

Eine Einführung in die Differentialgeometrie

Nach einer Vorlesung von Prof. Helga Baum¹

Getippt haben Luise Fehlinger und Carsten Falk

4. Mai 2006

¹Der Inhalt dieses Skriptes beruht auf den Vorlesungen “Differentialgeometrie 1” aus den Jahren 2002 und 2004

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Topologische Räume | 5 |
| 1.1 | Definition und Beispiele | 5 |
| 1.2 | Topologische Räume mit abzählbarer Basis | 12 |
| 1.3 | Stetige Abbildungen und Homöomorphismen | 17 |
| 1.4 | Hausdorff-Räume (T_2 -Räume) | 22 |
| 1.5 | Kompakte und folgenkompakte topologische Räume | 26 |
| 1.6 | Zusammenhängende und bogenzusammenhängende Mengen in topologi- schen Räumen | 35 |
| 2 | Differenzierbare Mannigfaltigkeiten | 39 |
| 2.1 | Definition und Beispiele | 39 |
| 2.2 | Differenzierbare Abbildungen, Diffeomorphismen | 46 |
| 2.3 | Der Tangentialraum und das Differential einer glatten Abbildung | 49 |
| 2.4 | Vektorfelder und Flüsse | 57 |
| 2.5 | Immersionen, Einbettungen und Submersionen | 70 |
| 2.6 | Tensorbündel und Tensorfelder | 76 |
| 2.6.1 | Tensorprodukt von Vektorräumen | 76 |
| 2.6.2 | Tensorbündel und Tensorfelder auf Mannigfaltigkeiten | 83 |
| 2.7 | Die “Zerlegung der 1” auf einer glatten Mannigfaltigkeit | 91 |
| 2.8 | Orientierbare Mannigfaltigkeiten | 95 |
| 2.9 | Integration auf Mannigfaltigkeiten | 101 |
| 2.10 | Der Satz von Stokes | 106 |
| 2.10.1 | Mannigfaltigkeiten mit Rand | 106 |
| 2.10.2 | Das Differential einer k -Form. | 107 |
| 2.10.3 | Der Satz von Stokes für Differentialformen | 110 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3 | Grundbegriffe der (semi-)Riemannschen Geometrie | 113 |
| 3.1 | Riemannsche und pseudo-Riemannsche Metriken | 113 |
| 3.2 | Längen, Winkel und Volumen in semi-Riem. MF | 119 |
| 3.2.1 | Längen von Kurven in M | 119 |
| 3.2.2 | Volumen in semi-Riem. Mannigfaltigkeiten | 121 |
| 3.2.3 | Der Schnittwinkel von Kurven in semi-Riem. Mannigfaltigkeiten | 125 |
| 3.3 | Isometrien und konforme Abbildungen | 127 |
| 3.4 | Kovariante Ableitungen und der Levi-Civita-Zusammenhang einer semi-Riemannschen Mannigfaltigkeit | 137 |
| 3.5 | Die Krümmungen einer semi-Riemannschen Mannigfaltigkeit | 148 |
| 3.5.1 | Definitionen | 148 |
| 3.5.2 | Räume mit konstanter Schnittkrümmung | 153 |
| 3.5.3 | Einstein-Mannigfaltigkeiten | 159 |
| 3.5.4 | Mathematische Modelle der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART):163 | |
| 3.6 | Geodätische Linien auf semi-Riemannschen Mannigfaltigkeiten | 173 |
| 3.7 | Exponentialabbildung und Normalkoordinaten, konvexe Umgebungen | 182 |
| 3.8 | Geodäten und Abstände in Riemannschen Mannigfaltigkeiten. Der Satz von Hopf und Rinow | 194 |
| 3.9 | Jacobifelder, konjugierte Punkte und Schnittort | 205 |
| 4 | Krümmung und Topologie - Einige Beispiele | 219 |
| 4.1 | Der Satz vom Gauß - Bonnet | 219 |
| 4.2 | Semi - Riemannsche Überlagerungen und lokale Isometrien | 230 |
| 4.3 | Die Sätze von Hadamard, Bonnet-Myers und Räume konstanter Krümmung | 244 |
| | Register | 258 |

Worum geht es in der Vorlesung “Differentialgeometrie I”?

Im Grundstudium wurden die Differential- und Integralrechnung im \mathbb{R}^n und auf Untermannigfaltigkeiten des \mathbb{R}^n behandelt. Für die Differentialgeometrie benötigen wir eine allgemeinere Klasse von Räumen, die differenzierbaren Mannigfaltigkeiten. Mannigfaltigkeiten sind abstrakte Mengen M , die man lokal um jeden Punkt durch n reelle Koordinaten beschreiben kann. Lokal verhalten sie sich also wie Euklidische Räume. Solche Mengen treten natürlicher Weise z.B. als Nullstellenmengen von Abbildungen oder als Mengen der Äquivalenzklassen bei Äquivalenzrelationen auf. Beispiele für Mannigfaltigkeiten sind Flächen im \mathbb{R}^3 , wie reguläre Quadriken, das Möbiusband oder Rotationsflächen. Aber auch die klassischen Gruppen oder die Menge aller k -dimensionalen Unterräume des \mathbb{R}^n sind Mannigfaltigkeiten. Nach dem Einbettungssatz von Whitney ist jede differenzierbare Mannigfaltigkeit diffeomorph zu einer Untermannigfaltigkeit eines reellen Vektorraumes \mathbb{R}^N , so dass es genügen würde, Geometrie und Analysis auf Untermannigfaltigkeiten zu betreiben. Meist ist es aber einfacher und genügt, ein Objekt als abstrakte Mannigfaltigkeit zu betrachten ohne seine (oft recht aufwendig hinzuschreibende) Einbettung in den \mathbb{R}^N zu kennen. Dies ist z.B. der Fall, wenn die Objekte durch Verklebungen entstehen oder als Orbiträume von Gruppenwirkungen, die unter anderem in der Physik eine große Rolle spielen.

Die Vorlesung ist eine Einführung in die Grundlagen der Riemannschen Geometrie auf Mannigfaltigkeiten. Wichtige Fragen, die wir klären wollen, sind:

- Wie definiert und berechnet man man den Abstand von Punkten, die Länge von Kurven oder das Volumen von Teilmengen von Mannigfaltigkeiten?
- Wie beschreibt man Krümmungen der Objekte?
- Welche globalen Eigenschaften der Mannigfaltigkeiten kann man aus den lokalen (wie z.B. den lokal definierten Krümmungen) ablesen? Kann man durch lokale Messungen die Gestalt der Erde oder des Kosmos erkennen?
- Wie kann man entscheiden, wann die gleichen geometrischen Verhältnisse auf zwei gegebenen Mannigfaltigkeiten vorliegen?
- Kann man Mannigfaltigkeiten bzgl. gewisser topologischer oder geometrischer Eigenschaften klassifizieren? D.h. kann man entscheiden, wieviel "verschiedene" Mannigfaltigkeiten es gibt und diese durch spezielle Invarianten charakterisieren?

Die in der Vorlesung behandelten Konzepte der Riemannschen Geometrie sind grundlegend für die mathematische Modellierung physikalischer Prozesse. Sie spielen unter anderem eine entscheidene Rolle in der Allgemeinen Relativitätstheorie.

Für das Selbststudium eignet sich folgende Literatur:

- B.O'Neill, *Semi-Riemannian Geometry*, Academy Press 1983.
- M.do Carmo, *Riemannian Geometry*, Birkhäuser 1992.
- Gromoll, Klingenberg, Meyer, *Riemannsche Geometrie im Großen*, Springer 1968.
- M.Spivak, *Differential Geometry I-V*.
- S. Gallot, D. Hulin, J. Lafontaine, *Riemannian Geometry*, Springer 1990.
- P.Peterson, *Riemannian Geometry*, Springer 1999.
- S.Kobayashi, K.Nomizu, *Foundations of Differential Geometry I,II*, Wiley and Sons, 1996.
- F.Warner, *Foundations of differentiable manifolds and Liegroups*, Springer 1983.
- C.F.Gauss, B.Riemann, H.Minkowski, *Gaußsche Flächentheorie, Riemannsche Räume und Minkowski-Welt*, Teubner-Archiv zur Mathematik, Bd 1.

Kapitel 1

Topologische Räume

In diesem Abschnitt werden wir zunächst einige Grundbegriffe aus der Theorie der topologischen Räume zusammenstellen. Insbesondere sollen die speziellen Eigenschaften von Hausdorffschen topologischen Räumen mit abzählbarer Basis besprochen werden. Als spezielle Literatur zu diesem Kapitel eignen sich die folgenden Bücher

- Engelking, General Topology,
- K. Jänich, Topologie, Springer Verlag 1990.
- E. Ossa, Topologie, Vieweg Verlag 1992.
- C. Kosniowski, A first course in algebraic topology, Cambridge Univ. Press 1980.
- P. Günther, Grundkurs Analysis Bd. II, Teubner-Verlag Leipzig 1973.
- L.A. Steen, J.A. Seebach, Counterexamples in Topology, Dover Publ. Inc. N.Y. 1995.
- Skript zur Analysis I (WS 2000, Dozentin Prof. Baum), Kapitel 2.

1.1 Definition und Beispiele

Es sei X eine nichtleere Menge. Mit $\mathcal{P}(X)$ bezeichnen wir im folgenden die Potenzmenge von X , d.h. die Menge aller Teilmengen von X .

Definition. Sei X eine nichtleere Menge. Ein Mengensystem $\tau \subset \mathcal{P}(X)$ heißt Topologie auf X , falls die folgenden drei Bedingungen erfüllt sind:

1. (T1) $\emptyset, X \in \tau$.
2. (T2) Die Vereinigung beliebig vieler Mengen aus τ liegt wieder in τ .
3. (T3) Sind $U, V \in \tau$, so liegt auch der Durchschnitt $U \cap V$ in τ .

D.h. das Mengensystem τ ist abgeschlossen gegenüber beliebigen Vereinigungen und endlichen Durchschnitten. (X, τ) heißt topologischer Raum. Die Mengen $U \in \tau$ nennt man die offenen Mengen des topologischen Raumes (X, τ) .

Beispiel 1. DISKRETE TOPOLOGIE

In dieser Topologie ist jede Menge offen: $\tau := \mathcal{P}(X)$

Beispiel 2. ANTIDISKRETE TOPOLOGIE

In dieser Topologie gibt es nur zwei offene Mengen: $\tau := \{\emptyset, X\}$

Beispiel 3. DIE VON EINER METRIK ERZEUGTE TOPOLOGIE

Zur Erinnerung: Eine Abbildung $\rho : X \times X \rightarrow \mathbb{R}$ heißt **Metrik** auf X , falls für alle $x, y, z \in X$ gilt

- $\rho(x, y) \geq 0$ und $\rho(x, y) = 0 \iff x = y$
- $\rho(x, y) = \rho(y, x)$
- $\rho(x, z) \leq \rho(x, y) + \rho(y, z)$

Sei ρ eine Metrik auf X . Wir betrachten das folgende Mengensystem:

$$\tau_\rho := \{U \subset X \mid \forall x \in U \exists \varepsilon > 0 : K(x, \varepsilon) := \{y \in X \mid \rho(x, y) < \varepsilon\} \subset U\}$$

τ_ρ ist ein Topologie auf X :

Da (T1) und (T2) per Definition unmittelbar klar sind, bleibt zu zeigen, dass mit zwei Mengen U und V auch ihr Durchschnitt in τ_ρ liegt.

Sei dazu $x \in U \cap V$. Dann gibt es zwei Zahlen $\varepsilon_1 > 0$ und $\varepsilon_2 > 0$, so dass $K(x, \varepsilon_1) \subset U$ und $K(x, \varepsilon_2) \subset V$. Dann folgt aber $K(x, \min(\varepsilon_1, \varepsilon_2)) \subset U \cap V$.

τ_ρ heißt die von ρ erzeugte Topologie auf X .

Definition. Ein topologischer Raum (X, τ) heißt metrisierbar, falls es eine Metrik ρ gibt, so dass $\tau = \tau_\rho$ gilt.

Natürlich ist nicht jeder topologische Raum metrisierbar.

Ein Beispiel hierfür ist die antidiskrete Topologie $\tau := \{\emptyset, X\}$, wobei X mindestens zwei Elemente enthält.

Angenommen, eine τ erzeugende Metrik ρ würde existieren. Für zwei verschiedene Punkte $x, y \in X$ ist dann $0 < \rho(x, y) =: \varepsilon$. Dann ist $y \notin K(x, \frac{\varepsilon}{2})$. Es gibt dann also eine weitere von X und \emptyset verschiedene offene Menge $K(x, \frac{\varepsilon}{2})$. Somit ist $(X, \{\emptyset, X\})$ nicht metrisierbar.

Die diskrete Topologie $\tau := \mathcal{P}(X)$ wird durch die diskrete Metrik ρ_d induziert:

$$\rho_d : X \times X \rightarrow \mathbb{R}$$

$$\rho_d(x, y) := \begin{cases} 0, & x = y \\ 1, & x \neq y \end{cases}$$

Da für diese Metrik $\{x\} = K(x, \frac{1}{2})$ gilt, ist jede einpunktige Menge offen. Aus (T2) folgt dann $\tau_{\rho_d} = \mathcal{P}(X)$.

Die metrischen Räume bilden eine echte Teilmenge der Menge der topologischen Räume.

Später wird bewiesen, dass jede differenzierbare Mannigfaltigkeit metrisierbar ist.

Beispiel 4. DIE AUF TEILMENGEN INDUZIERTE TOPOLOGIE

Sei (X, τ) ein topologischer Raum und A eine Teilmenge von X . Wir betrachten das Mengensystem

$$\tau_A := \{V \subset A \mid \exists U \in \tau : V = U \cap A\}$$

τ_A heißt die auf A induzierte Topologie. τ_A ist tatsächlich eine Topologie, denn:

- $\emptyset = \emptyset \cap A$, $A = X \cap A$
- $\{V_i\}_{i \in I}$, $V_i \in \tau_A \implies V_i = U_i \cap A$, mit $U_i \in \tau$

$$\bigcup_{i \in I} V_i = \bigcup_{i \in I} (U_i \cap A) = \underbrace{\left(\bigcup_{i \in I} U_i \right)}_{=: U \in \tau} \cap A$$

- $V_1, V_2 \in \tau_A \implies V_{1/2} = U_{1/2} \cap A$, mit $U_{1/2} \in \tau$

$$V_1 \cap V_2 = (U_1 \cap A) \cap (U_2 \cap A) = \underbrace{(U_1 \cap U_2)}_{=: U \in \tau} \cap A$$

Beispiel 5. DIE PRODUKTTOPOLOGIE

Seien (X, τ_X) und (Y, τ_Y) topologische Räume. Wir betrachten das folgende Mengensystem auf $X \times Y$:

$$\tau_{X \times Y} := \left\{ A \subset X \times Y \mid A = \bigcup_{i \in I} V_i \times U_i; \ V_i \in \tau_X, \ U_i \in \tau_Y \right\}$$

$\tau_{X \times Y}$ heißt die von τ_X und τ_Y induzierte Produkttopologie. Die Topologie-Eigenschaften folgen aus den Vertauschungsregeln für \times , \cup und \cap .

Beispiel 6. DIE FAKTORTOPOLOGIE

Seien (X, τ) ein topologischer Raum, Y eine Menge und $f : X \rightarrow Y$ eine surjektive Abbildung. Wir betrachten das folgende Mengensystem auf Y

$$\tau_f := \{A \subset Y \mid f^{-1}(A) \in \tau\}$$

τ_f ist eine Topologie auf Y - die durch f induzierte Faktortopologie.

Verifizieren der Topologieeigenschaften:

- $\emptyset \in \tau_f$, denn $f^{-1}(\emptyset) := \emptyset \in \tau$
- $Y \in \tau_f$, denn $f^{-1}(Y) = X \in \tau$
- $U_i \in \tau_f$, $i \in I \implies f^{-1}(\bigcup_{i \in I} U_i) = \bigcup_{i \in I} \underbrace{f^{-1}(U_i)}_{\in \tau} \in \tau \implies \bigcup_{i \in I} U_i \in \tau_f$
- $U_1, U_2 \in \tau_f \implies f^{-1}(U_1 \cap U_2) = \underbrace{f^{-1}(U_1)}_{\in \tau} \cap \underbrace{f^{-1}(U_2)}_{\in \tau} \in \tau \implies U_1 \cap U_2 \in \tau_f$

Faktortopologien werden insbesondere auf Mengen von Äquivalenzklassen betrachtet. Wir erinnern nochmal an die Definition einer Äquivalenzrelation:

Sei X eine Menge und $R \subset X \times X$ eine Menge von Paaren. Wir schreiben kurz $x \sim y$ falls $(x, y) \in R$. R bzw. \sim ist eine Äquivalenzrelation, falls gilt:

Reflexivität $\forall x \in X : x \sim x$.

Symmetrie $\forall x, y \in X : x \sim y \implies y \sim x$.

Transitivität $\forall x, y, z \in X : x \sim y \wedge y \sim z \implies x \sim z$.

Für $x \in X$ ist $[x] := \{y \in X \mid x \sim y\}$ die durch x definierte Äquivalenzklasse. $X/\sim := \{[x] \mid x \in X\}$ ist die Menge der Äquivalenzklassen bzgl. \sim . Die Projektion auf die Äquivalenzklassen ist:

$$\begin{aligned} \pi : X &\longrightarrow X/\sim \\ x &\longmapsto [x] \end{aligned}$$

Wir versehen eine solche Menge von Äquivalenzklassen X/\sim immer mit der durch π induzierten Faktortopologie.

Es folgen nun einige konkrete topologische Räume

Beispiel 7. DER EUKLIDISCHE VEKTORRAUM \mathbb{R}^n

\mathbb{R}^n sei immer mit der von der Euklidischen Metrik induzierten Topologie versehen

$$\rho(x, y) = \|x - y\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

Beispiel 8. DIE SPHÄRE S^n

Die Sphäre im \mathbb{R}^{n+1} vom Radius r

$$S_r^n := \{x \in \mathbb{R}^{n+1} \mid \|x\| = r\}$$

sei immer mit der induzierten Topologie des \mathbb{R}^{n+1} versehen. $S^n := S_1^n$ sei die Sphäre vom Radius 1.

Beispiel 9. DER N-DIMENSIONALE TORUS T^n

Der n -dimensionale Torus $T^n := \underbrace{S^1 \times \cdots \times S^1}_{n\text{-mal}} \subset \mathbb{R}^{2n}$ sei immer mit der Produkttopologie versehen.

Den 2-dimensionalen Torus T^2 können wir bijektiv auf einen Rotationstor \hat{T}^2 im \mathbb{R}^3 abbilden:

$$\hat{T}^2 := \{(2 + \cos v) \cos u, (2 + \cos v) \sin u, \sin v \mid u, v \in \mathbb{R}\}$$

Die Abbildung $\varphi : T^2 \longrightarrow \hat{T}^2$ ist gegeben durch

$$\varphi((e^{iu}, e^{iv})) = ((2 + \cos v) \cos u, (2 + \cos v) \sin u, \sin v).$$

Beispiel 10. DER REELL-PROJEKTIVE RAUM $\mathbb{R}P^n$

Wir betrachten S^n mit der Äquivalenzrelation $\forall x, y \in S^n : x \sim y \iff x = \pm y$.

$$\mathbb{R}P^n := S^n / \sim$$

ist der n-dimensionale reell-projektive Raum versehen mit der Faktortopologie.

$$\begin{aligned} \pi : S^n &\longrightarrow \mathbb{R}P^n \\ x = (x_0, x_1, \dots, x_n) &\mapsto [x] = [x_0 : x_1 : \dots : x_n] \end{aligned}$$

Beispiel 11. DER KOMPLEX-PROJEKTIVE RAUM $\mathbb{C}P^n$

Wir betrachten

$$S^{2n+1} = \{ \underline{z} := (z_0, \dots, z_n) \in \mathbb{C}^{n+1} \mid |z_0|^2 + \dots + |z_n|^2 = 1 \}$$

mit der Äquivalenzrelation $\forall \underline{z}, \underline{w} \in S^{2n+1} : \underline{z} \sim \underline{w} \iff \exists \lambda \in \mathbb{C} : |\lambda| = 1 \wedge \underline{z} = \lambda \underline{w}$.

$$\mathbb{C}P^n := S^{2n+1} / \sim$$

ist der n-dimensionale komplex-projektive Raum versehen mit der Faktortopologie.

$$\begin{aligned} \pi : S^{2n+1} &\longrightarrow \mathbb{C}P^n \\ \underline{z} = (z_0, z_1, \dots, z_n) &\mapsto [\underline{z}] = [z_0 : z_1 : \dots : z_n] \end{aligned}$$

Beispiel 12. DER QUATERNIONISCH-PROJEKTIVE RAUM $\mathbb{H}P^n$

\mathbb{H} ist der Schiefkörper der Quaternionen.

$$\begin{aligned} \mathbb{H} &\simeq \mathbb{C}^2 && \simeq \mathbb{R}^4 \\ q = x_0 + x_1i + x_2j + x_3k &\mapsto (x_0 + x_1i, x_2 + x_3i) && \mapsto (x_0, x_1, x_2, x_3) \end{aligned}$$

Wobei $i^2 = j^2 = k^2 = -1$ und $i \cdot j = k$. $\bar{q} := x_0 - x_1i - x_2j - x_3k$ und damit $|q|^2 := q \cdot \bar{q}$.

Wir betrachten

$$S^{4n+3} = \{ \underline{q} := (q_0, \dots, q_n) \in \mathbb{H}^{n+1} \mid |q_0|^2 + \dots + |q_n|^2 = 1 \}$$

mit der Äquivalenzrelation

$$\forall \underline{q}, \underline{z} \in S^{4n+3} : \underline{q} \sim \underline{z} \iff \exists \mu \in \mathbb{H} : |\mu| = 1 \wedge \underline{q} = \mu \underline{z}$$

$$\mathbb{H}P^n := S^{4n+3} / \sim$$

ist der n-dimensionale quaternionisch-projektive Raum versehen mit der Faktortopologie.

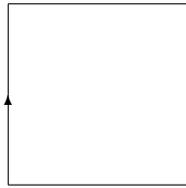
Beispiel 13. DAS MÖBIUSBAND (MÖB)

Wir betrachten $Q = [0, 1] \times [0, 1] \subset \mathbb{R}^2$ mit der Relation

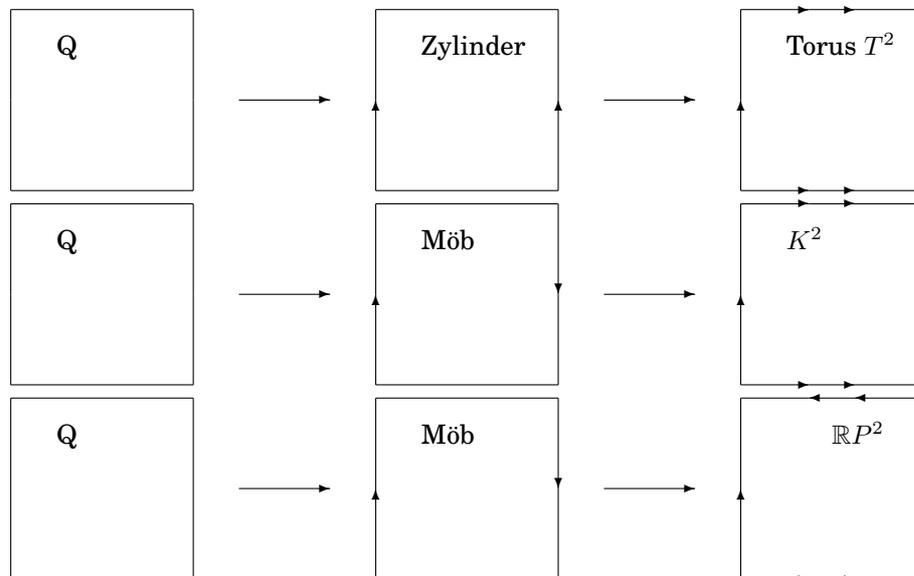
$$(x, y) \sim (z, w) \iff \begin{cases} (x, y) = (z, w) \text{ oder} \\ (x, y) = (0, y) \text{ und } (z, w) = (1, 1 - y) \text{ oder} \\ (z, w) = (0, w) \text{ und } (x, y) = (1, 1 - w) \end{cases}$$

dann ist

$$\text{Möb} = Q / \sim$$



Beispiel 14. DER TORUS T^2 , DIE KLEINSCHES FLASCHE K^2 UND DER $\mathbb{R}P^2$



Jede zweidimensionale, kompakte und zusammenhängende Fläche M^2 (ohne Rand) setzt sich aus S^2 , T^2 , $\mathbb{R}P^2$, K^2 zusammen. (\rightsquigarrow algebraische Topologie)

Definition. Sei (X, τ) ein topologischer Raum.

- Eine Teilmenge $U \subset X$ heißt Umgebung von $x \in X$ (Bezeichnung $U(x)$), falls $x \in U$ und $U \in \tau$.
- Sei $A \subset X$. Ein Punkt $x \in A$ heißt innerer Punkt von A , falls es eine Umgebung $U(x) \subset A$ gibt.
- Eine Teilmenge $A \subset X$ heißt abgeschlossen, falls $X \setminus A$ offen ist.

Definition. Sei (X, τ) ein topologischer Raum, $A \subset X$.

- $\text{int}(A) := \{x \in A \mid x \text{ ist innerer Punkt von } A\}$ heißt Inneres von A .
- $\text{cl}(A) := X \setminus \text{int}(X \setminus A)$ heißt Abschluss von A .
- $\partial A := X \setminus (\text{int}A \cup \text{int}(X \setminus A))$ heißt Rand von A .

Satz 1.1. Sei (X, τ) ein topologischer Raum, $A \subset X$. Dann gilt

1. $\text{int}(A) = \bigcup_{U_{\text{offen}} \subset A} U$
D.h. $\text{int}(A)$ ist die größte offene Menge, die in A liegt.
2. $\text{cl}(A) = \bigcap_{A \subset F_{\text{abgeschl.}}} F$
D.h. $\text{cl}(A)$ ist die kleinste abgeschlossene Menge, die A enthält.
 $x \in \text{cl}(A) \iff$ Jede Umgebung von x schneidet A .
3. $\partial A = \text{cl}(A) \setminus \text{int}(A)$
 $x \in \partial A \iff$ Jede Umgebung von x schneidet sich mit A und mit $X \setminus A$.

Der Beweis läuft genauso wie für metrische Räume.

Definition. Sei $f : X \rightarrow Y$ eine Abbildung zwischen topologischen Räumen.

f heißt offen (bzw. abgeschlossen), falls gilt:

Ist $U \subset X$ offen (bzw. abgeschlossen), so ist auch $f(U) \subset Y$ offen (bzw. abgeschlossen).

1.2 Topologische Räume mit abzählbarer Basis

Definition. Sei (X, τ) ein topologischer Raum. $\beta \subset \tau$ heißt Basis von (X, τ) , falls jede nichtleere, offene Menge die Vereinigung von Mengen aus β ist.

Beispiel 15. BASEN VON TOPOLOGISCHEN RÄUMEN

1. Sei (X, ρ) ein metrischer Raum.

$$\beta := \{K(x, \varepsilon) := \{y \in X \mid \rho(x, y) < \varepsilon\} \mid x \in X, \varepsilon \in \mathbb{R}^+\}$$

ist eine Basis von (X, τ_ρ) .

2. Eine Basis der Produkttopologie $(X \times Y, \tau_{X \times Y})$ ist:

$$\beta := \{U \times V \mid U \subset X \text{ offen, } V \subset Y \text{ offen}\}.$$

Definition. Ein topologischer Raum (X, τ) heißt topologischer Raum mit abzählbarer Basis (erfüllt das zweite Abzählbarkeitsaxiom), falls es eine Basis β von τ mit abzählbar vielen Elementen gibt.

Wie hängen die metrischen Räume mit den topologischen Räumen mit abzählbarer Basis zusammen?

Definition. Ein topologischer Raum (X, τ) heißt separabel, falls es eine abzählbare, dichte Teilmenge $A \subset X$ gibt (d.h. $\text{cl}(A) = X$).

Bemerkung

Es gilt: (X, τ) hat eine abzählbare Basis $\implies (X, \tau)$ ist separabel. (ÜA)

Satz 1.2. Die Menge der metrischen Räume, die auch topologische Räume mit abzählbarer Basis sind, ist gleich der Menge der separablen metrischen Räume.

$$\begin{aligned} \{\text{metrische Räume}\} \cap \{\text{top. Räume mit abzählbarer Basis}\} \\ = \{\text{separable metrische Räume}\} \end{aligned}$$

Den Beweis dieses Satzes überlassen dem Leser als Übungsaufgabe.

Beispiel 16. ABZÄHLBARE- UND NICHT ABZÄHLBARE BASEN

1. \mathbb{R}^n : $\beta = \{K(x, \varepsilon) \mid x \in \mathbb{Q}^n, \varepsilon \in \mathbb{Q}^+\}$ ist eine abzählbare Basis.

2. Sorgenfrey-Linie

\mathbb{R} : $\beta = \{[a, b) \mid -\infty < a < b < \infty\}$ ist eine Basis von

$$\tau_{\text{Sorg}} := \{\emptyset\} \cup \{U \subset \mathbb{R} \mid U \text{ ist Vereinigung halboffener Intervalle}\}$$

$(\mathbb{R}, \tau_{\text{Sorg}})$ ist nicht metrisierbar und hat keine abzählbare Basis.

3. $(\mathbb{R}, \mathcal{P}(\mathbb{R}))$ ist metrisierbar (diskrete Metrik) und hat keine abzählbare Basis (denn jede einelementige Menge ist offen).
4. $(\mathbb{R}, \tau = \{\emptyset, \mathbb{R}\})$ ist nicht metrisierbar und hat eine abzählbare Basis.

Satz 1.3. *Es gilt*

1. Sei (X, τ) ein topologischer Raum mit abzählbarer Basis, $A \subset X$, dann hat auch (A, τ_A) eine abzählbare Basis.
2. Seien (X, τ_X) , (Y, τ_Y) topologische Räume mit abzählbaren Basen, dann hat auch $(X \times Y, \tau_{X \times Y})$ eine abzählbare Basis.
3. Habe (X, τ) eine abzählbare Basis und sei $f : X \rightarrow Y$ surjektiv und offen bzgl. τ_f , dann hat (Y, τ_f) eine abzählbare Basis.

Beweis:

1. Sei $\beta_X = \{U_1, U_2, \dots\}$ eine abzählbare Basis von X .

$$\beta_A := \{U_1 \cap A, U_2 \cap A, \dots\} \subset \tau_A$$

Behauptung: β_A ist eine Basis von τ_A .

Sei $V \subset A$ offen, $V \neq \emptyset$. Dann gilt

$$\exists U \in \tau : V = U \cap A.$$

Da β eine Basis von (X, τ) ist, gilt: $U = \bigcup_{i \in I \subset \mathbb{N}} U_i$. und damit

$$V = \left(\bigcup_{i \in I} U_i \right) \cap A = \bigcup_{i \in I} \underbrace{(U_i \cap A)}_{\in \beta_A}.$$

2. Sei β_X eine abzählbare Basis von (X, τ_X) und β_Y eine abzählbare Basis von (Y, τ_Y) , $\implies \beta_{X \times Y} := \{U \times V \mid U \in \beta_X, V \in \beta_Y\}$ ist eine abzählbare Basis von $X \times Y$.
3. Sei β_X eine abzählbare Basis von (X, τ) . Da f offen ist, gilt

$$\tau_f \supset \beta_f := \{f(U) \mid U \in \beta_X\}.$$

β_f ist abzählbar und eine Basis von τ_f , denn:

$$V \in \tau_f, V \neq \emptyset \implies f^{-1}(V) \in \tau.$$

D.h.

$$\exists U_i \in \beta_X, i \in I : f^{-1}(V) = \bigcup_{i \in I} U_i$$

damit ist

$$f(f^{-1}(V)) \stackrel{f \text{ surj.}}{=} V = \bigcup_{i \in I} \underbrace{f(U_i)}_{\in \beta_f}$$

und β_f ist eine Basis von τ_f .

□

Beispiel 17. TOPOLOGISCHE RÄUME MIT ABZÄHLBARER BASIS

- \mathbb{R}^n mit der Euklidischen Topologie, S^n mit der induzierten Topologie und T^n mit der Produkttopologie haben nach Satz 1.3 abzählbare Basen.

- $\mathbb{R}P^n$ und $\mathbb{C}P^n$ haben nach Satz 1.3 abzählbare Basen, da die Projektionen offen sind (ÜA).
- Das Möbiusband und die Kleinsche Flasche haben abzählbare Basen.

Im allgemeinen überträgt sich bei der Faktortopologie die abzählbare Basis nicht.

Gegeben sei \mathbb{R} mit der Standardtopologie.

$$x \sim y : \Leftrightarrow (x = y \vee x, y \in \mathbb{Z})$$

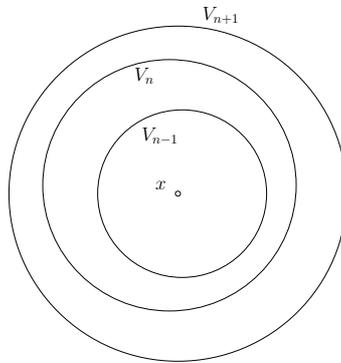
dann hat X / \sim keine abzählbare Basis.

Eigenschaften von Räumen mit abzählbarer Basis

Definition. Sei (X, τ) ein topologischer Raum und $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge in X . $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ konvergiert gegen $x \in X$ ($x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} x$, $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x$), falls für jede Umgebung $W(x)$ ein $n_0 \in \mathbb{N}$ existiert mit $x_n \in W(x) \quad \forall n \geq n_0$.

Lemma 1.1. Sei (X, τ) ein topologischer Raum mit abzählbarer Basis und sei $x \in X$. Dann existiert eine Folge von Umgebungen $\{V_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ von x mit den folgenden Eigenschaften:

1. $V_{n+1} \subset V_n$ für alle n
2. Ist W eine beliebige Umgebung von x , dann existiert ein $n_0 \in \mathbb{N}$, sodaß $V_{n_0} \subset W$.
3. Sei $\{x_n\}$ so, dass $x_n \in V_n$ für alle n , dann konvergiert x_n gegen x .



Beweis:

1. Sei β eine abzählbare Basis von (X, τ) und

$$\beta(x) := \{U \in \beta \mid x \in U\}.$$

Dann ist $\beta(x) = \{U_1, U_2, \dots\}$ abzählbar.

$$V_n(x) := \bigcap_{i=1}^n U_i \text{ ist eine Umgebung von } x.$$

Es gilt: $V_{n+1}(x) \subset V_n(x)$, womit 1. erfüllt ist.

2. Sei $W(x)$ eine beliebige Umgebung von x . Dann gilt: $W(x) = \bigcup_{i \in I} \tilde{U}_i$ mit $\tilde{U}_i \in \beta$. Da $x \in W(x)$ gilt, existiert ein Index i_0 mit $\beta(x) \ni \tilde{U}_{i_0} = U_{n_0}$ für ein $n_0 \in \mathbb{N}$. Damit ist

$$V_{n_0}(x) = \bigcap_{i=0}^{n_0} U_i \subset U_{n_0} = \tilde{U}_{i_0} \subset W(x).$$

3. Sei $x_n \in V_n(x)$ beliebig gewählt, $n \in \mathbb{N}$, z.z. $x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} x$:
Sei $W(x)$ eine beliebige Umgebung von x . Dann existiert ein $n_0 \in \mathbb{N}$ mit $V_{n_0}(x) \subset W(x)$, sodass

$$x_n \in V_n(x) \subset V_{n_0}(x) \subset W(x) \quad \forall n \geq n_0$$

und damit geht

$$x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} x$$

□

Bemerkung

Lemma 1.1 gilt für Räume mit abzählbarer Umgebungsbasis (1. Abzählbarkeitsaxiom).

Definition. Eine Umgebungsbasis für (X, τ) von $x \in X$ ist ein Mengensystem $\beta_x \subset \tau$ mit $x \in U \quad \forall U \in \beta_x$ und für jede Umgebung $W(x)$ existiert ein $U \in \beta_x$ mit $U \subset W(x)$.

Satz 1.4. Sei (X, τ) ein topologischer Raum. Dann gilt:

1. Seien $A \subset X$ und $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge in A mit $x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} x \in X$. Dann gilt $x \in cl(A)$.
2. Habe (X, τ) eine abzählbare Basis und sei $A \subset X$. Dann gilt: Ist $x \in cl(A)$, so existiert eine Folge $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ in A mit $x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} x$.

Beweis:

1. Sei $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge in A mit $x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} x \in X$. Nach Satz 1.1 gilt:

$$cl(A) = \bigcap_{A \subset F \text{ abgeschl.}} F$$

g.z.z. $x \in F$ für jede abgeschlossene Menge F , die A enthält.

Angenommen dies gilt nicht, d.h. es existiert eine abgeschlossene Menge F_0 mit $A \subset F_0$ und $x \notin F_0$. $\implies X \setminus F_0$ ist eine offene Umgebung von $x \in X$.

$$\implies x_n \in X \setminus F_0 \quad \forall n \geq n_0$$

$$\implies x_n \notin F_0 \quad \forall n \geq n_0 \implies x_n \notin A \quad \forall n \geq n_0$$

Das ist ein Widerspruch.

2. Sei $x \in cl(A)$. Sei $(V_n(x))$ eine Folge von schrumpfenden Mengen (aus Lemma 1.1). Nach Satz 1.1 gilt $V_n(x) \cap A \neq \emptyset \quad \forall n \in \mathbb{N}$. Wähle nun beliebige $x_n \in V_n(x) \cap A$, $n \in \mathbb{N}$. Nach Lemma 1.1 gilt $x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} x$.

□

Folgerung

Sei (X, τ) ein topologischer Raum mit abzählbarer Basis, $A \subset X$. Dann gilt:

$$\begin{aligned} & A \text{ ist abgeschlossen.} \\ \iff & \text{Ist } (x_n)_{n \in \mathbb{N}} \text{ eine Folge von Punkten in } A \\ & \text{und gilt } x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} x \in X, \text{ so liegt } x \text{ in } A. \end{aligned}$$

Beweis:

- (\Rightarrow) : (gilt in jedem topologischen Raum)
Sei A abgeschlossen, d.h. $A = cl A$. Mit Satz 1.4 (1) folgt die Behauptung.
- (\Leftarrow) Sei $x \in cl A$. Nach Satz 1.4 (2) existiert eine Folge $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ in A mit

$$x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} x.$$

Dann ist nach Voraussetzung $x \in A$, also $cl A = A$.

□

Satz 1.4 und die Folgerung gelten i.a. nicht.

Beispiel 18. GEGENBEISPIEL

Sei

$$X = \mathbb{R}, \quad \tau_{abz} := \{\mathbb{R} \setminus A \mid A \text{ ist abzählbar}\} \cup \{\emptyset\}$$

Dann ist (\mathbb{R}, τ_{abz}) ein topologischer Raum. (ÜA)

- $A \subset \mathbb{R}$ ist abgeschlossen bzgl. $\tau_{abz} \iff A = \begin{cases} \text{abzählbar} \\ \mathbb{R} \end{cases}$
- Sei $B \subset \mathbb{R}$, dann gilt

$$cl(B) = \begin{cases} \mathbb{R}, & \text{falls } B \text{ überabzählbar} \\ B, & \text{sonst} \end{cases}$$

- Sei $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge in (\mathbb{R}, τ_{abz}) , dann gilt

$$x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} x \in \mathbb{R} \iff x_n = x \quad \forall n \geq n_0,$$

denn $U(x) := \mathbb{R} \setminus \{x_n \mid x_n \neq x\}$ ist eine offene Umgebung von x , und da

$$x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} x$$

gilt, gibt es ein $n_0 \in \mathbb{N}$ mit $x_m \in U(x) \quad \forall m \geq n_0$.

$$\implies x_m = x \quad \forall m \geq n_0$$

- $A = (0, 1) \subset \mathbb{R}$ ist nicht offen und nicht abgeschlossen, denn $cl(A) = \mathbb{R}$.
 $1 \in cl(A)$ läßt sich nicht als Grenzwert einer Folge in $A = (0, 1)$ darstellen.
- A erfüllt auch nicht die Folgerung aus Satz 1.4.

$$\implies (\mathbb{R}, \tau_{abz}) \text{ hat keine abzählbare Basis.}$$

1.3 Stetige Abbildungen und Homöomorphismen

Definition. Seien X und Y topologische Räume.

- Eine Abbildung $f : X \rightarrow Y$ heißt stetig, falls die Urbilder offener Mengen offen sind,
d.h. ist $U \subset Y$ offen, so ist $f^{-1}(U) \subset X$ offen.
- $f : X \rightarrow Y$ heißt folgenstetig, falls gilt:
Wenn $x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} x$ in X konvergiert, so gilt $f(x_n) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} f(x)$ in Y .

Beispiel: Sei (X, τ) ein topologischer Raum, $f : X \rightarrow Y$ surjektiv.

Dann ist $f : (X, \tau) \rightarrow (Y, \tau_f)$ stetig. τ_f ist die feinste Topologie mit dieser Eigenschaft

Äquivalente Kriterien

Folgende Aussagen sind äquivalent:

1. $f : X \rightarrow Y$ ist stetig
2. Das Urbild jeder abgeschlossenen Menge ist abgeschlossen.
3. $f(\text{cl}(A)) \subset \text{cl}(f(A)) \quad \forall A \subset X$
4. Sei β_Y eine Basis der Topologie von Y . Dann ist das Urbild von $B \in \beta_Y$ in X offen, für alle $B \in \beta_Y$.
5. Für alle $x \in X$ und jede Menge $B \in \beta_Y$ mit $f(x) \in B$ existiert eine Umgebung $V(x)$ von x mit $f(V(x)) \subset B$.

Satz 1.5. Seien X, Y topologische Räume.

1. $f : X \rightarrow Y$ ist stetig. $\implies f$ ist folgenstetig.
2. Sei X ein Raum mit abzählbarer Basis (es reicht abzählbare Umgebungsbasis). Dann gilt:

$$f : X \rightarrow Y \text{ ist folgenstetig.} \implies f \text{ ist stetig.}$$

Beweis:

1. Sei f stetig.

Z.z. Ist $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge in X mit $x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} x$, so gilt $f(x_n) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} f(x)$.

Sei $U(f(x))$ eine beliebige Umgebung von $f(x)$. Da f stetig ist, ist

$$f^{-1}(U(f(x))) \subset X$$

eine offene Umgebung von $x \in X$. Dann gilt $x_n \in f^{-1}(U)$ für alle $n \geq n_0$.

$$\implies f(x_n) \in f(f^{-1}(U)) \subset U \quad \forall n \geq n_0$$

$$\implies f(x_n) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} f(x)$$

2. X habe eine abzählbare Basis und $f : X \rightarrow Y$ sei folgenstetig.

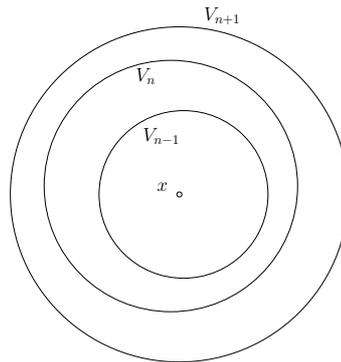
Annahme: f ist nicht stetig.

D.h. es existiert ein $x \in X$ und eine Umgebung $U(f(x))$, so dass für alle Umgebungen $V(x)$ gilt:

$$f(V(x)) \not\subseteq U$$

. Sei $(V_n(x))_{n \in \mathbb{N}}$ die schrumpfende Familie von Umgebungen aus Lemma 1.1. Dann existiert für jedes $n \in \mathbb{N}$ ein $x_n \in V_n(x)$ mit

$$f(x_n) \notin U.$$



Mit Lemma 1.1 gilt also $x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} x$ und

$$f(x_n) \not\xrightarrow{n \rightarrow \infty} f(x).$$

Dies ist ein Widerspruch zu der Voraussetzung, dass f folgenstetig ist.

□

Beispiel 19. FOLGENSTETIG IMPLIZIERT I.A. KEINE STETIGKEIT!

Im Allgemeinen gilt:

$$f \text{ ist folgenstetig. } \not\Rightarrow f \text{ ist stetig.}$$

Seien $X = (\mathbb{R}, \tau_{abz})$, wobei

$$\tau_{abz} := \{\mathbb{R} \setminus A \mid A \text{ abzählbar}\} \cup \{\emptyset\}$$

$$Y := (\mathbb{R}, \tau_{|\cdot|})$$

die reellen Zahlen mit der euklidischen Topologie, $Id : X \rightarrow Y$ die identische Abbildung. Jede Abbildung

$$f : X \rightarrow Y$$

ist folgenstetig, da

$$x_n \xrightarrow{\tau_{abz}} x \iff x_n = x \forall n \geq n_0.$$

Daraus folgt dann

$$f(x_n) = f(x) \quad \forall n \geq n_0 \quad \text{bzw.} \quad f(x_n) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} f(x)$$

$Id : X \rightarrow Y$ ist nicht stetig, denn

$$U := (0, 1) \subset Y$$

ist offen in der euklidischen Topologie, aber $Id^{-1}(U) = U \subset X$ ist nicht offen bzgl. τ_{abz} .

Satz 1.6. *Es gilt*

1. Seien $f : X \rightarrow Y$ und $h : Y \rightarrow Z$ stetig. Dann ist auch

$$h \circ f : X \rightarrow Z$$

stetig.

2. Ist $f : X \rightarrow Y$ stetig und $A \subset X$, so ist auch $f|_A : (A, \tau_A) \rightarrow Y$ stetig.

3. Seien X und Y topologische Räume und $X \times Y$ mit der Produkttopologie versehen. Dann gilt:

$$\begin{aligned} p_x : X \times Y &\rightarrow X \\ (x, y) &\mapsto x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_y : X \times Y &\rightarrow Y \\ (x, y) &\mapsto y \end{aligned}$$

sind stetig.

Eine Abbildung $f : Z \rightarrow X \times Y$ ist stetig genau dann, wenn $p_x \circ f$ und $p_y \circ f$ stetig sind.

4. Seien X und Z topologische Räume und $f : X \rightarrow Y$ surjektiv. Eine Abbildung $g : (Y, \tau_f) \rightarrow Z$ ist genau dann stetig, wenn $g \circ f : X \rightarrow Z$ stetig ist

Beweis:

zu 4. (\Rightarrow):

Sei g stetig. Da $f : X \rightarrow (Y, \tau_f)$ stetig ist, folgt, dass

$$g \circ f : X \rightarrow Z$$

stetig ist.

(\Leftarrow):

Sei $g \circ f : X \rightarrow Z$ stetig und $U \subset Z$ offen. Dann ist $(g \circ f)^{-1}(U) \subset X$ offen.

$$\begin{aligned} \Rightarrow f^{-1}(g^{-1}(U)) &= (g \circ f)^{-1}(U) \subset X \quad \text{ist offen.} \\ \Rightarrow &g^{-1}(U) \subset Y \quad \text{ist offen in der Faktortopologie.} \\ \Rightarrow &g \text{ ist stetig.} \end{aligned}$$

□

Definition. Eine Abbildung $f : X \rightarrow Y$ heißt Homöomorphismus, falls f bijektiv ist und f und f^{-1} stetig sind.

Zwei topologische Räume X und Y heißen homöomorph, falls es einen Homöomorphismus $f : X \rightarrow Y$ gibt.

Zwei Teilmengen $A \subset X$ und $B \subset Y$ heißen homöomorph, falls (A, τ_A) und $(B, \hat{\tau}_B)$ homöomorph sind.

Bemerkungen

- Man unterscheidet homöomorphe topologische Räume nicht, da sie die gleichen topologischen Eigenschaften haben.
- Sei $f : X \rightarrow Y$ bijektiv und stetig. Dann gilt:

$$\begin{aligned} & f \text{ ist ein Homöomorphismus} \\ \iff & f \text{ ist offen (bzw. abgeschlossen)} \\ \iff & \text{weitere Kriterien später} \end{aligned}$$

Beispiel 20. DIE STEREOGRAFISCHE PROJEKTION

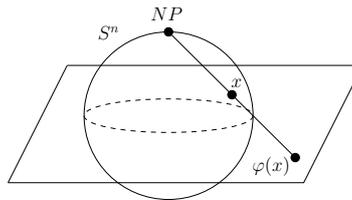
$S^n \setminus \{(1, 0, \dots, 0)\}$ ist homöomorph zu \mathbb{R}^n .

$$\varphi_{NP} : S^n \setminus \{(0, 0, \dots, 0, 1)\} \rightarrow \mathbb{R}^n = \{x \in \mathbb{R}^{n+1} \mid x_{n+1} = 0\},$$

wobei $\varphi_{NP}(x)$ der Schnittpunkt der Geraden durch den Nordpol $(0, 0, \dots, 0, 1)$ und x mit der Hyperebene

$$\mathbb{R}^n = \{x \in \mathbb{R}^{n+1} \mid x_{n+1} = 0\} \subset \mathbb{R}^{n+1}$$

ist.



φ_{NP} ist ein Homöomorphismus, denn

$$\begin{aligned} \varphi_{NP}(x) &= \varphi_{NP}((x_1, \dots, x_{n+1})) = \left(\frac{x_1}{1-x_{n+1}}, \frac{x_2}{1-x_{n+1}}, \dots, \frac{x_n}{1-x_{n+1}} \right) \\ \varphi_{NP}^{-1}(y) &= \varphi_{NP}^{-1}((y_1, \dots, y_n)) = \frac{1}{1+\|y\|^2} (2y_1, 2y_2, \dots, 2y_n, \|y\|^2 - 1) \\ & \quad (\|y\|^2 = y_1^2 + \dots + y_n^2) \end{aligned}$$

Also sind φ_{NP} und φ_{NP}^{-1} stetig.

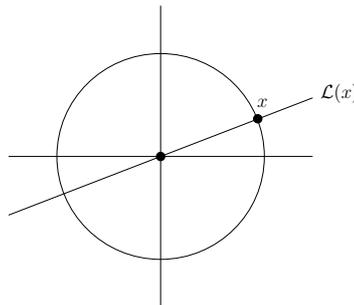
Beispiel 21. DER $\mathbb{R}P^n$ ALS QUOTIENT DER S^n

$\mathbb{R}P^n$ ist homöomorph zur Menge aller Geraden durch 0 im \mathbb{R}^{n+1} mit der folgenden Topologie:

$$X = \mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\}, \quad x \sim y \iff \exists \lambda \in \mathbb{R} : x = \lambda y.$$

X/\sim ist die Menge aller Geraden im \mathbb{R}^{n+1} durch 0 versehen mit der Faktortopologie.

$$\begin{aligned} \mathbb{R}P^n &= S^n/\sim \longrightarrow X/\sim \\ [x] &\mapsto \mathcal{L}(x) = \mathbb{R} \cdot x \end{aligned}$$



Dies ist ein Homöomorphismus.

Beispiel 22. DER $\mathbb{C}P^n$ ALS QUOTIENT DER S^{2n+1}

$\mathbb{C}P^n$ ist homöomorph zur Menge aller komplexen Geraden durch 0 in \mathbb{C}^{n+1} .

$$Y = \mathbb{C}^{n+1} \setminus \{0\}, \quad z \sim w \iff \exists \lambda \in \mathbb{C} : z = \lambda w.$$

Y/\sim ist die Menge aller komplexen Geraden in \mathbb{C}^{n+1} durch 0 versehen mit der Faktortopologie.

$$\begin{aligned} \mathbb{C}P^n &= S^{2n+1}/\sim \longrightarrow Y/\sim \\ [z] &\mapsto \mathcal{L}_{\mathbb{C}}(z) = \mathbb{C} \cdot z \end{aligned}$$

Dies ist ein Homöomorphismus.

Information1. *Satz über die Invarianz der Dimension*

Sei \mathbb{R}^n homöomorph zu \mathbb{R}^m (beide versehen mit der euklidischen Topologie). Dann gilt $n = m$.

2. *Satz über die Invarianz des Gebietes*

Seien $U, V \subset \mathbb{R}^n$ homöomorphe Teilmengen. Dann gilt: U ist offen (zusammenhängend) $\iff V$ ist offen (zusammenhängend).

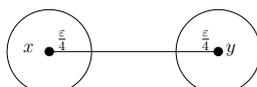
1.4 Hausdorff-Räume (T_2 -Räume)

Definition. Ein topologischer Raum X heißt Hausdorff-Raum (T_2 -Raum), falls es zu jedem Paar verschiedener Punkte $x, y \in X$ offene Umgebungen $U(x)$ und $V(y)$ gibt, die sich nicht schneiden.

Beispiel 23. HAUSDORFF-RÄUME

1. Metrische Räume sind T_2 -Räume.

Sei (X, ρ) ein metrischer Raum, $x, y \in X$ mit $x \neq y$. Dann gilt $\rho(x, y) =: \varepsilon > 0$.



Dann ist $K(x, \frac{\varepsilon}{4}) \cap K(y, \frac{\varepsilon}{4}) = \emptyset$.

2. Nicht jeder T_2 -Raum ist metrisierbar: $(\mathbb{R}, \tau_{\text{sorg}})$ Sorgenfrey-Linie¹

$$\beta = \{[a, b) \mid -\infty < a < b < \infty\}$$

ist eine Basis von τ_{sorg} .

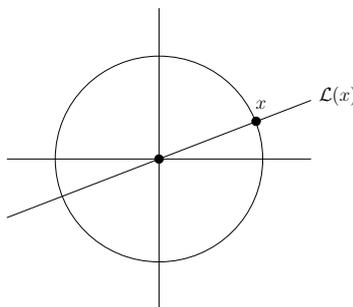
$\implies (\mathbb{R}, \tau_{\text{sorg}})$ ist T_2 , hat aber keine abzählbare Basis und ist nicht metrisierbar.

(Beweis: ÜA)

3. $(X, \tau = \{X, \emptyset\})$ ist nicht T_2 , hat aber eine abzählbare Basis.

4. $(\mathbb{R}, \tau_{\text{abz}})$ ist nicht T_2 und hat keine abzählbare Basis.

Es gilt sogar, dass sich alle offenen Mengen schneiden, denn seien $X_1, X_2 \in \tau_{\text{abz}} \setminus \{\emptyset\}$, so gibt es abzählbare Teilmengen $A_1, A_2 \subset \mathbb{R}$ mit $X_1 = \mathbb{R} \setminus A_1$, $X_2 = \mathbb{R} \setminus A_2$ und es gilt: $X_1 \cap X_2 = (\mathbb{R} \setminus A_1) \cap (\mathbb{R} \setminus A_2) = \mathbb{R} \setminus (\underbrace{A_1 \cup A_2}_{\text{abzählbar}}) \neq \emptyset$.



¹siehe auch Bsp. 16 auf Seite 12

Elementare Folgerungen

1. In einem T_2 -Raum sind alle einelementigen Mengen abgeschlossen.

Beweis:

Sei $x \in X$. Z.z. $X \setminus \{x\}$ ist offen.

Sei $y \in X \setminus \{x\}$, d.h. $x \neq y$. Dann existieren Umgebungen $U(x), V(y)$ mit

$$U(x) \cap V(y) = \emptyset$$

. Demnach ist $V(y) \subset X \setminus \{x\}$ und somit $X \setminus \{x\}$ offen und $\{x\}$ abgeschlossen.

(Bemerkung: Wir haben nur die T_1 -Eigenschaft benutzt: $x \neq y \implies$ Es existiert eine Umgebung $V(y)$ mit $x \notin V(y)$.)

□

2. Sei X ein T_2 -Raum. Dann ist der Grenzwert jeder konvergenten Folge eindeutig bestimmt.

Beweis:

Angenommen es gibt eine Folge $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ mit

$$x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} x \text{ und } x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} y, \quad x \neq y$$

.

Da X T_2 ist, gibt es Umgebungen $U(x), V(y)$ mit $U(x) \cap V(y) = \emptyset$.

Da $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ gegen x und y konvergiert, gibt es ein $n_0 \in \mathbb{N}$ mit

$$x_n \in U(x), \quad x_n \in V(y) \quad \forall n \geq n_0.$$

Das ist ein Widerspruch zu $U(x) \cap V(y) = \emptyset$.

□

Bemerkung

Im allgemeinen ist der Grenzwert einer Folge nicht eindeutig, z.B. konvergiert in $(X, \tau = \{X, \emptyset\})$ jede Folge gegen jeden Punkt.

Satz 1.7. *Es gilt:*

1. Seien $f, h : X \rightarrow Y$ stetige Abbildungen und Y ein T_2 -Raum. Dann ist $\{x \in X \mid f(x) = h(x)\} \subset X$ abgeschlossen.
2. Sei X ein T_2 -Raum, $A \subset X$. Dann ist auch $(A, \tau|_A)$ ein T_2 -Raum.
3. Seien X und Y T_2 -Räume, so ist auch $X \times Y$ versehen mit der Produkttopologie ein T_2 -Raum.
4. Sei X ein beliebiger topologischer Raum, $f : X \rightarrow (Y, \tau_f)$ surjektiv und offen und sei

$$D = \{(x, y) \in X \times X \mid f(x) = f(y)\} \subset X \times X$$

abgeschlossen. Dann ist (Y, τ_f) ein T_2 -Raum.

Beweis:

1. Es ist zu zeigen: $A := \{x \in X \mid f(x) \neq h(x)\} \subset X$ ist offen.

Sei $x \in A$. Da Y ein T_2 -Raum ist, existieren offene Umgebungen $U(f(x))$ und $V(h(x))$ mit

$$U(f(x)) \cap V(h(x)) = \emptyset$$

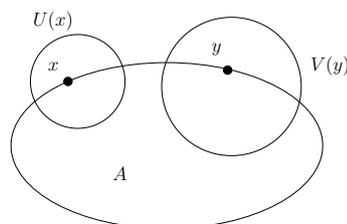
.

Da f und h stetig sind, ist $W := f^{-1}(U) \cap h^{-1}(V) \subset X$ offen und $x \in W$. Es gilt $W \subset A$, denn sei $z \in W$, so folgt $f(z) \in U$ und $h(z) \in V$

Da aber $U \cap V = \emptyset$, muss $f(z) \neq h(z)$ sein und somit $z \in A$. Also ist A offen und $X \setminus A = \{x \in X \mid f(x) = h(x)\}$ abgeschlossen.

2. Sei (X, τ) ein T_2 -Raum, $A \subset X$.

Seien $x, y \in A, x \neq y$. Da X T_2 ist, existieren offene Mengen $U(x) \subset X$ und $V(y) \subset X$ mit $U(x) \cap V(y) = \emptyset$.



Dann gilt:

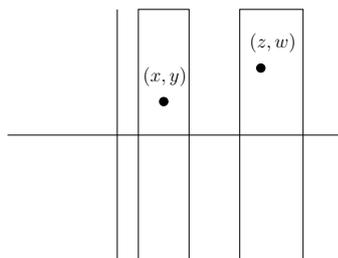
$$\underbrace{(U(x) \cap A)}_{\text{offen in } \tau_A} \cap \underbrace{(V(y) \cap A)}_{\text{offen in } \tau_A} = \emptyset$$

3. Seien $(x, y), (z, w) \in X \times X$ verschieden. OBdA $x \neq z$.

Da X ein T_2 -Raum ist, existieren offene Umgebungen $U(x), V(z)$ mit $U(x) \cap V(z) = \emptyset$. Damit ist

$$(U(x) \times Y) \cap (V(z) \times Y) = \emptyset$$

und $U(x) \times Y$ ist eine offene Umgebung von $(x, y) \in X \times Y$ und $V(z) \times Y$ ist eine offene Umgebung von $(z, w) \in X \times Y$.



4. $f : X \rightarrow Y$ ist surjektiv.

Seien also $f(x), f(z) \in Y$ zwei beliebige, verschiedene Punkte von Y .

Wir suchen Umgebungen bezüglich der Faktortopologie, die $f(x)$ und $f(z)$ trennen. Da $f(x) \neq f(z)$ gilt, ist (x, z) kein Element von D .

Da D abgeschlossen ist, ist $(X \times X) \setminus D$ offen. Folglich existiert eine Umgebung

$$U(x) \times V(z) \subset (X \times X) \setminus D$$

von (x, z) , wobei $U(x)$ und $V(z)$ in X offen sind, und es gilt

$$U(x) \cap V(z) = \emptyset$$

. Da $f : X \rightarrow (Y, \tau_f)$ eine offene Abbildung ist, gilt $f(U), f(V) \subset Y$ sind offen bzgl. τ_f .

Weiter gilt: $f(x) \in f(U)$, $f(z) \in f(V)$ und $f(U) \cap f(V) = \emptyset$, denn angenommen, $y \in f(U) \cap f(V)$, so existieren ein $u \in U$ und ein $v \in V$ mit $f(u) = y = f(v)$. Dann gilt aber $(u, v) \in D$ und $(u, v) \in U \times V$. Dies widerspricht der Wahl von $U \times V \subset (X \times X) \setminus D$.

□

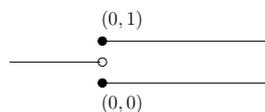
Beispiel 24. WEITERE BEISPIELE FÜR HAUSDORFF-RÄUME

- $\mathbb{R}^n, S^n, T^n, \mathbb{R}P^n$ und $\mathbb{C}P^n$ sind nach Satz 1.7 T_2 -Räume. Durch direktes Ausrechnen lässt sich beweisen, dass auch Möb und K^2 T_2 -Räume sind.
- Der folgende Faktorraum ist nicht T_2 :

$$X = (\mathbb{R} \times \{0\}) \cup (\mathbb{R} \times \{1\}) = \mathbb{R} \times \{0, 1\} \subset \mathbb{R}^2$$

mit der Topologie, die von $\beta_X = \{U \times \{0\}, V \times \{1\} \mid U, V \text{ in } \mathbb{R} \text{ offen}\}$ erzeugt wird. Auf X führen wir eine Äquivalenzrelation ein, die die beiden Geraden für $x < 0$ "verklebt".

$$(x, t) \sim (y, s) \iff \begin{cases} x = y, s = t & \text{für } x \geq 0, \\ x = y, s, t \in \{0, 1\} & \text{für } x < 0. \end{cases}$$



In X/\sim ist der Grenzwert einer Folge $(x_n, y_n)_{n \in \mathbb{N}}$ mit

$$x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

nicht eindeutig. X/\sim ist also nicht T_2 .

X/\sim hat eine abzählbare Basis.

1.5 Kompakte und folgenkompakte topologische Räume

Definition. Sei (X, τ) ein topologischer Raum und $A \subset X$. A heißt kompakt, falls es zu jeder offenen Überdeckung eine endliche Teilüberdeckung gibt, d.h.

$$A \subset \bigcup_{\alpha \in I} U_\alpha, \quad U_\alpha \text{ offen} \\ \implies \exists \alpha_1, \dots, \alpha_n \in I : A \subset \bigcup_{i=1}^n U_{\alpha_i}.$$

A heißt folgenkompakt, falls jede Folge $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ von Punkten aus A eine in A konvergente Teilfolge enthält.

Bemerkung

Es gilt: $A \subset \mathbb{R}^n$ ist kompakt \iff A ist abgeschlossen und beschränkt. (Satz von Heine-Borel)

Satz 1.8. 1. Sei X ein T_2 -Raum, $A \subset X$ kompakt. Dann ist A abgeschlossen.

2. Jede abgeschlossene Teilmenge eines kompakten topologischen Raumes ist kompakt.

3. Sei $f : X \rightarrow Y$ stetig, $A \subset X$ kompakt, so ist auch $f(A)$ kompakt.

4. Seien X, Y kompakte topologische Räume, dann ist auch $X \times Y$ kompakt.

5. Sei X ein topologischer Raum mit abzählbarer Basis. Dann gilt:

$$X \text{ ist kompakt} \iff X \text{ ist folgenkompakt}$$

(Für " \implies " ist das erste Abzählbarkeitsaxiom nötig und für " \impliedby " das zweite.)

Bemerkung

- Es existieren kompakte topologische Räume, die nicht folgenkompakt sind.
- Es existieren folgenkompakte topologische Räume, die nicht kompakt sind.

Beweis:

Die Beweise von 1.) - 4.) laufen genauso wie für metrische Räume.

zu 5.):

(\implies) Sei X kompakt. Sei weiter $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine beliebige Folge in X . Gesucht ist eine konvergente Teilfolge.

Betrachte

$$F_m := \text{cl}\{x_m, x_{m+1}, x_{m+2}, \dots\}$$

Es gilt $F_1 \supset F_2 \supset F_3 \supset \dots$ und F_i ist abgeschlossen für alle $i \in \mathbb{N}$.

Behauptung $\bigcap_{m=1}^{\infty} F_m \neq \emptyset$.

Angenommen $\bigcap_{m=1}^{\infty} F_m = \emptyset \implies X = X \setminus \bigcap_{m=1}^{\infty} F_m = \bigcup_{m=1}^{\infty} \underbrace{(X \setminus F_m)}_{\text{offen}}$.

Da X kompakt ist, existiert eine endliche Teilüberdeckung

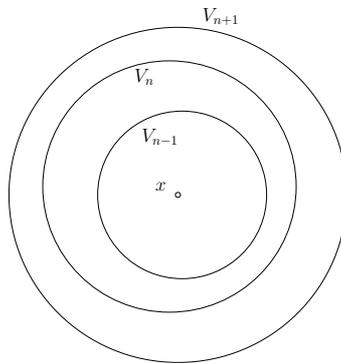
$$X = \bigcup_{i=1}^N (X \setminus F_{m_i}) = X \setminus \left(\bigcap_{i=1}^N F_i \right).$$

Damit ist

$$\bigcap_{i=1}^N F_i = \emptyset, \text{ aber es gilt } \bigcap_{i=1}^N F_i = F_{\max(m_1, \dots, m_N)} \neq \emptyset \text{ (Widerspruch)}$$

Folglich existiert ein $x \in \bigcap_{m=1}^{\infty} F_m$.

Nun wählen wir schrumpfenden Umgebungen $(V_n(x))_{n=1}^{\infty}$ aus Lemma 1.



Da $x \in cl\{x_m, x_{m+1}, \dots\} = F_m \quad \forall m \in \mathbb{N}$, gilt nach Satz 1.1

$$V_n(x) \cap \{x_m, x_{m+1}, \dots\} \neq \emptyset \quad \forall n, m \in \mathbb{N}.$$

Also können wir die folgende Teilfolge wählen:

$$\begin{aligned} x_{n_1} &\in V_1(x) \cap \{x_1, x_2, \dots\} \\ x_{n_2} &\in V_2(x) \cap \{x_{n_1+1}, x_{n_1+2}, \dots\} \\ x_{n_3} &\in V_3(x) \cap \{x_{n_2+1}, x_{n_2+2}, \dots\} \\ &\vdots \end{aligned}$$

Die Teilfolge $(x_{n_j})_{j \in \mathbb{N}}$ von $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ konvergiert nach Lemma 1 gegen x .

(\Leftarrow) Sei nun X folgenkompakt. Behauptung: X ist kompakt.

- Man kann aus jeder Überdeckung eine abzählbare Teilüberdeckung auswählen, da X eine abzählbare Basis hat:

$$X = \bigcup_{i \in I} U_i, \quad U_i \text{ offen} \implies U_i \text{ lässt sich als Vereinigung von Basismengen darstellen.}$$

Damit ist $X = \bigcup_{k \in K \subset \mathbb{N}} W_k$ wobei die W_k Basismengen sind.

Nun wählen wir zu jedem $k \in K \subset \mathbb{N}$ ein $U_{i(k)}$ mit $W_k \subset U_{i(k)}$.

$$X = \bigcup_{k \in K \subset \mathbb{N}} U_{i(k)}$$

- Man kann aus jeder abzählbaren Überdeckung eine endliche Teilüberdeckung auswählen:

Sei $X = \bigcup_{i=1}^{\infty} W_i$ $W_i \subset X$ offen. Angenommen, die Behauptung gilt nicht. Dann existiert zu jedem $m \in \mathbb{N}$ ein

$$x_m \in X \setminus \left(\bigcup_{j=1}^m W_j \right).$$

$(x_m)_{m \in \mathbb{N}}$ ist eine Folge in X . Da X folgenkompakt ist, existiert eine konvergente Teilfolge

$$x_{m_j} \xrightarrow{j \rightarrow \infty} x \in X = \bigcup_{i=1}^n W_i.$$

Also existiert ein $n_0 \in \mathbb{N}$ mit $x \in W_{n_0}$. Dann ist $x \in W_{n_0} \forall i > n_0$ und

$$x_{m_i} \in \bigcup_{j=1}^{m_i} W_j \quad \forall m_i > n_0, m_{i_0}$$

Das ist ein Widerspruch zur Wahl von x_m !

□

Beispiel 25. BEISPIELE FÜR KOMPAKTE RÄUME

$S^n, T^n, \mathbb{R}P^n, \mathbb{C}P^n, \text{Möb}$ und K^2 sind laut Satz 1.8 kompakt.

Satz 1.9. Sei $f : X \rightarrow Y$ stetig und bijektiv, X kompakt und $Y T_2$. Dann ist f ein Homöomorphismus.

Beweis: f ist bijektiv und stetig. Es genügt zu zeigen, dass f abgeschlossen ist.

Sei $A \subset X$ eine beliebige abgeschlossene Teilmenge. Da X kompakt ist, ist auch A kompakt und damit auch $f(A)$, weil f stetig ist. In einem T_2 -Raum ist aber nach Satz 1.8 jede kompakte Menge auch abgeschlossen. Also ist $f(A)$ abgeschlossen und somit f ein Homöomorphismus.

□

Man kann jeden topologischen Raum durch Hinzufügen eines zusätzlichen Punktes kompaktifizieren.

Definition. Sei (X, τ) ein topologischer Raum.

Sei weiterhin ∞ ein zusätzlicher Punkt mit $\infty \notin X$.

$$X_\infty := X \cup \{\infty\}$$

$$\tau_\infty := \tau \cup \{(X \setminus A) \cup \{\infty\} \mid A \subset X \text{ abgeschlossen und kompakt}\}$$

Satz 1.10. Es gilt:

1. (X_∞, τ_∞) ist ein topologischer Raum.
2. (X_∞, τ_∞) ist kompakt.

3. τ ist die von X_∞ auf X induzierte Topologie, d.h.

$$(\tau_\infty)_X = \tau$$

Ist X nicht-kompakt, so ist $X \subset X_\infty$ eine dichte Teilmenge.

Beweis:

1. (X_∞, τ_∞) ist ein topologischer Raum (ÜA)

2. (X_∞, τ_∞) ist kompakt.

Denn sei

$$X_\infty = \bigcup_{i \in I} U_i, \quad U_i \in \tau_\infty.$$

Dann existiert ein $i_0 \in I$ mit $\infty \in U_{i_0}$. Nach Definition von τ_∞ gilt

$$U_{i_0} = (X \setminus A) \cup \{\infty\}$$

wobei $A \subset X$ kompakt und abgeschlossen in X ist.

Da A kompakt ist, existiert endliche Teilüberdeckung von $A \subset U_{i_1} \cup \dots \cup U_{i_n}$ $i_j \in I$. Somit ist

$$X_\infty \subset \underbrace{U_{i_0}}_{=(X \setminus A) \cup \{\infty\}} \cup \underbrace{U_{i_1} \cup \dots \cup U_{i_n}}_{\supset A}$$

3. $\tau = (\tau_\infty)_X$:

(a) Sei $U \in (\tau_\infty)_X$. $\implies \exists \mathcal{O} \in \tau_\infty : U = X \cap \mathcal{O}$.

1. Fall: $\mathcal{O} \in \tau \implies U \in \tau$.

2. Fall: $\mathcal{O} = (X \setminus A) \cup \{\infty\} \implies U = \mathcal{O} \cap X = (X \setminus A) \cap X$ ist offen in X .
 $\implies U \in \tau$.

(b) Sei $U \in \tau$. $\implies U \in \tau \subset \tau_\infty$ und $U \subset X$, also $U = U \cap X$.

$\implies U \in (\tau_\infty)_X$.

4. Sei X nicht-kompakt.

Behauptung: $X \subset X_\infty$ ist dicht.

Es genügt zu zeigen, dass X nicht abgeschlossen ist, denn

$$X \neq cl(X) \implies cl(X) = X_\infty = X \cup \{\infty\}$$

Angenommen, $X = X_\infty \setminus \{\infty\}$ ist abgeschlossen. Dann ist $\{\infty\} \subset X_\infty$ offen und lässt sich wegen der Definition von τ_∞ darstellen als

$$\{\infty\} = (X \setminus X) \cup \{\infty\}$$

mit $X \subset X$ kompakt und abgeschlossen bezüglich τ . Das ist ein Widerspruch.

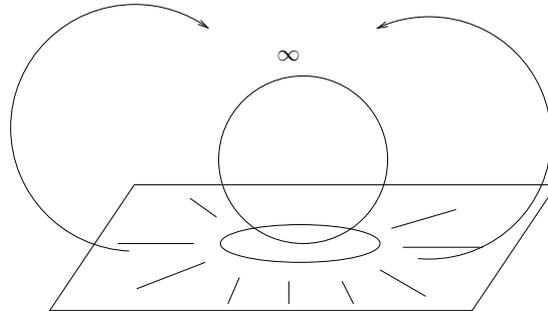
□

Definition. (X_∞, τ_∞) heißt 1-Punkt-Kompaktifizierung von X . ∞ heißt der unendlich ferne Punkt.

Beispiel 26. BEISPIELE FÜR 1-PUNKT-KOMPAKTIFIZIERUNGEN

1. $S^n \cong \mathbb{R}_\infty^n$
2. $S^2 \cong \mathbb{C}P^1 \cong \mathbb{C}_\infty$
3. $S^1 \cong \mathbb{R}P^1 \cong \mathbb{R}_\infty$

Wobei “ \cong ” homöomorph meint.



Bemerkung

(X_∞, τ_∞) ist ein T_2 -Raum mit abzählbarer Basis. $\iff (X, \tau)$ ist T_2 mit abzählbare Basis und lokal-kompakt.(ÜA)

Definition. Ein topologischer Raum (X, τ) heißt lokal-kompakt, falls es zu jedem $x \in X$ eine Umgebung $U(x) \in \tau$ gibt mit $clU(x)$ ist kompakt.

Beispiel 27. BEISPIELE FÜR LOKAL-KOMPAKTE RÄUME

1. X ist kompakt. $\implies X$ ist lokal kompakt.
2. Der euklidische Raum \mathbb{R}^n ist lokal-kompakt, aber nicht kompakt.
3. (\mathbb{R}, τ_{abz}) ist nicht lokal-kompakt ².

$$\tau_{abz} = \{\mathbb{R} \setminus A \mid A \text{ abzählbar}\} \cup \{\emptyset\}$$

Behauptung: \mathbb{R} ist weder kompakt noch lokal-kompakt bezüglich τ_{abz} .

(a) Seien $A_r := \{z \in \mathbb{Z} \mid z \leq r\}, r \in \mathbb{R}$.

$$\mathbb{R} = \bigcup_{r \in \mathbb{R}} \underbrace{(\mathbb{R} \setminus A_r)}_{\text{offen}}$$

Angenommen, es existiert eine endliche Teilüberdeckung, dann ist

$$\mathbb{R} = \bigcup_{i=1}^n (\mathbb{R} \setminus A_{r_i}) = \mathbb{R} \setminus \underbrace{\left(\bigcap_{i=1}^n A_{r_i}\right)}_{\neq \emptyset} \neq \mathbb{R} \quad \text{Widerspruch!}$$

Damit ist (\mathbb{R}, τ_{abz}) ist nicht kompakt.

²siehe auch Bsp. 18 auf Seite 16

- (b) Sei $x \in \mathbb{R}$. Jede Umgebung von x hat die Form $\mathbb{R} \setminus A$, wobei A abzählbar ist. Dann ist

$$cl(\mathbb{R} \setminus A) = \mathbb{R},$$

da $\mathbb{R} \setminus A$ überabzählbar ist. Also ist $cl(\mathbb{R} \setminus A)$ nicht-kompakt und damit (\mathbb{R}, τ_{abz}) ist nicht lokal-kompakt.

Wir wollen nun noch beweisen, dass topologische Räume (X, τ) die T_2 sind, eine abzählbare Basis haben und lokal-kompakt sind, auch parakompakt sind.

Definition. Sei $\mathcal{U} = \{U_\alpha\}_{\alpha \in I}$ offene Überdeckung von X . Eine Familie offener Mengen $\mathcal{V} = \{V_\beta\}_{\beta \in \Lambda}$ heißt lokal endliche Verfeinerung von \mathcal{U} , falls

1. \mathcal{V} ist eine offene Überdeckung von X , d.h. $X = \bigcup_{\beta \in \Lambda} V_\beta$.
2. \mathcal{V} ist eine Verfeinerung von \mathcal{U} , d.h. für alle $V_\beta \in \mathcal{V}$ existiert ein $U_\alpha \in \mathcal{U}$ mit $V_\beta \subset U_\alpha$.
3. \mathcal{V} ist lokal endlich, d.h. zu jedem $x \in X$ existiert eine Umgebung $W(x)$, die sich nur mit endlich vielen Mengen aus \mathcal{V} schneidet.

Ein topologischer Raum heißt parakompakt, falls jede offene Überdeckung eine lokal-endliche Verfeinerung besitzt.

Satz 1.11. Sei X ein lokal-kompakter, topologischer Raum mit abzählbarer Basis. Dann ist X parakompakt. Genauer: Zu jeder offenen Überdeckung

$$\mathcal{U} = \{U_\alpha\}_{\alpha \in I}$$

existiert eine höchstens abzählbare lokal-endliche Verfeinerung

$$\mathcal{V} = \{V_\beta\}_{\beta \in I}$$

mit clV_β ist kompakt für alle $V_\beta \in \mathcal{V}$.

Bemerkung:

Dies benutzt man zur Konstruktion einer Zerlegung der 1.

Beweis:

1. *Behauptung:* Es existiert eine abzählbare Basis β von X , so dass clU kompakt ist für alle $U \in \beta$.

Sei β' eine abzählbare Basis. Zu jedem $x \in X$ wählen wir eine offene Umgebung $U(x)$ mit kompaktem Abschluss, das ist möglich, da X lokal-kompakt ist.

$$\beta'' := \{W \in \beta' \mid W \subset U(x) \text{ für ein } x \in X\} \subset \beta'$$

ist abzählbar, da β' abzählbar ist.

$$\beta := \{V \cap W \mid V \in \beta', W \in \beta''\}$$

Es gilt:

- (a) β ist abzählbar

- (b) $\underbrace{cl(V \cap W)}_{\text{abgeschlossen}} \subset cl(W) \subset cl(U(x))$ und $cl(U(x))$ ist kompakt.
 $\implies cl(V \cap W)$ ist kompakt.

(c) β ist eine Basis, denn:

Sei $U \subset X$ offen $\implies U = \bigcup_{V_j \in \beta'} V_j$ (β' ist eine Basis.)

$$X = \bigcup_{x \in X} U(x) = \bigcup_{W_k \in \beta''} W_k$$

nach Definition von β'' gilt

$$\begin{aligned} U &= U \cap X = \left(\bigcup_{V_j \in \beta'} V_j \right) \cap \left(\bigcup_{W_k \in \beta''} W_k \right) \\ &= \bigcup_{j,k} \underbrace{(V_j \cap W_k)}_{\in \beta} \end{aligned}$$

Somit existiert zu jedem lokal-kompakten topologischen Raum mit abzählbarer Basis eine abzählbare Basis β mit $cl(U)$ ist kompakt für alle $U \in \beta$.

2. *Behauptung:* Es existiert eine Folge kompakter Teilmengen $(A_n)_{n=1}^\infty$ in X mit

- (a) $A_n \subset \text{int} A_{n+1}$
 (b) $X = \bigcup_{n=1}^\infty A_n$

Sei $\beta = \{W_1, W_2, \dots\}$ eine abzählbare Basis von (X, τ) , so dass $cl W_i$ kompakt ist für alle $i \in \mathbb{N}$. Wir betrachten die kompakten Mengen

$$B_n := \bigcup_{i=1}^n cl W_i \quad n = 1, 2, \dots$$

Dann gilt: $B_n \subset B_{n+1} \quad \forall n \in \mathbb{N}$ und $X = \bigcup_{n=1}^\infty B_n$.

Wir definieren nun $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ induktiv.

$$A_0 := \emptyset$$

B_1 ist kompakt und $B_1 \subset \bigcup_{i=1}^\infty W_i$ ist eine offene Überdeckung. Folglich existiert eine endliche Teilüberdeckung $B_1 \subset W_{i_1} \cup \dots \cup W_{i_k}$. Wir definieren

$$A_1 := cl(W_{i_1} \cup \dots \cup W_{i_k}) = \bigcup_{j=1}^k cl W_{i_j}.$$

A_1 ist kompakt und $B_1 \subset W_{i_1} \cup \dots \cup W_{i_k} \subset \underbrace{\text{int}(cl(W_{i_1} \cup \dots \cup W_{i_k}))}_{= \text{int}(A_1)}$.

Induktionsvoraussetzung: Es existieren kompakte Mengen A_1, \dots, A_k so dass

$$B_i \cup A_{i-1} \subset \text{int} A_i \quad i = 1, \dots, k.$$

Konstruktion von A_{k+1} :

$B_{k+1} \cup A_k$ ist kompakt und wird von $\beta = \{W_i\}_{i=1}^\infty$ überdeckt. Dann existiert eine endliche Teilüberdeckung $B_{k+1} \cup A_k \subset W_{j_1} \cup \dots \cup W_{j_l}$.

$$A_{k+1} := cl(W_{j_1} \cup \dots \cup W_{j_l})$$

Wie beim Induktionsanfang folgt dann, dass A_{k+1} kompakt ist und $B_{k+1} \cup A_k \subset \text{int}A_{k+1}$. Da $X = \bigcup_{n=1}^\infty B_n$ gilt, folgt $X = \bigcup_{n=1}^\infty A_n$.

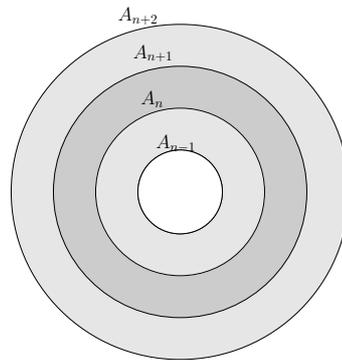
3. Sei \mathcal{U} eine beliebige offene Überdeckung von X . Wir konstruieren die gesuchte lokal endliche Teilüberdeckung \mathcal{V}

Sei wieder β die Basis aus Schritt 1 und bezeichne $\hat{\mathcal{U}}$ die folgende Verfeinerung von \mathcal{U} :

$$\hat{\mathcal{U}} := \{W \subset X \mid W \in \beta \text{ und es existiert Menge } U \in \mathcal{U} \text{ mit } W \subset U\}$$

Dann ist $\hat{\mathcal{U}}$ eine abzählbare Verfeinerung von \mathcal{U} so dass $cl(W)$ kompakt ist für alle $W \in \hat{\mathcal{U}}$. Wir müssen aus $\hat{\mathcal{U}}$ noch eine lokal-endliche Verfeinerung machen.

Wir betrachten die Ausschöpfung $(A_n)_{n=1}^\infty$ von X durch die kompakten Mengen aus Schritt 2. $A_{n+1} \setminus \text{int}(A_n)$ ist kompakt, da eine abgeschlossene Teilmenge einer kompakten Menge kompakt ist. $\text{Int}(A_{n+2}) \setminus A_{n-1}$ ist offen.



Es gilt weiter:

$$A_{n+1} \setminus \text{int}(A_n) \subset \text{int}(A_{n+2}) \setminus A_{n-1}.$$

Sei

$$U_{\alpha,n} := U_\alpha \cap (\text{int}(A_{n+2}) \setminus A_{n-1}), \quad U_\alpha \in \hat{\mathcal{U}}.$$

Dann ist für fixiertes $n \in \mathbb{N}$ $\hat{\mathcal{U}}_n := \{U_{\alpha,n} \mid U_\alpha \in \hat{\mathcal{U}}\}$ eine offene Überdeckung von $A_{n+1} \setminus \text{int}(A_n)$. Da letztere Menge kompakt ist, existieren endlich viele Mengen $V_{n_1}, \dots, V_{n_{\beta_n}} \in \hat{\mathcal{U}}_n$, die den "Ring" $A_{n+1} \setminus \text{int}(A_n)$ überdecken.

Für

$$\mathcal{V} := \{V_{n_{j_n}} \mid n = 1, 2, \dots, j_n = 1, \dots, \beta_n\}$$

gilt nun:

- (a) \mathcal{V} ist eine offene Überdeckung von X , da (A_n) eine Ausschöpfung von X ist.
- (b) \mathcal{V} ist eine Verfeinerung von \mathcal{U} , da \mathcal{V} eine Verfeinerung von $\hat{\mathcal{U}}$ und $\hat{\mathcal{U}}$ eine Verfeinerung von \mathcal{U} ist.
- (c) $cl(V_{n_j})$ ist kompakt, da $V_{n_j} \subset U_\alpha \in \hat{\mathcal{U}}$ und clU_α kompakt ist.

(d) \mathcal{V} ist lokal-endlich, denn:

Ist $x \in X$, so existiert ein $n \in \mathbb{N}$ mit $x \in A_n \subset \text{int}(A_{n+1})$ und $\text{int}(A_{n+1})$ ist eine offene Umgebung von x , die sich nur mit endlich vielen Mengen aus \mathcal{V} schneidet, nämlich

$$\{V_{k_{j_k}} \mid k \leq n+2, j_k = 1, \dots, p_k\}$$

□

1.6 Zusammenhängende und bogenzusammenhängende Mengen in topologischen Räumen

Definition. Ein topologischer Raum (X, τ) heißt *zusammenhängend* genau dann, wenn keine offenen, disjunkten, nichtleeren Mengen $U, V \in X$ mit $X = U \cup V$ existieren.

(X, τ) heißt *bogenzusammenhängend* genau dann, wenn für alle $x, y \in X$ eine stetige Abbildung $\omega : [a, b] \subset \mathbb{R} \rightarrow X$ mit $\omega(a) = x$, $\omega(b) = y$ existiert. ω heißt *Weg* von x nach y . $A \subset X$ heißt *zusammenhängend* (*bogenzusammenhängend*) genau dann, wenn (A, τ_A) zusammenhängend (*bogenzusammenhängend*) ist. D.h. $A \subset X$ ist zusammenhängend \iff es existieren keine offenen Mengen $U, V \subset X$ mit

- $A \subset U \cup V$
- $A \cap (U \cap V) = \emptyset$
- $A \cap U \neq \emptyset$, $A \cap V \neq \emptyset$.

Beispiel 28. EINFACHE BEISPIELE

1. Kugeln im \mathbb{R}^n sind zusammenhängend.
2. $A \subset \mathbb{R}$ ist zusammenhängend. \iff A ist ein Intervall (offen, halboffen, abgeschlossen).
3. Konvexe Mengen im \mathbb{R}^n sind bogenzusammenhängend.

Beispiel 29. DIE SORGENFREY-LINIE $(\mathbb{R}, \tau_{sorg})$

Eine Basis der Topologie³ τ_{sorg} ist: $\beta = \{[a, b] \mid -\infty < a < b < \infty\}$.

Behauptung: A ist zusammenhängend bzgl. $\tau_{sorg} \iff A = \{x\}$. D. h. $(\mathbb{R}, \tau_{sorg})$ ist total unzusammenhängend.

Beweis:

(\Leftarrow): Eine einelementige Menge ist nach Definition zusammenhängend, da sie nicht in zwei disjunkte Mengen zerlegbar ist.

(\Rightarrow): Ein Intervall $[a, b]$ ist offen und abgeschlossen, denn:

$$[a, b] = \mathbb{R} \setminus \underbrace{\left(\bigcup_{a \geq n \in \mathbb{Z}} [n, a) \cup \bigcup_{b < n \in \mathbb{Z}} [b, n) \right)}_{\text{offen}}$$

Sei $T \subset \mathbb{R}$ zusammenhängend und $x \in T$.

$$U = [x, x + \varepsilon) \subset \mathbb{R}$$

st offen für alle $\varepsilon > 0$,

$$V = \mathbb{R} \setminus [x, x + z) \subset \mathbb{R}$$

ist offen, da $[x, x + \varepsilon)$ auch abgeschlossen ist. Es gilt dann

$$U \cap V = \emptyset \quad \text{und damit} \quad U \cap V \cap T = \emptyset.$$

³siehe auch Bsp. 16 auf Seite 12

Da T zusammenhängend und $x \in T \cap U$ ist, muss $T \cap V = \emptyset$ gelten.
 $\implies T \cap (\mathbb{R} \setminus [x, x + \varepsilon)) = \emptyset \quad \forall \varepsilon > 0.$
 $\implies T \subset [x, x + \varepsilon) \quad \forall \varepsilon > 0.$
 $\implies T = \{x\}.$

□

Satz 1.12. *Es gilt*

1. Sei $f : X \rightarrow Y$ stetig, $A \subset X$ zusammenhängend (bogenzusammenhängend).
 $\implies f(A) \subset Y$ ist zusammenhängend (bogenzusammenhängend).
2. Sei $A \subset X$ bogenzusammenhängend. $\implies A$ ist zusammenhängend.

Beweis:

1. In 2 Teilen:

(a) Sei $f : X \rightarrow Y$ stetig, $A \subset X$ zusammenhängend.

Angenommen $f(A)$ ist nicht zusammenhängend. \implies Es existieren offene Mengen $U, V \subset Y$ mit $f(A) \subset U \cup V$ und

$$f(A) \cap U \cap V = \emptyset, \quad f(A) \cap U \neq \emptyset, \quad f(A) \cap V \neq \emptyset$$

Damit sind $f^{-1}(U), f^{-1}(V) \subset X$ offen, da f stetig ist, und es gilt $A \cap f^{-1}(V) \cap f^{-1}(U) = \emptyset$.

Weiter ist $A \subset f^{-1}(U) \cup f^{-1}(V)$, $A \cap f^{-1}(U) \neq \emptyset$, $A \cap f^{-1}(V) \neq \emptyset$.

