

# Kurzfassung Riemannsche Geometrie

© Tim Baumann, <http://timbaumann.info/uni-spicker>

**Def.** Eine **topologische Mannigfaltigkeit** (Mft) ist ein topologischer Raum  $M^m$  mit folgenden Eigenschaften:

- $M^m$  ist **hausdorffsch**, d. h.

$$\forall x, y \in M^m : x \neq y \implies \exists U_x \subseteq M^m : \exists U_y \subseteq M^m : \\ x \in U_x \wedge y \in U_y \wedge U_x \cap U_y = \emptyset.$$

- $M^m$  erfüllt das **zweite Abzählbarkeitsaxiom**, d. h. es gibt eine abzählbare Menge  $\{U_i \mid i \in \mathbb{N}\} \subset \mathcal{T}$ , sodass

$$\forall A \subseteq M^m : \exists K \subset \mathbb{N} : A = \bigcup_{k \in K} U_k.$$

- $M^m$  ist **lokal euklidisch**, d. h. für alle  $x \in M^m$  gibt es eine offene Umgebung  $U_x$  von  $x$  und einen Homöomorphismus  $\phi : U_x \rightarrow \mathcal{O}$  mit  $\mathcal{O} \subset \mathbb{R}^m$  offen.

*Bem.* lokal euklidisch  $\nRightarrow$  hausdorffsch

**Prop.** Sei  $M$  eine topologische Mannigfaltigkeit. Dann gilt

$$M \text{ zusammenhängend} \iff M \text{ wegzusammenhängend.}$$

**Def.** • Sei  $M$  eine  $m$ -dim. topol. Mft. Ein **Atlas** ist eine Menge  $\mathcal{A} = \{(U_j, \phi_j : U_j \rightarrow \mathcal{O}_j) \mid j \in J\}$  mit  $U_j \subseteq M$  und  $\mathcal{O}_j \subset \mathbb{R}^n$  offen und Homöomorphismen  $\phi_j$ , für die gilt  $\bigcup_{j \in J} U_j = M$ .

- Die Paare  $(U_j, \phi_j)$  werden **Karten** genannt.
- Für je zwei Karten  $(U_j, \phi_j)$  und  $(U_k, \phi_k)$  gibt es eine **Kartenwechselabbildung**

$$\phi_{kj} := \phi_k \circ \phi_j^{-1}|_{\phi_j(U_j \cap U_k)} : \phi_j(U_j \cap U_k) \rightarrow \phi_k(U_j \cap U_k).$$

- Ein Atlas heißt **differenzierbar**, wenn alle Kartenwechselabbildungen  $\mathcal{C}^\infty$ -Abbildungen sind.
- Ein Atlas  $\mathcal{A}$  heißt **differenzierbare Struktur** von  $M$ , wenn gilt: Ist  $(\tilde{U}, \tilde{\phi}_j)$  eine Karte von  $M$  und  $\tilde{\mathcal{A}} := \mathcal{A} \cup \{(\tilde{U}, \tilde{\phi}_j)\}$  ein differenzierbarer Atlas, dann gilt  $\mathcal{A} = \tilde{\mathcal{A}}$ .
- Eine topol. Mft versehen mit einer differenzierbaren Struktur heißt **differenzierbare Mannigfaltigkeit**.

**Notation.** Seien ab jetzt  $M^m$  und  $N^n$  differenzierbare Mften der Dimensionen  $m$  und  $n$

**Def.** • Eine Abbildung  $f : M \rightarrow N$  heißt in  $x \in M$  **differenzierbar**, wenn es eine Karte  $(U_x, \phi : U_x \rightarrow \mathcal{O}) \in \mathcal{A}_M$  und eine Karte  $(\tilde{U}_{f(x)}, \tilde{\phi} : \tilde{U}_{f(x)} \rightarrow \tilde{\mathcal{O}}) \in \mathcal{A}_N$  gibt, sodass

$$\tilde{\phi} \circ f|_{U_x \circ \phi^{-1}} : \mathcal{O} \rightarrow \tilde{\mathcal{O}} \quad \text{differenzierbar } (\mathcal{C}^\infty) \text{ ist.}$$

- Die Abbildung  $f$  heißt **differenzierbar**, falls sie in jedem Punkt  $x \in M$  differenzierbar ist.

**Notation.**  $\mathcal{C}^\infty(M, N) := \{f : M \rightarrow N \mid f \text{ ist differenzierbar}\}$

*Bem.* Die Definition ist unabh. von Wahl der Karten um  $x$  und  $f(x)$ .

**Def.** Eine Abbildung  $f : M \rightarrow N$  heißt **Diffeomorphismus**, wenn  $f$  ein Homöo ist und  $f$  und  $f^{-1}$  differenzierbar sind.

**Def.** Sei  $p \in M$ . Zwei Funktionen  $f : U_p \rightarrow \mathbb{R}$  und  $g : V_p \rightarrow \mathbb{R}$  mit  $U_p, V_p \subseteq M$  heißen äquivalent, falls es eine offene Umgebung  $W \subset U_p \cap V_p$  mit  $f|_W = g|_W$  gibt. Die Äquivalenzklasse  $[f]$  bezüglich der so definierten Äq'-relation heißt **Funktionskeim** in  $p$ .

**Notation.**  $\mathcal{C}^\infty(M, p) := \{[f] \mid [f] \text{ Funktionskeim in } p\}$

*Bem.* Die Menge der Funktionskeime ist eine  $\mathbb{R}$ -Algebra.

**Def.** Eine lineare Abb.  $\delta : \mathcal{C}^\infty(M, p) \rightarrow \mathbb{R}$  heißt **Derivation**, falls

$$\forall [f], [g] \in \mathcal{C}^\infty(M, p) : \delta[f \cdot g] = \delta[f] \cdot g(p) + f(p) \cdot \delta[g].$$

**Def.** Der gewöhnliche Tangentialraum des  $\mathbb{R}^n$  im Punkt  $p$  ist

$$\tilde{T}_p \mathbb{R}^n := \{(p, v) \mid v \in \mathbb{R}^n\}$$

mit  $(p, v) + (p, w) := (p, v + w)$  und  $\lambda \cdot (p, v) := (p, \lambda \cdot v)$ .

**Def.** Der **Tangentialraum** von  $M$  im Punkt  $p \in M$  ist

$$T_p M := \{\partial : \mathcal{C}^\infty(\mathbb{R}^n, p) \rightarrow \mathbb{R} \mid \partial \text{ linear, derivativ}\}$$

Ein Element  $v \in T_p M$  heißt **Tangentialvektor** an  $M$  in  $p$ .

*Bem.* Wir erhalten eine Abbildung

$$T_p M \times \mathcal{C}^\infty(M, p) \rightarrow \mathbb{R}, \quad (v, [f]) \mapsto v.f := v[f].$$

*Bem.*  $T_p M$  ist ein  $\mathbb{R}$ -Vektorraum.

**Satz.** Die Vektorräume  $T_p \mathbb{R}^n$  und  $\tilde{T}_p \mathbb{R}^n$  sind isomorph. Insbesondere gilt  $\dim(T_p \mathbb{R}^n) = n$ .

**Korollar.** Für eine  $m$ -dim. diff'bare Mft  $M$  gilt:  $\dim(T_p M) = m$ .

*Bem.* Sei  $c : (-\epsilon, \epsilon) \rightarrow M$  eine differenzierbare Kurve. Dann kann man  $\dot{c}(0)$  auffassen als Tangentialvektor an  $M$  in  $c(0)$  mittels

$$\dot{c}(0)[f] := \frac{d}{dt}|_{t=0}(f \circ c).$$

*Bem.* Sei  $(U, \phi)$  eine Karte von  $M$ . Wir setzen

$$\frac{\partial \phi}{\partial x_i}|_p[f] := (\phi^{-1} \circ \alpha_i)'(0)[f] = \frac{d}{dt}|_{t=0}(f \circ \phi^{-1} \circ \alpha_i) \\ \text{mit } \alpha_i : (-\epsilon, \epsilon) \rightarrow U, \quad t \mapsto \phi(p) + t e_i.$$

Wir erhalten  $\frac{\partial \phi}{\partial x_i}|_p \in T_p M$ .

**Def.** Sei  $f : M \rightarrow N$  diff'bar. Die **Ableitung** von  $f$  in  $p \in M$  ist

$$T_p f = f_{*p} : T_p M \rightarrow T_{f(p)} N, \quad v \mapsto f_{*p} v \\ \text{wobei } f_{*p}(v).[g] := v.[g \circ f].$$

**Lemma.** Sei  $M$  eine diff'bare Mft,  $p \in M$ . Dann gilt

- $f_{*p}$  ist linear
- $(\text{id}_M)_{*p} = \text{id}_{T_p M}$
- Kettenregel: Seien  $N, P$  diff'bare Mften. Dann gilt

$$\forall p \in M : (f \circ g)_{*p} = f_{*g(p)} \circ g_{*p}.$$

**Korollar.** Wenn  $f : M \rightarrow N$  ein Diffeomorphismus ist, dann ist  $f_{*p} : T_p M \rightarrow T_{f(p)} N$  ein VR-Isomorphismus für alle  $p \in M$ .

