

Analysis auf Mannigfaltigkeiten

Vorlesung von
PROF. DR. FELIX FINSTER
im Sommersemester 2012
Überarbeitung und Textsatz in LyX von
ANDREAS VÖLKLEIN



Stand: 3. Juli 2012

ACHTUNG

Diese Mitschrift ersetzt *nicht* die Vorlesung.

Es wird daher *dringend* empfohlen, die Vorlesung zu besuchen.

Copyright Notice

Copyright © 2012 ANDREAS VÖLKLEIN

Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.3 or any later version published by the Free Software Foundation;

with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts.

A copy of the license is included in the section entitled “GNU Free Documentation License”.

Disclaimer of Warranty

UNLESS OTHERWISE MUTUALLY AGREED TO BY THE PARTIES IN WRITING AND TO THE EXTENT NOT PROHIBITED BY APPLICABLE LAW, **THE COPYRIGHT HOLDERS AND ANY OTHER PARTY, WHO MAY DISTRIBUTE THE DOCUMENT AS PERMITTED ABOVE, PROVIDE THE DOCUMENT “AS IS”, WITHOUT WARRANTY OF ANY KIND**, EXPRESSED, IMPLIED, STATUTORY OR OTHERWISE, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, NON-INFRINGEMENT, THE ABSENCE OF LATENT OR OTHER DEFECTS, ACCURACY, OR THE ABSENCE OF ERRORS, WHETHER OR NOT DISCOVERABLE.

Limitation of Liability

IN NO EVENT UNLESS REQUIRED BY APPLICABLE LAW OR AGREED TO IN WRITING **WILL THE COPYRIGHT HOLDERS, OR ANY OTHER PARTY, WHO MAY DISTRIBUTE THE DOCUMENT AS PERMITTED ABOVE, BE LIABLE TO YOU FOR ANY DAMAGES**, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, ANY GENERAL, SPECIAL, INCIDENTAL, CONSEQUENTIAL, PUNITIVE OR EXEMPLARY DAMAGES, HOWEVER CAUSED, REGARDLESS OF THE THEORY OF LIABILITY, ARISING OUT OF OR RELATED TO THIS LICENSE OR ANY USE OF OR INABILITY TO USE THE DOCUMENT, EVEN IF THEY HAVE BEEN ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGES.

IN NO EVENT WILL THE COPYRIGHT HOLDERS’/DISTRIBUTOR’S LIABILITY TO YOU, WHETHER IN CONTRACT, TORT (INCLUDING NEGLIGENCE), OR OTHERWISE, **EXCEED THE AMOUNT YOU PAID THE COPYRIGHT HOLDERS/DISTRIBUTOR** FOR THE DOCUMENT UNDER THIS AGREEMENT.

Links

Der Text der „GNU Free Documentation License“ kann auch auf der Seite

<https://www.gnu.org/licenses/fdl-1.3.de.html>

nachgelesen werden.

Eine transparente Kopie der aktuellen Version dieses Dokuments kann von

<https://github.com/andiv/analysisMFK>

heruntergeladen werden.

Literatur

- Standardlehrbücher zur *Analysis*:
 - HERBERT AMANN, JOACHIM ESCHER
 - KONRAD KÖNIGSBERGER
 - THEODOR BRÖCKER
 - STEFAN HILDEBRANDT
- MICHAEL SPIVAK: *Calculus on manifolds*, Perseus Books, 1998
ISBN: 0-8053-9021-9
besonders gut: Satz von Stokes, Differentialformen
deckt nicht alles ab
- ANDRÉ LICHNEROWICZ: *Einführung in die Tensoranalysis*, Bibliographisches Institut, 1966
einfach zugänglich
Kapitel zur Allgemeinen Relativitätstheorie
- ALBRECHT DOLD: *Lectures on algebraic topology*, Springer, 1995

Differentialtopologie:

- BRÖCKER, JÄNICH: *Einführung in die Differentialtopologie*
- JÄNICH: *Vektoranalysis*

Inhaltsverzeichnis

1	Beispiele und grundlegende Definitionen	1
1.1	Untermannigfaltigkeiten des \mathbb{R}^n	1
1.1.1	Beispiel (Einheitssphäre)	1
1.1.2	Definition (Untermannigfaltigkeit des \mathbb{R}^n , Karte, Atlas)	3
1.1.3	Definition (regulärer Punkt)	3
1.1.4	Theorem (Satz vom regulären Wert)	3
1.1.5	Theorem (Satz von der lokalen Umkehrbarkeit)	3
1.1.6	Theorem (Satz über implizite Funktionen)	4
1.1.7	Theorem (Rangtheorem)	4
1.2	Abstrakte Mannigfaltigkeiten	4
1.2.1	Definition (Hausdorffsch, Basis, separabel)	4
1.2.2	Satz (metrischer Raum ist Hausdorffsch)	5
1.2.3	Beispiel	5
1.2.4	Definition (topologische Mannigfaltigkeit, differenzierbare Struktur)	5
1.2.5	Beispiel	6
1.2.6	Beispiel	7
1.2.7	Definition (differenzierbare Abbildungen zwischen Mannigfaltigkeiten)	8
1.2.8	Bemerkung	8
1.2.9	Definition (Untermannigfaltigkeit)	8
1.3	Die Partition der Eins	8
1.3.1	Definition (Zerlegung der Eins)	9
1.3.2	Definition (kompakte Ausschöpfung, parakompakt)	9
1.3.3	Satz (Mannigfaltigkeit ist parakompakt)	9
1.3.4	Satz (Existenz eines abzählbaren Atlanten)	10
1.3.5	Theorem (Existenz einer glatten Partition der Eins)	11
2	Mehrfachintegrale, die Transformationsformel	13
2.1	Definition (Mehrfachintegral)	13
2.2	Lemma	13
2.3	Beispiel (eindimensionale Variablentransformation)	15
2.4	Lemma (Vertauschen der Integrationsvariablen)	15
2.5	Lemma	16
2.6	Theorem (Transformationsformel)	18
2.7	Korollar	19
3	Einige Konstruktionen und Begriffe der Differentialtopologie	21
3.1	Der Tangentialraum	21
3.1.1	Definition (Kurve)	21
3.1.2	Bemerkung und Definition (Einsteinsche Summenkonvention, Äquivalente Kurven)	22

3.1.3	Definition (Tangentialraum)	23
3.1.4	Satz	23
3.1.5	Bemerkung	23
3.1.6	Definition (Richtungsableitung, ko- und kontravariante Vektoren) .	24
3.1.7	Konstruktion (Tangentialraum über Derivationen, Funktionskeime)	25
3.1.8	Satz	26
3.1.9	Definition (Tangentialvektor, Derivation)	26
3.1.10	Definition (partielle Ableitung)	27
3.1.11	Satz (Basis des Tangentialraums)	27
3.1.12	Satz	29
3.2	Abbildungen zwischen Mannigfaltigkeiten	29
3.2.1	Definition (differenzierbare Abbildung)	30
3.2.2	Definition (Pushforward)	30
3.2.3	Lemma	30
3.2.4	Definition (Pullback)	31
3.2.5	Theorem (lokale Umkehrbarkeit)	31
3.2.6	Theorem (Rangtheorem)	32
3.2.7	Definition (Submersion, Immersion)	32
3.2.8	Beispiel	32
3.3	Grundlagen der Tensoranalysis	32
3.3.1	Bemerkung und Definition (Kotangentialraum)	33
3.3.2	Konstruktion (Tensorprodukt)	34
3.3.3	Beispiel	35
3.3.4	Bemerkung und Definition (Tensor)	36
3.3.5	Definition (Operationen auf Tensoren)	37
3.3.6	Beispiel	38
3.3.7	Definition (Tensorfeld, Vektorfeld)	38
3.3.8	Bemerkung und Beispiel	39
3.4	Das Tangentialbündel, Vektorbündel	39
3.4.1	Definition (assoziierte Bündelkarte)	39
3.4.2	Bemerkung	40
3.4.3	Definition (Tangentialbündel, Faser, Schnitt des Bündels)	40
3.4.4	Definition (Vektorbündel)	41
3.4.5	Beispiel (triviales Vektorbündel)	41
3.4.6	Bemerkung und Definition (Basis, Projektion, Faser)	42
4	Riemannsche Mannigfaltigkeiten	43
4.1	Die Riemannsche Metrik	43
4.1.1	Definition (Riemannsche Metrik)	44
4.1.2	Beispiel (erste Fundamentalform)	44
4.1.3	Definition (Riemannsche Metrik)	44
4.1.4	Beispiel	45
4.1.5	Tensorkalkül mit Metrischem Tensor	46
4.2	Der Minkowski-Raum, Lorentz-Mannigfaltigkeiten	47
4.2.1	Definition (Minkowski-Raum, nicht entartet)	47
4.2.2	Definition (Signatur, Pseudo-Orthonormalbasis)	48
4.2.3	Satz	48
4.2.4	Bemerkung und Definition (Minkowski-Signatur, pseudo-Riemannsch)	48
4.2.5	Definition (pseudo-Riemannsche Metrik)	48

4.2.6	Tensorkalkül in Lorentz-Mannigfaltigkeit	49
4.2.7	Definition (kausale Struktur)	49
4.3	Länge von Kurven	49
4.3.1	Definition	50
4.3.2	Definition	50
4.3.3	Lemma	50
4.4	Integration auf Riemannschen Mannigfaltigkeiten	51
4.4.1	Lemma	52
4.4.2	Definition	53
4.4.3	Satz	53
4.4.4	Definition	54
4.4.5	Satz	54
5	Der Divergenzsatz von Gauß	55
5.1	Die Divergenz	55
5.1.1	Definition (Divergenz)	56
5.1.2	Bemerkung	56
5.1.3	Lemma	56
5.1.4	Bemerkung	58
5.1.5	Lemma und Definition (Divergenz)	59
5.1.6	Bemerkung	60
5.2	Der Satz von Gauß auf kompakten Mannigfaltigkeiten	60
5.2.1	Theorem	60
5.2.2	Definition	61
5.2.3	Korollar und Definition	62
5.2.4	Bemerkung	63
5.3	Mannigfaltigkeiten mit Rand	64
5.3.1	Definition	64
5.3.2	Lemma	64
5.3.3	Definition (Mannigfaltigkeit mit Rand)	65
5.3.4	Lemma und Definition	65
5.3.5	Definition	66
5.3.6	Beispiel	66
5.3.7	Definition	66
5.3.8	Bemerkung	66
5.3.9	Definition (Riemannsche Metrik)	67
5.3.10	Definition (Normale)	67
5.4	Der allgemeine Gaußsche Divergenzsatz	67
5.4.1	Theorem	67
5.4.2	Theorem (Greensche Formeln)	69
5.4.3	Randwertprobleme	70
5.4.4	Korollar	70
5.4.5	Theorem (Mittelwertgleichung)	71
5.4.6	Theorem (Satz von Gauß auf nicht-kompakten Mannigfaltigkeiten)	73
5.4.7	Theorem (Gaußscher Divergenzsatz im \mathbb{R}^3)	73
6	Differentialformen	75
6.1	Alternierende Formen	76
6.1.1	Definition	77

6.1.2	Satz	77
6.1.3	Definition	78
6.1.4	Definition	78
6.1.5	Beispiel	79
6.1.6	Definition	79
6.1.7	Satz	79
6.1.8	Satz	80
6.1.9	Satz	81
6.1.10	Beispiel	81
6.2	Differentialformen, Orientierbarkeit	82
6.2.1	Definition	82
6.2.2	Definition	83
6.2.3	Beispiel	83
6.2.4	Theorem	83
6.2.5	Lemma	83
6.2.6	Lemma	84
6.3	Die äußere Ableitung, der deRham-Komplex	85
6.3.1	Definition	85
6.3.2	Theorem (Rechenregeln)	85
6.3.3	Satz	86
6.3.4	Definition	89
6.3.5	Definition (deRham-Kohomologie)	89
6.3.6	Definition	90
6.3.7	Theorem (Poincarésches Lemma)	90
6.4	Integration von Differentialformen	92
6.4.1	Definition	92
6.4.2	Satz	93
6.5	Der Satz von Stokes	94
6.5.1	Theorem	94
Anhang		95
	Danksagungen	96
	GNU Free Documentation License	97

1 Beispiele und grundlegende Definitionen

1.1 Untermannigfaltigkeiten des \mathbb{R}^n

1.1.1 Beispiel (Einheitssphäre)

$S^2 \subseteq \mathbb{R}^3$ ist die zweidimensionale Einheitssphäre.

Diese kann als Lösungsmenge der Gleichung

$$x^2 + y^2 + z^2 = 1$$

charakterisiert werden.

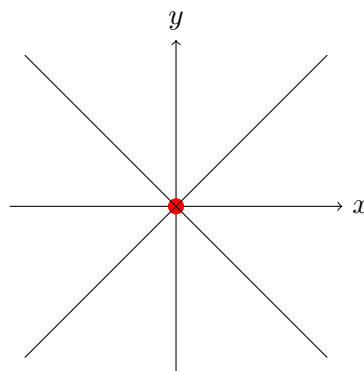
Günstiger ist es, wenn man S^2 als die Nullstellenmenge einer Funktion F auffasst:

$$\begin{aligned} F : \mathbb{R}^3 &\rightarrow \mathbb{R} \\ (x, y, z) &\mapsto x^2 + y^2 + z^2 - 1 \end{aligned}$$

Bemerkung

Im Allgemeinen ist die Nullstellenmenge einer glatten Funktion $F : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ *keine* Untermannigfaltigkeit. Betrachte zum Beispiel:

$$\begin{aligned} F(x, y, z) &= x^2 - y^2 \\ F(x, y, z) = 0 &\Leftrightarrow x = \pm y \end{aligned}$$



Die Nullstellenmenge besteht aus zwei Hyperebenen, die sich auf der Geraden $x = 0 = y$ schneiden. Analytisch liegt das daran, dass die Jacobi-Matrix

$$DF|_{(0,0,z)} = (2x, -2y, 0)|_{(0,0,z)} = 0$$

verschwindet.

Zurück zu S^2

Überprüfe, dass DF auf S^2 maximalen Rang hat. Es gilt

$$DF|_{(x,y,z)} v = \left\langle \text{grad}(F)|_{(x,y,z)}, v \right\rangle_{\mathbb{R}^3}$$

$$\text{grad}(F)|_{(x,y,z)} = \begin{pmatrix} 2x \\ 2y \\ 2z \end{pmatrix} \neq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

für alle $(x,y,z) \in S^2$, denn wegen $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ ist $(0,0,0) \notin S^2$.

Wende nun das Rangtheorem 1.1.7 an:

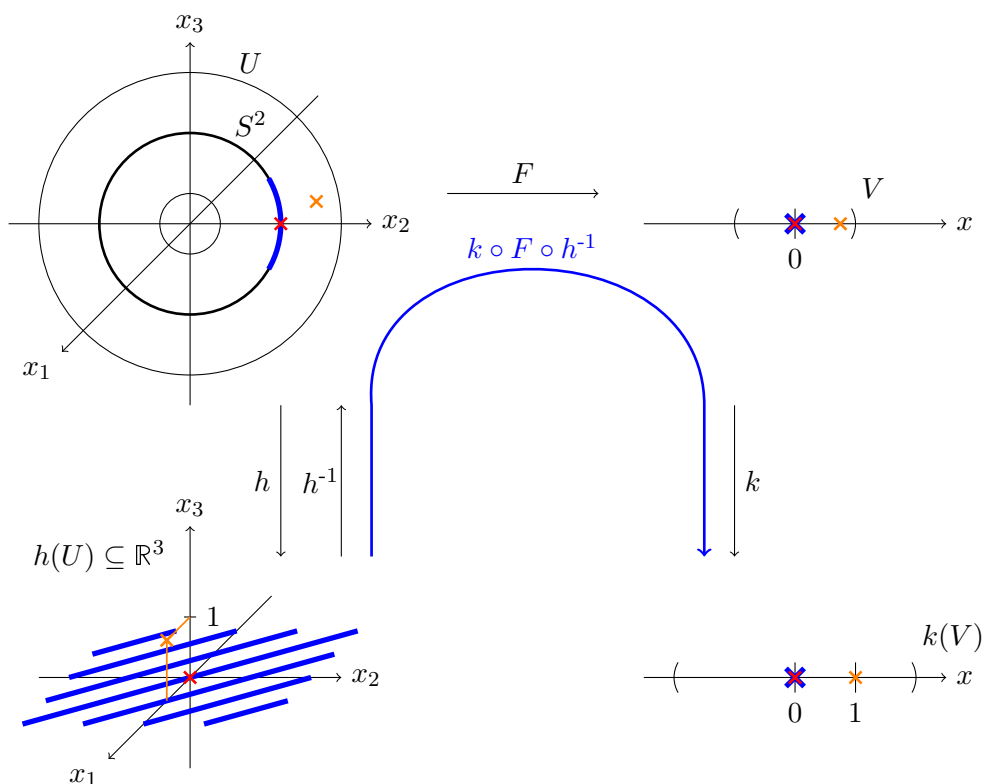
Sei $F \in C^1(\Omega \subseteq \mathbb{R}^3, \mathbb{R})$ und $DF|_p$ habe Rang eins für alle $p \in \Omega$.

Dann gibt es zu jedem $p \in \Omega$ eine offene Umgebung $U \subseteq \Omega$ von p und eine offene Umgebung $V \subseteq \mathbb{R}$ von $F(p)$ und Diffeomorphismen

$$\begin{array}{lll} h: U \rightarrow \mathbb{R}^3 & \text{mit} & h(p) = 0 \\ k: V \rightarrow \mathbb{R} & \text{mit} & k(F(p)) = 0 \end{array}$$

sodass $h(U)$ und $k(V)$ offen sind und dass gilt:

$$(k \circ F \circ h^{-1})(x_1, x_2, x_3) = x_3$$



h^{-1} bildet die Flächen parallel zur x_1 - x_2 -Ebene auf Flächen ab, auf denen F einen konstanten Wert hat. k bildet diesen Wert auf die ursprüngliche Höhe x_3 ab.

$F(x) = 0$ beschreibt Punkte auf S^2 . Wähle x auf der Sphäre, also $F(x) = 0$.

$$F(x) = 0 \Leftrightarrow (k \circ F)(x) = 0$$

Also gilt:

$$(k \circ F \circ h^{-1})(x_1, x_2, 0) = 0$$

Daher liegt auch $h^{-1}(x_1, x_2)$ auf S^2 .

$$h : U \rightarrow h(U) \subseteq \mathbb{R}^3$$

$U' := h(U)$ ist offen und $h(U \cap S^2) = h(U) \cap \mathcal{H}$ mit:

$$\mathcal{H} := \{(x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3 \mid x_3 = 0\}$$

Man erhält also eine *Karte* $h : U \rightarrow U'$.

$$h(U \cap S^2) = U' \cap (\mathbb{R}^2 \times \{0\})$$

1.1.2 Definition (Untermannigfaltigkeit des \mathbb{R}^n , Karte, Atlas)

Eine Teilmenge $M \subseteq \mathbb{R}^n$ heißt *k-dimensionale Untermannigfaltigkeit der Klasse C^l* , falls jeder Punkt $p \in M$ eine Umgebung $U \subseteq \mathbb{R}^n$ und einen C^l -Diffeomorphismus

$$h : U \rightarrow U' \subseteq \mathbb{R}^k \times \mathbb{R}^{n-k} = \mathbb{R}^n$$

besitzt, sodass $h(U \cap M) = U' \cap (\mathbb{R}^k \times \{0\})$ gilt.

(h, U) heißt *Karte*. Eine Familie $(h_\lambda, U_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ von Karten heißt *Atlas*, falls die $(U_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ eine offene Überdeckung von M bilden.

1.1.3 Definition (regulärer Punkt)

Sei $g : \Omega \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^q$ mit $q \leq n$ von der Klasse C^l .

Ein Punkt $u \in \Omega$ heißt *regulärer Punkt*, falls $Dg|_u$ Höchstrang (also Rang q) hat.

Ein $x \in \mathbb{R}^q$ heißt *regulärer Wert*, falls jedes $u \in g^{-1}(x)$ ein regulärer Punkt ist.

Gilt diese Bedingung nicht, so nennt man den Punkt beziehungsweise den Wert *singulär*.

1.1.4 Theorem (Satz vom regulären Wert)

Ist w ein regulärer Wert von $g \in C^l(\Omega \subseteq \mathbb{R}^n, \mathbb{R}^q)$, so ist $M := g^{-1}(w)$ eine Untermannigfaltigkeit der Dimension $n - q$ der Klasse C^l .

