleichungen

$$\begin{pmatrix} T \\ S \\ \hat{N} \end{pmatrix}' = \begin{pmatrix} 0 & \kappa_g & \kappa_n \\ -\kappa_g & 0 & \tau_g \\ -\kappa_n & -\tau_g & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T \\ S \\ \hat{N} \end{pmatrix}$$

mit den Koeffizienten (“Streifeninvarianten”)

- geodätische Krümmung

$$\kappa_g = \langle T', S \rangle = \left\langle \frac{\nabla T}{ds}, S \right\rangle = \text{I} \left(\frac{\nabla T}{ds}, S \right)$$

- Normalkrümmung

$$\begin{aligned} \kappa_n &= \langle T', \hat{N} \rangle = -\langle T, \hat{N}' \rangle = -\langle T, d_T N \rangle \\ &= \langle T, A(T) \rangle = \text{I}(T, A(T)) = \text{II}(T, T) \end{aligned}$$

- geodätische Torsion

$$\begin{aligned}\tau_g &= \langle S', \hat{N} \rangle = -\langle S, \hat{N}' \rangle = -\langle S, d_T N \rangle \\ &= \langle S, A(T) \rangle = I(A(T), S) = II(T, S)\end{aligned}$$

Beweis (von Satz 2.4.1):

Klar!

□

Folgerung: a) Im Unterschied zu $\kappa_g = \langle T, S' \rangle = I\left(\frac{\nabla T}{ds}, S\right)$ hängen $\kappa_n = II(T, T)$ und $\tau_g = II(T, S)$ nur von der Tangentialrichtung T ab.

Alle Flächenkurven durch einen Punkt mit gleicher Tangentialrichtung T haben dort gleiches κ_n und τ_g

κ_n und τ_g bestimmen also mehr das Krümmungsverhalten der Fläche als der Kurve.

b) Der innergeometrische Anteil der Ableitungsgleichungen ist

$$\frac{\nabla}{ds} \begin{pmatrix} T \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \kappa_g \\ -\kappa_g & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T \\ S \end{pmatrix}$$

und verallgemeinert die Frenetformeln für ebene Kurven.

Im Unterschied zu κ_n und τ_g ist κ_g eine innergeometrische Größe.

Wir bestimmen alle Flächenkurven, bei denen eine der Invarianten verschwindet.

Definition:

Eine Flächenkurve, deren Tangentenrichtung

- eine Hauptkrümmungsrichtung ist, heißt Krümmungslinie,
- eine Asymptotenrichtung ist, heißt Asymptotenlinie

(letztere existiert nicht durch elliptische Punkte)

Satz 2.4.2:

Für \mathcal{C}^2 -Flächenkurven c auf \mathcal{C}^2 -Flächen gilt

- (a) $\kappa_g \equiv 0 \Leftrightarrow c$ Geodätische
- (b) $\kappa_n \equiv 0 \Leftrightarrow c$ Asymptotenlinie

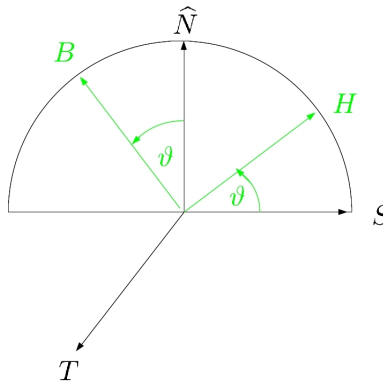
(c) $\tau_g \equiv 0 \Leftrightarrow c$ Krümmungslinie

Beweis (von Satz 2.4.2):

- (a) $\kappa_g \equiv 0 \Leftrightarrow \frac{\nabla T}{ds} = \kappa_g \cdot S \equiv 0 \Leftrightarrow c$ geodätisch
- (b) $\kappa_n \equiv 0 \Leftrightarrow \Pi(T, T) \equiv 0 \Leftrightarrow T$ Asymptotenrichtung $\Leftrightarrow c$ Asymptotenlinie
- (c) $\tau_g \equiv 0 \Leftrightarrow \Pi(T, S) = I(A(T), S) \equiv 0 \Leftrightarrow A(T) \parallel T \Leftrightarrow T$ Eigenvektor von A
 $\Leftrightarrow T$ Hauptkrümmungsrichtung $\Leftrightarrow c$ Krümmungslinie

□

Wir untersuchen den Zusammenhang zwischen Frenet- und Darboux-Begleitbasis bzw. ihrer Invarianten.



Satz 2.4.3:

Ist der Winkel ϑ zwischen der Schmiegenebene einer wendepunktfreien \mathcal{C}^2 -Flächenkurve (mit \mathcal{C}^1 -Frenet-Begleitbasis) und der Tangentialebene der Fläche, so gewählt, dass gilt

$$\begin{array}{lcl} H & = & \cos \vartheta S + \sin \vartheta \hat{N} \\ B & = & -\sin \vartheta S + \cos \vartheta \hat{N} \end{array} \quad \text{bzw.} \quad \begin{array}{lcl} S & = & \cos \vartheta H - \sin \vartheta B \\ \hat{N} & = & \sin \vartheta H + \cos \vartheta B \end{array} \quad (\text{Zurückdrehen!})$$

so folgt für die Streifeninvarianten sowie Krümmung und Torsion der Kurve

$$\left. \begin{array}{l} (1) \quad \kappa_g = \kappa \cos \vartheta \\ (2) \quad \kappa_n = \kappa \sin \vartheta \end{array} \right\} \text{ also } \kappa = \sqrt{\kappa_g^2 + \kappa_n^2}$$

$$(3) \quad \tau_g = \tau - \vartheta'$$

Beweis (von Satz 2.4.3):

$$T' = \kappa \cdot H \stackrel{!}{=} \kappa_g S + \kappa_n \hat{N} \Rightarrow (1), (2)$$

$$\tau_g = \langle S', \hat{N} \rangle = \langle -(\underbrace{\sin \vartheta H + \cos \vartheta B}_{\hat{N}}) \vartheta' + \underbrace{\cos \vartheta (-\kappa T + \tau B) + \sin \vartheta \tau H}_{\tau \cdot \hat{N}}, \hat{N} \rangle = -\vartheta' + \tau$$

□

Bemerkung:

Geraden ($T' \equiv 0$) auf einer Fläche (passen nicht ins Schema) sind sowohl Geodätische als auch Asymptotenlinien ($\kappa_g = \kappa_n \equiv 0$)

Folgerung:

Für wendepunktfreie Flächenkurven gilt

- a) Geodätische sind durch $\cos \vartheta = 0$ bzw. $H = \pm \hat{N}$ gekennzeichnet. Der “Krümmungsvektor” $c'' = \kappa \cdot H$ ist stets orthogonal zur Fläche. Schmiegebene und Tangentenebene schneiden sich rechtwinklig.
- b) Asymptotenlinien sind durch $\sin \vartheta = 0$ bzw. $B = \pm \hat{N}$ gekennzeichnet. Schmiegebene und Tangentialebene stimmen (bis auf die Orientierung) überein. (Deswegen auch “Schmieglinien”)

Eine weitere Interpretation von κ_n und τ_g

Satz 2.4.4:

Für C^2 -Flächenkurven gilt

- a) In einem Flächenpunkt $c(s)$ ist $|\kappa_n(s)|$ die Krümmung und $\tau_g(s)$ die Torsion derjenigen Geodätischen, die dort die Kurve berührt.
- b) [Satz von MEUSNIER]
In einem Kurvenpunkt $c(s)$ ist $|\kappa_n(s)|$ die Krümmung des ebenen Normalschnitts der Fläche, die dort die Kurve berührt.