Also ist A nicht zusammenhängend

(b) Sei A bogenzusammenhängend. Dann existiert für alle $x, y \in A$ eine stetige Abbildung $\omega : [a, b] \rightarrow X$ mit $\text{Im} \omega \subset A$, $\omega(a) = x$, und $\omega(b) = y$ und

$$f \circ \omega \text{ ist ein Weg von } f(x) \text{ nach } f(y) \text{ in } f(A)$$

2. Sei A bogenzusammenhängend.

Angenommen A ist nicht zusammenhängend. Dann existieren disjunkte Mengen $U, V \subset X$ mit

$$A \subset (U \cup V), \quad A \cap U \neq \emptyset, \quad A \cap V \neq \emptyset, \quad A \cap U \cap V = \emptyset.$$

Sei $x \in A \cap U$ und $y \in A \cap V$. Da A bogenzusammenhängend ist, existiert eine stetige Abbildung $\omega : [a, b] \rightarrow A \subset X$ mit $\omega(a) = x$, $\omega(b) = y$. Da $[a, b] \subset \mathbb{R}$ zusammenhängend ist, ist auch $\omega([a, b]) \subset X$ zusammenhängend.

Es gilt aber

$$x \in \omega([a, b]) \cap U \neq \emptyset, \quad y \in \omega([a, b]) \cap V \neq \emptyset, \quad \omega([a, b]) \subset U \cup V \text{ und } \omega([a, b]) \cap (U \cap V) = \emptyset.$$

Das ist ein Widerspruch.

□

Beispiel 30. BOGENZUSAMMENHÄNGENDE RÄUME

1. $\mathbb{R}^n, S^n, T^n, \mathbb{R}P^n, \mathbb{C}P^n$, Möbiusband und Kleinsche Flasche sind bogenzusammenhängend und somit auch zusammenhängend.
2. Nicht jede zusammenhängende Menge ist bogenzusammenhängend.

Beispiel: “Floh und Kamm”

Sei $X \subset \mathbb{C}$, $X = A \cup B$ wobei

$$A = \{i\} = \text{Floh} \quad B = \{[0, 1]\} \cup \left\{ \frac{1}{n} + iy \mid y \in [0, 1], n \in \mathbb{N} \right\} = \text{Kamm}$$

Dann ist $X \subset \mathbb{C}$ ist zusammenhängend aber nicht bogenzusammenhängend.

Satz 1.13. Sei (X, τ) ein topologischer Raum.

1. Sei $A \subset X$ zusammenhängend. Gilt für $B \subset X$ $A \subset B \subset clA$, so ist auch B zusammenhängend.
Insbesondere ist der Abschluß jeder zusammenhängenden Menge zusammenhängend.
2. Seien $A_i \subset X, i \in I$ beliebig viele zusammenhängende Mengen, wobei je zwei dieser Mengen einen nichtleeren Durchschnitt haben. Dann ist

$$A := \bigcup_{i \in I} A_i$$

zusammenhängend.

Beweis:

1. Angenommen B ist nicht zusammenhängend. Dann existieren offene Mengen $U, V \subset X$ mit

$$B \subset U \cup V, B \cap U \cap V = \emptyset \text{ und } B \cap U \neq \emptyset, B \cap V \neq \emptyset$$

Da $A \subset B$ ist, gilt auch

$$A \subset U \cup V, A \cap U \cap V = \emptyset$$

Behauptung: $A \cap U \neq \emptyset$ und $A \cap V \neq \emptyset$. (Das wäre ein Widerspruch.)

Angenommen $A \cap U = \emptyset$. Dann ist $A \subset \underbrace{X \setminus U}_{\text{abgeschlossen}}$

$$\implies clA \subset cl(X \setminus U) = X \setminus U$$

$$\implies B \subset clA \subset X \setminus U \implies B \cap U = \emptyset \text{ Widerspruch}$$

$$\implies A \cap U \neq \emptyset \text{ und analog } A \cap V \neq \emptyset$$

2. Angenommen $A = \bigcup_{i \in I} A_i$ ist nicht zusammenhängend.

Dann existieren offene Mengen $U, V \subset X$ mit $A \subset U \cup V$ und

$$A \cap U \neq \emptyset, A \cap V \neq \emptyset, A \cap U \cap V = \emptyset$$

Sei $i \in I$ beliebig. Dann ist $A_{i_0} \subset U \cup V$. Da A_{i_0} zusammenhängend ist, gilt $A_{i_0} \cap U = \emptyset$ oder $A_{i_0} \cap V = \emptyset$ (beides kann nicht gelten, da $A_{i_0} \subset U \cup V$).

Also ist $A_{i_0} \subset U \cap A$ oder $A_{i_0} \subset V \cap A$. Da jeweils zwei Mengen A_ν, A_μ einen nicht-leeren Durchschnitt haben, gilt entweder $A_i \subset U \cap A \forall i \in I$ oder $A_i \subset V \cap A \forall i \in I$, denn $(U \cap A) \cap (V \cap A) = \emptyset$. Damit ist

$$A = \bigcup_{i \in I} A_i \subset U \cap A \text{ oder } A \subset V \cap A$$

Das ist Widerspruch zur Voraussetzung: $U \cap A \neq \emptyset$ und $A \cap V \neq \emptyset$.

□

Definition. Sei (X, τ) ein topologischer Raum, $x \in X$. Die Menge

$$C(x) := \bigcup_{\substack{A \text{ zsh} \\ x \in A}} A$$

heißt die durch x bestimmte Zusammenhangskomponente von X .

Bemerkungen

1. $C(x)$ ist zusammenhängend nach Satz 1.13.
2. $C(x)$ ist die größte zusammenhängende Menge, die x enthält.
3. Sind $x, y \in X$, so gilt entweder $C(x) = C(y)$ oder $C(x) \cap C(y) = \emptyset$.
Angenommen $C(x) \cap C(y) \neq \emptyset$, so folgt mit Satz 1.13, dass $C(x) \cup C(y)$ zusammenhängend ist. $C(x) \cup C(y)$ enthält aber x und y . Damit ist

$$C(x) \cup C(y) \subset C(x) \text{ und } C(x) \cup C(y) \subset C(y)$$

D.h. $C(x) = C(y)$.

4. Damit zerlegt sich X in seine Zusammenhangskomponenten:

$$\begin{aligned} X &= \bigcup_{x \in X} C(x) \\ &= \dot{\bigcup}_i C(x_i) \quad (\text{disjunkte Vereinigung}) \end{aligned}$$

Satz 1.14. Jede Zusammenhangskomponente von (X, τ) ist abgeschlossen.

Beweis:

Sei $x \in X$, $C(x)$ die Zusammenhangskomponente, die x enthält. Dann ist $clC(x)$ nach Satz 1.13 zusammenhängend und enthält x . Es gilt also

$$clC(x) \subset C(x) \subset clC(x)$$

und damit $C(x) = clC(x)$, d.h. $C(x)$ ist abgeschlossen.

□

Kapitel 2

Differenzierbare Mannigfaltigkeiten

2.1 Definition und Beispiele

Definition. Ein topologischer Raum M heißt n -dimensionale topologische Mannigfaltigkeit, falls gilt:

1. M ist ein T_2 -Raum mit abzählbarer Basis.
2. M ist lokal euklidisch, d.h. zu jedem $x \in M$ existiert eine Umgebung $U(x) \subset M$, die homöomorph zu einer offenen Menge des \mathbb{R}^n ist.

Bemerkung:

1. Eine topologische Mannigfaltigkeit ist lokal kompakt, da der \mathbb{R}^n lokal kompakt ist. Somit ist nach Satz 1.11 aus Kapitel 1 jede topologische Mannigfaltigkeit auch parakompakt.
2. Die Zahl n ist eindeutig bestimmt und heißt Dimension von M . Die Eindeutigkeit folgt aus dem Satz über die Invarianz der Dimension: Seien $\tilde{U} \subset \mathbb{R}^n$ offen, $\tilde{V} \subset \mathbb{R}^m$ offen und \tilde{U} homöomorph zu \tilde{V} , so gilt $n = m$.
3. Sei M eine topologische Mannigfaltigkeit. Dann gilt:

M ist zusammenhängend. $\iff M$ ist bogenzusammenhängend.

(ÜA) Hinweis: Es genügt zu zeigen, dass eine zusammenhängende Mannigfaltigkeit auch bogenzusammenhängend ist. Sei $x_0 \in M$ fixiert und

$$F := \{y \in M \mid \exists \text{ stetiger Weg von } x_0 \text{ nach } y\} \subset M$$

Zu zeigen ist nun, dass F offen und abgeschlossen ist.

Bezeichnungen und Definition:

- Sei M^n eine n -dimensionale topologische Mannigfaltigkeit und $x \in M$. Dann existiert eine Umgebung $U(x) \subset M$ und ein Homöomorphismus

$$\varphi : U(x) \longrightarrow \tilde{U}_{\text{offen}} \subset \mathbb{R}^n$$

(U, φ) heißt Karte um $x \in M$, und $\varphi = (x_1, \dots, x_n)$ heißen lokale Koordinaten um $x \in M$.

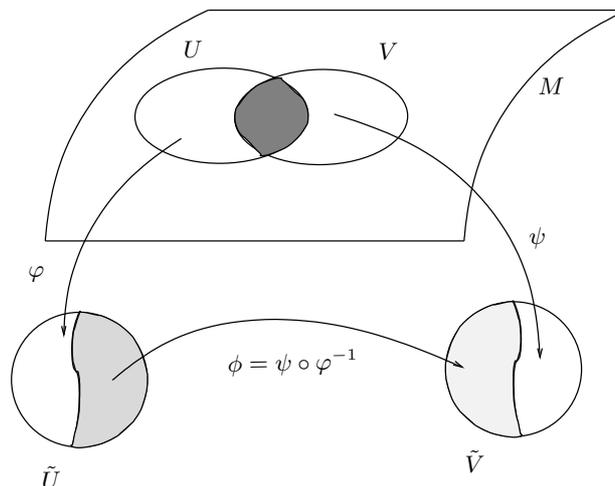
- Seien $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ und $(V, \psi = (y_1, \dots, y_n))$ Karten auf M mit $V \cap U \neq \emptyset$. Dann ist

$$\psi \circ \varphi^{-1} : \varphi(U \cap V) \longrightarrow \psi(U \cap V)$$

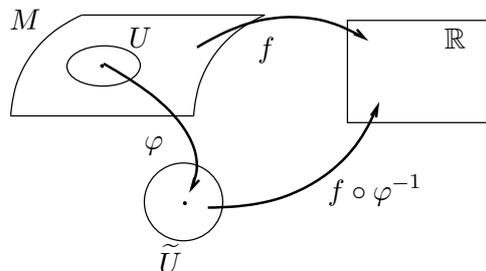
ein Homöomorphismus und heißt Kartenübergang von (U, φ) nach (V, ψ) .

- **Koordinatentransformation:**

$$\varphi(U \cap V) \ni (x_1, \dots, x_n) \mapsto (y_1(x_1, \dots, x_n), \dots, y_n(x_1, \dots, x_n)) := \psi \circ \varphi^{-1}(x_1, \dots, x_n)$$



Die topologischen Mannigfaltigkeiten sind die Grundobjekte, auf denen wir Geometrie und Analysis betreiben wollen. Dazu benötigen wir einen Differenzierbarkeitsbegriff.



Man könnte z.B. eine Funktion $f : M \rightarrow \mathbb{R}$ in $x_0 \in M$ differenzierbar nennen, falls für jede Karte (U, φ) um x_0

$$f \circ \varphi^{-1} : \tilde{U} \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$$

in $\varphi(x_0)$ differenzierbar ist. Dabei tritt jedoch folgendes Problem auf:

Seien $(U, \varphi), (V, \psi)$ zwei Karten um x_0 , dann gilt:

$$f \circ \psi^{-1} = f \circ \varphi^{-1} \circ (\varphi \circ \psi^{-1}).$$

Ist $f \circ \varphi^{-1}$ differenzierbar, dann braucht $f \circ \psi^{-1}$ jedoch nicht differenzierbar zu sein! Damit die Differenzierbarkeit von f sinnvoll erklärt werden kann, fordern wir, dass $\varphi \circ \psi^{-1}$ für alle Karten differenzierbar ist.

Definition. Eine Familie $\mathcal{A} = \{(U_\alpha, \varphi_\alpha)\}_{\alpha \in I}$ von Karten der topologischen Mannigfaltigkeit M^n heißt C^k -Atlas auf M^n ($0 \leq k \leq \infty$), falls

1. $M = \bigcup_{\alpha \in I} U_\alpha$

2. Für alle $(U, \varphi), (V, \psi) \in \mathcal{A}$ mit $U \cap V \neq \emptyset$ sind die Kartenübergänge

$$\psi \circ \varphi^{-1} : \varphi(U \cap V) \rightarrow \psi(U \cap V)$$

C^k -Abbildungen.

Zwei C^k -Atlanten \mathcal{A} und $\tilde{\mathcal{A}}$ auf M^n heißen äquivalent, falls $\mathcal{A} \cup \tilde{\mathcal{A}}$ ein C^k -Atlas auf M ist. $[\mathcal{A}]$ ist die durch den Atlas \mathcal{A} bestimmte Äquivalenzklasse von Atlanten.

Definition. Ein Paar $(M, [\mathcal{A}])$ aus einer n -dimensionalen topologischen Mannigfaltigkeit M und einem C^k -Atlas auf M heißt n -dimensionale C^k -Mannigfaltigkeit. $[\mathcal{A}]$ heißt auch C^k -Struktur auf M und ist durch die Angabe von $\mathcal{A} \in [\mathcal{A}]$ eindeutig bestimmt.

Ein Atlas $\tilde{\mathcal{A}}$ auf der C^k -Mannigfaltigkeit $(M, [\mathcal{A}])$ heißt zulässig, falls $\tilde{\mathcal{A}} \in [\mathcal{A}]$ (d.h. $\tilde{\mathcal{A}} \sim \mathcal{A}$). Eine Karte (U, φ) auf $(M, [\mathcal{A}])$ heißt zulässig, falls $\mathcal{A} \cup \{(U, \varphi)\} \sim \mathcal{A}$.

Bemerkungen:

1. Jede topologische Mannigfaltigkeit ist eine C^0 -Mannigfaltigkeit. Die C^0 -Struktur auf M^n ist eindeutig bestimmt, da alle C^0 -Atlanten äquivalent sind.
2. Auf einer topologischen Mannigfaltigkeit können verschiedene C^k -Strukturen existieren, falls $k \geq 1$.
Sei $M = \mathbb{R}^1$, $\mathcal{A}_1 = \{(\mathbb{R}, \varphi_1 = \text{id})\}$, $\mathcal{A}_2 = \{(\mathbb{R}, \varphi_2)\}$, wobei $\varphi_2(x) = x^3$. \mathcal{A}_1 und \mathcal{A}_2 sind C^k -Atlanten auf M aber $\mathcal{A}_1 \not\sim \mathcal{A}_2$, denn

$$\begin{aligned} \varphi_1 \circ \varphi_2 : \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R} \\ y &\mapsto \sqrt[3]{y} \end{aligned}$$

ist in 0 nicht differenzierbar.

Information zur Existenz von C^k -Strukturen

1. Existiert auf jeder topologischen Mannigfaltigkeit eine C^1 -Struktur? Nein!

- Für alle $n \geq 10$ existieren n -dimensionale topologische Mannigfaltigkeiten, die keine C^1 -Struktur haben. (1. Beispiel Kervain 1960)
 - Für $n \leq 4$ existiert auf jeder n -dimensionalen topologischen Mannigfaltigkeit eine C^1 -Struktur.
2. Ist M^n eine topologische Mannigfaltigkeit und \mathcal{A} ein C^k -Atlas auf M , so ist \mathcal{A} auch ein C^l -Atlas für alle $l \leq k$.
 3. Es gilt auch die Umkehrung: Sei $(M, [\mathcal{A}])$ eine C^k -Mannigfaltigkeit, $k \geq 1$. Dann existiert für jedes $l, k \leq l \leq \infty$, ein C^l -Atlas $\hat{\mathcal{A}}$ mit $\mathcal{A} \sim_{C^k} \hat{\mathcal{A}}$. D.h. $(M, [\hat{\mathcal{A}}])$ ist eine C^l -Mannigfaltigkeit. Insbesondere hat jede C^1 -Mannigfaltigkeit M einen zulässigen Atlas, der eine C^∞ -Struktur auf M liefert.¹(*)

Vereinbarungen

- Wir betrachten im folgenden nur noch C^∞ -Mannigfaltigkeiten.
Nach (*) ist dies keine Einschränkung gegenüber C^k , $k \geq 1$.
Mit einer differenzierbaren, bzw. glatten Mannigfaltigkeit ist nun immer eine C^∞ -Mannigfaltigkeit gemeint!
- Wir lassen oft die Angabe der Atlanten weg.

Satz 2.1. Sei N ein topologischer Raum, M^n eine n -dimensionale C^k -Mannigfaltigkeit mit dem zulässigen Atlas \mathcal{A} und $f : N \rightarrow M$ ein Homöomorphismus. Sei

$$\mathcal{A}_f := \{(f^{-1}(U), \varphi \circ f) \mid (U, \varphi) \in \mathcal{A}\}.$$

Dann ist $(N, [\mathcal{A}_f])$ eine n -dimensionale C^k -Mannigfaltigkeit. $[\mathcal{A}_f]$ ist eindeutig bestimmt.

Beweis:

- f ist ein Homöomorphismus und damit ist N T_2 und besitzt eine abzählbare Basis.
- N ist lokal euklidisch, denn zu jedem $x \in N$ existiert eine Karte $(U, \varphi) \in \mathcal{A}$ um $f(x) \in M$.
d.h. $(f^{-1}(U), \varphi \circ f)$ ist eine Karte um x .
- Kartenübergänge:
Seien $(f^{-1}(U), \varphi \circ f)$, $(f^{-1}(V), \psi \circ f)$ Karten um x , dann ist

$$(\psi \circ f) \circ (\varphi \circ f)^{-1} = \psi \circ \varphi^{-1} : \varphi(U \cap V) \rightarrow \psi(U \cap V)$$
 nach Voraussetzung k -fach stetig-differenzierbar.
- Sei $\mathcal{A} \sim \hat{\mathcal{A}}$ auf M , so ist $\mathcal{A}_f \sim \hat{\mathcal{A}}_f$, da die gleichen Kartenübergänge auftreten.

□

¹Whitney: Annals of Math. 37 (1936), 645-680
Munthres: Elementary Differential Topology

Beispiel 31. TRIVIALE BEISPIELE FÜR MANNIGFALTIGKEITEN

1. Der \mathbb{R}^n ist eine n -dimensionale C^∞ -Mannigfaltigkeit mit einem Atlas $\mathcal{A} = \{(\mathbb{R}^n, id)\}$.
2. Der \mathbb{C}^n ist eine $2n$ -dimensionale C^∞ -Mannigfaltigkeit mit einem Atlas $\mathcal{A} = \{(\mathbb{C}^n, \varphi)\}$, wobei

$$\varphi(z_1, \dots, z_n) := (x_1, y_1, \dots, x_n, y_n)$$

mit $z_j = x_j + iy_j$.

Beispiel 32. DIE SPHÄRE S^n ALS MF

Die S^n ist eine n -dimensionale C^∞ -Mannigfaltigkeit² mit einem Atlas aus zwei Karten: der Projektion aus dem Nordpol φ_N und φ_S , der Projektion aus dem Südpol.

$$\begin{aligned} \varphi_N : S^n \setminus \{NP\} &\longrightarrow \mathbb{R}^n \\ (x_1, \dots, x_{n+1}) &\mapsto \left(\frac{x_1}{1-x_{n+1}}, \dots, \frac{x_n}{1-x_{n+1}} \right) \\ \varphi_S : S^n \setminus \{SP\} &\longrightarrow \mathbb{R}^n \\ (x_1, \dots, x_{n+1}) &\mapsto \left(\frac{x_1}{1+x_{n+1}}, \dots, \frac{x_n}{1+x_{n+1}} \right) \end{aligned}$$

Für die Kartenübergänge gilt:

$$\begin{aligned} \varphi_S \circ \varphi_N^{-1} : \underbrace{\varphi_N(S^n \setminus \{NP, SP\})}_{=\mathbb{R}^n \setminus \{0\}} &\longrightarrow \underbrace{\varphi_S(S^n \setminus \{NP, SP\})}_{=\mathbb{R}^n \setminus \{0\}} \\ x &\mapsto \frac{x}{\|x\|^2} \\ \varphi_N \circ \varphi_S^{-1} : \mathbb{R}^n \setminus \{0\} &\longrightarrow \mathbb{R}^n \setminus \{0\} \\ x &\mapsto \frac{x}{\|x\|^2} \end{aligned}$$

D.h. $\mathcal{A} = \{(S^n \setminus \{NP\}, \varphi_N), (S^n \setminus \{SP\}, \varphi_S)\}$ ist ein C^∞ -Atlas.

Beispiel 33. DER REELL PROJEKTIVE RAUM $\mathbb{R}P^n$ ALS MF

Der reell-projektive Raum $\mathbb{R}P^n$ ist eine n -dimensionale C^∞ -Mannigfaltigkeit³, denn:

- $\mathbb{R}P^n$ ist ein T_2 -Raum mit abzählbarer Basis.
- Der $\mathbb{R}P^n$ ist homöomorph zur Menge aller Geraden $\mathbb{R} \cdot x$, $x \in \mathbb{R}^{n+1}$, im \mathbb{R}^{n+1} versehen mit der Faktortopologie.

$$\mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\} / \sim \quad x \sim y : \iff \mathbb{R} \cdot x = \mathbb{R} \cdot y$$

Die Mengen $\tilde{U}_i := \{/x_1, \dots, x_n \in \mathbb{R}^{n+1} \mid x_i \neq 0\}$ mit $i = 1, \dots, n+1$ sind offen im $\mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\}$, und

$$\pi : \mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\} \longrightarrow \mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\} / \sim = \mathbb{R}P^n$$

²siehe auch Bsp. 8 auf Seite 8 und Bsp. 20

³siehe auch Bsp. 10 auf Seite 9 und Bsp. 21 auf Seite 21

ist eine offene Abbildung. D.h. $U_i := \pi(\tilde{U}_i) \subset \mathbb{R}P^n$ ist offen für $i = 1, \dots, n+1$ und

$$\mathbb{R}P^n = \bigcup_{i=1}^{n+1} U_i$$

Definition einer Kartenabbildung auf U_i : Da

$$[x_1 : \dots : x_{n+1}] = \left[\frac{x_1}{x_i} : \dots : \frac{x_{i-1}}{x_i} : 1 : \frac{x_{i+1}}{x_i} : \dots : \frac{x_{n+1}}{x_i} \right]$$

ist

$$\begin{aligned} \varphi_i : U_i &\longrightarrow \mathbb{R}^n \\ [x_1 : \dots : x_{n+1}] &\longmapsto \left(\frac{x_1}{x_i}, \dots, \frac{x_{i-1}}{x_i}, \frac{x_{i+1}}{x_i}, \dots, \frac{x_{n+1}}{x_i} \right) \end{aligned}$$

bijektiv. Und da

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}_i : \tilde{U}_i &\longrightarrow \mathbb{R}^n \\ \tilde{\varphi}_i(x_1, \dots, x_{n+1}) &\longmapsto \left(\frac{x_1}{x_i}, \dots, \frac{x_{i-1}}{x_i}, \frac{x_{i+1}}{x_i}, \dots, \frac{x_{n+1}}{x_i} \right) \end{aligned}$$

stetig ist, ist auch φ_i stetig. Die Umkehrabbildung

$$\begin{aligned} \varphi_i^{-1} : \mathbb{R}^n &\longrightarrow U_i \\ (y_1, \dots, y_n) &\mapsto \pi((y_1, \dots, y_{i-1}, 1, y_i, \dots, y_n)) \end{aligned}$$

ist stetig, da π stetig ist. Damit ist der $\mathbb{R}P^n$ eine n -dimensionale topologische Mannigfaltigkeit.

- Nun zur C^∞ -Struktur:

$$\mathcal{A} = \{(U_i, \varphi_i) \mid i = 1, \dots, n+1\}$$

bildet einen C^∞ -Atlas, denn für $i < j$ ist

$$\varphi_j \circ \varphi_i^{-1} : \underbrace{\varphi_i(U_i \cap U_j)}_{\mathbb{R}^n \cap \{z_{j-1} \neq 0\}} \longrightarrow \underbrace{\varphi_j(U_i \cap U_j)}_{=\mathbb{R}^n \cap \{z_i \neq 0\}}$$

mit

$$\begin{aligned} &\varphi_j \circ \varphi_i^{-1}(z_1, \dots, z_n) \\ &= \varphi_j(\pi(z_1, \dots, z_{i-1}, 1, z_i, \dots, \underbrace{z_{j-1}}_{j\text{-te Stelle}}, \dots, z_n)) \\ &= \left(\frac{z_1}{z_{j-1}}, \dots, \frac{z_{i-1}}{z_{j-1}}, \frac{1}{z_{j-1}}, \dots, \frac{z_{j-2}}{z_{j-1}}, 1, \frac{z_j}{z_{j-1}}, \dots, \frac{z_n}{z_{j-1}} \right) \end{aligned}$$

eine C^∞ -Abbildung. Analog folgt dies auch für $\varphi_i \circ \varphi_j^{-1}$.

Der $\mathbb{R}P^n$ ist also auch eine n -dimensionale C^∞ -Mannigfaltigkeit.

Beispiel 34. OFFENE UNTERMANNIGFALTIGKEITEN

Sei $(M, [\mathcal{A}])$ eine n -dimensionale C^∞ -Mannigfaltigkeit und $B \subset M$ eine offene Teilmenge von M . Dann ist B mit dem Atlas

$$\mathcal{A}_B := \{(B \cap U, \varphi|_{B \cap U}) \mid (U, \varphi) \in \mathcal{A}\}$$

eine n -dimensionale C^∞ -Mannigfaltigkeit.

Die Gruppe der invertierbaren $(n \times n)$ -Matrizen ist z.B. eine offene Untermannigfaltigkeit des \mathbb{R}^{n^2} , denn

$$Gl(n, \mathbb{R}) = (\det)^{-1}(\mathbb{R} \setminus \{0\}) \subset M_{\mathbb{R}}(n, n) = \mathbb{R}^{n^2}$$

und die Determinantenfunktion ist stetig und $\mathbb{R} \setminus \{0\}$ ist offen.

Beispiel 35. PRODUKTMANNIGFALTIGKEITEN

Seien $(M^n, [\mathcal{A}])$ und $(\tilde{M}^m, [\tilde{\mathcal{A}}])$ C^∞ -Mannigfaltigkeiten. Auf $M \times \tilde{M}$ definieren wir einen Atlas durch:

$$\mathcal{A}_{M \times \tilde{M}} := \{(U \times V, \varphi \times \psi) \mid (U, \varphi) \in \mathcal{A}, (V, \psi) \in \tilde{\mathcal{A}}\}$$

Damit ist $(M \times \tilde{M}, [\mathcal{A}_{M \times \tilde{M}}])$ eine C^∞ -Mannigfaltigkeit.

Zum Beispiel ist

$$T^n = \underbrace{S^1 \times \dots \times S^1}_{n\text{-mal}}$$

eine C^∞ -Mannigfaltigkeit.

Beispiel 36. UNTERMANNIGFALTIGKEITEN

Sei $(\tilde{M}, [\tilde{\mathcal{A}}])$ eine C^∞ -Mannigfaltigkeit der Dimension N und

$$M \subset \tilde{M}$$

eine beliebige Teilmenge. M heißt n -dimensionale Untermannigfaltigkeit von \tilde{M} , falls für jeden Punkt $x \in M \subset \tilde{M}$ eine zulässige Karte (U, φ) von \tilde{M} um x existiert, so dass

$$\varphi(U \cap M) = \varphi(U) \cap \{x_{n+1} = \dots = x_N = 0\}.$$

Jede n -dimensionale Untermannigfaltigkeit $M \subset \tilde{M}$ ist eine n -dimensionale Mannigfaltigkeit mit dem Atlas

$$\mathcal{A}_M := \left\{ (U \cap M, \varphi|_{U \cap M}) \mid \begin{array}{l} (U, \varphi) \text{ ist eine zulässige Karte mit} \\ \varphi(U \cap M) = \varphi(U) \cap \{x_{n+1} = \dots = x_N = 0\} \end{array} \right\}$$

Die Kartenübergänge sind C^∞ , da sie die Einschränkungen der Kartenübergänge von zulässigen Karten von \tilde{M} auf den Unterraum \mathbb{R}^n sind.

2.2 Differenzierbare Abbildungen, Diffeomorphismen

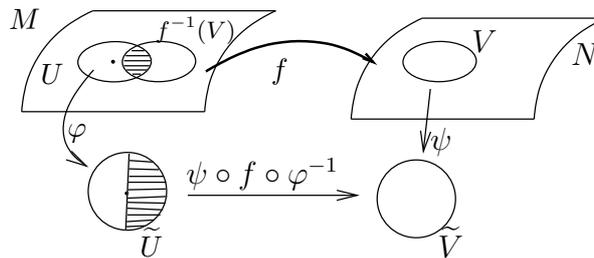
Definition. Seien M und N glatte Mannigfaltigkeiten und

$$F : M \longrightarrow N$$

eine Abbildung. F heißt C^k -Abbildung ($0 \leq k \leq \infty$), falls für alle zulässigen Karten (U, φ) von M und (V, ψ) von N mit $F^{-1}(V) \cap U \neq \emptyset$ gilt, dass

$$\psi \circ F \circ \varphi^{-1} : \varphi(U \cap F^{-1}(V)) \longrightarrow \psi(V)$$

eine C^k -Abbildung ist. $\psi \circ F \circ \varphi^{-1}$ heißt Kartendarstellung oder Koordinatendarstellung von F .



$C^k(M, N)$ bezeichnet die Menge aller C^k -Abbildungen von M nach N und $C^k(M)$ den Vektorraum aller C^k -Abbildungen von M nach \mathbb{R} . Mit der Multiplikation

$$(f \cdot h)(x) := f(x) \cdot h(x) \quad \forall x \in M$$

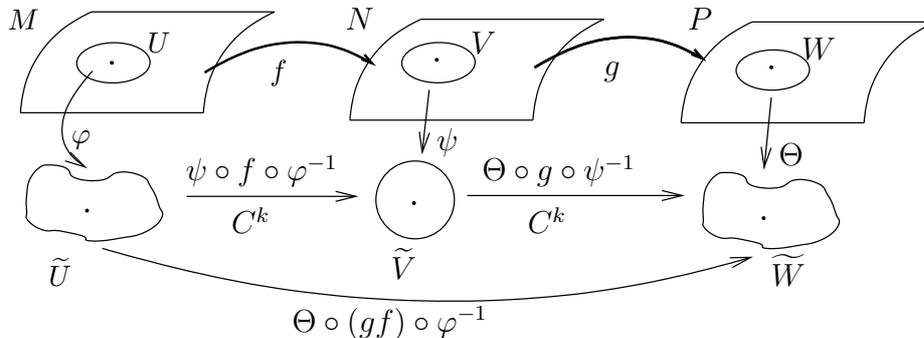
ist $C^k(M)$ sogar ein Ring.

Satz 2.2. 1. Seien $(M, [\mathcal{A}_M])$ und $(N, [\mathcal{A}_N])$ Mannigfaltigkeiten. Es genügt, die Differenzierbarkeit der Kartendarstellungen einer Funktion $f : M \longrightarrow N$ für alle Karten aus \mathcal{A}_M und \mathcal{A}_N zu überprüfen.

2. Seien $f \in C^k(M, N)$ und $g \in C^k(N, P)$, so ist $g \circ f \in C^k(M, P)$.

Beweis:

1. Übungsaufgabe!
2. Dies folgt unmittelbar aus



da die Verknüpfung von glatten Abbildungen im \mathbb{R}^n bekanntlich auch glatt ist.

□

Definition. Seien M und N glatte Mannigfaltigkeiten.

1. $F : M \longrightarrow N$ heißt C^k -Diffeomorphismus, falls F bijektiv ist, $F \in C^k(M, N)$ und $F^{-1} \in C^k(N, M)$.
2. M und N heißen diffeomorph, falls es einen C^∞ -Diffeomorphismus von M nach N gibt.
3. $\text{Diff}(M, N)$ bezeichnet die Menge aller C^∞ -Diffeomorphismen von M nach N .

Satz 2.3. Es gilt:

1. Sei M eine C^∞ -Mannigfaltigkeit und $\varphi : U \longrightarrow \tilde{U}$ eine zulässige Karte. Dann ist φ ein Diffeomorphismus zwischen den entsprechenden offenen Untermannigfaltigkeiten.
2. Sei $f : M \longrightarrow N$ ein Homöomorphismus zwischen den topologischen Räumen und sei $(N, [\mathcal{A}])$ eine C^∞ -Mannigfaltigkeit. Dann ist

$$f : (M, [\mathcal{A}_f]) \longrightarrow (N, [\mathcal{A}])$$

ein Diffeomorphismus.

Beweis:

1. U ist eine Mannigfaltigkeit mit einer zulässigen Karte (U, φ) . \tilde{U} ist eine Mannigfaltigkeit mit einer zulässigen Karte (\tilde{U}, id) . Die Kartendarstellung von φ ist:

$$id \circ \varphi \circ \varphi^{-1} = id$$

und damit glatt.

2. Die Kartendarstellung von f ist:

$$\varphi \circ f \circ (\psi \circ f)^{-1} = \varphi \circ f \circ f^{-1} \circ \psi^{-1} = \varphi \circ \psi^{-1}$$

und damit auch glatt.

□

Bemerkungen [Diffeomorphietypen von Mannigfaltigkeiten]

- Auf einer Mannigfaltigkeiten können nicht Äquivalente C^∞ -Atlanten existieren, meistens sind sie jedoch diffeomorph.
- Auf top. Mannigfaltigkeiten der Dimension $n \leq 3$ existiert nur ein Diffeomorphietyp.

- Jede zusammenhängende 1-dimensionale Mannigfaltigkeit ist diffeomorph zu S^1 oder \mathbb{R} .
- Im Fall $n = 2$ kennt man alle glatten zsh. Mannigfaltigkeiten.
- Im Fall $n = 3$
- Ab $n \geq 4$ existieren mehrere Diffeomorphiestrukturen, z.B. 28 auf S^7 .
- Für $n \geq 5$ existieren höchstens abzählbar viele Diffeomorphiestrukturen. Ist M^n darüberhinaus kompakt, so existieren höchstens endlich viele Strukturen.
- Mit der “Yang-Mills-Theorie” (ca. 1984) kann man auf dem \mathbb{R}^4 überabzählbar viele Diffeomorphiestrukturen nachweisen. Für $n \neq 4$ besitzt der \mathbb{R}^n jedoch nur einen Diffeomorphietyp.

2.3 Der Tangentialraum und das Differential einer glatten Abbildung

Bevor wir uns mit dem Begriff des Differentials für glatte Abbildungen auf Mannigfaltigkeiten befassen, noch ein paar Erinnerungen an die Analysis:

- Für eine differenzierbare Abbildung $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ ist

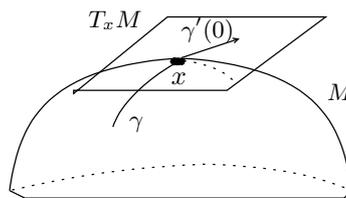
$$\begin{aligned} df_x : \mathbb{R}^n = T_x \mathbb{R}^n &\longrightarrow \mathbb{R}^m = T_{f(x)} \mathbb{R}^m \\ v &\mapsto \left. \frac{d}{dt} f(x + tv) \right|_{t=0} \end{aligned}$$

- Sei $M \subset \mathbb{R}^N$ eine Untermannigfaltigkeit, $x \in M$. Der Tangentialraum im Punkt x ist

$$T_x M := \{v \in \mathbb{R}^N \mid \exists \gamma : I \subset \mathbb{R} \rightarrow M : \gamma(0) = x, \gamma'(0) = v\}.$$

Für eine glatte Abbildung $f : M \subset \mathbb{R}^N \rightarrow \tilde{M} \subset \mathbb{R}^K$ C^∞ -Abbildung gilt hier

$$\begin{aligned} df_x : T_x M &\longrightarrow T_{f(x)} \tilde{M} \\ v = \gamma'(0) &\mapsto \left. \frac{d}{dt} f(\gamma(t)) \right|_{t=0} \end{aligned}$$



Definition. Sei M^n eine glatte Mannigfaltigkeit, $x \in M$. Zwei glatte Kurven $\gamma, \delta : I \subset \mathbb{R} \rightarrow M$ mit $\gamma(0) = \delta(0) = x$ heißen äquivalent (Bezeichnung: $\gamma \sim \delta$), falls für jede zulässige Karte (U, φ) um x gilt:

$$(\varphi \circ \gamma)'(0) = (\varphi \circ \delta)'(0).$$

Dies ist unabhängig von der Wahl der zulässigen Karte.

Ein Tangentialvektor in $x \in M$ ist eine Äquivalenzklasse von Kurven durch x .

$$T_x M := \{[\gamma] \mid \gamma \text{ ist Kurve durch } x\}$$

ist der Tangentialraum an M im Punkt x .

Satz 2.4. Der Tangentialraum $T_x M$ ist ein reeller Vektorraum mit der Operation:

$$\lambda[\gamma] + \mu[\delta] := [\varphi^{-1}(\lambda \cdot \varphi \circ \gamma + \mu \cdot \varphi \circ \delta)]$$

für $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$, $[\gamma], [\delta] \in T_x M$, wobei (U, φ) eine zulässige Karte um x mit $\varphi(x) = 0$ ist.

Beweis: Die Kurve

$$\varphi^{-1}(\lambda \cdot \varphi \circ \gamma + \mu \cdot \varphi \circ \delta)$$

ist eine Kurve durch x da

$$\begin{aligned} \varphi^{-1}(\lambda \cdot \varphi \circ \gamma(0) + \mu \cdot \varphi \circ \delta(0)) &= \varphi^{-1}(\lambda \cdot \varphi(x) + \mu \cdot \varphi(x)) \\ &= \varphi^{-1}(\lambda \cdot 0 + \mu \cdot 0) \\ &= \varphi^{-1}(0) = x \end{aligned}$$

Die Definition ist unabhängig von der Wahl der Vertreter $\gamma \in [\gamma]$ und $\delta \in [\delta]$. Weiterhin ist die Definition unabhängig von der gewählten Karte (U, φ) , denn sei (U, ψ) eine weitere Karte mit $\psi(x) = 0$, so gilt:

$$\begin{aligned} (\varphi \circ \psi^{-1}(\lambda \cdot \psi \circ \gamma + \mu \cdot \psi \circ \delta))'(0) &= d(\varphi \circ \psi^{-1})_0 \left(\frac{d}{dt}(\lambda \cdot \psi \circ \gamma(t) + \mu \cdot \psi \circ \delta(t)) \Big|_{t=0} \right) \\ &= d(\varphi \circ \psi^{-1})_0 (\lambda \cdot (\psi \circ \gamma)'(0) + \mu \cdot (\psi \circ \delta)'(0)) \\ &= \lambda \cdot (d(\varphi \circ \psi^{-1})_0(\psi \circ \gamma)'(0)) + \\ &\quad + \mu \cdot (d(\varphi \circ \psi^{-1})_0(\psi \circ \delta)'(0)) \\ &= \lambda \cdot (\varphi \circ \gamma)'(0) + \mu \cdot (\varphi \circ \delta)'(0) \\ &= (\varphi \circ \varphi^{-1}(\lambda \cdot \varphi \circ \gamma + \mu \cdot \varphi \circ \delta))'(0) \end{aligned}$$

D.h.

$$\varphi^{-1}(\lambda \cdot \varphi \circ \gamma + \mu \cdot \varphi \circ \delta) \sim \psi^{-1}(\lambda \cdot \psi \circ \gamma + \mu \cdot \psi \circ \delta).$$

□

Bemerkung:

Sei $M^n \subset \mathbb{R}^N$ eine Untermannigfaltigkeit, so ist die Abbildung:

$$\begin{aligned} T_x M &\longrightarrow T_x^{UMF} M \\ [\gamma] &\mapsto \gamma'(0) \in \mathbb{R}^N \end{aligned}$$

ein linearer Isomorphismus.

Vereinbarung:

Für Untermannigfaltigkeiten $M^n \subset \mathbb{R}^N$ benutzen wir immer die Realisierung

$$T_x M = T_x^{UMF} M = \{\gamma'(0) \mid \gamma : I \longrightarrow M, \gamma(0) = x\} \subset \mathbb{R}^N.$$

Wir benutzen auch für abstrakte Mannigfaltigkeiten für die Tangentialvektoren die formale Bezeichnung $\gamma'(0) := [\gamma]$.

Beispiel 37. TANGENTIALRAUM AN DER SPHÄRE

Wir betrachten die n -dimensionale Sphäre S^n , $x \in S^n$. Es gilt:

$$T_x S^n = \{v \in \mathbb{R}^{n+1} \mid \langle x, v \rangle_{\mathbb{R}^{n+1}} = 0\},$$

denn sei $\gamma : (-\varepsilon, \varepsilon) \longrightarrow S^n$ eine Kurve mit $\gamma(0) = x$, so gilt:

$$\langle \gamma(t), \gamma(t) \rangle = 1.$$

Und damit ist

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \langle \gamma(t), \gamma(t) \rangle|_{t=0} &= 2 \langle \gamma(0), \gamma'(0) \rangle \\ &= 2 \langle x, \gamma'(0) \rangle \\ &= 0 \end{aligned}$$

Damit ist “ \subset ” gezeigt. Die Gleichheit folgt dann aus Dimensionsgründen.

Definition. Sei $f : M \rightarrow N$ eine C^∞ -Abbildung, $x \in M$.

$$\begin{aligned} df_x : T_x M &\rightarrow T_{f(x)} N \\ [\gamma] &\mapsto [f \circ \gamma] \\ \gamma'(0) &\mapsto (f \circ \gamma)'(0) \end{aligned}$$

heißt Differential von f in x . Sei $v \in T_x M$, so ist $v(f) := df_x(v)$ die Richtungsableitung von f in Richtung v .

Bemerkung

1. Die Definition von df_x ist korrekt, d.h. aus $\gamma \sim_x \delta$ folgt $f \circ \gamma \sim_{f(x)} f \circ \delta$, denn sei (U, φ) eine zulässige Karte um x und (V, ψ) eine zulässige Karte um $f(x)$, so gilt:

$$\begin{aligned} (\psi \circ f \circ \gamma)'(0) &= (\psi \circ f \circ \varphi^{-1} \circ \varphi \circ \gamma)'(0) \\ &= d(\psi \circ f \circ \varphi^{-1})_{\varphi(x)} (\varphi \circ \gamma)'(0) \\ &\stackrel{\gamma \sim_x \delta}{=} d(\psi \circ f \circ \varphi^{-1})_{\varphi(x)} (\varphi \circ \delta)'(0) \\ &= (\psi \circ f \circ \varphi^{-1} \circ \varphi \circ \delta)'(0) \\ &= (\psi \circ f \circ \delta)'(0) \end{aligned}$$

2. Sei $M \subset \tilde{M}$ eine Untermannigfaltigkeit und $F : \tilde{M} \rightarrow N$ eine C^∞ -Abbildung. Dann ist $f := F|_M : M \rightarrow N$ eine C^∞ -Abbildung und es gilt:

$$df_x = dF_x|_{T_x M} \text{ für alle } x \in M$$

3. Sei $N \subset \tilde{N}$ eine Untermannigfaltigkeit. Dann ist $f : M \rightarrow N \subset \tilde{N}$ genau dann glatt bzgl. der Untermannigfaltigkeitsstruktur, wenn

$$f : M \rightarrow \tilde{N}$$

C^∞ ist. Dies folgt aus der Gleichheit der Differentiale.

Satz 2.5. Es gilt:

1. Die Kettenregel: Seien $f : M \rightarrow N$ und $h : N \rightarrow \tilde{M}$ C^∞ -Abbildungen, so gilt:

$$d(h \circ f)_x = dh_{f(x)} \circ df_x.$$

2. Ist $f : M \rightarrow N$ eine glatte Funktion, so ist

$$df_x : T_x M \rightarrow T_{f(x)} N$$

eine lineare Abbildung der Vektorräume.

Beweis:

1. Nun aus

$$T_x M \xrightarrow{df_x} T_{f(x)} N \xrightarrow{dh_{f(x)}} T_{h(f(x))} \tilde{M}$$

ergibt sich

$$\begin{aligned} d(h \circ f)_x[\gamma] &= [h(f \circ \gamma)] \\ &= dh_{f(x)}[f \circ \gamma] \\ &= dh_{f(x)} df_x[\gamma] \end{aligned}$$

2. Z.z. ist, dass für $[\gamma], [\delta] \in T_x M$, $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$

$$df_x(\lambda[\gamma] + \mu[\delta]) = \lambda df_x[\gamma] + \mu df_x[\delta].$$

Sei (U, φ) eine Karte um x mit $\varphi(x) = 0$ und (V, ψ) eine Karte um $f(x)$ mit $\psi(f(x)) = 0$, dann folgt aus der Linearität für Differentiale auf dem \mathbb{R}^n :

$$\begin{aligned} df_x(\lambda[\gamma] + \mu[\delta]) &= df_x([\varphi^{-1}(\lambda \cdot \varphi \circ \gamma + \mu \cdot \varphi \circ \delta)]) \\ &= [f \circ \varphi^{-1}(\lambda \cdot \varphi \circ \gamma + \mu \cdot \varphi \circ \delta)] \\ &= [\psi^{-1} \circ \psi \circ f \circ \varphi^{-1}(\lambda \cdot \varphi \circ \gamma + \mu \cdot \varphi \circ \delta)] \\ &= (d\psi^{-1})_0 \circ \underbrace{d(\psi \circ f \circ \varphi^{-1})_0}_{\text{linear}} (\lambda \cdot \varphi \circ \gamma + \mu \cdot \varphi \circ \delta)'(0) \\ &= (d\psi^{-1})_0 (\lambda \cdot \underbrace{d(\psi \circ f \circ \varphi^{-1})_0}_{=\lambda \cdot (\varphi \circ \gamma)'(0) + \mu \cdot (\varphi \circ \delta)'(0)} (\varphi \circ \gamma)'(0) + \\ &\quad + \mu \cdot d(\psi \circ f \circ \varphi^{-1})_0 (\varphi \circ \delta)'(0)) \\ &= (d\psi^{-1})_0 (\lambda \cdot (\psi \circ f \circ \varphi^{-1})'(0) + \mu \cdot (\psi \circ f \circ \delta)'(0)) \\ &= [\psi^{-1}(\lambda \cdot \psi \circ f \circ \varphi^{-1} + \mu \cdot \psi \circ f \circ \delta)] \\ &= \lambda \cdot df_x[\gamma] + \mu \cdot df_x[\delta] \end{aligned}$$

□

Folgerung1. Ist $f : M \rightarrow N$ ein Diffeomorphismus, $x \in M$, so ist

$$df_x : T_x M \rightarrow T_{f(x)} N$$

ein linearer Isomorphismus, denn

$$dI_{T_x M} = d(f^{-1} \circ f)_x = df_{f(x)}^{-1} \circ df_x$$

und

$$dI_{T_{f(x)} N} = d(f \circ f^{-1})_{f(x)} = df_x \circ df_{f(x)}^{-1}$$

2. Ist $f : M \rightarrow N$ eine C^∞ -Abbildung und

$$df_x : T_x M \rightarrow T_{f(x)} N$$

ein linearer Isomorphismus, dann ist f ein lokaler Diffeomorphismus.
(Satz über den lokalen Diffeomorphismus)

Die kanonischen Basen in $T_x M$

Sei M^n eine n -dimensionale C^∞ -Mannigfaltigkeit, $x \in M$.

Sei $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ eine zulässige Karte um $x \in M$, dann wird

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x_i}(x) &:= [\varphi^{-1}(\varphi(x) + te_i)] \in T_x M \\ &=: \left. \frac{d}{dt} (\varphi^{-1}(\varphi(x) + te_i)) \right|_{t=0} \\ &= d\varphi_{\varphi(x)}^{-1}([\varphi(x) + te_i]) \\ &= d\varphi^{-1}(e_i)\end{aligned}$$

für alle $i = 1 \dots n$ zu einem Tangentialvektor in $T_x M$.

Satz 2.6. *Es gilt:*

1. Sei M^n eine n -dimensionale C^∞ -Mannigfaltigkeit, $x \in M$ und sei $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ eine zulässige Karte um $x \in M$, dann bilden die Tangentialvektoren

$$\left(\frac{\partial}{\partial x_1}(x), \dots, \frac{\partial}{\partial x_n}(x)\right)$$

eine Basis in $T_x M$. Sie heißt kanonische Basis.
(Insbesondere ist $\dim T_x M = n$.)

2. Sei $v \in T_x M$ und

$$v = \sum_{i=1}^n \xi^i \frac{\partial}{\partial x_i}(x)$$

dessen Basisdarstellung. Sei weiter $v = [\gamma]$ und

$$\varphi \circ \gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_n) = \sum_{i=1}^n \gamma_i e_i$$

die Koordinatendarstellung von v bezüglich einer geeigneten Karte (U, φ) , dann gilt

$$\xi^i = \gamma'_i(0)$$

Beweis:

1. Eine zulässige Karte um x $\varphi : U \subset M \rightarrow \varphi(U) \subset \mathbb{R}^n$ ist bekanntlich ein Diffeomorphismus, $\varphi \in \text{Diff}(U, \varphi(U))$. Ihr Differential wird damit zu einem Isomorphismus. Und da Isomorphismen Basen in Basen überführen, folgt die Behauptung aus

$$d\varphi_x \left(\frac{\partial}{\partial x_i}(x) \right) = d\varphi_x \left(d\varphi_{\varphi(x)}^{-1}(e_i) \right) = e_i.$$

2. Aus der Linearität des Differentials folgt einerseits

$$d\varphi_x(v) = d\varphi_x \left(\sum_{i=1}^n \xi^i \frac{\partial}{\partial x_i}(x) \right) = \sum_{i=1}^n \xi^i d\varphi_x \left(\frac{\partial}{\partial x_i}(x) \right) = \sum_{i=1}^n \xi^i e_i$$

und andererseits gilt

$$d\varphi_x(v) = \underbrace{[\varphi \circ \gamma]}_{\text{Kurve im } \mathbb{R}^n} = (\varphi \circ \gamma)'(0) = (\gamma'_1(0), \dots, \gamma'_n(0)) = \sum_{i=1}^n \gamma'_i(0) e_i.$$

□

Satz 2.7. [Transformationsformeln für kanonische Basen]

1. Seien $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$, $(V, \psi = (y_1, \dots, y_n))$ zwei zulässige Karten um $x \in M$, dann transformieren sich die kanonischen Basisvektoren auf folgende Weise:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(x) = \sum_{\alpha=1}^n \frac{\partial(\psi \circ \varphi^{-1})_\alpha}{\partial x_i}(x_1, \dots, x_n) \frac{\partial}{\partial y_\alpha}(x)$$

2. Sei $f : M \rightarrow N$ eine C^∞ -Abbildung, $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ eine zulässige Karte um $x \in M$ und $(V, \psi = (y_1, \dots, y_n))$ eine zulässige Karte um $f(x) \in N$, dann gilt:

$$df_x \left(\frac{\partial}{\partial x_i}(x) \right) = \sum_{\alpha=1}^n \frac{\partial(\psi \circ f \circ \varphi^{-1})_\alpha}{\partial x_i}(x_1, \dots, x_n) \frac{\partial}{\partial y_\alpha}(f(x))$$

Beweis:

1. Es gilt

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(x) &= (d\varphi^{-1})_{\varphi(x)}(e_i) \\ &= d(\psi^{-1} \circ \psi \circ \varphi^{-1})_{\varphi(x)}(e_i) \\ &= d\psi_{\psi(x)}^{-1} \circ d(\psi \circ \varphi^{-1})_{\varphi(x)}(e_i) \\ &= d\psi_{\psi(x)}^{-1} \left(\sum_{\alpha=1}^n \frac{\partial(\psi \circ \varphi^{-1})_\alpha}{\partial x_i}(x_1, \dots, x_n)(e_\alpha) \right) \\ &= \sum_{\alpha=1}^n \frac{\partial(\psi \circ \varphi^{-1})_\alpha}{\partial x_i}(x_1, \dots, x_n) d\psi_{\psi(x)}^{-1}(e_\alpha) \\ &= \sum_{\alpha=1}^n \frac{\partial(\psi \circ \varphi^{-1})_\alpha}{\partial x_i}(x_1, \dots, x_n) \frac{\partial}{\partial y_\alpha}(x) \end{aligned}$$

2. Übungsaufgabe (analoge Rechnung)

□

Wie in der Linearen Algebra betrachtet man auch hier den Dualraum eines Vektorraumes.

Definition. Der duale Tangentialraum in $x \in M$ ist definiert als

$$T_x^*M := \{L : T_xM \rightarrow \mathbb{R} \mid L \text{ ist linear}\}$$

Sei $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ eine zulässige Karte um $x \in M$. Für das Differential der glatten Koordinatenabbildung $x_i : U \subset M \rightarrow \mathbb{R}, y \mapsto x_i(y)$ gilt:

$$(dx_i)_x : T_xU = T_xM \rightarrow T_{x_i(x)}\mathbb{R} \cong \mathbb{R}.$$

D.h. $(dx_i)_x$ ist eine lineare Abbildung von T_xM nach \mathbb{R} . Somit gilt:

$$(dx_i)_x \in T_x^*M$$

.

Satz 2.8. Die Linearformen $((dx_1)_x, \dots, (dx_n)_x)$ bilden eine Basis in T_x^*M , die dual zur kanonischen Basis $(\frac{\partial}{\partial x_1}(x), \dots, \frac{\partial}{\partial x_n}(x))$ von T_xM ist.

Beweis: Es genügt zu zeigen, dass $(dx_i)_x \left(\frac{\partial}{\partial x_j}(x) \right) = \delta_{ij}$ gilt:

$$\begin{aligned} (dx_i)_x \left(\frac{\partial}{\partial x_j}(x) \right) &= (dx_i)_x (d\varphi^{-1}(e_j)) \\ &= d(x_i \circ \varphi^{-1})_{\varphi(x)}(e_j) \\ &= d(I_i)_{\varphi(x)}(e_j) = (e_j)_i \\ &= \delta_{ij} \end{aligned}$$

□

Durch leichte Rechnung zeigt sich nun daraus, dass Dualbasen ein ähnliches Transformationsverhalten zeigen wie die Kanonischen Basen aus Satz 2.7.

Satz 2.9. *Seien $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ und $(V, \psi = (y_1, \dots, y_n))$ zulässige Karten um $x \in M$. Dann gilt*

$$(dy_i)_x = \sum_{\alpha=1}^n \left(\frac{\partial(\psi \circ \varphi^{-1})_i}{\partial x_\alpha} \right) (x_1, \dots, x_n) (dx_\alpha)_x.$$

Bemerkungen

- Vergleicht man die Indizes der Übergangsmatrizen, so bemerkt man, dass die Transformationsmatrix der Dualbasen genau der Transponiert-Inversen der Transformationsmatrix der Kanonischen Basis ist.
- Man bezeichnet die Vektoren des Dualraumes auch als Covektoren. Diese transformieren sich per Definition also covariant. Die Vektoren des Tangentialraumes transformieren sich dagegen kontravariant.

2.4 Vektorfelder und Flüsse

Definition. Sei M^n eine C^∞ -Mannigfaltigkeit und $TM := \dot{\bigcup}_{x \in M} T_x M$ die disjunkte Vereinigung aller Tangentialräume. Eine Abbildung

$$X : M \longrightarrow TM$$

heißt glattes Vektorfeld auf M : \iff

1. $X(x) \in T_x M \quad \forall x \in M$
2. Sei \mathcal{A} ein zuverlässiger Atlas von M , $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n)) \in \mathcal{A}$ und für $x \in U$

$$X(x) = \sum_{i=1}^n \xi_i(x) \frac{\partial}{\partial x_i}(x)$$

die Basisdarstellung von X , so gilt

$$\xi_i \in C^\infty(U, \mathbb{R}) \text{ für alle } i = 1, \dots, n.$$

Bemerkungen

- Die Forderung 2.) ist unabhängig vom zulässigen Atlas.
- Sei $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ eine zulässige Karte, dann sind $\frac{\partial}{\partial x_i} \in \mathfrak{X}(U)$ die kanonischen Basisfelder auf $U \subset M$.

$\mathfrak{X}(M)$ bezeichnet die Menge aller C^∞ -Vektorfelder auf M und ist ein Modul über dem Ring der glatten Funktionen:

$$\begin{aligned} X, Y \in \mathfrak{X}(M) &\implies X + Y \in \mathfrak{X}(M), \\ X \in \mathfrak{X}(M), f \in C^\infty(M) &\implies f \cdot X \in \mathfrak{X}(M), \end{aligned}$$

wobei $X + Y$ und $f \cdot Y$ punktweise definiert werden.

Satz 2.10. Sei $M^n \subset \mathbb{R}^N$ eine Untermannigfaltigkeit und X eine Abbildung:

$$\begin{aligned} X : M &\longrightarrow TM \\ x &\mapsto X(x) \in T_x M \subset \mathbb{R}^N \end{aligned}$$

Dann gilt:

$$X \text{ ist ein glattes Vektorfeld auf } M \iff \text{Die Abbildung } X : M \longrightarrow \mathbb{R}^N \text{ ist glatt.}$$

Beweis: Sei (U, h) ein Karte von \mathbb{R}^N , d.h. $U \subset \mathbb{R}^N$ ist offen,

$$h : U \longrightarrow \tilde{U} \subset \mathbb{R}^N$$

ist ein Diffeomorphismus und

$$h(U \cap M) = \tilde{U} \cap (\mathbb{R}^n \times \{0\}).$$

Dann ist $(U \cap M, \varphi = h|_{U \cap M})$ eine Karte von M^n . Für kanonische Basis dieser Karte gilt bekanntlich:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(x) = \frac{d}{dt}(\varphi^{-1}(\varphi(x) + te_i))|_{t=0} = \frac{\partial \varphi^{-1}}{\partial x_i}(\varphi(x)) = d\varphi_{\varphi(x)}^{-1}(e_i)$$

1. (\Rightarrow) : Sei $X \in \mathfrak{X}(M)$ und $X = \sum_{i=1}^n \xi^i \frac{\partial}{\partial x_i}$ die Basisdarstellung von X auf $U \cap M$. Mit $\xi^i \in C^\infty(U)$ ist

$$X \circ \varphi^{-1} = \sum_{i=1}^n \xi^i \circ \varphi^{-1} \cdot \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \circ \varphi^{-1}}_{= \frac{\partial \varphi^{-1}}{\partial x_i}(x_1, \dots, x_n)}$$

als Verknüpfung von C^∞ -Abbildungen (φ^{-1} ist ein Diffeomorphismus) glatt. Und da dies für jede Karte gilt, ist

$$X : M \longrightarrow \mathbb{R}^N$$

glatt.

2. (\Leftarrow) : Sei $X : M \longrightarrow \mathbb{R}^N$ eine C^∞ -Abbildung. Da

$$\begin{aligned} X(x) &= \sum_{i=1}^n \xi^i(x) \frac{\partial}{\partial x_i}(x) = \sum_{i=1}^n \xi^i(x) d\varphi_{\varphi(x)}^{-1}(e_i) \\ &= d\varphi_{\varphi(x)}^{-1}(\sum_i \xi^i(x) e_i) \end{aligned}$$

ist

$$d\varphi_x(X(x)) = (\xi^1(x), \dots, \xi^n(x))$$

als Verkettung von glatten Abbildungen auch glatt, insbesondere sind die $\xi^i : U \longrightarrow \mathbb{R}$ damit C^∞ -Abbildungen.

□

Definition. Sei M eine C^∞ -Mannigfaltigkeit, $X \in \mathfrak{X}(M)$, $f \in C^\infty(M, \mathbb{R}^m)$.

Dann heißt die Abbildung $X(f) \in C^\infty(M, \mathbb{R}^m)$ definiert durch

$$X(f)(x) := df_x(X(x)) \in T_{f(x)}\mathbb{R}^m = \mathbb{R}^m$$

Richtungsableitung von f nach dem Vektorfeld X .

Folgerungen

Aus den Eigenschaften des Differentials folgt für $X \in \mathfrak{X}(M)$, $f, g \in C^\infty(M)$:

1. $(X + Y)(f) = X(f) + Y(f)$
2. $X(f + g) = X(f) + X(g)$

3. $X(f \cdot g) = f \cdot X(g) + g \cdot X(f)$ (Produktenregel)
4. Sei $(\frac{\partial}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_n})$ die kanonische Basis von (U, φ) ,
 $X = \sum_i \xi^i \frac{\partial}{\partial x_i}$ die Basisdarstellung von X auf U , dann ist

$$X(f) = \sum_i \xi^i \frac{\partial}{\partial x_i}(f) = \sum_i \xi^i \frac{\partial(f \circ \varphi^{-1})}{\partial x_i}(\varphi(x)).$$

Insbesondere gilt

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(f) = \frac{\partial(f \circ \varphi^{-1})}{\partial x_i} \circ \varphi.$$

5. Für eine Abbildung

$$\begin{aligned} X : M &\longrightarrow TM \\ x &\longmapsto X(x) \in T_x M \end{aligned}$$

gilt:

$$X \text{ ist ein glattes Vektorfeld.} \iff X(f) \in C^\infty(M, \mathbb{R}) \forall f \in C^\infty(M, \mathbb{R}).$$

Definition. Seien $X, Y \in \mathfrak{X}(M)$, $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ eine zulässige Karte und $X = \sum_i \xi^i \frac{\partial}{\partial x_i}$, $Y = \sum_i \eta^i \frac{\partial}{\partial x_i}$ die Basisdarstellungen auf U . Das Vektorfeld

$$[X, Y] := \sum_{i=1}^n (X(\eta^i) - Y(\xi^i)) \frac{\partial}{\partial x_i},$$

heißt Kommutator von X und Y .

Bemerkung

Der Kommutator ist unabhängig von der Kartenwahl.

(Dies kann man mit den Transformationsregeln direkt ausrechnen.)

Definition. Sei

$$F : M \longrightarrow N$$

eine C^∞ -Abbildung und $X \in \mathfrak{X}(M)$, $Y \in \mathfrak{X}(N)$. Man sagt X und Y seien F-verknüpft, falls

$$Y(F(x)) = dF_x(X(x))$$

Bemerkung

Im Allgemeinen ist $dF(X)$ kein Vektorfeld!

Satz 2.11. [Eigenschaften des Kommutators]

1. $[X, Y] = -[Y, X]$ (Schiefsymmetrie)
2. $[\lambda X + \mu Y, Z] = \lambda[X, Z] + \mu[Y, Z]$ (linear in jeder Komponente)
3. $[[X, Y], Z] + [[Y, Z], X] + [[Z, X], Y] = 0$ (Jacobi-Identität)

4. Seien $f, g \in C^\infty(M)$.

$$[fX, gY] = fg[X, Y] + fX(g)Y - gY(f)X$$

5. Sei $f \in C^\infty(M, \mathbb{R}^m)$. Dann gilt für die Richtungsableitung

$$[X, Y](f) = X(Y(f)) - Y(X(f))$$

6. Sind $X_1, X_2 \in \mathfrak{X}(M), Y_1, Y_2 \in \mathfrak{X}(N)$ durch eine glatte Abbildung $F : M \rightarrow N$ verknüpft, d.h. es gilt

$$Y_j(F(x)) = dF_x(X_j(x)) \quad j = 1, 2.$$

Dann sind $[X_1, X_2]$ und $[Y_1, Y_2]$ auch F -verknüpft:

$$dF_x([X_1, X_2](x)) = [Y_1, Y_2](F(x))$$

7. Sei $M \subset \mathbb{R}^N$ eine Untermannigfaltigkeit, dann kann man $X \in \mathfrak{X}(M)$ als C^∞ -Abbildung $X : M \rightarrow \mathbb{R}^N$ auffassen, und es gilt:

$$[X, Y] = X(Y) - Y(X)$$

wobei $X(Y)$ die Richtungsableitung ist.

Beweis:

- 1. bis 6. sind Standartaufgaben (Übungsaufgaben).
- zu 7.: Sei $M \subset \mathbb{R}^N$ eine Untermannigfaltigkeit. Die Karten auf M entstehen durch Diffeomorphismen des \mathbb{R}^N . Sei $h : U \subset \mathbb{R}^N \rightarrow \tilde{U} \subset \mathbb{R}^N$ ein solcher Diffeomorphismus mit $h(U \cap M) = \tilde{U} \cap (\mathbb{R}^n \times \{0\})$, dann ist $(U \cap M, \varphi = h|_{U \cap M})$ eine Karte von M . Mit der Kanonischen Basis $\frac{\partial}{\partial x_i}(x) = \frac{\partial \varphi^{-1}}{\partial x_i}(\varphi(x)) \in \mathbb{R}^N$, $i = 1, \dots, n$. ergibt sich nun eine Darstellung:

$$X = \sum_i \xi^i \frac{\partial}{\partial x_i}, \quad Y = \sum_i \eta^i \frac{\partial}{\partial x_i}$$

Nach der Produktregel für Richtungsableitung gilt

$$\begin{aligned} X(Y) - Y(X) &= \sum_i \left(X(\eta^i) \frac{\partial}{\partial x_i} + \eta^i X\left(\frac{\partial}{\partial x_i}\right) - Y(\xi^i) \frac{\partial}{\partial x_i} - \xi^i Y\left(\frac{\partial}{\partial x_i}\right) \right) \\ &= \underbrace{\sum_i \left((X(\eta^i) - Y(\xi^i)) \frac{\partial}{\partial x_i} + \eta^i X\left(\frac{\partial}{\partial x_i}\right) - \xi^i Y\left(\frac{\partial}{\partial x_i}\right) \right)}_{[X, Y]} \end{aligned}$$

Es gilt:

$$\begin{aligned} \sum_i \left(\eta^i X\left(\frac{\partial}{\partial x_i}\right) - \xi^i Y\left(\frac{\partial}{\partial x_i}\right) \right) &= \sum_{i,j} \left(\eta^i \xi^j \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial}{\partial x_i}\right) - \xi^i \eta^j \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial}{\partial x_i}\right) \right) \\ &= \sum_{i,j} \eta^i \xi^j \underbrace{\left(\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial}{\partial x_i}\right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial}{\partial x_j}\right) \right)}_{=0} \\ &= 0 \end{aligned}$$

denn:

$$\begin{aligned} \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j}}_{\text{VF}} \underbrace{\left(\frac{\partial}{\partial x_i}\right)}_{\text{Fkt}}(x) &= \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j}}_{\text{part. Abl}} \left(\frac{\partial \varphi^{-1}}{\partial x_i}\right)(\varphi(x)) \\ &= \frac{\partial^2 \varphi^{-1}}{\partial x_j \partial x_i}(\varphi(x)) \end{aligned}$$

φ^{-1} ist eine C^∞ -Funktion zwischen reellen Räumen und mit dem Lemma von Schwarz ergibt sich

$$\begin{aligned} &= \frac{\partial^2 \varphi^{-1}}{\partial x_i \partial x_j}(\varphi(x)) \\ &= \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i}}_{\text{VF}} \underbrace{\left(\frac{\partial}{\partial x_j}\right)}_{\text{Fkt}}(x) \end{aligned}$$

□

Definition. Sei M^n eine C^∞ -Mannigfaltigkeit, $X \in \mathfrak{X}(M)$, $I \subset \mathbb{R}$ ein offenes Intervall um $0 \in \mathbb{R}$. Eine glatte Kurve

$$\gamma : I \longrightarrow M^n$$

heißt Integralkurve von X durch $x \in M$, falls

- $\gamma(0) = x$
- $\gamma'(t) = X(\gamma(t)) \quad \forall t \in I$

Beispiel 38. BEISPIELE FÜR INTEGRALKURVEN

- Sei $M = \mathbb{R}^n$. Die Integralkurve von X durch $x \in \mathbb{R}^n$ ist die Lösung einer autonomen gewöhnlichen Differentialgleichung mit Anfangsbedingung.
- $M = S^2$

$$X(x, y, z) := (-y, x, 0) \implies X \in \mathfrak{X}(S^2)$$

Die Integralkurven von X sind die Breitenkreise.

$$\gamma'(t) = X(\gamma(t)) \implies \gamma'_1(t) = -\gamma_2(t), \gamma'_2(t) = \gamma_1(t) \text{ und } \gamma'_3(t) = 0.$$

$$\begin{aligned} \implies \gamma_3(t) &= \text{const und } \begin{pmatrix} \gamma'_1 \\ \gamma'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} \\ \implies \begin{pmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} &= c \cdot \begin{pmatrix} \cos(t + t_0) \\ -\sin(t + t_0) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Durch die Anfangsbedingungen $\gamma(0) = (x_0, y_0, z_0) = p_0$ ist dann die Integralkurve an X durch $p_0 \in S^2$ eindeutig bestimmt.

$$\gamma(t) = (\sqrt{1 - z_0^2} \cos(t_0 + t), \sqrt{1 - z_0^2} \sin(t_0 + t), z_0),$$

wobei $(x_0, y_0) = \sqrt{1 - z_0^2}(\cos t_0, \sin t_0)$.

Durch Übertragung des Satzes über Differentialgleichungen im \mathbb{R}^n erhält man:

Satz 2.12. Sei $X \in \mathfrak{X}(M^n)$.

1. Zu jedem $x \in M$ existiert eine eindeutig bestimmte maximale Integralkurve

$$\gamma_x^X : I_x \subset \mathbb{R} \longrightarrow M$$

von X durch x . Hierbei meint maximal, dass der Definitionsbereich maximal ist.

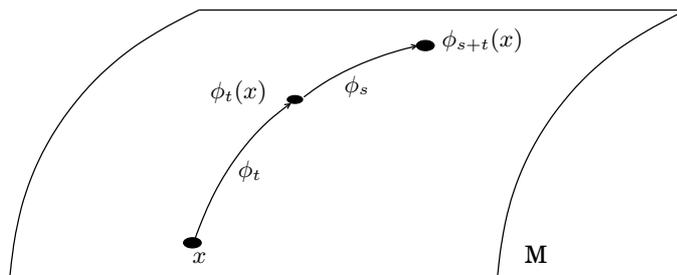
2. Sei $W = \{(t, x) \in \mathbb{R} \times M \mid t \in I_x\} \subset \mathbb{R} \times M$. Dann gilt:

- $W \subset \mathbb{R} \times M$ ist offen.
- Die Abbildung

$$\begin{aligned} \phi : W \subset \mathbb{R} \times M &\longrightarrow M \\ (t, x) &\mapsto \phi_t(x) := \gamma_x^X(t) \end{aligned}$$

ist C^∞ .

- Ist $(t, x) \in W$ und $(s, \phi_t(x)) \in W$, so folgt $(t + s, x) \in W$ und $\phi_{s+t}(x) = \phi_s \circ \phi_t(x)$.

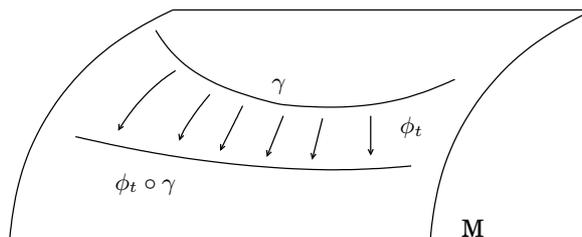


Der Beweis läuft analog zum \mathbb{R}^n indem man Karten nutzt⁴.

Definition. Sei $X \in \mathfrak{X}(M)$. Die Abbildung

$$\begin{aligned} \phi : W \subset \mathbb{R} \times M &\longrightarrow M \\ (t, x) &\mapsto \phi_t(x) := \gamma_x^X(t) \end{aligned}$$

heißt Fluß des Vektorfeldes X .



⁴siehe: Gromoll-Klingenberg-Meyer: Riemannsche Geometrie in Größen (Anhang)

Die Kurve γ wird vom Fluß 'mitgerissen'.

Definition. Ein Vektorfeld $X \in \mathfrak{X}(M^n)$ heißt vollständig $:\Leftrightarrow$ Alle maximalen Integralkurven γ_x^X von X durch $x \in M$ sind auf \mathbb{R} definiert.

Ist $X \in \mathfrak{X}(M)$ vollständig, so ist der Fluß ϕ_t von X ein Diffeomorphismus für alle $t \in \mathbb{R}$:

$$\begin{aligned}\phi : \mathbb{R} \times M &\longrightarrow M \\ (t, x) &\longrightarrow \gamma_x^X(t) \\ \phi_t : M &\longrightarrow M \\ x &\longmapsto \phi_t(x) = \gamma_x^X(t)\end{aligned}$$

Es gilt:

$$\phi_t \circ \phi_s = \phi_{t+s}, \quad \phi_0 = \text{id}.$$

$\{\phi_t\} \subset \text{Diff}(M)$ ist eine einparametrische Untergruppe von Diffeomorphismen definiert durch das vollständige Vektorfeld X .

Satz 2.13. Sei $X \in \mathfrak{X}(M^n)$ und

$$\gamma_x : I_x = (a, b) \subset \mathbb{R} \longrightarrow M$$

die maximale Integralkurve von X durch x , $b < \infty$. Dann gibt es zu jeder kompakten Teilmenge $A \subset M$ ein $\varepsilon > 0$ so, dass

$$\gamma_x(t) \notin A \quad \forall t \in (b - \varepsilon, b).$$

(D.h. eine nicht auf ganz \mathbb{R} definierte maximale Integralkurve verläßt jeden kompakten Bereich in endlicher Zeit.)

Beweis: Angenommen die Behauptung stimmt nicht.

Dann existiert eine Folge $(t_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset I_x$ mit $t_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} b$ und $\gamma_x(t_n) \in A$. Da A kompakt ist, ist A auch folgenkompakt. D.h. es existiert eine in A konvergente Teilfolge von $\{\gamma_x(t_n)\}$.

OBdA konvergiere $\gamma_x(t_n)$ gegen $p \in A$. Nach Satz 2.4 gilt

$$(0, p) \in W = \text{Definitionsbereich des Flusses } \phi \text{ von } X.$$

Außerdem ist W offen. Somit existiert eine Umgebung von $(0, p)$, die in W liegt:

$$(-\delta, \delta) \times U(p) \subset W.$$

Für hinreichend große n gilt dann

$$b - t_n < \delta \text{ und } \gamma_x(t_n) \in U(p)$$

Sei $\beta : (t_n - \delta, t_n + \delta) \longrightarrow M$ definiert durch

$$\beta(t) := \phi(t - t_n, \gamma_x(t_n)),$$

dann ist $\phi(t - t_n, \gamma_x(t_n))$ für alle $t \in (t_n - \delta, t_n + \delta)$ definiert. Und da $\phi(t_n, x)$ und $\phi(t - t_n, \gamma_x(t_n))$ existieren, existiert nach Satz 2.4 auch

$$\phi(t_n + t - t_n, x) = \phi(t, x) \text{ für alle } t \in (t_n - \delta, t_n + \delta).$$

Dies ist eine Verlängerung der Integralkurve γ_x auf das Intervall $(a, \underbrace{t_n + \delta}_{>b})$ und ein Widerspruch zur Maximalität von γ_x auf (a, b) .

□

Folgerung und Definition

Sei M eine C^∞ -Mannigfaltigkeit und $X \in \mathfrak{X}(M)$ ein Vektorfeld. Mit

$$\text{supp}X := \text{cl}\{x \in M \mid X(x) \neq 0\} \subset M$$

bezeichnen wir den Träger von X .

Ist der Träger kompakt, so ist X vollständig. Insbesondere ist jedes C^∞ -Vektorfeld auf einer kompakten Mannigfaltigkeit vollständig.

Beweis: Sei $x \in M$, $\gamma_x : I_x \subset \mathbb{R} \rightarrow M$ die maximale Integralkurve von X durch x . Z.z. $I_x = \mathbb{R}$.

1. Fall: $x \in M \setminus \text{supp}X$.

Auf $M \setminus \text{supp}X$ ist $X \equiv 0$.

$\implies \gamma_x(t) \equiv x \quad \forall t \in \mathbb{R}$ ist die maximale Integralkurve von X durch x .

2. Fall: $x \in \text{supp}X$.

$\implies \gamma_x(I_x) \subset \text{supp}X$, denn außerhalb von $\text{supp}X$ sind alle Integralkurven konstant. Mit Satz 2.12 folgt $I_x = \mathbb{R}$.

□

Satz 2.14. Seien $X, Y \in \mathfrak{X}(M)$, $x \in M$.

Seien $\phi_t : W_t = \{x \in M \mid t \in I_x\} \rightarrow M$ die durch den Fluss von X definierten lokalen Diffeomorphismen. Dann gilt:

$$[X, Y](x) = \left. \frac{d}{dt} \left((d\phi_{-t})_{\phi_t(x)} Y(\phi_t(x)) \right) \right|_{t=0}$$

Beweis: Sei $x \in M$ fixiert und $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ eine zulässige Karte um $x \in M$

$$X = \sum_{i=1}^n \xi^i \frac{\partial}{\partial x_i}, \quad Y = \sum_{i=1}^n \eta^i \frac{\partial}{\partial x_i}$$

seien die Basisdarstellungen von X und Y auf U , dann gilt:

$$\begin{aligned} (d\phi_{-t})_{\phi_t(x)} Y(\phi_t(x)) &= (d\phi_{-t})_{\phi_t(x)} \left(\sum_{i=1}^n \eta^i(\phi_t(x)) \frac{\partial}{\partial x_i}(\phi_t(x)) \right) \\ &= \sum_{j=1}^n \eta^j(\phi_t(x)) (d\phi_{-t})_{\phi_t(x)} \left(\frac{\partial}{\partial x_j}(\phi_t(x)) \right) \\ \text{Satz 2.7} &\equiv \sum_{j=1}^n \eta^j(\phi_t(x)) \left[\sum_{k=1}^n \frac{\partial}{\partial x_j}(x_k(\phi_{-t})(\phi_t(x))) \frac{\partial}{\partial x_k}(x) \right] \end{aligned}$$

Wir benutzen die Taylorentwicklung entlang von Integralkurven. Mit $h \in C^\infty(U)$, $y \in U$ folgt

$$h(\phi_t(y)) = h(y) + t \cdot dh_y(X(y)) + o(t^2),$$

denn sei $f(t) := h(\phi_t(y))$, dann ist

$$f(t) = f(0) + t \cdot f'(0) + \underbrace{\frac{t^2}{2} \cdot f''(0) + \dots}_{o(t^2)}$$

und mit der Kettenregel gilt:

$$f'(0) = \frac{d}{dt}(h(\phi_t(y)))|_{t=0} = dh_{\phi_0(y)}\left(\frac{d}{dt}(\phi_t(y))|_{t=0}\right) = dh_y(X(y))$$

und

$$f(0) = h(\phi_0(y)) = h(y).$$

Sei jetzt speziell $h = x_k \in C^\infty(U)$ die k -te Koordinate von (U, φ) , dann ergibt sich

$$\begin{aligned} x_k(\phi_{-t}(y)) &= x_k(y) - t \cdot dx_k(X(y)) + o(t^2) \\ &= x_k(y) - t \cdot dx_k\left(\sum_{i=1}^n \xi^i(y) \frac{\partial}{\partial x_i}(y)\right) + o(t^2) \\ &= x_k(y) - t \cdot \xi^k(y) + o(t^2) \\ \implies \frac{\partial}{\partial x_j}(x_k(\phi_{-t}(y))) &= \delta_{jk} - t \cdot \frac{\partial}{\partial x_j}(\xi^k)(y) + o(t^2) \quad \forall y \in U \end{aligned}$$

und es folgt

$$(d\phi_{-t})_{\phi_t(x)}(Y(\phi_t(x))) = \sum_{j,k=1}^n \eta^j(\phi_t(x)) \left[\delta_{jk} - t \cdot \frac{\partial}{\partial x_j}(\xi^k)(\phi_t(x) + o(t^2)) \right] \frac{\partial}{\partial x_k}(x) \in T_x M$$

Insgesamt erhält man

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(d\phi_{-t}(Y(\phi_t(x))))|_{t=0} &= \sum_{j,k=1}^n \left(\frac{d}{dt}(\eta^j(\phi_t(x)))|_{t=0} \cdot \delta_{jk} - \eta^j(x) \cdot \frac{\partial}{\partial x_j}(\xi^k)(x) \right) \frac{\partial}{\partial x_k}(x) \\ &= \sum_{j=1}^n \underbrace{\frac{d}{dt}(\eta^j(\phi_t(x)))|_{t=0}}_{=X(\eta^j)(x) \frac{\partial}{\partial x_j}(x)} \frac{\partial}{\partial x_j}(x) \\ &\quad - \sum_{j,k=1}^n \underbrace{\eta^j(x) \frac{\partial}{\partial x_j}(\xi^k)(x) \frac{\partial}{\partial x_k}(x)}_{= \sum_{k=1}^n Y(\xi^k)(x) \frac{\partial}{\partial x_k}(x)} \\ &= \sum_{j=1}^n [X(\eta^j)(x) - Y(\xi^j)(x)] \frac{\partial}{\partial x_j}(x) \\ &= [X, Y](x) \end{aligned}$$

□

Satz 2.15. Sei $F : M \rightarrow M$ ein Diffeomorphismus, $X \in \mathfrak{X}(M)$ mit dem Fluss $\{\phi_t^X\}$. Sei $F_*X \in \mathfrak{X}(M)$ definiert durch

$$(*) \begin{cases} (F_*X)(x) = dF_{F^{-1}(x)}(X(F^{-1}(x))) \\ (F_*X)(F(x)) = dF_x(X(x)) \end{cases}$$

mit dem Fluss $\{\phi_t^{F_*X}\}$. Dann gilt

1. $\phi_t^{F_*X} \circ F = F \circ \phi_t^X$
2. $X = F_*X \iff F \circ \phi_t^X = \phi_t^X \circ F$

Beweis:

1. z.z. Die Kurve $\gamma(t) = F(\phi_t^X(x))$ ist die Integralkurve von F_*X durch $F(x)$, denn diese ist eindeutig bestimmt.

- Als Anfangswert haben wir $\gamma(0) = F(\phi_0^X(x)) = F(x)$.
- Für die Ableitung ergibt sich

$$\begin{aligned} \gamma'(t) &= \frac{d}{dt}(F(\phi_t^X(x))) \\ &= dF_{\phi_t^X(x)} \left(\underbrace{\frac{d}{dt}(\phi_t^X(x))}_{=X(\phi_t^X(x))} \right) \\ &= dF_{\phi_t^X(x)}(X(\phi_t^X(x))) \\ &\stackrel{(*)}{=} (F_*X)(\underbrace{F(\phi_t^X(x))}_{=\gamma(t)}) \end{aligned}$$

2. Sei $X = F_*X$. Mit 1.) folgt

$$\phi_t^X \circ F = F \circ \phi_t^X.$$

Sei umgekehrt $\phi_t^X \circ F = F \circ \phi_t^X$. Durch ableiten nach t erhält man:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\phi_t^X(F(x))) &= \frac{d}{dt}(F \circ \phi_t^X(x)) \\ \iff X(\phi_t^X(F(x))) &= dF_{\phi_t^X(x)}\left(\frac{d}{dt}\phi_t^X(x)\right) \\ \iff X(F(\phi_t^X(x))) &= dF_{\phi_t^X(x)}(X(\phi_t^X(x))) \\ \stackrel{(*)}{\iff} X(F(\phi_t^X(x))) &= F_*X(F(\phi_t^X(x))) \\ \stackrel{t=0}{\implies} X(F(x)) &= F_*X(F(x)) \quad \forall x \in X \\ &\quad F \text{ ist ein Diffeomorphismus} \\ \implies X &= F_*X \end{aligned}$$

□

Satz 2.16. Seien $X, Y \in \mathfrak{X}(M)$ Vektorfelder auf M mit den Flüssen $\{\phi_t^X\}$ und $\{\phi_s^Y\}$. Dann gilt:

$$\phi_t^X \circ \phi_s^Y = \phi_s^Y \circ \phi_t^X \iff [X, Y] \equiv 0.$$

Beweis:

- (\Rightarrow): $F := \phi_{-t}^X$ ist ein lokaler Diffeomorphismus. Nach Satz 2.15 gilt wegen $F \circ \phi_s^Y = \phi_s^Y \circ F$ auch $Y = F_* Y$. D.h.

$$\begin{aligned} Y(x) &= (F_* Y)(x) \\ &= dF_{F^{-1}(x)}(Y(F^{-1}(x))) \\ &= (d\phi_{-t}^X)_{\phi_t^X(x)}(Y(\phi_t^X(x))) \end{aligned}$$

und damit ist

$$\begin{aligned} [X, Y](x) &\stackrel{\text{Satz 2.14}}{=} \left. \frac{d}{dt} (d\phi_{-t}^X)_{\phi_t^X(x)}(Y(\phi_t^X(x))) \right|_{t=0} \\ &= \left. \frac{d}{dt} (Y(x)) \right|_{t=0} \\ &= 0. \end{aligned}$$

- (\Leftarrow): Sei $[X, Y] = 0$ auf M . Da

$$\phi_s^X \circ \phi_t^X = \phi_t^X \circ \phi_s^X = \phi_{s+t}^X$$

ist

$$(\phi_t^X)_* X(p) = X(\phi_t^X(p))$$

und es folgt

$$\begin{aligned} 0 &= (\phi_t^X)_*([X, Y](x)) \\ &\stackrel{\text{Satz 2.11}}{=} [(\phi_t^X)_* X, (\phi_t^X)_* Y](x) \\ &= [X, (\phi_t^X)_* Y](x) \\ &\stackrel{\text{Satz 2.14}}{=} \left. \frac{d}{ds} (d\phi_{-s}^X)_{\phi_s^X(x)}((\phi_t^X)_* Y(\phi_s^X(x))) \right|_{s=0} \\ &= \left. \frac{d}{ds} (d\phi_{-s}^X)_{\phi_s^X(x)}(d\phi_t^X)_{\phi_{t+s}^X(x)}(Y(\phi_{-t}^X(\phi_s^X(x)))) \right|_{s=0} \\ &= \left. \frac{d}{ds} (d(\phi_{-s}^X \circ \phi_t^X)_{\phi_{s-t}^X(x)}(Y(\phi_{s-t}^X(x)))) \right|_{s=0} \\ &= \left. \frac{d}{d\tau} (d(\phi_{-\tau}^X)_{\phi_\tau^X(x)}(Y(\phi_\tau^X(x)))) \right|_{\tau=t} \end{aligned}$$

Somit ist die Kurve $d(\phi_{-\tau}^X)_{\phi_\tau^X(x)}(Y(\phi_\tau^X(x))) = ((\phi_{-\tau}^X)_* Y)(x)$ konstant, und es gilt

$$((\phi_{-\tau}^X)_* Y)(x) = ((\phi_0^X)_* Y)(x) = Y(x)$$

Aus Satz 2.15 folgt nun die Behauptung.

□

Vektorfelder und Lie-Algebren

Definition. Eine Gruppe G heißt Liesche Gruppe falls sie eine C^∞ -Mannigfaltigkeit ist, so dass die Abbildung $G \times G \rightarrow G, (g, a) \mapsto g \cdot a^{-1}$ glatt ist.

Sei G eine Liesche Gruppe. Dann sind die Gruppenhomomorphismen

Linkstranslation

$$\begin{aligned} l_g : G &\rightarrow G \\ a &\mapsto g \cdot a \end{aligned}$$

Rechtstranslation

$$\begin{aligned} r_g : G &\longrightarrow G \\ a &\mapsto a \cdot g \end{aligned}$$

Diffeomorphismen.

Beispiel 39. BEISPIELE FÜR LIE-GRUPPEN

- $(\mathbb{R}^n, +)$
- $(\mathbb{C}^* = \mathbb{C} \setminus \{0\}, \cdot)$
- $(T^n = S^1 \times \cdots \times S^1, \cdot)$
- Sind G und H zwei Liesche Gruppen, so ist $G \times H$ mit dem komponentenweisen Produkt eine Liesche Gruppe.
- $Gl(n, \mathbb{R}) \subset M(n, \mathbb{R}) = \mathbb{R}^{n^2}$ ist eine offene Untermannigfaltigkeit und eine Liesche Gruppe.
- Jede abgeschlossene Untergruppe von $Gl(n, \mathbb{R})$ ist eine Liesche Gruppe. $(O(n), Sp(n), U(n), \dots)$

Definition. Ein Paar $(V, [\ , \])$ heißt Lie-Algebra, falls V ein reeller Vektorraum ist und $[\ , \] : V \times V \longrightarrow V$ folgende Eigenschaften erfüllt:

1. $[\ , \]$ ist schief-symmetrisch.
2. $[\ , \]$ ist linear in beiden Komponenten.
3. Es gilt die Jacobi-Identität

$$[[X, Y], Z] + [[Y, Z], X] + [[Z, X], Y] = 0 \quad \forall X, Y, Z \in V.$$

Beispiel 40. BEISPIELE FÜR LIE-ALGEBREN

1. $\mathfrak{X}(M)$ mit dem Kommutator von Vektorfeldern ist eine (∞ -dimensionale) Lie-Algebra.
2. $M(n, \mathbb{R})$ mit $[A, B] := A \circ B - B \circ A$ ist eine Lie-Algebra.
3. \mathbb{R}^3 mit dem Vektorprodukt $[v, w] := v \times w$ ist eine Lie-Algebra.
4. Sei (M^{2n}, ω) eine symplektische Mannigfaltigkeit. Dann ist $C^\infty(M)$ mit der Poisson-Klammer $\{f, g\} := \omega(s - \text{grad}(f), s - \text{grad}(g))$ eine Lie-Algebra.

Definition. Sei G eine Liesche Gruppe. Ein Vektorfeld $X \in \mathfrak{X}(G)$ heißt linksinvariant, falls $(l_g)_* X = X$ für alle $g \in G$, d.h.

$$(l_g)_* X(l_g a) = (dl_g)_a(X(a)) = X(g \cdot a) = X(l_g a) \quad \forall a, g \in G.$$

Bemerkung

Der Kommutator $[X, Y]$ zweier linksinvarianter VF ist auch linksinvariant, denn sind $X, Y \in \mathfrak{X}(G)$ linksinvariant,

so ist nach Satz 2.11

$$(l_g)_*[X, Y] = [(l_g)_*X, (l_g)_*Y] = [X, Y]$$

Definition. Die *Lie-Algebra einer Lieschen Gruppe* G ist der Vektorraum aller linksinvarianten Vektorfelder von G mit dem Vektorfeld-Kommutator.

$$\mathfrak{g} = LA(G)$$

bezeichnet die Lie-Algebra von G .