Beweis

Für den Beweis verwendet man das folgende Theorem.

□_{1.1.4}

1.1.5 Theorem (Satz von der lokalen Umkehrbarkeit)

Sei $f \in C^l(\Omega \subseteq \mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$ und $Df|_{x_0}$ ist invertierbar.

Dann ist f lokal invertierbar, das heißt es existiert eine offene Umgebung $U \subseteq \Omega$ von x_0 , sodass $f(U) \subseteq \mathbb{R}^n$ offen und $f|_U : U \rightarrow f(U)$ ein C^l -Diffeomorphismus ist.

Beweis

Siehe Analysis 2.

□_{1.1.5}**1.1.6 Theorem** (Satz über implizite Funktionen)

Seien $\Omega \subseteq \mathbb{R}^n$, $V \subseteq \mathbb{R}^m$, $f \in C^l(\Omega \times V, \mathbb{R}^m)$ mit $f(x_0, y_0) = 0$ und $D_2 f|_{(x_0, y_0)}$, also der rechte $m \times m$ große Block der Jacobi-Matrix, sei invertierbar.

Dann existiert eine Umgebung $U \subseteq \Omega$ von x_0 und ein $\varphi \in C^l(U, V)$, sodass $\varphi(x_0) = y_0$ und $f(x, \varphi(x)) = 0$ für alle $x \in U$ gilt.

Beweis

Siehe Analysis 2.

□_{1.1.6}**1.1.7 Theorem** (Rangtheorem)

Seien $U \subseteq \mathbb{R}^n$ und $V \subseteq \mathbb{R}^m$ offen, $f \in C^l(U, V)$ und $Df|_u$ habe Rang $r \in \mathbb{N}$ für alle $u \in U$.

Sei $p \in U$ und $q := f(p) \in V$.

Dann gibt es offene Umgebungen $U_1 \subseteq U$ von p und $V_1 \subseteq V$ von q sowie Diffeomorphismen h und k mit den Eigenschaften:

$$\begin{aligned} h : U_1 &\rightarrow \mathbb{R}^n & h(p) &= 0 \\ k : V_1 &\rightarrow \mathbb{R}^m & k(q) &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (k \circ f \circ h^{-1}) : U_1 &\rightarrow V_1 \\ (x_1, \dots, x_n) &\mapsto (x_1, \dots, x_r, 0, \dots, 0) \end{aligned}$$

Beweis

Siehe Analysis 2.

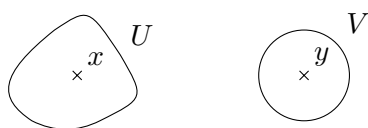
□_{1.1.7}**1.2 Abstrakte Mannigfaltigkeiten**

Zunächst zu den topologischen Vorbereitungen:

Sei (M, \mathcal{O}) ein topologischer Raum. Dabei sind die Elemente $\Omega \in \mathcal{O}$ die offenen Mengen.

1.2.1 Definition (Hausdorffsch, Basis, separabel)

- i) Die Topologie heißt *Hausdorffsch*, falls es zu je zwei Punkten $x, y \in M$ mit $x \neq y$ disjunkte offene Umgebungen U von x und V von y gibt.



- ii) Eine Mengenfamilie $(G_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ von offenen Mengen heißt *Basis der Topologie*, falls jede offene Menge als Vereinigung von G_λ 's geschrieben werden kann.
- iii) Ein topologischer Raum heißt *separabel*, falls es eine abzählbare Basis der Topologie gibt.

1.2.2 Satz (metrischer Raum ist Hausdorffsch)

Jeder metrischer Raum ist Hausdorffsch.

Beweis

Seien $x, y \in M$. Setze $d := d(x, y)$, $U = B_{\frac{d}{3}}(x)$ und $V = B_{\frac{d}{3}}(y)$.

Dann ist nach der Dreiecksungleichung $U \cap V = \emptyset$ und U, V sind offene Umgebungen von x beziehungsweise y . $\square_{1.2.2}$

1.2.3 Beispiel

- i) Betrachte \mathbb{R}^n mit der Standardtopologie. Die Menge

$$\Lambda = \{(x, \varrho) \mid x \in \mathbb{Q}^n, \varrho \in \mathbb{Q}_{>0}\}$$

ist als Produkt abzählbarer Mengen abzählbar. Zu $(x, \varrho) \in \Lambda$ definieren wir nun:

$$G_{(x, \varrho)} := B_{\varrho}(x)$$

Die $(G_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ bilden eine Basis der Topologie, denn eine beliebige offene Menge $\Omega \subseteq \mathbb{R}^n$ kann man als

$$\Omega = \bigcup_{G_\lambda \subseteq \Omega} G_\lambda$$

schreiben, denn:

$\bigcup_{G_\lambda \subseteq \Omega} G_\lambda \subseteq \Omega$ ist klar. Zeige nun $\Omega \subseteq \bigcup_{G_\lambda \subseteq \Omega} G_\lambda$:

Sei $x \in \Omega$. Da Ω offen ist, gibt es ein $\varepsilon > 0$ mit $B_\varepsilon(x) \subseteq \Omega$.

In $B_{\frac{\varepsilon}{3}}(x)$ liegt ein $y \in \mathbb{Q}^n$. Wähle $\varrho \in \mathbb{Q}$ mit $\frac{\varepsilon}{3} < \varrho < \frac{2\varepsilon}{3}$.

Also ist $B_{\varrho}(y) \subseteq B_\varepsilon(x) \subseteq \Omega$ und $x \in B_{\varrho}(y)$. $\square_{1.2.3}$

- ii) Betrachte \mathbb{R} mit $\mathcal{O} = \mathcal{P}(\mathbb{R})$, das heißt alle Teilmengen von \mathbb{R} sind offen. Dann gibt es keine abzählbare Basis der Topologie.

1.2.4 Definition (topologische Mannigfaltigkeit, differenzierbare Struktur)

- i) Eine *topologische Mannigfaltigkeit* (Abkürzung: MFK) der Dimension n ist ein separabler Hausdorffraum (M, \mathcal{O}) , also ein separabler, Hausdorffscher topologischer Raum, der lokal homöomorph zum \mathbb{R}^n ist, das heißt für alle $p \in M$ existiert eine offene Umgebung $U \subseteq M$ von p und eine offene Menge $V \subseteq \mathbb{R}^n$ und ein Homöomorphismus $x : U \rightarrow V$, das heißt x ist bijektiv und x und x^{-1} sind stetig.

- ii) (x, U) heißt *Karte* um p . Eine Familie von Karten $(x_\lambda, U_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ heißt *Atlas* und wir schreiben auch:

$$\mathcal{A} = \{(x_\lambda, U_\lambda) \mid \lambda \in \Lambda\} = \{(x, U)\}$$

TODO: Abb1 einfügen

$x \circ (x')^{-1}$ heißt *Kartenwechselabbildung*. Genauer sind $x(U \cap U') \subseteq \mathbb{R}^n$ und $x'(U \cap U')$ offen und

$$x \circ (x')^{-1} : x'(U \cap U') \rightarrow x(U \cap U')$$

ist ein Homöomorphismus.

Ein Atlas $\mathcal{A} = \{(x, U)\}$ heißt C^l -Atlas mit $l \in \mathbb{N}_{\geq 1}$, falls gilt:

- a) $\{U \mid (x, U) \in \mathcal{A}\}$ bildet eine Überdeckung von M .
- b) Sind $(x, U), (y, V) \in \mathcal{A}$ mit $U \cap V \neq \emptyset$, so ist

$$(x \circ y^{-1}) : y(U \cap V) \rightarrow x(U \cap V)$$

von der Klasse C^l .

- iii) Sei \mathcal{A} ein C^l -Atlas von M . Eine Karte (x, U) heißt *mit \mathcal{A} verträglich*, falls $\mathcal{A} \cup \{(x, U)\}$ ebenfalls ein C^l -Atlas ist.

Für zwei C^l -Atlanten \mathcal{A} und \mathcal{A}' kann man definieren:

$$\mathcal{A} \subseteq \mathcal{A}' \quad \Leftrightarrow \quad \forall_{(x, U) \in \mathcal{A}} : (x, U) \in \mathcal{A}'$$

Mit Hilfe des Lemmas von Zorn kann man zeigen:

Sei \mathcal{A} ein C^l -Atlas. Dann gibt es einen maximalen C^l -Atlas \mathcal{A}' , der \mathcal{A} erweitert, also mit $\mathcal{A} \subseteq \mathcal{A}'$.

Einen solchen maximalen Atlas nennt man *differenzierbare Struktur*.

Im Folgenden betrachten wir meist C^∞ -Strukturen, das heißt eine differenzierbare Struktur mit maximalem C^∞ -Atlas.

Solche Mannigfaltigkeiten nennt man *glatt*.

1.2.5 Beispiel

- i) Jede C^l -Untermannigfaltigkeit $M^k \subseteq \mathbb{R}^n$ ist eine k -dimensionale Mannigfaltigkeit.

TODO: Abb2 einfügen

$x = \pi \circ \phi|_{V \cap M} : U \rightarrow \mathbb{R}^k$ und (x, U) ist eine Karte von M .

- ii) Eine *Riemannsche Fläche* ist eine zweidimensionale C^∞ -Mannigfaltigkeit.

1.2.6 Beispiel

- i) Betrachte $M = \mathbb{R}^n$ mit Atlas $\mathcal{A} = \{(\text{id}, \mathbb{R}^n)\}$ ist ein C^∞ -Atlas.

Die zugehörige differenzierbare Struktur ist die „übliche differenzierbare Struktur des \mathbb{R}^n “.

(Das bedeutet, dass genau die Abbildungen stetig differenzierbar sind, die üblicherweise stetig differenzierbar sind.)

- ii) Betrachte die Einheitssphäre $S^n := \{x \in \mathbb{R}^{n+1} \mid \|x\| = 1\}$.

TODO: Abb3 einfügen

$$\begin{aligned}\pi_+ : S^n \setminus \{N\} &\rightarrow \mathbb{R}^n \\ p &\mapsto (\pi_{+,i}(p))_{1 \leq i \leq n} = \left(\frac{p_i}{1 - p_{n+1}} \right)_{1 \leq i \leq n} \\ \pi_- : S^n \setminus \{S\} &\rightarrow \mathbb{R}^n \\ p &\mapsto (\pi_{-,i}(p))_{1 \leq i \leq n} = \left(\frac{p_i}{1 + p_{n+1}} \right)_{1 \leq i \leq n} \\ \pi_+ \circ \pi_-^{-1} : \pi_- (S^n \setminus \{N, S\}) &\rightarrow \pi_+ (S^n \setminus \{N, S\}) \in C^\infty\end{aligned}$$

Damit ist

$$\mathcal{A} = \{(\pi_+, S^n \setminus \{N\}), (\pi_-, S^n \setminus \{S\})\}$$

ein C^∞ -Atlas.

- iii) Man kann auf \mathbb{R} verschiedene differenzierbare Strukturen einführen. $\mathcal{A}_1 = \{(\text{id}, \mathbb{R})\}$ ist ein C^∞ -Atlas.

TODO: Abb4 einfügen

Definition: $f : M \rightarrow \mathbb{R}$ ist genau dann differenzierbar, wenn $f \circ X^{-1}$ differenzierbar ist.

$\mathcal{A} = \{(\varphi, \mathbb{R})\}$ mit:

$$\begin{aligned}\varphi : \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R} \\ t &\mapsto \varphi(t) = t^3\end{aligned}$$

φ ist ein Homöomorphismus und differenzierbar, aber φ^{-1} ist *nicht* differenzierbar.

$$\begin{aligned}\varphi^{-1} : \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R} \\ x &\mapsto \varphi^{-1}(x) = \begin{cases} \sqrt[3]{x} & \text{falls } x \geq 0 \\ -\sqrt[3]{|x|} & \text{falls } x < 0 \end{cases}\end{aligned}$$

TODO: Abb5 einfügen

Da alle Kartenwechselabbildungen die Identität sind ($\varphi \circ \varphi^{-1} = \text{id}$), sind alle Kartenwechselabbildungen glatt. Also ist \mathcal{A} ein C^∞ -Atlas.

Eine Funktion $f : M = \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ ist genau dann differenzierbar bezüglich der differenzierbaren Struktur von $\mathcal{A} = \{(\varphi, \mathbb{R})\}$, wenn $f \circ \varphi^{-1}$ differenzierbar ist.

$$\begin{array}{ll} f(x) = x & \text{ist nicht differenzierbar} \\ f(x) = x^3 & \text{ist differenzierbar wegen } (f \circ \varphi^{-1})(x) = x \end{array}$$

1.2.7 Definition (differenzierbare Abbildungen zwischen Mannigfaltigkeiten)

Seien M^n und N^k differenzierbare Mannigfaltigkeiten, also mit Atlanten mit differenzierbaren Kartenwechselabbildungen, und $\Omega \subseteq M$ offen.

TODO: Abb6 einfügen

Eine Abbildung $f : \Omega \rightarrow N$ heißt *differenzierbar von der Klasse C^l* , falls $y \circ f \circ x^{-1}$ von der Klasse C^l für beliebige Karten $(x, U) \in \mathcal{A}_M$ und $(y, V) \in \mathcal{A}_N$ ist.

f heißt *Diffeomorphismus*, falls f bijektiv und f und f^{-1} differenzierbar sind.

1.2.8 Bemerkung

Ist $\Omega \subseteq M^n$ offen, $f : \Omega \rightarrow N^k$ ein Diffeomorphismus und $f(\Omega) \subseteq N^k$ offen, so ist $n = k$.

Beweis

Betrachte die Abbildung

$$y \circ f \circ x^{-1} : U \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow V \subseteq \mathbb{R}^k$$

mit offen Mengen U, V . Dies ist nach der Definition ein Diffeomorphismus. Aus dem Rangtheorem folgt die Behauptung. $\square_{1.2.8}$

Wenn f ein Homöomorphismus ist, ist diese Aussage immer noch richtig, aber für den Beweis braucht man algebraische Topologie. (vergleiche [DOLD])

1.2.9 Definition (Untermannigfaltigkeit)

Sei M^n eine Mannigfaltigkeit. Eine Teilmenge $N \subseteq M$ heißt *k-dimensionale Untermannigfaltigkeit*, falls es um jeden Punkt $p \in N$ eine differenzierbare Karte

$$x : U \rightarrow U' \subseteq \mathbb{R}^n = \mathbb{R}^k \times \mathbb{R}^{n-k}$$

von M gibt, sodass gilt:

$$x(U \cap N) = U' \cap (\mathbb{R}^k \times \{0\}^{n-k})$$

TODO: Abb7 einfügen

1.3 Die Partition der Eins

Sei M eine glatte n -dimensionale Mannigfaltigkeit. Die Abbildung $f : M \rightarrow \mathbb{R}$ sei glatt, also $f \circ x^{-1} : x(U) \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ ist glatt für jede Karte $(x, U) \in \mathcal{A}$.

Ziel ist es, das Integral $\int_M f d\mu_M$ zu definieren.

Ein Zwischenschritt wird sein:

$$\int_{x(U)} (f \circ x^{-1}) d^n x = \int dx_1 \int dx_2 \dots \int dx_n (f \circ x^{-1})(x_1, \dots, x_n)$$

Es wäre wünschenswert, dass für den Träger von f , also die abgeschlossene Menge

$$\text{supp}(f) = \overline{\{x \in M \mid f(x) \neq 0\}}$$

schon $\text{supp}(f) \subseteq U$ gilt, das heißt es gilt $f \equiv 0$ außerhalb des Trägers.

TODO: Abb8 einfügen

Wir wollen glatte Funktionen

$$\varphi_\nu : M \rightarrow \mathbb{R}$$

mit $\text{supp}(\varphi_\nu) \subseteq U_\nu$ und $\sum_\nu \varphi_\nu(x) = 1$ für alle $x \in M$ wählen.

Für eine Funktion $f : M \rightarrow \mathbb{R}$ betrachten wir $(\varphi_\nu \cdot f)$, integrieren dies und bilden am Ende die Summe:

$$\sum_\nu \int_M (\varphi_\nu f) d\mu_m$$

1.3.1 Definition (Zerlegung der Eins)

Sei X ein topologischer Raum und $\mathfrak{U} = (U_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ eine offene Überdeckung von X .

Eine der Überdeckung \mathfrak{U} untergeordnete *Zerlegung der Eins* ist eine Familie $(\varphi_\nu)_{\nu \in L}$ von Funktionen $\varphi_\nu : X \rightarrow [0,1] \subseteq \mathbb{R}$ mit den folgenden Eigenschaften:

- i) Jeder Punkt $p \in X$ besitzt eine Umgebung V , sodass $\varphi_\nu|_V = 0$ außer für endliche viele $\nu \in L$. (Die Zerlegung ist *lokal endlich*.)
- ii) $\sum_{\nu \in L} \varphi_\nu = 1$; Beachte, dass diese Summe wegen i) endlich ist.
- iii) Jeder Träger $\text{supp}(\varphi_\nu)$ liegt in einer der U_λ .

Sind die φ_ν stetig (beziehungsweise glatt) so heißt die Partition der Eins stetig (beziehungsweise glatt).

Ist L abzählbar, so heißt die Partition der Eins abzählbar.

1.3.2 Definition (kompakte Ausschöpfung, parakompakt)

Eine *kompakte Ausschöpfung* von M ist eine Folge kompakter Mengen $(K_i)_{i \in \mathbb{N}}$, sodass $K_i \subseteq K_{i+1}$ und

$$\bigcup_{i=0}^{\infty} K_i = M$$

Gibt es eine kompakte Ausschöpfung eines topologischen Raumes (M, \mathcal{O}) , so heißt M *parakompakt*.

Beispiel

Sei $M = \mathbb{R}^n$ und $K_i := \overline{B_i(0)}$. Dann ist $(K_i)_{i \in \mathbb{N}}$ eine kompakte Ausschöpfung.

1.3.3 Satz (Mannigfaltigkeit ist parakompakt)

Jede Mannigfaltigkeit besitzt eine kompakte Ausschöpfung $(K_n)_{n \in \mathbb{N}}$.

Beweis

Um jeden Punkt p gibt es eine Karte (x, U) . Durch Komposition mit einer Verschiebung kann man erreichen, dass $x(p) = 0$ ist.

TODO: Abb1 einfügen

Wähle $\varepsilon \in \mathbb{R}_{>0}$ so, dass $B_{2\varepsilon}(0) \subseteq x(U)$ ist und $\Omega_p := x^{-1}(B_\varepsilon(0))$.

$B_\varepsilon(0)$ ist relativ kompakt, das heißt $\overline{B_\varepsilon(0)}$ ist in \mathbb{R}^n kompakt.

Also ist Ω_p relativ kompakt in M .

Die $(\Omega_p)_{p \in M}$ sind alle relativ kompakt und bilden eine offene Überdeckung von M . Da (M, \mathcal{O}) separabel ist, gibt es eine abzählbare Basis $(U_n)_{n \in \mathbb{N}}$ der offenen Mengen, das heißt jedes offene $\Omega \subseteq M$ kann dargestellt werden als:

$$\Omega = \bigcup_{\substack{n \in \mathbb{N} \\ U_n \subseteq \Omega}} U_n$$

Wähle jetzt diejenigen U_n aus, die in einer der Mengen Ω_p enthalten sind. Dann gilt:

a) Jedes U_n ist in einem der Ω_p enthalten.

$$\text{b) } \Omega_p = \bigcup_{\substack{n \in \mathbb{N} \\ U_n \subseteq \Omega_p}} U_n$$

Die U_n sind dann relativ kompakt, da $U_n \subseteq \Omega_{p(0)}$ und $\Omega_{p(0)}$ relativ kompakt ist, und bilden eine offene Überdeckung, denn es gilt:

$$p \in \Omega_p \subseteq \bigcup_{n \in \mathbb{N}} U_n$$

Setze nun $K_0 := \overline{U_0}$, $K_1 := \overline{U_0 \cap U_1}$, allgemein:

$$K_n := \overline{\bigcap_{k=0}^n U_k}$$

Die K_n bilden eine kompakte Ausschöpfung von M .

□_{1.3.3}

1.3.4 Satz (Existenz eines abzählbaren Atlanten)

Sei $U = (U_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ eine offene Überdeckung einer Mannigfaltigkeit M^n .

