

6. Jacobi-Felder (Verbindung Geometrie–Krümmung)

6.1. Jacobi-Gleichung

Sei $(M, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ eine Riemann'sche Mannigfaltigkeit. Für $v \in T_p M$ sei \exp_p definiert. Wir betrachten die parametrisierte Fläche $f(t, s) := \exp_p(tv(s))$ mit $0 \leq t \leq 1$ und $-\varepsilon \leq s \leq \varepsilon$, wobei $v(s)$ eine Kurve in $T_p M$ mit $\|v(s)\| = \|v(0)\|$, $v(0) = v$, $v'(0) = w$ ist.

Es gilt (vergleiche Beweis Gauß-Lemma):

$$d\exp_p|_v w = \frac{\partial f}{\partial s}(1, 0) \in T_{\exp_p(v)} M.$$

$\|d\exp_p|_v w\|$ ist ein Maß dafür, wie schnell die Geodätischen $t \mapsto f(t, s)$ auseinanderlaufen.

Betrachte dazu das Vektorfeld $d\exp_p|_{tv} tw = \frac{\partial f}{\partial s}(t, v)$ längs $\gamma(t) := \exp_p(tv)$, $0 \leq t \leq 1$. Wir halten fest: Da γ eine Geodätische ist, gilt für alle t, s : $\frac{D}{\partial t} \frac{\partial f}{\partial t}(t, s) = 0$.

Lemma 6.1

$$f: A \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow M \\ (u, v) \mapsto f(u, v)$$

sei eine parametrisierte Fläche und $V(u, v)$ sei ein Vektorfeld längs f . Dann gilt:

$$\frac{D}{\partial v} \frac{D}{\partial u} V - \frac{D}{\partial u} \frac{D}{\partial v} V = R\left(\frac{\partial f}{\partial u}, \frac{\partial f}{\partial v}\right) V$$

wobei $\frac{D}{\partial u} = D_{\frac{\partial f}{\partial u}}$.

Beweis

Betrachte Karte (U, φ) . Dann sind die Basisfelder also $V = \sum_{i=1}^n v^i X_i$, $v^i = v^i(u, v)$,

$$\begin{aligned} \frac{D}{\partial u} V &= \frac{D}{\partial u} \left(\sum_{i=1}^n v^i X_i \right) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial v^i}{\partial u} X_i + \sum_{i=1}^n v^i \frac{D}{\partial u} X_i. \\ \frac{D}{\partial v} \left(\frac{D}{\partial u} V \right) &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 v^i}{\partial v \partial u} X_i + \sum_{i=1}^n \frac{\partial v^i}{\partial u} \frac{D}{\partial v} X_i + \sum_{i=1}^n \frac{\partial v^i}{\partial v} \frac{\partial D}{\partial u} X_i + \sum_{i=1}^n v^i \frac{D}{\partial v} \frac{D}{\partial u} X_i \\ \implies \frac{D}{\partial v} \frac{D}{\partial u} V - \frac{D}{\partial u} \frac{D}{\partial v} V &= \sum_{i=1}^n v^i \left(\frac{D}{\partial v} \frac{D}{\partial u} X_i - \frac{D}{\partial u} \frac{D}{\partial v} X_i \right) \end{aligned}$$

Berechne $\frac{D}{\partial v} \frac{D}{\partial u} X_i$: Für $f(u, v) = (x^1(u, v), \dots, x^n(u, v))$ ist

$$\frac{\partial f}{\partial u} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial x^j}{\partial u} X_j; \quad \frac{\partial f}{\partial v} = \sum_{k=1}^n \frac{\partial x^k}{\partial v} X_k \quad \text{und} \quad \frac{D}{\partial u} X_i = D_{\frac{\partial f}{\partial u}} X_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial x^j}{\partial u} D_{X_j} X_i.$$