Bemerkung

Die Abbildung

$$\begin{aligned} \mathfrak{g} &\longrightarrow T_e G \\ X &\longmapsto X(e) \end{aligned}$$

ist ein Vektorraum-Isomorphismus, da $X(g) = (dl_g)_e(X(e))$ gilt. Somit ist $\dim(\mathfrak{g}) = \dim(G)$ und man kann \mathfrak{g} mit $T_e G$ identifizieren. Die Lie-Klammer auf $T_e G$ wird definiert durch

$$[v, w] := [\tilde{V}, \tilde{W}](e) \quad v, w \in T_e G,$$

wobei $\tilde{V}(g) := (dl_g)_e(v)$ und $\tilde{W}(g) := (dl_g)_e(w)$.

Beispiel 41. DIE LIE-ALGEBRA VON $Gl(n, \mathbb{R})$

Sei $G = Gl(n, \mathbb{R})$. Dann ist die Lie-Algebra von G die Menge der $n \times n$ -Matrizen mit dem Matrizenkommutator.

$$\mathfrak{g} = M(n, \mathbb{R}) \quad [A, B] := A \circ B - B \circ A$$

2.5 Immersionen, Einbettungen und Submersionen

Definition. Sei $f : M \rightarrow N$ eine C^∞ -Abbildung. Dann heißt f :

Immersion : $\Leftrightarrow df_x : T_x M \rightarrow T_{f(x)} N$ ist eine injektive Abbildung für alle $x \in M$.

Submersion : $\Leftrightarrow df_x : T_x M \rightarrow T_{f(x)} N$ ist eine surjektive Abbildung für alle $x \in M$.

Einbettung : $\Leftrightarrow f$ ist eine injektive Immersion und $f : M \rightarrow f(M) \subset N$ ist ein Homöomorphismus bzgl. der auf $f(M)$ durch N induzierten Topologie.

Beispiel 42. IMMERSION, EINBETUNG U. SUBMERSION

1. Die Abbildung

$$\begin{aligned} f : \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R}^2 \\ t &\mapsto (t^3 - 4t, t^2 - 4) \end{aligned}$$

ist eine Immersion.

2. Die Abbildung

$$\begin{aligned} f : \mathbb{R}P^2 &\rightarrow \mathbb{R}^4 \\ [x : y : z] &\mapsto (yz, xz, xy, x^2 + 2y^2 + 3z^2) \end{aligned}$$

ist eine Einbettung. (Übungsaufgabe)

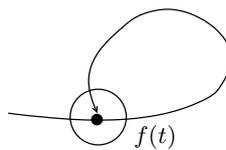
3. Die Hopf-Faserung:

$$\begin{aligned} \pi : S^3 &\rightarrow \mathbb{C}P^1 = S^2 \\ (z_1, z_2) &\mapsto [z_1 : z_2] \end{aligned}$$

ist eine Submersion. (Übungsaufgabe)

4. Nicht jede injektive Immersion ist eine Einbettung.

Die Abbildung $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^2$ mit $f'(t) \neq 0$ ist keine Einbettung.



Satz 2.17. Sei $f : M \rightarrow N$ eine injektive Immersion und M kompakt. Dann ist f eine Einbettung.

Beweis: $f : M \rightarrow N$ ist stetig. Somit ist auch $f : M \rightarrow f(M) \subset N$ stetig bzgl. der durch N induzierten Topologie. Fixiere auf $f(M)$ die durch N induzierte Topologie. Dann ist $f : M \rightarrow f(M)$ bijektiv und stetig. Da M kompakt ist und $f(M)$ T_2 ist (da N T_2 ist), folgt aus Satz 1.9, dass $f : M \rightarrow f(M)$ ein Homöomorphismus ist. D.h. f ist eine Einbettung.

□

Lemma 2.1. [Erinnerung an die Analysis II]

1. Sei $G \subset \mathbb{R}^n$ offen,

$$f : G \subset \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^n$$

glatt und

$$df_x : T_x \mathbb{R}^n \longrightarrow T_{f(x)} \mathbb{R}^n$$

ein Isomorphismus für ein $x \in G$. Dann ist f ein lokaler Diffeomorphismus um x . D.h. es existiert eine Umgebung $U(x)$, auf der f ein Diffeomorphismus ist. ("Satz über den lokalen Diffeomorphismus")

2. Sei $G \subset \mathbb{R}^n$ eine Umgebung von $0 \in \mathbb{R}^m$ und $f : G \subset \mathbb{R}^m \longrightarrow \mathbb{R}^n$ eine glatte Abbildung mit $f(0) = 0$

(a) Ist $m \leq n$ und df_0 injektiv, dann existiert eine Karte (U, g) um 0, sodass

$$g \circ f(u) = i(u),$$

wobei $i : \mathbb{R}^m \longrightarrow \mathbb{R}^n$ mit $i(u) = (u, 0)$ die Einbettung bezeichnet.

(b) Ist $m \geq n$ und df_0 surjektiv, dann existiert eine Karte (U, h) um 0, sodass

$$f \circ h = \pi,$$

wobei $\pi : \mathbb{R}^m \longrightarrow \mathbb{R}^n$ die kanonische Projektion bezeichnet.

Beweis:

1. Siehe Analysis II

2. Zu

(a) Nach Voraussetzung gilt

$$\operatorname{rg} \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_j}(0) \right)_{\substack{i=1, \dots, n \\ j=1, \dots, m}} = m.$$

OBdA seien die ersten m Zeilen dieser Matrix linear unabhängig. Für die glatte Abbildung

$$F : G \times \mathbb{R}^{n-m} \subset \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^n \\ (u, v) \mapsto f(u) + (0, v)$$

gilt

$$dF_0 \hat{=} \begin{pmatrix} \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(0) & 0 \\ * & I_{n-m} \end{pmatrix}$$

Dieses Differential ist injektiv, denn

$$\det(dF_0) = \det \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_j}(0) \right)_{\substack{i=1, \dots, m \\ j=1, \dots, m}} \neq 0$$

D.h. $dF_0 : T_0\mathbb{R}^n \rightarrow T_0\mathbb{R}^n$ ist ein Isomorphismus. Dann existiert also eine Umgebung $W(0) \subset \mathbb{R}^n$, so dass

$$F|_{W(0)} : W(0) \rightarrow F(W(0)) =: U$$

ein Diffeomorphismus ist. Mit $g := (F|_{W(0)})^{-1} : U \rightarrow W(0)$ ist (U, g) eine Karte um $0 \in \mathbb{R}^n$ mit

$$g \circ F|_{W(0)}(u, v) = id_{W(0)}(u, v) = (u, v).$$

Für $v = 0$ ergibt sich $g \circ f(u) = (u, 0) = i(u)$ für alle u aus einer Umgebung von $0 \in \mathbb{R}^m$.

(b) Sei $m \geq n$. Nach Voraussetzung gilt:

$$rg \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_j}(0) \right)_{\substack{i=1, \dots, n \\ j=1, \dots, m}} = n.$$

OBdA seien die ersten n Spalten dieser Matrix linear unabhängig. Für die glatte Abbildung

$$\begin{aligned} F : G \times \mathbb{R}^m &\rightarrow \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^{m-n} = \mathbb{R}^m \\ u = (u_1, \dots, u_m) &\mapsto (f(u), u_{n+1}, \dots, u_m) \end{aligned}$$

gilt

$$dF_0 \hat{=} \begin{pmatrix} \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(0) & * \\ 0 & I_{m-n} \end{pmatrix}$$

Das Differential ist wieder injektiv, da

$$\det(dF_0) = \det \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_j}(0) \right)_{\substack{i=1, \dots, n \\ j=1, \dots, n}} \neq 0$$

D.h. $dF_0 : T_0\mathbb{R}^m \rightarrow T_0\mathbb{R}^m$ ist ein Isomorphismus. Dann existiert also eine Umgebung $W(0) \subset G$, so dass

$$F|_{W(0)} : W(0) \rightarrow F(W(0)) =: U$$

ein Diffeomorphismus ist. Mit $h := (F|_{W(0)})^{-1} : U \rightarrow W(0)$ ist (U, h) eine Karte um $0 \in \mathbb{R}^m$ mit

$$F \circ h(u) = id_U(u) = (u).$$

Somit ergibt sich aus der Definition von F :

$$f \circ h(u) = \pi(F \circ h(u)) = \pi(u) \text{ für alle } u \in U.$$

□

Übertragung auf Mannigfaltigkeiten

Satz 2.18. Sei $f : M^m \rightarrow N^n$ eine glatte Abbildung, $x \in M$ und

$$df_x : T_x M \rightarrow T_{f(x)} N$$

ein Isomorphismus. Dann ist f ein lokaler Diffeomorphismus um $x \in M$, d.h. es existiert eine Umgebung $U(x)$, so dass

$$f|_U : U \rightarrow f(U)$$

ein Diffeomorphismus ist.

Beweis: Man wähle eine Karte $(\tilde{U}, \tilde{\varphi})$ um x und (V, ψ) um $f(x)$ und wende das obige Lemma auf $\psi \circ f \circ \tilde{\varphi}^{-1}$ an.

□

Satz 2.19. Sei $f : M^m \rightarrow N^n$ eine Immersion. Dann existiert zu jedem $x \in M$ eine Umgebung $U(x) \subset M$, so dass $f : U(x) \rightarrow N$ eine Einbettung ist.

Beweis: Sei $(\tilde{U}, \tilde{\varphi})$ eine zulässige Karte um $x \in M$ mit $\tilde{\varphi}(x) = 0$ und $(\tilde{V}, \tilde{\psi})$ eine zulässige Karte um $f(x) \in N$ mit $\tilde{\psi}(f(x)) = 0$. Nach Voraussetzung ist $d(\tilde{\psi} \circ f \circ \tilde{\varphi}^{-1})_0$ injektiv. Mit dem obigen Lemma existiert also eine Koordinatentransformation g auf $\tilde{\psi}(\tilde{V})$, so dass

$$g \circ (\tilde{\psi} \circ f \circ \tilde{\varphi}^{-1})(\hat{u}) = (\hat{u}, 0) = i(\hat{u}) \quad \forall \hat{u} \in \hat{U} \subset \tilde{\varphi}(\tilde{U}).$$

Sei $U := \tilde{\varphi}^{-1}(\hat{U})$, und $\varphi := \tilde{\varphi}|_U$, dann ist (U, φ) eine Karte um $x \in M$. Die Karte (V, ψ) um $f(x)$ sei definiert durch

$$\psi := g \circ \tilde{\psi}, \quad V := \psi^{-1}(g(\tilde{\psi}(\tilde{V})) \cap \pi^{-1}(\hat{U})).$$

D.h. f hat die Kartendarstellung $\psi \circ f \circ \varphi^{-1} = i$ auf U . Somit ist

$$f|_U : U \rightarrow N$$

eine Einbettung.

□

Satz 2.20. Sei $f : M^m \rightarrow N^n$ eine Einbettung.

Dann ist $f(M) \subset N$ eine m -dimensionale Untermannigfaltigkeit und die Abbildung

$$f : M \rightarrow f(M)$$

mit der Untermannigfaltigkeitsstruktur auf $f(M)$ ist ein Diffeomorphismus.

Beweis: Nach Satz 2.19 existiert der folgende zulässige Atlas auf M :

$$\mathcal{A}_M := \left\{ (U, \varphi) \left| \begin{array}{l} (U, \varphi) \text{ ist eine Karte um } x \in M \text{ und es existiert eine} \\ \text{Karte } (V, \psi) \text{ um } f(x), \text{ so dass } \psi \circ f \circ \varphi^{-1} = i \text{ auf } \varphi(U) \end{array} \right. \right\}$$

Insbesondere gilt:

$$\psi(V \cap f(M)) = \psi(V) \cap \{x_{m+1} = \dots = x_n = 0\}.$$

D.h. $f(M)$ ist eine Untermannigfaltigkeit von N .

$f : M \rightarrow N$ ist eine Einbettung, d.h. $f : M \rightarrow f(M)$ ist ein Homöomorphismus bzgl. der induzierten Topologie auf $f(M)$.

Analog zu den Sätzen 2.1 und 2.3 folgt, dass

$$\mathcal{A}_{f(M)} = \{(f(U), \varphi \circ f^{-1}) \mid (U, \varphi) \in \mathcal{A}\}$$

ein Atlas auf $f(M)$ und die Abbildung

$$f : (M, \mathcal{A}_M) \longrightarrow (f(M), \mathcal{A}_{f(M)})$$

ein Diffeomorphismus ist.

Es bleibt zu zeigen, dass $\mathcal{A}_{f(M)}$ ein Atlas ist, der durch Untermannigfaltigkeitskarten entsteht.

Sei $(f(U), \varphi \circ f^{-1}) \in \mathcal{A}_{f(M)}$ und (V, ψ) eine Karte um $f(x)$ mit

$$\psi \circ f \circ \varphi^{-1} = i$$

auf $\varphi(U)$, dann folgt

$$\begin{aligned} & \psi \circ f \circ \varphi^{-1} = i \quad \text{auf } \varphi(U) \\ \implies & f \circ \varphi^{-1} = \psi^{-1} \quad \text{auf } \varphi(U) \\ \implies & \underbrace{\varphi \circ f^{-1}}_{\in \mathcal{A}_{f(M)}} = \underbrace{\psi|_{V \cap f(M)}}_{\in \mathcal{A}_{f(U)}^{UMF}} \end{aligned}$$

□

Definition. Sei $f : M^m \longrightarrow N^n$ eine glatte Abbildung, $m \geq n$.

$y \in N$ heißt regulärer Wert von f , falls

$$df_x : T_x M \longrightarrow T_y N$$

surjektiv ist für jedes $x \in f^{-1}(y)$.

Satz 2.21. Sei $f : M^m \longrightarrow N^n$ eine glatte Abbildung, $m \geq n$ und $y \in N$ ein regulärer Wert von f . Dann ist

$$B := f^{-1}(y) \subset M$$

eine $m - n$ -dimensionale Untermannigfaltigkeit von M .

Beweis: Wir betrachten die von M auf B induzierte Topologie und konstruieren Untermannigfaltigkeitskarten auf B . Sei $x \in B \subset M$ und $(\tilde{U}, \tilde{\varphi})$ eine zulässige Karte von M um x mit $\tilde{\varphi}(x) = 0$. Sei weiter (V, ψ) eine Karte auf N um $f(x)$ mit $\psi(f(x)) = 0$. Laut Voraussetzung ist

$$df_x : T_x M \longrightarrow T_{f(x)} N$$

surjektiv. Somit ist auch

$$d(\psi \circ f \circ \tilde{\varphi}^{-1})_0 : T_0 \mathbb{R}^m \longrightarrow T_0 \mathbb{R}^n$$

surjektiv. D.h. es existiert eine Karte $(W(0), h)$ mit $W(0) \subset \tilde{\varphi}(\tilde{U})$, so dass

$$\psi \circ f \circ \underbrace{\tilde{\varphi}^{-1} \circ h}_{=: \varphi^{-1}}|_W = \pi|_W.$$

Die Karte $U := \tilde{\varphi}(h(W))$, $\varphi := h^{-1} \circ \tilde{\varphi}|_U$ ist eine Untermannigfaltigkeitskarte um $x \in B \subset M$, denn

$$\begin{aligned}
& \varphi^{-1}(w) \in B \\
\implies & f(\varphi^{-1}(w)) = y \\
\implies & \psi \circ f \circ \varphi^{-1}(w) = \pi(w) = 0 \\
\text{d.h.} & \quad \varphi(U \cap B) = \varphi(U) \cap \varphi(B) \\
& \quad \quad \quad = W \cap \varphi(B) \\
& \quad \quad \quad = \varphi(U) \cap \{x_1 = \dots = x_n = 0\}
\end{aligned}$$

□

Satz 2.22. [Einbettungssatz von Whitney (1936)]⁵

Sei M^n eine glatte Mannigfaltigkeit. Dann existiert eine Einbettung

$$f : M^n \longrightarrow \mathbb{R}^{2n+1}.$$

Insbesondere ist jede glatte Mannigfaltigkeit M^n diffeomorph zu einer Untermannigfaltigkeit des \mathbb{R}^{2n+1} .

Beispiel 43. UNTERMANNIGFALTIGKEITEN

1. Der Graph einer glatten Abbildung $f : M^n \longrightarrow \mathbb{R}^m$

$$B := \text{graph}(f) := \{(x, f(x)) \in M \times \mathbb{R}^m \mid x \in M\}$$

ist eine n -dimensionale Untermannigfaltigkeit von $M^n \times \mathbb{R}^m$.

Betrachte dazu die glatte Funktion

$$\begin{aligned}
F : M^n \times \mathbb{R}^m & \longrightarrow \mathbb{R}^m \\
(x, y) & \longmapsto F(x, y) := f(x) - y
\end{aligned}$$

Es gilt $B = F^{-1}(0)$ und 0 ist ein regulärer Wert von F .

2. Rotationsflächen

Sei $f : (a, b) \subset \mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{R}$ glatt mit $f > 0$.

$$M^2 := \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x^2 + y^2 = f(z)^2\}$$

ist eine 2-dimensionale Untermannigfaltigkeit des \mathbb{R}^3 .

3. Gleichungsdefinierte Untergruppen von $Gl(n, \mathbb{R})$

$$O(n) := \{A \in Gl(n, \mathbb{R}) \mid A \cdot A^t = I_n\} \subset Gl(n, \mathbb{R}) \subset \mathbb{R}^{n^2}$$

ist eine $\frac{n(n-1)}{2}$ -dimensionale Untermannigfaltigkeit der $Gl(n, \mathbb{R})$. Betrachte dazu die Funktion

$$\begin{aligned}
F : Gl(n, \mathbb{R}) & \longrightarrow \{\text{symmetrische } n \times n\text{-Matrizen}\} = \mathbb{R}^{\frac{n(n+1)}{2}} \\
A & \longmapsto A \cdot A^t
\end{aligned}$$

$O(n) = F^{-1}(I_n)$ und I_n ist ein regulärer Wert von F .

⁵Ein Beweis steht in M.Hirsch: Differential Topology, Springer 1976

2.6 Tensorbündel und Tensorfelder

Als Vorbereitung wiederholen wir zunächst einige Begriffe aus der Algebra, die wir im folgenden benutzen werden.

2.6.1 Tensorprodukt von Vektorräumen

Im folgenden bezeichne \mathbb{K} den Vektorraum der reellen oder der komplexen Zahlen. Alle Vektorräume, die wir hier betrachten, seien Vektorräume über dem Körper \mathbb{K} .

Wir betrachten Vektorräume V_1, V_2, \dots, V_r der endlichen Dimension $n_j = \dim_{\mathbb{K}} V_j < \infty$. Diesen Vektorräumen werden wir einen neuen Vektorraum

$$V \otimes V_2 \otimes \dots \otimes V_r$$

der Dimension $n_1 \cdot \dots \cdot n_r$ zuordnen, das sogenannte *Tensorprodukt von V_1, \dots, V_r* .

Definition. Eine r -lineare Abbildung $t : V_1 \times \dots \times V_r \rightarrow W$ in einen Vektorraum W heißt tensoriell, falls die folgende Universalitätseigenschaft erfüllt ist:

Zu jeder r -linearen Abbildung $f : V_1 \times \dots \times V_r \rightarrow H$ in einen Vektorraum H existiert genau eine lineare Abbildung $h_f : W \rightarrow H$ so dass $h_f \circ t = f$ gilt.

$$\begin{array}{ccc} V_1 \times \dots \times V_r & \xrightarrow{t} & W \\ & \searrow f & \downarrow h_f \\ & & H \end{array}$$

Satz 2.23. Es existiert eine tensorielle Abbildung

$$t : V_1 \times V_2 \times \dots \times V_r \rightarrow W.$$

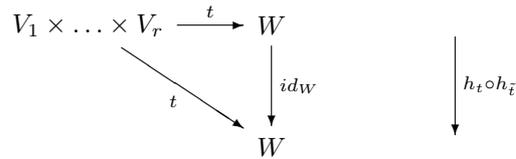
Diese ist bis auf Isomorphie eindeutig bestimmt. D.h. seien die Abbildungen $t : V_1 \times \dots \times V_r \rightarrow W$ und $\tilde{t} : V_1 \times \dots \times V_r \rightarrow \tilde{W}$ tensoriell, so existiert ein Vektorraum-Isomorphismus $\varphi : W \rightarrow \tilde{W}$ so dass $\varphi \circ t = \tilde{t}$ gilt.

Beweis:

Eindeutigkeit: Aus der Universalitätseigenschaft folgt, dass eindeutig bestimmte lineare Abbildungen $h_{\tilde{t}} : W \rightarrow \tilde{W}$ und $h_t : \tilde{W} \rightarrow W$ mit der Eigenschaft $h_{\tilde{t}} \circ t = \tilde{t}$ und $h_t \circ \tilde{t} = t$ existieren.

$$\begin{array}{ccc} V_1 \times \dots \times V_r & \xrightarrow{t} & W \\ & \searrow \tilde{t} & \downarrow h_{\tilde{t}} \\ & & \tilde{W} \end{array} \quad \begin{array}{c} \uparrow h_t \end{array}$$

Dann gilt $(h_t h_{\tilde{t}})t = t$. Andererseits gilt natürlich auch $id_W \circ t = t$. Wir betrachten das Diagramm



Aus der Eindeutigkeit in der Universalitätseigenschaft folgt:

$$id_W = h_t \circ h_{\bar{t}}.$$

Analog zeigt man $h_{\bar{t}} \circ h_t = id_{\bar{W}}$.

Existenz: Es gibt verschiedene Möglichkeiten, eine tensorielle Abbildung von V_1, \dots, V_r zu realisieren.⁶ Wir betrachten hier die folgende: Mit V_j^* bezeichnen wir den dualen Vektorraum zu V_j , d.h. $V_j^* := \{L : V_j \rightarrow \mathbb{K} \mid L \text{ linear}\}$. Wir betrachten nun den Vektorraum

$$W := \{L : V_1^* \times \dots \times V_r^* \rightarrow \mathbb{K} \mid L \text{ } r\text{-linear}\}$$

und die r -lineare Abbildung

$$\begin{aligned}
 t : V_1 \times \dots \times V_r &\longrightarrow W \\
 (v_1, \dots, v_r) &\longmapsto L_{(v_1, \dots, v_r)},
 \end{aligned}$$

wobei $L_{(v_1, \dots, v_r)} \in W$ folgendermaßen definiert ist:

$$L_{(v_1, \dots, v_r)}(\sigma^1, \dots, \sigma^r) := \sigma^1(v_1) \cdot \dots \cdot \sigma^r(v_r) \quad (\sigma^j \in V_j^*)$$

Wir zeigen, dass die Abbildung $t : V_1 \times \dots \times V_r \rightarrow W$ tensoriell ist. Sei dazu $(a_{j1}, \dots, a_{jn_j})$ eine Basis im Vektorraum V_j . Dann sind die linearen Abbildungen

$$\left(L_{(a_{1p_1}, \dots, a_{rp_r})} \mid p_s \in \{1, \dots, n_s\} \right)$$

eine Basis im Raum der Abbildungen W . Sei nun $f : V_1 \times \dots \times V_r \rightarrow H$ eine r -lineare Abbildung. Dann definieren wir

$$h_f(L_{(a_{1p_1}, \dots, a_{rp_r})}) := f(a_{1p_1}, \dots, a_{rp_r}) \quad (*)$$

und setzen h_f linear auf W fort. Dann gilt offensichtlich $h_f \circ t = f$ und h_f ist eindeutig bestimmt, denn $(*)$ muß wegen $h_f \circ t = f$ gelten.

□

Wir führen folgende Bezeichnung ein:

Definition. Sei $t : V_1 \times \dots \times V_r \rightarrow W$ eine tensorielle Abbildung

Der Vektorraum $V_1 \otimes \dots \otimes V_r := W$ heißt Tensorprodukt von V_1, V_2, \dots, V_r . Weiterhin sei

$$\begin{aligned}
 t : V_1 \times \dots \times V_r &\xrightarrow{\otimes} V_1 \otimes \dots \otimes V_r \\
 (v_1, \dots, v_r) &\longmapsto v_1 \otimes \dots \otimes v_r := t(v_1, \dots, v_r)
 \end{aligned}$$

Der Vektor $v_1 \otimes \dots \otimes v_r$ heißt das Tensorprodukt der Vektoren v_1, \dots, v_r .

⁶Eine andere Realisierung des Tensorproduktes findet man in F.W. Warner: Foundations of differentiable Manifolds and Lie groups.

Wählen wir die Realisierung des Tensorproduktes aus Satz 2.23, so gilt

$$V_1 \otimes \dots \otimes V_r = \{L : V_1^* \times \dots \times V_r^* \longrightarrow \mathbb{K} \mid L \text{ r-linear}\}$$

und

$$v_1 \otimes \dots \otimes v_r := L_{(v_1, \dots, v_r)}.$$

Nach Definition gilt

$$V_1 \otimes \dots \otimes V_r = \text{span}_{\mathbb{K}}\{v_1 \otimes \dots \otimes v_r \mid v_j \in V_j, j = 1, \dots, r\}.$$

Da die Abbildung t r -linear ist, hat man für das Tensorprodukt von Vektoren die folgenden Rechenregeln:

1. $\lambda \cdot (v_1 \otimes \dots \otimes v_r) = v_1 \otimes \dots \otimes v_{j-1} \otimes \lambda v_j \otimes v_{j+1} \otimes \dots \otimes v_r \quad (\lambda \in \mathbb{K}).$
2. $v_1 \otimes \dots \otimes v_{j-1} \otimes (v_j + w_j) \otimes v_{j+1} \otimes \dots \otimes v_r = v_1 \otimes \dots \otimes v_r + v_1 \otimes \dots \otimes v_{j-1} \otimes w_j \otimes v_{j+1} \otimes \dots \otimes v_r$

Insbesondere erhält man die folgende Basisdarstellung für Tensorprodukte von Vektoren:

Sei $(a_{j_1}, \dots, a_{j_{n_j}})$ eine Basis von $V_j, j = 1, \dots, r$. Dann ist

$$(a_{1p_1} \otimes \dots \otimes a_{rp_r} \mid p_j \in \{1, \dots, n_j\})$$

eine Basis von $V_1 \otimes \dots \otimes V_r$.

Ist $v_j = \sum_{p_j=1}^{n_j} \xi^{jp_j} a_{jp_j}$ die Basisdarstellung von $v_j \in V_j$, so ist

$$v_1 \otimes \dots \otimes v_r = \sum \xi^{1p_1} \dots \xi^{rp_r} a_{1p_1} \otimes \dots \otimes a_{rp_r}$$

die Basisdarstellung von $v_1 \otimes \dots \otimes v_r$. Dies zeigt, dass

$$\dim_{\mathbb{K}} (V_1 \otimes \dots \otimes V_r) = n_1 \cdot \dots \cdot n_r .$$

Satz 2.24. Seien V_1, \dots, V_r, W und \tilde{W} endlich-dimensionale Vektorräume. Dann gilt

1. $V_1^* \otimes \dots \otimes V_r^* \otimes W = \{L : V_1 \times \dots \times V_r \longrightarrow W \mid L \text{ r-linear}\}$
Insbesondere ist: $V^* \otimes W = \text{Hom}_{\mathbb{K}}(V, W)$
2. $V \otimes W = W \otimes V$
3. $(V \otimes W) \otimes \tilde{W} = V \otimes (W \otimes \tilde{W}) = V \otimes W \otimes \tilde{W}$
4. $(V \otimes W)^* = V^* \otimes W^*$

Beweis: Die Behauptungen 2), 3) und 4) sind klar. Man schreibt den Isomorphismus mittels Basen direkt hin oder benutzt die Universalitätseigenschaft.

Zu 1.): Für einen endlich-dimensionalen Vektorraum V gilt:

$$V = (V^*)^*$$

$$v \mapsto \phi_v \quad \phi_v(\sigma) = \sigma(v) \quad \text{für } \sigma \in V^*$$

Nach Definition und Satz 2.23 ist dann

$$V_1^* \otimes \dots \otimes V_r^* \otimes W = \{L : V_1 \times \dots \times V_r \times W^* \longrightarrow \mathbb{K} \mid L \text{ ((r+1)-linear)}\}$$

Der Vektorraum auf der rechten Seite ist isomorph zum Vektorraum

$$\{\hat{L} : V_1 \times \dots \times V_r \longrightarrow W \mid \hat{L} \text{ r-linear}\}.$$

Dieser Isomorphismus wird beschrieben durch $L \mapsto \hat{L}$ mit

$$\hat{L}(v_1, \dots, v_r) = \sum_{j=1}^n L(v_1, \dots, v_r, \sigma^j) a_j,$$

wobei (a_1, \dots, a_n) eine Basis von W und $(\sigma^1, \dots, \sigma^n)$ die dazu duale Basis in W^* ist.

□

Definition. Sei V ein n -dimensionaler Vektorraum.

$$T^{(r,s)}(V) := \underbrace{V^* \otimes \dots \otimes V^*}_{r\text{-mal}} \otimes \underbrace{V \otimes \dots \otimes V}_{s\text{-mal}}$$

heißt Vektorraum der (r, s) -Tensoren über V (oder der r -fach kovarianten und s -fach kontravarianten Tensoren über V).

Speziell gilt:

$$\begin{aligned} T^{(1,0)}(V) &= V^* \\ T^{(0,1)}(V) &= V \\ T^{(0,0)}(V) &:= \mathbb{K} \\ T^{(r,s)}(V) &= \{L : \underbrace{V \times \dots \times V}_{r\text{-mal}} \times \underbrace{V^* \times \dots \times V^*}_{s\text{-mal}} \longrightarrow \mathbb{K} \mid L \text{ multilinear}\} \\ T^{(r,1)}(V) &= \{L : \underbrace{V \times \dots \times V}_{r\text{-mal}} \longrightarrow V \mid L \text{ multilinear}\} \end{aligned}$$

(siehe Satz 2.24).

Aus den Tensorprodukten über V kann man eine Algebra bilden, die Tensoralgebra über V .

$$T(V) := \sum_{r,s \geq 0} T^{(r,s)}(V) \quad (\text{Menge aller endlichen Summen})$$

Das Algebrenprodukt ist gegeben durch:

$$\begin{aligned} T^{(r,s)}(V) \times T^{(\hat{r},\hat{s})}(V) &\xrightarrow{\otimes} T^{(r+\hat{r},s+\hat{s})}(V) \\ (L, \hat{L}) &\mapsto L \otimes \hat{L}, \end{aligned}$$

wobei

$$\begin{aligned} (L \otimes \hat{L})(x_1, \dots, x_{r+\hat{r}}, y^1, \dots, y^{s+\hat{s}}) &:= L(x_1, \dots, x_r, y^1, \dots, y^s) \\ &\quad \cdot \hat{L}(x_{r+1}, \dots, x_{r+\hat{r}}, y^{s+1}, \dots, y^{s+\hat{s}}) \end{aligned}$$

mit $x_j \in V, y^j \in V^*$.

Ist (a_1, \dots, a_n) eine Basis von V und $(\sigma^1, \dots, \sigma^n)$ die dazu duale Basis von V^* , so ist

$$(\sigma^{i_1} \otimes \dots \otimes \sigma^{i_r} \otimes a_{j_1} \otimes \dots \otimes a_{j_s} \mid i_k \in \{1, \dots, n\}, j_l \in \{1, \dots, n\})$$

eine Basis von $T^{(r,s)}V$.

Sei nun $a'_j = \sum_l b_{lj} a_l$ ein Basiswechsel in V . Für die Cobasen im Dualraum V^* ergibt sich damit

$$\sigma'_i = \sum_l b^{il} \sigma_l$$

Dabei bezeichne b^{il} den i - l -ten Eintrag der zur Matrix $B = \{b_{il}\}$ inversen Matrix.

Ein Basisvektor aus $T^{(r,s)}$ transformiert sich dann aufgrund der Multilinearität wie folgt:

$$\begin{aligned} & \sigma^{i_1'} \otimes \dots \otimes \sigma^{i_r'} \otimes a_{j_1'} \otimes \dots \otimes a_{j_s'} \\ = & \sum_{l_1} b^{i_1 l_1} \sigma^{l_1} \otimes \dots \otimes \sum_{l_r} b^{i_r l_r} \sigma^{l_r} \otimes \sum_{l_{r+1}} b_{l_{r+1} j_1} a_{l_{r+1}} \otimes \dots \otimes \sum_{l_{r+s}} b_{l_{r+s} j_s} a_{l_{r+s}} \\ = & \sum_L \underbrace{b^{i_1 l_1} \dots b^{i_r l_r}}_{r\text{-fach covariant}} \underbrace{b_{l_{r+1} j_1} \dots b_{l_{r+s} j_s}}_{s\text{-fach kontravariant}} (\sigma^{l_1} \otimes \dots \otimes \sigma^{l_r} \otimes a_{l_{r+1}} \otimes \dots \otimes a_{l_{r+s}}) \end{aligned}$$

Alternierende Tensoren

Im Vektorraum der k -fach kovarianten Tensoren über V existieren 2 wichtige Unterräume, der Vektorraum der alternierenden bzw. der der symmetrischen Tensoren. Sei

$$T^{(k,0)}V = \underbrace{V^* \otimes \dots \otimes V^*}_{k\text{-mal}} =: \otimes^k V^*$$

Definition. Eine multilineare Abbildung $L : V \times \dots \times V \rightarrow \mathbb{K}$ heißt alternierend, wenn $L(\dots, v, \dots, w, \dots) = -L(\dots, w, \dots, v, \dots)$ für alle $v, w \in V$ gilt. Der Vektorraum

$$\Lambda^k(V^*) := \{L : \underbrace{V \times \dots \times V}_{k\text{-mal}} \rightarrow \mathbb{K} \mid L \text{ multilinear und alternierend}\}$$

heißt Vektorraum der alternierenden k -Formen auf V .

Aus den Vektorräumen der alternierenden k -Formen kann man ebenfalls eine Algebra machen. Dazu betrachten wir die folgende Abbildung

$$\begin{aligned} \wedge : \Lambda^k(V^*) \times \Lambda^l(V^*) & \longrightarrow \Lambda^{k+l}(V^*) \\ (\omega, \sigma) & \longmapsto \omega \wedge \sigma \end{aligned}$$

definiert durch

$$\begin{aligned} (\omega \wedge \sigma)(x_1, \dots, x_{k+l}) & := \frac{1}{k! \cdot l!} \sum_{\pi \in \mathcal{S}_{k+l}} \text{sgn} \pi \cdot \omega(x_{\pi(1)}, \dots, x_{\pi(k)}) \cdot \sigma(x_{\pi(k+1)}, \dots, x_{\pi(k+l)}) \\ & = \sum_{\pi \in \mathcal{S}_{k+l}} \text{sgn} \pi \cdot \omega(x_{\pi(1)}, \dots, x_{\pi(k)}) \cdot \sigma(x_{\pi(k+1)}, \dots, x_{\pi(k+l)}) \end{aligned}$$

In diesen Formeln bezeichnet S_k die Gruppe der Permutationen der Zahlen $1, \dots, k$.

Die $(k+l)$ -Form $\omega \wedge \sigma$ heißt das alternierende Produkt, Dachprodukt oder wedge-Produkt von ω und σ .

Bemerkung

Manche Autoren multiplizieren in der Definition von $\omega \wedge \sigma$ noch zusätzlich mit $\frac{1}{(k+l)!}$.

Satz 2.25. *Das alternierende Produkt hat folgende Eigenschaften:*

1. $\omega \wedge \sigma = (-1)^{k \cdot l} \sigma \wedge \omega, \quad w \in \Lambda^k(V^*), \sigma \in \Lambda^l(V^*)$

2. $(\omega \wedge \sigma) \wedge \eta = \omega \wedge (\sigma \wedge \eta)$

3. $\omega \wedge \sigma = \omega \otimes \sigma - \sigma \otimes \omega$

4. *Seien $\sigma^1, \dots, \sigma^k \in V^*, v_1, \dots, v_k \in V$. Dann gilt*

$$(\sigma^1 \wedge \sigma^2 \wedge \dots \wedge \sigma^k)(v_1, \dots, v_k) = \text{Determinante der Matrix } (\sigma^i(v_j))_{i,j=1,\dots,k}$$

5. *Ist $(\sigma^1, \dots, \sigma^n)$ eine Basis von V^* , so ist $(\sigma^{i_1} \wedge \dots \wedge \sigma^{i_k} \mid 1 \leq i_1 < \dots < i_k \leq n)$ eine Basis von $\Lambda^k(V^*)$. Insbesondere gilt für einen n -dimensionalen Vektorraum V*

$$\dim \Lambda^k V^* = \binom{n}{k} \quad \text{für } k \leq n = \dim V \quad \text{und} \quad \Lambda^k V^* = 0 \quad \text{für } n > k$$

Für $k = 0$ setzen wir $\Lambda^0 V^* := \mathbb{K}$ und $\lambda \wedge \omega := \lambda \cdot \omega =: \omega \wedge \lambda$ für $\lambda \in \Lambda^0 V^*, \omega \in \Lambda^k V^*$.

Die Algebra

$$\left(\Lambda(V^*) := \sum_{k=0}^n \Lambda^k(V^*), \wedge \right)$$

heißt Algebra der alternierenden Formen über V .

Symmetrische Tensoren

Definition. *Eine multilineare Abbildung $L : V \times \dots \times V \rightarrow \mathbb{K}$ heißt symmetrisch, wenn $L(\dots, v, \dots, w, \dots) = L(\dots, w, \dots, v, \dots)$ für alle $v, w \in V$ gilt. Der Vektorraum*

$$S^k(V^*) := \{L : \underbrace{V \times \dots \times V}_{k\text{-mal}} \rightarrow \mathbb{K} \mid L \text{ multilinear und symmetrisch} \}$$

heißt Vektorraum der symmetrischen k -fach kovarianten Tensoren über V .

Aus den Vektorräumen der symmetrischen Tensoren kann man ebenfalls eine Algebra machen. Dazu betrachten wir die folgende Abbildung

$$\begin{aligned} \circ : S^k(V^*) \times S^l(V^*) &\longrightarrow S^{k+l}(V^*) \\ (\omega, \sigma) &\longmapsto \omega \circ \sigma \end{aligned}$$

definiert durch

$$(\omega \circ \sigma)(x_1, \dots, x_{k+l}) := \frac{1}{(k+l)!} \sum_{\pi \in S_{k+l}} \omega(x_{\pi(1)}, \dots, x_{\pi(k)}) \cdot \sigma(x_{\pi(k+1)}, \dots, x_{\pi(k+l)})$$

Der $(k+l)$ -Tensor $\omega \circ \sigma$ heißt das symmetrische Tensorprodukt von ω und σ .

Satz 2.26. *Das symmetrische Tensorprodukt hat folgende Eigenschaften:*

1. $\omega \circ \sigma = \sigma \circ \omega$
2. $(\omega \circ \sigma) \circ \eta = \omega \circ (\sigma \circ \eta)$
3. $\omega \circ \sigma = \frac{1}{2}(\omega \otimes \sigma + \sigma \otimes \omega)$
4. *Ist $(\sigma^1, \dots, \sigma^n)$ eine Basis von V^* , so ist $(\sigma^{i_1} \circ \dots \circ \sigma^{i_k} \mid 1 \leq i_1 \leq i_2 \leq \dots \leq i_k \leq n)$ eine Basis von $S^k(V^*)$. Insbesondere gilt:*

$$\dim S^k(V^*) = \binom{n+k-1}{k}$$

Für $k = 0$ setzen wir $S^0(V^*) := \mathbb{K}$ und $\lambda \circ T = \lambda \cdot T = T \circ \lambda$ für $\lambda \in S^0(V^*) = \mathbb{K}, T \in S^k(V^*)$.

Die Algebra

$$\left(S(V^*) := \sum_{k=0}^{\infty} S^k(V^*), \circ \right)$$

heißt Algebra der symmetrischen, kovarianten Tensoren über V .

Man kann Tensoren mittels linearen Abbildungen von einem Vektorraum auf einen anderen übertragen.

Sei $f : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung. f induziert eine Abbildung auf den kovarianten Tensoren

$$\begin{aligned} f^* : T^{(k,0)}W = \otimes^k W^* &\longrightarrow T^{(k,0)}V = \otimes^k V^* \\ T &\longmapsto f^*T \quad \text{mit} \\ f^*T(v_1, \dots, v_k) &:= T(f(v_1), \dots, f(v_k)), \quad v_j \in V_j \end{aligned}$$

f^*T heißt der durch f aus T induzierte Tensor. f^* heißt die induzierte Abbildung auf den Tensorprodukten.

Ist $f : V \rightarrow W$ sogar ein Isomorphismus, so kann man allgemeiner die folgende Konstruktion machen: Wir betrachten die duale Abbildung $f^* : W^* \rightarrow V^*$ zu f :

$$(f^*\sigma)(v) = \sigma(f(v)), \quad \sigma \in W^*, v \in V.$$

Dann induziert f eine Abbildung

$$\begin{aligned} f^* : T^{(r,s)}W &\longrightarrow T^{(r,s)}V \\ T &\longmapsto f^*T \end{aligned}$$

wobei

$$f^*T(v_1, \dots, v_r, \sigma^1, \dots, \sigma^s) := T(f(v_1), \dots, f(v_r), f^{*-1}(\sigma^1), \dots, f^{*-1}(\sigma^s)) \quad v_j \in V, \sigma^j \in V^*$$

2.6.2 Tensorbündel und Tensorfelder auf Mannigfaltigkeiten

Definition. Sei M^n eine glatte Mannigfaltigkeit, $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ oder $\mathbb{K} = \mathbb{C}$. Ein Tripel (E, π, M) heißt glattes Vektorbündel vom Rang r über M , falls

1. E ist eine glatte Mannigfaltigkeit, $\pi : E \rightarrow M$ ist glatt.
2. E ist lokal-trivial, d.h. zu jedem $x \in M$ existiert eine Umgebung $U(x) \subset M$ und ein Diffeomorphismus $\phi_U : \pi^{-1}(U) \rightarrow U \times \mathbb{K}^r$, so dass $\pi = pr_1 \circ \phi_U$.
3. Die "Fasern" $E_x := \pi^{-1}(x) \subset E$ sind \mathbb{K} -Vektorräume und die Abbildungen

$$\phi_{U,x} := pr_2 \circ \phi_U|_{E_x} : E_x \rightarrow \mathbb{K}^r$$

sind Vektorraumisomorphismen.

Bezeichnungen:

- E heißt Totalraum des Bündels.
- π heißt Projektion des Bündels.
- M heißt Basis des Bündels.
- (U, ϕ_U) heißt Bündelkarte bzw. lokale Trivialisierung.
- $\mathcal{A} := \{(U_\alpha, \phi_{U_\alpha}) \mid \alpha \in I, (U_\alpha, \phi_{U_\alpha}) \text{ Bündelkarten}, M = \bigcup_{\alpha \in I} U_\alpha\}$ heißt Bündelatlas.

Beispiel 44. BEISPIELE FÜR VEKTORBÜNDEL

1. Sei $U \subset M$ offen, (E, π, M) ein Vektorbündel über M .
Dann ist $(E|_U := \pi^{-1}(U), \pi|_U, U)$ ein Vektorbündel über U .
2. $(M \times \mathbb{K}^r, pr_1, M)$ ist ein triviales Vektorbündel.

Beispiel 45. DAS TENSORBÜNDEL ÜBER M

Sei $x \in M$. $T_x M$ ist der Tangentialraum an M im Punkt x und $T_x^* M$ der Kotangentialraum an M in x .

$$T^{(r,s)}(T_x M) := \bigotimes^r T_x^* M \otimes \bigotimes^s T_x M$$

Sei $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ eine zulässige Karte von M . Dann ist

$$\left(\frac{\partial}{\partial x_1}(x), \dots, \frac{\partial}{\partial x_n}(x) \right)$$

eine Basis in $T_x M$ und $((dx_1)_x, \dots, (dx_n)_x)$ ist die duale Basis in $T_x^* M$. Somit ist

$$\left\{ (dx_{i_1})_x \otimes \dots \otimes (dx_{i_r})_x \otimes \frac{\partial}{\partial x_{j_1}}(x) \otimes \dots \otimes \frac{\partial}{\partial x_{j_s}}(x) \mid i_l, j_k \in \{1, \dots, n\} \right\}$$

eine Basis in $T^{(r,s)}(T_x M)$.

Abkürzend schreibt man auch $dx^I \otimes \frac{\partial}{\partial x^J}$ $I = (i_1, \dots, i_r)$, $J = (j_1, \dots, j_s)$.

$$T^{(r,s)} M := \dot{\bigcup}_{x \in M} T^{(r,s)}(T_x M)$$

$$\pi : T^{(r,s)} M \longrightarrow M$$

$$T^{(r,s)}(T_x M) \ni B \mapsto x$$

Insbesondere ist

$$T^{(1,0)} M = T^* M = \dot{\bigcup}_{x \in M} T_x^* M \text{ das Kotangentialbündel und}$$

$$T^{(0,1)} M = T^M = \dot{\bigcup}_{x \in M} T_x M \text{ das Tangentialbündel.}$$

Satz 2.27. *Das Bündel der (r, s) -Tensoren $\tau := (T^{(r,s)} M, \pi, M)$ ist ein glattes Vektorbündel vom Rang n^{r+s} über M .*

Beweis:

1. erster Teil der Definition von *lokalen Trivialisierungen* von τ :

Sei \mathcal{A}_M ein zulässiger Atlas auf M , $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n)) \in \mathcal{A}_M$. Dann ist

$$\{(dx^I)_x \otimes \frac{\partial}{\partial x^J}(x) \mid I, J\}$$

eine Basis in $T^{(r,s)}(T_x M)$.

Die Bijektion

$$\hat{\phi}_{(U,\varphi)} : \pi^{-1}(U) \longrightarrow \varphi(U) \times \mathbb{K}^{n^{r+s}}$$

sei definiert durch

$$T^{(r,s)}(T_x M) \ni B_x \mapsto (x_1(x), \dots, x_n(x), (B_I^J)_{I,J}) \quad x \in U,$$

wobei $B_x = \sum_{I,J} B_I^J dx_x^I \otimes \frac{\partial}{\partial x^J}(x)$.

2. Definition der *Topologie* auf $T^{(r,s)} M$:

Sei \mathcal{A}_M ein zulässiger Atlas auf M . $\mathcal{O} \subset T^{(r,s)} M$ heißt *offen*, falls

$$\hat{\phi}_{(U,\varphi)}(\mathcal{O} \cap \pi^{-1}(U)) \subset \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^{n^{r+s}}$$

offen ist für alle zulässigen Karten $(U, \varphi) \in \mathcal{A}_M$. Dies definiert unabhängig von der Wahl des zulässigen Atlas eine Topologie auf $T^{(r,s)} M$, die T^2 ist und eine abzählbare Basis hat, da M und \mathbb{R}^k diese Eigenschaften haben.

3. $T^{(r,s)} M$ ist eine *glatte Mannigfaltigkeit*:

Die Kartenbereiche des Atlas

$$\mathcal{A}_T := \{(\pi^{-1}(U), \hat{\phi}_{(U,\varphi)}) \mid (U, \varphi) \in \mathcal{A}_M\}$$

überdecken ganz $T^{(r,s)} M$ und die Abbildungen $\hat{\phi}_{(U,\varphi)}$ sind Homöomorphismen. Somit ist $T^{(r,s)} M$ eine topologische Mannigfaltigkeit.

Seien $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n)), (V, \psi = (y_1, \dots, y_n)) \in \mathcal{A}_M$ mit $U \cap V \neq \emptyset$, dann ist der Katrenübergang

$$\begin{aligned} \hat{\phi}_{(V,\psi)} \circ \hat{\phi}_{(U,\varphi)}^{-1} : \varphi(U \cap V) \times \mathbb{R}^{n^{r+s}} &\longrightarrow \psi(U \cap V) \times \mathbb{R}^{n^{r+s}} \\ (x_1, \dots, x_n, a_J^I) &\mapsto (\psi \circ \varphi^{-1}(x_1, \dots, x_n), b_L^K) \end{aligned}$$

glatt. Dies folgt einerseits aus der Glattheit von $\psi \circ \varphi^{-1}$ und zum anderen aus dem Koordinatenübergang von a_J^I nach b_L^K . Aus den Sätzen 2.7 und 2.9 folgt nämlich

$$\begin{aligned} &\sum_{I,J} a_J^I dx^J \otimes \frac{\partial}{\partial x^I} \\ &= \sum_{I,J} a_J^I \left(\sum_{k_1} \frac{\partial(\varphi^{-1} \circ \psi)_{i_1}}{\partial x_{k_1}} dy^{k_1} \otimes \dots \otimes \sum_{l_s} \frac{\partial(\psi^{-1} \circ \varphi)_{l_s}}{\partial x_{j_s}} \frac{\partial}{\partial y_{l_s}} \right) \\ &= \sum_{K,L} \underbrace{\sum_{I,J} a_J^I \frac{\partial(\varphi^{-1} \circ \psi)_{i_1}}{\partial x_{k_1}} \dots \frac{\partial(\psi^{-1} \circ \varphi)_{l_s}}{\partial x_{j_s}}}_{b_K^L} \left(dx^K \otimes \dots \otimes \frac{\partial}{\partial y^L} \right) \end{aligned}$$

und d.h.

$$b_{k_1, \dots, k_r}^{l_1, \dots, l_s} = \sum_{I,J} \frac{\partial(\varphi^{-1} \circ \psi)_{i_1}}{\partial x_{k_1}} \dots \frac{\partial(\varphi^{-1} \circ \psi)_{i_r}}{\partial x_{k_r}} \cdot \frac{\partial(\psi^{-1} \circ \varphi)_{l_{r+1}}}{\partial x_{j_1}} \dots \frac{\partial(\psi^{-1} \circ \varphi)_{l_s}}{\partial x_{j_s}} a_J^I$$

Diese Abbildung ist offensichtlich glatt.

4. $\pi : T^{(r,s)}M \longrightarrow M$ ist glatt:

Betrachte die Kartendarstellungen von π . Seien $(U, \varphi), (V, \psi) \in \mathcal{A}_M$.

$$\begin{aligned} \psi \circ \pi \circ \hat{\phi}_{(U,\varphi)}^{-1}(x_1, \dots, x_n, a_J^I) &= \psi \circ \pi \left(\sum_{I,J} a_J^I (dx^J)_x \otimes \frac{\partial}{\partial x^I}(x) \right) \\ &= \psi(x) \\ &= \psi \circ \varphi^{-1}(x_1, \dots, x_n) \end{aligned}$$

$\psi \circ \varphi^{-1}$ ist glatt und somit ist auch π glatt.

5. lokale Trivialisierung von $(T^{(r,s)}M, \pi, M)$:

Sei $x \in M$ und $(U, \varphi) \in \mathcal{A}_M$ eine Karte um x .

$$\phi_{(U,\varphi)} := (\varphi^{-1} \times id) \circ \hat{\phi}_{(U,\varphi)} : \pi^{-1}(U) \xrightarrow{\hat{\phi}_{(U,\varphi)}} \varphi(U) \times \mathbb{R}^{n^{r+s}} \xrightarrow{\varphi^{-1} \times id} U \times \mathbb{R}^{n^{r+s}}$$

sei eine Bündelkarte über U . Es gilt:

(a) $\phi_{(U,\varphi)}$ ist nach Definition ein Diffeomorphismus.

(b) $pr_1 \circ \phi_{(U,\varphi)} = \pi$

Und die Abbildung

$$\begin{aligned} pr_2 \circ \phi_{(U,\varphi)}|_{\pi^{-1}(x)} : \pi^{-1}(x) &\longrightarrow \mathbb{R}^{n^{r+s}} \\ B_x = \sum_{I,J} a_J^I (dx^J)_x \otimes \frac{\partial}{\partial x^I}(x) &\mapsto (a_J^I) \end{aligned}$$

ist ein Isomorphismus von Vektorräumen.

□

Spezialfälle

1. Das Tangentialbündel TM^n ist eine $2n$ -dimensionale glatte Mannigfaltigkeit mit folgendem Atlas:

Sei $(U, \varphi) \in \mathcal{A}_M$, $\varphi = (x_1, \dots, x_n)$. Sei weiter $t_x \in T_x M$, $t_x = \sum_{i=1}^n \xi^i \frac{\partial}{\partial x^i}(x)$.

$$\hat{\phi}_{(U, \varphi)}(t_x) := (x_1(x), \dots, x_n(x), \xi^1, \dots, \xi^n)$$

(TM, π, M) ist ein glattes Vektorbündel vom Rang n .

2. Das Kotangentialbündel T^*M ist eine $2n$ -dimensionale glatte Mannigfaltigkeit mit folgendem Atlas:

Sei $(U, \varphi) \in \mathcal{A}_M$, $\varphi = (x_1, \dots, x_n)$. Sei weiter $L_x \in T_x^* M$, $L_x = \sum_{i=1}^n \eta_i (dx^i)_x$.

$$\phi_{(U, \varphi)}(L_x) := (x_1(x), \dots, x_n(x), \eta_1, \dots, \eta_n)$$

(T^*M, π, M) ist ein glattes Vektorbündel vom Rang n .

3. Analog zu Satz 2.27 zeigt man, dass

$$\bigwedge^k M := \bigcup_{x \in M} \bigwedge^k (T_x^* M)$$

eine glatte Mannigfaltigkeit der Dimension $n + \binom{n}{k}$ ist, so dass $(\bigwedge^k M, \pi, M)$ ein glattes Vektorbündel vom Rang $\binom{n}{k}$, das Bündel der (alternierenden) k -Formen ist.

Basen für die lokale Trivialisierung:

$$\{(dx_{i_1})_x \wedge \dots \wedge (dx_{i_k})_x \mid 1 \leq i_1 < \dots < i_k \leq n\}$$

4. Die Menge

$$S^k M := \bigcup_{x \in M} S^k (T_x^* M)$$

ist eine glatte Mannigfaltigkeit der Dimension $n + \binom{n+k-1}{k}$, so dass $(S^k M, \pi, M)$ ein glattes Vektorbündel vom Rang $\binom{n+k-1}{k}$, das Bündel der k -fach kovarianten Tensoren über M ist.

Basen für die lokale Trivialisierung:

$$\{(dx_{i_1})_x \circ \dots \circ (dx_{i_k})_x \mid 1 \leq i_1 \leq \dots \leq i_k \leq n\}$$

Definition. Sei $\xi = (E, \pi, M)$ ein glattes Vektorbündel. Eine glatte Abbildung

$$s : M \longrightarrow E$$

mit $\pi \circ s = id_M$ heißt glatter Schnitt des Bündels ξ . Mit $\Gamma(E)$ wird die Menge aller glatten Schnitte von ξ bezeichnet. $(\Gamma(E) = C^\infty(M, E) = C^\infty(E))$

Bemerkung

$\Gamma(E)$ ist ein $C^\infty(M)$ -Modul:

$$\begin{aligned} \Gamma(E) \ni s_1, s_2 &\mapsto s_1 + s_2 \in \Gamma(E) \\ &(s_1 + s_2)(x) := s_1(x) + s_2(x) \\ C^\infty(M) \times \Gamma(E) \ni (f, s) &\mapsto f \cdot s \in \Gamma(E) \\ &(f \cdot s)(x) := f(x) \cdot s(x) \end{aligned}$$

Definition. Sei (E, π, M) eine Vektorbündel vom Rang r , $s_1, \dots, s_r \in \Gamma(E|_U)$, $U \subset M$ offen, so dass $(s_1(x), \dots, s_r(x))$ für alle $x \in U$ eine Basis in E_x ist. Dann nennt man (s_1, \dots, s_r) eine lokale Basis in (E, π, M) über U .

Bemerkungen

1. Ist $\hat{\phi}_U : \pi^{-1}(U) \rightarrow U \times \mathbb{K}^r$ eine Bündelkarte und (a_1, \dots, a_r) eine Basis in \mathbb{K}^r , so sind $s_i : U \rightarrow E$ definiert durch

$$s_i(x) := \hat{\phi}_U^{-1}(x, a_i), \quad x \in U$$

($i = 1, \dots, r$) eine lokale Basis von E über U .

2. Ist (s_1, \dots, s_r) eine lokale Basis von E über U , so definiert

$$\begin{aligned} \phi_U : \pi^{-1}(U) &\rightarrow U \times \mathbb{K}^r \\ x \in U, E_x \ni v &\mapsto (x, \xi^1, \dots, \xi^r) \end{aligned}$$

wobei $v = \sum_{i=1}^r \xi^i s_i(x)$ ist, eine Bündelkarte von E über U .

Satz 2.28. Sei (E, π, M) ein glattes Vektorbündel und $s : M \rightarrow E$ mit $\pi \circ s = id_M$ gegeben. Sei $\mathcal{U} = \{U_\alpha\}$ eine offene Überdeckung von M , $(s_{\alpha_1}, \dots, s_{\alpha_r})$ eine lokale Basis von E über U_α und $s|_{U_\alpha} = \sum_{i=1}^r \xi^{\alpha_i} s_{\alpha_i}$. Dann ist $s \in \Gamma(E)$ genau dann, wenn

$$\xi^{\alpha_i} \in C^\infty(U_\alpha) \quad i = 1, \dots, r \quad \forall U_\alpha \in \mathcal{U}$$

Den Beweis überlassen wir als Übungsaufgabe.

Folgerung

1. Ist $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ eine zulässige Karte und

$$\begin{aligned} dx^I \otimes \frac{\partial}{\partial x^J} : U &\rightarrow T^{(r,s)}M|_U \\ x &\mapsto (dx^I)_x \otimes \frac{\partial}{\partial x^J}(x) \end{aligned}$$

Dann ist $(dx^I \otimes \frac{\partial}{\partial x^J})_{I,J}$ eine lokale Basis von $T^{(r,s)}M$ über U .

2. Sei $B : M \ni x \mapsto B_x \in T^{(r,s)}(T_x M)$ gegeben. Dann ist $B \in \Gamma(T^{(r,s)}M)$ genau dann, wenn $B_I^J \in C^\infty(U)$ für alle I, J , wobei

$$B_x = \sum_{I,J} B_I^J(x) (dx^I)_x \otimes \frac{\partial}{\partial x^J}(x).$$

Insbesondere gilt: $\mathfrak{X}(M) = \Gamma(TM)$.

Definition. Ein glattes Tensorfeld von Typ (r, s) $r \geq 1, s = 0, 1$ ist eine Abbildung

$$B : \mathfrak{X}(M) \times \cdots \times \mathfrak{X}(M) \longrightarrow \begin{cases} C^\infty(M) & , s = 0 \\ \mathfrak{X}(M) & , s = 1 \end{cases}$$

die $C^\infty(M)$ -multilinear ist, d.h.

$$B(\dots, f_1 \cdot X_1 + f_2 \cdot X_2, \dots) = f_1 \cdot B(\dots, X_1, \dots) + f_2 \cdot B(\dots, X_2, \dots)$$

für alle $X_1, X_2 \in \mathfrak{X}(M)$ $f_1, f_2 \in C^\infty(M)$.

$\mathfrak{X}^{(r,s)}(M)$ bezeichnet die Menge der (r, s) -Tensorfelder über M . $\mathfrak{X}^{(r,s)}(M)$ ist ein Modul über $C^\infty(M)$.

Beispiel 46. BEISPIELE FÜR TENSORFELDER

1. Die Induzierte Riemannsche Metrik

Sei $M \subset \mathbb{R}^N$ eine Untermannigfaltigkeit.

$$\mathfrak{X}(M) = \{X \in C^\infty(M, \mathbb{R}^N) \mid X(x) \in T_x M \quad \forall x \in M\}$$

Die induzierte Riemannsche Metrik $g : \mathfrak{X}(M) \times \mathfrak{X}(M) \longrightarrow C^\infty(M)$ ist definiert durch

$$g(X, Y)(x) := \langle X(x), Y(x) \rangle_{\mathbb{R}^N}.$$

g ist ein symmetrisches $(2, 0)$ -Tensorfeld.

2. Sei $M = \mathbb{R}^3$. Dann ist

$$\begin{aligned} B : \mathfrak{X}(\mathbb{R}^3) \times \mathfrak{X}(\mathbb{R}^3) &\longrightarrow \mathfrak{X}(\mathbb{R}^3) \\ (X, Y) &\mapsto X \times Y \\ (X \times Y)(x) &:= X(x) \times Y(x) \end{aligned}$$

ein $(2, 1)$ -Tensorfeld.

3. Sei M eine glatte Mannigfaltigkeit. Dann ist der Kommutator

$$\begin{aligned} [,] : \mathfrak{X}(M) \times \mathfrak{X}(M) &\longrightarrow \mathfrak{X}(M) \\ (X, Y) &\mapsto [X, Y] \end{aligned}$$

kein Tensorfeld, denn $[fX, Y] = f[X, Y] - Y(f)X$.

4. Sei $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ eine zulässige Karte. $dx_i \in \mathfrak{X}(U)$ ist definiert durch

$$\begin{aligned} (dx_i)(X) &:= \xi^i \in C^\infty(U) \quad \text{für} \\ X(x) &= \sum_{i=1}^n \xi^i(x) \frac{\partial}{\partial x_i}(x) \quad x \in U \end{aligned}$$

$$(dx_i(X))(x) := (dx_i)_x(X(x))$$

Definition. Seien $B_1 \in \mathfrak{X}^{(r_1, 0)}(M)$ und $B_2 \in \mathfrak{X}^{(r_2, 0)}(M)$.

Dann ist das Tensorprodukt $B_1 \otimes B_2 \in \mathfrak{X}^{(r_1+r_2, 0)}(M)$ von B_1 und B_2 definiert durch

$$(B_1 \otimes B_2)(X_1, \dots, X_{r_1+r_2}) := B_1(X_1, \dots, X_{r_1}) \cdot B_2(X_{r_1+1}, \dots, X_{r_1+r_2})$$

Beispiel 47. TENSORPRODUKT FÜR KANONISCHE BASISFELDER

Sei $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ eine zulässige Karte, und bezeichne

$$\delta_J^I = \begin{cases} 0 & , I \neq J \\ 1 & , I = J \end{cases} \quad \text{mit Reihenfolge}$$

dann ist mit $dx_{i_1} \otimes \dots \otimes dx_{i_r} \in \mathfrak{X}^{(r,0)}(U)$

$$(dx_{i_1} \otimes \dots \otimes dx_{i_r})\left(\frac{\partial}{\partial x_{j_1}}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_{j_r}}\right) = \delta_J^I$$

und damit

$$(dx_{i_1} \otimes \dots \otimes dx_{i_r})(X_1, \dots, X_r) = \xi_1^{i_1} \cdot \dots \cdot \xi_r^{i_r},$$

wobei $X_j = \sum_{\alpha=1}^n \xi_j^\alpha \frac{\partial}{\partial x_\alpha}$.

Satz 2.29. [Lokalisierungssatz für Tensorfelder]

Sei $B \in \mathfrak{X}(M)$ und $(X_1, \dots, X_r), (\tilde{X}_1, \dots, \tilde{X}_r)$ Vektorfelder auf M mit $X_i(x) = \tilde{X}_i(x)$ für $i = 1, \dots, r$. Dann gilt

$$B(X_1, \dots, X_r)(x) = B(\tilde{X}_1, \dots, \tilde{X}_r)(x).$$

Beweis: Sei $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ eine zulässige Karte um $x \in M$. Sei $f \in C^\infty(M)$ mit $f(x) = 1$, $\text{supp}(f) \subset U$. Seien $Y_1, \dots, Y_n \in \mathfrak{X}(M)$ definiert durch

$$Y_i(y) = \begin{cases} f(y) \cdot \frac{\partial}{\partial x_i}(y) & , y \in U \\ 0 & , \text{sonst} \end{cases}$$

Dann ist

$$fX_i = \sum_{j=1}^n \xi^{ij} Y_j, \quad f\tilde{X}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{\xi}^{ij} Y_j$$

und somit

$$\begin{aligned} B(X_1, \dots, X_r)(x) &= \underbrace{f(x)^r}_{=1} B(X_1, \dots, X_r)(x) \\ &= (f^r B(X_1, \dots, X_r))(x) \\ &= B(fX_1, \dots, fX_r)(x) \\ &= B\left(\sum_{j_1=1}^n \xi^{1j_1} Y_{j_1}, \dots, \sum_{j_r=1}^n \xi^{rj_r} Y_{j_r}\right)(x) \\ &= \left(\sum_{j_1, \dots, j_r=1}^n \xi^{1j_1} \dots \xi^{rj_r} B(Y_{j_1}, \dots, Y_{j_r})\right)(x) \\ &= \sum_{j_1, \dots, j_r=1}^n \xi^{1j_1}(x) \dots \xi^{rj_r}(x) B(Y_{j_1}, \dots, Y_{j_r})(x) \end{aligned}$$

aus $f(x)X_i(x) = f(x)\tilde{X}_i(x)$ folgt jedoch $\xi^{ij_i}(x) = \tilde{\xi}^{ij_i}(x)$, d.h.

$$B(X_1, \dots, X_r)(x) = \sum_{j_1, \dots, j_r=1}^n \tilde{\xi}^{1j_1}(x) \dots \tilde{\xi}^{rj_r}(x) B(Y_{j_1}, \dots, Y_{j_r})(x)$$

Analog rechnet man dies für $B(\tilde{X}_1, \dots, \tilde{X}_r)(x)$ und daraus folgt dann die Behauptung. □

Folgerung

Ein Tensorfeld $B \in \mathfrak{X}^{(r,s)}(M)$ läßt sich auf eine offene Teilmenge U einschränken. $B_U \in \mathfrak{X}^{(r,s)}(U)$ ist definiert durch

$$B_U(X_1, \dots, X_r)(x) := B(\hat{X}_1, \dots, \hat{X}_r)(x),$$

wobei $x \in U$, $X_i \in \mathfrak{X}(U)$, $\hat{X}_i \in \mathfrak{X}(M)$ mit $\hat{X}_i|_U = X_i$. Ist insbesondere $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ eine zulässige Karte und $B \in \mathfrak{X}^{(r,0)}(M)$, so ist

$$B_U = \sum_{i_1, \dots, i_r=1}^n B_{i_1 \dots i_r} \underbrace{dx_{i_1} \otimes \dots \otimes dx_{i_r}}_{\in \mathfrak{X}^{(r,0)}(U)},$$

wobei $B_{i_1 \dots i_r} \in C^\infty(U)$ definiert ist durch $B_{i_1 \dots i_r} := B_U(\frac{\partial}{\partial x_{i_1}}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_{i_r}})$.

Satz 2.30. *Es existiert eine bijektive Beziehung*

$$\begin{aligned} \mathfrak{X}^{(r,s)}(M) &\longleftrightarrow \Gamma(T^{(r,s)}(M)) \quad (s = 0, 1) \\ B &\mapsto (M \ni x \mapsto B_x \in T^{(r,s)}(T_x M)) \\ &\text{für } v_i \in T_x M \text{ wähle } X_i \in \mathfrak{X}(M) \text{ mit } X_i(x) = v_i \\ &B_x(v_1, \dots, v_r) := B(X_1, \dots, X_r)(x) \\ B &\leftarrow (M \ni x \mapsto B_x) \in \Gamma(T^{(r,s)}(M)) \end{aligned}$$

wobei

$$B(X_1, \dots, X_r)(x) := B_x(X_1(x), \dots, X_r(x))$$

Definition. Sei $\phi : M \rightarrow N$ eine glatte Abbildung und $B \in \mathfrak{X}^{(r,0)}(N)$. Dann induziert dies ein Tensorfeld $\phi^*B \in \mathfrak{X}^{(r,0)}(M)$ durch

$$(\phi^*B)(X_1, \dots, X_r)(x) := B_{\phi(x)}(d\phi_x(X_1(x)), \dots, d\phi_x(X_r(x))) \quad X_i \in \mathfrak{X}(M)$$

ϕ^*B heißt induziertes Tensorfeld.

Eine k -Form auf M ist ein alternierendes $(k, 0)$ -Tensorfeld

$$\omega : \underbrace{\mathfrak{X}(M) \times \dots \times \mathfrak{X}(M)}_{k\text{-mal}} \rightarrow C^\infty(M)$$

mit den Eigenschaften

- ω ist $C^\infty(M)$ -linear
- $\omega(\dots, X, \dots, Y, \dots) = -\omega(\dots, Y, \dots, X, \dots)$

$\Omega^k(M)$ bezeichnet den Modul der k -Formen über M .

Bemerkung

Es gilt $\Omega^k(M) \simeq \Gamma(\wedge^k M)$.

2.7 Die “Zerlegung der 1” auf einer glatten Mannigfaltigkeit

Die “Zerlegung der 1” hat eine zentrale Bedeutung für die Analysis und Geometrie auf Mannigfaltigkeiten. Größen, die man im \mathbb{R}^n kennt, kann man dadurch auf Mannigfaltigkeiten “zusammenkleben”, zum Beispiel das Integral oder Skalarprodukte.

Definition. Sei M eine C^∞ -Mannigfaltigkeit, \mathcal{A} ein zulässiger Atlas auf M . Eine abzählbare Familie $\{f_n\}_{n=1}^\infty$ von nichtnegativen Funktionen $f_n \in C^\infty(M)$ heißt Zerlegung der 1 zu (M, \mathcal{A}) , falls

1. Für alle $n \in \mathbb{N}$ ist $\text{supp } f_n := \text{cl}\{x \in M \mid f_n(x) > 0\}$ kompakt und in einer Kartenumgebung von \mathcal{A} enthalten.
2. Die Familie der Mengen $\{\text{supp } f_n\}_{n=1}^\infty$ ist lokal endlich, d.h. zu jedem $x \in M$ existiert eine Umgebung $U(x)$ so dass $U(x) \cap \text{supp } f_n \neq \emptyset$ nur für endlich viele $n \in \mathbb{N}$.
3. $\sum_{n=1}^\infty f_n(x) \equiv 1 \quad \forall x \in M$.

Bemerkungen

- $\sum_{n=1}^\infty f_n$ ist nach 2.) eine C^∞ -Funktion, da für alle $x \in M$ die Summe auf einer Umgebung $U(x)$ endlich ist.
- Ist eine Familie von Mengen $(A_n)_{n=1}^\infty$, $A_n \subset M$, lokal-endlich und $K \subset M$ kompakt, so schneidet sich K nur mit endlich vielen Mengen aus $(A_n)_{n=1}^\infty$.

Beweis: Da zu jedem $x \in M$ eine Umgebung $U(x) \subset M$ mit $U(x) \cap A_n = \emptyset$ für fast alle $n \in \mathbb{N}$ existiert und $K \subset M = \bigcup_{x \in M} U(x)$ gilt, gibt es endlich viele Mengen $U(x_i)$ mit

$$K \subset U(x_1) \cup \dots \cup U(x_m)$$

Jedes $U(x_i)$ schneidet sich nur mit endlich vielen Mengen aus $(A_n)_{n=1}^\infty$ und somit gilt das auch für K .

□

Ziel dieses Abschnittes ist es, zu zeigen, dass zu jeder Mannigfaltigkeit M und jedem zulässigen Atlas \mathcal{A} eine Zerlegung der 1 existiert.

Lemma 2.2. Sei M eine glatte MF, $U \subset M$ offen und $K \subset U$ kompakt. Dann existiert eine nichtnegative Funktion $f \in C^\infty(M)$ mit

$$f|_K > 0 \text{ und } \text{supp } f \subset U.$$

Beweis:

1. *Behauptung:* Für jedes $x \in U$ existiert eine Umgebung $V(x) \subset U$ und eine nicht-negative Funktion $f_x \in C^\infty(M)$, so dass $f_x(x) > 0$ und $\text{supp} f_x \subset V(x)$.

Wähle eine Karte $(V(x), \varphi)$ um x mit $\varphi(x) = 0$ und $V(x) \subset U$. $\varphi(V(x)) \subset \mathbb{R}^n$ ist eine Umgebung von 0. Wähle ein $\varepsilon > 0$, so dass $\text{cl}(K(0, \varepsilon)) \subset \varphi(V(x))$.

$$p(t) := \begin{cases} e^{-1/t^2}, & \text{falls } t > 0 \\ 0, & \text{falls } t \leq 0 \end{cases} \text{ ist eine } C^\infty\text{-Funktion auf } \mathbb{R}.$$

$f_x \in C^\infty(M)$ wird definiert durch

$$f_x(y) := \begin{cases} p(\varepsilon^2 - \|\varphi(y)\|^2), & \text{falls } y \in V(x) \\ 0, & \text{falls } y \in M \setminus V(x) \end{cases}.$$

Es gilt: $f_x(x) = p(\varepsilon^2) > 0$ und $\text{supp} f_x \subset \varphi^{-1}(\text{cl}K(0, \varepsilon)) \subset V(x) \subset U$.

2. *Konstruktion von f :*

Sei $x \in K \subset U$. Wähle $f_x \in C^\infty(M)$ wie in 1). $W(x) := \{y \in M \mid f_x(y) > 0\}$ ist eine offene Teilmenge von M .

$$\text{cl}W(x) = \text{supp} f_x \subset V(x) \subset U \quad (*)$$

$K \subset \bigcup_{x \in K} W(x)$. Da K kompakt ist, existiert endliche Teilüberdeckung:

$$K \subset W(x_1) \cup \dots \cup W(x_n)$$

Sei nun

$$f := f_{x_1} + \dots + f_{x_n} \in C^\infty(M)$$

dann gilt:

- f ist nichtnegativ.
- $f|_K > 0$, da es zu jedem $x \in K$ ein x_i gibt mit $x \in W(x_i)$ und $f_{x_i}(x) > 0$ und $f_{x_j}(x) \geq 0$ für $i \neq j$.

und

$$\begin{aligned} \text{supp} f &= \text{cl}\{y \in M \mid f(y) > 0\} = \text{cl}(W(x_1) \cup \dots \cup W(x_n)) \\ &= \text{cl}W(x_1) \cup \dots \cup \text{cl}W(x_n) \stackrel{(*)}{\subset} U \end{aligned}$$

□

Satz 2.31. Sei M eine C^∞ -Mannigfaltigkeit und \mathcal{A} ein zulässiger Atlas. Dann existiert eine Zerlegung der 1 zu (M, \mathcal{A}) .

Beweis:

1. Sei $\mathcal{A} = \{(U_\alpha, \varphi_\alpha)\}_{\alpha \in \Lambda}$. OBdA können wir annehmen, dass $\mathcal{U} = \{U_\alpha\}_{\alpha \in \Lambda}$ eine abzählbare, lokal-endliche Überdeckung und $\text{cl}U_\alpha$ kompakt ist, denn nach Satz 1.11 existiert zu \mathcal{U} eine solche Verfeinerung.

2. *Behauptung:* Es existiert eine offene Überdeckung $\mathcal{W} = \{W_\alpha\}_{\alpha \in \Lambda}$ von M mit $clW_\alpha \subset U_\alpha$.

Zu $x \in M$ existiert ein $\alpha(x) \in \Lambda$ mit $x \in U_{\alpha(x)}$. Wir wählen eine offene Menge $\mathcal{O}(x)$ mit $cl\mathcal{O}(x) \subset U_{\alpha(x)}$. Dies ergibt eine offene Überdeckung \mathcal{O} von M . Nach Satz 11 aus Kapitel 1 existiert eine abzählbare, lokal-endliche Verfeinerung $\mathcal{N} = \{N_\kappa\}_{\kappa \in K}$ von \mathcal{O} , d.h.

- (a) $M = \bigcup_{\kappa \in K} N_\kappa$.
- (b) $N_\kappa \subset \mathcal{O}(x) \subset U_{\alpha(x)}$ für ein $x \in M$.
- (c) $\{N_\kappa\}_{\kappa \in K}$ ist lokal endlich.
- (d) $clN_\kappa \subset cl\mathcal{O}(x) \subset U_{\alpha(x)}$ für ein $x \in M$.

Sei $\alpha \in \Lambda$ fix. $J_\alpha := \{\kappa \in K \mid clN_\kappa \subset U_\alpha\}$

$\{N_\kappa\}$ ist lokal-endlich, d.h. für alle $x \in M$ existiert eine Umgebung $U(x)$, die sich nur mit endlich vielen N_κ schneidet. clU_α ist kompakt und $clU_\alpha \subset \bigcup_{x \in M} U(x)$. Also gibt es $x_1, \dots, x_m \in M$ mit $clU_\alpha \subset U(x_1) \cup \dots \cup U(x_m)$. Da jedes $U(x_i)$ sich nur mit endlich vielen N_κ schneidet, schneidet sich auch clU_α nur mit endlich vielen N_κ . $\implies J_\alpha$ ist endlich.

Sei nun $W_\alpha := \bigcup_{\kappa \in J_\alpha} N_\kappa$. W_α ist offen.

$\mathcal{W} = \{W_\alpha\}_{\alpha \in \Lambda}$ ist eine abzählbare Überdeckung von M .

$$clW_\alpha = cl\left(\bigcup_{\kappa \in J_\alpha} N_\kappa\right) = \bigcup_{\kappa \in J_\alpha} clN_\kappa \subset U_\alpha$$

Außerdem ist clW_α kompakt, da $clW_\alpha \subset clU_\alpha$ ist und clU_α nach 1. kompakt ist.

3. *Definition der Zerlegung der 1:*

Wir wenden das Lemma 2.2 auf $cl(W_\alpha) \subset U_\alpha$ an.

Es existiert eine nichtnegative Funktion $g_\alpha \in C^\infty(M)$ mit $g_\alpha|_{clW_\alpha} > 0$ und $\text{supp}g_\alpha \subset U_\alpha$. Sei $g := \sum_{\alpha \in \Lambda} g_\alpha$. g existiert und ist eine C^∞ -Funktion, da $\{U_\alpha\}$ eine lokal endliche Familie von Mengen ist und g_α außerhalb von U_α verschwindet, d.h. $\sum_{\alpha \in \Lambda} g_\alpha|_{U(x)}$ ist für jedes $x \in M$ eine endliche Summe.

$g(x) > 0$ für alle $x \in M$, da zu jedem $x \in M$ ein $\alpha \in \Lambda$ existiert mit $x \in W_\alpha$ und $g_\alpha > 0$ auf clW_α und $g_\beta \geq 0$ für $\beta \neq \alpha$.

$$f_\alpha := \frac{g_\alpha}{g} \in C^\infty(M)$$

Es gilt:

- (a) $f_\alpha \geq 0$, $\text{supp}f_\alpha = \text{supp}g_\alpha \subset U_\alpha$
- (b) $\{\text{supp}f_\alpha\}_{\alpha \in \Lambda}$ ist lokal endlich, da $\{U_\alpha\}_{\alpha \in \Lambda}$ lokal endlich ist.
- (c) $\sum_{\alpha \in \Lambda} f_\alpha = \frac{\sum_{\alpha \in \Lambda} g_\alpha}{g} \equiv 1$

Damit wird $\{f_\alpha\}_{\alpha \in \Lambda}$ zu einer Zerlegung der 1 von (M, \mathcal{A}) .

□

Aus dem Beweis ergibt sich die

Folgerung

Sei M eine C^∞ -Mannigfaltigkeit. Dann existiert ein abzählbarer zulässiger Atlas

$$\mathcal{A} = \{(U_\alpha, \varphi_\alpha)\}_{\alpha \in \Lambda},$$

sodass

1. $\{U_\alpha\}_\alpha$ ist eine lokal-endliche Überdeckung von M .
2. $\text{cl}U_\alpha$ ist kompakt für alle $\alpha \in \Lambda$.
3. Es existiert eine Zerlegung der 1 $\{f_\alpha\}_{\alpha \in \Lambda}$ zu (M, \mathcal{A}) mit $\text{supp}f_\alpha \subset U_\alpha$.

Satz 2.32. Sei M eine C^∞ -Mannigfaltigkeit, $U \subset M$ offen, $K \subset M$ kompakt und $K \subset U$. Dann existiert eine nichtnegative Funktion $f \in C^\infty(M)$ mit $f|_K \equiv 1$ und $\text{supp}f \subset U$.

Beweis: Wir wählen einen Atlas $\mathcal{A} = \{(U_\alpha, \varphi_\alpha)\}_{\alpha \in \Lambda}$ aus der Folgerung, so dass entweder $U_\alpha \subset U$ oder $U_\alpha \subset M \setminus K$. Das ist möglich, da U und $M \setminus K$ offen sind. (Man schneidet die Kartenbereiche eines beliebigen Atlas \mathcal{A} mit U und $M \setminus K$.)

Sei $\{f_\alpha\}_{\alpha \in \Lambda}$ eine Zerlegung der 1 zu \mathcal{A} , $\text{supp}f_\alpha \subset U_\alpha$ und

$$\tilde{\Lambda} := \{\alpha \in \Lambda \mid \text{supp}f_\alpha \cap K \neq \emptyset\}$$

$\tilde{\Lambda}$ ist endlich, da $\{\text{supp}f_\alpha\}$ lokal-endlich und K kompakt ist, denn zu jedem $x \in K$ existiert eine Umgebung $U(x)$, die sich nur mit endlich vielen $\text{supp}f_\alpha$ schneidet, und $K \subset U(x_1) \cup \dots \cup U(x_m)$.

Nach Wahl des Atlas \mathcal{A} gilt: $\alpha \in \tilde{\Lambda} \implies \text{supp}f_\alpha \subset U_\alpha \subset U$, denn für $\alpha \in \tilde{\Lambda}$ kann $\text{supp}f_\alpha \subset U_\alpha \subset M \setminus K$ nicht gelten. Für

$$f := \sum_{\alpha \in \tilde{\Lambda}} f_\alpha \in C^\infty(M)$$

gilt dann:

1. $f \geq 0$
2. $f|_K \equiv 1$, da für alle $x \in K$ und $\alpha \in \Lambda$ aus $f_\alpha(x) > 0$ folgt, dass α aus $\tilde{\Lambda}$ ist, d.h.

$$f|_K = \sum_{\alpha \in \tilde{\Lambda}} f_\alpha|_K \equiv 1.$$

3. $\text{supp}f = \bigcup_{\alpha \in \tilde{\Lambda}} \text{supp}f_\alpha \subset U$.

□

2.8 Orientierbare Mannigfaltigkeiten

Zur Erinnerung

Orientierung eines Vektorraumes V mit Dimension n .

Sei dazu

$$B(V) = \text{Menge der Basen in } V.$$

Wir führen darauf eine Äquivalenzrelation ein:

$$\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_n) \sim \mathbf{b} = (b_1, \dots, b_n) \iff \det \mathfrak{M}_{\mathbf{a}, \mathbf{b}} > 0,$$

dabei bezeichne $\mathfrak{M}_{\mathbf{a}, \mathbf{b}}$ die Übergangsmatrix von \mathbf{a} nach \mathbf{b} .

Definition. Eine Orientierung in V ist eine Äquivalenzklasse von Basen

$$[(a_1, \dots, a_n)] \in B(V)_{/\sim}$$

.

Bemerkungen

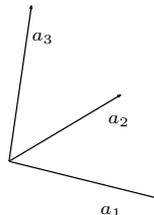
- Es existieren genau 2 mögliche Orientierungen von V , da $\text{card } B(V)_{/\sim} = 2$.
- Mit O_V wollen wir eine Orientierung von V bezeichnen. Sei dann das Paar (V, O_V) vorgegeben, so wollen wir $\mathbf{a} \in B(V)_{/\sim}$ positiv orientiert nennen, falls $\mathbf{a} \in O_V$. Anderenfalls heißt \mathbf{a} negativ orientiert.

Beispiel 48. BEISPIELE FÜR ORIENTIERUNGEN VON VR

1. Die Orientierung $O_{\mathbb{R}^n} = [(e_1, \dots, e_n)]$ des \mathbb{R}^n , wobei $e_i = (0, \dots, 0, \underbrace{1}_{i\text{-te Stelle}}, 0, \dots, 0)$, heißt positive Orientierung des \mathbb{R}^n .
2. Im \mathbb{R}^2 sind $(a_1, a_2) \in O_{\mathbb{R}^2} \iff \varphi \in (0, 2\pi]$, wobei



3. Im \mathbb{R}^3 sind $(a_1, a_2, a_3) \in O_{\mathbb{R}^3}$ genau dann, wenn sie die "rechte Hand Regel" erfüllen:



Und nun wollen wir den Begriff der Orientierung auf Mannigfaltigkeiten übertragen.

Definition. Sei M^n eine C^∞ -Mannigfaltigkeit. Eine Orientierung von M ist eine Familie von Orientierungen der Tangentialräume

$$O_M = \{O_{T_x M}\}_{x \in M}$$

mit folgender Eigenschaft:

Zu jedem $x \in M$ existiert eine zulässige Karte $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$, sodass für deren kanonische Basis gilt:

$$\left(\frac{\partial}{\partial x_1}(y), \dots, \frac{\partial}{\partial x_n}(y) \right) \in O_{T_y M} \text{ für alle } y \in U$$

M heißt genau dann orientierbar, wenn eine Orientierung O_M existiert.

Sei (M, O_M) eine orientierte MF. Eine zulässige Karte $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ heißt positiv orientiert bzw. negativ orientiert, falls

$$\left(\frac{\partial}{\partial x_1}(y), \dots, \frac{\partial}{\partial x_n}(y) \right) \in O_{T_y M} \text{ für alle } y \in U$$

bzw.

$$\left(\frac{\partial}{\partial x_1}(y), \dots, \frac{\partial}{\partial x_n}(y) \right) \notin O_{T_y M} \text{ für alle } y \in U$$

Bemerkung

Sei $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ eine zulässige Karte und sei $\varphi^- := (-x_1, x_2, \dots, x_n)$, dann gilt:

$$(U, \varphi) \text{ ist positiv orientiert} \iff (U, \varphi^-) \text{ ist negativ orientiert}$$

Beispiel 49. BEISPIELE FÜR ORIENTIERBARE MF

- $\mathbb{R}^n, \mathbb{C}^n$ und $\text{graf}(f)$ mit $f : U_{\text{offen}} \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ sind orientierbar, da man sie durch eine einzige Karte überdecken kann.
- S^1 ist orientierbar, denn für $\gamma(t) = (\cos t, \sin t)$ ist $O_{T_x S^1} = [\gamma'(t)]$ eine Orientierung.

Satz 2.33. M^n ist genau dann orientierbar, falls ein zulässiger Atlas \mathcal{A} auf M existiert, sodass für alle Karten $(U, \varphi), (V, \psi) \in \mathcal{A}$ mit $U \cap V \neq \emptyset$ gilt:

$$\det \left(D(\psi \circ \varphi^{-1})_{\varphi(x)} \right) > 0 \text{ für alle } x \in U \cap V$$

Beweis:

(\Rightarrow): Sei O_M eine Orientierung von M . Nach Definition existiert nun um $x \in M$ eine zulässige Karte (U_x, φ_x) , sodaß

$$\left(\frac{\partial}{\partial x_1}(y), \dots, \frac{\partial}{\partial x_n}(y) \right) \in O_{T_y M} \text{ für alle } y \in U_x$$

Betrachten wir nun den Atlas $\mathcal{A} = \{(U_x, \varphi_x)\}_{x \in M}$. Sei daraus (U_x, φ_x) und (U_y, φ_y) mit $U_x \cap U_y \neq \emptyset$, dann ist mit $z \in U_x \cap U_y$ und der Transformationsformel für kanonische Basen

$$D(\varphi_y \circ \varphi_x^{-1})_{\varphi_x(z)} = \mathfrak{M}_{\left(\frac{\partial}{\partial x_i}(z)\right)} \left(\frac{\partial}{\partial y_j}(z)\right). \quad (*)$$

Da aber nach Voraussetzung (U_x, φ_x) und (U_y, φ_y) positiv orientiert sind, gilt

$$\det \mathfrak{M}_{\left(\frac{\partial}{\partial x_i}(z)\right)\left(\frac{\partial}{\partial y_j}(z)\right)} > 0 \quad (**)$$

Damit haben wir einen Atlas mit den gewünschten Eigenschaften gefunden.

(\Leftarrow): Sei $x \in M$ und \mathcal{A} der besagte Atlas. Sei weiterhin $(U, \varphi) \in \mathcal{A}$ eine Karte um x , dann definieren wir

$$O_{T_x M} := \left[\left(\frac{\partial}{\partial x_1}(x), \dots, \frac{\partial}{\partial x_n}(x) \right) \right].$$

Wegen (*) und (**) ist dies korrekt definiert und damit bildet

$$O_M := \{O_{T_x M}\}_{x \in M}$$

eine Orientierung von M .

□

Folgerung

Seien M und N orientierbar, so ist auch $M \times N$ orientierbar. Denn seien $(U_M \times U_N, \varphi_M \times \varphi_N)$ und $(V_M \times V_N, \psi_M \times \psi_N)$ aus dem Produktatlas $\mathcal{A}_{M \times N}$, so gilt

$$D \left((\psi_1 \times \psi_2) \circ (\varphi_1 \times \varphi_2)^{-1} \right) = \begin{pmatrix} D(\psi_1 \circ \varphi_1^{-1}) & 0 \\ 0 & D(\psi_2 \circ \varphi_2^{-1}) \end{pmatrix}.$$

Damit wird **z.B.** der n -Torus $T^n = S^1 \times \dots \times S^1$ orientierbar.

Satz 2.34. Eine n -dimensionale MF M^n ist genau dann orientierbar, falls eine n -Form $\omega \in \Omega^n(M)$ mit der Eigenschaft

$$\omega_x \neq 0 \quad \forall x \in M$$

existiert.

Beweis:

(\Leftarrow): Sei ω die besagte n -Form, so existiert für jedes $x \in M$ eine Basis $(a_1(x), \dots, a_n(x))$ in $T_x M$ mit $\omega_x(a_1(x), \dots, a_n(x)) \neq 0$. Sei $(b_1(x), \dots, b_n(x))$ nun eine weitere Basis dieser Art, so gilt bekanntlich aufgrund der Schiefsymmetrie von ω_x

$$\omega_x(a_1(x), \dots, a_n(x)) = \det(\mathfrak{M}_{(a_i)(b_j)}) \omega_x(b_1(x), \dots, b_n(x)) > 0.$$

D.h. die Definition

$$O_{T_x M} := [(a_1(x), \dots, a_n(x))]$$

ist korrekt. Wir zeigen nun, dass $O_M := \{O_{T_x M}\}_{x \in M}$ eine Orientierung von M bildet:

Sei $x \in M$ und (U, φ) eine zulässige Karte um x und U zusammenhängend. Aufgrund der Stetigkeit ist dann entweder

$$\omega_y \left(\frac{\partial}{\partial x_1}(y), \dots, \frac{\partial}{\partial x_n}(y) \right) > 0 \quad \forall y \in U,$$

oder

$$\omega_y \left(\frac{\partial}{\partial x_1}(y), \dots, \frac{\partial}{\partial x_n}(y) \right) < 0 \quad \forall y \in U.$$

Im ersten Fall ist realisiert (U, φ) die Orientierung, im zweiten ist es dagegen (U, φ^-) .

