



WESTFÄLISCHE
WILHELMS-UNIVERSITÄT
MÜNSTER



FACHBEREICH 10
MATHEMATIK UND
INFORMATIK

Skript Differentialgeometrie I.


Mitschrift der Vorlesung „Differentialgeometrie I.“ von Frederik Witt

Arne Grauer

2. November 2014

Aktuelle Version verfügbar bei:



 **GitHub** (inklusive Sourcecode)
<https://github.com/JaMeZ-B/latex-www> 




 **Bittorrent Sync**
B6WH2DISQ5QVYIRYIEZSF4ZR2IDVKPN3I

Vorwort — Mitarbeit am Skript

Dieses Dokument ist eine Mitschrift aus der Vorlesung „Differentialgeometrie I., WiSe 2014“, gelesen von Frederik Witt. Der Inhalt entspricht weitestgehend dem Tafelanschrieb. Für die Korrektheit des Inhalts übernehme ich keinerlei Garantie! Für Bemerkungen und Korrekturen – und seien es nur Rechtschreibfehler – bin ich sehr dankbar. Korrekturen lassen sich prinzipiell auf drei Wegen einreichen:

- Persönliches Ansprechen in der Uni, Mails an ✉ j.bantje@wwu.de (gerne auch mit annotieren PDFs)
- *Direktes* Mitarbeiten am Skript: Den Quellcode poste ich auf GitHub (siehe oben), also stehen vielfältige Möglichkeiten der Zusammenarbeit zur Verfügung: Zum Beispiel durch Kommentare am Code über die Website und die Kombination Fork + Pull Request. Wer sich verdient macht oder ein Skript zu einer Vorlesung, die ich nicht besuche, beisteuern will, dem gewähre ich gerne auch Schreibzugriff.


Beachten sollte man dabei, dass dazu ein Account bei github.com  notwendig ist, der allerdings ohne Angabe von persönlichen Daten angelegt werden kann. Wer bei GitHub (bzw. dem zugrunde liegenden Open-Source-Programm „git“) – verständlicherweise – Hilfe beim Einstieg braucht, dem helfe ich gerne weiter. Es gibt aber auch zahlreiche empfehlenswerte Tutorials im Internet.¹

- *Indirektes* Mitarbeiten: \TeX -Dateien per Mail verschicken.

Dies ist nur dann sinnvoll, wenn man einen ganzen Abschnitt ändern möchte (zB. einen alternativen Beweis geben), da ich die Änderungen dann per Hand einbauen muss!


Vorlesungshomepage



<https://wwwmath.uni-muenster.de/u/frederik.witt/diffgeoI.html> 

Über die Differentialgeometrie

1. **Differentialgeometrie** Mannigfaltigkeiten \Rightarrow Differentialtopologie
2. **Riemannsche Geometrie** Längen und Winkel messen \leadsto Geodäte (lokal) kürzeste Verbindung zwischen 2 Punkten einer Mannigfaltigkeit.
Krümmung
Allgemeine Relativitätstheorie: Krümmung = Gravitation ist für solche Effekte verantwortlich

¹zB. <https://try.github.io/levels/1/challenges/1> , ist auf Englisch, aber dafür interaktives LearningByDoing

Inhaltsverzeichnis

1 Differenzierbare Mannigfaltigkeiten	1
1.1 Untermannigfaltigkeiten	1
1.1.1 Definition: Submersion, Immersion und Étale	1
1.1.2 Bemerkung: Submersiv/immersiv/étale sind offene Bedingungen	1
1.1.3 Satz über inverse Funktionen (inverse function theorem)	1
1.1.4 Satz über implizite Funktionen (implicit function theorem)	1
1.1.5 Satz (Normalenformen von Submersionen/Immersionen)	1
1.1.6 Definition: Untermannigfaltigkeit	2
1.1.7 Beispiele für Untermannigfaltigkeiten	2
1.1.8 Bemerkung:	3
1.1.9 Satz: lokale Parametrisierung von Untermannigfaltigkeiten	3
1.1.10 Beispiele zur lokalen Parametrisierung	4
1.1.11 Bemerkung	4
1.1.12 Satz: Wechsel lok. Parametrisierungen	5
1.2 Abstrakte Mannigfaltigkeit	5
1.2.1 Definition: Karte und Atlas	5
1.2.2 Definition: Abstrakte differenzierbare Mannigfaltigkeit	6
1.2.3 Beispiele für differenzierbare Mannigfaltigkeiten	6
1.2.4 Bemerkungen zu abstrakten Mannigfaltigkeiten	9
1.3 Glatte Abbildung	9
1.3.1 Definition: Glatte Funktionen zwischen zwei Mannigfaltigkeiten	9
1.3.2 Bemerkung	10
1.3.3 Definition	10
1.3.4 Beispiele	10
1.3.5 Definition	11
1.3.6 Theorem	11
1.3.7 Whitney Theorem	11
1.3.8 Bemerkung	12
1.4 Das Tangentialbündel einer Untermannigfaltigkeit	12
1.4.1 Definition	12
1.4.2 Satz: Vektorraumstruktur des Tangentialraumes	12
1.4.3 Satz	13
1.5 Das Tangentialbündel einer abstrakten Mannigfaltigkeit	13
1.5.1 Definition	13
1.5.2 Bemerkung	14
1.5.3 Definition	14
1.5.4 Bemerkung	14
1.5.5 Definition	14
Index	A
Abbildungsverzeichnis	B

1 Differenzierbare Mannigfaltigkeiten

Konvention: glatt = C^∞ .

Wiederholung: Diffeomorphismus $f : U \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ glatt, bijektiv und f^{-1} glatt.

1.1 Untermannigfaltigkeiten

1.1.1 Definition

Eine Abbildung $f : U \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ glatt heißt **Submersion/Immersion/Étale** in $x \in U$, falls $d_x f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ surjektiv/injektiv/Isomorphismus ist. f heißt schlechthin **Submersion/Immersion/Étale**, falls f Submersion/Immersion/Étale für alle $x \in U$ ist.

Insbesondere $n \geq m/n \leq m/n = m$

1.1.2 Bemerkung

Submersiv/immersiv/étale sind offene Bedingungen, d.h. ist f Submersion/Immersion/Étale in x , so auch in einer hinreichend kleinen Umgebung von x (vergleiche auch Satz 15 unten)

1.1.3 Satz über inverse Funktionen (inverse function theorem)

Sei $f : U \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ étale in x . Dann existiert eine offene Menge $x \in V \subset U \subset \mathbb{R}^n$, sodass $f|_V$ ein Diffeomorphismus auf seinem Bild ist, d.h. $f|_V : V \xrightarrow{\sim} f(V)$ ist bijektiv und $f|_V, (f|_V)^{-1}$ glatt.

1.1.4 Satz über implizite Funktionen (implicit function theorem)

Sei $f : U \subset \mathbb{R}^{n+k} \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine Submersion in 0 mit $f(0) = 0$. Dann existiert eine glatte Funktion g auf einer Umgebung von $0 \in \mathbb{R}^n$ mit Werten in \mathbb{R}^k , d.h.

$$g = g(x_1, \dots, x_n) = \begin{pmatrix} g_1(x_1, \dots, x_n) \\ \vdots \\ g_k(x_1, \dots, x_n) \end{pmatrix}$$

mit

$$f(x_1, \dots, x_n, g_1(x_1, \dots, x_n), \dots, g_k(x_1, \dots, x_n)) = f(x, g(x)) = 0$$

1.1.5 Satz (Normalenformen von Submersionen/Immersionen)

a) Sei $f : U \subseteq \mathbb{R}^{n+k} \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine Submersion mit $f(0) = 0$. Dann existiert ein Diffeomorphismus $\varphi : 0 \in V \subset \mathbb{R}^{n+k} \rightarrow \mathbb{R}^{n+k}$ mit $\varphi(V) \subset U$ und $f \circ \varphi(x_1, \dots, x_{n+k}) = (x_1, \dots, x_n) = \pi_{\mathbb{R}^n}(x_1, \dots, x_{n+k})$, d.h. modulo einer Diffeomorphismus ist jede Submersion äquivalent zu einer Projektion.

b) Sei $f : U \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n+k}$ eine Immersion in 0, $f(0) = 0$. Dann existiert ein Diffeomorphismus

$$\varphi : 0 \in V \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n+k}$$

mit $\varphi(0) = 0$ und

$$\varphi \circ f(x_1, \dots, x_n) = (x_1, \dots, x_n, 0, \dots, 0) = i(x_1, \dots, x_n)$$

d.h. modulo Diffeomorphismen ist f äquivalent zur kanonischen Einbettung von $\mathbb{R}^n \hookrightarrow \mathbb{R}^{n+k}$.