Beweis (von Satz 2.4.4):

- a) Für Kurve c und Geodätische \tilde{c} folgt aus $T = \tilde{T}$ auch

$$\kappa_n = \tilde{\kappa}_n, \tau_g = \tilde{\tau}_g$$

. Wegen $\tilde{\kappa}_g = 0$ ($\Rightarrow \tilde{\kappa} = |\tilde{\kappa}_n|, \tilde{\vartheta} = \text{const}$) erhält man

$$|\kappa_n| = |\tilde{\kappa}_n| = \tilde{\kappa}, \tau_g = \tilde{\tau}_g = \tilde{\tau}$$

b) Für den ebenen Normalschnitt \tilde{c} gilt

$$\begin{aligned}\tilde{B} \perp \hat{N}, \text{ also } \cos \tilde{\vartheta} &= \langle \tilde{B}, \hat{N} \rangle = 0, \\ \text{also ebenfalls } |\kappa_n| &= |\tilde{\kappa}_n| = \tilde{\kappa}\end{aligned}$$

□

Folgerung:

Geodätische auf einer Fläche besitzen in jedem Kurvenpunkt minimale Krümmung κ im Vergleich zu allen anderen Flächenkurven durch diesen Punkt mit gleicher Tangentialrichtung.

Beweis (der Folgerung):

Für Geodätische c und Vergleichskurve \tilde{c} gilt

$$\kappa = |\kappa_n| = |\tilde{\kappa}_n| \leq \sqrt{\kappa_g^2 + \kappa_n^2} = \tilde{\kappa}$$

□

Wir untersuchen jetzt κ_n und τ_g in Abhängigkeit von der Tangentenrichtung in einem festen Kurvenpunkt.

Referenzsystem: Hauptkrümmungsrichtungen

Satz 2.4.5:

In einem Flächenpunkt sei die Tangentialrichtung $\underline{T} = \cos \varphi Y_1 + \sin \varphi Y_2$ mit (orthonormierten) Hauptkrümmungsrichtungen Y_1, Y_2 gegeben. Dann gilt

$$\begin{aligned}\kappa_n(\varphi) &= \kappa_1 \cos^2 \varphi + \kappa_2 \sin^2 \varphi = H - \sqrt{H^2 - K} \cos 2\varphi & [\text{EULERSche Formel}] \\ \tau_g(\varphi) &= (\kappa_2 - \kappa_1) \sin \varphi \cos \varphi = +\sqrt{H^2 - K} \sin 2\varphi\end{aligned}$$

Beweis (von Satz 2.4.5):

Wegen

$$S = -\sin \varphi Y_1 + \cos \varphi Y_2, \quad A(T) = \kappa_1 \cos \varphi Y_1 + \kappa_2 \sin \varphi Y_2$$

ist

$$\begin{aligned}\kappa_n(\varphi) &= \langle A(T), T \rangle = \kappa_1 \cos^2 \varphi + \kappa_2 \sin^2 \varphi \\ \tau_g(\varphi) &= \langle A(T), S \rangle = (\kappa_2 - \kappa_1) \sin \varphi \cos \varphi\end{aligned}$$

Aus

$$H = \frac{1}{2}(\kappa_1 + \kappa_2), K = \kappa_1 \kappa_2 \Rightarrow \sqrt{H^2 - K} = \frac{1}{2}(\kappa_2 - \kappa_1) \quad [\text{wenn } \kappa_1 \leq \kappa_2] \text{ und}$$

$$\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi = \cos 2\varphi, 2 \sin \varphi \cos \varphi = \sin 2\varphi$$

folgt die zweite Darstellung.

□

Folgerung:

- a) In einem Flächenpunkt sind die Hauptkrümmungen κ_1, κ_2 die Extremalwerte der Normalkrümmung κ_n bezüglich aller Tangentenrichtungen.
- b) Trägt man in einem Flächenpunkt in jede Tangentialrichtung die Größe $\frac{1}{\sqrt{|\kappa_n(\varphi)|}}$ ab, so erhält man die Dupinsche Indikatrix.

Beweis (der Folgerung):

$$\text{a) } \frac{d}{d\varphi} \kappa_n(\varphi) = (\kappa_2 - \kappa_1) \sin \varphi \cos \varphi = 0 \stackrel{\kappa_1 \neq \kappa_2}{\Leftrightarrow} \sin \varphi = 0 \vee \cos \varphi = 0$$

$$\text{b) Für } X := \frac{1}{\sqrt{|\kappa_n(\varphi)|}} \cdot T \text{ gilt}$$

$$\Pi(X, X) = \frac{1}{|\kappa_n(\varphi)|} \Pi(T, T) = \frac{1}{|\kappa_n(\varphi)|} \underbrace{\langle A(T), T \rangle}_{\kappa_n(\varphi)} = \pm 1$$

□

Anwendung:

Auf einer Kugel ist jede Richtung eine Hauptkrümmungsrichtung (nur Nabelpunkte!). Also ist jede sphärische Kurve eine Krümmungslinie mit $\tau_g \equiv 0$. Weiter ist $\kappa_n = \kappa_1 \cos^2 \varphi + \kappa_2 \sin^2 \varphi = \kappa_1 = \kappa_2 = \frac{1}{r} = \text{const.}$ (wenn r der Kugelradius ist). Also gilt

$$\left\{ \begin{array}{l} \kappa \sin \vartheta = \frac{1}{r} \\ \tau = \vartheta' \end{array} \right\} \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \varrho = r \sin \vartheta \\ \tau = \vartheta' \end{array} \right\} \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \varrho = r \cos \lambda \\ \tau = -\lambda' \end{array} \right\} \quad \text{mit } \lambda = \frac{\pi}{2} - \vartheta$$

2.4.2 Spezielle Parameter

Auf einer Fläche gibt es zwar keine BLP wie bei Kurven aber doch einige nützliche spezielle Parameter, z.B.

Krümmungslinienparameter

\Leftrightarrow alle Parameterlinien sind Krümmungslinien

$\Leftrightarrow x_\varrho \parallel Y_\varrho$ ($\varrho = 1, 2$) mit Hauptkrümmungsrichtungen Y_1, Y_2

Asymptotenlinienparameter (existieren nur auf hyperbolischen Flächen, evtl. mit Flachpunkten)

\Leftrightarrow alle Parameterlinien sind Asymptotenlinien

$\Leftrightarrow x_\varrho \parallel Z_\varrho$ ($\varrho = 1, 2$) mit Asymptotenrichtungen Z_1, Z_2

Wie erkennt man solche Parameter?