(\Rightarrow): Hier benutzen wir die Zerlegung der 1 :

Sei $\mathcal{A} = \{(U_i, \varphi_i)\}_{i \in I}$ ein abzählbarer Atlas aus positiv orientierbaren Karten und $\{f_i\}_{i \in I}$ eine Zerlegung der 1 zu \mathcal{A} mit $\text{supp } f_i \subset U_i$. Zu jeder Karte $\varphi_i = (x_1, \dots, x_n)$ definieren wir $\omega_i := dx_1 \wedge \dots \wedge dx_n \in \Omega(U_i)$ und betrachten

$$\omega := \sum_{i \in I} \underbrace{f_i \omega_i}_{\in \Omega(M)}.$$

Zu zeigen ist nun, dass $\omega_x \neq 0$ für alle $x \in M$:

Sei $(a_1(x), \dots, a_n(x)) \in O_{T_x M}$, dann ist $(\omega_i)_x(a_1(x), \dots, a_n(x)) > 0$ für jedes $x \in U_i$ und $i \in I$. Da nun

$$f_i(x) \cdot (\omega_i)_x(a_1(x), \dots, a_n(x)) \geq 0, \text{ aber } \sum_{i \in I} f_i = 1,$$

existiert ein $j \in I$ mit $f_j > 0$, sodass

$$\omega_x(a_1(x), \dots, a_n(x)) > 0$$

□

Dies erlaubt nun folgende

Definition. Sei (M^n, O_M) eine orientierte Mannigfaltigkeit.

Eine n -Form $\omega \in \Omega^n(M)$ mit

$$\omega_x(a_1(x), \dots, a_n(x)) > 0 \text{ für alle } [(a_1(x), \dots, a_n(x))] \in O_{T_x M}$$

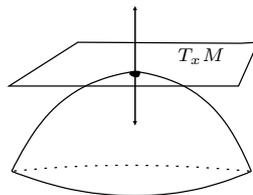
heißt Volumenform von (M, O_M) .

Satz 2.35. Sei M^n eine Hyperfläche des \mathbb{R}^{n+1} , d.h. M ist eine n -dimensionale UMF von \mathbb{R}^{n+1} , dann gilt:

M ist genau dann orientierbar, falls ein stetiges Einheitsnormalenvektorfeld existiert

$$\begin{aligned} \mu : M^n &\longrightarrow \mathbb{R}^{n+1} \\ x &\mapsto \mu(x) \in N_x M = (T_x M)^\perp \end{aligned}$$

wobei $\|\mu(x)\| \equiv 1$.



Da $N_x M = (T_x M)^\perp$ ein ein-dimensionaler Unterraum ist, existieren dort nur 2 Vektoren der Länge 1.

Beweis:

Sei $O_M = \{O_{T_x M}\}_{x \in M}$ eine Orientierung auf M , dann wählen wir ein $\mu(x) \in N_x M$ mit $\|\mu(x)\| = 1$, sodass

$$\underbrace{(v_1, \dots, v_n, \mu(x))}_{\in O_{T_x M}} \in O_{\mathbb{R}^{n+1}}.$$

Damit ist $\mu(x)$ eindeutig bestimmt, denn mit einem weiteren $(w_1, \dots, w_n) \in O_{T_x M}$ ergibt sich

$$0 < \det(\mathfrak{M}_{v,w}) = \det \begin{pmatrix} \mathfrak{M}_{v,w} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \det(\mathfrak{M}_{(v,\mu),(w,\mu)}) \quad (*)$$

Stetigkeit von μ :

Für eine positiv orientierte Karte (U, φ) ergibt sich aus den Eigenschaften des Vektorproduktes

$$\mu(x) = \frac{\frac{\partial}{\partial x_1}(x) \times \dots \times \frac{\partial}{\partial x_n}(x)}{\|\frac{\partial}{\partial x_1}(x) \times \dots \times \frac{\partial}{\partial x_n}(x)\|}$$

Diese Abbildung ist stetig.

(\Leftarrow): Sei $\mu : M \rightarrow \mathbb{R}^{n+1}$ ein stetiges Normalenfeld, so definieren wir

$$O_{T_x M} = [(v_1, \dots, v_n)] \iff (v_1, \dots, v_n, \mu(x)) \in O_{\mathbb{R}^{n+1}}.$$

Wegen Aussage (*) ist die Definition korrekt. Nun zur Orientierung:

Sei (U, φ) eine zulässige Karte und U zusammenhängend. Aufgrund der Stetigkeit der Determinanten ist

$$\left(\frac{\partial}{\partial x_1}(y), \dots, \frac{\partial}{\partial x_n}(y), \mu(y) \right) \in O_{\mathbb{R}^{n+1}} \quad \forall y \in U,$$

oder

$$\left(\frac{\partial}{\partial x_1}(y), \dots, \frac{\partial}{\partial x_n}(y), \mu(y) \right) \notin O_{\mathbb{R}^{n+1}} \quad \forall y \in U.$$

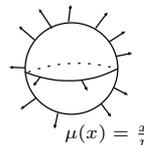
Im ersten Fall realisiert (U, φ) die Orientierung, und im zweiten Fall (U, φ^-) .

□

Folgerungen

1. $S_r^n = \{x \in \mathbb{R}^{n+1} \mid \|x\| = r\}$ ist orientierbar:

$T_x S_r^n = \{v \in \mathbb{R}^{n+1} \mid \langle v, x \rangle = 0\}$
somit ist $\mu(x) = \frac{x}{r}$ ein Einheitsnormalenfeld



2. gleichungsdefinierte Hyperflächen sind orientierbar:

Sei $f : U \subset \mathbb{R}^{n+1} \rightarrow \mathbb{R}$ eine glatte Abbildung und $0 \in \mathbb{R}$ ein regulärer Wert von f , dann bildet

$$M^n := f^{-1}(0) \subset \mathbb{R}^{n+1}$$

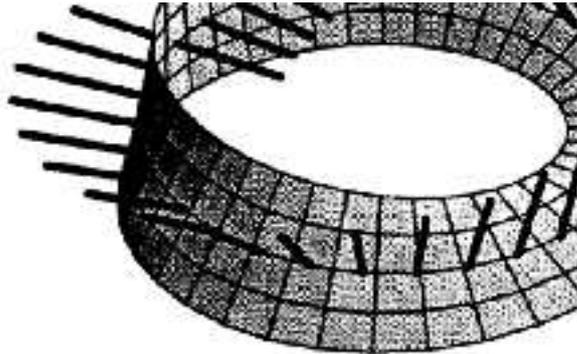
eine Hyperfläche mit $T_x M = \{v \in \mathbb{R}^{n+1} \mid \langle v, \text{grad } f(x) \rangle = 0\}$. Sei nämlich γ ein Weg auf M mit $\gamma(0) = x$ und $\gamma'(0) = v \in T_x M$, so gilt

$$0 = f(\gamma(0)) \Rightarrow [f \circ \gamma]'(0) = df_x(v) = \langle \text{grad } f(x), v \rangle = 0.$$

Damit ist dann $N_x M = \mathbb{R} \cdot \text{grad } f(x)$ und

$$\mu(x) = \frac{\text{grad } f(x)}{\|\text{grad } f(x)\|}$$

3. Das Möbiusband ist nicht orientierbar:



Normalen an ein Möbiusband

Das Normalenfeld ist nicht stetig!

2.9 Integration auf Mannigfaltigkeiten

Eine Integrationstheorie existiert auf jedem Maßraum (X, \mathcal{A}, μ) mit Menge X , σ -Algebra \mathcal{A} und Maß μ . Welchen Maßraum nimmt man nun für Mannigfaltigkeiten?

Definition. Sei M^n eine glatte Mannigfaltigkeit. Eine Teilmenge $A \subset M$ heißt messbar (Nullmenge), falls für alle Karten (U, φ) eines zulässigen Atlanten \mathcal{A}_M die Menge $\varphi(U \cap A)$ lebesgue-messbar (Lebesgue-Nullmenge) ist.

Diese Definition ist korrekt, da beide Begriffe invariant unter C^1 -Abbildungen sind.

Die Menge der messbaren Teilmengen bilden eine σ -Algebra, das Maß darauf definiert man indirekt.

Wir wollen nun erklären, was man unter dem Integral über eine n -Form ω versteht. Dazu setzen wir voraus, dass M^n eine orientierte Mannigfaltigkeit ist.⁷ Wir bezeichnen dann

$$\Omega_0^n(M) := \{\omega \in \Omega(M) \mid \text{supp } \omega = \text{cl } \{x \in M \mid \omega_x \neq 0\} \text{ ist kompakt}\}$$

die Menge der n -Formen mit kompaktem Träger, und

$$\Omega_+^n(M) := \{\omega \in \Omega(M) \mid \omega_x(a_1, \dots, a_n) \geq 0 \quad \forall (a_1, \dots, a_n) \in O_{T_x M}\}$$

bzw.

$$\Omega_-^n(M) := \{\omega \in \Omega(M) \mid \omega_x(a_1, \dots, a_n) \leq 0 \quad \forall (a_1, \dots, a_n) \in O_{T_x M}\}$$

als Menge der positiven bzw. negativen n -Formen. Zur Abkürzung schreiben wir kurz

$$\Omega_{0,\mp}^n(M) := \Omega_0^n(M) \cup \Omega_+^n(M) \cup \Omega_-^n(M)$$

Unser Ziel ist nun die Definition von

$$\int_A \omega \quad \text{mit } \omega \in \Omega_{0,\mp}^n(M)$$

Definition. Sei $\omega \in \Omega_{0,\mp}^n(M)$, $A \subset M^n$ messbar und enthalten in einer positiv-orientierten Karte (U, φ) . Das Integral von ω über A ist dann definiert durch

$$I_1 : \int_A \omega := \int_{\varphi(A)} (\omega_\varphi \circ \varphi^{-1}) d\lambda^n.$$

Dies ist das Lebesgue-Integral der stetigen Abbildung $\omega_\varphi \circ \varphi^{-1}$ über der Lebesguemenge $\varphi(A)$ im \mathbb{R}^n , wobei ω_φ aus der lokalen Darstellung von ω in U

$$\omega_U = \omega_\varphi dx^1 \wedge \dots \wedge dx^n$$

mit

$$\omega_\varphi(x) = \omega_x \left(\frac{\partial}{\partial x_1}(x), \dots, \frac{\partial}{\partial x_n}(x) \right)$$

kommt. (D.h. man integriert die lokalen Koeffizienten der Form ω über dem Koordinatenbereich von A .)

⁷Für nicht-orientierbare Mannigfaltigkeiten, siehe "Sulanke/Wintgen: Differentialgeometrie und Faserbündel"

Satz 2.36. Die Definition 2.9 (I_1) ist korrekt, d.h. sie ist unabhängig von der gewählten Karte.

Beweis:

Sei $A \subset U$ und $\varphi = (x_1, \dots, x_n)$ und $\psi = (y_1, \dots, y_n)$ zwei positiv-orientierte Kartenabbildungen auf U . Für die lokale Darstellung von ω gilt dann die Transformation

$$\omega = \omega_\varphi dx_1 \wedge \dots \wedge dx_n = \det \left(D(\psi \circ \varphi^{-1})_{\varphi(x)} \right) \cdot \omega_\psi dy_1 \wedge \dots \wedge dy_n$$

bzw.

$$\omega_\varphi(x) = \omega \left(\frac{\partial}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_n} \right) = \det \left(D(\psi \circ \varphi^{-1})_{\varphi(x)} \right) \underbrace{\omega \left(\frac{\partial}{\partial y_1}, \dots, \frac{\partial}{\partial y_n} \right)}_{\omega_\psi}$$

daraus folgt jedoch

$$\omega_\varphi \circ \varphi^{-1} = \det D \left(\underbrace{\psi \circ \varphi^{-1}}_T \right)_{\varphi(x)} \cdot \omega_\psi \circ \psi^{-1} \circ \left(\underbrace{\psi \circ \varphi^{-1}}_T \right). \quad (*)$$

Auf den Diffeomorphismus $T : \varphi(U) \rightarrow \psi(U)$ wenden wir nun die Transformationsformel für Lebesgueintegrale an:

$$\begin{aligned} \int_{\underbrace{T(\varphi(A))}_{\psi(A)}} (\omega_\psi \circ \psi^{-1}) d\lambda^n &= \int_{\varphi(A)} (\omega_\psi \circ \psi^{-1} \circ T) \cdot \underbrace{|\det DT|}_{>0 \text{ da orient.}} \\ &\stackrel{(*)}{=} \int_{\varphi(A)} (\omega_\psi \circ \varphi^{-1}) d\lambda^n \end{aligned}$$

□

I.A. liegt A jedoch nicht vollständig in einem Kartenbereich! Dies motiviert folgende

Definition. Ist $\omega \in \Omega_{0,\mp}(M)$, $A \subset M^n$ messbar und $\eta = \{(U_\alpha, \varphi_\alpha)\}$ ein abzählbarer, positiv-orientierter Atlas auf M mit Zerlegung der 1 $\{f_\alpha\}_{\alpha \in \Lambda}$, dann sei

$$I_2 : \int_A \omega := \sum_{\alpha \in \Lambda} \underbrace{\int_{A \cap U_\alpha} f_\alpha \cdot \omega}_{\text{nach Def 2.9}}$$

Bemerkungen

- Ist $\omega \in \Omega_0^n(M)$, so summiert man über endlich viele Summanden.
- Ist $\omega \in \Omega_\pm^n(M)$, so gilt $\int_{A \cap U_\alpha} f_\alpha \cdot \omega \geq 0$ bzw. $\int_{A \cap U_\alpha} f_\alpha \cdot \omega \leq 0$ für alle $\alpha \in \Lambda$.

Satz 2.37. Die Definition 2.9 (I_2) ist korrekt, d.h. sie ist unabhängig von den gewählten $(\eta, \{f_\alpha\})$. Falls A in einem Kartenbereich liegt, stimmt sie mit der Definition 2.9 überein.

Beweis:

1. Unabhängigkeit vom Atlas und der Zerlegung der 1:

Sei $\hat{\eta} = (V_\beta, \psi_\beta)$, $\{g_\beta\}$ ein weiterer positiv-orientierter Atlas mit Zerlegung der 1, dann ist

$$\text{supp}(f_\alpha g_\beta \omega) \subset U_\alpha \cap U_\beta$$

und damit

$$\begin{aligned} \sum_{\alpha} \int_{A \cap U_{\alpha}} f_{\alpha} \cdot \omega &= \sum_{\alpha} \int_{A \cap U_{\alpha}} \underbrace{\sum_{\beta} g_{\beta}}_{\text{endl. Sum.}} f_{\alpha} \cdot \omega \\ &= \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \int_{A \cap U_{\alpha} \cap U_{\beta}} f_{\alpha} g_{\beta} \cdot \omega = (*) \end{aligned}$$

Nun vertauschen wir die Summenzeichen. Dabei sei darauf hingewiesen, dass für ein fixiertes β nur endlich viele $f_{\alpha} g_{\beta}$ nicht verschwinden, da der Träger von g_{β} kompakt ist. Es ergibt sich also

$$\begin{aligned} (*) &= \sum_{\beta} \underbrace{\sum_{\alpha} \int_{A \cap U_{\alpha} \cap U_{\beta}} f_{\alpha} g_{\beta} \cdot \omega}_{\text{endl. Sum.}} \\ &= \sum_{\beta} \int_{A \cap U_{\beta}} \underbrace{\sum_{\alpha} f_{\alpha} g_{\beta} \cdot \omega}_{=1} \\ &= \sum_{\beta} \int_{A \cap U_{\beta}} g_{\beta} \cdot \omega \end{aligned}$$

2. Übereinstimmung der Definitionen:

Sei $A \subset U$ in einem Kartenbereich einer positiv-orientierten Karte (U, φ) . Zu zeigen ist nun, dass

$$\int_{\varphi(A)} \omega_{\varphi} \circ \varphi^{-1} d\lambda^n = \sum_{\alpha} \int_{A \cap U_{\alpha}} f_{\alpha} \cdot \omega.$$

Es gilt nun $(A \cap U_{\alpha}) \subset A \subset U$, d.h. wir können für $\int_{A \cap U_{\alpha}} f_{\alpha} \cdot \omega$ die Definition 2.9 verwenden:

$$\begin{aligned} \sum_{\alpha} \int_{A \cap U_{\alpha}} f_{\alpha} \cdot \omega &= \sum_{\alpha} \int_{\varphi(A \cap U_{\alpha})} (f_{\alpha} \cdot \omega_{\varphi}) \circ \varphi^{-1} d\lambda^n \\ &= \underbrace{\sum_{\alpha} \int_{\varphi(A \cap U)} (f_{\alpha} \circ \varphi^{-1}) \cdot (\omega_{\varphi} \circ \varphi^{-1}) d\lambda^n}_{\text{endl. Sum.}} \\ &= \int_{\varphi(A)} \underbrace{\left(\sum_{\alpha} f_{\alpha} \circ \varphi^{-1} \right)}_{=1} \cdot (\omega_{\varphi} \circ \varphi^{-1}) d\lambda^n \end{aligned}$$

□

Satz 2.38. Sei $\omega \in \Omega_{0,\mp}^n(M)$.

1. Rechenmethode der Integralberechnung

Aus $A = A_0 \cup \bigcup_{i=1}^{\infty} A_i$ mit Nullmenge A_0 und paarweise disjunkten, L -messbaren A_i ergibt sich

$$\int_A \omega = \sum_{i=1}^{\infty} \int_{A_i} \omega$$

D.h. man zerlege A in disjunkte Teilmengen A_i , die in Kartenumgebungen liegen und berechne $\int_{A_i} \omega$ mit I_1 (Definition 2.9). Die Nullmengen kann man weglassen.

2. Mittelwertsatz

Sei $x \in M$, $f \in C^\infty(M)$ und ω die Volumenform auf M , dann ist

$$f(x) = \lim_{U_i \rightarrow \{x\}} \frac{\int_{U_i} f \cdot \omega}{\int_{U_i} \omega}$$

wobei $\lim_{U_i \rightarrow \{x\}}$ bedeutet, dass $U_i \subset \varphi^{-1}(K_{\epsilon_i}(\varphi(x)))$ zsh. mit $\epsilon_i \rightarrow 0$.

3. Verhalten unter Diffeomorphismen

Sei $\Phi : M^n \rightarrow N^n$ ein orientierungserhaltender Diffeomorphismus, d.h. mit $(e_1, \dots, e_n) \in O_{T_x M}$ ist $(d\Phi_x(e_1), \dots, d\Phi_x(e_n)) \in O_{T_{\Phi(x)} N}$, so folgt

$$\int_A \Phi^* \omega = \int_{\Phi(A)} \omega$$

wobei natürlich $A \subset M$ messbar ist, und $\omega \in \Omega_{0,\mp}^n(M)$.

4. Verhalten bei Orientierungsänderung von M

(M, O_M) sei eine orientierte Mannigfaltigkeit und

$$-M := (M, -O := \{-O_{T_x M}\})$$

die Umkehrung der Orientierung in jedem Tangentialraum, dann gilt

$$\int_A \omega = - \int_{-A} \omega$$

Beweis:

Für 1.) wendet man das Integral I_2 an und auf $\int_{A \cap U_\alpha} f_\alpha \omega$ die entsprechenden Eigenschaften des L -Integrals im \mathbb{R}^n .

3.) und 4.) folgen aus der Transformationsformel für das L -Integral im \mathbb{R}^n (Vgl. Beweis von Satz 2.36).

□

Zum Abschluss dieses Abschnitts noch 2 Bemerkungen:

Sei $\mathcal{R}(M) := \{A \subset M \mid A \text{ ist messbar}\}$. Dies ist eine σ -Algebra auf M und für jedes $\omega \in \Omega_{0,\mp}^n(M)$ ist

$$\begin{aligned} \mu_\omega : \mathcal{R}(M) &\longrightarrow \bar{\mathbb{R}} \\ A &\longmapsto \int_A \omega \end{aligned}$$

ein signiertes Maß. Ist dann $f : M \longrightarrow [0, \infty]$ \mathcal{R} -messbar, so gilt

$$\int_M f d\mu_\omega = \int_A f \cdot \omega$$

Dadurch erhält man eine Integrationstheorie auf M mittels n-Formen.

2.10 Der Satz von Stokes

Der Zentrale Satz in der Integrationstheorie ist der Satz von Stokes :

Satz 2.39. Sei M^n eine Mannigfaltigkeit mit Rand ∂M und sei $\omega \in \Omega_{0,\mp}^{n-1}(M)$, so gilt

$$\int_M d\omega = \int_{\partial M} \omega$$

Diesen Satz wollen wir nun im Folgenden beweisen. Dies stellt lediglich eine Wiederholung zum Grundkurs “Analysis IV” dar, da alle Beweise analog zu denen aus der Theorie der Untermannigfaltigkeiten des \mathbb{R}^n geführt werden.

Zuerst werden wir auf den Begriff der “berandeten Mannigfaltigkeit” eingehen. Danach wollen wir wichtige Eigenschaften des Differential einer k-Form wiederholen, bevor wir dann im Anschluß den Satz von Stokes beweisen.

2.10.1 Mannigfaltigkeiten mit Rand

Wir bezeichnen mit

$$\mathbb{R}_+^n = \{x \in \mathbb{R}^n \mid x_n \geq 0\}$$

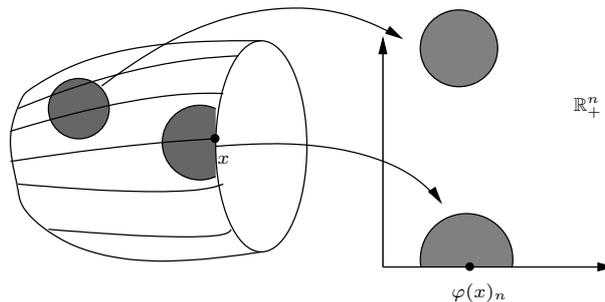
den “oberen” Halbraum mit induzierter Topologie.

Definition. M^n ist eine glatte Mannigfaltigkeit mit Rand: \iff

1. M^n ist ein top. Raum mit T_2 -Eigenschaft und abzählbarer Basis.
2. Es existiert eine offene Überdeckung $U = \{U_\alpha\}_{\alpha \in \Lambda}$ von M und Homöomorphismen

$$\varphi_\alpha : U_\alpha \longrightarrow \tilde{U}_\alpha \subset \mathbb{R}_+^n$$

3. $\varphi_\alpha \circ \varphi_\beta^{-1}$ sind C^∞ -Abbildungen.



Die Menge

$$\partial M = \{x \in M \mid \text{es ex. Karte } (U, \varphi) \text{ mit } \varphi(x)_n = 0\}$$

bezeichnen wir als Rand von M .

Die Menge

$$\text{int } M = \{x \in M \mid \text{es ex. Karte } (U, \varphi) \text{ mit } \varphi(x)_n > 0\}$$

alles Inneres von M .

Es ist nun klar, dass nur einer von diesen zwei Fällen eintreten wird. Denn sei $x \in (\partial M \cap \text{int } M)$, dann gibt es zum einen eine Karte

$$\varphi_1 : U_1 \longrightarrow \tilde{U}_1 \subset \mathbb{R}^n$$

mit $x \in U_1$ und $\varphi(x)_n > 0$, und eine Karte

$$\varphi_2 : U_2 \longrightarrow \tilde{U}_2 \subset \mathbb{R}_+^n$$

mit $x \in U_2$ und $\varphi(x)_n = 0$. Damit ist $\varphi_1(U_1 \cap U_2)$ offen in \mathbb{R}^n , $\varphi_2(U_1 \cap U_2) \subset \mathbb{R}_+^n$ jedoch nicht, da $\varphi_2(x) \in \partial \mathbb{R}_+^n$. Das Bild der offenen Menge $\varphi_1(U_1 \cap U_2)$ sollte unter dem Diffeomorphismus $\varphi_2 \circ \varphi_1^{-1}$ jedoch auch offen sein. Es gilt also

$$\partial M \cap \text{int } M = \emptyset$$

Aus der Konstruktion erkennt man leicht, dass es sich bei $\text{int } M$ um eine n -dimensionale Mannigfaltigkeit ohne Rand, und bei ∂M um eine $(n - 1)$ -dimensionale Mannigfaltigkeit ohne Rand handelt.

Ist nun M orientiert, so induziert dies eine Orientierung auf ∂M :

Definition. Sei (M^n, O_M) eine orientierte Mannigfaltigkeit mit Rand $\partial M \neq \emptyset$. Sei weiterhin $x \in \partial M$, $w = [\gamma]$ mit $\gamma(0) = x$ und

$$\gamma : (-\epsilon, 0] \longrightarrow M$$

dann heisst

$$O_{\partial M} := \{O_{T_x \partial M} := \{(v_1, \dots, v_{n-1}) \mid (w, v_1, \dots, v_{n-1}) \in O_M\}\}_{x \in \partial M}$$

die von O_M induzierte Orientierung auf ∂M .

2.10.2 Das Differential einer k -Form.

In Abschnitt 3 haben wir bereits das Differential einer glatten Funktion definiert. Dies war die folgende Abbildung, die jeder Nullform (=Funktion) eine 1-Form zuordnet

$$\begin{aligned} d : C^\infty(M) &\longrightarrow \Omega^1(M) \\ f &\longmapsto df \quad \text{wobei } df(X) := X(f) \end{aligned}$$

Die lokale Darstellung von df bezüglich einer Karte $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ ist gegeben durch

$$df = \sum_{i=1}^n df \left(\frac{\partial}{\partial x_i} \right) dx^i = \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i} (f) dx^i.$$

Wir definieren jetzt das Differential auf den k -Formen für $k \geq 1$, das jeder k -Form eine $(k + 1)$ -Form zuordnet.

Definition. Die Abbildung

$$\begin{aligned} d : \Omega^k(M) &\longrightarrow \Omega^{k+1}(M), \\ \omega &\longmapsto d\omega \end{aligned}$$

sei definiert durch

$$\begin{aligned} d\omega(X_0, \dots, X_k) &:= \sum_{j=0}^k (-1)^j X_j \left(\omega(X_0, \dots, \widehat{X}_j, \dots, X_k) \right) \\ &+ \sum_{0 \leq \alpha < \beta \leq k} (-1)^{\alpha+\beta} \omega([X_\alpha, X_\beta], X_0, \dots, \widehat{X}_\alpha, \dots, \widehat{X}_\beta, \dots, X_k). \end{aligned}$$

(Dabei bedeutet der "Hut" auf einem Eintrag X_i , d.h. \widehat{X}_i , dass das entsprechende Vektorfeld weggelassen wird.)

d heißt Differential auf dem Raum der k -Formen, $d\omega$ heißt Differential von ω .

Als Spezialfälle erhält man beispielsweise für das Differential von 1- bzw. 2-Formen

1. Sei $\omega \in \Omega^1(M)$ eine 1-Form. Dann gilt

$$d\omega(X, Y) = X(\omega(Y)) - Y(\omega(X)) - \omega([X, Y]).$$

2. Sei $\omega \in \Omega^2(M)$ eine 2-Form. Dann gilt

$$\begin{aligned} d\omega(X, Y, Z) &= X(\omega(Y, Z)) - Y(\omega(X, Z)) + Z(\omega(X, Y)) \\ &- \omega([X, Y], Z) + \omega([X, Z], Y) - \omega([Y, Z], X). \end{aligned}$$

Satz 2.40. [Eigenschaften des Differentials]

1. Die Abbildung $d : \Omega^k(M) \longrightarrow \Omega^{k+1}(M)$ ist korrekt definiert und linear.

(a) Sei $\omega \in \Omega^k(M)$ und $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ eine Karte auf M bezüglich derer ω die lokale Darstellung $\omega|_U = \sum_I \omega_I dx^I$ habe. Dann gilt für die lokale Darstellung von $d\omega$

$$d\omega|_U = \sum_I d\omega_I \wedge dx^I.$$

(b) $d(\omega \wedge \sigma) = d\omega \wedge \sigma + (-1)^{\deg \omega} \omega \wedge d\sigma$.

(c) $dd\omega = 0$ für alle $\omega \in \Omega^k(M)$ und $k \geq 0$.

(d) Ist $F : M \longrightarrow N$ eine glatte Abbildung und $\omega \in \Omega^k(N)$, dann gilt

$$d(F^*\omega) = F^*d\omega.$$

Beweis:

1. Nach Definition ist d offensichtlich linear. Die Schiefsymmetrie von $d\omega$ folgt aus der Schiefsymmetrie der k -Form ω bzw. des Kommutators $[\cdot, \cdot]$. Die C^∞ -Linearität von $d\omega$ folgt aus den Rechenregeln für den Kommutator aus Satz 2.11. Man benutzt dazu z.B. die Regel

$$[fX, Y] = f[X, Y] - Y(f)X.$$

Also ist $d\omega \in \Omega^{k+1}(M)$.

2. Die k -Form ω habe die lokale Darstellung

$$\omega|_U = \sum_I \omega_I dx^I.$$

Nach 1.) ist $d\omega$ eine $(k+1)$ -Form, besitzt also eine lokale Darstellung der Form

$$\begin{aligned} d\omega|_U &= \sum_{(J=1 \leq j_0 < \dots < j_k \leq n)} (d\omega) \left(\frac{\partial}{\partial x_{j_0}}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_{j_k}} \right) \cdot dx^J \\ &\stackrel{Def}{=} \sum_J \left[\sum_{\alpha=0}^k (-1)^\alpha \frac{\partial}{\partial x_{j_\alpha}} \left(\omega \left(\frac{\partial}{\partial x_{j_0}}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_{j_\alpha}}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_{j_k}} \right) \right) \right] \cdot dx^J + 0, \end{aligned}$$

wobei $[\frac{\partial}{\partial x_i}, \frac{\partial}{\partial x_j}] = 0$ benutzt wurde. Es folgt durch Vertauschen der Differentiale

$$\begin{aligned} d\omega|_U &= \sum_{J=(I, j_\alpha)} \left[\sum_{\alpha=0}^k \left(\frac{\partial}{\partial x_{j_\alpha}} (\omega_I) \right) \right] \cdot dx_{j_\alpha} \wedge dx^I \\ &= \sum_I \left[\sum_{j=1}^n \frac{\partial}{\partial x_j} (\omega_I) \cdot dx_j \right] \wedge dx^I \\ &= \sum_I d\omega_I \wedge dx^I. \end{aligned}$$

3. Wir dürfen oBdA $\omega = f dx^I$ und $\sigma = g dx^J$ annehmen, da d linear und eine lokale Operation ist. Dann folgt durch die bereits bekannten Rechenregln für Differentialformen

$$\begin{aligned} d(\omega \wedge \sigma) &= d(f dx^I \wedge g dx^J) = d(fg dx^I \wedge dx^J) \stackrel{2}{=} d(fg) \wedge dx^I \wedge dx^J \\ &\stackrel{PR}{=} (g df + f dg) \wedge dx^I \wedge dx^J = df \wedge dx^I \wedge g dx^J + dg \wedge f dx^I \wedge dx^J \\ &= df \wedge dx^I \wedge \sigma + dg \wedge \omega \wedge dx^J \stackrel{2}{=} (d\omega) \wedge \sigma + (-1)^{deg \omega} \omega \wedge d\sigma. \end{aligned}$$

4. Wir beweisen die Behauptung zunächst für $k = 0$. Sei dazu $f \in C^\infty(M)$. Dann gilt nach Definition des Differentials und unter Benutzung der Eigenschaften des Kommutators aus Satz 2.11

$$\begin{aligned} d(df)(X, Y) &\stackrel{Def}{=} X(df(Y)) - Y(df(X)) - df([X, Y]) \\ &= X(Y(f)) - Y(X(f)) - [X, Y](f) \\ &= 0. \end{aligned}$$

Sei nun $k \geq 1$ und $\omega \in \Omega^k(M)$ eine k -Form mit der lokaler Darstellung $\omega = \sum_I \omega_I dx^I$. Dann gilt

$$d(d\omega) \stackrel{2}{=} \sum_I d(d\omega_I \wedge dx^I) = \sum_I [d(d\omega_I) \wedge dx^I - d\omega_I \wedge d(dx^I)].$$

Da $\omega_I \in C^\infty(M)$ und $dx^I = dx_{i_k} \wedge \dots \wedge dx_{i_1}$ ist, folgt $d(d\omega) = 0$ aus dem Fall $k = 0$ und unter Anwendung von 3.).

5. Wir beweisen die Behauptung durch Induktion über den Grad von ω .

Sei $k = 0$ und $f \in C^\infty(N) = \Omega^0(N)$. Dann gilt $(F^*f)(x) = f(F(x))$. Also folgt

$$d(F^*f)_x(v) = d(f \circ F)_x(v) \stackrel{KR}{=} (df)_{F(x)}(dF_x(v)) = (F^*df)_x(v),$$

d.h. $d(F^* f) = F^* df$.

Wir setzen nun voraus, dass die Behauptung bereits für k -Formen bewiesen ist und schließen auf $(k+1)$ -Formen. Sei also ω eine $(k+1)$ -Form. Wie oben dürfen wir oBdA annehmen, dass $\omega = f dx^J$ gilt, wobei J ein geordneter Multiindex $J = (1 \leq j_0 < \dots < j_k \leq n)$ ist. In der folgenden Rechnung bezeichnet I den Multiindex $I = (j_0 < \dots < j_{k-1})$. Dann erhalten wir aus den schon bekannten Rechenregeln und der Induktionsvoraussetzung

$$\begin{aligned} d(F^* \omega) &= d(F^*(f dx^J)) \\ &= d(F^* [(f dx_{j_0} \wedge \dots \wedge dx_{j_{k-1}}) \wedge dx_{j_k}]) \\ &= d(F^*(f dx^I) \wedge F^* dx_{j_k}) \\ &\stackrel{3.}{=} d(F^*(f dx^I)) \wedge F^* dx_{j_k} + (-1)^k F^*(f dx^I) \wedge d(F^* dx_{j_k}) \\ &\stackrel{I.V.}{=} F^*(d(f dx^I)) \wedge F^* dx_{j_k} + (-1)^k F^*(f dx^I) \wedge F^*(d dx_{j_k}) \\ &\stackrel{4.}{=} F^*(d(f dx^I) \wedge dx_{j_k}) \stackrel{3.}{=} F^*(d(f dx^I \wedge dx_{j_k})). \end{aligned}$$

□

2.10.3 Der Satz von Stokes für Differentialformen

Satz 2.41. [Satz von Stokes]

Sei M^n eine n -dimensionale orientierte Mannigfaltigkeit, ∂M der Rand von M , versehen mit der induzierten Orientierung und ω eine $(n-1)$ -Form mit kompaktem Träger auf M . Dann gilt

$$\int_M d\omega = \int_{\partial M} \omega \quad (*)$$

Beweis: Sei $\mathcal{A} = \{(U_\alpha, \varphi_\alpha)\}$ ein Atlas auf M und $\{f_\alpha\}$ eine Zerlegung der 1 zu \mathcal{A} . Dann ist $\omega = \sum_\alpha f_\alpha \omega$, wobei die Summe endlich ist, da $\text{supp } \omega$ kompakt und die Familie der Träger $\{\text{supp } f_\alpha\}$ lokal endlich ist. Da die linke und rechte Seite von $(*)$ linear in ω sind, genügt es zu zeigen, dass

$$\int_M d(f_\alpha \omega) = \int_{\partial M} f_\alpha \omega$$

gilt. Deshalb können wir, um $(*)$ zu beweisen, oBdA annehmen, dass der Träger $\text{supp } \omega$ in einem Kartenumgebung U von M liegt.

Wir werden nun $(*)$ durch direktes Ausrechnen beider Integrale beweisen.

1. *Berechnung von $\int_M d\omega$:*

Sei $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ eine positiv orientierte Karte mit $\varphi(U) \subset \mathbb{R}_+^n$. Bezüglich dieser Karte ist ω durch

$$\omega = \sum_{i=1}^n \omega_i(x) dx_1 \wedge \dots \wedge \widehat{dx}_i \wedge \dots \wedge dx_n, \quad \text{mit } \omega_i = \omega \left(\frac{\partial}{\partial x_1}, \dots, \widehat{\frac{\partial}{\partial x_i}}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_n} \right)$$

gegeben. Wenden wir das Differential darauf an, so ergibt sich

$$\begin{aligned}
 d\omega &= \sum_{i=1}^n d\omega_i \wedge dx_1 \wedge \dots \wedge \widehat{dx}_i \wedge \dots \wedge dx_n \\
 &= \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial}{\partial x_j}(\omega_i) dx_j \wedge dx_1 \wedge \dots \wedge \widehat{dx}_i \wedge \dots \wedge dx_n \\
 &= \sum_{i=1}^n (-1)^{i-1} \frac{\partial}{\partial x_i}(\omega_i) dx_1 \wedge \dots \wedge dx^n \\
 &= (d\omega)_\varphi dx_1 \wedge \dots \wedge dx_n.
 \end{aligned}$$

Durch Einsetzen und Umformen des Integrals erhalten wir

$$\begin{aligned}
 \int_M d\omega &= \int_U d\omega \\
 &= \int_{\varphi(U)} (d\omega)_\varphi \circ \varphi^{-1} d\lambda_n \\
 &= \sum_{i=1}^n (-1)^{i-1} \int_{\varphi(U)} \frac{\partial}{\partial x_i}(\omega_i) \circ \varphi^{-1} d\lambda_n \\
 &= \sum_{i=1}^n (-1)^{i-1} \int_{\mathbb{R}} \dots \int_{\mathbb{R}} \underbrace{\left(\int_{\mathbb{R}} \frac{\partial}{\partial x_i}(\omega_i \circ \varphi^{-1})(x) dx_i \right)}_{(**)} dx_1 \dots \widehat{dx}_i \dots dx_n,
 \end{aligned}$$

wobei die letzte Identität aufgrund des Satzes von Fubini gilt. Da $\text{supp } \omega \subset \varphi(U)$, konnten wir beim letzten Schritt den Integrationsbereich über ganz \mathbb{R}^n ausdehnen. Nun unterscheiden wir zwei Fälle.

(a) Ist $i < n$, so gilt

$$(**) = \int_{\mathbb{R}} \frac{\partial}{\partial x_i}(\omega_i \circ \varphi^{-1})(x) dx_i = [\omega_i \circ \varphi^{-1}]_{-\infty}^{\infty} = 0,$$

da $\text{supp } \omega_i$ kompakt ist.

(b) Falls $i = n$ ist, so gilt

$$(**) = \int_0^\infty \frac{\partial}{\partial x_n}(\omega_n \circ \varphi^{-1})(x) dx_i = -\omega(\varphi^{-1}(x_1, \dots, x_{n-1}, 0)).$$

Daraus folgt

$$\int_M d\omega = (-1)^n \int_{\mathbb{R}^{n-1}} \omega_n(\varphi^{-1}(x_1, \dots, x_{n-1}, 0)) d\lambda_{n-1}(x_1, \dots, x_{n-1}).$$

2. Berechnung von $\int_{\partial M} \omega$:

Da $\text{supp } \omega \subset U$, ist $\text{supp } \omega|_{\partial M} \subset \partial M \cap U$. Ist $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ eine Karte auf M , so ist

$$(U \cap \partial M, \varphi|_{U \cap \partial M} = (x_1, \dots, x_{n-1}))$$

eine Karte auf ∂M , da der Rand durch $x_n = 0$ charakterisiert ist.

Sei $w_x \in T_x M$ wie in Definition ?? . Die folgenden Basen von $T_x M$ in einem Randpunkt $x \in \partial M$ sind gleichorientiert:

$$\begin{aligned} \left(\nu(x), \frac{\partial}{\partial x_1}(x), \dots, \frac{\partial}{\partial x_{n-1}}(x) \right) &\sim \left(\frac{\partial}{\partial x_1}(x), \dots, \frac{\partial}{\partial x_{n-1}}(x), (-1)^{n-1} w_x \right) \\ &\sim \left(\frac{\partial}{\partial x_1}(x), \dots, \frac{\partial}{\partial x_{n-1}}(x), (-1)^n \frac{\partial}{\partial x_n}(x) \right) \end{aligned}$$

da die Vektoren $\frac{\partial}{\partial x_n}(x)$ und w_x nach Definition in verschiedene Richtungen bezüglich $T_x \partial M$ zeigen, $\nu(x)$ nach außen und $\frac{\partial}{\partial x_n}(x)$ nach innen. Also ist die Karte $(U \cap \partial M, \varphi|_{U \cap \partial M})$ des Randes positiv orientiert, falls n gerade ist und negativ orientiert, falls n ungerade ist.

Die lokale Darstellung von $\omega|_{U \cap \partial M}$ bzgl. der Randkarte ist

$$\omega|_{U \cap \partial M} = \sum_{i=1}^n \omega_i dx_1 \wedge \dots \wedge \widehat{dx}_i \wedge \dots \wedge dx_n|_{U \cap \partial M} = \omega_n dx_1 \wedge \dots \wedge dx_{n-1},$$

denn für jeden Tangentialvektor $\frac{\partial}{\partial x_j}(x) \in T_x \partial M, j = 1, \dots, n - 1$, ist

$$(dx_n)_x \left(\frac{\partial}{\partial x_j}(x) \right) = 0$$

.

(a) Sei n gerade. Dann ist

$$\begin{aligned} \int_{\partial M} \omega &= \int_{U \cap \partial M} \omega_n dx_1 \wedge \dots \wedge dx_{n-1} \\ &= \int_{\varphi(U \cap \partial M)} \omega_n \circ \varphi^{-1} d\lambda_{n-1}(x_1, \dots, x_{n-1}) \\ &= \int_{\mathbb{R}^{n-1}} \omega_n (\varphi^{-1}(x_1, \dots, x_{n-1}, 0)) d\lambda_{n-1}(x_1, \dots, x_{n-1}). \end{aligned}$$

(b) Ist n ungerade, so ist

$$\int_{\partial M} \omega = - \int_{\mathbb{R}^{n-1}} \omega_n (\varphi^{-1}(x_1, \dots, x_{n-1}, 0)) d\lambda_{n-1}(x_1, \dots, x_{n-1}).$$

Damit ist die Behauptung $\int_M d\omega = \int_{\partial M} \omega$ bewiesen.

□

- Ist Index $g = 0$, d.h. g_x ein positiv-definites Euklidisches Skalarprodukt auf $T_x M$, so heißt g Riemannsche Metrik
- Ist Index $(g) = 1$, so heißt g Lorentz-Metrik (Lorentz-Metriken benutzt man in der Relativitätstheorie)
- $1 \leq k \leq n - 1$, so heißt g pseudo-Riemannsche Metrik
- k beliebig, dann heißt g semi-Riemannsche Metrik

Definition. Ist g eine Metrik auf M^n , so heißt (M, g)

- Riemannsche Mannigfaltigkeit $\Leftrightarrow g$ Riemannsche Metrik
- Lorentz-Mannigfaltigkeit $\Leftrightarrow g$ Lorentz-Metrik
- pseudo-Riemannsche Mannigfaltigkeit $\Leftrightarrow g$ pseudo-Riemannsche Metrik
- semi-Riemannsche Mannigfaltigkeit $\Leftrightarrow g$ beliebige Metrik

Definition. Sei g eine Metrik auf M , dann heißt

- $v \in T_x M$ heißt zeitartig $\Leftrightarrow g_x(v, v) < 0$
- $v \in T_x M$ heißt isotrop (lichtartig) $\Leftrightarrow g_x(v, v) = 0, \forall v \neq 0$
- $v \in T_x M$ heißt raumartig $\Leftrightarrow g_x(v, v) > 0$

Lokale Darstellung einer Metrik:

Sei $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ eine zulässige Karte, dann ist

$$g_U = \sum_{i,j=1}^n g_{ij} dx_i \otimes dx_j = \sum_{i,j} g_{ij} dx_i \circ dx_j$$

mit

$$g_{ij}(x) = g\left(\frac{\partial}{\partial x_i}(x), \frac{\partial}{\partial x_j}(x)\right)$$

Die Funktionen $g_{ij} \in C^\infty(U)$ heißen lokale Koeffizienten der Metrik bezüglich (U, φ) .

Da g_x nichtausgeartet und symmetrisch, ist die matrix $(g_{ij}(x))_{i,j=1}^n$ symmetrisch und invertierbar. Die dazu inverse Matrix bezeichnet man mit $(g^{kl}(x))_{k,l=1}^n$.

Es folgen nun Beispiele von Metriken.

Beispiel 50. METRIKEN IM \mathbb{R}^n

Sei $\langle \cdot, \cdot \rangle_{p,q}$ eine nichtausgeartete symm. BLF vom Index p auf \mathbb{R}^n . Ein Vektorfeld auf \mathbb{R}^n ist eine glatte Abbildung

$$X \in C^\infty(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$$

und somit ist

$$g_{p,q}(X, Y)(x) := \langle X(x), Y(x) \rangle_{p,q}$$

eine Metrik vom Index p auf der Mannigfaltigkeit \mathbb{R}^n .

Lokale Darstellung von $g_{n,k}$: Sei (a_1, \dots, a_n) ONB von $(\mathbb{R}^{p,q}, \langle \cdot, \cdot \rangle_{p,q})$, d.h.

$$\langle a_i, a_j \rangle_{p,q} = \begin{cases} -\delta_{ij} & \text{für } i \leq p \\ \delta_{ij} & \text{für } i > p \end{cases}$$

Für eine Karte auf dem \mathbb{R}^n : $\varphi(x) = (x_1, \dots, x_n)$ mit $x = \sum x_i a_i$ gilt dann $\frac{\partial}{\partial x_i}(x) = a_i$ und daraus folgt

$$g_{ij}(x) = \langle a_i, a_j \rangle_{p,q} = \varepsilon_i \delta_{ij} \quad \text{wobei } \varepsilon_i = \begin{cases} -1 & \text{für } i \leq p \\ 1 & \text{für } i > p \end{cases}$$

und damit ist

$$g_{p,q} = -dx_1^2 - \dots - dx_p^2 + dx_{p+1}^2 + \dots + dx_{x_n}^2 \quad \text{wobei } dx_i^2 = dx_i \circ dx_i.$$

Das Paar $(\mathbb{R}^n, g_{n,n-1})$ heißt Minkowski-Raum

Beispiel 51. INDUZIERTE METRIKEN

Sei (\tilde{M}, \tilde{g}) eine Riemannsche Mannigfaltigkeit und $f : M \rightarrow \tilde{M}$ eine Immersion, dann heißt

$$f^* \tilde{g} =: g$$

die induzierte Riemannsche Metrik auf M

Sei (\tilde{M}, \tilde{g}) eine pseudo-Riemannsche Mannigfaltigkeit und $f : M \rightarrow \tilde{M}$ eine Immersion so dass für alle $x \in M$

$$df_x(T_x M) \subset T_{f(x)} \tilde{M}$$

ein nichtausgearteter Unterraum ist, (d.h. $\tilde{g}_{f(x)}$ ist auf $df_x(T_x M)$ nichtausgeartet), dann ist

$$g := f^* \tilde{g}$$

eine Metrik auf M und heißt induzierte semi-Riemannsche Metrik

- Sei $(\mathbb{R}^2, g_{1,1})$ und $M = \mathbb{R}$. Die Abbildung $f : M \rightarrow \mathbb{R}^2, x \rightarrow (x, x)$ ist eine Einbettung. Aber jeder Vektor $df_{(x,x)}(v)$ ist isotrop und deshalb ist $f^* g_{1,1} \equiv 0$. Keine Metrik!
- Sei speziell $M \subset \tilde{M}$ eine Untermannigfaltigkeit und (\tilde{M}, \tilde{g}) eine semi-Riemannsche Mannigfaltigkeit, sodass für alle $x \in M$ $T_x M \subset T_x \tilde{M}$ ein nichtausgearteter Unterraum ist. Dann ist

$$g := \tilde{g}|_{\mathfrak{X}(M) \times \mathfrak{X}(M)}$$

eine semi-Riemannsche Metrik auf M .

- Ist $M \subset \mathbb{R}^N$ eine Untermannigfaltigkeit des reellen Vektorraumes \mathbb{R}^N und $\langle \cdot, \cdot \rangle_{\mathbb{R}^N}$ das Standardskalarprodukt von \mathbb{R}^N . Dann gilt $\mathfrak{X}(M) \subset C^\infty(M^n, \mathbb{R}^N)$.

$$g(X, Y)(x) := \langle X(x), Y(x) \rangle_{\mathbb{R}^N} \quad X, Y \in \mathfrak{X}(M)$$

ist Riemannsche Metrik auf M^n . Diese heißt induzierte Riemannsche Metrik der Untermannigfaltigkeit $M \subset \mathbb{R}^N$.

Beispiel 52. ROTATIONSFLÄCHEN IM \mathbb{R}^3

Wir betrachten die Mannigfaltigkeit

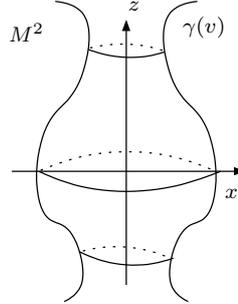
$$M^2 = \{f(u, v) = (\gamma_1(v) \cos u, \gamma_1(v) \sin u, \gamma_2(v)) \mid v \in (a, b), u \in \mathbb{R}\}$$

mit einer Kurve

$$\gamma = (\gamma_1, \gamma_2) : (a, b) \subset \mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{R}^2$$

mit den Eigenschaften $\gamma_1(v) > 0$ und $\dot{\gamma} \neq 0$.

$M^2 \subset \mathbb{R}^3$ ist eine 2-dim. UMF. Sei
 $D = (u_0 - \pi, u_0 + \pi, v_0 - \epsilon, v_0 + \epsilon)$,
dann ist
 $(U = f(D), \varphi = f^{-1}|_D = (u, v))$
eine Karte um $f(u_0, v_0)$.



Für die kanonischen Basis ergibt sich damit

$$\frac{\partial}{\partial u} (f(u, v)) = \frac{\partial f}{\partial u} (u, v) = (-\gamma_1 \sin u, \gamma_1 \cos u, 0)$$

und

$$\frac{\partial}{\partial v} (f(u, v)) = \frac{\partial f}{\partial v} (u, v) = (\dot{\gamma}_1(v) \cos u, \dot{\gamma}_1(v) \sin u, \dot{\gamma}_2(v)).$$

Die Koeffizienten der lokale Darstellung der induzierten Metrik ergeben sich dann aus

$$\begin{aligned} (g_{ij}(f(u, v))) &= \begin{pmatrix} \langle \frac{\partial}{\partial u}, \frac{\partial}{\partial u} \rangle & \langle \frac{\partial}{\partial u}, \frac{\partial}{\partial v} \rangle \\ \langle \frac{\partial}{\partial v}, \frac{\partial}{\partial u} \rangle & \langle \frac{\partial}{\partial v}, \frac{\partial}{\partial v} \rangle \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \gamma^2(v) & 0 \\ 0 & \|\dot{\gamma}(v)\|^2 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Es ist also

$$g_{f(u,v)} = \gamma^2(v) du^2 + \|\dot{\gamma}(v)\|^2 dv^2$$

Beispiel 53. PRODUKT-METRIKEN

Seien $(M, g), (N, h)$ semi-Riemannsche Mannigfaltigkeiten mit den Projektionen

$$\pi_1 : M \times N \rightarrow M \text{ und } \pi_2 : M \times N \rightarrow N$$

Wir definieren eine Metrik $r \in \mathfrak{X}^{(2,0)}(M \times N)$ durch

$$r := \pi_1^* g + \pi_2^* h.$$

Dies ist eine Metrik auf $M \times N$ mit $\text{Index}(r) = \text{Index}(g) + \text{Index}(h)$ und heißt Produkt-Metrik.

Nun ist jedoch

$$\begin{aligned} T_{(x,y)}(M \times N) &\simeq T_x M \times T_y N \\ v &\mapsto \underbrace{((d\pi_1)_{(x,y)}(v))}_{v_1}, \underbrace{(d\pi_2)_{(x,y)}(v)}_{v_2} \end{aligned}$$

und damit

$$r_{(x,y)}(v_1 + v_2, w_1 + w_2) = g_x(v_1, w_1) + h_y(v_2, w_2).$$

Deshalb benutzt man auch folgende Schreibweise:

$$r = g + h$$

Beispiel 54. WARPED-PRODUCT-METRIKEN

Seien $(M, g), (N, h)$ semi-Riemannsche Mannigfaltigkeiten und

$$f \in C^\infty(M), f > 0$$

Wir definieren folgende Metrik auf $M \times N$

$$r := \pi_1^* g + (f \circ \pi_1)^2 \pi_2^* h,$$

oder in Kurzform

$$r = g + f^2 h,$$

wobei

$$r_{(x,y)}(v_1 + v_2, w_1 + w_2) = g_x(v_1, w_1) + f(x)^2 h_y(v_2, w_2)$$

Diese semi-Riemannsche Mannigfaltigkeit $M \times_f N := (M \times N, r)$ heißt warped product.

Viele kosmologische Modelle (4-dimensionale Mannigfaltigkeiten, die die Einstein-Gleichungen der ART erfüllen: $Ric - \frac{1}{2} Rg = T$) sind warped products.

$$M = I \times_f F$$

Dabei ist (F, g) eine 3-dimensionale Riemannsche Mannigfaltigkeiten konstanter Schnittkrümmung, $I_{offen} \subset \mathbb{R}$ ein Intervall und $f \in C^\infty(I)$. Für die Metrik ergibt sich

$$r = -dt^2 + f^2 g.$$

Satz 3.1. Auf jeder C^∞ -Mannigfaltigkeit M^n existiert eine Riemannsche Metrik.

Beweis:

Sei $\mathcal{A} = \{U_\alpha, \varphi_\alpha\}_{\alpha \in \Lambda}$ abzählbarer Atlas mit Zelegung der 1 $\{f_\alpha\}_{\alpha \in \Lambda}$. Wir betrachten die induzierte Riemannsche Metrik

$$g_\alpha := \varphi_\alpha^* \langle \cdot, \cdot \rangle_{\mathbb{R}^n} \in \mathfrak{X}^{(2,0)}(U_\alpha)$$

auf $U_\alpha \subset M$. Da $\text{supp } f_\alpha \subset U_\alpha$ ist $f_\alpha g_\alpha \in \mathfrak{X}^{(2,0)}(M)$ ein symmetrisches Tensorfeld auf M . Die Fortsetzung

$$g := \sum_{\alpha \in \Lambda} f_\alpha \cdot g_\alpha \in \mathfrak{X}^{(2,0)}(M)$$

ist symmetrisch und existiert, da $\{\text{supp } f_\alpha\}$ lokal endlich ist.

g_x ist positiv-definit: Für $v \in T_x M, v \neq 0$ gilt

$$g_x(v, v) = \sum_{\alpha \in \tilde{\Lambda}} f_\alpha(x) g_{\alpha_x}(v, v) \geq 0,$$

wobei

$$\tilde{\Lambda} = \{\alpha \in \Lambda \mid x \in U_\alpha\}.$$

Da $\sum_{\alpha \in \Lambda} f_\alpha \equiv 1$, existiert α_0 und $f_{\alpha_0}(x) > 0$, sodass

$$g_x(v, v) > 0.$$

Damit ist g eine Riemannsche Metrik auf M .

□

Metriken mit Index $g = k > 0$ existieren nicht immer. Dazu braucht man zusätzlich topologische Bedingungen an M .

Satz 3.2. *Auf M^n existiert genau dann eine pseudo-Riemannsche Metrik der Signatur (p, q) , wenn*

$$TM = \xi^p \oplus \eta^q,$$

debei sind ξ^p und η^q Vektorbündel vom Rang p und q .

Die Aufspaltung $TM = \xi^p \oplus \eta^q$ hat topologische Konsequenzen \rightarrow Stiefel-Whitney-Klassen, Chernklassen. Für Lorentz-Metriken gilt speziell

Satz 3.3. *Sei M^n eine C^∞ -Mannigfaltigkeit. Dann sind folgende Bedingungen äquivalent:*

1. *Auf M existiert eine Lorentz-Metrik*
2. *Es existiert ein nirgends verschwindendes Vektorfeld $X \in \mathfrak{X}(M)$ ($X(x) \neq 0, \forall x \in M$)*
3. *M ist nicht-kompakt oder M ist kompakt und die Eulersche Charakteristik $\chi(M)$ ist Null.*

(Beweis: \rightarrow O'Neill: Semi-Riemannsche Geometrie, S. 149).

Wir erinnern an den schon aus Analysis IV bekannten

Satz 3.4 (Igelsatz). *Auf der Sphäre S^{2n} existiert kein nirgends verschwindendes Vektorfeld.*

Aus Satz 3.3 folgt nun, dass auf S^{2n} keine Lorentz-Metrik existieren kann.

3.2 Längen, Winkel und Volumen in semi-Riem. MF

Wir wollen uns in diesem Abschnitt mit dem Problem der Volumen- und Längendefinition einer semi-Riem. Mannigfaltigkeit (M, g) beschäftigen.

3.2.1 Längen von Kurven in M

Definition. Sei $v \in T_x M$, dann heißt

$$\|v\|_g := \sqrt{|g_x(v, v)|}$$

die Länge des Vektors v in $(T_x M, g)$.

Definition. Sei (M, g) eine semi-Riem. MF. und $\gamma : I_{\text{Intervall}} \subset \mathbb{R} \rightarrow M$ eine glatte Kurve auf M . Dann heißt

$$l(\gamma) := \int_I \|\dot{\gamma}(t)\|_g dt$$

Länge von γ in (M, g) .

Bemerkungen:

- Ist $M^n \subset \mathbb{R}^N$ eine UMF mit induzierter Metrik. Dann ist für eine glatte Kurve $\gamma : [a, b] \subset \mathbb{R} \rightarrow M$

$$l(\gamma) = \int_a^b \|\dot{\gamma}(t)\|_{\mathbb{R}^n} dt$$

die aus der Analysis bekannte Länge.

- Für eine pseudo-Riem.-MF kann die Länge einer nicht konstanten Kurve auch null sein, da für isotrope Kurven stets $\|\dot{\gamma}\| \equiv 0$ gilt. (Das Licht bewegt sich in der Relativitätstheorie auf isotropen Kurven.)

Eigenschaften der Länge

1. Sei $\gamma : I \subset \mathbb{R} \rightarrow M$ eine glatte Kurve und $\tau : J \rightarrow I$ eine Parametertrafo (d.h. τ ist ein Diffeomorphismus). Sei dann

$$\tilde{\gamma} := \gamma \circ \tau : J \rightarrow M \quad \text{Umparametrisierung von } \gamma$$

so gilt

$$\boxed{l(\gamma) = l(\tilde{\gamma})}$$

, da

$$\begin{aligned}
 l(\tilde{\gamma}) &= \int_J \|\dot{\tilde{\gamma}}(t)\|_g dt \\
 &= \int_J \|(\gamma \circ \tau)'(t)\|_g dt \\
 &\stackrel{\text{Int.-Trafo}}{=} \int_{\tau(J)} \|(\gamma \circ \tau)'(\tau^{-1}(t))\|_g \left| \det(\tau^{-1})'(t) \right| dt \\
 &\stackrel{KR}{=} \int_I \|(\dot{\gamma} \circ \tau)(\tau^{-1}(t))\|_g |\tau'(t)| \frac{1}{|\tau'(t)|} dt \\
 &= l(\gamma)
 \end{aligned}$$

2. Eine Kurve $\gamma : I = [a, b] \subset \mathbb{R} \rightarrow M$ heißt nach Bogenlänge parametrisiert, falls

$$\|\dot{\gamma}(t)\|_g \equiv 1.$$

Für eine nach Bogenlänge parametrisierte Kurve γ gilt dann

$$\begin{aligned}
 l(\gamma) &= \int_I \|\dot{\gamma}(t)\|_g dt \\
 &= \int_I dt \\
 &= b - a
 \end{aligned}$$

3. Eine Kurve $\gamma : I \subset \mathbb{R} \rightarrow M$ heißt regulär, falls $\dot{\gamma} \neq 0$ für alle $t \in I$.

Behauptung: Jede reguläre, nirgends isotrope Kurve $\gamma : I \subset \mathbb{R} \rightarrow M$ ist nach Bogenlänge parametrisierbar, d.h. es existiert eine Umparametrisierung $\tilde{\gamma} = \gamma \circ \tau$ mit $\|\tilde{\gamma}(t)\|_g \equiv 1$.

Beweis: Sei $\gamma : [a, b] \rightarrow M$ regulär und nirgends isotrop. Wir betrachten die Abbildung

$$\begin{aligned}
 l : [a, b] &\rightarrow M \\
 t &\mapsto l(\gamma|_{[a, t]}) = \int_a^t \|\dot{\gamma}(t)\|_g dt
 \end{aligned}$$

dann ist $l'(t) = \|\dot{\gamma}(t)\|_g > 0$. Wegen dieser strikten Monotonie existiert eine Umkehrabbildung

$$\tau := l^{-1} [0, l(\gamma)] \rightarrow [a, b].$$

Es gilt nun

$$\begin{aligned}
 \|(\gamma \circ \tau)'(t)\|_g &= \|\dot{\gamma}(\tau(t))\|_g |\tau'(t)| \\
 &= \|\dot{\gamma}(\tau(t))\|_g \frac{1}{l'(\tau(t))} \\
 &= 1
 \end{aligned}$$

D.h. $\tilde{\gamma} = \gamma \circ \tau$ ist nach Bogenlänge parametrisiert.

□

Definition. Eine Kurve $\gamma : I = [a, b] \rightarrow M$ heißt stückweise glatt, falls γ stetig ist und eine Zerlegung

$$a = t_0 < t_1 < \dots < t_n = b$$

existiert, sodass die

$$\gamma_i = \gamma|_{[t_i, t_{i+1}]} : [t_i, t_{i+1}] \rightarrow M$$

für alle $i = 0 \dots n$ glatte Kurven sind.

Die Punkte $\gamma(t_i)$ heißen Ecken von γ .



Dann ist die Länge von γ definiert durch

$$l(\gamma) = \sum_{i=1}^n l(\gamma_i).$$

Die Eigenschaften 1-3 bleiben erhalten.

3.2.2 Volumen in semi-Riem. Mannigfaltigkeiten

Im letzten Kapitel haben wir die Integration von k -Formen auf Mannigfaltigkeiten besprochen. Nun wollen wir dies auf den Begriff des Volumens ausdehnen. Wie man aber am Beispiel des $(\mathbb{R}^n, \langle \cdot, \cdot \rangle_{\mathbb{R}^n})$ sehen kann, ist der Volumenbegriff stark an die Metrik gebunden!

Wir suchen nun eine spezielle, der Metrik g angepasste positive n -Form auf M^n .

Definition. Sei (M^n, g, O_M) eine orientierte semi-Riem. Mannigfaltigkeit und (v_1, \dots, v_n) eine positiv-orientierte Basis in $T_x M$ mit dualer Basis (η_1, \dots, η_n) aus $T_x^* M$. Dann bezeichnen wir

$$dM_x := \sqrt{|\det(g_x(v_i, v_j))|} \eta_1 \wedge \dots \wedge \eta_n$$

Bemerkungen:

- dM_x ist unabhängig von der gewählten Basis. Denn sei (a_1, \dots, a_n) eine weitere positiv-orientierte Basis mit dualer Basis $(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$ und Übergangsmatrix $v_i = A_{ik}a_k$, so ist nach Voraussetzung $\det A > 0$. Darüberhinaus gilt

$$\begin{aligned} g_x(v_i, v_j) &= g_x(A_{ik}a_k, A_{jl}a_l) \\ &= A_{ik}A_{jl}g_x(a_k, a_l) \\ &= A_{ik}A_{lj}^T g_x(a_k, a_l) \\ &= \sum_k A_{ik} \sum_l g_x(a_k, a_l) A_{lj}^T. \end{aligned}$$

In Matrixschreibweise heißt das

$$\{g_x(v_i, v_j)\}_{ij} = A \cdot \{g_x(a_k, a_l)\}_{kl} \cdot A^T.$$

Andererseits ist

$$\sigma_1 \wedge \dots \wedge \sigma_n = (\det A) \eta_1 \wedge \dots \wedge \eta_n.$$

Für dM_x ergibt sich damit

$$\begin{aligned} \sqrt{|\det(g_x(v_i, v_j))|} \eta_1 \wedge \dots \wedge \eta_n &= \sqrt{|\det(A)^2 \cdot \det(g_x(a_k, a_l))|} (\det A)^{-1} \sigma_1 \wedge \dots \wedge \sigma_n \\ &= \sqrt{|\det(g_x(a_k, a_l))|} \sigma_1 \wedge \dots \wedge \sigma_n. \end{aligned}$$

- Die Abbildung $x \mapsto dM_x$ ist ein glatter Schnitt in $\Lambda^n M$, denn sei $(U, \varphi = x_1, \dots, x_n)$ eine positiv-orientierte Karte, so gilt für deren kanonische Basis

$$dM_x = \underbrace{\sqrt{\left| \det g_x \left(\frac{\partial}{\partial x_i}(x), \frac{\partial}{\partial x_j}(x) \right) \right|}}_{\in C^\infty(U)} dx_1 \wedge \dots \wedge dx_n$$

- Ist (e_1, \dots, e_n) eine positiv-orientierte ONB aus $T_x M$ und $(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$ deren Dual, so gilt

$$dM_x(e_1, \dots, e_n) = 1 = \sigma_1 \wedge \dots \wedge \sigma_n(e_1, \dots, e_n),$$

d.h.

$$dM_x = \sigma_1 \wedge \dots \wedge \sigma_n$$

Dies erlaubt nun folgende

Definition. Die n -Form $dM_g \in \Omega^n(M)$ mit

$$dM_g : x \mapsto dM_x \in \Lambda^n(T_x^* M)$$

heißt Volumenform von (M, g, O_M) .

Lokale Darstellung der Volumenform:

Ist $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ eine positiv-orientierte Karte und $g_{ij}(x) = g_x\left(\frac{\partial}{\partial x_i}(x), \frac{\partial}{\partial x_j}(x)\right)$ seien die Koeffizienten der Metrik, dann ist

$$dM|_U = \sqrt{|\det(g_{ij})|} dx_1 \wedge \dots \wedge dx_n$$

Definition. Sei (M^n, g, O_M) eine orientierte semi-Riem. Mannigfaltigkeit und $A \subset M$ eine meßbare Teilmenge, so heißt die Zahl

$$Vol_g(A) := \int_A dM_g$$

das Volumen von A in (M^n, g, O_M) . (Im Fall $n = 2$ entspricht dies dem 'Flächeninhalt'.)

Bemerkungen:

- Für $(M, g) = (\mathbb{R}^n, \langle \cdot, \cdot \rangle_{\mathbb{R}^n})$ ist $Vol_g(A) = \lambda^n(A)$, dem Lebesque-Maß auf \mathbb{R}^n .
- Vol_g ist unabhängig von der gewählten Orientierung, denn für $-M = (M, -O_M)$ ist

$$d(-M) = -dM$$

und damit

$$\int_{-A} d(-M) = - \int_{-A} dM = \int_A dM$$

- Man kann das Volumen auch für Teilmengen von nichtorientierbaren Mannigfaltigkeiten definieren:

Sei $A \subset M$ meßbar, so ist

$$A = \bigcup_{\alpha} A_{\alpha} \quad \text{wobei } A_{\alpha} \text{ paarweise disjunkt, und } A_{\alpha} \subset U_{\alpha} \text{ Karte}$$

Dann fixieren wir eine Orientierung auf U_{α} womit

$$Vol_g(A_{\alpha}) = \int_{A_{\alpha}} dU_{\alpha}$$

und wir setzen

$$Vol_g(A) = \sum_{\alpha} Vol_g(A_{\alpha})$$

Beispiel 55. OBERFLÄCHEN VON GRAPHEN

Sei $h : U_{offen} \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ eine glatte Abbildung. Für $M^2 = graph(h) \subset \mathbb{R}^3$ mit induzierter Metrik gilt dann

$$Vol_g(M) = \int_U \sqrt{1 + \left(\frac{\partial h}{\partial u_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial u_2}\right)^2} du_1 du_2$$

denn in der inversen Karte $f(u_1, u_2) = (u_1, u_2, h(u_1, u_2))$ mit $f(u_1, u_2) = x$ hat man

$$\frac{\partial}{\partial u_1}(x) = df_{(u_1, u_2)}(e_1) = \frac{\partial f}{\partial u_1}(u_1, u_2) = \left(1, 0, \frac{\partial h}{\partial u_1}(u_1, u_2)\right)$$

und

$$\frac{\partial}{\partial u_2}(x) = df_{(u_1, u_2)}(e_2) = \frac{\partial f}{\partial u_2}(u_1, u_2) = \left(0, 1, \frac{\partial h}{\partial u_2}(u_1, u_2)\right).$$

Für die Koeffizienten der Metrik ergibt sich dann

$$\begin{aligned} (g_{ij}(x)) &= \left\langle \left\langle \frac{\partial}{\partial u_i}(x), \frac{\partial}{\partial u_j}(x) \right\rangle \right\rangle \\ &= \begin{pmatrix} 1 + \left(\frac{\partial h}{\partial u_1}(u_1, u_2)\right)^2 & \frac{\partial h}{\partial u_1}(u_1, u_2) \cdot \frac{\partial h}{\partial u_2}(u_1, u_2) \\ \frac{\partial h}{\partial u_1}(u_1, u_2) \cdot \frac{\partial h}{\partial u_2}(u_1, u_2) & 1 + \left(\frac{\partial h}{\partial u_2}(u_1, u_2)\right)^2 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

und es folgt

$$\det(g_{ij}(x)) = 1 + \left(\frac{\partial h}{\partial u_1}(u_1, u_2)\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial u_2}(u_1, u_2)\right)^2.$$

Setzen wir dies ein, so erhalten wir

$$\begin{aligned} Vol_g(M) &= \int_M dM_g \\ &= \int_{f(U)} \sqrt{\det(g_{ij}(x))} du_1 \wedge du_2 \\ &= \int_{f^{-1}(f(U))} \sqrt{\det(g_{ij}(f(u_1, u_2)))} d\lambda^2 \\ &= \int_U \sqrt{1 + \left(\frac{\partial h}{\partial u_1}(u_1, u_2)\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial u_2}(u_1, u_2)\right)^2} du_1 du_2. \end{aligned}$$

Beispiel 56. OBERFLÄCHEN VON ROTATIONSFLÄCHEN

Hier ist bekanntlich¹

$$M^2 = \{f(u, v) = (\gamma_1(v) \cos u, \gamma_1(v) \sin u, \gamma_2(v))\},$$

wobei $\gamma_1 > 0$ und $\dot{\gamma}(v) \neq 0$. Für die Metrikoeffizienten ergibt sich mit $x = f(u, v)$

$$g_{ij}(x) = \begin{pmatrix} \gamma_1^2(v) & 0 \\ 0 & \|\dot{\gamma}(v)\|^2 \end{pmatrix}$$

und daraus folgt

$$\det(g_{ij}(x)) = \gamma_1^2(v) \cdot \|\dot{\gamma}(v)\|^2.$$

Für das Volumen erhalten wir nun

$$Vol_g(M) = \int_0^{2\pi} \int_a^b \gamma_1(v) \cdot \|\dot{\gamma}(v)\| du dv$$

bzw.

$$Vol_g(M) = 2\pi \int_a^b \gamma_1(v) \cdot \|\dot{\gamma}(v)\| du dv$$

¹siehe Beispiel 52 auf Seite 116

3.2.3 Der Schnittwinkel von Kurven in semi-Riem. Mannigfaltigkeiten

Im Folgenden sei (M, g) eine semi-Riem. Mannigfaltigkeit.

In einem Vektorraum mit Skalarprodukt beliebiger Signatur kann man erklären was 'senkrecht' bedeutet, Winkel existieren aber nur im euklidischen Fall.

Definition. Seien $v, w \in T_x M$, dann heißt v orthogonal zu w ($v \perp w$) falls

$$g_x(v, w) = 0$$

Bemerkungen

1. Ist (M, g) eine *Riemannsche MF*, so kann man den Schnittwinkel beliebiger Tangentialvektoren $u, v \in T_x M$ definieren. Für ein positiv-definites Skalarprodukt gilt bekanntlich die Cauchy-Schwarz-Ungleichung

$$|g_x(u, v)| \leq \|u\| \cdot \|v\|$$

und daraus folgt dann

$$-1 \leq \frac{g_x(u, v)}{\|u\| \cdot \|v\|} \leq 1 \quad \text{für alle } u, v \neq 0.$$

Es existiert also ein eindeutig bestimmter Winkel $\alpha \in [0, \pi]$ für den

$$\cos \alpha = \frac{g_x(u, v)}{\|u\| \cdot \|v\|}.$$

Dieser Winkel $\alpha =: \angle(v, w)$ heißt Schnittwinkel von u und v in (M, g) .

2. Sei (M, g) eine *Lorentz-MF*.

- (a) Sind $v, w \in T_x M$ *zeitartig*, so gilt

$$|g_x(v, w)| \geq \|v\| \cdot \|w\|$$

Beweis:

OBdA seien v und w linear unabhängig und es gelte

$$w = av + \tilde{w} \quad \text{wobei } \tilde{w} \perp v.$$

Damit folgt

$$g_x(w, w) = g_x(av + \tilde{w}, av + \tilde{w}) = a^2 g_x(v, v) + g_x(\tilde{w}, \tilde{w}). \quad (*)$$

Da v zeitartig ist und der Index von g nur 1, muss \tilde{w} raumartig sein, d.h. es gilt

$$g_x(\tilde{w}, \tilde{w}) > 0.$$

Wir erhalten nun

$$\begin{aligned} g_x(v, w)^2 &= a^2 g_x(v, v)^2 \\ &\stackrel{(*)}{=} (g_x(w, w) - g_x(\tilde{w}, \tilde{w})) g_x(v, v) \\ &= \underbrace{g_x(w, w)}_{<0} \underbrace{g_x(v, v)}_{<0} - \underbrace{g_x(\tilde{w}, \tilde{w})}_{>0} \underbrace{g_x(v, v)}_{<0} \\ &\geq g_x(w, w) g_x(v, v) \\ &= \|v\|^2 \cdot \|w\|^2 \end{aligned}$$

□

Damit gilt also

$$\frac{g_x(v, w)}{\|v\| \cdot \|w\|} \geq 1$$

und es existiert genau ein $\alpha \in [0, \infty)$ für das

$$\cosh \alpha = \frac{g_x(v, w)}{\|v\| \cdot \|w\|}.$$

Dieses α heißt hyperbolischer Winkel zwischen u und v .

(b) Ist $v \in T_x M$ isotrop, so gilt $v \perp v$.

Definition. Zwei reguläre glatte Kurven $\gamma : I \rightarrow M$ und $\delta : J \rightarrow M$ schneiden sich in $x_0 \in M$ orthogonal, falls

$$x_0 = \gamma(t_0) = \delta(t_0) \quad \text{und} \quad \dot{\gamma}(t_0) \perp \dot{\delta}(t_0)$$

Sei (M, g) Riemannsch. γ und δ schneiden sich im Winkel $\alpha \in [0, \pi]$, falls

$$x_0 = \gamma(t_0) = \delta(t_0) \quad \text{und} \quad \alpha = \angle(\dot{\gamma}(t_0), \dot{\delta}(t_0)) =: \angle_{x_0}(\gamma, \delta).$$

3.3 Isometrien und konforme Abbildungen

Definition. Seien (M, g) und (\tilde{M}, \tilde{g}) semi-Riem. Mannigfaltigkeiten. Eine Abbildung $f : M \rightarrow \tilde{M}$ heißt Isometrie, falls

1. f ist ein Diffeomorphismus.
2. $f^*\tilde{g} = g$.

Ist dies der Fall, so nennen wir (M^n, g) und (\tilde{M}^n, \tilde{g}) isometrisch.

$f^*\tilde{g} = g$ heißt ausgeschrieben:

$$\tilde{g}_{f(x)}(df_x(v), df_x(w)) = g_x(v, w) \quad (*)$$

damit ist also $df_x : T_x M \rightarrow T_{f(x)} \tilde{M}$ eine lineare Isometrie der Vektorräume.

Definition. Eine C^∞ -Abbildung $f : M^n \rightarrow \tilde{M}^n$ heißt lokale Isometrie, falls

$$f^*\tilde{g} = g$$

Aus (*) erkennt man unmittelbar, dass mit $f^*\tilde{g} = g$ das Differential df injektiv sein muß und aus Dimensionsgründen demnach bijektiv. Der Satz über die Umkehrabbildung liefert dann eine lokale Diffeomorphie.

Definition. Eine C^∞ -Abbildung $f : M^n \rightarrow \tilde{M}^n$ heißt konform, falls

$$f^*\tilde{g} = \sigma^2 g \quad \text{wobei } \sigma \in C^\infty(M), \sigma > 0$$

Insbesondere ist f damit ein lokaler Diffeomorphismus.

Es folgen nun einige Beispiele.

Beispiel 57. HOLOMORPHE FUNKTIONEN

Sei $f : U \subset \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ eine holomorphe Funktion und $g(\cdot, \cdot) = \langle \cdot, \cdot \rangle_{\mathbb{R}^2}$.

Behauptung: Ist $f'(z_0) \neq 0$, so ist f lokal konform auf $\tilde{U} = \{z \in U \mid f'(z) \neq 0\}$ mit $\sigma^2 = \det(Df)$.

Der Beweis bleibt als Übungsaufgabe.

Beispiel 58. MÖBIUSTRANSFORMATION

Wir betrachten die 1-Punkt-Kompaktifizierung von \mathbb{C} : $\mathbb{C}_\infty = \mathbb{C} \cup \{\infty\}$. Sei weiterhin

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in GL(2; \mathbb{C}),$$

so definieren wir die Möbiustransformation

$$F_A : \mathbb{C}_\infty \rightarrow \mathbb{C}_\infty$$

$$z \mapsto \frac{az + b}{cz + d}$$

$$\infty \mapsto \frac{a}{c}$$

Mit

$$H^+ := \{x + iy \in \mathbb{C} \mid y > 0\}$$

und der Metrik

$$g_{H^+} = \frac{1}{y^2} (dx^2 + dy^2)$$

bezeichnen wir die Poincare-Halbebene (H^+, g_{H^+}) .

Behauptung: Sei $A \in SL(2; \mathbb{R})$, so ist

$$F_A : (H^+, g_{H^+}) \longrightarrow (H^+, g_{H^+})$$

eine Isometrie.

Der Beweis bleibt als Übungsaufgabe.

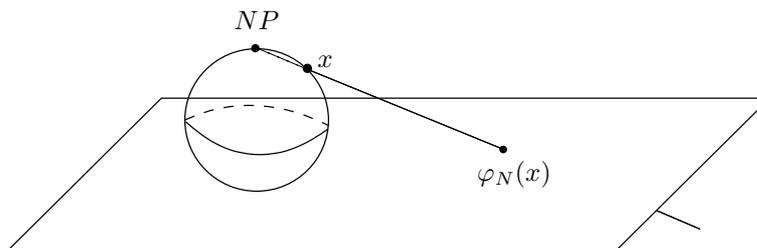
Beispiel 59. STEREOGRAPHISCHE PROJEKTION

Wir betrachten die Kartenabbildung²

$$\varphi_N : S^n - \{NP\} \longrightarrow \mathbb{R}^n$$

$x \longmapsto$ Schnittpunkt des Graphen durch NP

und x mit $\mathbb{R}^n = \{x \in \mathbb{R}^{n+1} \mid x_{n+1} = 0\}$



Behauptung: φ_N ist ein konformer Diffeomorphismus mit

$$\varphi_N^* g_{\mathbb{R}^n} = \left(\frac{1 + \|\varphi_N(\cdot)\|_{\mathbb{R}^n}^2}{2} \right)^2 \cdot \underbrace{g_{S^n}}_{\text{induzierte riem. Metrik}}$$

Der Beweis bleibt als Übungsaufgabe. (Man berechne

$$\varphi_N(x_1, \dots, x_{n+1}) = \frac{1}{1 - x_1} (x_1, \dots, x_n)$$

und

$$\varphi_N^{-1}(y_1, \dots, y_n) = \frac{1}{1 + \|y\|^2} (2y_1, \dots, 2y_n, \|y\|^2 - 1)$$

Definition. Ein Diffeomorphismus $f : (M, g) \longrightarrow (\tilde{M}, \tilde{g})$ zwischen zwei semi-Riem. Mannigfaltigkeiten heißt

- längentreu $:\iff l_g(\gamma) = l_{\tilde{g}}(f(\gamma))$ für alle Kurven $\gamma : I \longrightarrow M$,

²siehe auch Bsp. 20 auf Seite 20 von Kapitel 1

- volumentreu : $\iff \text{Vol}_g(A) = \text{Vol}_{\tilde{g}}(f(A))$ für alle meßbaren $A \subset M$
- orthogonalitätserhalten : $\iff \forall v, w \in T_x M$ mit $v \perp w$ gilt $df_x(v) \perp df_x(w)$.

Seien g und \tilde{g} Riemannsch, so heißt f

- winkeltreu : $\iff \angle_x(\gamma, \delta) = \angle_{f(x)}(f(\gamma), f(\delta))$.

Seien g und \tilde{g} pseudo-Riemannsch, so heißt f

- typerhaltend : $\iff \forall x \in T_x M$ zeitartig (raumartig) ist $df_x(v)$ zeitartig (raumartig).

Satz 3.5. Sei $f : (M, g) \rightarrow (\tilde{M}, \tilde{g})$ ein typerhaltender Diffeomorphismus zwischen semi-Riem. Mannigfaltigkeiten, dann gilt

1. f ist eine Isometrie $\iff f$ ist längentreu,
2. f ist konform $\iff f$ ist orthogonalitätserhaltend,
3. f ist längentreu $\iff f$ ist konform und volumenerhaltend.

Sind g und \tilde{g} Riemanssch, so gilt

4. f ist konform $\iff f$ ist winkeltreu.

Beweis:

1. (\Rightarrow) :

$$\begin{aligned}
 l_{\tilde{g}}(f(\gamma)) &= \int_a^b \|(f(\gamma))'(t)\|_{\tilde{g}} dt \\
 &= \int_a^b \|df_{\gamma(t)}(\dot{\gamma}(t))\|_{\tilde{g}} dt \\
 &= \int_a^b \sqrt{|\tilde{g}_{f(\gamma(t))}(df_{\gamma(t)}(\dot{\gamma}(t)), df_{\gamma(t)}(\dot{\gamma}(t)))|} dt \\
 &= \int_a^b \sqrt{(f^*\tilde{g})_{\gamma(t)}(\dot{\gamma}(t), \dot{\gamma}(t))} dt \\
 &\stackrel{\text{Vor.}}{=} \int_a^b \sqrt{g_{\gamma(t)}(\dot{\gamma}(t), \dot{\gamma}(t))} dt = \int_a^b \|\dot{\gamma}(t)\|_g dt \\
 &= l_g(\gamma)
 \end{aligned}$$

(\Leftarrow) : Sei f längentreu. Da g und f^*g symmetrische Bilinearformen sind, genügt es zu zeigen, dass

$$(f^*g)_x(v, v) = g_x(v, v) \quad \forall v \in T_x M$$

da

$$g_x(v, w) = \frac{1}{2}(g_x(v, v) + g_x(w, w) - g_x(v - w, v - w))$$

Sei also $\gamma : (-\epsilon, \epsilon) \rightarrow M$ eine Kurve mit $\gamma(0) = x$ und $\dot{\gamma}(0) = v$. Wir setzen

$$L(t) := l_g(\gamma|_{[-\epsilon, \epsilon]}) = \int_{-\epsilon}^{\epsilon} \|\dot{\gamma}(t)\|_g dt$$

und

$$\tilde{L}(t) := l_g(f(\gamma)|_{[-\epsilon, \epsilon]}) = \int_{-\epsilon}^{\epsilon} \|(f \circ \gamma)'(t)\|_g dt.$$

Nach Vor. ist $L(t) = \tilde{L}(t)$. Differenziert man nun nach t in $t = 0$, so folgt

$$\|\dot{\gamma}(t)\|_g = \|(f \circ \gamma)'(t)\|_g$$

bzw.

$$|g_x(v, v)| = |(f^*g)_x(v, v)|.$$

Da f typerhaltend ist, folgt daraus die Behauptung.

2. (\Rightarrow): Seien $v, w \in T_x M$ mit $v \perp w$, so gilt

$$g_{f(x)}(df_x(v), df_x(w)) = (f^*g)_x(v, w) = \sigma^2 g_x(v, w) = 0$$

(\Leftarrow): Sei f orthogonalitätserhaltend. Wir fixieren eine ONB (e_1, \dots, e_n) von $T_x M$.

Dann ist

$$\epsilon_i = g_x(e_i, e_i) = \begin{cases} -1 & i = 1, \dots, p \\ 1 & i = p + 1, \dots, n \end{cases}$$

und wir setzen

$$\begin{aligned} (f^*\tilde{g})_x(e_i, e_j) &= g_{f(x)}(df_x(e_i), df_x(e_j)) & (*) \\ &= \delta_{ij} \epsilon_i \sigma_i^2(x) \text{ mit } \sigma > 0 \end{aligned}$$

Wir zeigen nun

$$\sigma_1(x) = \dots = \sigma_n(x) =: \sigma(x).$$

Es gilt nämlich

$$g_x(e_i - e_j, \epsilon_j e_i + \epsilon_i e_j) = \epsilon_j \epsilon_i - \epsilon_i \epsilon_j = 0.$$

Demzufolge ist nach Voraussetzung auch

$$df_x(e_i - e_j) \perp df_x(\epsilon_j e_i + \epsilon_i e_j)$$

und damit

$$\begin{aligned} 0 &= (f^*\tilde{g})_x(e_i - e_j, \epsilon_j e_i + \epsilon_i e_j) \\ &= \tilde{g}_{f(x)}(df_x(e_i) - df_x(e_j), \epsilon_j df_x(e_i) + \epsilon_i df_x(e_j)) \\ &= \epsilon_j \epsilon_i \sigma_i^2(x) - \epsilon_i \epsilon_j \sigma_j^2(x) \\ &= \sigma_i^2(x) - \sigma_j^2(x) \end{aligned}$$

Durch lineare Fortsetzung von (*) folgt nun die Behauptung.

3. f längentreu $\iff f$ ist konform und volumentreu.

- (a) Sei $(u, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ eine Karte von M mit der durch φ definierten Orientierung O_M und damit $(\tilde{U} = f(U), \tilde{\varphi} = \varphi \circ f^{-1} = (y_1, \dots, y_n))$ eine Karte auf \tilde{M} mit der durch $\tilde{\varphi}$ definierten Orientierung. Dann ist $f : U \rightarrow \tilde{U}$ ein *orientierungserhaltender* Diffeomorphismus. Nach Definition überführt df die kanonischen Basen ineinander, denn

$$\begin{aligned} df_x \left(\frac{\partial}{\partial x_i} (x) \right) &= df_x \left(d\varphi_{\varphi(x)}^{-1} (e_i) \right) = d(f \circ \varphi^{-1})_{\varphi(x)} (e_i) \\ &\stackrel{y=f(x)}{=} d(\varphi \circ f^{-1})_{\tilde{\varphi}(y)}^{-1} (e_i) \\ &= \frac{\partial}{\partial y_i} (y) \end{aligned}$$

Für die kanonischen n-Formen folgt dann

$$\begin{aligned} 1 &= dy_1 \wedge \dots \wedge dy_n \left(\frac{\partial}{\partial y_1} (y), \dots, \frac{\partial}{\partial y_n} (y) \right) \\ &= f^* (dy_1 \wedge \dots \wedge dy_n) \left(\frac{\partial}{\partial x_1} (x), \dots, \frac{\partial}{\partial x_n} (x) \right). \end{aligned}$$

Damit ist also

$$f^* (dy_1 \wedge \dots \wedge dy_n) = dx_1 \wedge \dots \wedge dx_n \quad (3.1)$$

Behauptung: f ist volumentreu $\iff f^* d\tilde{U} = dU \quad \forall (U, \varphi)$

i. (\Leftarrow):

$$\begin{aligned} Vol_g(A) &= \int_A dU \\ &\stackrel{Vor.}{=} \int_A f^* d\tilde{U} \\ &= \int_A \sqrt{\tilde{g}_{f(x)}} f^* (dy_1 \wedge \dots \wedge dy_n) \\ &\stackrel{(3.1)}{=} \int_A \sqrt{\tilde{g}_{f(x)}} dx_1 \wedge \dots \wedge dx_n \\ &= \int_{\varphi(A)} \sqrt{\tilde{g}_{f \circ \varphi^{-1}}} d\lambda^n \\ &= \int_{\tilde{\varphi}(f(A))} \sqrt{\tilde{g}_{\tilde{\varphi}^{-1}}} d\lambda^n \\ &= \int_{f(A)} \sqrt{\tilde{g}} dy_1 \wedge \dots \wedge dy_n \\ &= \int_{f(A)} d\tilde{U} = Vol_{\tilde{g}}(f(A)) \end{aligned}$$

ii. (\Rightarrow): Für die n-Formen $f^* d\tilde{U}$ und dU existiert genau ein $\lambda \in C^\infty(M)$ mit

$$f^* d\tilde{U} = \lambda \cdot dU.$$

Für alle $x \in M$ gilt nun aber nach dem Mittelwertsatz der Integralrech-

nung

$$\begin{aligned}
 \lambda(x) &= \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\int_{K_\epsilon(x)} \lambda dU}{\int_{K_\epsilon(x)} dU} = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\int_{K_\epsilon(x)} f^* d\tilde{U}}{\int_{K_\epsilon(x)} dU} \\
 &= \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\int_{K_\epsilon(x)} \sqrt{\tilde{g}} \circ f^* (dy_1 \wedge \dots \wedge dy_n)}{\int_{K_\epsilon(x)} dU} \\
 &\stackrel{(3.1)}{=} \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\int_{K_\epsilon(x)} \sqrt{\tilde{g}} \circ f^* dx_1 \wedge \dots \wedge dx_n}{\int_{K_\epsilon(x)} dU} \\
 &= \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\int_{\varphi(K_\epsilon(x))} \sqrt{\tilde{g}} \circ (f \circ \varphi^{-1}) d\lambda^n}{\int_{K_\epsilon(x)} dU} \\
 &= \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\int_{\tilde{\varphi}(f(K_\epsilon(x)))} \sqrt{\tilde{g}} \circ \tilde{\varphi}^{-1} d\lambda^n}{\int_{K_\epsilon(x)} dU} \\
 &= \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\int_{f(K_\epsilon(x))} d\tilde{U}}{\int_{K_\epsilon(x)} dU} = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{Vol_{\tilde{g}}(f(K_\epsilon(x)))}{Vol_g(K_\epsilon(x))} \\
 &\stackrel{Vor. 1}{=} 1
 \end{aligned}$$

(b) Zum Beweis von 3. :

i. (\Rightarrow) : Ist f längentreu so gilt $f^*\tilde{g} = g$ und somit ist f konform. Wählt man nun alle Karten wie in (a), so gilt auch

$$\begin{aligned}
 \sqrt{\tilde{g}(f(x))} &= \sqrt{\det \left\{ \tilde{g}_{f(x)} \left(\frac{\partial}{\partial y_i}(y), \frac{\partial}{\partial y_j}(y) \right) \right\}_{ij}} \\
 &= \sqrt{\det \left\{ \tilde{g}_{f(x)} \left(df_x \left(\frac{\partial}{\partial x_i}(x) \right), df_x \left(\frac{\partial}{\partial x_j}(x) \right) \right) \right\}_{ij}} \\
 &= \sqrt{\det \{f^*\tilde{g}\}_{ij}} = \sqrt{\det \{g\}_{ij}} \\
 &= \sqrt{g(x)}
 \end{aligned}$$

Ist A meßbar und liegt oBdA in einer Kartenumgebung U , so folgt

$$\begin{aligned}
 \int_{f(A)} d\tilde{U} &= \int_{f(A)} \sqrt{\tilde{g}} dy_1 \wedge \dots \wedge dy_n \\
 &= \int_{\tilde{\varphi}(f(A))} \sqrt{\tilde{g}} \circ \tilde{\varphi}^{-1} d\lambda^n \\
 &= \int_{\varphi(A)} \sqrt{(\tilde{g} \circ f) \circ \varphi^{-1}} d\lambda^n \\
 &= \int_A dU
 \end{aligned}$$

Also ist f auch volumenerhaltend.