Beweis

- (i) Wähle Koordinaten x_1, \dots, x_n mit $d_0 f = (A \ B)$ mit $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{k \times n}$ mit $\det A \neq 0$.
Definiere $F : U \subset \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^k$ durch $(p, q) \mapsto (f(p, q), q)$. Dann gilt

$$d_{(0,0)} F = \begin{pmatrix} d_0 f & 0 \\ 0 & \text{id}_{k \times k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ 0 & \text{id}_{k \times k} \end{pmatrix} \implies \det d_0 F \neq 0$$

Mit 1.1.3 folgt: $\varphi = F^{-1}$ Diffeomorphismus um $0 \in \mathbb{R}^{n+k}$ herum.

- (ii) Definiere $F : U \times \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^k$. $F(p, q) = f(p) + (0, q)$.

$$d_{(0,0)} F = \begin{pmatrix} d_0 f & 0 \\ 0 & \text{id}_{k \times k} \end{pmatrix},$$

also $\det d_{(0,0)} F \neq 0 \implies \exists \varphi = F^{-1}$ um 0 mit $\varphi(f(p)) = \varphi \circ F(p, 0) = (p, 0) = i(p)$ \square

Bemerkung

Durch Komposition mit Translationen können Submersionen/Immersionen mit $F(x) = y$ (nicht notwendigerweise $= 0$) behandelt werden.

1.1.6 Definition

$M \subset \mathbb{R}^{n+k}$ heißt n -dimensionale **Untermannigfaltigkeit**, falls $\forall x \in M : \exists x \in U \subset \mathbb{R}^{n+k}$ Umgebung, sowie eine Submersion $f : U \rightarrow \mathbb{R}^k$ mit $U \cap M = f^{-1}(0)$.

1.1.7 Beispiele

- (i) Die n -**Sphäre** $S^n := \{x = (x_1, \dots, x_{n+1}) \in \mathbb{R}^{n+1} \mid |x|^2 = 1\}$ ist eine n -dimensionale Untermannigfaltigkeit des \mathbb{R}^{n+1} . Definiere $f : \mathbb{R}^{n+1} \rightarrow \mathbb{R}$ durch $f(x_1, \dots, x_{n+1}) = x_1^2 + \dots + x_{n+1}^2 - 1$.
 $\implies f^{-1}(0) = S^n$ nach Definition.

$$d_x f = (2x_1, \dots, 2x_{n+1}) : \mathbb{R}^{n+1} \rightarrow \mathbb{R}$$

- (ii) Die hyperbolischen Räume $H_c^n := \{x = (x_1, \dots, x_{n+1}) \in \mathbb{R}^{n+1} \mid -x_1^2 + \sum_{i=2}^{n+1} x_i^2 = c\}$

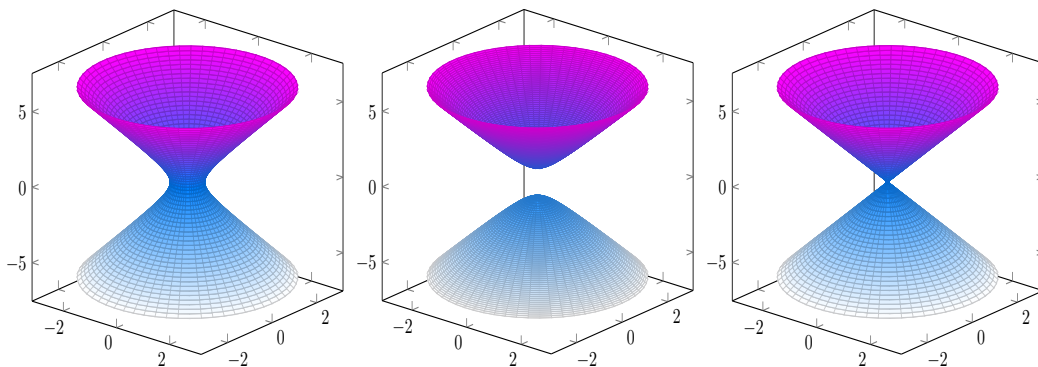


Abbildung 1: hyperbolischer Raum für $c > 0$, $c < 0$, $c = 0$

Sei $f : \mathbb{R}^{n+1} \rightarrow \mathbb{R}$ definiert durch $f_c(x) = -x_1^2 + \sum_{i=2}^{n+1} x_i^2 - c$.

$\implies f$ ist glatt und $f_c^{-1}(0) = H_c^n$

Es bleibt zu zeigen, dass f eine Submersion ist.

$$d_x f = (-2x_1, 2x_2, \dots, 2x_{n+1}) : \mathbb{R}^{n+1} \rightarrow \mathbb{R}$$

Es gilt $d_x f(\nu) = 0 \forall \nu \in \mathbb{R}^{n+1} \Leftrightarrow x_i = 0 \forall i = 1, \dots, n+1$.

Das heißt $\exists i : x_i \neq 0 \Rightarrow d_x f$ Submersion, wobei $\exists i : x_i \neq 0$ gilt, falls $x \in H_c^n, c \neq 0$. Also ist für $c \neq 0$ H_c^n eine n -dimensionale Untermannigfaltigkeit. Für $c = 0$ ist $H_0^n \setminus \{0\}$ eine n -dimensionale Untermannigfaltigkeit.

(iii) Der n -Torus $T^n = \{x = (x_1, x_2, \dots, x_{2n-1}, x_{2n}) \in \mathbb{R}^{2n} \mid x_1^2 + x_2^2 = 1, \dots, x_{2n-1}^2 + x_{2n}^2 = 1\}$

$$f : \mathbb{R}^{2n} \rightarrow \mathbb{R}, f(x) = \begin{pmatrix} x_1^2 + x_2^2 - 1 \\ \vdots \\ x_{2n-1}^2 + x_{2n}^2 - 1 \end{pmatrix}$$

$\Rightarrow f$ glatt, $f^{-1}(0) = T^n$

$$d_x f = \begin{pmatrix} 2x_1 & 2x_2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 2x_3 & 2x_4 & & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \ddots & \\ 0 & & & & 2x_{2n-1} & 2x_{2n} \end{pmatrix}$$

$\Rightarrow d_x f$ ist eine Submersion.

(iv) Die orthogonale Gruppe $O(n) \subset \mathbb{R}^{n \times n}$ ist eine Untermannigfaltigkeit der Dimension $\frac{n(n-1)}{2}$.

$$O(n) = \{A \in \mathbb{R}^{n \times n} \mid AA^T = \text{id}_{\mathbb{R}^n} = f^{-1}(0)\}, f(A) = AA^T - \text{id}_{\mathbb{R}^n}$$

Es gilt $f(A)^T = A^{TT} \cdot A^T - \text{id}^T = AA^T - \text{id} = f(A)$. Also $f : \mathbb{R}^{n \times n} \rightarrow \text{Sym}(\mathbb{R}^{n \times n}) = \{A \in \mathbb{R}^{n \times n} \mid A^T = A\}$.