Satz 2.4.6:

- a) Auf einer nabelpunktfreien \mathcal{C}^2 -Fläche in der Parameterdarstellung $u \mapsto x(u)$ sind die Parameterlinien genau dann Krümmungslinien, wenn gilt

$$g_{12} = b_{12} = 0$$

In diesem Fall sind die Hauptkrümmungen

$$\kappa_1 = \frac{b_{11}}{g_{11}}, \kappa_2 = \frac{b_{22}}{g_{22}}$$

und die Weingartenschen Ableitungsgleichungen lauten

$$\partial_\varrho N = -\kappa_\varrho x_\varrho \quad (\varrho = 1, 2) \quad [\text{Formel von RODRIGUEZ}]$$

- b) Auf einer rein hyperbolischen \mathcal{C}^2 -Fläche sind die Parameterlinien genau dann Asymptotenlinien, wenn gilt

$$b_{11} = b_{22} = 0$$

Beweis (von Satz 2.4.6):

a) “ \Rightarrow ” in Krümmungslinienparametern folgt aus $x_\varrho \parallel Y_\varrho$ ($\varrho = 1, 2$)

$$-\partial_\varrho N = A(x_\varrho) = \kappa_\varrho x_\varrho, \text{ also } (b^\mu_\sigma) = \begin{pmatrix} \kappa_1 & 0 \\ 0 & \kappa_2 \end{pmatrix}$$

und wegen $\kappa_1 \neq \kappa_2$ (Nabelpunktfreiheit) auch

$$\langle x_1, x_2 \rangle = g_{12} = 0$$

Also ist

$$(b_{\varrho\sigma} = (g_{\varrho\sigma}) \cdot (b^\mu_\sigma) = \begin{pmatrix} g_{11}\kappa_1 & 0 \\ 0 & g_{22}\kappa_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \end{pmatrix}$$

“ \Leftrightarrow ” $g_{12} = b_{12} = 0 \Rightarrow b^1_2 = b^2_1 = 0$, d.h. (b^μ_σ) ist Diagonalmatrix. Die Basisvektoren x_1, x_2 sind also Eigenvektoren und definieren die Hauptkrümmungsrichtungen.

b) x_1, x_2 Asymptotenrichtungen $\Leftrightarrow \Pi(x_1, x_1) = b_{11} = 0 \wedge \Pi(x_2, x_2) = b_{22} = 0$

□

Bemerkung:

Auf einer Kugel und in der Ebene ist jede Parametrisierung eine “Krümmungslinienparametrisierung” (nur Nabelpunkte) : Jede Richtung ist Hauptkrümmungsrichtung.

In isolierten Nabelpunkten können Singularitäten des Krümmungsliniennetzes auftreten.

Beispiel:

Ellipsoid

Beispiel:

1. Auf einer Rotationsfläche sind Meridiane und Breitenkreise ebene Krümmungslinien ($g_{12} = b_{12} = 0$)
2. Auf einer Wendelfläche (siehe \hat{x} in Übung 2.1) sind die auf ihr liegenden Geraden und Schraubenlinien Asymptotenlinien ($b_{11} = b_{22} = 0$)

Zur Existenz solcher parameter: Dazu eine Verallgemeinerung des Problems.

Gegeben seien auf einer \mathcal{C}^2 -Fläche $u \mapsto x(u)$ zwei linear unabhängige tangentielle \mathcal{C}^1 -Vektorfelder

$$\begin{aligned} u \mapsto X_1(u) &= \sum \xi_1^\mu x_\mu(u) \\ u \mapsto X_2(u) &= \sum \xi_2^\mu x_\mu(u) \end{aligned}$$

Gesucht ist eine Parametertransformation $u \mapsto \bar{u} = \Phi(u)$, sodass nach der Transformation für $\bar{x} = x \circ \Phi^{-1}$ gilt

$$\forall_u \bar{x}_\varrho(\Phi(u)) \parallel X_\varrho(u)$$

Lösung: Wegen $x = \bar{x} \circ \Phi$, also $x_\mu = \sum \bar{x}_\sigma \partial_\mu \Phi^\sigma$, d.h.

$$X_\varrho = \sum \xi_\varrho^\mu x_\mu = \sum \xi_\varrho^\mu \partial_\mu \Phi^\sigma \bar{x}_\sigma \parallel \bar{x}_\varrho \quad (\varrho = 1, 2)$$

muss gelten

$$\begin{aligned} (\varrho = 2) \quad & \sum \xi_2^\mu \partial_\mu \Phi^1 = \xi_2^1 \partial_1 \Phi^1 + \xi_2^2 \partial_2 \Phi^1 = 0 \\ (\varrho = 1) \quad & \sum \xi_1^\mu \partial_\mu \Phi^2 = \xi_1^1 \partial_1 \Phi^2 + \xi_1^2 \partial_2 \Phi^2 = 0 \end{aligned}$$

Für die Komponententen $F = \Phi^1, \Phi^2$ von Φ müssen also partielle Differentialgleichungen der Form

$$\begin{aligned} a \cdot \partial_1 F + b \cdot \partial_2 F &= 0 & \text{bzw.} \\ \text{grad } F \parallel \begin{pmatrix} -b \\ a \end{pmatrix} &=: f \end{aligned}$$

Solche Differentialgleichungen lassen sich in der Ebene (bei zwei Parametern) mit einem geeigneten integrierenden Faktor $(u^1, u^2) \mapsto \mu(u^1, u^2) \neq 0$ lokal stets lösen: Es existiert eine Funktion F mit

$$\text{grad } F = \mu \cdot f$$

(siehe Differentialgleichungen, Stichwort: “Exakte Differentialgleichungen”)

Problem dabei: Diese Lösungen sind im Allgemeinen nur \mathcal{C}^1 -differenzierbar ($a, b \in \mathcal{C}^1$, aber $\mu \in \mathcal{C}^0 \Rightarrow F \in \mathcal{C}^1$) und liefern eine nicht zulässige \mathcal{C}^1 -Parametertransformation $u \mapsto \Phi(u)$ auf der \mathcal{C}^2 -Fläche mit den gewünschten Eigenschaften $\bar{x}_\varrho(\Phi(u)) \parallel X_\varrho(u)$.

Anwendung auf Hauptkrümmungsrichtungen bzw. Asymptotenrichtungen:

Hier sind erst bei \mathcal{C}^3 -Flächen 2. Grundform und Weingartenmatrix \mathcal{C}^1 -Differenzierbar und damit auch die Hauptkrümmungsrichtungen bzw. Asymptotenrichtungen. Dies liefert

Satz 2.4.7:

- a) In der Umgebung eines Nicht-Nabelpunktes einer \mathcal{C}^3 -Fläche existiert ein \mathcal{C}^1 -Parameternetz aus Krümmungslinien.
- b) In der Umgebung eines hyperbolschen Punktes einer \mathcal{C}^3 -Fläche existiert ein \mathcal{C}^1 -Parameternetz aus Asymptotenlinien.

Bemerkung:

1. Erst auf einer \mathcal{C}^4 -Fläche existiert im Allgemeinen eine lokale Krümmungslinien-/Asymptotenlinien-Parametrisierung, mit der sich vernünftig arbeiten lässt.
2. Der Satz gilt nicht für höher-dimensionale Hyperflächen.
3. Ist das Parametergebiet der Fläche einfach zusammenhängend ("ohne Löcher"), so existiert sogar eine globale Transformation auf Krümmungslinien-/Asymptotenlinien-Parametern (falls keine Nabelpunkte stören).