Dann gibt es einen abzählbaren Atlas $\mathcal{A} := (x_k, V_k)_{k \in \mathbb{N}}$, sodass gilt:

- i) $x_k(V_k) = B_\varepsilon(0) \subseteq \mathbb{R}^n$ für ein $\varepsilon \in \mathbb{R}_{>0}$.
- ii) Die Mengen V_k sind lokal endlich, das heißt für alle $p \in M$ gibt es eine offene Umgebung W , sodass $W \cap V_k = \emptyset$ außer für endlich viele k gilt, und jedes V_k liegt in einer der Mengen U_{λ_0} .
- iii) Die Mengen $W_k := x_k^{-1}(B_1(0))$ bilden eine offene Überdeckung von M .

TODO: Abb2

Beweis

Zunächst gilt:

Behauptung Für jedes $p \in M$ gibt es eine Karte (x_p, V_p) mit $x_p(V_p) = B_\varepsilon(0)$ und $V_p \subseteq U_{\lambda_0}$ für ein $\lambda_0 \in \Lambda$.

Beweis p liegt in einem U_{λ_0} , da die $(U_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ eine Überdeckung von M bilden. Da U_{λ_0} offen ist, ist $\Omega := U_{\lambda_0} \cap V$ eine offene Umgebung von p mit $\Omega \subseteq U_{\lambda_0}$. $(x|_\Omega, \Omega)$ ist eine Karte um p mit $\Omega \subseteq U_{\lambda_0}$ und $x(\Omega) \subseteq \mathbb{R}^n$ ist offen. Durch Verschiebung und zentrische Streckung kann man erreichen, dass $x(\Omega) = B_\varepsilon(0)$ und $x(0) = 0$.

TODO: Abb3

$V_p := x^{-1}(B_\varepsilon(0)) \subseteq \Omega \subseteq M$ ist offen und $(x_p := x|_{V_p}, V_p)$ ist dann die gewünschte Karte.

□ Behauptung

Für jedes $p \in M$ ist die Menge $U(p) := x_p^{-1}(B_1(0)) \subseteq M$ ist offen. Betrachte eine kompakte Ausschöpfung $(K_n)_{n \in \mathbb{N}}$ von M . Die Menge $\mathcal{U}_1 := \{U(p) \mid p \in K_1\}$ ist eine offene Überdeckung von K_1 . Da K_1 kompakt ist, gibt es eine endliche Teilüberdeckung $U(p_1), \dots, U(p_{k_1})$.

Nun bildet $\mathcal{U}_2 := \{U(p) \mid p \in K_2 \setminus K_1^\circ\}$ eine offene Überdeckung der kompakten Menge $K_2 \setminus K_1^\circ$ und wir können eine endliche Teilüberdeckung $U(p_{k_1+1}), \dots, U(p_{k_2})$.

Dies kann man induktiv fortführen, indem man eine endliche Teilüberdeckung von $\mathcal{U}_n := \{U(p) \setminus K_{n-2} \mid p \in K_n \setminus K_{n-1}^\circ\}$ wählt.

Man erhält dann eine *abzählbare* Familie U_{p_i} , die jedes K_n überdecken und lokal endlich ist, da für ein $m \in K_n$ höchstens die endlich vielen U_{p_i} , die in einem \mathcal{U}_l für $l \leq n+1$ enthalten sind, m enthalten können.

Da die $(K_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Ausschöpfung von M bilden, sind die U_{p_i} dann auch eine Überdeckung von M . Die zugehörigen Karten $(x|_{U_{p_i}}, U_{p_i})$ bilden dann den gewünschten Atlas. □_{1.3.4}

1.3.5 Theorem (Existenz einer glatten Partition der Eins)

Auf einer C^∞ -Mannigfaltigkeit gibt es zu jeder offenen Überdeckung eine glatte Partition der Eins, die der Überdeckung untergeordnet ist.

Beweis

Sei $\mathfrak{U} = (U_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ gegeben. Wähle nun einen abzählbaren Atlas \mathcal{A} wie in Satz 1.3.4.

Wähle zu jeder Karte $(x_n, V_n) \in \mathcal{A}$ ein $\gamma \in C^\infty(\mathbb{R}^n, \mathbb{R})$ mit $\text{supp}(\gamma) \subseteq B_3(0)$, zum Beispiel:

$$\gamma(y) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{1}{4-\|y\|^2}\right) & \text{falls } \|y\| < 2 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

TODO: Abb4-Plot von γ einfügen

Dann ist die Abbildung

$$\varphi_n = \gamma \circ x_n : V_n \rightarrow \mathbb{R}$$

eine C^∞ -Abbildung.

TODO: Abb5 einfügen

Die φ_n sind nach Konstruktion lokal endlich und, da die $x_n^{-1}(B_1(0))$ eine Überdeckung bilden, ist $\sum_n \varphi_n(p) > 0$ für alle $p \in M$. Nun definieren wir:

$$\psi_n(p) := \frac{\varphi_n(p)}{\sum_n \varphi_n(p)}$$

Dann sind die ψ_n die gesuchte Partition der Eins.

□_{1.3.5}

2 Mehrfachintegrale, die Transformationsformel

Betrachte zunächst nur stetige Funktionen mit kompakten Träger, also $f \in C_0^0(\mathbb{R}^n, \mathbb{R})$.

Später betrachten wir vektorwertige Funktionen komponentenweise und Funktionen $h \in C_0^0(M^n, \mathbb{R})$ durch die Verwendung einer Karte.

Für eine Funktion $g \in C^0(\mathbb{R}^n)$ wählen wir eine Partition der Eins, also $\eta_k \in C_0^\infty(\mathbb{R}^n, \mathbb{R})$ und $\sum_k \eta_k = 1$. Dann definieren wir das Integral:

$$\int g d^n x := \sum_k \int \underbrace{g \cdot \eta_k}_{\in C_0^0(\mathbb{R}^n)} d^n x$$

2.1 Definition (Mehrfachintegral)

Für eine Funktion $f \in C_0^0(\mathbb{R}^n, \mathbb{R})$ setzen wir das Integral:

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}^n} f(x) d^n x &:= \int_{-\infty}^{\infty} dx_1 \int_{-\infty}^{\infty} dx_2 \dots \int_{-\infty}^{\infty} dx_n f(x_1, \dots, x_n) = \\ &:= \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_{-\infty}^{\infty} f(x_1, \dots, x_n) dx_n \right) dx_{n-1} \dots dx_1 \end{aligned}$$

2.2 Lemma

Sei $f \in C_0^0(\mathbb{R}^n, \mathbb{R})$. Dann ist für jedes $k \in \{0, \dots, n\}$ das iterierte eindimensionale Riemann-Integral

$$g(x_1, \dots, x_{n-k}) := \underbrace{\int_{-\infty}^{\infty} dx_{n-k+1} \dots \int_{-\infty}^{\infty} dx_n f(x_1, \dots, x_n)}_{k \text{ Integrale}} \quad (2.1)$$

wohldefiniert und stetig in den Variablen x_1, \dots, x_{n-k} .

Im Spezialfall $k = 1$ ist dadurch garantiert, dass die Integrale in Definition 2.1 wohldefiniert und endlich sind.

Erinnerung

Da $\text{supp}(f) \subseteq \mathbb{R}^n$ kompakt ist, ist $\text{supp}(f)$ beschränkt, also gibt es ein $L \in \mathbb{R}_{>0}$ mit:

$$\text{supp}(f) \subseteq [-L, L]^n$$

Wegen $f \in C_0^0(\mathbb{R})$ ist f schon Riemann-integrierbar und es gilt:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx := \int_{-L}^L f(x) dx$$

TODO: Abb6 einfügen

Außerdem ist f gleichmäßig stetig, das heißt es gibt zu jedem $\delta \in \mathbb{R}_{>0}$ ein $\varepsilon \in \mathbb{R}_{>0}$, sodass für alle $x, y \in \mathbb{R}$ mit $\|x - y\| < \delta$ schon

$$|f(x) - f(y)| < \varepsilon$$

gilt. Wichtig dabei ist, dass δ unabhängig von x und y gewählt werden kann.

Beweis

Führe eine Induktion über k durch:

Induktionsanfang bei $k = 0$: $g = f$ ist nach Voraussetzung stetig.

Induktionsschritt $k \rightsquigarrow k + 1$:

$$g(x_1, \dots, x_{n-(k+1)}) := \int_{-\infty}^{\infty} dx_{n-k} g(x_1, \dots, x_{n-(k+1)}, x_{n-k})$$

$g(x_1, \dots, x_{n-k})$ ist nach Induktionsvoraussetzung wohldefiniert und stetig.

Außerdem ist klar, dass $g(x_1, \dots, x_{n-(k+1)}, x_{n-k}) = 0$ ist für $|x_{n-k}| > L$, $\text{supp}(f) \subseteq [-L, L]^n$ ist. Damit ist das Integral in (2.1) wohldefiniert als Riemann-Integral über eine stetige Funktion mit kompaktem Träger. Man kann nun abschätzen:

$$\begin{aligned} & |g(x_1, \dots, x_{n-k-1}) - g(y_1, \dots, y_{n-k-1})| = \\ & = \left| \int_{-\infty}^{\infty} dx_{n-k} \dots \int_{-\infty}^{\infty} dx_n (f(x_1, \dots, x_n) - f(y_1, \dots, y_{n-k-1}, x_{n-k}, \dots, x_n)) \right| \leq \\ & \leq \int_{-L}^L dx_{n-k} \dots \int_{-L}^L dx_n |f(x_1, \dots, x_n) - f(y_1, \dots, y_{n-k-1}, x_{n-k}, \dots, x_n)| \leq \\ & \leq (2L)^{k+1} \sup |f(x_1, \dots, x_n) - f(y_1, \dots, y_{n-k-1}, x_{n-k}, \dots, x_n)| \end{aligned}$$

f ist gleichmäßig stetig, das heißt für alle $\varepsilon \in \mathbb{R}_{>0}$ gibt es ein $\delta \in \mathbb{R}_{>0}$ so, dass gilt:

$$\|x - y\| < \delta \quad \Rightarrow \quad |f(x) - f(y)| < \varepsilon$$

Also gilt

$$|g(x_1, \dots, x_{n-k-1}) - g(y_1, \dots, y_{n-k-1})| \leq (2L)^{k+1} \cdot \varepsilon$$

falls gilt:

$$\|(x_1, \dots, x_n) - (y_1, \dots, y_{n-k-1}, x_{n-k}, \dots, x_n)\| = \|(x_1 - y_1, \dots, x_{n-k} - y_{n-k}, 0, \dots, 0)\| < \delta$$

Also ist $g(x_1, \dots, x_{n-k-1})$ tatsächlich stetig. □_{2.2}

Fragen

- Kann man die Integrationsreihenfolge vertauschen?

$$\int dx \int dy f(x,y) \stackrel{?}{=} \int dy \int dx f(x,y)$$

- Sei $A \in \text{SO}(n)$ eine Drehmatrix und sei $f \in C_0^0(\mathbb{R}^n)$.

$$\int_{\mathbb{R}^n} f(x) d^n x \stackrel{?}{=} \int_{\mathbb{R}^n} f(Ax) d^n x$$

Allgemeine Frage: Wie verhält sich das Integral unter Diffeomorphismen?

Seien $U \subseteq \mathbb{R}^n$, $\phi : U \rightarrow V$ ein Diffeomorphismus und $V \subseteq \mathbb{R}^n$ offen.

Für ein $f \in C_0^0(V, \mathbb{R})$, setze f durch \tilde{f} auf \mathbb{R}^n fort, mit $\tilde{f}|_{\mathbb{R}^n \setminus V} = 0$.

$$\int_{\mathbb{R}^n} \tilde{f} d^n x =: \int_V f(x) d^n x \stackrel{?}{=} \int_U (f \circ \phi)(y) d^n y$$

2.3 Beispiel (eindimensionale Variablentransformation)

Seien $U, V \subseteq \mathbb{R}$ offene Intervalle und $\phi : U \rightarrow V$ ein Diffeomorphismus.

ϕ ist insbesondere bijektiv, das heißt, dass ϕ entweder monoton steigend oder monoton fallend. Außerdem sind ϕ und ϕ^{-1} stetig differenzierbar. Also ist insbesondere $\phi' \neq 0$ auf U . Bezeichne $U = (a, b)$ und $V = \phi(U) = (\alpha, \beta)$. Sei $f \in C_0^0(V, \mathbb{R})$ so setze f mit $f|_{\mathbb{R} \setminus V} = 0$ stetig auf \mathbb{R} fort. Also gilt:

$$\int_{\mathbb{R}} f(x) dx = \int_{\alpha}^{\beta} f(x) dx$$

Führe eine Variablentransformation $x = \phi(y)$, $y = \phi^{-1}(x)$ mit $dx = \phi'(y) dy$ durch:

$$\begin{aligned} \int_{\alpha}^{\beta} f(x) dx &= \int_{\phi^{-1}(\alpha)}^{\phi^{-1}(\beta)} (f \circ \phi)(y) \phi'(y) dy = \begin{cases} \int_a^b (f \circ \phi)(y) \phi'(y) dy & \text{falls } \phi' > 0 \\ \int_b^a (f \circ \phi)(y) \phi'(y) dy & \text{falls } \phi' < 0 \end{cases} \\ &= \int_a^b (f \circ \phi)(y) |\phi'(y)| dy = \int_{-\infty}^{\infty} (f \circ \phi)(y) |\phi'(y)| dy \end{aligned}$$

2.4 Lemma (Vertauschen der Integrationsvariablen)

Für $\varphi \in C_0^0(\mathbb{R}^2)$ gilt:

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy \varphi(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} dy \int_{-\infty}^{\infty} dx \varphi(x,y)$$

Beweis

Wähle L so, dass $\text{supp}(\varphi) \subseteq [-L, L]^2$ ist.

TODO: Abb2 einfügen

Zerlege $[-L, L]^2$ in kleine quadratförmige Zellen Z der Kantenlänge δ . Da φ gleichmäßig stetig ist, gibt es zu jedem $\varepsilon \in \mathbb{R}_{>0}$ ein $\delta \in \mathbb{R}_{>0}$, sodass für alle Zellen Z gilt:

$$\max_Z \varphi - \min_Z \varphi < \varepsilon$$

Wähle eine Treppenfunktion T , also eine Funktion, die auf jeder Zelle konstant ist, so dass für alle x gilt:

$$|\phi(x) - T(x)| < \varepsilon$$

Wähle zum Beispiel für jede Zelle einen Punkt $z \in Z$ und setze $T|_Z = f(z)$. Sei $y \in [-L, L]$, so gilt für alle $x \in [-L, L]$:

$$\int \underbrace{|\varphi(x, y) - T(x, y)|}_{\leq \varepsilon} dx \leq 2L \cdot \varepsilon$$

Also folgt

$$\left| \int dy \int dx \varphi(x, y) - \int dy \int dx T(x, y) \right| \leq \int \left(\int |\varphi(x, y) - T(x, y)| dx \right) dy \leq (2L)^2 \cdot \varepsilon$$

und:

$$\int dy \int dx T(x, y) = \delta^2 \cdot \sum_Z T|_Z$$

Vertausche nun x und y und erhalte die entsprechenden Beziehungen, womit folgt:

$$\begin{aligned} \left| \int dy \int dx \varphi(x, y) - \int dx \int dy \varphi(x, y) \right| &\leq \left| \int dy \int dx \varphi(x, y) - \delta^2 \sum_Z T|_Z \right| \\ &\quad + \left| \delta^2 \sum_Z T|_Z - \int dx \int dy \varphi(x, y) \right| \leq \\ &\leq 2 \cdot (2L)^2 \cdot \varepsilon \end{aligned}$$

Da ε beliebig ist, folgt die Behauptung. $\square_{2.4}$

2.5 Lemma

Sei $\phi : U \rightarrow V$ ein Diffeomorphismus.

Zu jedem $p \in V$ gibt es eine offene Umgebung $W \subseteq V$ von p , sodass für alle $g \in C_0^0(W)$ gilt:

$$\int_W g(y) d^n y = \int_{\phi^{-1}(W)} (g \circ \phi)(x) |\det(D\phi|_x)| d^n x$$

TODO: Abb1 einfügen

Beweis

TODO: Abb1-4.5.12 einfügen

Sei $\phi : U \rightarrow V$ ein Diffeomorphismus und $q \in U$ mit $\phi(q) = p$.

Da ϕ ein Diffeomorphismus ist, ist $D\phi|_q : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ invertierbar, also gilt ohne Einschränkung, da man die Variablen vertauschen kann:

$$\partial_1 \phi^k(q) \neq 0$$

Durch Vertauschen der Komponenten, also die Vertauschung der Zeilen, kann man erreichen, dass gilt:

$$\partial_1 \phi^1(q) \neq 0$$

Setze $\varphi := \phi^1$ und betrachte die Abbildung:

$$\begin{aligned} \psi : U &\rightarrow \mathbb{R}^n \\ (x^1, \dots, x^n) &\mapsto (\varphi(x^1, \dots, x^n), x^2, \dots, x^n) \\ D\psi|_q &= \begin{pmatrix} \partial_1 \varphi(q) & \partial_2 \varphi(q) & \dots & \partial_n \varphi(q) \\ 0 & 1 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & 0 & & 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Wegen $\det(D\psi|_q) = \partial_1 \varphi(q) \neq 0$ ist ψ also lokal invertierbar und somit ein lokaler Diffeomorphismus. Daher gibt es eine Umgebung $\Omega \subseteq U$ von q , sodass

$$\psi|_{\Omega} : \Omega \rightarrow \psi(\Omega) \stackrel{\text{offen}}{\subseteq} \mathbb{R}^n$$

ein Diffeomorphismus ist. Da $\psi|_{\Omega}$ invertierbar ist, können wir $\phi|_{\Omega}$ schreiben in der Form

$$\phi|_{\Omega} = A \circ \psi|_{\Omega}$$

wobei

$$A := \phi \circ \psi|_{\Omega}^{-1} : \psi(\Omega) \rightarrow \phi(\Omega) =: W \subseteq V$$

ein Diffeomorphismus ist. Es gilt für $x = (x^1, \dots, x^n) \in \Omega$:

$$\begin{aligned} A(\varphi(x^1, \dots, x^n), x^2, \dots, x^n) &= A(\psi(x)) = (\phi \circ \psi^{-1} \circ \psi)(x) = \\ &= \phi(x) = (\phi^1(x), \dots, \phi^n(x)) = (\varphi(x), \phi^2(x), \dots, \phi^n(x)) \end{aligned}$$

Also gilt für alle $y \in \psi(\Omega)$:

$$A(y^1, \dots, y^n) = (y^1, A^2(y), \dots, A^n(y))$$

Gehe jetzt induktiv in n vor:

Den Induktionsanfang bei $n = 1$ haben wir die Behauptung schon in Beispiel 2.3 behandelt.

Induktionsschritt $n - 1 \rightsquigarrow n$: Sei das Lemma schon für die Dimension $n - 1$ bewiesen.

Setze g mit $g|_{\mathbb{R}^n \setminus W} = 0$ stetig auf \mathbb{R}^n fort. Dann gilt:

$$\begin{aligned}
 \int_W g d^n x &= \int_{\mathbb{R}^n} g d^n x = \int_{-\infty}^{\infty} dx_1 \left(\int_{-\infty}^{\infty} dx_2 \dots \int_{-\infty}^{\infty} dx_n g(x_1, \dots, x_n) \right) = \\
 &\stackrel{A \text{ lässt}}{=} \int_{-\infty}^{\infty} dx_1 \left(\int_{-\infty}^{\infty} dx_2 \dots \int_{-\infty}^{\infty} dx_n (g \circ A)(x) |\det(DA)| \right) = \\
 &\stackrel{1. \text{ Komp. fest}}{=} \int_{-\infty}^{\infty} dx_2 \left(\int_{-\infty}^{\infty} dx_1 \dots \int_{-\infty}^{\infty} dx_n (g \circ A)(x) |\det(DA|_x)| \right) = \\
 &\stackrel{2.4}{=} \int_{-\infty}^{\infty} dx_2 \left(\int_{-\infty}^{\infty} dx_1 \dots \int_{-\infty}^{\infty} dx_n (g \circ A \circ \psi)(x) |\det(DA|_{\psi(x)})| \cdot |\det(D\psi|_x)| \right) = \\
 &\stackrel{\psi \text{ lässt}}{=} \int_{-\infty}^{\infty} dx_2 \left(\int_{-\infty}^{\infty} dx_1 \dots \int_{-\infty}^{\infty} dx_n (g \circ A \circ \psi)(x) |\det(DA|_{\psi(x)})| \cdot |\det(D\psi|_x)| \right) = \\
 &\stackrel{2. \text{ Komp. fest}}{=} \int_{\mathbb{R}^n} d^n x (g \circ A \circ \psi)(x) \cdot |\det(DA|_{\psi(x)}) \cdot D\psi|_x| = \\
 &\stackrel{\det(A) \det(B) = \det(AB)}{=} \int_{\mathbb{R}^n} d^n x (g \circ A \circ \psi)(x) \cdot |\det(D(A \circ \psi)|_x)| = \\
 &\stackrel{\text{Kettenregel}}{=} \int_{\mathbb{R}^n} d^n x (g \circ \phi)(x) \cdot |\det(D\phi|_x)| = \\
 &= \int_{\mathbb{R}^n} (g \circ \phi)(x) \cdot |\det(D\phi|_x)| d^n x = \int_{\phi^{-1}(W)} (g \circ \phi)(x) \cdot |\det(D\phi|_x)| d^n x
 \end{aligned}$$

□_{2.5}

Bemerkung

Anschaulich lässt sich dies mit den Spaltenvektoren u_k von

$$D\phi|_x = (u_1, \dots, u_n)$$

erklären. Denn $|\det(D\phi|_x)|$ ist das Volumen der von u_k generierten Zelle.