$\Rightarrow f$ glatt, $f^{-1}(0) = O(n)$

$$d_A f : \mathbb{R}^{n \times n} \rightarrow \text{Sym}(\mathbb{R}^{n \times n}), d_A f = HA^T + AH^T$$

Sei $S \in \text{Sym}(\mathbb{R}^{n \times})$. Setze $H = \frac{SA}{2} \Rightarrow d_A f(\frac{SA}{2}) = \frac{1}{2}(SAA^T + ASAT) = \frac{1}{2}(S + S) = S$
 $\Rightarrow O(n)$ ist eine Untermannigfaltigkeit

1.1.8 Bemerkung

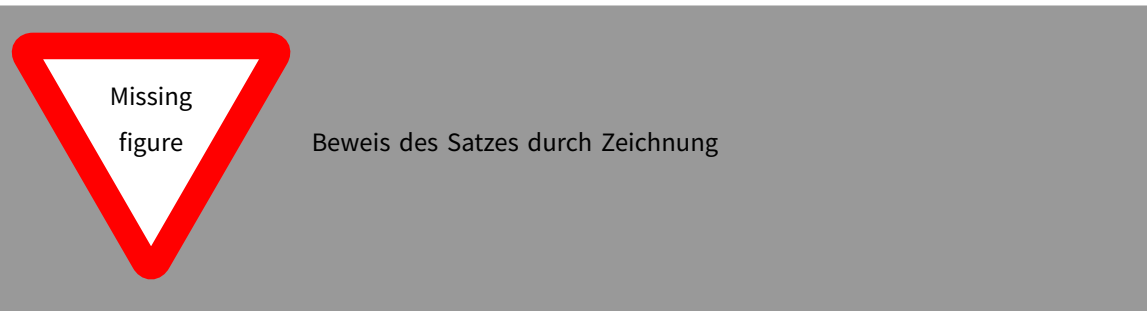
M kann von der Form $M = f^{-1}(0)$ sein, f glatt, aber keine Submersion. Zum Beispiel

$$M = \{(x, x) \in \mathbb{R}^2 \mid x \in \mathbb{R}\} = f^{-1}(0), f(x, y) = x^3 + y^3$$

1.1.9 Satz

Es sind äquivalent:

- (i) $M^n \subset \mathbb{R}^{n+k}$ ist n -dim Untermannigfaltigkeit
- (ii) $\forall x \in M^n \exists$ Umgebungen U und $V \subset \mathbb{R}^{n+k}$ von x und 0 , und ein Diffeomorphismus $\phi : U \rightarrow V$ mit $\phi(M \cap U) \rightarrow \underbrace{(\mathbb{R}^n \times \{0\}) \cap V}_{=: W}$
- (iii) $\forall x \in M^n \exists$ Umgebungen $U \subset \mathbb{R}^{n+k}$ und $W \subset \mathbb{R}^n$, sowie eine glatte Abbildung $g : W \rightarrow \mathbb{R}^{n+k}$, sodass g ein Homöomorphismus von W auf $M \cap U$ und eine Immersion ist. g nennt man eine **lokale Parametrisierung**



1.1.10 Beispiele

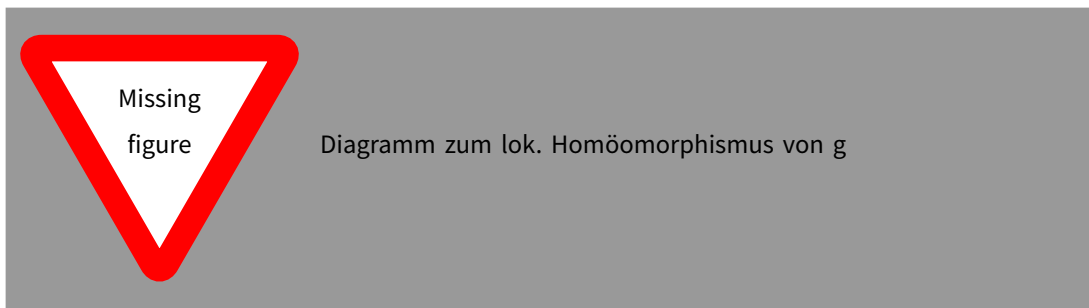
(i) Der 2-Torus T^2 ist das Bild von

$$g : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^4, g(x, y) = (\cos(x), \sin(x), \cos(y), \sin(y)) \subset T^2 \subset \mathbb{R}^4$$

g ist lokale Parametrisierung:

$$d_{(x,y)}g = \begin{pmatrix} -\sin(x) & 0 \\ \cos(x) & 0 \\ 0 & -\sin(y) \\ 0 & \cos(y) \end{pmatrix}$$

$d_{(x,y)}g$ hat somit immer vollen Rang 2, also ist $d_{(x,y)}g$ injektiv. Es folgt somit, dass g eine Immersion ist.



\hat{g} ist stetig (Quotiententopologie), \hat{g} bijektiv und T^2 kompakt. Damit folgt, dass \hat{g} ein Homöomorphismus und somit g ein lokaler Homöomorphismus ist.

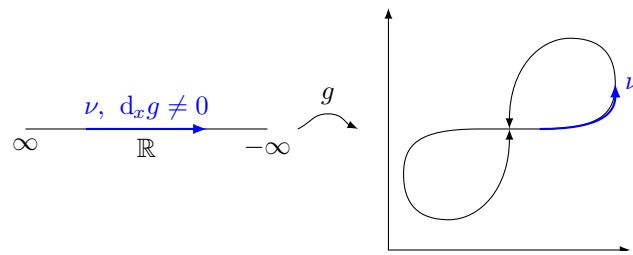
(ii)

$$g : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3, g(x, y) = (\sin(x) \cos(y), \sin(x) \sin(y), \cos(x)) \in S^2 \subset \mathbb{R}^3$$

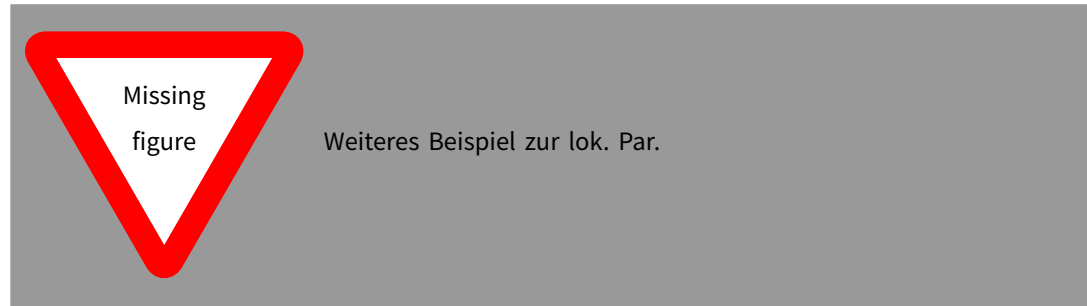
g ist ein lokaler Homöomorphismus, jedoch ist $d_{(x,y)}$ nicht injektiv, das heißt keine lokale Parametrisierung nahe der Pole. Also müssen wir eine andere Parametrisierung wählen, zum Beispiel $g(x, y) = (x, y, \sqrt{1 - x^2 - y^2})$

1.1.11 Bemerkung

(i) Betrachte:



g ist immersiv, hat aber keine Umkehrfunktion und ist somit kein Homöomorphismus.



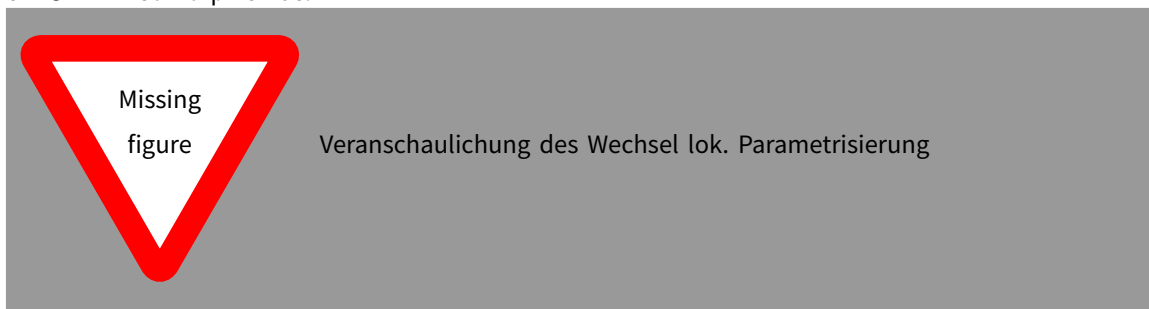
- (ii) g ist keine lokale Parametrisierung, da g nicht immersiv in 0 ist. $g(t) = (g_1(t), g_2(t)) \in \mathbb{R}^2 \Rightarrow g_1^2(t) = g_2^3(t) \Rightarrow d_0 g = 0$

1.1.12 Satz

Sei M^n eine n -dim glatte Untermannigfaltigkeit, $x \in M$, und seien U_1, U_2 Umgebungen von x in \mathbb{R}^{k+n} mit lok. Parametrisierung g_1 und g_2 von $U_1 \cap M$ und $U_2 \cap M$ definiert auf Ω_1 und Ω_2 (das heißt $g_i : \Omega_i \rightarrow \mathbb{R}^{n+k}$). Dann ist

$$g_2^{-1} \circ g_1 : \Omega_1 \cap g_1^{-1}(U_2) \xrightarrow{g_1} g_1(\Omega_1) \cap U_2 \xrightarrow{g_2^{-1}} \Omega_2 \cap g_2^{-1}(U_1)$$

ein C^∞ -Diffeomorphismus.



