

Mitschrieb: Differentialtopologie II
SS 18

tensor.produkt@gmx.de

13. Juni 2018

Vorwort

Dies ist ein Mitschrieb der Vorlesungen vom 16.04.18 bis zum ... des Kurses DIFFERENTIALTOPOLOGIE II an der Universität Heidelberg.

Dieses Dokument wurde „live“ in der Vorlesung getext. Sämtliche Verantwortung für Fehler übernimmt alleine der Autor dieses Dokumentes.

Auf Fehler kann gerne hingewiesen werden bei folgende E-Mail-Adresse

tensor.produkt@gmx.de

Ferner kann bei dieser E-Mail-Adresse auch der Tex-Code für dieses Dokument erfragt werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung in die Riemannsche Geometrie	5
1.1	Überblick und Ideen	5
1.2	Die Lie-Klammer	11
1.3	Die Lie-Ableitung	15
1.4	Riemannsche Mannigfaltigkeiten	19
1.5	Zusammenhänge	25
1.6	Der Levi-Civita-Zusammenhang	31
1.7	Geodätische Kurven	35
1.8	Krümmung	44
1.9	Jacobi-Felder	53
1.10	Konjugationspunkte	59
1.11	Vollständige Mannigfaltigkeiten	61
1.12	Überlagerungen	66
2	Morse-Theorie	73
2.1	Crash-Kurs: Zellkomplexe und Homologie	73
2.2	Morse-Theorie	80

Kapitel 1

Einführung in die Riemannsche Geometrie

1.1 Überblick und Ideen

Bisher können wir durch die äußere Ableitung

$$d : \Omega^p(M) \rightarrow \Omega^{p+1}(M)$$

nur Differentialformen auf glatten Mannigfaltigkeiten ableiten, aber keine anderen Objekte wie zum Beispiel Vektorfelder. Wir können also auch nicht über Phänomene aus der Physik wie Beschleunigung zum Beispiel sprechen.

Ziel Wir wollen einen Rahmen finden, in dem Objekte wie zum Beispiel Vektorfelder abgeleitet werden können.

1.1.1 Beispiel

Sei $f : M \rightarrow \mathbb{R}$ eine glatte Funktion. Gilt $df = 0$ und ist M zusammenhängend, so ist f konstant.

Hätten wir für ein Vektorfeld ξ eine Ableitung $d\xi$, dann sollte die Gleichung $d\xi = 0$ implizieren, dass ξ *konstant* ist.

Ist zum Beispiel ξ auf $M = \mathbb{R}^n$ konstant, so ist ξ parallel, im Sinne von, die einzelnen Tangentialvektoren, die im Bild von ξ liegen, sind parallel.

Somit impliziert eine Ableitung für Vektorfelder ein Konzept von *Parallelismus*.

Vorlesung
vom
16.04.18

Problem Ein Konzept von Parallelismus kann nicht über Karten erklärt werden, weil Kartenwechsel im Allgemeinen nicht winkeltreu sind.

1.1.2 Beispiel

Sei $M = S^2 \subset \mathbb{R}^3$ die zweidimensionale Einheitssphäre. Sei $p \in S^2$ und $\xi(p) \in T_p S^2$. γ sei ein Großkreis, der durch p in Richtung $\xi(p)$ geht. Ist p_1 ein weiterer Punkt auf γ , so lässt sich $\xi(p)$ *naiv* wie gewohnt in \mathbb{R}^3 von p auf p_1 verschieben. Dies hat das offensichtliche Problem, das der so parallel verschobene Vektor im Allgemeinen nicht tangential an S^2 anliegt.

Diesen kann man nun orthogonal auf den Tangentialraum $T_{p_1} S^2$ projizieren. Dadurch erhält man einen Tangentialvektor $\xi(p_1) \in T_{p_1} S^2$. Durch dieses Prozedere lässt sich ξ glatt auf S^2 fortsetzen. Wählt man weitere Punkte p_i auf γ , die gegen einen Punkt q am Äquator konvergieren und für die gilt

$$d(p_i, p_{i+1}) \longrightarrow 0$$

dann erhalten wir einen Vektor $\xi(q) \in T_q S^2$. Dies nennt man den **Paralleltransport** von $\xi(p)$ entlang γ zu $\xi(q)$.

Allerdings kann man $\xi(p)$ auch entlang eines weiteren Großkreises γ_1 verschieben. Verschiebt man entlang γ_1 wieder auf den Äquator und von dort wieder auf q , so erhält man einen anderen Tangentialvektor auf q .

Neues Phänomen Für allgemeine Mannigfaltigkeiten hängt der Paralleltransport vom Weg γ ab; im Gegensatz zum Euklidischen Raum.

1.1.3 Zurück zu Ableitungen von Vektorfeldern ξ

Auf M sei Parallelismus gegeben (zum Beispiel ist M eingebettet im \mathbb{R}^n). $p \in M$ sei ein Punkt und $v \in T_p M$ sei ein Tangentialvektor. ξ sei ein Vektorfeld auf M .

Sei γ eine glatte Kurve mit $\gamma(0) = p$ und $\dot{\gamma}(0) = v$. q sei ein Punkt auf γ . Durch den vorgegebenen Parallelismus lässt sich $\xi(p)$ entlang γ verschieben. D. h., im Punkt q haben wir die Vektoren $\xi(q)$ und $\tau_p^q \xi(p)$, wobei $\tau_p^q \xi(p)$ der Paralleltransport von $\xi(p)$ nach q entlang γ ist.

Idee Betrachte

$$\xi(q) - \tau_p^q \xi(p) \in T_p M$$

für $d(p, q) \rightarrow 0$. Dies bezeichnet man dann auch als die **kovariante Ableitung** von ξ in Richtung v

$$\nabla_v \xi \in T_q M$$

∇_v nennt man dabei einen **Zusammenhang**. Diese hat folgende Eigenschaften:

- ∇_v ist $\Omega^0(M)$ -linear in v , d. h.

$$\nabla_{\lambda v + w}(\xi) = \lambda \nabla_v(\xi) + \nabla_w(\xi)$$

für glatte Funktionen $\lambda : M \rightarrow \mathbb{R}$.

- Sie ist \mathbb{R} -linear im zweiten Argument

$$\nabla_v(\xi + \eta) = \nabla_v(\xi) + \nabla_v(\eta)$$

- Ist $f : M \rightarrow \mathbb{R}$ linear, so liegt folgende Produktregel vor

$$\nabla_v(f \cdot \xi) = f \cdot \nabla_v(\xi) + \nabla_v(f) \cdot \xi$$

wobei

$$\nabla_v f := v(f)$$

1.1.4 Geodätische

Sei γ eine (glatte) Kurve auf M . γ heißt eine **Geodätische**, falls gilt

$$\nabla_{\dot{\gamma}} \dot{\gamma} = 0$$

Obige Bedingung ist in lokalen Koordinaten eine Differentialgleichung zweiter Ordnung.

Physikalisch gesprochen verschwindet die Beschleunigung. Geometrisch gesprochen ist γ parallel entlang γ .

1.1.5 Beispiel

Sei M eine Riemannsche Fläche im \mathbb{R}^3 . Die Gleichung

$$\nabla_{\dot{\gamma}} \dot{\gamma} = 0$$

bedeutet

$$\ddot{\gamma} \perp M$$

D. h., die Euklidische zweite Ableitung steht orthogonal auf der Fläche M .

1.1.6 Beispiel

- Geraden sind Geodätische im Euklidischen Raum.
- Großkreise sind Geodätische auf Sphären.
- Allgemein sind Geodätische lokal kürzeste Kurven.

1.1.7 Parallelogramme

Sei $p \in M$. μ, λ seien zwei Geodätische, die sich im Punkt p schneiden mit $\mu(0) = \lambda(0) = p$.

μ, λ seien parametrisiert durch die Bogenlänge, d. h.,

$$\left| \dot{\lambda}(t) \right| = \left| \dot{\mu}(t) \right| = 1$$

für alle t . Setze $v := \dot{\mu}(0)$ und $w := \dot{\lambda}(0)$. Sei $\varepsilon > 0$.

Indem wir w entlang μ verschieben, erhalten wir einen Vektor \bar{w} auf $\mu(\varepsilon)$ und analog einen Vektor \bar{v} auf $\lambda(\varepsilon)$.

Es gilt

$$\|\bar{v}\| = \|\bar{w}\| = 1$$

da der Paralleltransport eine Isometrie ist, wenn die Riemannsche Metrik kompatibel ist zum Zusammenhang ∇ .

Indem man \bar{v} und \bar{w} durch durch Bogenlänge parametrisierte Geodätische fortsetzt, erhält man Geodätische $\bar{\mu}$ und $\bar{\lambda}$. Dadurch erhält man dann Punkte $\bar{\lambda}(\varepsilon)$ und $\bar{\mu}(\varepsilon)$.

Im Euklidischen würden die beiden Punkte zusammen fallen und das Parallelogramm schließen. Für allgemeine Riemannsche Mannigfaltigkeiten muss dies nicht der Fall sein, aber es gilt

$$d(\bar{\mu}(\varepsilon), \bar{\lambda}(\varepsilon)) \in O(\varepsilon^2)$$

Vorlesung
vom
18.04.18

1.1.8 Definition

Definiere die **Torsion** des Zusammenhangs durch

$$T(\xi, \eta) := \nabla_\xi \eta - \nabla_\eta \xi - [\xi, \eta]$$

wobei $[\xi, \eta]$ die **Lie-Klammer**¹ der beiden Vektorfelder ξ und η bezeichnet.

T ist ein **Tensor**, d. h., $\mathcal{C}^\infty(M)$ -linear.

∇ heißt **symmetrisch** bzw. **torsionsfrei**, falls $T = 0$.

1.1.9 Lemma

Ist ∇ symmetrisch, dann gilt sogar

$$d(\bar{\mu}(\varepsilon), \bar{\lambda}(\varepsilon)) \in O(\varepsilon^3)$$

Sei $u \in T_p(M)$ ein weiterer Tangentialvektor. u_1 sei der Paralleltransport von u entlang $\lambda\bar{\mu}$. u_2 sei der Paralleltransport entlang $\mu\bar{\lambda}$.

Es liegt dann folgende asymptotische Gleichheit vor

$$||u_1 - u_2|| \sim \varepsilon^2 R(v, w)u$$

$R(v, w)u$ heißt **Riemannscher Krümmungstensor**. Er ist definiert durch

$$R(v, w)u := \nabla_v \nabla_w u - \nabla_w \nabla_v u - \nabla_{[v, w]} u$$

Wir werden nun im Folgenden mit den Formalen Definitionen beginnen.

¹Lassen sich die beiden Vektorfelder als Koordinatenrichtungen schreiben, so gilt zum Beispiel $[\frac{\partial}{\partial x_i}, \frac{\partial}{\partial x_j}] = 0$

1.2 Die Lie-Klammer

Sei M im Folgenden eine glatte n -dimensionale Mannigfaltigkeit und $X, Y : M \rightarrow \mathcal{T}M$ glatte Vektorfelder auf M .

1.2.1 Lemma

Es existiert genau ein glattes Vektorfeld Z auf M , sodass gilt

$$Z(f) = X(Y(f)) - Y(X(f))$$

für alle $f \in \mathcal{C}^\infty(M)$. Beachte, $X(f)$ bezeichnet die glatte Funktion, die sich ergibt durch

$$X(f)(p) := X(p)(f)$$

Beweis

- Eindeutigkeit:

Sei $p \in M$. $\{x_i\}$ seien lokale Koordinaten bei p . X, Y lassen sich dann schreiben durch

$$X = \sum_i a_i \frac{\partial}{\partial x_i} \quad \text{und} \quad Y = \sum_j b_j \frac{\partial}{\partial x_j}$$

und es gilt

$$\begin{aligned} X(Yf) &= X \left(\sum_j b_j \frac{\partial f}{\partial x_j} \right) \\ &= \sum_i a_i \sum_j \frac{\partial}{\partial x_i} \left(b_j \frac{\partial f}{\partial x_j} \right) \\ &= \sum_{i,j} a_i \frac{\partial b_j}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} + \sum_{i,j} a_i b_j \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i} \end{aligned}$$

bzw.

$$Y(Xf) = \sum_{i,j} b_j \frac{\partial a_i}{\partial x_j} \frac{\partial f}{\partial x_i} + \sum_{i,j} b_j a_i \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}$$

In der Differenz ergibt sich

$$\begin{aligned} X(Yf) - Y(Xf) &= \sum_{i,j} a_i \frac{\partial b_j}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} - \sum_{i,j} b_i \frac{\partial a_j}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \\ &= \sum_{i,j} \left(a_i \frac{\partial b_j}{\partial x_i} - b_i \frac{\partial a_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial f}{\partial x_j} \end{aligned}$$

Lokal ist Z also bestimmt durch

$$Z = \sum_{i,j} \left(a_i \frac{\partial b_j}{\partial x_i} - b_i \frac{\partial a_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial}{\partial x_j}$$

- Existenz:

Durch obige Formel ist für jedes lokale Koordinatensystem ein Z gegeben. Diese lassen sich global zu einem glatten Vektorfeld auf ganz M zusammen setzen.

□

1.2.2 Definition

Definiere nun die **Lie-Klammer** von X und Y durch

$$Z := [X, Y] = XY - YX$$

1.2.3 Bemerkung

Die Lie-Klammer hat folgende Eigenschaften

- $[X, Y] = -[Y, X]$
- Für $a, b \in \mathbb{R}$ gilt

$$[aX_1 + bX_2, Y] = a[X_1, Y] + b[X_2, Y]$$

- Iteration: Für beliebige Vektorfelder X, Y, Z gilt

$$[[X, Y], Z] = [XY - YX, Z] = XYZ - YXZ - ZXY + ZYX$$

und

$$[[Y, Z], X] = [YZ - ZY, X] = YZX - ZYX - XYZ + XZY$$

und

$$[[Z, X], Y] = [ZX - XZ, Y] = ZXY - XZY - YZX + YXZ$$

Durch Aufsummieren ergibt sich

$$[[X, Y], Z] + [[Y, Z], X] + [[Z, X], Y] = 0$$

Dies nennt sich die **Jacobi-Identität**.

- Seien $f, g \in C^\infty(M)$. Es gilt

$$\begin{aligned} [fX, gY] &= fX(gY) - gY(fX) \\ &= f(X(g)Y - gXY) - g(Y(f)X - fYX) \\ &= fg[X, Y] + fX(g)Y - gY(f)X \end{aligned}$$

Da eine Mannigfaltigkeit lokal wie \mathbb{R}^n aussieht, lassen sich die bekannten Sätze zu Existenz, Eindeutigkeit und Abhängigkeit von Anfangsbedingungen von gewöhnlichen Differentialgleichungen von \mathbb{R}^n auf M verallgemeinern.

1.2.4 Satz

Sei M eine glatte Mannigfaltigkeit, X ein glattes Vektorfeld auf M , $p \in M$ ein Punkt. Dann existiert eine offene Umgebung $U \subset M$ von p und ein $\delta > 0$ zusammen mit einer Abbildung

$$\varphi : (-\delta, \delta) \times U \longrightarrow M$$

sodass $t \mapsto \varphi(t, p)$ die eindeutige Lösung von

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \varphi(t, q) &= X(\varphi(t, q)) & \forall q \in U \\ \varphi(0, q) &= q \end{aligned}$$

ist.

Schreibweise:

$$\varphi_t(p) := \varphi(t, p)$$

Die glatte Abbildung

$$\varphi_t : U \rightarrow M$$

heißt **Fluss** von X (in der Umgebung von p).

1.2.5 Bemerkung

Sei $|s|, |t|, |s+t| < \delta$. Betrachte

$$\gamma_1(t) := \varphi(t, \varphi(s, p))$$

Das impliziert

$$\dot{\gamma}_1 = X(\gamma_1) \qquad \gamma_1(0) = \varphi(s, p)$$

und

$$\gamma_1(t) := \varphi(t+s, p)$$

impliziert

$$\dot{\gamma}_2 = X(\gamma_2) \qquad \gamma_2(0) = \varphi(s, p)$$

Aus der Eindeutigkeit folgt nun

$$\gamma_1 = \gamma_2$$

D. h.,

$$\varphi_{s+t} = \varphi_s \circ \varphi_t$$

Insbesondere gilt

$$\text{Id}_M = \varphi_t \circ \varphi_{-t}$$

Daraus folgt, dass jedes φ_t ein Diffeomorphismus ist. Die Menge aller $\{\varphi_t\}_t$ nennt man eine **Einparameter-Untergruppe** von Diffeomorphismen.

1.3 Die Lie-Ableitung

Seien X, Y zwei Vektorfelder auf M , $p \in M$ ein Punkt.

Sei φ_t der Fluss auf X mit

$$\frac{\partial}{\partial t} \varphi(t, p) = X(\varphi_t(p)) \quad \text{und} \quad \varphi_0(p) = p$$

Definiere nun die **Lie-Ableitung** durch

$$(L_X Y)(p) := \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} (Y_p - (d\varphi_h)(Y_{\varphi_{-h}(p)})) \in T_p(M)$$

wobei $Y_p = Y(p)$, $d\varphi_h = \varphi_{h,*}$. Die Lie-Ableitung leitet das Vektorfeld Y bzgl. dem Fluss von X im Punkt p ab.

1.3.1 Proposition

Es gilt

$$L_X Y = [X, Y]$$

Für den Beweis dieser Proposition benötigen wir ein Lemma:

Idee Sei $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ glatt mit $f(0) = 0$. f hat die Taylor-Entwicklung

$$f(t) = t f'(0) + \frac{t^2}{2} f''(0) + \dots =: t \cdot g(t)$$

Es gilt

$$f(t) = t g(t)$$

und $f'(0) = g(0)$.

Wir brauchen nun folgende Verallgemeinerung dieser Beobachtung:

1.3.2 Lemma

Sei M eine Mannigfaltigkeit, $f : (-\varepsilon, \varepsilon) \times M \rightarrow \mathbb{R}$ glatt, $f(0, p) = 0$ für alle $p \in M$. Dann existiert eine glatte Funktion $g : (-\varepsilon, \varepsilon) \times M \rightarrow \mathbb{R}$ mit

$$f(t, p) = t \cdot g(t, p) \quad \text{und} \quad \frac{\partial f}{\partial t}(0, p) = g(0, p)$$

Beweis

Wir definieren g durch

$$g(t, p) := \int_0^1 \left(\frac{\partial f}{\partial s} \right) (s \cdot t, p) ds$$

Der Rest ist nachrechnen.

