

Differentialgeometrie I

gehalten von Dr. Anna Siffert
im Sommersemester 2018

an der
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg



In L^AT_EX gesetzt von
Thomas Ackermann & Mathieu Kaltschmidt

aktueller Stand: 6. Juni 2018

Differentialgeometrie I

Dr. Anna Siffert



UNIVERSITÄT
HEIDELBERG
ZUKUNFT
SEIT 1386

Vorwort

Bei diesen Vorlesungsnotizen handelt es sich um kein offizielles Skript, sondern lediglich um die Umsetzung des Vorlesungsmitschriebs in \LaTeX .

Für die Vollständigkeit & Richtigkeit des Inhalts wird deshalb **keine Gewährleistung** übernommen.

Bei Fragen, Korrekturen und Verbesserungsvorschlägen freuen wir uns über eine Nachricht.¹

Die Dozentin Frau Dr. Siffert empfiehlt die nachfolgende Literatur zur Vertiefung des in der Vorlesung behandelten Stoffs:

- [1] Manfredo Perdigão do Carmo. *Riemannian geometry*. 14., corrected print. Boston ; Basel ; Berlin: Birkhäuser, 2013.
- [2] Jeff Cheeger und David G. Ebin. *Comparison theorems in Riemannian geometry*. Amsterdam [u.a.]: North-Holland, 1975.
- [3] Sylvestre Gallot, Dominique Hulin und Jacques Lafontaine. *Riemannian geometry*. 3. ed. Berlin ; Heidelberg [u.a.]: Springer, 2004.
- [4] Detlef Gromoll, Wilhelm Klingenberg und Wolfgang Meyer. *Riemannsche Geometrie im Großen*. 2. Aufl. Berlin ; Heidelberg [u.a.]: Springer, 1975.
- [5] Sigurdur Helgason. *Differential geometry, Lie groups, and symmetric spaces*. New York: Academic Press, 1978.
- [6] John M. Lee. *Introduction to smooth manifolds*. 2. ed. New York ; Heidelberg [u.a.]: Springer, 2013.
- [7] John M. Lee. *Riemannian manifolds. an introduction to curvature*. New York ; Berlin ; Heidelberg [u.a.]: Springer, 1997.

Eine Inhaltsübersicht der in der Vorlesung behandelten Themen befindet sich auf der nächsten Seite.

¹Mail an M.Kaltschmidt@stud.uni-heidelberg.de oder T.Ackermann@stud.uni-heidelberg.de

Inhaltsverzeichnis

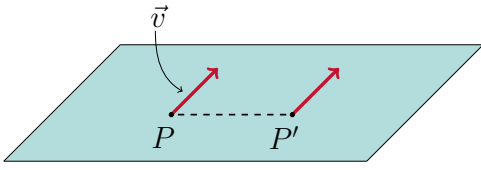
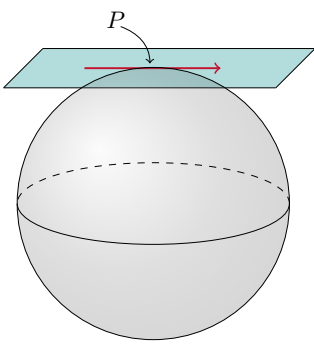
Vorwort	ii
1 Differenzierbare Mannigfaltigkeiten	1
1.1 Definitionen	1
1.2 Differenzierbare Abbildungen	6
1.3 Untermannigfaltigkeiten	7
1.4 Tangentialraum	7
2 Vektorbündel	16
2.1 Tangentialbündel	16
2.2 Vektorbündel	17
2.2.1 Direkte Summe (Whitney-Summe)	21
2.2.2 Tensorbündel	21
2.2.3 Homomorphismenbündel	22
2.2.4 Duales Bündel	22
2.2.5 Alternierendes Vektorbündel	22
2.3 Zusammenhang und kovariante Ableitung	28
2.4 Krümmung	36
2.5 Krümmung und Parallelverschiebung	39
3 Riemannsche Mannigfaltigkeiten	44
3.1 Wiederholung: Symmetrische Bilinearform	44
3.2 Riemannsche Metriken	45
3.3 Levi-Civita-Zusammenhang	49
Anhang: Wiederholungen und Exkurse	II
Abbildungsverzeichnis	III

1 Differenzierbare Mannigfaltigkeiten

Worum geht es in der Differentialgeometrie?

Die zentralen Objekte der Differentialgeometrie sind Mannigfaltigkeiten. Das Ziel ist es, Analysis und Geometrie auf solchen Mannigfaltigkeiten zu betreiben.

Wir beginnen zunächst einmal mit einer kurzen Gegenüberstellung der bereits bekannten Konzepte aus dem \mathbb{R}^n mit den korrespondierenden Begriffen der Differentialgeometrie, welche wir in den kommenden Vorlesungen noch genauer kennenlernen werden.

	
\mathbb{R}^n	\mathcal{M}
Parallelverschiebung	Begriff des Zusammenhangs
Gerade = kürzeste Verbindung	Konzept der Geodätischen
flacher Raum	gekrümmter Raum
Skalarprodukt	Riemannsche Metrik

1.1 Definitionen

Um differenzierbare Mannigfaltigkeiten definieren zu können wiederholen wir zunächst die Definition eines topologischen Raumes.

Erinnerung: $M \subseteq \mathbb{R}^n$ offen, wenn $\forall p \in U \exists \varepsilon > 0$, sodass $B_\varepsilon(p) \subset U$. Dieser Begriff von Offenheit heißt *euklidische Topologie* und erfüllt:

- i) \emptyset, \mathbb{R}^n offen
- ii) $U, V \subset \mathbb{R}^n$ offen $\Rightarrow U \cap V$ offen in \mathbb{R}^n
- iii) $U_i, i \in I$ offen in $\mathbb{R}^n \Rightarrow \bigcup_{i \in I} U_i \subset \mathbb{R}^n$ offen



Abbildung 1.1: Offene Menge

Definition 1.1 (Topologischer Raum)

Ein topologischer Raum ist eine Menge X zusammen mit einer Menge $\mathcal{O} \subset \mathcal{P}(X)$, sodass:

- i) $\emptyset, X \in \mathcal{O}$
- ii) $U, V \in \mathcal{O} \Rightarrow U \cap V \in \mathcal{O}$
- iii) $U_i \in \mathcal{O} \Rightarrow \bigcup_{i \in I} U_i \in \mathcal{O}$

Beispiel 1.2

- a) $(X, \mathcal{O} = \mathcal{P}(X))$
- b) $N \subset X$ Teilmenge. Dann ist auch (N, \mathcal{O}_1) ein topologischer Raum, wobei \mathcal{O}_1 wie folgt gegeben ist:

$$V \in \mathcal{O}_1 \Leftrightarrow \exists U \in \mathcal{O}, \text{ sodass } V = N \cap U$$

Teilmengen topologischer Räume sind topologische Räume.

Definition 1.3 (Topologische Mannigfaltigkeiten)

Eine topologische Mannigfaltigkeit ist ein topologischer Raum \mathcal{M} der Dimension n mit folgenden Eigenschaften:

- i) \mathcal{M} ist hausdorffsch. Das heißt $\forall p, q \in \mathcal{M}$ mit $p \neq q \exists$ zwei disjunkte, offene Umgebungen $U \ni p$ und $V \ni q$ wobei $U, V \in \mathcal{O}$

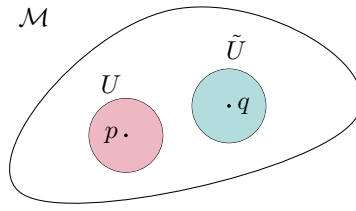


Abbildung 1.2: Hausdorff'sche Eigenschaft

ii) **2. Abzählbarkeitsaxiom**

\mathcal{M} hat eine abzählbare Basis der Topologie, das heißt es existiert eine abzählbare Menge $\{U_1, \dots, U_k, \dots\}$ offener Teilmengen oder abzählbar viele offene Mengen U_1, \dots, U_k, \dots mit $U_i \in \mathcal{O}$, sodass $\forall p \in \mathcal{M}$ und alle Umgebungen U von p gibt es ein K sodass $p \in U_k \subseteq U$.

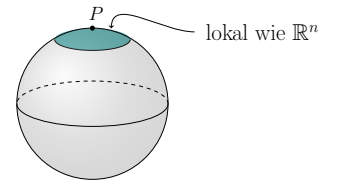
iii) \mathcal{M} ist homöomorph zu \mathbb{R}^n , das heißt $\forall p \in \mathcal{M}$ existiert eine Umgebung U von p und ein **Homöomorphismus** $X : U \rightarrow V \subseteq \mathbb{R}^n$ (offen).

Definition 1.4 (Karte, Atlas)

Das Paar (X, U) heißt **Karte** von \mathcal{M} um p .

Eine Menge $\mathcal{A} = \{(x_\alpha, U_\alpha)_{\alpha \in \mathcal{A}}\}$ von Karten heißt **Atlas** von \mathcal{M} , falls

$$\bigcup_{\alpha \in \mathcal{A}} U_\alpha = \mathcal{M} \quad (1.1)$$



Topologische Mannigfaltigkeiten sind die Grundbausteine. Nun wollen wir auf diesen Mannigfaltigkeiten Geometrie betreiben. Dafür benötigen wir mehr Struktur. Wir wollen die differenzierbare Struktur des \mathbb{R}^n auf unseren Mannigfaltigkeiten "holen".

Definition 1.5 (Kartenwechsel)

Seien x_α und x_β zwei Karten, dann ist der Kartenwechsel wie folgt definiert:

$$x_\alpha \circ x_\beta^{-1} : x_\beta(U_\alpha \cap U_\beta) \rightarrow x_\alpha(U_\alpha \cap U_\beta) \subseteq \mathbb{R}^n \quad (1.2)$$

Dies ist ein Homöomorphismus.

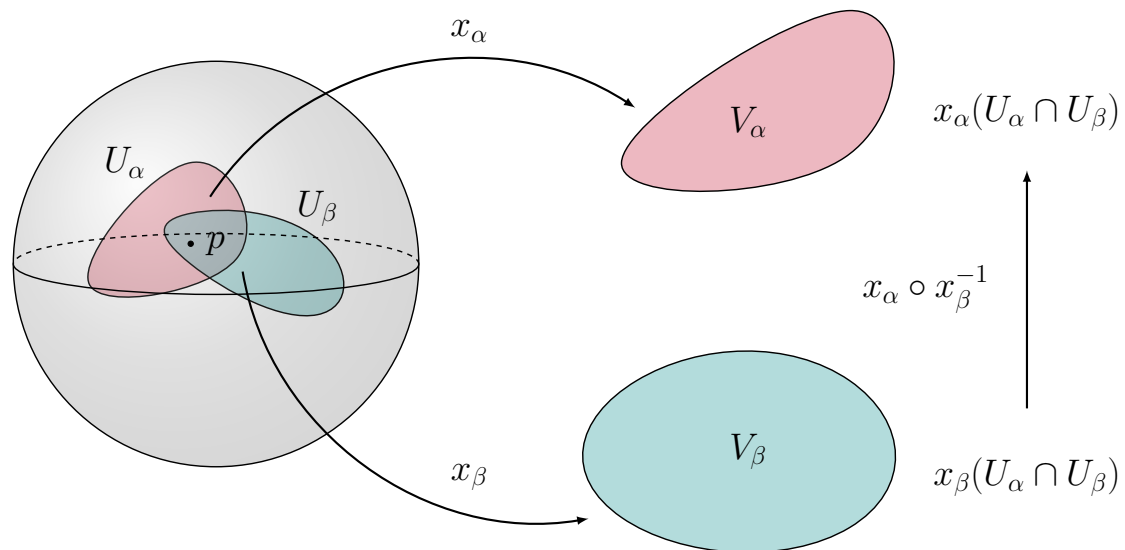


Abbildung 1.3: Kartenwechsel

Nun wollen wir, dass $x_\alpha \circ x_\beta^{-1}$ Diffeomorphismen sind.

Definition 1.6

Sei \mathcal{M} eine topologische Mannigfaltigkeit.

- a) Ein Atlas $\mathcal{A} = \{(x_\alpha, U_\alpha)\}$ auf \mathcal{M} heißt C^∞ -Atlas, falls alle Kartenwechsel $x_\alpha \circ x_\beta^{-1}$ mit $\alpha, \beta \in A$ C^∞ -Diffeomorphismen sind.
- b) Sei \mathcal{A} ein C^∞ -Atlas von \mathcal{M} .
Eine Karte (x, U) ist verträglich mit \mathcal{A} , falls $x \circ x_\alpha^{-1}$ ein C^∞ -Diffeomorphismus ist.

Gegeben ein C^∞ -Atlas, so kann man diesen zu einem *maximalen* C^∞ -Atlas vervollständigen. Maximal bedeutet hierbei, dass der Atlas nicht strikt in einem anderen enthalten ist.

Definition 1.7 (Differenzierbare Mannigfaltigkeit)

Eine differenzierbare Struktur auf einer topologischen Mannigfaltigkeit M ist ein maximaler C^∞ -Atlas. Eine differenzierbare Mannigfaltigkeit ist eine topologische Mannigfaltigkeit mit einer differenzierbaren Struktur.

Bemerkung: Man kann auch eine topologische Mannigfaltigkeit definieren, ohne das 2. Abzählbarkeitsaxiom zu fordern.

Aber: Dann bekommt man Mannigfaltigen mit ganz anderen Eigenschaften als diejenigen, die wir betrachten wollen.

Wichtig: Hausdorffsch + 2. Abzählbarkeitsaxiom \Rightarrow parakompakt, d. h. jede offene Überdeckung hat eine lokal endliche Verfeinerung.

(V_j) heißt Verfeinerung von (U_i) , falls $\forall V_j \exists U_i$ mit $V_j \subseteq U_i$

Lokal endlich: $\forall p \in X \exists$ Umgebung U , die nur endlich viele V_j trifft

Parakompakt $\Rightarrow \exists$ Partition der Eins f mit

$$f_i : V_i \subseteq X \rightarrow [0, 1], \sum_{i \in I} f_i(x) = 1$$

Beispiel 1.9

Metrische Räume sind parakompakt.

Beispiel 1.10 (differenzierbare Mannigfaltigkeiten)

1. \mathbb{R}^n mit Atlas $\mathcal{A} = \{(\text{id}, \mathbb{R}^n)\}$

2. V Vektorraum, B Basis mit $B = \{v_1, \dots, v_n\}$, Atlas $\mathcal{A} = \{(\chi_B, V)\}$

$$\begin{aligned} \chi_B : V &\rightarrow \mathbb{R}^n \\ v = \sum_{i=1}^n a_i v_i &\mapsto \sum_{i=1}^n a_i e_i \end{aligned}$$

wobei (e_1, \dots, e_n) die Standardbasis ist.

3. $\mathcal{M} \subseteq \mathbb{R}^n$, (χ_U, U) mit $\chi_U = \text{id}|_U$, $V \subseteq \mathcal{M}^n$, M differenzierbare Mannigfaltigkeit, $\mathcal{A} = \{(\chi_U, U)\}$ Atlas von \mathcal{M}

$\mathcal{A}_V = \{(\chi_V, U_V)\}$ wobei $(\chi_V, U_V) = (\chi_{U \cap V}, U \cap V)$

4. $\mathcal{M}_1 = S^1$, $\mathcal{M}_2 = \mathbb{R}$, $\mathcal{M}_1 \times \mathcal{M}_2 = \text{"unendlicher Zylinder"}$

Seien $M_1^{n_1}, M_2^{n_2}$ differenzierbare Mannigfaltigkeiten, so ist $M_1 \times M_2$ ebenfalls eine differenzierbare Mannigfaltigkeit der Dimension $n_1 + n_2$.