$$\begin{aligned}
 \frac{D}{\partial v} \frac{D}{\partial u} X_i &= \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 x^j}{\partial v \partial u} D_{X_j} X_i + \sum_{j=1}^n \frac{\partial x^j}{\partial u} D_{\frac{\partial f}{\partial u}} (D_{X_j} X_i) = \sum_j \frac{\partial^2 x^j}{\partial u \partial v} D_{X_j} X_i + \sum_j \frac{\partial x^j}{\partial u} \left(\sum_k \frac{\partial x^k}{\partial u} D_{X_k} D_{X_j} X_i \right) \\
 \implies \left(\frac{D}{\partial v} \frac{D}{\partial u} - \frac{D}{\partial u} \frac{D}{\partial v} \right) X_i &= \sum_{j,k=1}^n \frac{\partial x^j}{\partial u} \frac{\partial x^k}{\partial v} \underbrace{\left(D_{X_k} D_{X_j} X_i - D_{X_j} D_{X_k} X_i \right)}_{\substack{[X_j, X_k]=0 \\ R(X_j, X_k) X_i}} \\
 \implies \frac{D}{\partial v} \frac{D}{\partial u} V - \frac{D}{\partial u} \frac{D}{\partial v} V &= \sum_{i,j,k} v_i \frac{\partial x^j}{\partial u} \frac{\partial x^k}{\partial v} R(X_j, X_k) X_i \stackrel{R \text{ multilinear}}{=} R \left(\frac{\partial f}{\partial u}, \frac{\partial f}{\partial v} \right) \quad \blacksquare
 \end{aligned}$$

Weiter gilt:

$$\begin{aligned}
 0 &= \frac{D}{\partial s} \left(\frac{D}{\partial t} \frac{\partial f}{\partial t} \right) \stackrel{\text{Lemma 1}}{=} \frac{D}{\partial t} \left(\frac{D}{\partial s} \frac{\partial f}{\partial t} \right) - R \left(\frac{\partial f}{\partial s}, \frac{\partial f}{\partial t} \right) \frac{\partial f}{\partial t} \\
 &\stackrel{\text{Lemma 3 Kap 4} + \text{schiefsym.}}{=} \frac{D}{\partial t} \left(\frac{D}{\partial t} \frac{\partial f}{\partial s} \right) - R \left(\frac{\partial f}{\partial t}, \frac{\partial f}{\partial s} \right) \frac{\partial f}{\partial t}
 \end{aligned}$$

Wir setzen $\gamma(t) = \exp_p(tv) = f(t, 0)$ und $J(t) \equiv J(\gamma(t)) := \frac{\partial f}{\partial s}(t, 0)$ ein Vektorfeld längs γ . Dann gilt die Jacobi-Gleichung:

$$\frac{D}{\partial t} \frac{D}{\partial t} J(t) + R(\gamma'(t), J(t)) \gamma'(t) = 0$$

mit der Kurzschreibweise

$$\frac{D}{\partial t} \frac{D}{\partial t} J(t) =: J''(t)$$

Definition

Sei $\gamma : [0, a] \rightarrow M$ eine Geodätische. Ein Vektorfeld J längs γ heißt Jacobi-Feld, falls J für alle $t \in [0, a]$ die Jacobi-Gleichung erfüllt.

Es gilt: Ein Jacobi-Feld ist eindeutig bestimmt durch die Anfangsbedingungen $J(0)$ und $J'(0) := D_{\gamma'} J(0)$.

Begründung: Betrachte orthonormale Parallelfelder $E_1(t), \dots, E_n(t)$, wobei $E_i(t) = E_i(\gamma(t))$, längs γ . Dann kann man schreiben: $J(t) = \sum_{i=1}^n f_i(t) E_i(t)$ mit $f_i \in C^\infty$. Also $J'(t) = D_{\gamma'} J(t) = \sum_{i=1}^n D_{\gamma'}(f_i E_i) = \sum_{i=1}^n (f'_i E_i + f_i \underbrace{D_{\gamma'} E_i}_{=0}) = \sum_{i=1}^n f'_i(t) E_i(t)$ und $J''(t) = \sum_{i=1}^n f''_i(t) E_i(t)$.