**Satz.** Sei  $M$  eine  $m$ -dimensionale Mft,  $p \in M$  und  $(U, \phi)$  eine Karte.

- Es gilt  $T_p M = \{\dot{c}(0) \mid c : (-\epsilon, \epsilon) \rightarrow M \text{ diff'bar}, c(0) = p\}$
- $\{\frac{\partial \phi}{\partial x^i}|_p \mid i = 1, \dots, n\}$  ist eine Basis von  $T_p M$ .

**Def.**  $TM := \bigcup_{p \in M} T_p M$  heißt **Tangentialbündel** von  $M$ . Die **Fußpunktabbildung** ist die Projektion

$$\pi : TM \rightarrow M, v \in T_p M \mapsto p.$$

**Def.** Ein **Vektorfeld** auf  $M$  ist eine Abbildung  $X : M \rightarrow TM$ , sodass  $\pi \circ X = \text{id}_M$ . Dies ist äquivalent zu  $\forall p \in M : X(p) \in T_p(M)$ .

*Bem.* Sei  $X : M \rightarrow TM$  ein Vektorfeld,  $(U, \phi)$  eine Karte. Dann gibt es Funktionen  $\xi^j : U \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $j = 1, \dots, n$  mit

$$\forall p \in U : X(p) = \sum_{j=1}^n \xi^j(p) \frac{\partial \phi}{\partial x^j}|_p.$$

**Def.** • Ein Vektorfeld  $X$  auf  $M$  heißt in  $p \in M$  **diff'bar** ( $\mathcal{C}^\infty$ ), wenn es eine Karte  $(U, \phi)$  um  $p$  gibt, sodass die Funktionen  $\xi_1, \dots, \xi^m$  diff'bar ( $\mathcal{C}^\infty$ ) sind.

- $X$  heißt **differenzierbar**, wenn  $X$  in allen  $p \in M$  diff'bar ist.

**Lemma.** Wenn die Koordinatenfunktionen  $\xi^1, \dots, \xi^n$  für eine bestimmte Karte  $(U, \phi : U \rightarrow \mathcal{O})$  differenzierbar sind, dann sind sie es für jede andere Karte  $(\tilde{U}, \psi : \tilde{U} \rightarrow \tilde{\mathcal{O}})$  mit  $\tilde{U} \subseteq U$ .

**Def.** Sei  $M$  eine  $m$ -dimensionale diff'bare Mft mit diff'barer Struktur  $\mathcal{A} = \{(U_j, \phi_j) \mid j \in J\}$ . Dann ist  $TM$  eine  $2m$ -dimensionale Mft mit Atlas  $\tilde{\mathcal{A}} := \{(\tilde{U}_j := \pi^{-1}(U_j), \tilde{\Phi}_j) \mid j \in J\}$ , wobei

$$\tilde{\Phi}_j : \pi^{-1}(U_j) \rightarrow \phi_j(U_j) \times \mathbb{R}^m, \quad \sum_{k=1}^m \xi^k(p) \frac{\partial \phi_j}{\partial x^k}|_p \mapsto (\phi_j(p), \xi^1(p), \dots, \xi^n(p)).$$

Eine Menge  $V \subseteq TM$  heißt offen, wenn  $\tilde{\Phi}_j(V \cap \pi^{-1}(U_j)) \subseteq \mathbb{R}^{2n}$  offen ist für alle  $j \in J$ .

**Notation.**  $\chi(M) := \{\text{diff'bare Vektorfelder auf } M\}$

*Bem.*  $\chi(M)$  ist ein  $\mathbb{R}$ -VR und ein  $\mathcal{C}^\infty(M)$ -Modul.

**Lemma.** Jedes  $X \in \chi(M)$  induziert eine Abbildung

$$X : \mathcal{C}^\infty(M) \rightarrow \mathcal{C}^\infty(M), \quad \phi \mapsto X(\phi) := p \mapsto X(p).[ \phi ].$$

Die Abbildung  $X$  ist linear und derivativ.

**Lemma.** Seien  $X, Y \in \chi(M)$  mit  $\forall f \in \mathcal{C}^\infty(M) : X(f) = Y(f)$ . Dann gilt  $X \equiv Y$ .

**Def.** Seien  $X, Y \in \chi(M)$ . Dann heißt das Vektorfeld

$$[X, Y] : \mathcal{C}^\infty(M) \rightarrow \mathcal{C}^\infty(M), \quad f \mapsto X(Y(f)) - Y(X(f))$$

**Kommutator** oder **Lie-Klammer** von  $X$  und  $Y$ .

**Satz.** Für  $X, Y_1, Y_2 \in \chi(M)$  und  $f \in \mathcal{C}^\infty(M)$  gilt

$$[X, Y_1 + f Y_2] = [X, Y_1] + X(f) \cdot Y_2 + f \cdot [X, Y_2].$$

**Def.** Sei  $X \in \chi(M)$ . Eine diff'bare Kurve  $c : (-\epsilon, \epsilon) \rightarrow M$  heißt **Integralkurve** von  $X$ , falls

$$\forall t \in (-\epsilon, \epsilon) : \dot{c}(t) = X_{c(t)}.$$

**Lemma.** Sei  $X \in \chi(M)$ ,  $p \in M$  und  $v \in T_p M$ . Dann hat das AWP

$$\dot{c}(t) = X_{c(t)}, \quad c(0) = p$$

eine eindeutige lokale Lösung  $c = c_p^X : (-\epsilon, \epsilon) \rightarrow M$ .

**Def.**  $\Phi_X : U \times (-\epsilon, \epsilon) \rightarrow M$ ,  $(p, t) \mapsto c_p^X(t)$  heißt **Fluss** von  $X$ .

**Def.** Ein  $\mathbb{K}$ -Vektorraum  $V$  mit einer  $\mathbb{K}$ -bilinearen Abbildung  $[-, -] : V \times V \rightarrow V$ ,  $(v, w) \mapsto [v, w]$  heißt **Lie-Algebra**, falls

- die Abb. antisymmetrisch ist, d. h.  $\forall v, w \in V : [v, w] = -[w, v]$
- die **Jacobi-Identität** erfüllt ist, d. h.

$$\forall v, w, z \in V : [v, [w, z]] + [z, [v, w]] + [w, [z, v]] = 0.$$

**Bspe.** •  $(\chi(M), [-, -])$  ist eine Lie-Algebra.

- $\mathbb{K}^{n \times n}$  ist eine Lie-Algebra mit  $[A, B] := AB - BA$ .

**Def.** Eine Gruppe  $G$ , welche ebenfalls eine diff'bare Mft ist, heißt **Lie-Gruppe**, wenn gilt:

- $\mu : G \times G \rightarrow G$ ,  $(g_1, g_2) \mapsto g_1 \cdot g_2$  ist diff'bar.
- $\iota : G \rightarrow G$ ,  $g \mapsto g^{-1}$  ist diff'bar.

**Bsp.** Die allg. lin. Gruppe  $GL(n, \mathbb{R}) \subset \mathbb{R}^{n \times n} \approx \mathbb{R}^{(n^2)}$  ist eine Lie-Gruppe. Die Diff'barkeit der Inv. folgt aus der Cramerschen Regel.

**Def.** Sei  $G$  eine Lie-Gruppe und  $g \in G$ . Dann sind

$$lg : G \rightarrow G, \quad x \mapsto g \cdot x = \mu(g, x)$$

$$rg : G \rightarrow G, \quad x \mapsto x \cdot g = \mu(x, g)$$

Diffeomorphismen mit Umkehrabbildung  $l(g^{-1})$  bzw.  $r(g^{-1})$ .

**Bsp.** Abgeschl. Untergruppen von  $GL(n, \mathbb{R})$  sind Lie-Gruppen, z. B.

- $GL(n, \mathbb{C}) \subset GL(2n, \mathbb{R})$  •  $O_n \subset GL(n, \mathbb{R})$  •  $U_n \subset GL(2n, \mathbb{R})$

**Def.** Sei  $f : M \rightarrow N$  ein Diffeomorphismus und  $X \in \chi(M)$ . Dann ist

$$f_* X : N \rightarrow TN, \quad x \mapsto f_{*f^{-1}(x)} X(f^{-1}(x))$$

**Def.** Ein Vektorfeld  $X \in \chi(G)$  heißt **linksinvariant**, wenn gilt:

$$\forall g, h \in G : X(g \cdot h) = lg_* h X(h).$$

Kürzer:  $\forall g \in G : lg_* X = X$ .

**Notation.**  $\mathcal{L}(G) := \{X \in \chi(G) \mid X \text{ ist linksinvariant}\} \subset \chi(G)$

*Bem.* Ein linksinvariantes VF  $X \in \chi(G)$  ist eindeutig bestimmt durch  $X(e)$ . Andererseits: Ist  $x \in T_e G$ , dann gibt es ein linksinvariantes VF  $X \in \chi(G)$  mit  $X(e) = x$ . Somit ist die Abbildung

$$i : \mathcal{L}(G) \rightarrow T_e G, \quad X \mapsto X(e)$$

ein Vektorraum-Isomorphismus.

**Lemma.** Seien  $X, Y \in \mathcal{L}(G)$ . Dann ist  $[X, Y] \in \mathcal{L}(G)$ .

**Korollar.**  $(\mathcal{L}(G), [-, -])$  ist eine  $\dim(G)$ -dimensionale Unter-Lie-Algebra von  $(\chi(G), [-, -])$ .