- ii. (\Leftarrow): Sei $f^*\tilde{g} = \sigma^2 \cdot g$ und $f^*d\tilde{U} = dU$ für alle Karten (U, φ) . Sei weiterhin (e_1, \dots, e_n) eine positiv-orientierte ONB in T_xU bzgl. g , dann ist

$$\left(\frac{1}{\sigma(x)} df_x(e_1), \dots, \frac{1}{\sigma(x)} df_x(e_n) \right)$$

eine positiv-orientierte ONB in $T_{f(x)}\tilde{U}$ bzgl. \tilde{g} . Und es folgt

$$\begin{aligned} (f^*d\tilde{U})_x(e_1, \dots, e_n) &= d\tilde{U}_{f(x)}(df_x(e_1), \dots, df_x(e_n)) \\ &= \sigma^n(x) \cdot d\tilde{U}_{f(x)}\left(\frac{1}{\sigma(x)} df_x(e_1), \dots, \frac{1}{\sigma(x)} df_x(e_n)\right) \\ &= \sigma^n \cdot 1 \\ &= \sigma^n \cdot dU_x(e_1, \dots, e_n). \end{aligned}$$

Damit ist also

$$f^*d\tilde{U} = \sigma^n \cdot dU$$

Nach Voraussetzung gilt dann jedoch $\sigma^n \equiv 1$.

4. Analog zu 2.

□

Information:

Satz von Nash.³ Sei (M^n, g) eine Riemannsche Mannigfaltigkeit. Dann ist M isometrisch zu einer UMF $\tilde{M} \subset \mathbb{R}^N$ mit induzierter Metrik.

Definition. Sei $B \in \mathfrak{X}^{(r,0)}(M)$ ein $(r, 0)$ -Tensorfeld und $X \in \mathfrak{X}(M)$ ein Vektorfeld und $\Phi_t : M \rightarrow M$ die durch den Fluß von X definierten lokalen Diffeomorphismen, dann heißt das $(r, 0)$ -Tensorfeld

$$(L_X B)_x := \frac{d}{dt} (\Phi_t^* B)_x |_{t=0} \in T_x^{(r,0)} M$$

die Lie-Ableitung von B nach X .

³Ann. of Math 1956, 63, S.20-63

Definition. Sei (M, g) eine semi-Riem. Mannigfaltigkeit. Ein Vektorfeld $X \in \mathfrak{X}(M)$ heißt

- Killing-Vektorfeld : $\Leftrightarrow L_X g = 0$
- konformes Vektorfeld : $\Leftrightarrow L_X g = \lambda \cdot g$

Schreibt man z.B. die Bedingung für ein Killingfeld aus, so erhält man

$$\begin{aligned} (L_X g)_x(v, w) &= \frac{d}{dt} (\Phi_t^* g)_x |_{t=0} \\ &= \frac{d}{dt} (g_{\Phi_t(x)}(X(\gamma(t)), X(\delta(t)))) |_{t=0} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{g_x(X(\gamma(0)), X(\delta(0))) - g_{\Phi_h(x)}(X(\gamma(h)), X(\delta(h)))}{|h|} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{g_x(v, w) - g_{\Phi_h(x)}(X(\gamma(h)), X(\delta(h)))}{|h|} \\ &= 0 \end{aligned}$$

für alle $v = [\gamma]$ und $w = [\delta]$ aus $T_x M$.

Satz 3.6. Sei (M, g) eine semi-Riem. Mannigfaltigkeit und $X \in \mathfrak{X}(M)$ mit Fluß $\{\Phi_t\}$, dann gilt

1. X ist ein Killingfeld. $\Leftrightarrow \Phi_t : U_t \subset M \rightarrow \Phi_t(U_t) \subset M$ sind Isometrien.
2. X ist ein konformes Vektorfeld $\Leftrightarrow \Phi_t : U_t \subset M \rightarrow \Phi_t(U_t) \subset M$ sind konforme Abbildungen.

Beweis:

1. (\Leftarrow) : Sei $x \in M$. Für alle $|t| < \epsilon$ ist $x \in U_t$. Nach Voraussetzung ist dann

$$(\Phi_t^* g)_x = g_x \quad \forall |t| < \epsilon$$

und damit

$$(L_X g)_x = \frac{d}{dt} (\Phi_t^* g)_x |_{t=0} = 0$$

- (\Rightarrow) : Sei $x \in U_t$. Zu zeigen ist $(\Phi_t^* g)_x = g_x$. Dazu nutzen wir die Eigenschaft

$$\Phi_{s+t} = \Phi_s \circ \Phi_t$$

und betrachten die Abbildung

$$\begin{aligned} (\Phi_t^*)_x : T_{\Phi_t}^{(2,0)} M &\longrightarrow T_x^{(2,0)} M & (*) \\ B_{\Phi_t(x)} &\longmapsto (\Phi_t^* B)_x \end{aligned}$$

Nach Voraussetzung ist

$$0 = (L_X g)_{\Phi_t(x)} = \frac{d}{ds} \left((\Phi_s^* g)_{\Phi_t(x)} \right) |_{s=0}.$$

Wenden wir darauf (*) an , so folgt

$$\begin{aligned} 0 &\equiv \frac{d}{ds} \underbrace{((\Phi_t^*)_x \circ (\Phi_s^*g)_{\Phi_t(x)})}_{(\Phi_{t+s}^*g)_x} \Big|_{s=0} \\ &= \frac{d}{d\tau} (\Phi_\tau^*g)_x \Big|_\tau \end{aligned}$$

d.h. $(\Phi_\tau^*g)_x$ ist konstant auf $(-\epsilon, t)$ und damit folgt

$$(\Phi_\tau^*g)_x = g_x$$

2. (\Leftarrow) : Es ist $(\Phi_t^*g)_x = \sigma_t^2(x) g_x$ für alle t für die Φ_t definiert ist. Damit folgt

$$(L_X g)_x = \frac{d}{dt} (\Phi_t^*g)_x \Big|_{t=0} = \frac{d}{dt} \underbrace{(\sigma_t^2(x))}_{\lambda(x)} \Big|_{t=0} \cdot g_x$$

(\Rightarrow) : Sei x im Definitionsbereich von Φ_t und gelte

$$(L_X g)_{\Phi_t(x)} = \frac{d}{ds} (\Phi_s^*g)_{\Phi_t(x)} \Big|_{s=0} = \lambda(\Phi_t(x)) \cdot g_{\Phi_t(x)}$$

Wir benutzen wieder die Abbildung von (*) :

$$\frac{d}{ds} \underbrace{((\Phi_t^*)_x \circ (\Phi_s^*g)_{\Phi_t(x)})}_{(\Phi_{t+s}^*g)_x} \Big|_{t=0} = \lambda(\Phi_t(s)) \cdot (\Phi_t^*)_x g_{\Phi_t(x)}$$

Damit ist

$$\frac{d}{dt} ((\Phi_t^*g)_x) = \lambda(\Phi_t(x)) \cdot \underbrace{(\Phi_t^*g)_x}_{h(t)}.$$

Aus der DGL $h'(t) = \lambda(t) h(t)$ folgt dann

$$(\Phi_t^*g)_x = \underbrace{e^{\int_0^t \lambda(\Phi_s(x)) ds}}_{:=\sigma_t^2(x)} \cdot \underbrace{(\Phi_0^*g)_x}_{g_x}$$

und somit ist Φ_t konform. □

Satz 3.7 (Eigenschaften der Lie-Ableitung von Tensorfeldern). *Seien $B_i, B \in \mathfrak{X}^{(r,0)}(M)$ Tensorfelder, $f \in C^\infty(M)$ und $X, Y \in \mathfrak{X}(M)$, so gilt*

1. $L_X(f \cdot B) = X(f) \cdot B + f \cdot L_X B$
2. $L_X(B_1 \otimes B_2) = (L_X B_1) \otimes B_2 + B_1 \otimes (L_X B_2)$
3. $(L_X B)(X_1, \dots, X_r) = X(B(X_1, \dots, X_r)) - \sum_{i=1}^r B(X_1, \dots, [X, X_i], \dots, X_r)$
4. $[L_X, L_Y] = L_{[X, Y]}$

Den Beweis überlassen wir als Übungsaufgabe.

Folgerung

Sind X, Y Killing-VF (konforme VF), so ist $[X, Y]$ auch ein Killing-VF (konformes VF).

Beweis: Es sei $L_X g = \lambda \cdot g$ und $L_Y g = \mu \cdot g$. Aus Satz 3.7 folgt dann

$$\begin{aligned}
 L_{[X,Y]}g &\stackrel{4.)}{=} [L_X, L_Y]g \\
 &= L_X(L_Y g) - L_Y(L_X g) \\
 &= L_X(\mu \cdot g) - L_Y(\lambda \cdot g) \\
 &\stackrel{1.)}{=} X(\mu) \cdot g + \mu \cdot L_X g - X(\lambda) \cdot g + \lambda \cdot L_Y g \\
 &= (X(\mu) + \mu \cdot \lambda - X(\lambda) - \lambda \cdot \mu) \cdot g \\
 &= \underbrace{(X(\mu) - X(\lambda))}_{\in C^\infty M} \cdot g
 \end{aligned}$$

□

Bemerkungen

- $\mathfrak{Kill}(M, g) = \{X \in \mathfrak{X}(M) \mid X \text{ ist Killing-Vektorfeld}\}$ ist eine Lie-Algebra.
 $Isom(M, g) = \{f \in Diff(M) \mid f \text{ ist Isometrie}\}$ ist eine Liesche Gruppe mit Lie-Algebra

$$\mathfrak{Kill}_c(M, g) = \{X \in \mathfrak{Kill}(M, g) \mid X \text{ ist vollständig}\}$$

- $conf(M, g) = \{X \in \mathfrak{X}(M) \mid X \text{ ist ein konformes VF}\}$ ist eine Lie-Algebra
 $Conf(M, g) = \{f \in Diff(M) \mid f \text{ ist konform}\}$ ist eine Liesche Gruppe mit Lie-Algebra

$$conf_c(M, g) = \{X \in conf(M, g) \mid X \text{ ist vollständig}\}$$

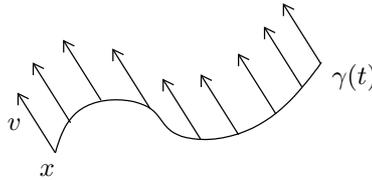
und es gilt

$$\begin{aligned}
 \dim \mathfrak{Kill}_c(M^n, g) &\leq \frac{1}{2}n(n+1) \\
 \dim conf_c(M^n, g) &\leq \frac{1}{2}(n+1)(n+2)
 \end{aligned}$$

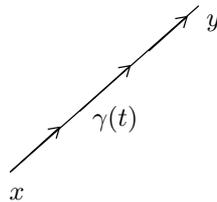
3.4 Kovariante Ableitungen und der Levi-Civita-Zusammenhang einer semi-Riemannschen Mannigfaltigkeit

Im Euklidischen Raum weiß man, wie man Vektoren entlang von Kurven parallel verschieben kann. Wir wollen dies jetzt auf Mannigfaltigkeiten verallgemeinern. Dazu benötigt man ein Konzept, mit dem man erklären kann, was die Parallelverschiebung von Tangentialvektoren sein soll.

Betrachten wir dazu zunächst die Parallelverschiebung im \mathbb{R}^n nochmals genauer:



- $v(Z) \in T_{\gamma(t)}\mathbb{R}^n = \mathbb{R}^n$ Parallelverschiebung von $v \in T_x\mathbb{R}^n$ entlang $\gamma \iff v(t) \equiv v = \text{const.} \iff v'(t) = 0$



- $\gamma(t)$ kürzeste Kurve zwischen x und y im $\mathbb{R}^n \iff \gamma'(t)$ parallel verschoben entlang $\gamma(t)$

Wir müssen allgemein erklären, was die Ableitung von VF entlang Kurven ist. Dazu verallgemeinern wir zunächst die Richtungsableitung im \mathbb{R}^n und betrachten dazu die Menge der Vektorfelder $\mathfrak{X}(\mathbb{R}^n) = C^\infty(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n) = \Gamma(T\mathbb{R}^n)$ mit der Abbildung

$$\begin{aligned} \nabla : \mathfrak{X}(\mathbb{R}^n) \times \mathfrak{X}(\mathbb{R}^n) &\longrightarrow \mathfrak{X}(\mathbb{R}^n), \\ (X, Y) &\longmapsto \nabla_X Y := X(Y) \end{aligned}$$

Richtungsableitung von $Y : \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^n$
nach VF X .

Diese Abbildung ist

- additiv in Y ,

- erfüllt die Produktregel in Y , d.h. $\nabla_X(fY) = X(f)Y + f \cdot (\nabla_X Y)$,
- und sie ist tensoriell in X , d.h. $\nabla_{f \cdot X_1 + g \cdot X_2} Y = f \cdot \nabla_{X_1} Y + g \cdot \nabla_{X_2} Y$ für alle $Y \in \mathfrak{X}(\mathbb{R}^n)$ und $f, g \in C^\infty(\mathbb{R}^n)$.

Desweiteren hat sie die Eigenschaften:

- $X(\langle Y_1, Y_2 \rangle_{\mathbb{R}^n}) = \langle \nabla_X Y_1, Y_2 \rangle_{\mathbb{R}^n} + \langle Y_1, \nabla_X Y_2 \rangle_{\mathbb{R}^n}$
- $\nabla_X Y - \nabla_Y X = [X, Y]$

Definition. Sei M^n eine glatte Mannigfaltigkeit. Eine Zuordnung

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

heißt kovariante Ableitung (=affiner Zusammenhang) von Y nach X (auf M), falls

1. $\nabla_X(Y_1 + Y_2) = \nabla_X Y_1 + \nabla_X Y_2$ (additiv in Y)
2. $\nabla_X(fY) = X(f)Y + f \nabla_X Y$ (Produktregel)
3. $\nabla_X Y$ tensoriell in X , d.h. $\nabla_{f \cdot X_1 + g \cdot X_2} Y = f \cdot \nabla_{X_1} Y + g \cdot \nabla_{X_2} Y$ für alle $Y \in \mathfrak{X}(M)$ und $f, g \in C^\infty(M)$.

Beispiel 60. KOVARIANTE ABLEITUNGEN

1. Für $\mathbb{R}^n = M^n$ ist wie oben gesehen $\nabla_X Y = X(Y)$ eine kovariante Ableitung.
2. Sei $M^n \subset \mathbb{R}^n$ eine UMF, dann ist $(\nabla_X Y)(x) := \text{proj}_{T_x M} \underbrace{X(Y)(x)}_{\in \mathbb{R}^n}$ eine kov. Ableitung auf M .
3. Sei ∇ eine kov. Ableitung und $B \in \mathfrak{X}^{(2,1)}(M)$, dann ist $\tilde{\nabla} = \nabla + B$ mit

$$\tilde{\nabla}_X Y = \nabla_X Y + B(X, Y)$$

ebenfalls eine kov. Ableitung.

Da eine glatte Mannigfaltigkeit M^n diffeomorph ist zu einer UMF $\tilde{M} \subset \mathbb{R}^N$ existieren also immer ∞ viele kov. Ableitungen.

Lemma 3.1. Sei ∇ eine kov. Ableitung, $U \subset M$ offen und $Y_1, Y_2, X \in \mathfrak{X}(M)$ mit $Y_1|_U \equiv Y_2|_U$, so ist

$$\nabla_X Y_1 = \nabla_X Y_2$$

auf U .

Beweis: Sei $x \in U$ fix und $f \in C^\infty(M)$ mit $f(x) = 1$ und $\text{supp } f \subset U$. Dann ist $f \cdot (Y_1 - Y_2) \equiv 0$ auf M und mit der Produktregel folgt

$$0 = \nabla_X f \cdot (Y_1 - Y_2) = X(f)(Y_1 - Y_2) + f \cdot (\nabla_X Y_1 - \nabla_X Y_2)$$

Im Punkt x gilt nun aber $f(x) = 1$ und $Y_1(x) = Y_2(x)$, sodass

$$0 = (\nabla_X Y_1)(x) - (\nabla_X Y_2)(x).$$

Daraus folgt aber die Behauptung.

□

Folgerungen

1. $(\nabla_X Y)$ ist eindeutig durch $X(x)$ und $Y|_U$ bestimmt, und zwar für beliebig kleine offene Umgebung $U(x) \subset M$. Wir setzen damit

$$(\nabla_X Y)(x) := \nabla_{X(x)} Y.$$

2. Man kann die kov. Ableitung ∇^M auf M zu einer kov. Ableitung auf offenen Teilmengen $U \subset M$ einschränken:

$$\begin{aligned} \nabla^U : \mathfrak{X}(U) \times \mathfrak{X}(U) &\longrightarrow \mathfrak{X}(U) \\ (X, Y) &\longmapsto (\nabla_X^U Y)(x) := \left(\nabla_{\tilde{X}}^M \tilde{Y} \right)(x) \end{aligned}$$

wobei $\tilde{X}, \tilde{Y} \in \mathfrak{X}(M)$ mit $\tilde{X}|_U = X$ und $\tilde{Y}|_U = Y$.

Wir bezeichnen im Folgenden ∇^U und ∇^M mit dem gleichen Symbol ∇ .

Definition. Sei $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ eine zulässige Karte auf M , dann heißen die Funktionen $\Gamma_{ij}^k \in C^\infty(U)$, für die

$$\nabla_{\frac{\partial}{\partial x_i}} \frac{\partial}{\partial x_j} = \sum_{k=1}^n \Gamma_{ij}^k \frac{\partial}{\partial x_k}$$

lokale Koeffizienten von ∇ bez. (U, φ) .

Wegen der Eigenschaften 1.) - 3.) ist ∇ eindeutig bestimmt, wenn man die $\{\Gamma_{ij}^k\}$ für einen Atlas A_M kennt. Sei nämlich $X = \sum \xi^i \frac{\partial}{\partial x_i}$ und $Y = \sum \psi^j \frac{\partial}{\partial x_j}$ für eine Karte $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$, so folgt dann

$$\begin{aligned} \nabla_X Y &= \sum_{i=1}^n \xi^i \nabla_{\frac{\partial}{\partial x_i}} Y \\ &= \sum_{i,j=1}^n \xi^i \eta^j \nabla_{\frac{\partial}{\partial x_i}} \frac{\partial}{\partial x_j} + \xi^i \frac{\partial}{\partial x_i} (\eta_j) \frac{\partial}{\partial x_j} \\ &= \sum_{k=1}^n \left(\sum_{i,j=1}^n \xi^i \eta^j \Gamma_{ij}^k + \sum_i \xi^i \frac{\partial}{\partial x_i} (\eta^k) \right) \frac{\partial}{\partial x_k} \end{aligned}$$

Beispiel 61. KOVARIANTE ABLEITUNG IM \mathbb{R}^n

Sei $M = \mathbb{R}^n$ und $\nabla_X Y = X(Y)$. Für die Karte $(\mathbb{R}^n, \varphi = \text{id})$ mit $\frac{\partial}{\partial x_i} = e_i$ folgt

$$\nabla_{e_i} e_j = e_i(e_j) \equiv 0,$$

da e_j ein konstantes VF ist. Es gilt also $\Gamma_{ij}^k = 0$.

Definition. Sei $\gamma : I \subset \mathbb{R} \rightarrow M$ eine C^∞ -Kurve. Ein VF entlang γ ist eine Abbildung

$$X : I \subset \mathbb{R} \rightarrow TM$$

$$t \mapsto X(t) \in T_{\gamma(t)}M$$

die 'glatt' ist, d.h. für jede Karte (U, φ) mit $U \cap \gamma(I) \neq \emptyset$ sind die Koeffizienten $\xi^i(t)$ in der Basisdarstellung

$$X(t) = \sum_{i=1}^n \xi^i(t) \frac{\partial}{\partial x_i}(\gamma(t)) \quad \gamma(t) \in U$$

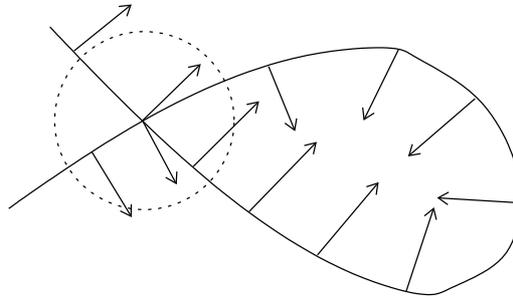
glatte Funktion in t .

Wir setzen

$$\mathfrak{X}_\gamma(M) := \text{Menge der Vektorfelder entlang } \gamma$$

Bemerkung

$X(t)$ ist i.A. nicht zu einem VF auf M fortsetzbar.



Behauptung: Sei $\gamma : I \subset \mathbb{R} \rightarrow M$ regulär und $X \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$, dann existiert für alle $t_0 \in I$ ein $\epsilon_{t_0} > 0$ und Vektorfeld $\tilde{X}_{t_0} \in \mathfrak{X}(M)$ so dass

$$\tilde{X}_{t_0}(\gamma(t)) = X(t) \quad \forall |t - t_0| < \epsilon_{t_0}, t \in I.$$

D.h. man kann X in diesem Fall lokal zu einem Vektorfeld auf M fortsetzen.

Beweis: Nach Voraussetzung ist γ eine Immersion, und damit lokal eine Einbettung. Es existiert also eine Teilmenge $\hat{I}_{t_0} \subset I$ so dass

$$\gamma : \hat{I}_{t_0} \simeq \gamma(\hat{I}_{t_0}) = K \subset M$$

ein Diffeomorphismus zur UMF $K \subset M$ ist. Damit existiert auch eine Karte (U, φ) von M mit $\varphi(K \cap U) = (x_1, 0, \dots, 0)$ und wir setzen

$$\tilde{X}(\varphi^{-1}(x_1, \dots, x_n)) := X(\varphi^{-1}(x_1, 0, \dots, 0)).$$

□

Satz 3.8. Sei (M, ∇) eine glatte Mannigfaltigkeit mit kov. Ableitung und $\gamma : I \subset \mathbb{R} \rightarrow M$ eine C^∞ -Kurve in M . Dann existiert eine eindeutig bestimmte Zuordnung

$$\frac{\nabla}{dt} : \mathfrak{X}_\gamma(M) \rightarrow \mathfrak{X}_\gamma(M)$$

$$X \mapsto \frac{\nabla X}{dt}$$

mit folgenden Eigenschaften:

1. $\frac{\nabla}{dt}(X_1 + X_2) = \frac{\nabla X_1}{dt} + \frac{\nabla X_2}{dt}$
2. $\frac{\nabla}{dt}(f \cdot X) = f'X + f \cdot \frac{\nabla X}{dt}$ für alle $f \in C^\infty(I)$.
3. Ist $\tilde{X} \in \mathfrak{X}(M)$ mit $\tilde{X}(\gamma(t)) = X(t) \quad \forall t \in \tilde{I} \subset I$ dann ist

$$\frac{\nabla X}{dt}(t) = \nabla_{\gamma(t)} \tilde{X} \quad \forall t \in \tilde{I}$$

$\frac{\nabla X}{dt} \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$ heißt kovariante Ableitung von $X \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$ entlang γ

Beweis:

1. **Eindeutigkeit:** Angenommen $\frac{\nabla}{dt}$ und 1.) - 3.) sind gegeben. Sei $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ zulässige Karte mit $U \cap \gamma(I) \neq \emptyset$, und $\tilde{I} \subset I$ ein Teilintervall mit $\gamma(\tilde{I}) \subset U$, dann ist

$$X(t) = \sum_{i=1}^n \xi_i(t) \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i}(\gamma(t))}_{=: X_i(t)} \quad t \in \tilde{I}$$

Aus 1.) und 2.) folgt nun

$$\frac{\nabla X}{dt} = \sum_{i=1}^n \left(\xi'_i \cdot X_i + \xi_i \frac{\nabla X_i}{dt} \right).$$

und mit 3.) folgt weiter

$$\frac{\nabla X_i}{dt}(t) = \nabla_{\dot{\gamma}(t)} \frac{\partial}{\partial x_i} \quad \forall t \in \tilde{I}$$

Setzen wir nun $\varphi \circ \gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_n)$ auf \tilde{I} , so erhalten wir

$$\begin{aligned} \dot{\gamma}(t) &= \sum_{j=1}^n \gamma'_j(t) \frac{\partial}{\partial x_j}(\gamma(t)) \\ \Rightarrow \frac{\nabla X_i}{dt}(t) &= \sum_{k,j=1}^n \gamma'_j(t) \Gamma_{ji}^k(\gamma(t)) \cdot \frac{\partial}{\partial x_k}(\gamma(t)) \quad t \in \tilde{I} \\ \Rightarrow \frac{\nabla X}{dt}(t) &= \sum_{k=1}^n \left(\xi'_k(t) + \sum_{i,j} \xi_i(t) \gamma'_j(t) \Gamma_{ij}^k(\gamma(t)) \right) \frac{\partial}{\partial x_k}(\gamma(t)) \quad \forall t \in \tilde{I} \quad (*) \end{aligned}$$

und damit ist $\frac{\nabla X}{dt}$ ist eindeutig durch die lokalen Koeffizienten $\{\Gamma_{ij}^k\}$ von ∇ bestimmt.

2. **Existenz:** Sei $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ Karte mit $\gamma(I) \cap U \neq \emptyset$. Wir definieren $\frac{\nabla X}{dt}(t) \quad \forall t \in I$ durch (*)

$$\frac{\nabla X}{dt}(t) = \sum_{k=1}^n \left(\xi'_k(t) + \sum_{i,j} \xi_i(t) \gamma'_j(t) \Gamma_{ij}^k(\gamma(t)) \right) \frac{\partial}{\partial x_k}(\gamma(t)).$$

Direktes Nachrechnen zeigt, dass $\frac{\nabla X}{dt}(t)$ die Eigenschaften 1.) - 3.) erfüllt. (*) ist damit auch die Lokale Darstellung von $\frac{\nabla X}{dt}(t)$.

□

Beispiel 62. KOVARIANTE ABLEITUNG ENTLANG KURVEN IM \mathbb{R}^n

Sei $M = \mathbb{R}^n$ und $\nabla_X Y = X(Y)$. Für $X \in \mathfrak{X}_\gamma(\mathbb{R}^n)$ gilt

$$X(t) = \sum_{i=1}^n \xi_i(t) e_i$$

und damit ist

$$\begin{aligned} \frac{\nabla X}{dt}(t) &= \sum_{k=1}^n \xi'_k(t) e_k \quad (\text{da } \Gamma_{ij}^k \equiv 0) \\ &= X'(t) \end{aligned}$$

Definition. Sei (M, ∇) eine glatte Mannigfaltigkeit mit kov. Ableitung und $\gamma : I \subset \mathbb{R} \rightarrow M$ eine glatte Kurve. Ein VF $X \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$ heißt parallel verschoben entlang γ , falls

$$\frac{\nabla X}{dt} \equiv 0$$

In lokalen Koordinaten ist diese Bedingung äquivalent zu

$$\left(\xi'_k + \sum_{i,j} (\gamma' - i \xi_j \Gamma_{ij}^k \gamma) \right) \equiv 0 \quad k = 1, \dots, n$$

Beispiel 63. PARALLELVERSCHIEBUNG IM \mathbb{R}^n

Sei $M = \mathbb{R}^n$ und $\nabla_X Y = X(Y)$. $Z \in \mathfrak{X}_\gamma(\mathbb{R}^n)$ ist genau dann parallel verschoben, falls

$$\frac{\nabla Z}{dt} = Z'(t) = 0 \iff Z(t) = \text{const.}$$

Satz 3.9. Sei (M, ∇) eine glatte Mannigfaltigkeit mit kov. Ableitung und $\gamma : [a, b] \subset \mathbb{R} \rightarrow M$ eine glatte Kurve, dann gilt

1. Ist $v \in T_{\gamma(a)}M$, so existiert genau ein entlang γ parallelverschobenes VF $X_v \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$ mit $X_v(a) = v$.
2. Die Abbildung

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_\gamma^\nabla : T_{\gamma(a)}M &\longrightarrow T_{\gamma(b)}M \\ v &\longmapsto X_v(b) \end{aligned}$$

heißt Parallelverschiebung entlang γ , ist ein linear Isomorphismus der Tangentialräume und unabhängig von der Parametrisierung von γ .

Beweis:

1. Die DGL $\frac{\nabla X}{dt} \equiv 0$ hat in lokalen Koordinaten die Form

$$\xi'(t) = B(t) \cdot \xi(t),$$

wobei $\xi(t) = (\xi_1(t), \dots, \xi_n(t))^T$ und $B(t) \in M_{\mathbb{R}}(n, n)$. Sei $\xi(a)$ vorgegeben, dann existiert (lokal) genau eine Lösung des AWP auf dem ganzen Definitionsbereich von B^4 . Überdeckt man durch Karten $\gamma([a, b])$, so erhält man sukzessive die Lösung des AWP auf den Teilintervallen. Und damit folgt die Behauptung.

⁴siehe Analysis 3: Eindeutigkeitsatz von Picard-Lindelöf

2. $\mathcal{P}_\gamma^\nabla$ ist

- *linear*, da DGL linear:

$$X_{\alpha v + \beta w}(t) = \alpha X_v(t) + \beta X_w(t)$$

erfüllt DGL und AWP

- *bijektiv*: Wir lassen γ rückwärts durchlaufen:

$$\gamma^-(t) = \gamma(b - t(b - a)) \quad t \in [0, 1].$$

Dann ist $X^-(t) := X(b - t(b - a))$ parallel entlang γ^- und es gilt

$$X^-(1) = X(a) \quad \text{und} \quad X^-(0) = X(b)$$

sodass

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_\gamma^\nabla \cdot \mathcal{P}_{\gamma^-}^\nabla &= \text{id}_{T_{\gamma(b)}M} \\ \mathcal{P}_{\gamma^-}^\nabla \circ \mathcal{P}_\gamma^\nabla &= \text{id}_{T_{\gamma(a)}M} \end{aligned}$$

- Mit

$$\tilde{\gamma}(s) = \gamma(\tau(s)) \quad \tau(s_0) = a, \quad \tau(s_1) = b$$

ist $\tilde{X}(s) := X(\tau(s))$ Parallelverschiebung von $v \in T_{\gamma(a)}M$ entlang $\tilde{\gamma}$.

□

Satz 3.10. Sei $M^n \subset \mathbb{R}^N$ eine UMF mit kanonischen kov. Ableitung $\nabla_X Y = \text{proj}_{TM}(X(Y))$ und $\gamma : I \subset \mathbb{R} \rightarrow M$ eine Kurve. Dann gilt:

Ein Vektorfeld $Z : I \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^N$ auf M entlang γ ist parallelverschoben. $\iff Z'(t) \in N_{\gamma(t)}M^n \subset \mathbb{R}^N \quad \forall t \in I.$

Beweis: Sei $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ Karte mit $\gamma(t) \in U$, dann ist in einer Umgebung von $\gamma(t)$

$$Z(t) = \sum_{i=1}^n \xi_i(t) \frac{\partial}{\partial x_i}(\gamma(t))$$

und damit

$$\begin{aligned} \frac{\nabla Z}{dt}(t) &= \sum_i \xi_i'(t) \frac{\partial}{\partial x}(\gamma(t)) + \xi_i(t) \nabla_{\dot{\gamma}(t)} \frac{\partial}{\partial x_i} \\ &\stackrel{\text{Def.}}{=} \sum_{i=1}^n \xi_i'(t) \frac{\partial}{\partial x_i}(\gamma(t)) + \xi_i(t) \text{proj}_{T_{\gamma(t)}M} \left(\dot{\gamma}(t) \left(\frac{\partial}{\partial x_i} \right) \right) \\ &= \text{proj}_{TM_{\gamma(t)}} \left(\sum_i \xi_i'(t) \frac{\partial}{\partial x_i}(\gamma(t)) + \xi_i(t) \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial x_i} \gamma(t) \right) \right) \\ &= \text{proj}_{T_{\gamma(t)}M} \left(\frac{d}{dt} \underbrace{\left(\sum_i \xi_i(t) \frac{\partial}{\partial x_i}(\gamma(t)) \right)}_{Z(t)} \right) \\ &= \text{proj}_{T_{\gamma(t)}M} Z'(t). \end{aligned}$$

Und daraus folgt

$$\begin{aligned} Z'(t) = 0 &\iff \text{proj}_{T_{\gamma(t)}M}(Z'(t)) = 0 \quad \forall t \in I \\ &\iff Z'(t) \in N_{\gamma(t)}M^n \subset \mathbb{R}^N \quad \forall t \in I. \end{aligned}$$

□

Beispiel 64. PARALLELVERSCHIEBUNG AUF DER S^2

Betrachten S^2 mit kanonischer kov. Ableitung $\nabla_X Y = \text{proj}_{TS^2} X(Y)$.

Wir betrachten die halben Großkreise. Für $t \in [0, \pi]$ sei

$$\begin{aligned}\gamma_1(t) &= \cos(t) e_3 + \sin(t) e_1 \\ \gamma_2(t) &= \cos(t) e_3 + \sin(t) e_2\end{aligned}$$

Für die Parallelverschiebungen $\mathcal{P}_{\gamma_j}^\nabla : T_{e_3} S^2 \longrightarrow T_{-\gamma_j} S^2, j \in \{1, 2\}$, folgt dann

$$\boxed{\mathcal{P}_{\gamma_1}^\nabla(v) = -\mathcal{P}_{\gamma_2}^\nabla(v) \quad \text{mit } v \in T_\xi S^2}$$

wobei $T_\xi S^2 = \text{span}(e_1, e_2)$. Denn es gilt

- $\gamma_1'(t) = -\sin(t) e_3 + \cos(t) e_1$ ist parallel entlang γ_1 mit $\gamma_1'(0) = e_1$, da $\gamma_1''(t) = -\gamma_1(t) \perp T_{\gamma_1(t)} S^2$
- $\gamma_2'(t) = -\sin(t) e_3 + \cos(t) e_2$ ist parallel entlang γ_2 mit $\gamma_2'(0) = e_2$.
- $X_1(t) \equiv e_2$ ist \parallel VF entlang γ_1 und $X_1(0) = e_2$, da $X_1(t) \perp \gamma_1(t)$ und $X_1'(t) \equiv 0$.
- $X_2(t) \equiv e_1$ ist \parallel VF entlang γ_2 mit $X_2(0) = e_1$.

Sei dann $v = v_1 e_1 + v_2 e_2 \in T_\xi S^2$, so folgt

$$\begin{aligned}\mathcal{P}_{\gamma_1}^\nabla(v) &= v_1 \mathcal{P}_{\gamma_1}^\nabla(e_1) + v_2 \mathcal{P}_{\gamma_1}^\nabla(e_2) \\ &= -v_1 e_1 + v_2 e_2\end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned}\mathcal{P}_{\gamma_2}^\nabla(v) &= v_1 \mathcal{P}_{\gamma_2}^\nabla(e_1) + v_2 \mathcal{P}_{\gamma_2}^\nabla(e_2) \\ &= v_1 e_1 - v_2 e_2\end{aligned}$$

Hierbei hängt die Parallelverschiebung also vom Weg ab!

Bemerkung

Der Begriff der kov. Ableitung und der \parallel -Verschiebung sind äquivalent: Seien $X, Y \in \mathfrak{X}(M)$ und γ Integralkurve von X durch x , sodass

$$\gamma(0) = x, \quad \gamma'(t) = X(\gamma(t)).$$

Dann ist

$$(\nabla_X Y)(x) = \frac{d}{dt} \underbrace{\left(\mathcal{P}_{\gamma|_{[0,t]}}^\nabla(Y(\gamma(t))) \right)}_{\in T_x M} \Big|_{t=0}$$

Sei (M^n, g) semi-Riemannsche MF, dann existieren verschiedene kov. Ableitungen. Wollen wir solche kov. Ableitung ∇ finden, für die die Parallelverschiebungen

$$\mathcal{P}_\gamma^\nabla : T_{\gamma(a)} M^n \longrightarrow T_{\gamma(b)} M^n$$

(pseudo)-orthogonale Abbildungen sind, d.h. Längen und Winkel von Vektoren bleiben invariant.

Satz 3.11. [Fundamentallemma der Riemannschen Geometrie]

Sei (M^n, g) semi-Riemannsche MF. Dann existiert genau eine kov. Ableitung ∇ auf M^n mit

1. $X(g(Y, Z)) = g(\nabla_X Y, Z) + g(Y, \nabla_X Z)$ (*metrisch*)
2. $\nabla_X Y - \nabla_Y X = [X, Y]$ (*torsionsfrei*).

Diese kov. Ableitung ∇ heißt Levi-Civita-Zusammenhang von (M^n, g) und ist gegeben durch die Koszul-Formel:

$$(*) \quad 2g(\nabla_X Y, Z) = X(g(Y, Z)) + Y(g(X, Z)) - Z(g(X, Y)) + g([X, Y], Z) + g([Z, X], Y) + g([Z, Y], X).$$

Beweis:

1. *Existenz:* Die Formel (*) definiert eine metrische und torsionsfreie kov. Ableitung. ÜA.

2. *Eindeutigkeit:* Sei ∇ metrisch und torsionsfrei, dann gilt

- (a) $X(g(Y, Z)) \stackrel{metr.}{=} g(\nabla_X Y, Z) + g(Y, \nabla_X Z)$
- (b) $Y(g(X, Z)) \stackrel{metr.}{=} g(\nabla_Y X, Z) + g(X, \nabla_Y Z) \stackrel{tor.}{=} g(\nabla_X Y, Z) + g([Y, X], Z) + g(X, \nabla_Y Z)$
- (c) $Z(g(X, Y)) = g(\nabla_Z X, Y) + g(X, \nabla_Z Y) \stackrel{tor.}{=} g(\nabla_X Z, Y) + g([Z, X], Y) + g(X, \nabla_Y Z) + g(X, [Z, Y])$

Daraus folgt dann aber die Koszul-Formel (*).

□

Satz 3.12. Sei ∇ der Levi-Civita-Zusammenhang einer semi-Riemannschen MF (M^n, g) und seien $\{\Gamma_{ij}^k\}$ die lokalen Koeffizienten von ∇

$$\nabla_{\frac{\partial}{\partial x_i}} \frac{\partial}{\partial x_j} = \sum_{k=1}^n \Gamma_{ij}^k \frac{\partial}{\partial x_k}.$$

Dann gilt: Γ_{ij}^k ist symmetrisch in (i, j) und

$$(**) \quad \Gamma_{ij}^k = \frac{1}{2} \sum_{\ell=1}^n g^{k\ell} \left(\frac{\partial}{\partial x_i} (g_{j\ell}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (g_{i\ell}) - \frac{\partial}{\partial x_\ell} (g_{ij}) \right),$$

wobei $g_{ij} = g\left(\frac{\partial}{\partial x_i}, \frac{\partial}{\partial x_j}\right)$ die lokale Koeffizienten der Metrik sind und $g^{k\ell}$ inverse Matrix zu g_{ij} .

Beweis: Wir setzen $\nabla_{\frac{\partial}{\partial x_i}} \frac{\partial}{\partial x_j} = \sum_{k=1}^n \Gamma_{ij}^k \frac{\partial}{\partial x_k}$ in die Koszul-Formel (*) ein und benutzen

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

$$2g\left(\underbrace{\nabla_{\frac{\partial}{\partial x_i}} \frac{\partial}{\partial x_j}, \frac{\partial}{\partial x_p}}\right) = \frac{\partial}{\partial x_i} (g_{ip}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (g_{ip}) - \frac{\partial}{\partial x_p} (g_{ij}) - \sum_{k=1}^n 2\Gamma_{ij}^k g_{kp}$$

Multiplizieren wir dies mit $\sum_p g^{p\ell}$, so folgt

$$2\Gamma_{ij}^\ell = \sum_p g^{\ell p} \left(\frac{\partial}{\partial x_i} (g_{jp}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (g_{ip}) - \frac{\partial}{\partial x_p} (g_{ij}) \right).$$

□

Definition. Die $\{\Gamma_{ij}^k\}$ aus (**) heißen Christoffel-Symbole von (M^n, g) .

Satz 3.13. Sei ∇ der Levi-Civita-Zusammenhang der semi-Riemannschen MF (M^n, g) , $\gamma : [a, b] \in \mathbb{R} \rightarrow M$ eine glatte Kurve und $X, Y \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$ parallelverschiebende VF entlang γ , dann gilt

$$g_{\gamma(t)}(X(t), Y(t)) \equiv g_{\gamma(a)}(X(a), Y(a)) \quad \forall t \in [a, b]$$

Insbesondere ist $\mathcal{P}_\gamma^\nabla : T_{\gamma(a)}M \rightarrow T_{\gamma(b)}M$ eine (pseudo)-orthogonale Abbildung, d.h. Längen und Winkel von Vektoren bleiben invariant.

Beweis: ∇ ist eine metrische kov. Ableitung, und mit der Definition von $\frac{\nabla X}{dt}$ folgt

$$\frac{d}{dt} (g_{\gamma(t)}(X(t), Y(t))) = g_{\gamma(t)} \left(\frac{\nabla X}{dt}(t), Y(t) \right) + g_{\gamma(t)} \left(X(t), \frac{\nabla Y}{dt}(t) \right) \quad \forall X, Y \in \mathfrak{X}_\gamma(M).$$

Da nach Voraussetzung X und Y parrallele Vektorfelder sind, verschwindet die rechte Seite der Gleichung.

□

Satz 3.14. Sei $M^n \subset \mathbb{R}^N$ eine UMF mit induzierter Riemannscher Metrik g . Der Levi-Civita-Zusammenhang von M^n ist dann gegeben durch

$$\nabla_X Y = \text{proj}_{TM} X(Y)$$

Beweis: Die Richtungsableitung im \mathbb{R}^n ist bekanntlich metrisch und torsionsfrei. Für $Y, Z \in \mathfrak{X}(M^n)$ mit $X(Y) = \text{proj}_{TM} X(Y) + \text{proj}_{NM} X(Y)$ folgt dann aber aus $TM \perp_{\langle \cdot, \cdot \rangle_{\mathbb{R}^n}} NM$

$$\begin{aligned} X(g(Y, Z)) &= \langle \text{proj}_{TM} X(Y), Z \rangle_{\mathbb{R}^n} + \langle Y, \text{proj}_{TM} X(Z) \rangle \\ &= g(\nabla_X Y, Z) + g(Y, \nabla_X Z) \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} \nabla_X Y - \nabla_Y X &= \text{proj}_{TM} (X(Y) - Y(X)) \\ &= \text{proj}_{TM} \left(\underbrace{[X, Y]}_{\text{tangential}} \right) \\ &= [X, Y] \end{aligned}$$

□

Eine kovariante Ableitung ∇ auf M kann man auch auf Tensorfelder fortsetzen.

Definition. Sei $B \in \mathfrak{X}^{(r,0)}(M)$ ein $(r,0)$ -Tensorfeld und $X \in \mathfrak{X}(M)$. Das Tensorfeld $\nabla_X B \in \mathfrak{X}^{(r,0)}(M)$ mit

$$(\nabla_X B)(X_1, \dots, X_r) := X(B(X_1, \dots, X_r)) - \sum_{i=1}^r B(X_1, \dots, \nabla_X X_i, \dots, X_r)$$

heißt kovariante Ableitung von B nach X .

Damit ergeben sich folgende Eigenschaften:

1. $\nabla_X (B_1 + B_2) = \nabla_X B_1 + \nabla_X B_2$
2. $\nabla_X (fB) = X(f)B + f \cdot \nabla_X B$
3. $\nabla_X (B_1 \otimes B_2) = \nabla_X B_1 \otimes B_2 + B_1 \otimes \nabla_X B_2$

Satz 3.15. Sei (M, g) eine semi-Riem. Mannigfaltigkeit, dann gilt:

1. ∇ ist ein metrische kovariante Ableitung auf $M \iff \nabla_g = 0$
2. Ist ∇ torsionsfreie kov. Ableitung auf M , dann gilt

$$(L_X g)(Y, Z) = (\nabla_X g)(Y, Z) + g(\nabla_Y X, Z) + g(Y, \nabla_Z X)$$

3. Ist ∇^{LC} der Levi-Civita-Zusammenhang auf (M, g) , so folgt

$$(L_X g)(Y, Z) = g(\nabla_Y^{LC} X, Z) + g(Y, \nabla_Z^{LC} X).$$

Insbesondere gilt:

$$X \text{ ist Killing-VF} \iff g(\nabla_Y^{LC} X, Z) + g(Y, \nabla_Z^{LC} X) = 0 \quad \forall Y, Z \in \mathfrak{X}(M)$$

und

$$X \text{ ist ein konformes VF} \iff \exists \lambda \in C^\infty(M) \text{ mit } g(\nabla_Y^{LC} X, Z) + g(Y, \nabla_Z^{LC} X) = \lambda \cdot g(Y, Z) \quad \forall Y, Z \in \mathfrak{X}(M)$$

Beweis: Nachrechnen mit Definition von ∇_g und ÜA über Lie-Ableitung.

□

3.5 Die Krümmungen einer semi-Riemannschen Mannigfaltigkeit

In diesem Abschnitt wollen wir uns mit den Krümmungsgrößen einer semi-Riemannschen Mannigfaltigkeit befassen. Dazu führen wir im erten Teilabschnitt die grundlegenden Definitionen ein. Danach wollen wir uns mit zwei speziellen Klassen von Mannigfaltigkeiten beschäftigen, den Mannigfaltigkeiten mit konstanter *Schnittkrümmung* und danach mit den sogenannten *Einstein-Mannigfaltigkeiten*. Am Ende dieses Teilabschnitts wollen wir dann eine kleine Einführung in das mathematische Modell der *Allgemeinen Relativitätstheorie* (ART) geben.

3.5.1 Definitionen

Sei M^n eine C^∞ -Mannigfaltigkeit mit kov. Ableitung ∇ . Auf (M^n, ∇) betrachtet man 2 Tensorfelder:

Definition. Das $(2,1)$ -Tensorfeld $T^\nabla \in \mathfrak{X}^{(2,1)}(M)$

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

heißt *Torsion* von ∇ .

Das $(3,1)$ -Tensorfeld $\mathcal{R}^\nabla \in \mathfrak{X}^{(3,1)}(M)$

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

heißt *Krümmung* von ∇ .

Die Abbildung $\mathcal{R}^\nabla(X, Y) : \mathfrak{X}(M) \longrightarrow \mathfrak{X}(M)$ heißt *Krümmungsendomorphismus*.

Bemerkung

1. Die tensoriellen Eigenschaften rechnet man leicht nach (aus jeder Komp. kann man Funktionen herausziehen).
2. T^∇ und $\mathcal{R}^\nabla(\cdot, \cdot)Z$ sind schiefsymmetrisch.
3. Ist ∇ der Levi-Civita-Zusammenhang einer semi-Riemannschen Mannigfaltigkeit, dann ist $T^\nabla = 0$ (torsionsfrei).

Definition. Sei (M^n, g) eine semi-Riemannsche MF, ∇ Levi-Civita-Zsh. Der *Krümmungstensor* von (M^n, g) ist das $(4,0)$ -Tensorfeld $\mathcal{R} \in \mathfrak{X}^{(4,0)}(M)$:

$$\mathcal{R}(X, Y, Z, W) := g(\mathcal{R}^\nabla(X, Y)Z, W)$$

Später werden wir feststellen, dass \mathcal{R} ein Maß für die Abweichung von der Geometrie des \mathbb{R}^n ist.

Satz 3.16. Der Krümmungstensor einer semi-Riem. MF hat folgende Eigenschaften:

1. \mathcal{R} ist schiefsymmetrisch in der 1. und 2. und in der 3. und 4. Komponente:

$$\mathcal{R}(X, Y, Z, W) = -\mathcal{R}(Y, X, Z, W) = -\mathcal{R}(X, Y, W, Z)$$

$$2. \mathcal{R}(X, Y, Z, W) = \mathcal{R}(Z, W, X, Y)$$

3. *Es gilt die 1. Bianchi-Identität:*

$$\mathcal{R}(X, Y, Z, W) + \mathcal{R}(Y, Z, X, W) + \mathcal{R}(Z, X, Y, W) = 0$$

4. *Es gilt auch die 2. Bianchi-Identität:*

$$(\nabla_X \mathcal{R})(Y, Z, U, V) + (\nabla_Y \mathcal{R})(Z, X, U, V) + (\nabla_Z \mathcal{R})(X, Y, U, V) = 0$$

Beweis:

1. Die Schiefsymmetrie in der 1. und 2. Komponente ergibt sich aus der Def., da $\mathcal{R}^\nabla(X, Y)$ schiefsymmetrisch ist.

$$\mathcal{R}(X, Y, Z, W) = -\mathcal{R}(X, Y, W, Z) \iff \mathcal{R}(X, Y, Z, Z) = 0 \quad \forall Z$$

$$\text{(da } b(z, w) + b(w, z) = \frac{1}{2}(b(z+w, z+w) - b(z-w, z-w))$$

$$\begin{aligned} \mathcal{R}(X, Y, Z, Z) &= g(\nabla_X \nabla_Y Z - \nabla_Y \nabla_X Z - \nabla_{[X, Y]} Z, Z) \\ &\stackrel{\nabla_{\text{metr.}}}{=} X(g(\nabla_Y Z, Z)) - g(\nabla_Y Z, \nabla_X Z) - Y(g(\nabla_X Z, Z)) + g(\nabla_X Z, \nabla_Y Z) \\ &\quad - [X, Y](g(Z, Z)) + g(Z, \nabla_{[X, Y]} Z) \\ &= XY(g(Z, Z)) - X(g(Z, \nabla_Y Z) - YX(g(Z, Z))) \\ &\quad + Y(g(Z, \nabla_X Z)) - [X, Y](g(Z, Z)) + g(Z, \nabla_{[X, Y]} Z) \\ &= -g(\nabla_X Z, \nabla_Y Z) - g(Z, \nabla_X \nabla_Y Z) \\ &\quad + g(\nabla_Y Z, \nabla_X Z) + g(Z, \nabla_Y \nabla_X Z) = g(Z, \nabla_{[X, Y]} Z) \\ &= -\mathcal{R}(X, Y, Z, Z) \quad (\leadsto 1). \end{aligned}$$

2. $\mathcal{R}(X, Y, Z, W) = \mathcal{R}(Z, W, X, Y) \quad \forall X, Y, Z, W \in \mathfrak{X}(M)$: Benutzen Schiefsymmetrie und 1. Bianchi-Identität

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

Summiert man diese Gleichungen, dann folgt

$$2(\mathcal{R}(X, Z, W, Y) + \mathcal{R}(W, Y, Z, X)) = 0 \implies \mathcal{R}(X, Z, W, Y) = \mathcal{R}(W, Y, X, Z)$$

3. *1. Bianchi-Identität:*

$$\begin{aligned} \mathcal{R}^\nabla(X, Y)Z + \mathcal{R}^\nabla(Y, Z)X &= \mathcal{R}^\nabla(Z, X)Y = \\ &= \nabla_X \nabla_Y Z - \nabla_Y \nabla_X Z - \nabla_{[X, Y]} Z + \nabla_Y \nabla_Z X - \nabla_Z \nabla_Y X - \nabla_{[Y, Z]} X \\ &\quad + \nabla_Z \nabla_X Y - \nabla_X \nabla_Z Y - \nabla_{[Z, X]} Y \\ &= \nabla_X([Y, Z]) - \nabla_{[Y, Z]} X + \nabla - Y[Z, X] - \nabla_{[Z, X]} Y \\ T^\nabla = 0 & \\ &\quad + \nabla_Z([X, Y]) - \nabla_{[X, Y]} Z \\ &= [X, [Y, Z]] + [Y, [Z, X]] + [Z, [X, Y]] \\ T^\nabla = 0 & \\ &= 0 \end{aligned}$$

(Jacobi-Identität für den Kommutator von VF \nearrow Satz 2.11, Kapitel 2).

4. 2. *Bianchi-Identität*: ÜA. (direkte Rechnung)

□

Sei nun (M^n, g) eine semi-Riem. MF, $x \in M$ und $v, w \in T_x M$ linear unabhängig, dann definieren wir

$$\begin{aligned} Q_x(v, w) &:= g_x(v, v)g_x(w, w) - g_x(v, w)^2 \\ &= \det \begin{pmatrix} g_x(v, v) & g_x(v, w) \\ g_x(w, v) & g_x(w, w) \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Offensichtlich gilt

1. Sei $\nu = (v_1, v_2), \omega = (w_1, w_2)$ eine Basis eines 2-dim UR $E \subset T_x M$ und $M = \{\mathcal{M}\}_{\nu, \omega}$, dann ist

$$(*) \quad Q_x(v_1, v_2) = \text{Det}(M)^2 Q_x(w_1, w_2)$$

(Trafo-Formel für BLF)

2. $E \subset T_x M$ ist bez. g_x nichtausgearteter 2-dim UR $\iff Q_x(v_1, v_2) \neq 0 \quad \forall$ Basen (v_1, v_2) von E .

Definition. (M^n, g) semi-Riemannsche MF, $\mathcal{R} \in \mathfrak{X}^{(k,0)}(M)$ Krümmungstensor von (M, g) $x \in M$ und $E \subset T_x M$ nichtausgearteter 2-dim UR.

$$K_E(x) := \frac{\mathcal{R}_x(v, w, w, v)}{Q_x(v, w)}$$

wobei $E = \text{span}(v, w)$ heißt Schnittkrümmung von (M, g) in $x \in M$ in Richtung $E \subset T_x M$.

Bemerkung:

1. $K_E(x)$ ist korrekt definiert (d.h. unabhängig von Wahl der Basis (v, w) von E)
Dies folgt aus (*) und da \mathcal{R} in (1,2) und (3,4) schiefssymmetrisch ist, d.h. Zähler und Nenner transformieren sich mit $\det(M^2)$.

2. Ist (e_1, e_2) ONB von (E, g_x) und $g_x(e_i, e_j) = \delta_{ij}\epsilon_i = \pm 1$, dann ist

$$K_E(x) = \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \mathcal{R}_x(e_1, e_2, e_2, e_1)$$

Satz 3.17. Sei (M^n, g) eine semi-Riem. Mannigfaltigkeit.

Der Krümmungstensor \mathcal{R} von (M^n, g) ist durch die Schnittkrümmungen $K_E(x)$ mit $x \in M$ und $E \subset T_x M$ 2-dim. nichtausgeartet, eindeutig bestimmt.

Beweis: Wir führen folgende Bezeichnung ein: Sei V reeller VR mit $\dim V \geq 2$, dann sei

$$\begin{aligned} S^2(\Lambda^2 V^*) &:= \{B \in T^{(4,0)}V \mid B \text{ schiefssymmetrisch in (1,2) und (3,4),} \\ &\quad \text{und } B(v, w, x, y) = B(x, y, v, w)\} \end{aligned}$$

Sei \langle, \rangle nichtausgeartete BLF auf V . Da \mathcal{R} ein (4,0)-Tensorfeld ist, das die 1. Bianchi-Identität erfüllt und $\mathcal{R}_x \in S^2(\Lambda^2 T_x^* M) \forall x \in M$, genügt es, folgendes zu zeigen:

Seien $R, \hat{R} \in S^2(\Lambda^2 V^*)$ (4,0)-Tensoren, die die 1. Bianchi-Identität erfüllen und gelte

$$K_E := \frac{R(x, y, y, x)}{Q(x, y)} = \hat{K}_E := \frac{\hat{R}(x, y, y, x)}{Q(x, y)}$$

für alle nichtausgearteten UR $E = \text{span}(x, y) \subset V$. Dann ist $R = \hat{R}$.

1. Nach Voraussetzung gilt $R(X, Y, Y, X) = \hat{R}(x, y, y, x)$, falls x, y linear unabhängig und $E = \text{span}(x, y)$ nichtausgearteter UR.

$$R(x, y, y, x) = \hat{R}(x, y, y, x) \quad \forall y, y \in V:$$

Da $R(x, y, \cdot, \cdot)$ schiefsymmetrisch, kann man oBdA annehmen, dass x, y linear unabhängig sind (sonst $0 = 0$). Sei $E = \text{span}(x, y)$ 2-dim und ausgeartet. Wir zeigen: es existiert Folge $y_n \in V, y_n \rightarrow y$, so dass $E_n = \text{span}(x, y_n)$ 2-dim, nicht ausgeartet: $E = \text{span}(x, y)$ ausgeartet $\implies \langle, \rangle$ ist definiert. Wähle ein $v \in V$ mit folgender Eigenschaft:

$$\begin{aligned} \langle x, x \rangle = 0 &: v \in V \text{ so dass } \langle x, v \rangle \neq 0 \\ \langle x, x \rangle < 0 &: v \in V \text{ mit } \langle v, v \rangle > 0 \\ \langle x, x \rangle > 0 &: v \in V \text{ mit } \langle v, v \rangle < 0. \end{aligned}$$

In allen 3 Fällen gilt dann $Q(x, v) < 0$. Sei $y_n := y + \frac{1}{n}v, n \in \mathbb{N}$, dann folgt

$$\begin{aligned} Q(x, y_n) &= \langle x, x \rangle \langle y_n, y_n \rangle - \langle x, y_n \rangle^2 \\ &= \langle x, x \rangle \left(\langle y, y \rangle + \frac{1}{n^2} \langle v, v \rangle + \frac{2}{n} \langle y, v \rangle \right) \\ &\quad - \left(\langle x, y \rangle + \frac{1}{n} \langle x, v \rangle \right)^2 \\ &= Q(x, y) + \frac{2}{n} (\langle x, x \rangle \langle y, v \rangle - \langle x, y \rangle \langle x, v \rangle) \\ &\quad - \frac{1}{n^2} \langle x, v \rangle^2 + \frac{1}{n^2} \langle v, v \rangle \langle x, x \rangle \\ &= Q(x, y) + \frac{1}{n^2} Q(x, v) + \frac{2}{n} \underbrace{\left(\langle x, x \rangle \langle y, v \rangle - \langle x, y \rangle \langle x, v \rangle \right)}_b \\ &\stackrel{Q(x, y)=0}{=} \frac{1}{n^2} Q(x, v) + \frac{2}{n} \cdot b \neq 0 \end{aligned}$$

für n hinreichend groß. Damit ist $\text{span}(x, y_n) = E_n$ nichtausgeartet falls $u \geq v$. Und nach Voraussetzung folgt dann

$$R(x, y_n, y_n, x) = \hat{R}(x, y_n, y_n, x)$$

bzw. für $y_n \rightarrow y$

$$R(x, y, y, x) = \hat{R}(x, y, y, x)$$

2. $R(x, y, y, z) = \hat{R}(x, y, y, z) \quad \forall x, y, z \in V:$

Mit 1. folgt

$$\begin{aligned} R(x+z, y, y, x+z) &= \hat{R}(x+z, y, y, x+z) \\ R(x, y, y, x) + R(x, y, y, z) &= R(z, y, y, x) \\ &= R(z, y, y, z) \\ &= \hat{R}(x, y, y, x) + \hat{R}(x, y, y, z) \\ &= \hat{R}(x, y, y, z) + \hat{R}(z, y, y, x) + \hat{R}(z, y, y, z) \end{aligned}$$

Da $R, \hat{R} \in S^2(\Lambda^2 V^*)$ folgt dann aber

$$R(x, y, y, z) = \hat{R}(x, y, y, z) \quad \forall x, y, z$$

3. $R = \hat{R}$:

Mit 2. ist

$$R(x, y+w, y+w, z) = \hat{R}(x, y+w, y+w, z)$$

und damit

$$\begin{aligned} R(x, y, y, z) + R(x, y, w, z) &= R(x, w, w, z) + R(x, w, y, z) \\ &= \hat{R}(x, y, y, z) \\ &= \hat{R}(x, y, w, z) + \hat{R}(x, w, v, z) + \hat{R}(x, w, y, z). \end{aligned}$$

Jetzt setzen wir

$$\begin{aligned} f(x, y, w, z) &:= R(x, y, w, z) - \hat{R}(x, y, w, z) \\ &= R(w, x, y, z) - \hat{R}(w, x, y, z) \\ &= f(w, x, y, z) \end{aligned}$$

und erhalten weiter

$$f(x, y, w, \cdot) = f(w, x, y, \cdot) = f(y, w, x, \cdot)$$

Damit ist f invariant gegen zyklische Vertauschungen der vorderen 3 Einträge. Aus der 1. Bianchi-Identität folgt dann

$$3f(x, y, w, z) = f(x, y, w, z) + f(y, w, x, z) + f(w, x, y, z) = 0$$

und daraus ergibt sich

$$R(x, y, w, z) = \hat{R}(x, y, w, z) \quad \forall x, y, w, z \in V.$$

□

Satz 3.18. Sei $F : (M, g) \rightarrow (\tilde{M}, \tilde{g})$ eine Isometrie zwischen semi-Riem. MF, $\nabla, \tilde{\nabla}$ Levi-Civita-Zsh. von (M, g) bzw. (\tilde{M}, \tilde{g}) und $\mathcal{R}, \tilde{\mathcal{R}}$ die Krümmungstensoren, dann gilt:

1. $\tilde{\nabla}_{dF(X)} dF(Y) = dF(\nabla_X Y) \quad X, Y \in \mathfrak{X}(M)$
2. $F^* \tilde{\mathcal{R}} = \mathcal{R}$
3. Für die Schnittkrümmungen auf M bzw. \tilde{M} gilt: $E \subset T_x M$ nichtausgeartet 2-dim. gilt

$$\tilde{K}_{dF(E)}(F(x)) = K_E(x).$$

Den Beweis überlassen wir als ÜA.

3.5.2 Räume mit konstanter Schnittkrümmung

In der Riem. Geometrie spielen MF mit konstanter Schnittkrümmung eine besondere Rolle.

Definition. Eine semi-Riem. MF (M^n, g) heißt MF konstanter Schnittkrümmung $K_0 \in \mathbb{R} \iff$

$$K_E(x) \equiv K_0 \quad \forall x \in M$$

$$\forall E \subset T_x M \text{ nichtausgeartet, } \dim E = 2.$$

Satz 3.19. Sei (M^n, g) eine semi-Riemannsche MF, dann gilt

$$(M, g) \text{ hat konst. Schnittkrümmung } K_0 \iff \mathcal{R}(X, Y, Z, W) = K_0 (g(X, W)g(Y, Z) - g(X, Z)g(Y, W))$$

Beweis: (\Leftarrow): Sei $E \subset T_x M$ nichtausgeartet mit $\dim E = 2$ und (e_1, e_2) ONB von E mit $g(e_i, e_i) = \epsilon_i = \pm 1$, dann gilt

$$K_E(x) = \epsilon_1 \epsilon_2 \mathcal{R}_x(e_1, e_2, e_2, e_1)$$

$$\stackrel{\text{Vor.}}{=} \epsilon_1 \epsilon_2 K_0 (g(e_1, e_1)g(e_2, e_2) - g(e_1, e_2)^2)$$

$$= K_0$$

(\Rightarrow): Sei $k_E(x) \equiv K_0 \quad \forall x \in M, E^2 \subset T_x M$ nichtausgeartet. Wir betrachten den (4,0)-Tensor

$$\hat{R}(X, Y, Z, W) = (K_0 g(X, W)g(Y, Z) - g(X, Z)g(Y, W))$$

Dann ist $\hat{R}_x \in S^2(\lambda^2 T_x^* M) \quad \forall x \in M$ und erfüllt die 1. Bianchi-Identität (nachrechnen). Für die zu \hat{R} gehörende Schnittkrümmung gilt

$$\hat{K}_E(x) = \epsilon_1 \epsilon_2 \hat{R}(e_1, e_2, e_2, e_1) \quad (e_1, e_2) \text{ ONB in } E$$

$$= K_0.$$

Der Beweis von Satz 3.17 liefert dann $R = \hat{R}$.

□

Es folgen nun Beispiele für Mannigfaltigkeiten konstanter Schnittkrümmung.

Beispiel 65. DER \mathbb{R}^n MIT EUKLIDISCHEM SKALARPRODUKT

Behauptung: $(\mathbb{R}^n, \langle \cdot, \cdot \rangle_{\mathbb{R}^n})$ hat konst. Schnittkrümmung $K_0 = 0$.

Beweis:

Nach Satz 3.19 ist $\mathcal{R} = 0$ zu zeigen. Der Levi-Civita-Zsh. ist hier $\nabla_X Y = X(Y)$ und für den Krümmungsendomorphismus folgt dann

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

$$= X(Y(Z)) - Y(X(Z)) - [X, Y](Z)$$

$$= 0$$

Daraus ergibt sich dann $\mathcal{R} \equiv 0$ bzw. $K_0 = 0$.

□

Beispiel 66. DIE SPHÄRE S_r^n MIT INDUZIERTER METRIK

Wir betrachten die Sphäre $S_r^n \subset \mathbb{R}^{n+2}$

$$S_r^n = \{x \in \mathbb{R}^{n+1} \mid \langle x, x \rangle = r^2\}$$

mit induzierter Riem. Metrik g .

Behauptung: (S_r^n, g) hat konstante Schnittkrümmung $K_0 = \frac{1}{r^2}$.

Beweis: Für den Levi-Civita-Zsh. ergibt sich aus Satz 3.14:

$$\nabla_X Y = \text{proj}_{T_x S_r^n} X(Y).$$

Da $T_x S_r^n = \{v \in \mathbb{R}^{n+1} \mid \langle v, x \rangle = 0\}$ ist

$$M : S_r^n \longrightarrow \mathbb{R}^{n+1} \quad \text{Einheitsnormalenfeld von } S_r^n \\ x \longmapsto \frac{1}{r} \cdot x.$$

Sei $Z \in \mathbb{R}^{n+1}$, dann folgt

$$\text{proj}_{T_x S_r^n} Z = Z - \underbrace{\langle Z, u(x) \rangle n(x)}_{\text{Normalenkomp. von } Z}$$

$$\implies \nabla_X Y = X(Y) - \langle X(Y), n \rangle n, \quad X, Y \in \mathfrak{X}(S_r^n).$$

Aus der Produktregel für $\langle \cdot, \cdot \rangle$ ergibt sich

$$\begin{aligned} \langle X(Y), n \rangle &= X \underbrace{\langle Y, n \rangle}_{dn_Y \perp n} - \langle Y, \underbrace{X(n)}_{dn(x) = \frac{1}{r} X} \rangle \\ &= -\frac{1}{r} \langle Y, X \rangle \end{aligned}$$

Für den LC-Zsh. auf S_r^n gilt also

$$\nabla_X Y = X(Y) + \frac{1}{r} \langle X, Y \rangle n; \quad X, Y \in \mathfrak{X}(S_r^n)$$

und damit folgt

$$\begin{aligned} \mathcal{R}^\nabla(X, Y)Z &= \nabla_X \nabla_Y Z - \nabla_Y \nabla_X Z - \nabla_{[X, Y]} Z \\ &= X(\nabla_Y Z) - \frac{1}{r} \langle X, \nabla_Y Z \rangle n \\ &\quad - Y(\nabla_X Z) - \frac{1}{r} \langle Y, \nabla_X Z \rangle n \\ &\quad - [X, Y](Z) - \frac{1}{r} \langle [X, Y], Z \rangle n \\ &= XY(Z) + \frac{1}{r} X(\langle Y, Z \rangle n) + \frac{1}{r} \langle X, \nabla - YZ \rangle n \\ &\quad - YX(Z) - \frac{1}{r} Y(\langle X, Z \rangle n) - \frac{1}{r} \langle Y, \nabla_X Z \rangle n \\ &\quad - [X, Y](Z) - \frac{1}{r} \langle \nabla_X Y, Z \rangle n + \frac{1}{r} \langle \nabla_Y X, Z \rangle n \\ &= \frac{1}{r} \{ \langle Y, Z \rangle X(n) - \langle X, Z \rangle Y(n) \} \\ &= \frac{1}{r^2} \{ \langle Y, Z \rangle X - \langle X, Z \rangle Y \} \end{aligned}$$

Für den Krümmungstensor ergibt sich dann:

$$\mathcal{R}(X, Y, Z, W) = \frac{1}{r^2} \{ \langle Y, Z \rangle \langle X, W \rangle - \langle X, Z \rangle \langle Y, W \rangle \}.$$

Aus Satz 3.19 folgt nun $K_0 \equiv \frac{1}{r^2}$.

□

Beispiel 67. DER OBERE HALBRAUM MIT HYPERBOLISCHER METRIK

Betrachten den oberen Halbraum

$$H^n = \{x \in \mathbb{R}^n \mid x_n > 0\}$$

mit hyperbolischer Metrik

$$g_r := \frac{r^2}{x_n^2} (dx_1^2 + \dots + dx_n^2) \quad r > 0$$

und setzen

$$H_r^n := (H^n, g_r).$$

Behauptung: Die RMF (H_r^n, g_r) hat konst. Schnittkrümmung $-\frac{1}{r^2}$.

Beweis:

Wir berechnen zunächst die den Krümmungstensor ganz allgemein in lokalen Koordinaten bez. einer Karte:

Sei $(\varphi, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ eine zul. Karte, $\left\{ \partial_j := \frac{\partial}{\partial x_j} \mid j=1, \dots, n \right\}$ deren kanonische Basis und $\{g_{ij}\}$ die Koeffizientenmatrix der Metrik mit Inverser $\{g^{ij}\}$. Für die Christoffelsymbole von (M, g) gilt

$$\Gamma_{ij}^k = \frac{1}{2} \sum_{\ell=1}^n g^{k\ell} (\partial_i(g_{j\ell}) + \partial_j(g_{i\ell}) - \partial_\ell(g_{ij})),$$

für den Krümmungsendomorphismus

$$\begin{aligned} \mathcal{R}^\nabla(\partial_i, \partial_j)\partial_k &= \nabla_{\partial_i} \partial_j - \nabla_{\partial_j} \partial_i - \nabla_{\partial_j} \nabla_{\partial_i} \partial_k - \nabla_{[\partial_i, \partial_j]} \partial_k \\ &= \partial_i(\Gamma_{jk}^p) \partial_p + \Gamma_{jk}^p \Gamma_{ip}^r \partial_r \\ &\quad - \partial_j(\Gamma_{ik}^p) \partial_p - \Gamma_{ik}^p \Gamma_{jp}^r \partial_r. \end{aligned}$$

und für den Krümmungstensor

$$\begin{aligned} \mathcal{R} &= R_{ijkl} dx_i \otimes dx_j \otimes dx_k \otimes dx_l, \text{ wobei} \\ (*) \quad R_{ijkl} &= \mathcal{R}(\partial_i, \partial_j, \partial_k, \partial_l) = \\ &= (\partial_i(\Gamma_{jk}^r) - \partial_j(\Gamma_{ik}^r) + \Gamma_{jk}^p \Gamma_{ip}^r - \Gamma_{ik}^p \Gamma_{jp}^r) g_{rl} \end{aligned}$$

(In allen Fällen gilt die Summenkonvention: Summiert über gleichen Indizes.)

Nun leiten wir daraus die Formel für den Krümmungstensor für H_r^n ab:

Für H_r^n betrachten wir die Karte $(H_r^n, \varphi(x) = Id = (x_1, \dots, x_n))$. Dann ist $\partial_j = \frac{\partial}{\partial x_j} \equiv e_j$ und

$$\{g_{ij}(x)\} = \frac{r^2}{x_n^2} E \quad \text{bzw.} \quad \{g^{ij}(x)\} = \frac{x_n^2}{r^2} E.$$

Für die Christoffelsymbole folgt

$$\Gamma_{ij}^k = \frac{1}{2} \frac{x_n^2}{r^2} (\partial_i(g_{jk}) + \partial_j(g_{ik}) - \partial_k(g_{ij})) \implies \Gamma_{ij}^k = 0,$$

außer für die Indizes:

$$\begin{aligned} \Gamma_{ii}^n &= \frac{1}{x_n} \quad i < n \\ \Gamma_{nn}^n &= -\frac{1}{x_n} = \Gamma_{in}^i = \Gamma_{ni}^i. \end{aligned}$$

Setzt man dies in (*) ein, so erhält man:

$$\begin{aligned} R_{ijkl} &= -\frac{r^2}{x_n^4} (\partial_{i\ell} \partial_{jk} - \partial_{ik} \partial_{j\ell}) \\ &= -\frac{1}{r^2} (g_{H_r^n}(\partial_i, \partial_\ell) g_{H_r^n}(\partial_j, \partial_k) - g_{H_r^n}(\partial_i, \partial_k) g_{H_r^n}(\partial_j, \partial_\ell)). \end{aligned}$$

Aus Satz 3.19 folgt nun wieder $K_0 \equiv -\frac{1}{r^2}$

□

Information:

Für Modellräume mit Riemannscher Metrik gilt:⁵

- Sei (M^n, g) zsh., *vollständige* Riem. MF mit konst. Schnittkrümmung K_0 , dann ist (M^n, g) isometrisch zu einer der folgenden Riem. MF

$$\begin{aligned} \mathbb{R}^n|_\Gamma &\text{ für } K_0 = 0 \\ S_r^n|_\Gamma &\text{ für } K_0 = \frac{1}{r^2} > 0 \\ H_r^n|_\Gamma &\text{ für } K_0 = -\frac{1}{r^2} < 0 \end{aligned}$$

wobei Γ eine diskrete UG der Isometriegruppe von \mathbb{R}^n, S_r^n bzw. H_r^n ist, die eigentlich diskontinuierlich wirkt.

- Ist die universelle Riem. Überlagerung von (M^n, g) gleich \mathbb{R}^n, S_r^n bzw. H_r^n , dann ist (M^n, g) lokal isometrisch zu \mathbb{R}^n, S_r^n bzw. H_r^n .

Analoge Eigenschaften gelten auch im pseudo-Riem. Fall für Modellräume konstanter Schnittkrümmung für Metriken vom Index k :⁶

1. Für $\mathbb{R}^{n,k} = (\mathbb{R}^n, \langle \cdot, \cdot \rangle_{n,k} = -dx_1^2 - \dots - dx_k^2 + dx_{k+1}^2 + \dots + dx_n^2)$ ist $\mathcal{R} = 0$ und damit auch

$$K_0 = 0.$$

⁵siehe Kapitel 4 Satz 4.9 und J.A. Wolf: Spaces of constant curvature

⁶siehe O'Neill: Semi-Riemannsche Geometrie, S. 110 ff

2. Sei $S_{k(r)}^n := \{x \in \mathbb{R}^{n+1,k} \mid \langle x, x \rangle_{n+1,k} = r^2\}$ mit der durch $\langle \cdot, \cdot \rangle_{n+1,k}$ induzierten Metrik die 'Pseudosphäre vom Radius r '.

$S_k^n(r)$ hat Dimension n , Index k und konstante Schnittkrümmung

$$K_0 = \frac{1}{r^2}.$$

($S_k^n(r)$ ist diffeomorph zu $\mathbb{R}^k \times S^{n-k}$.)

3. Sei $H_k^n(r) := \{x \in \mathbb{R}^{n+1,k+1} \mid \langle x, x \rangle_{n+1,k+1} = -r^2\}$ mit der durch $\langle \cdot, \cdot \rangle_{n+1,k+1}$ induzierten Metrik "Pseudohyperbolischer Raum".

$H_k^n(r)$ hat Dimension n , Index k und konstante Schnittkrümmung

$$K_0 = -\frac{1}{r^2}.$$

($H_k^n(r)$ ist diffeomorph $S^k \times \mathbb{R}^{n-k}$.)

Es gilt allgemeiner: Ist $(M^{n,k}, g)$ zsh. *geodätisch vollständige*⁷ pseudo-Riem. MF vom Index k ($1 \leq k \leq n-1$) mit konst. Schnittkrümmung K_0 , so ist $(M^{n,k}, g)$ isometrisch zu

$$\begin{aligned} \mathbb{R}^{n,k}|_{\Gamma} & \text{ für } K_0 = 0 \\ \widetilde{S}_k^n(r)|_{\Gamma} & \text{ für } K_0 = \frac{1}{r^2} > 0 \\ \widetilde{H}_k^n(r)|_{\Gamma} & \text{ für } K_0 = -\frac{1}{r^2} < 0 \end{aligned}$$

wobei

$$\begin{aligned} \widetilde{S}_k^n(r) &= \text{univ. Überlagerung von } S_k^n(r) \quad k = n-1 \\ \widetilde{H}_k^n(r) &= \text{univ. Überlagerung von } H_k^n(r) \quad k = n-1 \end{aligned}$$

Γ diskrete UG der Isometriegruppe der Totalräume, die eigentlich diskontinuierlich wirkt.

Insbesondere gilt:

- Seien $(M, g), (\tilde{M}, \tilde{g})$ semi-Riem. MF, vollständig, gleiche Dimension und gleicher Index.
Wenn (M, g) und (\tilde{M}, \tilde{g}) gleiche konst. Schnittkrümmung haben, so sind sie lokal isometrisch.⁸
- $\mathcal{R} \equiv 0$ für vollst. zsh. semi-Riem. MF $(M, g) \iff (M, g)$ lokal isometrisch zu $\mathbb{R}^{n,k}$.

Definition. (M^n, g) semi-Riem. MF mit Krümmungstensor \mathcal{R} . Das $(2,0)$ -Tensorfeld $Ric \in \mathfrak{X}^{2,0}(M)$

$$\begin{aligned} Ric(X, Y)(x) &= \sum_{i=1}^n \epsilon_i \mathcal{R}_x(X(x), e_i, e_i, Y(x)) \\ & \text{wobei } (e_1, \dots, e_n) \text{ ONB in } T_x M \epsilon_i = g_x(e_i, e_i) = \pm 1 \\ &= \text{Tr}_{g_x}(\mathcal{R}^\nabla(\cdot, X(x))Y(x)) \end{aligned}$$

⁷siehe Definition auf Seite 176

⁸siehe Folgerung von Satz 4.6 aus Kapitel 4

heißt Ricci-Krümmung von (M, g) . Die Funktion $R \in C^\infty(M)$

$$\begin{aligned} R(x) &= \sum_{i,j=1}^n \epsilon_i \epsilon_j \mathcal{R}_x(e_i, e_j, e_j, e_i) \\ &= \sum_{j=1}^n \epsilon_j \text{Ric}_x(e_j, e_j) \end{aligned}$$

heißt Skalarkrümmung von (M, g)

Bemerkung:

- Beide Krümmungen sind korrekt def. (, dh. unabhängig von Wahl der ONB)
- 'Ric' ist ein symmetrisch (2,0)-Tensor
- $R(x) = 2 \sum_{i < j} K_{E_{ij}}(x)$, dabei sei $K_{E_{ij}}$ die Schnittkrümmung auf

$$E_{ij} = \text{span}(e_i, e_j) \subset T_x M$$

Satz 3.20. Sei (M^n, g) n -dim. semi-Riem. MF konst. Schnittkrümmung K_0 , so gilt

$$\begin{aligned} \text{Ric} &= (n-1)K_0 \cdot g \\ R &= n(n-1) \cdot K_0 \end{aligned}$$

Beweis: Aus Satz 3.19 folgt

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_x(v, e_i, e_i, w) &= K_0 (g(v, w)g(e_i, e_i) - g(v, e_i)g(e_i, w)) \\ &= K_0 (\epsilon_i g(v, w) - g(v, e_i)g(e_i, w)) \\ \implies \text{Ric}_x(v, w) &= \sum_{j=1}^n \epsilon_j \mathcal{R}_x(v, e_j, e_j, w) \\ &= K_0 \left(n \cdot g(v, w) - g(v, \underbrace{\sum \epsilon_i g(e_i, w) e_i}_w) \right) \\ &= K_0 (n-1)g(v, w). \\ R(x) &= \sum_{i < j} \underbrace{K_{E_{ij}}(x)}_{K_0} = n(n-1)K_0. \end{aligned}$$

□

3.5.3 Einstein-Mannigfaltigkeiten

Definition. Eine semi-Riemannsche MF (M, g) heißt Einstein-MF: \iff es existiert Funktion $f \in C^\infty(M)$ so dass $\text{Ric} = f \cdot g$.

Beispiele:

- Jede MF konst. Schnittkrümmung ist Einstein (Satz 3.20)
- Jede 2-dim MF ist Einstein:

$$T_x M = \text{span}(e_1, e_2) \quad e_1, e_2 \text{ ONB}$$

$$\begin{aligned} \text{Ric}_x(e_i, e_j) &= \sum_{k=1}^2 \epsilon_k \mathcal{R}_x(e_i, e_k, e_k, e_j) \\ &= \begin{cases} 0 & i \neq j & \text{(schiefraum)} \\ \epsilon_2 \mathcal{R}_x(e_1, e_2, e_2, e_1) & i = j = 1 \\ \epsilon_1 \mathcal{R}_x(e_2, e_1, e_1, e_2) & i = j = 2 \end{cases} \\ &= \begin{cases} K(x) \cdot \epsilon_1 & i = j = 1 \\ K(x) \cdot \epsilon_2 & i = j = 2 \\ 0 & i \neq j \end{cases} \end{aligned}$$

wobei $K(x) = K_{T_x M}(x)$ Schnittkrümmung von m^2 . Und damit ist $\text{Ric} = K \cdot g$.

Wir wollen nun einige Eigenschaften von Einstein-Räumen behandeln. Zunächst jedoch eine Definition:

Definition. Sei (M^n, g) eine semi-Riem. mit LC-Zsh. ∇ und $(e_1, \dots, e_n) \in T_x M$ eine ONB.

- Für ein $(r, 0)$ -Tensorfeld $B \in \mathfrak{X}^{(r,0)}(M)$ bezeichne $\delta B \in \mathfrak{X}^{(r-1,0)}(M)$ das Tensorfeld

$$\delta B(X_1, \dots, X_{r-1}) := - \sum_{i=1}^n \epsilon_i (\nabla_{e_i} B)(e_i, X_1, \dots, X_{r-1})$$

δB heißt Divergenz von B.

- Seien B und S aus $\mathfrak{X}^{(r,s)}(M)$. Wir definieren $\langle B, S \rangle_g \in C^\infty(M)$ durch

$$\langle B, S \rangle_g(x) := \sum_{i_1, \dots, i_r=1}^n \epsilon_{i_1} \dots \epsilon_{i_r} B(e_{i_1}, \dots, e_{i_r}) \cdot S(e_{i_1}, \dots, e_{i_r}).$$

$\langle B, S \rangle_g$ heißt Skalarprodukt von B und S bzw. Bündelmetrik auf $T^{(r,0)}M$.

- Sei $B \in \mathfrak{X}^{(r,0)}(M)$. Dann heißt

$$\text{Tr}_g B_{(k,l)} := \sum_{i=1}^n \epsilon_i \cdot B \left(\dots, \overset{k. \text{ Stelle}}{e_i}, \dots, \overset{l. \text{ Stelle}}{e_i}, \dots \right)$$

die Spur von B in der (k, l)-Komponente.

Bemerkungen

1. $\delta g = 0$, $Tr_g g = n$ und $Tr_g Ric = R$.
2. Ist B symmetrisch (schiefsymmetrisch) so auch δB
3. Ist $B \in \mathfrak{X}^{(2,0)}(M)$, dann gilt $\langle g, B \rangle_g = Tr_g B$.
4. Ist $X \in \mathfrak{X}(M)$ ein Vektorfeld, dann ist $div(X) \in C^\infty(M)$ mit

$$div(X) = \sum_{i=1}^n \epsilon_i g(\nabla_{e_i} X, e_i)$$

die Divergenz von X .

Ist weiterhin ω_X die zu X duale 1-Form, d.h. es gilt

$$\omega_X(Y) = g(X, Y) \quad \forall Y \in \mathfrak{X}(M)$$

so folgt

$$\boxed{\delta \omega_X = -div(X)}$$

(denn

$$\begin{aligned} \delta \omega &= - \sum_{i=1}^n \epsilon_i (\nabla_{e_i} \omega)(e_i) \\ &= - \sum_{i=1}^n \epsilon_i (\omega(e_i) - \omega(\nabla_{e_i} e_i)) e_i \\ &= - \sum_{i=1}^n \epsilon_i (g(e_i, X) - g(\nabla_{e_i} e_i, X)) e_i \\ &= - \sum_{i=1}^n \epsilon_i g(e_i, \nabla_{e_i} X) \\ &= -div(X) \end{aligned}$$

5. Sei $f \in C^\infty(M)$ und $Hess f \in S^{(2,0)}(M)$ die *Hessische Form* von f :

$$Hess f := (\nabla_X (df))(Y) := XY(f) - df(\nabla_X Y)$$

dann wird durch

$$\boxed{Tr_g(Hess f) = -\delta df = div(grad f) =: -\Delta_g f}$$

der Laplace-Operator von f definiert.

Eine Methode um Tensorrechnung zu vereinfachen: x-synchrone Vektorfelder

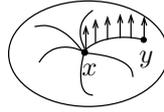
Sei $x \in M$ fixiert. Dann existiert eine Umgebung $U(x)$ mit den folgenden Eigenschaften:

Zu jedem $y \in U(x)$ existiert⁹ eine *eindeutig* bestimmte Kurve

$$\gamma_{xy} : [0, 1] \longrightarrow U(x)$$

mit $\gamma_{xy}(0) = x$, $\gamma_{xy}(1) = y$ und $\frac{\nabla \gamma_{xy}}{dt} \equiv 0$. Dabei heißt $U(x)$ Normalenumgebung von x und γ_{xy} radiale Geodäte.

⁹Beweis im nächsten Abschnitt



Dann kann man jedem Tangentialvektor $v \in T_x M$ durch Parallelverschiebung von v entlang γ_{xy} zu einem Vektorfeld V auf $U(x)$ fortsetzen:

$$V(y) := \mathcal{P}_{\gamma_{xy}}^\nabla(v) \in T_y M.$$

Ein solches VF $V \in \mathfrak{X}(M)$ heißt synchron bzgl. x und erfüllt

$$\boxed{\nabla V(x) \equiv 0}$$

d.h. im Punkt x gilt $(\nabla_Y V)(x) = 0$ für alle $Y \in \mathfrak{X}(M)$.

Insbesondere erfüllen alle x -synchronen Vektorfelder V, W die Eigenschaften

1. $\nabla V(x) = \nabla W(x) = 0$
2. $[V, W](x) = 0$
3. $(\operatorname{div} V)(x) = 0 = (\operatorname{div} W)(x)$

Wenn man die Gleichheit von Tensoren überprüfen will, so geht man wie folgt vor:

$$\text{zz. } (B_1)_x = (B_2)_x \quad \forall x$$

Dazu wählen wir uns v_1, \dots, v_r aus $T_x M$ und setzen diese x -synchron zu V_1, \dots, V_r fort, und zeigen

$$\begin{aligned} (B_1)(v_1, \dots, v_r) &= B_1(V_1, \dots, V_r)(x) \\ &= B_2(V_1, \dots, V_r)(x) \\ &= (B_2)(v_1, \dots, v_r) \end{aligned}$$

und verwenden dabei die Eigenschaften 1.-3.

Satz 3.21. Für den Ricci-Tensor einer semi-Riem. MF. (M, g) gilt:

$$\delta \operatorname{Ric} = -\frac{1}{2} dR$$

Dabei ist R die Skalarkrümmung.

Beweis: Sei $x \in M$, $v \in T_x M$, (e_1, \dots, e_n) eine ONB von $(T_x M, g_x)$ und $V, (E_1, \dots, E_n)$ x -synchron Fortsetzungen von v und (e_1, \dots, e_n) .

Aus der 2. Bianchi-Identität für \mathcal{R} folgt dann

$$0 = (\nabla_V \mathcal{R})(E_i, E_j, E_j, E_i) + (\nabla_{E_i} \mathcal{R})(E_j, V, E_j, E_i) + (\nabla_{E_j} \mathcal{R})(V, E_i, E_j, E_i)$$

auf $U(x)$. Und im Punkt x gilt nun speziell wegen der x -Synchronität

$$0 = v(\mathcal{R}(E_i, E_j, E_j, E_i)) + e_i(\mathcal{R}(E_j, V, E_j, E_i)) + e_j(\mathcal{R}(V, E_i, E_j, E_i))$$

Jetzt summieren wir dies über $\sum_{i,j=1}^n \epsilon_i \epsilon_j$ und erhalten in x :

$$0 = v(R) - 2 \sum_{i=1}^n \epsilon_i e_i (\text{Ric}(V, E_i))$$

und daraus folgt

$$2 \underbrace{\sum_{i=1}^n \epsilon_i (\nabla_{e_i} \text{Ric})_x(v, e_i)}_{-(\delta \text{Ric})_x(v)} = dR_x(v)$$

und damit auch die Behauptung. □

Satz 3.22. *Es gilt:*

1. Ist (M^n, g) ein Einstein-Raum, so gilt $\text{Ric} = \frac{R}{n} \cdot g$.
2. Sei (M^n, g) ein zsh. Einstein-Raum der Dimension $n \geq 3$. Dann ist die Skalar­krümmung konstant.