Bemerkung

- $h : \Omega_1 \rightarrow \Omega_2$ Homöomorphismus, offene Menge in $\Omega_1 \leftrightarrow$ offene Menge in Ω_2
- $\varphi : \Omega_1 \rightarrow \Omega_2$ Diffeomorphismus, falls Homöom. und $C^\infty(\Omega_1) \leftrightarrow C^\infty(\Omega_2)$

1.2 Abstrakte Mannigfaltigkeit

1.2.1 Definition

Sei M ein topologischer Raum. Ein **Atlas** ist eine Familie $\{(U_i, \varphi_i)\}_i \in I$ mit

- (i) $U_i \subset M$ offen, $M = \bigcup_{i \in I} U_i$ ($\{U_i\}$ offene Überdeckung)
- (ii) $\{\varphi_i : U_i \rightarrow \Omega_i \subset \mathbb{R}^n\}$ ist eine Familie von Homöomorphismen mit:

$$U_{ij} = U_i \cap U_j \neq \emptyset, \text{ dann ist } \varphi_{ij} = \varphi_i \circ \varphi_j^{-1} : \varphi_j(U_{ij}) \rightarrow \varphi_i(U_{ij})$$

ein C^∞ -Diffeomorphismus.

Ein Paar (U_i, φ_i) heißt **Karte** und φ_{ij} heißt Übergangsfunktion oder .

1.2.2 Definiton

Sei M ein topologischer Raum.

- (i) Zwei Atlanten $\mathcal{A}_1 = \{(U_i, \varphi_i)\}_{i \in I}$ und $\mathcal{A}_2 = \{(V_j, \psi_j)\}_{j \in J}$ sind äquivalent, genau dann wenn $\forall i \in I, j \in J$ mit $U_i \cap V_j \neq \emptyset$

$$\varphi_i \circ \psi_j^{-1} : \psi_j(U_i \cap V_j) \rightarrow \varphi_i(U_i \cap V_j)$$

ein C^∞ -Diffeomorphismus, das heißt die Vereinigung und $\mathcal{A}_1 \cup \mathcal{A}_2$ ist wieder ein Atlas von M .

- (ii) **Differenzierbare Struktur** auf M ist die Äquivalenzklasse eines Atlanten. Ein Hausdorffraum M mit einer differenzierbaren Struktur heißt **(abstrakte) differenzierbare Mannigfaltigkeit** oder Mannigfaltigkeit.

- (iii) Nehmen alle Karten eines Atlanten Werte in \mathbb{R}^n an, so heißt n die Dimension der Mannigfaltigkeit.

1.2.3 Beispiele

- (i) \mathbb{R}^n ist Mannigfaltigkeit der Dimension n , Atlas: $\{\mathbb{R}^n, \text{id}_{\mathbb{R}^n}\}$ und $U \subset \mathbb{R}^n$ ist Mannigfaltigkeit der Dimension n , Atlas: $\{U, \text{id}_{\mathbb{R}^n}|_U\}$

- (ii) Untermannigfaltigkeit im Sinne von Abschnitt 1.1 sind abstrakte Mannigfaltigkeiten.

- (iii) Mannigfaltigkeit $N \subset M$ ist eine Untermannigfaltigkeit von M , falls für alle $y \in N$ eine Karte (U, φ) von M um y existiert, sodass $\varphi(U \cap N)$ Untermannigfaltigkeit von \mathbb{R}^n im Sinne von Abschnitt 1.1 ist.

Dann gilt zum Beispiel $U \overset{\text{offen}}{\subset} \mathbb{R}^n$ ist Untermannigfaltigkeit im "abstrakten" Sinne. Untermannigfaltigkeit $N \subset \mathbb{R}^n$ im Sinne von 1.1 ist Untermannigfaltigkeit im abstrakten Sinne.

- (iv) Die n -Sphäre, z.B $n = 1$

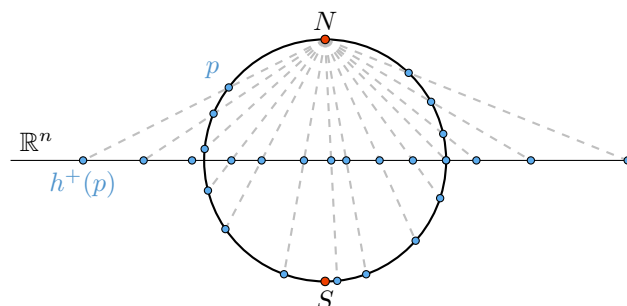


Abbildung 2: Stereografische Projektion

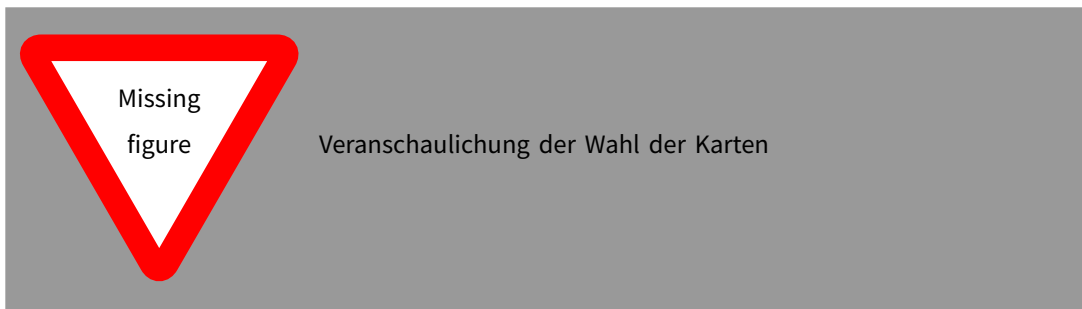
Allgemein: $U_N = S^n \setminus \{N\}$, $U_S = S^n \setminus \{S\} \subset \mathbb{R}^{n+1}$

$$\begin{aligned}\varphi_N : U_N &\rightarrow \mathbb{R}^n, (x_1, \dots, x_{n+1}) \mapsto \frac{1}{1 - x_{n+1}}(x_1, \dots, x_n) \\ \varphi_S : U_S &\rightarrow \mathbb{R}^n, (x_1, \dots, x_{n+1}) \mapsto \frac{1}{1 + x_{n+1}}(x_1, \dots, x_n) \\ \varphi_S \circ \varphi_N^{-1} : \mathbb{R}^n \setminus \{0\} &\rightarrow \mathbb{R}^n \setminus \{0\}, x \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\} \mapsto \frac{x}{\|x\|^2}\end{aligned}$$

Bemerkung

$\{(S^n, \text{id}_{\mathbb{R}^{n+1}}|_{S^n})\}$ ist kein Atlas, denn S^n ist nicht offen im \mathbb{R}^{n+1} .