**Notation.**  $OJ := T_e G \cong \mathcal{L}(G)$

**Def.** Ein Skalarprodukt auf einem Vektorraum  $V$  ist eine symmetrische, positiv definite Bilinearform  $\langle -, - \rangle$ . Die davon induzierte Norm ist  $\|v\| := \sqrt{|\langle v, v \rangle|}$ .

**Def.** Eine **Riemannsche Metrik** auf einer diff. Mft  $M$  ist eine Familie  $g = (g_p)_{p \in M}$  von Skalarprodukten  $g_p : T_p M \times T_p M \rightarrow \mathbb{R}$ , die differenzierbar von  $p$  abhängt, d. h. für alle  $X, Y \in \chi(M)$  ist  $g(X, Y) : M \rightarrow \mathbb{R}, p \mapsto g_p(X(p), Y(p))$  differenzierbar ( $\mathcal{C}^\infty$ ). Das Tupel  $(M, g)$  heißt **Riemannsche Mannigfaltigkeit**.

*Bem.* Sei  $(U, \phi)$  eine Karte von  $M$ . Setze

$$g_{ij}^\phi : U \rightarrow \mathbb{R}, \quad p \mapsto g\left(\frac{\partial \phi}{\partial x^i} \Big|_p, \frac{\partial \phi}{\partial x^j} \Big|_p\right).$$

Seien  $X = \sum_{i=1}^n v^i \frac{\partial \phi}{\partial x^i}$  und  $Y = \sum_{j=1}^n w^j \frac{\partial \phi}{\partial x^j}$  zwei VF in  $U$ . Dann gilt

$$g(X, Y)(p) = g_p(X(p), Y(p)) = \sum_{i,j=1}^n v^i(p) w^j(p) g_{ij}(p).$$

**Def.** Seien  $(M, g_M)$ ,  $(N, g_N)$  Riemannsche Mannigfaltigkeiten. Eine Abbildung  $f : M \rightarrow N$  heißt **Isometrie**, wenn gilt:

- $f$  ist ein Diffeomorphismus
- $f$  erhält Riemannsche Metriken, d. h. für alle  $X, Y \in \chi(M)$  gilt:

$$g_M(X, Y) = g_N(f_* X, f_* Y) \circ f,$$

$$\text{also } \forall p \in M : \forall v, w \in T_p M : g_{M,p}(v, w) = g_{N,f(p)}(f_* v, f_* w).$$

**Def.** Sei  $(M, g)$  eine Riemannsche Mannigfaltigkeit. Dann ist

$$I(M, g) := \{f : M \rightarrow M \mid f \text{ Isometrie}\}$$

in kanonischer Weise eine Lie-Gruppe (Myers-Steenrod).

**Satz.** Jede diff'bare Mannigfaltigkeit hat eine Riemannsche Metrik.

**Bsp.** Das Oberer-Halbraum-Modell des hyperbolischen Raum ist

$$H^n := \{x \in \mathbb{R}^n \mid \langle x, e_n \rangle_{\text{eukl}} > 0\} \subseteq \mathbb{R}^n$$

mit dem offensichtlichen Atlas und der Riemannschen Metrik

$$g_p^{\text{Hyp}}((p, \tilde{v}), (p, \tilde{w})) := \frac{\langle \tilde{v}, \tilde{w} \rangle_{\text{eukl}}}{\langle p, e_n \rangle^2}.$$

**Def.** Eine diffbare Abbildung  $f : M \rightarrow N$  zwischen diff'baren Mften heißt **Immersion**, falls  $f_* p : T_p M \rightarrow T_{f(p)} N$  f. a.  $p \in M$  injektiv ist.

**Def.** Angenommen,  $N$  ist sogar eine Riemannsche Mft mit Metrik  $g_N$ . Dann erhalten wir eine Riemannsche Metrik auf  $M$ , die mit  $f$  **zurckgeholte Metrik**, durch

$$(f^* g_N)_p(v, w) := g_{N,f(p)}(f_* v, f_* w).$$

**Def.** Eine Immersion  $f : (M, g^M) \rightarrow (N, g^N)$  heißt **isometrisch**, falls  $g^M = f^* g^N$ .

**Prop.** Sei  $M$  eine zshgde Mft. Dann gibt es für alle  $p, q \in M$  einen stückweise diff'baren Weg  $\gamma : [0, 1] \rightarrow M$  mit  $\gamma(0) = p$  und  $\gamma(1) = q$ .

**Def.** Für  $\gamma : [a, b] \rightarrow M$  stückweise  $\mathcal{C}^1$  heißt

$$L(\gamma) := \int_a^b \|\dot{\gamma}(\tau)\| d\tau \quad \text{Länge von } \gamma.$$

**Def.** Sei  $(M, g)$  eine Riemannsche Mft. Dann ist der **Riemannsche Abstand** gegeben durch die Metrik

$$d_g : M \times M \rightarrow \mathbb{R}, \quad (p, q) \mapsto \inf \{ L(\gamma) \mid \gamma : [a, b] \rightarrow M \text{ stückweise } \mathcal{C}^1 \text{ mit } \gamma(a) = p \text{ und } \gamma(b) = q \}.$$

*Bem.* Nach dem Satz von Hopf-Rinow stimmt die von  $d_g$  induzierte Topologie mit der von  $M$  überein.

**Def.** Ein **Zusammenhang** (kov. Ableitung) ist eine Abb.

$$\nabla : \chi(M) \times \chi(M) \rightarrow \chi(M), \quad (X, Y) \mapsto \nabla_X Y$$

sodass für  $X, X_1, X_2, Y, Y_1, Y_2 \in \chi(M)$  und  $f \in \mathcal{C}^\infty(M)$  gilt:

- $\nabla_{X_1 + f X_2} Y = \nabla_{X_1} Y + f \nabla_{X_2} Y$
- $\nabla_X (Y_1 + Y_2) = \nabla_X Y_1 + \nabla_X Y_2$
- $\nabla_X (fY) = f(\nabla_X Y) + (X(f)) \cdot Y$  (Leibniz-Regel)

**Def.** Sei  $\nabla$  ein Zusammenhang auf  $M$ . Dann heißt

$$T^\nabla(X, Y) := \nabla_X Y - \nabla_Y X - [X, Y] \quad \text{Torsion von } \nabla.$$

Wenn  $T^\nabla \equiv 0$ , dann heißt  $\nabla$  **torsionsfrei**.

**Def.** Ein Zusammenhang  $\nabla$  auf einer Riemannschen Mft.  $(M, g)$  heißt **metrisch**, wenn gilt:

$$g(\nabla_X Y, Z) + g(Y, \nabla_X Z) = Xg(Y, Z)$$

**Theorem.** Auf jeder Riem. Mft.  $(M, g)$  gibt es genau einen torsionsfreien, metrischen Zusammenhang. Für diesen gilt:

$$2g(\nabla_X Y, Z) = Xg(Y, Z) + Yg(X, Z) - Zg(X, Y) + g([X, Y], Z) + g([Z, X], Y) + g([Z, Y], X)$$

**Def.** Der eindeutige torsionsfreie und metrische Zusammenhang auf  $(M, g)$  heißt **Levi-Civita-Zusammenhang** auf  $(M, g)$ .

*Bem.* Sei  $(M, g)$  eine Riemannsche Mft.,  $(U, \phi)$  eine Karte von  $M$ . Dann gibt es diff'bare Ftk.  $\Gamma_{ij}^k : U \rightarrow \mathbb{R}$  für  $i, j, k \in \{1, \dots, n\}$ , sodass

$$\nabla \left( \frac{\partial \phi}{\partial x^i} \right) \left( \frac{\partial \phi}{\partial x^j} \right) = \sum_{k=1}^n \Gamma_{ij}^k \frac{\partial \phi}{\partial x^k}.$$

Die Funktionen  $\Gamma_{ij}^k$  heißen **Christoffel-Symbole** von  $\nabla$ .

**Lemma.**  $\left[ \frac{\partial \phi}{\partial x^j}, \frac{\partial \phi}{\partial x^k} \right] = 0$

**Satz.** Für die Christoffel-Symbole gilt

$$\Gamma_{ij}^k = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^n g^{kl} \left( \frac{\partial^\phi}{\partial x^j} g_{il} + \frac{\partial^\phi}{\partial x^i} g_{jl} - \frac{\partial^\phi}{\partial x^l} g_{ij} \right),$$

wobei

$$g_{ij} : U \rightarrow \mathbb{R}, \quad p \mapsto g_p \left( \frac{\partial^\phi}{\partial x^i}(p), \frac{\partial^\phi}{\partial x^j}(p) \right)$$

$$g^{kl} : U \rightarrow \mathbb{R} \text{ definiert ist durch } \sum_{r=1}^n g^{jr} g_{rk} = \delta_k^j.$$

**Def.** Sei  $\nabla$  ein Zusammenhang auf  $M$ . Dann heißt  $X \in \chi(M)$  **parallel**, falls  $\nabla X : \chi(M) \rightarrow \chi(M)$ ,  $Y \mapsto \nabla_Y X$  verschwindet.