Beweis:

1. Sei $\text{Ric} = f \cdot g$ und seien (e_1, \dots, e_n) eine ONB in $T_x M$, dann folgt

$$\begin{aligned} R(x) &= \sum_{i=1}^n \epsilon_i \text{Ric}_x(e_i, e_i) = f(x) \sum_i \epsilon_i \underbrace{g(e_i, e_i)}_{\epsilon_i} \\ &= n \cdot f(x). \end{aligned}$$

2. Sei $\text{Ric} = f \cdot g$, dann gilt

$$\begin{aligned} \delta \text{Ric} &= \delta(f \cdot g) = - \sum_{i=1}^n \epsilon_i \nabla_{e_i} (f \cdot g)(e_i, \cdot) \\ &= - \sum_i \epsilon_i e_i(f) \cdot g(e_i, \cdot) + f \cdot \underbrace{(\nabla_{e_i} g)(e_i, \cdot)}_{=0} \\ &= -g \left(\underbrace{\sum_{i=1}^n \epsilon_i e_i(f) e_i}_{\text{grad } f}, \cdot \right) \\ &= -df \stackrel{!}{=} -\frac{1}{n} dR \\ &\stackrel{\text{Satz 3.21}}{=} -\frac{1}{2} dR \end{aligned}$$

Damit ist also

$$dR \cdot \left(\frac{2-n}{2n} \right) = 0$$

und für $n \geq 3$ die Aussage bewiesen. □

Man erhält also folgende Inklusionen:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{MF. konst.} \\ \text{Schnittkrümmung} \end{array} \right\} \subset \left\{ \begin{array}{l} \text{Einstein-} \\ \text{Räume} \end{array} \right\} \stackrel{n \geq 3}{\subset} \left\{ \begin{array}{l} \text{MF. konst.} \\ \text{Skalarkrümmung} \end{array} \right\}$$

Beispiele für Einstein-Räume¹⁰

- $\mathbb{R}^{3,1}$ mit Schwarzschild-Metrik
- Sei G eine Halbeinfache Lie-Gruppe, mit der durch die Killingform erzeugten Metrik g , dann ist (G, g) ein Einstein-Raum.
- $\mathbb{C}P^n$ mit der 'Fubini-Studi-Metrik'

3.5.4 Mathematische Modelle der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART):

Die Idee dieser Theorie ist die Beschreibung der Gravitation durch eine Krümmungen des Raumes. Bevor wir uns jedoch genauer mit diesem Thema beschäftigen, müssen wir noch etwas auf den Sogenannten *Lagrange-Formalismus* eingehen.

Der Lagrange-Formalismus in der Klassischen Mechanik

Der Lagrange-Formalismus dient i.A. zur Beschreibung eines physikalischen Systems. Ähnlich wie in der Newton-Mechanik, bei der die Bewegung eines Teilchens q beschrieben wird durch dessen Bewegungsgleichung

$$m\ddot{q} - F(q) = 0,$$

gibt es bei Lagrange Bewegungsgleichungen, deren Lösung die Bewegung eines Teilchens darstellen, dass sich in diesem System mit gewissen Anfangsbedingungen bewegt.

Definition. Sei M eine glatte Mannigfaltigkeit. Eine Lagrangefunktion ist eine glatte Abbildung

$$L : TM \longrightarrow \mathbb{R}.$$

Das Paar (TM, L) heißt Lagrange-System mit Konfigurationsraum M und Phasenraum TM .

Das Integral

$$S(\gamma) := \int_{\gamma} L(\dot{\gamma}(t)) dt \quad \text{mit } \gamma : I \subset \mathbb{R} \longrightarrow M$$

nennt man Wirkung.

Wie die Lagrangefunktion im speziellen aussieht, hängt vom System ab.

¹⁰ / A.Besse: Einstein-manifolds, Springer 87

Beispiel 68. NATÜRLICHE SYSTEME

Angenommen eine Punktmasse q bewegt sich im 'leeren' Raum $(\mathbb{R}^2, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ in dem keine äußeren Kräfte wirken, dann hat die Lagrange-Funktion die Gestalt

$$L(q(t), \dot{q}(t)) = \underbrace{\frac{1}{2} \|\dot{q}(t)\|^2}_{\text{kinetische Energie}} . \quad (3.2)$$

Fügt man dem System jedoch einen massiven Körper hinzu, so wirkt zusätzlich auf q ein Gravitationspotential U . Für das Lagrange-Funktional ergibt sich dann

$$L(q(t), \dot{q}(t)) = \underbrace{\frac{1}{2} \|\dot{q}(t)\|^2}_{\text{kinetische Energie}} - \underbrace{U(q(t))}_{\text{potentielle Energie}} . \quad (3.3)$$

Definition. Sei (M, g) eine semi-Riem. Mannigfaltigkeit. Ein Lagrange-System (TM, L) heißt natürliches System, falls die Lagrangefunktion die Gestalt

$$L(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) - U(q)$$

hat. Dabei ist $U \in C^\infty(M)$ und heißt Potential. T hat die Form

$$T(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} g_q(\dot{q}, \dot{q}) .$$

Tatsächlich lassen sich sehr viele klassische Beispiele in solch eine Form bringen.

Wir kommen nun zu den Bewegungen in einem Lagrange-System.

Definition. Sei $\gamma : [a, b] \subset \mathbb{R} \rightarrow M$ eine glatte Kurve. Unter einer Variation von γ verstehen wir eine glatte Abbildung

$$\begin{aligned} \Gamma : [a, b] \times (-1, 1) &\rightarrow M \\ (t, \epsilon) &\mapsto \Gamma(t, \epsilon) =: \gamma_\epsilon(t) \end{aligned}$$

mit $\Gamma(t, 0) = \gamma(t)$, $\Gamma(a, \epsilon) = \gamma(a)$ und $\Gamma(b, \epsilon) = \gamma(b)$ für alle $\epsilon \in (-1, 1)$.

Definition. Sei (TM, L) ein Lagrange-System. Eine Bewegung in (TM, L) ist eine Kurve $\gamma : I \subset \mathbb{R} \rightarrow M$, für die die Wirkung

$$S(\gamma) = \int_\gamma L(\dot{\gamma}) dt$$

stationär wird, d.h.

$$\frac{d}{d\epsilon} S(\gamma_\epsilon) |_{\epsilon=0} = 0$$

für alle Variationen γ_ϵ von γ .

Bemerkung

- Sei (TM, L) ein natürliches Lagrange-System mit Funktional

$$L(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} g_q(\dot{q}, \dot{q})$$

so folgt für dessen Wirkung S offensichtlich

$$S(\gamma) = \int_\gamma \frac{1}{2} g_\gamma(\dot{\gamma}, \dot{\gamma}) dt = \frac{1}{2} \int_\gamma \|\dot{\gamma}\|_g dt = \frac{1}{2} l(\gamma) .$$

Es gilt nun folgende Aussage:

Satz 3.23. Sei (TM, L) ein Lagrange-System. Eine Kurve $\gamma : I \subset \mathbb{R} \rightarrow M^n$ ist genau dann eine Bewegung, wenn γ für alle Karten die Euler-Lagrange-Gleichungen

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \hat{L}}{\partial \dot{q}} \right) = \frac{\partial \hat{L}}{\partial q}$$

erfüllt. Dabei ist

$$\hat{L}(q, \dot{q}) := L(d\varphi_q^{-1}(\dot{q})) = ((\varphi^{-1})^* L)(q, \dot{q})$$

für eine Karte $(U, \varphi = (q_1, \dots, q_n))$.

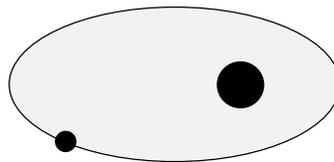
Diese Gleichungen werden deshalb auch Bewegungsgleichungen des Systems genannt.

Für den Beweis dieses Satzes sei auf M. Schottenloher 'Geometrie und Symmetrie in der Physik', Vierweg 95, S. 119, verwiesen.

Die Einstein-Gleichung der ART

Dazu betrachten wir die Bahn eines Teilchens in einem Gravitationsfeld.

Die Bahn eines Trabanten.



Bewegt er sich nicht auch auf einer scheinbaren Oberfläche?

Die Idee ist nun, die Ablenkung als eine Krümmung des Raumes zu betrachten und eine Metrik g zu finden, für die sich das Teilchen auf einer Geodäte bewegt. Diese Metrik erhält man aus der *Einstein-Gleichung*, die nun im weiteren Verlauf erläutert werden soll.

Sei $(M^{4,1}, g)$ eine 4-dim Lorentz-MF.

Wir betrachten nun den Einsteinscher Gravitationstensor

$$G = \text{Ric} - \frac{R}{2}g$$

und einen sogenannten Energie-Impuls-Tensor

$$T \in \mathfrak{X}^{(2,0)}(M) \quad \text{symmetrisch und } \delta T = 0$$

Letzterer beschreibt die Energie-Verteilung der Materie in der speziellen physikalischen Situation.

Dann lautet Einstein-Gleichung der ART

$$G = \text{Ric} - \frac{R}{2}g = T$$

Eine Lösung dieser Partielle Differentialgleichung in g liefert uns nun eine Metrik, in der sich die Teilchen auf Geodäten bewegen.

Die Einstein-Gleichungen im Vakuum als Variationsproblem

Im Vakuum ist keine Materie vorhanden, d.h. $T = 0$ und damit haben wir für die Einstein-Gleichungen

$$G = \text{Ric} - \frac{R}{2}g = 0. \quad (*)$$

Wir wollen nun ein Lagrangefunktional \mathcal{L} finden, dessen kritische Punkte, und damit meinen wir die *stationären* Punkte der Wirkung von \mathcal{L} gerade die Lösungen von $(*)$ sind.

Dazu sei erwähnt, das es sich hierbei nicht um ein klassisches Lagrangefunktional aus dem vorletzten Abschnitt handelt, da $(*)$ eine Gleichung für eine Metrik ist. Das Funktional \mathcal{L} muß dadurch auf den symmetrischen $(2, 0)$ - Tensorfeldern mit Signatur (p, q) der definiert sein. Solche Lagrangefunktionale, die auf Feldern die definiert sind, bezeichnet man auch als Lagrangedichten.

Sei

$$\mathcal{M}_{p,q}(M) := \left\{ g \mid g \text{ Metrik der Sign. } (p, q) \text{ und } \int_M R_g dM_g < \infty \right\},$$

dann setzen wir als Lagrangedichte \mathcal{L}

$$\begin{aligned} \mathcal{L} : \mathcal{M}_{p,q}(M) &\longrightarrow C^\infty(M) \\ g &\longmapsto R_g \end{aligned}$$

die Wirkung ergibt sich daraus als

$$\begin{aligned} S : \mathcal{M}_{p,q}(M) &\longrightarrow \mathbb{R} \\ g &\longmapsto \int_M \mathcal{L}(g) dM_g = \int_M R_g dM_g \end{aligned}$$

Dieses Funktional heißt Einstein-Hilbert-Funktional.

Für die Variation betrachten wir nun ein $g \in \mathcal{M}_{p,q}(M)$ und ein $h \in S_0^{(2,0)}(M)$, dies sind die symmetrischen $(2, 0)$ -Tensorfelder mit *kompaktem* Träger. Dann ist

$$g + th \in \mathcal{M}_{p,q}(M) \quad \text{für } |t| < \epsilon.$$

$g \in \mathcal{M}_{p,q}(M)$ heißt nun kritischer (o. stationärer) Punkt von S , falls

$$\frac{d}{dt}(S(g + th))|_{t=0} = 0 \quad \forall h \in S_0^{(2,0)}(M).$$

Satz 3.24. *Eine Metrik g auf M . Dann sind folgende Aussagen äquivalent:*

1. g ist kritischer Punkt des Einstein-Hilbert-Funktional.
2. $\text{Ric}_g - \frac{1}{2}R_g = 0$.
3. $\text{Ric} = 0$

Zum Beweis benutzen wir folgende Variationsformeln für die Krümmungstensoren:

Lemma 3.2. Sei g eine Metrik, $h \in S_0^{(2,0)}(M)$, dann gelten die folgenden Variationsformeln

1. Für die Volumenform:

$$\begin{aligned} d\dot{M} &:= \frac{d}{dt} (dM_{g+th})|_{t=0} = \frac{1}{2} \langle g, h \rangle_g dM_g \\ &= \frac{1}{2} \text{Tr}_g(h) dM_g \end{aligned}$$

2. Für den Levi-Civita-Zsh:

$$\nabla := \frac{d}{dt} (\nabla^{g+th})|_{t=0}$$

ist ein $(2, 1)$ -Tensorfeld und

$$g(\dot{\nabla}(X, Y), Z) = \frac{1}{2} ((\nabla_Y^g h)(Y, Z) + (\nabla_Y^g h)(X, Z) - (\nabla_Z^g h)(X, Y))$$

3. Für den $(3, 1)$ -Krümmungstensor:

Sei $\mathcal{R} := \frac{d}{dt} (\mathcal{R}^{\nabla^{g+th}})|_{t=0}$, dann ist

$$\dot{\mathcal{R}}(X, Y)Z = \nabla_X^g(\dot{\nabla})(Y, Z) - \nabla_Y^g(\dot{\nabla})(X, Z)$$

4. Für den Ricci-Tensor:

Sei $\text{Ric} := \frac{d}{dt} (\text{Ric}_{g+th})|_{t=0}$, dann ist

$$\text{Ric}(X, Y) = \sum_{i=1}^n \epsilon_i \left[g(\nabla_{e_j}(\dot{\nabla})(X, Y), e_i) - g(\nabla_X(\dot{\nabla})(e_i, Y), e_i) \right]$$

5. Für die Skalarkrümmung:

$$\dot{R} = \frac{d}{dt} (R_{g+th})|_{t=0} = \Delta_g(\text{tr}_g(h)) + \delta_g(\delta_g h) - \langle \text{Ric}, h \rangle_g$$

Beweis:

1. Nach Definition ist $dM_g = \sqrt{|\det(g(a_i, a_j))|} \sigma^1 \wedge \dots \wedge \sigma^n$ für eine Basis (a_1, \dots, a_n) und deren Dualbasis $(\sigma^1, \dots, \sigma^n)$. Sei nun (a_1, \dots, a_n) eine ONB für g mit Index p . Dann ist

$$|\det(g(a_i, a_j))| = |(-1)^p| = 1$$

und damit

$$dM_g = \sigma^1 \wedge \dots \wedge \sigma^n$$

und daraus folgt

$$\begin{aligned} dM_{g+th} &= \sqrt{(-1)^p \det((g+th)(a_i, a_j))} \sigma^1 \wedge \dots \wedge \sigma^n \\ &= \sqrt{(-1)^p \det(A+tB)} \sigma^1 \wedge \dots \wedge \sigma^n \end{aligned}$$

wobei

$$A = \begin{pmatrix} -1 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & -1 & & \\ & & & 1 & \\ 0 & & & & \ddots \\ & & & & & 1 \end{pmatrix} \quad \text{und } B = (h(a_i, a_j)).$$

Behauptung:

$$\frac{d}{dt} ((-1)^p \det(A + tB))|_{t=0} = \det A \cdot \text{Tr}(A^{-1}B)$$

Es gilt $\det(e^{sX}) = e^{\text{Tr} sX}$, dies rechnet man mithilfe der Jordanform aus. Nun entwickeln wir dies für s :

$$\det(E + sX) = 1 + s \text{Tr} X + O(s^2)$$

und daraus folgt nun

$$\begin{aligned} \det(A + sB) &= \det(A^{-1})(E + sA^{-1}B) \\ &= \det(A^{-1})(1 + s \cdot \text{Tr}(A^{-1}B) + O(s^2)) \end{aligned}$$

und das heißt dass

$$\frac{d}{ds} (\det(A + sB)) = \det(A^{-1}) \cdot \text{Tr}(A^{-1}B).$$

Mit dieser Tatsache ergibt sich nun

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (dM_{g+th})|_{t=0} &= \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{1}} (-1)^p \cdot \det(A) \cdot \text{Tr}(A^{-1}B) \cdot \sigma^1 \wedge \dots \wedge \sigma^n \\ &= \frac{1}{2} \cdot \text{Tr} \left(\begin{pmatrix} -1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & -1 & \\ & & & 1 \\ & & & & \ddots \\ & & 0 & & & 1 \end{pmatrix} \circ (h(a_i, a_j)) \right) \cdot \sigma^1 \wedge \dots \wedge \sigma^n \\ &= \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n \epsilon_j h(a_i, a_j) dM_g \\ &= \frac{1}{2} \text{Tr}_g h \cdot dM_g = \frac{1}{2} \langle g, h \rangle_g dM_g \end{aligned}$$

2. Hier benutzen wir die Kozulformel für den LC-Zsh. Aus

$$\begin{aligned} 2(g + th) \left(\nabla_X^{g+th} Y, Z \right) &= X((g + th)(Y, Z)) + Y((g + th)(X, Z)) \\ &\quad - Z((g + th)(X, Y)) + (g + th)([X, Y], Z) \\ &\quad + (g + th)([Z, X], Y) + (g + th)([Z, Y], X) \end{aligned}$$

mit $\frac{d}{dt}|_{t=0}$ folgt

$$\begin{aligned} 2 \cdot g \left(\dot{\nabla}(X, Y), Z \right) + 2h(\nabla_X^g Y, Z) &= X(h(Y, Z)) + Y(h(X, Z)) - Z(h(X, Y)) \\ &\quad + h([X, Y], Z) + h([Z, X], Y) + h([Z, Y], X) \\ &= (\nabla_X h)(Y, Z) + (\nabla_Y h)(X, Z) - (\nabla_Z h)(X, Y) \\ &\quad + h(\nabla_X Y, Z) + h(Y, \nabla_X Z) + h(\nabla_Y X, Z) \\ &\quad + h(X, \nabla_Y Z) - h(\nabla_Z X, Y) - h(X, \nabla_Z Y) \\ &\quad + h(\nabla_X Y, Z) - h(\nabla_Y X, Z) + h(\nabla_Z X, Y) \\ &\quad - h(\nabla_X Z, Y) + h(\nabla_Z Y, X) - h(\nabla_Y Z, X) \end{aligned}$$

und daraus ergibt sich dann

$$\boxed{g \left(\dot{\nabla}(X, Y), Z \right) = \frac{1}{2} ((\nabla_X h)(Y, Z) + (\nabla_Y h)(X, Z) - (\nabla_Z h)(Z, Y))}$$

3. Hierbei sei nochmals auf die Definition der Kovarianten Ableitung für Tensorfelder verwiesen. Mit der Produktregel folgt dann

$$\begin{aligned}\dot{\mathcal{R}}(X, Y)Z &= \dot{\nabla}(X, \nabla_Y Z) + \nabla_X \left(\dot{\nabla}(Y, Z) \right) - \dot{\nabla}(Y, \nabla_X Z) \\ &\quad - \nabla_Y \left(\dot{\nabla}(X, Z) \right) - \dot{\nabla}([X, Y], Z) \\ &\stackrel{Def}{=} \nabla_X \left(\dot{\nabla} \right) (Y, Z) - \nabla_Y \left(\dot{\nabla} \right) (X, Z)\end{aligned}$$

4. Da die Spur einer lin. Abbildung und die Ableitung nach t vertauschbar sind, folgt

$$\begin{aligned}\mathbf{Ric}(X, Y) &= \frac{d}{dt} (\mathbf{Ric}_{g+th}(X, Y))|_{t=0} \\ &= Tr \left(Z \mapsto \dot{\mathcal{R}}(X, Y)Z \right)\end{aligned}$$

und daraus ergibt sich

$$\mathbf{Ric}(X, Y) = \sum_{i=1}^n \epsilon_i \left(g \left(\nabla_{e_i} \left(\dot{\nabla} \right) (X, Y), e_i \right) - g \left(\nabla_X \left(\dot{\nabla} \right) (e_i, Y), e_i \right) \right)$$

5. Es gilt

$$R_{g+th} = \sum_{i=1}^n \epsilon_i \mathbf{Ric}_{g+th}(a_i(t), a_i(t))$$

wobei $a_i(t)$ eine ONB von $g+th$ ist. Sei $a_i(0) = a_i$ und $\dot{a}_i = \dot{a}_i(0)$, dann ist

$$\begin{aligned}\dot{R} &= \frac{d}{dt} (R_{g+th})|_{t=0} \\ &= \sum_i \left(\epsilon_i \dot{\mathbf{Ric}}(a_i, a_i) + 2\epsilon_i \mathbf{Ric}_g(\dot{a}_i, a_i) \right) \\ &= Tr_g \dot{\mathbf{Ric}} + 2 \sum_i \epsilon_i \mathbf{Ric}_g(\dot{a}_i, a_i) \quad (*)\end{aligned}$$

Behauptung:

$$2 \sum_i \epsilon_i \mathbf{Ric}_g(\dot{a}_i, a_i) = - \langle \mathbf{Ric}_g, h \rangle_g$$

Aus $(g+th)(a_i(t), a_j(t)) = \epsilon_i \delta_{ij}$ folgt

$$h(a_i, a_j) + g(\dot{a}_i, a_j) + g(a_i, \dot{a}_j) = 0$$

und mit Basisdarstellung ergibt sich

$$\begin{aligned}\dot{a}_i &= \sum_k g(\dot{a}_i, a_k) \epsilon_k a_k \\ &= \sum_k -h(a_i, a_k) \epsilon_k a_k - g(a_i, \dot{a}_k) \epsilon_k a_k\end{aligned}$$

Insgesamt erhalten wir dann

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^n \epsilon_i \mathbf{Ric}_g(\dot{a}_i, a_i) &= - \sum_{k,i} \epsilon_i \epsilon_k (h(a_i, a_k) \mathbf{Ric}_g(a_k, a_i) + g(a_i, \dot{a}_k) \mathbf{Ric}_g(a_k, a_i)) \\ &= - \langle h, \mathbf{Ric}_g \rangle_g - \sum_k \epsilon_k \mathbf{Ric}(a_k, \dot{a}_k) \\ \Leftrightarrow 2 \sum_i \epsilon_i \mathbf{Ric}_g(\dot{a}_i, a_i) &= - \langle h, \mathbf{Ric}_g \rangle_g\end{aligned}$$

Wenden wir dies auf (*) an, dann bleibt die

Behauptung:

$$Tr_g \dot{\mathbf{Ric}} = \Delta_g (Tr h) + \delta_g \delta_g (h)$$

Es ist

$$\begin{aligned} Tr_g \dot{\mathbf{Ric}} &= \sum_i \epsilon_i \dot{\mathbf{Ric}}(e_i, e_j) \\ &= \sum_{i,j} \epsilon_i \epsilon_j \left(g \left(\nabla_{e_j} \left(\dot{\nabla} \right) (e_i, e_i), e_j \right) - g \left(\nabla_{e_i} \left(\dot{\nabla} \right) (e_j, e_j), e_i \right) \right) \end{aligned}$$

nun rechnen wir im Punkt $x \in M$ in einer x -synchronen ONB. Dann folgt

$$\begin{aligned} Tr_g \dot{\mathbf{Ric}} &\stackrel{x}{=} \sum_{i,j} \epsilon_i \epsilon_j \left(g \left(\nabla_{e_j} \left(\dot{\nabla} \right) (e_i, e_i), e_j \right) - g \left(\nabla_{e_i} \left(\dot{\nabla} \right) (e_j, e_j), e_i \right) \right) \\ &\stackrel{\nabla_g=0}{=} \sum_{i,j} \epsilon_i \epsilon_j \left(e_j \left(g \left(\dot{\nabla} (e_i, e_i), e_j \right) \right) - e_i \left(g \left(\dot{\nabla} (e_j, e_j), e_i \right) \right) \right) \\ &\stackrel{2.}{=} \frac{1}{2} \sum_{i,j} \epsilon_i \epsilon_j \{ e_j (\nabla_{e_i} h(e_i, e_j) + \nabla_{e_i} h(e_i, e_j) - \nabla_{e_j} h(e_i, e_i)) \\ &\quad - e_i (\nabla_{e_j} h(e_i, e_j) + \nabla_{e_i} h(e_j, e_j) - \nabla_{e_j} h(e_j, e_i)) \} \\ &= \sum_{i,j} \epsilon_i \epsilon_j (e_j \underbrace{(\nabla_{e_i} h(e_i, e_j))}_{-\delta h(e_j)} - e_i (\nabla_{e_j} h(e_i, e_i))) \\ &= \delta_g \delta_g h - \sum_{i,j} \epsilon_i \epsilon_j e_j (e_j (h(e_i, e_i) - 2h(\nabla_{e_j} e_i, e_i))) \\ &= \delta_g \delta_g h + \Delta_g (Tr_g h) + 2 \sum_{i,j} \epsilon_i \epsilon_j h (\nabla_{e_i} \nabla_{e_j} e_i, e_i) \end{aligned}$$

Wir zeigen nun

$$2 \sum_{i,j} \epsilon_i \epsilon_j h (\nabla_{e_i} \nabla_{e_j} e_i, e_i) = 0$$

Es gilt

$$\begin{aligned} \nabla_{e_i} \nabla_{e_j} e_i &= \sum_k \epsilon_k g (\nabla_{e_i} \nabla_{e_j} e_i, e_k) e_k \\ &= \sum_k \epsilon_k (e_j (g (\nabla_{e_j} e_i, e_k)) - 0) e_k \\ &= \sum_k \epsilon_k \left(e_j \left(\underbrace{g(e_i, e_k)}_0 \right) - g(e_i, \nabla_{e_j} e_k) \right) e_k \\ &= - \sum_k \epsilon_k g(e_i, \nabla_{e_i} \nabla_{e_j} e_k) e_k \end{aligned}$$

und daraus folgt

$$\begin{aligned} \sum_{i,j} \epsilon_i \epsilon_j h (\nabla_{e_i} \nabla_{e_j} e_i, e_i) &= \sum_{i,j,k} \epsilon_i \epsilon_j \epsilon_k g(e_i, \nabla_{e_j} \nabla_{e_j} e_k) \cdot h(e_k, e_k) \\ &= - \sum_{j,k} \epsilon_k \epsilon_j h (\nabla_{e_j} \nabla_{e_j} e_k, e_k) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Insgesamt ergibt sich damit

$$\boxed{\dot{R} = \delta_g \delta_g h + \Delta_g (Tr_g h) - \langle \mathbf{Ric}_g, h \rangle_g}$$

Und das Lemma ist bewiesen. □

Wir kommen nun zum Beweis von Satz 3.24.

Beweis: Für die Variation des Einstein-Hilbert-Funktional gilt nun

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(S(g+th))|_{t=0} &= \int_M \frac{d}{dt}(R_{g+th} \cdot dM_{g+th})|_{t=0} \\ &= \int_M \dot{R} \cdot dM_g + R_g \cdot d\dot{M} \\ &\stackrel{\text{Lemma}}{=} \int_M \left(\Delta_g(Tr_g h) + \delta_g \delta_g h - \langle \mathbf{Ric}_g, h \rangle_g + \frac{1}{2} \langle R_g g, h \rangle \right) dM_g \\ &= \int_M \left\langle \frac{1}{2} R_g g - \mathbf{Ric}_g, h \right\rangle dM_g \\ &\quad + \int_M (\Delta_g(Tr_g h) + \delta_g \delta_g h) dM_g \end{aligned}$$

der 2. Term verschwindet jedoch nach dem Satz von Stokes bzw. dem Divergenzsatz für Vektorfelder mit kompaktem Träger auf Mannigfaltigkeiten ohne Rand. Aus

$$0 = \frac{d}{dt}(S(g+th))|_{t=0} = \int_M \left\langle \frac{1}{2} R_g g - \mathbf{Ric}_g, h \right\rangle_g dM_g \quad \forall h \in S_0^{(2,0)}(M)$$

folgt dann also

$$\mathbf{Ric} - \frac{1}{2} R_g \cdot g = 0$$

□

Bemerkung:

- Es gilt

$$T = 0 \Leftrightarrow \frac{d}{dt}(S(g+th))|_{t=0} = \int_M \langle T, h \rangle_g dM_g = 0 \quad \forall h \in S_0^{(2,0)}(M)$$

Sei $x \in M$, (e_1, \dots, e_n) eine ONB in $T_x M$ und angenommen $T_x(e_i, e_j) \neq 0$. Wir betrachten h mit $h_x = \underbrace{h_x(e_i, e_j)}_{\neq 0} \sigma^i \circ \sigma^j$ und

$$\underbrace{T_x(e_i, e_j) h_x(e_i, e_j)}_{=: f(x)} > 0.$$

Sei $\varphi \in C^\infty(M)$ mit $\varphi > 0, \varphi(x) = 1$ und $\text{supp } \varphi \subset \{f > 0\}$ dann ist

$$\frac{d}{dt}(S(g+t\varphi h))|_{t=0} = \int_M \langle T, \varphi h \rangle_g dM_g = \int_M \varphi f dM_g > 0.$$

Satz 3.25. Sei (M, g) eine orientierte semi-Riem. MF mit $Vol(M, g) = 1$. Sei

$$F : \mathcal{M}_{(p,g)} \longrightarrow \mathbb{R}$$

das normierte Einstein-Hilbert-Funktional

$$F(g) = \frac{1}{Vol(M, g)^{\frac{n-2}{n}}} \int_M R_g dM_g,$$

dann gilt

$$(M, g) \text{ ist Einstein-Raum} \iff g \text{ ist kritischer Punkt von } F$$

Beweis:

Bemerkung: Verhalten der Funktionale bei Umskalierung der Metrik

Sei $\tilde{g} = \lambda \cdot g$, dann ist

- $\text{Ric}_{\tilde{g}} = \text{Ric}_g$
- $R_{\tilde{g}} = \lambda^{-1} R_g$
- $dM_{\tilde{g}} = \lambda^{\frac{n}{2}} dM_g$

Somit folgt also

$$S(\lambda g) = \int_M R_{\lambda g} dM_{\lambda g} = \lambda^{\frac{n-2}{2}} S(g)$$

bzw.

$$F(\lambda g) = \frac{1}{Vol(M, \lambda g)^{\frac{n-2}{2}}} S(\lambda g) = \lambda^{-\frac{n}{2} \cdot \frac{n-2}{2}} \cdot \lambda^{\frac{n-2}{2}} \cdot F(g) = F(g).$$

Für die Variationen ergibt sich damit

$$\frac{d}{dt} (F(g + th))|_{t=0} = \frac{d}{dt} (S(g + th))|_{t=0} \cdot \underbrace{Vol(M, g)}_1 + S(g) \cdot \left(-\frac{n-2}{n} \cdot \underbrace{\frac{d}{dt} (Vol(M, g + th))|_{t=0}}_{Vol} \right)$$

wobei nach dem Lemma

$$Vol = \int_M d\dot{M} = \int_M \frac{1}{2} \langle g, h \rangle_g dM,$$

und nach Satz 3.24

$$\frac{d}{dt} (S(g + th))|_{t=0} = \int_M - \left\langle \text{Ric} - \frac{1}{2} R_g \cdot g, h \right\rangle_g dM.$$

Insgesamt erhalten wir also

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (F(g + th))|_{t=0} &= \int_M \left\langle -\text{Ric} + \frac{1}{2} R_g \cdot g - \frac{n-2}{2n} R_g \cdot g, h \right\rangle_g dM_g \\ &= \int_M \left\langle -\text{Ric} + \frac{1}{n} R_g \cdot g, h \right\rangle_g dM_g \\ &= 0 \quad \forall h \\ \Rightarrow \quad \text{Ric} &= \frac{R}{n} \cdot g. \end{aligned}$$

Und somit ist (M, g) ein Einstein-Raum.

□

3.6 Geodätische Linien auf semi-Riemannschen Mannigfaltigkeiten

Ziel: Verallgemeinerung der Geraden im $\mathbb{R}^n =$ kürzeste Verbindung zwischen 2 Punkten in $(\mathbb{R}^n, \langle \cdot, \cdot \rangle_{\mathbb{R}^n})$.

Definition. Sei (M^n, g) semi-Riemannsche Mannigfaltigkeit und ∇ der Levi-Civita-Zusammenhang. Sei weiterhin $I \subset \mathbb{R}$ sei ein Intervall.

Eine C^∞ -Kurve $\gamma : I \rightarrow M$ heißt geodätische Linie auf (M^n, g) , falls

$$\frac{\nabla \dot{\gamma}}{dt} \equiv 0$$

auf I , (d.h. $\dot{\gamma}$ ist \parallel -verschoben entlang γ).

Eigenschaften von Geodäten:

1. *Lokale Formel für geodätische Linien γ*

Aus der lokalen Formel für parallele Vektorfelder folgt: Sei $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ zul. Karte um $\gamma(t)$ und $\varphi \circ \gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_n)$, so folgt

$$\dot{\gamma}(t) = \sum_{i=1}^n \gamma'_i(t) \frac{\partial}{\partial x_i}(\gamma(t))$$

und damit

$$\gamma''_k(t) + \sum_{i,j=1}^n \gamma'_i(t) \gamma'_j(t) \Gamma_{ij}^k(\gamma(t)) \equiv 0 \quad k = 1, \dots, n$$

wobei (Γ_{ij}^k) die Christoffelsymbole von (M, g) bezüglich (U, φ) sind.

Beispiel 69. GEODÄTEN IM FLACHEN RAUM

Sei $(M, g) = (\mathbb{R}^n, \langle \cdot, \cdot \rangle_{\mathbb{R}^n})$, dann ist $\Gamma_{ij}^k \equiv 0$. Damit gilt:

$$\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^n \text{ geodätische} \Leftrightarrow \gamma''_k(t) = 0 \quad k = 1, \dots, n \Leftrightarrow \gamma(t) = at + b \quad a, b \in \mathbb{R}^n$$

2. Sei $\gamma : I \rightarrow M$ geodätische, dann ist

$$\|\gamma'(t)\| = \text{const.}$$

Da die \parallel -Verschiebung bezüglich Levi-Civita-Zusammenhang die Längen erhält¹¹.

3. Sei $\gamma : I \rightarrow M$ eine nicht-konstante geodätische und $\tau : J \rightarrow I$ eine Parametertransformation. Dann gilt:

Die umparametrisierte Kurve $\tilde{\gamma} = \gamma \circ \tau : J \rightarrow M$ ist eine geodätische $\Leftrightarrow \tau(t) = at + b$ (d.h. τ ist eine affine Parametertransformation).

Denn:

$$\tilde{\gamma}'(t) = \gamma'(\tau(t)) \cdot \tau'(t)$$

Aus der Produktregel für kovariante Ableitung von VF folgt dann

$$\frac{\nabla \tilde{\gamma}'}{dt}(t) = \frac{\nabla \gamma'}{d\tau}(\tau(t)) \cdot (\tau'(t))^2 + \gamma'(\tau(t)) \cdot \tau''(t)$$

$\stackrel{\gamma \text{ Geodäte}}{=} \gamma'(\tau(t)) \cdot \tau''(t)$

Da γ nicht konstant und γ' -verschoben ist, folgt $\gamma'(\tau(t)) \neq 0 \quad \forall t \in I \setminus \text{Nullmenge}$.

¹¹siehe Satz 3.13 auf Seite 146

Definition. Eine C^∞ -Kurve $\gamma : I \rightarrow M$ heißt Prägeodäte \Leftrightarrow es existiert eine beliebige Parametertransformation $\tau : J \rightarrow I$ derart, dass $\tilde{\gamma} = \gamma \circ \tau : J \subset \mathbb{R} \rightarrow M$ eine Geodäte ist.

Satz 3.26. Sei (M, g) semi-Riemannsche Mannigfaltigkeit, $x \in M$ und $v \in T_x M$. Dann existiert genau eine maximale Geodätische $\gamma_v : I_v \subset \mathbb{R} \rightarrow M$ mit

$$\begin{aligned} \gamma_v(0) &= x \\ \gamma'_v(0) &= v \quad \text{“Durchlaufgeschwindigkeit”} \end{aligned}$$

(maximal = maximaler Definitionsbereich)

Beweis:

1. Wir zeigen zuerst: es existiert eine Geodätische $\gamma : (-\varepsilon, \varepsilon) \subset \mathbb{R} \rightarrow M$ mit $\gamma(0) = x, \gamma'(0) = v$.

Dazu wählen wir Karte $(U, \varphi = (x_1, \dots, x_n))$ um x . Sei dann $v = \sum v^k \frac{\partial}{\partial x_k}(x)$, so betrachten wir das lineare DGS auf $\varphi(U)$:

$$\left. \begin{aligned} \gamma''(t) + \sum_{i,j=1}^n \gamma'_i(t) \gamma'_j(t) \Gamma_{ij}^k(\gamma(t)) &\equiv 0 \\ \gamma_k(0) &= X_k(x) \\ \gamma'_k(0) &= v^k \end{aligned} \right\} \quad k = 1, \dots, n$$

Dies ist gewöhnliche DGLS 2. Ordnung mit AW \Rightarrow es existiert lokal eine Lösung um $t = 0$

$$\gamma(t) := \varphi^{-1}(\gamma_1(t), \dots, x_n(t)) \quad t \in (-\varepsilon, \varepsilon)$$

2. Maximalität und Eindeutigkeit: Standardschluss wie im \mathbb{R}^n : Seien $\gamma_i : I_i \subset \mathbb{R} \rightarrow M$ Geodätische mit $\gamma_i(0) = x, \gamma'_i(0) = v, I_1 \cap I_2$ zusammenhängend, $0 \in I_1 \cap I_2 \Rightarrow \gamma_1 = \gamma_2$ auf $I_1 \cap I_2$ denn: Sei

$$A = \{t \in I_1 \cap I_2 \mid \gamma_1(t) = \gamma_2(t), \gamma'_1(t) = \gamma'_2(t)\}$$

dann ist $A \neq \emptyset$ da $0 \in A$. Darüberhinaus ist A abgeschlossen, da γ_i, γ'_i stetig und T_2 -Räume, und offen nach lokalem Existenzsatz für $t_0 \in A$. Da $I_1 \cap I_2$ zusammenhängend ist, folgt $A = I_1 \cap I_2$.

Wir betrachten alle Lösungen $\gamma : (a_\gamma, b_\gamma) \rightarrow M, a = \inf_\gamma a_\gamma, b = \sup_\gamma b_\gamma$. Dann gilt:

$$\gamma_v : (a, b) = I_v \subset \mathbb{R} \rightarrow M$$

ist eindeutige maximale Lösung: $\gamma_v(t) := \gamma(t)$ falls $t \in (a_\gamma, b_\gamma)$.

□

Folgerung:

Sei $\gamma_v : I_v \subset \mathbb{R} \rightarrow M$ die maximale Geodäte mit Anfangspunkt $\gamma_v(0) = x$ und Anfangsrichtung $\gamma'_v(0) = v$. Dann gilt:

$$ts \in I_v \Rightarrow s \in I_{tv}$$

und

$$\gamma_{tv}(s) = \gamma_v(ts).$$

Insbesondere ist mit $1 \in I_v$ auch $1 \in I_{tv} \forall 0 \leq t \leq 1$.

Beweis: Sei $\delta(\tau) := \gamma_v(t \cdot \tau)$ für $0 \leq \tau \leq s$, t fix. Dann gilt: δ ist Geodäte, da affine Parametertransformation

$$\delta(0) = \gamma_v(0) = x \quad , \quad \delta'(0) = t \cdot v$$

Nach Definition ist dann $\delta(\tau) = \gamma_{tv}(\tau)$ und damit

$$\delta(s) \stackrel{\text{def}}{=} \gamma_v(ts) = \gamma_{tv}(s) \Rightarrow s \in I_{tv}, \text{ da } ts \in I_v.$$

Für $s = 1$ folgt dann $t \cdot 1 \in I_v \forall 0 \leq t \leq 1$ und demnach

$$1 \in I_{tv} \forall 0 \leq t \leq 1.$$

□

Satz 3.27. Sei $f : (M, g) \rightarrow (\tilde{M}, \tilde{g})$ eine Isometrie zwischen semi-Riemannschen Mannigfaltigkeiten. Dann gilt:

$\gamma : I \rightarrow M$ ist eine Geodätische in $(M, g) \iff f \circ \gamma : I \rightarrow \tilde{M}$ ist eine Geodätische in (\tilde{M}, \tilde{g})

Beweis: Eine Geodätische γ ist stückweise entweder regulär ($\gamma'(t) \neq 0$) oder konstant, da $\|\gamma'(t)\| = \text{const.}$ und γ' \parallel -verschoben. Für einen Diffeomorphismus f gilt dann

$$\begin{aligned} \gamma \text{ konstant} &\Leftrightarrow f \circ \gamma \text{ konstant} \quad \text{und} \\ \gamma \text{ regulär} &\Leftrightarrow f \circ \gamma \text{ regulär.} \end{aligned}$$

Sei nun γ regulär und $t_0 \in I$, dann existiert $\tilde{I} = (t_0 - \varepsilon, t_0 + \varepsilon)$ und ein VF $\tilde{X}_{t_0} \in \mathfrak{X}(M)$ mit $\tilde{X}_{t_0}(\gamma(t)) = \gamma'(t) \forall t \in \tilde{I}$. Betrachten das VF $df(\tilde{X}_{t_0}) \in \mathfrak{X}(\tilde{M})$, (dies existiert, da f ein Diffeomorphismus ist):

$$\begin{aligned} df(\tilde{X}_{t_0})(f\gamma(t)) &\stackrel{\text{def}}{=} df_{\gamma(t)}(\tilde{X}_{t_0}(\gamma(t))) \\ &= df_{\gamma(t)}(\gamma'(t)) = (f\gamma)'(t) \quad \forall t \in \tilde{I} \end{aligned}$$

D.h. $df(\tilde{X}_{t_0})$ setzt $(f\gamma)'$ um $(f\gamma)'(t_0)$ fort. Und damit folgt

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{\nabla}((f\gamma)')}{dt}(t) &= \tilde{\nabla}_{(f\gamma)'(t)} df(\tilde{X}_{t_0}) \\ &= df_{\gamma(t)}(\nabla_{\gamma'(t)} \tilde{X}_{t_0}) \\ &\stackrel{S.3.8}{=} df_{\gamma(t)}\left(\frac{\nabla \gamma'}{dt}(t)\right) \quad \forall t \in \tilde{I} \end{aligned}$$

Da $df_{\gamma(t)}$ eine Isometrie ist, folgt $\|(f\gamma)'(t)\| \Leftrightarrow \|\gamma'(t)\| \forall t \in \tilde{I}$. Da $t_0 \in I$ beliebig ist, gilt die Behauptung $\forall t \in I$.

□

Satz 3.28. Sei $M^n \subset \mathbb{R}^n$ eine Mannigfaltigkeit mit induzierter Riemannscher Metrik und bezeichne

$$N_x M := (T_x M)^\perp$$

den Normalenraum in $x \in M$. Dann gilt: $\gamma : I \rightarrow M^n$ ist eine Geodätische

$$\Leftrightarrow \gamma''(t) \in N_{\gamma(t)} M$$

Beweis: Dies folgt aus Satz 3.10: Sei $Z \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$, dann ist $Z(t)$ ist parallelverschoben entlang $\gamma \Leftrightarrow Z'(t) \in N_{\gamma(t)}M$. Es gilt also

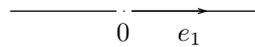
$$\gamma \text{ ist Geodätische} \iff \gamma'(t) \parallel \text{entlang } \gamma \iff \gamma''(t) \in N_{\gamma(t)}M$$

□

Definition. Eine semi-Riemannsche Mannigfaltigkeit (M, g) heißt geodätisch vollständig (kurz: vollständig) $:\Leftrightarrow$ Jede maximale Geodätische $\gamma : I \rightarrow M$ ist auf ganz \mathbb{R} definiert.

Beispiel 70. VOLLSTÄNDIGKEIT IM FLACHEN RAUM

1. $(\mathbb{R}^{n,k}, g_k)$ ist geodätisch vollständig.
maximale Geodätische: $\gamma(t) = at + b \quad t \in \mathbb{R}$
2. $(\mathbb{R}^{n,k} \setminus \{0\}, g_k)$ nicht geodätisch vollständig.



$\gamma(t) = te_1$ ist nur definiert auf $(-\infty, 0)$ und $(0, \infty)$.

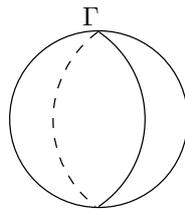
Beispiel 71. GEODÄTISCHE LINIEN AUF $S^n \subset \mathbb{R}^{n+1}$ MIT IND. METRIK

Wir betrachten einen Großkreis auf S^n :

$$E^2 \subset \mathbb{R}^{n+1} \text{ wobei } \dim E = 2$$

und setzen

$$\Gamma := E^2 \cap S^n \quad \text{'Großkreis'}$$



Sei $E = \text{span}(v_1, v_2)$ mit ON-Vektoren (v_1, v_2) aus \mathbb{R}^{n+1} . Wir parametrisieren Γ mittels Bogenlänge.

$$\gamma(t) := \cos tv_1 + \sin tv_2, \quad t \in \mathbb{R}$$

$$\Rightarrow \Gamma = \text{Im} \quad , \quad \|\gamma'(t)\| \equiv 1$$

$\gamma(t)$ ist eine Geodätische auf S^n , denn

$$\gamma'(t) = -\sin t v_1 + \cos t v_2$$

$$\gamma''(t) = \cos t v_1 - \sin t v_2 = -\gamma(t)$$

Da $N_{\gamma(t)}S^n = \mathbb{R}\gamma'(t)$, ist

$$\gamma''(t) \in N_{\gamma(t)}S^n$$

Da durch jeden Punkt $x \in S^n$ und in jeder Richtung genau ein Großkreis geht, sind das alle Geodätischen Linien. Insbesondere gilt: Die Sphäre S^n ist eine vollständige Riemannsche Mannigfaltigkeit.

Beispiel 72. DIE GEODTISCHEN LINIEN DER POINCARÉ-HALBEBENE

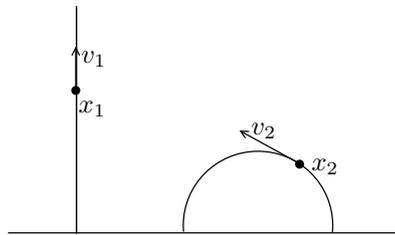
Sei

$$H^+ = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid y > 0\}$$

$$g_{H^+} = \frac{1}{y^2}(dx^2 + dy^2)$$

die Poincaré-Halbebene¹².

Behauptung: Die senkrechten Geraden und alle Halbkreise mit MP auf der reellen Achse sind (bei geeigneter Parametrisierung) alle Geodätischen von (H^+, g_{H^+}) . Insbesondere ist (H^+, g_{H^+}) vollständig.



Beweis: Da durch jeden Punkt $x \in H^+$ und in jede Richtung $v \in T_x H^+$ genau ein Halbkreis oder eine senkrechte Gerade steht, g.z.z. man kann diese Mengen durch Geodätische Linien parametrisieren.

Parametrisierung des Halbkreises (MP $(\beta, 0)$, Radius α):

$$(*) \quad \gamma(t) = \left(\alpha \tan h(t) + \beta, \frac{\alpha}{\cosh h(t)} \right) \quad t \in \mathbb{R}$$

Parametrisierung der Geraden:

$$(**) \quad \gamma(t) = (\beta, e^t) \quad t \in \mathbb{R}$$

Wir berechnen nun die Christoffel-Symbole von (H^+, g_{H^+}) in Karte $\varphi(x, y) = (x, y)$:

$$\begin{aligned} \Gamma_{11}^1 &= \Gamma_{22}^1 = \Gamma_{21}^2 = 0 \\ \Gamma_{22}^2 &= \Gamma_{21}^1 = \Gamma_{12}^1 = -\frac{1}{y}, \quad \Gamma_{11}^2 = \frac{1}{y} \end{aligned}$$

Demnach sind die Geodätengleichungen: $\gamma(t) = (\gamma_1(t), \gamma_2(t))$ Geodäte \Leftrightarrow

$$\begin{aligned} \gamma''(t) - \frac{2}{\gamma_2(t)} \gamma_1'(t) \gamma_2'(t) &= 0 \\ \gamma''(t) - \frac{1}{\gamma_2'(t)} \gamma_2'(t) \gamma_2'(t) + \frac{1}{\gamma_2(t)} \gamma_1'(t) \gamma_1'(t) &= 0 \end{aligned}$$

Diese Gleichungen sind für die Kurven (*) und (**) erfüllt.

¹²Siehe hierzu auch Bsp.58 zur Möbiustransformation

□

Bemerkung zu den Modellen der nicht-Euklidischen Geometrie

Euklidische Geometrie wird durch Axiomsysteme beschrieben.

Grundbegriffe:

- Punkt
- Gerade
- + Axiome der “synthetischen Geometrie”

Sreitpunkt: *Parallelenaxiom:*

L Gerade, x Punkt, $x \notin L$. Es existiert genau eine Gerade durch x , die L nicht schneidet, “parallele” Gerade.

Kann man dies aus den Axiomen der synthetischen Geometrie folgern oder muss man es zusätzlich fordern?

⇒ Entwicklung der nicht-Euklidischen Geometrie (Gauß, Lobatschewski, Bolay ...)

⇒ man muss Parallelaxiom zusätzlich fordern. Es existieren auch andere Geometrien, wo es nicht gilt!

Modelle:

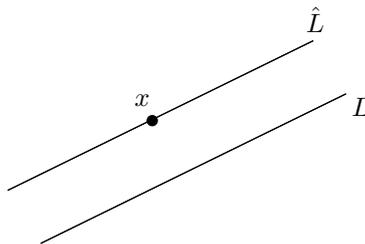
vollständige einfach-zusammenhängende Riemannsche Mannigfaltigkeit (M^2, g) mit konstanter Schnittkrümmung $K \equiv 0, 1, -1$

“Punkte” $\hat{=}$ Elemente $x \in M$

“Geraden” $\hat{=}$ Geodätische Linien in (M^2, g)

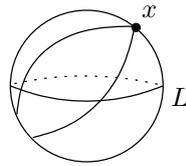
Dann sind alle Axiome der synthetischen Geometrie erfüllt, aber:

$K = 0$: $(\mathbb{R}^2, \langle \cdot, \cdot \rangle_{\mathbb{R}^2})$ *Euklidische Geometrie*



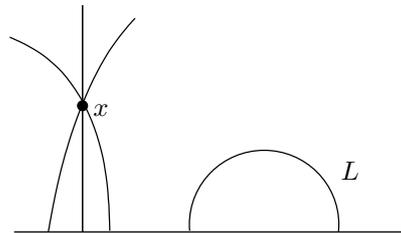
$x \notin L, \exists! \hat{L}$ und $x \in \hat{L}$ und $L \cap \hat{L} = \emptyset$

$K = 1$: S^2 mit ind. Metrik. *Sphärische Geometrie*



Alle “Geraden” durch x schneiden L .

$K = -1$: (H^+, g_{H^+}) *Hyperbolische Geometrie*



Es existieren unendlich viele “Geraden” durch x , die L nicht schneiden.

Beispiel 73. GEODTISCHE LINIEN AUF ROTATIONSFLÄCHEN

Wir betrachten die *Rotationsfläche*¹³ mit induzierter Metrik:

$$M^2 = \{f(u, v) = (\gamma_1(v) \cos u, \gamma_1(v) \sin u, \gamma_2(v)) \mid v \in (a, b), u \in \mathbb{R}\}$$

mit einer Kurve

$$\gamma = (\gamma_1, \gamma_2) : (a, b) \subset \mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{R}^2$$

mit den Eigenschaften $\gamma_1(v) > 0$ und $\dot{\gamma} \neq 0$.

Wegen (*) ist $f : \mathbb{R} \times (a, b) \rightarrow \mathbb{R}^3$ eine Immersion. Wählt man $\gamma(v)$ geeignet, (z.B. ohne Doppelpunkt), so ist $M^2 = \text{Im}f \subset \mathbb{R}^3$ eine UMF und *inverse* Kartenabbildungen auf M sind gegeben durch

$$f = \varphi^{-1} : (u, v) \in (u_1 - \pi, u_0 + \pi) \times (v_0, v_1) \rightarrow f(u, v) \in M$$

Für die kanonische Basis dieser Karte gilt:

$$\frac{\partial}{\partial u} (f(u, v)) = \frac{\partial f}{\partial u} (u, v) = (-\gamma_1 \sin u, \gamma_1 \cos u, 0)$$

und

$$\frac{\partial}{\partial v} (f(u, v)) = \frac{\partial f}{\partial v} (u, v) = (\dot{\gamma}_1(v) \cos u, \dot{\gamma}_1(v) \sin u, \dot{\gamma}_2(v)).$$

¹³siehe hierzu Bsp. auf Seite 116

Berechnet man die Christoffelsymbole, so erhält man folgende Geodäten-gleichungen:

$$\delta(t) = f(u(t), v(t)) \text{ ist Geodätische}$$

$$\Leftrightarrow \left(u'' + 2\frac{\gamma_1'}{\gamma_1} u'v' = 0 \right) \text{ und } \left(v'' - \frac{\gamma_1\gamma_1'}{(\gamma_1' + (\gamma_2')^2)} u'^2 + \frac{\gamma_1'\gamma_1'' + \gamma_2'\gamma_2''}{(\gamma_1')^2 + (\gamma_2')^2} (v')^2 = 0 \right) \quad (**)$$

wobei $\gamma_i' = \gamma_i'(v(t))$.

Die Kurve $\delta(t)$ ist auf Bogenlänge parametrisiert, falls

$$\gamma_1^2 (u')^2 + \left((\gamma_1')^2 + (\gamma_2')^2 \right) (v')^2 = 1 \quad (***)$$

Die Punktmenge

$$\{f(u, v_0) \mid u \in \mathbb{R}\}$$

heißen *Breitenkreis* von M und die

$$\{f(u_0, v) \mid v \in (a, b)\}$$

heißen *Meridian* von M .

Wir parametrisieren die Breitenkreise durch die Bogenlänge. d.h. durch Kurven $\delta_b(t) = f(u(t), v_0)$. Mit (***) folgt dann

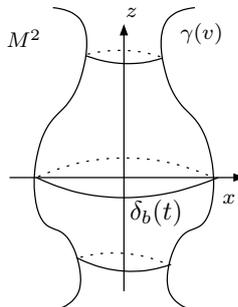
$$\gamma_1^2(v_0) (u')^2 = 1$$

Für die Meridiane schließt man mit $\delta_m(t) = f(u_0, v(t))$ analog, dass hierfür

$$\left((\gamma_1')^2 + (\gamma_2')^2 \right) (v')^2 = 1$$

Dann gilt:

1. Alle (auf BL parameter) Meridiane $\delta_m(t) = f(u_0, v(t))$ sind Geodätische Linien.
2. ein (auf BL parameter) Breitenkreis $\delta_b(t) = f(u(t), v_0)$ ist Geodätische Linie $\Leftrightarrow \gamma_1'(v_0) = 0$ (d.h. $\gamma'(v_0)$ ist parallel zur z -Achse.



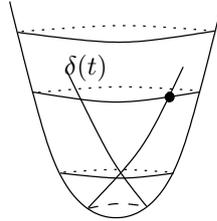
sind die einzigen geodätischen unter den Breitenkreisen.

3. Sei $\delta(t) = f(u(t), v(t))$ auf BL parametrisiert, $\beta(t) :=$ Schnittwinkel zwischen δ und dem Breitenkreis durch $\delta(t)$ im Punkte $\delta(t)$.

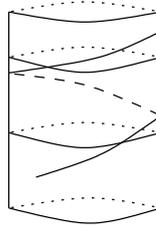
Es gelte $0 < \beta(t) < \pi$ (d.h. δ verläuft nirgends auf einem Breitenkreis)

$r(t) :=$ Radius des Breitenkreises durch $\delta(t)$. Dann gilt die Clairantsche Regel:

$$\delta(t) \text{ ist Geodätische} \Leftrightarrow r(t) \cdot \cos \beta(t) \equiv \text{const}$$



Paraboloid, kein Breitenkreis ist geodätisch



Zylinder, $r(t) = r = \text{const} \Rightarrow \beta(t) = \text{const} \Rightarrow \delta(t)$ Schraubenkreis

3.7 Exponentialabbildung und Normalkoordinaten, konvexe Umgebungen

Sei (M^n, g) eine semi-Riemannsche Mannigfaltigkeit, $x \in M$ und $v \in T_x M$.

$$\gamma_v : I_v \subset \mathbb{R} \rightarrow M$$

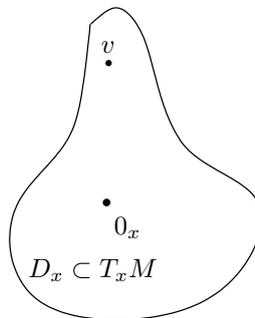
Sei eindeutig bestimmte maximale Geodätische mit $\gamma_v(0) = x$, $\gamma'_v(0) = v$. Nach Folgerung aus Satz 3.26 gilt

$$1 \in I_v \Rightarrow 1 \in I_{tv} \quad \forall 0 \leq t \leq 1 \quad \text{und} \quad \gamma_{tv}(1) = \gamma_v(t)$$

Dann ist die Menge

$$D_x := \{v \in T_x M \mid 1 \in I_v\} \subset T_x M$$

sternförmig bzgl. $0_x \in T_x M$ und offen (folgt aus allgemeiner Theorie der Differentialgleichungen)

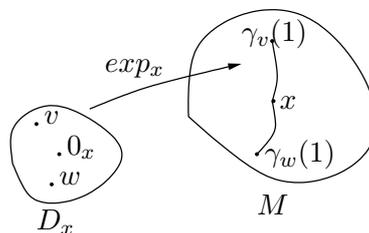


Nach Def. ist $D_x \subset T_x M$. Ist (M^n, g) geodätisch vollständig, so gilt $D_x = T_x M$.

Definition. Die Abbildung

$$\begin{aligned} \exp_x : D_x \subset T_x M &\rightarrow M \\ v &\mapsto \gamma_v(1) \end{aligned}$$

heißt Exponentialabbildung von (M, g) im Punkt $x \in M$.



\exp_x bildet Geradenstücke $\{tv \mid t \in \Gamma_0, I\}$ auf Geradenstücke in M ab

$$\exp_x(tv) = \gamma_{tv}(1) = \gamma_v(t)$$

Die Abbildung \exp_x ist C^∞ , denn Lösungen von Differentialgleichungen mit C^∞ -Koeffizienten hängen glatt von den Anfangsbedingungen $(v, \pi(v))$ ab.

Satz 3.29. Die Exponentialabbildung $\exp_x : D_x \subset T_x M \rightarrow M$ ist ein lokaler Diffeomorphismus um $0_x \in D_x$.

Beweis: Es gilt: bei Identifizierung $T_0(T_x M) \simeq T_x M$

$$(d \exp_x)_0 = \text{id}_{T_x M}$$

da

$$\begin{aligned} (d \exp_x)_0(w) &= \frac{d}{dt}(\exp_x(0 + tw))|_{t=0} \\ &= \frac{d}{dt}(\exp_x(tw))|_{t=0} = \frac{d}{dt}(\gamma_w(t))|_{t=0} \\ &= w \end{aligned}$$

□

Definition. Sei $\tilde{U} \subset T_x M$ eine bzgl. $\delta_x \in T_x M$ sternförmige Umgebung von $\delta_x \in T_x M$, so dass

$$\exp_x : \tilde{U} \rightarrow U(x) \subset M$$

ein Diffeomorphismus ist. Dann heißt $U(x) = \exp_x(\tilde{U})$ Normalenumgebung von $x \in M$.

Aus Satz 3.29 erhält man:

(M^n, g) semi-Riemannsche Mannigfaltigkeit. Dann besitzt jeder Punkt $x \in M$ eine Normalenumgebung.

Normalenumgebungen haben folgende spezielle Eigenschaft:

Satz 3.30. Sei $U(x)$ Normalenumgebung von $x \in M$. Dann existiert für jeden Punkt $y \in U(x)$ eine eindeutig bestimmte Geodäte $\gamma : [0, 1] \rightarrow U(x)$, die x und y innerhalb von $U(x)$ verbindet ($\gamma(0) = x, \gamma(1) = y$). Dabei gilt: Ist $v = \exp_x^{-1}(y)$, so ist

$$\gamma(t) = \exp_x(tv) = \gamma_v(t) \quad t \in [0, 1]$$

und

$$l(\gamma_v|_{[0,1]}) = \|v\|$$

$\gamma_v : [0, 1] \rightarrow U(x)$ heißt radiale Geodäte von x nach y

$$t \mapsto \gamma_v(t) = \exp_x(tv).$$

Beweis:

1. *Existenz:*

$v = \exp_x^{-1}(y) \in \tilde{U}$. Da \tilde{U} sternförmig, ist $tv \in \tilde{U} \quad \forall 0 \leq t \leq 1$. Und damit ist

$$\gamma_v(t) = \exp_x(tv) \in U(x)$$

eine Geodäte in $U(x)$, die x und y verbindet.

2. *Eindeutigkeit:*

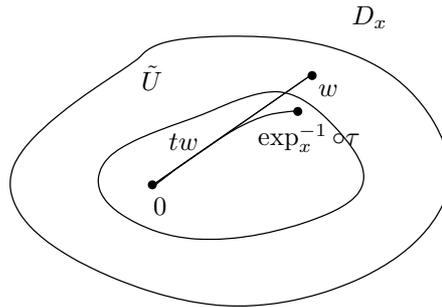
Sei $\tau : [0, 1] \rightarrow U(x)$ weitere Geodäte mit $\tau(0) = x, \tau(1) = y$. Wir setzen $w := \tau'(0) \in T_x M$ und betrachten die durch w definierte *maximale* Geodäte $\gamma_w : I_w \rightarrow M$. Da τ und γ_w gleichen AP und Anfangsvektor, folgt:

$$\tau = \gamma_w|_{[0,1]} \quad (*)$$

und damit ist $w \in D_x \subset T_x M$.

Dann ist $w \in \tilde{U}$, denn angenommen, $w \notin \tilde{U}$.

Dann verläßt der Strahl $\{tw|t \in [0, 1]\} \tilde{U}$.



Es existiert also ein $t_0 \in (0, 1)$ so dass $t_0 w \in \tilde{U} \setminus \exp_x^{-1}(\tau[0, 1])$ kompakt. Damit ist aber

$$\gamma_w(t_0) \in U(x) \setminus \tau[0, 1]$$

Das ist aber ein Widerspruch zu (*).

Es gilt nun

$$y = \gamma_w(1) = \gamma_v(1) \quad \text{und } v, w \in \tilde{U} \text{ mit } \exp_x(w) = \exp_x(v)$$

Da $\exp_x : \tilde{U} \rightarrow U(x)$ ein Diffeomorphismus ist, folgt

$$w = v \Rightarrow \gamma_v = \gamma_w = \tau$$

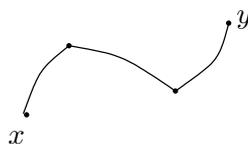
auf $[0, 1]$.

3. Die Länge ist nun

$$l(\gamma_v|_{[0,1]}) = \int_0^1 \|\gamma_v'(t)\| dt = \|v\|.$$

□

Folgerung: Sei (M^n, g) zusammenhängende semi-Riemannsche Mannigfaltigkeit. Dann kann man beliebige Punkte $x, y \in M$ durch eine gebrochene Geodäte verbinden.



γ 'gebrochene Geodäte' $\Leftrightarrow \gamma$ stückweis C^∞ und die glatten Stücke sind Geodäten.

Beweis: Sei $x \in M$ fix. Und

$$\mathcal{C} := \{y \in M \mid \text{es existiert eine gebr. Geodäte von } x \rightarrow y\}$$

Dann ist $M = \mathcal{C}$, denn $\mathcal{C} \neq \emptyset$, da $x \in \mathcal{C}$. \mathcal{C} ist offen:

Sei $y \in \mathcal{C}$ und $U(y)$ die Normalenumgebung von y . Für jedes $z \in U(y)$ existiert nun eine radiale Geodäte von $y \rightarrow z$, somit ist

$$U(y) \subset \mathcal{C}.$$

\mathcal{C} ist abgeschlossen, d.h. $M \setminus \mathcal{C}$ ist offen:

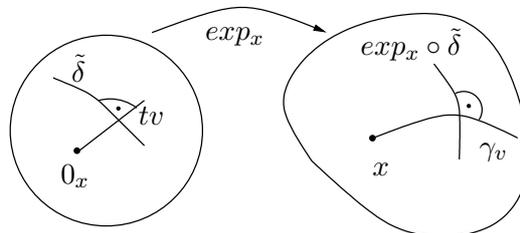
$y \in M \setminus \mathcal{C}$ und $U(y)$ dessen Normalenumgebung. Für $z \in U(y)$ ist $z \in M \setminus \mathcal{C}$ und damit $U(y) \subset M \setminus \mathcal{C}$.

Da M zusammenhängend ist, folgt $M = \mathcal{C}$.

□

Ziel: Die Exponentialabbildung hat folgende geometrische Eigenschaft:

$$\begin{aligned} \exp_x : \tilde{U} \subset T_x M &\rightarrow U(x) \subset M \\ \text{Strahl } tv &\rightarrow \text{ radiale Geodäte } \gamma_v(t) = \exp_x(tv) \end{aligned}$$



\exp_x erhält die Orthogonalität zu den radialen Richtungen, d.h. sie ist eine "Radiale Isometrie" (schneidet $\tilde{\delta}$ den Strahl $tv \perp$, so schneidet $\delta = \exp_x \circ \tilde{\delta}$ die radiale Geodäte $\gamma_v \perp$).

Dazu zunächst ein Hilfsmittel:

Definition. Sei $A \subset \mathbb{R}^2$ eine zusammenhängende Menge, so dass $U \subset A \subset cl(U)$ (*) für eine offene Menge $U \subset \mathbb{R}^2$. Eine parametrisierte Fläche in einer Mannigfaltigkeit M^n ist eine glatte Abbildung

$$f : A \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow M$$

(Dabei heißt f glatt, falls es eine offene Menge $V \supset A$ und eine C^∞ -Abbildung $F : V \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow M$ mit $F|_A = f$ gibt. Bedingung (*) sichert, dass das Differential $df_a := dF_a, a \in A$, unabhängig von der Fortsetzung F ist.)

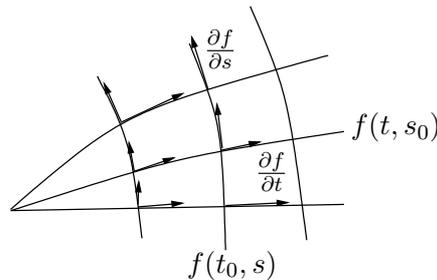
Definition. Ein Vektorfeld X entlang einer parametrisierten Fläche $f : A \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow M$ ist eine Abbildung

$$X : A \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow TM$$

$$(t, s) \mapsto X(t, s) \in T_{f(t,s)}M,$$

die C^∞ ist (im üblichen Sinne wie für Vektorfelder entlang Kurven).

Sei $f : A \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow M$ eine parametrisierte Fläche



Die Kurven $t \rightarrow f(t, s_0)$ bzw. $s \rightarrow f(t_0, s)$ heißen Koordinatenlinien von f (s_0, t_0 fix). Leitet man die Koordinatenlinien nach ihrem jeweiligen Parameter ab, so erhält man Vektorfelder $\frac{\partial f}{\partial t}$ bzw. $\frac{\partial f}{\partial s}$ entlang f :

$$\frac{\partial f}{\partial t}(t_0, s_0) := \frac{d}{dt}(f(t, s_0)_{t=t_0})df_{(t_0, s_0)}\left(\frac{\partial}{\partial t}(t_0, s_0)\right)$$

$$\frac{\partial f}{\partial s}(t_0, s_0) := \frac{d}{ds}(f(t_0, s)_{s=s_0})df_{(t_0, s_0)}\left(\frac{\partial}{\partial s}(t_0, s_0)\right)$$

Sei ∇ eine kovariante Ableitung auf M und X ein Vektorfeld entlang f . Dann sind die partiellen kovarianten Ableitungen $\frac{\nabla X}{\partial t}$ und $\frac{\nabla X}{\partial s}$ die folgendermaßen definierten Vektorfelder entlang f :

$\frac{\nabla X}{\partial t}(t_0, s_0)$ ist die kovariante Ableitung des Vektorfeldes $X(\cdot, s_0)$ entlang der Koordinatenlinie $f(\cdot, s_0)$ im Punkt t .

$\frac{\nabla X}{\partial s}(t_0, s_0)$ ist die kovariante Ableitung des Vektorfeldes $X(t_0, \cdot)$ entlang der Koordinatenlinie $f(t_0, \cdot)$ im Punkt s_0 .

Lemma 3.3. (Vertauschbarkeit der partiellen Ableitungen bei parametrischen Flächen ($\hat{=}$ Schwarz-Lemma der Analysis))

Sei M^n eine C^∞ -Mannigfaltigkeit mit torsionsfreier kovarianten Ableitung ∇ und $f : A \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow M$ eine parametrisierte Fläche, dann ist

$$\frac{\nabla}{\partial t} \frac{\partial f}{\partial s} = \frac{\nabla}{\partial s} \frac{\partial f}{\partial t}$$

Beweis: Sei (U, φ) Karte um $f(t, s)$ und $\varphi(f(t, s)) = (x_1(t, s), \dots, x_n(t, s))$, so folgt

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial x_i}{\partial t} \frac{\partial}{\partial x_i}(f(\cdot, \cdot))$$

$$\frac{\partial f}{\partial s} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial x_i}{\partial s} \frac{\partial}{\partial x_i}(f(\cdot, \cdot))$$

für $f(t, s) \in U$. Aus der lokalen Formel für die kovariante Ableitung folgt:

$$\begin{aligned} \frac{\nabla}{\partial s} \frac{\partial f}{\partial t} &= \sum_i \left(\frac{\partial^2 x_i}{\partial s \partial k} + \sum_{k,l} \frac{\partial x_k}{\partial t} \frac{\partial x_l}{\partial s} \Gamma_{lk}^i \right) \frac{\partial}{\partial x_i} (f(\cdot, \cdot)) \\ \frac{\nabla}{\partial k} \frac{\partial f}{\partial s} &= \sum_i \left(\frac{\partial^2 x_i}{\partial t \partial s} + \sum_{k,l} \frac{\partial x_k}{\partial s} \frac{\partial x_l}{\partial k} \Gamma_{lk}^i \right) \frac{\partial}{\partial x_i} (f(\cdot, \cdot)) \end{aligned}$$

Da ∇ torsionsfrei ist, folgt $\Gamma_{lk}^i = \Gamma_{kl}^i$ und damit die Behauptung. □

Satz 3.31. [Gauß-Lemma]

Sei (M^n, g) eine semi-Riemannsche Mannigfaltigkeit, $x \in M$ und $v \in D_x \subset T_x M$.

Sei $\sigma_v(t) = tv \subset T_x M$ der von v erzeugte Strahl in $T_x M$. Sei weiterhin $X \in T_v(T_x M)$ ein "radialer" Tangentialvektor (d.h. X tangential an σ_v) und $Y \in T_v(T_x M)$ beliebig. Dann gilt bei Identifizierung $T_v(T_x M) = T_x M$:

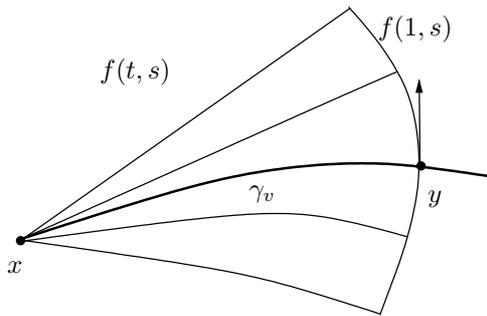
$$g_y((d \exp_x)_v(X), (d \exp_x)_v(Y)) = g_x(X, Y)$$

wobei $y = \exp_x(v)$.

(Insbesondere gilt: schneidet eine Kurve $\tilde{\delta}(t)$ in $T_x M$ den Strahl $\sigma_v(t)$ in v orthogonal, so schneidet die Bildkurve $\delta(t) = \exp_x(\tilde{\delta}(t))$ die radiale Geodäte $\gamma_v(t)$ in $y = \exp_x(v)$ orthogonal.)

Beweis: Sei $X \in T_v(T_x M)$ ein radial Vektor, so ist $X = dv$. Da $(d \exp_x)_v$ linear ist, genügt es die Behauptung für $X = v$ zu beweisen. Betrachten die parametrisierte Fläche

$$\begin{aligned} f : [0, 1] \times (-\varepsilon, \varepsilon) &\rightarrow M \\ (t, s) &\mapsto f(t, s) := \exp_x(t(v + sY)) \end{aligned}$$



Aus $f(t, s) = \exp_x(t(v + sY))$ und $\gamma_v(t) = f(t, 0)$ folgt dann

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial t}(1, 0) &= \frac{d}{dt}(\gamma_v(t))|_{t=1} = \frac{d}{dt}(\exp_x(tv))|_{t=1} \\ &\stackrel{KR}{=} (d \exp_x)_v(v) \\ \frac{\partial f}{\partial s}(1, 0) &= \frac{d}{ds}(f(1, s))|_{s=0} = \frac{d}{ds}(\exp_x(v + sy))|_{s=0} \\ &= (d \exp_x)_v(y) \end{aligned}$$

Sei weiterhin $U(x)$ Normalenumgebung von $x \in M$. Wir definieren

$$\begin{aligned} \varphi_{\mathbf{a}} : U(x) &\rightarrow \mathbb{R}^n \\ y &\mapsto (x_1, \dots, x_n) \quad y = \exp_x \left(\sum_{i=1}^n x_i \mathbf{a}_i \right) \end{aligned}$$

$\varphi_{\mathbf{a}}$ heißen Normalkoordinaten auf $U(x)$

Bemerkung:

- Sei $\gamma_v(t) = \exp_x(tv)$ die von $v \in D_x \subset T_x M$ erzeugte radiale Geodäte und sei $v = \sum_{i=1}^n v_i \mathbf{a}_i$. Dann gilt: $\varphi_{\mathbf{a}}(\gamma_v(t)) = (tv_1, \dots, tv_n)$. In der kanonischen Basis bezgl. $(U(x), \varphi_{\mathbf{a}})$ gilt damit:

$$\gamma'_v(t) = \sum_{i=1}^n v_i \frac{\partial}{\partial x_i}(\gamma_v(t)).$$

- Sei $y \in U(x)$ und $v = \exp_x^{-1}(y) = \sum v_i \mathbf{a}_i$, dann ist

$$x_i(y) = v_i$$

und damit

$$\begin{aligned} l(\gamma_v|_{[0,1]}) &= (|-x_1^2(y) - \dots - x_k^2(y) + x^2(y) + \dots + x_n^2(y)|^{\frac{1}{2}}) \\ &= (k = \text{index}(g)) \end{aligned}$$

- Für die kanonische Basis der Normalkoordinaten $\varphi_{\mathbf{a}}$ gilt:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(y) = (d \exp_x)_v(\mathbf{a}_i) : v = \exp_x^{-1}(y)$$

da

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(y) &= \frac{d}{dt}(\varphi_{\mathbf{a}}^{-1}(\varphi_{\mathbf{a}}(y) + t\mathbf{a}_i))|_{t=0} \\ &= \frac{d}{dt}(\exp_x(x_1(y)\mathbf{a}_1 + \dots + (x_i(y) + t)\mathbf{a}_i + \dots + x_n(y)\mathbf{a}_n))|_{t=0} \\ &= (d \exp_x)_v(\mathbf{a}_i) . \end{aligned}$$

Die Normalkoordinaten um x verhalten sich im Punkt x in 1. Näherung so wie die Euklidischen Koordinaten von $\mathbb{R}^{n,k} \simeq T_x M$:

Satz 3.32. Sei (M^n, g) semi-Riemannsche Mannigfaltigkeit und $(U(x), \varphi_{\mathbf{a}})$ Normalkoordinaten um $x \in M$, dann gilt

1. $g_{ij}(x) = \delta_{ij} \varepsilon_j$ mit $\varepsilon = \{-1 \text{ } j \leq k, 1 \text{ } j > k\}$
2. $\Gamma_{ij}^k(x) = 0$

Beweis:

1. Es gilt

$$\begin{aligned} g_{ij}(x) &= g_x\left(\frac{\partial}{\partial x_i}(x), \frac{\partial}{\partial x_j}(x)\right) \\ &= g_x((d \exp_x)_0(\mathbf{a}_i), (d \exp_x)_0(\mathbf{a}_j)) \\ &\stackrel{\text{Satz 3.29}}{=} g_x(\mathbf{a}_i, \mathbf{a}_j) = \delta_{ij} \varepsilon_j \end{aligned}$$

2. Betrachten die Geodätengleichung für radiale Geodäte $\gamma_v(t)$ in Normalkoordinaten:

$$y = \exp_x(v), \varphi_{\mathbf{a}}(y) = (x_1(y), \dots, x_n(y)) = (v_1, \dots, v_n)$$

dann ist

$$\varphi_{\mathbf{a}}(\gamma_v(t)) = (tx_1(y), \dots, tx_n(y)) = (\gamma_1(t), \dots, \gamma_n(t))$$

und damit

$$\gamma'_i(t) \equiv x_i(y) \quad \text{bzw. } \gamma''(t) = 0.$$

Daraus folgt nun

$$\sum_{i,j} \Gamma_{ij}^k(\gamma_v(t)) x_i(y) x_j(y) = 0 \quad t \in [0, \varepsilon], k = 1, \dots, n$$

Wir betrachten nun speziell den Vektor $v = (\mathbf{a}_r + \mathbf{a}_s)$. Sei $0 < \alpha \in \tilde{U}$ fixiert, dann ist

$$x_i(y) = \begin{cases} \alpha & \text{für } i = r \text{ oder } i = s \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Es gilt also

$$\Gamma_{rs}^k(\gamma_v(t)) + \Gamma_{sr}^k(\gamma_v(t)) = 0 \quad \forall t \in [0, \varepsilon]$$

und insbesondere für $t = 0$

$$\Gamma_{rs}^k(x) + \Gamma_{sr}^k(x) = 0$$

D.h. $\Gamma_{rs}^k(x)$ ist schiefsymmetrisch in (r, s) . Da aber $\Gamma_{r,s}^k(x)$ immer *symmetrisch* in (r, s) folgt

$$\Gamma_{r,s}^k(x) = 0 \quad \forall r, s, k.$$

□

Definition. Sei (M^n, g) eine semi-Riemannsche Mannigfaltigkeit.

Eine offene Menge $W \subset M$ heißt konvex $\Leftrightarrow W$ ist Normalenumgebung für jeden ihrer Punkte.

Aus Satz 3.30 folgt: Ist $W \subset M$ konvex, so existiert für je 2 Punkte $x, y \in W$ eine *eindeutig bestimmte* Geodäte, die x und y in W verbindet.

Ziel: Jeder Punkt von M besitzt eine konvexe Umgebung.

Dazu betrachten wir die C^∞ -Abbildung

$$\begin{aligned} E : D \subset TM &\rightarrow M \times M \\ v &\mapsto (\pi(v), \exp_{TM(v)}(v)) \end{aligned}$$

Dabei sei $\pi(v)$ der Fußpunkt von v im Tangentialbündel TM und

$$D := \{v \in TM \mid 1 \in I_v\}.$$

$D \subset TM$ ist offen (Theorie der Differentialgleichungen) und es gilt

$$D_x = D \cap T_x M \quad \forall x \in M.$$

Lemma 3.4. Sei $x \in M$ und $v \in T_x M$, so folgt: Ist

$$(d \exp_x)_v : T_v(T_x M) \rightarrow T_{\exp_x(v)} M$$

ein Isomorphismus, so ist

$$dE_v : T_v(TM) \rightarrow T_{(x, \exp_x(v))}(M \times M)$$

ein Isomorphismus. Insbesondere ist $E : D \subset TM \rightarrow M \times M$ ein lokaler Diffeomorphismus um $\sigma_x \in T_x M \subset TM$.

Beweis: Sei $v \in T_x M$ ein Vektor für den $(d \exp_x)_v$ ein Isomorphismus ist. Aus Dimensionsgründen genügt es zu zeigen, dass dE_v injektiv ist. Sei $X \in T_v(TM)$ und $dE_v(X) = 0$. Da $pr_1 \circ E = \pi =$ Projektion im Tangentialbündel, und damit

$$d\pi_v(X) = dpr_1 \circ dE_v(X) = 0$$

folgt

$$X \in \underbrace{\ker d\pi_v}_{n\text{-dim}} = \underbrace{T_v(T_x M)}_{n\text{-dim}}$$

d.h. X ist ein "vertikaler Vektor". Und damit

$$(dE_v)(X) = (0, (d \exp_x)_v(X)) = 0$$

sodaß

$$(d \exp_x)_v(X) = 0 = \vec{Ver} X = 0$$

□

Satz 3.33. (M^n, g) semi-Riemannsche Mannigfaltigkeit. Jeder Punkt $x \in M$ besitzt eine konvexe Umgebung.

Beweis: Sei $U(x)$ eine Normalenumgebung von x und $\varphi_a = (x_1, \dots, x_n)$ Normalenkoordinaten um x auf $U(x)$.

Wir betrachten die Funktion (unabhängig von $\text{sign}(g)$)

$$N : U(x) \rightarrow \mathbb{R} \\ y \mapsto x_1^2(y) + \dots + x_n^2(y)$$

Für hinreichend kleines $\delta > 0$ gilt

$$V_\delta(x) := \{y \in U(x) \mid N(y) < \delta^2\} \subset U(x)$$

$(V_\delta(x))$ wird bei φ_a auf die Euklidische Kugel im \mathbb{R}^n und Radius δ abgebildet).

1. Sei B das folgende symmetrische $(2, 0)$ -Tensorfeld auf $U(x)$:

$$B = \sum_{i,j} (\delta_{ij} - \sum_k \underbrace{\Gamma_{ij}^k x_k}_{\text{bzgl. Normalkoordinaten}}) dx_i \otimes dx_j$$

Im Punkt $x \in U(x)$ gilt nach Satz 3.32

$$B_x = \sum_{i,j} \delta_{ij} (dx_i \otimes dx_j)_x = \sum_{i=1}^n (dx_i^2)_x,$$

d.h. B_x ist positiv-definit. Wählen δ zusätzlich so klein, dass B auf $V_\delta(x) \subset U(x)$ positiv definit ist. Da

$$\begin{aligned} \phi : [0, 1] \times D \subset [0, 1] \times TM &\rightarrow M \\ (t, v) &\mapsto \exp_{\pi(v)}(tv) \end{aligned}$$

stetig ist, existiert eine Umgebung $[0, \varepsilon] \times \tilde{V} \subset [0, 1] \times \infty$ von $(0, \sigma_x)$ so dass

$$\phi(t, v) = \exp_{\pi(v)}(tv) \in V_\delta(x)$$

$\forall (t, v) \in [0, \varepsilon] \times \tilde{V}$.

Betrachten $\tilde{V}' := \left\{ \frac{\varepsilon}{2} \tilde{V} \mid v \in \tilde{V} \right\} \subset D$ (Umnormierbar), dann ist

$$\exp_{\pi(\tilde{V}')} (t\tilde{V}') = \exp_{\pi(v)} \left(t \cdot \frac{\varepsilon}{2} \cdot v \right) \in V_\delta(x)$$

mit $\tilde{v} = \frac{\varepsilon}{2} \cdot v \forall t \in [0, 1]$ und $\tilde{v} \in \tilde{V}'$.

Es existiert Umgebung \tilde{V}' von $\delta_x \in TM$, so dass $\exp_{\pi(v)}(tv) \in V_\delta(x)$ für alle $0 \leq t \leq 1$ und $v \in \tilde{V}'$. Nach dem Lemma ist $E : D \subset TM \rightarrow M \times M$ ein lokaler Diffeomorphismus um δ_x . Wählen $0 \leq \epsilon \leq \delta$ so klein, dass

$$E : \tilde{W} \subset TM \rightarrow V_\epsilon(x) \times V_\epsilon(x)$$

ein Diffeomorphismus und $\exp_{\pi(w)}(tw) \in V_\delta(x)$ für alle $0 \leq t \leq 1$ und $w \in \tilde{W}$ ($\tilde{W} \subset \tilde{V}'$ wählen).

2. *Behauptung:* Für jedes $0 < a \leq c$ gilt: $V_a(x)$ ist Normalenumgebung für jeden seiner Punkte $y \in V_a(x)$.

Seien $y, z \in V_a(x)$ und $v := E^{-1}(y, z) \in \tilde{W}$. Dann gilt $y = \pi(v)$ $z = \exp_y(v)$. Dann gilt nach 1.) die radiale Geodäte $\gamma_v(t) = \exp_y(tv)$, die y und z verbindet: $\gamma_v(t) \in V_\delta(x)$ ($t \in [0, 1]$). Wir zeigen, dass sogar gilt:

$$\gamma_v(t) \in V_a(x) \quad \forall t \in [0, 1].$$

Betrachten die Geodäte $\gamma_v(t)$ in den Normalkoordinaten bezgl. x

$$\gamma_v(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t))$$

Sei $N(t) := N(\gamma_v(t)) = \sum_{i=1}^n x_i(t)^2$. Nach 1.) folgt dann $N(t) < \delta^2$.

Angenommen γ_v verläßt $V_a(x)$. Da $y, z \in V_a(x) \Rightarrow N(\delta), N(1) < a^2 \Rightarrow N(t)$ hat einen maximalen Wert in einem $t_0 \in (0, 1)$.

$$N'(t_0) = 2 \sum_i x_i(t_0)x_i'(t_0)$$

$$N''(t_0) = 2 \sum_i (x_i'(t_0)^2 + x_i(t_0)x_i''(t_0)) \quad (*)$$

Die Geodätengleichung in Normalkoordinaten lautet

$$x_i''(t_0) + \sum_{k,l} x_k' x_l' \Gamma_{kl}^i(\gamma_v(t)) = 0$$

sodaß

$$N''(t_0) = 2 \sum_{k,l} (\delta_{kl} - \Gamma_{kl}^i(\gamma(t_0))x_i(t_0))x_k'(t_0)x_l'(t_0)$$

$$= 2B_{\gamma(t_0)}(\gamma'(t_0), \gamma'(t_0)) > 0$$

da B auf $V_\delta(x)$ positiv-definit und $\gamma'(t_0) \neq 0$.

N hat also in t_0 ein lokales Minimum. Dies ist ein Widerspruch zur Annahme, dass N in t_0 maximal ist.

$$\Rightarrow \gamma_v([0, 1]) \subset V_a(x). \quad 0 < a \leq c$$

3. $V_a(x)$ ist Normalenumgebung von $y \in V_a(x)$: Sei

$$\tilde{W}' = E^{-1}(V_a(x) \times V_a(x)) \subset \tilde{W}.$$

und

$$\tilde{W}_y = \tilde{W}' \cap T_y M \subset T_y M$$

offen. Da $E|_{\tilde{W}'}$ Diffeomorphismus ist folgt

$$\exp_y : \tilde{W}_y \subset T_y M \rightarrow V_a(x)$$

Diffeomorphismus. Noch zu zeigen: \tilde{W}_y ist sternförmig bezgl. σ_y :

$$v \in \tilde{W}_y \Rightarrow z = \exp_y(v) \in V_a(x)$$

\Rightarrow Die radiale Geodäte $\gamma_v(t) \in V_a(x) \forall 0 \leq t \leq 1$

$$\Rightarrow t \cdot v = \exp_y^{-1}(\underbrace{\gamma_v(t)}_{\gamma_{tv(1)}}) \in \tilde{W}_y \quad \forall t \in [0, 1]$$

□

Folgerung

Sei (M^n, g) eine semi-Riemannsche Mannigfaltigkeit.

Ist $\gamma : [0, b) \subset \mathbb{R} \rightarrow M$ eine Geodäte und existiere eine stetige Fortsetzung $\tilde{\gamma} : [0, b) \subset \mathbb{R} \rightarrow M$ von γ , dann existiert eine Fortsetzung von γ zu einer Geodäten auf $[0, b + \varepsilon)$ (für ein $\varepsilon > 0$).

Beweis: Sei $V \subset M$ eine konvexe Umgebung von $\tilde{\gamma}$. Dann existiert $0 < a < b$ so dass

$$\tilde{\gamma}|_{[a,b]} \subset V.$$

V ist Normalenumgebung von $\gamma(a) \Rightarrow \gamma|_{[a,b]}$ ist ein Anfangsstück einer radialen Geodäten. Setzen diese radiale Geodäte bis zum Rand von V fort. Da $\tilde{\gamma}(b) \notin \partial V$, ist die radiale Geodäte auf $[0, b + a)$ für ein $\varepsilon > 0$ definiert.

□

3.8 Geodäten und Abstände in Riemannschen Mannigfaltigkeiten. Der Satz von Hopf und Rinow

Wir betrachten in diesem Abschnitt nur **Riemannsche** Mannigfaltigkeit (M^n, g) und studieren die Abstands-minimierenden Eigenschaften von Geodäten in Riemannschen Mannigfaltigkeiten.

Sei (M^n, g) eine *zusammenhängende* Riemannsche Mannigfaltigkeit und $x, y \in M$.

$\Omega(x, y) :=$ Menge der stückweise glatten Kurven, die x und y verbinden.

Definition. $d(x, y) := \inf\{l(\gamma) \mid \gamma \in \Omega(x, y)\}$ heißt Abstand von x und y in (M, g) .

Bemerkung:

1. $d : M \times M \rightarrow \mathbb{R}$ ist offensichtlich ≥ 0 , symmetrisch und erfüllt die Δ -Ungleichung

$$d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y).$$

Sei $\varepsilon > 0$. Wähle $\alpha \in \Omega(x, z)$, $\beta \in \Omega(z, y)$ mit

$$l(\alpha) < d(x, z) + \varepsilon \quad , \quad l(\beta) < d(z, y) + \varepsilon$$

dann ist $\alpha * \beta \in \Omega(x, y)$ ¹⁴ und es gilt

$$l(\alpha * \beta) = l(\alpha) + l(\beta)$$

$$d(x, y) \leq l(\alpha * \beta) < d(x, z) + d(z, y) + 2\varepsilon.$$

Mit $\varepsilon \rightarrow 0$ folgt Behauptung.