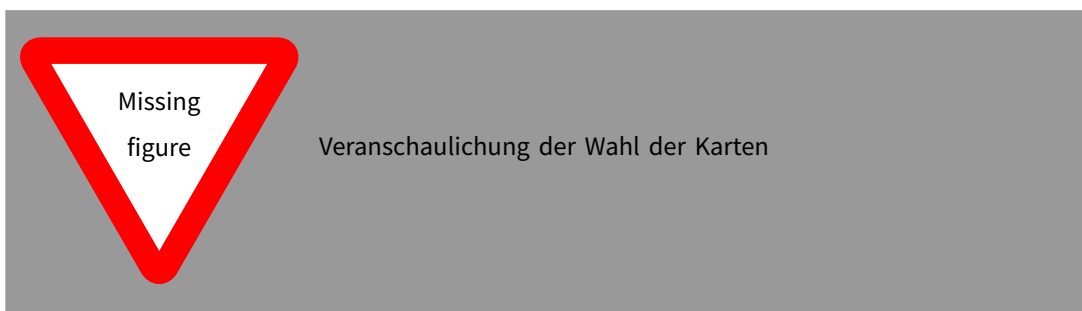
- (v) Der n -Torus T^n . Betrachte $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{C}^n, (x_1, \dots, x_n) \mapsto (\exp(ix_1), \dots, \exp(ix_n)) \in \underbrace{S^1 \times \dots \times S^1}_{n\text{-mal}} \subset \mathbb{C} \times \dots \times \mathbb{C}$, so folgt $f(\mathbb{R}^n) = T^n$



Schränke $f|_{(a_1-\epsilon, a_1+\epsilon) \times \dots \times (a_n-\epsilon, a_n+\epsilon)}$ auf sein Bild ein. $\varphi_a := f^{-1} : \underbrace{f(I_a)}_{=U_a \subset T} \rightarrow I_a \overset{\text{offen}}{\subset} \mathbb{R}^n$.

Somit ist $\{(U_a, \varphi_a)\}_{a \in \mathbb{R}^n}$ eine Familie von Karten, die T^n überdeckt. Es bleibt zu zeigen, dass $\varphi_{ab} = \varphi_a \circ \varphi_b^{-1}$ ein Diffeomorphismus ist, was wir an dieser Stelle dem Leser überlassen. Somit folgt, dass $\{(U_a, \varphi_a)\}_{a \in \mathbb{R}^n}$ ein Atlas ist.

- (vi) Betrachte den Hyperbolischen Raum H^n .



H^n ist eine Mannigfaltigkeit mit einer Karte, gegeben durch stereographische Projektion. Man sagt daher, dass H^n diffeomorph zu \mathbb{R}^n

- (vii) Würfel $Q \subset \mathbb{R}^n$

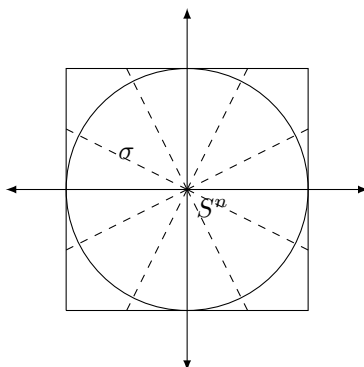


Abbildung 3: Der Würfel Q ist keine Untermannigfaltigkeit des \mathbb{R}^n !

Q ist jedoch eine abstrakte Mannigfaltigkeit, denn Q ist ein Hausdorffraum und bijektiv zu S^n durch Projektion σ . So ist $\mathcal{A} := \{(\sigma^{-1}(U_N), \varphi_N \circ \sigma), (\sigma^{-1}(U_S), \varphi_S \circ \sigma)\}$ ein Atlas, da $\varphi_2 \circ \varphi_1^{-1} = \varphi_S \circ \sigma \circ \sigma^{-1} \circ \varphi_N$ und somit ist Q eine abstrakte Mannigfaltigkeit.

(viii) Sei $\mathbb{K} = \mathbb{R}, \mathbb{C}$. So ist der **projektive Raum**

$$\begin{aligned} \mathbb{KP}^n &= \text{Menge der Ursprungsgraden in } \mathbb{K}^{n+1} \\ &= \mathbb{K}^{n+1} \setminus \{0\} / \sim, \quad x, y \in \mathbb{K}^{n+1} \setminus \{0\} \text{ seien äquivalent, } x \sim y \Leftrightarrow \exists \lambda \in \mathbb{K} \setminus \{0\} : x = \lambda y \\ &= \mathbb{K}^{n+1} \setminus \{0\} / \mathbb{K}^* \text{ wobei} \\ [x] &\in \mathbb{K}^{n+1} \setminus \{0\} / \mathbb{K}^* \mapsto \langle x \rangle_{\mathbb{K}} \text{ lineare Erzeugnis von } x \text{ in } \mathbb{K}^{n+1} \end{aligned}$$

Wir schreiben $[x] = [x_0 : \dots : x_n]$, falls $x = (x_0, \dots, x_n) \in \mathbb{K}^{n+1}$, "homogene Koordinaten".

Bemerkung

$$[x_0 : \dots : x_n] = [\lambda x_0 : \dots : \lambda x_n], \quad \lambda \in \mathbb{K}^{n+1}$$

(1) Betrachte $p : x \in \mathbb{K}^{n+1} \setminus \{0\} \mapsto [x] = p(x) \in \mathbb{K}^{n+1} \setminus \{0\} / \sim$ so folgt, dass \mathbb{KP}^n versehen mit der Quotiententopologie ein Hausdorff-Raum ist.

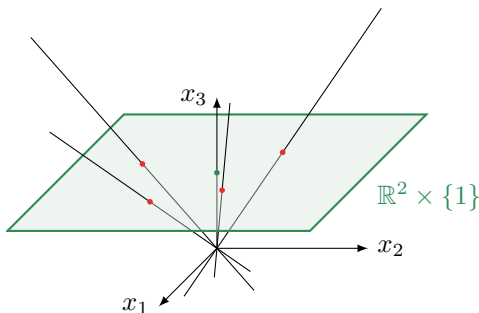


Abbildung 4: Der 2-dimensionale projektive Raum \mathbb{RP}^2 (projektive Ebene)

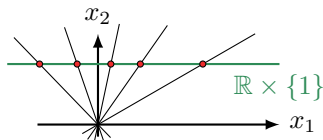


Abbildung 5: Der eindimensionale projektive Raum \mathbb{RP}^1

Aus Abbildung 3 bzw. 2 folgt somit $\mathbb{RP}^n = \mathbb{R} \cup \{\infty\} \cong S^2$ und analog $\mathbb{R}^2 \cup \{N\} \cong S^2$. Um zu zeigen, dass \mathbb{KP}^n eine abstrakte Mannigfaltigkeit ist, muss die Existenz eines Atlanten gezeigt werden. Betrachte $U_i = \{[x_0 : \dots : x_n] \in \mathbb{KP}^n \mid x_i \neq 0\}$. So folgt, dass $\bigcup_{i=0}^n U_i = \mathbb{KP}^n$, da $(0, \dots, 0) \notin \mathbb{KP}^{n+1} \setminus \{0\}$, also $\nexists [0 : \dots : 0]$. Da $[x_0 : \dots : x_n] \in U_i \Rightarrow x_i \neq 0$, ist $\varphi_i : [x_0 : \dots : x_n] = [\frac{x_0}{x_i} : \dots : \frac{x_n}{x_i}] \xrightarrow{\varphi_i} [\frac{x_0}{x_i} : \dots : \frac{\hat{x}_i}{x_i} : \dots : \frac{x_n}{x_i}]$ wohldefiniert. Es bleibt als Übung zu zeigen, dass $\varphi_i \circ \varphi_j^{-1}$ ein Diffeomorphismus ist.