Atlas $\mathcal{A} = \{(x \times y, U \times V)\}$, wobei

$(x, U) = \text{Karte von } M_1$

$(y, V) = \text{Karte von } M_2$

$$(x \times y)(p_1, p_2) = (x(p_1), y(p_2))$$

5. $S_R^n = \{(x_0, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^{n+1} \mid \sum_{i=0}^n x_i^2 = R^2\} \subset \mathbb{R}^{n+1}$

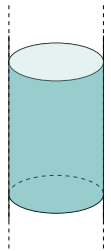
- Teilraumtopologie: $U \subset S_R^n$ offen $\Leftrightarrow \exists U' \subset \mathbb{R}^{n+1}$ offen mit $U = U' \cap S_R^n$
- Atlas: Wir brauchen zwei Karten. Einmal für den Nord- und einmal für den Südpol (haben unterschiedliche Orientierung).
Nordpol (N):

$$f_N : S_R^n \setminus \{N\} \rightarrow \mathbb{R}^n \quad (1.3)$$

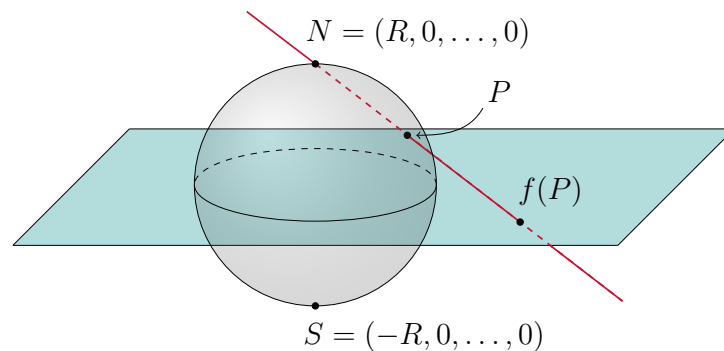
$$f_N(x_0, \dots, x_n) = \frac{R}{R - x_0}(x_1, \dots, x_n) \quad (1.4)$$

Analog für den Südpol (S):

$$f_S : \mathcal{M}_s \rightarrow \mathbb{R}^n \quad (1.5)$$



→ Zwei Karten f_N und f_S ("Stereographische Projektionen").



Bemerkung: N mit der Teilraumtopologie und dem Atlas $\mathcal{A}_N = \{(\chi|_U, U \cap N)\}$ ist eine differenzierbare Mannigfaltigkeit.

Definition 1.12

Seien \mathcal{M}, \mathcal{N} differenzierbare Mannigfaltigkeiten. Eine Einbettung ist eine differenzierbare Abbildung

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

sodass

1. $f(N) \subset M$ eine Untermannigfaltigkeit
2. $f : N \rightarrow f(N)$ Diffeomorphismus

1.2 Differenzierbare Abbildungen

Definition 1.13 (Differenzierbare Abbildungen)

Seien \mathcal{M}, \mathcal{N} differenzierbare Mannigfaltigkeiten. Eine Abbildung $f : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{N}$ heißt differenzierbar, falls $\forall p \in \mathcal{M}$ Karten (x, U) von \mathcal{M} um p (Karten (y, V) von \mathcal{N} um $f(p)$)

Es gilt: $y \circ f \circ x^{-1} : x(U \cap f^{-1}(U')) \rightarrow y(f(U) \cap U')$ ist C^∞ -differenzierbar. Wir bezeichnen die Menge aller differenzierbaren Abbildungen durch $C^\infty(\mathcal{M}, \mathcal{N})$; $\mathcal{F}(\mathcal{M}) = C^\infty(\mathcal{M}, \mathbb{R})$.

Definition 1.14 (Diffeomorphismus)

Eine differenzierbare Abbildung $F : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{N}$ heißt Diffeomorphismus, falls f eine Bijektion und f^{-1} differenzierbar ist.

Die Menge aller Diffeomorphismen $f : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{N}$ bezeichnen wir mit $\text{Diff}(\mathcal{M}, \mathcal{N})$. $\text{Diff}(\mathcal{M}) \equiv \text{Diff}(\mathcal{M}, \mathcal{M})$ bilden eine Gruppe (Diffeomorphismengruppe).

1.3 Untermannigfaltigkeiten

Definition 1.15 (Untermannigfaltigkeiten)

Sei \mathcal{M} eine differenzierbare Mannigfaltigkeit. Eine Teilmenge $\mathcal{N} \subseteq \mathcal{M}$ heißt Untermannigfaltigkeit falls: $\forall p \in \mathcal{N} \exists$ Karte (x, U) von \mathcal{M} um p $x : \mathcal{M} \rightarrow V' \times V''$ mit $x(\mathcal{M} \cap \mathcal{N}) = V' \times \{z_0\}$ für ein $z_0 \in V''$

Bemerkung: \mathcal{N} mit der Teilraumtopologie und dem Atlas $\mathcal{A}_{\mathcal{N}} = \{(x_U, U \cap \mathcal{N})\}$ ist eine differenzierbare Mannigfaltigkeit.

Definition 1.17 (Einbettung)

Seien \mathcal{M}, \mathcal{N} differenzierbare Mannigfaltigkeiten. Eine Einbettung ist eine differenzierbare Abbildung

$$f : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{N} \quad (1.6)$$

Sodass

- $f(\mathcal{N}) \cap \mathcal{M}$ eine Umkehrfunktion.
- $f : \mathcal{N} \rightarrow f(\mathcal{N})$ Diffeomorphismus.

1.4 Tangentialraum

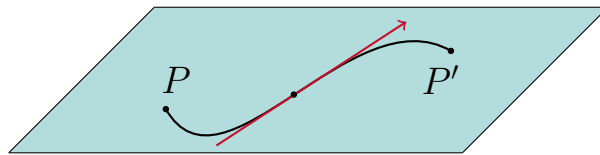
Definition 1.18

1. Ein Tangentialvektor an \mathcal{M} im Punkt $p \in \mathcal{M}$ ist eine \mathbb{R} -lineare Abbildung

$$v : \mathcal{F}(\mathcal{M}) \rightarrow \mathbb{R}$$

mit $v(fg) = v(f)g(p) + f(p)v(g)$.

2. Die Menge aller Tangentialvektoren an \mathcal{M} in p heißt Tangentialraum von \mathcal{M} in p : $T_p\mathcal{M}$ ist ein Vektorraum.



1.19 Hilfslemma (Existenz einer Glockenfunktion)

Sei $U \subseteq \mathcal{M}$ offen, $p \in U$. Dann $\exists \varphi \in \mathcal{F}(\mathcal{M})$, s. d.

1. $\text{supp } \varphi \subseteq U$

2. $\varphi = 1$ auf einer Umgebung $U' \subset U$ von p ist

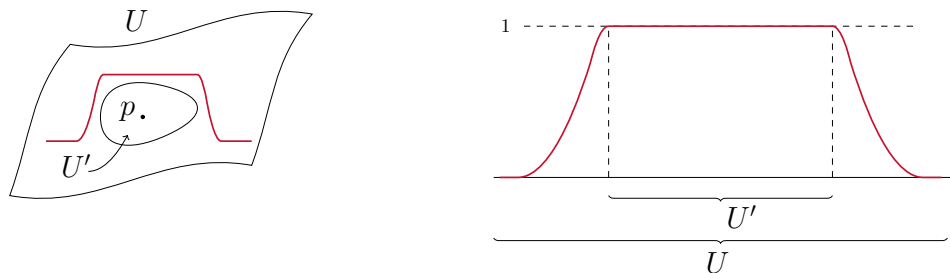


Abbildung 1.4: Visualisierung des Hilfslemmas (1.19) ("bump function")

Beweis:

Sei (x, U) eine Karte um p , $\varepsilon > 0$, s. d. $B_{2\varepsilon}(x(p)) \subset V \subset \mathbb{R}^n$ und wähle $\psi : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ mit

$$\left. \begin{array}{l} \text{supp}(\psi) \subset B_{2\varepsilon}(x(p)) \\ \varphi = 1 \text{ auf } B_\varepsilon \end{array} \right\} \text{ Resultat aus Analysis}$$

Setze $\varphi(q) = \begin{cases} \psi(x(q)) & \text{für } q \in U \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$

□

1.21 Satz (Eigenschaften des Tangentialraums)

Für $v \in T_p\mathcal{M}$ gilt:

1. $v(\text{konstante Funktion}) = 0$
2. Falls $f = g$ in einer Umgebung von p , so gilt $v(f) = v(g)$

"Lokalisierung von Tangentialvektoren"

Beweis: (zu 2)

Wähle φ wie im Hilfslemma, wobei U so gewählt ist, dass $\varphi f = \varphi g$ auf U ist. Nun gilt:

$$\begin{aligned} v(\varphi f) &= v(\varphi)f(p) + \varphi(p)v(f) \\ &= v(\varphi)f(p) + v(f) \\ v(\varphi g) &= v(\varphi)g(p) + v(g) \end{aligned}$$

Dann folgt $v(\varphi f) = v(\varphi g) \Leftrightarrow v(f) = v(g)$.

□

Beweis: (zu 1)

$$v(\lambda f) = \lambda v(f), \quad \lambda \in \mathbb{R}, \quad f \in \mathcal{F}(\mathbb{R})$$

zz: $v(1) = 0$. Aufgrund von $v(\lambda) = \lambda v(1)$ genügt es zu zeigen, dass $v(1) = 0$. Dies folgt aus der Produktregel

$$v(1) = v(1 * 1) = 1v(1) + v(1)1 = 2v(1) \Rightarrow v(1) = 0$$

□

Jede Karte liefert eine spezielle Basis von $T_p\mathcal{M}$.

Definition 1.24

Sei (x, U) eine Karte von \mathcal{M} um p . Definiere Tangentialvektoren $\frac{\partial}{\partial x_i} \Big|_p$ ($i = 1, \dots, m$) wie folgt:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \Big|_p (f) := \partial_i (f \circ x^{-1}) \Big|_{x(p)} \quad (1.7)$$

Hierbei bedeutet ∂_i die i -te partielle Ableitung.

1.25 Satz

Die Tangentialvektoren $(\frac{\partial}{\partial x_1} \Big|_p, \dots, \frac{\partial}{\partial x_m} \Big|_p)$ bilden eine Basis des $T_p\mathcal{M}$. Jeder Tangentialvektor lässt sich schreiben als

$$v = \sum_{i=1}^m v(x_i) \frac{\partial}{\partial x_i} \Big|_p = \sum_{i=1}^m \xi \frac{\partial}{\partial x_i} \Big|_p. \quad (1.8)$$

Beweis: (Satz 1.25 Teil 1)

Es gilt die lineare Unabhängigkeit:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \Big|_p (x^j) = \delta_{ij} \quad (1.9)$$

Jetzt muss noch gezeigt werden, dass $(\frac{\partial}{\partial x_1} \Big|_p, \dots, \frac{\partial}{\partial x_m} \Big|_p)$ ein Erzeugendensystem für $T_p\mathcal{M}$ ist. Dafür benötigen wir allerdings zunächst ein Hilfslemma. \square

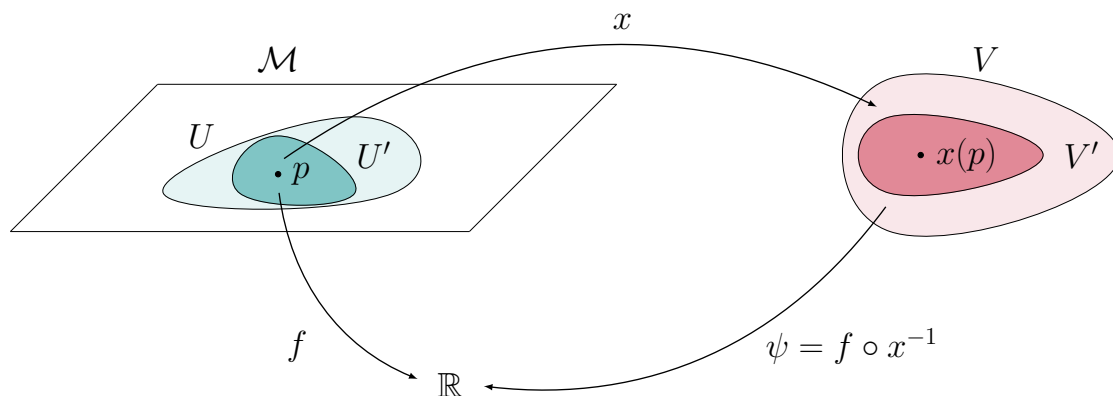
1.27 Hilfslemma

Sei $f : U \subset \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}$ eine glatte Funktion. Dann existiert eine Umgebung $U' \subset U$ von p ($p \in U'$) und eine glatte Funktion $f_i : U' \rightarrow \mathbb{R}$, so dass

$$f = f(p) + \sum_{i=1}^m (x_i - x_i(p)) f_i. \quad (1.10)$$

Wobei $f_i(p) = \frac{\partial}{\partial x_i} \Big|_p (f)$.

Beweis:



Nach der Abbildung gilt:

$$\psi(u) - \psi(u_0) = \int_0^1 \frac{d}{dt} \psi(tu + (1-t)u_0) dt \quad (1.11)$$

Hierbei ist $u = x(q)$ mit $q \in \mathcal{M}$ und $u_0 = x(p)$.

$$\psi(u) - \psi(u_0) = \sum_i (u^i - u_0^i) \int_0^1 \underbrace{\frac{d\psi}{du'}}_{:=\psi_i(u)} dt \quad (1.12)$$

Setze $f_i = \psi_i \circ x : U \subset \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}$. f_i ist glatt und es gelten folgende Eigenschaften nach Definition:

- $\psi(u) - \psi(u_0) = \psi(x(q)) - \psi(x(p)) = f(q) - f(p)$
- $u^i = x^i(q)$
- $u_0^i = x^i(p)$
- $\psi_i(u) = \psi_i(x(1)) = f_i(q)$

Diese Eigenschaften können wir nun wie folgt verwenden:

$$f(q) - f(p) = \sum_{i=1}^n (x_i(q) - x_i(p)) f_i(q) \quad (1.13)$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial x_i} \right|_p (f) = \partial_i \underbrace{(f \circ x^{-1})}_{\psi} \Big|_{x(p)} \quad (1.14)$$

$$= \partial_i \psi \Big|_{x(p)} \quad (1.15)$$

$$= \psi_i(x(p)) = f_i(p) \quad (1.16)$$

Da $\psi(u) = \psi(u_0) + \sum_i (u^i - u_0^i) \psi_i(u)$

$$\Rightarrow \frac{\partial}{\partial u_i} \psi \Big|_{x(p)} = \psi_i(u) \Big|_x (p) = \psi(x(p)) \quad (1.17)$$

Und somit gilt schließlich $f_i(p) = \frac{\partial}{\partial u_i} \Big|_p (f)$. \square

Nun können wir unseren Beweis fortführen.

Beweis: (Satz 1.25 Teil 2)

$$v(f) = v(f(p) + \sum_i (x_i - x_i(p)) f_i) \quad (1.18)$$

$$= v(f(p)) + \sum_i v(x_i - x_i(p)) f_i \quad (1.19)$$

Benutze Produktregel

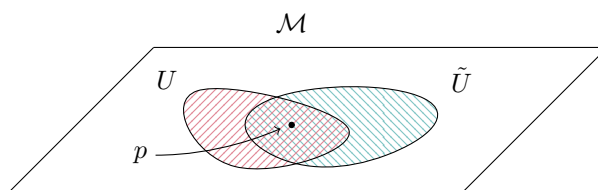
$$v(f) = \sum_i \underbrace{((x_i(p) - x_i(p)) v(f_i))}_{=0} + \underbrace{v(x_i - x_i(p)) f_i}_{=v(x_i)} \quad (1.20)$$

$$= \sum_i v(x_i) f_i \quad (1.21)$$

$$= \sum_i v(x_i) \frac{\partial}{\partial x_i} \Big|_p f \quad (1.22) \quad \square$$

1.30 Satz (Transformationsregel)

Seien (x, U) und (\tilde{x}, \tilde{U}) zwei Karten um $p \in \mathcal{M}$.



Dann gilt:

$$\frac{\partial}{\partial \tilde{x}_i} \Big|_p = \sum_j \underbrace{\frac{\partial}{\partial \tilde{x}_i} \Big|_p (x_j)}_{\in \mathbb{R}} \frac{\partial}{\partial x_j} \Big|_p \quad (1.23)$$

(In der linearen Algebra hatten Transformationen die ähnliche Gestalt: $\tilde{v}_i = \sum_j a_{ij} v_j$)

Definition 1.31 (Differential, Ableitung)

Seien \mathcal{M} und \mathcal{N} differenzierbare Mannigfaltigkeiten und $f : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{N}$ glatt. Das **Differential (Ableitung)** von f in p ist die lineare Abbildung:

$$\mathrm{d}f \Big|_p : T_p \mathcal{M} \rightarrow T_{f(p)} \mathcal{N} \quad (1.24)$$

$$v \mapsto \mathrm{d}f \Big|_p (v), \quad (1.25)$$

welche definiert ist durch:

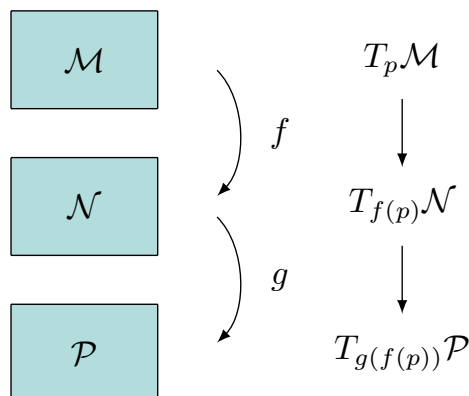
$$\underbrace{\mathrm{d}f \Big|_p (v)}_{\in T_{f(p)} \mathcal{N}} \underbrace{(\phi)}_{\in \mathcal{F}(\mathcal{N})} = \underbrace{v(\phi \circ f)}_{\in \mathcal{F}(\mathcal{N})}, \quad \forall \phi \in \mathcal{F}(\mathcal{N}) \quad (1.26)$$

Fakt: $\mathrm{d}f \Big|_p$ ist linear.