Weiter sei $a_{ij}(t) := \langle R(\gamma'(t), E_i(t)) \gamma'(t), E_j(t) \rangle_{\gamma(t)}$. Dann gilt $R(\gamma', J) \gamma' = \sum_j \langle R(\gamma', J) \gamma', E_j \rangle E_j = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n f_i \langle R(\gamma' E_i) \gamma', E_j \rangle E_j = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n f_i a_{ij}(t) E_j(t)$

Damit ist die Jacobi-Gleichung äquivalent zum System linearer Differentialgleichungen 2. Ordnung

$$f''_j(t) + \sum_{i=1}^n a_{ij}(t) f_i(t) = 0, \quad j = 1, \dots, n$$

Die Lösungen bilden einen Vektorraum Jac_γ der Dimension $2n$, wobei $n = \dim M$. Zu gegebener Anfangsbedingung $J(0), J'(0)$ bzw. $f_1(0), \dots, f_n(0), f'_1(0), \dots, f'_n(0)$ existiert genau ein Jacobi-Feld längs ganz γ , also eine Lösung des obigen Differentialgleichungssystems für alle $t \in [0, a]$.

Folgerung: Längs der Geodätischen $\gamma : [0, a] \rightarrow M$ existieren $2n$ linear unabhängige Jacobi-Felder, wobei $n = \dim M$.

Bemerkung: Gewisse Jacobi-Felder kann man direkt angeben: $J(t) := \gamma'(t)$ ist ein Jacobi-Feld, da $J'' + R(\gamma', J)\gamma' = \gamma''' + R(\gamma', \gamma')\gamma' = D_{\gamma'}\gamma'' + 0 = D_{\gamma'}D_{\gamma'}\gamma' = 0$.

Ansatz: $J(t) := a(t)\gamma'(t)$ für $a : I \rightarrow \mathbb{R}$ ist Jacobi-Feld, genau dann, wenn $a(t)$ linear (affin) ist. Also: $J'' = a''\gamma'$, $R(\gamma', J)\gamma' = R(\gamma', a\gamma')\gamma' = aR(\gamma', \gamma')\gamma' = 0$. Das heißt die Jacobi-Gleichung gilt $\iff a''\gamma' = 0 \iff a'' = 0 \iff a(t) = \alpha + t\beta$, $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$.

Folgerung: $J_1(t) := \gamma'(t)$ und $J_2(t) := t\gamma'(t)$ sind verschieden, da $J_1(0) = \gamma'(0) \neq J_2(0) = 0$, und spannen einen 2-dimensionalen Untervektorraum des Vektorraumes Jac_γ aller Jacobi-Felder längs γ auf.

Es genügt dann den $2(n-1)$ -dimensionalen Untervektorraum aller Jacobi-Felder orthogonal zu γ' zu verstehen.

Jacobi-Felder für Riemann'sche Mannigfaltigkeiten konstanter Krümmung

Sei $(M, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ eine Riemann'sche Mannigfaltigkeit mit konstanter Schnittkrümmung k_0 , etwa $(\mathbb{R}^2, \text{kan}) : k_0 = 0$, $(S^2, \text{kan}) : k_0 = 1$, $(H^2\mathbb{R}, \text{kan}) : k_0 = -1$.

Weiter sei $\gamma : [0, a] \rightarrow M$ eine normale Geodätische und J ein Jacobi-Feld längs γ , so dass $J(t) \perp \gamma'(t)$.

Für ein beliebiges Vektorfeld X längs γ gilt die Formel (vgl. 5.2, Ergänzende Sätze):

$$\langle R(\gamma', J)\gamma', X \rangle = k_0 \left(\underbrace{\langle \gamma', \gamma' \rangle}_{=1} \langle J, X \rangle - \langle \gamma', X \rangle \underbrace{\langle J, \gamma' \rangle}_{=0} \right) = k_0 \langle J, X \rangle$$

also

$$R(\gamma', J)\gamma' = k_0 J$$

Die Jacobi-Gleichung lautet hier:

$$J'' + k_0 J = 0 \quad (*)$$

Es sei $E(t)$ ein Parallelfeld längs γ mit $\|E(t)\|_{\gamma(t)} = 1$ und $\langle E(t), \gamma'(t) \rangle_{\gamma(t)} = 0$ für alle t . Dann ist

$$J(t) := \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{k_0}} \cdot \sin(t\sqrt{k_0}) \cdot E(t), & k_0 > 0 \\ t \cdot E(t), & k_0 = 0 \\ \frac{1}{\sqrt{-k_0}} \cdot \sinh(t\sqrt{-k_0}) \cdot E(t), & k_0 < 0 \end{cases}$$

eine Lösung von $(*)$ mit Anfangsbedingung $J(0) = 0$ und $J'(0) = E(0)$.