Zeigen später, dass d eine Metrik auf M ist (noch zu zeigen: $d(x, y) = 0 \Rightarrow x = y$)

2. In pseudo-Riemannschen Mannigfaltigkeiten kann man zwar d ebenfalls definieren, dies ist aber *keine* Metrik:

Für $(\mathbb{R}^2, g = -dx^2 + dy^2)$ ist $\gamma : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^{2,1}$ $\gamma(t) := (t, t)$ isotrop, und damit gilt

$$l(\gamma) = 0 \quad \Rightarrow \quad d(\gamma(0), \gamma(1)) = 0$$

3. Es muss keine Kurve geben, deren Länge gleich dem Abstand ist

$$\mathbb{R}^2 \setminus \{(0, 0)\} \quad g = dx^2 + dy^2$$

$$\begin{array}{ccc} \dot{a} & \dot{0} & \dot{b} \\ a & 0 & b \end{array}$$

¹⁴Hierbei bezeichne $\alpha * \beta$ die Verknüpfung von Wegen.

Definition. Eine Kurve $\gamma \in \Omega(x, y)$ heißt minimierend : $\leftrightarrow l(\gamma) = d(x, y)$.

Sei (M^n, g) ein Riemannsche Mannigfaltigkeit und $x \in M$. Sei $U(x)$ eine Normalenumgebung von x und

$$\exp_x : \tilde{U}(0) \subset T_x M \rightarrow U(x) \subset M$$

Diffeomorphismus. Sei $\varepsilon > 0$ so dass $\underbrace{cl(K_\varepsilon(0))}_{\text{abg. Kugel in } (T_x M, g_x)} \subset \tilde{U}(0)$. Dann heißt

$$B_\varepsilon(x) := \exp_x(K_\varepsilon(0)) \subset U(x)$$

geodätische Kugel um x ¹⁵ und

$$S_\varepsilon(x) := \exp_x(\partial(K_\varepsilon(0))) = \exp_x(\{v \in \tilde{U} \mid \|v\| = \varepsilon\})$$

geodätische Sphäre um x .

Seien $\varphi_a = (x_1, \dots, x_n)$ Normalkoordinaten um auf $U(x)$. Dann gilt

$$\begin{aligned} y \in B_\varepsilon &\Leftrightarrow \|\exp_x^{-1}(y)\|^2 < \varepsilon^2 \\ &\Leftrightarrow x_1(y)^2 + \dots + x_n(y)^2 < \varepsilon^2 \end{aligned}$$

Aus dem Beweis von Satz 3.33 erhält man

Satz 3.34. Sei (M^n, g) eine Riemannsche Mannigfaltigkeit. Für jeden Punkt $x \in M$ existiert eine geodätische Kugel $B_c(x)$ so dass für jedes $0 < a \leq c$ die geodätischen Kugeln $B_a(x)$ um x konvex sind.

Satz 3.35. Sei (M^n, g) eine zusammenhängende Riemannsche Mannigfaltigkeit, $x \in M$ und $U(x)$ eine Normalenumgebung um x . Sei $y \in U(x)$ und $\gamma_v : [0, 1] \subset \mathbb{R} \rightarrow U(x)$, die radiale Geodäte von x nach y ($v = \exp_x^{-1}(y)$). Dann ist γ_v die eindeutig bestimmte kürzeste Kurve von x nach y in $U(x)$, d.h.

$$\begin{aligned} l(\alpha) &\geq l(\gamma_v) \quad \forall \alpha \in \Omega(x, y) \\ l(\alpha) &= l(\gamma_v) \Leftrightarrow \alpha = \gamma_v \circ \tau \end{aligned}$$

Dabei ist τ eine monotone, wachsende Umparametrisierung von γ_v .

Beweis: Sei $\alpha \in \Omega(x, y)$, $\alpha : [0, 1] \rightarrow U(x)$ (d.h. evtl. umparametrisiert auf das Intervall $[0, 1]$). $\exp_x : \tilde{U}(0) \subset T_x M \rightarrow U(x)$ ist ein Diffeomorphismus. Sei

$$\tilde{v}(t) = \exp_x^{-1}(\alpha(t)) \in \tilde{U}(0) \subset T_x M$$

OBdA gelte $\tilde{v}(t) \neq 0 \quad \forall t \in (0, 1]$ (sonst läßt man Anfangsintervall weg, mit dem man x mit x verbindet.)

Dann ist $\tilde{v}(t) = r(t) \cdot v(t)$, wobei $\|v(t)\| \equiv 1$ und $r : (0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^+$ stückweise glatt ist. (Damit ist auch $\|\tilde{v}(t)\| = r(t)$). Aus $\alpha(t) = \exp_x(r(t) \cdot v(t))$ und mit Ausnahme der endlich vielen "Ecken" von $\alpha(t)$ gilt dann:

$$\alpha'(t) = (d\exp_x)_{\tilde{v}(t)} \left(\underbrace{r'(t)v(t)}_{\text{tangential an den Strahl } \sigma_{v(t)}} + \underbrace{r(t) \cdot v'(t)}_{y \text{ (orthogonal an den Strahl } \sigma_{v(t)})} \right)$$

¹⁵ $B_\varepsilon(x)$ ist ebenfalls eine Normalenumgebung von x .

Aus dem Gauß-Lemma (Satz 3.31) folgt

$$g(\alpha'(t), \alpha'(t)) = r'(t)^2 \underbrace{g_x(v(t), v(t))}_{\equiv 1} + g(\hat{y}, \hat{y}) \quad \text{mit } \hat{y} = (d \exp_x(y))$$

$$\stackrel{\text{Riem.MF}}{\geq} r'(t)^2 \quad (*)$$

Damit ist dann

$$\|\alpha'(t)\| \geq |r'(t)| \geq r'(t).$$

Wir betrachten nun $\int_{\epsilon}^1 \|\alpha'(t)\| dt \geq \int_{\epsilon}^1 r'(t) dt = r(1) - r(\epsilon)$. Für $\epsilon \rightarrow 0$ folgt $r(\epsilon) \rightarrow 0$, da $\tilde{v}(0) = 0_x$. Desweiteren ist

$$r(1) = \|\tilde{v}(1)\| = \|\exp^{-1}(y)\| = \|v\| = l(\gamma_v),$$

sodass insgesamt

$$l(\alpha) \geq l(\gamma_v).$$

Die Gleichheit kann nur auftreten, wenn in (*) die Gleichheit eintritt, d.h.

$$l(\alpha) = l(\gamma_v) \Rightarrow g(\hat{y}, \hat{y}) \equiv 0 \quad \text{d.h. } \hat{y} = 0,$$

da aber nach Konstruktion $r(t) \geq 0$, muß $v'(t) \equiv 0$ sein, sodass

$$v(t) \equiv v_0.$$

Wir erhalten dann

$$\tilde{v}(t) = r(t) \cdot v_0 \quad \text{mit } r'(t) \geq 0 \quad (**)$$

$r(t)$ ist also monoton wachsend. Aus $\tilde{v}(1) = v = r(1)v_0$, bzw. $v_0 = \frac{1}{r(1)}v$ folgt mit (**)

$$\tilde{v}(t) = \frac{r(t)}{r(1)} \cdot v \quad \text{und damit}$$

$$\alpha(t) = \exp_x\left(\frac{r(t)}{r(1)} \cdot v\right)$$

D.h. $\alpha(t)$ ist eine monoton wachsende Umparametrisierung von $\gamma_v(s) = \exp_x(s \cdot v)$, mit

$$\tau(t) = \frac{r(t)}{r(1)}.$$

□

Für die geodätischen Kugeln um x gilt sogar noch mehr:

Satz 3.36. Sei (M, g) eine Riemannsche Mannigfaltigkeit, $x \in M$ und $B_{\epsilon}(x)$ eine geodätische Kugel um x , $y \in B_{\epsilon}(x)$. Dann ist die radiale Geodäte $\gamma_v : [0, 1] \rightarrow B_{\epsilon}(x)$ von x nach y die kürzeste Kurve zwischen x und y in ganz M . Insbesondere gilt: Ist α eine stückweis C^{∞} -Kurve, die in x beginnt und $B_{\epsilon}(x)$ verläßt, dann gilt

$$l(\alpha) \geq \epsilon.$$

Beweis: Nach Satz 3.35 ist γ_v die kürzeste Kurve von x nach y innerhalb von $B_\varepsilon(x)$. Nach Definition von $B_\varepsilon(x)$ gilt $l(\gamma_v) = \|v\| < \varepsilon$. Es genügt also zu zeigen: Ist $\alpha : [0, b) \rightarrow U(x)$ eine stückweis C^∞ -Kurve mit $\alpha(0) = x$, die $B_\varepsilon(x)$ verläßt, dann gilt $l(\alpha) \geq \varepsilon$.

Also angenommen α verläßt $B_\varepsilon(x)$, dann schneidet α jede geodätische Sphäre $S_a(x)$ für $0 < a < \varepsilon$.

Sei nun a fix und $t_0 \in (0, b)$ der kleinste Parameter mit $\alpha(t_0) \in S_a(x)$, dann ist

$$\alpha|_{[0, t_0]} \subset cl(B_a(x)) \subset B_\varepsilon(x)$$

Für die radiale Geodäte γ von x nach $\alpha(t_0)$ gilt $l(\gamma) = a$ und nach Satz 3.35 folgt also

$$l(\alpha) \geq l(\alpha|_{[0, t_0]}) \geq l(\gamma) = a \quad \forall a < \varepsilon$$

bzw.

$$l(\alpha) \geq \varepsilon.$$

□

Folgerung

Sei $B_\varepsilon(x)$ eine geodätische Kugel um x und $S_\varepsilon(x)$ die geodätische Sphäre vom Radius ε . Dann gilt

1. $\forall y \in B_\varepsilon(x)$ gilt

$$d(x, y) = l(\gamma_v) = \|v\|,$$

wobei $\gamma_v : [0, 1] \rightarrow M$ die radiale Geodäte von $x \rightarrow y = \exp_x(v)$

2. Weiter ist

$$B_\varepsilon(x) = \{y \in M \mid d(x, y) < \varepsilon\}$$

$$S_\varepsilon(x) = \{y \in M \mid d(x, y) = \varepsilon\}$$

Aus dem soeben bewiesenen folgt insbesondere, dass Geodäten lokal minimierende Kurven sind:

Satz 3.37. Sei $\gamma : I \rightarrow M$ eine Geodäte in einer Riemannschen Mannigfaltigkeit.

Dann ist γ lokal minimierend, d.h. zu jedem Kurvenpunkt $\gamma(t_0)$ existiert eine Umgebung $V(\gamma(t_0))$, so dass für je zwei Kurvenpunkte $\gamma(s_0), \gamma(s_1) \in V(\gamma(t_0))$ das Geodätenstück $\gamma|_{[s_0, s_1]}$ minimierend ist:

$$d(\gamma(s_0), \gamma(s_1)) = l(\gamma|_{[s_0, s_1]})$$

Beweis:

Sei $x = \gamma(t_0)$ und $B_a(x)$ eine geodätische Kugel um x und $J(t_0) \subset I$ ein Parameterbereich um t_0 , die so klein gewählt sind, dass die Kurve $\gamma|_J$ die Kugel $B_a(x)$ in einem zusammenhängenden Parameterbereich schneidet. Seien nun $x_0 = \gamma(s_0), x_1 = \gamma(s_1) \in B_a(x)$. Dann ist $\text{Im} \gamma|_{[s_0, s_1]} \subset B_a(x)$ und $\gamma|_{[s_0, s_1]}$ ist eine radiale Geodäte aus $\gamma(s_0)$ in der Normalenumgebung $B_a(x)$ von $\gamma(s_0)$. Nach Satz 3.35 ist dann

$$d(x_0, x_1) = l(\gamma)|_{[s_0, s_1]}$$

□

Andererseits gilt

Satz 3.38. Sei (M^n, g) eine zusammenhängende Riemannsche Mannigfaltigkeit, $x, y \in M$. Sei $\alpha \in \Omega(x, y)$ eine minimierende Kurve, die proportional zur Bogenlänge parametrisiert ist. Dann ist α eine Geodäte (also insbesondere auch C^∞).

Beweis:

Sei $\alpha : I \rightarrow M$ eine minimierende Kurve, $t \in I$ und $B_\varepsilon(\alpha(t))$ eine konvexe geodätische Kugel um $\alpha(t)$. Dann gilt für ein Teilintervall $t \in [t_1, t_2] \subset I$ dass

$$\alpha([t_1, t_2]) \subset B_\varepsilon(\alpha(t)).$$

Da α minimierend ist, folgt

$$l(\alpha|_{[t_1, t_2]}) = d(\alpha(t_1), \alpha(t_2))$$

(Δ -Ungleichung).

Nun ist $B_\varepsilon(\alpha(t))$ eine Normalenumgebung von $\alpha(t_1)$. Nach Satz 3.35 ist $\alpha|_{[t_1, t_2]}$ eine monoton wachsende Umparametrisierung der radialen Geodäten γ von $\alpha(t_1)$ nach $\alpha(t_2)$. Sei $\tau : [t_1, t_2] \rightarrow [0, 1]$ die Umparametrisierung:

$$\alpha(t) = \gamma(\tau(t))$$

Da α proportional zur Bogenlänge parametrisiert, folgt

$$\|\alpha'(t)\| = \text{const} = \underbrace{\|\gamma'(\tau(t))\|}_{\text{konst}} \cdot \underbrace{|\tau'(t)|}_{\geq 0}$$

und damit ist

$$\tau'(t) \equiv \text{const} \geq 0$$

Somit muß τ eine affine Transformation sein:

$$\tau(t) = at + b$$

Aus Stetigkeitsgründen gilt dies auch in den "Ecken" von α .

Da γ eine Geodäte ist, ist die affine Umparametrisierung $\alpha|_{[t_1, t_2]}$ auch eine Geodäte. Da dies für jedes $t \in I$ gilt, ist α insgesamt eine Geodäte.

□

Satz 3.39. Sei (M^n, g) eine zusammenhängende Riemannsche Mannigfaltigkeit und $d : M \times M \rightarrow \mathbb{R}$ der Abstand auf (M, g) . Dann ist (M, d) ein metrischer Raum. Die von der Metrik d induzierte Topologie auf M stimmt mit der MF-Topologie überein.

Beweis:

1. d ist Metrik auf M :

Es ist nur noch zu zeigen, dass gilt:

$$d(x, y) = 0 \quad \Rightarrow \quad x = y :$$

Sei $x \neq y$. Da M T_2 -Raum, existiert eine geodätische Kugel $B_\varepsilon(x)$, die y nicht enthält. Nach Satz 3.35 ist jede Kurve $\alpha \in \Omega(x, y)$ länger als ε , da sie $B_\varepsilon(x)$ verläßt, d.h.

$$d(x, y) \geq \varepsilon > 0.$$

2. Für die geodätischen Kugeln in (M, g) gilt

$$B_\varepsilon(x) = \{y \in M \mid d(x, y) < \varepsilon\}$$

Da \exp_x ein Diffeomorphismus ist, sind die geodätischen Kugeln $B_\varepsilon(x)$ sowohl in der MF-Topologie von M als auch im metrischen Raum (M, d) offen, die Topologie stimmt damit überein:

- Sei $V \subset M$ offen in $(M, d) \Rightarrow \forall x \in V$ existiert Kugel $B_{\varepsilon(x)}(x) \subset V$, sodass

$$V = \underbrace{\bigcup_{x \in V} B_{\varepsilon(x)}(x)}_{\text{offen in } M}$$

- $U \subset M$ offen in M (MF-Topologie). Nach Satz 3.34 $\Rightarrow \forall x \in U$ existiert geodätische Kugel $B_{\varepsilon(x)}(x) \subset U$, d.h.

$$U = \underbrace{\bigcup_{x \in V} B_{\varepsilon(x)}(x)}_{\text{offen in } (M, d)}$$

□

Bevor wir nun zum *Satz von Hopf und Rinow* kommen, noch ein wichtiges Lemma:

Lemma 3.5. *Ist $x \in M$ ein Punkt für den \exp_x auf $T_x M$ definiert ist, so existiert für jeden Punkt $y \in M$ eine minimierende Geodäte von x nach y .*

Beweis:

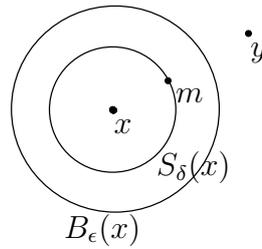
Sei $B_\varepsilon(x)$ eine geodätische Kugel um x mit $y \notin B_\varepsilon(x)$ (sonst Behauptung trivial). Sei $0 < \delta < \varepsilon$. Betrachten die geodätische Sphäre $S_\delta(x)$.

$S_\delta(x)$ ist nach Definition kompakt (da \exp_x stetig). Die Metrik definiert eine stetige Funktion

$$\begin{aligned} d_y M &\rightarrow \mathbb{R} \\ z &\mapsto d(y, z) \end{aligned}$$

d_y nimmt dann auf $S_\delta(x)$ ein Minimum an. Sei $m \in S_\delta(x)$ mit $d(y, m) = \min_{z \in S_\delta(x)} d(y, z)$, dann gilt

$$d(x, m) + d(m, y) = d(x, y), \quad (*)$$



Sei nämlich $\alpha \in [0, b] \rightarrow M$ Kurve von x nach y und sei $0 < a < b$ der kleinste Parameter mit $\alpha(a) \in S_\delta(x)$. Sei nun

$$\alpha_1 = \alpha|_{[0,a]} \quad , \quad \alpha_2 = \alpha|_{[a,b]},$$

dann ist

$$l(\alpha) = l(\alpha_1) + l(\alpha_2) \geq \delta + l(\alpha_2),$$

da α_1 Kurve in $B_\delta(x)$ ist, deren Länge ist nach Satz 3.35 \geq (Länge der radialen Geodäten von $x \rightarrow \alpha(a) = \delta = d(x, m)$). Nach Wahl von m gilt nun

$$d(m, y) \leq d(\alpha(a), y) \leq l(\alpha_2),$$

und daraus folgt

$$l(\alpha) \geq d(x, m) + d(m, y) \quad \forall \alpha \in \Omega(x, y),$$

und damit

$$d(x, y) \geq d(x, m) + d(m, x).$$

Aus Δ -Ungleichung erhält man dann die Behauptung (*).

Sei nun $\gamma[0, \infty) \rightarrow M$ die auf BL parametrisierte radiale Geodäte ($B_\epsilon(x)$ ist eine Normalenumgebung) von x aus, auf der m liegt:

$$\exp_x^{-1}(m) = \delta v \quad \text{für ein } v \in T_x M \text{ mit } \|v\| = 1,$$

und

$$\gamma(t) = \exp_x(tv).$$

(Nach Voraussetzung ist $\gamma(t) \forall t \in [0, \infty)$ definiert.)

Behauptung: Sei $d_0 = d(x, y)$, dann gilt:

$$\gamma(d_0) = y. \quad (**)$$

Sei nämlich

$$T := \{t \in [0, d_0] \mid t + d(\gamma(t), y) = d_0\} \quad \text{beachte } t = l(\gamma|_{[0,t]}) = d(x, \gamma(t))$$

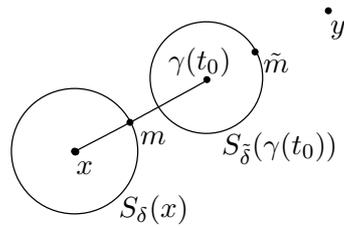
Nach (*) ist $\delta \in T$. T ist abgeschlossen in $[0, d_0]$ aus Stetigkeitsgründen. Sei dann $t_0 = \max\{t \in T\} \in [0, d_0]$, dann ist

$$t_0 \geq \delta > 0$$

Wir zeigen, dass $t_0 = d_0$, damit wäre

$$d_0 + d(\gamma(d_0), y) = d_0 \Rightarrow \gamma(d_0) = y.$$

Angenommen $t_0 < d_0$:



Dann findet man eine geodätische Sphäre $S_{\tilde{\delta}}(\gamma(t_0))$, sodass

$$\underbrace{\tilde{\delta}}_{=d(\gamma(t_0), \tilde{m})} + d(\underbrace{\tilde{\gamma}(\tilde{\delta})}_{\tilde{m}}, y) = d(\gamma(t_0), y).$$

Dann ist

$$t_0 + \tilde{\delta} + d(\tilde{m}, y) = d(\gamma(t_0), y) + t_0 = d(x, y) \quad , \text{ da } t_0 \in T, \quad d(x, y) = d_0$$

und damit

$$t_0 + \tilde{\delta} + d(\tilde{m}, y) = d(x, y) \leq d(x, \tilde{m}) + d(\tilde{m}, y) \Rightarrow t_0 + \tilde{\delta} \leq d(x, \tilde{m}).$$

Aus der Δ -Ungleichung folgt aber

$$d(x, \tilde{m}) \leq \underbrace{d(x, \gamma(t_0))}_{t_0} + \underbrace{d(\gamma(t_0), \tilde{m})}_{\tilde{\delta}}$$

d.h. es tritt eine Gleichheit ein:

$$t_0 + \tilde{\delta} = d(x, \tilde{m}).$$

Wir setzen nun $\gamma_1 = \gamma|_{[0, t_0]}$ und $\tilde{\gamma}_1 = \tilde{\gamma}|_{[0, \tilde{\delta}]}$. Dann ist

$$t_0 = l(\gamma_1) \quad , \text{ und } \quad \tilde{\delta} = l(\tilde{\gamma}_1).$$

Die stückweise C^∞ -Kurve $\gamma_1 * \tilde{\gamma}_1$ von x nach \tilde{m} ist nach bogenlänge parametrisiert, hat die Länge $t_0 + \tilde{\delta}$ und es gilt

$$l(\gamma_1 * \tilde{\gamma}_1) = d(x, \tilde{m}),$$

sie ist somit *minimierend* ! Satz 3.38 liefert nun, das $\gamma_1 * \tilde{\gamma}_1'$ sogar eine Geodäte ist, also insbesondere glatt, d.h. es liegt in $\gamma(t_0)$ keine "Ecke" vor, und damit ist zwangsläufig

$$\gamma(t_0 + \tilde{\delta}) = \tilde{m}.$$

Dies ist jedoch ein Widerspruch zur Maximalität von $t_0 \neq d_0$, da

$$\begin{aligned} & d(\gamma(t_0), \tilde{m}) + d(\tilde{m}, y) \stackrel{(*)}{=} d(\gamma(t_0), y) \\ \Rightarrow & t_0 + d(\gamma(t_0), \tilde{m}) + d(\tilde{m}, y) \stackrel{t_0 \in T}{=} d_0 \\ \Rightarrow & t_0 + \tilde{\delta} + d(\gamma(t_0 + \tilde{\delta}), y) = d_0 \end{aligned}$$

Und damit wäre $t_0 < t_0 + \tilde{\delta}' \in T$. Widerspruch! D.h. $t_0 = d_0$.

□

Satz 3.40. [Theorem von Hopf und Rinow]

Sei (M^n, g) zusammenhängende Riemannsche Mannigfaltigkeit. Dann sind folgende Aussagen äquivalent:

1. (M^n, g) ist geodätisch vollständig.
2. Der metrische Raum (M, d) ist vollständig.
3. Jede abgeschlossene beschränkte Teilmenge von M ist kompakt.
4. Es existiert ein Punkt $x \in M$ so dass \exp_x auf ganz $T_x M$ definiert ist.

Ist (M^n, g) vollständig, so existiert für je 2 beliebige Punkte $x, y \in M$ eine minimierende Geodäte γ von x nach y : $d(x, y) = l(\gamma)$.

Bemerkung: Es folgt

1. Jede kompakte Riemannsche Mannigfaltigkeit ist vollständig.
2. In einer vollständigen Riemannschen Mannigfaltigkeit kann man Abstände berechnen, in dem man alle Geodäten von $x \rightarrow y$ bestimmt und deren Länge berechnet.

Beweis:

- 4. \rightarrow 3. *Behauptung:* Existiert ein $x \in M$, sodass \exp_x auf ganz $T_x M$ definiert ist, und sei $A \subset M$ abgeschlossen und beschränkt. Dann ist A kompakt.

Aus Lemma 3.5 folgt: Ist $y \in A$, so existiert eine minimierende Geodäte $\gamma_y : [0, 1] \rightarrow M$ von x nach y :

$$d(x, y) = l(\gamma_y) = \|\gamma_y'(0)\|.$$

Da A beschränkt ist \Rightarrow es existiert ein konstantes $C > 0$, so dass

$$d(x, y) \leq C \quad \forall y \in A \quad (A \in \overline{K_C(x)}).$$

Und so ist

$$\gamma_y'(0) \in \{v \in T_x M \mid \|v\| \leq C\} := \tilde{K}_C \subset T_x M$$

\tilde{K}_C ist kompakt, $\exp_x : T_x M \rightarrow M$ stetig, und damit ist $\exp_x(\tilde{K}_C)$ kompakt in M und enthält A . Jede abgeschlossene Teilmenge einer kompakten Menge ist jedoch kompakt.

- 3. \rightarrow 2. *Behauptung:* Jede abgeschlossene und beschränkte Teilmenge ist kompakt. Dann ist (M, d) vollständig.

Sei $\{x_n\}$ eine CF in (M, d) , dann ist $A = \{x_n\}$ eine beschränkte Menge. $cl(A)$ ist somit beschränkt und abgeschlossen und nach Voraussetzung kompakt bzw. folgenkompakt. D.h. jede Folge in $cl(A)$ hat konvergente Teilfolge. Da $\{x_n\}$ eine CF ist, die eine konvergente Teilfolge enthält, ist $\{x_n\}$ konvergent.

- 2. → 1. *Behauptung*: Sei (M, d) vollständig. Dann ist *jede* Geodäte ist auf ganz \mathbb{R} definiert.

Sei $\gamma : (a, b) \rightarrow M$ eine auf BL parametrisierte maximale Geodäte. Dann läßt sich γ über b hinaus als Geodäte fortsetzen:

Sei $t_n \rightarrow b < \infty$. Dann ist $\{\gamma(t_n)\}$ eine CF in M , da

$$d(\gamma(t_n), \gamma(t_m)) \leq l(\gamma|_{[t_n, t_m]}) = |t_n - t_m| \quad (n, m \geq n_0).$$

Nach Vor. konvergiert nun $\{\gamma(t_n)\}$ in M gegen ein $q \in M$. Ist $s_n \rightarrow b$ eine andere Folge, dann gilt ebenfalls

$$d(\gamma(t_n), \gamma(s_n)) \leq l(\gamma|_{[s_n, t_n]}) = |t_n - s_n| \rightarrow 0$$

D.h. $\{\gamma(s_n)\}$ konvergiert ebenfalls gegen $q \in M$. Dann definiert

$$\tilde{\gamma}(b) := \lim_{t_n \rightarrow b} \gamma(t_n) = q$$

stetige Fortsetzung von γ n den Punkt b . Nach Folgerung aus Satz 3.33 ist γ auf $(a, b + \varepsilon)$ mit $\varepsilon > 0$ als Geodäte fortsetzbar. Damit γ ist nicht maximal und $(a, b) = \mathbb{R}$.

- 1. → 4. *Behauptung*: Ist (M, g) geodätisch vollständig, dann ex. $x \in M$, sodass \exp_x auf ganz $T_x M$ definiert ist.

Dies folgt trivialerweise aus der Definition.

□

Die Aussagen des Satzes von Hopf und Rinow gelten *nicht* in pseudo-Riemannschen Mannigfaltigkeiten.

1. Beispiel einer *kompakten* pseudo-Riemannschen Mannigfaltigkeit, die *nicht* geodätisch vollständig ist.

Wir betrachten den \mathbb{R}^2 mit der Lorentz-Metrik

$$g_{(x,y)} = (\cos^4 y - 1)dx^2 - 2dxdy$$

Diese Metrik ist 2π -periodisch, definiert also eine Lorentz-Metrik auf dem *kompakten* Torus $T^2 = \mathbb{R}^2/2\pi \cdot \mathbb{Z} \times 2\pi \cdot \mathbb{Z}$. (T^2, g) ist *nicht* geodätisch vollständig, da sich die Geodäte

$$\begin{aligned} \gamma : (0, \infty) &\longrightarrow T^2 = \pi(\mathbb{R}^2) \\ t &\longmapsto \pi\left(\frac{1}{t} - t, \arctan(t)\right) \end{aligned}$$

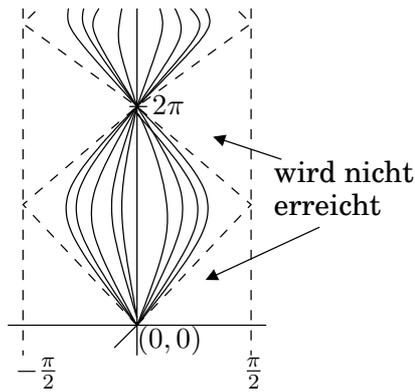
nicht über 0 nach links fortsetzen läßt.

2. Beispiel einer geodätisch *vollständigen* pseudo-Riemannschen Mannigfaltigkeit, in der es Punkte gibt, die man *nicht* durch Geodäten verbinden kann: Anti-De Sitter-Raum

$$M^2 = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid -\frac{\pi}{2} < x < \frac{\pi}{2}\}$$

$$g_{(x,y)} = \frac{1}{\cos^2 x} \cdot (-dx^2 + dy^2)$$

Man kann zeigen, dass die Geodäten durch den Punkt $(0, 0)$ folgenden Verlauf haben und dass alle maximalen Geodäten auf \mathbb{R} definiert sind.



3. In pseudo-Riemannschen Räumen muss man den kausalen Charakter von Geodäten unterscheiden:

\mathbb{R}^2 mit Koordinaten (x, y) . Sei $f \in C^\infty(\mathbb{R}^2)$ Funktion mit $f \equiv 1$ auf $\{(x, y) \mid |x| \geq 1\}$, f symmetrisch der y -Achse, $\int_{-\infty}^{\infty} f(0, y) dy < \infty$. Dann ist die Lorentzmetrik

$$g = f^2(dx^2 - dy^2)$$

raum- und lichtartig geodätisch vollständig, aber zeitartig geodätisch unvollständig. Insbesondere geht die Vollständigkeit von $(dx^2 - dy^2)$ bei konformer Änderung der Metrik verloren¹⁶.

¹⁶Siehe O'Neill: Semi-Riemannsche Geometrie, Seite 154, Beem, Ehrlich: Global Lorentzian Geometry

3.9 Jacobifelder, konjugierte Punkte und Schnittort

Sei (M^n, g) eine semi-Riemannsche Mannigfaltigkeit, $x \in M$ und $\exp_x : T_x M \rightarrow M$ die Exponentialabbildung. Wir wissen bereits, dass für das Differential von \exp_x im Nullvektor $o \in T_x M$

$$(d\exp_x)_o = \text{id}_{T_x M}$$

gilt. Insbesondere ist \exp_x ein lokaler Diffeomorphismus um $o \in T_x M$.

Wir wollen nun wissen, wie gross der Diffeomorphiebereich von \exp_x ist. Dazu müssen folgende Fragen beantwortet werden:

1. Wie kann man

$$(d\exp_x)_v : T_v(T_x M) = T_x M \rightarrow T_{\exp_x(v)} M$$

bestimmen für $v \neq o$? Für welche $v \in T_x M$ ist diese Abbildung ein Isomorphismus?

2. Für welchen Bereich $U_x \subset T_x M$ ist $\exp_x : U_x \subset T_x M \rightarrow M$ injektiv?

3. Wir suchen eine Menge $\text{Cut}(x) \subset M$, so dass

$$\exp_x : U_x \subset T_x M \rightarrow M \setminus \text{Cut}(x)$$

ein Diffeomorphismus ist.

Als technisches Hilfsmittel benutzen wir *Jacobifelder*.

Definition. Sei (M, g) eine semi-Riemannsche Mannigfaltigkeit und $\gamma : [0, a] \rightarrow M$ eine Geodäte in (M, g) . Ein Vektorfeld $Y \in \mathfrak{X}(M)$ entlang γ heißt Jacobifeld, falls

$$Y'' + \mathcal{R}(Y, \gamma')\gamma' \equiv 0$$

auf $[0, a]$, wobei $Y' = \frac{\nabla Y}{dt}$, $Y'' = \frac{\nabla}{dt} \frac{\nabla Y}{dt}$ für den Levi-Civita-Zusammenhang ∇ .

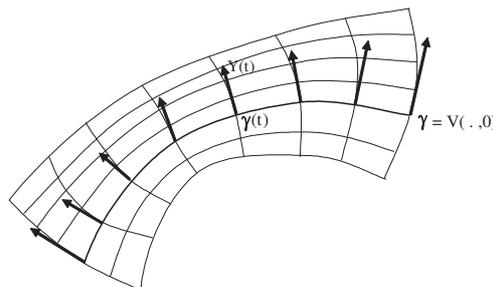
Beispiel 74. EINFACHE JACOBIFELDER

$Y = \gamma'$ und $\hat{Y} \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$ mit $\hat{Y}(t) := t\gamma'(t)$ sind Jacobifelder entlang γ .

Jacobifelder treten bei Variation von Geodäten auf:

Definition. Sei $\gamma : [0, a] \rightarrow M$ eine Geodäte. Eine Variation von γ ist eine parametrisierte Fläche $V : [0, a] \times (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow M$ mit

$$V(t, 0) = \gamma(t)$$



Das Vektorfeld $Y \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$ mit $Y(t) := \frac{\partial V}{\partial s}(t, 0)$ heißt Variationsvektorfeld von V .

Satz 3.41. Ist V eine Variation der Geodäten $\gamma : [0, a] \rightarrow M$, die nur aus Geodäten besteht, d.h. $V(\cdot, s) : [0, a] \rightarrow M$ ist eine Geodäte für jedes $s \in (-\varepsilon, \varepsilon)$, so ist das Variationsvektorfeld $Y = \frac{\partial V}{\partial s}(\cdot, 0)$ ein Jacobifeld entlang γ .

Beweis: Nach dem Symmetriema gilt

$$\frac{\nabla}{dt} \frac{\partial V}{\partial s} = \frac{\nabla}{ds} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (\text{da } \nabla \text{ metrisch}).$$

Da ∇ torsionsfrei ist, folgt $[\frac{\partial V}{\partial s}, \frac{\partial V}{\partial t}] = 0$. Es ist $\gamma'(t) = \frac{\partial V}{\partial t}(t, 0)$, $Y(t) = \frac{\partial V}{\partial s}(t, 0)$.

Daraus folgt im Punkt $(t, 0)$:

$$\begin{aligned} \mathcal{R}(Y, \gamma')\gamma' &= (\nabla_{\frac{\partial V}{\partial s}} \nabla_{\frac{\partial V}{\partial t}} - \nabla_{\frac{\partial V}{\partial t}} \nabla_{\frac{\partial V}{\partial s}} - \nabla_{[\frac{\partial V}{\partial s}, \frac{\partial V}{\partial t}]}) \frac{\partial V}{\partial t} \\ &= (\nabla_{\frac{\partial V}{\partial s}} \nabla_{\frac{\partial V}{\partial t}} - \nabla_{\frac{\partial V}{\partial t}} \nabla_{\frac{\partial V}{\partial s}}) \frac{\partial V}{\partial t} \end{aligned}$$

Da V eine Variation aus Geodäten ist, ist $t \rightarrow V(t, s)$ eine Geodäte für jedes $s \in (-\varepsilon, \varepsilon)$, d.h.

$$\frac{\nabla}{dt} \frac{\partial V}{\partial t}(\cdot, s) = 0 \quad \forall s \in (-\varepsilon, \varepsilon)$$

Unter Benutzung des Symmetriemas folgt dann

$$\mathcal{R}(Y, \gamma')\gamma' = -\nabla_{\frac{\partial V}{\partial t}} \nabla_{\frac{\partial V}{\partial s}} \frac{\partial V}{\partial t} = -\nabla_{\frac{\partial V}{\partial t}} \nabla_{\frac{\partial V}{\partial t}} \frac{\partial V}{\partial s} = -\frac{\nabla}{dt} \frac{\nabla}{dt} Y = -Y''.$$

□

Beispiel 75. JACOBI- UND KILLINGFELDER

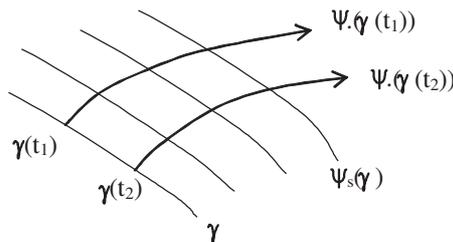
Sei $X \in \mathfrak{X}(M)$ ein Killingfeld und $\gamma : [0, a] \rightarrow M$ eine Geodäte. Dann ist $X(t) := X(\gamma(t))$ ein Jacobifeld entlang γ .

Beweis: Sei $\{\psi_s\}$ der lokale Fluß von X . Da X ein Killingfeld ist, ist

$$\psi_s : U \subset M \rightarrow \psi_s(U) \subset M$$

eine Isometrie. Wir betrachten nun die Variation

$$\begin{aligned} V &: [0, a] \times (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow M \\ V(t, s) &= \psi_s(\gamma(t)) \end{aligned}$$



V ist eine Variation durch Geodäten, folglich ist das Variationsvektorfeld $\frac{\partial V}{\partial s}(t, 0)$ ein Jacobifeld. Wir erhalten

$$\begin{aligned}\frac{\partial V}{\partial s}(t_0, 0) &= \frac{d}{ds}(\psi_s(\gamma(t_0)))|_{s=0} \\ &= X(\gamma(t_0)) = X(t_0),\end{aligned}$$

denn $s \rightarrow \psi_s(\gamma(t_0))$ ist die Integralkurve von X durch den Punkt $\gamma(t_0)$.

□

Satz 3.42. Sei $\gamma : [0, l] \rightarrow M$ eine Geodäte, $u, w \in T_x M$, $\gamma(0) = x$ und $\gamma'(0) = v$. Dann gilt

1. Es existiert genau ein Jacobifeld $Y \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$, so dass $Y(0) = u$, $Y'(0) = w$.
2. Sei $Y \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$ das Jacobifeld entlang γ und $Y(0) = 0$, $Y'(0) = w \in T_x M$. Dann gilt

$$Y(t) = t \cdot (d \exp_x)_{tv}(w) \in T_{\gamma(t)} M$$

Beweis:

1. Die Jacobi-Gleichung $Y'' + \mathcal{R}(Y, \gamma')\gamma' \equiv 0$ ist eine Differentialgleichung 2. Ordnung. Die Lösung ist deshalb eindeutig bestimmt durch die Anfangsbedingungen $Y(0)$ und $Y'(0)$.
2. Wir betrachten die folgende geodätische Variation von γ :

$$V(t, s) := \exp_x(t(v + sw)).$$

Dann gilt

$$\begin{aligned}V(t, 0) &= \exp_x(tv) = \gamma_v(t) \\ V(t, s_0) &= \exp_x(t(v + s_0 w)) = \gamma_{v+s_0 w}(t)\end{aligned}$$

und aus der Kettenregel folgt

$$Y(t) = \frac{\partial V}{\partial s}(t, 0) = (d \exp_x)_{tv}(tw).$$

Aus Satz 3.41 weiss man, dass Y ein Jacobifeld entlang γ ist. Ausserdem gilt

$$\begin{aligned}Y(0) &= 0 \\ Y'(0) &= \frac{\nabla}{dt} \frac{\partial V}{\partial s}(0, 0) = \frac{\nabla}{ds} \frac{\partial V}{\partial t}(0, 0)\end{aligned}$$

$\frac{\partial V}{\partial t}(\cdot, s_0)$ ist das tangentielle Vektorfeld an die Geodäte $V(t, s_0) = \gamma_{v+s_0 w}(t)$, d.h. es ist

$\frac{\partial V}{\partial t}(0, s_0) = \gamma'_{v+s_0 w}(0) = v + s_0 w$. Also gilt:

$$Y'(0) = \frac{d}{ds}(v + sw)|_{s=0} = w.$$

Damit ist $Y(t) := (d \exp_x)_{tv}(tw)$ das eindeutig bestimmte Jacobifeld mit $Y(0) = 0$, $Y'(0) = w$.

□

Beispiel 76. JACOBIFELDER AUF MF KONST. SCHNITTKRÜMMUNG

Sei $M^n = M^n(K_0)$ eine Riemannsche Mannigfaltigkeit mit konstanter Schnittkrümmung K_0 und $\gamma : [0, l] \rightarrow M^n(K_0)$ eine auf Bogenlänge parametrisierte Geodäte mit $\gamma(0) = x, \gamma'(0) = v$. Seien $u, w \in T_x M^n$ gegeben und bezeichne $U, W \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$ die Parallelverschiebung von $u - \langle u, v \rangle v$ bzw. $w - \langle w, v \rangle v$ entlang γ . Dann ist das Jacobifeld $Y \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$ mit $Y(0) = u$ und $Y'(0) = w$ gegeben durch

$$Y(t) = \hat{Y}(t) + \langle w, u \rangle t \cdot \gamma' + \langle v, u \rangle \gamma'$$

wobei

$$\hat{Y}(t) = \left\{ \frac{1}{\sqrt{K_0}} \left(\sin(\sqrt{K_0}t) \cdot W(t) + \cos(\sqrt{K_0} \cdot t) \cdot U(t) \right) \right.$$

Zum Beweis benutzt man

$$\mathcal{R}(X, Y, T, Z) = K_0 \left(g(X, Z)g(Y, T) - g(X, T)g(Y, Z) \right)$$

und berechnet $Y'' + \mathcal{R}(Y, \gamma')\gamma' = 0$.

Satz 3.43. Bezeichne $\text{Jac}_\gamma M$ den Vektorraum der Jacobifelder entlang γ . Dann gilt:

1. $\text{Jac}_\gamma M$ ist ein $2n$ -dimensionaler Vektorraum.
2. $\{Y \in \text{Jac}_\gamma M \mid Y \perp \gamma'\}$ ist ein $(2n - 2)$ -dimensionaler Vektorraum.
3. $\{Y \in \text{Jac}_\gamma M \mid Y(0) = 0, Y \perp \gamma'\}$ ist ein $(n - 1)$ -dimensionaler Vektorraum.

Insbesondere gilt für $Y \in \text{Jac}_\gamma M$

$$\langle Y(t), \gamma'(t) \rangle = \alpha t + \beta$$

(wobei $\langle \cdot, \cdot \rangle$ die Metrik bezeichnet).

Beweis: Sei $Y \in \text{Jac}_\gamma M$. Wir zeigen, dass die Funktion $t \rightarrow \langle Y(t), \gamma'(t) \rangle$ linear ist:

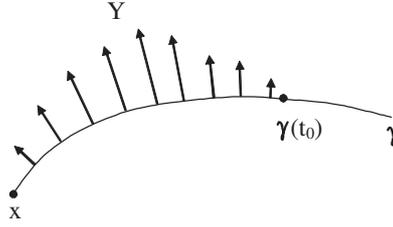
$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \langle Y, \gamma' \rangle &= \left\langle \frac{\nabla}{dt} Y, \gamma' \right\rangle + \left\langle Y, \frac{\nabla}{dt} \gamma' \right\rangle = \langle Y', \gamma' \rangle \\ \frac{d^2}{dt^2} \langle Y, \gamma' \rangle &= \langle Y'', \gamma' \rangle + \left\langle Y', \frac{\nabla}{dt} \gamma' \right\rangle \\ &= -\langle \mathcal{R}(Y, \gamma')\gamma', \gamma' \rangle = \mathcal{R}(\gamma', Y, \gamma', \gamma') = 0. \end{aligned}$$

Folglich gilt $\langle Y(t), \gamma'(t) \rangle = \alpha t + \beta$ mit $\beta = \langle Y(0), \gamma'(0) \rangle$ und $\alpha = \langle Y'(0), \gamma'(0) \rangle$.

Die Bedingung $\langle Y, \gamma' \rangle \equiv 0$ liefert $\alpha = \beta = 0$, also einen Unterraum der Codimension 2 im $2n$ -dimensionalen Raum aller Anfangsbedingungen $(Y(0), Y'(0))$. Ist zusätzlich $Y(0) = 0$, so ist bereits $\beta = 0$ und man hat einen Unterraum der Kodimension 1 im n -dimensionalen Raum der Anfangsbedingungen $Y'(0)$.

□

Definition. Sei $x \in M, \gamma : [0, a] \rightarrow M$ eine Geodäte mit $\gamma(0) = x$ und $t_0 \in (0, a]$. Der Punkt $\gamma(t_0)$ heißt konjugiert zu x entlang γ , falls ein Jacobifeld $Y \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$ existiert mit $Y \neq 0$ und $Y(0) = Y(t_0) = 0$.



Bemerkung: Für dieses Jacobifeld gilt $Y \perp \gamma'$, denn nach Satz 3.43 ist $\langle Y(t), \gamma'(t) \rangle = \alpha t$ und somit $\alpha = 0$ wegen $Y(t_0) = 0$.

Satz 3.44. Sei $x \in M$ und $v \in T_x M$. Das Differential der Exponentialabbildung

$$(d \exp_x)_{tv} : T_x M \rightarrow T_{\gamma_v(t)} M$$

ist genau dann ausgeartet, wenn die Punkte x und $\gamma_v(t)$ zueinander konjugiert entlang der radialen Geodäten γ_v sind.

Beweis: Wir wissen, dass das Vektorfeld $Y_w(t) = t(d \exp_x)_{tv}(w)$ das Jacobifeld entlang γ_r mit $Y_w(0) = 0$ und $Y'_w(0) = w$ ist. Folglich gilt:

$$\begin{aligned} (d \exp_x)_{tv} \text{ ist ausgeartet} &\Leftrightarrow \exists w \in T_x M, w \neq 0 : (d \exp_x)_{tv}(w) = 0 \\ &\Leftrightarrow Y_w(t) = 0, Y_w(0) = 0 \\ &\Leftrightarrow x \text{ und } \gamma_v(t) \text{ sind konjugiert entlang } \gamma_v \end{aligned}$$

□

Beispiel 77. KONJUGIERTE PUNKTE VON RIEMANNSCHEN MF

1. Auf den Riemannschen Mannigfaltigkeiten $(\mathbb{R}^n, \langle \cdot, \cdot \rangle_{\mathbb{R}^n})$ existieren *keine* konjugierten Punkte:

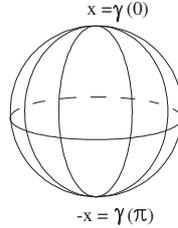
Für \mathbb{R}^n ist die Schnittkrümmung $K_0 \equiv 0$. Das Jacobifeld $Y \in \mathfrak{X}_{\gamma_v}(\mathbb{R}^n)$ mit $Y(0) = 0$ und $Y'(0) = w \perp v$ ist gegeben durch $Y(t) = tW(t)$, wobei $W(t)$ die Parallelverschiebung von $w \neq 0$ entlang γ_v ist. Folglich ist $Y(t) = t \cdot W(t) \neq 0$ für alle $t > 0$.

2. Auf $(\mathbb{H}^n, g_{\mathbb{H}^n} = \frac{1}{x_n^2}(dx_1^2 + \dots + dx_n^2))$ existieren keine konjugierten Punkte:

\mathbb{H}^n hat konstante Schnittkrümmung $K_0 = -1$. Das Jacobifeld $Y \in \mathfrak{X}_{\gamma_v}(\mathbb{H}^n)$ mit $Y(0) = 0$ und $Y'(0) = w \perp v$ ist gegeben durch $Y(t) = \sinh(t) \cdot W(t) \neq 0$ für $t > 0$.

3. Auf der Riemannschen Sphäre S^n sind zwei Punkte x und y genau dann konjugiert, wenn $y = -x$ gilt:

S^n hat konstante Schnittkrümmung $K_0 = 1$. Das Jacobifeld $Y \in \mathfrak{X}_{\gamma_v}(S^n)$ mit $Y(0) = 0$ und $Y'(0) = w \perp v$ ist gegeben durch $Y(t) = \sin t \cdot W(t)$, wobei $W(t)$ die Parallelverschiebung von $w \in T_x M$ entlang γ_v ist. Folglich gilt $Y(t) = 0$ genau dann, wenn $t \in \pi \cdot \mathbb{Z}$. D.h. die Punkte $x, -x \in S^n$ sind konjugiert entlang jeder Geodäten.



Als nächstes werden wir zeigen, dass die Schnittkrümmung eine Aussage über den Verlauf von Geodäten macht. Dazu benutzen wir den folgenden Satz über Jacobifelder:

Satz 3.45. Sei (M, g) eine Riemannsche Mannigfaltigkeit und $\gamma : [0, a] \rightarrow M$ eine Geodäte mit $\gamma(0) = x$ und $\gamma'(0) = v$. Sei weiterhin $w \in T_x M$ ein Vektor mit $\langle v, v \rangle = \langle w, w \rangle = 1$ und $\langle v, w \rangle = 0$. Bezeichne Y das Jacobifeld entlang γ mit $Y(0) = 0$ und $Y'(0) = w$. Dann gilt

$$\|Y(t)\| = t - \frac{1}{6} K_{\text{span}(v,w)}(x) t^3 + o(t^3)$$

Beweis: Wir betrachten die Taylorentwicklung der Funktion $h(t) = \langle Y(t), Y(t) \rangle$ im Punkt $t = 0$:

$$h(t) = h(0) + h'(0)t + \frac{1}{2} h''(0)t^2 + \frac{1}{6} h'''(0)t^3 + \frac{1}{4!} h^{(4)}(0)t^4 + o(t^4)$$

Dabei gilt:

$$\begin{aligned} h(0) &= \langle Y(0), Y(0) \rangle = 0 \\ h'(0) &= 2\langle Y'(0), Y(0) \rangle = 0 \\ h''(0) &= 2\langle Y''(0), Y(0) \rangle + 2\langle Y'(0), Y'(0) \rangle = 2\langle Y'(0), Y'(0) \rangle = 2\langle w, w \rangle = 2 \\ h'''(0) &= 2\langle Y'''(0), Y(0) \rangle + 6\langle Y''(0), Y'(0) \rangle = -6\langle \mathcal{R}(Y(0), \gamma'(0))\gamma'(0), Y'(0) \rangle = 0 \\ h^{(4)}(0) &= 8\langle Y'''(0), Y'(0) \rangle + 6\langle Y''(0), Y''(0) \rangle . \end{aligned}$$

Da $Y''(t) = -\mathcal{R}(Y(t), \gamma'(t))\gamma'(t)$ folgt

$$Y''' = -\nabla_{\gamma'}(\mathcal{R}(Y, \gamma')\gamma') = -(\nabla_{\gamma'}, \mathcal{R})(Y, \gamma')\gamma' - \mathcal{R}(Y', \gamma')\gamma' .$$

Folglich gilt in $t = 0$:

$$Y'''(0) = -\mathcal{R}(w, v)v .$$

Damit folgt $h^{(4)}(0) = -8K_{\text{span}(v,w)}(x)$. Wir erhalten

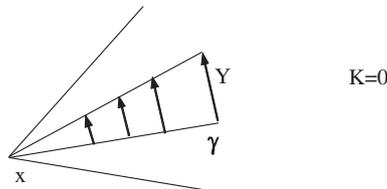
$$\|Y(t)\|^2 = t^2 - \frac{1}{3} K_{\text{span}(v,w)}(x) t^4 + o(t^4)$$

Für die Wurzel erhält man durch Multiplizieren und Koeffizientenvergleich

$$\|Y(t)\| = t - \frac{1}{6}K_{\text{span}(v,w)}(x)t^3 + o(t^3)$$

□

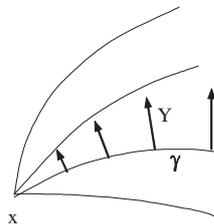
Bemerkung: Da für den flachen Raum $\mathcal{R} \equiv 0$ gilt, folgt aus dem Beweis des vorigen Satzes in diesem Fall $h^{(k)}(0) = 0 \forall k > 2$. Also $\|Y(t)\| = t$.



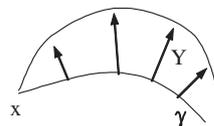
Für die gekrümmten Fälle gilt:

$$\|Y(t)\| = t - \underbrace{\frac{1}{6}K_{\text{span}(v,w)}(x)t^3}_{\text{Abweichung vom flachen Verhalten}} + o(t^3)$$

1. $a = K_{\text{span}(v,w)}(x) < 0$. Dann ist $\|Y(t)\| \cong t + |a|t^3$ monoton wachsend. In diesem Fall laufen die Geodäten auseinander.



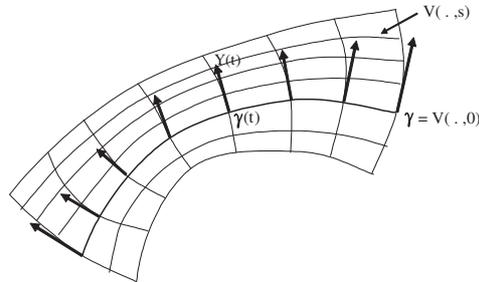
2. $a = K_{\text{span}(v,w)}(x) > 0$. Dann hat $\|Y(t)\| \cong t - |a|t^3$ ein lokales Maximum. In diesem Fall laufen die Geodäten zusammen.



Als nächstes wollen wir zeigen, dass eine Geodäte in einer Riemannschen Mannigfaltigkeit, auf der ein konjugierter Punkt liegt, nicht minimierend sein kann.

Satz 3.46. Sei (M^n, g) eine Riemannsche Mannigfaltigkeit und $\gamma : [0, l] \rightarrow M$ eine auf Bogenlänge parametrisierte Geodäte. Sei $V : [0, l] \times (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow M$ eine Variation von γ mit dem Variationsvektorfeld $Y = \frac{\partial V}{\partial s}(\cdot, 0)$. Bezeichne $L : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow \mathbb{R}$ die Länge der variierenden Kurven

$$L(s) := l(V(\cdot, s)).$$



Dann gilt für die 1. und 2. Variation von L :

$$L'(0) = \langle Y(l), \gamma'(l) \rangle - \langle Y(0), \gamma'(0) \rangle$$

$$L''(0) = \int_0^l \left(\|\tilde{Y}'(t)\|^2 - \mathcal{R}(\tilde{Y}, \gamma', \gamma', \tilde{Y}) \right) dt + \left\langle \frac{\nabla}{ds} \frac{\partial V}{\partial s}(l, 0), \gamma'(l) \right\rangle - \left\langle \frac{\nabla}{ds} \frac{\partial V}{\partial s}(0, 0), \gamma'(0) \right\rangle,$$

wobei \tilde{Y} die Normalprojektion des Variationsvektorfeldes Y ist:

$$\tilde{Y} = Y - \langle Y, \gamma' \rangle \gamma'.$$

(Sind die Randkurven $s \rightarrow V(0, s)$ und $s \rightarrow V(l, s)$ Geodäten, so fallen die letzten beiden Summanden von $L''(0)$ weg.)

Beweis:

1. Wegen

$$L(s) = \int_0^l \left\| \frac{\partial V}{\partial t}(t, s) \right\| dt = \int_0^l \left\langle \frac{\partial V}{\partial t}(t, s), \frac{\partial V}{\partial t}(t, s) \right\rangle^{\frac{1}{2}} dt$$

folgt

$$L'(s) = \int_0^l \frac{1}{\left\| \frac{\partial V}{\partial t}(t, s) \right\|} \left\langle \frac{\nabla}{ds} \frac{\partial V}{\partial t}(t, s), \frac{\partial V}{\partial t}(t, s) \right\rangle dt.$$

Wir wissen:

$$\left\| \frac{\partial V}{\partial t}(t, 0) \right\| = \|\gamma'(t)\| \equiv 1$$

und

$$\frac{\nabla}{ds} \frac{\nabla}{dt} V(t, 0) = \frac{\nabla}{dt} \frac{\nabla}{ds} V(t, 0) = Y'(t).$$

Daraus folgt

$$L'(0) = \int_0^l \langle Y'(t), \gamma'(t) \rangle dt = \int_0^l \frac{d}{dt} \langle Y(t), \gamma'(t) \rangle dt = \langle Y(l), \gamma'(l) \rangle - \langle Y(0), \gamma'(0) \rangle.$$

2. Wir leiten die Formel für $L'(s)$ nochmals ab und erhalten in $s = 0$

$$\begin{aligned}
 L''(0) &= \int_0^l \left[\frac{1}{\|\gamma'(t)\|} \left\{ \left\langle \frac{\nabla}{ds} \frac{\nabla}{ds} \frac{\partial V}{\partial t}(t, 0), \gamma'(t) \right\rangle + \left\langle \frac{\nabla}{ds} \frac{\partial V}{\partial t}(t, 0), \frac{\nabla}{ds} \frac{\partial V}{\partial t}(t, 0) \right\rangle \right\} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{\|\frac{\partial V}{\partial t}(t, 0)\|^3} \left\langle \frac{\nabla}{ds} \frac{\partial V}{\partial s}(t, 0), \gamma'(t) \right\rangle^2 \right] dt \\
 &= \int_0^l \left\{ \left\langle \frac{\nabla}{ds} \frac{\nabla}{dt} \frac{\partial V}{\partial s}(t, 0), \gamma'(t) \right\rangle + \langle Y'(t), Y'(t) \rangle - \langle Y'(t), \gamma'(t) \rangle^2 \right\} dt \\
 &= \int_0^l \left\{ \left\langle \mathcal{R} \left(\frac{\partial V}{\partial s}, \frac{\partial V}{\partial t} \right) \frac{\partial V}{\partial s}, \gamma'(t) \right\rangle \Big|_{s=0} + \left\langle \frac{\nabla}{dt} \frac{\nabla}{ds} \frac{\partial V}{\partial s}(t, s), \gamma'(t) \right\rangle \Big|_{s=0} + \langle Y'(t), Y'(t) \rangle \right. \\
 &\quad \left. - \langle Y'(t), \gamma'(t) \rangle^2 \right\} dt \\
 &= \int_0^l \left(\mathcal{R}(Y, \gamma', Y, \gamma') + \frac{d}{dt} \left\langle \frac{\nabla}{ds} \frac{\partial V}{\partial s}(t, 0), \gamma'(t) \right\rangle + \langle \tilde{Y}(t), \tilde{Y}'(t) \rangle \right) dt .
 \end{aligned}$$

Die letzte Identität folgt wegen

$$\begin{aligned}
 \tilde{Y}(t) &= Y(t) - \langle Y(t), \gamma'(t) \rangle \gamma'(t), \\
 \tilde{Y}'(t) &= Y'(t) - \langle Y'(t), \gamma'(t) \rangle \gamma'(t)
 \end{aligned}$$

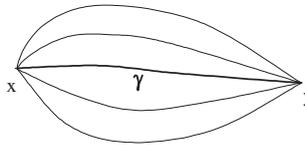
und somit

$$\langle \tilde{Y}'(t), \tilde{Y}'(t) \rangle = \langle Y'(t), Y'(t) \rangle - \langle Y'(t), \gamma'(t) \rangle^2 .$$

□

Bemerkungen:

1. Analoge Formeln gelten für stückweis glatte Variationen (werden entlang der Stücke summiert)
2. Ist V eine Variation mit festem Endpunkt und festem Anfangspunkt (= eigentliche Variation)



so gilt für das Variationsvektorfeld $Y(0) = Y(l) = 0$ und folglich

$$\begin{aligned}
 L'(0) &= 0 \\
 L''(0) &= \int_0^l (\|\tilde{Y}'(t)\| - \mathcal{R}(\tilde{Y}, \gamma', \gamma', \tilde{Y})) dt .
 \end{aligned}$$

3. Sei $\gamma : [0, l] \rightarrow M$ eine auf Bogenlänge parametrisierte Geodäte und $X, Y \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$ Vektorfelder entlang γ mit $X(0) = X(l) = 0$ und $Y(0) = Y(l) = 0$.

Dann heißt die symmetrische Bilinearform

$$I_\gamma(X, Y) := - \int_0^l \langle X, Y'' + \mathcal{R}(Y, \gamma')\gamma' \rangle dt$$

die Indexform von γ .

Da für Vektorfelder $Y \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$ gilt

$$\langle Y, Y'' \rangle = \frac{d}{dt} (\langle Y, Y' \rangle - \langle Y', Y \rangle),$$

erhält man folgende Beziehung zwischen der Indexform von γ und der 2. Variation der Bogenlänge:

Satz 3.47. Sei $\gamma : [0, l] \rightarrow M$ eine auf Bogenlänge parametrisierte Geodäte und $Y \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$ ein Vektorfeld mit $Y(0) = Y(l) = 0$ und $Y \perp \gamma'$. Dann definiert Y die eigentliche Variation $V : [0, l] \times (\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow M$

$$V(t, s) := \exp_{\gamma(t)}(sY(t))$$

mit dem Variationsvektorfeld Y . Für die Indexform gilt

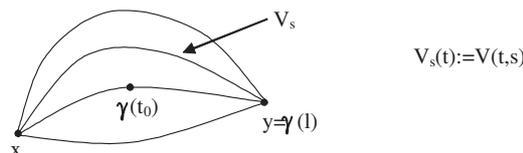
$$\begin{aligned} I_\gamma(Y, Y) &= \int_0^l \left(\|Y'\|^2 - \mathcal{R}(Y, \gamma', \gamma', Y) \right) dt \\ &= L''(0) \end{aligned}$$

wobei $L(s) = l(V(\cdot, s))$.

Wir erhalten nun die folgende Aussage über die Länge von Geodäten, auf denen ein konjugierter Punkt liegt:

Satz 3.48. Sei $\gamma : [0, l] \rightarrow M$ eine auf Bogenlänge parametrisierte Geodäte und $\gamma(0) = x$. Sei $t_0 \in (0, l)$ und $\gamma(t_0)$ konjugiert zu $\gamma(0) = x$ entlang γ . Dann existiert eine eigentliche Variation V von γ so dass

$$L(V_s) < L(\gamma) \quad \forall s \in (-\varepsilon, \varepsilon) \setminus \{0\}$$



Insbesondere ist γ nicht minimierend zwischen x und y .

Beweis: $\gamma(t_0)$ ist konjugiert zu x entlang γ . Folglich existiert ein Jacobifeld $Y \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$ mit $Y(0) = 0$ und $Y(t_0) = 0$. Nach Satz 3.43 ist dann $Y \perp \gamma'$ und $Y'(t_0) \neq 0$. Bezeichne nun $Z_0 \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$ die Parallelverschiebung von $-Y'(t_0)$ entlang γ und $\theta \in C^\infty([0, l])$ eine Funktion mit $\theta(0) = \theta(l) = 0$, $\theta(t_0) = 1$. Wir betrachten das Vektorfeld $Z \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$ definiert durch $Z(t) := \theta(t) \cdot Z_0(t)$. Dafür gilt

$$Z(0) = Z(l) = 0 \quad , \quad Z(t_0) = -Y'(t_0) .$$

Für $\alpha \in \mathbb{R}$ setzen wir

$$Y_\alpha(t) := \begin{cases} Y(t) + \alpha Z(t) & t \in [0, t_0] \\ \alpha \cdot Z(t) & t \in [t_0, l] \end{cases}$$

Y_α ist stetig und stückweis C^∞ . Außerdem gilt $Y_\alpha(0) = Y_\alpha(l) = 0$. Benutzt man $Y_\alpha \perp \gamma'$ und $\langle Y'(t_0), \gamma'(t_0) \rangle = \frac{d}{dt}(\langle Y(t), \gamma'(t) \rangle)|_{t=t_0} = 0$, so folgst aus der Definition von Z , dass $Y_\alpha \perp \gamma'$. Sei nun V_α die durch Y_α definierte stückweis glatte Variation

$$V_\alpha(t, s) = \exp_{\gamma(t)}(s \cdot Y_\alpha(t))$$

Nach Satz 3.45 und 3.46 gilt für die Bogenlänge $L_\alpha(s) = l(V_\alpha(\cdot, s))$

$$\begin{aligned} L'_\alpha(0) &= 0 \\ L''_\alpha(0) &= I_\gamma(Y_\alpha, Y_\alpha) . \end{aligned}$$

Nach Definition von $I_\gamma(Y_\alpha, Y_\alpha)$ gilt $I_\gamma(Y_\alpha, Y_\alpha) = I_1 + I_2 + I_3$, wobei

$$\begin{aligned} I_1 &= - \int_0^{t_0} \langle Y, Y'' + \mathcal{R}(Y, \gamma')\gamma' \rangle dt \\ I_2 &= -\alpha \int_0^{t_0} \langle Z, Y'' + \mathcal{R}(Y, \gamma')\gamma' \rangle dt - \alpha \int_0^{t_0} \langle Y, Z'' + \mathcal{R}(Z, \gamma')\gamma' \rangle dt \\ &= -2\alpha \int_0^{t_0} \langle Z, Y'' + \mathcal{R}(Y, \gamma')\gamma' \rangle dt + \alpha \int_0^{t_0} (\langle Z, Y' \rangle - \langle Y, Z' \rangle)' dt \\ &= -2\alpha \int_0^{t_0} \langle Z, Y'' + \mathcal{R}(Y, \gamma')\gamma' \rangle dt + \alpha(\langle Z(t_0), Y'(t_0) \rangle - \langle Y(t_0), Z'(t_0) \rangle) \\ &= -2\alpha \int_0^{t_0} \langle Z, Y'' + \mathcal{R}(Y, \gamma')\gamma' \rangle dt - \alpha \|Y'(t_0)\|^2 \\ &= -\alpha \|Y'(t_0)\|^2 \quad (\text{da } Y \text{ ein Jacobifeld ist}) \\ I_3 &= \alpha^2 I_\gamma(Z, Z) . \end{aligned}$$

Dann gilt für die Variation der Bogenlänge

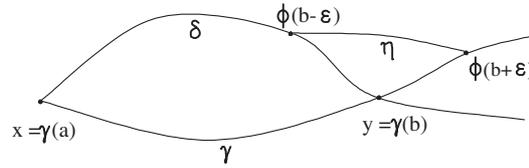
$$\begin{aligned} L'_\alpha(0) &= 0 \\ L''_\alpha(0) &= I_\gamma(Y_\alpha, Y_\alpha) = \alpha^2 I_\gamma(Z, Z) - \alpha \|Y'(t_0)\|^2 \\ &= -\alpha(\|Y'(t_0)\|^2 - \alpha I_\gamma(Z, Z)) \end{aligned}$$

Ist α hinreichend klein, so ist $\|Y'(t_0)\| - \alpha I_\gamma(Z, Z) > 0$, also $L''_\alpha(0) < 0$. Für diese α ist V_α eine Variation von γ , für die $l(\gamma)$ ein striktes lokales Minimum von $L(V_\alpha(\cdot, s))$ ist. Also gilt

$$L(V_\alpha(\cdot, s)) < L(\gamma) \quad \forall s \in (-\varepsilon, \varepsilon) \setminus \{0\} .$$

□

Satz 3.49. Sei (M, g) eine vollständige Riemannsche Mannigfaltigkeit. Seien $\gamma, \delta : [a, b] \rightarrow M$ zwei verschiedene gleichlange Geodäten, die zwei Punkte x und y verbinden.



Dann ist $\gamma : [a, b + \epsilon] \rightarrow M$ nicht minimierend (für beliebige $\epsilon > 0$).

Beweis: Sei $\epsilon > 0$ und bezeichne $\phi : [a, b + \epsilon] \rightarrow M$ die Kurve

$$\phi(t) = \begin{cases} \delta(t) & t \leq b \\ \gamma(t) & t \geq b. \end{cases}$$

Da (M, g) vollständig ist, existiert nach dem Satz von Hopf und Rinow eine minimierende Geodäte η von $\phi(b - \epsilon')$ nach $\phi(b + \epsilon')$, wobei $0 < \epsilon' < \epsilon$. Da ϕ in $\phi(b)$ eine "Ecke" hat, ist $\phi|_{[b - \epsilon', b + \epsilon']}$ nicht minimierend zwischen $\phi(b - \epsilon')$ und $\phi(b + \epsilon') = \gamma(b + \epsilon')$. Folglich gilt

$$l(\phi|_{[b - \epsilon', b + \epsilon']}) > d(\phi(b - \epsilon'), \phi(b + \epsilon')).$$

Folglich existiert eine Kurve zwischen $x = \gamma(a)$ und $z = \gamma(b + \epsilon')$, die kürzer ist als $\phi|_{[a, b + \epsilon']}$. Da $l(\delta|_{[a, b]}) = l(\phi|_{[a, b]}) = l(\gamma|_{[a, b]})$ und $\phi|_{[b, b + \epsilon']} = \gamma|_{[b, b + \epsilon']}$, existiert eine Kurve von x nach z , die kürzer ist als $\gamma|_{[a, b + \epsilon']}$. Folglich ist $\gamma|_{[a, b + \epsilon']}$ nicht minimierend zwischen x und z .

□

Im folgenden sei (M, g) eine vollständige Riemannsche Mannigfaltigkeit, $x \in M$ und $\exp_x : T_x M \rightarrow M$ die Exponentialabbildung. Wir wollen nun den Diffeomorphiebereich von \exp_x studieren.

Sei $v \in T_x M$ und $\gamma_v : \mathbb{R} \rightarrow M$ die eindeutig bestimmte Geodäte mit $\gamma_v(0) = x$ und $\gamma'_v(0) = v$. Bezeichne

$$J_v := \{t \in \mathbb{R} \mid \gamma_v \text{ ist minimierend auf } [0, t]\} \subset \mathbb{R}.$$

Dann gilt:

- $t_0 \in J_v \Rightarrow [0, t_0] \subset J_v$ (Dreiecksungleichung)
- J_v ist abgeschlossen:

Seien $t_n \in J_v$ und konvergiere $t_n \rightarrow t \in \mathbb{R}$. Dann gilt

$$d(\gamma_v(t_n), x) = t_n \cdot \|v\| \rightarrow t \cdot \|v\|$$

und da d stetig ist, folgt

$$d(\gamma_v(t), x) = t \cdot \|v\| = l(\gamma_v|_{[0, t]}),$$

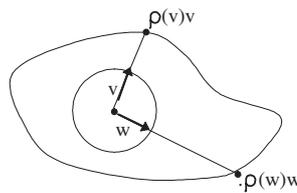
d.h. $t \in J_v$.

Sei nun $\rho(v) = \max J_v \leq \infty$, d.h. $J_v = [0, \rho(v)]$. Dann gilt:

- $\rho(v)$ ist der größte Parameter t , für den $\gamma|_{[0,t]}$ noch minimierend ist.
- $\rho(v) = \lambda\rho(\lambda v) \quad \forall \lambda \in \mathbb{R}$, da $\gamma_{\lambda v}(t) = \gamma_v(\lambda t)$.
- $\rho : \{v \in T_x M \mid \|v\| = 1\} \rightarrow \mathbb{R}$ ist stetig und von unten beschränkt durch $c > 0$ (siehe Kobayashi / Nomizu, Teil II, S. 98).

Wir betrachten nun die offene Menge $U_x \subset T_x M$

$$U_x := \{t \cdot v \mid v \in T_x M, \|v\| = 1, 0 \leq t < \rho(v)\}$$



Nach Umnormierung kann man U_x auch in der folgenden Form schreiben

$$\begin{aligned} U_x &= \left\{ w \in T_x M \mid \|w\| < \rho\left(\frac{w}{\|w\|}\right) \right\} \\ &= \{w \in T_x M \mid 1 < \rho(w)\} \\ &= \{w \in T_x M \mid \text{es existiert ein } \varepsilon > 0, \text{ so dass } \gamma_w|_{[0,1+\varepsilon]} \text{ minimierend ist.} \} \end{aligned}$$

Definition. Die Menge

$$\text{Cut}(x) := \exp_x(\partial U_x) = \{\gamma_v(\rho(v)) \mid v \in T_x M, \|v\| = 1\}$$

heißt der Schnittort von x .

Satz 3.50. Sei (M, g) eine vollständige Riemannsche Mannigfaltigkeit. Dann gilt für jedes $x \in M$:

1. $M = \exp_x(U_x) \dot{\cup} \text{Cut}(x)$
2. $\exp_x : U_x \rightarrow M \setminus \text{Cut}(x)$ ist ein Diffeomorphismus.
3. $y \in \text{Cut}(x)$ genau dann, wenn es 2 verschiedene minimierende Geodäten von x nach y gibt oder y zu x entlang einer Geodäten konjugiert ist. Insbesondere gilt:

$$x \in \text{Cut}(y) \Leftrightarrow y \in \text{Cut}(x).$$

Beweis:

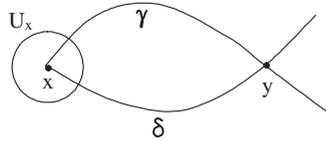
1. Behauptung: $M = \exp_x(U_x) \cup \exp_x(\partial U_x)$:

Sei $y \in M$. Dann existiert nach dem Satz von Hopf / Rinow eine Geodäte γ von x nach y und $d(x, y) = l(\gamma)$. Sei $\gamma : [0, 1] \rightarrow M, \gamma(0) = x, \gamma(1) = y$ und bezeichne $v := \gamma'(0)$. Dann ist $\rho(v) \geq 1$, also $v \in U_x \cup \partial U_x$ und somit $y \in \exp_x(U_x) \cup \exp_x(\partial U_x)$.

2. Die Vereinigung $\exp_x(U_x) \cup \exp_x(\partial U_x)$ ist disjunkt:

Sei $y \in \exp_x(U_x) \cap \text{Cut}(x)$. Da $y \in \exp_x(U_x)$, existiert eine Geodäte $\gamma : \mathbb{R} \rightarrow M$ mit $\gamma(0) = x, \gamma(l) = y$ und $\gamma|_{[0, l+\varepsilon]}$ ist minimierend für ein $\varepsilon > 0$.

Da $y \in \text{Cut}(x) = \exp_x(\partial U_x)$, existiert eine Geodäte δ mit $\delta(0) = x$ und $\delta(b) = y$, die bis b minimierend ist und danach nicht mehr. Dann müssen die Geodäten γ und δ verschieden sein.



Dann kann aber γ nicht minimierend auf $[0, l + \varepsilon]$ sein (Satz 3.49). Dies ist ein Widerspruch, d.h. $M = \exp_x(U_x) \dot{\cup} \text{Cut}(x)$ ist eine disjunkte Vereinigung.

Insbesondere ist $\exp_x : U_x \rightarrow M \setminus \text{Cut}(x)$ surjektiv.

3. Wir zeigen, dass $\exp_x : U_x \rightarrow M \setminus \text{Cut}(x)$ ein Diffeomorphismus ist:

Nach Satz 3.49 und der Definition von U_x ist $\exp_x : U_x \rightarrow \text{Cut}(x)$ injektiv. Nach Satz 3.48 gilt: Ist $v \in U_x$, so sind x und $\exp_x(v) = y$ nicht zueinander konjugiert entlang $\gamma_v(t) = \exp_x(tv)$. Nach Satz 3.44 ist dann $(d\exp_x)_v : T_v(T_x M) \rightarrow T_y M$ ein Isomorphismus, also ein lokaler Diffeomorphismus. Da $\exp_x : U_x \rightarrow M \setminus \text{Cut}(x)$ auch bijektiv ist, ist $\exp_x : U_x \rightarrow M \setminus \text{Cut}(x)$ ein Diffeomorphismus.

□

Wir haben also einen Diffeomorphismus $\exp_x : U_x \rightarrow M \setminus \text{Cut}(x)$ und für den Schnittpunkt $\text{Cut}(x)$ gilt

$\text{Cut}(x) = \{y \in M \mid \text{es existiert eine minimale Geodäte von } x \text{ nach } y, \text{ die danach nicht mehr minimierend ist.}\}$

Definition. Sei (M, g) eine vollständige Riemannsche Mannigfaltigkeit. Dann heißt

$$r_{\text{inj}}(x) := d(x, \text{Cut}(x))$$

Injektivitätsradius von (M, g) in $x \in M$.

$$r_{\text{inj}}(M) = \inf_{x \in M} r_{\text{inj}}(x)$$

heißt Injektivitätsradius von (M, g) .

Nach Definition von $\text{Cut}(x)$ gilt dann

$$\exp_x(K(0, r_{\text{inj}}(x))) = B_{r_{\text{inj}}(x)}(x)$$

$B_{r_{\text{inj}}(x)}(x)$ ist die maximale geodätische Kugel um x , auf der \exp_x ein Diffeomorphismus ist.

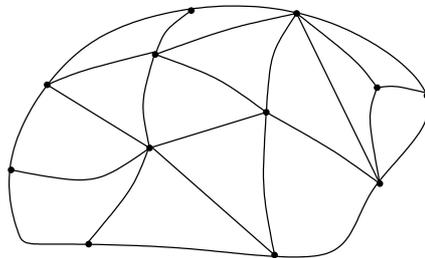
Kapitel 4

Krümmung und Topologie - Einige Beispiele

4.1 Der Satz vom Gauß - Bonnet

Aus der Differentialtopologie ist bekannt:

1. Jede glatte orientierbare zsh. 2-dim. MF M^2 ist *triangulierbar*, d.h vollständig durch ein Netz von "Dreiecken" zu überdecken. ("Dreieck" bedeutet diffeomorph zu einem Dreieck).



2. Sei eine Triangulierung einer komp. MF M^2 fixiert, dann bezeichne

- e_0 =Anzahl der Ecken
- e_1 =Anzahl der Kanten
- e_2 =Anzahl der Dreiecke

Daraus definieren wir

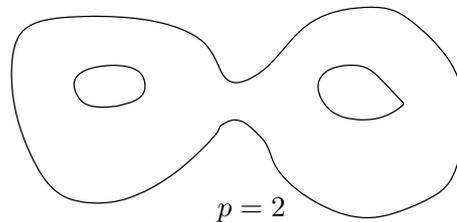
$$\chi(M) := e_0 - e_1 + e_2 \quad \text{Eulersche Charakteristik}$$

$\chi(M)$ ist eine topologische Invariante.

3. Ist M^2 eine zsh., komp., orientierte Fläche, dann ist M^2 homöomorph zu

$$M^2 \cong S^2 \# \underbrace{T^2 \# \dots \# T^2}_{p\text{-mal}} =: F_p$$

wobei $\chi(M^2) = 2(1-p)$. Die Zahl p heißt "Geschlecht" von M^2 .



Ziel: Satz von Gauß - Bonnet

Sei ein M^2 kompakte, orientierbare und zsh. Fläche mit Riemannscher Metrik und Schnittkrümmung¹ $K \in C^\infty(M)$. Dann gilt

$$\underbrace{\int_M K dM}_{\text{Totalkrüm.}} = \underbrace{2\pi\chi(M)}_{\text{Unabhängig von } g!} = 4\pi(1-p)$$

Folgerungen

- M^2 ist diffeomorph zu S^2 ($p=0$) $\iff \int_M K dM > 0$
- M^2 ist diffeomorph zu T^2 ($p=1$) $\iff \int_M K dM = 0$
- M^2 ist diffeomorph zu F_p ($p > 1$) $\iff \int_M K dM < 0$

Im folgenden sei (M, g) stets eine kompakte, orientierte und zsh. Riemannsche MF der Dimension 2.

Mit ∇ bezeichnen wir ihren Levi-Civita-Zsh.

Sei $\gamma : I \subset \mathbb{R} \rightarrow M^2$ eine auf Bogenlänge parametrisierte Kurve auf M^2 . Dann sei

- $\tau(t) := \gamma'(t)$ der Tangentialvektor von γ , und
- $n(t) := D_{\frac{\tau}{|\tau|}}(\tau(t)) \in T_{\gamma(t)}M^2$ der Normalenvektor von $\gamma(t)$

Dabei bezeichne D_φ eine Drehung in positive Richtung, sodass

$$(\tau(t), n(t)) \in \mathcal{O}_{T_{\gamma(t)}M}$$

¹siehe dazu die Definition auf Seite 150

Wir betrachten das VF $\frac{\nabla \gamma'}{dt} \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$ entlang γ .

Da $g(\gamma', \gamma') \equiv 1$, folgt

$$g\left(\frac{\nabla \gamma'}{dt}, \gamma'\right) \equiv 0,$$

d.h. $\frac{\nabla \gamma'}{dt}(t)$ und $n(t)$ sind parallele Vektoren.

Folglich existiert eine Funktion

$$k_g : I \longrightarrow \mathbb{R}$$

mit

$$\frac{\nabla \gamma'}{dt} = k_g(t) \cdot n(t)$$

Definition. $k_g(t)$ heißt geodätische Krümmung von

$$\gamma : I \longrightarrow M^2$$

im Parameter t .

Bemerkung

Offensichtlich gilt

$$\gamma \text{ ist eine Geodäte} \Leftrightarrow \frac{\nabla \gamma'}{dt} \equiv 0 \Leftrightarrow k_g \equiv 0$$

Satz 4.1. [Lokale Version von Gauß-Bonnet]

Sei $U \subset M^2$ eine offene Teilmenge, sodass $cl(U)$ diffeomorph zu einer Kreisscheibe in einem Kartenbereich von M^2 ist. Dann gilt

$$\int_U K \, dM + \int_{\partial U} k_g = 2\pi \quad \text{mit} \quad \int_{\partial U} k_g := \int_0^l k_g(t) \, dt$$

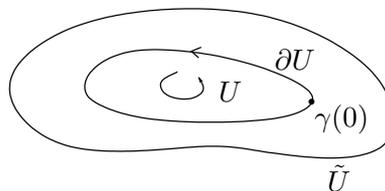
wobei k_g die Krümmung der auf Bogenlänge parametrisierten Parametrisierung

$$\gamma : [0, l] \longrightarrow \partial U$$

ist, bei der γ' der auf ∂U induzierten Orientierung entspricht.

Beweis:

Sei $U \subset M^2$ eine 2-dim. Untermannigfaltigkeit mit Rand $\partial U \cong S^1$.



Auf dem Kartenbereich \tilde{U} existieren globale Vektorfelder $X_1, X_2 \in \mathfrak{X}(\tilde{U})$, sodass $(X_1(x), X_2(x))$ eine positiv-orientierte ONB in $T_x \tilde{U}$ bilden.

1. Wir betrachten die 1-Form $\omega \in \Omega^1(\tilde{U})$

$$\omega := g(X_1, \nabla X_2)$$

Behauptung: $d\omega = K dM|_{\tilde{U}}$

Da (X_1, X_2) eine positiv-orientierte ONB ist, genügt es zu zeigen, dass

$$d\omega(X_1, X_2) = K.$$

Es gilt nun

$$\begin{aligned} d\omega(X_1, X_2) &= X_1(\omega(X_2)) - X_2(\omega(X_1)) - \omega([X_1, X_2]) \\ &= X_1(g(X_1, \nabla_{X_2} X_2) - X_2(g(X_1, \nabla_{X_1} X_2))) \\ &\quad - g(X_1, \nabla_{[X_1, X_2]} X_2) \\ &= g(\nabla_{X_1} X_1, \nabla_{X_2} X_2) + g(X_1, \nabla_{X_1} \nabla_{X_2} X_2) \\ &\quad - g(\nabla_{X_2} X_1, \nabla_{X_1} X_2) - g(X_1, \nabla_{X_2} \nabla_{X_1} X_2) \\ &\quad - g(X_1, \nabla_{[X_1, X_2]} X_2) \\ &= g(X_1, (\nabla_{X_1} \nabla_{X_2} - \nabla_{X_2} \nabla_{X_1} - \nabla_{[X_1, X_2]}) X_2) \\ &\quad + g(\nabla_{X_1} X_1, \nabla_{X_2} X_2) - g(\nabla_{X_1} X_1, \nabla_{X_1} X_2) \\ &= \underbrace{\mathcal{R}(X_1, X_2, X_2, X_1)}_K + g(\nabla_{X_1} X_1, \nabla_{X_2} X_2) - g(\nabla_{X_2} X_1, \nabla_{X_1} X_2) \end{aligned}$$

Da $g(X_i, X_i) \equiv 1$ folgt

- $\nabla_X X_1 \perp X_1$ für alle X und
- $\nabla_X X_2 \perp X_2$ für alle X .

Damit ist dann

$$\nabla_X X_1 = a(X) X_2 \quad \text{und} \quad \nabla_X X_2 = b(X) X_1.$$

Wir erhalten also

$$g(\nabla_{X_1} X_1, \nabla_{X_2} X_2) = a(X_1) \cdot b(X_2) \cdot g(X_2, X_1) = 0$$

und

$$g(\nabla_{X_2} X_1, \nabla_{X_1} X_2) = a(X_2) \cdot b(X_1) \cdot g(X_2, X_1) = 0.$$

Die Behauptung wäre damit gezeigt.

2. Aus dem Satz von Stokes folgt nun

$$\int_{\tilde{U}} K dM = \int_U d\omega = \int_{\partial U} \omega$$

Behauptung:

$$\int_{\partial U} \omega = - \int_{\partial U} k_g + 2\pi$$

Sei $\gamma : [0, l] \rightarrow \partial U$ eine auf Bogenlänge parametrisierte Parametrisierung von ∂U , entsprechend der induzierten Orientierung auf ∂U . (D.h. $(\partial U \setminus \gamma(0), \gamma^{-1})$ ist eine Karte von ∂U .)

Sei $X_i \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$ das Vektorfeld

$$X_i(t) := X_i(\gamma(t)) \quad i = 1, 2$$

und $(\tau(t), u(t))$ die Tangenten- und Normalvektoren in $\gamma(t)$.

Sei weiterhin $\varphi(t) := \angle(X_1(t), \tau(t))$, dann ist

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}}_{\text{Drehung um } \varphi} \begin{pmatrix} \tau \\ u \end{pmatrix} \quad (*)$$

Da γ eine Parametrisierung von $\partial U \setminus \gamma(0)$ ist, ist mit $\frac{\partial}{\partial t} = \gamma'(t) = \tau(t)$

$$\int_{\partial U} \omega = \int_0^l \omega \left(\frac{\partial}{\partial t} \right) dt = \int_0^l \omega(\gamma'(t)) dt \quad (**)$$

Weiterhin ist

$$\begin{aligned} \omega(\gamma'(t)) &= g(X_1, \nabla_{\gamma'(t)} X_2) \\ &\stackrel{(*)}{=} \cos \varphi(t) \cdot g(\tau(t), \nabla_{\gamma'(t)} X_2) - \sin \varphi(t) \cdot g(n, \nabla_{\gamma'} X_2) \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} \nabla_{\gamma'} X_2 &= \nabla_{\gamma'} (\sin \varphi(t) \cdot \tau(t) + \cos \varphi(t) \cdot n(t)) \\ &= \cos \varphi(t) \cdot \varphi'(t) \tau(t) + \sin \varphi(t) \cdot \frac{\nabla \gamma'}{dt} \\ &\quad - \sin \varphi(t) \cdot \varphi'(t) \cdot n(t) + \cos \varphi(t) \cdot \frac{\nabla n(t)}{dt} \end{aligned}$$

bzw.

$$\begin{aligned} \omega(\gamma'(t)) &= \cos^2 \varphi(t) \cdot \varphi'(t) + \cos \varphi(t) \cdot \sin \varphi(t) \cdot g \left(\gamma', \frac{\nabla \gamma'}{dt} \right) \\ &\quad - \cos^2 \varphi(t) \cdot g \left(\gamma', \frac{\nabla n(t)}{dt} \right) \\ &\quad - \sin^2 \varphi(t) \cdot g \left(n, \frac{\nabla \gamma'}{dt} \right) + (\sin^2 \varphi(t)) \varphi'(t) \\ &\quad - \cos \varphi(t) \cdot \sin \varphi(t) \cdot g \left(n(t), \frac{\nabla n(t)}{dt} \right) \end{aligned}$$

Da aber

- $g(n(t), n(t)) \equiv 1 \Rightarrow g(n, \frac{\nabla n}{dt}) = 0$
- $g(n(t), \tau(t)) \equiv 0 \Rightarrow g(n, \frac{\nabla \tau}{dt}) + g(\frac{\nabla n}{dt}, \tau) \equiv 0$
- $g(\gamma'(t), \gamma'(t)) \equiv 1 \Rightarrow g(\gamma', \frac{\nabla \gamma'}{dt}) \equiv 0$

und nach Definition $\frac{\nabla \gamma'}{dt} = k_g(t) \cdot n(t)$, folgt

$$\boxed{\omega(\gamma'(t)) = \varphi'(t) - k_g(t)}$$

Setzen wir dies in (***) ein, dann erhalten wir

$$\begin{aligned} \int_{\partial U} \omega &= \int_0^l \omega(\gamma'(t)) dt \\ &= \int_0^l \varphi'(t) dt - \int_0^l k_g(t) dt \\ &= (\varphi(l) - \varphi(0)) - \int_{\partial U} k_g \end{aligned}$$

Da ∂U eine einfach geschlossene Kurve ist, gilt für den Winkel

$$(\varphi(l) - \varphi(0)) = 2\pi,$$

womit die Behauptung bewiesen wäre.

Insgesamt ist also

$$\int_U K dM + \int_{\partial U} k_g = 2\pi.$$

□

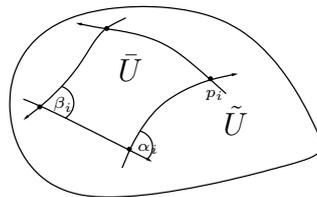
Satz 4.2. [Gauss-Bonnet für n-Ecke]

Sei $U \subset M^2$ offen und \tilde{U} liege in einem Kartengebiet von M^2 und sei diffeomorph zu einem N -Eck. Seien β_i die Innenwinkel und bezeichne

$$\alpha_i = \pi - \beta_i$$

dann gilt

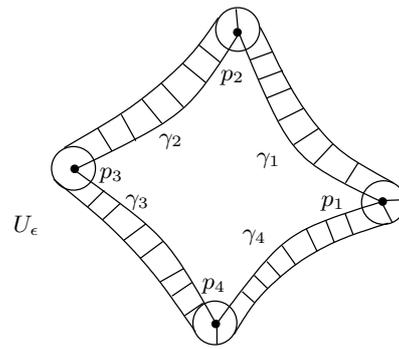
$$\int_U K dM + \int_{\partial U} k_g + \sum_{i=1}^n \alpha_i = 2\pi$$



Beweis:

Sei U_ϵ eine "geglättete" Umgebung von U :

$$\bar{U} \subset U_\epsilon \subset \tilde{U} \quad U_\epsilon \text{ ist diffeomorph zu einem Kreis } D^2$$



Dies \$U_\epsilon\$ bekommt man, indem man einen Kreisbogen um \$p_i\$ vom Radius \$\epsilon\$ (bzgl. \$d_g\$) und orthogonale Geodäten der Länge \$\epsilon\$ auf die \$\gamma_i\$ legt.