**Def.** Ein **Tensorfeld** vom Typ  $(j, k)$  mit  $k \in \mathbb{N}$  und  $j \in \{0, 1\}$  ist eine multilineare Abbildung

$$T : \chi(M) \times \dots \times \chi(M) \rightarrow \begin{cases} \mathcal{C}^\infty(M), & \text{falls } j = 0, \\ \chi(M), & \text{falls } j = 1, \end{cases}$$

**Bspe.** •  $T^\nabla : \chi(M) \times \chi(M) \rightarrow \chi(M)$  ist Tensor vom Typ  $(1, 2)$ .  
•  $\nabla Y : \chi(M) \rightarrow \chi(M)$ ,  $X \mapsto \nabla_X Y$  ist Tensor vom Typ  $(1, 1)$ .  
• Alternierende  $k$ -Formen auf  $\mathbb{R}^n$  sind Tensoren vom Typ  $(0, k)$ .  
• Riemannsche Metriken sind Tensorfelder vom Typ  $(0, 2)$ .

**Satz.** Sei  $T$  ein Tensorfeld auf  $M$  vom Typ  $(j, k)$ . Sei  $p \in M$ . Seien  $X_1, \dots, X_k \in \chi(M)$ . Dann hängt  $T(X_1, \dots, X_k)(p)$  nur von  $X_1(p), \dots, X_k(p)$  ab.

*Bem.* Sei  $(U, \phi)$  eine Karte von  $M$  und  $T$  ein Tensorfeld vom Typ  $(1, k)$  auf  $M$ . Dann gibt es Funktionen  $T_{i_1, \dots, i_k}^l$ , sodass

$$T\left(\frac{\partial^\phi}{\partial x^{i_1}}, \dots, \frac{\partial^\phi}{\partial x^{i_k}}\right) = \sum_{l=1}^n T_{i_1, \dots, i_k}^l \frac{\partial^\phi}{\partial x^l}.$$

**Notation.**  $\nabla_v Y := (\nabla_X Y)(p)$  für  $v \in T_p M$  und  $X$  ein VF mit  $X_p = v$  (wohldefiniert).

**Satz.** Sei  $\nabla$  ein Zusammenhang auf  $M$ . Sei  $p \in M$ ,  $v \in T_p M$  und  $Y, \tilde{Y} \in \chi(M)$ . Falls für eine diff'bare Kurve  $c : (-\epsilon, \epsilon) \rightarrow M$  gilt

$$c(0) = p, \quad \dot{c}(0) = 0 \quad \text{und} \quad \forall t \in (-\epsilon, \epsilon) : Y(c(t)) = \tilde{Y}(c(t)),$$

dann gilt  $\nabla_v Y = \nabla_v \tilde{Y}$ .

**Def.** Ein **VF längs einer Kurve**  $c : I \rightarrow M$  ist eine Abbildung

$$X : I \rightarrow TM \quad \text{mit} \quad X(t) = X_t \in T_{c(t)} M,$$

welche diff'bar ist, d. h. für alle  $t_0 \in I$  existiert eine Karte  $(U, \phi)$  um  $c(t_0)$ , sodass man schreiben kann

$$X(t) = \sum_{i=1}^n \xi^i(t) \frac{\partial^\phi}{\partial x^i} \Big|_{c(t)} \quad \text{für alle } t \in c^{-1}(U)$$

mit diff'baren Funktionen  $\xi^i : c^{-1}(U) \rightarrow \mathbb{R}$ .

*Bem.*  $X_t$  muss nicht Einschränkung eines VF auf  $M$  sein.

**Notation.**  $\chi_c := \{ \text{Vektorfelder längs } c \}$

*Bem.*  $\chi_c$  ist ein Modul über  $\mathcal{C}^\infty(I, \mathbb{R})$ .

**Satz.** Sei  $\nabla$  ein Zusammenhang auf  $M$ , sei  $c : I \rightarrow M$  eine diff'bare Kurve. Dann gibt es eine eindeutige Abbildung

$$\frac{\nabla}{dt} = \frac{D}{dt} = \frac{D^\nabla}{dt} : \chi_c \rightarrow \chi_c,$$

sodass für  $X, \tilde{X} \in \chi_c$ ,  $Y \in \chi(M)$  und  $f \in \mathcal{C}^\infty(I, \mathbb{R})$  gilt:

- $\frac{D}{dt}(X + \tilde{X}) = \frac{D}{dt}X + \frac{D}{dt}\tilde{X}, \quad \bullet \quad \frac{D}{dt}(f \cdot X) = f \cdot \frac{D}{dt}X + f'X,$
- $\frac{D(Y \circ c)}{dt} = \nabla_{\dot{c}} Y.$

**Def.**  $\frac{D}{dt}$  heißt von  $\nabla$  **induzierte kovariante Ableitung längs  $c$** .

**Satz.** Sei  $(M, g)$  eine Riem. Mft,  $\nabla$  der Levi-Civita-Zusammenhang und  $c : I \rightarrow M$  diff'bar. Dann gilt

$$\forall X, Y \in \chi_c : g(X, Y)' = g\left(\frac{DX}{dt}, Y\right) + g\left(X, \frac{DY}{dt}\right).$$

**Def.** Sei  $\nabla$  ein Zusammenhang auf  $M$ . Dann heißt  $X \in \chi_c$  **parallel (längs  $c$ )**, wenn  $\frac{DX}{dt} = 0$ .

*Bem.* Sei  $(U, \phi)$  eine Karte,  $\tilde{I} \subset I$  mit  $c(\tilde{I}) \subset U$ . In lokalen Koordinaten lässt sich Parallelität ausdrücken durch

$$(\xi^k)' + \sum_{i,j=1}^n \dot{c}^i(t) \xi^j(t) \Gamma_{ij}^k(c(t)) = 0 \quad \text{für } k = 1, \dots, n \text{ und alle } t \in \tilde{I}.$$

Für die Funktionen  $\xi^k$  ist das ein System linearer DGL mit nichtkonstanten Koeffizienten

$$\begin{pmatrix} \xi^1 \\ \vdots \\ \xi^n \end{pmatrix}' = A(t) \cdot \begin{pmatrix} \xi^1 \\ \vdots \\ \xi^n \end{pmatrix}$$

Dieses System ist linear beschränkt, es folgt daher die Existenz von parallelen Vektorfeldern in Kartenumgebungen.

**Satz.** Sei  $t_0 \in I = (a, b)$  und  $v \in T_{c(t_0)} M$  vorgegeben. Dann gibt es genau ein VF  $X \in \chi_X$  mit

$$\frac{DX}{dt} \equiv 0 \quad \text{und} \quad X(t_0) = v.$$

**Def.** Sei  $[a, b] \rightarrow M$  diff'bar. Die Abbildung

$$P_c : T_{c(a)} M \rightarrow T_{c(b)} M, \quad v \mapsto X^v(b), \quad \text{wobei} \quad \frac{DX^v}{dt} \equiv 0 \text{ und } X^v(a) = v,$$

heißt **Parallelverschiebung** längs  $c$  bzgl.  $\nabla$ .

**Satz.**  $P_c$  ist linear.

**Satz.** Ist  $(M, g)$  Riem. Mft und  $\nabla$  der LC-Zshg, dann gilt

$$g_{c(b)}(P_c(v), P_c(w)) = g_{c(a)}(v, w).$$

Mit anderen Worten:  $P_c$  ist eine lineare Isometrie.

*Bem.* Wir können nun die Definition der Ableitung als Limes des Differenzenquotienten auf Mften übertragen: Sei  $v \in T_x M$ ,  $X \in \chi(M)$  und  $c : (-\epsilon, \epsilon) \rightarrow M$  mit  $c(0) = x$  und  $\dot{c}(0) = v$ . Dann ist

$$\nabla_v X = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{P_{c(t)}^{-1}(X(c(t))) - X(c(0))}{t}$$

*Bem.* Parallelverschiebung ist auch möglich und sinnvoll entlang stückweise glatter Kurven.

**Def.** Die **Holonomiegruppe** von  $M$  in  $x \in M$  bzgl.  $\nabla$  ist  $\text{Hol}_x^\nabla := \{P_c : T_x M \rightarrow T_x M \mid c \text{ stückweise glatt mit } c(0) = c(1) = x.\}$  Dabei ist  $P_c \circ P_{\tilde{c}} = P_{c \circ \tilde{c}}$  und  $(P_c)^{-1} = P_{c^{-1}}$ .

*Bem.*  $\text{Hol}_x^\nabla$  ist sogar eine Lie-Gruppe und Untergr. von  $O(T_x M, g_x)$ .

**Def.** Eine glatte Kurve  $c : I \rightarrow M$  heißt **Geodäte** bzgl.  $\nabla$ , falls

$$\frac{D^\nabla \dot{c}}{dt} \equiv 0, \quad \text{d. h. das Tangential-VF } \dot{c} \text{ ist parallel längs } c.$$

*Bem.* Sei  $(U, \phi)$  eine Karte,  $\tilde{I} \subset I$  mit  $c(\tilde{I}) \subset U$ . In lokalen Koord. lässt sich diese Bed. ausdrücken durch die **Geodätengleichung**

$$(\ddot{c}^k)'(t) + \sum_{i,j=1}^n \dot{c}^i(t) \dot{c}^j(t) \Gamma_{ij}^k(c(t)) = 0 \quad \text{für } k = 1, \dots, n \text{ und alle } t \in \tilde{I}.$$

**Satz.** Zu jedem  $p \in M$  und  $v \in T_p M$  gibt es ein  $\epsilon > 0$  und genau eine Geodäte  $c : (-\epsilon, \epsilon) \rightarrow M$  mit  $c(0) = p$  und  $\dot{c}(0) = v$ .