Ergänzung: Weitere ausgezeichnete, lokal in jedem Punkt existierende Parameter sind:

- a) Geodätische Parallelkoordinaten bezüglich einer Flächenkurve c
Erkennungszeichen:

$$\begin{aligned} (g_{\varrho\sigma}(u, v)) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & g(u, v) \end{pmatrix} && \text{falls Geodätische in BLP} \\ (g_{\varrho\sigma}(u, v)) &= \begin{pmatrix} \lambda(u) & 0 \\ 0 & \mu(u, v) \end{pmatrix} && \text{sonst} \end{aligned}$$

Beispiel:

Rotationsfläche mit $(g_{\varrho\sigma}(u, v)) = \begin{pmatrix} w(u) & 0 \\ 0 & r(u) \end{pmatrix}$

- b) Geodätische Polarkoordinaten ($c \equiv x_0$)
Kennzeichen: wie unter a)

2.5 Vertauschbarkeitsrelationen, BONNETscher Fundamentalsatz

Die Koeffizienten der Ableitungsgleichungen einer \mathcal{C}^3 -Hyperfläche im \mathbb{R}^n

$$\begin{aligned} \partial_\sigma x_\varrho &= \sum \gamma_\varrho^\mu{}_\sigma x_\mu + b_{\varrho\sigma} N \\ \partial_\sigma N &= - \sum b^\mu{}_\sigma x_\mu \end{aligned}$$

lassen sich alle aus den beiden Grundform-Matrizen berechnen.

$$\begin{aligned} (g_{\varrho\sigma}) &\rightarrow (\gamma_\varrho^\mu{}_\sigma) \\ (g_{\varrho\sigma}) \text{ und } (b_{\varrho\sigma}) &\rightarrow (b^\mu{}_\sigma) \end{aligned}$$

Aber sie sind nicht unabhängig voneinander. Die Vertauschbarkeitsrelationen

$$\partial_\tau \partial_\sigma x_\varrho = \partial_\sigma \partial_\tau x_\varrho \qquad \partial_\tau \partial_\sigma N = \partial_\sigma \partial_\tau N$$

liefern komplizierte differentielle Relationen zwischen ihnen.

Zunächst: Hilfsmittel zu ihrer invarianten Beschreibung:

2.5.1 Der Riemannsche Krümmungstensor

Bei einer \mathcal{C}^3 -Fläche sind die zweiten gewöhnlichen partiellen Ableitungen der tangentialen Basisfelder $u \mapsto x_1(u), \dots, x_{n-1}(u)$ vertauschbar. Dies gilt im Allgemeinen nicht für die zweiten kovarianten partiellen Ableitungen, wenn die Fläche “krumm” ist, also $\nabla \neq d$ ist. Man erhält

$$\nabla_\tau \nabla_\sigma x_\varrho - \nabla_\sigma \nabla_\tau x_\varrho = \sum R_\varrho^\mu{}_{\sigma\tau} x_\mu$$

mit Koeffizientenfunktion $u \mapsto R_\varrho^\mu{}_{\sigma\tau}(u)$.

Wegen

$$\begin{aligned} \nabla_\tau \nabla_\sigma x_\varrho &= \nabla_\tau \left(\sum \gamma_\varrho^\mu{}_\sigma x_\mu \right) = \sum \partial_\tau \gamma_\varrho^\mu{}_\sigma x_\mu + \sum \gamma_\varrho^\mu{}_\sigma \nabla_\tau x_\mu \\ &= \sum (\partial_\tau \gamma_\varrho^\mu{}_\sigma + \gamma_\varrho^\alpha{}_\sigma \gamma_\alpha^\mu{}_\tau) x_\mu \end{aligned}$$

gilt

$$R_\varrho^\mu{}_{\sigma\tau} = (\partial_\tau \gamma_\varrho^\mu{}_\sigma + \gamma_\varrho^\alpha{}_\sigma \gamma_\alpha^\mu{}_\tau) - (\partial_\sigma \gamma_\varrho^\mu{}_\tau + \gamma_\varrho^\alpha{}_\tau \gamma_\alpha^\mu{}_\sigma)$$

Die Koeffizienten sind offensichtlich innergeometrisch.

Durch lineare Fortsetzung auf beliebige tangentialen Vektorfelder $x = \sum X^\varrho x_\varrho$, $Y = \sum Y^\sigma x_\sigma$, $Z = \sum Z^\tau x_\tau$ mittels

$$R(Y, Z)X := \sum R_\varrho^\mu{}_{\sigma\tau} X^\varrho Y^\sigma Z^\tau x_\mu$$

wird in jedem Flächenpunkt eine dreifach lineare Abbildung

$$R_u: (T_u x)^3 \rightarrow T_u x$$

definiert. Das Feld $u \mapsto R_u$ ist unabhängig von der Ausgangsparametrisierung (siehe später) und nennt es Riemannsches Krümmungstensorfeld.

Bemerkung:

Die Parameterunabhängigkeit sieht man auch an der Darstellung

$$R(Y, Z)X = \nabla_Z \nabla_Y X - \nabla_Y \nabla_Z X - \nabla_{[Y, Z]} X$$

Verwendet wird dabei die durch $[Y, Z] := d_Z Y - d_Y Z$ definierte Lie-Klammer (auch Kommutator von Y, Z genannt), welche zwei tangentialen Vektorfeldern Y, Z wieder ein tangentiales Vektorfeld $[Y, Z]$ zuordnet (ohne Beweis).

Speziell für natürliche Basisfelder $X = x_\varrho, Y = x_\sigma, Z = x_\tau$ gilt

$$[x_\sigma, x_\tau] = \partial_\tau x_\sigma - \partial_\sigma x_\tau = 0$$

d.h. sie “kommutieren” und es folgt

$$R(x_\sigma, x_\tau)x_\varrho = \nabla_\tau \nabla_\sigma x_\varrho - \nabla_\sigma \nabla_\tau x_\varrho = \sum R_{\varrho\sigma\tau}^\mu x_\mu$$

Hinweis: Oft wird auch die Definition

$$[Y, Z] = d_Y Z - d_Z Y, T(Y, Z)X = \nabla_Y \nabla_Z X - \dots$$

verwendet; ändert nur das Vorzeichen.

Zur Bezeichnung “Krümmungstensor”:

Eine Ableitung kann als infinitesimale Parallelverschiebung gedeutet werden.

Au “flachen” Flächen mit $\nabla = d$ gilt $R \equiv 0$. Infinitesimale durch gewöhnliche Parallelverschiebung entstandene Parallelogramme “schließen sich”. Dies gilt nicht auf “krummen” Flächen mit $\nabla \neq d$ bei Verwendung der geodätischen Parallelverschiebung.

2.5.2 Weitere kovariante Ableitungen

Ziel: Fortsetzung der kovarianten Ableitung ∇X für Vektorfelder X auf andere “Tensorfelder”, z. B. Felder von Bilinearformen (I, II) und von linearen Abbildungen (A).

Trick: Forderung der Gültigkeit der Produktregel.

1. Wir definieren $\nabla_\tau \text{II}$ (soll wieder Bilinearform sein) durch

$$\begin{aligned} (\nabla_\tau \text{II})(x_\varrho, x_\sigma) &:= \partial_\tau [\text{II}(x_\varrho, x_\sigma)] - \text{II}\left(\underbrace{\nabla_\tau x_\varrho}_{\sum \gamma_{\varrho\tau}^\alpha x_\alpha}, x_\sigma\right) - \text{II}\left(x_\varrho, \underbrace{\nabla_\tau x_\sigma}_{\sum \gamma_{\sigma\tau}^\alpha x_\alpha}\right) \\ &= \partial_\tau b_{\varrho\sigma} - \sum b_{\alpha\sigma} \gamma_{\varrho\tau}^\alpha - \sum b_{\varrho\alpha} \gamma_{\sigma\tau}^\alpha =: \nabla_\tau b_{\varrho\sigma} \end{aligned}$$

Für die lineare Fortsetzung

$$(\nabla_Z \text{II})(X, Y) = \sum \nabla_\tau b_{\varrho\sigma} X^\varrho Y^\sigma Z^\tau$$

auf beliebige tangentielle Vektorfelder X, Y, Z reduziert man nach

$$(\nabla_Z \Pi)(X, Y) = d_Z [\Pi(X, Y)] - \Pi(\nabla_Z X, Y) - \Pi(X, \nabla_Z Y)$$

was die Parameterunabhängigkeit zeigt.