1.32 Satz (Kettenregel)

Seien $f : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{N}$ und $g : \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{P}$ glatte Abbildungen. Dann gilt:

$$\mathrm{d}(g \circ f) \Big|_p = \mathrm{d}g \Big|_{f(p)} \circ \mathrm{d}f \Big|_p \quad (1.27)$$



Beweis: (Satz 1.32)

$$\mathrm{d}(g \circ f) \Big|_p (v)(\phi) = v(\phi \circ g \circ f) \quad (1.28)$$

$$= \mathrm{d}f \Big|_p (v)(\phi \circ g) \quad (1.29)$$

$$= \mathrm{d}g \Big|_{f(p)} \circ \mathrm{d}f \Big|_p (v)(\phi) \quad (1.30)$$

□

1.34 Satz

Sei $f : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{N}$ glatt und sei (x, U) eine Karte von \mathcal{M} um p und (y, V) eine Karte von \mathcal{N} um p . Setze $f_j = y_j \circ f$ mit $f_j : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}$, dann gilt:

$$\underbrace{df \Big|_p \left(\frac{\partial}{\partial x_i} \Big|_p \right)}_{\in T_{f(p)}\mathcal{M}} = \sum_j \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \Big|_p (f_j)}_{\in \mathbb{R}} \underbrace{\frac{\partial}{\partial y_j} \Big|_{f(p)}}_{\in T_{f(p)}\mathcal{N}} \quad (1.31)$$

Definition 1.35 (regulärer Wert/Punkt, Submersion, Immersion)

Sei $f : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{N}$ glatt und es gelte $\dim \mathcal{M} = m$, $\dim \mathcal{N} = n$.

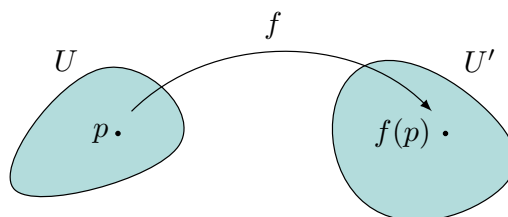
1. Rang f in p ist $\text{Rang } df \Big|_p$.
2. $p \in \mathcal{M}$ heißt regulärer Punkt ($\in \mathcal{M}$) $\Leftrightarrow \text{Rang } df \Big|_p = \dim \mathcal{N}$.
3. $q \in \mathcal{N}$ heißt regulärer Wert ($\in \mathcal{N}$) $\Leftrightarrow \forall p \in f^{-1}(q)$ sind reguläre Punkte.
4. f heißt Submersion $\Leftrightarrow f$ surjektiv und alle $p \in \mathcal{M}$ sind reguläre Punkte.
5. f heißt Immersion $\Leftrightarrow df \Big|_p$ injektiv für alle $p \in \mathcal{M}$

1.36 Satz (Umkehrsatz)

Sei $f : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{N}$ glatt. Sei $df \Big|_p : T_p\mathcal{M} \rightarrow T_{f(p)}\mathcal{N}$ ein Isomorphismus, dann existiert eine Umgebung U um p und eine Umgebung U' um $f(p)$, so dass

$$f \Big|_U : U \rightarrow U' \quad (1.32)$$

ein Diffeomorphismus ist.

**Beweis: (Satz 1.36)**

Nutze Karten um dies auf den euklidischen Fall zu führen.

$$\begin{array}{ccc}
 \mathcal{M} & \xrightarrow{f} & \mathcal{N} \\
 \downarrow x & & \downarrow y \\
 V \subseteq \mathbb{R}^m & \xrightarrow{\phi} & V \subseteq \mathbb{R}^m
 \end{array} \tag{1.33}$$

Seien (x, U) und (y, U') Karten von \mathcal{M} und \mathcal{N} um p und $f(p)$. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit gilt: $f(U) \subset U'$. Dann ist ϕ eine glatte Abbildung deren Differential $d\phi|_{x(p)}$ invertierbar ist. Umkehrsatz im \mathbb{R}^n auf ϕ anwenden: Es existieren Umgebungen \hat{V} von $x(p)$ und \hat{V}' von $y(f(p)) = \phi(x(p))$, so dass $\hat{\phi}|_{\hat{V}}$ ein Diffeomorphismus ist. Dann ist

$$f|_{x^{-1}(\hat{V})} : x^{-1}(\hat{V}) \rightarrow y^{-1}(\hat{V}') \tag{1.34}$$

ein Diffeomorphismus.

$$\phi = y \circ f \circ x^{-1} \Rightarrow f = y^{-1} \circ \phi \circ x \tag{1.35}$$

□

1.38 Satz (Satz über implizite Funktionen)

Sei $f : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{N}$ glatt und es gelte $\dim \mathcal{M} = m$, $\dim \mathcal{N} = n$.

1. Sei $\text{Rang}_p f = r$ und $v \in V$ und $V \subseteq \mathbb{R}^m$. Dann existiert zu jeder Karte (y, U') um $f(p)$ eine Karte (x, U) um p , so dass

$$y \circ f \circ x^{-1}(v_1, \dots, v_m) = (v_1, \dots, v_r, \phi_{r+1}(v), \dots, \phi_n(v)). \tag{1.36}$$

Falls $y(f(p)) = 0$, so kann man x so wählen, dass $x(p) = 0$ und $\phi_j(0) = 0$ ($\forall j > r$).

2. Sei $\text{Rang } f = r$ auf einer Umgebung von p . Dann gibt es Karten (x, U) , (y, U') , so dass

$$y \circ f \circ x^{-1}(v_1, \dots, v_m). \tag{1.37}$$

Beweis: (Satz 1.38 Teil 1)

Wähle Karten und modifiziere diese geschickt. Sei (y, U') eine Karte von \mathcal{N} um $f(p)$. Sei (\hat{x}, U) eine Karte von \mathcal{M} um p mit $\hat{x}(p) = 0$. Setze

$$\hat{A} = (\hat{A})_{ij} = (\partial_i \hat{\phi}_j), \quad (1.38)$$

mit $\phi = y \circ f \circ x^{-1}$. Da $\text{Rang}_p f = r$, können wir ohne Beschränkung der Allgemeinheit annehmen, dass

$$\det \tilde{A} \neq 0. \quad (1.39)$$

Wobei hier nun $\tilde{A} = (\hat{A}_{ij})_{1 \leq i \leq r}$. Setze

$$x_i = \begin{cases} y_i \circ f & 1 \leq i \leq r \\ \hat{x}_i & \text{falls } r+1 \leq i \leq n \end{cases} \quad (1.40)$$

Dann gilt $x(p) = 0$ und

$$\partial_i(x_j \circ \hat{x}^{-1})(0) = \begin{pmatrix} \partial_i \hat{\phi}_j(0) & \star \\ 0 & \mathbb{1} \end{pmatrix}. \quad (1.41)$$

Daraus folgt, dass $\text{Rang } x = m = \dim \mathcal{M}$ im Punkt p . Mit Hilfe des Umkehrsatzes folgt, dass x ein lokaler Diffeomorphismus ist und eine Umgebung U um den Punkt p existiert und eine Umgebung V von 0 in \mathbb{R}^n , sodass $x : \mathcal{M} \rightarrow V$ eine Karte ist und

$$\phi(v_1, \dots, v_m) = y \circ f \circ x^{-1}(v_1, \dots, v_m) \quad (1.42)$$

$$= (v_1, \dots, v_r, \phi_{r+1}(v), \dots, \phi_m(v)). \quad (1.43)$$

Wobei ϕ_k glatt auf U' sind mit $\phi_i(0) = 0$. Betrachte die Jacobi-Matrix:

$$A_{ij} = (\partial_i \phi_j)_{ij} = \begin{pmatrix} \mathbb{1} & 0 \\ \star & \partial_i \phi_j \end{pmatrix} \quad (1.44)$$

Da $\text{Rang } \phi = r$ in einer Umgebung von $U = 0$ hat folgt:

$$\partial_i \phi_j = 0 \quad \forall i, j > r. \quad (1.45)$$

□

1.40 Korollar

Sei $f : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{N}$ mit $\dim \mathcal{M} = m$ und $\dim \mathcal{N} = n$ glatt, dann gilt:

1. Sei $q \in \mathcal{N}$ ein regulärer Wert, so ist

$$\mathcal{H} = f^{-1}(q) = \{p \in \mathcal{M} \mid f(p) = q\} \quad (1.46)$$

eine Untermannigfaltigkeit der Dimension $m - n$.

2. Sei f linear in einer Umgebung von $\mathcal{H} = f^{-1}(q)$ vom Rang r , so ist \mathcal{H} eine Untermannigfaltigkeit der Dimension $m - r$. Der Tangentialraum $T_p \mathcal{H}$ ist isomorph zu

$$\ker df \Big|_p \subseteq T_p \mathcal{M}, \quad \forall p \in \mathcal{H}. \quad (1.47)$$

2 Vektorbündel

2.1 Tangentialbündel

Wir wollen nun alle Tangentialräume einer Mannigfaltigkeit \mathcal{M} gemeinsam betrachten.

$$T\mathcal{M} = \bigsqcup_{p \in \mathcal{M}} T_p\mathcal{M} = \{(p, v) | p \in \mathcal{M}, v \in T_p\mathcal{M}\} \quad (2.1)$$

Dies soll nun die Struktur einer differenzierbaren Mannigfaltigkeit haben. Das heißt wir müssen eine Topologie und eine C^∞ -Struktur auf $T\mathcal{M}$ definieren.

$$\pi : T\mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M} \quad (2.2)$$

$$(p, v) \mapsto p \quad (2.3)$$

Sei (x, U) eine Karte von \mathcal{M}^m . Dann definieren wir eine Karte (\bar{x}, \bar{U}) von $T\mathcal{M}$ wie folgt:

$$\bar{U} = \pi^{-1}(U) = \bigsqcup_{p \in U} T_p\mathcal{M} \quad (2.4)$$

$$\bar{x} : \bar{U} \rightarrow x(U) \times \mathbb{R}^m \subset \mathbb{R}^{2m} \quad (2.5)$$

$$(p, v) \mapsto (x(p), \xi) \quad (2.6)$$

Wobei $\xi = (\xi^1, \dots, \xi^m) \in \mathbb{R}^m$ gegeben ist durch:

$$v = \sum_{i=1}^m \xi_i \frac{\partial}{\partial x_i} \Big|_p, \quad \forall p \in U. \quad (2.7)$$

Wir können aber Kartenwechsel betrachten.

Seien (\bar{x}, \bar{U}) und (\bar{y}, \bar{U}') zwei Karten. Betrachte die Abbildungen:

$$\bar{y} \circ \bar{x}^{-1} : \underbrace{x(\bar{U} \cap \bar{U}')}_{x(U \cap U') \times \mathbb{R}^m} \rightarrow \underbrace{\bar{y}(\bar{U} \cap \bar{U}')}_{y(U \cap U') \times \mathbb{R}^m} \quad (2.8)$$

$$(v, \xi) \mapsto (y \circ \underbrace{x^{-1}(v)}_{v \in T\mathcal{M}|_{\bar{U} \cap \bar{U}'}} , \eta) \quad (2.9)$$

Wobei $\eta = d(y \circ x^{-1})|_U \xi$.

Da $y \circ x^{-1}$ Diffeomorphismus ist, ist $\bar{y} \circ \bar{x}^{-1}$ ein Isomorphismus. Nun können wir die Topologie auf $T\mathcal{M}$ definieren. $O \subset T\mathcal{M}$ offen, falls $\bar{x}(O \cap \bar{U})$ offen in $V \times \mathbb{R}^m$ ist für alle Karten $(x, U) \in \mathcal{A}_{\mathcal{M}}$ (bzw $(\bar{x}, \bar{U}) \in \mathcal{A}_{T\mathcal{M}}$)

2.1 Satz

$T\mathcal{M}$ mit dieser Topologie ist eine topologische Mannigfaltigkeit und $\mathcal{A}_{T\mathcal{M}}$ eine differenzierbare Struktur.

2.2 Vektorbündel

$T\mathcal{M}$ hat die Struktur einer glatten Mannigfaltigkeit. Allerdings hat es noch mehr, nämlich die eines Vektorbündels, was wir nun definieren.

Definition 2.2 (Vektorbündel)

Sei \mathcal{M} eine differenzierbare Mannigfaltigkeit. Ein \mathbb{R} -Vektorbündel vom Rang k über \mathcal{M} ist eine differenzierbare Mannigfaltigkeit mit einer glatten surjektiven Abbildung:

$$\pi : E \rightarrow \mathcal{M}, \quad (2.10)$$

so dass:

1. $\forall p \in \mathcal{M}$ hat $E_p := \pi^{-1}(\{p\})$ die Struktur eines \mathbb{R} -Vektorraums der Dimension k . E_p heißt Faser von E über p .
2. Für alle p in \mathcal{M} existiert eine Umgebung U von p in \mathcal{M} und ein Diffeomorphismus, für den gilt:
 - $\pi \circ \phi = pr_1$
 - Für alle $q \in U$ ist die Abbildung

$$\phi \Big|_q : \{q\} \times \mathbb{R}^k \rightarrow E_q \quad (2.11)$$

$$\{q, \xi\} \mapsto \phi_q(\xi) := \phi(q, \xi) \quad (2.12)$$

ein Isomorphismus. ϕ heißt lokale Trivialisierung von E .

$$\begin{array}{ccc} \phi : U \times \mathbb{R}^k & \xrightarrow{\quad} & \pi^{-1}(U) \\ & \searrow pr_1 \quad \swarrow \pi & \\ & U & \end{array} \quad (2.13)$$

Bemerkung: Ein Vektorbündel ist ein Tripel (E, π, \mathcal{M}) aber wir schreiben oft nur E . Hierbei wird E Totalraum und \mathcal{M} Basis genannt.

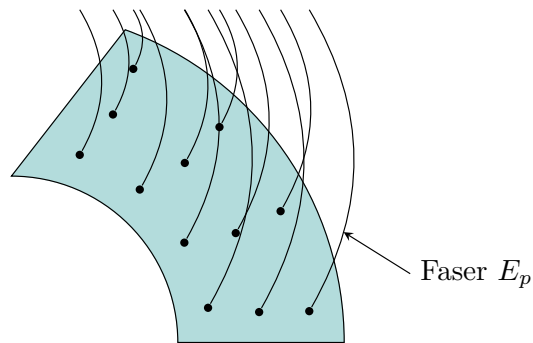


Abbildung 2.1: Veranschaulichung eines Vektorbündels

Beispiel 2.4

1. Triviales Bündel:

$$\pi : E = \mathcal{M} \times \mathbb{R}^k \rightarrow \mathcal{M} \quad (2.14)$$

$$(p, \xi) \mapsto p \quad (2.15)$$

2. Tangentialbündel

$$\pi : T\mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M} \quad (2.16)$$

$$(p, v) \mapsto p \quad (2.17)$$

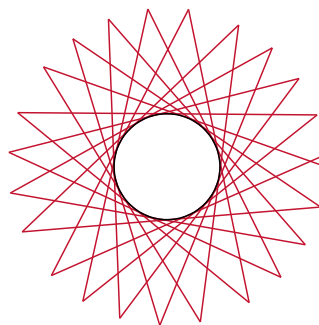


Abbildung 2.2: Darstellung des Tangentialbündels eines Kreises

3. Tautologisches Bündel

$$\mathcal{M} = \mathbb{RP}^n \quad (2.18)$$

$$E = \{(l, x) | l \in \mathbb{RP}^n, x \in l \subset \mathbb{R}^{n+1}\} \quad (2.19)$$

$$\pi : E \rightarrow \mathcal{M} = \mathbb{RP}^n \quad (2.20)$$

$$(l, x) \mapsto l \quad (2.21)$$

Behauptung: Dies ist ein Vektorbündel vom Rang 1. Vektorraumstruktur auf E_l :

$$(l, x) + (l, y) := (l, x + y) \quad (2.22)$$

$$k(l, x) := (l, kx) \quad (2.23)$$

Nun wollen wir uns damit beschäftigen wie wir Vektorbündel konstruieren können. Angenommen uns wäre das folgende gegeben:

1. E_p (mit $p \in \mathcal{M}$) eine Familie von Vektorräumen der Dimension k
2. $(U_\alpha)_{\alpha \in A}$ eine offene Überdeckung von \mathcal{M}
3. $\forall \alpha \in A, p \in U_\alpha$ gibt es den folgenden Isomorphismus:

$$\phi_{\alpha,p} : \mathbb{R}^k \rightarrow E_p \quad (2.24)$$

Setze

$$E = \bigcup_{p \in \mathcal{M}} E_p \quad (2.25)$$

$$\pi : E \rightarrow \mathcal{M} \quad (2.26)$$

$$(p, v) \mapsto p \quad (2.27)$$

$$\phi_\alpha : U_\alpha \times \mathbb{R}^k \rightarrow E \Big|_{U_\alpha} \quad (2.28)$$

$$(p, \xi) \mapsto (p, \phi_{\alpha,p}(\xi)). \quad (2.29)$$

Nun stellt sich die Frage unter welchen Voraussetzungen (E, π, \mathcal{M}) ein Vektorbündel ist.