□

Beweis: 1.3.1

Sei $f \in \mathcal{C}^\infty(M)$. Wir wollen Folgendes zeigen.

$$(L_X Y)(f) = [X, Y](f) = XYf - YXf$$

Definiere die Hilfsfunktion

$$h(t, p) := f(\varphi_t(p)) - f(p).$$

Da $h(0, p) = 0$, existiert aufgrund des Lemmas ein g mit

$$h(t, p) = t \cdot g(t, p) \quad \text{und} \quad \frac{\partial h}{\partial t}(0, p) = g(0, p).$$

Es gilt

$$f \circ \varphi_t = f + tg_t$$

und

$$X_p(f) = \left(\frac{\partial}{\partial t} \varphi_t(p) \right) (f) = \frac{\partial}{\partial t} f(\varphi_t(p)) = \frac{\partial h}{\partial t}(0, p) = g(0, p).$$

Durch die erste der beiden obigen Gleichungen erhalten wir

$$\begin{aligned} (d\varphi_h)(Y_{\varphi_{-h}(p)})(f) &= Y_{\varphi_{-h}(p)}(f \circ \varphi_h) \\ &= Y_{\varphi_{-h}(p)}(f + tg_t). \end{aligned}$$

Setzt man dies in die Lie-Ableitung ein, so erhält man

$$\begin{aligned} (L_X Y)(f) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} (Y_p - (d\varphi_h)(Y_{\varphi_{-h}(p)})(f)) \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} (Y_p - (Y_{\varphi_{-h}(p)})(f)) - \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} (h(Y_{\varphi_{-h}(p)})(g_h)). \end{aligned}$$

Da gilt

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} (h(Y_{\varphi_{-h}(p)})(g_h)) = \lim_{h \rightarrow 0} (Y_{\varphi_{-h}(p)})(g_h) = Y_p(g_0) = YXf,$$

folgt

$$\begin{aligned} (L_X Y)(f) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} ((Yf)_p - (Yf)_{\varphi_{-h}(p)}) - Y_p Xf \\ &= X_p Yf - Y_p Xf. \end{aligned}$$

□

Folgerungen

$$L_Y X = -L_X Y, \quad L_X X = 0$$

Seien Vektorfelder X, Y gegeben. Man kann zeigen, dass lokale Koordinaten x_1, \dots, x_n existieren mit

$$X = \frac{\partial}{\partial x_1}.$$

Gilt ferner

$$Y = \frac{\partial}{\partial x_2},$$

so folgt

$$[X, Y] = \frac{\partial \partial}{\partial x_1 \partial x_2} - \frac{\partial \partial}{\partial x_2 \partial x_1} = 0.$$

Insofern ist das Verschwinden von $[X, Y]$ eine notwendige Bedingung für die Existenz von lokalen Koordinaten x_1, \dots, x_n mit

$$X = \frac{\partial}{\partial x_1} \quad \text{und} \quad Y = \frac{\partial}{\partial x_2}.$$

1.3.3 Geometrische Interpretation der Lie-Klammer

Seien X, Y Vektorfelder. φ und ψ seien korrespondierende Flüsse, $p \in M$ sei ein Punkt. Setze

$$c(h) := \psi_{-h} \varphi_{-h} \psi_h \varphi_h(p).$$

Die Zuordnung $h \mapsto c(h)$ definiert eine glatte Kurve. Man kann zeigen

$$\dot{c}(h) = 0.$$

Für Kurven $\gamma(t)$ mit $\dot{\gamma}(0) = 0$ lässt sich die zweite Ableitung definieren durch

$$\ddot{\gamma}(t)(0) := \frac{d^2}{dt^2}_{t=0} f(\gamma(t)).$$

Dann ist $\ddot{\gamma}(0)$ eine Derivation.

Daraus folgt, dass $\ddot{c}(0)$ definiert ist, und es gilt

$$\ddot{c}(0) = 2[X, Y]_p.$$

1.4 Riemannsche Mannigfaltigkeiten

Sei M eine glatte, n -dimensionale Mannigfaltigkeit.

1.4.1 Definition

Eine **Riemannsche Metrik** auf M ist eine Zuordnung

$$p \mapsto \langle \cdot | \cdot \rangle_p$$

für $p \in M$, wobei $\langle \cdot | \cdot \rangle_p$ jeweils ein inneres Produkt² auf $T_p M$ ist. Ferner soll diese Zuordnung **glatt** sein in dem Sinne, dass für lokale Koordinaten (U, x) die Funktionen

$$g_{i,j}(p) := \left\langle \frac{\partial}{\partial x_i}(p) \mid \frac{\partial}{\partial x_j}(p) \right\rangle_p$$

für alle i, j glatt sind auf U .

Wir werden manchmal $g(p)$ anstatt $\langle \cdot | \cdot \rangle_p$ schreiben.

Das Paar $(M, \langle \cdot | \cdot \rangle)$ heißt **Riemannsche Mannigfaltigkeit**.

1.4.2 Definition

Ein Diffeomorphismus $\varphi : (M, \langle \cdot | \cdot \rangle_M) \rightarrow (N, \langle \cdot | \cdot \rangle_N)$ heißt **Isometrie**, falls für alle $p \in M$ und $u, v \in T_p M$ gilt

$$\langle u, v \rangle_{M,p} = \langle d\varphi_p u, d\varphi_p v \rangle_{N,\varphi(p)}.$$

(1) 1.4.3 Beispiel

Sei $M = \mathbb{R}^n$. x seien die Standardkoordinaten auf \mathbb{R}^n . Setzt man

$$\left\langle \frac{\partial}{\partial x_i}, \frac{\partial}{\partial x_j} \right\rangle_p = \delta_{i,j}$$

so erhält man die euklidische Metrik auf \mathbb{R}^n .

- (2) Sei $f : M \rightarrow N$ eine glatte Immersion. $(N, \langle \cdot | \cdot \rangle_N)$ sei eine Riemannsche Mannigfaltigkeit, M eine glatte Mannigfaltigkeit. Dann induziert f eine Riemannsche Metrik $\langle \cdot | \cdot \rangle_M$ auf M durch

$$\langle u|v \rangle_M := \langle df(u), df(v) \rangle_N.$$

Da df injektiv ist, ist $\langle u|v \rangle_{M,p}$ positiv definit.

²Inneres Produkt heißt hier eine symmetrische, positiv definite Bilinearform.

(3) **1.4.4 Beispiel**

Es bezeichne $S^n = \{(x_1, \dots, x_{n+1}) \in \mathbb{R}^{n+1} \mid x_1^2 + \dots + x_{n+1}^2 = 1\}$ die Einheitssphäre. Durch die Einebettung $S^n \subset \mathbb{R}^{n+1}$ erhalten wir eine Riemannsche Metrik auf S^n . S^n zusammen mit dieser Metrik nennt man **Standardsphäre**.

- (4) **Produktmetrik:** Seien $(M, g_M), (N, g_N)$ zwei Riemannsche Mannigfaltigkeiten. π_1, π_2 seien die korrespondierenden Projektionen von $M \times N$ auf M bzw. N . Seien $u, v \in T_{(p,q)}(M \times N)$, setze

$$\langle u, v \rangle_{p,q} := \langle d\pi_1(u), d\pi_1(v) \rangle_{M,p} + \langle d\pi_2(u), d\pi_2(v) \rangle_{N,q}.$$

$\langle u, v \rangle_{p,q}$ ist eine Riemannsche Metrik auf $M \times N$, die sogenannte **Produktmetrik**.

(5) **1.4.5 Beispiel**

Betrachte $T^n := S^1 \times \dots \times S^1$. Ist S^1 mit der Standardmetrik versehen, so induziert uns dies eine Produktmetrik auf T^n . In diesem Fall spricht man vom **flachen Torus**.

Für $n = 2$ kann man T^2 in den \mathbb{R}^3 einbetten. Dadurch erhält man eine andere induzierte Metrik auf T^2 , die nicht äquivalent zu obiger Produktmetrik ist. Diese beiden Tori sind nicht isometrisch.

1.4.6 Proposition

Jede glatte Mannigfaltigkeit besitzt eine Riemannsche Metrik.

Beweis

Sei $\{(U_\alpha, x_\alpha)\}$ eine offene Überdeckung von M durch Karten und $\{f_\alpha\}$ eine glatte Partition der Eins bzgl. dieser Überdeckung.

Über U_α betrachte man die eindeutige Riemannsche Metrik g^α , sodass

$$(U_\alpha, g^\alpha) \xrightarrow{x_\alpha} (\mathbb{R}^n, g_{eukl})$$

eine Isometrie ist. Auf M erhält man nun eine Riemannsche Metrik durch

$$g_p := \sum_{p \in U_\alpha} f_\alpha(p) g_p^\alpha.$$

□

1.4.7 Definition

Sei $c : \mathbb{R} \rightarrow M$ eine glatte Kurve. Ein **Vektorfeld entlang einer Kurve** c ist eine glatte Zuordnung

$$t \longmapsto V(t) \in T_{c(t)}M$$

1.4.8 Bemerkung

Ein Vektorfeld entlang einer Kurve lässt sich im Allgemeinen nicht auf ein Vektorfeld einer offenen Umgebung der Kurve fortsetzen. Zum Beispiel könnte sich die Kurve selbst schneiden und V die Ableitung der Kurve sein.

Notation Wir schreiben auch für $v \in T_pM$

$$\|v\| := \sqrt{\langle v|v \rangle_p}$$

1.4.9 Definition

Für eine Kurve c definiere wir die **Länge** durch

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

Vorlesung
vom
25.04.18

Sei (M, g) eine Riemannsche Mannigfaltigkeit, die obendrein orientiert ist. (U, x) und (V, y) seien orientierte Karten auf M , die sich schneiden. Wir erinnern an folgendes Lemma aus Differentialtopologie I.

1.4.10 Lemma

Auf $U \cap V$ gilt

$$f dx_1 \wedge \dots \wedge dx_n = g dy_1 \wedge \dots \wedge dy_n$$

genau dann, wenn

$$f = \det \left(\frac{\partial y_i}{\partial x_j} \right) g$$

gilt.

Auf einer orientierten Karte U sind Funktionen $g_{i,j} : U \rightarrow \mathbb{R}$ gegeben durch

$$g_{i,j} = \left\langle \frac{\partial}{\partial x_i} \middle| \frac{\partial}{\partial x_j} \right\rangle$$

für $p \in U$. Setze ferner $X_i := \frac{\partial}{\partial x_i}$.

Sei e_1, \dots, e_n eine Orthonormalbasis (ONB) für $T_p M$ bzgl. g_p . Dann lässt sich X_i darstellen durch

$$X_i = \sum_j a_{i,j} e_j.$$

Wir erhalten so eine $n \times n$ -Matrix $A := (a_{i,j})_{i,j}$. Es gilt

$$\begin{aligned} g_{i,j} &:= \langle X_i | X_j \rangle \\ &= \left\langle \sum_k a_{i,k} e_k \middle| \sum_l a_{j,l} e_l \right\rangle \\ &= \sum_{k,l} a_{i,k} a_{j,l} \langle e_k | e_l \rangle \\ &= \sum_k a_{i,k} a_{j,k}. \end{aligned}$$

Daraus folgt

$$(g_{i,j})_{i,j} = A A^T.$$

Dies impliziert insbesondere

$$\det(g_{i,j}) = \det(A)^2 > 0.$$

Insbesondere ist $\sqrt{\det(g_{i,j})} = |\det A|$ wohldefiniert. Durch den Transformationssatz folgt nun im Punkt p

$$\text{vol}(X_1, \dots, X_n) = |\det A| \cdot \text{vol}(e_1, \dots, e_n) = |\det A|,$$

da $\text{vol}(e_1, \dots, e_n) = 1$. Daraus folgt insbesondere

$$\text{vol}\left(\frac{\partial}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_n}\right) = \sqrt{\det(g_{i,j})}.$$

Auf (V, y) erhält man analog

$$\text{vol}(Y_1, \dots, Y_n) = \sqrt{\det(h_{i,j})}.$$

für

$$Y_i = \frac{\partial}{\partial y_i}$$

und

$$h_{i,j} = \langle Y_i | Y_j \rangle.$$

Man erhält hierdurch

$$\begin{aligned} \sqrt{\det(h_{i,j})} &= \text{vol}(Y_1, \dots, Y_n) \\ &= \det\left(\frac{\partial x_i}{\partial y_j}\right) \text{vol}(X_1, \dots, X_n) \\ &= \det\left(\frac{\partial x_i}{\partial y_j}\right) \sqrt{\det(g_{i,j})}. \end{aligned}$$

Mit dem obigen Lemma folgt nun auf $U \cap V$

$$\sqrt{\det(g_{i,j})} dx_1 \wedge \dots \wedge dx_n = \sqrt{\det(h_{i,j})} dy_1 \wedge \dots \wedge dy_n.$$

Durch Verkleben erhalten wir eine glatte n -Form $\nu \in \Omega^n(M)$.

1.4.11 Definition

ν heißt **Riemannsche Volumenform** von M . ν ist durch die Riemannsche Metrik eindeutig festgelegt.

1.4.12 Definition

Wenn M kompakt ist, setzen wir

$$\text{vol}(M) := \int_M \nu < \infty.$$

$\text{vol}(M)$ heißt das **Riemannsche Volumen**.

Wenn $\text{vol}(K)$ unbeschränkt ist über kompakte Untermannigfaltigkeiten (mit Rand) $K \subset M$, dann sagen wir, dass M unendliches Volumen habe.

1.4.13 Bemerkung

Oft sieht man in der Literatur $\nu = dV = d\text{vol}$, obwohl ν im Allgemeinen nicht im Bild des Randhomomorphismus

$$d : \Omega^{n-1}(M) \longrightarrow \Omega^n(M)$$

liegt.

1.5 Zusammenhänge

Sei $\Gamma(\mathcal{T}M)$ der Vektorraum der glatten Schnitte von $\mathcal{T}M$, d. h., $\Gamma(\mathcal{T}M)$ ist der Vektorraum der glatten Tangentialvektorfelder auf M .

1.5.1 Definition

Ein **Zusammenhang** auf M ist eine Abbildung

$$\begin{aligned}\nabla : \Gamma(\mathcal{T}M) \times \Gamma(\mathcal{T}M) &\longrightarrow \Gamma(\mathcal{T}M) \\ (X, Y) &\longmapsto \nabla_X Y,\end{aligned}$$

sodass:

(1) Für $f, g \in \mathcal{C}^\infty(M)$ gilt

$$\nabla_{fX_1 + gX_2} Y = f\nabla_{X_1} Y + g\nabla_{X_2} Y.$$

(2) Ferner gilt

$$\nabla_X (Y_1 + Y_2) = \nabla_X Y_1 + \nabla_X Y_2.$$

(3) Zuletzt wird folgende Produktregel gefordert

$$\nabla_X (f \cdot Y) = f\nabla_X Y + X(f)Y.$$

In Lokalen Koordinaten Sei (U, x) eine Karte. X, Y seien Vektorfelder der Gestalt

$$X = \sum_i a_i \frac{\partial}{\partial x_i}, \quad Y = \sum_j b_j \frac{\partial}{\partial y_j}.$$

Es gilt

$$\begin{aligned}\nabla_X Y &= \sum_i a_i \nabla_{\frac{\partial}{\partial x_i}} \left(\sum_j \frac{\partial}{\partial y_j} \right) \\ &= \sum_i a_i \sum_j \nabla_{\frac{\partial}{\partial x_i}} \left(b_j \frac{\partial}{\partial y_j} \right) \\ &= \sum_{i,j} a_i \left(\frac{\partial b_j}{\partial x_i} \frac{\partial}{\partial y_j} + b_j \nabla_{\frac{\partial}{\partial x_i}} \frac{\partial}{\partial y_j} \right).\end{aligned}$$

Wir dröseln die Terme $\nabla_{\frac{\partial}{\partial x_i}} \frac{\partial}{\partial y_j}$ weiter auf und erhalten

$$\nabla_{\frac{\partial}{\partial x_i}} \frac{\partial}{\partial y_j} = \sum_k \Gamma_{i,j}^k \frac{\partial}{\partial x_k}.$$

Die Funktionen $\Gamma_{i,j}^k$ nennt man **Christoffel-Symbole** des Zusammenhangs. Wir erhalten final

$$\begin{aligned} \nabla_X Y &= \sum_{i,k} a_i \left(\frac{\partial b_k}{\partial x_i} \frac{\partial}{\partial x_k} + \sum_{j} a_j b_j \sum_k \Gamma_{i,j}^k \frac{\partial}{\partial x_k} \right) \\ &= \sum_k \left(\sum_i a_i \frac{\partial b_k}{\partial x_i} + \sum_{i,j} a_i b_j \Gamma_{i,j}^k \right) \frac{\partial}{\partial x_k}. \end{aligned}$$

1.5.2 Bemerkung

Die Gleichung

$$\nabla_X Y = \sum_k \left(\sum_i a_i \frac{\partial b_k}{\partial x_i} + \sum_{i,j} a_i b_j \Gamma_{i,j}^k \right) \frac{\partial}{\partial x_k}$$

impliziert, dass $\nabla_X Y$ eine lokale Operation ist. Denn für $p \in M$ gilt

$$(\nabla_X Y)(p) = \sum_k \left(\sum_i a_i(p) \frac{\partial b_k}{\partial x_i}(p) + \sum_{i,j} a_i(p) b_j(p) \Gamma_{i,j}^k(p) \right) \frac{\partial}{\partial x_k} \Big|_p.$$

D. h., $(\nabla_X Y)(p)$ hängt nur von $X(p), Y(p)$ und $\frac{\partial b_k}{\partial x_i}(p)$ ab.

1.5.3 Definition

Sei $V = V(t)$ ein Vektorfeld entlang einer Kurve $c(t)$ in M .

Eine **kovariante Ableitung** ist eine Zuordnung

$$\frac{D}{dt} : \mathcal{V}_c \longrightarrow \mathcal{V}_c,$$

wobei \mathcal{V}_c den Raum aller Vektorfelder entlang c bezeichnet, sodass

$$(1) \quad \frac{D}{dt}(V + W) = \frac{D}{dt}V + \frac{D}{dt}W$$

- (2) und $\frac{D}{dt}(fV) = f\frac{D}{dt}V + \frac{\partial f}{\partial t}V$ für $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ glatt gelten.
- (3) Wenn ferner ein Vektorfeld X auf M existiert mit $X(c(t)) = V(t)$, dann soll gelten

$$\nabla_{\dot{c}}X = \frac{D}{dt}(V).$$

1.5.4 Proposition

Sei M eine glatte Mannigfaltigkeit mit Zusammenhang ∇ . Sei c eine Kurve auf M . Dann existiert eindeutig eine kovariante Ableitung $\frac{D}{dt}$ mit obigen Eigenschaften.

Beweis

- Eindeutigkeit: Sei $V(t)$ ein Vektorfeld entlang $c(t)$. In lokalen Koordinaten x_1, \dots, x_n :

$$V(t) = \sum_i v_i(t) \frac{\partial}{\partial x_i}, \quad c(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t))$$

Es gilt dann

$$\begin{aligned} \frac{D}{dt}V &= \sum_i \left(v_i \frac{D}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial x_i|_{c(t)}} \right) + v'_i \frac{\partial}{\partial x_i} \right) \\ &= \sum_i \left(v_i \nabla_{\dot{c}(t)} \frac{\partial}{\partial x_i} + v'_i \frac{\partial}{\partial x_i} \right). \end{aligned}$$

- Existenz: Sei (U_α, x^α) eine offene Überdeckung von M durch Karten. Definiere $\frac{D}{dt}$ auf U_α durch

$$\frac{D}{dt}V := \sum_i \left(v_i \nabla_{\dot{c}(t)} \frac{\partial}{\partial x_i} + v'_i \frac{\partial}{\partial x_i} \right).$$

Auf $U_\alpha \cap U_\beta$ stimmen diese $\frac{D}{dt}$ überein wegen Eindeutigkeit und definieren somit $\frac{D}{dt}$ überall.