Bemerkung:

Anwendung dieses Verfahrens auf die 1. Grundform I liefert

$$(\nabla_\tau I)(x_\varrho, x_\sigma) = \partial_\tau g_{\varrho\sigma} - \gamma_{\varrho\sigma\tau} - \gamma_{\sigma\varrho\tau} \equiv 0 \quad (\text{siehe Satz 2.1.5})$$

und beweist das RICCI-Lemma $\boxed{\nabla I \equiv 0}$

2. Analog definieren wir $\nabla_\tau A$ (soll wieder lineare Abbildung sein) durch

$$\begin{aligned} (\nabla_\tau A)(x_\sigma) &:= \nabla_\tau [A(x_\sigma)] - A(\nabla_\tau x_\sigma) \\ &= \nabla_\tau \left(\sum b^\mu_\sigma x_\mu \right) - A \left(\sum \gamma_\sigma^\alpha x_\alpha \right) \\ &= \sum (\partial_\tau b^\mu_\sigma) + \sum b^\mu_\sigma \nabla_\tau x_\mu - \sum \gamma_\sigma^\alpha A(x_\alpha) \\ &= \partial_\tau b^\mu_\sigma x_\mu + \sum b^\alpha_\sigma \gamma_\alpha^\mu x_\mu - \sum b^\mu_\alpha \gamma_\sigma^\alpha x_\mu \\ &= \left[\partial_\tau b^\mu_\sigma + \sum b^\alpha_\sigma \gamma_\alpha^\mu - \sum b^\mu_\alpha \gamma_\sigma^\alpha \right] x_\mu \\ &=: (\nabla_\tau b^\mu_\sigma) x_\mu \end{aligned}$$

Für die lineare Fortsetzung

$$\nabla_Z A)(Y) = \sum (\nabla_\tau b^\mu_\sigma) Y^\sigma Z^\tau x_\mu$$

auf beliebige tangentielle Vektorfelder Y, Z errechnet man wieder

$$(\nabla_\tau A)(Y) = \nabla_Z [A(Y)] - A(\nabla_Z Y)$$

was die Parameterunabhängigkeit zeigt.

2.5.3 Die Gauß- und Codazzigleichungen

Wir beschreiben die Vertauschbarkeitsrelationen durch die Operatoren $R, \nabla \Pi, \nabla A$.

1. Die Gaußschen Ableitungsgleichungen

$$\begin{aligned}
\partial_\sigma x_\varrho &= \nabla_\sigma x_\varrho + \Pi(x_\varrho, x_\sigma)N \Rightarrow \\
\partial_\tau \partial_\sigma x_\varrho &= \nabla_\tau \nabla_\sigma x_\varrho + \Pi(\nabla_\sigma x_\varrho, x_\tau)N + \partial_\tau [\Pi(x_\varrho, x_\sigma)]N - \Pi(x_\varrho, x_\sigma)A(x_\tau) \Rightarrow \\
0 &= (\nabla_\tau \nabla_\sigma x_\varrho - \nabla_\sigma \nabla_\tau x_\varrho) - (\Pi(x_\varrho, \sigma)A(x_\tau) - \Pi(x_\varrho, x_\tau)A(x_\sigma)) \\
&+ [\cancel{\Pi(\nabla_\sigma x_\varrho, x_\tau)} - \cancel{\Pi(\nabla_\tau x_\varrho, x_\sigma)} + (\nabla_\tau \Pi)(x_\varrho, x_\sigma) - (\nabla_\sigma \Pi)(x_\varrho, x_\tau) \\
&+ \cancel{\Pi(\nabla_\tau x_\varrho, x_\sigma)} - \cancel{\Pi(\nabla_\sigma x_\varrho, x_\tau)} + \Pi(x_\varrho, \underbrace{\nabla_\tau x_\sigma - \nabla_\sigma x_\tau}_{=0})]N \Leftrightarrow
\end{aligned}$$

(Aufspaltung in Tangential- und Normalanteil)

$$\boxed{R(x_\sigma, x_\tau)x_\varrho = \Pi(x_\varrho, x_\sigma)A(x_\tau) - \Pi(x_\varrho, x_\tau)A(x_\sigma)}$$

$$\boxed{(\nabla_\tau \Pi)(x_\varrho, x_\sigma) = (\nabla_\sigma \Pi)(x_\tau)}$$

2. Die Weingartenschen Ableitungsgleichungen

$$\begin{aligned}
-\partial_\sigma N &= A(x_\sigma) \\
-\partial_\tau \partial_\sigma N &= \partial_\tau [A(x_\sigma)] = \nabla_\tau [A(x_\sigma)] + \Pi(A(x_\sigma), x_\tau)N \\
&= (\nabla_\tau A)(x_\sigma) + A(\nabla_\tau x_\sigma) + (A(x_\sigma), A(x_\tau))N \Rightarrow \\
0 &= -(\partial_\tau \partial_\sigma N - \partial_\sigma \partial_\tau N) = (\nabla_\tau A)(x_\sigma) - (\nabla_\sigma A)(x_\tau) + A(\underbrace{\nabla_\tau x_\sigma - \nabla_\sigma x_\tau}_{=0}) \Leftrightarrow \\
&\boxed{(\nabla_\tau A)(x_\sigma) = (\nabla_\sigma A)(x_\tau)}
\end{aligned}$$

Lineare Fortsetzung liefert

Satz 2.5.1:

Die Vertauschbarkeitsrelationen der Gaußschen Ableitungsgleichungen einer \mathcal{C}^3 -Hyperfläche im \mathbb{R}^n lauten parameterunabhängig

(1)	$\boxed{R(Y, Z)X = \Pi(X, Y)A(Z) - \Pi(X, Z)A(Y)}$	Gaußgleichung
(2)	$\boxed{(\nabla_Z \Pi)(X, Y) = (\nabla_Y \Pi)(X, Z)}$	Codazzigleichung für Π

Die Vertauschbarkeitsrelationen der Weingartenschen Ableitungsgleichungen lauten parameterunabhängig

(3)	$\boxed{(\nabla_Z A)(Y) = (\nabla_Y A)(Z)}$	Codazzigleichung für A
-----	---	--------------------------

und sind äquivalent zur Codazzigleichung für Π .

Beweis (der Äquivalenz (2) \Leftrightarrow (3) von Satz 2.5.1):

Für alle X, Y gilt

$$\begin{aligned}
\Pi(X, Y) &= I(A(X), Y) = I(X, A(Y)) \Rightarrow \\
(\nabla_Z \Pi)(X, Y) &= d_Z[\Pi(X, Y)] - \Pi(\nabla_Z X, Y) - \Pi(X, \nabla_Z Y) \\
&= d_Z[I(X, A(Y))] - I(\nabla_Z X, A(Y)) - I(X, A(\nabla_Z Y)) \\
&\quad - \underbrace{I(X, \nabla_Z[A(Y)]) + I(X, \nabla_Z[A(Y)])}_{=0} \\
&= \underbrace{(\nabla_Z I)}_{=0}(X, A(Y)) + I(X, \nabla_Z[A(Y)] - A(\nabla_Z Y)) \\
&= I(X, (\nabla_Z)(Y))
\end{aligned}$$

Also ist (2) äquivalent zu

$$I(X, (\nabla_Z A)(Y) - (\nabla_Y A)(Z)) = 0 \text{ für alle } X$$

also äquivalent zu (3).