Beispiele

(1) $(\mathbb{R}^2, \text{kan})$, $k_0 = 0$:

Geodätische = Gerade; Parallelfeld = konstantes Vektorfeld $E(t) = e \forall t$
 $\implies J(t) = tE(t) = te$

(2) (S^2, kan) , $k_0 = 1$:

$$\begin{aligned} X(s, t) &= (\cos s \sin t, \sin s \sin t, \cos t) \\ \frac{\partial X}{\partial s}(s, t) &= (-\sin s \sin t, \cos s \sin t, 0) \\ \frac{\partial X}{\partial t}(s, t) &= (\cos s \cos t, -\sin s \cos t, -\sin t) \end{aligned}$$

Mit $s = 0$ (= Großkreis in x - z -Ebene = Geodätische = γ):

$$\begin{aligned}\frac{\partial X}{\partial t}(0, t) &= \frac{\partial}{\partial t} \gamma(t) = \gamma'(t) = (\cos t, 0, -\sin t) \\ \frac{\partial X}{\partial s}(0, t) &= (0, \sin t, 0) =: J(t) \\ E(t) &= \frac{J(t)}{\|J(t)\|} = (0, 1, 0)\end{aligned}$$

(3) $(H^2, \text{kan}), k_0 = -1$:

$H^2 = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid y > 0\} \hat{=} \{z \in \mathbb{C} \mid \text{Im } z > 0\}$. Betrachte $\gamma(t) = (0, e^t) \hat{=} ie^t$.

$$T_{(x,y)}H^2 = \mathbb{R} \frac{\partial}{\partial x} \oplus \mathbb{R} \frac{\partial}{\partial y}, \quad \left\| \frac{\partial}{\partial x}(x, y) \right\|_{\text{hyp}} = \frac{1}{y} \|(1, 0)\|_{\text{eukl}} = \frac{1}{y}, \quad \left\| \frac{\partial}{\partial y}(x, y) \right\|_{\text{hyp}} = \frac{1}{y}$$

$$\gamma'(t) = (0, e^t) = e^t \frac{\partial}{\partial y} \implies \|\gamma'(t)\|_{\text{hyp}} = e^t \left\| \frac{\partial}{\partial y} \right\|_{\text{hyp}} = e^t \frac{1}{e^t} = 1.$$

$$\text{Parallelfeld: } E(t) = \frac{\frac{\partial}{\partial x}(0, e^t)}{\left\| \frac{\partial}{\partial x}(0, e^t) \right\|_{\text{hyp}}} = \frac{(1, 0)}{\frac{1}{e^t}} = (e^t, 0), \quad \|E(t)\|_{\text{hyp}} = 1$$

$$\implies J(t) = \sinh t \cdot E(t) = (\sinh t \cdot e^t, 0), \quad \|J(t)\|_{\text{hyp}} = \sinh t.$$

Satz 6.1

Sei $\gamma : [0, a] \rightarrow M$ eine normale Geodätische (also $\|\gamma'\| = 1$) und J ein Jacobi-Feld längs γ mit $J(0) = 0$ und $J'(0) = \frac{D}{dt}J(0) = (D_{\gamma'}J)(0) =: w$. Schließlich sei $v := \gamma'(0)$.

Wir betrachten w als Element von $T_{av}(T_{\gamma(0)}M)$ und wählen Kurve $v(s)$ in $T_{\gamma(0)}M$ mit $v(0) = av$, $v'(0) = aw$. Für die parametrisierte Fläche $f(t, s) := \exp_{\gamma(0)}\left(\frac{t}{a}v(s)\right)$, $|s| < \varepsilon$, $0 \leq \frac{t}{a} \leq 1$ ist $\bar{J}(t) := \frac{\partial f}{\partial s}(t, 0)$ ein Jacobi-Feld längs γ mit $J(t) = \bar{J}(t)$ für alle $t \in [0, a]$.