Zum Beispiel gilt in zwei Dimensionen:

TODO: Abb2-4.5.12 einfügen

$|\det(D\phi|_x)|$ ist die Fläche des Parallelogramms.

2.6 Theorem (Transformationsformel)

Seien $f \in C_0^0(\mathbb{R}^n)$ mit $\text{supp}(\phi) \subseteq V \stackrel{\text{offen}}{\subseteq} \mathbb{R}^n$ und $\phi : U \stackrel{\text{offen}}{\subseteq} \mathbb{R}^n \rightarrow V$ ein Diffeomorphismus, so gilt:

$$\int_V f(x) d^n x = \int_U (f \circ \phi)(y) |\det(D\phi|_y)| d^n y$$

Beweis

Wähle für jedes $p \in V$ eine Umgebung $W(p)$ wie in Lemma (2.5).

Wegen $\text{supp}(f)$ ist $f \in C_0^0(V)$ und da der Träger $\text{supp} f$ kompakt ist, können wir ihn durch endlich viele solche offenen Mengen W_1, \dots, W_N mit $N \in \mathbb{N}_{\geq 1}$ überdecken.

Wähle nun eine glatte, dieser Überdeckung untergeordnete Zerlegung der Eins $(\eta_l)_{l \in L}$.

Nach Definition ist eine Zerlegung der Eins lokal endlich, das heißt jeder Punkt $s \in \text{supp}(f)$ besitzt eine offene Umgebung U_p , so dass $\eta_l|_{U_p} = 0$ für fast alle Indizes $l \in L$ ist.

Wir bezeichnen die Indizes l , für die $\eta_l|_{U_p} = 0$ gilt, mit $l_{p,1}, \dots, l_{p,n(p)}$ für ein $n(p) \in N$. Nun bilden die Mengen $(U_p)_{p \in \text{supp}(f)}$ eine offene Überdeckung von $\text{supp}(f)$, weil jedes $p \in \text{supp}(f)$ in U_p enthalten ist.

Da $\text{supp}(f)$ kompakt ist, gibt es somit eine endliche Teilüberdeckung U_{p_1}, \dots, U_{p_M} mit $M \in \mathbb{N}$ und gewissen Punkten $p_i \in \text{supp}(f)$. Da auf jeder dieser endlich vielen Mengen nur endlich viele Funktionen η_l nicht identisch verschwinden, gilt dies auch für ganz $\text{supp}(f)$. Genauer sind nur die Funktionen $\eta_{p_i,j}$ mit $j \leq n(p_i)$ und $i \leq M$ nicht identisch null.

Also besteht diese Zerlegung der Eins besteht aus endlich vielen nicht-trivialen Funktionen $\eta_1, \dots, \eta_K \in C_0^\infty(V)$.

Daher gilt für alle $x \in \text{supp}(f)$:

$$\sum_{k=1}^K \eta_k(x) = 1$$

Da die Zerlegung der Überdeckung $(W_n)_{n \in \{1, \dots, N\}}$ untergeordnet ist, also

$$\text{supp}(\eta_k(y) f(y)) \subseteq W_{l(k)}$$

gilt, folgt:

$$\begin{aligned} \int_V f(y) \, dy &= \int_V \sum_{k=1}^K \eta_k(y) f(y) \, d^n y = \sum_{k=1}^K \int_V \eta_k(y) f(y) \, d^n y = \\ &= \sum_{k=1}^K \int_{W_{l(k)}} \eta_k(y) f(y) \, d^n y = \\ &\stackrel{\text{Lemma 2.5}}{=} \sum_{k=1}^K \int_{\mathbb{R}^n} (\eta_k \circ \phi)(x) \cdot (f \circ \phi)(x) |\det D\phi| \, d^n x = \\ &= \int_{\mathbb{R}^n} \underbrace{\left(\sum_{k=1}^K \eta_k(\phi(x)) \right)}_{=1} \cdot (f \circ \phi)(x) |\det D\phi| \, d^n x = \int_{\mathbb{R}^n} (f \circ \phi)(x) |\det D\phi| \, d^n x \end{aligned}$$

□_{2.6}

2.7 Korollar

Das iterierte Riemann-Integral $\int_{\mathbb{R}^n} f(x) \, d^n x$ ist invariant unter

- der Vertauschung von Koordinaten.
- Drehungen und Spiegelungen.
- Translationen.

Beweis

Zum Beispiel für Vertauschung von x_1 und x_2 wähle:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & & & 0 \\ 1 & 0 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & \ddots & \\ 0 & & & & 1 \end{pmatrix}$$

$$\phi(x) = Ax$$

Dann gilt:

$$\det A = -1$$

Spiegelungen ($A_{11} = -1$) und Drehungen ($A \in \mathrm{SO}_n$) sind analog.

Translationen: $\phi(x) = x + u$ mit $u \in \mathbb{R}^n$:

$$D\phi|_x = E_n \qquad \det D\phi|_x = 1$$

□_{2.7}

3 Einige Konstruktionen und Begriffe der Differentialtopologie

Sei M^n eine differenzierbare Mannigfaltigkeit, also ist M ein separabler Hausdorff-Raum mit einer differenzierbaren Struktur, das heißt einem maximalen Atlas $\mathcal{A} = \{(X, U)\}$ mit stetigen (beziehungsweise glatten) Kartenwechselabbildungen.

Ein wichtiger Begriff ist der *Tangentialraum*.

Betrachte als Beispiel eine Untermannigfaltigkeit:

Sei $F : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^{m-n}$ glatt und $0 \in \mathbb{R}^{m-n}$ ein regulärer Wert von F , das heißt $DF|_p$ habe Rang $m - n$ für alle $p \in F^{-1}(0)$.

Dann ist $M := F^{-1}(0)$ eine n -dimensionale Untermannigfaltigkeit $M^n \subseteq \mathbb{R}^m$.

TODO: Abb3 einfügen

$T_p M$ ist der Tangentialraum, also die sich tangential an M^n in p „anschmiegende“ Ebene.

$$T_p M := \ker \left(DF|_p \right) + p \quad \text{affiner Unterraum}$$

Oft betrachtet man auch $T_p M := \ker DF|_p \subseteq \mathbb{R}^m$ als Unterraum.

3.1 Der Tangentialraum

Sei M^n eine n -dimensionale differenzierbare Mannigfaltigkeit und $p \in M$.

3.1.1 Definition (Kurve)

Sei (x, U) eine Karte um p .

Eine C^1 -Abbildung $\alpha : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow M$ für ein $\varepsilon \in \mathbb{R}_{>0}$ mit $\alpha(0) = p$ heißt auch C^1 -Kurve durch p .

Das heißt für jede Karte (x, U) um p ist

$$x \circ \alpha : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow x(U) \subseteq \mathbb{R}^n$$

eine C^1 -Abbildung.

TODO: Abb4 einfügen

Falls $\alpha((-\varepsilon, \varepsilon))$ nicht in U enthalten ist, verkleinern wir ε .

3.1.2 Bemerkung und Definition (Einsteinsche Summenkonvention, Äquivalente Kurven)

$v := \frac{d}{dt} (x \circ \alpha) \big|_{t=0} \in \mathbb{R}^n$ ist der *Tangentialvektor* in Koordinaten in unserer Karte (x, U) .

Betrachte eine andere Karte (y, V) um p .

$$w := \frac{d}{dt} (y \circ \alpha) \big|_{t=0} \stackrel{\text{evtl. } \varepsilon}{\underset{\text{verkleinern}}{=}} \frac{d}{dt} \left(\underbrace{(y \circ x^{-1})}_{\text{Kartenwechselabbildung}} \circ (x \circ \alpha) \right) \bigg|_{t=0}$$

Wende nun die Kettenregel an:

$$w = D(y \circ x^{-1}) \big|_{x(p)} \cdot \frac{d}{dt} (x \circ \alpha) \big|_{t=0} = D(y \circ x^{-1}) \big|_{x(p)} \cdot v$$

Die Tangentialvektoren transformieren sich also mit der Jacobi-Matrix $D(y \circ x^{-1}) \big|_{x(p)}$ der Kartenwechselabbildung, für die wir schreiben:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial y^1}{\partial x^1} & \cdots & \frac{\partial y^1}{\partial x^n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial y^n}{\partial x^1} & \cdots & \frac{\partial y^n}{\partial x^n} \end{pmatrix}$$

Die Komponenten lauten also:

$$w^j = \sum_{i=1}^n \frac{\partial y^j}{\partial x^i} v^i =: \frac{\partial y^j}{\partial x^i} v^i$$

Verwende dabei die *Einsteinsche Summenkonvention*:

Summiere stets über doppelt auftretende Indizes.

Genauer: Summiere über doppelt auftretende Indizes, wobei ein Index oben und ein Index unten steht.

Es ist nämlich nicht sinnvoll über Komponenten zu summieren, bei denen beide Indizes oben beziehungsweise unten stehen, da diese dann nicht unabhängig von der Wahl der Karte ist.

Betrachte nun zwei Kurven α, β durch p .

TODO: Abb5 einfügen

$$\begin{aligned} v &= \frac{d}{dt} (x \circ \alpha) \big|_{t=0} & \tilde{v} &= \frac{d}{dt} (x \circ \beta) \big|_{t=0} \\ w &= \frac{d}{dt} (y \circ \alpha) \big|_{t=0} & \tilde{w} &= \frac{d}{dt} (y \circ \beta) \big|_{t=0} \end{aligned}$$

Nehme an, dass $v = \tilde{v}$ ist. Dann folgt:

$$\begin{aligned} w &= D(y \circ x^{-1}) \big|_{x(p)} v \\ \tilde{w} &= D(y \circ x^{-1}) \big|_{x(p)} \tilde{v} \end{aligned}$$

Also gilt:

$$(w - \tilde{w}) = D(y \circ x^{-1})|_{x(p)} \underbrace{(v - \tilde{v})}_{=0} = 0$$

$$w = \tilde{w}$$

Damit können wir folgende Äquivalenzrelation auf den C^1 -Kurven durch p einführen:

$$\alpha \sim_p \beta \quad :\Leftrightarrow \quad \exists_{\text{Karte } (x,U)} : \frac{d}{dt}(x \circ \alpha)|_{t=0} = \frac{d}{dt}(x \circ \beta)|_{t=0}$$

Beachte: Diese Definition von \sim_p ist unabhängig von der Wahl der Karte. Außerdem ist \sim_p eine Äquivalenzrelation.

3.1.3 Definition (Tangentialraum)

Der *Tangentialraum* $T_p M$ ist die Menge aller Äquivalenzklassen von C^1 -Kurven durch p bezüglich der Relation \sim_p .

3.1.4 Satz

$T_p M$ ist ein n -dimensionaler Vektorraum.

Beweis

Seien (x,U) eine Karte um p mit $x(p) = 0$ und α eine Kurve durch p . Dann ist $\tilde{\alpha} := x \circ \alpha$ eine C^1 -Kurve durch $x(p)$.

TODO: Abb6 einfügen

Sei umgekehrt $\tilde{\beta}$ eine C^1 -Kurve durch $x(p)$ in \mathbb{R}^n , dann ist $\beta := x^{-1} \circ \tilde{\beta}$ eine C^1 -Kurve durch p in M .

Damit können wir den C^1 -Kurven durch p eindeutig Kurven im \mathbb{R}^n zuordnen.

Für Kurven $\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}$ durch 0 im \mathbb{R}^n können wir Linearkombinationen wie gewohnt bilden.

$$(\lambda \tilde{\alpha} + \tilde{\beta})(t) := \lambda \tilde{\alpha}(t) + \tilde{\beta}(t) \in \mathbb{R}^n$$

Da $x(p) = 0$ ist, ist dann

$$x^{-1}(\lambda \tilde{\alpha} + \tilde{\beta}) = x^{-1}(\lambda \alpha \circ x + \beta \circ x)$$

eine Kurve durch p .

□_{3.1.4}

3.1.5 Bemerkung

Beachte, dass man den Definitionsbereich der Kurven möglicherweise verkleinern, zum Beispiel:

$$\begin{aligned} \tilde{\alpha} &: (-\varepsilon_1, \varepsilon_1) \rightarrow \mathbb{R}^n \\ \tilde{\beta} &: (-\varepsilon_2, \varepsilon_2) \rightarrow \mathbb{R}^n \\ \lambda \tilde{\alpha} + \tilde{\beta} &: (-\delta, \delta) \rightarrow \mathbb{R}^n \\ \delta &\leq \min(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \end{aligned}$$

Wähle außerdem den Definitionsbereich so klein, dass das Bild stets in $x(U)$ liegt.

$$\begin{aligned} v &= \frac{d}{dt} (x \circ \alpha) \big|_{t=0} \\ \tilde{v} &= \frac{d}{dt} (y \circ \alpha) \big|_{t=0} = \frac{d}{dt} ((x \circ y^{-1}) \circ (y \circ \alpha)) \big|_{t=0} = \\ &= D(y \circ x^{-1}) \big|_{x(p)} \cdot v \end{aligned}$$

In Komponenten ist das mit der Einsteinschen Summenkonvention:

$$\tilde{v}^i = \frac{\partial y^i}{\partial x^j} v^j$$

3.1.6 Definition (Richtungsableitung, ko- und kontravariante Vektoren)

Sei $v \in T_p M$ mit Repräsentant α , also $v = [\alpha]$. α ist eine Kurve durch p .

Sei $f \in C^\infty(M, \mathbb{R})$.

$$f \circ \alpha : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow \mathbb{R}$$

Dann ist die *Richtungsableitung von f in Richtung v* definiert als:

$$\frac{d}{dt} (f \circ \alpha) \big|_{t=0}$$

Rechne dies in Koordinaten, also einer Karte (x, U) , aus:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (f \circ \alpha) \big|_{t=0} &= \frac{d}{dt} ((f \circ x^{-1}) \circ (x \circ \alpha)) \big|_{t=0} = \\ &= D(f \circ x^{-1}) \big|_{x(p)} \cdot \frac{d}{dt} (x \circ \alpha) \big|_{t=0} = \\ &= D(f \circ x^{-1}) \cdot v = \frac{\partial f}{\partial x^j} \cdot v^j \end{aligned}$$

In einer Karte (y, V) gilt:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (f \circ \alpha) \big|_{t=0} &= \frac{d}{dt} ((f \circ y^{-1}) \circ (y \circ \alpha)) \big|_{t=0} = \\ &= D(f \circ y^{-1}) \big|_{y(p)} \cdot \frac{d}{dt} (y \circ \alpha) \big|_{t=0} = \\ &= D(f \circ y^{-1}) \cdot \tilde{v} = \frac{\partial f}{\partial y^j} \cdot \tilde{v}^j \end{aligned}$$

Da $\frac{d}{dt} (f \circ \alpha) \big|_{t=0}$ unabhängig von der Wahl der Karte ist, folgt:

$$\frac{\partial f}{\partial x^i} v^i = \frac{\partial f}{\partial y^i} \tilde{v}^i$$

Die beiden Faktoren $\frac{\partial f}{\partial x^i}$ und v^i müssen sich auf eine verträgliche Weise transformieren.

$$\begin{aligned} \tilde{v}^k &= v^j \frac{\partial y^k}{\partial x^j} && \text{kontravariante Transformation} \\ \left(\frac{\partial f}{\partial y^i} \right)_{i=1, \dots, n} &= D(f \circ y^{-1}) = D(f \circ x^{-1} \circ (x \circ y^{-1})) = D(f \circ x^{-1}) \cdot D(x \circ y^{-1}) \\ \frac{\partial f}{\partial y^i} &= \frac{\partial f}{\partial x^j} \cdot \frac{\partial x^j}{\partial y^i} && \text{kovariante Transformation} \end{aligned}$$

Bei kontravarianten Größen steht der Index oben, bei kovarianten Transformationen unten. Es treten also genau die Inversen Jacobi-Matrizen auf.

$$\begin{aligned} \text{id} &= (y \circ x^{-1}) \circ (x \circ y^{-1}) \\ \Rightarrow E_n &= D(y \circ x^{-1}) \Big|_{x(p)} \cdot D(x \circ y^{-1}) \Big|_{y(p)} \end{aligned}$$

Oder in Komponenten:

$$\delta_l^i = \sum_{k=1}^n \frac{\partial y^i}{\partial x^k} \cdot \frac{\partial x^k}{\partial y^l}$$

Damit folgt:

$$\frac{\partial f}{\partial y^i} \tilde{v}^i = \left(\frac{\partial f}{\partial x^j} \cdot \frac{\partial x^j}{\partial y^i} \right) \left(\frac{\partial y^i}{\partial x^l} v^l \right) = \frac{\partial f}{\partial x^j} \underbrace{\left(\frac{\partial x^j}{\partial y^i} \cdot \frac{\partial y^i}{\partial x^l} \right)}_{=\delta_l^j} v^l = \frac{\partial f}{\partial x^j} \cdot v^j$$

3.1.7 Konstruktion (Tangentialraum über Derivationen, Funktionskeime)

Konstruiere nun den *Tangentialraum über Derivationen*:

Sei $\Omega \subseteq M$ eine offene Umgebung von p , so betrachte die glatten reellwertigen Funktionen $C^\infty(\Omega) := C^\infty(\Omega, \mathbb{R})$ auf Ω .

Einem $[\alpha] \in T_p M$ können wir die Richtungsableitung

$$f \in C^\infty(\Omega) \mapsto \frac{d}{dt} (f \circ \alpha) \Big|_{t=0}$$

zuordnen.

TODO: Abb1 einfügen

Betrachte die Menge:

$$F_p^0 = \{f \in C^\infty(\Omega) \mid f \equiv 0 \text{ in einer Umgebung von } p\} \subseteq C^\infty(\Omega)$$

$C^\infty(\Omega)$ ist eine Algebra:

- Vektorraum über punktweise Addition und Skalarmultiplikation.
- Die Multiplikation ist ebenfalls punktweise, also als $(f \cdot g)(q) = f(q) \cdot g(q)$ definiert

F_p^0 ist ein *Ideal* in $C^\infty(\Omega)$, das heißt für $f \in C^\infty(\Omega)$ und $q \in F_p^0$ folgt $f \cdot q \in F_p^0$.

Man kann die Äquivalenzrelation einführen:

$$f_1 \sim f_2 \quad :\Leftrightarrow \quad f_1 - f_2 \in F_p^0$$

Der Quotientenvektorraum

$$F_p^\infty(\Omega) := C^\infty(\Omega) / F_p^0$$

ist die *Algebra der Funktionskeime*.

Identifiziere im Folgenden einen Repräsentanten $f \in C^\infty(U)$ mit $[f] \in F_p^\infty$.

3.1.8 Satz

Sei $U \subseteq M$ eine offene Umgebung von p . Dann gilt:

$$F_p^\infty(U) = F_p^\infty(M)$$

Beweis

Wähle eine Karte (x, V) mit einer Umgebung $V \subseteq U$ von p .

Wähle $\eta \in C^\infty(V)$ mit $\eta = 1$ in einer Umgebung von p mit $\text{supp}(\eta) \subseteq V$:

TODO: Abb2 einfügen

Sei $\eta_\varepsilon : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ eine C^∞ -Funktion mit $\text{supp}(\eta_\varepsilon) \subseteq (-\varepsilon, \varepsilon)$.

Betrachte die Funktion $\phi : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ mit $\phi(x_1, \dots, x_n) = \eta_\varepsilon(x_1) \cdots \eta_\varepsilon(x_n)$.