□

Bemerkung:

Gleichung (1) beweist (nochmal) die Parameterunabhängigkeit und Linearität des Krümmungstensors.

Korollar 2.5.2:

Bezüglich einer Parametrisierung $u \mapsto x(u)$ einer \mathcal{C}^3 -Hyperfläche im \mathbb{R}^n lauten die Vertauschbarkeitsrelationen der Abbildungsgleichungen

$$\begin{aligned}
(1) \quad R_{\varrho}^{\mu}{}_{\sigma\tau} &= b_{\varrho\sigma}b^{\mu}_{\tau} - b_{\varrho\tau}b^{\mu}_{\sigma} && \text{(Gaußgleichung)} \\
(2) \quad \nabla_{\tau}b_{\varrho\sigma} &= \nabla_{\sigma}b_{\varrho\tau} && \text{Codazzigleichung für } (b_{\varrho\sigma}) \\
(3) \quad \nabla_{\tau}b^{\mu}_{\sigma} &= \nabla_{\sigma}b^{\mu}_{\tau} && \text{Codazzigleichung für } (b^{\mu}_{\sigma})
\end{aligned}$$

Definiert man die 4-lineare Krümmungsform

$$R(Y, Z)(X, W) := I(R(Y, Z)X, W)$$

in Koordinaten

$$\underline{R_{\varrho\nu}{}_{\sigma\tau} = \sum g_{\mu\nu}R_{\varrho}^{\mu}{}_{\sigma\tau}}$$

so gilt

$$\begin{aligned}
(1) &\Leftrightarrow R(Y, Z)(X, W) = \Pi(X, Y)\Pi(W, Z) - \Pi(X, Z)\Pi(W, Y) \\
&\Leftrightarrow R_{\varrho\nu}{}_{\sigma\tau} = b_{\varrho\sigma}b_{\nu\tau} - b_{\varrho\tau}b_{\nu\sigma} \quad (*)
\end{aligned}$$

Folgerung:

1. Die Krümmungsform ist nicht nur in (Y, Z) , sondern auch in (W, Z) schiefsymmetrisch (Analog für die Indexpaare (σ, τ) und (ϱ, ν) in $(*)$).
2. Alle (2×2) -Unterdeterminanten der Matrix $(b_{\varrho\sigma})_{\varrho, \sigma=1, \dots, n-1}$ sind innergeometrisch ("Schnittkrümmungen").

Spezialisierung auf 2-Flächen im \mathbb{R}^3

Hier sind in $(*)$ nur die Indexpaare $(\varrho, \nu) = (1, 2)$ und $(\sigma, \tau) = (1, 2)$ wesentlich und man erhält.

$$(1) \Leftrightarrow R_{12\ 12} = b_{11}b_{22} - b_{12}b_{21} = b$$

Ebenso folgt aus der Symmetrie von $(b_{\varrho\sigma})$:

$$(2) \Leftrightarrow \begin{cases} \nabla_2 b_{11} &= \nabla_1 b_{12} \\ \nabla_1 b_{22} &= \nabla_2 b_{12} \end{cases}$$

Folgerung 2.5.3:

Speziell für \mathcal{C}^3 -Flächen im \mathbb{R}^3 ist die Gaußgleichung äquivalent zu

$$(1') \quad \boxed{K = \frac{R_{12\ 12}}{g}} \quad (\text{Theorema egregium von Gauß})$$

$$(2') \quad \boxed{\begin{aligned} \nabla_2 b_{11} &= \nabla_1 b_{12} \\ \nabla_1 b_{22} &= \nabla_2 b_{12} \end{aligned}} \quad (\text{Gleichung von Mainardi-Codazzi})$$

Insbesondere ist die Gaußsche Krümmung eine innergeometrische Größe.

2.5.4 Der BONNETsche Fundamentalsatz

Die Ableitungsgleichungen einer Hyperfläche im \mathbb{R}^n

$$(*) \quad \begin{cases} \partial_\sigma x_\varrho = \sum \gamma_\varrho^\mu{}_\sigma x_\mu + b_{\varrho\sigma} N \\ \partial_\sigma N = - \sum b^\mu{}_\sigma x_\mu \end{cases}$$

bilden bei bekannten Funktionen $u \mapsto (g_{\varrho\sigma}(u)), (b_{\varrho\sigma}(u)) [\rightarrow \gamma_\varrho^\mu{}_\sigma(u), b^\mu{}_\sigma(u)]$, definiert auf ein Gebiet $G \subset \mathbb{R}^{n-1}$ ein System partieller Differentialgleichungen 1. Ordnung für gesuchte Abbildungen $u \mapsto x_\varrho(u), N(u)$.

Aus diesen lässt sich die Fläche selbst gewinnen durch Lösen des Systems

$$(**) \quad \partial_\varrho x = x_\varrho$$

Solche Systeme sind genau dann lokal eindeutig lösbar, wenn sogenannte Integrabilitätsbedingungen für die Koeffizientenfunktionen erfüllt sind, die man erhält, indem man die Vertauschbarkeitsrelationen (bei $(*)$ etwa $\partial_\tau \partial_\sigma x_\varrho = \partial_\sigma \partial_\tau x_\varrho, \partial_\tau \partial_\sigma N = \partial_\sigma \partial_\tau N$) formal auswertet.

Zuständig ist der Satz von FROBENIUS.

Beim System $(*)$ sind die Integrabilitätsbedingungen gerade die Gauß- und Codazzigleichungen und beim System $(**)$ lauten sie $\partial_\sigma x_\varrho = \partial_\varrho x_\sigma$ und sind erfüllt, wenn man in $(*)(g_{\varrho\sigma})$ und $(b_{\varrho\sigma})$ $[\rightarrow (\gamma_\varrho^\mu{}_\sigma)]$ als symmetrisch in (ϱ, σ) vorausgesetzt.

Damit gilt (zunächst für $n = 3$):

Literaturhinweise

Kühnel: *Differentialgeometrie: Kurven, Flächen, Mannigfaltigkeiten*

Zur Kartographie:

Hoschek, J: *mathematische Grundlagen der Kartographie*

Strubecker, K.: *Differentialgeometrie II*

Zum Satz von Frobenius:

Dieudonné: *Grundzüge der modernen Analysis 1, Kap. 10.9*

Pabel: *Skript Gewöhnliche Differentialgleichungen* (Ist im Internet zu finden)