Beweis

Jacobi-Feld ist durch Anfangsbedingungen vollständig bestimmt, das heißt es genügt zu zeigen: $J(0) = \bar{J}(0)$ und $J'(0) = \bar{J}'(0)$.

Es ist einfach zu sehen, dass $\bar{J}(0) = \frac{\partial f}{\partial s}(0, 0) = 0$.

Weiter gilt

$$\begin{aligned}\bar{J}'(t) &= \frac{D}{dt} \frac{\partial f}{\partial s}(t, 0) = \frac{D}{dt} \left(d\exp_p|_{\frac{t}{a}v(0)} \cdot \frac{t}{a}v'(0) \right) = \frac{D}{dt} \left(d\exp_p|_{tv} tw \right) \\ &= \frac{D}{dt} \left(t \cdot d\exp_p|_{tv} w \right) = 1 \cdot d\exp_p|_{tv} w + t \frac{D}{dt} \left(d\exp_p|_{tv} w \right).\end{aligned}$$

Daher ist $\bar{J}'(0) = d\exp_p|_0 w = w = J'(0)$. ■

Bemerkungen: (1) Es gilt folgende Formel für ein Jacobi-Feld längs einer normalen Geodätischen $\gamma : [0, a] \rightarrow M$ mit $J(0) = 0$:

$$J(t) = d\exp_p|_{t\gamma'(0)}(tJ'(0)), \quad t \in [0, a]$$

(2) Eine analoge Konstruktion (Jacobi-Felder erzeugen durch Variation einer Geodätischen) gilt auch für Jacobi-Felder mit Anfangsbedingung $J(0) \neq 0$.

6.2. Jacobi-Felder und Schnittkrümmung

Satz 6.2

Sei $p \in M$, $\gamma : [0, a] \rightarrow M$ eine normale Geodätische mit $\gamma(0) = p$, $\gamma'(0) = v$ und $w \in T_v(T_p M) \cong T_p M$ mit $\|w\| = 1$. Weiter sei $J(t) = d\exp_p|_{tw}(tw)$, $0 \leq t \leq a$ ein Jacobi-Feld längs γ .

Dann gilt für die Taylorentwicklung von $\|J(t)\|_{\gamma(t)}^2 = \langle J(t), J(t) \rangle_{\gamma(t)}$ bei $t = 0$:

$$\|J(t)\|_{\gamma(t)}^2 = t^2 - \frac{1}{3} \langle R(v, w)v, w \rangle_p t^4 + o(t^4)$$

Beweis

Es ist $J(0) = 0$, $J'(0) = w$, $\|w\| = 1$. Für die ersten drei Koeffizienten der Taylorreihe in t folgt:

$$(0) \quad \|J(p)\|_p^2 = \langle J, J \rangle(0) = 0$$

$$(1) \quad \langle J, J \rangle'(0) = 2\langle J', J \rangle(0) = 0$$

$$(2) \quad \langle J, J \rangle''(0) = 2\langle J'', J \rangle(0) + 2\langle J', J' \rangle(0) = 0 + 2\|w\|^2 = 2$$

$$(3) \quad \begin{aligned} \langle J, J \rangle'''(0) &= 2\langle J''', J \rangle(0) + 2\langle J'', J' \rangle(0) + 4\langle J'', J' \rangle(0) = 0 + 6\langle -R(\gamma', J)\gamma', J' \rangle(0) = \\ &= 6\langle -R(\gamma', 0)\gamma', J' \rangle(0) = 6\langle 0, J' \rangle(0) = 0 \end{aligned}$$

$$(4) \quad \begin{aligned} \langle J, J \rangle''''(0) &= 2\langle J'''', J \rangle(0) + 2\langle J''', J' \rangle(0) + 6\langle J''', J' \rangle(0) + 6\langle J'', J'' \rangle(0) = 8\langle J''', J' \rangle(0) = \\ &= -8\langle R(\gamma', J')\gamma', J' \rangle(0) = -8\langle R(v, w)v, w \rangle_p \end{aligned}$$

Nebenrechnung für $J''' = -\frac{D}{dt}R(\gamma', J)\gamma'$. Dazu betrachten wir ein beliebiges Vektorfeld Z mit $Z' = \frac{D}{dt}Z = D_{\gamma'}Z$. Es ist