**Satz.** Seien  $c_{1,2} : I_{1,2} \rightarrow M$  zwei Geodäten bzgl.  $\nabla$  mit  $0 \in I_1 \cap I_2$ . Falls  $c_1(0) = c_2(0)$  und  $\dot{c}_1(0) = \dot{c}_2(0)$ , dann gilt  $c_1|_{I_1 \cap I_2} \equiv c_2|_{I_1 \cap I_2}$ .

**Satz.** Gegeben  $p \in M$  und  $v \in T_p M$ , dann gibt es genau ein Intervall  $I_v \subseteq \mathbb{R}$  mit  $0 \in I_v$  und eine Geodäte

$$c_v : I_v \rightarrow M \quad \text{mit} \quad c_v(0) = p, \quad \dot{c}_v(0) = v,$$

die maximal im folgenden Sinn ist: Für jede Geodäte  $c : I \rightarrow M$  mit  $\dot{c}(0) = v$  gilt:  $I \subseteq I_v$  und  $c = c_v|_I$ .

**Notation.** Für  $v \in T_p M$  sei  $c_v : I_v \rightarrow M$  die zugeh. max. Geodäte.

**Def.** Ein Zshg  $\nabla$  auf  $M$  heißt **vollständig**, wenn  $\forall v \in TM : I_v = \mathbb{R}$ .

**Lemma (Spray-Eigenschaft).** Ist  $v \in T_p M$ ,  $c_v : I_v \rightarrow M$  die maximale Geodäte mit  $\dot{c}_v(0) = v$ . Sei  $\lambda \neq 0$ , dann ist

$$c_{\lambda v} : I_{\lambda v} \rightarrow M, \quad t \mapsto c_v(\lambda t) \quad \text{wobei} \quad I_{\lambda v} := \frac{1}{\lambda} I_v$$

die maximale Geodäte mit  $\dot{c}_{\lambda v}(0) = \lambda v$ .

**Def.** Sei  $M$  eine Mft mit Zshg  $\nabla$  und  $p \in M$ . Dann heißt

$$\text{Exp}_p : \widetilde{T_p M} \rightarrow M, \quad v \mapsto c_v(1), \quad \widetilde{T_p M} := \{v \in T_p M \mid 1 \in I_v\}$$

**Exponentialabbildung** von  $\nabla$  in  $p$ .

**Lemma.** •  $\widetilde{T_p M}$  ist sternförmig bzgl. 0

- $\forall v \in \widetilde{T_p M} : \forall t \in [0, 1] : \text{Exp}_p(tv) = c_v(t)$

**Satz.** • Es gibt eine offene Umgebung  $\hat{U} \subseteq T_p M$  mit  $0 \in \hat{U} \subseteq \widetilde{T_p M}$ , sodass  $\text{Exp}_p|_{\hat{U}} : \hat{U} \rightarrow M$  eine  $\mathcal{C}^\infty$ -Abbildung ist.

- Wir können  $\hat{U}$  so wählen, dass  $\text{Exp}_p|_{\hat{U}} : \hat{U} \rightarrow \text{Exp}_p(\hat{U})$  ein Diffeomorphismus ist.

*Bem.* Man kann zeigen: •  $\widetilde{T_p M} \subseteq T_p M$

- $\text{Exp}_p : \widetilde{T_p M} \rightarrow M$  ist überall  $\mathcal{C}^\infty$ , aber nicht überall ein lokaler Diffeomorphismus (Schnittpunkt-Phänomen)

- Ist  $(M, \nabla)$  geodätisch vollständig, dann gilt  $\widetilde{T_p M} = T_p M$ .

**Def.** Eine Kurve  $c : I \rightarrow M$  heißt **nach / proportional zur BL parametrisiert**, wenn gilt:

$$\|\dot{c}(t)\| \equiv 1 \quad / \quad \|\dot{c}(t)\| \equiv \text{konst.}$$

*Bem.* • Jede Geodäte ist proportional zur BL parametrisiert.

- Eine Kurve ist genau dann prop. zur BL parametrisiert, wenn es  $\alpha \geq 0$  gibt mit  $L(c|_{[a,b]}) = \alpha \cdot (b - a)$ .

**Def.** Eine **Variation** von  $c : [a, b] \rightarrow M$  ist eine  $\mathcal{C}^\infty$ -Abbildung

$$(-\epsilon, \epsilon) \times [a, b] \rightarrow M, \quad (s, t) \mapsto \alpha(s, t) \quad \text{mit} \quad \forall t \in [a, b] : \alpha(0, t) = c(t).$$

Sie heißt **Variation mit festen Endpunkten**, wenn zudem gilt:

$$\forall s \in (-\epsilon, \epsilon) : \alpha(s, a) = c(a) \wedge \alpha(s, b) = c(b)$$

**Sprechweise.**  $s$  heißt **Variationsparameter**

**Def.** Eine Variation einer stückweise glatten Kurve  $c : [a, b] \rightarrow M$  (mit  $c$  glatt auf den Teilintervallen  $[t_{i-1}, t_i]$ ) ist eine stetige Abb.

$$\alpha : (-\epsilon, \epsilon) \times [a, b] \rightarrow M, \quad (s, t) \mapsto \alpha_s(t) \quad \text{mit} \quad \alpha|_{(-\epsilon, \epsilon) \times [t_{i-1}, t_i]} \text{ ist } \mathcal{C}^\infty.$$

**Notation.** •  $\frac{\partial \alpha}{\partial s}(s_0, t_0)$  ist der Tang.-Vektor an  $s \mapsto \alpha(s, t_0)$  in  $s_0$ .

- $\frac{\partial \alpha}{\partial t}(s_0, t_0)$  ist der Tangentialvektor an  $s \mapsto \alpha(s_0, t)$  in  $t_0$ .

**Def.** Eine Abbildung  $X : (-\epsilon, \epsilon) \times [a, b] \rightarrow TM$  mit  $X(s, t) \in T_{\alpha(s, t)} M$  heißt **Vektorfeld längs  $\alpha$** , wenn  $X$  differenzierbar (bzw. stückweise diff'bar) ist.

**Notation.** Sei  $X$  ein VF längs  $\alpha(s, t)$ . Dann

$$\frac{DX}{\partial s}(s_0, t_0) := \frac{D}{ds}|_{s=s_0}(s \mapsto X(s, t_0))$$

$$\frac{DX}{\partial t}(s_0, t_0) := \frac{D}{dt}|_{t=t_0}(s \mapsto X(s_0, t))$$

**Lemma.**  $\frac{D}{\partial s} \frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{D}{\partial t} \frac{\partial \alpha}{\partial s}$

**Satz (1. Variationsformel).** Sei  $\alpha : (-\epsilon, \epsilon) \times [a, b] \rightarrow M$  eine  $\mathcal{C}^\infty$ -Variation von einer  $\mathcal{C}^\infty$ -Kurve  $c = \alpha_0 : [a, b] \rightarrow M$ . Sei  $\|\dot{c}(t)\| = \text{konst} \neq 0$ . Dann gilt mit  $X(t) := \frac{\partial \alpha}{\partial s}(0, t)$

$$\frac{d}{ds}|_{s=0} L(\alpha_s) = \frac{1}{\|\dot{c}\|} \left( g(X, \dot{c})|_a^b - \int_a^b g(X(\tau), \frac{D\dot{c}}{dt}) d\tau \right)$$

**Sprechweise.**  $X(t) := \frac{\partial \alpha}{\partial s}(0, t)$  heißt **Variationsvektorfeld** (VVF).

**Satz (1. Variationsformel** für stückweise glattes  $c$ ).

Sei  $\alpha : (-\epsilon, \epsilon) \times [a, b] \rightarrow M$  eine stückweise glatte Variation, glatt auf  $(-\epsilon, \epsilon) \times [t_{i-1}, t_i]$  mit  $a = t_0 < \dots < t_k = b$ . Dann ist

$$\frac{d\alpha_s}{ds}|_{s=0} = \frac{1}{\|\dot{c}\|} \left( g(X, \dot{c})|_a^b + \sum_{i=1}^{k-1} g(X(t_i), \nabla_i \dot{c}) - \int_a^b g(X, \frac{D\dot{c}}{dt}) dt \right)$$

$$\text{mit } \nabla_i \dot{c} = \dot{c}(t_i^-) - \dot{c}(t_i^+)$$

**Notation.**  $\dot{c}(t_i^+) = \lim_{t \downarrow t_i} \dot{c}(t), \quad \dot{c}(t_i^-) = \lim_{t \uparrow t_i} \dot{c}(t)$

**Satz.** Zu jedem (stückw.) glatten  $X \in \chi_c$  gibt es eine (stückw.) glatte Variation  $\alpha$  von  $c$  mit  $X = \frac{\partial \alpha}{\partial s}(0, t)$ . Wenn  $X(a) = X(b) = 0$ , so kann man  $\alpha$  als Variation mit festen Endpunkten wählen.