2.5 Lemma

Sei \mathcal{M} eine glatte Mannigfaltigkeit, E eine Menge und die Abbildung $\pi : E \rightarrow \mathcal{M}$ surjektiv. Sei $\{U_\alpha\}$ eine offene Überdeckung von \mathcal{M} zusammen mit bijektiven Abbildungen

$$\phi_\alpha^{-1} = \varphi : \pi^{-1}(U_\alpha) \rightarrow U_\alpha \times \mathbb{R}^k, \quad (2.30)$$

die $pr_1 \circ \varphi_\alpha = \pi$ erfüllen, so dass wann immer $U_\alpha \cap U_\beta \neq \emptyset$, dann ist

$$\varphi_\alpha \circ \varphi_\beta^{-1} : (U_\alpha \cup U_\beta) \times \mathbb{R}^k \rightarrow (U_\alpha \cap U_\beta) \times \mathbb{R}^k, \quad (2.31)$$

von der Form:

$$(\varphi_\alpha \circ \varphi_\beta^{-1})(p, v) = (p, \tau(p)v) \quad (2.32)$$

mit einer glatten Abbildung $\tau : U_\alpha \cap U_\beta \rightarrow \text{GL}(k, \mathbb{R})$. Dann existiert eine eindeutige Struktur als glattes k -dim Vektorbündel über \mathcal{M} für die φ_α^{-1} lokale Trivialisierungen sind.

Beweis: (Lemma 2.5)

Sei $p \in \mathcal{M}$ und setze $E_p := \pi^{-1}(\{p\})$. Falls $p \in U_\alpha$, dann ist

$$\varphi_\alpha \Big|_p : E_p \rightarrow \{p\} \times \mathbb{R}^k. \quad (2.33)$$

Definiere eine Vektorraumstruktur auf E_p durch die Forderung, dass die Abbildung $\varphi_\alpha \Big|_p$ ein Isomorphismus ist. Durch Verkleinern von U_α und Hinzunahme von weiteren offenen Mengen kann man annehmen, dass jedes U_α diffeomorph zu $\bar{U}_\alpha \subseteq \mathbb{R}^m$ ist. Verknüpfung von φ_α mit einem solchen Diffeomorphismus liefert eine Bijektion:

$$\pi^{-1}(U_\alpha) \rightarrow \bar{U}_\alpha \times \mathbb{R}^k. \quad (2.34)$$

Diese nutzen wir als Karte für E . Wegen Gleichung 2.32 bekommen wir eine glatte Struktur auf E . \square

Sei (x, U) Karte von \mathcal{M} , $p \in U$, $v \in T_p \mathcal{M}$.

$$v = \sum_{i=1}^m \xi_i \frac{\partial}{\partial x_i} \Big|_p \quad (2.35)$$

Definiere:

$$\varphi : \pi^{-1}(U) \rightarrow U \times \mathbb{R}^m \quad (2.36)$$

$$v \mapsto (p, v) \quad (2.37)$$

Dort wo (x) und (\bar{x}) überlappen.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \Big|_p = \left(\frac{\partial \bar{x}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial}{\partial \bar{x}_j} \Big|_p \quad (2.38)$$

$$v = \sum_{j=1}^m \xi_j \frac{\partial}{\partial \bar{x}_j} \Big|_p = \sum_{j=1}^m \xi_j \frac{\partial}{\partial x_i} \Big|_p \quad (2.39)$$

$$= \sum_{i,j} \xi_i \frac{\partial \bar{x}_j}{\partial x_i} \frac{\partial}{\partial \bar{x}_j} \Big|_p \quad (2.40)$$

$$\Rightarrow \bar{\xi}_j = \sum_i v_i \left(\frac{\partial \bar{x}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.41)$$

$$\bar{\varphi} \circ \varphi^{-1}(x, v) = (x, \bar{v}) = (x, \tau(x)v) \quad (2.42)$$

Wobei nun $\tau(x)$ gegeben ist durch $\frac{\partial \bar{x}_j}{\partial x_i}$.

Im Folgenden werden nun einige Beispiele für Vektorbündel angegeben.

2.2.1 Direkte Summe (Whitney-Summe)

Es seien zwei Vektorbündel gegeben:

$$\pi : E \rightarrow \mathcal{M} \quad (2.43)$$

$$\pi' : E' \rightarrow \mathcal{M}' \quad (2.44)$$

mit Rang k bzw. k' . Dann existiert $(U_\alpha)_{\alpha \in A}$ eine offene Überdeckung, sodass für alle $\alpha \in A$ und alle $p \in U_\alpha$ folgendes gilt:

$$\phi_{\alpha,p} : \mathbb{R}^k \rightarrow E_p, \quad g_{\alpha,\beta} : U_\alpha \cap U_\beta \rightarrow \text{Gl}(k, \mathbb{R}) \quad (2.45)$$

$$\phi'_{\alpha,p} : \mathbb{R}^{k'} \rightarrow E'_p, \quad g'_{\alpha,\beta} : U_\alpha \cap U_\beta \rightarrow \text{Gl}(k', \mathbb{R}) \quad (2.46)$$

Wir definieren:

$$\mathcal{E}_p := E_p \oplus E'_p \quad (2.47)$$

$$\mathcal{E} = \bigsqcup_{p \in \mathcal{M}} \mathcal{E}_p \quad (2.48)$$

$$\Phi_{\alpha,p} : \mathbb{R}^k \oplus \mathbb{R}^{k'} \rightarrow E_p \oplus E'_p \quad (2.49)$$

$$(v, w) \mapsto (\phi_{\alpha,p}(v), \phi'_{\alpha,p}(w)) \quad (2.50)$$

$$G_{\alpha\beta} : U_\alpha \cap U_\beta \rightarrow \text{Gl}(k + k', \mathbb{R}) \quad (2.51)$$

$$p \mapsto \begin{pmatrix} g_{\alpha\beta}(p) & 0 \\ 0 & g'_{\alpha\beta}(p) \end{pmatrix} \quad (2.52)$$

\mathcal{E} ist nun ein Vektorbündel. Wir nennen \mathcal{E} die Whitney-Summe von E und E' und schreiben:

$$\mathcal{E} = E \oplus E'. \quad (2.53)$$

2.2.2 Tensorbündel

Es seien E' und E'' Vektorbündel über \mathcal{M} und (U_α) sei wie oben definiert.

$$(E' \otimes E'')_p := E'_p \otimes E''_p \quad (2.54)$$

$$\phi_{\alpha,p} : \mathbb{R}^{k'} \times \mathbb{R}^{k''} \rightarrow E'_p \otimes E''_p \quad (2.55)$$

$$(v, w) \mapsto \phi'_{\alpha,p}(v) \otimes \phi''_{\alpha,p}(w) \quad (2.56)$$

Wir erhalten zusammen die folgende Übergangsmatrix:

$$g_{\alpha\beta} = g'_{\alpha\beta}(p) \otimes g''_{\alpha\beta}(p) \quad (2.57)$$

Diese Abbildung ist glatt und somit ergibt sich ein neues Vektorbündel.

2.2.3 Homomorphismenbündel

Es seien die Daten wie eben schon gegeben. Das Homomorphismenbündel

$$\text{Hom}_p(E', E'') := \text{Hom}(E'_p, E''_p), \quad (2.58)$$

ist wie folgt gegeben:

$$\phi_{\alpha p} : \text{Hom}(\mathbb{R}^{k'}, \mathbb{R}^{k''}) \rightarrow \text{Hom}(E'_p, E''_p) \quad (2.59)$$

$$f \mapsto \phi''_{\alpha p} \circ f \circ (\phi'_{\alpha p})^{-1} \quad (2.60)$$

2.2.4 Duales Bündel

Sei ein Vektorbündel (E, π, \mathcal{M}) gegeben. Wir wollen nun das sogenannte duale Vektorbündel konstruieren. Wir führen hier die folgende Notation ein $E^* = \text{Hom}(E, \mathbb{R})$, wobei \mathbb{R} das triviale Vektorbündel vom Rang 1 ist. Ein wichtiges Beispiel ist hierbei das Kotangentenbündel $T^*\mathcal{M} = \text{Hom}(T\mathcal{M}, \mathbb{R})$. $T_p^*\mathcal{M}$ heißt der Kotangentenraum.

Sei $f : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}$ eine glatte Abbildung.

$$df \Big|_p : T_p\mathcal{M} \rightarrow T_{f(p)}\mathbb{R} \cong \mathbb{R} \quad (2.61)$$

Es gilt $df \Big|_p \in T_p^*\mathcal{M} \subset T^*\mathcal{M}$. Sei $x : U \rightarrow \mathcal{M}$ eine Karte

$$dx \Big|_p : T_p\mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}^n \quad (2.62)$$

Die so definierten Differentiale $\{dx^1 \Big|_p, \dots, dx^n \Big|_p\}$ bilden eine Basis für $T_p^*\mathcal{M}$.

- $dx^i \Big|_p$ heißen Kotangentenvektoren
- $\frac{\partial}{\partial x^i} \Big|_p$ heißen Tangentenvektoren

Seien (x, U) und (y, U') zwei Karten um p .

$$\frac{\partial}{\partial x^i} \Big|_p = \sum_j a_i^j \frac{\partial}{\partial y^j} \Big|_p, \quad a_i^j = \frac{\partial y^j}{\partial x^i} \quad (2.63)$$

$$dx^k = \sum_l b_l^k dy^l \Big|_p = \sum_l \frac{\partial x^k}{\partial y^l} dy^l \Big|_p \quad (2.64)$$

2.2.5 Alternierendes Vektorbündel

Das Alternierende Vektorbündel

$$\wedge^m(E', E'')_p := \wedge^m(E'_p, E''_p) \quad (2.65)$$

$$= \{f : \underbrace{E'_p \times \dots \times E'_p}_{m\text{-mal}} \rightarrow E''_p\} \quad (2.66)$$

Wobei f multilinear und alternierend ist.

$$\phi_{\alpha p} : \wedge^m(\mathbb{R}^{k'}, \mathbb{R}^{k''}) \rightarrow \wedge^m(E'_p, E''_p) \quad (2.67)$$

$$f \mapsto ((v_1, \dots, v_m) \mapsto \phi''_{\alpha p}(f^{-1}(\phi_{\alpha p})'(v_1), \dots, f^{-1}(\phi'_{\alpha p})(v_m))) \quad (2.68)$$

Es bleibt zu zeigen, dass $g_{\alpha\beta}$ glatt ist.

Es gilt:

$$\wedge^1(E', E'') = \text{Hom}(E', E'') \quad (2.69)$$

$$\wedge^1(T\mathcal{M}, \mathbb{R}) = T^*\mathcal{M} \quad (2.70)$$

Definition 2.7 (Bündel-Abbildung)

Seien (E, π, \mathcal{M}) und (E', π', \mathcal{M}') Vektorbündel. Ein paar (f, L) von glatten Abbildungen $f : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}'$ und $L : E \rightarrow E'$ heißt Bündelabbildung falls:

- $\pi' \circ L = f \circ \pi$
- $L|_{E_p}$ ist \mathbb{R} -linear

$$\begin{array}{ccc} E & \xrightarrow{L} & E' \\ \pi \downarrow & & \downarrow \pi' \\ \mathcal{M} & \xrightarrow{f} & \mathcal{M}' \end{array} \quad (2.71)$$

Beispiel 2.8

Seien $\mathcal{M}, \mathcal{M}'$ glatte Mannigfaltigkeiten und $f : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}'$ glatt. Dann ist (f, df) eine Bündel-Abbildung von $T\mathcal{M}$ nach $T\mathcal{M}'$.

Definition 2.9 (Unterbündel)

Sei (E, π, \mathcal{M}) ein Vektorbündel mit Rang k . Eine Untermannigfaltigkeit $E' \subset E$ ist ein Unterbündel vom Rang k' falls

$$\pi|_{E'} : E' \rightarrow \mathcal{M}, \quad (2.72)$$

ein Vektorbündel ist.

Beispiel 2.10 (Unterbündel)

1. $S^n \subset \mathbb{R}^{n+1}$

$$TS^n \cong \{(p, x) \in S^n \times \mathbb{R}^{n+1} | x \perp p\} \subset \underbrace{S^n \times \mathbb{R}^{n+1}}_{\text{triviales Bündel}} \quad (2.73)$$

ist ein Unterbündel

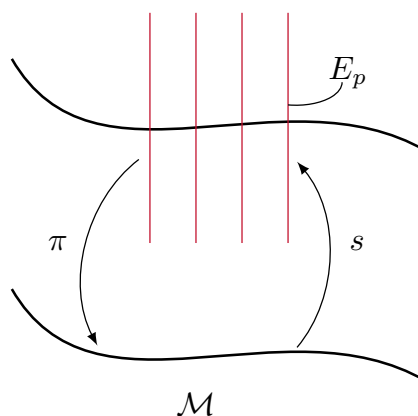
2. \mathbb{RP}^n mit dem tautologischen Bündel

$$\{(l, x) \in \mathbb{RP}^n \times \mathbb{R}^{n+1} | x \in l\} \subset \mathbb{RP}^n \times \mathbb{R}^{n+1} \quad (2.74)$$

ist ein Unterbündel.

Definition 2.11 (Schnitte von Vektorbündeln)

Sei (E, π, \mathcal{M}) ein Vektorbündel. Eine glatte Abbildung $s : \mathcal{M} \rightarrow E$ heißt Schnitt von E , falls $\pi \circ s = \text{id}|_{\mathcal{M}}$. Wir bezeichnen die Schnitte von E mit $\Gamma(E)$. Sei $U \subset \mathcal{M}$. Ein Schnitt von E über U ist eine Abbildung $s : U \rightarrow E$ mit $\pi \circ s = \text{id}_U$.



Beispiel 2.12 (Schnitte)

- Nullschnitt

$$s : \mathcal{M} \rightarrow E \quad (2.75)$$

$$p \mapsto 0 \in E_p \quad (2.76)$$

- Schnitte von $T\mathcal{M}$ heißen Vektorfelder. Wir bezeichnen die Menge der Vektorfelder $V : \mathcal{M} \rightarrow T\mathcal{M}$ mit $\mathfrak{X}(\mathcal{M})$.

2.13 Satz

Der Raum der Schnitte $\Gamma(E)$ ist ein Modul über $\mathcal{F}(\mathcal{M})$.