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{D}{dt}R(\gamma', J)\gamma', Z \right\rangle &= \frac{d}{dt} \langle R(\gamma', J)\gamma', Z \rangle - \langle R(\gamma', J)\gamma', Z' \rangle \\ &= \frac{d}{dt} \langle R(\gamma', Z)\gamma', J \rangle - \langle R(\gamma', J)\gamma', Z' \rangle \\ &= \left\langle \frac{D}{dt}R(\gamma', Z)\gamma', J \right\rangle + \langle R(\gamma', Z)\gamma', J' \rangle - \langle R(\gamma', J)\gamma', Z' \rangle. \end{aligned}$$

Für $t = 0$ ist $J(0) = 0$, also:

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{D}{dt}R(\gamma', J)\gamma', Z \right\rangle(0) &= 0 + \langle R(\gamma', Z)\gamma', J' \rangle(0) - 0 \\ &= \langle R(\gamma', J')\gamma', Z \rangle(0) \end{aligned}$$

Da Z beliebig war, gilt $J'''(0) = -\frac{D}{dt}R(\gamma', J)\gamma'(0) = -R(\gamma', J')\gamma'(0)$ ■

Korrolar

Falls $\langle v, w \rangle_p = 0$, (v, w also orthonormiert) gilt: $\langle R(v, w)v, w \rangle_p = K(p, \sigma) =$ Schnittkrümmung der von v und w aufgespannten Ebene σ , also

$$\|J(t)\|_{\gamma(t)}^2 = t^2 - \frac{1}{3}K(p, \sigma)t^4 + o(t^4)$$

sowie

$$\|J(t)\|_{\gamma(t)} = t - \frac{1}{6}K(p, \sigma)t^3 + o(t^3)$$

Beweis

Die Formel für $\|J(t)\|_{\gamma(t)}$ folgt aus einem Koeffizientenvergleich der Taylorreihen:

$$\begin{aligned} f(t) &= a + bt + ct^2 + dt^3 + \dots \\ (f(t))^2 &= a^2 + 2abt + \dots \end{aligned}$$

■

Anwendung Länge von geodätischen Kreisen. $p \in M$, $v, w \in T_p M$, $v \perp w$, $\|v\| = \|w\| = 1$, $f(r, \theta) := \exp_p(r(\cos \theta \cdot v + \sin \theta \cdot w))$. Für ein festes r heißt $K_r(\theta) = f(r, \theta)$ für $0 \leq \theta \leq 2\pi$ ein geodätischer Kreis von Radius r .

Die Länge von K_r ist $L(K_r) := \int_0^{2\pi} \left\| \frac{d}{d\theta} K_r(\theta) \right\| d\theta = \int_0^{2\pi} \left\| \frac{\partial f}{\partial \theta} \right\| d\theta$, wobei $\frac{\partial f}{\partial \theta}$ ein Jacobi-Feld längs $\gamma_\theta(r) = \exp_p(rv(\theta))$ ist. Daher

$$L(K_r) = \int_0^{2\pi} \left[r - \frac{1}{6}K(p, \sigma)r^3 + o(r^3) \right] d\theta = 2\pi r \left(1 - \frac{1}{6}K(p, \sigma)r^2 + o(r^2) \right).$$

Das ist die klassische Formel von Bertrand-Puiseux (1848) für Flächen in \mathbb{R}^3 .

Umgekehrt hat man $K(p, \sigma) = \frac{3}{\pi r^3} (2\pi r - L(K_r) + o(r^3))$ oder

$$K(p, \sigma) = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{3}{\pi r^3} (2\pi r - L(K_r)).$$

Im euklidischen ist $L(K_r) = 2\pi r$, also $K(p, \sigma) = 0$. Im Sphärischen ist $L(K_r) = 2\pi \sin r = 2\pi \left(r - \frac{r^3}{3!} + \dots \right)$, also $K(p, \sigma) = +1$. Im Hyperbolischen ist $L(K_r) = 2\pi \sinh r = 2\pi \left(r + \frac{r^3}{3!} + \dots \right)$, also $K(p, \sigma) = -1$.