□

1.5.5 Proposition

Sei c eine Kurve in M , $p = c(0)$. Sei ferner $V^0 \in T_p M$ ein Tangentialvektor. Dann existiert genau ein Vektorfeld V entlang c mit

$$\frac{D}{dt}V = 0$$

und

$$V(0) = V^0.$$

1.5.6 Definition

Sei V ein Vektorfeld entlang einer Kurve c . V heißt **parallel** entlang c , falls

$$\frac{D}{dt}V = 0.$$

1.5.7 Proposition

Sei c eine Kurve in M und $V^0 \in T_{c(t_0)}M$ ein Vektor bei $c(t_0)$. Dann existiert genau ein Vektorfeld $V(t)$ entlang $c(t)$, das die Eigenschaften

$$\begin{aligned} V(t_0) &= V^0 \\ \frac{D}{dt}V &= 0 \end{aligned}$$

erfüllt.

Beweis

- Existenz und Eindeutigkeit in lokalen Koordinaten:
Existiert so ein V , so gilt

$$0 = \frac{D}{dt}V = \sum_k (v'_k + \sum_{i,j} x'_i v_j \Gamma_{i,j}^k) \frac{\partial}{\partial x_k}.$$

Daraus folgt

$$v'_k = - \sum_{i,j} (x'_i \Gamma_{i,j}^k) v_j$$

für alle $k = 1, \dots, n$. Dadurch ergibt sich ein System von linearen gewöhnlichen Differentialgleichungen. Aus der Theorie der gewöhnlichen Differentialgleichungen wissen wir, dass es in kleinen Umgebungen von t eindeutige Lösungen für $v_k(t)$ gibt für alle t . Da obiges DGL linear ist, sind die $v_k(t)$ für alle $t \in \mathbb{R}$ definiert.

- Globale Existenz:
Sei $t_1 > t_0$ beliebig. Der Kurvenabschnitt $c[t_0, t_1]$ ist kompakt und wird folglich überdeckt durch endlich viele Karten. Man kann nun eine lokale Lösung von Karte zu Karte fortsetzen. Die lokalen Lösungen stimmen auf den Durchschnitten der Karten überein wegen ihrer Eindeutigkeit.

□

1.5.8 Bemerkung

1.) Wir erhalten folgende Abbildung

$$\begin{aligned}\tau : T_{c(t_0)}M &\longrightarrow T_{c(t_1)}M \\ V^0 &\longmapsto V(t_1).\end{aligned}$$

Diese Abbildung nennt man den **Paralleltransport** von $c(t_0)$ nach $c(t_1)$ entlang c .

Die Linearität des vorangegangenen Differentialgleichungssystems stellt die Linearität von τ sicher. Durch Umkehren der Zeit erhält man eine lineare Abbildung

$$\tau' : T_{c(t_1)}M \longrightarrow T_{c(t_0)}M.$$

Naheliegenderweise gilt

$$\tau' = \tau^{-1}.$$

Hierdurch folgt insbesondere, dass τ ein Isomorphismus ist. D.h., wir können Tangentialräume an verschiedenen Punkten mittels Paralleltransporte vergleichen.

Daher die Terminologie *Zusammenhang*.

2.) $\frac{D}{dt}V$ ordnet auch Vektoren an Punkten mit $\dot{c}(t) = 0$ zu. Diese Vektoren müssen nicht Null sein!

1.5.9 Beispiel

Wenn $c(t) = p$ konstant ist, dann ist $V(t)$ eine Kurve in T_pM . $\frac{D}{dt}V$ ist dann einfach die Ableitung von $V(t)$ nach t , also $V'(t)$ im euklidischen Sinne.

1.6 Der Levi-Civita-Zusammenhang

Sei (M, g) eine Riemannsche Mannigfaltigkeit.

1.6.1 Definition

Ein Zusammenhang ∇ auf M heißt **kompatibel** mit der Riemannschen Metrik g , falls für jede Kurve c und für alle parallele Vektorfelder V, W entlang c gilt:

$$\langle V, W \rangle = \text{konst.}$$

d. h., der Paralleltransport ist in diesem Fall sogar eine Isometrie.

1.6.2 Proposition

g und ∇ sind genau dann kompatibel, wenn für alle Vektorfelder V, W entlang einer beliebigen Kurve c gilt

$$\frac{\partial}{\partial t} \langle V, W \rangle = \left\langle \frac{D}{dt} V, W \right\rangle + \left\langle V, \frac{D}{dt} W \right\rangle.$$

Beweis

\Leftarrow) Seien V, W parallele Vektorfelder entlang c . Dann gilt

$$\frac{\partial}{\partial t} \langle V, W \rangle = \left\langle \frac{D}{dt} V, W \right\rangle + \left\langle V, \frac{D}{dt} W \right\rangle = \langle 0, W \rangle + \langle V, 0 \rangle = 0.$$

$\langle V, W \rangle$ ist als Funktion in t konstant.

\Rightarrow) \langle, \rangle und ∇ seien kompatibel. Sei $\{P_1(t_0), \dots, P_n(t_0)\} \subset T_{c(t_0)}M$ eine Orthonormalbasis. Durch den Paralleltransport erhalten wir die parallelen Vektorfelder P_1, \dots, P_n entlang c .

Durch die Kompatibilität bleiben die P_1, \dots, P_n an jeder Stelle auf c eine Orthonormalbasis. Seien V, W nun beliebige Vektorfelder entlang c . Wir können dann schreiben

$$V = \sum_i v_i P_i \quad \text{und} \quad W = \sum_j w_j P_j.$$

Es gilt dann

$$\frac{D}{dt}V = \sum_i (v'_i P_i + v_i \frac{D}{dt}P_i) = \sum_i v'_i P_i.$$

Und somit

$$\left\langle \frac{D}{dt}V, W \right\rangle = \left\langle \sum_i v'_i P_i, \sum_j w_j P_j \right\rangle = \sum_{i,j} v'_i w_j \langle P_i, P_j \rangle = \sum_i v'_i w_i.$$

Und analog

$$\left\langle V, \frac{D}{dt}W \right\rangle = \sum_i v_i w'_i.$$

Zusammen also

$$\left\langle \frac{D}{dt}V, W \right\rangle + \left\langle V, \frac{D}{dt}W \right\rangle = \sum_i (v'_i w_i + v_i w'_i).$$

Ferner gilt

$$\langle V, W \rangle = \dots = \sum_i v_i w_i.$$

Mit der Produktregel folgt nun

$$\frac{\partial}{\partial t} \langle V, W \rangle = \sum_i (v'_i w_i + v_i w'_i).$$

□

1.6.3 Korollar

g und ∇ sind genau dann kompatibel, wenn gilt

$$X \langle Y, Z \rangle = \langle \nabla_X Y, Z \rangle + \langle Y, \nabla_X Z \rangle$$

für beliebige Tangentialvektorfelder X, Y, Z auf M .

Beweis

Für einen Punkt $p \in M$ wähle eine Kurve c mit $c(0) = p$ und $\dot{c}(0) = X(p)$. Es gilt dann

$$X(p) \langle Y, Z \rangle = \frac{\partial}{\partial t} \Big|_{t=0} \langle Y_{c(t)}, Z_{c(t)} \rangle.$$

□

1.6.4 Definition: Symmetrie von Zusammenhängen

Ein Zusammenhang ∇ heißt **symmetrisch**, wenn gilt

$$\nabla_X Y - \nabla_Y X = [X, Y].$$

In lokalen Koordinaten für $X = \frac{\partial}{\partial x_i}$ und $Y = \frac{\partial}{\partial x_j}$ gilt dann

$$\nabla_{\frac{\partial}{\partial x_i}} \frac{\partial}{\partial x_j} - \nabla_{\frac{\partial}{\partial x_j}} \frac{\partial}{\partial x_i} = \left[\frac{\partial}{\partial x_i}, \frac{\partial}{\partial x_j} \right] = 0.$$

Daraus folgt dann

$$\nabla_{\frac{\partial}{\partial x_i}} \frac{\partial}{\partial x_j} = \nabla_{\frac{\partial}{\partial x_j}} \frac{\partial}{\partial x_i}.$$

Für die Christoffel-Symbole bedeutet dies

$$\Gamma_{i,j}^k = \Gamma_{j,i}^k.$$

1.6.5 Bemerkung

Definiere die **Torsion** durch

$$T(X, Y) := \nabla_X Y - \nabla_Y X - [X, Y].$$

T ist linear über $\mathcal{C}^\infty(M)$. D. h., T ist ein Tensor.

Ferner ist ein Zusammenhang genau dann symmetrisch, wenn er torsionsfrei ist.

1.6.6 Satz: Levi-Civita

Sei (M, g) eine Riemannsche Mannigfaltigkeit. Dann existiert genau ein Zusammenhang ∇ auf M , sodass gilt:

1.) ∇ und g sind kompatibel.

2.) ∇ ist symmetrisch.

Diesen Zusammenhang nennen wir den **Levi-Civita-Zusammenhang** bzw. den **Riemannschen Zusammenhang**.

Beweis

Eindeutigkeit Seien X, Y, Z beliebige Tangentialvektorfelder auf M . Es gilt dann

$$X \langle Y, Z \rangle = \langle \nabla_X Y, Z \rangle + \langle Y, \nabla_X Z \rangle$$

und

$$Y \langle Z, X \rangle = \langle \nabla_Y Z, X \rangle + \langle Z, \nabla_Y X \rangle$$

und

$$Z \langle X, Y \rangle = \langle \nabla_Z X, Y \rangle + \langle X, \nabla_Z Y \rangle.$$

Wir addieren die ersten beiden Zeilen und subtrahieren die dritte. Dadurch erhalten wir

$$\begin{aligned} & X \langle Y, Z \rangle + Y \langle Z, X \rangle - Z \langle X, Y \rangle \\ &= \langle Y, \nabla_X Z - \nabla_Z X \rangle + \langle X, \nabla_Y Z - \nabla_Y X \rangle \\ &+ \langle Z, \nabla_X Y + \nabla_Y X \rangle \\ &\stackrel{\nabla \text{ symm}}{=} \langle Y, [X, Z] \rangle + \langle X, [Y, Z] \rangle + \langle Z, [X, Y] + 2\nabla_Y X \rangle \\ &= \langle Y, [X, Z] \rangle + \langle X, [Y, Z] \rangle + \langle Z, [X, Y] \rangle + 2 \langle Z, \nabla_Y X \rangle \end{aligned}$$

Daraus erhalten wir für ∇

$$\begin{aligned} \langle Z, \nabla_Y X \rangle &= \\ \frac{1}{2} (X \langle Y, Z \rangle + Y \langle Z, X \rangle - Z \langle X, Y \rangle - \langle Y, [X, Z] \rangle - \langle X, [Y, Z] \rangle - \langle Z, [X, Y] \rangle) \end{aligned}$$

Daraus folgt die Eindeutigkeit von ∇ .

Existenz Definiere $\nabla_Y X$ durch obige Gleichung. Dann bleibt nachzurechnen, dass ∇ ein symmetrischer und kompatibler Zusammenhang ist.

□

1.7 Geodätische Kurven

1.7.1 Definition

Sei (M, g) eine Riemannsche Mannigfaltigkeit. Sei ∇ der Levi-Civita-Zusammenhang auf M .

Geodätische sind Kurven auf M mit Beschleunigung Null, d. h., eine glatte Kurve $c : I \rightarrow M$ heißt **geodätisch**, falls

$$\frac{D}{dt}\dot{c} = 0$$

gilt.

1.7.2 Beispiel

Betrachte \mathbb{R}^n mit der Euklidischen Metrik. Durch den Levi-Civita-Zusammenhang werden alle Christoffel-Symbole Null. Gilt

$$0 = \frac{D}{dt}\dot{\gamma} = \ddot{\gamma},$$

so muss $\dot{\gamma}$ konstant gleich a sein. Ergo ist $\gamma(t) = at + b$ eine Gerade.

Sei γ eine Geodätische. Betrachte

$$\frac{\partial}{\partial t} \langle \dot{\gamma}, \dot{\gamma} \rangle = 2 \left\langle \frac{D}{dt} \dot{\gamma}, \dot{\gamma} \right\rangle = 2 \langle 0, \dot{\gamma} \rangle = 0,$$

da γ geodätisch ist. Somit ist $\|\dot{\gamma}'(t)\|$ konstant gleich $c \in \mathbb{R}_{\geq 0}$. Sei $c \neq 0$. $0, t$ seien in I . Dann

$$L_0^t(\gamma) = \int_0^t \|\dot{\gamma}(\tau)\| d\tau = \int_0^t c d\tau = ct.$$

D. h., die Bogenlänge ist proportional zum Parameter t . Ist insbesondere $c = 1$, dann sagen wir, dass γ durch die Bogenlänge parametrisiert sei.

In lokalen Koordinaten x lässt sich γ darstellen durch

$$\gamma(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t)).$$

Sei $V(t)$ ein Vektorfeld entlang γ . V hat die Gestalt

$$V(t) = \sum_i v_i(t) \frac{\partial}{\partial x_i|_{\gamma(t)}}.$$

Es gilt allgemein

$$\frac{D}{dt}V = \sum_k \left(v'_k + \sum_{i,j} x'_i v_j \Gamma_{i,j}^k \right) \frac{\partial}{\partial x_k}.$$

Für $V(t) = \dot{\gamma}(t)$ gilt $v_k(t) = x'_k(t)$. Dann gilt

$$0 = \frac{D}{dt}\dot{\gamma} = \sum_k \left(x''_k + \sum_{i,j} x'_i x'_j \Gamma_{i,j}^k \right) \frac{\partial}{\partial x_k}.$$

Daraus folgt für alle k

$$x''_k = - \sum_{i,j} x'_i x'_j \Gamma_{i,j}^k.$$

Dadurch erhalten wir ein System von gewöhnlichen Differentialgleichungen 2. Ordnung. Auf dem Tangentialbündel $\mathcal{T}M$ kann dieses System umgeschrieben werden in ein System 1. Ordnung. Seien die Koordinaten x definiert auf $U \subset M$. Ein Tangentialvektor kann geschrieben werden als eine Linearkombination

$$\sum_i y_i \frac{\partial}{\partial x_i}.$$

Dann sind $(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_n)$ lokale Koordinaten auf $\mathcal{T}M$, definiert in $\mathcal{T}U$. Die Abbildung

$$t \longmapsto (\gamma(t), \dot{\gamma}(t))$$

definiert eine glatte Kurve in $\mathcal{T}M$. Hierfür gilt

$$\begin{aligned} y_k &= x_k \\ y'_k &= - \sum_{i,j} \Gamma_{i,j}^k y_i y_j. \end{aligned}$$

Dies ist ein System von Differentialgleichungen 1. Ordnung auf $\mathcal{T}M$. Wir wenden den Satz über Existenz, Eindeutigkeit und Abhängigkeit von Anfangsbedingungen an auf dieses System. Es folgt dann:

1.7.3 Proposition

Für alle $p \in M$ existieren $\delta, \varepsilon_1 > 0$, eine offene Umgebung $V \subset M$ von p und eine glatte Abbildung

$$\gamma : (-\delta, \delta) \times U \longrightarrow M,$$

wobei

$$U = \{(q, v) \in V \times T_q M \mid \|v\| < \varepsilon_1\},$$

sodass

$$t \longmapsto \gamma(t, q, v)$$

die eindeutige Geodätische in M ist mit

$$\gamma(0, q, v) = q \quad \text{und} \quad \gamma(0, \dot{q}, v) = v.$$

1.7.4 Lemma: Homogenität von Geodätischen

Ist die Geodäte $\gamma(t, q, v)$ definiert für $|t| < \delta$, so ist die Geodäte $\gamma(at, q, v)$ definiert für $a > 0$ und $|t| < \frac{\delta}{a}$, und es gilt

$$\gamma(at, q, v) = \gamma(t, q, av).$$

Beweis

Setze $c(t) := \gamma(at, q, v)$. Dann ist $c(0) = q$ und $\dot{c}(0) = a\dot{\gamma}(0, q, v) = av$. Damit erfüllt c dieselben Anfangsbedingungen wie $\gamma(t, q, av)$. Es bleibt zu zeigen, dass c tatsächlich eine Geodätische ist. Es gilt

$$\frac{D}{dt}\dot{c} = \nabla_{\dot{c}}\dot{c} = \nabla_{a\dot{\gamma}}(a\dot{\gamma}) = a^2\nabla_{\{\dot{\gamma}\}}\dot{\gamma} = a^2 \cdot 0 = 0.$$

Aus der Eindeutigkeit folgt nun

$$c(t) = \gamma(t, q, av).$$

□

Betrachte insbesondere $|t| < 2 = \frac{\delta}{\delta/2}$ und $a = \frac{\delta}{2}$. Setze $\varepsilon = \frac{\delta\varepsilon_1}{2}$. Dann ist $\gamma(t, q, v)$ definiert für $|t| < 2$ und $\|v\| < \varepsilon$.

1.7.5 Definition: Die Exponentialabbildung

Sei $q \in V$, $v \in T_q M$ mit $\|v\| < \varepsilon$. Definiere die Abbildung

$$\exp_q(v) = \gamma(1, q, v).$$

Für $v \neq 0$ gilt

$$\exp_q(v) = \gamma(1, q, v) = \gamma(\|v\|, q, \frac{v}{\|v\|})$$

. Bezeichnet $B_0(\varepsilon)$ den ε -Ball in $T_q M$, so ist \exp_q eine Abbildung vom Typ

$$\exp_q : B_0(\varepsilon) \subset T_q M \longrightarrow M.$$

Wir schreiben allgemein auch \exp statt \exp_q .

1.7.6 Bemerkung

Die Bezeichnung obiger Abbildung als Exponentialabbildung kommt aus der Theorie der Lie-Gruppen. Ist G eine Lie-Gruppe, so erhält man eine Abbildung

$$\exp : \mathfrak{g} := T_1 G \longrightarrow G,$$

wobei \mathfrak{g} die Lie-Algebra von G bezeichnet. D. h., in diesem Fall gilt

$$\exp(\mathfrak{a} + \mathfrak{b}) = \exp(\mathfrak{a}) \cdot \exp(\mathfrak{b}).$$

1.7.7 Proposition

Es existiert ein $\varepsilon > 0$, sodass

$$\exp : B_0(\varepsilon) \rightarrow M$$

ein Diffeomorphismus auf sein Bild ist.