**Satz.** Für  $c : [a, b] \rightarrow M$  stückw. glatt mit  $\|\dot{c}\| = \text{konst}$  sind äquiv.:

- $c$  ist eine Geodäte
- $\frac{d}{ds}|_{s=0} L(\alpha_s) = 0$  für jede stückweise glatte Variation  $\alpha$  von  $c$  mit festen Endpunkten.

**Korollar.** Sei  $c : [a, b] \rightarrow M$  stückweise glatt und kürzeste stückweise Verbindung ihrer Endpunkte (d. h. für alle  $\tilde{c} : [a, b] \rightarrow M$  stückweise glatt mit  $c(a) = \tilde{c}(a)$  und  $c(b) = \tilde{c}(b)$  ist  $L(c) \leq L(\tilde{c})$ ). Dann ist  $c$  eine glatte Geodäte.

**Achtung.** Geodäten sind i. A. nicht global kürzeste Verbindungen, die Umkehrung gilt also nicht!

**Notation.**  $\Omega_{p,q} := \{c : [0, 1] \rightarrow M \mid c(0)=p, c(1)=q, c \text{ stückw. glatt}\}$

*Bem.* Geodäten sind „kritische Punkte“ von  $L : \Omega_{p,q} \rightarrow \mathbb{R}$  unter der Nebenbedingung  $\|\dot{c}\| = \text{konst.}$  Ersetzt man das Längenfunktional durch die Energie, so ist diese NB unnötig.

**Notation.**  $S_\rho(0) = \{x \in T_p M \mid \|x\| = \rho\}$

**Satz (Gaußlemma).** Sei  $(M, g)$  eine zshgde Riem. Mft,  $\nabla = \nabla^{LC}$ . Sei  $p \in M$  und  $\epsilon > 0$ , sodass

$$\text{Exp}_p|_{B_\epsilon(0)} : B_\epsilon(0) \rightarrow \text{Exp}_p(B_\epsilon(0))$$

ein Diffeo ist. Dann schneiden die radialen Geodäten

$$t \mapsto \text{Exp}_p(tv) = v_v(t), \quad v \in T_p M \setminus \{0\},$$

die Hyperflächen  $\text{Exp}_p(S_\rho(0))$ ,  $\rho \in (0, \epsilon)$  orthogonal.

**Satz.** Seien  $p \in M$ ,  $\epsilon > 0$ ,  $\rho \in [0, \epsilon)$  wie oben. Dann ist

$$c_v|_{[0, \delta]} : [0, \delta] \rightarrow M, \quad t \mapsto c_v(t) = \text{Exp}_p(tv) \quad (v \in T_p M, \|v\| = 1)$$

die kürzeste Verbindung ihrer Endpunkte, genauer:

Es gilt  $\delta = L(c_v|_{[0, \delta]}) \leq L(\gamma)$  für jedes  $\gamma : [a, b] \rightarrow M$  stückweise glatt mit  $\gamma(a) = p$ ,  $\gamma(b) = c_v(\delta)$ . Gleichheit gilt genau dann, wenn  $\gamma(t) = c_v(r(t))$  mit  $r : [a, b] \rightarrow [0, \delta]$  monoton wachsend.

**Def.**  $i(p) := \sup\{\epsilon > 0 \mid \text{Exp}_p|_{B_\epsilon(0)} \text{ ist Diffeo aufs Bild}\}$  heißt **Injektivitätsradius** von  $M$  in  $p$ .

**Satz.** Sei  $M$  eine zshgde Riemannsche Mannigfaltigkeit.

- Ist  $p \in M$ ,  $\epsilon \in (0, i(p))$ , dann ist

$$\text{Exp}_p(B_\epsilon(p)) = B_\epsilon(p) := \{q \in M \mid d(p, q) < \epsilon\},$$

$$\text{Exp}_p(S_\epsilon(p)) = S_\epsilon(p) := \{q \in M \mid d(p, q) = \epsilon\}.$$

- $d : M \times M \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$  ist eine Metrik.
- Die durch  $d$  ind. Topologie stimmt mit der gegebenen überein.

**Satz (Hopf-Rinow 1).** Sei  $M$  eine zshgde Riem. Mft,  $p \in M$ .

Angenommen, alle Geodäten  $\gamma$  auf  $M$  mit  $\gamma(0) = p$  sind auf ganz  $\mathbb{R}$  definiert (m.a.W:  $\text{Exp}_p$  ist auf ganz  $T_p M$  definiert). Dann gibt es für alle  $q \in M$  eine kürzeste Geodäte von  $p$  nach  $q$ .

**Satz (Hopf-Rinow 2).** Für eine zusammenhängende Riemannsche Mannigfaltigkeit  $M$  sind äquivalent:

- $M$  ist geodätisch vollständig.
- $\forall p \in M : \text{Exp}_p$  ist auf ganz  $T_p M$  definiert.
- Beschränkte und abgeschlossene Teilmengen von  $M$  sind kompakt.
- $M$  ist ein vollständiger metrischer Raum.

**Korollar.** Jede kompakte Riemannsche Mft ist geodätisch vollständig und zwei ihrer Punkte können durch eine kürzeste Geodäte verbunden werden.

**Korollar.** Unter-Mften des  $\mathbb{R}^n$  sind geodätisch vollständig.

**Def.** Sei  $\nabla$  ein Zusammenhang auf  $M$ , dann heißt

$$R^\nabla = R : \chi(M) \times \chi(M) \times \chi(M) \rightarrow \chi(M)$$

$$(X, Y, Z) \mapsto R(X, Y)Z := \nabla_X(\nabla_Y Z) - \nabla_Y(\nabla_X Z) - \nabla_{[X, Y]} Z$$

**Krümmungstensor** von  $\nabla$ .

*Bem.*  $R^\nabla$  ist ein (1,3)-Tensor.

**Notation.**  $R(u, v)w := (R(X, Y)Z)(p)$ , wobei  $X, Y, Z \in \chi(M)$  mit  $X(p) = u$ ,  $Y(p) = v$ ,  $Z(p) = w$ .

**Satz.** Es gilt für  $X, Y, Z, W \in \chi(M)$ :

- $-R(X, Y)Z = R(Y, X)Z$
- Falls  $\nabla$  torsionsfrei: **1. Bianchi-Identität / Jacobi-Identität:**

$$R(X, Y)Z + R(Z, X)Y + R(Y, Z)X = 0.$$

- Ist  $(M, g)$  Riemannsch und  $\nabla$  metrisch, dann gilt

$$g(R(X, Y)Z, W) = -g(R(X, Y)W, Z).$$

- Ist  $\nabla$  der LC-Zshg von  $(M, g)$  Riemannsch, dann ist

$$g(R(X, Y)Z, W) = g(R(Z, W)X, Y).$$

**Def.** Sei  $p \in M$ ,  $\sigma = \text{span}(v, w) \in T_p M$  ein 2-dim UVR. Dann heißt

$$\sec(\sigma) = \kappa(\sigma) := \frac{g(R(v, w)w, v)}{\|v\|^2 \cdot \|w\|^2 - g(v, w)^2}$$

**Riemannsche Schnittkrümmung** von  $\sigma$ .

**Lemma.**  $\sec(\sigma)$  ist unabhängig von der Basiswahl.

**Satz.** Sei  $\alpha : (-\epsilon, \epsilon) \times [a, b] \rightarrow M$  eine glatte Variation einer Kurve  $\alpha_0 : [a, b] \rightarrow M, t \mapsto \alpha(0, t)$ . Sei  $X : (-\epsilon, \epsilon, \times) [a, b] \rightarrow TM$  ein VF längs  $\alpha$ . Dann gilt:

$$\frac{D}{\partial s} \frac{DX}{\partial t} - \frac{D}{\partial t} \frac{DX}{\partial s} = R\left(\frac{\partial \alpha}{\partial s}, \frac{\partial \alpha}{\partial t}\right) X$$

**Satz (2. Variationsformel** für die Länge). Sei  $c : [a, b] \rightarrow M$  eine Geodäte,  $\alpha : (-\epsilon, \epsilon) \times [a, b] \rightarrow M$  eine glatte Variation von  $c$  mit festen Endpunkten,  $X(t) := \frac{\partial \alpha}{\partial s}(0, t) \in \chi_c$  das VVF mit  $X^\perp := X - g(X, \frac{\dot{c}}{\|\dot{c}\|}) \frac{\dot{c}}{\|\dot{c}\|}$  senkrecht zum Anteil zu  $\dot{c}$ . Dann gilt

$$\frac{d^2}{ds^2}|_{s=0} L(\alpha_s) = \frac{1}{\|\dot{c}\|} \int_a^b \left\| \frac{DX^\perp}{dt} \right\|^2 - g(R(X, \dot{c})\dot{c}, X) dt.$$



**Def.** Der **Durchmesser** einer Riemannschen Mft  $(M, g)$  ist

$$\text{diam}(M) := \sup\{d(p, q) \mid p, q \in M\}.$$

**Satz (Myers 1935).** Jede vollständige zshgde Riem. Mft. mit  $\text{sec} \geq \delta > 0$  ist kompakt mit Durchmesser  $\text{diam}(M) \leq \frac{\pi}{\delta}$ .

*Bem.* Das Bsp der Sphären zeigt: Die Schranke ist optimal.