Wähle ε so klein, dass $\text{supp}(\phi) \subseteq x(V)$ ist. Setze:

$$\eta := \phi \circ x : M \rightarrow \mathbb{R}$$

Sei $f \in C^\infty(M)$. Dann ist $f \cdot \eta \in C^\infty(U)$ und $f \sim \eta f$, da $\eta \equiv 1$ in einer kleinen Umgebung von p , das heißt:

$$[f] = [\eta f]$$

Also repräsentieren f und ηf das gleiche Element in F_p^∞ .

□_{3.1.8}

3.1.9 Definition (Tangentialvektor, Derivation)

i) Ein *Tangentialvektor* v ist eine Abbildung

$$v : F_p^\infty(M) \rightarrow \mathbb{R}$$

mit den folgenden Eigenschaften:

- a) v ist linear, also $v(\lambda f + g) = \lambda v(f) + v(g)$.
- b) v ist eine *Derivation*, das heißt es gilt die Leibniz-Regel:

$$v(f \cdot g) = v(f) \cdot g(p) + f(p) \cdot v(g)$$

ii) Die Menge aller Tangentialvektoren in p ist ein Vektorraum, der Tangentialraum $T_p M$.

Beachte: Die Vektorraumstruktur ist offensichtlich:

$$(\lambda v + w)(f) := \lambda \cdot v(f) + w(f)$$

Sei $\alpha : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow M$ eine Kurve durch p . Definiere $v \in T_p M$:

$$v : F_p^\infty(M) \rightarrow \mathbb{R}$$

$$[f] \mapsto \left. \frac{d}{dt} (f \circ \alpha) \right|_{t=0}$$

3.1.10 Definition (partielle Ableitung)

Sei (x, U) eine Karte um p . Wir definieren Tangentialvektoren $\frac{\partial}{\partial x^i} \Big|_p$ durch:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x^i} \Big|_p f &:= \partial_i (f \circ x^{-1}) (\xi^1, \dots, \xi^n) \Big|_{x(p)} = \\ &= \frac{d}{dt} (f \circ x^{-1}) (x(p) + te_i) \end{aligned}$$

Beachte die Notationsüberlastung: $x : U \rightarrow \mathbb{R}^n$ ist eine Abbildung und $(x^1, \dots, x^n) \in \mathbb{R}^n$ ist ein Vektor.

3.1.11 Satz (Basis des Tangentialraums)

Sei (x, U) eine Karte um p und $v \in T_p M$. Dann gilt:

$$\begin{aligned} v &= v^i \cdot \frac{\partial}{\partial x^i} \Big|_p \\ v^i &= v(x^i) \end{aligned}$$

Die Vektoren $\frac{\partial}{\partial x^i} \Big|_p$ sind linear unabhängig. Sie sind also eine Basis von $T_p M$.

Beweis

Lineare Unabhängigkeit:

Wähle ein festes $i \in \{1, \dots, n\}$. Dann ist

$$x^i : U \rightarrow \mathbb{R}$$

eine reellwertige Funktion und wir können die Derivation anwenden:

$$\frac{\partial}{\partial x^j} \Big|_p (x^i) = \partial_j (x^i \circ x^{-1}) (\xi^1, \dots, \xi^n) \Big|_{x(p)} = \partial_j \xi^i = \delta_j^i$$

Daher sind die $\frac{\partial}{\partial x^i}$ linear unabhängig, denn aus

$$a^j \frac{\partial}{\partial x^j} \Big|_p = 0$$

für $a^j \in \mathbb{R}$ folgt:

$$0 = a^j \frac{\partial}{\partial x^j} \Big|_p (x^i) = a^j \delta_j^i = a^i$$

Wie kann man v in der Form

$$v = v^i \frac{\partial}{\partial x^i} \Big|_p$$

darstellen?

$x^i : U \rightarrow \mathbb{R} \in C^\infty(U)$ repräsentiert ein Element aus F_p^∞ für jedes $i \in \{1, \dots, n\}$.

Sei $[f] \in F_p^\infty$. Ohne Einschränkung gilt $f(p) = 0$, denn für die Konstante Funktion 1 gilt:

$$\begin{aligned} v(1) &= v(1 \cdot 1) = 1 \cdot v(1) + v(1) \cdot 1 = 2 \cdot v(1) \\ \Rightarrow v(1) &= 0 \end{aligned}$$

Somit folgt für eine Konstante Funktion $c \in \mathbb{R}$:

$$v(c) = c \cdot v(1) = 0$$

Definiere nun:

$$g := f \circ x^{-1} : x(U) \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$$

$$v(f) = v((f \circ x^{-1}) \circ x) = v(g \circ x)$$

Nenne $x(p) =: \xi_0 \in \mathbb{R}^n$. Nun könnte man schreiben:

$$g(\xi) = g(\xi_0) + \partial_j g(\xi - \xi_0)^j + o(\xi - \xi_0)$$

Besser kann man

$$g(\xi) = g(\xi_0) + h_j(\xi) \cdot (\xi - \xi_0)^j$$

mit einer glatten Funktion $h_j(\xi) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ wählen, nämlich:

$$\begin{aligned} g(\xi) - g(\xi_0) &= \int_0^1 \frac{d}{ds} g(s \cdot (\xi - \xi_0) + \xi_0) ds = \int_0^1 \left. Dg \right|_{s \cdot (\xi - \xi_0) + \xi_0} ds \cdot (\xi - \xi_0) = \\ &= \underbrace{\int_0^1 \left. \partial_j g \right|_{s \cdot (\xi - \xi_0) + \xi_0} ds}_{=: h_j(\xi)} \cdot (\xi - \xi_0)^j = h_j(\xi) \cdot (\xi - \xi_0)^j \end{aligned}$$

Es gilt:

$$\begin{aligned} h_j(\xi_0) &= \int_0^1 \left. \partial_j g \right|_{s \cdot (\xi_0 - \xi_0) + \xi_0} ds = \left. \partial_j g \right|_{\xi_0} \int_0^1 ds = \\ &= \left. \partial_j g \right|_{\xi_0} = \left. \partial_j (f \circ x^{-1})(\xi^1, \dots, \xi^n) \right|_{x(p)} = \left. \frac{\partial}{\partial x^j} \right|_p f \end{aligned}$$

Dabei ist $x \in \mathbb{R}^n$ ein Vektor. Schreibe nun $g \circ x$ als $g(x)$ mit der Funktion $x : U \rightarrow \mathbb{R}^n$. Dann gilt:

$$\begin{aligned} v(f) &= v(g(x)) = v\left(g(x_0) + h_j(x) \cdot (x - x_0)^j\right) = \underbrace{v(g(x_0))}_{=0} + v\left(h_j(x) \cdot (x - x_0)^j\right) = \\ &= v(h_j(x)) \cdot (x - x_0)^j \Big|_p + \left(h_j \circ x\right) \Big|_p \cdot v\left((x - x_0)^j\right) = \\ &= v(h_j(x)) \cdot \left(\underbrace{x(p)}_{=x_0} - x_0\right)^j + \underbrace{h_j(x(p))}_{=\left.\frac{\partial}{\partial x^j}\right|_p f} \cdot v\left((x - x_0)^j\right) = \\ &= \left.\frac{\partial}{\partial x^j}\right|_p f \cdot \left(v(x^j) - \underbrace{v(x_0)}_{=0}\right) = v(x^j) \cdot \left.\frac{\partial}{\partial x^j}\right|_p f \end{aligned}$$

Also gilt:

$$v = v(x^j) \cdot \frac{\partial}{\partial x^j} \Big|_p$$

Daher sind die $\frac{\partial}{\partial x^j} \Big|_p$ ein Erzeugendensystem, also sind sie tatsächlich eine Basis. $\square_{3.1.11}$

Bemerkung

Der Zusammenhang mit der Definitionen des Tangentialraums ist folgendermaßen:

Sei $v = [\alpha]$, also ist die C^1 -Kurve α durch p ein Repräsentant. Dann ist

$$F_p^\infty \rightarrow \mathbb{R} \\ [f] \mapsto \frac{d}{dt} (f \circ \alpha) \Big|_{t=0}$$

eine Derivation, also ein $\tilde{v} \in T_p M$.

3.1.12 Satz

Zu jedem $v \in T_p M$ gibt es eine C^1 -Kurve $\alpha : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow M$ mit $\alpha(0) = p$, sodass

$$v(f) = \frac{d}{dt} (f \circ \alpha) \Big|_{t=0}$$

für alle $f \in F_p^\infty$ gilt.

Beweis

Seien (x, U) eine Karte mit $x(p) = 0$ und $f \in F_p^\infty$.

Nach Satz 3.1.11 ist $v = v(x^i) \frac{\partial}{\partial x^i} \Big|_p$. Setze $\xi^i := v(x^i)$ und fasse $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_n) \in \mathbb{R}^n$ auf:

$$\alpha : \mathbb{R} \rightarrow M \\ t \mapsto x^{-1}(t\xi)$$

Dies ist eine C^1 -Kurve durch p .

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (f \circ \alpha)(t) \Big|_{t=0} &= \frac{d}{dt} ((f \circ x^{-1}) \circ (x \circ \alpha))(t) \Big|_{t=0} = \frac{d}{dt} ((f \circ x^{-1})(t\xi)) \Big|_{t=0} = \\ &= \partial_j (f \circ x^{-1}) \Big|_{t=0} \cdot \xi^j = \xi^j \frac{\partial}{\partial x^j} \Big|_p f = v(f) \end{aligned}$$

$\square_{3.1.12}$

3.2 Abbildungen zwischen Mannigfaltigkeiten

Seien M^n und N^k differenzierbare Mannigfaltigkeiten der Dimensionen $n, k \in \mathbb{N}$.

Sei $f : \Omega \overset{\text{offen}}{\subseteq} M^n \rightarrow N^k$ gegeben.

- Stetigkeit ist definiert, da f die topologischen Räume M und N ineinander abbildet.
- Differenzierbarkeit wird wieder über Karten definiert:

3.2.1 Definition (differenzierbare Abbildung)

Sei $f : \Omega \stackrel{\text{offen}}{\subseteq} M^n \rightarrow N^k$. f heißt *differenzierbar von der Klasse C^m* , falls es für alle $p \in \Omega$ eine Karte (x, U) um p und eine Karte (y, V) um $f(p)$ gibt, sodass

$$y \circ f \circ x^{-1} : x(U \cap \Omega) \stackrel{\text{offen}}{\subseteq} \mathbb{R}^k \rightarrow y(V \cap f(\Omega)) \stackrel{\text{nicht notwendig}}{\subseteq} \mathbb{R}^k$$

offen

von der Klasse C^m ist.

3.2.2 Definition (Pushforward)

Sei $f : \Omega \stackrel{\text{offen}}{\subseteq} M^n \rightarrow N^k$ differenzierbar, das heißt von der Klasse C^1 . Für jedes $p \in \Omega$ definiert f eine lineare Abbildung

$$f_*|_p : T_p M \rightarrow T_{f(p)} N$$

die für $v \in T_p M$ und $\varphi \in F_{f(p)}^\infty N$ als

$$(f_*|_p v)(\varphi) := v(\varphi \circ f)$$

definiert ist. f_* heißt *Pushforward* oder auch einfach *Differential*. (In manchen Büchern wird dies mit df bezeichnet.)

TODO: Abb1 einfügen

Rechne diese Abbildung in lokalen Koordinaten aus:

Sei (x, U) eine Karte von M um p und (y, V) eine Karte von N um $f(p)$.

$$\begin{aligned} f_*|_p v &= (f_*|_p v)(y^i) \cdot \frac{\partial}{\partial y^i} \Big|_{f(p)} = v(y^i \circ f) \cdot \frac{\partial}{\partial y^i} \Big|_{f(p)} = \\ &= v(x^j) \cdot \left(\frac{\partial}{\partial x^j} \Big|_p (y^i \circ f) \right) \cdot \frac{\partial}{\partial y^i} \Big|_{f(p)} = \\ &= v^j \partial_j (y^i \circ f \circ x^{-1}) \frac{\partial}{\partial y^i} \Big|_{f(p)} = A_j^i v^j \cdot \frac{\partial}{\partial y^i} \Big|_{f(p)} \end{aligned}$$

Dabei wird über i und j summiert.

$$A_j^i = \partial_j (y^i \circ f \circ x^{-1})$$

A ist die Jacobi-Matrix von $y \circ f \circ x^{-1}$.

3.2.3 Lemma

i) Für $\text{id} : M \rightarrow M$ gilt $\text{id}_*|_p = \text{id}_{T_p M}$.

ii) Für die Folge $M \xrightarrow{f} N \xrightarrow{g} Q$ gilt:

$$(g \circ f)_*|_p = g_*|_{f(p)} \circ f_*|_p$$

Beweis

i) Für die Jacobi-Matrix gilt:

$$A_j^i = \partial_j (x^i \circ \text{id} \circ x^{-1}) = \delta_j^i$$

Also ist $\text{id}_*|_p = \text{id}_{T_p M}$.

ii) Seien $v \in T_p M$ und $\varphi \in F_{(g \circ f)(p)}^\infty Q$.

$$\begin{aligned} ((g \circ f)_* v)(\varphi) &= v(\varphi \circ g \circ f) = v \circ ((\varphi \circ g) \circ f) = (f_*|_p v)(\varphi \circ g) = \\ &= (g_*|_{f(p)} \cdot (f_*|_p v))(\varphi) = (g_*|_{f(p)} \circ f_*|_p) v \end{aligned}$$

□_{3.2.3}

3.2.4 Definition (Pullback)

Sei $f : \Omega \subseteq M \rightarrow N$. Die Abbildung

$$\begin{aligned} f^* : C^\infty(N) &\rightarrow C^\infty(M) \\ \varphi &\mapsto \varphi \circ f \end{aligned}$$

heißt *Pullback*. Durch Äquivalenzklassenbildung erhält man eine Abbildung

$$\begin{aligned} f^*|_p : F_p^\infty N &\rightarrow F_p^\infty M \\ [\varphi] &\mapsto [\varphi \circ f] \end{aligned}$$

Es gilt dann:

$$(f^*|_p v)(\varphi) = v(\varphi \circ f) = v(f^* \varphi)$$

Der Satz von der lokalen Umkehrbarkeit nimmt folgende Form an:

3.2.5 Theorem (lokale Umkehrbarkeit)

Seien $n \in \mathbb{N}_{\geq 1}$, M^n und N^n differenzierbare Mannigfaltigkeiten, $\Omega \subseteq M^n$ eine offene Teilmenge, $f \in C^s(\Omega, N^n)$ eine differenzierbare Abbildung der Klasse C^s mit $s \in \mathbb{N}_{\geq 1}$ und $\text{rg}(f_*(p)) = n$. Dann ist f ein lokaler Diffeomorphismus, das heißt es gibt eine offene Umgebung $U \subseteq \Omega$ von p und eine offene Umgebung V von $f(p)$, sodass

$$f|_U : U \rightarrow V$$

ein Diffeomorphismus ist.

Beweis

Wähle Karten (x, U) um p und (y, V) um $f(p)$. Dann hat auch

$$D(y \circ f \circ x^{-1})|_p$$

Rang n , da dies gerade in der Darstellung von f_* in lokalen Karten auftritt.

Also ist $y \circ f \circ x^{-1}$ ein lokaler Diffeomorphismus und somit ist auch $f = y^{-1} \circ (y \circ f \circ x^{-1}) \circ x$ ein lokaler Diffeomorphismus. □_{3.2.5}

3.2.6 Theorem (Rangtheorem)

Sei $f : \Omega \subseteq M^n \rightarrow N^k$ von der Klasse C^1 und der Pushforward f_* habe konstanten Rang $r \leq k, n$. Dann gibt es Karten (x, U) um p und (y, V) um $f(p)$, sodass gilt:

$$(y \circ f \circ x^{-1})(\xi^1, \dots, \xi^n) = (\xi^1, \dots, \xi^r, 0, \dots, 0)$$

Beweis

Wende das übliche Rangtheorem in lokalen Karten an.

□_{3.2.6}

3.2.7 Definition (Submersion, Immersion)

- i) Eine differenzierbare Abbildung $f : M^n \rightarrow N^k$ heißt *Submersion*, falls für alle $p \in M$ die Abbildung $f_*|_p$ surjektiv ist, also Höchstrang hat und $k \leq n$ gilt.
- ii) Eine differenzierbare Abbildung $f : M^n \rightarrow N^k$ heißt *Immersion*, falls $f_*|_p$ injektiv ist, also Höchstrang hat und $k \geq n$ ist.
- iii) Eine Immersion heißt *Einbettung*, falls f injektiv ist und $f : M \rightarrow f(M)$ ein Homöomorphismus ist, wobei $f(M)$ mit der Relativtopologie versehen ist. $f(M)$ heißt *Untermannigfaltigkeit*. f ist automatisch ein Diffeomorphismus.

3.2.8 Beispiel

Sei $f : M^n \rightarrow \mathbb{R}^k$ eine Einbettung. Dann hat

$$f_* : T_p M \rightarrow \mathbb{R}^k$$

konstanten Rang n .

TODO: Abb3 einfügen

Sei (x, U) ein Karte von M^n um einen Punkt $p \in M$.

$$f \circ x^{-1} : x(U) \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^k$$

ist dann eine lokale Parametrisierung von $f(M)$.

Also ist $f(M)$ auch eine Untermannigfaltigkeit von \mathbb{R}^k wie wir sie früher definiert haben.

TODO: Abb4 einfügen

3.3 Grundlagen der Tensoranalysis

Sei $v \in T_p M$. Zu einer Karte (x, U) um p gibt es eine zugehörige Basis $\frac{\partial}{\partial x^i} \Big|_p$ von $T_p M$. Für $f \in F_p^\infty$ gilt:

$$\frac{\partial}{\partial x^i} \Big|_p f := \partial_i (f \circ x^{-1}) \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} v &= v^i \frac{\partial}{\partial x^i} \Big|_p \\ v^i &= v(x^i) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Transformationsverhalten der Basis $\frac{\partial}{\partial x^i} \Big|_p$. Sei (y, V) eine weitere Karte. Verwende

$$v = v(y^j) \frac{\partial}{\partial y^j} \Big|_p$$

für $v = \frac{\partial}{\partial x^i} \Big|_p$.

$$\frac{\partial}{\partial x^i} \Big|_p = \frac{\partial}{\partial x^i} \Big|_p (y^j) \cdot \frac{\partial}{\partial y^j} \Big|_p = \partial_i (y^j \circ x^{-1}) \frac{\partial}{\partial y^j} \Big|_p = \frac{\partial y^j}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial y^j} \Big|_p$$

$$\boxed{\frac{\partial}{\partial x^i} \Big|_p = \frac{\partial y^j}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial y^j} \Big|_p}$$

$$v = v^i \frac{\partial}{\partial x^i} \Big|_p = v^i \frac{\partial y^j}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial y^j} \Big|_p = \tilde{v}^j \frac{\partial}{\partial y^j} \Big|_p$$

$$\tilde{v}^j = v^i \frac{\partial y^j}{\partial x^i}$$

Also transformiert sich v^i kontravariant.

3.3.1 Bemerkung und Definition (Kotangententialraum)

Definiere T_p^*M als den Dualraum von T_pM , den sogenannten *Kotangententialraum*.

$$E := T_pM \qquad E^* := T_p^*M$$

Sei (e_1, \dots, e_n) eine Basis von E . Betrachte die zugehörige duale Basis von E^* und lineare Funktionale $(\varphi^1, \dots, \varphi^n)$ mit $\varphi^i(e_j) = \delta_j^i$.

In der Karte (x, U) haben wir die folgenden Basen:

$$\begin{array}{ll} \frac{\partial}{\partial x^i} \Big|_p, \dots, \frac{\partial}{\partial x^n} \Big|_p & \text{Basis von } T_pM \\ dx^1|_p, \dots, dx^n|_p & \text{zugehörige duale Basis} \end{array}$$

Die duale Basis ist definiert über:

$$dx^j|_p \left(\frac{\partial}{\partial x^i} \Big|_p \right) = \delta_i^j$$

Untersuche das Transformationsverhalten der dx^i . Sei (y, V) eine andere Karte.

$$\begin{aligned} dx^i|_p &= a_k^i dy^k|_p \\ dx^i|_p \left(\frac{\partial}{\partial y^k} \Big|_p \right) &= \left(a_l^i dy^l|_p \right) \left(\frac{\partial}{\partial y^k} \Big|_p \right) = a_l^i \underbrace{\left(dy^l|_p \left(\frac{\partial}{\partial y^k} \Big|_p \right) \right)}_{=\delta_k^l} = a_l^i \delta_k^l = a_k^i \\ a_k^i &= dx^i|_p \left(\frac{\partial}{\partial y^k} \Big|_p \right) = dx^i|_p \left(\frac{\partial x^l}{\partial y^k} \frac{\partial}{\partial x^l} \Big|_p \right) = \frac{\partial x^l}{\partial y^k} dx^i|_p \underbrace{\left(\frac{\partial}{\partial x^l} \Big|_p \right)}_{=\delta_l^i} = \frac{\partial x^i}{\partial y^k} \end{aligned}$$

Also transformiert sich $dx^i|_p$ kontravariant:

$$dx^i|_p = \frac{\partial x^i}{\partial y^k} dy^k|_p$$

Sei $\varphi \in T_p^*M$ ein Kotangentialvektor. Betrachte die Basisdarstellung in der Karte (x, U) :

$$\varphi = \varphi_i dx^i|_p = \varphi_i \frac{\partial x^i}{\partial y^j} dy^j|_p = \tilde{\varphi}_j dy^j|_p$$

Also gilt:

$$\tilde{\varphi}_j = \frac{\partial x^i}{\partial y^j} \varphi_i$$

Dies ist kovariantes Transformationsverhalten.