Beweis

Betrachte

$$(d \exp)_0(v) = \frac{\partial}{\partial t} \Big|_{t=0} \exp(tv) = \frac{\partial}{\partial t} \Big|_{t=0} \gamma(1, q, tv) = \frac{\partial}{\partial t} \Big|_{t=0} \gamma(t, q, v) = v.$$

D. h., $d \exp_0$ ist die Identität auf $B_0(\varepsilon)$. Der Satz über umkehrbare Funktionen impliziert, dass \exp ein lokaler Diffeomorphismus in der Nähe von 0 ist. \square

1.7.8 Beispiel

1) Sei $M = \mathbb{R}^n$. Betrachte

$$\exp_0 : T_0\mathbb{R}^n \cong \mathbb{R}^n \xrightarrow{\text{Id}_{\mathbb{R}^n}} \mathbb{R}^n$$

2) Sei $S^n \subset \mathbb{R}^{n+1}$ die Einheitssphäre. Betrachte

$$\exp_q : B_0(\pi) \longrightarrow S^n - \{-q\}$$

wobei q den Nordpol bezeichnet. \exp_q ist dann tatsächlich surjektiv auf $S^n - \{-q\}$. Allerdings gilt

$$\exp_q(\partial B_0(\pi)) = \{-q\}.$$

1.7.9 Satz: Gauss-Lemma

Es gilt

$$\langle d\exp_v(v), d\exp_v(w) \rangle = \langle v, w \rangle$$

für $v, w \in T_q M$. Dabei wurde stillschweigend die Identifikation

$$T_v(T_q M) \cong T_q M$$

angenommen.

Beweis

Wir schreiben $w = w_{\parallel} + w_{\perp}$ mit $w_{\parallel} \in \mathbb{R} \cdot v$ und $w_{\perp} \in v^{\perp}$. Die Linearität impliziert, dass es genügt die Aussage für w_{\parallel} und für w_{\perp} jeweils zu beweisen.

1) Für $w_{\parallel} = \lambda v$:

Es gilt

$$\langle d\exp_v(v), d\exp_v(\lambda v) \rangle = \lambda \|d\exp_v(v)\|^2$$

und

$$\langle v, \lambda v \rangle = \lambda \|v\|^2.$$

Zu zeigen bleibt

$$\|d\exp_v(v)\| = \|v\|.$$

Es gilt nun

$$\|d\exp_v(v)\| = \left\| \frac{\partial}{\partial t} \Big|_{t=0} \gamma(1, q, v + tv) \right\| = \left\| \frac{\partial}{\partial t} \Big|_{t=0} \gamma(1 + t, q, v) \right\| = \|v\|$$

2) Für w_\perp :

Wir schreiben $w = w_\perp$ und es gilt $\langle v, w \rangle = 0$. Zu zeigen ist

$$\langle d \exp_v(v), d \exp_v(w) \rangle = 0.$$

Sei $v(s)$ eine Kurve in $T_q M$ mit $v(0) = v, \dot{v} = w$ und $\|v(s)\|$ konstant. Setze

$$f(t, s) := \exp(tv(s)).$$

f ist eine parametrisierte Fläche. Es gilt dann

$$\langle d \exp_v(v), d \exp_v(w) \rangle = \left\langle \frac{\partial f}{\partial t}, \frac{\partial f}{\partial s} \right\rangle (t = 1, s = 0).$$

Wir behaupten, dass $\left\langle \frac{\partial f}{\partial t}, \frac{\partial f}{\partial s} \right\rangle$ unabhängig von t ist, denn:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\langle \frac{\partial f}{\partial t}, \frac{\partial f}{\partial s} \right\rangle = \left\langle \frac{D}{dt} \frac{\partial f}{\partial t}, \frac{\partial f}{\partial s} \right\rangle + \left\langle \frac{\partial f}{\partial t}, \frac{D}{dt} \frac{\partial f}{\partial s} \right\rangle$$

Nun ist $\frac{D}{dt} \frac{\partial f}{\partial t}$ gleich Null, da γ eine Geodätische ist. Es gilt nun

$$\left\langle \frac{D}{dt} \frac{\partial f}{\partial s}, \frac{\partial f}{\partial t} \right\rangle \stackrel{\text{Symmetrie}}{=} \left\langle \frac{D}{ds} \frac{\partial f}{\partial t}, \frac{\partial f}{\partial t} \right\rangle = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial s} \left\| \frac{\partial f}{\partial t} \right\|^2 = 0,$$

da $\|v(s)\|$ konstant ist.

Betrachte wieder

$$\left\langle \frac{\partial f}{\partial t}, \frac{\partial f}{\partial s} \right\rangle (1, s) = \left\langle \frac{\partial f}{\partial t}, \frac{\partial f}{\partial s} \right\rangle (0, s).$$

Nun gilt

$$\frac{\partial f}{\partial s}(0, s) = 0,$$

da $f(0, s) = \exp(0 \cdot v(s)) = \exp(0) = q$ konstant in s ist.

□

1.7.10 Definition

Sei $\exp_p : T_p M \rightarrow M$ die Exponentialabbildung und $\varepsilon > 0$ so, dass \exp_p auf $B_0(\varepsilon)$ injektiv ist.

Für $0 < r < \varepsilon$ nennen wir dann

$$B_p(r) := \exp_p(B_0(r))$$

den **geodätischen Ball** und

$$S_p(r) := \exp_p(\partial B_0(r))$$

die **geodätische Sphäre** um p von Radius r .

1.7.11 Bemerkung: Interpretation: Gauss-Lemma

Wir können nun das Gauss-Lemma wie folgt ausdrücken:

Geodätische Kurven durch p stehen senkrecht auf geodätischen Sphären.

1.7.12 Proposition: Geodätische minimieren lokal die Länge von Kurven.

Sei $p \in M$ und $\varepsilon > 0$ so klein, dass $\exp_p : B_0(\varepsilon) \rightarrow M$ injektiv ist. Sei $\gamma : [0, 1] \rightarrow B := B_p(r)$ für $r < \varepsilon$ mit $\gamma(0) = p$ eine Geodätische.

Sei $c : [0, 1] \rightarrow M$ eine stückweise glatte Kurve mit $c(0) = p$ und $c(1) = q := \gamma(1)$.

Dann gilt

$$L(c) \geq L(\gamma).$$

Ferner gilt Gleichheit genau dann, wenn c und γ dasselbe Bild haben.

Beweis

Idee: Wir schreiben $c = c(s)$ in Polarkoordinaten:

$$c(s) = \exp(r(s) \cdot v(s))$$

für $r > 0, s > 0$ und $\|v(s)\| = 1$. Wir nehmen dabei zunächst an, dass $c[0, 1] \subset B$. Ferner nehmen wir ohne Einschränkung an, dass $c(s) \neq p$ für $s > 0$. Setze

$$f(r, s) := \exp(r \cdot v(s)).$$

Dann gilt

$$c(s) = f(r(s), s).$$

Daraus folgt

$$\dot{c}(s) = \frac{\partial f}{\partial r} \cdot r' + \frac{\partial f}{\partial s}.$$

Und hieraus

$$\begin{aligned} \|\dot{c}(s)\|^2 &= \left\| \frac{\partial f}{\partial r} \cdot r' \right\|^2 + 2 \left\langle \frac{\partial f}{\partial r} r, \frac{\partial f}{\partial s} \right\rangle + \left\| \frac{\partial f}{\partial s} \right\|^2 \\ &= |r'|^2 \cdot \left\| \frac{\partial f}{\partial r} \right\|^2 + 2r' \left\langle \frac{\partial f}{\partial r}, \frac{\partial f}{\partial s} \right\rangle + \left\| \frac{\partial f}{\partial s} \right\|^2 \\ &= |r'|^2 \cdot 1 + 2r' \cdot 0 + \left\| \frac{\partial f}{\partial s} \right\|^2, \end{aligned}$$

denn $\left\langle \frac{\partial f}{\partial r} r, \frac{\partial f}{\partial s} \right\rangle = 0$ nach Gauss-Lemma und $\left\| \frac{\partial f}{\partial r} \right\| = \|v(s)\| = 1$. Es folgt also

$$\|\dot{c}(s)\|^2 = |r'|^2 + \left\| \frac{\partial f}{\partial s} \right\|^2 \geq |r'|^2.$$

Wähle nun $\delta > 0$ klein, und betrachte

$$\int_{\delta}^1 \|\dot{c}(s)\| \, ds \geq \int_{\delta}^1 |r'(s)| \, ds \geq \int_{\delta}^1 r'(s) \, ds = r(1) - r(\delta) \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} r(1) = L(\gamma).$$

Ferner gilt

$$\int_{\delta}^1 \|\dot{c}(s)\| \, ds \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} L(c).$$

Gilt Gleichheit, so muss

$$\left\| \frac{\partial f}{\partial s} \right\| = 0$$

gelten. Daraus folgt aber, dass $f(r, s)$ konstant in s ist. Ergo

$$f(r, s) = \exp(r \cdot v(0)).$$

Insofern haben in diesem Fall c und γ tatsächlich dasselbe Bild.

Wenn nun $c[0, 1]$ nicht in B enthalten ist, dann sei s_0 der kleinste Wert s , sodass $c(s_0) \in \partial B$. Es gilt

$$L_0^1(c) \geq L_0^{s_0}(c) \geq L(\gamma_1) = r \geq L(\gamma).$$

$\gamma_1 : p \mapsto c(s_0)$ ist eine Geodätische. □

1.7.13 Bemerkung

1.) Man kann auch zeigen:

Ist γ eine Kurve parametrisiert proportional zur Bogenlänge, sodass

$$L(\gamma) \leq L(c)$$

für alle Kurven c mit denselben Randpunkten gilt, so muss γ eine Geodätische sein.

2.) Isometrien erhalten Geodätische.

1.8 Krümmung

1.8.1 Beispiel

- Die Krümmung eines Kreises von Radius r definieren wir durch $\frac{1}{r}$.
- Wir betrachten nun Kurven in \mathbb{R}^2 , die durch die Bogenlänge parametrisiert sind.

Sei dazu c eine solche Kurve mit $\ddot{c}(s) \neq 0$ für ein s . Betrachte s_1, s_2, s_3 nahe bei s . Da die zweite Ableitung nicht verschwindet, sind $c(s_1), c(s_2)$ und $c(s_3)$ nicht kollinear.

Daraus folgt, dass $c(s_1), c(s_2)$ und $c(s_3)$ auf einem eindeutig bestimmten Kreis mit Radius R liegen. Für $s_1, s_2, s_3 \rightarrow s$ erhält man einen Grenzkreis, den sogenannten oskulierenden Kreis in $c(s)$.

Die Krümmung von c im Punkt $c(s)$ definiert man nun als $\frac{1}{R}$, die Krümmung dieses oskulierenden Kreises.

Es gilt nun ferner

$$\frac{1}{R} = |\ddot{c}(s)|.$$

- Kurven in \mathbb{R}^3 :
Wir fixieren wieder s . Sei $\ddot{c}(s) \neq 0$. $c(s_1), c(s_2)$ und $c(s_3)$ definieren dann eine Ebene in \mathbb{R}^3 . Laufen s_1, s_2, s_3 nach s , so definieren sie eine Grenzebene, die oskulierende Ebene.

Ferner erhält man in dieser oskulierenden Ebene den oskulierenden Kreis mit Radius R . Die Krümmung bei $c(s)$ definieren wir dann wieder als die Krümmung $\frac{1}{R}$ des oskulierenden Kreises. Es gilt nun

$$0 = \frac{\partial}{\partial s} \|\dot{c}(s)\|^2 = \frac{\partial}{\partial s} \langle \dot{c}, \dot{c} \rangle = 2 \langle \ddot{c}, \dot{c} \rangle$$

ergo steht $\ddot{c}(s)$ orthogonal auf $\dot{c}(s)$. Beide liegen in der oskulierenden Ebene und spannen diese auf.

- Flächen und Euler:
Sei M eine zweidimensionale Mannigfaltigkeit im \mathbb{R}^3 . Sei $p \in M$ und ν_p ein Einheitsnormalenvektor, d. h.,

$$\nu_p \perp T_p M \text{ und } \|\nu_p\| = 1.$$

Sei ferner $v \in T_p M$ mit $\|v\| = 1$. ν_p und v spannen eine Ebene E_v auf. Schneidet man diese mit M , so erhält man eine Kurve

$$E_v \cap M = \text{Kurve } c_v.$$

c_v sei hierbei durch Bogenlänge parametrisiert mit $c_v(0) = p$ und $\dot{c}_v(0) = v$. Es gilt nun

$$\ddot{c}_v(0) \perp T_p M.$$

Dann existiert genau ein $\kappa_v \in \mathbb{R}$, sodass

$$\ddot{c}_v(0) = \kappa_v \nu_p.$$

Es gilt

$$\kappa_{-v} = \kappa_v,$$

insofern erhalten wir eine Funktion

$$\kappa : \mathbb{R}P^1 \longrightarrow \mathbb{R}.$$

1.8.2 Satz: Satz von Euler

Es existieren eindeutige Richtungen $v_1, v_2 \in \mathbb{R}P^1$, sodass

$$k_1 := \kappa_{-v_1} = \min_v \kappa_v$$

und

$$k_2 := \kappa_{v_2} = \max_v \kappa_v.$$

Es gilt ferner

$$v_1 \perp v_2$$

und

$$\kappa_v = k_1 \cos^2 \theta + k_2 \sin^2 \theta$$

wobei $\theta = \angle(v, v_1)$.

Vorlesung
vom
09.05.18

Krümmung von Flächen nach Gauss Sei $M^2 \subset \mathbb{R}^3$ eine orientierte Fläche, $p \in M$. Sei ferner $\nu_p \in T_p M^\perp$ ein Einheitsnormalenvektor orthogonal auf M am Punkt p , sodass (ν_p, v, w) positiv orientiert ist, wobei (v, w) positiv orientiert in $T_p M$ sei.

Dies induziert die **Gauss-Abbildung**:

$$\begin{aligned}\nu : M &\longrightarrow S^2 \\ p &\longmapsto \nu_p\end{aligned}$$

Ist $A \subset M$ eine Umgebung um p , so kann man die **Gauss-Krümmung** definieren durch

$$\kappa(p) := \lim_{A \rightarrow p} \frac{\text{vol}(\nu(A))}{\text{vol}(A)}.$$

1.8.3 Beispiel

- 1.) Sei $M = S^2 = S_1^2$ die Einheitssphäre. Dann ist $\nu = \text{Id}_{S^2}$. Daraus folgt $\kappa(p) = 1$ für alle $p \in M$.
- 2.) Sei $M = S_r^2$ die Sphäre von Radius r . Dann gilt

$$\text{vol}(\nu(A)) = \frac{1}{r^2} \text{vol}(A).$$

Daraus folgt

$$\kappa(p) = \lim_{A \rightarrow p} \frac{\text{vol}(\nu(A))}{\text{vol}(A)} = \frac{1}{r^2}.$$

- 3.) Ist M eine Ebene, so sind alle ν_p parallel zueinander. Daraus folgt, dass ν konstant ein Punkt ist. Und somit gilt $\kappa(p) = 0$ für alle $p \in M$.
- 4.) Sei M ein Zylinder, $p \in M$. Ist A eine kleine Umgebung um p , so induziert die Nabe bei b eine Strecke auf dem Äquator von S^2 . Die Längsachse des Zylinders induziert nur einen Punkt in S^2 . Insofern ist $\nu(A)$ eine Strecke in S^2 . Es folgt $\text{vol}(\nu(A)) = 0$ und $\kappa(p) = 0$.

Daraus folgt, der Zylinder ist **nicht** gekrümmt!

1.8.4 Satz: Beziehung Gauss-Euler

Es gilt

$$\kappa(p) = \kappa_1(p) \cdot \kappa_2(p),$$

wobei $\kappa(p)$ die Gauss-Krümmung und $\kappa_1(p), \kappa_2(p)$ die Eulerschen Minimal- und Maximal-Krümmungen bezeichnet.

1.8.5 Beispiel

1) Betrachte $S_r^2 \subset \mathbb{R}^3$. Dann ist $\kappa_1 = \kappa_2 = \frac{1}{r}$. Insbesondere gilt

$$\kappa_1 \kappa_2 = \frac{1}{r^2} = \kappa(p).$$

2) Betrachte den Zylinder. Dann ist $\kappa_2 = \frac{1}{r}$ bei einem Radius von r und $\kappa_1 = 0$. Es folgt

$$\kappa(p) = 0 = \kappa_1 \kappa_2.$$

3) Betrachte die Fläche $z = \frac{a}{2}(x^2 - y^2)$ für $a > 0$. Dann gilt

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{ax^2}{2} \right) = a = \kappa_2 > 0$$

und

$$\frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial y} \left(-\frac{ay^2}{2} \right) = -a = \kappa_1 < 0$$

bei $p = (0, 0, 0)$. Folglich gilt

$$\kappa_1 \kappa_2 = -a^2 < 0.$$

Insofern handelt es sich hierbei um eine Fläche negativer Krümmung.

Krümmung nach Riemann Idee: Sei M eine n -dimensionale Mannigfaltigkeit und $p \in M$. Sei $\sigma \subset T_p M$ ein zweidimensionaler Untervektorraum. Betrachte

$$\exp_p : B_0(\varepsilon) \subset T_p M \xrightarrow{\cong} U,$$

wobei U den geodätischen Ball um p bezeichnet. $F^2 := \exp_p(\sigma \cap B_\varepsilon(0))$ ist dann eine Fläche in U . F erhalte die induzierte Metrik von M .

Dann sei $\kappa(p, \sigma)$ definiert als die Krümmung von F im Punkt p nach Euler-Gauss.

Formell: Sei ∇ der Levi-Civita-Zusammenhang auf der Riemannschen Mannigfaltigkeit (M, \langle, \rangle) . Wir definieren eine Abbildung

$$\begin{aligned} R : \Gamma(\mathcal{T}M)^3 &\longrightarrow \Gamma(\mathcal{T}M) \\ (X, Y, Z) &\longmapsto R(X, Y)Z \end{aligned}$$

wobei

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

In lokalen Koordinaten $\{x_i\}$ mit $X = \frac{\partial}{\partial x_i}$ und $Y = \frac{\partial}{\partial x_j}$ gilt

$$[X, Y] = 0$$

und insbesondere

$$R(X, Y) = \nabla_Y \nabla_X - \nabla_X \nabla_Y.$$

Ferner

$$R(X, Y) \frac{\partial}{\partial x_k} =: \sum_l R_{i,j,k}^l \frac{\partial}{\partial x_l}.$$

Eigenschaften Sind $f, g : M \rightarrow \mathbb{R}$ und $X, Y \in \Gamma(\mathcal{T}M)$ glatt, so gilt:

- $R(fX_1 + gX_2, Y)Z = fR(X_1, Y)Z + gR(X_2, Y)Z.$
- $R(X, fY_1 + gY_2)Z = fR(X, Y_1)Z + gR(X, Y_2)Z.$

Ferner gilt

$$\begin{aligned} R(X, Y)(fZ) &= \nabla_Y \nabla_X (fZ) - \nabla_X \nabla_Y (fZ) + \nabla_{[X, Y]}(fZ) \\ &= \nabla_Y (f \nabla_X Z + X(f)Z) - \nabla_X (f \nabla_Y Z + Y(f)Z) + f \nabla_{[X, Y]} Z + [X, Y](f)Z \\ &= f \nabla_Y \nabla_X Z + Y(f) \nabla_Y Z + YX(f)Z \\ &\quad - f \nabla_X \nabla_Y Z - X(f) \nabla_Y Z - Y(f) \nabla_X Z - XY(f)Z \\ &\quad + f \nabla_{[X, Y]} Z + XY(f)Z - YX(f)Z \\ &= fR(X, Y)Z \end{aligned}$$

und insbesondere

$$R(X, Y)(fZ_1 + gZ_2) = fR(X, Y)Z_1 + gR(X, Y)Z_2.$$

Daraus folgt, dass R ein Tensor ist, der sogenannte **Riemannsche Krümmungstensor**. (Dies erklärt den Term $\nabla_{[X, Y]} Z$.)