1.2.4 Bemerkung

- (i) Die Vereinigung aller äquivalenten Atlanten ist wieder ein Atlas, der sogenannte maximale Atlas (eindeutig bestimmt). In der Praxis arbeitet man mit konkreten Atlanten.
- (ii) Allgemein kann man C^p -Atlanten betrachten, das heißt φ_{ij} C^p -Diffeomorphismen $\rightarrow C^p$ -Mannigfaltigkeiten. Ebenso kann man Karten mit allgemeinen Zielräumen betrachten, wo der Begriff der Differenzierbarkeit/Diffeomorphismus Sinn hat. Zum Beispiel Banach- und Hilbertraum \rightarrow Banach- und Hilbertmannigfaltigkeiten oder Frécher Raum \rightarrow Fréchemannigfaltigkeiten.
- (iii) Sei M ein topologischer Raum mit differenzierbarer Struktur, so ist er nicht automatisch Hausdorff! Zum Beispiel

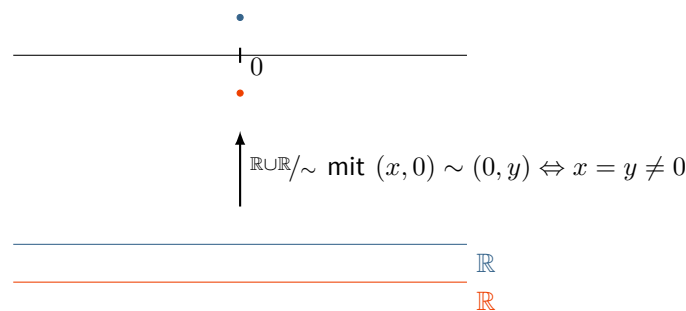


Abbildung 6: Beispiel einer Nichthausdorffmenge

Benutze Atlas $\{(U_1 = \{(x, 0) \mid x \in \mathbb{R}\}, \text{id}), (U_2 = \{(0, y) \mid y \in \mathbb{R}\}, \text{id})\}$. Dies ist ein Atlas, da $U_1 \cap U_2 = M \setminus \{:\}$.

- (iv) Wir nehmen künftig zwei zusätzliche Bedingungen für Mannigfaltigkeiten an:
 - (a) M zusammenhängend \rightarrow jede Mannigfaltigkeit hat wohldefinierte Dimension schreibe M^n
 - (b) M erfüllt das 2. Abzählbarkeitsaxiom. Für uns: \exists abzählbarer Atlas.

1.3 Glatte Abbildung

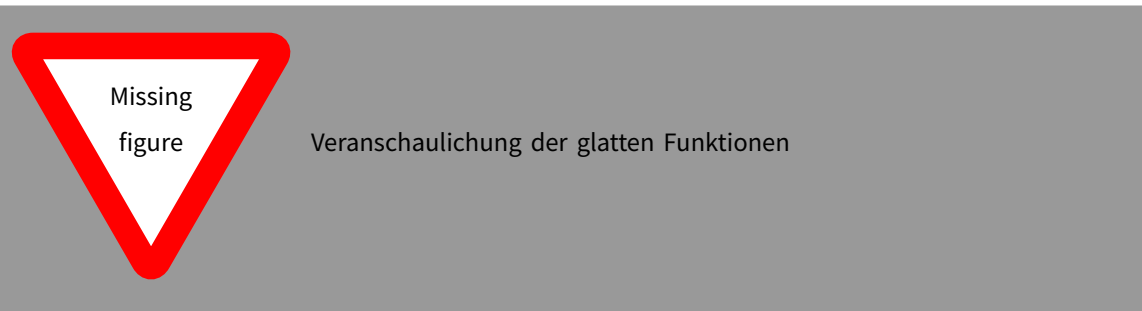
1.3.1 Definition

Seien M^n, N^m zwei Mannigfaltigkeiten und sei $f : M^n \rightarrow N^m$ eine stetige Abbildung. Dann heißt f glatt, falls für alle x Karten $(U, \varphi) \subset M$ und $(V, \psi) \subset N$ um x beziehungsweise $f^{-1}(x)$ existieren mit $f(U) \subset V$ und

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

$\subset \mathbb{R}^n \qquad \qquad \subset \mathbb{R}^m$

glatt ist. ("f in Karten gelesen ist glatt")



Wir schreiben $C^\infty(M, N) = \{f : M \rightarrow N \mid f \text{ glatt}\}$ und als Spezialfall $C^\infty(M) = C^\infty(M, \mathbb{R})$.

1.3.2 Bemerkung

Glattheit ist unabhängig von der Wahl der Karten! (\leadsto Diffeomorphismusbedingung!)

1.3.3 Definition

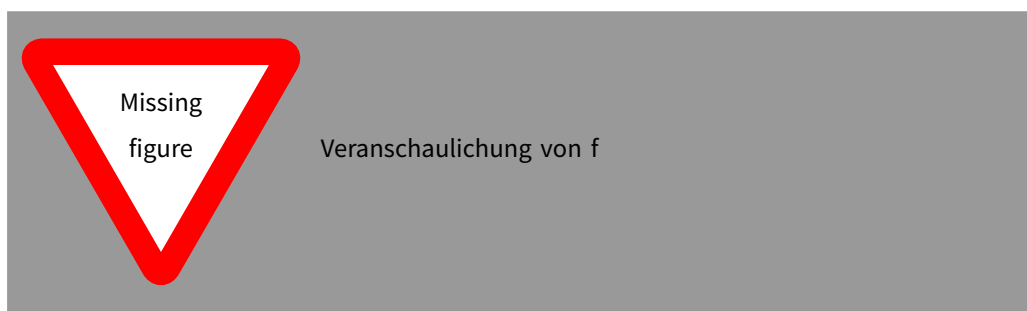
- (i) Eine glatte Abbildung $f : M \rightarrow N$ heißt Submersion/Immersion/étale, falls für ein Paar (und damit alle Karten) $\psi \circ f \circ \varphi^{-1}$ eine Submersion/Immersion/étale ist.
- (ii) f ist Diffeomorphismus zwischen M und N (M und N sind "diffeomorph"), falls f bijektiv ist und f sowie f^{-1} glatt ist.
- (iii) $f : M \rightarrow N$ heißt Einbettung, falls f Immersion und Homöomorphismus auf sein Bild ist.

1.3.4 Beispiele

- (i) Wenn M eine Untermannigfaltigkeit des \mathbb{R}^{n+k} , $f : \mathbb{R}^{n+k} \rightarrow \mathbb{R}^m$ glatte Funktion, dann ist auch $f|_M$ glatt.
 - $\{\mathbb{R}^n, \text{id}\}, \{\mathbb{R}^m, \text{id}\} \Rightarrow f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ glatt im Sinne von Definition 1.3.1 \Leftrightarrow glatt im üblichen Sinne
 - $x \in M$, Karte um x : $\varphi : U \subset \mathbb{R}^{n+k} \xrightarrow{\text{Diffeo.}} V = \varphi(U) \subset \mathbb{R}^{n+k}$ mit $\varphi(U \cap M) = U \cap (\mathbb{R}^n \times \{0\})$ (aus 1.1.9), so gilt

$$f \circ \varphi^{-1} : V \cap (\mathbb{R}^n \times \{0\}) \xrightarrow{\varphi^{-1}|_{V \cap (\mathbb{R}^n \times \{0\})} \in C^\infty(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^{n+k})} M \cap U \xrightarrow{f \in C^\infty(\mathbb{R}^{n+k}, \mathbb{R}^m)} \mathbb{R}^m$$

Somit folgt, dass $f|_M$ glatt ist.



- (ii) S^2 ist diffeomorph zu $\mathbb{CP}^1 = \{\text{Ursprungsgeraden in } \mathbb{C}^2\} = \mathbb{C} \setminus \{0\} / \mathbb{C}^*$. Definiere

$$f : S^2 \subset \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{CP}^1, (x, y, z) \mapsto \begin{cases} z \neq -1 : [\frac{x+iy}{1+z} : 1] \\ z = -1 : [1 : 0] \end{cases}$$

Somit folgt

(1) f ist bijektiv

(2) Wir "lesen nun in Karten", wobei $U_1 = \{z_1 : z_2 \mid z_2 \neq 0\} \xrightarrow{\psi_2} \frac{z_1}{z_2}$:

$$\psi \circ f \circ \varphi_S^{-1}(x, y) = \psi_2[x + iy : 1] = x + iy \stackrel{\mathbb{C} \simeq \mathbb{R}}{=} (x, y)$$