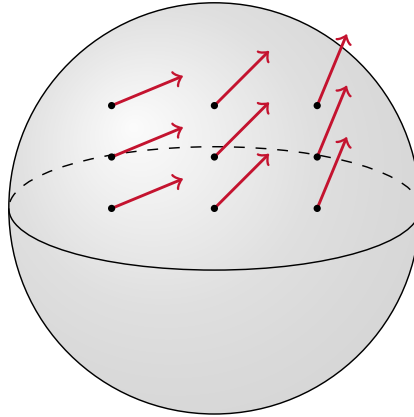


Abbildung 2.3: Beispiel für ein Vektorfeld

Beweis: (Satz 2.13)

Seien $s_1, s_2 \in \Gamma(E)$, so ist $s_1 + s_2 \in \Gamma(E)$

$$(s_1 + s_2)(p) := s_1(p) + s_2(p) \quad (2.77)$$

Sei $\phi \in \mathcal{F}(\mathcal{M})$, $s \in \Gamma(E)$, so ist $\phi \circ s \in \Gamma(E)$

$$(\phi s)(p) := \phi(p)s(p). \quad (2.78)$$

□

2.15 Lemma

Sei (E, π, \mathcal{M}) ein Vektorbündel und $p \in \mathcal{M}$. Dann gilt für alle $x \in E_p$ existiert ein Schnitt $s \in \Gamma(E)$, so dass $s(p) = x$

Beweis:

Wähle eine lokale Trivialisierung von E auf $W \ni p$

$$\phi : W \times \mathbb{R}^k \rightarrow \pi^{-1}(W) = E \Big|_W \quad (2.79)$$

und eine glatte Funktion $\varphi \in \mathcal{F}(\mathcal{M})$ mit $\varphi(p) = 1$ und $\text{supp}(\varphi) \subset W$. Sei $\xi \in \mathbb{R}^k$, so dass $\phi(p, \xi) = x$. Definiere:

$$s(q) = \begin{cases} \phi(q, \varphi(q)\xi) & q \in W \\ 0_q & q \notin W \end{cases} \quad (2.80)$$

s ist glatt, da folgendes gilt:

- s ist glatt auf W
- s ist 0 auf einer Umgebung von $\mathcal{M} \setminus W$

$$s(p) = (\phi(p), \phi(p)\xi) = \phi(p, \xi) = x \quad (2.81)$$

□

Definition 2.17 (Lokaler Rahmen)

Sei (E, π, \mathcal{M}) ein Vektorbündel vom Rang k und $U \subset \mathcal{M}$. Ein Rahmen von E über U ist ein k -Tupel (s_1, \dots, s_k) von glatten Schnitten über U (das heißt $s_i \in \Gamma_i(E)$), so dass für alle $p \in U$ $s_1(p), \dots, s_k(p)$ eine Basis von E_p bilden.

2.18 Satz

Sei (E, π, \mathcal{M}) ein Vektorbündel vom Rang k .

1. Aus einem lokalen Rahmen folgt eine lokale Trivialisierung. Sei (s_1, \dots, s_k) ein lokaler Rahmen über $U \subset \mathcal{M}$. Dann ist

$$\phi : U \times \mathbb{R}^k \rightarrow E \Big|_U \quad (2.82)$$

$$(p, \xi) \mapsto \sum_{i=1}^k \xi_i s_i(p), \quad (2.83)$$

eine lokale Trivialisierung

2. Aus einer lokalen Trivialisierung folgt ein lokaler Rahmen. Sei $\phi : U \times \mathbb{R}^k \rightarrow E \Big|_U$ eine lokale Trivialisierung. Dann ist (s_1, \dots, s_k) ein lokaler Rahmen mit

$$s_i(p) = \phi(p, e_i), \quad (2.84)$$

wobei $\{e_i\}$ die Standardbasis von \mathbb{R}^k ist.

Beweis: (Teil 1 Satz 2.18)

Es gilt, dass

$$\phi \Big|_p : \{p\} \times \mathbb{R}^k \rightarrow E \Big|_p \quad (2.85)$$

ein Isomorphismus ist. Außerdem hat

$$\phi : U \times \mathbb{R}^k \rightarrow E \Big|_U, \quad (2.86)$$

maximalen Rang.

Für alle p in U existiert eine Umgebung $V \subset U$ von p , so dass die folgende Abbildung eine lokale Trivialisierung ist:

$$\psi_V : V \times \mathbb{R}^k \rightarrow E \Big|_V. \quad (2.87)$$

Dann gilt:

$$\psi_V^{-1} \circ \phi(q, \xi) = (q, \underbrace{\psi_q^{-1} \circ \phi_q(\xi)}_{\text{Isomorphismus}}) \quad (2.88)$$

$\psi_V^{-1} \circ \phi : V \times \mathbb{R}^k \rightarrow V \times \mathbb{R}^k$ ist ein Diffeomorphismus. Daraus folgt, dass ϕ maximalen Rang auf V und U hat womit folgt, dass ϕ ein Diffeomorphismus ist. \square

Beweis: (Teil 2 Satz 2.18)

Diese Aussage ist sofort klar, da ϕ_p ein Isomorphismus ist. \square

Lokale Rahmen erlauben es uns mit Schnitten zu rechnen.

Definition 2.21 (Hauptteil)

Sei (s_1, \dots, s_k) ein lokaler Rahmen und ϕ die dazugehörige lokale Trivialisierung. Ferner sei $s \in \Gamma_U(E)$ über $U \subset \mathcal{M}$. Dann existiert eine glatte Abbildung

$$\sigma : U \rightarrow \mathbb{R}^k, \quad (2.89)$$

so dass

$$s(p) = \sum_{i=1}^k \sigma_i(p) s_i(p) \quad (2.90)$$

$$\phi(p, \sigma(p)) = s(p). \quad (2.91)$$

σ heißt der Hauptteil von s bezüglich ϕ .

Bemerkung: Die Aussagen: σ ist glatt und s ist glatt sind äquivalent.

Sei (t_1, \dots, t_k) ein lokaler Rahmen über V und ψ die dazugehörige lokale Trivialisierung, so dass $U \cap V \neq \emptyset$. Über $U \cap V$ gilt:

$$s_i = \sum_j g_i^j t_j, \quad (2.92)$$

wobei $g_i^j : U \cap V \rightarrow \mathbb{R}$. Setze $g(p) = (g_i^j(p))_{i,j=1}^k$

$$g(p)(t_1(p), \dots, t_k(p)) = (s_1(p), \dots, s_k(p)) \quad (2.93)$$

$$g : U \cap V \ni p \mapsto g(p) \in \text{GL}(E \Big|_p) \quad (2.94)$$

sei $s \in \Gamma_{U \cap V}(E)$ und Hauptteile σ_ϕ, σ_ψ , dann ist

$$\sigma_\phi^i = \sum_{j=1}^k g_i^j \sigma_\psi^j \quad (2.95)$$

$$\sigma_\phi = g \sigma_\psi \quad (2.96)$$

$$g : U \cap V \rightarrow \text{GL}(k, \mathbb{R}) \quad (2.97)$$

Definition 2.23 (Pullback)

Sei $E \xrightarrow{\pi} \mathcal{M}$ ein Vektorbündel und $f : \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{M}$ eine glatte Abbildung. Der Pullback von E über f ist das Vektorbündel f^*E welches definiert ist durch:

1. $(f^*E)_{p \in \mathcal{N}} = \{(p, x) | x \in E_{f(p)}\}$
2. sei $\phi : U \times \mathbb{R}^k \rightarrow E|_U$ lokale Trivialisierung von E

$$f^*\phi : f^{-1}(U) \times \mathbb{R}^k \rightarrow (f^*E)|_{f^{-1}(U)} \quad (2.98)$$

$$(p, \xi) \mapsto (p, \phi(f(p), \xi)) \quad (2.99)$$

Definition 2.24

Ein Schnitt von E entlang von f ist eine glatte Abbildung $s : \mathcal{N} \rightarrow E$, so dass $\pi \circ s = f$.

2.3 Zusammenhang und kovariante Ableitung

Definition 2.25

$$\mathfrak{X}(\mathcal{M}) \times \mathcal{F}(\mathcal{M}) \rightarrow \mathcal{F}(\mathcal{M}) \quad (2.100)$$

$$X : \phi \mapsto X(\phi) \quad (2.101)$$

Wobei

$$X(\phi)(p) := X_p(\phi) \quad (2.102)$$

Definition 2.26 (Lie-Klammern)

$$[\cdot, \cdot] : \mathfrak{X}(\mathcal{M}) \times \mathfrak{X}(\mathcal{M}) \rightarrow \mathfrak{X}(\mathcal{M}) \quad (2.103)$$

$$[X, Y]f := X(Y(f)) - Y(X(f)) \quad (2.104)$$

Hier bleibt als Übung zu zeigen, dass $[X, Y]$ tatsächlich ein neues Vektorfeld ist. Zusammen mit der Lie-Klammer ist $\mathfrak{X}(\mathcal{M})$ eine Lie-Algebra.

Definition 2.27 (Zusammenhang)

Sei (E, π, \mathcal{M}) ein Vektorbündel vom Rang k . Ein Zusammenhang auf E ist eine Abbildung

$$D : \mathfrak{X}(\mathcal{M}) \times \Gamma(E) \rightarrow \Gamma(E) \quad (2.105)$$

$$(X, s) \mapsto D(X, s) = D_X s \quad (2.106)$$

Wobei folgende Eigenschaften erfüllt sind:

1. D ist tensoriell in X :

$$D_{X_1+X_2}s = D_{X_1}s + D_{X_2}s \quad (2.107)$$

$$D_{\phi X}s = \phi D_X s \quad (2.108)$$

2. D ist eine Derivation in s :

$$D_X(s_1 + s_2) = D_X s_1 + D_X s_2 \quad (2.109)$$

$$D_X(\phi s) = X(\phi)s + \phi D_X s \quad (2.110)$$

Wir führen hier die folgende Notation ein: $D_X s$ heißt die kovariante Ableitung von s in Richtung X .

Wichtiger Spezialfall:

$$E = T\mathcal{M} \quad (2.111)$$

$$D : \underbrace{\mathfrak{X}(\mathcal{M})}_{\text{tensoriell}} \times \underbrace{\mathfrak{X}(\mathcal{M})}_{\text{derivativ}} \rightarrow \mathfrak{X}(\mathcal{M}) \quad (2.112)$$

Beispiel 2.28

Sei $E = \mathcal{M} \times \mathbb{R}^k$ das triviale Bündel mit

$$s : \mathcal{M} \rightarrow E \quad (2.113)$$

$$p \mapsto (p, \sigma(p)) \quad (2.114)$$

wobei $\sigma = (\sigma_1, \dots, \sigma_k)$, $\sigma_i \in \mathcal{F}(\mathcal{M})$. Dann ist der kanonische Zusammenhang gegeben als:

$$(D_X s)(p) = (p, X_p(\sigma_1), \dots, X_p(\sigma_k)) \quad (2.115)$$

Wir benutzen die folgende Notation: $D_X s = X(\sigma)$.

2.29 Lemma

$X_1, X_2 \in \mathfrak{X}(\mathcal{M})$ und $X_1(p) = X_2(p)$, dann folgt daraus, dass

$$(D_{X_1} s)(p) = (D_{X_2} s)(p). \quad (2.116)$$

2.30 Lemma

$s_1, s_2 \in \Gamma(\mathcal{M})$ und $s_1 = s_2$ in einer Umgebung von p , daraus folgt, dass

$$(D_X s_1)(p) = (D_X s_2)(p). \quad (2.117)$$

Beweis: (Lemma 2.30)

Wähle $\phi \in \mathcal{F}(\mathcal{M})$ mit $\text{supp } \phi \subseteq U$ und $\phi = 1$ auf einer Umgebung $V \subset U$ von p . Dann gilt

$$\phi s_1 = \phi s_2 \quad (2.118)$$

$$D_X(\phi s_1)(p) = D_X(\phi s_2)(p) \quad (2.119)$$

Für die linke Seite ist

$$D_X(\phi s_1)(p) = \underbrace{X(p)}_{=0} s_1(p) + \underbrace{\phi(p)}_{=1} D_X s_1(p) = D_X s_1(p). \quad (2.120)$$

Das gleiche gilt für die rechte Seite und somit folgt die Aussage:

$$(D_X s_1)(p) = (D_X s_2)(p). \quad (2.121)$$

□

Als nächstes möchten wir Lemma 2.29 beweisen. Allerdings können wir gleich etwas allgemeineres beweisen wodurch Lemma 2.29 sofort klar wird.

2.32 Lemma

Sei $\mathcal{L} : \Gamma(E) \rightarrow \Gamma(E')$ eine tensorielle Abbildung. Tensoriell bedeutet hierbei, dass

$$\mathcal{L}(\phi s) = \phi \mathcal{L}(s), \quad \forall \phi \in \mathcal{F}(\mathcal{M}) \quad (2.122)$$

gilt.

Sei weiterhin $p \in \mathcal{M}$ und $s, \tilde{s} \in \Gamma(E)$ mit $s(p) = \tilde{s}(p)$, dann gilt

$$\mathcal{L}(s)(p) = \mathcal{L}(\tilde{s})(p) \quad (2.123)$$

Lemma 2.29 folgt sofort aus diesem Lemma, da die Abbildung

$$D.s : \mathfrak{X}(\mathcal{M}) \rightarrow \Gamma(E) \quad (2.124)$$

$$X \mapsto D_X s \quad (2.125)$$

tensoriell ist.

Beweis: (Lemma 2.32)

Sei U eine Umgebung von p und $\phi = (s_1, \dots, s_k)$ ein lokaler Rahmen auf U . Sei außerdem φ eine Bumpfunktion mit $\text{supp } \varphi \subset U$ und $\varphi(p) = 1$.

Wir schreiben

$$s = \sum_{i=1}^k \sigma_i s_i, \quad \tilde{s} = \sum_{i=1}^k \tilde{\sigma}_i s_i \quad (2.126)$$

mit $\sigma_i(p) = \tilde{\sigma}_i(p)$.

$$\mathcal{L}(s)(p) = \varphi^2(p) \mathcal{L}(s)(p) \quad (2.127)$$

$$= \mathcal{L}(\varphi^2 s)(p) \quad (2.128)$$

$$= \sum_{i=1}^k \mathcal{L}((\varphi \sigma_i)(\varphi s_i))(p) \quad (2.129)$$

$$= \sum_{i=1}^k \varphi(p) \sigma_i(p) \mathcal{L}((\varphi s_i))(p) \quad (2.130)$$

Analog rechnet man mit \tilde{s}

$$\mathcal{L}(\tilde{s})(p) = \sum_{i=1}^k \varphi(p) \tilde{\sigma}_i(p) \mathcal{L}((\varphi s_i))(p). \quad (2.131)$$

Da $\sigma_i(p) = \tilde{\sigma}_i(p)$ und $\varphi(p) = 1$ folgt nun die Aussage

$$\mathcal{L}(s)(p) = \mathcal{L}(\tilde{s})(p). \quad (2.132)$$

□

Definition 2.34 (Tensorfeld)

Ein Tensorfeld vom Typ (n, s) ist ein glatter Schnitt des Bündels

$$T_s^n(\mathcal{M}) = \left(\bigotimes_{i=1}^n T\mathcal{M} \right) \otimes \left(\bigotimes_{i=1}^s T_s^* \mathcal{M} \right). \quad (2.133)$$

In anderen Worten ist ein Tensorfeld vom Typ (n, s) eine Abbildung

$$B : \underbrace{\mathfrak{X}(\mathcal{M}) \times \cdots \times \mathfrak{X}(\mathcal{M})}_{s \text{ mal}} \rightarrow \underbrace{\mathfrak{X}(\mathcal{M}) \times \cdots \times \mathfrak{X}(\mathcal{M})}_{n \text{ mal}}, \quad (2.134)$$

die tensoriell in jedem Argument ist.

Lemma 2.32 sagt uns, dass jede Abbildung B aus einem Vektorfeld kommt.

2.35 Korollar

Sei B ein Tensorfeld vom Typ (n, s) , dann induziert B für alle p eine s -lineare Abbildung:

$$B_p : T_p \mathcal{M}^s \rightarrow T_p \mathcal{M}^n \quad (2.135)$$

$$(v_1, \dots, v_s) \mapsto B_p(v_1, \dots, v_s) \quad (2.136)$$

Wir wollen nun wieder zu Zusammenhängen zurückkehren.