Sei $\varphi \in T_p^*M$ und $v \in T_pM$:

$$\varphi(v) = \tilde{\varphi}_i \tilde{v}^i = \left(\varphi_k \frac{\partial x^k}{\partial y^i} \right) \left(\frac{\partial y^i}{\partial x^l} v^l \right) = \varphi_k \underbrace{\left(\frac{\partial x^k}{\partial y^i} \frac{\partial y^i}{\partial x^l} \right)}_{=\delta_l^k} v^l = \varphi_k v^k$$

3.3.2 Konstruktion (Tensorprodukt)

Seien k ein Körper und E, F zwei k -Vektorräume endlicher Dimension.

Betrachte die Konstruktion des Tensorprodukts $E \otimes F$:

- Bilde das kartesische Produkt $E \times F = \{(u, v) \mid u \in E, v \in F\}$.
- Bilde formale Linearkombinationen $\langle E \times F \rangle$, das heißt ein $\Phi \in \langle E \times F \rangle$ hat die Form

$$\Phi = \lambda_1 (u_1, v_1) + \lambda_2 (u_1, v_2) + \dots + \lambda_L (u_L, v_L)$$

mit $\lambda_i \in k$, $u_i \in E$ und $v_i \in F$ für $i \in \{1, \dots, L\}$.

- Führe eine Äquivalenzrelation \sim ein, so dass die folgenden Relationen gelten:

$$\begin{aligned} \lambda (u, v) &\sim (\lambda u, v) \sim (u, \lambda v) \\ ((u + v), w) &\sim (u, w) + (v, w) \\ (u, (v + w)) &\sim (u, v) + (u, w) \end{aligned}$$

Dann ist das *Tensorprodukt* definiert als:

$$E \otimes F = \langle E \times F \rangle / \sim$$

Eigenschaften des Tensorproduktes:

$$E^{r,s} := \underbrace{E \otimes \dots \otimes E}_r \otimes \underbrace{E^* \otimes \dots \otimes E^*}_s$$

1. Es gibt eine eindeutige multilineare Abbildung

$$\varphi : \underbrace{E \times \dots \times E}_r \times \underbrace{E^* \times \dots \times E^*}_s \rightarrow E^{r,s}$$

$$(u_1, \dots, v_r, a_1, \dots, a_s) \mapsto v_1 \otimes \dots \otimes v_r \otimes a_1 \otimes \dots \otimes a_s$$

Zum Beispiel gilt:

$$\varphi(2v_1, v_2, \dots, v_r, a_1, \dots, a_s) = 2\varphi(v_1, v_2, \dots, v_r, a_1, \dots, a_s) = \varphi(v_1, 2v_2, \dots, v_r, a_1, \dots, a_s)$$

2. *Universelle Eigenschaft:* Zu jeder bilinearen Abbildung $\Phi : E \times F \rightarrow \mathbb{R}$ gibt es eine eindeutige lineare Abbildung $\psi : E \otimes F \rightarrow \mathbb{R}$ so, dass das folgende Diagramm kommutiert:

$$\begin{array}{ccc} E \times F & \xrightarrow{\Phi} & \mathbb{R} \\ \varphi \downarrow & \nearrow \psi & \\ E \otimes F & & \end{array}$$

3. Ist (e_1, \dots, e_n) eine Basis von E und (f_1, \dots, f_m) eine Basis von F , so ist

$$(e_i \otimes f_j)_{\substack{i \in \{1, \dots, n\} \\ j \in \{1, \dots, m\}}}$$

eine Basis von $E \otimes F$, also ist $\dim E \otimes F = n \cdot m$.

$E^{r,s}$ hat die Basis

$$(e_{i_1} \otimes \dots \otimes e_{i_r} \otimes e^{j_1} \otimes \dots \otimes e^{j_s})_{\substack{i_k \in \{1, \dots, n\} \\ j_l \in \{1, \dots, n\}}}$$

und daher ist $\dim E^{r,s} = n^{r+s}$, wobei die Basis $(e^i)_{i \in \{1, \dots, n\}}$ von E^* die zu $(e_i)_{i \in \{1, \dots, n\}}$ duale Basis von E ist.

3.3.3 Beispiel

Betrachte $E = \mathbb{R}^2$ mit der kanonischen Basis (e_1, e_2) und ihrer dualen Basis (e^1, e^2) von $E^* \cong \mathbb{R}^2$. Diese Isomorphie ist allerdings nicht kanonisch.

- a) $E^{1,1}$ ist ein 4-dimensionaler Vektorraum mit der Basis $(e_1 \otimes e^1, e_2 \otimes e^1, e_1 \otimes e^2, e_2 \otimes e^2)$.

Ein $T \in E^{1,1}$ hat die Basisdarstellung:

$$T = t_j^i e_i \otimes e^j$$

T kann mit einer linearen Abbildung auf E identifiziert werden, denn für ein $v = v^i e_i \in E$ gilt:

$$(Tv)_i = t_j^i v^j$$

$$\begin{pmatrix} (Tv)^1 \\ (Tv)^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1^1 & t_2^1 \\ t_1^2 & t_2^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v^1 \\ v^2 \end{pmatrix}$$

Koordinatenfrei: Sei $u \in E$ und $\varphi \in E^*$, also:

$$u \otimes \varphi \in E^{1,1}$$

Dann ist

$$(u \otimes \varphi)(v) = u \cdot \varphi(v)$$

die zugehörige lineare Abbildung auf E .

Sei $T = t_j^i (e_i \otimes e^j)$, so ist:

$$Tv = t_j^i e_i e^j(v) = e_i t_j^i v^j$$

b) $E^{0,2} = E^* \otimes E^*$ hat die Basis $(e^i \otimes e^j)_{i,j \in \{1,2\}}$. Sei $T \in E^{(0,2)}$ mit $T = t_{ij} e^i \otimes e^j$.

Seien $v = v^i e_i, w = w^i e_i \in E$, dann ist:

$$t_{ij} v^i w^j \in \mathbb{R}$$

Koordinatenfrei:

$$(e^i \otimes e^j)(v, w) = e^i(v) \cdot e^j(w)$$

Setze linear fort:

$$T(v, w) = t_{ij} (e^i \otimes e^j)(v, w) = t_{ij} e^i(v) e^j(w) = t_{ij} v^i w^j$$

Also ist $T : E \times E \rightarrow \mathbb{R}$ bilinear, das heißt T eine Bilinearform.

c) $E^{1,2}$ hat Basis $(e_i \otimes e^j \otimes e^k)_{i,j,k \in \{1,2\}}$ und ist 8 dimensional. Ein $T = t_{ijk}^i e_i \otimes e^j \otimes e^k \in E^{1,2}$ kann interpretiert werden als bilineare Abbildung

$$\begin{aligned} T : E \times E &\rightarrow E \\ (T(u, v))^i &\mapsto t_{jk}^i v^j w^k \end{aligned}$$

d) Ein $T \in E^{n,m}$ kann also aufgefasst werden als eine multilineare Abbildung:

$$T : E^m \rightarrow E^n$$

3.3.4 Bemerkung und Definition (Tensor)

Betrachte speziell $E = T_p M$ und $E^* = T_p^* M$.

$$T_p^{r,s} M := T_p M \otimes \dots \otimes T_p M \otimes T_p^* M \otimes \dots \otimes T_p^* M$$

ist ein n^{r+s} -dimensionaler Vektorraum und ein $A \in T_p^{r,s} M$ heißt *Tensor* der Stufe (r, s) in $p \in M$.

Sei (x, U) eine Karte, die folgende Basen induziert:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial}{\partial x^i} \Big|_p \right)_{i \in \{1, \dots, n\}} & \quad \text{Basis von } T_p M \\ \left(dx^i \Big|_p \right)_{i \in \{1, \dots, n\}} & \quad \text{zugehörige duale Basis von } T_p^* M \end{aligned}$$

A hat dann die Basisdarstellung:

$$A = A_{j_1 \dots j_s}^{i_1 \dots i_r} \frac{\partial}{\partial x^{i_1}} \Big|_p \otimes \dots \otimes \frac{\partial}{\partial x^{i_r}} \Big|_p \otimes dx^{j_1} \Big|_p \otimes \dots \otimes dx^{j_s} \Big|_p$$

Untersuche nun das Transformationsverhalten: Sei (y, V) eine neue Karte.

$$\frac{\partial}{\partial x^i} \Big|_p = \frac{\partial y^k}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial y^k} \Big|_p$$

$$dx^j \Big|_p = \frac{\partial x^j}{\partial y^l} dy^l \Big|_p$$

Also gilt:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x^{i_1}} \Big|_p \otimes \dots \otimes \frac{\partial}{\partial x^{i_r}} \Big|_p \otimes dx^{j_1} \Big|_p \otimes \dots \otimes dx^{j_s} \Big|_p = \\ &= \left(\frac{\partial y^{k_1}}{\partial x^{i_1}} \frac{\partial}{\partial y^{k_1}} \Big|_p \right) \otimes \dots \otimes \left(\frac{\partial y^{k_r}}{\partial x^{i_r}} \frac{\partial}{\partial y^{k_r}} \Big|_p \right) \otimes \left(\frac{\partial x^{j_1}}{\partial y^{l_1}} dy^{l_1} \Big|_p \right) \otimes \dots \otimes \left(\frac{\partial x^{j_s}}{\partial y^{l_s}} dy^{l_s} \Big|_p \right) = \\ &= \frac{\partial y^{k_1}}{\partial x^{i_1}} \cdot \dots \cdot \frac{\partial y^{k_r}}{\partial x^{i_r}} \cdot \frac{\partial x^{j_1}}{\partial y^{l_1}} \cdot \dots \cdot \frac{\partial x^{j_s}}{\partial y^{l_s}} \frac{\partial}{\partial x^{k_1}} \Big|_p \otimes \dots \otimes \frac{\partial}{\partial x^{k_r}} \Big|_p \otimes dx^{l_1} \Big|_p \otimes \dots \otimes dx^{l_s} \Big|_p \end{aligned}$$

Somit ist

$$A = \tilde{A}_{l_1 \dots l_s}^{k_1 \dots k_r} \frac{\partial}{\partial x^{k_1}} \Big|_p \otimes \dots \otimes \frac{\partial}{\partial x^{k_r}} \Big|_p \otimes dx^{l_1} \Big|_p \otimes \dots \otimes dx^{l_s} \Big|_p$$

mit:

$$\tilde{A}_{l_1 \dots l_s}^{k_1 \dots k_r} = A_{j_1 \dots j_s}^{i_1 \dots i_r} \frac{\partial y^{k_1}}{\partial x^{i_1}} \Big|_p \cdot \dots \cdot \frac{\partial y^{k_r}}{\partial x^{i_r}} \Big|_p \cdot \frac{\partial x^{j_1}}{\partial y^{l_1}} \cdot \dots \cdot \frac{\partial x^{j_s}}{\partial y^{l_s}}$$

Nachdem wir uns das Transformationsverhalten klar gemacht haben, schreiben wir im Folgenden meist nur die Komponenten in einer beliebigen Karte auf:

$$t_{j_1 \dots j_s}^{i_1 \dots i_r} \quad \text{Tensor der Stufe } (r, s)$$

3.3.5 Definition (Operationen auf Tensoren)

1. Multiplikation von Tensoren: Die Abbildung

$$\begin{aligned} & T^{r_1, s_1} M \times T^{r_2, s_2} M \rightarrow T^{r_1+r_2, s_1+s_2} M \\ & \left(A_{j_1 \dots j_{s_1}}^{i_1 \dots i_{r_1}}, B_{l_1 \dots l_{s_2}}^{k_1 \dots k_{r_2}} \right) \mapsto A_{j_1 \dots j_{s_1}}^{i_1 \dots i_{r_1}} B_{l_1 \dots l_{s_2}}^{k_1 \dots k_{r_2}} \end{aligned}$$

induziert eine Abbildung:

$$T^{r_1, s_1} M \otimes T^{r_2, s_2} M \xrightarrow{\sim} T^{r_1+r_2, s_1+s_2} M$$

Koordinatenfrei heißt das:

$$\begin{aligned} T_p^{r_1, s_1} \otimes T_p^{r_2, s_2} &= \underbrace{T_p M \otimes \dots \otimes T_p M}_{r_1} \otimes \underbrace{T_p^* M \otimes \dots \otimes T_p^* M}_{s_1} \\ &\quad \otimes \underbrace{T_p M \otimes \dots \otimes T_p M}_{r_2} \otimes \underbrace{T_p^* M \otimes \dots \otimes T_p^* M}_{s_2} = \\ &= T_p^{r_1+r_2, s_1+s_2} M \end{aligned}$$

Bemerkung: Die *Tensoralgebra*

$$\tau := \bigoplus_{r,s=0}^{\infty} T^{r,s}$$

ist eine Algebra, das heißt ein Vektorraum mit zusätzlicher Multiplikation:

$$\begin{aligned} \otimes : \tau \times \tau &\rightarrow \tau \\ (A^{r_1, s_1}, A^{r_2, s_2}) &\mapsto A^{r_1, s_1} \otimes A^{r_2, s_2} \end{aligned}$$

2. *Verjüngung* oder *Kontraktion*:

$$\begin{aligned} T_p^{r,s} M &\rightarrow T_p^{r-1, s-1} \\ A_{j_1 \dots j_s}^{i_1 \dots i_r} &\mapsto A_{j_1 \dots j_{s-1}}^{i_1 \dots i_{r-1} k} \end{aligned}$$

Dabei wird über k gemäß der Einsteinschen Summenkonvention summiert: Über doppelt auftretende Indizes, von denen einer kontravariant und einer kovariant ist, wird stets summiert.

3.3.6 Beispiel

Für die linearen Abbildungen $\text{Hom}(E, E)$ auf E gilt (vergleiche Beispiel 3.3.3 a)):

$$E \otimes E^* \cong \text{Hom}(E, E)$$

Sei $A_j^i \frac{\partial}{\partial x^i} \otimes dx^j \in E \otimes E^*$, dann ist die Verjüngung

$$A_i^i = \text{Tr}(A)$$

gerade die Spur der linearen Abbildung.

3.3.7 Definition (Tensorfeld, Vektorfeld)

Nehme an, man habe für jedes $p \in \Omega \stackrel{\text{offen}}{\subseteq} M$ einen Tensor $A(p) \in T_p^{r,s}(M)$ gegeben, das heißt in Komponenten einer Karte (x, U) :

$$A(p) = A_{j_1 \dots j_s}^{i_1 \dots i_r}(p) \cdot \frac{\partial}{\partial x^{i_1}} \Big|_p \otimes \dots \otimes \frac{\partial}{\partial x^{i_r}} \Big|_p \otimes dx^{j_1} \Big|_p \otimes \dots \otimes dx^{j_s} \Big|_p$$

Sind alle Komponentenfunktionen glatt als reelle Funktionen in unserer Karte, das heißt die Abbildungen $A_{j_1 \dots j_s}^{i_1 \dots i_r}(x^{-1}(\xi)) : x(U) \rightarrow \mathbb{R}$ sind glatt, so heißt A *Tensorfeld*.

Ein Tensorfeld der Stufe $(1,0)$ heißt *Vektorfeld*.

3.3.8 Bemerkung und Beispiel

Betrachte zum Beispiel ein Vektorfeld $v : \Omega \rightarrow T_p M$:

$$v(p) \in T_p^{1,0} M = T_p M$$

$$q \in U$$

$$v(q) = v^i(q) \cdot \frac{\partial}{\partial x^i} \Big|_q \quad v^i(q) := v(q)(x^i)$$

$$v^i(x_1, \dots, x_n) := v^i(x^{-1}(\xi_1, \dots, \xi_n))$$

$$v^i : x(U) \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$$

$$(\xi_1, \dots, \xi_n) \mapsto (v^1(\xi_1, \dots, \xi_n), \dots, v^n(\xi_1, \dots, \xi_n))$$

Beachte: Ist M eine C^∞ -Mannigfaltigkeit, so ist die Definition des Tensorfelds unabhängig von der Wahl der Karte.

$$\frac{\partial}{\partial x^k} A_j^i =: B_{jk}^i$$

ist im Allgemeinen *kein* Tensor der Stufe (1,2).

Stattdessen verwendet man:

- Die *kovariante Ableitung* mit den *Christoffel-Symbolen* Γ_{kl}^i :

$$\nabla_k A_j^i = \partial_k A_j^i + \Gamma_{kl}^i A_j^l - \Gamma_{kj}^b A_b^i$$

- Die *äußere Ableitung*:

$$dA = (\partial_i A_j - \partial_j A_i) dx^i \otimes dx^j \in T_p^{(0,2)} M$$

Darauf kommen wir später bei Differentialformen zurück.

3.4 Das Tangentialbündel, Vektorbündel

Ziel: Mache die Menge der Tangentialräume zu einer Mannigfaltigkeit.

3.4.1 Definition (assoziierte Bündelkarte)

Sei $p \in M$ und (x, U) eine Karte um p .

Für jedes $q \in U$ ist dann $T_q M$ ein n -dimensionaler Vektorraum. Die abstrakte Vereinigung

$$\dot{\bigcup}_{q \in U} T_q M$$

ist disjunkt. Die Abbildung

$$\bar{x} : \bigcup_{q \in U} T_q M \rightarrow \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n$$

$$v \in T_q M \mapsto (x(q), (v(x^1), \dots, v(x^n)))$$

heißt *die x assoziierte Bündelkarte*.

3.4.2 Bemerkung

$v(x^i)$ sind die Komponenten der Basisdarstellung, denn für eine andere Karte (y, V) um p gilt:

$$v = v(x^i) \frac{\partial}{\partial x^i} \Big|_q = v(y^i) \frac{\partial}{\partial y^i} \Big|_q$$

Für die assoziierten Bündelkarten ergibt sich:

$$\begin{aligned} (\bar{x} \circ \bar{y}^{-1}) : \bar{y} \left(\bigcup_{q \in U \cap V} T_q M \right) &\rightarrow \bar{x} \left(\bigcup_{q \in U \cap V} T_q M \right) \\ (a, b) &\mapsto \left((x \circ y^{-1})(a), \left(\frac{\partial x^1}{\partial y^j} \Big|_a b^j, \dots, \frac{\partial x^n}{\partial y^j} \Big|_a b^j \right) \right) \\ b^i &= v(y^i) \end{aligned}$$

Die Komponenten von v transformieren sich kontravariant:

$$v(x^i) = v(y^j) \cdot \frac{\partial x^i}{\partial y^j} \Big|_q$$

$x \circ y^{-1}$ ist der Diffeomorphismus des Kartenwechsels. Die Abbildung

$$b \mapsto \left(\frac{\partial x^1}{\partial y^j} \Big|_a b^j, \dots, \frac{\partial x^n}{\partial y^j} \Big|_a b^j \right)$$

ist die lineare Transformation mit der Jacobi-Matrix der Kartenwechselabbildung.

Da die Jacobi-Matrix invertierbar ist, ist die Bündelkarten-Wechselabbildung ein Diffeomorphismus.

Betrachte:

$$TM := \bigcup_{p \in M} T_p M$$

Wähle auf TM die Topologie so, dass die Bündelkartenabbildungen Homöomorphismen werden. Dann ist TM ein topologischer Hausdorff-Raum.

Ist \mathcal{A} ein differenzierbarer Atlas von M , so bilden die assoziierten Bündelkarten einen differenzierbaren Atlas von TM .

3.4.3 Definition (Tangentialbündel, Faser, Schnitt des Bündels)

$TM = \bigcup_{q \in U} T_q M$ mit dem Atlas $\{(\bar{x}, TM)\}$ der assoziierten Bündelkarten heißt *das Tangentialbündel*.