Also ist $\psi \circ f \circ \varphi_S^{-1} = \text{id}$ und somit $f|_{S^2 \setminus \{S\}}$ ist C^∞ und f^{-1} auch C^∞ . Nun brauchen wir nur noch eine Karte um S ! Zum Beispiel φ_N . Hier $\varphi_N(S) = (0, 0)$. Es gilt:

$$f \circ \varphi_N^{-1}(x, y) = \begin{cases} (x, y) \neq (0, 0) : [\varphi_S \circ \varphi_N^{-1}(x, y) : 1] \stackrel{\mathbb{C} \simeq \mathbb{R}}{=} [\frac{x+iy}{x^2+y^2} : 1] \in U_0 \\ [1 : 0] \in U_0 \end{cases}$$

Somit folgt:

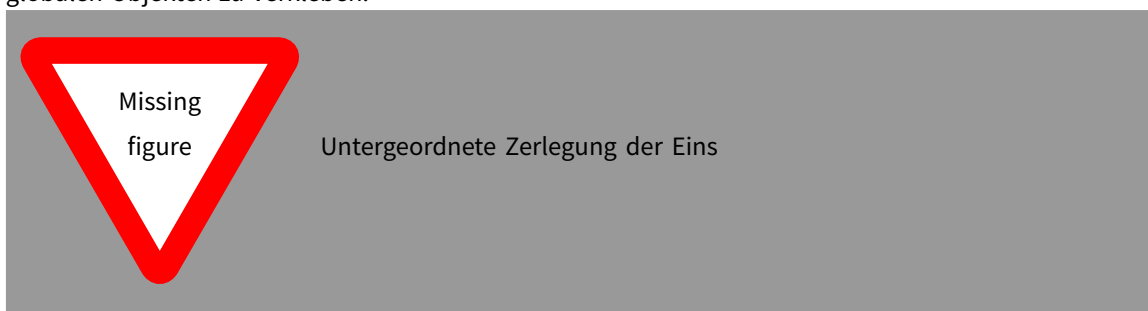
$$\psi_1 \circ f \circ \varphi_N^{-1}(x, y) = \begin{cases} \frac{x^2+y^2}{x+iy} = x - iy \\ 0 \end{cases} = (x, -y) \text{ glatt}$$

1.3.5 Definition

- (i) Eine Mannigfaltigkeit erfüllt das zweite Abzählbarkeitsaxiom, falls es einen abzählbaren Atlas besitzt.
- (ii) Seien M^n eine Mannigfaltigkeit. Eine Familie $\{f_i : M \rightarrow \mathbb{R}\}$ glatter Funktionen heißt **Zerlegung der Eins**, falls
 - $\text{supp } f_i = \overline{\{x \in M \mid f_i(x) \neq 0\}}$ "Träger von f_i " sind kompakt und bilden "lokal endliche Familie" (das heißt, sei $K \subset M$ kompakt, so gilt $\text{supp } f_i \cap K = \emptyset$ außer für endlich viele $i \in I$)
 - $\forall x \sum_{i \in I} f_i(x) = 1$ (wohldefiniert, also \sum endlich, da lokal endlich)

1.3.6 Theorem

Sei $\{U_i\}_{i \in I}$ eine Überdeckung von M . Ist M zweifach abzählbar, so existiert eine Zerlegung der Eins, die \mathcal{U} untergeordnet ist, das heißt $\text{supp } f_i \subset U_i$. Dies ist nützlich um beliebig definierte Objekte zu globalen Objekten zu verkleben.



1.3.7 Whitney Theorem

Sei M^n eine zweifach abzählbare Mannigfaltigkeit. Dann existiert eine Einbettung $f : M^n \rightarrow \mathbb{R}^{2n}$ von M (bzw. Immersion $f : M^n \rightarrow \mathbb{R}^{2n-1}$) als Untermannigfaltigkeit von \mathbb{R}^{2n} (bzw. \mathbb{R}^{2n-1})

1.3.8 Bemerkung

- (i) Können jede "abstrakte" Mannigfaltigkeit M^n als eine Untermannigfaltigkeit des \mathbb{R}^{2n-1} realisieren.

Aber

Die Einbettung ist nicht kanonisch (oder "natürlich"), das heißt gewisse Eigenschaften der Untermannigfaltigkeit entstehen durch die Einbettung und sind keine intrinsische Einbettung von M !

- (ii) Die Dimension $2n - 1$ des Bildraumes ist optimal im folgenden Sinne

\exists Mannigfaltigkeit M^n , die sich nicht in \mathbb{R}^N mit $N < 2n - 1$ einbetten lassen.

Beweisskizze

Wir nehmen an, dass die Mannigfaltigkeit M kompakt ist. So folgt mit 1.3.5, dass ein endlicher Atlas $\{(U_i, \varphi_i : U_i \rightarrow \Omega_i \subset \mathbb{R}^n)\}_{i=1}^n$ mit untergeordneter Zerlegung der Eins $\{f_i : M \rightarrow \mathbb{R}\}_{i=1}^n$, $\text{supp } f_i \subset U_i$ existiert. Definiere $\psi_i : M \rightarrow \mathbb{R}^n$ durch $\psi_i(x) = \varphi_i(x)f_i(x)$, so folgt $\psi_i(x) \equiv 0$ für $x \in U_i^c$ und ψ_i ist glatt. Dann definiert $\psi : M \rightarrow \mathbb{R}^{nr+r}$, $\psi(x) = (\psi_1(x), \dots, \psi_r(x), f_1(x), \dots, f_r(x))$ eine Einbettung. Von jetzt an ist M^n stets eine glatte zweifach abzählbare Mannigfaltigkeit.

1.4 Das Tangentialbündel einer Untermannigfaltigkeit

1.4.1 Definition

Sei $M^n \subset \mathbb{R}^{n+k}$ eine n -dimensionale Untermannigfaltigkeit. Sei $x \in M$, $v \in \mathbb{R}^{n+k}$ ist tangential an M in x , falls eine C^∞ -Abbildung $c : 0 \in I \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^{n+k}$ existiert mit

- $c(I) \subset M$
- $c(0) = x$
- $c'(t) = v$

Notation

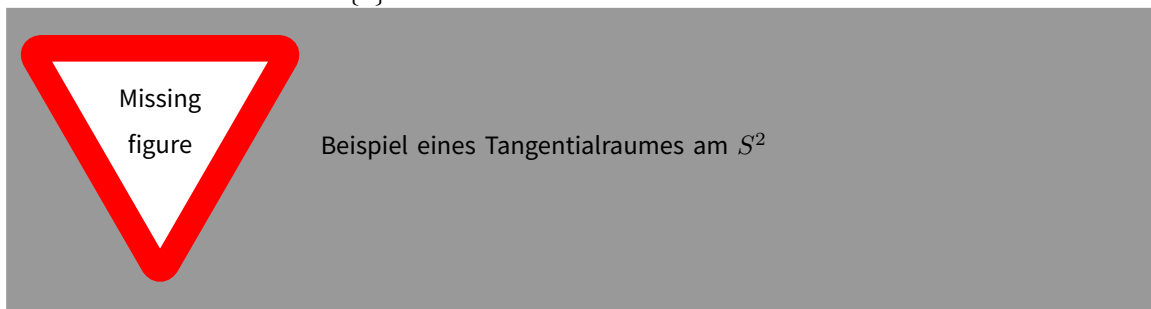
$T_x M^n$ = Menge der Tangentialvektoren v in x .

1.4.2 Satz

$T_x M^n$ ist ein n -dim Vektorraum $_{|\mathbb{R}} (\cong \mathbb{R}^n)$

Beweis

Sei M eine Untermannigfaltigkeit, $x \in M$, so existiert Umgebung $U \subset \mathbb{R}^{n+k}$ offen, $\varphi : U \rightarrow V \subset \mathbb{R}^{n+k}$ diffeomorph mit $\varphi(U \cap M) = V \cap (\mathbb{R}^n \times \{0\})$. Sei $c : I \rightarrow \mathbb{R}^{n+k}$ ein Weg mit $c(I) \subset M \cap U$, so ist $\varphi \circ c$ ein Weg im $V \cap (\mathbb{R}^n \times \{0\})$. Es folgt, dass $T_x M \cong d_{\varphi(x)} \varphi^{-1}(\mathbb{R}^n \times \{0\})$, das heißt $T_x M$ übernimmt die Vektorraumstruktur von $\mathbb{R}^n \times \{0\}$



1.4.3 Satz

Sei $M^n \subset \mathbb{R}^{n+k}$ eine Untermannigfaltigkeit der Dimension n , $x \in M$ und $U \subset \mathbb{R}^{n+k}$ offene Umgebung um x .