Beispiel 2.36 (Kanonischer Zusammenhang)

Wir wählen die Koordinaten wie folgt:

$$s(p) = (p, \sigma(p)), \quad s \in \Gamma(\mathcal{M} \times \mathbb{R}^k), \quad (2.137)$$

wobei $\sigma = (\sigma_1, \dots, \sigma_k)$ mit $\sigma_i \in \mathcal{F}(\mathcal{M})$. Dann ist der kanonische Zusammenhang gegeben durch:

$$D_X s = (X(\sigma_1), \dots, X(\sigma_k)) \quad (2.138)$$

Sei ω eine 1-Form auf \mathcal{M} mit Werten in Matrizen $\text{Mat}_{k \times k}(\mathbb{R})$. Das bedeutet, dass

$$\omega \in \Gamma(\text{Hom}(T\mathcal{M}, \text{Mat}_{k \times k}(\mathbb{R}))) \quad (2.139)$$

$$\omega_p : T_p \mathcal{M} \rightarrow \text{Mat}_{k \times k}(\mathbb{R}) \quad (2.140)$$

$$\omega = (\omega_{ij})_{i,j=1}^k \quad (2.141)$$

ω_{ij} ist eine 1-Form auf \mathcal{M}

$$w_p^{ij} : T_p \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}. \quad (2.142)$$

Definition 2.37

Mit einer 1-Form kann folgender Zusammenhang definiert werden:

$$(D_X^\omega s)(p) = (p, X_p(\sigma) + \omega_p(X_p)\sigma(p)) \quad (2.143)$$

2.38 Satz

Sei (E, π, \mathcal{M}) ein Vektorbündel und D ein Zusammenhang auf E . Weiterhin sei ω eine 1-Form mit Werten in $\text{Hom}(E, E)$. Dann ist

$$D_X^\omega s = D_X s + \omega(X)s, \quad (2.144)$$

ein Zusammenhang auf E

Umgekehrt gilt ebenso der folgende Satz:

2.39 Satz

Seien D und D' zwei Zusammenhänge auf E . Dann definiert

$$\omega(X)s = D'_X s - D_X s \quad (2.145)$$

eine 1-Form mit Werten in $\text{Hom}(E, E)$.

Beispiel 2.40

Sei $E = \mathcal{M} \times \mathbb{R}^k$.

$$D_X^\omega s = (p, X(\sigma) + \omega_p(X_p)\sigma_p) \quad (2.146)$$

Aus dem Satz von oben folgt, dass $D_X^\omega s$ alle Zusammenhänge auf E sind. Aus der Lokalisierung folgt

$$\phi : U \times \mathbb{R}^k \rightarrow E \Big|_U. \quad (2.147)$$

Wir stellen uns die Frage wie wir Zusammenhänge mit einer 1-Form finden können. Dies ist mithilfe von Zusammenhangsformen bezüglich eines lokalen Rahmens möglich. Sei $\phi = (s_1, \dots, s_k)$ ein lokaler Rahmen von E über U und sei $X \in \mathfrak{X}(\mathcal{M})$. Zudem sind $D_X s_1, \dots, D_X s_k \in \Gamma(E)$. Diese lassen sich wie folgt darstellen:

$$D_X s_i = \sum_{j=1}^k \omega_{ij}(x) s_j \quad (2.148)$$

Wobei die 1-Form $\omega_{ij}(x) : U \rightarrow \mathbb{R}$ glatt und tensoriell in X ist. Es ist $s = \sum_i \sigma_i s_i$. Damit erhält man:

$$D_X s = \sum (X(\sigma_i) s_i + \sigma_i D_X s_i) \quad (2.149)$$

$$= \sum_j X(\sigma_j) s_j + \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^k \sigma_i \omega_{ij} s_j \quad (2.150)$$

$$= \sum_j \left[X(\sigma_j) + \sum_i \sigma_i \omega_{ij}(X) \right] s_j \quad (2.151)$$

Unser nächster Schritt ist es nun die Parallelverschiebung zu definieren. Auf dem Weg dorthin ist unser erstes Ziel zunächst die kovariante Ableitung von Schnitten längs einer Abbildung zu definieren.

1. Zu Schnitten längs einer Abbildung:

$$\begin{array}{ccc}
 & & E \\
 & \nearrow s^{\mathcal{N}} & \downarrow \pi \\
 \mathcal{N} & \xrightarrow{f} & \mathcal{M}
 \end{array} \quad (2.152)$$

Eine Abbildung $s^{\mathcal{N}} : \mathcal{N} \rightarrow E$ heißt Schnitt längs $f : \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{M}$ falls:

- i) $s^{\mathcal{N}}$ ist glatt
- ii) Das obere Diagramm kommutiert: $f = \pi \circ s^{\mathcal{N}}$

Notation: $\Gamma_f(E)$

Wichtiger Spezialfall: $\mathcal{N} = I$, das heißt f ist eine Kurve falls $E = T\mathcal{M}$

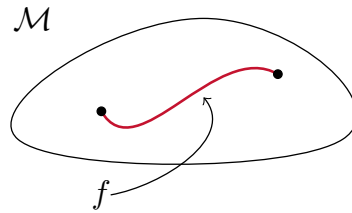


Abbildung 2.4: Kurve f auf einer Mannigfaltigkeit

Hier sieht das Diagramm dann wie folgt aus:

$$\begin{array}{ccc}
 & & T\mathcal{M} \\
 & \nearrow s^I & \downarrow \pi \\
 I & \xrightarrow{f} & \mathcal{M}
 \end{array} \quad (2.153)$$

2. Wollen $D : \mathfrak{X}(\mathcal{N}) \times \Gamma_f(E) \rightarrow \Gamma_f(E)$.

Definition 2.41 (Kovariante Ableitung längs eines Schnittes)

Sei $\phi = (s_1, \dots, s_k)$ ein lokaler Rahmen von E über U und $s \in \Gamma_f(U)$. Dann ist:

$$s = \sum_{i=1}^k \sigma_i s_i \circ f \quad (2.154)$$

Wir definieren die kovariante Ableitung längs f als:

$$D_X^f s = \sum_{j=1}^k \left(X(\sigma_j) + \sum_{i=1}^k \omega_{ij}(f_* X) \sigma_i \right) s_j \circ f \quad (2.155)$$

$$" = "X(\sigma) + (f^* \omega)(X) \sigma \quad (2.156)$$

Die Wohldefiniertheit soll als Übung gezeigt werden.

2.42 Satz

Die kovariante Ableitung D^f längs f

$$D^f : \mathfrak{X}(\mathcal{N}) \times \Gamma_f(E) \rightarrow \Gamma_f(E), \quad (2.157)$$

ist tensoriell im ersten Argument und derivativ im zweiten Argument.

Wenn wir die Schnitte $\Gamma_f(E)$ mit $\Gamma(f^*E)$ identifizieren, dann erhalten wir den zurückgezogenen Zusammenhang

$$f^*D : \mathfrak{X}(\mathcal{N}) \times \Gamma(f^*E) \rightarrow \Gamma(f^*E). \quad (2.158)$$

2.43 Satz

Sei $s^{\mathcal{M}} \in \Gamma(E)$, $q \in \mathcal{N}$ und $v \in T_q \mathcal{N}$. Dann gilt:

$$D_v^f(s^{\mathcal{M}} \circ f) = D_{f^*v} s^{\mathcal{M}} \quad (2.159)$$

Die wichtigste Situation ist hierbei der Fall der Kurven also mit $\mathcal{N} = I$ und $E = T\mathcal{M}$. Hier gilt nämlich

$$D_t s := D_{\frac{\partial}{\partial t}}^c s. \quad (2.160)$$

Bemerkung: Sei c so gewählt, dass $\dot{c}(t) = 0$, das heißt $c(t) = p$.

Achtung: $D_t s$ kann ungleich Null sein, selbst wenn $\dot{c}(t) = 0$.

Zum Beispiel: $c(t) = p$ und $s \in \Gamma_c(E)$, dann muss $s(t) \in E_p$ nicht konstant sein.

Als nächstes wollen wir nun die kovariante Ableitung längs von Kurven verwenden, um die Parallelverschiebung zu definieren.

Definition 2.45 (Parallelität)

Sei $c : I \rightarrow \mathcal{M}$ eine glatte Kurve und (E, π, \mathcal{M}) ein Vektorbündel. Ein Schnitt $s^I \in \Gamma_c(E)$ heißt parallel längs c , falls

$$D_t^c s = 0. \quad (2.161)$$

Bemerkung: Wenn s_1 und s_2 parallel sind, so ist auch $\alpha s_1 + \beta s_2$ ($\forall \alpha, \beta \in \mathbb{R}$) parallel.

In einem lokalen Rahmen bedeutet $D_t^c s = 0$:

$$\dot{\sigma} + \omega(\dot{c})\sigma = 0. \quad (2.162)$$

Dies ist eine gewöhnliche Differentialgleichung erster Ordnung.

2.47 Lemma

Sei $t_0 \in I$ und $X \in E_{c(t_0)}$ dann existiert genau ein paralleler Schnitt s längs c mit $s(t_0) = X$.

Sei c eine glatte Kurve mit $c(t_0) = p$ und $c(t_1) = q$ ($t_0, t_1 \in I$). Setze $P_c(x) = s(t_1)$ wobei s der eindeutig bestimmte parallele Schnitt längs c mit $s(t_0) = x$ ist.

Definition 2.48 (Parallelverschiebung)

$P_c : E_p \rightarrow E_q$ heißt Parallelverschiebung längs c .

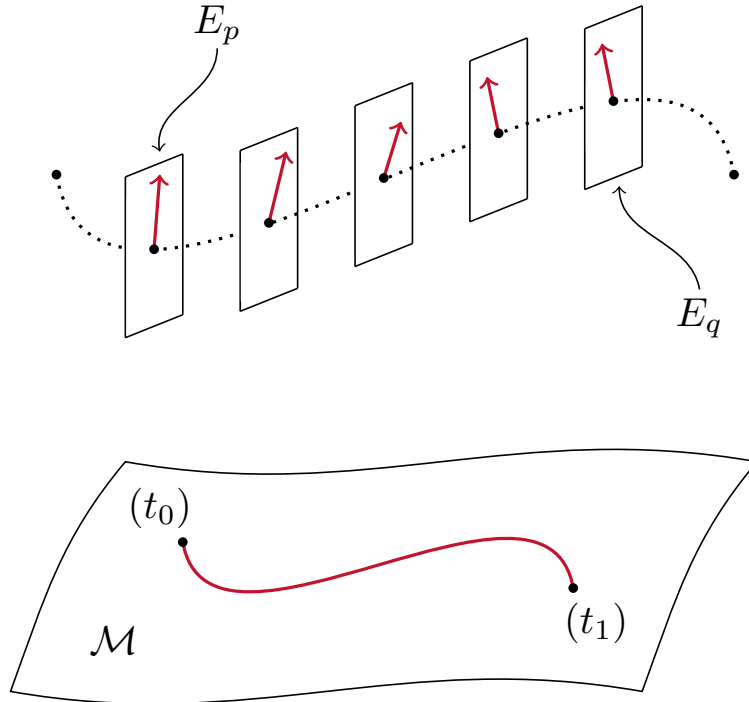


Abbildung 2.5: Parallelverschiebung

2.49 Lemma

Sei $t_0 \in I$ und seien s_1, \dots, s_k parallele Schnitte längs c . Falls $s_1^I(t_0), \dots, s_k^I(t_0)$ eine Basis von $E_{c(t_0)}$ ist, so ist $s_1^I(t), \dots, s_k^I(t)$ eine Basis von $E_{c(t)}$ für alle $t \in I$.

Beweis: (Lemma 2.49)

$$s_i^I(t) = P_c s_i^I(t_0) \quad (2.163)$$

Da P invertierbar ist folgt die Aussage. \square

Definition 2.51 (Paralleler Rahmen)

Ein k -Tupel von Schnitten $\phi = (s_1, \dots, s_k)$ längs c heißt Rahmen von E längs c , falls $(s_1(t), \dots, s_k(t))$ eine Basis von $E_{c(t)}$ für alle $t \in I$ ist. $\phi = (s_1, \dots, s_k)$ heißt paralleler Rahmen, falls alle s_i parallel sind.

Warum sind parallele Rahmen für uns interessant?

Wir betrachten den parallelen Rahmen $\phi = (s_1, \dots, s_k)$ und sei $s \in \Gamma_c(E)$. Das heißt

$$s = \sum_{i=1}^k \sigma_i s_i. \quad (2.164)$$

Damit erhalten wir für die kovariante Ableitung:

$$D_t s = \sum_{i=1}^k D_t(\sigma_i s_i) \quad (2.165)$$

$$= \sum_{i=1}^k (\partial_t \sigma_i) s_i. \quad (2.166)$$

Bezüglich des parallelen Rahmens ist die kovariante Ableitung also gerade die Standardableitung.

Bemerkung: Parallelverschiebung kann man allgemein längs Stückweiser glatter Kurven c definieren.

2.4 Krümmung

Definition 2.53 (Krümmungstensor)

Der Krümmungstensor eines Zusammenhangs D auf E ist die Abbildung:

$$\begin{aligned} R : \mathfrak{X}(\mathcal{M}) \times \mathfrak{X}(\mathcal{M}) \times \Gamma(E) &\rightarrow \Gamma(E) \\ (X, Y, s) &\mapsto R(X, Y)s \end{aligned}$$

Hierbei gilt: $R(X, Y)s = D_X(D_Y s) - D_Y(D_X s) - D_{[X, Y]}s$

Achtung: Die Vorzeichen-Konvention ist in der Literatur im Allgemeinen nicht eindeutig!

2.54 Satz

Der Krümmungstensor ist tensoriell in X, Y & s . Außerdem ist er schiefsymmetrisch in X & Y .

Beweis:

- $R(X, Y) = -R(Y, X)$ trivial \Rightarrow Schiefsymmetrie klar.
- zu zeigen: R ist tensoriell in s , das heißt $R(X, Y)(\varphi s) = \varphi R(X, Y)s$
 - a) $D_X(D_Y(\varphi s)) = D_X(Y(\varphi)s + \varphi D_Y s) = X(Y(\varphi))s + Y(\varphi)D_X s + X(\varphi)D_Y s + \varphi D_X(D_Y s)$
 - b) $-D_Y(D_X(\varphi s)) = -Y(X(\varphi))s - X(\varphi)D_Y s - Y(\varphi)D_X s + \varphi D_Y(D_X s)$
 - c) $-D_{[X, Y]}(\varphi s) = -[X, Y](\varphi)s - \varphi D_{[X, Y]}s$

$$\Rightarrow R(X, Y)\varphi s = \varphi D_X(D_Y s) - \varphi D_Y(D_X s) - \varphi D_{[X, Y]}s = \varphi R(X, Y)s \quad \square$$

- zu zeigen: R ist tensoriell in X .

2.56 Hilfslemma

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

Beweis:

$$[\varphi X, Y]f = \varphi X(Y(f)) - Y(\varphi X(f)) = \varphi X(Y(f)) - Y(\varphi)X(f) - \varphi Y(X(f)) \quad \square$$

Beweis:

$$\begin{aligned} R(\varphi X, Y)s &= D_{\varphi X}(D_Y s) - D_Y(D_{\varphi X} s) - D_{[\varphi X, Y]}s \\ &= \varphi D_X(D_Y s) - Y(\varphi)D_X s - \varphi D_Y(D_X s) - D_{\varphi[X, Y]}s + D_{Y(\varphi)X} s \\ &= \varphi R(X, Y)s \end{aligned} \quad \square$$

2.59 Korollar

$R_p : T_p \mathcal{M} \times T_p \mathcal{M} \times E_p \rightarrow E_p$ ist punktweise definiert $\forall p \in \mathcal{M}$

Bemerkung: In vielen Büchern wird zunächst der Fall $E = T\mathcal{M}$ diskutiert.

Beispiel 2.61

1) Kanonischer Zusammenhang auf $\mathcal{M} \times \mathbb{R}^k$:

$$s \in \Gamma(E) \quad \longleftrightarrow \quad \sigma : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}^k$$

In diesen Fall ist der Krümmungstensor wie folgt gegeben:

$$\begin{aligned} R(X, Y)s &= D_X(D_Y s) - D_Y(D_X s) - D_{[X, Y]}s \\ &= X(Y(\sigma)) - Y(X(\sigma)) - [X, Y]\sigma \\ &= 0 \end{aligned}$$

Definition 2.62

- a) Ein Zusammenhang D auf E mit $R \equiv 0$ heißt *flach*.
 b) Ein Vektorbündel E mit flachem Zusammenhang heißt *flaches Bündel*.

Beispiel 2.63

2) Zusammenhang auf $\mathcal{M} \times \mathbb{R}^k$ gegeben durch eine 1-Form mit Werten in $\text{Mat}(k \times k, \mathbb{R})$:

$$\begin{aligned} D_X^\omega s &= X(\sigma) + \omega(X) \cdot \sigma \\ &= \sum_{j=1}^k (X(\sigma^j) + \sum_{i=1}^k \sigma^i \omega_i^j(X)) s_j \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R^\omega(X, Y)s &= D_X^\omega(D_Y^\omega s) - D_Y^\omega(D_X^\omega s) - D_{[X, Y]}^\omega s \\ &= D_X^\omega(Y(\sigma) + \omega(Y) \cdot \sigma) - D_Y^\omega(X(\sigma) + \omega(X) \cdot \sigma) - [X, Y](\sigma) - \omega([X, Y])\sigma \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Übung!} &= X(Y(\sigma)) + X(\omega(Y))\sigma - Y(X(\sigma)) - Y(\omega(X))\sigma + \omega(X)\omega(Y)\sigma \\ &\quad - \omega(Y)\omega(X)\sigma - [X, Y]\sigma - \omega([X, Y])\sigma \\ &= \left(\underbrace{X(\omega(Y)) - Y(\omega(X)) - \omega([X, Y])}_{:= d\omega(X, Y)} - [\omega(X), \omega(Y)] \right) \sigma \end{aligned}$$

Hierbei wird d äußeres Differential genannt.