Anhang

- **Klausurtermin:** Donnerstag, 26.07.2012, 14 Uhr – 16 Uhr
- Hinweis zum Übungsblatt 10:

$$x(u, v) = \operatorname{Re} \Phi(u + i v)$$

$$\hat{x}(u, v) = \operatorname{Im} \Phi(u + i v)$$

Index

- Äquivalenz, 7, 88
 - 1. Grundform, 38
 - 2. Grundform, 46
 - 3. Grundform, 61, 91
- Ableitungsmatrix
 - \mathbb{R}^3 , 17
 - \mathbb{R}^n , 31
- Ableitungsvektor, 8
- affin, 4
- Asymptotenlinie, 68, 92
- Asymptotenlinienparameter, 73
- Böschungslinie, 27, 88
- Böschungswinkel, 27, 88
- Begleitbasis
 - Berechnung (unbekannte BLP), 17
- Begleitebene, 16
- Berührbedingung, 21
- Binormalenvektor, 15
- Bogenlängenfunktion, 11
- Bogenlängenparametrisierung, 11
 - Berechnung, 12
- Christoffelsymbole, 43
- Darboux-Vektor, 18
- Darbouxbegleitbasis, 67
- Diffeomorphismus, 7, 88
- Drehung, 19
 - Drehachse, 19
 - Einheitsvektor, 19
- Einsteinsche Summationskonvention, 37
- Ellipse, 13
- euklidisch, 11
- Fläche, 35, 89
 - Äquivalenz, 36, 89
 - Parameter, 35, 89
 - Parameterlinie, 35, 89
 - regulär, 35, 89
 - Singularität, 35, 89
 - Skalarprodukt, 38
 - Spur, 35, 89
- Flachpunkt, 59, 91
- Frenet-Begleitbasis, 15
 - Ableitungsgleichungen, 17
- Fundamentalsatz, 23, 33
- Gaußabbildung, 43
- Gaußsche Ableitungsgleichungen], 43
- Gaußsche Krümmung, 48, 90
- Geodätische, 52, 90
- geodätische Parallelität, 50, 90
- geodätische Vollständigkeit, 54
- Geschwindigkeit, 6
 - Bahn-, 19
 - Winkel-, 19
- Hauptnormalenvektor, 15
- Henkelpunkt, 10, 88
- Hyperfläche
 - Begleitbasis, 42
 - regulär, 36
- innergeometrische Größen, 40
- Isometrie, 40, 89
- kartesisches Koordinatensystem, 3
- Kommutator, 78
- kovariante Ableitung, 46
- Krümmung, 14
 - 2. Krümmung, 16
 - Berechnung (unbekannte BLP), 17

- Gesamtkrümmung, 18
- konische, 28
- Krümmungsachse, 23
- Krümmungskreis, 21, 23
- Krümmungslinie, 68, 91
- Krümmungslinienparameter, 73
- Krümmungsradius, 23
- Kreis, 7
- Kreuzprodukt, 4
- Kurve, 6, 88

- Lie-Klammer, 78
- linearer Zusammenhang, 46
- lokale kanonische Form, 20

- Mannigfaltigkeit, 8
- mittlere Krümmung, 48, 90

- Nabelpunkt, 59, 91
- Nicht-Wendepunkt, 10, 88
- normal, 12
- Normalebene, 16

- orientierungstreu, 7, 88
- Orthogonalprojektion, 20
- Orthonormalbasis, 3
 - feld, 17

- Parallelfeld, 50
- Parallelverschiebung, 50
- Parameter, 6, 88
- Parametertransformation, 7, 88
- Parametrisierung, 7, 88

- regulär, 6, 88
- rektifizierende Ebene, 16
- Richtungsableitung, 44
- Riemannscher Krümmungstensor, 77
- Riemannsches Krümmungstensorfeld, 77

- Schmidtsches Orthonormalisierungsverfahren, 18
- Schmiegeebene, 16
- Schmiegekugel, 21, 23
- Schmiegeparaboloid, 63
- Schmiegraum, 8
 - degeneriert, 10

- Singularität, 6, 88
- Skalarprodukt, 3
- Sphäre
 - 2-, 36
- sphärisch, 29
- sphärisches Bild, 43
- Spur, 6, 88
- Standard-Skalarprodukt, 3
- Standardbasis, 3
- Streifenbegleitbasis, 67

- Tangenteneinheitsvektor, 14
- Tangentenvektor, 6, 15, 88
- Tangentialraum, 35
 - Basistransformation, 37
- Taylorentwicklung, 20
- Torsion, 16
 - Berechnung (unbekannte BLP), 17
- Translation, 19

- Vektor, 3
 - länge, 3
 - orthogonal, 3
 - Winkel, 3
- Vektorprodukt, 4
- verbiegbar, 40, 90
- Vertauschbarkeitsrelationen, 77

- Weg, 6, 88
 - länge, 12
- Weingarten-Endomorphismus, 46
- Weingartenschen Ableitungsgleichungen, 43
- Wendepunkt, 10, 88
 - frei, 10
- Windung, 16

3 Definitionen

Definition:

Ein \mathcal{C}^r -Weg oder eine parametrisierte \mathcal{C}^r -Kurve ($r \geq 0$) [\mathcal{C}^r = r -mal stetig differenzierbar] im (affinen) \mathbb{R}^n ist eine \mathcal{C}^r -Abbildung

$$c: t \in I \subset \mathbb{R} \mapsto c(t) \in \mathbb{R}^n$$

eines offenen Intervalls I in den \mathbb{R}^n .

t heißt Parameter, die Bildmenge $c[I] \subset \mathbb{R}^n$ die Spur des Weges.

Ein \mathcal{C}^r -Weg ($r \geq 1$) heißt regulär, wenn überall der Tangentenvektor $\dot{c}(t) = \frac{dc}{dt}(t) \neq 0$ ist. Nichtreguläre Punkte $c(t_0)$ mit $\dot{c}(t_0) = 0$ heißen Singularitäten.

Definition:

$I, \tilde{I} \subset \mathbb{R}$ seien offene Intervalle.

Zwei Wege $c: I \rightarrow \mathbb{R}^n, \tilde{c}: \tilde{I} \rightarrow \mathbb{R}^n$ heißen \mathcal{C}^r -äquivalent ($r \geq 0$), wenn ein orientierungstreuer (d.h. monoton wachsender) \mathcal{C}^r -Diffeomorphismus $\Phi: I \rightarrow \tilde{I}$ existiert, mit

$$c = \tilde{c} \circ \Phi, \text{ d.h. } \forall_t c(t) = \tilde{c}(\Phi(t))$$

Definition:

Eine (orientierte, reguläre) \mathcal{C}^r -Kurve ($r \geq 1$) im (affinen) \mathbb{R}^n ist eine Äquivalenz-klasse $[c]$ von regulären \mathcal{C}^r -Wegen $c: I \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$. Ein Repräsentant heißt eine (zulässige) Parametrisierungen der \mathcal{C}^r -Kurve, eine die Äquivalenz vermittelnde Abbildung Φ eine (zulässige) Parametertransformation.

Definition:

Ein (regulärer) Kurvenpunkt $c(t)$ heißt Wendepunkt (WP, inflection point), falls $(\dot{c}(t), \ddot{c}(t))$ linear abhängig ist.

Definition:

Ein Nicht-Wendepunkt $c(t)$ heißt „Henkelpunkt“ (handle point), wenn $(\dot{c}(t), \ddot{c}(t), \ddot{\ddot{c}}(t))$ linear abhängig ist.

Definition:

Eine Böschungslinie im \mathbb{R}^3 ist eine \mathcal{C}^1 -Kurve, ohne Einschränkung in Bogenlängenparametrisierung $s \mapsto c(s)$, deren Tangenten mit einer festen Richtung E (mit $|E| = 1$) einen festen Böschungswinkel γ einschließen. Es ist also \forall_s

$$\langle T(s), E \rangle = \cos \gamma$$

Definition (Parametrisierte \mathcal{C}^r - p -Fläche ($r \geq 0$)):

\mathcal{C}^r -Abbildung $x: G \subset \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}^n$

$$u = (u^1, \dots, u^p) \mapsto x(u) = (x^1(u), \dots, x^n(u))$$

wobei G ein Gebiet des \mathbb{R}^p (d.h. offen und zusammenhängend) ist.