Es folgt auch, dass $(R(X, Y)Z)_p$ am Punkt $p \in M$ nur von den Vektoren $X(p), Y(p)$ und $Z(p)$ abhängt.

Ferner gilt:

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

2) Symmetrie von ∇ + Jacobi-Identität für $[,]$ impliziert die **Bianchi-Identität**

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

3) Es gilt $\langle R(X, Y)Z, W \rangle + \langle R(X, Y)W, Z \rangle = 0$, denn

$$\begin{aligned} \langle R(X, Y)Z, Z \rangle &= \langle \nabla_Y \nabla_X Z - \nabla_X \nabla_Y Z + \nabla_{[X, Y]} Z, Z \rangle \\ &= \langle \nabla_Y \nabla_X Z, Z \rangle - \langle \nabla_X \nabla_Y Z, Z \rangle + \langle \nabla_{[X, Y]} Z, Z \rangle \\ &= Y \langle \nabla_X Z, Z \rangle - \langle \nabla_X Z, \nabla_Y Z \rangle - X \langle \nabla_Y Z, Z \rangle + \langle \nabla_Y Z, \nabla_X Z \rangle + \frac{1}{2} [X, Y] \langle Z, Z \rangle \\ &= 0, \end{aligned}$$

wobei

$$\begin{aligned} Y \langle \nabla_X Z, Z \rangle &= \langle \nabla_Y \nabla_X Z, Z \rangle + \langle \nabla_X Z, \nabla_Y Z \rangle \\ X \langle \nabla_Y Z, Z \rangle &= \langle \nabla_X \nabla_Y Z, Z \rangle + \langle \nabla_Y Z, \nabla_X Z \rangle \\ [X, Y] \langle Z, Z \rangle &= 2 \langle \nabla_{[X, Y]} Z, Z \rangle. \end{aligned}$$

4) Ferner gilt

$$\begin{aligned} \langle R(X, Y)Z, W \rangle + \langle R(Y, Z)X, W \rangle + \langle R(Z, X)Y, W \rangle &= 0 \\ \langle R(Y, Z)W, X \rangle + \langle R(Z, W)Y, X \rangle + \langle R(W, Y)Z, X \rangle &= 0 \\ \langle R(Z, W)X, Y \rangle + \langle R(W, X)Z, Y \rangle + \langle R(X, Z)W, Y \rangle &= 0 \\ \langle R(W, X)Y, Z \rangle + \langle R(X, Y)W, Z \rangle + \langle R(Y, W)X, Z \rangle &= 0. \end{aligned}$$

Indem man alle Zeilen aufaddiert, erhält man

$$\begin{aligned} 0 &= \langle R(Z, X)Y, W \rangle + \langle R(W, Y)Z, X \rangle + \langle R(X, Z)W, Y \rangle + \langle R(Y, W)X, Z \rangle \\ &= 2 \langle R(Z, X)Y, W \rangle - 2 \langle R(Y, W)Z, X \rangle. \end{aligned}$$

Ergo gilt auch folgende Symmetrie

$$\langle R(X, Y)Z, W \rangle = \langle R(Z, W)X, Y \rangle.$$

In lokalen Koordinaten (x_1, \dots, x_n) setzen wir

$$X_i := \frac{\partial}{\partial x_i}.$$

$X, Y, Z \in \Gamma(\mathcal{T}M)$ schreiben wir als

$$X = \sum_i x_i X_i, \quad Y = \sum_i y_i X_i \quad \text{und} \quad Z = \sum_i z_i X_i.$$

Dann gilt

$$R(X, Y)Z = \sum_{i,j,k} x_i y_j z_k R(X, X_j)X_k = \sum_{i,j,k} x_i y_j z_k R_{ijk}^l X_l$$

wobei

$$R(X_i, X_j)X_k = \sum_l R_{ijk}^l X_l.$$

Insbesondere gilt

$$\begin{aligned} R(X_i, X_j)X_k &= \nabla_{X_j} \nabla_{X_i} X_k - \nabla_{X_i} \nabla_{X_j} X_k \\ &= \nabla_{X_j} \sum_l \Gamma_{ik}^l X_l - \nabla_{X_i} \sum_l \Gamma_{jk}^l X_l \\ &= \sum_l \sum_a (\Gamma_{ik}^l \Gamma_{jl}^a - \Gamma_{jk}^l \Gamma_{il}^a) X_a \end{aligned}$$

Ergo

$$R_{ijk}^a = \sum_l (\Gamma_{ik}^l \Gamma_{jl}^a - \Gamma_{jk}^l \Gamma_{il}^a)$$

Schnittkrümmung Sei $p \in M$ ein Punkt und $\sigma \subset T_p M$ ein zweidimensionaler Untervektorraum. Sei $\{x, y\}$ eine Basis für σ . Die Fläche des von x und y aufgespannten Parallelogramms ist

$$A(x, y) := \sqrt{\|x\|^2 \|y\|^2 - \langle x, y \rangle^2}.$$

Wir betrachten

$$\kappa(x, y) := \frac{\langle R(x, y)x, y \rangle}{A(x, y)^2}.$$

1.8.6 Lemma

$\kappa(x, y)$ hängt nicht von der Wahl der Basisvektoren x, y für σ ab.

Beweis

Jede andere Basis von σ erhält man aus $\{x, y\}$ durch Anwendung der folgenden drei elementaren Transformationen:

$$\begin{aligned}\{x, y\} &\implies \{y, x\} \\ \{x, y\} &\implies \{\lambda x, y\} \text{ für } \lambda \neq 0 \\ \{x, y\} &\implies \{x + \lambda y, y\}\end{aligned}$$

Überprüfe dann, dass $\kappa(x, y)$ invariant bleibt unter diesen drei Transformationen. \square

Aufgrund obigen Lemmas dürfen wir die **Schnittkrümmung** von M entlang σ in p definieren:

$$\kappa_p(\sigma) := \kappa(x, y)$$

Die Familie aller $\{\kappa_p(\sigma)\}_{\sigma \subset T_p M}$ bestimmt R im Punkt p eindeutig. Dies folgt aus einem Resultat der linearen Algebra, nämlich:

1.8.7 Proposition

Sei $(V, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ ein Euklidischer Vektorraum und seien $R, R' : V \times V \times V \rightarrow V$ trilineare Abbildungen, die beide die Symmetrien aus 1) bis 4) aus 1.8.5 erfüllen. Wenn ferner folgende Gleichheit vorliegt

$$\langle R(x, y)x, y \rangle = \langle R'(x, y)x, y \rangle$$

für alle $x, y \in V$, dann gilt

$$R = R'.$$

Ricci-Krümmung Sei $p \in M$ und $x \in T_p M$ mit $\|x\| = 1$. Wir ergänzen x zu einer Orthonormalbasis $\{x, z_1, \dots, z_{n-1}\}$ von $T_p M$. Definiere die **Ricci-Krümmung** durch

$$\operatorname{Ric}_p(x) := \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \langle R(x, z_i)x, z_i \rangle.$$

$\operatorname{Ric}_p(x)$ ist unabhängig von der Wahl von $\{z_i\}_{i=1}^{n-1}$:

$$Q(x, y) := \operatorname{Spur}(z \mapsto R(x, z)y).$$

Q ist eine Bilinearform und es gilt

$$Q(x, x) = (n-1)\operatorname{Ric}_p(x).$$

1.9 Jacobi-Felder

Wir stellen uns die Frage:

Wie Schnell Entfernen sich Geodäten Voneinander?

Sei dazu (M, g) eine Riemannsche Mannigfaltigkeit zusammen mit dem Levi-Civita-Zusammenhang ∇ . Sei $p \in M$. Ferner sei die Abbildung $\exp_p : B_0(\varepsilon) \rightarrow M$ gegeben. Sei $v \in T_p M$, dann ist

$$\gamma(t) = \exp_p(tv)$$

die eindeutig bestimmte Geodätische in p mit $\dot{\gamma}(0) = v$. Wir betrachten Vektorfelder entlang von Geodätischen. Sei $w \in T_v(T_p M)$. Wie im Gauss-Lemma sei $v(s)$ eine Kurve in $T_p M$ mit $v(0) = v$ und $\dot{v}(0) = w$. Setze nun

$$f(t, s) := \exp_p(tv(s)).$$

Sei

$$J(t) = (d \exp_p)_{tv}(tw) = \frac{\partial f}{\partial s}(t, s=0).$$

J ist ein Vektorfeld entlang γ .

γ ist eine Geodäte, ergo gilt

$$\frac{D}{dt} \frac{\partial f}{\partial t} = \frac{D}{dt} \dot{\gamma} = 0.$$

Daraus folgt

$$\frac{D}{ds} \left(\frac{D}{dt} \frac{\partial f}{\partial t} \right) = 0.$$

Ist V ein Vektorfeld entlang einer parametrisierten Fläche, so gilt

$$\frac{D}{ds} \frac{D}{dt} V - \frac{D}{dt} \frac{D}{ds} V = R\left(\frac{\partial f}{\partial t}, \frac{\partial f}{\partial s}\right)V.$$

Das kann man durch Nachrechnen in lokalen Koordinaten überprüfen.

$$\begin{aligned} \frac{D}{ds} \frac{D}{dt} \frac{\partial f}{\partial t} &= \frac{D}{dt} \frac{D}{ds} \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right) + R\left(\frac{\partial f}{\partial t}, \frac{\partial f}{\partial s}\right) \frac{\partial f}{\partial t} \\ &= \frac{D}{dt} \frac{D}{ds} \left(\frac{\partial f}{\partial s} \right) + R\left(\dot{\gamma}, \frac{\partial f}{\partial s}\right) \dot{\gamma}. \end{aligned}$$

Daraus folgt, dass $J = \frac{\partial f}{\partial s}$ folgende Gleichung erfüllt

$$\frac{D}{dt} \frac{D}{ds} J + R(\dot{\gamma}, J) \dot{\gamma} = 0.$$

Diese Gleichung nennt man **Jacobi-Gleichung**.

In Lokalen Koordinaten: Seien $\{e_1(t), e_2(t), \dots, e_n(t)\}$ parallele Vektorfelder entlang γ , die an jedem Punkt $\gamma(t)$ eine Orthonormalbasis von $T_{\gamma(t)}M$ bilden. Betrachte

$$J(t) = \sum_i f_i(t) e_i(t).$$

Es gilt

$$\frac{D}{dt} \frac{D}{dt} J(t) = \sum_i f_i''(t) e_i(t).$$

Insbesondere folgt

$$\begin{aligned} R(\dot{\gamma}, J)\dot{\gamma} &= \sum_i \langle R(\dot{\gamma}, J)\dot{\gamma}, e_i \rangle e_i \\ &\stackrel{\text{Fourier-Entwicklung}}{=} \sum_{i,j} f_j \langle R(\dot{\gamma}, e_j)\dot{\gamma}, e_i \rangle e_i. \end{aligned}$$

Setzt man $a_{i,j} := \langle R(\dot{\gamma}, e_j)\dot{\gamma}, e_i \rangle$, so gilt

$$f_i''(t) + \sum_j a_{i,j} f_j(t) = 0$$

Dies ist eine *lineare* Differentialgleichung zweiter Ordnung.

1.9.1 Definition

Ein Vektorfeld $J(t)$ entlang einer Geodätischen $\gamma(t)$ heißt **Jacobi-Feld**, wenn $J(t)$ die Jacobi-Gleichung erfüllt.

Die Tatsache, dass eine Differentialgleichung zweiter Ordnung vorliegt, impliziert nun, dass man nach Wahl von $J(0)$ und $\frac{D}{dt}J(0)$ ein eindeutiges Jacobi-Feld durch Lösen von

$$f_i''(t) + \sum_j a_{i,j} f_j(t) = 0$$

erhält.

1.9.2 Beispiel

$\dot{\gamma}(t)$ und $t\dot{\gamma}(t)$ sind Jacobi-Felder für eine Geodäte γ .

1.9.3 Beispiel: Jacobi-Felder auf Mannigfaltigkeiten Konstanter Schnittkrümmung

Sei M eine Mannigfaltigkeit der konstanten Schnittkrümmung κ . Definiere R' durch

$$\langle R'(X, Y)Z, W \rangle := \langle X, Z \rangle \langle Y, W \rangle - \langle X, W \rangle \langle Y, Z \rangle.$$

R' ist trilinear und erfüllt die Symmetrien 1) - 4) des echten Krümmungstensors aus 1.8.5. Betrachte

$$\langle R'(X, Y)X, Y \rangle = \|X\|^2 \|Y\|^2 - \langle X, Y \rangle^2 = A(X, Y)^2.$$

Ferner gilt

$$\frac{\kappa R'(X, Y)X, Y}{A(X, Y)^2} = \kappa = \frac{\langle R(X, Y)X, Y \rangle}{A(X, Y)^2}.$$

Aus 1.8.7 folgt nun

$$R = \kappa R'.$$

Setzt man dies in die Jacobi-Gleichung ein, so erhält man

$$\begin{aligned} \langle R(\dot{\gamma}, J)\dot{\gamma}, T \rangle &= \langle \kappa R'(\dot{\gamma}, J)\dot{\gamma}, T \rangle \\ &= \kappa(\langle \dot{\gamma}, \dot{\gamma} \rangle \langle J, T \rangle - \langle \dot{\gamma}, T \rangle \langle J, J \rangle). \end{aligned}$$

Sei γ parametrisiert durch die Bogenlänge und J orthogonal zu γ . Es gilt

$$\langle R(\dot{\gamma}, J)\dot{\gamma}, T \rangle = \kappa \langle J, T \rangle.$$

Daraus vereinfacht sich die Jacobi-Gleichung zu

$$\frac{D}{dt} \frac{D}{dt} J + \kappa J = 0.$$

Sei $W(t)$ ein Vektorfeld entlang γ , $\|W(t)\| = 1$, $\langle W, \dot{\gamma} \rangle = 0$, W parallel. Die vereinfachte Jacobi-Gleichung impliziert

$$J(t) = \begin{cases} \frac{\sin(\sqrt{\kappa}t)}{\sqrt{\kappa}} W(t) & , \text{ falls } \kappa > 0, \\ tW(t) & , \text{ falls } \kappa = 0, \\ \frac{\sinh(\sqrt{-\kappa}(t))}{\sqrt{-\kappa}} W(t) & , \text{ falls } \kappa < 0. \end{cases}$$

Vorlesung
vom
16.05.18

1.9.4 Bemerkung

Ist $J(0) = 0$ und $v := \dot{\gamma}(0)$, $w := \frac{D}{dt}J(0)$, dann gilt

$$J(t) = (d \exp)_{tv}(tw) = \frac{\partial f}{\partial s}(t, 0)$$

für $f(t, s) = \exp_p(tv(s))$ für $v(0) = v$, $\dot{v}(0) = w$. Dies folgt aus der Eindeutigkeit von Differentialgleichungen zweiter Ordnung.

Notation: Wir schreiben in Zukunft

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

und allgemeiner

$$J^{(k)}(t) := \left(\frac{D}{dt}\right)^k J.$$

Sei $J(t)$ ein Jacobi-Feld mit $J(0) = 0$, $v = \dot{\gamma}(0)$, $w = J'(0)$, $\|w\| = 1$. Wir interessieren uns für $\|J(t)\|^2$ für kleine t und taylor es deswegen im Folgenden.

- $\langle J, J \rangle(0) = 0$,
- $\langle J, J \rangle' = 2 \langle J', J \rangle$, und insbesondere

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

da $J(0) = 0$.

- $\langle J, J \rangle'' = 2(\langle J', J' \rangle + \langle J, J'' \rangle)$, und ferner

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

- $\langle J, J \rangle''' = 2(2 \langle J'', J' \rangle + \langle J', J'' \rangle + \langle J, J''' \rangle) = 6 \langle J', J'' \rangle + 2 \langle J, J''' \rangle$. Indem man 0 einsetzt, erhält man

$$\langle J, J \rangle'''(0) = 6 \langle w, J''(0) \rangle \stackrel{\text{Jacobi}}{=} 6 \langle w, -R(\dot{\gamma}, J)\dot{\gamma}(0) \rangle = 6 \langle w, -R(v, J(0))v \rangle = 0$$

$$\bullet \langle J, J \rangle'''' = 6 \langle J'', J'' \rangle + 8 \langle J', J''' \rangle + 2 \langle J, J'''' \rangle.$$

$$\langle J, J \rangle''''(0) = 6 \langle J''(0), J''(0) \rangle + 8 \langle w, J'''(0) \rangle = 8 \langle w, J'''(0) \rangle$$

$J'' = -R(\dot{\gamma}, J)\dot{\gamma}$. Es gilt

$$J''' = -\frac{D}{dt}_{t=0} R(\dot{\gamma}, J)\dot{\gamma} \stackrel{(1)}{=} R(\dot{\gamma}, J'(0))\dot{\gamma} = -R(v, w)v$$

Somit ergibt sich

$$\langle J, J \rangle''''(0) = 8 \langle -R(v, w)v, w \rangle = -8\kappa(v, w).$$

Die Gleichheit bei (1) gilt, da

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \langle R(\dot{\gamma}, J)\dot{\gamma}, W \rangle &= \left\langle \frac{D}{dt} R(\dot{\gamma}, J)\dot{\gamma}, W \right\rangle + \left\langle R(\dot{\gamma}, J)\dot{\gamma}, \frac{D}{dt} W \right\rangle \\ &= \frac{\partial}{\partial t} \langle R(\dot{\gamma}, W)\dot{\gamma}, J \rangle = \left\langle \frac{D}{dt} R(\dot{\gamma}, W)\dot{\gamma}, J \right\rangle + \langle R(\dot{\gamma}, W)\dot{\gamma}, J' \rangle \\ &= \left\langle \frac{D}{dt} R(\dot{\gamma}, W)\dot{\gamma}, J \right\rangle + \langle R(\dot{\gamma}, J')\dot{\gamma}, W \rangle \end{aligned}$$

Zusammenfassung: Wir haben gezeigt:

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

für $t \rightarrow 0$.

Gilt $\|v\| = \|w\| = 1$, $v \perp w$, dann $A(v, w) = 1$ und somit

$$\langle R(v, w)v, w \rangle = \kappa_p(v, w).$$

Daraus folgt

$$\|J(t)\|^2 = t^2 - \frac{1}{3} \kappa_p(v, w) t^4 + o(t^4)$$

und somit

$$\|J(t)\| = t - \frac{1}{6} \kappa_p(v, w) t^3 + o(t^3).$$

Wir wollen die Abweichungsgeschwindigkeit von geodätischen Kurven in M mit der Abweichungsgeschwindigkeit solcher Kurven in $T_p M$ vergleichen.