Lineare Zusammenhänge: $E = T\mathcal{M}$

$$\nabla : \mathfrak{X}(\mathcal{M}) \times \mathfrak{X}(\mathcal{M}) \longrightarrow \mathfrak{X}(\mathcal{M})$$

Krümmung :

$$\begin{aligned} R : \mathfrak{X}(\mathcal{M}) \times \mathfrak{X}(\mathcal{M}) \times \mathfrak{X}(\mathcal{M}) &\longrightarrow \mathfrak{X}(\mathcal{M}) \\ R(X, Y)Z &= \nabla_X(\nabla_Y Z) - \nabla_Y(\nabla_X Z) - \nabla_{[X, Y]}Z \end{aligned}$$

Torsion:

$$\begin{aligned} T : \mathfrak{X}(\mathcal{M}) \times \mathfrak{X}(\mathcal{M}) &\longrightarrow \mathfrak{X}(\mathcal{M}) \\ (X, Y) &\longmapsto T(X, Y) := \nabla_X Y - \nabla_Y X - [X, Y] \end{aligned}$$

2.64 Lemma

T ist tensoriell in X und Y .

Beweis:

$T(X, Y) = -T(Y, X) \longrightarrow \text{z.z. } T \text{ tensoriell in } X.$

$$\begin{aligned} T(\varphi X, Y) &= \nabla_{\varphi X} Y - \nabla_Y(\varphi X) - [\varphi X, Y] \\ &= \varphi T(X, Y) \end{aligned}$$

□

Definition 2.66

Ein Zusammenhang ∇ heißt *symmetrisch*, falls $T \equiv 0$.

2.5 Krümmung und Parallelverschiebung

1. Gegeben seien $u, v \in T_p \mathcal{M}$. Dann können wir $R_p(u, v) : E_p \rightarrow E_p$ als lineare Abbildung von E_p nach E_p auffassen.
2. Gegeben sei eine geschlossene ($c(0) = c(1) = p$) Kurve $c : I = [0, 1] \rightarrow \mathcal{M}$ (glatt). So liefert $P_c : E_p \rightarrow E_p$ einen Isomorphismus mit:

$$D_t s = 0 \quad (2.167)$$

$$P_c : x \mapsto y. \quad (2.168)$$

Wobei gilt:

$$P_c(\lambda x) = \lambda P_c(x), \quad P_c(\tilde{s}(0)) = \tilde{s}(1) = \lambda P_c(s(0)) \quad (2.169)$$

$$P_c(\lambda s(0)) = \tilde{s}(1), \quad P_c(s(0)) = s(1). \quad (2.170)$$

Dieser Isomorphismus wird Holonomie von D längs c genannt.

Bemerkung: Im allgemeinen hängt die Abbildung P_c vom Weg c ab. Dies gilt allerdings nicht im \mathbb{R}^n , da hier die Krümmung Null ist.

Parallelverschiebung entlang unterschiedlicher geschlossener Kurven mit dem selben Anfangspunkt p liefern im Allgemeinen unterschiedliche Resultate für $P(r)$:

$$P_{c_1}(r) \neq P_{c_2}(r) \quad (2.171)$$

Notation:

Parallelverschiebung entlang $c : P_c$

$$c : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow \mathcal{M}, \quad \text{Kurve in } \mathcal{M} \quad (2.172)$$

$$c(0) = p, \quad c'(0) = x \Big|_p, \quad Y \text{ glattes Vektorfeld auf } \mathcal{M} \quad (2.173)$$

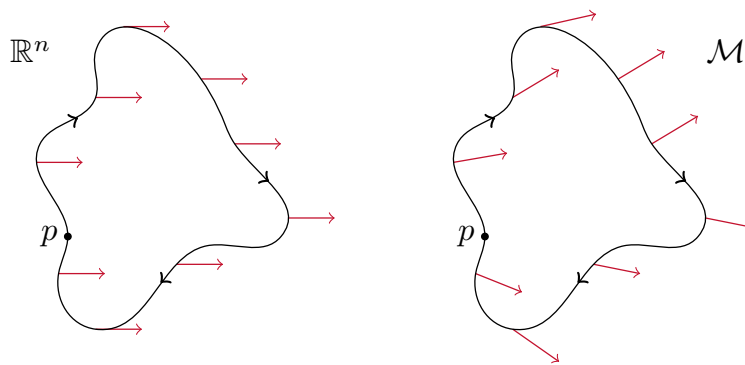
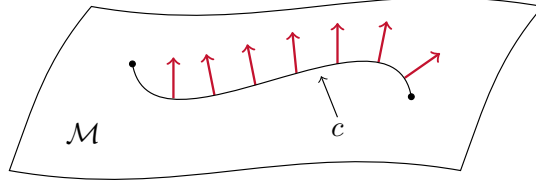


Abbildung 2.6: Parallelverschiebung auf Kurve c in \mathbb{R}^n vs. auf beliebiger Mannigfaltigkeit \mathcal{M}

Die kovariante Ableitung lässt sich durch Parallelverschiebung ausdrücken. Wir bezeichnen die Parallelverschiebung entlang c mit P_c , wobei $c : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow \mathcal{M}$ eine Kurve in \mathcal{M} ist.



Es gelte $c(0) = p$, $c'(0) = X_p$ und Y sei ein glattes Vektorfeld auf \mathcal{M} . Dann gilt:

$$\nabla_{X_p} Y = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{t} \left(P_{c(t)}^{-1} Y_{c(t)} - Y_p \right) \quad (2.174)$$

Beweis: (Beweis von Gleichung 2.174)

Für Y , definiert in einer Umgebung von p_y , ist der Wert $(\nabla_X Y)(p)$ vollständig bestimmt durch Restriktion von Y auf die Kurve c mit $c'(0) = X_p$. Expandiere Y als Linearkombination paralleler Vektorfelder längs c .

Sei $\{\hat{w}_1, \dots, \hat{w}_n\}$ eine Basis von $T_p \mathcal{M}$. Sei $w_i : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow \mathcal{M}$ das parallele Vektorfeld längs c mit $w_i(0) = \hat{w}_i$. Mit anderen Worten $\{w_1(t), \dots, w_n(t)\}$ ist eine Basis von $T_{c(t)} \mathcal{M}$.

$$Y = \sum_{i=1}^m a_i w_i \quad (2.175)$$

Mit Koeffizienten $a_i : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow \mathbb{R}$.

Betrachte:

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{t} \left(P_{c(t)}^{-1} Y(t) - Y(0) \right) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{t} \left(\sum_{i=1}^m (a_i(t) - a_i(0)) \cdot w_i(0) \right) \quad (2.176)$$

$$= \sum_{i=1}^m \left(\left. \frac{d}{dt} a_i(t) \right|_{t=0} \right) w_i(0) \quad (2.177)$$

$$= D_t \left(\sum_{i=1}^m a_i w_i \right) \Big|_{t=0} \quad (2.178)$$

$$= \nabla_X Y \quad (2.179)$$

□

Definition 2.69 (Parallele Fortsetzung)

Sei $p \in \mathcal{M}$ und $v \in T_p \mathcal{M}$, dann existiert ein paralleles Vektorbündel längs c mit $X|_p = v$.

$X|_p$ heißt parallele Fortsetzung von v .

Es stellt sich nun die folgende Frage:

Kann man $v \in T_p\mathcal{M}$ zu einem parallelen Vektorfeld in einer Umgebung von p fortsetzen? Also existiert ein Vektorfeld X auf \mathcal{M} in einer Umgebung U von p , sodass $X|_p = v$ und X parallel sind?

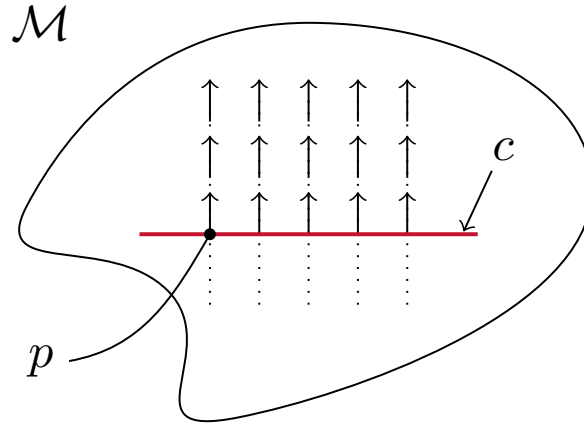


Abbildung 2.7: Paralleltransport

Gegeben sei

$$V : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow \mathcal{M} \quad (2.180)$$

$$(t, \tau) \mapsto V(t, \tau) \quad (2.181)$$

Damit erhalten wir ein Vektorfeld Z in einer Umgebung von p :

$$\nabla_{\frac{\partial}{\partial t}} Z \Big|_{(t,0)} = 0, \quad \nabla_{\frac{\partial}{\partial \tau}} Z = 0 \quad (2.182)$$

Wir hätten gerne, dass $\nabla_{\frac{\partial}{\partial t}} Z = 0$. Es genügt zu zeigen, dass folgendes gilt:

$$\nabla_{\frac{\partial}{\partial \tau}} \nabla_{\frac{\partial}{\partial t}} Z = 0 \quad (2.183)$$

2.182 impliziert:

$$\nabla_{\frac{\partial}{\partial t}} \nabla_{\frac{\partial}{\partial \tau}} Z = 0 \quad (2.184)$$

Es muss deshalb zwangsweise gelten:

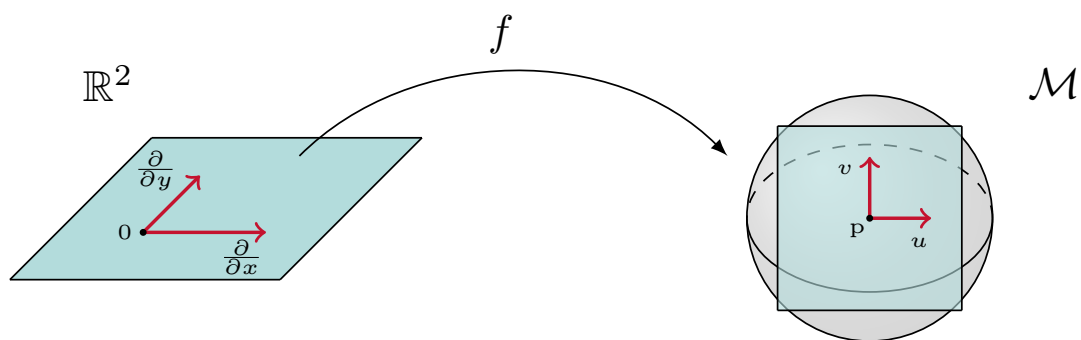
$$\nabla_{\frac{\partial}{\partial t}} \nabla_{\frac{\partial}{\partial \tau}} Z - \nabla_{\frac{\partial}{\partial \tau}} \nabla_{\frac{\partial}{\partial t}} Z = 0. \quad (2.185)$$

Da $\left[\frac{\partial}{\partial \tau}, \frac{\partial}{\partial t}\right] = 0$ gilt, ist

$$R\left(\frac{\partial}{\partial \tau}, \frac{\partial}{\partial t}\right)Z = 0 \quad (2.186)$$

Das bedeutet also falls $\nabla_{\frac{\partial}{\partial t}} Z = 0$, dann gilt $R = 0$. Mit anderen Worten $R = 0$ ist eine notwendige Bedingung für die Parallelität. Man kann zeigen, dass $R \equiv 0$ auch hinreichend ist.

Betrachte nun die folgende Situation:



Sei f glatt und $f(0) = p$ und sei außerdem

$$df\Big|_0\left(\frac{\partial}{\partial x}\right) = f_x(0) = u \quad (2.187)$$

$$df\left(\frac{\partial}{\partial y}\right) = f_y(0) = v. \quad (2.188)$$

Es sei eine Familie von Kurven c_s wobei $0 \leq s \leq 1$ und $c_s(0) = c_s(1) = 0$.

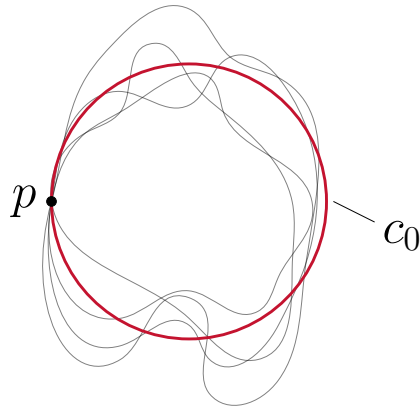


Abbildung 2.8: Variation der Kurve c_0

P_s ist die Parallelverschiebung längs c_s . Wir definieren

$$c : I \times I \rightarrow \mathcal{M} \quad (2.189)$$

$$(s, t) \mapsto c(s, t) \quad (2.190)$$

wie folgt:

$$c(s, t) = \begin{cases} f(4st, 0) & 0 \leq t \leq 1/4 \\ f(s, s(4t - 1)) & 1/4 \leq t \leq 1/2 \\ f(s(3 - 4t), s) & 1/2 \leq t \leq 3/4 \\ f(0, 4s(1 - t)) & 3/4 \leq t \leq 1 \end{cases} \quad (2.191)$$

2.70 Satz

Sei $p \in \mathcal{M}$, $u, v \in T_p \mathcal{M}$ und $f : U \rightarrow \mathcal{M}$ sei wie oben definiert. P_s sei die Parallelverschiebung längs c_s von $c_s(0) = p$ nach $c_s(1) = 0$. Dann gilt:

$$\partial_s \partial_s P_s(0) = 2 R(u, v) \quad (2.192)$$

3 Riemannsche Mannigfaltigkeiten

3.1 Wiederholung: Symmetrische Bilinearform

Definition 3.1 (Entartung, Index)

- Eine symmetrische Bilinearform $B : V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ ist nicht entartet, falls:

$$B(v, w) = 0, \quad \forall w \in V \quad (3.1)$$

$$\Rightarrow v = 0. \quad (3.2)$$

- $\text{Index}(B) = \max\{\dim W \mid W \subset V \text{ ist UR mit } \dim n \text{ und } B|_{W \times W} \text{ ist negativ definit.}\}$

Es existiert eine Basis b_1, \dots, b_n von V , so dass

$$c(s, t) = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ -1 & 1 \leq i \leq \text{Index}(B) \\ 1 & \text{Index}(B) + 1 \leq i \leq n \end{cases} \quad (3.3)$$

Definition 3.2 (Bilinearform zurückholen)

Seien V, W \mathbb{R} - Vektorräume und $B_V : V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ eine nicht-entartete symmetrische Bilinearform. Sei außerdem $\phi : W \rightarrow V$ eine lineare Abbildung. Dann ist die zurückgeholte Bilinearform:

$$(\phi^* B_V)(w_1, w_2) := B(\phi(w_1), \phi(w_2)) \quad (3.4)$$

Bemerkung:

- $(\phi^* B_V)$ ist eine symmetrische Bilinearform, die entartet sein kann.
- Wenn B_V positiv definit und ϕ injektiv ist, dann folgt daraus, dass $(\phi^* B_V)$ positiv definit ist.

Definition 3.4 (Isometrie)

Seien V, W \mathbb{R} - Vektorräume mit nicht-entarteten Bilinearformen B_V und B_W . $\phi : W \rightarrow V$ heißt Isometrie, falls $(\phi^* B_V) = B_W$.

3.2 Riemannsche Metriken

Definition 3.5 (Riemannsche Metriken)

Eine (Semi-) Riemannsche Metrik auf einer differenzierbaren Mannigfaltigkeit \mathcal{M} , ist eine Familie von nicht-entarteten symmetrischen Bilinearformen $(g_p)_{p \in \mathcal{M}}$ auf $T_p\mathcal{M}$, so dass für alle $X, Y \in \mathfrak{X}(\mathcal{M})$ gilt:

$$g.(X., Y.) : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R} \quad (3.5)$$

$$p \mapsto g_p(X_p, Y_p) \quad (3.6)$$

ist glatt in $p \in \mathcal{M}$.