Parameter:

$$u^1, \dots, u^p \quad \text{bei } n = 3 \text{ meist } (u, v)$$

Parameterlinien:

$$u^\varrho \mapsto x(u_0^1, \dots, u^\varrho, \dots, u_0^p)$$

Spur:

$$M := x[G] \subset \mathbb{R}^n$$

Regularität $r \geq 1$: Die partiellen Ableitungen

$$x_\varrho := \partial_\varrho x = \frac{\partial x}{\partial u^\varrho} \quad (\varrho = 1, \dots, p)$$

sind überall linear unabhängig (sonst Singularitäten).

Definition (\mathcal{C}^r -Äquivalenz):

$$\mathcal{C}^r\text{-Äquivalenz zweier } \mathcal{C}^r\text{-}p\text{-Flächen} \quad \begin{cases} x: G \rightarrow \mathbb{R}^n, u \mapsto x(u) \\ \tilde{x}: \tilde{G} \rightarrow \mathbb{R}^n, \tilde{u} \mapsto \tilde{x}(\tilde{u}) \end{cases}.$$

Es existiert ein orientierungstreuer \mathcal{C}^r -Diffeomorphismus

$$\Phi: G \rightarrow \tilde{G}, u \mapsto \tilde{u}(u) = \Phi(u)$$

mit $x = \tilde{x} \circ \Phi$, d.h.

$$\forall_n x(u) = \tilde{x}(\Phi(u)) = \tilde{x}(\tilde{u})$$

Definition:

Eine (orientierte, reguläre) \mathcal{C}^r - p -Fläche im affinen \mathbb{R}^n ist eine Äquivalenzklasse regulärer, parametrisierter \mathcal{C}^r - p -Flächen $x: G \subset \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}^n$.

Definition:

a) Zwei \mathcal{C}^1 - p -Flächen heißen isometrisch, wenn Parametrisierungen

$$u \in G \mapsto x(u) \in M \quad \text{und} \quad u \in G \mapsto \bar{x}(u) \in \bar{M}$$

existieren mit

$$\forall_u (g_{\varrho\sigma}(u)) = (\bar{g}_{\varrho\sigma}(u))$$

b) Zwei isometrische \mathcal{C}^1 - p -Flächen mit Parametrisierungen

$$u \in G \mapsto x(u) \in M \quad \text{und} \quad u \in G \mapsto \bar{x}(u) \in \bar{M}$$

heißen ineinander verbiegbar (abwickelbar), wenn eine stetige Schar

$$\alpha \in [a, b] \mapsto ({}^\alpha x: G \rightarrow M_\alpha)$$

isometrischer \mathcal{C}^1 - p -Flächen existiert mit

$${}^a x = x, \quad {}^b x = \bar{x}$$

Definition:

Bei einer \mathcal{C}^2 -Hyperfläche im \mathbb{R}^n heißt

$$H := \frac{1}{n-1} \operatorname{tr} A = \frac{1}{n-1} \sum b^e_e$$

die mittlere Krümmung und

$$\kappa := \det A = \det(b^\mu_\sigma)$$

die Gaußsche Krümmung

Definition:

Ein tangentiales \mathcal{C}^1 -Vektorfeld $t \mapsto X(t) = \sum X^e(t)x_e(u(t))$ längs einer \mathcal{C}^1 -Flächenkurve $t \mapsto c(t) = x(u(t))$ heißt geodätisch parallel, wenn gilt

$$\begin{aligned} \frac{\nabla X}{dt} &= \left. \frac{dX}{dt} \right|_T \equiv 0, \text{ also} \\ \dot{X}^\mu + \sum X^e \gamma^\mu_{e\sigma}(u) \dot{u}^\sigma &= 0 \quad (\mu = 1, 2) \end{aligned} \quad (*)$$

(d.h. der innergeometrisch nur sichtbare Anteil der Ableitung verschwindet)

(*) ist ein lineares Differentialgleichungssystem 1. Ordnung für die Komponentenfunktionen $t \mapsto X^\mu(t)$ ($\mu = 1, 2$), das unter Anfangsbedingungen $X^\mu(t_0) = X_0^\mu$ ($\mu = 1, 2$) eindeutig gelöst werden kann.⁵

Definition:

Eine Geodätische (Autoparallele, “Geodäte”) auf einer \mathcal{C}^2 -Fläche ist eine \mathcal{C}^2 -Flächenkurve mit geodätisch parallelem Tangenteneinheitsfeld, d.h. mit

$$\boxed{\frac{\nabla T}{dt} \equiv 0}$$

Definition:

$x: G \rightarrow M, \bar{x}: G \rightarrow \bar{M}$ seien *injektive* Parametrisierungen zweier \mathcal{C}^1 -Flächen. Dann heißt die durch $\Psi = \bar{x} \circ x^{-1}: M \rightarrow \bar{M}$ definierte *Flächenabbildung*

- a) *längentreu*, wenn zugeordnete Kurvenstücke stets gleiche Länge besitzen,
- b) *winkeltreu* (konform), wenn zugeordnete Kurvenstückpaare in zugeordneten Schnittpunkten stets gleiche Winkel einschließen,
- c) *flächentreu* (arealtreu), wenn zugeordnete Flächenstücke stets den gleichen Flächeninhalt besitzen.

Definition:

Auf einer \mathcal{C}^2 -Fläche im \mathbb{R}^3 heißen Flächenpunkte $x(u)$

- a) $\kappa_1(u) = \kappa_2(u) = \lambda(u) \in \mathbb{R}$ Nabelpunkte [umbilics] mit der Kennzeichnung

$$A_u = \lambda(u) \text{ Id } |_{T_u x} \text{ bzw. } \Pi_u = \lambda(u) \cdot \text{I}_u$$

(“symmetrisches Krümmungsverhalten”)

- b) $\kappa_1(u) = \kappa_2(u) = 0$ Flachpunkte mit der Kennzeichnung

$$A_u = 0 \text{ bzw. } \Pi_u = 0$$

(“keine Krümmung”)

Definition:

Die 3. Grundform (Fundamentalform) einer \mathcal{C}^2 -Fläche sei das Feld von symmetrischen, positiv semidefiniten Bilinearformen

$$\text{III}_u: T_u x \times T_u x \rightarrow \mathbb{R}, (X, Y) \mapsto \text{III}_u(X, Y) = \text{I}_u(A_u(X), A_u(Y))$$

mit den Darstellungsmatrizen

$$(c_{\varrho\sigma}(u)) = (\text{III}_u(x_\varrho(u), x_\sigma(u))) = \left(\sum_{\mu\nu} g_{\mu\nu} b_\varrho^\mu b_\sigma^\nu \right)$$

Geometrische Bedeutung:

$$\text{III}(X, Y) = \langle d_Y N, d_Y N \rangle \Rightarrow c_{\varrho\sigma} = \langle N_\varrho, N_\sigma \rangle$$

(vergleiche $g_{\varrho\sigma} = \langle x_\varrho, x_\sigma \rangle$)

Daraus folgt:

Die 3. Grundform einer Fläche $u \mapsto x(u)$ ist die 1. Grundform ihres Normalenfeldes $u \mapsto 0 + N(u)$

Definition:

Eine Flächenkurve, deren Tangentenrichtung

- eine Hauptkrümmungsrichtung ist, heißt Krümmungslinie,

- eine Asymptotenrichtung ist, heißt Asymptotenlinie

(letztere existiert nicht durch elliptische Punkte)