Die Abweichungsgeschwindigkeit in $T_p M$ der Szrahen $t \mapsto tv(s)$ und $t \mapsto tv(0)$ ist gerade

$$\left\| \frac{\partial}{\partial s}_{s=0} tv(s) \right\| = t \left\| \frac{\partial}{\partial s}_{s=0} v(s) \right\| = t \|w\| = t.$$

Daraus folgt, dass die Differenz der Abweichungsgeschwindigkeit in M und der in $T_p M$ gegeben ist durch

$$-\frac{1}{6}\kappa_p(v, w)t^3 + o(t^3)$$

Daraus folgt, ist $\kappa > 0$, so ist die Abweichungsgeschwindigkeit in M langsamer als in $T_p M$. Ist die Schnittkrümmung bei p negativ, so ist die Abweichungsgeschwindigkeit in M schneller als in $T_p M$.

1.10 Konjugationspunkte

1.10.1 Definition

Sei $p \in M$, γ eine Geodätische in M mit $\gamma(0) = p$. Ein Punkt $\gamma(t_0) \neq p$ heißt **konjugiert** zu p entlang γ , falls ein Jacobi-Feld $J \neq 0$ entlang γ existiert, sodass

$$J(0) = J(t_0) = 0.$$

Die **Vielfachheit** von $\gamma(t_0)$ ist dann die maximale Anzahl von linear unabhängigen Jacobi-Feldern mit dieser Eigenschaft.

1.10.2 Beispiel

Sei $M = S^n \subset \mathbb{R}^{n+1}$ die Einheitssphäre. Dann ist $\kappa_p(\sigma) = 1$ konstant positiv. Wir haben gezeigt

$$J(t) = \sin(t)W(t)$$

mit $\|W(t)\| = 1$ und $W \perp \dot{\gamma}$.

Ist $p \in S^n$, $p = \gamma(0)$, dann ist $-p = \gamma(\pi)$ konjugiert zu p . Daraus folgt für alle p , dass $-p$ konjugiert zu p ist. Die Vielfachheit dieser Konjugation ist $n - 1$.

1.10.3 Bemerkung

$J(t) = t\dot{\gamma}(t)$ ist ein Jacobi-Feld mit $J(0) = 0$, und $J(t) \neq 0$ für alle $t \neq 0$, falls $\dot{\gamma}(0) \neq 0$.

Daraus folgt, dass die Vielfachheit einer Konjugation immer höchstens $n - 1$ ist für zwei verschiedene Konjugationspunkte.

1.10.4 Proposition

$q = \gamma(t_0)$ ist genau dann konjugiert zu $p = \gamma(0)$ entlang γ , wenn $t_0 v$ ein kritischer Punkt von \exp_p ist für $v = \dot{\gamma}(0)$.

Beweis

Ist $J(0) = 0$, so folgt $J(t) = (\mathrm{d} \exp_p)_{tv}(tw)$ und somit

$$0 = J(t_0) = (\mathrm{d} \exp_p)_{t_0 v}(t_0 w),$$

wobei $t_0 w \neq 0$. □

1.10.5 Definition

Wir definieren den **Konjugationslokus** durch

$$C(p) = \{q \in M \mid p, q \text{ sind konjugiert}\}$$

1.10.6 Beispiel

Ist $M = S^n$, so gilt

$$C(p) = \{-p\}.$$

1.11 Vollständige Mannigfaltigkeiten

Sei (M, g) eine Riemannsche Mannigfaltigkeiten.

1.11.1 Definition

(M, g) heißt **geodätisch vollständig** bzw. **vollständig**, falls für alle $p \in M$ die Abbildung \exp_p auf ganz $T_p M$ definiert ist.

1.11.2 Beispiel

- $M = \mathbb{R}^n$ ist geodätisch vollständig.
- Die eingebettete Untermannigfaltigkeit $B := \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x\| < 1\} \subset \mathbb{R}^n$ mit der induzierten Metrik ist nicht vollständig.
Allerdings kann man die Mannigfaltigkeit B mit \mathbb{R}^n identifizieren und dementsprechend eine Metrik auf B einführen, sodass B und \mathbb{R}^n isometrisch sind. Dadurch wird B zu einer vollständigen Mannigfaltigkeit.

1.11.3 Definition

Seien $p, q \in M$. Definiere die Distanz zwischen p und q durch

$$d(p, q) := \inf \{L(c) \mid c : p \mapsto q \text{ ist eine stückw. glatte Kurve}\}.$$

Gilt $d(p, q) = 0$, so folgt $p = q$, da Geodätische lokal die Länge minimieren. Die anderen Axiome eines metrischen Raumes werden durch $d(p, q)$ ebenfalls erfüllt. Dadurch wird (M, d) zu einem metrischen Raum.

Vorlesung
vom
23.05.18

Für hinreichend kleinen Radius sind geodätische Bälle metrische Bälle. Daraus folgt, dass die Topologie, die durch die Metrik induziert wird, mit der Topologie der Riemannschen Mannigfaltigkeit M übereinstimmt.

1.11.4 Satz: Hopf-Rinow

Sei M eine zusammenhängende Riemannsche Mannigfaltigkeit und $p \in M$ ein Punkt. Dann sind folgende Aussagen äquivalent:

- (1) \exp_p ist auf ganz $T_p M$ definiert.
- (2) Abgeschlossene beschränkte Mengen in M sind kompakt.
- (3) (M, d) ist metrisch vollständig.
- (4) (M, g) ist geodätisch vollständig.
- (5) Für jede Folge von kompakten Teilmengen $K_j \subset M$ mit

$$K_j \subseteq K_{j+1} \quad \text{und} \quad \bigcup_j K_j = M$$

und jede Folge $x_j \in M \setminus K_j$ gilt

$$d(p, x_j) \xrightarrow{j \rightarrow \infty} \infty.$$

Jeder der Aussagen (1) - (5) impliziert:

- (6) Für jedes $q \in M$ existiert eine Geodätische γ , die p und q verbindet, und für die gilt

$$L(\gamma) = d(p, q).$$

Beweis

- (1) \Rightarrow (6): Setze $r := d(p, q)$. Sei $\overline{B}_\delta(p)$ ein abgeschlossener geodätischer Ball um p , $\delta > 0$. sei $S := \partial \overline{B}_\delta(p)$ die korrespondierende geodätische Sphäre. Dann existiert ein $x_0 \in S$ sodass gilt

$$d(x_0, q) = \min_{x \in S} d(x, q).$$

Dann existiert ein $v \in T_p M$ mit $\|v\| = 1$ und $x_0 = \exp_p(\delta v)$.

Mit (1) folgt jetzt, dass

$$\gamma(s) := \exp_p(sv)$$

eine Geodätische ist.

Behauptung: $\gamma(r) = q$.

Setze, um dies zu zeigen,

$$A := \{s \in [0, r] \mid d(\gamma(s), q) = r - s\}.$$

0 liegt in A , somit ist A nicht leer.

Behauptung: Ist $s_0 \in A$ mit $s_0 < r$, dann existiert ein $\varepsilon > 0$ mit $s_0 + \varepsilon \in A$.

Sei $\overline{B}_\varepsilon(\gamma(s_0))$ ein geodätischer Ball um $\gamma(s_0)$ mit Radius $\varepsilon > 0$. Sei $S' := \partial \overline{B}_\varepsilon(\gamma(s_0))$ die korrespondierende geodätische Sphäre.

Dann existiert ein $y_0 \in S'$ mit $d(y_0, q) = \min_{y \in S'} d(y, q)$. Es gilt nun

$$d(\gamma(s_0), q) = \varepsilon + \min_{y \in S'} d(y, q) = \varepsilon + d(y_0, q)$$

$$d(\gamma(s_0), q) \stackrel{s_0 \in A}{=} r - s_0.$$

Daraus folgt

$$d(y_0, q) = r - s_0 - \varepsilon.$$

Da gilt

$$d(p, q) \leq d(p, y_0) + d(y_0, q),$$

folgt

$$\begin{aligned} d(p, y_0) &\geq d(p, q) - d(y_0, q) \\ &= r - (r - s_0 - \varepsilon) \\ &= s_0 + \varepsilon. \end{aligned}$$

Andererseits gibt es eine stückweise glatte Kurve c , die p und y_0 verbindet und Länge $s_0 + \varepsilon$ hat. Somit folgt

$$d(p, y_0) = s_0 + \varepsilon.$$

Damit folgt insbesondere, dass c eine Geodätische, also durchgehend glatte Kurve ist. Damit folgt

$$\gamma(s_0 + \varepsilon) = y_0.$$

Es gilt nun

$$d(\gamma(s_0 + \varepsilon), q) = d(y_0, q) = r - (s_0 + \varepsilon).$$

Ergo liegt $s_0 + \varepsilon$ in A .

Da A abgeschlossen ist, gilt nun $r \in A$. Damit gilt

$$d(\gamma(r), q) = r - r = 0,$$

ergo

$$\gamma(r) = q.$$

(1) \Rightarrow (2): Sei $C \subset M$ abgeschlossen und beschränkt. Wegen der Beschränktheit existiert ein metrischer Ball B , sodass C in B enthalten ist. Da \exp_p laut (6) surjektiv ist, existiert somit ein $\overline{B}_r(0) \subset T_p M$ mit $B \subset \exp \overline{B}_r(0)$. Da $\overline{B}_r(0)$ kompakt ist, ist $\exp \overline{B}_r(0)$ ebenfalls kompakt. Ergo ist $C \subset \exp \overline{B}_r(0)$ eine abgeschlossene Teilmenge eines kompakten Raumes und dadurch selbst kompakt.

(2) \Rightarrow (3): Wir müssen zeigen: Jede Cauchy-Folge (x_n) in M konvergiert. $X := \{x_n\} \subset M$ ist beschränkt. Ergo ist \overline{X} beschränkt und abgeschlossen und somit kompakt. Daraus folgt, dass (x_n) eine konvergente Teilfolge hat. Da (x_n) Cauchy-konvergent ist, folgt, dass (x_n) konvergiert.

(3) \Rightarrow (4): Wir führen einen Widerspruchsbeweis: Angenommen, M wäre nicht geodätisch vollständig. Dann gibt es eine nach Bogenlänge parametrisierte Geodätische γ und es existiert ein $s_0 \in \mathbb{R}$, sodass $\gamma(s)$ für alle $s_0 > s$ definiert ist, aber γ sich auf s nicht fortsetzen lässt.

Betrachte eine Folge (s_n) mit $s_n \rightarrow s$ für $n \rightarrow \infty$. Wir behaupten, dass die Folge $(\gamma(s_n))_n$ dann Cauchy-konvergent ist. Sei $\varepsilon > 0$. Es existiert ein N , sodass für alle $n, m \geq N$ gilt

$$|s_n - s_m| < \varepsilon.$$

Dann gilt

$$d(\gamma(s_n), \gamma(s_m)) \leq L_{s_n}^{s_m}(\gamma) = |s_n - s_m| < \varepsilon.$$

(3) impliziert nun, dass $\gamma(s_n)$ gegen einen Punkt $q \in M$ konvergiert. Ergo liegen ab einem bestimmten Index alle Folgenglieder in einer geodätischen Umgebung von q . Nun kann man durch q eine Geodäte wählen, die γ fortsetzt.

(4) \Rightarrow (1): trivial.

(2) \Leftrightarrow (5): Dies zeigt man durch Punktmengen-Topologie.

□

1.11.5 Korollar

Kompakte Mannigfaltigkeiten sind vollständig.

1.12 Überlagerungen

Seien E, B topologische Räume. Sei $p : E \rightarrow B$ eine stetige surjektive Abbildung.

1.12.1 Definition

p heißt **Überlagerung** von B , wenn für jedes $b \in B$ eine offene Umgebung $U \stackrel{o}{\subset} B, b \in U$, existiert mit

$$p^{-1}(U) = \bigsqcup_i V_i,$$

wobei die V_i topologisch disjunkt und jeweils offen sind. Ferner soll für jedes i die Einschränkung

$$p|_{V_i} : V_i \longrightarrow U_i$$

ein Homöomorphismus sein.

Man nennt in diesem Zusammenhang B den **Basisraum** und E den Totalraum.

1.12.2 Beispiel

\mathbb{R} lässt sich wie eine Spirale über S^1 aufdrehen. Betrachte dazu

$$\begin{aligned} p : \mathbb{R}^1 &\longrightarrow S^1 \\ t &\longmapsto e^{2\pi it}. \end{aligned}$$

1.12.3 Bemerkung

Nicht jeder surjektiver lokaler Homöomorphismus ist eine Überlagerung.

1.12.4 Hochhebungsproblem

In voller Allgemeinheit gestaltet sich das Problem wie folgt. Es sind stetige Abbildungen $f : X \rightarrow Y$ und $g : Z \rightarrow Y$ gegeben und man fragt, ob eine stetige Abbildung $\tilde{f} : X \rightarrow Z$ existiert mit $g \circ \tilde{f} = f$.

$$\begin{array}{ccc} & & Z \\ & \nearrow \exists ? \tilde{f} & \downarrow g \\ X & \xrightarrow{f} & Y \end{array}$$

Im allgemeinen Fall ist die Antwort natürlich Nein. Betrachte als Gegenbeispiel die Identität $f = \text{Id}_{S^1}$ und die Überlagerung $g : \mathbb{R}^1 \rightarrow S^1$. Würde \tilde{f} existieren, so würde sich folgendes kommutierende Diagramm von Kohomologiegruppen existieren:

$$\begin{array}{ccc} & & H^1(\mathbb{R}) = 0 \\ & \nwarrow \tilde{f}^* & \uparrow g^* \\ H^1(S^1) = \mathbb{R} & \xleftarrow{f^* = \text{Id}} & H^1(S^1) = \mathbb{R} \end{array}$$

Sei $g = p$ nun eine Überlagerung.

Fakt: Wege lassen sich bzgl. Überlagerungen hochheben, und zwar *eindeutig*, wenn der Anfangspunkt der Hochhebung fixiert wurde.

Beweis

Ist $\gamma : [0, 1] \rightarrow B$ ein Weg im Basisraum und $x \in p^{-1}(\gamma(0))$, so besitzt $\gamma \cap U$ in einer offenen Umgebung um U eine eindeutige Fortsetzung von x aus. Da $\gamma([0, 1])$ kompakt ist, können wir $\gamma([0, 1])$ mit endlich vielen offenen Mengen überdecken, deren Urbilder unter p sich in homöomorphe Komponenten zerlegen lassen. Auf jeder dieser Komponenten ist die Hochliftung aufgrund der Homöomorphie eindeutig. \square

1.12.5 Definition

Zwei Überlagerungen $p_i : E_i \rightarrow B, i = 1, 2$, heißen **äquivalent**, wenn es einen Homöomorphismus $\varphi : E_1 \rightarrow E_2$ zwischen den Totalräumen, sodass sich folgendes Diagramm ergibt:

$$\begin{array}{ccc} E_1 & \xrightarrow{\varphi} & E_2 \\ & \searrow p_1 & \swarrow p_2 \\ & B & \end{array}$$

1.12.6 Definition

Ein topologischer Raum X heißt **einfach zusammenhängend**, wenn X wegzusammenhängend ist und jede stetige punktierte Abbildung $\gamma : (S, 1) \rightarrow (X, x_0)$ homotop relativ 1 zur konstanten Abbildung $z \mapsto x_0$ ist.

Fakt: Sei $p : E \rightarrow B$ eine Überlagerung. Seien $\gamma, \gamma' : I \rightarrow B$ Wege, die homotop relativ Endpunkte sind. Seien $\tilde{\gamma}, \tilde{\gamma}' : I \rightarrow E$ Hochhebungen von γ und γ' , sodass gilt

$$\tilde{\gamma}(0) = \tilde{\gamma}'(0).$$

Dann gilt

$$\tilde{\gamma}(1) = \tilde{\gamma}'(1).$$

Fakt: Abbildungen, die auf einem einfach zusammenhängenden Raum definiert sind, lassen sich immer bzgl. Überlagerungen hochheben.

Beweis

Sei X einfach zusammenhängend und es seien eine Abbildung $f : X \rightarrow B$ und eine Überlagerung $g : E \rightarrow B$ gegeben. Wir wollen eine Hochhebung $\tilde{f} : X \rightarrow E$ konstruieren.

Sei $x_0 \in X$ ein beliebiger Basispunkt und $y_0 \in p^{-1}(x_0)$ fixiert. Ist $x \in X$ ein anderer Punkt, so sei $\gamma : x_0 \rightarrow x$ eine Strecke zwischen beiden Punkte. Der Weg $f\gamma$ besitzt eine Hochhebung $\tilde{\gamma}$ mit $\tilde{\gamma}(0) = y_0$. Wir setzen

$$\tilde{f}(x) := \tilde{\gamma}(1).$$

\tilde{f} ist dadurch wohldefiniert. Denn sind $\gamma, \gamma' : x_0 \rightarrow x$ zwei verschiedene Wege. Dann ist $f \circ \gamma * \gamma'$ ein nullhomotoper Weg in B . Dieser wird zu einem nullhomotopen Weg

in E hochgeliftet. Es gilt ergo

$$f(x) = \tilde{\gamma}(1) = \tilde{\gamma}'.$$

Es bleibt zu zeigen, dass \tilde{f} stetig ist. □

1.12.7 Definition

Eine Überlagerung $p : E \rightarrow B$ heißt **universell**, wenn E einfach zusammenhängend.

Wir nehmen nun an, dass unsere Räume wegzusammenhängend sind. Seien E_1, E_2 einfach zusammenhängend mit Überlagerungen $p_i : E_i \rightarrow B$ für $i = 1, 2$. Es ergibt sich folgendes Diagramm

$$\begin{array}{ccc} & E_2 & \\ \nearrow \exists_1 \tilde{p}_1 & \downarrow p_2 & \\ E_1 & \xrightarrow{p_1} & B \end{array}$$

da E_1 einfach zusammenhängend ist. Da E_2 ebenfalls einfach zusammenhängend ist, ergibt sich ferner

$$\begin{array}{ccc} & E_1 & \\ \nearrow \exists_1 \tilde{p}_2 & \downarrow p_1 & \\ E_2 & \xrightarrow{p_2} & B \end{array}$$

Da die Hochhebungen $\widetilde{\text{Id}_{E_1}} = \tilde{p}_2 \tilde{p}_1$ und $\widetilde{\text{Id}_{E_2}} = \tilde{p}_1 \tilde{p}_2$ eindeutig sind, folgt, dass \tilde{p}_1 und \tilde{p}_2 zueinander inverse Homöomorphismen sind. Daraus folgt, dass E_1 und E_2 äquivalent sind.

Wir haben gezeigt: Die *universelle* Überlagerung eines Basisraumes ist eindeutig bis auf Äquivalenz von Überlagerungen.

1.12.8 Korollar

Ist B einfach zusammenhängend, so ist

$$p : E \longrightarrow B$$

ein Homöomorphismus.

Beweis

E muss einfach zusammenhängend sein. Ferner liegt folgendes Diagramm von Überlagerungen vor:

$$\begin{array}{ccc} E & \xrightarrow{\exists_1 \varphi} & B \\ & \searrow p & \swarrow \text{Id}_B \\ & B & \end{array}$$

Da B einfach zusammenhängend ist, folgt, dass $p = \varphi$ homöomorph ist. □

1.12.9 Bemerkung

Im glatten Kontext ersetzen wir *Homöomorphismus* durch *Diffeomorphismus*, etc..