Es ist eine $2n$ -dimensionale Mannigfaltigkeit mit zusätzlicher Struktur:

Die Projektion auf die Basis ist:

$$\begin{aligned} \pi : TM &\rightarrow M \\ \underbrace{v_p}_{\in T_p M} &\mapsto p \end{aligned}$$

TODO: Abb2 einfügen

Ein Tangentialraum $T_p M$ heißt *Faser* des Bündels.

Eine Abbildung $v : \Omega \subseteq M \rightarrow TM$ mit $\pi \circ v = \text{id}$ heißt *Vektorfeld*. Also liegt

$$v(p) \in \pi^{-1}(p) = T_p M$$

in der zugehörigen Faser.

Hat man eine allgemeinere Faser, so heißt $v : \Omega \subseteq M \rightarrow TM$ mit $\pi \circ v = \text{id}$ ein *Schnitt des Bündels*.

3.4.4 Definition (Vektorbündel)

Sei M^n eine differenzierbare Mannigfaltigkeit und V ein k -dimensionaler \mathbb{R} -Vektorraum. (Ein komplexer Vektorraum geht analog.)

N heißt *Vektorbündel über M mit Faser V* , falls gilt:

- i) N ist $(n+k)$ -dimensionale Mannigfaltigkeit.
- ii) Eine glatte Projektion $\pi : N \rightarrow M$ ist gegeben.
- iii) Zu einem Atlas $\{(x, U)\}$ von M ist ein zugehöriger Bündelatlas $\mathcal{A} = \{(\tilde{x}, \tilde{U})\}$ gegeben, sodass gilt:

$$\begin{aligned}\tilde{U} &= \pi^{-1}(U) \\ \tilde{x} : \tilde{U} &\rightarrow \mathbb{R}^n \times V \\ \tilde{p} &\mapsto (x(\pi(\tilde{p})), v)\end{aligned}$$

- iv) Die Bündelkartenwechselabbildungen haben die Form:

$$\begin{aligned}(\tilde{x} \circ \tilde{y}^{-1}) : (y, v) &\mapsto (x, w) \\ w &= A|_y v\end{aligned}$$

Dabei ist $A|_y : V \rightarrow V$ linear.

3.4.5 Beispiel (triviales Vektorbündel)

Sei M^n eine Mannigfaltigkeit und V ein Vektorraum, dann ist

$$N := M \times V$$

mit

$$\tilde{x}((p, v)) = (x(p), v)$$

das sogenannte *triviale Vektorbündel*. (Trivial bedeutet, dass N die Struktur eines kartesischen Produkts hat.)

- Beispiel: $M = S^1$ und $V = \mathbb{R}$.

$$N := M \times V = S^1 \times \mathbb{R}$$

TODO: Abb3 einfügen

– Beispiel: Das Möbiusband:

TODO: Abb4 einfügen

Betrachte $[0,1] \times \mathbb{R} \subseteq \mathbb{R}^2$ und identifiziere $(0,x)$ mit $(1, -x)$ in einer Äquivalenzrelation \sim . Dann ist

$$N : [0,1] \times \mathbb{R} / \sim$$

das Möbiusband. Dies ist ein nicht-triviales Bündel, aber lokal, also in einer Karte U ist $\tilde{U} = U \times \mathbb{R}$ ein triviales Bündel.

3.4.6 Bemerkung und Definition (Basis, Projektion, Faser)

Seien N eine $n+k$ -dimensionale differenzierbare Mannigfaltigkeit, M , die sogenannte *Basis* sei eine n -dimensionale differenzierbare Mannigfaltigkeit und $\pi : N \rightarrow M$ die sogenannte *Projektion auf die Basis*, die differenzierbar beziehungsweise glatt sei.

Für $p \in M$ ist die *Faser* $\pi^{-1}(p)$ (*in* p) als Vektorraum isomorph zu einem k -dimensionalen reellen Vektorraum V .

TODO: Abb1 einfügen

Damit dies Sinn macht, muss der Atlas auf N mit der Vektorraumstruktur der Faser verträglich sein, das heißt:

Zu jeder Karte (x,U) um $p \in M$ gibt es eine Karte (\bar{x},\bar{U}) von N mit $\bar{U} = \pi^{-1}(U)$.

$$\begin{aligned} \bar{x} : \bar{U} &\rightarrow \mathbb{R}^n \times V \\ q &\mapsto (x(\pi(q)), v(q)) \end{aligned}$$

Betrachte ein glattes Vektorfeld $u : M \rightarrow TM$ mit $\pi \circ u = \text{id}$.

$T^{r,s}M$ ist ein Vektorbündel mit Faser $T_p^{r,s}M$.

Ein Tensorfeld $w : M \rightarrow T^{r,s}M$ ist glatt mit $\pi \circ w = \text{id}$.

4 Riemannsche Mannigfaltigkeiten

4.1 Die Riemannsche Metrik

Zur Motivation:

Sei M eine $(N - 1)$ -dimensionale Untermannigfaltigkeit des \mathbb{R}^N , das heißt es gibt ein $F \in C^\infty(\mathbb{R}^N, \mathbb{R})$ mit regulärem Wert von 0 und $M := F^{-1}(0)$ eine $(N - 1)$ -dimensionale Untermannigfaltigkeit.

$$T_p M = \ker \left(DF|_p \right)$$

ist eine Hyperebene in \mathbb{R}^N . Man kann die Vektorraumstruktur und die Euklidische Struktur des \mathbb{R}^N ausnutzen, um

1. die Länge von Kurven zu berechnen:

Sei zum Beispiel $\alpha : [a, b] \rightarrow M \subseteq \mathbb{R}^N$ und $\dot{\alpha}(t) \in T_{\alpha(t)} M$ oder $\dot{\alpha}(t) \in \mathbb{R}^N$.

$$\begin{aligned} \|\dot{\alpha}(t)\| &= \sqrt{\langle \dot{\alpha}(t), \dot{\alpha}(t) \rangle} \\ L(\alpha) &= \int_a^b \|\dot{\alpha}(t)\| dt \end{aligned}$$

gibt die Länge der Kurve an.

2. den Schnittwinkel zwischen zwei Kurven durch p zu berechnen:

Seien α, β zwei Kurven durch p mit $\alpha(0) = \beta(0) = p$.

TODO: Abb3 einfügen

$$\cos \gamma = \frac{\langle \dot{\alpha}(0), \dot{\beta}(0) \rangle}{\|\dot{\alpha}(0)\| \|\dot{\beta}(0)\|}$$

bestimmt den Schnittwinkel.

3. den Flächeninhalt zu berechnen:

Es gibt eine explizite Formel zur Berechnung des Flächeninhalts.

Beachte: Man braucht hier nur die Einschränkung des Euklidischen Skalarproduktes auf den Tangentialraum, also:

$$\begin{aligned} \langle \cdot, \cdot \rangle_p : T_p M \times T_p M &\rightarrow \mathbb{R} \\ (u, v) &\mapsto \langle u, v \rangle_{\mathbb{R}^N} \end{aligned}$$

Fasse dabei $u, v \in T_p M$ als Vektoren im \mathbb{R}^N auf.

Verallgemeinere dies so, dass auf $\langle \cdot, \cdot \rangle_{\mathbb{R}^N}$ verzichtet wird.

4.1.1 Definition (Riemannsche Metrik)

Sei M^n eine differenzierbare Mannigfaltigkeit. Eine Bilinearform

$$\langle \cdot, \cdot \rangle_p : T_p M \times T_p M \rightarrow \mathbb{R}$$

heißt *Riemannsche Metrik in p* , falls sie

i) symmetrisch

$$\langle u, v \rangle_p = \langle v, u \rangle_p$$

ii) und positiv definit ist:

$$\langle u, u \rangle_p \geq 0 \qquad \langle u, u \rangle = 0 \iff u = 0$$

4.1.2 Beispiel (erste Fundamentalform)

Bei einer Untermannigfaltigkeit $M^n \subseteq \mathbb{R}^N$ kann man $T_p M$ mit einem n -dimensionalen Unterraum von \mathbb{R}^N identifizieren und setzen:

$$g := \langle \cdot, \cdot \rangle_p : T_p M \times T_p M \rightarrow \mathbb{R} \\ (u, v) \mapsto \langle u, v \rangle_{\mathbb{R}^N}$$

Dies ist die sogenannte *induzierte Metrik* oder *erste Fundamentalform*.

Mit Tensoren kann man dies für ein $p \in M$ folgendermaßen ausdrücken:

$$g \in T_p^{0,2} M = T_p^* M \otimes T_p^* M$$

ist ein Tensor der Stufe (0,2) und kann in einer Basis dargestellt werden als:

$$g = g_{ij} \cdot dx^i \otimes dx^j$$

g kann mit einer Bilinearform identifiziert werden:

$$g : T_p M \times T_p M \rightarrow \mathbb{R} \\ (u, v) \mapsto g_{ij} u^i v^j$$

Dabei ist $u = u^i \frac{\partial}{\partial x^i}$ und $v = v^j \frac{\partial}{\partial x^j}$.

Ohne Indizes kann man $\varphi \otimes \psi \in T_p^* M \otimes T_p^* M$ zu einer Bilinearform $T_p M \times T_p M \rightarrow \mathbb{R}$ machen:

$$(\varphi \otimes \psi)(u, v) := \varphi(u) \cdot \psi(v) \in \mathbb{R}$$

4.1.3 Definition (Riemannsche Metrik)

Ein Tensorfeld der Stufe (0,2) auf M heißt *Riemannsche Metrik auf M* , falls

i) g symmetrisch ist, also $g_{ij}(p) = g_{ji}(p)$ für alle $p \in M$.

ii) die zugehörige Bilinearform

$$\begin{aligned} T_p M \times T_p M &\rightarrow \mathbb{R} \\ (u, v) &\mapsto g_{ij} u^i v^j \end{aligned}$$

für alle $p \in M$ positiv definit ist.

$(g_{ij})_{i,j}$ heißt *der metrische Tensor*. In einer Karte (x, U) um p gilt:

$$g(x) = g_{ij}(x) dx^i|_p \otimes dx^j|_p$$

Beim Wechsel zu einer weiteren Karte (y, V) um p transformieren sich die Komponenten wie folgt:

$$\tilde{g}_{kl}(y) = g_{ij}(x) \frac{\partial x^i}{\partial y^k} \Big|_p \cdot \frac{\partial x^j}{\partial y^l} \Big|_p$$

4.1.4 Beispiel

i) Betrachte $\mathbb{R} \setminus \{0\}$ in Polarkoordinaten $y := (r, \varphi)$ aufgefasst als Karte. $x = \text{id}$ ist die kartesische Karte und die Transformation ist:

$$x^1 = r \cos \varphi \qquad x^2 = r \sin \varphi$$

Drücke die Euklidische Metrik des \mathbb{R}^2 in Polarkoordinaten aus.

TODO: Abb4 einfügen

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y^1} &= \frac{\partial}{\partial r} = \frac{\partial x^1}{\partial r} \frac{\partial}{\partial x^1} + \frac{\partial x^2}{\partial r} \frac{\partial}{\partial x^2} = \cos \varphi \frac{\partial}{\partial x^1} + \sin \varphi \frac{\partial}{\partial x^2} = \begin{pmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix}_x \\ \frac{\partial}{\partial y^2} &= \frac{\partial}{\partial \varphi} = \frac{\partial x^1}{\partial \varphi} \frac{\partial}{\partial x^1} + \frac{\partial x^2}{\partial \varphi} \frac{\partial}{\partial x^2} = -r \sin \varphi \frac{\partial}{\partial x^1} + r \cos \varphi \frac{\partial}{\partial x^2} = \begin{pmatrix} -r \sin \varphi \\ r \cos \varphi \end{pmatrix}_x \end{aligned}$$

Dabei sind

$$\frac{\partial}{\partial x^{1/2}} = e_{1/2}$$

die kanonischen Basisvektoren des \mathbb{R}^2 . Es folgt:

$$\begin{aligned} g_{11} &= g \left(\frac{\partial}{\partial y^1}, \frac{\partial}{\partial y^1} \right) = \left\langle \frac{\partial}{\partial y^1}, \frac{\partial}{\partial y^1} \right\rangle_{\mathbb{R}^2} = \left\langle \begin{pmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix} \right\rangle_{\mathbb{R}^2} = 1 \\ g_{21} &= g_{12} = g \left(\frac{\partial}{\partial y^1}, \frac{\partial}{\partial y^2} \right) = \left\langle \frac{\partial}{\partial y^1}, \frac{\partial}{\partial y^2} \right\rangle_{\mathbb{R}^2} = \left\langle \begin{pmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix}, r \begin{pmatrix} -\sin \varphi \\ \cos \varphi \end{pmatrix} \right\rangle_{\mathbb{R}^2} = 0 \\ g_{22} &= g \left(\frac{\partial}{\partial y^2}, \frac{\partial}{\partial y^2} \right) = \left\langle \frac{\partial}{\partial y^2}, \frac{\partial}{\partial y^2} \right\rangle_{\mathbb{R}^2} = \left\langle r \begin{pmatrix} -\sin \varphi \\ \cos \varphi \end{pmatrix}, r \begin{pmatrix} -\sin \varphi \\ \cos \varphi \end{pmatrix} \right\rangle_{\mathbb{R}^2} = r^2 \end{aligned}$$

ii) Betrachte Hyperbel-Koordinaten:

TODO: Abb5 einfügen

$$V = \{(x^1, x^2) \in \mathbb{R}^2 \mid x^2 > |x^1|\} \stackrel{\text{offen}}{\subseteq} \mathbb{R}^2$$

$$\begin{aligned} y^1 &= x^1 & y^2 &= \sqrt{(x^2)^2 - (x^1)^2} \\ x^1 &= y^1 & x^2 &= \sqrt{(y^1)^2 + (y^2)^2} \end{aligned}$$

$x = (x^1, x^2)$ sei das kartesische Koordinatensystem und $g_{ij}(x) = \delta_{ij}$ die euklidischen Metrik. Berechne den metrischen Tensor \tilde{g} in der Karte y . Verwende dazu das Transformationsverhalten des metrischen Tensors:

$$\begin{aligned} \tilde{g}_{kl}(y) &= g_{ij}(x) \cdot \frac{\partial x^i}{\partial y^k} \cdot \frac{\partial x^j}{\partial y^l} \\ \tilde{g}_{11}(y) &= \delta_{11} \frac{\partial x^1}{\partial y^1} \cdot \frac{\partial x^1}{\partial y^1} + \delta_{22} \frac{\partial x^2}{\partial y^1} \cdot \frac{\partial x^2}{\partial y^1} = \left(\frac{\partial x^1}{\partial y^1} \right)^2 + \left(\frac{\partial x^2}{\partial y^1} \right)^2 = \\ &= 1^2 + \left(\frac{2y^1}{2\sqrt{(y^1)^2 + (y^2)^2}} \right)^2 = 1 + \frac{(y^1)^2}{(y^1)^2 + (y^2)^2} \\ \tilde{g}_{12}(y) &= \tilde{g}_{21}(y) = \delta_{11} \frac{\partial x^1}{\partial y^1} \cdot \frac{\partial x^1}{\partial y^2} + \delta_{22} \frac{\partial x^2}{\partial y^1} \cdot \frac{\partial x^2}{\partial y^2} = \\ &= 1 \cdot 0 + \frac{y^1}{\sqrt{(y^1)^2 + (y^2)^2}} \cdot \frac{y^2}{\sqrt{(y^1)^2 + (y^2)^2}} = \frac{y^1 y^2}{(y^1)^2 + (y^2)^2} \\ \tilde{g}_{22}(y) &= \delta_{11} \frac{\partial x^1}{\partial y^2} \cdot \frac{\partial x^1}{\partial y^2} + \delta_{22} \frac{\partial x^2}{\partial y^2} \cdot \frac{\partial x^2}{\partial y^2} = \left(\frac{\partial x^1}{\partial y^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial x^2}{\partial y^2} \right)^2 = \\ &= 0^2 + \left(\frac{y^2}{\sqrt{(y^1)^2 + (y^2)^2}} \right)^2 = \frac{(y^2)^2}{(y^1)^2 + (y^2)^2} \end{aligned}$$

4.1.5 Tensorkalkül mit Metrischem Tensor

Sei $v \in T_p M$ und $g : T_p M \times T_p M \rightarrow \mathbb{R}$ die Riemannsche Metrik in p .

Sei $\varphi_v \in T_p^* M$ ist definiert durch $\varphi_v(w) := g(v, w) = \langle v, w \rangle_p$.

Man kann also $T_p M$ mit Hilfe der Metrik kanonisch mit $T_p^* M$ identifizieren. In Komponenten heißt das:

$$\begin{aligned} v &= v^i \frac{\partial}{\partial x^i} \\ \varphi_v(w) &= g_{ij} v^i \cdot w^j \end{aligned}$$

Also folgt:

$$\varphi_v = \varphi_i dx^i \qquad \varphi_i = g_{ij} v^j$$

Denn es gilt:

$$\varphi_v(w) = (\varphi_i dx^i) \left(w^j \frac{\partial}{\partial x^j} \right) = \varphi_i w^j \underbrace{dx^i \left(\frac{\partial}{\partial x^j} \right)}_{=\delta_j^i} = \varphi_i w^i$$

Dann gilt:

$$\varphi_i = g_{ij}v^j$$

Durch Überschieben mit der Metrik kann man aus einem kontravarianten Index einen kovarianten Index machen.

Mache umgekehrt aus einem kovariantem Index einen kontravarianten Index. Setze dann:

$$g^{ij} := (g^{-1})_{ij}$$

Also gilt $g^{ij}g_{jk} = \delta_k^i$ und $g^{jk} = g^{kj}$. Sei $\varphi \in T_p^*M$ mit $\varphi = \varphi_j dx^j$. Dann gibt es ein $v \in T_pM$ mit:

$$v = v^i \frac{\partial}{\partial x^i} \qquad v^i := g^{ij} \varphi_j$$

Allgemein ist für ein Tensorfeld $v_{j_1 \dots j_l}^{i_1 \dots i_r}$ der Stufe (r, s) nun

$$v_{kj_1 \dots j_l}^{i_2 \dots i_r} := g_{ki_1} v_{j_1 \dots j_l}^{i_1 \dots i_r}$$

ein Tensorfeld der Stufe $(r-1, s+1)$.

Durch Überschieben mit der Metrik kann man allgemein $T^{r,s}$ mit $T^{r+k, s-k}$ für ein $k \in \mathbb{Z}$ identifizieren.

Zweimaliges Überschieben liefert wieder den ursprünglichen Tensor:

$$\begin{aligned} v^i &\in T_p M \\ g_{ij} v^j &\in T_p^* M \\ g^{ki} (g_{ij} v^j) &= \underbrace{(g^{ki} g_{ij})}_{=\delta_j^k} v^j = v^k \end{aligned}$$

4.2 Der Minkowski-Raum, Lorentz-Mannigfaltigkeiten

4.2.1 Definition (Minkowski-Raum, nicht entartet)

Der Vektorraum \mathbb{R}^4 (oder ein abstrakter 4-dimensionaler reeller Vektorraum) mit der Bilinearform

$$\langle u, v \rangle = u^0 v^0 - \sum_{i=1}^3 u^i v^i$$

heißt *Minkowski-Raum*.

Bemerkung

Diese Bilinearform ist *nicht* positiv definit, denn zum Beispiel gilt:

$$\left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right\rangle = 1 \qquad \left\langle \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right\rangle = -1$$

Daher ist die Bilinearform kein Skalarprodukt. Aber sie ist *nicht entartet*, das heißt für alle $u \in \mathbb{R}^4$ gilt:

$$\forall_{v \in \mathbb{R}^4} \langle u, v \rangle = 0 \quad \Rightarrow \quad u = 0$$

Allgemein:

4.2.2 Definition (Signatur, Pseudo-Orthonormalbasis)

Eine nicht entartete Bilinearform auf einem endlich-dimensionalen Vektorraum V hat *Signatur* (p, q) , falls es eine Basis $(e_\alpha)_{\alpha=1, \dots, p+q}$ von V gibt, sodass gilt:

$$\langle e_\alpha, e_\beta \rangle = \begin{cases} 0 & \text{falls } \alpha \neq \beta \\ 1 & \text{falls } \alpha = \beta \in \{1, \dots, p\} \\ -1 & \text{falls } \alpha = \beta \in \{p+1, \dots, p+q\} \end{cases}$$

Eine solche Basis nennt man *Pseudo-Orthonormalbasis*.