Auf dieses \$U_\epsilon\$ wenden wir nun Satz 4.1 an, dann folgt

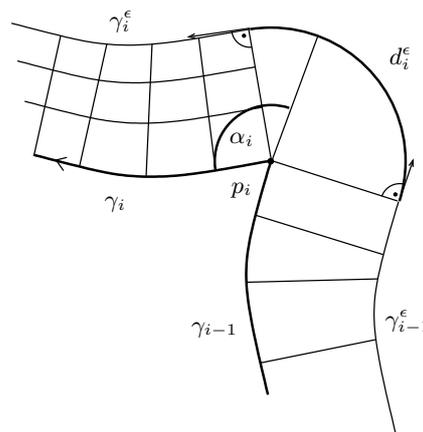
$$\int_{U_\epsilon} K dM + \int_{\partial U_\epsilon} k_g = 2\pi$$

aus der Stetigkeit des L-Maßes gilt dann für den Grenzwert

$$\int_{U_\epsilon} K dM \xrightarrow{\epsilon \rightarrow 0} \int_U K dM$$

Desweiteren ist

$$\int_{\partial U_\epsilon} k_g = \underbrace{\sum_{i=1}^n \int_{\gamma_i^\epsilon} k_g}_{\text{parallele Randstücke}} + \sum_{i=1}^n \underbrace{\int_{d_i^\epsilon} k_g}_{\text{Kreisbogenabschnitte}}$$



Da \$(\gamma_i^\epsilon)' \rightarrow \gamma_i'\$ und \$n_i^\epsilon \rightarrow n_i\$ für \$\epsilon \rightarrow 0\$, so geht auch \$k_g^{\gamma_i^\epsilon} \rightarrow k_g\$ und damit ist

$$\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \sum_i \int_{\gamma_i^\epsilon} k_g = \sum_i \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \int_{\gamma_i^\epsilon} k_g = \int_{\gamma_i} k_g = \int_{\partial U} k_g$$

Für die Kreisbögen gilt

Wie in Satz 4.1
(**)

$$\int_{d_i^\epsilon} k_g = \underbrace{\int_0^{l_i^\epsilon} \varphi'(t) dt}_{(*)} - \int_{d_i^\epsilon} \omega$$

Dabei ist

$$\begin{aligned} (*) &= \underbrace{\int_0^{l_i^\epsilon} \varphi'(t) dt}_{(*)} \\ &= \varphi(l_i^\epsilon) - \varphi(0) \\ &= \angle(x_1, (\delta_i^\epsilon)'(l_i^\epsilon)) - \angle(x_1, (\delta_i^\epsilon)'(0)) \\ &=: \alpha_i(\epsilon) \end{aligned}$$

Führt man nun den Grenzübergang $\epsilon \rightarrow 0$ durch, dann erhält man

$$\alpha_i(\epsilon) \longrightarrow \angle(v_1, v_2) = \alpha_i$$

und

$$\int_{d_i^\epsilon} \omega \longrightarrow 0,$$

da d_i^ϵ sich zu einem Punkt zusammen zieht.

Insgesamt ergibt dies dann

$$\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \int_{\partial U_\epsilon} k_g = \int_{\partial U} k_g + \sum_{i=1}^n \alpha_i$$

und dies verifiziert die Behauptung.

□

Folgerung [Winkelsumme in Geodätischen Δ]

Sei (M^2, g) eine 2-dim. RMF und $\Delta \subset M$ eine Geodätisches Dreieck, d.h Δ ist diffeom. zu einem Dreieck und seine Kanten bestehen aus Geodäten.

Seien weiterhin β_1, β_2 und β_3 die Innenwinkel von Δ , dann gilt

$$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = \pi + \int_{\Delta} K dM.$$

Innsbesondere ist dann

1. Für

- $K \equiv 0$ die Innenwinkelsumme $\sum \beta_i = \pi$,
- $K < 0$ die Innenwinkelsumme $\sum \beta_i < \pi$ und für
- $K > 0$ die Innenwinkelsumme $\sum \beta_i > \pi$.

Dies gilt für beliebige geodätische Δ .

2. Sei $K \equiv K_0$, dann ist

$$\sum \beta_i = \pi + K_0 \cdot \text{Vol}(\Delta),$$

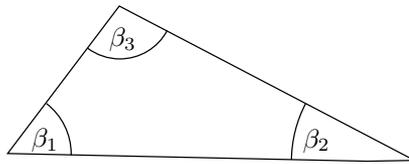
d.h. die Innenwinkelsumme hängt vom Volumen ab!

Modelle für Geometrien²

Sei (M^2, g) eine einfach-zsh. RMF.

1. Die *Euklidische Geometrie* $K \equiv 0$

Im \mathbb{R}^2 mit dem Standardvektorenprodukt sind die Geodäten die Geraden, ein geodätisches Δ hat folgende Gestalt

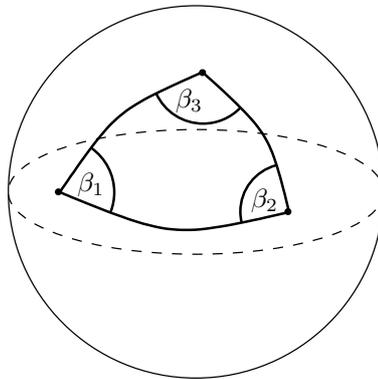


Für die Innenwinkel gilt nun wie zu erwarten

$$\sum \beta_i = \pi$$

2. Die *Sphärische Geometrie* $K \equiv 1$

Hier sind die Geodäten gerade die Großkreise



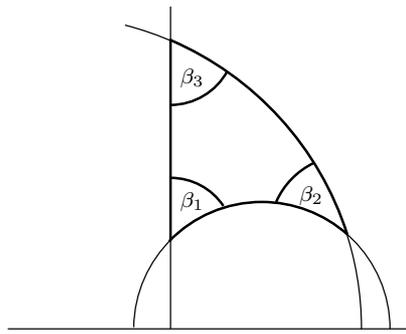
Die Innenwinkelsumme ist also

$$\sum \beta_i = \pi + \text{Vol}(\Delta) > \pi$$

3. Die *Hyperbolische Geometrie* $K \equiv -1$

Die geodätischen Δ haben hier die Gestalt

²siehe hierzu auch die Betrachtungen auf Seite 178



Für die Innenwinkelsumme ergibt sich deshalb

$$\sum \beta_i = \pi - \text{Vol}(\Delta) < \pi$$

Satz 4.3. [Gauß-Bonnet]

Sei (M^2, g) eine komp., orientierte, 2-dim. RMF mit Schnittkrümmung K , dann gilt

$$\int_M K dM = 2\pi\chi(M)$$

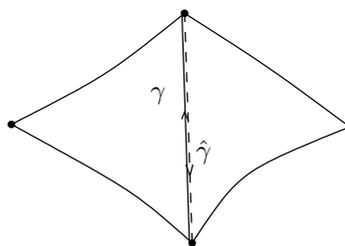
Beweis:

Wir triangulieren M (zerlegen es in Δ), dann gilt

$$\begin{aligned} \int_M K dM &= \sum_{\Delta} \int_{\Delta} K dM \\ &\stackrel{\text{Satz 4.2}}{=} \sum_{\Delta} \left(- \int_{\partial\Delta} k_g + \left(\sum_{i=1}^3 \beta_i(\Delta) \right) - \pi \right) \end{aligned}$$

(Wählen Δ so, dass $\bar{\Delta}$ in einem Kartenbereich liegt.)

In der Triangularisierung tritt jede Kante in genau 2 Δ mit der jeweils entgegengesetzten Orientierung auf!



Nach Def von k_g ist dann mit $\hat{\gamma}(t) := \gamma(l - t) = \gamma^-$

$$k_g^{\hat{\gamma}}(t) = -k_g^{\gamma}(l - t),$$

(Beim γ' und n' ändert sich nur das Vorzeichen.)

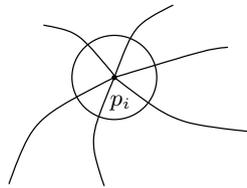
Es folgt also

$$\begin{aligned} \int_{-\Gamma} k_g &= \int_0^l k_g^{\hat{\gamma}}(s) ds = - \int_0^l k_g^{\gamma} \left(\underbrace{l-s}_t \right) ds \\ &= + \int_l^0 k_g^{\gamma}(t) dt = - \int_0^l k_g^{\gamma}(t) dt \\ &= - \int_{\Gamma} k_g \end{aligned}$$

und damit ist

$$\sum_{\Delta} \int_{\partial\Delta} k_g = 0.$$

Wir betrachten nun die Innenwinkelsummen:



In jeder Ecke ist die Summe der anliegenden Innenwinkel der Δ gleich 2π , sodass

$$\sum_{\Delta} \sum_{i=1}^3 \beta_i(\Delta) = 2\pi \cdot e_0,$$

und deshalb

$$\int_M K dM = 2\pi \cdot e_0 - e_2 \cdot \pi.$$

Nun hat jedes Δ 3 Kanten. Da aber jede Kante jeweils in 2 Δ vorkommt gilt für die Anzahl der Kanten e_1

$$e_1 = \frac{3}{2} \cdot e_2.$$

Es ergibt sich nun

$$\begin{aligned} \int_M K dM &= 2\pi \cdot e_0 - e_2 \cdot \pi = 2\pi \cdot e_0 + 2 \cdot e_2 \cdot \pi - 3 \cdot e_2 \cdot \pi \\ &= 2\pi (e_0 - e_1 + e_2) \\ &= 2\pi \cdot \chi(M^2). \end{aligned}$$

□

4.2 Semi - Riemannsche Überlagerungen und lokale Isometrien

Definition. Sei M eine glatte Mannigfaltigkeit. Eine Überlagerung von M ist ein Triebel (\tilde{M}, π, M) aus folgenden Objekten

1. \tilde{M} ist eine glatte MF.
2. $\pi : \tilde{M} \rightarrow M$ ist eine C^∞ -Abbildung
3. Für jeden Punkt $x \in M$ existiert eine offene, zsh. Umgebung $U(x) \subset M$, sodaß

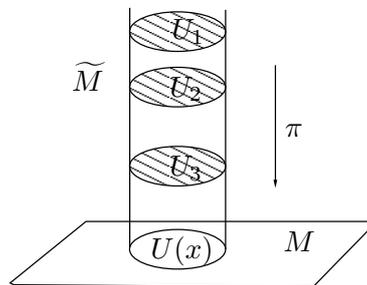
$$\pi^{-1}(U) = \dot{\bigcup}_{i \in I} U_i$$

wobei $U_i \subset \tilde{M}$ offene und paarweise disjunkte Mengen sind, für die

$$\pi|_{U_i} : U_i \rightarrow U$$

ein Diffeomorphismus ist.

Die Umgebung $U(x)$ heißt korrekt überlagerte Umgebung, die U_i heißen Blätter über U . Die Mannigfaltigkeit M heißt Basis, die Mannigfaltigkeit \tilde{M} Totalraum und die Abbildung π Projektion der Überlagerung (\tilde{M}, M, π) .



Ist die Anzahl der Blätter endlich, so spricht man von einer endlichen Überlagerung.

Bemerkung

Oft zeichnet man in (\tilde{M}, M, π) einen Basispunkt aus: Sei $x_0 \in M$ und $\tilde{x}_0 \in \pi^{-1}(x_0)$, so schreibt man auch

$$\pi : (\tilde{M}, \tilde{x}_0) \rightarrow (M, x_0)$$

als Überlagerung.

Beispiel 78. ÜBERLAGERUNGEN1. *Überlagerung der S^1*

Die Abbildung

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

liefert eine $\tilde{U}L$ der S^1 .2. *Überlagerung der S^1*

Die Abbildung

$$\begin{aligned} p_n : S^1 \subset \mathbb{C} &\longrightarrow S^1 \subset \mathbb{C} \\ z &\longmapsto z^n \end{aligned}$$

liefert eine n -fache Überlagerung der S^1 3. *Überlagerung des $\mathbb{R}P^n$ durch die S^n*

Hierzu verweisen wir auch auf das Bsp. 21.

Die Abbildung

$$\begin{aligned} \pi : S^n &\longrightarrow \mathbb{R}P^n = S^n / \{\pm 1\} \\ x &\longmapsto [x] \end{aligned}$$

liefert eine Überlagerung von $\mathbb{R}P^n$ 4. *Allgemein*

Sei Γ eine Gruppe von Diffeomorphismen die eigentlich diskontinuierlich wirkt, d.h. für jeden Punkt $x \in M$ existiert eine Umgebung $U(x)$, sodass

$$U(x) \cap g \cdot U(x) = \emptyset \quad \forall g \neq e \text{ aus } \Gamma.$$

Dann ist

$$\pi : M \longrightarrow M/\Gamma$$

eine Überlagerung.

Überlagerungen werden topologisch durch die Fundamentalgruppe $\pi_1(M)$ klassifiziert.³ Wir stellen hier die wichtigsten Fakten zusammen.

Definition. Seien $\sigma, \omega : [0, 1] \longrightarrow M$ zwei stetige Wege mit $\sigma(0) = \omega(0) = x$ und $\sigma(1) = \omega(1) = y$. Dann heißen σ und ω homotop bzgl. $\{0, 1\}$, ($\sigma \sim \omega$ bzgl. $\{0, 1\}$), falls es eine stetige Abbildung

$$H : [0, 1] \times [0, 1] \longrightarrow M$$

gibt, für die

- $H(t, 0) = \omega(t)$
- $H(t, 1) = \sigma(t)$

³siehe Vorlesung "Algebraische Topologie"

- $H(0, s) = x$
- $H(1, s) = y$

Die Abbildung H heißt Homotopie von σ und ω .

Mit

$$[\omega] := \{\sigma \in \Omega(x, y) \mid \sigma \sim \omega \text{ bzgl. } \{0, 1\}\}$$

bezeichnen wir die Homotopieklasse von ω .

Die Menge

$$\pi_1(M, x) := \{\text{Menge der Homotopieklassen von geschlossenen Wegen}\}$$

hat bezüglich der Operation

$$\begin{aligned} * : \pi_1(M, x) \times \pi_1(M, x) &\longrightarrow \pi_1(M, x), \\ [\omega] * [\sigma] &\longmapsto [\omega * \sigma] \end{aligned}$$

wobei

$$(\omega * \sigma)(t) := \begin{cases} \omega(2t) & \text{für } 0 \leq t \leq \frac{1}{2} \\ \sigma(2t - 1) & \text{für } \frac{1}{2} \leq t \leq 1 \end{cases},$$

eine Gruppenstruktur.

Definition. $\pi_1(M, x)$ heißt Fundamentalgruppe von (M) in x

Fakt 1 [Hochhebung von Wegen]

Ist (\tilde{M}, M, π) eine Überlagerung und $\tilde{x} \in \tilde{M}$. Sei

$$\gamma : I \longrightarrow M$$

eine glatte Kurve mit $\gamma(0) = \pi(\tilde{x})$. Dann existiert genau eine C^∞ -Kurve

$$\tilde{\gamma} : I \longrightarrow \tilde{M}$$

mit $\tilde{\gamma}(0) = \tilde{x}$ und $\pi \circ \tilde{\gamma} = \gamma$.

Fakt 2 [Homotopiehebungseigenschaft]

Ist

$$F : M \longrightarrow N$$

eine stetige Abbildung, so induziert sie einen Gruppenhomomorphismus

$$\begin{aligned} F_* : \pi_1(M, x) &\longrightarrow \pi_1(N, F(x)) \\ [\omega] &\longmapsto [F \circ \omega] \end{aligned}$$

Ist (\tilde{M}, M, π) eine ÜL, dann ist π_* injektiv.

Definition. Sei $\pi : (\tilde{M}, \tilde{x}_0) \longrightarrow (M, x_0)$ eine Überlagerung, dann heißt

$$\pi_* \left(\pi_1(\tilde{M}, \tilde{x}_0) \right) \subset \pi_1(M, x_0)$$

die Charakteristische Untergruppe einer Überlagerung. Wir bezeichnen sie mit $G(\tilde{M}, \tilde{x}_0)$

Fakt 3 [Klassifikationssatz]

Definition. Sei M eine zusammenhängende glatte MF. Zwei ÜL heißen äquivalent, falls ein Diffeomorphismus

$$F : \widetilde{M}_1 \longrightarrow \widetilde{M}_2$$

existiert, sodass

$$\pi_2 \circ F = \pi_1$$

Nun existiert eine Bijektion

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Äquivalenzklassen} \\ \text{von Überlagerungen} \\ \pi : E \rightarrow M, \\ E \text{ zsh.} \end{array} \right\} \iff \left\{ \begin{array}{l} \text{Konjugationsklassen} \\ \text{von Untergruppen} \\ H \subset \pi_1(M, x_0) \end{array} \right\}$$

wobei

$$(E, M, \pi) \longmapsto H := \pi_* (\pi_1(E, e_0)) \text{ mit } e_0 \in \pi^{-1}(x_0)$$

und

$$H \subset \pi_1(M, x_0) \longmapsto E := \Omega(M, x_0) / \sim_H$$

Seien hierbei ω_1 und ω_2 zwei Wege aus $\Omega(M, x_0)$, dann setzen wir

$$\omega_1 \sim_H \omega_2 \iff \omega_1(1) = \omega_2(1) \text{ und } [\omega_1 * \omega_2^{-1}] \in H.$$

Als Projektion nimmt man

$$\begin{aligned} \pi : E &\longrightarrow M. \\ [\omega] &\longmapsto \omega(1) \end{aligned}$$

Es gelten die folgenden beiden Sätze:

1. *Eindeutigkeitssatz*

Zwischen 2 zusammenhängenden Überlagerungen (E_1, e_1) und (E_2, e_2) von (M, x_0) existiert genau dann ein basispunkterhaltender Diffeomorphismus f mit $\pi_1 = \pi_2 \circ f$ (E_1 und E_2 sind äquivalent), wenn sie die gleichen charakteristischen Untergruppen haben, d.h.

$$G(E_1, e_1) = G(E_2, e_2) \subset \pi_1(M, x_0).$$

2. *Existenzsatz*

Ist M eine zsh. MF und $G \subset \pi_1(M, x_0)$, dann gibt eine zsh. ÜL (E, M, π) mit $G(E, e_0) = G$.

Fakt 4 [Universelle Überlagerung]

Definition. Eine zsh MF M heißt einfach-zusammenhängend falls

$$\pi_1(M) = 1$$

Definition. Eine $\ddot{U}L (\tilde{M}, M, \pi)$ heißt universell, falls \tilde{M} einfach-zsh. ist.

Definition. Sei (\tilde{M}, M, π) eine $\ddot{U}L$. Eine Decktransformation ist ein Automorphismus

$$\phi \in \text{Aut}(\tilde{M}) \subset \text{Diff}(\tilde{M}),$$

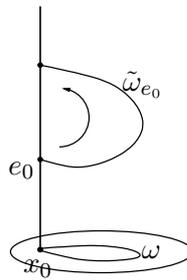
der die Fasern respektiert, d.h. es gilt $\pi \circ \phi = \pi$.

Die Gruppe der Decktransformationen bezeichnen wir mit $\text{Deck}(\pi)$.

Jede zusammenhängende Mannigfaltigkeit M besitzt eine bis auf Äquivalenz eindeutig bestimmte universelle $\ddot{U}L \tilde{M}$. Die Fasern der Überlagerung sind mit $\pi_1(M, x_0)$ zu identifizieren:

1. Wir zeigen $\pi_1(M, x_0) \cong \pi^{-1}(x_0)$.

Sei $[\omega] \in \pi_1(M, x_0)$ und $\tilde{\omega}_{e_0} : I \rightarrow \tilde{M}$ ein Lift von ω mit $\tilde{\omega}_{e_0}(0) = e_0$.



Dann ist die Abbildung

$$\begin{aligned} \pi_1(M, x_0) &\longrightarrow \pi^{-1}(x_0) \\ [\omega] &\longmapsto \tilde{\omega}_{e_0}(1) \end{aligned}$$

eine Bijektion.

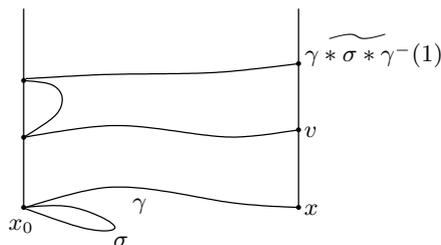
2. Wir zeigen $\text{Deck}(\pi) \cong \pi_1(\tilde{M}, \tilde{x}_0)$

Wir wollen nun eine Wirkung von $\pi_1(M, x_0)$ auf \tilde{M} realisieren, die die Fasern respektiert.

Sei dazu $[\omega] \in \pi_1(M, x_0)$ fixiert, und $v \in \pi^{-1}(x) \subset \tilde{M}$ beliebig mit. Da M zusammenhängend und damit auch wegzsh. ist, existiert ein Weg

$$\gamma : [0, 1] \longrightarrow M$$

mit $\gamma(0) = x_0$ und $\gamma(1) = x$.



Damit ist

$$\begin{aligned} \pi_1(M, x_0) \times \widetilde{M} &\longrightarrow \widetilde{M} \\ ([\sigma], v) &\longmapsto [\sigma] \cdot v := \gamma * \widetilde{\sigma} * \gamma^{-1}(1) \end{aligned}$$

eine fasertreue Wirkung.

Wir identifizieren nun $[\sigma] \in \pi_1(M, x_0)$ nach 1. mit $u = \tilde{\sigma}(1) \in \pi^{-1}(x_0)$. Da

$$G(\widetilde{M}, u) = G(\widetilde{M}, \tilde{x}_0) = \pi_*\left(\pi_1(\widetilde{M}, \tilde{x}_0)\right) = \pi_*(1) = 1,$$

existiert nach dem Eindeutigkeitssatz⁴ eine Dektransformation $f_{[\sigma]}$ mit $f(\tilde{x}_0) = u$.

Sei andererseits $f \in Deck(\pi)$, dann betrachten wir $f(\tilde{x}_0) \in \pi^{-1}(x_0)$. Nach 1. entspricht dies einem $[\sigma]$ aus $\pi_1(M, x_0)$.

Wir haben also

$$Deck(\pi) \cong \pi_1(M, x_0) \cong \pi^{-1}(x_0)$$

Darüberhinaus wirkt $Deck(\pi)$ eigentlich diskontinuierlich auf \widetilde{M} , mit Bsp 78.4 ist damit $(\widetilde{M}, \widetilde{M}/\Gamma, p)$ eine Überlagerung. Insbesondere ist damit \widetilde{M}/Γ eine MF.

Die Projektion $\pi : \widetilde{M} \longrightarrow M$ liefert dann einen Diffeomorphismus

$$\begin{aligned} \bar{\pi} : \widetilde{M}/\Gamma &\longrightarrow M. \\ [\tilde{m}] &\longmapsto \pi(m) \end{aligned}$$

Definition. Seien (M, g) und $(\widetilde{M}, \tilde{g})$ semi-Riemannsche MF. Eine Abbildung

$$\phi : (\widetilde{M}, \tilde{g}) \longrightarrow (M, g)$$

heißt semi-Riemannsche Überlagerung, falls

- (\widetilde{M}, M, ϕ) eine Überlagerung ist, und
- ϕ eine lokale Isometrie, d.h.

$$\phi^*g = \tilde{g}$$

Als nächstes beweisen wir ein nützliches Kriterium, das angibt, wann eine lokale Isometrie eine semi-Riemannsche Überlagerung ist.

Satz 4.4. [Liftungsbedingung]

Sei $\phi : (N, h) \longrightarrow (M, g)$ eine lokale Isometrie. Habe ϕ zusätzlich die Eigenschaft:

Für jeden Punkt $x \in N$ und jede Geodäte

$$\sigma : [0, 1] \longrightarrow N$$

mit $\phi(x) = \sigma(0)$, existiert ein Lift

$$\tilde{\sigma} : [0, 1] \longrightarrow N$$

⁴sie Fakt 3 auf Seite 233

mit $\tilde{\sigma}(0) = x$ und $\phi \circ \tilde{\sigma} = \sigma$.

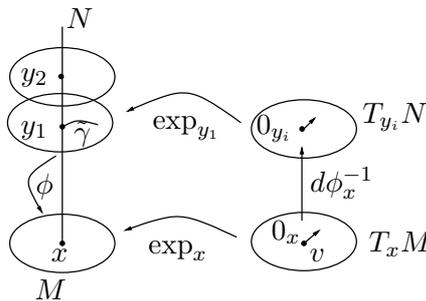
Dann ist

$$\phi : (N, h) \longrightarrow (M, g)$$

eine semi-Riemannsche ÜL.

Beweis:

1. ϕ ist surjektiv, da es zu je 2 Punkten $x, y \in M$ eine gebrochene Geodäte von x nach y gibt.
2. Sei $U \subset M$ eine Normalenumgebung von $x \in M$. Wir zeigen, dass U korrekt überlagert ist



Sei $\tilde{U} \subset T_xM$ sternförmig bezüglich 0_x und

$$\exp_x : \tilde{U} \longrightarrow U(x)$$

ein Diffeomorphismus.

Wir betrachten einen Punkt $y \in \phi^{-1}(x)$. Nach Vor. ist

$$d\phi_y : T_yN \longrightarrow T_xM$$

ein linearer Isomorphismus. Somit ist

$$\tilde{U}(y) := d\phi_x^{-1}(\tilde{U}) \subset T_yN$$

auch sternförmig bzgl. 0_y .

(a) *Behauptung:* \exp_y ist auf $\tilde{U}(y)$ definiert.

Sei $v \in \tilde{U}(y) \subset T_yN$. Dann ist

$$\hat{v} = d\phi_y(v) \in \tilde{U} \subset T_xM$$

und somit existiert eine radiale Geodäte

$$\gamma_{\hat{v}} : [0, 1] \longrightarrow N$$

mit $\gamma_{\hat{v}}(0) = x$ und $\gamma'_{\hat{v}}(0) = \hat{v}$. Nach Vor. existiert ein Lift

$$\tilde{\gamma} : [0, 1] \longrightarrow N$$

mit $\tilde{\gamma}(0) = y$ und $\phi \circ \tilde{\gamma} = \gamma_{\hat{v}}$. Da aber ϕ eine lokale Isometrie ist, ist $\tilde{\gamma}$ eine Geodäte von (N, h) und

$$d\phi_y(\tilde{\gamma}'(0)) = \gamma'_{\hat{v}}(0) = \hat{v}.$$

Damit ist $\tilde{\gamma}'(0) = v$ und deshalb

$$\tilde{\gamma} = \tilde{\gamma}_v$$

D.h. $\exp_y(v) = \tilde{\gamma}_v(1)$ existiert.

(b) *Behauptung:*

$$\exp_y : \tilde{U}(y) \longrightarrow U(y) := \exp_y(\tilde{U}(y))$$

ist ein Diffeomorphismus.

i. Nach der Kettenregel und der Definition der Exponentialabbildung gilt

$$\underbrace{\exp_x \circ d\phi_y}_{Diffeo} = \phi \circ \exp_y : \tilde{U}(y) \longrightarrow U(x) \quad (*)$$

woraus die Injektivität bzw. die Bijektivität von

$$\exp_y : \tilde{U}(y) \longrightarrow U(y)$$

folgt.

ii. Differenziert man (*), dann sieht man, dass aus

$$\underbrace{d(\exp_x)_{d(\phi_y)(v)}(d\phi_y)_v}_{Isom \forall v \in \tilde{U}} = d\phi_{\gamma_v(1)}(d\exp_y)_v$$

auch Isomorphie von

$$(d\exp_y)_v : T_v(T_y N) \longrightarrow T_{\gamma_v(1)} N$$

folgt, sodaß \exp_y ein lokaler Diffeomorphismus ist. Insbesondere ist dann auch

$$\exp_y : \underbrace{\tilde{U}(y)}_{sternf.} \longrightarrow U(y)$$

ein Diffeomorphismus.

Wir haben also gezeigt, das $U(y)$ eine Normalenumgebung von y in (N, h) ist. Desweiteren ist damit

$$\phi : U(y) \longrightarrow U(x)$$

ein Diffeomorphismus, da

$$\phi = \exp_x \circ d\phi_y \circ \exp_y^{-1}.$$

(c) Es bleibt zu zeigen, dass sich $\phi^{-1}(U)$ in die Normalenumgebungen

$$\{U(y) \mid y \in \phi^{-1}(x)\}$$

blättert, d.h.

$$\phi^{-1}(U) = \dot{\bigcup} \{U(y) \mid y \in \phi^{-1}(x)\}$$

- i. Seien $y_1 \neq y_2$ aus $\phi^{-1}(x)$. Angenommen es ex. ein $z \in U(y_1) \cap U(y_2)$.
Seien

$$\sigma_i : [0, 1] \longrightarrow N$$

die radialen Geodäten von z nach y_i . Dann sind

$$(\phi \circ \sigma_i) : [0, 1] \longrightarrow U(x)$$

radiale Geodäten von x nach $\phi(z)$. Da $U(x)$ eine Normalenumgebung ist, folgt

$$\phi(\sigma_1) = \phi(\sigma_2)$$

sodass

$$d\phi_z(\sigma_1'(0)) = d\phi_z(\sigma_2'(0)),$$

Und da $d\phi$ nach Voraussetzung ein Isomorphismus ist, folgt jedoch

$$\sigma_1'(0) = \sigma_2'(0) \Rightarrow \sigma_1 \equiv \sigma_2 \Rightarrow y_1 = y_2.$$

Widerspruch!

- ii. Sei $z \in \phi^{-1}(x)$.

Behauptung: $z \in U(y_i)$ für ein $y_i \in \phi^{-1}(x)$.

Dazu betrachten wir die Geodäte

$$\sigma : [0, 1] \longrightarrow U(x) \subset M$$

mit $\sigma(0) = x$ und $\sigma(1) = \phi(z)$. ($\sigma(t) = \exp_x(t \exp_x^{-1}(\phi(z)))$). Nach Vor.
ex. ein Lift

$$\tilde{\sigma} : [0, 1] \longrightarrow N$$

und $\tilde{\sigma}(1) = z$. Dann betrachten wir

$$y := \tilde{\sigma}(0) \in \phi^{-1}(x).$$

Damit ist $\tilde{\sigma}([0, 1]) \subset U(y)$.

□

Satz 4.5. Sei $\phi : (N, h) \longrightarrow (M, g)$ eine surjektive lokale Isometrie und M zsh. Dann gilt:

(N, h) ist geodätisch vollständig. $\iff (M, g)$ ist geodätisch vollständig und (N, M, ϕ) ist eine ÜL.

Beweis:

1. Sei (N, M, ϕ) eine ÜL und (M, g) geodätisch vollständig

Behauptung: (N, h) ist geodätisch vollständig.

Sei $x \in N$ und $v \in T_x N$. Bezeichne

$$\gamma : \mathbb{R} \longrightarrow M$$

die Maximale Geodäte mit $\gamma(0) = \phi(x)$ und $\gamma'(0) = d\phi_x(v)$.

Da ϕ eine ÜL ist, existiert eine eindeutiger Lift

$$\tilde{\gamma} : \mathbb{R} \longrightarrow N$$

mit $\tilde{\gamma}(0) = x$ und $\phi \circ \tilde{\gamma} = \gamma$. Durch die Isometrieeigenschaft von ϕ ist nun auch $\tilde{\gamma}$ eine Geodäte, die auf ganz \mathbb{R} definiert ist. Daraus folgt dann die Behauptung.

2. Sei (N, h) vollständig

Behauptung: (M, g) ist geodätisch vollständig.

Sei $x \in M$ und $v \in T_x M$. Wir wählen ein $y \in \phi^{-1}(x)$ und betrachten die maximale Geodäte

$$\tilde{\gamma} : \mathbb{R} \longrightarrow N$$

mit $\tilde{\gamma}(0) = y$ und $\tilde{\gamma}'(0) = d\phi_y^{-1}(v)$. Da ϕ eine lokale Isometrie ist, ist

$$\gamma := \phi \circ \tilde{\gamma}$$

eine Geodäte.

3. Sei (M, h) vollständig.

Behauptung: (N, M, ϕ) ist eine ÜL.

Dazu zeigen wir, dass das Liftungskriterium von Satz 4.4 erfüllt ist.

Sei

$$\sigma : [0, 1] \longrightarrow M$$

eine Geodäte in (M, g) mit $\sigma(0) = \phi(y) = x$. Sei $v = d\phi_x^{-1}(\sigma'(0))$ und

$$\gamma_v : \mathbb{R} \longrightarrow N$$

die maximale Geodäte in (N, h) mit $\gamma_v(0) = y$ und $\gamma_v'(0) = v$.

Wegen der Eindeutigkeit der Geodäte ist dann

$$\phi \circ \gamma_v|_{[0,1]} = \sigma$$

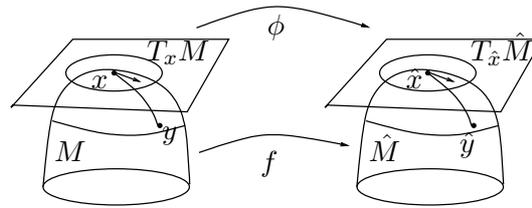
also ein geodätischer Lift von σ .

□

Seien (M, g) und (\hat{M}, \hat{g}) zwei semi-Riem. Mannigfaltigkeiten und

$$\varphi : T_x M \longrightarrow T_{\hat{x}} \hat{M}$$

eine *linere* Isometrie.



Sei $U(x) \subset M$ eine Normalenumgebung, sodass

$$\varphi(\exp_x^{-1}(U(x))) \in DB(\exp \hat{x}).$$

Wir betrachten die Abbildung f

$$\begin{aligned} f U(x) &\longrightarrow \hat{M} \\ y &\longmapsto \exp \cdot \circ \varphi \circ \exp_x^{-1}(y) \end{aligned}$$

Wann ist f eine lokale Isometrie? Die kann man der Krümmung ansehen!

Zuerst einige Bezeichnungen:

Sei $y \in U(x)$ und

$$\gamma : [0, 1] \longrightarrow U(x)$$

die radiale Geodäte von x nach y . Bezeichne

$$\hat{\gamma} : [0, 1] \longrightarrow \hat{U}(\hat{x}) = f(U(x))$$

die radiale Geodäte mit $\hat{\gamma}(0) = \hat{x}$ und $\hat{\gamma}'(0) = \varphi(\gamma'(0))$. Dann ist

$$\hat{\gamma}(t) = f(\gamma(t)).$$

Sei

$$\mathcal{P}_t : T_x M \longrightarrow T_{\gamma(t)} M$$

die Parallelverschiebung entlang γ bzgl. des LC von (M, g) und

$$\hat{\mathcal{P}}_t : T_{\hat{x}} \hat{M} \longrightarrow T_{\hat{\gamma}(t)} \hat{M}$$

die Parallelverschiebung entlang $\hat{\gamma}$ in (\hat{M}, \hat{g}) .

Sei weiterhin

$$\begin{aligned} \phi_t : T_{\gamma(t)} M &\longrightarrow T_{\hat{\gamma}(t)} \hat{M} \\ v &\longmapsto \hat{\mathcal{P}}_t \circ \phi \circ \mathcal{P}_t^{-1}(v) \end{aligned}$$

Dann gilt der

Satz 4.6. (Cartan'51)

Ist für alle $y \in U(x)$ und $v, w, u, \tau \in T_y M$

$$\mathcal{R}_y(v, w, u, \tau) = \hat{\mathcal{R}}_{f(y)}(\phi_t(v), \phi_t(w), \phi_t(u), \phi_t(\tau))$$

so ist

$$f : U(x) \subset M \longrightarrow \hat{M}$$

eine lokale Isometrie, d.h.

$$f^* \hat{g} = g$$

Beweis:

Wir fixieren ein $v \in T_y M$. Sei $Y \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$ ein Jacobifeld entlang γ und $Y(0) = 0$ und $Y(l) = v$.

Sei weiterhin (e_1, \dots, e_n) eine ONB in $T_x M$ und $(e_1(t), \dots, e_n(t))$ die Parallelverschiebung entlang γ . Wir betrachten das VF $\hat{Y} \in \mathfrak{X}_{\hat{\gamma}}(\hat{M})$

$$\hat{Y}(t) := \phi_t(Y(t))$$

1. *Behauptung:* \hat{Y} ist ein Jacobifeld entlang $\hat{\gamma}$.

Betrachten dazu die Basisdarstellung von $Y(t)$:

$$Y(t) = \sum_{i=1}^n y_i(t) e_i(t)$$

$$\gamma'(t) = \sum_{k=1}^n x_k(t) e_k(t)$$

Für die Parallelverschobene ONB $(\hat{e}_1(t), \dots, \hat{e}_n(t))$ definiert durch

$$\hat{e}_i(t) := \phi_t(e_i(t))$$

gilt

$$\hat{Y}(t) = \sum_{i=1}^n y_i(t) \hat{e}_i(t)$$

$$\hat{\gamma}'(t) = \sum_{k=1}^n x_k(t) \hat{e}_k(t)$$

Da Y ein Jacobifeld ist folgt

$$\mathcal{R}(Y, \gamma') \gamma' + \gamma'' = 0$$

und daraus folgt

$$0 = y_j''(t) + \sum_{k,l,i} \mathcal{R}_{\gamma(t)}(e_i, e_k, e_l, e_j) y_i x_k x_l$$

$$\stackrel{V.or.}{=} y_j''(t) + \sum_{k,l,i} \hat{\mathcal{R}}_{\gamma(t)}(\hat{e}_i, \hat{e}_k, \hat{e}_l, \hat{e}_j) y_i x_k x_l$$

$$\Rightarrow 0 = \hat{y}'' + \hat{\mathcal{R}}_{\hat{\gamma}}(\hat{Y}, \hat{\gamma}') \hat{\gamma}' = 0$$

Somit ist \hat{Y} ein Jacobifeld entlang $\hat{\gamma}$.

Da die Parallelverschiebungen und φ Isometrien sind, gilt

$$g(Y(t), Y(t)) = \hat{g}(\hat{Y}(t), \hat{Y}(t))$$

2. *Behauptung:* f ist eine lokale Isometrie.

Zu zeigen ist, dass für alle $y \in U(x)$ und $v \in T_y M$ gilt

$$\hat{g}_{f(y)}(df_y(v), df_y(v)) = g_y(v, v).$$

Sei $Y \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$ das Jacobifeld entlang γ mit $Y(0) = 0$, $Y(l) = v$ und $\hat{Y}(t) = \phi_t(Y(t))$. Da

$$g(Y(t), Y(t)) \stackrel{!}{=} \hat{g}(\hat{Y}(t), \hat{Y}(t))$$

gilt es zu zeigen dass

$$\hat{Y}(l) = df_y(Y(l)).$$

Nach Satz 3.42 gilt für das Jacobiefeld \hat{Y} :

$$\hat{Y}(l) = (d\exp_{\hat{x}})_{l, \hat{\gamma}'(0)}(l \cdot \hat{\gamma}'(0)).$$

Nach Def. von \hat{y} ist $\hat{Y}(0) = \varphi(Y'(0))$, da

$$\begin{aligned} \frac{\nabla \hat{Y}}{dt}(0) &\stackrel{A}{=} \frac{d}{dt}(\hat{\mathcal{P}}_t^{-1}(\hat{Y}(t)))|_{t=0} = \frac{d}{dt} \left(\varphi \circ \underbrace{\mathcal{P}_t^{-1}(Y(t))}_{\in T_x M} \right) |_{t=0} \\ &= \varphi \left(\frac{\nabla Y}{dt}(0) \right) \end{aligned}$$

Somit folgt

$$\begin{aligned} \hat{Y}(l) &= (d\exp_{\hat{x}})_{l, \hat{\gamma}'(0)} \left(\varphi \left((d\exp_x)_{l, \gamma'(0)}^{-1} \circ \underbrace{(d\exp_x)_{l, \gamma'(0)}(l \cdot Y'(0))}_{Y(l)} \right) \right) \\ &= df_y(Y(l)) \end{aligned}$$

und f ist eine lokale Isometrie.

□

Folgerung

Sind (M^n, g) und (\hat{M}^n, \hat{g}) zwei semi-Riem. MF gleicher Signatur und gleicher, *konstanter* Schnittkrümmung $K \in \mathbb{R}$, so sind sie lokal isometrisch.

Beweis:

Wir fix. ein $x \in M$ und $\hat{x} \in \hat{M}$ beliebig. Da

$$sign(g_x) = sign(\hat{g}_{\hat{x}})$$

existiert eine lineare Isometrie

$$\begin{aligned} \varphi : T_x M &\longrightarrow T_{\hat{x}} \hat{M}. \\ \text{ONB} &\longmapsto \text{ONB} \end{aligned}$$

Nach Satz 3.17 haben die Krümmungstensoren die Gestalt

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_y(v, w, u, \tau) &= K(g(v, \tau) \cdot g(w, u) - g(v, u) \cdot g(w, \tau)) \\ &\stackrel{\parallel\text{-verschieb.}}{=} K(\hat{g}(\hat{v}, \hat{\tau}) \cdot \hat{g}(\hat{w}, \hat{u}) - \hat{g}(\hat{v}, \hat{u}) \cdot \hat{g}(\hat{w}, \hat{\tau})) \\ &= \hat{\mathcal{R}}_y \left(\underbrace{\phi_t(v)}_{\hat{v}}, \underbrace{\phi_t(w)}_{\hat{w}}, \underbrace{\phi_t(u)}_{\hat{u}}, \underbrace{\phi_t(\tau)}_{\hat{\tau}} \right) \end{aligned}$$

Aus dem letzten Satz folgt dann die Behauptung.

□

Satz 4.7. [Starrheitssatz]

Seien $f_1, f_2 : (M, g) \rightarrow (\hat{M}, \hat{g})$ zwei lokale Isometrien zwischen zusammenhängenden semi-Riem. MF. Ist $x \in M$ ein Punkt und

$$\begin{aligned} f_1(x) &= f_2(x) \\ (df_1)_x &= (df_2)_x \end{aligned}$$

so gilt

$$f_1 \equiv f_2$$

D.h. lokale Isometrien sind durch einen Punkt und dem Differential an diesem Punkt eindeutig bestimmt.

Beweis:

Sei

$$A = \left\{ y \in M \mid f_1(y) = f_2(y) \text{ und } (df_1)_y = (df_2)_y \right\}$$

Dann gilt:

1. $A \neq \emptyset$, da $x \in M$.
2. Wegen der Stetigkeit der f_i ist A abgeschlossen.
3. Wir zeigen: A ist offen.

Sei $y_0 \in A$ und $U(y_0)$ eine Normalenumgebung von y_0 .

Für ein $z \in U(y_0)$ existiert eine radiale Geodäte

$$\gamma_v : [0, 1] \rightarrow U(y_0)$$

mit $\gamma_v(0) = v$, $\gamma_v(1) = z$, $\gamma'_v(0) = v$ und $z = \exp_{y_0}(v)$.

Da die f_i lokale Isometrien sind, sind auch

$$\gamma_i(t) := f_i(\gamma_v(t))$$

Geodäten mit $\gamma_i(0) = f_i(y_0)$ und $\gamma'_i(0) = (df_i)_{y_0}(v)$.

Da aber $y_0 \in A$, stimmen die AWP überein, sodass

$$\gamma_1 \equiv \gamma_2 \Rightarrow (f_1 \equiv f_2 \text{ auf } U(y_0))$$

und insbesondere

$$(df_1)_z \equiv (df_2)_z \quad \forall z \in U(y_0).$$

Damit ist aber $U(y_0) \subset A$, und A offen.

Nun ist A offen, abgeschlossen und nicht leer. Da M zsh. ist, folgt also

$$A = M.$$

□

4.3 Die Sätze von Hadamard, Bonnet-Myers und Räume konstanter Krümmung

Satz 4.8. [Hadamard-Cartan-Thm.]

Sei (M^n, g) eine vollständige zsh. Riemannsche MF mit nichtpositiver Schnittkrümmung $K_E \leq 0$ für alle $x \in M$ und $E^2 \subset T_x M$, dann ist

$$\exp_x : T_x M \cong \mathbb{R}^n \longrightarrow M$$

eine glatte ÜL.

Da $\pi_1(\mathbb{R}^n) = 1$, ist $(\mathbb{R}^n, M, \exp_x)$ universell, und damit

$$M \cong \mathbb{R}^n / \Gamma$$

wobei Γ Gruppe der Decktransformationen $\text{Deck}(\pi)$.⁵

Beweis:

1. Sei $\gamma : \mathbb{R} \longrightarrow M$ eine Geodäte und die Schnittkrümmung entlang γ nicht positiv.

Behauptung: Auf γ liegen keine zu $x = \gamma(0)$ konjugierten Punkte.

Sei $Y \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$ ein Jacobifeld entlang γ und $\gamma(0) = 0$.

Wir betrachten die Funktion

$$h(t) = g(Y(t), Y(t)) \geq 0,$$

dann ist

$$\begin{aligned} h'(t) &= 2g(Y'(t), Y(t)) \\ h''(t) &= 2\{g(Y''(t), Y(t)) + g(Y'(t), Y'(t))\} \quad (*) \\ &= -2\underbrace{\mathcal{R}(Y, \gamma', \gamma', Y)}_{K \leq 0} + \|Y'(t)\|^2 \geq 0 \end{aligned}$$

- Aus $h(0) = 0$, $h'(0) = 0$ und $h''(0) > 0$ (da $Y'(0) \neq 0$) erkennt man, dass h in $t = 0$ ein lokales Minimum hat.
- Da $h''(t) > 0$ für alle $|t| < \epsilon$ ist h strikt konvex auf $(0, \epsilon)$ und da $h''(t) \geq 0$ für alle t , ist h konvex für alle t .

Demnach ist

$$h(t) > 0 \quad \forall t \neq 0$$

und deswegen auch $Y(t) \neq 0$ für alle $t \neq 0$, sodass auf γ kein zu $\gamma(0)$ konjugierter Punkt existiert.

Also ist $(d\exp_x)_{tv}$ nicht ausgeartet für alle $t \in \mathbb{R}$ und $v \in T_x M$ und demzufolge

$$\exp_x : T_x M \longrightarrow M$$

eine lokaler Diffeomorphismus um jeden Punkt $v \in T_x M$. Und da (M, g) vollständig ist, ist \exp_x außerdem *surjektiv*.

⁵siehe Fakt 4 auf Seite 233

2. Wir betrachten die Metrik $\tilde{g} := \exp_x^* g$ auf $T_x M$. Dann ist

$$\exp_x : (\mathbb{R}^n, \tilde{g}) \longrightarrow (M, g)$$

eine surjektive und lokale Isometrie. Deshalb sind die Geraden

$$\begin{aligned} \sigma_v : \mathbb{R} &\longrightarrow T_x M \cong \mathbb{R}^n \\ t &\longmapsto t \cdot v \end{aligned}$$

die Geodäten durch 0_x . Diese sind auf ganz \mathbb{R} definiert, sodass $(\mathbb{R}^n, \tilde{g})$ nach Satz von Hopf-Rinow vollständig ist. Satz 4.5 liefert nun dass

$$\exp_x : T_x M \cong \mathbb{R}^n \longrightarrow M$$

eine Riemannsche ÜL ist.

□

Folgerung

Ist M darüberhinaus noch einfach-zsh, so gilt

$$M^n \cong \mathbb{R}^n$$

Insbesondere existiert dann zu 2 Punkten x und y aus M genau eine Geodäte, die beide miteinander verbindet.

Satz 4.9. Sei M^n eine vollständige zsh. Riemannsche MF mit konstanter Schnittkrümmung K .

Dann ist die universelle Riemannsche ÜL \tilde{M} von M isometrisch zu ⁶

- \mathbb{H}^n , falls $K \equiv -1$
- \mathbb{R}^n , falls $K \equiv 0$
- S^n , falls $K \equiv 1$

Beweis:

Sei (\tilde{M}, M, π) die universelle ÜL und $\tilde{g} := \pi^* g$. Da (M, g) vollständig ist, ist auch nach Satz 4.5 auch (\tilde{M}, \tilde{g}) vollständig. Somit ist (\tilde{M}, \tilde{g}) eine einfachzusammenhängende RMF konstanter Schnittkrümmung $K \in \{-1, 0, 1\}$

1. Sei $K \leq 0$.

Wir bezeichnen

$$N := \begin{cases} \mathbb{R}^n & \text{falls } K = 0 \\ \mathbb{H}^n & \text{falls } K = -1 \end{cases}$$

Dann fixieren wir ein $x \in N$ und $\tilde{x} \in \tilde{M}$ und eine lineare Isometrie

$$\varphi : T_x N \longrightarrow T_{\tilde{x}} \tilde{M}.$$

⁶Siehe Beispiele 65,66 und 67 auf den Seiten 153ff.

Nach dem Satz von Hadamard (Satz 4.8) sind die Exponentialabbildungen

$$\exp_x : T_x N \longrightarrow N \quad \text{und}$$

$$\widetilde{\exp}_x : T_x \widetilde{M} \longrightarrow \widetilde{M}$$

Diffeomorphismen. Wir betrachten die Abbildung

$$f := \widetilde{\exp}_x \circ \varphi \circ \exp_x^{-1} : N \longrightarrow \widetilde{M}.$$

Diese ist ein Diffeomorphismus und nach der Folgerung von Satz 4.6 eine Isometrie, da die Krümmungen übereinstimmen.

2. Sei $K = 1$

Wir fixieren eine lineare Isometrie

$$\varphi : T_x S^n \longrightarrow T_x \widetilde{M}.$$

$S^n \setminus \{-x\}$ ist eine Normalenumgebung von x und damit

$$\exp_x^{-1} : S^n \setminus \{-x\} \longrightarrow \{v \in T_x S^n \mid \|v\| < \pi\}$$

ein Diffeomorphismus.

Nach Satz 4.6 ist dann

$$f := \widetilde{\exp}_x \circ \varphi \circ \exp_x^{-1} : S^n \setminus \{-x\} \longrightarrow \widetilde{M}$$

eine lokale Isometrie. Diese wollen wir in den Punkt $-x$ fortsetzen:

Dazu fix. wir ein $y \in S^n \setminus \{-x, x\}$ und betrachten den Punkt

$$\tilde{y} = f(y) \in \widetilde{M}$$

und die lineare Isometrie

$$\hat{\varphi} := df_y : T_y S^n \longrightarrow T_{\tilde{y}} \widetilde{M},$$

die von f induziert wird. Dann ist nach Satz 4.6 die Abbildung

$$\hat{f} := \widetilde{\exp}_{\tilde{y}} \circ \hat{\varphi} \circ \exp_y^{-1} : S^n \setminus \{-y\} \longrightarrow \widetilde{M}$$

eine lokale Isometrie und für die zsh. Menge $W := S^n \setminus \{x, -y\}$ gilt

- $y \in W$
- $\hat{f}(y) = \widetilde{\exp}_{\tilde{y}} \circ \hat{\varphi} \circ \exp_y^{-1}(y) = \tilde{y}$
- und

$$\begin{aligned} \hat{d}f_y &= (d\widetilde{\exp}_{\tilde{y}})_{0_{\tilde{y}}} \circ \hat{\varphi}_{0_y} \circ \underbrace{(d\exp_y^{-1})_y}_{(d\exp_y)_{0_y}^{-1}} \\ &= \text{id}_{T_{\tilde{y}} \widetilde{M}} \circ \hat{\varphi}_{0_y} \circ \text{id}_{T_y S^n} \\ &= \hat{\varphi}_0 = df_y \end{aligned}$$

Nach dem Starrheitssatz für Isometrien (Satz 4.7) folgt daraus

$$f \equiv \hat{f}$$

und \hat{f} setzt f im Punkt $-x$ fort. Es existiert damit eine lokale Isometrie

$$F : S^n \longrightarrow \widetilde{M}.$$

Nun ist S^n vollständig und nach Punkt 3. aus dem Beweis von Satz 4.6 ist F eine Riemannsche ÜL.

Da sowohl S^n als auch \widetilde{M} einfach-zsh. sind, folgt aus der Überlagerungstheorie, dass

$$F : S^n \longrightarrow \widetilde{M}$$

ein Diffeomorphismus und damit eine Isometrie ist.

□

Definition. Eine vollständige Riemannsche MF mit konstanter Schnittkrümmung nennt man *Raumform*.

Folgerung [Klassifikation von Raumformen]

Sei M^n eine Raumform mit Schnittkrümmung $K \in \{0, 1, -1\}$, dann ist M isometrisch zu \widetilde{M}/Γ , wobei

$$\widetilde{M} = \begin{cases} \mathbb{R}^n & \text{falls } K = 0 \\ \mathbb{H}^n & \text{falls } K = -1 \\ S^n & \text{falls } K = 1 \end{cases}$$

und Γ eine Untergruppe der Isometriegruppe von \widetilde{M} ist, die eigentlich diskontinuierlich auf \widetilde{M} wirkt, d.h.

$$\pi : \widetilde{M} \longrightarrow \widetilde{M}/\Gamma \cong M$$

ist eine ÜL. (die universelle).

Beweis:

Sei $(\widetilde{M}, \tilde{g})$ die universelle ÜL mit $\tilde{g} = \pi^*g$. Nach Satz 4.9 hat \widetilde{M} je nach Krümmung die Gestalt \mathbb{R}^n , \mathbb{H}^n oder S^n . Sei Γ die Gruppe der Decktransformationen $Deck(\pi)$. Mit Fakt 4 auf Seite 233, genügt es zu zeigen, dass

$$\Gamma \subset Iso(\widetilde{M}).$$

Sei $\gamma \in \Gamma$, dann ist

$$\gamma^*\tilde{g} = \gamma^*\pi^*g = (\pi \circ \gamma)^*g = \tilde{g}.$$

□

Satz 4.10. Sei (M^n, g) eine vollständige RMF, deren Ricci-Krümmung von unten durch

$$Ric \geq \frac{n-1}{c^2} \cdot g \quad c = \text{const} > 0$$

Dann gilt für den Durchmesser

$$\text{diam}(M, g) := \sup_{x, y \in M} d(x, y) \leq \pi \cdot c = \text{diam}(S_c^n)$$

wobei S_c^n die Sphäre vom Radius c ist.

Insbesondere ist M kompakt und hat eine endliche Fundamentalgruppe $\pi_1(M)$.

Beweis:

Seien $x, y \in M$. Da (M, g) vollständig ist, existiert eine minimierende Geodäte

$$\gamma : [0, l] \longrightarrow M$$

mit $\gamma(0) = x, \gamma(l) = y$ und $l = l(\gamma)$. (Auf BL param.)

1. Wir zeigen dass $d(x, y) = l(\gamma) < \pi \cdot c$. (damit ist $\text{diam}(M, g) \leq \pi \cdot c$)

Sei $Y \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$ ein VF entlang γ mit $Y(0) = Y(l) = 0$ und $Y \perp \gamma'$. Dann gilt für die Indexform

$$I_\gamma(Y, Y) := - \int_0^l \langle Y, Y'' + \mathcal{R}(Y, \gamma') \gamma' \rangle dt$$

nach Satz 3.47:

Sei

$$V(t, s) := \exp_{\gamma(t)}(s \cdot Y(t))$$

und

$$L(s) := l(V(\cdot, s)).$$

Dann ist Y das Variations-VF von V und es gilt

$$\begin{aligned} L'(0) &= 0 \\ L''(0) &= I_\gamma(Y, Y) \geq 0 \end{aligned}$$

(da $l(\gamma) = d(x, y)$ ein globales Minimum von L ist)

Wir setzen nun spezielle Vektorfelder in die Indexform ein:

Sei $(e_1 = \gamma'(0), e_2, \dots, e_n)$ eine ONB in $T_x M$ und (X_1, \dots, X_n) das daraus entstehende parallele VF entlang γ . Wir betrachten $Y_i \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$

$$Y_i(t) := \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{l}\right) \cdot X_i(t) \quad 2 \leq i \leq n.$$

dann ist

$$Y_i(0) = 0 = Y_i(l) \quad \text{und} \quad Y_i \perp \gamma' \implies I_\gamma(Y_i, Y_i) \geq 0.$$

Die Berechnung der Indexform liefert:

$$\begin{aligned} Y_i' &= \frac{\pi}{l} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot t}{l}\right) \cdot X_i(t) + \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{l}\right) \cdot X_i'(t) \\ &= \frac{\pi}{l} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot t}{l}\right) \cdot X_i(t) \quad \text{da } X_i \parallel \\ Y_i'' &= -\left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{l}\right) \cdot X_i(t) \end{aligned}$$

Damit ist

$$Y_i'' = -\left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \cdot Y_i$$

Für die Indexform folgt

$$I_\gamma(Y_i, Y_i) = \int_0^l \sin^2\left(\frac{\pi \cdot t}{l}\right) \left\{ \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 - \mathcal{R}(X_i, \gamma', \gamma') X_i \right\} dt$$

Da $(\gamma', X_2, \dots, X_n)$ eine ONB entlang γ ist, folgt durch Summation

$$0 \leq \sum_{i=2}^n I_\gamma(Y_i, Y_i) = \int_0^l \sin^2\left(\frac{\pi \cdot t}{l}\right) \left\{ (n-1) \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 - Ric(\gamma', \gamma') \right\} dt$$

Nach Vor. ist aber

$$Ric(\gamma', \gamma') = \frac{n-1}{c^2} \cdot \underbrace{g(\gamma', \gamma')}_{\equiv 1} = \frac{n-1}{c^2}$$

und damit folgt

$$0 \leq \sum_{i=2}^n I_\gamma(Y_i, Y_i) = \int_0^l \underbrace{\sin^2\left(\frac{\pi \cdot t}{l}\right)}_{\geq 0} \left\{ (n-1) \left[\left(\frac{\pi}{l}\right)^2 - c^{-2} \right] \right\} dt$$

und somit

$$\frac{\pi}{l} > \frac{1}{c} \quad \text{bzw. } l < \pi \cdot c$$

2. Da M beschränkt und vollständig, folgt nach Hop-Rinow auch die Kompaktheit.

3. $\pi_1(M)$ ist endlich.

Sei (\tilde{M}, M, π) die universelle Riemansche ÜL von (M, g) . Da π eine lokale Isometrie ist, stimmt die Schnittkrümmung von (\tilde{M}, \tilde{g}) mit der von (M, g) überein.

Nach 1. ist also auch (\tilde{M}, \tilde{g}) kompakt.

Damit ist aber auch die Anzahl der Blätter $\#(\pi^{-1}(x))$ endlich und aus

$$\pi^{-1}(x) \cong \pi_1(M, x)$$

folgt dann die Endlichkeit von $\pi_1(M)$.

□

Folgerung für die Schnittkrümmung

Sei (M^n, g) eine vollständige RMF mit strikt positiver Schnittkrümmung

$$K \geq \frac{1}{c^2} > 0,$$

dann ist M^n kompakt, $diam(M, g) \leq \pi \cdot c$ und $\pi_1(M)$ endlich.

(Für $K \geq 0$ gilt dies nicht mehr.)

Bevor wir zum nächsten Satz kommen, noch ein algebraisches

Lemma 4.1. Sei

$$A: \mathbb{R}^{n-1} \longrightarrow \mathbb{R}^{n-1}$$

eine orthogonale Abbildung und $\det A = (-1)^n$. Dann hat A einen EW $\lambda = 1$, d.h. einen Fixpunkt.

Beweis:

1. Sei n gerade.

$\chi(A) = \det(A - \lambda E)$ hat den Grad $n - 1 =$ ungerade, sodass eine reelle NS λ auftritt. Da $A \in O(n - 1)$ ist $\lambda = \pm 1$.

Alle komplexen EW treten paarweise auf

$$(\mu_1, \dots, \mu_r), (\bar{\mu}_1, \dots, \bar{\mu}_r), \underbrace{\lambda_1, \dots, \lambda_m}_{\text{reelle EW}}$$

Und es folgt

$$\det(A) = (-1)^n = 1 = \left(\prod_{j=1}^r |\mu_j|^2 \right) \cdot \underbrace{\lambda_1 \cdots \lambda_m}_{\text{unger. Anz.}}$$

Damit muss ein EW $\lambda = 1$ existieren.

2. Sei n ungerade.

Dann ist

$$\det A = -1 = \left(\prod_{j=1}^r |\mu_j|^2 \right) \cdot \underbrace{\lambda_1 \cdots \lambda_m}_{\text{ger. Anz.}}$$

Ein reeller EW muss, aber alle können nicht negativ sein. Somit existiert ein EW $\lambda = 1$.

□

Satz 4.11. [Satz von Weinstein ('68)]

Sei M^n eine komp. orientierte MF mit $K > 0$. Sei

$$f : M \longrightarrow M$$

eine Isometrie, die die Orientierung erhält, falls n gerade ist, und die Orientierung umkehrt, falls n ungerade ist, dann hat f einen Fixpunkt.

Beweis:

Angenommen $f(p) \neq p$ für alle $p \in M$. Da M kompakt ist, ex. ein $p \in M$, sodass

$$0 < d(p, f(p)) = \min_{p' \in M} d(p', f(p')).$$

Dies Führen wir zum Widerspruch.

Sei

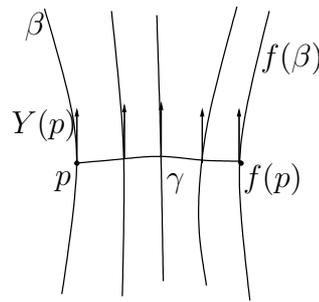
$$\gamma : [0, l] \longrightarrow M$$

eine minimierende Geodäte von p nach $f(p)$. Da $d(p, f(p)) > 0$ ist $l > 0$.

1. Suchen ein $Y(p) \in T_x M$ mit $\|Y(p)\| = 1$ und $y \perp \gamma'(0)$, sodass:

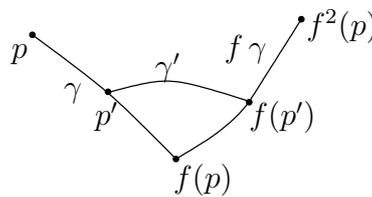
Wenn β eine Geodäte ist mit $\beta(0) = p$ und $\beta'(0) = Y(p)$, dann ist $f(\beta)$ eine Geodäte mit

$$f(\beta(0)) = f(p) \quad \text{und} \quad (f \circ \beta)'(0) = \mathcal{P}_\gamma(Y(0))$$



Sei γ eine Geodäte. Da f eine Isometrie ist, wird somit auch $f(\gamma)$ zu einer Geodäte.

Behauptung: In $f(p)$ ex. kein Knick.



Sei $p' \in \text{Im } \gamma$ und γ' die minimierende Geodäte von p' nach $f(p')$.

Δ -Ungleichung:

$$d(p', f(p')) \leq d(p', f(p)) + \underbrace{d(f(p), f(p'))}_{=d(p,p')}$$

$$= d(p, f(p))$$

Da p der Punkt mit dem minimalen Abstand war, folgt

$$d(p', f(p')) \stackrel{!}{=} d(p', f(p)) + d(f(p), p')$$

Die Gebrochen Geodäte

$$p' \xrightarrow{\gamma} f(p) \xrightarrow{f \circ \gamma} f(p')$$

ist also minimal, und damit glatt, d.h.

$$\boxed{f(\gamma)'(0) = \gamma'(l)}. \quad (*)$$

Wir betrachten nun die Abbildung

$$A := \mathcal{P}_\gamma^{-1} \circ df_p : T_p M \longrightarrow T_{f(p)} M \longrightarrow T_p M.$$

A ist eine lineare Isometrie, und $\gamma'(0)$ ist ein Fixpunkt von A :

$$A(\gamma'(0)) = \mathcal{P}_\gamma^{-1}(df_p(\gamma'(0))) = \mathcal{P}_\gamma^{-1}((f \circ \gamma)'(0))$$

$$\stackrel{(*)}{=} \mathcal{P}_\gamma^{-1}(\gamma'(l)) = \gamma'(0)$$

Sei

$$B := A|_{\gamma'(0)^\perp} : \gamma'(0)^\perp \longrightarrow \gamma'(0)^\perp \cong \mathbb{R}^{n-1}.$$

Dann erfüllt B die Eigenschaften des vorangegangenen Lemmas, und es existiert damit ein Fixpunkt $v \in T_p M$ von A mit

$$v \perp \gamma'(0) \quad \text{und} \quad \|v\| = 1.$$

Sei weiterhin $Y \in \mathfrak{X}_\gamma(M)$ die Parallelverschiebung von v entlang γ

$$Y(t) = \mathcal{P}_\gamma(v),$$

dann ist $Y(t) \perp \gamma'(0)$.

Sei

$$\beta : \mathbb{R} \longrightarrow M$$

die Geodäte mit $(f \circ \beta)(0) = f(p)$, so folgt

$$f \circ \beta : \mathbb{R} \longrightarrow M$$

ist eine Geodäte mit

- $(f \circ \beta)(0) = f(p)$
- und

$$\begin{aligned} (f \circ \beta)'(0) &= df_p(\beta'(0)) = df_p(v) \\ &= \mathcal{P}_\gamma(\mathcal{P}_\gamma^{-1}(df_p(v))) \\ &= \mathcal{P}_\gamma(A(v)) \\ &= \mathcal{P}_\gamma(v) = Y(l) \end{aligned}$$

2. Wir betrachten nun die Variation

$$\begin{aligned} V : [0, l] \times \mathbb{R} &\longrightarrow M \\ (t, s) &\longmapsto \exp_{\gamma(t)}(s \cdot Y(t)) \end{aligned}$$

mit den Geodäten β und $f(\beta)$ als Ränder, um einen Widerspruch zu finden.

Die Randkurven sind die Geodäten

$$\begin{aligned} V(0, s) &= \exp_p(s \cdot Y(0)) = \beta(s) \\ V(l, s) &= \exp_{f(p)}(s \cdot Y(l)) = f(\beta(s)) \end{aligned}$$

Das Variations-VF von V ist Y .

Sei $L(s) = l(V(\cdot, s))$. Nach Satz 3.47 gilt für die Variation der BL

$$\begin{aligned} L'(0) &= 0 \\ L''(0) &= I_\gamma(Y, Y) \\ &= - \int_0^l \langle Y, Y'' + \mathcal{R}(Y, \gamma') \gamma' \rangle dt \end{aligned}$$

Da die Randkurven jedoch Geodäten sind, gilt darüberhinaus

$$0 = \left\langle \frac{\nabla}{ds} \left(\frac{\partial V}{\partial s}(l, 0) \right), \gamma'(l) \right\rangle - \left\langle \frac{\nabla}{ds} \left(\frac{\partial V}{\partial s}(0, 0) \right), \gamma'(0) \right\rangle.$$

Da Y entlang γ parallelverschoben ist, haben wir auch

$$0 = \langle Y(l), Y'(l) \rangle - \langle Y(0), Y'(0) \rangle$$

sodass sich $L''(0)$ vereinfacht:

$$L''(0) = - \int_0^l \underbrace{\mathcal{R}(Y, \gamma', \gamma', Y)}_{0 < K_{\langle y, \gamma' \rangle}} dt$$

Damit ist $L''(0) < 0$ und L besitzt in $t = 0$ ein strikt lokales Maximum, dh. es existiert ein $s \in (-\epsilon, \epsilon)$ sodass

$$l \left(\underbrace{V(\cdot, s)}_{=c} \right) < l(\gamma)$$

Damit ist aber

$$d(\beta(s), f(\beta(s))) < l(c) < l(\gamma) = d(p, f(p))$$

was im Widerspruch zur Minimalität von $d(p, f(p))$ steht.

□

Satz 4.12. Sei M^n eine kompakte RMF mit $K > 0$. Dann gilt

1. Ist M orientierbar und n gerade, so ist M einfachzsh.!
2. Ist n ungerade, so ist M orientierbar ($w_1(M) = 0$).

Beweis:

1. Sei M orientierbar und n gerade.

Wir betrachten die universelle ÜL (\tilde{M}, M, π) und setzen $\tilde{g} := \pi^*g$.

Dann wählen wir uns auf \tilde{M} eine Orientierung, für die π orientierungserhaltend ist. Die Kompaktheit von M impliziert nach Satz 4.6 die Vollständigkeit von (\tilde{M}, \tilde{g}) , und darüberhinaus liefert sie, da $K > 0$, die Existenz eines $c \in \mathbb{R}^+$, für das $K_{\tilde{M}} \geq c > 0$. Und da π eine lokale Isometrie ist folgt auch

$$K_{\tilde{M}} \geq c > 0.$$

Nach Satz von Bonnet/Myers (Satz 4.10) ist dann \tilde{M} kompakt.

Sei Γ die Gruppe der Decktransformationen $Deck(\pi)$ von π und $k \in \Gamma$. Nach Folgerung von Satz 4.9 ist k eine Isometrie und erhält die Orientierung (da π die Orientierung erhält und $\pi \circ k = \pi$).

Nach Satz von Weinstein (Satz 4.11) hat k einen Fixpunkt $\tilde{x}_0 \in \pi^{-1}(x_0)$ mit $x_0 \in M$. Wir betrachten den Gruppenisomorphismus⁷

$$\begin{aligned} \pi_1(M, x_0) &\longrightarrow \Gamma \\ [\sigma] &\longmapsto f_{[\sigma]} \end{aligned}$$

⁷siehe Fakt 4 auf Seite 233

und identifizieren $k = k_{[\omega]}$ mit $[\omega] \in \pi_1(M, x_0)$. Dann ist

$$k(\tilde{x}_0) = \tilde{\omega}(1) = \tilde{x}_0 \quad \text{und damit} \quad [\tilde{\omega}] \in \pi_1(\tilde{M}, \tilde{x}_0) = 1,$$

sodass demzufolge

$$[\omega] = [\pi_* \tilde{\omega}] = \pi_* [\tilde{\omega}] = \pi_* [1] = 1$$

und $k = Id$.

Als Decktransformationsgruppe ergibt sich also

$$\Gamma = \{Id\}$$

und damit ist

$$M = \tilde{M}/\Gamma = \tilde{M}.$$

Insbesondere ist M einfachzsh.

2. Sei n ungerade.

Angenommen M sei *nicht* orientierbar. Wir betrachten

$$\overline{M} := \left\{ (x, \underbrace{\mathcal{O}_{T_x M}}_{\mathcal{O}_x}) \mid x \in M, \quad \mathcal{O}_x \text{ ist eine Orientierung von } T_x M \right\}.$$

Mit den Karten $(\overline{U}, \overline{\varphi})$:

$$\overline{\varphi}^{-1}(x_1, \dots, x_n) := \left(\varphi^{-1}(x_1, \dots, x_n), \left[\frac{\partial}{\partial x_1}(x), \dots, \frac{\partial}{\partial x_n}(x) \right] \right)$$

$$\overline{U} := \overline{\varphi}^{-1}(\varphi(U)) \subset \overline{M}$$

ist \overline{M} eine MF und es gilt

- \overline{M} ist orientierbar: $\mathcal{O}_{(x, \mathcal{O}_x)} := \mathcal{O}_x$.
- Die Abbildung

$$\begin{aligned} \overline{\pi} : \overline{M} &\longrightarrow M \\ (x, \mathcal{O}_x) &\longmapsto x \end{aligned}$$

ist eine 2-fache UL von M

Wir setzen $\overline{g} := \pi^* g$, dann ist $(\overline{M}, \overline{g})$ orientierbar und vollständig.

Als Decktransformationen von $\overline{\pi}$ erhalten wir

$$Deck(\overline{\pi}) = \{Id, k \quad (k \text{ vertauscht die Blätter})\}$$

Dann ist k eine Isometrie, die die Orientierung umkehrt. Nach Satz 4.11 besitzt k auch einen Fixpunkt. Dies ist jedoch für k nicht möglich.

□

Bemerkung

1. Die MF $M = \mathbb{R}P^2$ ist kompakt mit $K > 0$ (übertragen die Metrik von S^2) aber *nicht* einfachzsh., dh. die Orientierbarkeit ist bei Teil 1 von Satz 4.12 notwendig!
2. Ebenso sieht man, dass für den 2. Teil ein gerades n notwendig ist, da $\mathbb{R}P^2$ nicht orientierbar ist.
3. Sei $M = \mathbb{R}P^3$. Dieser ist kompakt mit $K > 0$, orientierbar, aber nicht einfachzsh. Im 1. Teil ist also ebenfalls "n gerade" notwendig

Ist (M^n, g) eine kompakte *Riemannsche* MF, so ist die Schnittkrümmung beschränkt:

$$a \leq K_E(x) \leq b \quad \forall E^2 \subset T_x M.$$

Ziel:

Ist (M^n, g) eine *pseudo-RMF* und $a \leq K_E \leq b$, dann ist

$$K \equiv \text{const.}$$

Die Schnittkrümmung ist nur auf 2-dim. *nichtausgearteten* UR erklärt. Sei

$$E = \text{span}(w, v) \subset T_x M$$

und

$$Q(v, w) := \det \begin{pmatrix} \langle v, v \rangle & \langle v, w \rangle \\ \langle v, w \rangle & \langle w, w \rangle \end{pmatrix} \quad \text{Gram'sche Det.}$$

Dann gilt

$$E \text{ nicht ausgeartet} \iff Q(v, w) \neq 0.$$

Sei $E = \text{span}(v, w) = \text{span}(y, z) \subset T_x M$ beliebig fix. Dann existiert eine 2×2 Matrix A , sodass

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = A \cdot \begin{pmatrix} v \\ w \end{pmatrix}$$

und es gilt

$$\mathcal{R}(z, y, y, z) = \det(A)^2 \mathcal{R}(v, w, w, v). \quad (*)$$

Bezeichne

$$\mathcal{N}(E) := \begin{cases} 0 & \mathcal{R}(z, y, y, z) = 0 \\ 1 & \mathcal{R}(z, y, y, z) > 0 \\ -1 & \mathcal{R}(z, y, y, z) < 0 \end{cases}$$

mit (*) ist dies eine Invariante von E und somit korrekt definiert.

Lemma 4.2. *Es gilt:*

1. *Ist*

$$K_E(x) \equiv k = \text{const.} \quad \forall E^2 \subset T_x M \text{ nicht ausgeartet,}$$

dann ist

$$\mathcal{N}(E^2) \equiv 0 \quad \forall E^2 \subset T_x M \text{ ausgeartet.}$$

2. Ist

$$\mathcal{N}(E^2) \equiv 0 \quad \forall E^2 \subset T_x M \text{ ausgeartet,}$$

und sind $u, v, w \in T_x M$ ON-Vektoren mit $g(u, u) = -g(v, v)$, dann gilt

$$K_{\langle u, w \rangle}(x) = K_{\langle v, w \rangle}(x)$$

Beweis:

1. Ist $E = \text{span}(u, v)$, so gilt nach Satz 3.19

$$\mathcal{R}(u, v, v, u) = k \cdot \underbrace{Q(u, v)}_0 = 0 \quad \Rightarrow \quad \mathcal{N} = 0.$$

2. $u \pm v$ sind isotrope Vektoren und die 2-dim. UR

$$E_{\pm} = \langle u \pm v, w \rangle$$

sind ausgeartet, da $N(E) = 0$, folgt

$$\mathcal{R}(u + v, w, w, u + v) = 0 = \mathcal{R}(u - v, w, w, u - v)$$

bzw. auch

$$\mathcal{R}(u, w, w, v) = 0 \Rightarrow \mathcal{R}(u, w, w, u) + \mathcal{R}(v, w, w, v) = 0.$$

Da (u, v, w) ON-Vektoren sind und $g(u, u) = -g(v, v)$, folgt

$$Q(u, w) = -Q(v, w)$$

und damit

$$\underbrace{\frac{\mathcal{R}(u, w, w, u)}{Q(u, w)}}_{K_{\langle u, w \rangle}(x)} = \underbrace{\frac{\mathcal{R}(v, w, w, v)}{Q(v, w)}}_{K_{\langle v, w \rangle}(x)}.$$

□

Satz 4.13. (Kulkarni)

Sei (M^n, g) eine zusammenhängende pseudo-Riemannsche MF und $x \in M$. Dann sind folgende Bedingungen äquivalent

1. $K_E(x) \equiv k = \text{const.}$ für alle $E^2 \subset T_x M$ nicht ausgeartet.

2. $\mathcal{N}(E) = 0$ für alle $E^2 \subset T_x M$ ausgeartet.

3. Für alle $E^2 \subset T_x M$ nicht ausgeartet gilt

$$a \leq K_E(x) \text{ oder } K_E(x) \leq b.$$

4. Für alle $E^2 \subset T_x M$ indefinit gilt

$$a \leq K_E(x) \leq b.$$

5. Für alle $E^2 \subset T_x M$ definit gilt

$$a \leq K_E(x) \leq b.$$

Ist $n \geq 3$ und gilt in jedem Punkt $x \in M$ eine der Bedingungen 1.-5., so ist die Schnittkrümmung von (M, g) konstant.

Beweis:

- Wir können annehmen, das $n \geq 3$. Sonst ex. kein nichtausgearteter 2-dim. UR und $E = T_x M$ ist eindeutig bestimmt
- Die Letzte Bedingung folgt aus der 2. Bianchi-Identität (ÜA 16)
- 1.) \Rightarrow 3.), 4.), 5.) und 1.) \Rightarrow 2.) folgt aus Lemma.
- 2.) \Rightarrow 1.)

1. Fall: $k = \text{Index}(g) = 1$ oder $n - 1$.

Seien u, v, w orthogonal und $g(u, u) = -1$.

Dann folgt aus Lemma (2.), da $\mathcal{N} = 0$,

$$K_{\langle u, w \rangle}(x) = K_{\langle v, w \rangle}(x),$$

da $g(v, v) = 1$ für $u \perp v$ und $k = 1$.

\Rightarrow Sei $E^2 \subset T_x M$ nicht ausgeartet und $u \in E$ oder $E \perp \mathbb{R} \cdot u$, dann ist

$$K_E(x) = k(u)$$

unabhängig von E .

Ist $\hat{u} \in T_x M$ ein zeitartiger Vektor unabh. von u , so ist

$$k(u) = K_{\langle u, \hat{u} \rangle}(x) = k(\hat{u}) = K_E(x) \quad \forall E \perp \hat{u}.$$

Für einen 2-dim. nichtausgearteten UR $E \subset T_x M$ gilt somit

$$K_E(x) \equiv k = \text{konst.}$$

2. Fall: $1 < k = \text{Index}(g) < n - 1$.

Sei $E^2 \subset T_x M$ positiv definit und $\hat{E}^2 \subset T_x M$ negativ-definit, $u \in E$ und $\hat{u} \in \hat{E}$ Einheitsvektoren, dann gilt

$$Q(u, \hat{u}) = g(u, u) \cdot g(\hat{u}, \hat{u}) - g(u, \hat{u})^2 < 0.$$

Die UR

$$E \oplus \mathbb{R} \cdot \hat{u}, E \oplus \mathbb{R} \cdot u \subset T_x M$$

sind 3-dim. VR vom Index 1, die nicht ausgeartet sind.

Aus dem 1. Fall folgt nun

$$K_E(x) = K_{\langle u, \hat{u} \rangle}(x) = K_{\hat{E}}(x).$$

Daraus ergibt sich die Behauptung.

- Folglich gilt 1.) \Leftrightarrow 2.), und es bleibt 3.), 4.), 5.) \Rightarrow 2.) zu zeigen.

3.) \Rightarrow 2.): Nach Vor. ist $K \geq a$. ($K \leq b$ erhält man durch $g \mapsto -g$.)

Jeder *ausgeartete* 2-dim. UR E ist Grenzwert einer Folge indefiniter 2-dim. (E_n) und einer Folge definiter 2-dim. (F_n) (ÜA). Dann gilt

$$E_n = \langle u_n, v_n \rangle \xrightarrow{u_n \rightarrow u, v_n \rightarrow v} E = \langle u, v \rangle$$

$$K_{E_n}(x) = \frac{\mathcal{R}(u_n, v_n, v_n, u_n)}{Q(u_n, v_n)} \geq a$$

und

$$Q(u_n, v_n) \longrightarrow Q(u, v) = 0, \quad \text{da } E = \langle u, v \rangle \text{ ausgeartet.}$$

1. Ist (E_n) definit, so ist $Q(u_n, v_n) > 0$ und damit

$$\mathcal{R}(u_n, v_n, v_n, u_n) \geq a \cdot Q(u_n, v_n) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0,$$

sodass

$$\mathcal{R}(u, v, v, u) = 0 \Rightarrow \mathcal{N}(E) = 0$$

2. Ist (E_n) indefinit, dann ist $Q(u_n, v_n) < 0$ und damit

$$\mathcal{R}(u_n, v_n, v_n, u_n) \leq a \cdot Q(u_n, v_n) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0,$$

sodass

$$\mathcal{R}(u, v, v, u) = 0 \Rightarrow \mathcal{N}(E) = 0$$

4.), 5.) \Rightarrow 2.):

Wie eben erhält man

$$\left| \frac{\mathcal{R}(u_n, v_n, v_n, u_n)}{Q(u_n, v_n)} \right| \leq \text{const.}$$

wobei

$$Q(u_n, v_n) < 0 \quad \text{für 4.)}$$

$$Q(u_n, v_n) > 0 \quad \text{für 5.)}$$

und

$$E_n = \langle u_n, v_n \rangle \xrightarrow{u_n \rightarrow u, v_n \rightarrow v} E = \langle u, v \rangle \text{ ausgeartet.}$$

Damit geht

$$|\mathcal{R}(u_n, v_n, v_n, u_n)| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 = \mathcal{R}(u, v, v, u)$$

und $\mathcal{N}(E) = 0$ für alle E ausgeartet.

□

Index

Symbols

1-Punkt-Kompaktifizierung 29

A

Abbildung

abgeschlossene 11

folgenstetige 17

isometrische 127

konforme 127

längentreue 128

offene 11

orthogonalitätserhaltende 129

stetige 17

tensorielle 76

typerhaltende 129

volumentreue 129

winkeltreue 129

Ableitung

kovariante Ableitung 138

Lie-Ableitung 133

Richtungsableitung 51

nach einem Vektorfeld 58

Abschluss 11

Abstand 194

AdS-Raum 203

Algebra

der alternierenden Formen 81

der symmetrischen kovarianten Tensoren 82

alternierendes Produkt 81

Anti-de-Sitter-Raum 203

Atlas 41

B

Bündel

der symmetrischen kov. Tensoren .. 86

Bündelmetrik 159

Basis

eines topologischen Raumes 12

Kanonische Basis im Tangentialraum

54

Umgebungsbasis 15

Bianchi-Identität 149

bogenzusammenhängend 35

C

Christoffel-Symbole 146

Clairantsche Regel 181

Covektoren 56

D

Decktransformation 234

Diffeomorphismus 47

Differential

einer Abbildung 51

einer k -Form 108

differenzierbare Abbildung 46

Divergenz

eines Tensorfeldes 159

eines Vektorfeldes 160

Duale Tangentialraum 55

E

eigentlich diskontinuierlich 231

Einbettung 70

Einstein-Hilbert-Funktional 166

Einsteinmannigfaltigkeit 159

Eulersche Charakteristik 219

Exponentialabbildung 182

F

Fluß eines Vektorfeldes 62

folgenkompakt 26

Folgenstetigkeit 17

Fundamentalgruppe 232

G

Gauß-Lemma 187

| | | | |
|--------------------------------------|-----|-----------------------------------|----------|
| Geodäte | 173 | kompakt | 26 |
| gebrochene | 185 | Komplex-projektiver-Raum | |
| Prägeodäte | 174 | als Quotient der Sphäre | 21 |
| radiale | 183 | als topologischer Raum | 9 |
| geodätisch vollständig | 176 | konforme Abbildung | 127 |
| geodätische Kugel | 195 | konforme Gruppe | 136 |
| geodätische Sphäre | 195 | konjugierter Punkt | 209 |
| H | | konvexe Umgebung | 190 |
| Hausdorff-Raum | 22 | Koordinaten | |
| homöomorph | 20 | lokale | 40 |
| Homöomorphismus | 20 | Normalkoordinaten | 189 |
| Homotopie | | Kotangentialbündel | 84 |
| von Wegen | 232 | Atlas | 86 |
| Hyperbolischer Raum | | kovariante Ableitung | 138 |
| Pseudo- | 157 | entlang einer Kurve | 141 |
| Hyperflächen | | Krümmung einer - | 148 |
| Orientierung | 98 | lokale Koeffizienten | 139 |
| Hyperflächen | | metrische | 145 |
| Orientierung | 99 | Torsion einer - | 148 |
| I | | torsionsfreie | 145 |
| Immersion | 70 | von Tensorfeldern | 147 |
| Indexform einer Geodäte | 214 | Kozul-Formel | 145 |
| Injektivitätsradius | 218 | Krümmung | |
| innerer Punkt | 10 | Ricci-Krümmung | 158 |
| Inneres | 11 | Skalarkrümmung | 158 |
| Integralkurve | 61 | Krümmungsendomorphismus | 148 |
| Isometrie | 127 | Krümmungstensor | 148 |
| lokale | 127 | Kurve | |
| radiale | 185 | Integralkurve | 61 |
| Isometriegruppe | 136 | minimierende | 195 |
| isotrop | 114 | nach Bogenlänge parametrisiert .. | 120 |
| J | | reguläre Kurve | 120 |
| Jacobifeld | 205 | Schnittwinkel | 126 |
| K | | stückweise glatte Kurve | 121 |
| k-Form | | L | |
| auf einem Vektorraum | 80 | Länge | |
| auf einer Mannigfaltigkeit | 90 | einer Kurve | 119, 121 |
| k-Formen | | eines Vektors | 119 |
| als Bündel | 86 | Laplace-Operator | 160 |
| Kleinsche Flasche | | Lemma | |
| als topologischer Raum | 10 | Gauß-Lemma | 187 |
| Kommutator zweier Vektorfelder | 59 | Symmetriemaß | 186 |
| | | Levi-Civita-Zusammenhang | 145 |
| | | lichtartig | 114 |
| | | Lie-Ableitung | 133 |
| | | Lie-Algebra | 68 |

- einer Liegruppe 69
 Liesche Gruppe 67
 lokal-kompakt 30
- M**
- Möbiusband
 als topologischer Raum 9
 Orientierung 100
 Möbiustransformation 127
 Mannigfaltigkeit 39
 differenzierbare 41
 Einstein MF 159
 Lorentz 114
 mit Rand 106
 orientierbare 96
 Produkt- 45
 pseudo-Riemannsche 114
 Riemannsche 114
 semi-Riemannsche 114
 topologische - 39
- Menge
 abgeschlossene 10
 messbare 101
 Nullmenge 101
 offene 5
- Metrik 113
 Bündelmetrik 159
 induzierte 115
 lokale Koeffizienten 114
 Lorentz 114
 Produkt-Metrik 116
 pseudo-Riemannsche 114
 Riemannsche 114
 semi-Riemannsche 114
 Warped-Product-Metrik 117
- Minkowski-Raum 115
- N**
- Normalenumgebung 183
 Normalkoordinaten 189
 Nullmenge 101
- O**
- Oberer Halbraum 155
 Schnittkrümmung 155
- Orientierung
 einer Mannigfaltigkeit 96
 eines Vektorraumes 95
 induzierte Orientierung auf dem Rand
 107
 orthogonal 125
- P**
- Paraboloid 181
 parakompakt 31
 Parallelverschiebung
 entlang einer Kurve 142
 Poincare-Halbebene 128
 Geodäten 177
- Q**
- Quarternionen
 als topologischer Raum 9
- R**
- Rand 11
 raumartig 114
 Raumform 247
 Reell-projektiver-Raum
 als Quotient der Sphäre 21
 als topologischer Raum 9
 differenzierbare Struktur 43
 regulärer Wert 74
 Ricci-Krümmung 158
 Richtungsableitung 51
 nach einem Vektorfeld 58
 Rotationsfläche
 als Untermannigfaltigkeit 75
 Geodäten 179
 induzierte Metrik 116
 Volumen 124
- S**
- Satz
 Invarianz der Dimension 21
 Invarianz des Gebietes 21
 Starrheitssatz für Isometrien 243
 von Bonnet-Myers 247
 von Gauß-Bonnet 228
 von Hadamard-Cartan 244
 von Hopf und Rinow 202
 von Kulkarni 256

- von Nash 133
 - von Stokes 110
 - von Synge 253
 - von Weinstein 250
 - Schnitt in einem Bündel 86
 - Schnittkrümmung 150
 - seperabel 12
 - Skalarkrümmung 158
 - Sorgenfrey-Linie 12, 22
 - Sphäre
 - als topologischer Raum 8
 - differenzierbare Struktur 43
 - Geodäten 176
 - Orientierung der Sphäre 99
 - Pseudo- 157
 - Schnittkrümmung 154
 - Tangentialraum 50
 - Stereographische Projektion 43, 128
 - Stetigkeit 17
 - Submersion 70
- T**
- T_2 -Raum 22
 - Tangential
 - Raum 49
 - Vektor 49
 - Tangentialbündel 84
 - Atlas 86
 - Tensor
 - alternierender 80
 - induzierter 82
 - kontravarianter 79
 - kovarianter 79
 - Krümmungstensor 148
 - symmetrischer 81
 - Tensorbündel 83
 - Tensorfeld 88
 - Beispiele 88
 - Divergenz 159
 - induziertes 90
 - Spur 159
 - Tensorprodukt
 - alternierendes 81
 - symmetrisches 81
 - von Tensorfeldern 88
 - von Vektorräumen 77
 - Topologie 5
- Faktor 7
 - induzierte 7
 - Produkt 7
 - Topologischer Raum 5
 - metrisierbarer 6
 - mit abzählbarer Basis 12
 - seperabler 12
 - Torus
 - als topologischer Raum 8, 10
- U**
- Überlagerung 230
 - endliche 230
 - semi-Riemannsche 235
 - universelle 234
 - Umgebung 10
 - konvexe 190
 - korrekt überlagerte 230
 - Untermannigfaltigkeit 45
 - offene 44
- V**
- Variationsvektorfeld 206
 - Vektorbündel 83
 - lokale Basis 87
 - Schnitt 86
 - Vektorfeld 57
 - Fluß 62
 - Divergenz 160
 - entlang einer Fläche 185
 - entlang einer Kurve 140
 - Jacobivektorfeld 205
 - Killing-Vektorfeld 134
 - konformes Vektorfeld 134
 - linksinvariantes 68
 - parallelverschoben entlang einer Kurve 142
 - Träger 64
 - Variations- 206
 - verknüpfte Vektorfelder 59
 - vollständiges 63
 - x-synchrones VF 161
 - Volumen
 - einer Teilmenge 123
 - Volumenform 98, 122

W

wedge-Produkt 81

Winkel

hyperbolischer Winkel 126

Schnittwinkel 125

Z

zeitartig 114

Zerlegung der 1 91

zusammenhängend 35

Zusammenhang (affiner) 138

Zusammenhangskomponente 38

Zylinder 181