Sei M^n eine Riemannsche Mannigfaltigkeit.

1.12.10 Proposition

Ist M zusammenhängend und vollständig mit Schnittkrümmung $\kappa \leq 0$ überall, so ist $\exp_p : T_p M \rightarrow M$ die universelle Überlagerung von M .

Daraus folgt:

1.12.11 Satz: Hadamard

Sei M einfach zusammenhängend und vollständig mit $\kappa \leq 0$. Dann ist M diffeomorph zu \mathbb{R}^n .

Beweis

$p : T_p M \rightarrow M$ ist universell laut der Proposition. Mit dem voran gegangenen Korollar folgt nun, dass \exp_p ein Diffeomorphismus ist. □

Wir wollen nun die Proposition beweisen.

1.12.12 Lemma 1

Seien T, M Riemannsche Mannigfaltigkeiten der Dimension n und T vollständig. Ist $p : T \rightarrow M$ eine isometrische Immersion, so ist p eine Überlagerung.

Beweis

- (1)
- M
- ist vollständig:

Sei $x^* \in T$. Setze $x := p(x^*)$. Sei $v \in T_x M$ mit $\|v\| = 1$. Dann ist $dp_{x^*} : T_{x^*} T \rightarrow T_x M$ eine Isometrie von Vektorräumen. Setze

$$v^* := (dp_{x^*})^{-1}(v).$$

Definiere eine Geodäte durch

$$\gamma^*(s) := \exp_{x^*}(sv^*)$$

für alle $s \in \mathbb{R}$, da T vollständig. Da gilt

$$p(\gamma^*(s)) = \exp_x(sv)$$

ist auch $\exp_x(sv)$ für alle $s \in \mathbb{R}$ definiert. Ergo ist auch M vollständig.

- (2)
- p
- ist surjektiv:

Sei $x_0^* \in T$, setze $x_0 := p(x_0^*)$. Sei $x \in M$. Wegen Hopf-Rinow (6) gibt es eine Geodätische γ , die x_0 mit x verbindet, wobei $v := \dot{\gamma}(0)$ Länge 1 hat. Dann gilt $\gamma(l) = x$ für $l = d(x_0, x)$.

Wir können v zu $v^* \in T_{x_0^*} T$ hochliften. Es gilt dann für $x^* := \exp_{x_0^*}(lv^*)$

$$p(x^*) = x.$$

- (3)
- p
- ist eine Überlagerung:

□

Vorlesung
vom
30.05.18

1.12.13 Lemma 2

Ist M vollständig mit $\kappa \leq 0$, so ist $\exp_p : T_p M \rightarrow M$ ein lokaler Diffeomorphismus.

Beweis

Sei J ein Jacobi-Feld entlang $\gamma(t) = \exp_p(tv)$ für $\|v\| = 1$, mit $J(0) = 0$ und $J \neq 0$. Es genügt zu zeigen, dass $J(t) \neq 0$ für alle $t > 0$. Es gilt

$$\begin{aligned}\langle J, J \rangle'' &= 2 \langle J', J' \rangle + 2 \langle J, J'' \rangle \\ &= 2 \|J'\|^2 + 2 \langle -R(\dot{\gamma}, J')\dot{\gamma}, J \rangle \\ &= 2 \|J'\|^2 - 2\kappa(\dot{\gamma}, J) \cdot A(\dot{\gamma}, J)^2.\end{aligned}$$

Da $A(\dot{\gamma}, J)^2 \geq 0$ und $\kappa(\dot{\gamma}, J) \leq 0$, folgt

$$\langle J, J \rangle'' \geq 0.$$

D. h., $\|J\|^2$ ist eine konvexe Funktion von t . Es gilt ferner $J'(0) \neq 0$ und $\langle J, J \rangle'(0) = 2 \langle J, J' \rangle(0) = 0$.

Daraus folgt $J(t) \neq 0$ für alle $t > 0$. □

Beweis: Proposition 1.12.10

Mit Lemma 2 folgt, dass \exp_p ein lokaler Diffeomorphismus ist. Daraus folgt, dass die Riemannsche Metrik auf M eine eindeutige Riemannsche Metrik auf $T_p M$ induziert, durch die \exp_p zu einer isometrischen Isomorphismus wird.

Die Geodätischen in $T_p M$ durch den Ursprung 0 sind die Geraden durch 0. Mit Hopf-Rinow folgt nun, dass $T_p M$ mit der gegebenen Metrik vollständig ist. Mit Lemma 1 folgt nun, dass \exp_p eine Überlagerung ist. □

Kapitel 2

Morse-Theorie

2.1 Crash-Kurs: Zellkomplexe und Homologie

- **Zellkomplexe:**

Idee: Zerlege einen Raum in Teile (*Zellen*), die selbst *keine Topologie* besitzen. Dann kann die Homologie/Kohomologie aus der Kombinatorik dieser Teile abgelesen werden.

2.1.1 Definition: Zelle

Wir definieren **Zelle** als alles, was homöomorph zu $D^n = \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x\| \leq 1\}$ ist. Es gilt $\partial D^n = S^{n-1}$.

Schreibweise:

$$e^n \cong D^n.$$

Wir beschränken uns auf **endliche** Zellkomplexe.

- **CW-Komplexe**¹:

CW-Komplexe sind induktiv definiert:

$$X^0 = e_1^0 \sqcup e_2^0 \cup \dots \sqcup e_{k_0}^0$$

ist eine disjunkte Vereinigung von Punkten. X^1 ergibt sich, indem 1-Zellen dazu nimmt und ihre Randpunkte mit Punkten in X^0 identifiziert:

$$X^0 \cup_f e^1 := (X^0 \sqcup e^1) / (x \sim f(x) \ \forall x \in \partial e^1) \text{ mit } \partial e^1 = S^0 \xrightarrow{f} X^0.$$

¹Das C steht für *closure finite* und das W für *weak topology*.

Dann gilt

$$X^1 = X^0 \cup_{f_1} e_1^1 \cup_{f_2} e_2^1 \dots \cup_{f_{k_1}} e_{k_1}^1.$$

Die $f_i : e_i^1 \rightarrow X^0$ nennt man **anheftende Abbildungen**. X^1 nennt man auch **Graph**.

$$\begin{aligned} X^2 : e^2, \partial e^2 = S^1 &\xrightarrow{f} X^1 \\ X^1 \cup_f e^2 &:= (X^1 \sqcup e^2) / (\forall x \in \partial e^2 = S^1 : x \sim f(x)) \\ X^2 &= X^1 \cup_{f_1} e_1^2 \dots \cup_{f_{k_2}} e_{k_2}^2. \end{aligned}$$

Allgemein:

$$X^n = X^{n-1} \cup_{f_1} e_1^n \dots \cup_{f_{k_n}} e_{k_n}^n$$

mit $f_i : \partial e_i^n \rightarrow X^{n-1}$ stetig. X^n nennt man das **n -Skelett**.
Es ergibt sich ferner folgendes Diagramm

$$\begin{array}{ccc} e_i^k & \xrightarrow{\chi_i} & X^k \subset X \\ \uparrow & & \uparrow \\ \partial e_i^k & \xrightarrow{f} & X^{k-1} \end{array}$$

wobei χ_i ein Homöomorphismus vom Inneren von e_i^k auf sein Bild ist. χ_i nennt man auch die **charakteristische Abbildung**.

2.1.2 Definition

Ein topologischer Raum von der Form X^n heißt **CW-Komplex**.

2.1.3 Beispiel

$$\begin{aligned} S^0 &= e^0 \sqcup e^0 \\ S^1 &= e^0 \sqcup e^1 \\ S^n &= e^0 \sqcup e^n \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} \mathbb{R}P^2 &= D^2 / (x \sim -x, x \in \partial D^2) \\ \mathbb{R}P^2 &= S^1 \cup_f e^2 \end{aligned}$$

mit f antipodal. Daraus folgt

$$\mathbb{R}P^2 = e^0 \cup_{\text{konst.}} e^1 \cup_f e^2.$$

Allgemein:

$$\mathbb{R}P^n = \mathbb{R}P^{n-1} \cup_{\text{Quot}=f} e^n$$

mit $f : \partial e^n = S^{n-1} \xrightarrow{\text{Quot}} \mathbb{R}P^{n-1} = S^{n-1}/(x \sim -x)$. Daraus folgt

$$\mathbb{R}P^n = e^0 \cup e^1 \cup \dots \cup_{\text{Quot}} e^n.$$

Torus:

$$T^2 = e^0 \cup_{\text{konst.}} e_a^1 \cup_{\text{konst.}} e_b^1 \cup_f e^2$$

mit $f : \partial e^2 = S^1 \rightarrow (T^2)^1$. $(T^2)^1$ soll das 1-Skelett des Tori beschreiben. $f = aba^{-1}b^{-1}$.

Kleinsche Flasche:

$$K^2 = e^0 \cup e_a^1 \cup e_b^1 \cup_f e^2$$

mit $f : aba^{-1}b$, sonst gilt $(K^2)^1 = (T^2)^1$.

2.1.4 Definition

Sei X ein CW-Komplex. Setze

$$C_k(X) := \mathbb{Z}[X^k].$$

D. h., $C_k(X)$ ist die frei abelsche Gruppe, die von den k -dimensionalen Zellen in X frei erzeugt wird. $C_k(X)$ nennen wir die k -te **zelluläre Kettengruppe** von X .

2.1.5 Beispiel

Für $X = T^2 = e^0 \cup e_a^1 \cup e_b^1 \cup_f e^2$ ist

$$\begin{aligned} C_{-1} &= 0, C_0(T^2) &&= \mathbb{Z}\langle e^0 \rangle, \\ C_1(T^2) &= \mathbb{Z}\langle e_a^1, e_b^1 \rangle = \mathbb{Z}\langle e_a^1 \rangle \oplus \mathbb{Z}\langle e_b^1 \rangle, \\ C_2(T^2) &= \mathbb{Z}\langle e^2 \rangle. \end{aligned}$$

Es gibt ferner Randabbildungen

$$\xrightarrow{\partial_3} C_2(T^2) \xrightarrow{\partial_2} C_1(T^2) \xrightarrow{\partial_1} C_0(T^2) \xrightarrow{\partial_0} C_{-1}(T^2) \xrightarrow{\partial_{-1}}.$$

Diese sind gegeben durch

$$\begin{aligned}\partial_1(e_a^1) &= e^0 - e^0 = 0, \\ \partial_1(e_b^1) &= e^0 - e^0 = 0, \\ \partial_2(e^2) &= e_a^1 + e_b^1 - e_a^1 - e_b^1 = 0.\end{aligned}$$

Für die Homologie

$$H_k(X) := \frac{\ker(\partial_k : C_k(X) \rightarrow C_{k-1}(X))}{\operatorname{im}(\partial_{k+1} : C_{k+1}(X) \rightarrow C_k(X))}$$

ergibt sich nun

$$\begin{aligned}H_2(T^2) &= C_2(T^2) = \mathbb{Z}, \\ H_1(T^2) &= C_1(T^2) = \mathbb{Z} \oplus \mathbb{Z}, \\ H_0(T^2) &= C_0(T^2) = \mathbb{Z}.\end{aligned}$$

Für K^2 kann man analog nachrechnen

$$\begin{aligned}H_2(K^2) &= 0, \\ H_1(K^2) &= \mathbb{Z} \oplus \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}, \\ H_0(K^2) &= \mathbb{Z}.\end{aligned}$$

2.1.6 Definition: Randoperatoren

Wir definieren **Randoperatoren**

$$\partial_k : C_k(X) \longrightarrow C_{k-1}(X).$$

Sei e_i^k eine k -Zelle von X .

$$\partial e_i^k = S_i^{k-1} \xrightarrow{f_i} X^{k-1} \xrightarrow{\operatorname{Quot}} \frac{X^{k-1}}{X^{k-2}} \cong \bigvee_j S_j^{k-1} \xrightarrow{\operatorname{Proj}} S_j^{k-1}.$$

$\partial e_i^k = S_i^{k-1} \rightarrow S_i^{k-1}$ habe den Abbildungsgrad $d_{i,j} \in \mathbb{Z}$. ∂_k ist dann gerade die Matrix $(d_{i,j})_{i,j}$. Es gilt

$$\partial_{k-1} \circ \partial_k = 0.$$

Wir definieren ferner die **zelluläre Homologie** von X durch

$$H_k(X) := \frac{\ker(\partial_k : C_k(X) \rightarrow C_{k-1}(X))}{\operatorname{im}(\partial_{k+1} : C_{k+1}(X) \rightarrow C_k(X))}.$$

2.1.7 Bemerkung

Man kann auch Kettengruppen $C_k(X; R) = C_k(X) \otimes_{\mathbb{Z}} R$ über beliebige **Koeffizientenringe** einführen. Diese besitzen Randabbildungen $\partial_k : C_k(X; R) \rightarrow C_{k-1}(X; R)$ und führen zu R -wertigen Homologiergruppen $H_k(X; R) = \ker \partial_k / \text{Bild} \partial_{k+1}$. Die Definition von $H_k(X; R)$ ist unabhängig von der Wahl der CW-Struktur auf X .

Achtung: Im Allgemeinen gilt **nicht**

$$H_k(X; R) = H_k(X) \otimes_{\mathbb{Z}} R.$$

2.1.8 Beispiel

Sei $X = \mathbb{R}P^2 = e^0 \cup e^1 \cup_f e^2$, wobei $f : D^2 = e^2 \rightarrow S^1 = e^1 \cup e^0$ die Abbildung von Grad 2 ist. Es ergeben sich folgende Abbildungen

$$\xrightarrow{0} C_2 = \mathbb{Z} \langle e^2 \rangle \xrightarrow{\partial_2=2} C_1 = \mathbb{Z} \langle e^1 \rangle \xrightarrow{\partial_1=0} C_0 = \mathbb{Z} \langle e^0 \rangle \xrightarrow{0} .$$

Somit folgt

$$H_i(\mathbb{R}P^2) = \begin{cases} 0, & i = 2, \\ \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} & i = 1, \\ \mathbb{Z} & i = 0. \end{cases}$$

2.1.9 Definition: Induzierte Abbildungen

Eine stetige Abbildung $f : X \rightarrow Y$ zwischen CW-Komplexen heißt **zellulär**, wenn $f(X^k) \subset Y^k$ für alle k gilt.

Sei $f : X \rightarrow Y$ zellulär und sei e_i^k eine k -Zelle von X . Betrachte die charakteristische Abbildung

$$\begin{array}{ccc} e_i^k & \xrightarrow{\chi_i} & X^k \subset X \\ \uparrow & & \uparrow \\ \partial e_i^k & \xrightarrow{f} & X^{k-1} \end{array}$$

Dies induziert Abbildungen

$$S_i^k := \frac{e_i^k}{\partial e_i^k} \xrightarrow{\bar{\chi}} \frac{X^k}{X^{k-1}} \xrightarrow{f} \frac{Y^k}{Y^{k-1}} = \bigvee_j S_j^k \xrightarrow{\text{Proj}} S_j^k.$$

Den Grad der Abbildung $S_i^k \rightarrow S_j^k$ nennen wir $f_{ij} \in \mathbb{Z}$. Diese ergeben die Matrix

$$f_* := (f_{ij}) : C_k(X) \longrightarrow C_k(Y).$$

Es gilt

$$\partial_* \circ f_* = f_* \circ \partial_*.$$

Daraus folgt, dass f_* Homomorphismen auf der Homologie

$$f_* : H_k(X) \longrightarrow H_k(Y)$$

induziert.

2.1.10 Satz: Zellulärer Approximationssatz

Sei $f : X \rightarrow Y$ eine stetige Abbildung zwischen CW-Komplexen. Dann ist f homotop zu einer zellulären Abbildung.

Beachte, dass die auf den Homologiegruppen induzierte Abbildung f_* nur von der Homotopieklasse von f abhängt.

2.1.11 Definition: Relative Homologie

Sei X ein CW-Komplex und $A \subset X$ ein **Unterkomplex**, d. h., eine Vereinigung von abgeschlossenen Zellen. Dann ergibt sich eine Inklusion

$$C_k(A) \subset C_k(X).$$

Wir setzen

$$C_k(X, A) := \frac{C_k(X)}{C_k(A)}.$$

Betrachte nun das kommutierende Diagramm

$$\begin{array}{ccc} C_k(A) & \hookrightarrow & C_k(X) \\ \downarrow \partial_k^A & & \downarrow \partial_k^X \\ C_{k-1}(A) & \hookrightarrow & C_{k-1}(X) \end{array}$$

Wir definieren ergo die **relative Homologie** des Paares (X, A) durch

$$H^k(X, A) := \frac{\ker \partial_k : C_k(X, A) \rightarrow C_{k-1}(X, A)}{\text{Bild} \partial_{k+1} : C_{k+1}(X, A) \rightarrow C_k(X, A)}$$

Nach Konstruktion ist

$$0 \longrightarrow C_*(A) \longrightarrow C_*(X) \longrightarrow C_*(X, A) \longrightarrow 0$$

exakt. Dies induziert uns eine lange exakte Sequenz

$$\dots \rightarrow H_k(A) \rightarrow H_k(X) \rightarrow H_k(X, A) \rightarrow H_{k-1}(A) \rightarrow \dots$$

2.1.12 Definition: Tripel

Betrachte das **Tripel** $A \subset Y \subset X$ von Unterkomplexen. Wir schreiben hierfür auch (X, Y, A) .

Dann ergibt sich folgendes kommutierende Zopf-Diagramm

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & H_k(Y, A) & \xleftarrow{\quad} & H_{k-1}(A) & \xleftarrow{\quad} & H_{k-1}(A) \\
 & \nearrow & & \nearrow & & \nearrow & \\
 H_k(Y) & & & & H_k(X, A) & & H_{k-1}(Y) \\
 \nearrow & \searrow & \nearrow & \searrow & \nearrow & \searrow & \\
 H_k(A) & \xrightarrow{\quad} & H_k(X) & \xrightarrow{\quad} & H_k(X, Y) & \xrightarrow{\quad} & H_{k-1}(Y, A)
 \end{array}$$

2.2 Morse-Theorie

Die Morse-Theorie soll eine Beziehung zwischen auf der einen Seite den kritischen Punkten und den Indizes einer glatten Funktion $f : M \rightarrow \mathbb{R}$ und auf der anderen Seite der Zellstruktur bzw. der Homologie von M .

2.2.1 Beispiel

Es sei $f : M = T^2 \rightarrow \mathbb{R}^1$ die glatte Abbildung, die jedem Punkt des auf der Seite stehenden Tori seine Höhe zuordnet. Diese Abbildung hat vier kritische Punkte: Der höchste Punkt, der tiefste Punkt und der maximal bzw. minimale Innenpunkt. Wir nennen diese kritischen Punkte in absteigender Höhe s, r, p, q .

Für ein $a \in \mathbb{R}$ setze $M^a := \{x \in M \mid f(x) \leq a\}$.

- Ist $a < f(p)$, so gilt $M^a = \emptyset$.
- Ist $a \in (f(p), f(q))$, so ist M^a eine Kreisscheibe.
- Ist $a \in (f(q), f(r))$, so ist M^a ein Zylinder.
- Ist $a \in (f(r), f(s))$, so ist M^a der Torus minus eine obere Kreisscheibe.
- Ist $a > f(s)$, so ist $M^a = M$.