**Korollar.** Sei  $M$  eine vollständige zshge Mft,  $\dim(M) \geq 2$  mit  $\text{sec} \geq \delta > 0$ . Dann ist  $\pi_1(M)$  endlich.

**Def.** Sei  $p \in M$ ,  $v \in T_p M$  mit  $\|v\| = 1$ ,  $v = e_1, e_2, \dots, e_n$  eine ONB von  $T_p M$ . Die **Ricci-Krümmung** von  $M$  in Richtung  $v$  ist dann

$$\text{Ric}(v) := \sum_{j=2}^n \text{sec}(\text{span}(v, e_j)).$$

*Bem.*  $\text{Ric}(v)$  ist unabhängig von der Wahl der ONB:

$$\begin{aligned} \text{Ric}(v) &= \sum_{j=2}^n \text{sec}(v, e_j) = \sum_{j=2}^n g(R(e_j, v)v, e_j) = \\ &= \sum_{j=1}^n g(R(e_j, v)v, e_j) = \text{spur}(x \mapsto R(x, v)v) \end{aligned}$$

**Def.**  $\text{Ric}_p : T_p M \times T_p M \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $(v, w) \mapsto \text{spur}(x \mapsto R(x, v)w)$  heißt **Ricci-Tensor**.

*Bem.* Der Ricci-Tensor ist ein (2,0)-Tensor und es gilt:

- $\text{Ric}_p(v, w) = \text{Ric}_p(w, v)$ , •  $\text{Ric}(v) = \text{Ric}(v, v)$ .

**Def.**  $(M, g)$  heißt **Einstein-Mft**, wenn die Ricci-Krümmung konstant ist, d. h.  $\forall p \in M : \forall x, y \in T_p M : \text{Ric}(x, y) = c \cdot g(x, y)$ .

**Beobachtung.** •  $\text{sec} \geq \delta \implies \text{Ric}(v) \geq (n-1)\delta$   
• Mften mit konstanter Schnittkrümmung sind Einstein.

**Satz (Myers).** Jede vollständige zshgde Riem. Mft. mit  $\text{Ric} \geq (n-1)\delta$  ist kompakt mit Durchmesser  $\text{diam}(M) \leq \frac{\pi}{\sqrt{\delta}}$ .

**Def.** Sei  $(M, g)$  eine Riem Mft,  $c : I \rightarrow M$  glatt,  $Y \in \chi_c$  heißt **Jacobi-Feld**, wenn die **Jacobi-Gleichung** gilt:

$$Y'' + R(Y, \dot{c})\dot{c} = 0 \quad (Y'' := \frac{D}{dt} (\frac{DY}{dt}))$$

*Bem.* Die Jacobi-Gleichung ist linear in  $Y$ , somit ist  $\{X \in \chi_c \mid X \text{ ist ein Jacobi-Feld}\}$  ein UVR von  $\chi_c$ .

**Satz.** Sei  $c : [a, b] \rightarrow M$  eine Geodäte,  $\alpha : (-\epsilon, \epsilon) \times [a, b] \rightarrow M$  eine glatte Variation von  $c = \alpha_0$  durch Geodäten (d. h.  $\alpha_s$  ist Geodäte für alle  $s \in (-\epsilon, \epsilon)$ ). Dann ist das VVF  $X = \frac{\partial \alpha}{\partial s}(0, t)$  ein Jacobi-Feld.

**Satz.** Sei  $c_0 : I \rightarrow M$  eine Kurve,  $t_0 \in I$ . Dann gibt es für alle  $v, w \in T_{c(t_0)}$  genau ein Jacobi-Feld  $Y \in \chi_c$  mit

$$Y(t_0) = v \quad \text{und} \quad Y'(t_0) = w.$$

**Satz.** Sei  $v \in T_p M$ ,  $w \in T_p M \cong T_v(T_p M)$ . Dann gilt  $(\text{Exp}_p)_* v(w) = Y(1)$ , wobei  $Y \in \chi_c$  ein Jacobi-Feld längs  $c_v(t) = \text{Exp}_p(tv)$  mit  $Y(0) = 0$  und  $Y'(0) = w$ .

**Satz.** Sei  $Y$  ein Jacobifeld längs Geodäten  $c$  in  $(M, g)$ .

Wenn  $\text{sec} \leq 0$ , dann gilt

- $(t \mapsto \|Y(t)\|^2)$  ist konvex.
- Wenn  $Y$  zwei verschiedene Nullstellen hat, dann  $Y \equiv 0$ .
- Es gibt keine konjugierten Punkte längs  $c$ .

**Korollar.** Falls  $(M, g)$  vollständig mit  $\text{sec} \leq 0$ , dann ist  $\text{Exp}_p$  für alle  $p$  ein lokaler Diffeomorphismus, d. h.

$$\forall v \in M : \exists U_v \Subset T_p M : \text{Exp}_p|_{U_v} : U_v \rightarrow \text{Exp}_p(U_v) \text{ ist Diffeo.}$$

**Satz.** Sei  $X$  wegzshgd,  $Y$  einfach zshgd,  $\pi : X \rightarrow Y$  eine Überlagerung. Dann ist  $\pi$  ein Homöomorphismus.

**Def.** Eine Abbildung  $\pi : (M_1, g_1) \rightarrow (M_2, g_2)$  zwischen Riemannsche Mften heißt **Riemannsche Überlagerung**, wenn gilt:

- $\pi$  ist eine topologische Überlagerung
- $\pi$  ist diffbar
- $\pi^* p : T_p M_1 \rightarrow T_{\pi(p)} M_2$  ist eine orthogonale Abb f. a.  $p \in M_1$ .

**Satz.** Sei  $\pi : (M_1, g_1) \rightarrow (M_2, g_2)$  eine surj. lokale Isometrie zw. Riem Mften. Wenn  $M_1$  vollständig ist, dann ist  $\pi$  eine Überlagerung.

**Satz (Cartan-Hadamard).** Sei  $(M, g)$  eine vollständige, zshgde Riemannsche Mft. mit Schnittkrümmung  $\text{sec} \leq 0$ ,  $p \in M$ . Dann ist  $\text{Exp}_p : T_p M \rightarrow M$  eine Überlagerung.

**Korollar.** Falls  $(M^n, g)$  zusätzlich einfach zshgd ist, dann gilt  $M \cong \mathbb{R}^n$ . Je zwei Punkte in  $M$  lassen sich durch genau eine nach BL param. Geodäte verbinden (bis auf Umkehrung, Parametershift).

**Satz (Synge 1936).** Jede zshgde kompakte orientierte Riem Mft gerader Dimension mit  $\text{sec} > 0$  ist einfach zshgd.

**Satz (Weinstein 1968, Synge 1936).** Sei  $M^n$  kompakte, zshgde, orientierte Riem Mft,  $\text{sec} > 0$ ,  $n$  gerade. Sei  $f : M^n \rightarrow M^n$  eine orientierungstreue Isometrie. Dann hat  $f$  einen Fixpunkt.

**Def.**  $\text{Iso}(M) := \{\tau : M \rightarrow M \mid \tau \text{ Isometrie}\}$  heißt **Isometriegruppe**.

**Prop.** Sei  $(M, g)$  eine vollständige Riem Mft,  $p \in M$ . Seien  $f, g \in \text{Iso}(M)$ . Wenn  $f(p) = g(p)$  und  $f_* p = g_* p$ , dann gilt  $f \equiv g$ .

**Def.** Eine zshgde Riem Mft  $P$  heißt **Symmetrischer Raum**, wenn

$$\forall p \in P : \exists s_p \in \text{Iso}(P) : s_p(p) = p \quad \wedge \quad (s_p)_* p = -\text{id}_{T_p M}.$$

**Sprechweise.**  $s_p$  heißt **(geodätische) Spiegelung** in  $p$ .

**Lemma.** Sei  $P$  ein symmetrischer Raum,  $\gamma : (-\epsilon, \epsilon) \rightarrow P$  eine Geodäte,  $p = \gamma(0)$ . Dann gilt  $\forall t \in (-\epsilon, \epsilon) : (s_p \circ \gamma)(t) = \gamma(-t)$ .

**Lemma.** Sei  $P$  ein symm. Raum,  $\gamma : (-\epsilon, \epsilon) \rightarrow P$  eine Geodäte,  $\gamma(0) = p$ ,  $\tau \in (-\epsilon, \epsilon)$ ,  $q := \gamma(\tau)$ . Dann gilt  $(s_q \circ s_p)(\gamma(t)) = \gamma(t + 2\tau)$ , wenn  $t + 2\tau \in (-\epsilon, \epsilon)$ .

**Korollar.** Symmetrische Räume sind geodätisch vollständig.

**Def.** Eine Riem Mft heißt **homogen** (homogener Raum), wenn

$$\forall p, q \in P : \exists f \in \text{Iso}(M, g) : f(p) = q.$$

**Lemma.** Symmetrische Räume sind homogen.

**Lemma.** Sei  $P$  ein symm Raum,  $p, q \in P$ ,  $f \in \text{Iso}(P)$  mit  $f(p) = q$ . Dann gilt  $s_q = f \circ s_p \circ f^{-1}$ .