- (i) $U \cap M = f^{-1}(0)$ für $f : \mathbb{R}^{n+k} \rightarrow \mathbb{R}^k$ eine Submersion, so ist $T_x M^n = \ker d_x f$.
Sei zum Beispiel $M = S^2$. So ist $f(x, y, z) = x^2 + y^2 + z^2 - 1$ eine Submersion mit $S^2 = f^{-1}(0)$.
Betrachte nun den Tangentialraum am Nordpol N . Es gilt $d_N f = (0, 0, z) : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$, also gilt für den Tangentialraum:

$$T_N S^2 = \ker d_N f = \left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3 \right\}$$

- (ii) Sei $\varphi : U \rightarrow V \subset \mathbb{R}^{n+k}$ ein Diffeomorphismus mit $\varphi(U \cap M) = V \cap (\mathbb{R}^n \times \{0\})$, dann ist $T_x M = d_{\varphi(x)} \varphi^{-1}(\mathbb{R}^n \times \{0\})$
(iii) Ist (Ω, g) eine Parametrisierung von $U \cap M$, so ist der Tangentialraum $T_{g(y)} M = d_y g(\mathbb{R}^n)$

Beweis

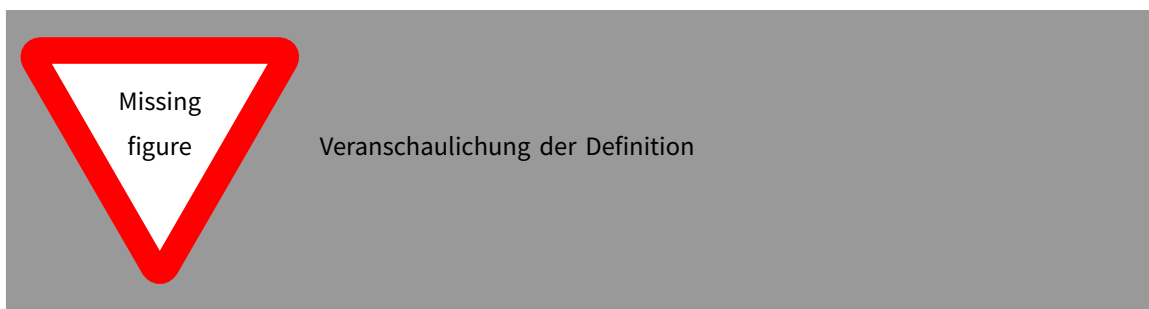
- (i) Sei $v \in T_x M$, das heißt $v = c'(0)$, $c(0) = x$. So gilt $f \circ c(t) = 0$, da $c(t) \subset M \cap U = f^{-1}(0)$.
Somit folgt mit der Kettenregel, das $d_{c(0)} f \circ c'(0) = d_x f(v) = 0$. Also ist $v \in \ker d_x f$ und es gilt $T_x M \subset \ker d_x f$. Da $T_x M$ und $\ker d_x f$ n -dimensional, folgt somit die Gleichheit.
(ii) Siehe 1.4.3
(iii) Sei $\tilde{c} \subset \Omega$ eine Kurve, $c := g \circ \tilde{c}$ Kurve durch $c(0) = g(\tilde{c}(0)) \in M$. So ist $c'(0) = d_{\tilde{c}(0)} g(c'(\tilde{c}(0))) \in T_{c(0)} M$. Also gilt $d_y g(\mathbb{R}^n) \subset T_{g(y)} M$ und die Gleichheit folgt wie in (i) durch die Dimension.

1.5 Das Tangentialbündel einer abstrakten Mannigfaltigkeit

1.5.1 Definition

Sei M^n eine abstrakte Mannigfaltigkeit, $x \in M$. Ein **Tangentialvektor** von M in x ist eine Äquivalenzklasse von Kurven $\alpha : I \rightarrow M$ mit $\alpha(0) = x$. Dabei heißen $\alpha : I \rightarrow M$ und $\beta : J \rightarrow M$ äquivalent, falls eine Karte (U, φ) um x existiert mit

$$(\varphi \circ \alpha)'(0) = (\varphi \circ \beta)'(0)$$



Notation

$T_x M$ = Raum der Tangentialvektoren

1.5.2 Bemerkung

(i) Gilt die oben genannte Äquivalenzbedingung für eine Karte, dann gilt sie für alle.

Beweis

Sei (V, ψ) eine andere Karte. Es gilt

$$\begin{aligned} (\psi \circ \alpha)'(0) &= (\psi \circ \varphi^{-1} \varphi \circ \alpha)'(0) \\ &= d_{\varphi(\alpha(0))}(\psi \circ \varphi^{-1})((\varphi \circ \alpha)'(0)) \\ &= d_{\varphi(\beta(0))}(\psi \circ \varphi^{-1})((\varphi \circ \beta)'(0)) = (\psi \circ \beta)'(0) \end{aligned}$$

(ii) $T_x M$ ist n -dimensionaler Vektorraum $_{|\mathbb{R}}$.

Beweis

Sei (U, φ) eine Karte um x . Sei $\Gamma_{(U, \varphi, x)} : T_x M \rightarrow \mathbb{R}^n$, $[\alpha] \mapsto (\varphi \circ \alpha)'(0)$. Aus der Äquivalenzrelation folgt, dass Γ wohldefiniert und bijektiv. Also können wir die Vektorraumstruktur auf $T_x M$ durch $\Gamma_{(U, \varphi, x)}$ erklären. Dies ist wohldefiniert, da $d_{\varphi(x)}(\psi \circ \varphi^{-1})$ für jede weitere Karte (V, ψ) um x ein linearer Isomorphismus ist. (Da $\psi \circ \varphi^{-1}$ Diffeomorphismus.)

1.5.3 Definition

Sei M eine Mannigfaltigkeit, $x \in M$, (U, φ) und (V, ψ) zwei Karten um x . Seien $u, v \in \mathbb{R}^n$. Als Äquivalenzrelation ist definiert:

$$u \sim v \stackrel{\text{Def.}}{\iff} v = d_{\varphi(x)}(\psi \circ \varphi^{-1})(u)$$

Ein **Tangentenvektor** in x auf M ist eine solche Äquivalenzklasse $[(U, \varphi, u)]$



1.5.4 Bemerkung

Sei $x \in M$, (U, φ) Karte um x . So ist


$$\Theta_{(U, \varphi, x)} : \begin{matrix} u \\ \in \varphi(x) + \mathbb{R}^n \end{matrix} \rightarrow [(U, \varphi, u)] \in T_x M$$

eine Bijektion, die wohldefiniert $VR|_{\mathbb{R}^n}$ auf $T_x M$ induziert.

1.5.5 Definition

$TM := \bigcap_{x \in M} T_x M$ ist das **Tangentenbündel** von M .

Index

Die **Seitenzahlen** sind mit [Hyperlinks](#) zu den entsprechenden Seiten versehen, also anklickbar 

(abstrakte) differenzierbare Mannigfaltigkeit, 6

Atlas, 5

Differenzierbare Struktur, 6

Immersion, 1

Karte, 6

Kartenwechsel, 6

lokale Parametrisierung, 3

projektive Raum, 8

Sphäre, 2

Submersion, 1

Tangentialbündel, 14

Tangentialvektor, 13, 14

Untermannigfaltigkeit, 2

Zerlegung der Eins, 11

Étale, 1

Abbildungsverzeichnis

1	hyperbolischer Raum für $c > 0$, $c < 0$, $c = 0$	2
2	Stereografische Projektion	6
3	Der Würfel Q ist keine Untermannigfaltigkeit des \mathbb{R}^n !	8
4	Der 2-dimensionale projektive Raum $\mathbb{R}P^2$ (projektive Ebene)	8
5	Der eindimensionale projektive Raum $\mathbb{R}P^1$	8
6	Beispiel einer Nichthäudorffmenge	9