Homotopietheoretisch: Ist $a \in (f(p), f(q))$, so ist M^a homotop zum Punkt, ergo zu einer 0-Zelle e^0 .

Ist $a \in (f(q), f(r))$, so ist M^a homotop zu einer Sphäre, ergo erhält man eine 1-Zelle e^1 , die man an e^0 anklebt.

Ist $a \in (f(r), f(s))$, so ist M^a homotop zu $S^1 \wedge S^1$, ergo erhält man eine weiteren 1-Zelle e^1 , die man an den oberen Punkt von e^1 klebt.

Ist $a > f(s)$, so ist $M^a = M$ homotop zum Torus, ergo erhält man eine 2-Zelle, die man entlang den beiden e^1 s verklebt.

2.2.2 Definition: Die Hesse-Form

Sei M eine glatte Mannigfaltigkeit, $f : M \rightarrow \mathbb{R}$ glatt, $p \in M$ ein kritischer Punkt von f .

Seien $v, w \in T_p M$. Wähle glatte Fortsetzungen von v, w als glatte Vektorfelder \tilde{v}, \tilde{w} auf M . Wir definieren folgenden Ausdruck

$$H(f)(v, w) := v_p(\tilde{w}(f)).$$

Um dies zu untersuchen, betrachten wir folgende Lie-Klammer für $\tilde{v} = \sum_i a_i \frac{\partial}{\partial x_i}$, $\tilde{w} = \sum_i b_i \frac{\partial}{\partial x_i}$ in lokalen Koordinaten

$$[\tilde{v}, \tilde{w}](f)_p = \sum_{i,j} \left(a_i \frac{\partial b_j}{\partial x_i} - b_i \frac{\partial a_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial f}{\partial x_j} \Big|_p.$$

Aber $\frac{\partial f}{\partial x_j} \Big|_p$ muss Null sein, da p ein kritischer Punkt ist. Es folgt

$$v_p(\tilde{w}(f)) = w_p(\tilde{v}(f))$$

bzw.

$$H(f)(v, w) = H(f)(w, v).$$

Dies zeigt, dass $H(f)$ symmetrisch und wohldefiniert, d. h. unabhängig von der Wahl von \tilde{v} und \tilde{w} , ist.

Wir erhalten so eine symmetrische Bilinearform

$$H(f) : T_p M \times T_p M \longrightarrow \mathbb{R},$$

die sogenannte **Hesse-Form**.

In der Basis $\{\frac{\partial}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_n}\}$ von $T_p M$ ist $H(f)$ durch die **Hesse-Matrix** $\left(\frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial}{\partial x_j} f(0) \right)_{i,j}$ gegeben.

2.2.3 Definition

- Ein kritischer Punkt $p \in M$ von $f : M \rightarrow \mathbb{R}$ heißt **nicht ausgeartet**, wenn $H(f)_p$ als Bilinearform nicht ausgeartet ist. D. h., die Hesse-Matrix bei p ist nicht singulär.

- Der **Index** eines nicht ausgearteten kritischen Punktes p von f ist die maximale Dimension von Untervektorräumen von $T_p M$, auf denen die Hesse-Form negativ definit ist.

2.2.4 Lemma

Sei $f: U \rightarrow \mathbb{R}$ glatt, $U \subset \mathbb{R}^n$ offen und konvex. Ferner soll $f(0) = 0$ gelten. Dann existieren glatte Funktionen $g_i: U \rightarrow \mathbb{R}$ für $i = 1, \dots, n$ mit:

1. $f(x) = \sum_{i=1}^n x_i g_i(x)$.
2. $g_i(0) = \frac{\partial f}{\partial x_i}(0)$.

Beweis

Es gilt

$$f(x) = \int_0^1 \frac{\partial}{\partial t} f(tx) dt = \int_0^1 \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i}(tx) \cdot x_i dt.$$

Setze ergo

$$g_i(x) := \int_0^1 \frac{\partial f}{\partial x_i}(tx) dt.$$

□

2.2.5 Lemma: Morse Lemma

Sei $f: M \rightarrow \mathbb{R}$ glatt und $p \in M$ ein nicht ausgearteter kritischer Punkt von f . Dann gibt es lokale Koordinaten y_1, \dots, y_n bei p , sodass

$$f(y) = f(p) - y_1^2 - \dots - y_\iota^2 + y_{\iota+1}^2 + \dots + y_n^2,$$

wobei ι gleich dem Index von f bei p ist.

Beweis

Seien x_1, \dots, x_n lokale Koordinaten. Wir dürfen ohne Einschränkung annehmen, dass $f(0) = 0$ gilt.

Das vorangegangene Lemma impliziert, dass g_i existieren mit

$$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i g_i(x), \quad g_i(0) = \frac{\partial f}{\partial x_i}(0).$$

Da p ein kritischer Punkt ist, ist $g_i(0) = \frac{\partial f}{\partial x_i}(0) = 0$ für alle i . Wir wenden das Lemma nochmal für alle g_i an und erhalten Funktionen $h_{ij}(x)$ mit

$$g_i(x) = \sum_j x_j h_{ij}(x).$$

Daraus folgt

$$f(x) = \sum_{i,j} x_i x_j h_{ij}(x).$$

Man kann ferner ohne Einschränkung annehmen, dass $h_{ij} = h_{ji}$ gilt (anderenfalls kann man stattdessen $\frac{h_{ij}+h_{ji}}{2}$ betrachten).

Induktion: Annahme: Wir haben lokale Koordinaten u bei p mit

$$f(u) = \pm u_1^2 \pm \dots \pm u_{r-1}^2 + \sum_{i,j \geq r} u_i u_j H_{ij}(u)$$

für glatte Funktionen H_{ij} mit $H_{ij} = H_{ji}$. Aufgrund der Symmetrie können wir die Matrix $H_{ij}(0)$ diagonalisieren, d. h.

$$A^{-1} H_{ij}(0) A = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_n \end{pmatrix}.$$

Da $H_{ij}(0)$ nicht singulär ist, ist $\lambda_1 \neq 0$. Es sei r maximal mit $|H_{rr}(u)| > 0$. Dann ist $g(u) := \sqrt{|H_{rr}(u)|}$ glatt in der Nähe von $u = 0$.

Transformation

$$\begin{aligned} v_i &:= u_i \text{ für } i \neq r \\ v_r &:= g(u) \left(u_r + \sum_{i>r} u_i \frac{H_{ir}}{H_{rr}} \right) \end{aligned}$$

Dann gilt

$$f(v) = \pm v_1^2 \pm \dots \pm v_r^2 + \sum_{i,j \geq r+1} v_i v_j \tilde{H}_{ij}.$$

□ Wenn f die Form in der Behauptung hat, dann

$$(H(f))_{ij} = \begin{pmatrix} -2 & & & & & \\ & -2 & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & -2 & & \\ & & & & 2 & \\ & & & & & \ddots \\ & & & & & & 2 \end{pmatrix},$$

wobei die Anzahl der negativen Diagonaleinträge dem Index von f bei p entspricht.

2.2.6 Korollar

Nichtausgeartete kritische Punkte sind isoliert.

2.2.7 Beispiel

Betrachte einen auf der Seite liegenden Zylinder. Alle Punkte auf der oberen Seitenlinie, sind kritisch und liegen kontinuierlich, ergo sind sie alle ausgeartet.

Sei M eine glatte Mannigfaltigkeit und X ein Vektorfeld auf M , sodass $X|_{M-K} = 0$ für eine kompakte Menge $K \subset M$.

Sei $U_1 \cup \dots \cup U_m$ eine Überdeckung von K durch offene Mengen auf denen lokale Flüsse $\varphi_{i,t} : U_i \rightarrow M$ existieren mit

$$\frac{\partial}{\partial t} \varphi_{i,t} = X(\varphi_{i,t})$$

für $|t| < \varepsilon_i$. Wegen der Eindeutigkeit von Lösungen von Differentialgleichungssystemen gilt $\varphi_{i,t} = \varphi_{j,t}$ auf $U_{i,t} \cap U_{j,t}$. Setze nun

$$\varphi_t(q) := \begin{cases} q & q \in M \setminus K, \\ \varphi_{i,t}(q), & q \in U_i \end{cases}$$

für $|t| < \varepsilon := \min_i \varepsilon_i$. φ_t ist ein globaler Fluss für X .

Ist $|t| \geq \varepsilon$, dann schreibe

$$t = k \cdot \frac{\varepsilon}{2} + r$$

mit $k \in \mathbb{Z}$, $|r| < \frac{\varepsilon}{2}$. Es gilt dann konsequenterweise

$$\varphi_t = (\varphi_{\frac{\varepsilon}{2}})^k \circ \varphi_r.$$

Ergo ist $\varphi_t(p)$ für alle $p \in M$ und $t \in \mathbb{R}$ definiert.

2.2.8 Proposition

Sei M eine glatte kompakte Mannigfaltigkeit, $f: M \rightarrow \mathbb{R}$ glatt ohne kritische Punkte in $f^{-1}([a, b])$ für ein Paar $a, b \in \mathbb{R}$, $a < b$. Dann ist M^a diffeomorph zu M^b , die Inklusion $M^a \hookrightarrow M^b$ ist eine Homotopieäquivalenz und M^a ist ein Deformationsretrakt von M^b .

Beweis

Sei $\langle \cdot, \cdot \rangle$ eine Riemannsche Metrik auf M .

2.2.9 Definition

Wir definieren einen **Gradienten** ∇f durch

$$\langle X, \nabla f \rangle := X(f)$$

für alle Vektorfelder X .

p ist genau dann ein kritischer Punkt von f , wenn ∇f bei p Null ist. Nun folgt, dass $\|\nabla f\| > 0$ auf $f^{-1}([a, b])$. Setze

$$\rho(q) := \begin{cases} \frac{1}{\|\nabla f\|^2}(q), & q \in f^{-1}([a, b]) \\ 0, & q \in M \setminus K \end{cases}$$

für eine kompakte Umgebung $K \supset f^{-1}([a, b])$. Auf $K \setminus f^{-1}([a, b])$ sei ρ irgendwie definiert, sodass $\rho: M \rightarrow \mathbb{R}$ glatt ist.

Definiere folgendes Vektorfeld auf M

$$X := \rho \cdot \nabla f.$$

X verschwindet außerhalb von K , ergo existiert ein globaler Fluss $\varphi_t: M \rightarrow M$ mit $\frac{\partial}{\partial t} \varphi_t = X(\varphi_t)$ für $t \in \mathbb{R}$.

Setze $g(t) := f(\varphi_t(q))$. Es gilt

$$\begin{aligned} g'(t) &= \left\langle \frac{\partial}{\partial t} \varphi_t, \nabla f \right\rangle \\ &= \langle X, \nabla f \rangle \\ &= \langle \rho \nabla f, \nabla f \rangle \\ &= \rho \|\nabla f\|^2 = +1, \end{aligned}$$

solange sich q auf $f^{-1}([a, b])$ befindet. Sei $c = g(0) = f(\varphi_0(q)) = f(q)$. Wenn $q \in M^a$, dann $f(q) \leq a$. Daraus folgt $c \leq a$ und $g(t) = t + c$. Es gilt

$$f(\varphi_{b-a}(q)) = g(b - a) = b - a + c \leq b - a \leq b$$

d. h., $\varphi_{b-a}(q) \in M^b$. Es ist nun φ_{b-a} der gesuchte Diffeomorphismus. Der Deformationsretrakt ist nun gegeben durch r_1 für

$$r_t := \begin{cases} q & q \in M^a \\ \varphi_{t(a-f(q))} & q \in f^{-1}[a, b] \end{cases}$$

□

2.2.10 Definition

Eine glatte Funktion $f : M \rightarrow \mathbb{R}$, deren kritischen Punkte alle nicht ausgeartet sind, heißt **Morse-Funktion**.

2.2.11 Satz

Sei M eine glatte Mannigfaltigkeit, $f : M \rightarrow \mathbb{R}$ glatt, $\varepsilon > 0$, sodass $f^{-1}[c - \varepsilon, c + \varepsilon]$ kompakt ist. Ferner sei p der einzige kritische Punkt von f in $[c - \varepsilon, c + \varepsilon]$ für $c = f(p)$. Ist p nicht ausgeartet mit Index i , so ist $M^{c+\varepsilon}$ homotopieäquivalent zu $M^{c-\varepsilon} \cup e^i$.

Beweis

Wegen dem Morse-Lemma existieren lokale Koordinaten u um p , sodass sich f lokal darstellen lässt durch

$$f(u) = c - u_1^2 - \dots - u_i^2 + u_{i+1}^2 + \dots + u_n^2.$$

Setze

$$e^i := \{u \mid u_1^2 + \dots + u_i^2 \leq \varepsilon, u_{i+1} = \dots = u_n = 0\},$$

dann ist der Rand gegeben durch

$$\partial e^i := \{u \mid u_1^2 + \dots + u_i^2 = \varepsilon, u_{i+1} = \dots = u_n = 0\} \subset M^{c-\varepsilon}.$$

Die anheftende Abbildung für diese i -Zelle an $M^{c-\varepsilon}$ ist dann die Inklusion.

Wir modifizieren f und definieren mithilfe der modifizierten Funktion F einen sogenannten Henkel, der e^i als Deformationsretrakt enthält.

- **Hilfsfunktion μ :** Sei $\mu : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ glatt, sodass gilt

$$\mu(t) \begin{cases} > \varepsilon, & \text{falls } t = 0 \\ \in [0, 2\varepsilon], & \text{falls } t \in [0, 2\varepsilon] \\ = 0, & \text{falls } t \geq 2\varepsilon. \end{cases}$$

und $\mu' \in [-1, 0]$.

- Setze

$$\begin{aligned} \xi(u) &:= u_1^2 + \dots + u_i^2 \\ \eta(u) &:= u_{i+1}^2 + \dots + u_n^2 \\ F(u) &:= f(u) - \mu(\xi(u) + 2\eta(u)) = c - \xi + \eta - \mu(\xi - 2\eta) \end{aligned}$$

- Im Ellipsoid $\xi + 2\eta \leq 2\varepsilon$ gilt nun

$$F \leq f = c - \xi + \eta \leq c + \frac{1}{2}\xi + \eta \leq c + \varepsilon$$

Daraus folgt

$$F^{-1}(-\infty, c + \varepsilon] = M^{c+\varepsilon}$$

- Die Bedingung $\mu' \in (-1, 0]$ stellt sicher, dass F und f in $F^{-1}(-\infty, c + \varepsilon]$ dieselben kritischen Punkte haben. Denn es gilt

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial u_k} F(u) &= \frac{\partial}{\partial u_k} (f(u) - \mu(\xi(u) + 2\eta(u))) \\ &= \frac{\partial}{\partial u_k} f(u) - \frac{\partial}{\partial u_k} \mu(\xi(u) + 2\eta(u)) \\ &= \pm 2u_k - cu_k \mu'(\xi(u) + 2\eta(u)) \\ &= (2 - c\mu'(\xi(u) + 2\eta(u)))u_k \\ &\Leftrightarrow u_k = 0. \end{aligned}$$

für ein passendes $c \in \{1, 2\}$.

- Der einzige kritische Punkt von F in $F^{-1}(-\infty, c + \varepsilon]$ könnte somit nur p sein. Es gilt aber

$$F(p) = f(p) - \mu(0) < c - \varepsilon.$$

Daraus folgt, dass p nicht in $F^{-1}(-\infty, c + \varepsilon]$ liegt, also hat F keine kritischen Punkte auf $F^{-1}(-\infty, c + \varepsilon]$.

Mit der letzten Proposition folgt, dass $F^{-1}(-\inf, c - \varepsilon] \subset F^{-1}(-\inf, c + \varepsilon]$ ein Deformationsretrakt ist. Daraus folgt, dass $F^{-1}(-\inf, c - \varepsilon] \subset M^{c+\varepsilon}$ ein Deformationsretrakt ist.

Wir definieren den Henkel durch den topologischen Abschluss

$$H := \text{closure}(F^{-1}(-\inf, c + \varepsilon] - M^{c-\varepsilon}).$$

Dann wird $M^{c-\varepsilon} \cup e^i$ von $M^{c-\varepsilon} \cup H$ als Deformationsretrakt enthalten. Insgesamt ergibt sich folgendes Diagramm:

$$\begin{array}{ccc} M^{c-\varepsilon} \cup e^i & \xrightarrow{\text{Def-retr.}} & M^{c-\varepsilon} \cup H \\ & \searrow \text{Def-retr.} & \downarrow \text{Def-retr.} \\ & & M^{c+\varepsilon} \end{array}$$

□

2.2.12 Satz: Hauptsatz

Sei M eine kompakte Mannigfaltigkeit und $f : M \rightarrow \mathbb{R}$ eine Morse-Funktion. Dann hat M den Homotopie-Typ eines CW-Komplexes mit genau einer Zelle der Dimension i für jeden kritischen Punkt mit Index i .

Beweis

C sei die Menge der kritischen Punkte von f . Jeder kritische Punkt ist isoliert, da er nicht ausgeartet ist. Da M kompakt ist, ist C somit endlich. Insofern besteht $f(C)$ aus den Elementen $c_1 < c_2 < \dots < c_k$.

Wir führen nun eine vollständige Induktion nach k . In der Induktionsvoraussetzung nehmen wir an, dass wir eine Homotopieäquivalenz h zwischen M^a und einem CW-Komplex K haben für einen Wert a , der nicht in $f(C)$ liegt.

Im Induktionsschritt sei $c \in f(C)$ minimal mit der Eigenschaft $c > a$. Dann existiert für ein hinreichend kleines $\varepsilon > 0$ eine Homotopie

$$h' : M^a \simeq M^{c-\varepsilon}.$$

Aus dem vorhergegangenen Satz folgt nun

$$M^{c+\varepsilon} \simeq M^{c-\varepsilon} \cup_{\varphi_1} e_1^{i_1} \cup \dots \cup_{\varphi_l} e_l^{i_l}$$

für anheftende Abbildungen

$$\varphi_j : \partial e_j^{i_j} \longrightarrow M^{c-\varepsilon} \simeq^{h'} M^a \simeq^h K.$$

Durch den zellulären Approximationssatz erhalten wir homotope Abbildungen ψ_i :

$$\begin{array}{ccc} hh'\varphi_j : \partial e_j^{i_j} & \longrightarrow & K \\ \Downarrow & & \cup \\ \psi_i : \partial e_j^{i_j} & \longrightarrow & K^{i_j-1}. \end{array}$$

Es ergibt sich nun folgend Homotopie

$$K \cup_{\psi_1} e_1^{i_1} \cup \dots \cup_{\psi_l} e_l^{i_l} \simeq K \cup_{hh'\varphi_1} e_1^{i_1} \cup \dots \cup_{hh'\varphi_l} e_l^{i_l} \simeq M^{c-\varepsilon} \cup_{\varphi_1} e_1^{i_1} \cup \dots \cup_{\varphi_l} e_l^{i_l} \simeq M^{c+\varepsilon}.$$

Rechterseits steht der CW-Komplex, den wir haben wollen. Ergo folgt durch Induktion die Aussage. \square