**Korollar.** Ist  $(M, g)$  eine homogene zshgde Riem Mft, sodass

$$\exists m \in M : \exists s_m \in \text{Iso}(M) : s_m(m) = m \quad \wedge \quad (s_m)_* m = -\text{id}_{T_p M}.$$

Dann ist  $M$  ein symmetrischer Raum.

**Def.** Sei  $M$  eine Mft mit Zshg  $\nabla$ . Sei  $T$  ein Tensorfeld auf  $M$  vom Typ  $(1, k)$ . Dann ist  $\nabla T$  das durch

$$(\nabla T)(X_1, \dots, X_k, Y) := \nabla_Y(T(X_1, \dots, X_k)) - \sum_{i=1}^k T(X_1, \dots, \nabla_Y X_i, \dots, X_k)$$

definierte Tensorfeld vom Typ  $(1, k+1)$ .

**Bsp.** Sei  $(M, g)$  Riem,  $\nabla = \nabla^{LC}$ . Dann gilt  $\nabla g = 0$  ( $\nabla$  metrisch).

**Def.**  $T$  heißt **parallel**, wenn  $\nabla T = 0$ .

**Satz.**  $P$  symmetrisch  $\implies \nabla^{LC} R = 0$

*Bem.* Die Umkehrung gilt nur lokal.

**Notation.** Sei  $P$  im Folgenden ein symmetrischer Raum.

**Def.** Eine **Transvektion** von  $P$  ist eine Isometrie der Form

$$t_{pq} = s_p \circ s_q \quad \text{mit } p, q \in P,$$

d. h. ein Produkt geodätischer Spiegelungen.

**Bsp.** Im  $\mathbb{R}^n$  sind Transvektionen genau die Translationen.

**Def.** Die von den Transvektionen erzeugte abgeschl. Untergruppe

$$\text{Trans}(P) := \langle t_{pq} \mid p, q \in P \rangle_c$$

heißt **Transvektionsgruppe** von  $P$ .

**Lemma.** Sei  $\gamma : \mathbb{R} \rightarrow P$  eine Geodäte,  $p = \gamma(0)$ ,  $X \in \chi_c$  parallel. Sei

$$Y := (s_p)_* X : \mathbb{R} \rightarrow TP, \quad t \mapsto (s_p)_{*c(t)} X(t)$$

Dann gilt  $Y(t) = -X(-t)$ .

**Lemma.** Sei  $\gamma : \mathbb{R} \rightarrow P$  eine Geodäte. Dann gilt f. a.  $\tau \in \mathbb{R}$ :

- $(t_{\gamma(\tau)\gamma(0)} \circ \gamma)(t) = \gamma(t + 2\tau)$
- $(t_{\gamma(\tau)\gamma(0)}_* X)(t) = X(t + 2\tau)$  für  $X \in \chi_\gamma$  parallel.

**Lemma.** Sei  $\gamma : \mathbb{R} \rightarrow P$  eine Geodäte. Dann ist die Abbildung

$$t^\gamma : \mathbb{R} \rightarrow \text{Iso}(P), \quad \tau \mapsto t_{\gamma(\tau)\gamma(0)}$$

eine Ein-Parameter-Untergruppe.

**Def.** Sei  $\gamma$  eine Geodäte. Die Ein-Parameter-UG  $t^\gamma$  von  $\text{Iso}(P)$  heißt **Transvektion** längs  $\gamma$ .

**Satz.** Jede maximale Geodäte in  $P$  ist Bahn einer Ein-Parameter-Untergruppe von Isometrien, nämlich von  $\gamma(\tau) := (t^\gamma(\tau))(c(0))$ .

**Def.**  $\lambda \in \mathbb{R}_{\geq 0}$  heißt **Periode** einer Geodäten  $\gamma$ , wenn f. a.  $t \in \mathbb{R}$  gilt:  $\gamma(t) = \gamma(t + \gamma)$ . Die Menge aller Perioden wird mit  $P_\gamma$  bezeichnet.

**Lemma.** Sei  $b > a$  und  $c(a) = c(b)$ . Dann ist  $\lambda := b - a \in P_\gamma$ .

**Korollar.** Hat eine Geodäte  $\gamma$  in  $P$  einen Selbstschnitt, so ist  $\gamma$  periodisch. Sei  $\lambda_0$  die minimale nichttriviale Periode einer nichttrivialen Geodäten  $\gamma$  in  $P$ . Dann ist  $c|_{[t, t+\lambda_0)}$  injektiv für alle  $t$ .

**Satz (Sphärensatz).** Sei  $M^n$  eine kompakte, einfach zshgde Riem. Mft. mit  $\frac{1}{4} < \sec \leq 1$ . Dann ist  $M$  diffeomorph zur  $n$ -Sphäre.

**Def.** Sei  $M$  eine Riem. Mft,  $p \in M$ .

$\text{Iso}_p(M) := \{f \in \text{Iso}(M) \mid f(p) = p\}$  heißt **Isotropiegruppe** von  $p$ .

**Lemma.** Seien  $p, q \in M$ ,  $f \in \text{Iso}(M)$  mit  $f(p) = q$ . Dann ist

$$\text{Iso}_q(M) = \{f \circ g \circ f^{-1} \mid g \in \text{Iso}_p(M)\}.$$

*Bem.* Ist  $M$  homogen, so sind alle Isotropiegruppen isomorph.

*Bem.* Sei  $M$  zshgd, vollständig. Dann ist

$$\phi : \text{Iso}_p(M) \rightarrow O(T_p M), \quad f \mapsto f_{*p}$$

ein injektiver Gruppenhomomorphismus.

**Satz.**  $\phi(\text{Iso}_p(M))$  ist abgeschlossen in  $O(T_p M)$ , also kompakt.

**Def.** Sei  $M$  eine Riem. Mft,  $p \in M$ . Dann heißt

$$\text{Hol}_p(M) := \{P_c \mid c : [0, 1] \rightarrow M \text{ stückw. reg. Kurve, } c(0) = c(1) = p\}$$

**Holonomiegruppe** von  $p$  ( $\text{Hol}_p(M) \subseteq O(T_p M)$ ).

**Satz.** Sei  $P$  ein sym. Raum. Dann ist  $\text{Hol}_p(P) \subseteq \phi(\text{Iso}_p(P))$ .

*Bem.* • Umkehrung: Sei  $M$  einfach zshgde, Riem. Mft. mit  $\text{Hol}_p(M) \subseteq \phi(\text{Iso}_p(M))$ . Dann ist  $P$  ein symmetrischer Raum.

- Für  $P = \mathbb{R}^n$ ,  $p = 0$  gilt  $\text{Hol}_p(P) \subsetneq \phi(\text{Iso}_p(P))$ .
- Für eine zshgde, vollst. Riem. Mft.  $M$  gilt:

$$\begin{aligned} \phi(\text{Iso}_p(M)) &= \text{Normalisator von } \text{Hol}_p(M) \text{ in } O(T_p M) \\ &= \{g \in O(T_p M) \mid g \text{Hol}_p g^{-1} = \text{Hol}_p\}. \end{aligned}$$

**Def.** Eine **Darstellung** einer Gruppe  $G$  ist ein Gruppenhomomorphismus  $\rho : G \rightarrow \text{GL}(V)$  mit  $V$  ein Vektorraum.

**Def.** Eine Darstellung  $\rho : G \rightarrow \text{GL}(V)$  einer Gruppe heißt **irreduzibel**, wenn gilt:

$$\forall U \subset V \text{ UVR} : (\forall g \in G : \rho(g)(U) = U) \implies U \in \{\{0\}, V\}.$$

**Satz** (de Rham). Sei  $(M, g)$  eine einfach zshgde vollständige Riem. Mft. Dann ist  $M$  isometrisch zu einem Riemannschen Produkt

$$M \cong M_0 \times M_1 \times \dots \times M_k \quad \text{mit}$$

- $M_0$  ist ein euklidischer VR (evtl.  $\{0\}$ )
- $M_1, \dots, M_k$  sind vollständige, einfach zshgde, unzerlegbare (im Sinne dieses Satzes) Riem Mft, für die gilt:  $\text{Hol}_{p_j}(M_j)$  wirkt irreduzibel auf  $T_{p_j} M_j$ .

**Def.** Eine Riem. Mft  $(M, g)$  heißt **Isotropie-irreduzibel**, wenn gilt: Für alle  $p \in M$  wirkt  $\text{Iso}_p(M)$  irreduzibel auf  $T_p M$ .

**Satz.** Sei  $P$  ein zshgder, de-Rham-unzerlegbarer sym. Raum. Dann ist  $P$  Isotropie-irreduzibel.

**Lemma.** Sei  $(M, g)$  ein Isotropie-irreduzibler homogener Raum und  $B : TM \times TM \rightarrow \mathbb{R}$  ein symmetrischer  $(0, 2)$ -Tensor. Angenommen,  $B$  ist Isometrie-invariant, d. h.

$$\forall f \in \text{Iso}(P) : \forall p \in M : \forall x, y \in T_p M : B_{f(p)}(f_{*p}x, f_{*p}y) = B_p(x, y).$$

Dann gilt  $\exists \lambda \in \mathbb{R} : B = \lambda \cdot g$ .

**Satz.** Sei  $M$  ein zshgder Isotropie-irred. homogener Raum. Dann ist  $M$  Einsteinsch.