Bemerkung:

- Eine solche Metrik heißt Riemannsch, wenn g_p positiv definit für alle p in \mathcal{M} .
- Eine solche Metrik heißt Lorentz-Metrik, falls $\text{Index}(g_p) = 1$ für alle p in \mathcal{M} .

Zu Semi-Riemannsch: Index potentiell ≥ 1 , aber auch Riemannsche Metriken werden als Semi-Riemannsch bezeichnet.

Mittels Riemannscher Metriken lassen sich die wesentlichen geometrischen Eigenschaften von Mannigfaltigkeiten beschreiben. Sie können verwendet werden um Winkel, Distanz bzw. Längen von Kurven zu messen.

Definition 3.7 ((Semi-)Riemannsche Mannigfaltigkeit)

Eine differenzierbare Mannigfaltigkeit \mathcal{M} ausgestattet mit einer (Semi-)Riemannschen Metrik g , wird (Semi-)Riemannsche Mannigfaltigkeit genannt.

Notation: (\mathcal{M}, g)

Wir wollen nun (Semi-)Riemannsche Metrik g in lokalen Koordinaten betrachten. Sei (x, U) eine Karte von \mathcal{M} . Ferner bezeichnen wir mit (X_1, \dots, X_n) den dazugehörigen lokalen Rahmen von $T\mathcal{M}|_U$, das heißt $X_i = \frac{\partial}{\partial x_i}$. Dann sind

$$g_{ij} : U \rightarrow \mathbb{R} \quad (3.7)$$

$$p \mapsto g_{ij}(p) := g \Big|_p (X_i(p), X_j(p)) \quad (3.8)$$

glatte Funktionen und es gilt:

$$g_p \left(X \Big|_p, Y \Big|_p \right) = g_p \left(\sum_i^m \xi^i X_i \Big|_p, \sum_i^m \eta^i X_i \Big|_p \right) \quad (3.9)$$

$$= \sum_{ij} \xi^j \eta^i \underbrace{g \Big|_p (X_j \Big|_p, X_i \Big|_p)}_{g_{ij}(p)} \quad (3.10)$$

Definition 3.8 (Fundamentalmatrix)

$(g_{ij})_{i,j=1}^m$ heißt *Fundamentalmatrix* von g bzgl. (x, U)

Bemerkung:

1. Matrix $(g_{ij})_{i,j=1}^m$ ist symmetrisch, d.h. $g_{ij} = g_{ji}$ (Folgt aus Symmetrie von g_p)
2. $(g_{ij})_{i,j=1}^m$ ist invertierbar (Folgt aus der Tatsache, dass g_p nicht entartet ist)

Die Inverse Matrix von $(g_{ij})_{i,j=1}^m$ bezeichnen wir mit $(g^{ij})_{i,j=1}^m$

Beispiel 3.10

- a) Sei V ein reeller n -dimensionaler Vektorraum und $\langle \cdot, \cdot \rangle$ eine nicht entartete Bilinearform auf V . Für $v, w \in T_p V$ gilt $g_p(v, w) := \langle v, w \rangle$. Sei $X : V \rightarrow V$ glat (X Vektorfeld), dann gilt

$$g_p(X(p), Y(p)) = \langle X(p), Y(p) \rangle \quad (3.11)$$

ist glatt. Daraus folgt, dass g eine Semi-Riemannsche Metrik ist. Es gilt:

$$g_p \left(\frac{\partial}{\partial x_i}, \frac{\partial}{\partial x_j} \right) = \left\langle \phi_p \left(\frac{\partial}{\partial x_i} \right), \phi_p \left(\frac{\partial}{\partial x_j} \right) \right\rangle = \langle e_i, e_j \rangle = \delta_{ij}$$

- b) Sei $\mathcal{M} \subset \mathbb{R}^{n+k}$ eine n -dimensionale Untermannigfaltigkeit mit

$$\begin{aligned} \phi_p : T_p \mathcal{M} &\rightarrow \mathbb{R}^{n+k} \\ [c] &\mapsto \left. \frac{d}{dt} \right|_{t=0} c(t) \end{aligned}$$

wobei ϕ_p injektiv und linear ist. Dann ist

$$g_p = \phi_p^* \langle \cdot, \cdot \rangle$$

positiv definit.

Definition 3.11

Diese Metrik heißt *erste Fundamentalform* von $\mathcal{M} \subset \mathbb{R}^{n+k}$

Als nächstes wollen wir die Existenz von Semi-Riemannschen Metriken zeigen.

3.12 Satz

Jede differenzierbare Mannigfaltigkeit kann mit einer Riemannschen Metrik ausgestattet werden.

Frage: gilt dies auch für Semi-Riemannsche Metriken? Übung.

Beweis: (Beweis Satz 3.12)

Sei $\{(x_\alpha, U_\alpha)\}$ Atlas von \mathcal{M} . Setze

$$(g_\alpha)_{ij} = \delta_{ij}$$

Sei φ_α eine glatte Partition der Eins mit $\text{supp } \varphi_\alpha \subseteq U_\alpha$. Dann setze:

$$g := \sum_{\alpha} \varphi_{\alpha} g_{\alpha}.$$

g ist hierbei nach Konstruktion glatt.

Positivität: Sei $v \in T_p \mathcal{M}$, $v \neq 0$, dann gilt:

$$g_p(v, v) = \sum_{\alpha} \varphi_{\alpha}(p) g_{\alpha} \Big|_p (v, v) \geq 0.$$

Es existiert ein α_0 , so dass $\varphi_{\alpha_0}(p) > 0$.

$$\Rightarrow g_p(v, v) \geq \varphi_{\alpha_0}(p) g_{\alpha_0} \Big|_p (v, v) > 0.$$

Wichtig: Wir haben Wahlen getroffen. \Rightarrow Metrik g ist nicht kanonisch. Unter Umständen können Metriken sehr verschiedene Eigenschaften haben. \square

Seien $\mathcal{M}_1, \mathcal{M}_2$ differenzierbare Mannigfaltigkeiten und unsere Daten sind jetzt $(\mathcal{M}_1, g_1), \mathcal{M}_2, g_2$.

$$\phi : \mathcal{M}_1 \rightarrow \mathcal{M}_2, \quad \text{Diffeomorphismus}$$

Wir wollen zusätzlich, dass ϕ die Metriken erhält, das heißt

$$\phi^* g_2 = g_1 \tag{3.12}$$

Das heißt vom Standpunkt der Riemannschen Geometrie sind (\mathcal{M}_1, g_1) und (\mathcal{M}_2, g_2) nicht zu unterscheiden, wenn $\phi : \mathcal{M}_1 \rightarrow \mathcal{M}_2$ ein Diffeomorphismus mit

$$\phi^* g_2 = g_1 \tag{3.13}$$

existiert. Eine solche Abbildung heißt **Isometrie**.

Unsere nächste Frage ist: wie verhält sich g_{ij} unter Kartenwechsel?

3.14 Lemma (Transformationsregel)

Seien (x, U) und (y, V) Karten von p . Dann gilt:

$$\begin{aligned} g_{ij}^y &= g(Y_i, Y_j) \\ &= \sum_{k,l=1}^m \frac{\partial}{\partial y^i} (x^k \circ y^{-1}) \frac{\partial}{\partial y^j} (x^l \circ y^{-1}) g_{kl}^x \end{aligned}$$

Beweis: (Beweis Lemma 3.14)

Wir wissen:

$$y_i = \sum_{k=1}^m \frac{\partial}{\partial y^i} (x^k \circ y^{-1}) \frac{\partial}{\partial x^k}$$

Daher gilt:

$$\begin{aligned} g_{ij}^y &= g(Y_i, Y_j) \\ &= \sum_{k,l=1}^m \frac{\partial}{\partial y^i} (x^k \circ y^{-1}) \frac{\partial}{\partial y^j} (x^l \circ y^{-1}) \underbrace{g\left(\frac{\partial}{\partial x^l}, \frac{\partial}{\partial x^k}\right)}_{=g_{lk}^x} \end{aligned} \quad \square$$

Nächstes Ziel: Führe ausgezeichneten Zusammenhang ein. Dazu benötigen wir zunächst ein Hilfslemma. Eine Semi-Riemannsche Metrik g definiert einen Isomorphismus zwischen Tangentialbündel und Kotangentialbündel

$$T\mathcal{M} \rightarrow T^*\mathcal{M} \quad (3.14)$$

$$T_p\mathcal{M} \ni v \mapsto g_p(v, \cdot) \in T_p^*\mathcal{M} \quad (3.15)$$

3.16 Hilfslemma

Auf einer Semi-Riemannschen Mannigfaltigkeit (\mathcal{M}, g) gibt es eine Eins zu Eins Korrespondenz zwischen Vektorfeldern und 1-Formen

$$\mathfrak{X}(\mathcal{M}) \rightarrow \Omega^1(\mathcal{M}) \quad (3.16)$$

$$x \mapsto g(X, \cdot) \quad (3.17)$$

Beweis: (Beweis Hilfslemma 3.16)

Wir haben beweis einen Faserweisen Isomorphismus

$$T_p\mathcal{M} \rightarrow T_p^*\mathcal{M}$$

definiert. Zu zeigen bleibt: glattheit, das heißt X glatt, dass ist $g(X, \cdot)$ glatt. Arbeite in Karte (x, U) , dann ist

$$\left(\frac{\partial}{\partial x_1} \Big|_p, \dots, \frac{\partial}{\partial x_m} \Big|_p \right)$$

eine Basis von $T_p^*\mathcal{M}$. Dann gilt $g_p = \sum g_{ij} dx^i \otimes dx^j$. Das heißt:

$$\begin{aligned} g_p(X, Y) &= g_{ij} dx^i \otimes dx^j \left(\sum \xi^k X_k, \eta^l, X_l \right) \\ &= \sum g_{ij} \xi^k \eta^l \delta_{ik} \delta_{jl} \\ &= \sum g_{ij} x^i \eta^j \end{aligned}$$

Wir erhalten als $g(X, Y) = \sum g_{ij}$ für $X = \sum \xi^k X_k$ und $Y = \sum \eta^l Y_l$ beliebig. Wir schreiben nun auch die 1-Form in lokale Koordinaten:

$$\phi = \sum_j \varphi_j dx^j \quad (3.18)$$

Zu Zeigen: sei $\phi = g(X, \cdot)$ dann sind die Koeffizientenfunktionen glatt.

$$\begin{aligned} \phi(Z) &= \sum_j \varphi_j dx^j \left(\sum_l \eta^l X_l \right) \\ &= \sum_j \varphi_j \eta^l dx^j(X_l) \\ &= \sum_j \varphi_j \eta^j \end{aligned}$$

Nach obiger Rechnung haben wir also:

$$\varphi_j = \sum_{i=1}^m g_{ij} \xi^i \quad (3.19)$$

dies ist eine glatte Funktion. □

3.3 Levi-Civita-Zusammenhang

3.18 Satz

Sei (\mathcal{M}, g) eine Semi-Riemannsche Mannigfaltigkeit, dann existiert auf \mathcal{M} ein Zusammenhang mit den folgenden Eigenschaften:

1. D ist Torsionsfrei:

$$D_Y X - D_X Y = [Y, X], \quad \forall X, Y \in \mathfrak{X}(\mathcal{M}) \quad (3.20)$$

2. D ist metrisch:

$$Xg(Y, Z) = g(D_X Y, Z) + g(Y, D_X Z), \quad \forall X, Y, Z \in \mathfrak{X}(\mathcal{M}) \quad (3.21)$$

Dieser Zusammenhang ist eindeutig durch die **Koszulformel** bestimmt:

$$2g(D_X Y, Z) = Xg(Y, Z) + Yg(X, Z) - Zg(X, Y) \quad (3.22)$$

$$- g(X, [Y, Z]) - g(Y, [X, Z]) + g(Z, [X, Y]) \quad (3.23)$$

D heißt **Levi-Civita-Zusammenhang**.

Beweis: (Beweis Satz 3.18)

Zu zeigen:

1. Die beiden geforderten Eigenschaften bestimmen den Zusammenhang und Koszuformel ist erfüllt

Die zweite geforderte Eigenschaft impliziert:

$$\begin{aligned} Xg(Y, Z) &= g(D_X Y, Z) + g(Y, D_X Z) \\ Yg(X, Z) &= g(D_Y X, Z) + g(X, D_Y Z) \\ Zg(X, Y) &= g(D_Z X, Y) + g(X, D_Z Y) \end{aligned}$$

Daraus folgt:

$$\begin{aligned} Xg(Y, Z) + Yg(X, Z) - Zg(X, Y) &= g(D_X Y + D_Y X, Z) + g(D_X Z - D_Z X, Y) \\ &\quad + g(D_Y Z - D_Z Y, X) \\ &= 2g(D_X Y, Z) - g([X, Y], Z) + g([X, Z], Y) + g([Y, Z], X) \end{aligned}$$

Damit ergibt sich

$$2g(D_X Y, Z) = g([X, Y], Z) - g([X, Z], Y) - g([Y, Z], X) \quad (3.24)$$

$$+ Xg(Y, Z) + Yg(X, Z) - Zg(X, Y) \quad (3.25)$$

Definiere $D : \mathfrak{X}(\mathcal{M}) \times \mathfrak{X}(\mathcal{M}) \rightarrow \mathfrak{X}(\mathcal{M})$ durch $D(X, Y)$, welches das eindeutig bestimmte glatte Vektorfeld ist, das die Koszulformel erfüllt.

Es bleibt zu zeigen: $D : \mathfrak{X}(\mathcal{M}) \times \mathfrak{X}(\mathcal{M}) \rightarrow \mathfrak{X}(\mathcal{M})$ ist ein Zusammenhang □

Anhang

A1: Tensoren & Tensorrechnung

In diesem Abschnitt seien grundsätzlich alle V endlichdimensionale Vektorräume.

$$\mathcal{L}(V_1, \dots, V_k, W) = \text{Menge aller multilinearen Abbildungen} \\ V_1 \times V_2 \times \dots \times V_k \longrightarrow W$$

3.20 Satz

Für diesen Fall existiert ein Isomorphismus

$$V_1 \otimes \dots \otimes V_k \cong \mathcal{L}(V_1^*, \dots, V_k^*, \mathbb{R})$$

Bemerkung:

$$V^{**} \cong V \\ V_1^* \otimes \dots \otimes V_k^* \cong \mathcal{L}(V_1, \dots, V_k, \mathbb{R})$$

Definition 3.22

Ein kovarianter k -Tensor auf V ist ein Element in $\underbrace{V^* \otimes \dots \otimes V^*}_{k\text{-mal}}$, das heißt es handelt sich um eine multilineare Abbildung: $V \times \dots \times V \longrightarrow \mathbb{R}$

Beispiel: Die Determinante ist ein kovarianter k -Tensor in \mathbb{R}^k .

Definition 3.23

Ein kontravarianter k -Tensor auf V ist ein Element in $\underbrace{V \otimes \dots \otimes V}_{k\text{-mal}}$, das heißt es handelt sich um eine multilineare Abbildung: $V^* \times \dots \times V^* \longrightarrow \mathbb{R}$

Typischerweise treten gemischte Tensoren auf, das heißt Elemente in:

$$T^{(n,l)} V = \underbrace{V \otimes \dots \otimes V}_{n\text{-mal}} \otimes \underbrace{V^* \otimes \dots \otimes V^*}_{l\text{-mal}}$$

Tensoren auf Mannigfaltigkeiten

$$T^{(r,s)} T\mathcal{M} := \bigsqcup_{p \in \mathcal{M}} T^{(r,s)}(T_p \mathcal{M})$$

Definition 3.24

Ein Tensorfeld vom Typ (r, s) ist ein Schnitt von $T^{(r,s)} T\mathcal{M}$.

Übung: Bestimmen sie den Typ der folgenden Tensoren:

- Vektorfelder
- 1-Formen
- Torsion
- Krümmungstensor

Abbildungsverzeichnis

1.1	Offene Menge	2
1.2	Hausdorff'sche Eigenschaft	3
1.3	Kartenwechsel	4
1.4	Visualisierung des Hilfslemmas (1.19) ("bump function")	8
2.1	Veranschaulichung eines Vektorbündels	18
2.2	Darstellung des Tangentialbündels eines Kreises	18
2.3	Beispiel für ein Vektorfeld	25
2.4	Kurve f auf einer Mannigfaltigkeit	33
2.5	Parallelverschiebung	35
2.6	Parallelverschiebung auf Kurve c in \mathbb{R}^n vs. auf beliebiger Mannigfaltigkeit \mathcal{M}	39
2.7	Paralleltransport	41
2.8	Variation der Kurve c_0	43