4.2.3 Satz

Die Signatur ist wohldefiniert, sie hängt nicht von der Wahl der Basis ab.

Beweis

Siehe zum Beispiel: ISRAEL GOHBERG, LEIBA RODMAN, PETER LANCASTER: *Matrices and indefinite scalar products*, Birkhäuser, 1983 □_{4.2.3}

4.2.4 Bemerkung und Definition (Minkowski-Signatur, pseudo-Riemannsch)

Falls die Signatur

- $(p, 0)$ ist, ist \langle, \rangle ein Skalarprodukt.
- $(0, q)$ ist, ist $-\langle, \rangle$ ein Skalarprodukt.
- $(1, q)$, *Minkowski-Signatur* genannt, ist, haben wir einen Minkowski-Raum.
- (p, q) ist, heißt der Raum *pseudo-Riemannsch*.

4.2.5 Definition (pseudo-Riemannsche Metrik)

Sei M^{p+q} eine differenzierbar Mannigfaltigkeit.

Ein Tensorfeld der Stufe $(0, 2)$ auf M heißt *pseudo-Riemannsche Metrik* der Signatur (p, q) , falls gilt:

- i) g ist symmetrisch.
- ii) Die Bilinearform

$$g : T_p M \times T_p M \rightarrow \mathbb{R} \\ (u, v) \mapsto g_{ij} u^i u^j$$

ist nicht-entartet und hat die Signatur (p, q) .

(M, g) heißt *pseudo-Riemannsche* Mannigfaltigkeit. Bei der Signatur $(1, 3)$ heißt M *Lorentz-Mannigfaltigkeit*.

Der Minkowski-Raum ist eine spezielle Lorentz-Mannigfaltigkeit.

4.2.6 Tensorkalkül in Lorentz-Mannigfaltigkeit

Sei M eine Lorentz-Mannigfaltigkeit und seien $u, v \in T_p M$. Wähle eine Pseudo-Orthonormalbasis $(e_i)_{i=0, \dots, 3}$, das heißt:

$$u = u^i e_i \qquad v = v^i e_i$$

$$\langle u, v \rangle = g_{ij} u^i v^j$$

Es gilt:

$$g_{ij} = \langle e_i, e_j \rangle$$

$$g = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

4.2.7 Definition (kausale Struktur)

Ein $u \in T_p M$ heißt

- *zeitartig*, falls $\langle u, u \rangle_p > 0$ ist.
- *raumartig*, falls $\langle u, u \rangle_p < 0$ ist.
- *lichtartig*, falls $\langle u, u \rangle_p = 0$ ist.

Eine Kurve $\gamma : (a, b) \rightarrow M$ heißt *kausal*, wenn $\dot{\gamma}(\tau) \in T_{\gamma(\tau)} M$ für alle $\tau \in (a, b)$ zeitartig oder lichtartig ist.

Kausalitätsprinzip:

Information kann nur längs kausalen Kurven transportiert werden.

TODO: Abb1 einfügen

4.3 Länge von Kurven

TODO: Rest überarbeiten

Sei (M^n, g) eine Riemannsche Mannigfaltigkeit. Dann ist

$$\gamma : I = [a, b] \rightarrow M$$

glatte Kurve.

4.3.1 Definition

Die Länge L einer Kurve γ ist definiert durch:

$$L(\gamma) := \int_a^b \sqrt{g_{ij}(\gamma(\tau)) \dot{\gamma}^i(\tau) \dot{\gamma}^j(\tau)} d\tau$$

Zum Vergleich die Länge einer Kurve im \mathbb{R}^n ist:

$$L(\gamma) := \int_a^b \|\dot{\gamma}(\tau)\| d\tau$$

Wohldefiniertheit:

- Die Unabhängigkeit von der Wahl der Karte auf M ist klar, weil $g_{ij}\dot{\gamma}^i\dot{\gamma}^j$ ein Skalar ist.
- Zu zeigen ist die Unabhängigkeit von der Parametrisierung.

4.3.2 Definition

Eine Kurve $\gamma : [a, b] \rightarrow M$ heißt *regulär*, wenn für alle $\tau \in [a, b]$ schon $\dot{\gamma}(\tau) \neq 0$ ist.

4.3.3 Lemma

Für reguläre Kurven ist die Länge unabhängig von der Wahl der Parametrisierung.

Beweis

Sei $\gamma : I := [a, b] \rightarrow M$ eine glatte Kurve.

Sei $\tilde{\gamma} : J \rightarrow M$ eine andere Parametrisierung. Dann ist $\tilde{\gamma} = \gamma \circ \varphi$, wobei $\varphi : J \rightarrow I$ ein Diffeomorphismus ist.

$$L(\tilde{\gamma}) = \int_J \sqrt{g_{ij}(\tilde{\gamma}(\tau)) \dot{\tilde{\gamma}}^i(\tau) \dot{\tilde{\gamma}}^j(\tau)} d\tau$$

$$\tilde{\gamma}(\tau) = (\gamma \circ \varphi)(\tau)$$

$$\dot{\tilde{\gamma}}^i(\tau) = \gamma'^i|_{\varphi(\tau)} \dot{\varphi}(\tau)$$

Also folgt:

$$L(\tilde{\gamma}) = \int_J \sqrt{g_{ij} \gamma'^i|_{\varphi(\tau)} \gamma'^j|_{\varphi(\tau)}} |\dot{\varphi}(\tau)| d\tau$$

Eine Substitution $t = \varphi(\tau)$ mit $d\tau = \dot{\varphi}(\tau) d\tau$ liefert.

$$L(\tilde{\gamma}) = \int_I \sqrt{g_{ij} \gamma'^i|_{\varphi(\tau)} \gamma'^j|_{\varphi(\tau)}} dt = L(\gamma)$$

□_{4.3.3}

4.4 Integration auf Riemannschen Mannigfaltigkeiten

Sei (M^n, g) eine Riemannsche Mannigfaltigkeit und (x, U) und (y, V) Karten um p .

TODO: Abb2

Wähle ein $f \in C_0^0(U \cap V)$, also $\text{supp}(f) \subseteq U \cap V$ oder $f(q) = 0$ für alle $q \notin U \cap V$.

Wie ist

$$\int_M f d\mu = ?$$

zu definieren?

Idee

Integriere in Karten, also:

$$\int_{x(U \cap V)} (f \circ x^{-1}) d^n x \stackrel{?}{=} \int_{y(U \cap V)} (f \circ y^{-1}) d^n y$$

Es gilt:

$$(f \circ x^{-1}) = (f \circ y^{-1}) \circ (y \circ x^{-1})$$

Definiere:

$$(f \circ y^{-1})(y) =: g(y)$$

$$(y \circ x^{-1})(x) =: \varphi(x)$$

Die Transformationsformel lautet:

$$\int_{\varphi(\Omega)} g(y) d^n y = \int_{\Omega} (g \circ \varphi)(x) |\det D\varphi| d^n x$$

Wende dies an für $\Omega := x(U \cap V)$ und erhalte:

$$\begin{aligned} \int_{y(U \cap V)} \underbrace{(f \circ y^{-1})(y)}_{=g(y)} d^n y &= \int_{x(U \cap V)} (f \circ x^{-1})(x) |\det D\varphi(x)| d^n x \\ &\stackrel{\text{i. A.}}{\neq} \int_{x(U \cap V)} (f \circ x^{-1})(x) d^n x \end{aligned}$$

Die naive Idee geht nicht, weil das Integral davon abhängt, in welcher Karte man es ausrechnet.

Idee

Versuche den störenden Faktor $|\det D\varphi|$ mit Hilfe der Riemannschen Metrik zu kompensieren.

$$D\varphi = D(y \circ x^{-1}) = \left(\frac{\partial y^i}{\partial x^k} \right)_{i,k \in \{1, \dots, n\}}$$

$$\tilde{g}_{kl}(y) = g_{ij}(x) \frac{\partial x^i}{\partial y^k} \cdot \frac{\partial x^j}{\partial y^l} = \frac{\partial x^i}{\partial y^k} g_{ij}(x) \frac{\partial x^j}{\partial y^l} = D(x \circ y^{-1})^T \cdot g \cdot D(x \circ y^{-1})$$

$$\det \tilde{g}(y) = \det (D(x \circ y^{-1})) \cdot \det(g) \cdot \det(D(x \circ y^{-1}))$$

$$\sqrt{\det \tilde{g}(y)} = \sqrt{\underbrace{\det g}_{>0}} \cdot |\det(D(x \circ y^{-1}))|$$

$$x \circ y^{-1} = (y \circ x^{-1})^{-1}$$

Also gilt für alle $q \in U \cap V$:

$$D(x \circ y^{-1})|_{y(p)} = D(y \circ x^{-1})^{-1}|_{x(p)}$$

$$\det(D(x \circ y^{-1})) = \frac{1}{\det(D(y \circ x^{-1}))}$$

Es folgt:

$$\sqrt{\det \tilde{g}(y)} = \sqrt{\det g} \cdot \frac{1}{|\det(D(y \circ x^{-1}))|}$$

Also gilt:

$$\int_{y(U \cap V)} (f \circ y^{-1}) \sqrt{\det(\tilde{g}(y))} d^n y = \int_{x(U \cap V)} (f \circ x^{-1}) \underbrace{\sqrt{\det(\tilde{g}(y))}|_{\varphi(x)} |\det(D\varphi)|}_{=\sqrt{\det(g(x))}} d^n x$$

4.4.1 Lemma

Sind (x, U) und (y, V) zwei Karten auf M und $f \in C_0^0(U \cap V)$.

Dann ist

$$\int_{x(U \cap V)} f(x) \sqrt{\det(g(x))} d^n x = \int_{y(U \cap V)} f(y) \sqrt{\det(g(y))} d^n y$$

Dabei ist $f(x) = f \circ x^{-1}$ und $f(y) = f \circ y^{-1}$ und lasse die Tilde (wie üblich) weg, also $\tilde{g}(y) =: g(y)$.

Beweis

$$\begin{aligned} \int_{y(U \cap V)} f(y) \sqrt{\det(g(y))} d^n y &= \int_{x(U \cap V)} f(x) \sqrt{\det(g(x))} \frac{1}{|\det(D(y \circ x^{-1}))|} d^n x = \\ &= \int_{x(U \cap V)} f(x) \sqrt{\det(g(x))} d^n x \end{aligned}$$

□_{4.4.1}

Betrachte allgemeinere Funktionen, also keine Bedingung an den Träger.

Beginne mit positiven Funktionen, $f \in C^0(M, \mathbb{R}_{\geq 0})$.

4.4.2 Definition

Seien $f \in C^0(M, \mathbb{R}_{\geq 0})$, (x_n, U_n) ein abzählbarer differenzierbarer Atlas und (η_k) eine untergeordnete Zerlegung der Eins, also genauer $\text{supp}(\eta_k) \subseteq U_{n_k}$. Das Integral von f über M ist definiert durch:

$$\int_M f d\mu := \sum_k \int_{x_{n_k}(U_{n_k})} (f \eta_k) \circ x_{n_k}^{-1} \sqrt{\deg(g(x))} d^n x \in \mathbb{R}_{\geq 0} \cup \{\infty\}$$

f heißt *integrierbar* falls $\int_M f d\mu < \infty$ ist.

4.4.3 Satz

Diese Definitionen sind unabhängig von der Wahl der Karten und der Zerlegung der Eins.

Beweis

Sei (y_l, V_l) ein weiterer, verträglicher Atlas und mit untergeordneter Zerlegung der Eins φ_m , genauer $\text{supp}(\varphi_m) \subseteq V_{l_m}$.

$$\begin{aligned} \int_{x_{n_k}(U_{n_k})} (f \cdot \eta_k) \circ x_{n_k}^{-1} \sqrt{\det(g(x))} d^n x &= \int_{x_{n_k}(U_{n_k})} \left(\left(\sum_m \varphi_m \right) \cdot f \cdot \eta_k \right) \circ x_{n_k}^{-1} \sqrt{\det(g(x))} d^n x = \\ &= \sum_{m \in \mathbb{N}} \int_{x_{n_k}(U_{n_k})} (f \cdot \eta_k \cdot \varphi_m) \circ x_{n_k}^{-1} \sqrt{\det(g(x))} d^n x \end{aligned}$$

Man kann die letzte Gleichheit auf zwei Weisen begründen:

1. Monotoner Konvergenzsatz, falls das Lebesgue-Integral bekannt ist.
2. Wähle $\text{supp}(\eta_k)$ kompakt, dies geht zum Beispiel so wie wir die Zerlegung der Eins kontrahiert haben.
Wegen der lokalen Endlichkeit der Zerlegung der Eins (μ_m) sind dann fast alle Summanden null.

Man hat also eine endliche Summe und kann die Summe mit dem Integral vertauschen.

$$\begin{aligned} \sum_{m \in \mathbb{N}} \int_{x_{n_k}(U_{n_k})} (f \cdot \eta_k \cdot \varphi_m) \circ x_{n_k}^{-1} \sqrt{\det(g(x))} d^n x &= \sum_{m \in \mathbb{N}} \int_{x_{n_k}(U_{n_k} \cap V_{l_m})} (f \cdot \eta_k \cdot \varphi_m) \circ x_{n_k}^{-1} \sqrt{\det(g(x))} d^n x = \\ &= \sum_{m \in \mathbb{N}} \int_{y_{l_m}(U_{n_k} \cap V_{l_m})} (f \cdot \eta_k \cdot \varphi_m) \circ y_{l_m}^{-1} \sqrt{\det(g(y))} d^n y \end{aligned}$$

Summiere über k und erhalte dann:

$$\begin{aligned} \int_M f d\mu &= \sum_{k \in \mathbb{N}} \int_{x_{n_k}(U_{n_k})} (f \cdot \eta_k) \circ x_{n_k}^{-1} \sqrt{\det(g(x))} d^n x = \\ &= \underbrace{\sum_{k \in \mathbb{N}} \sum_{m \in \mathbb{N}} \int_{y_{l_m}(V_{l_m})} \underbrace{(f \cdot \eta_k \varphi_m) \circ y_{l_m}^{-1}}_{\geq 0} \underbrace{\sqrt{\det(g(y))}}_{\geq 0} d^n y}_{\geq 0} \end{aligned}$$

Verwende den Umordnungssatz für Reihen mit nicht-negativen Gliedern und erhalte:

$$\int_M f d\mu = \sum_{m \in \mathbb{N}} \int_{y_{l_m}(V_{l_m})} (f \cdot \varphi_m) \circ y_{l_m}^{-1} \sqrt{\det(g(y))} d^n y \stackrel{\text{Definition mit } (\varphi_m)}{=} \int_M f d\mu$$

□4.4.3

4.4.4 Definition

$f \in C^0(M, \mathbb{R})$ heißt *integrierbar*, falls $|f|$ integrierbar (im Sinne der Definition 4.4.2).

Definiere das Integral

$$\int_M f d\mu := \sum_k \int_{x_{n_k}(U_{n_k})} (f \eta_k) \circ x_{n_k}^{-1} \sqrt{\det(g(x))} d^n x$$

wobei wieder (x_n, U_n) ein Atlas mit untergeordneter Zerlegung der Eins η_k ist.

4.4.5 Satz

Diese Definitionen sind unabhängig von der Wahl der Karten und der Zerlegung der Eins.

Beweis

Wähle wieder Atlas (y_l, V_l) und eine Zerlegung der Eins (φ_m) . Die Doppelreihe

$$D := \sum_k \sum_m \int_{U_{n_k} \cap V_{l_m}} (f \cdot \eta_k \cdot \mu_m) d\mu$$

ist absolut konvergent, da gilt:

$$D \leq \sum_k \sum_m \int_{U_{n_k} \cap V_{l_m}} \underbrace{(|f| \cdot \eta_k \cdot \varphi_m)}_{\geq 0} d\mu = \int_M |f| d\mu < \infty$$

Damit ist die Reihe absolut konvergent und folglich können wir nach dem Umordnungssatz die Summe über k und m vertauschen. Ab jetzt geht der Beweis wie vorher. $\square_{4.4.5}$

5 Der Divergenzsatz von Gauß

5.1 Die Divergenz

Im \mathbb{R}^3 gilt für ein Vektorfeld

$$\vec{v} : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$$

$$x \mapsto \vec{v}(x) = \begin{pmatrix} v_1(x) \\ v_2(x) \\ v_3(x) \end{pmatrix}$$

ist die Divergenz:

$$\operatorname{div} \vec{v} := \partial_1 v_1(x) + \partial_2 v_2(x) + \partial_3 v_3(x)$$

Zum Beispiel gilt in der Physik im SI-Einheitensystem:

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

Frage

Kann man und, wenn ja wie, die Divergenz auf einer Mannigfaltigkeit einführen.

Versuche naiv: Sei $v \in T^{(1,0)}M$ ein Vektorfeld auf M , also ein Tensorfeld der Stufe $(1,0)$.

$$v = v^i(x) \frac{\partial}{\partial x^i} \Big|_p = \tilde{v}^k(y) \frac{\partial}{\partial y^k} \Big|_p$$

$$\tilde{v}^k(y) = v^i(x) \frac{\partial y^k}{\partial x^i} \Big|_p$$

$$\operatorname{div} v := \frac{\partial}{\partial x^i} \Big|_p v^i(x)$$

Ist das unabhängig von der Karte?

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial y^k} \Big|_p \tilde{v}^k(x) &= \frac{\partial}{\partial y^k} \left(v^i(x) \frac{\partial y^k}{\partial x^i} \right) = \frac{\partial x^l}{\partial y^k} \frac{\partial}{\partial x^l} \left(v^i(x) \frac{\partial y^k}{\partial x^i} \right) = \\
 &= \frac{\partial x^l}{\partial y^k} \frac{\partial y^k}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial x^l} (v^i(x)) + \frac{\partial x^l}{\partial y^k} v^i(x) \frac{\partial^2 y^k}{\partial x^l \partial x^i} = \\
 &= \delta_i^l \frac{\partial}{\partial x^l} (v^i(x)) + \frac{\partial x^l}{\partial y^k} v^i(x) \frac{\partial^2 y^k}{\partial x^l \partial x^i} = \\
 &= \frac{\partial}{\partial x^i} (v^i(x)) + \underbrace{\frac{\partial x^l}{\partial y^k} v^i(x) \frac{\partial^2 y^k}{\partial x^l \partial x^i}}_{\text{störender Zusatzterm}}
 \end{aligned}$$

Man sieht, dass man auf einer topologischen Mannigfaltigkeiten die Divergenz nicht definieren kann.

Auf Riemannschen Mannigfaltigkeiten kann man hoffen, dass man mit Hilfe der Metrik die Formel so modifizieren kann, dass der störende Zusatzterm herausfällt.

5.1.1 Definition (Divergenz)

$$\operatorname{div}(v) := \frac{1}{\sqrt{\det g}} \frac{\partial}{\partial x^j} \left(\sqrt{\det g} v^j \right)$$

Hat man eine kovariante Ableitung

$$\nabla_i v^k := \frac{\partial}{\partial x_i} v^k + \Gamma_{il}^k v^l$$

dann gilt:

$$\operatorname{div}(v) = \nabla_i v^i$$

5.1.2 Bemerkung

Frage:

$$\frac{\partial}{\partial x^i} \det g(x) = ?$$

Einfacher ist es, eine glatte 1-Parameter-Familie von Matrizen $A(t) \in \operatorname{GL}_n(\mathbb{C})$ zu betrachten. Dann ist $\det(A(t))$ glatt in t , weil polynomial in den Matrixelementen.

5.1.3 Lemma

Sei $A \in C^1((a,b), \operatorname{GL}_n(\mathbb{C}))$, dann gilt:

$$\frac{d}{dt} \det(A(t)) = \det A(t) \cdot \operatorname{Tr} \left(A^{-1}(t) \frac{d}{dt} A(t) \right)$$

Beweis

Sei $A = (a_{ij})_{i,j \in \{1, \dots, n\}}$. Für jedes $i \in \{1, \dots, n\}$ kann man mit dem Laplaceschen Entwicklungssatz nach der i -ten Zeile entwickeln und erhält:

$$\det(A) = \sum_{j=1}^n a_{ij} \operatorname{Adj}_{ij}(A)$$

Dabei ist die *Adjunkte* $\operatorname{Adj}_{ij}(A)$ die Determinante der Matrix ist, bei der man die i -te Zeile und die j -te Spalte streicht mal $(-1)^{i+j}$.

Wähle $k \in \{1, \dots, n\}$ mit $k \neq i$. Dann ist:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \operatorname{Adj}_{kj}(A) = \det \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & \dots & a_{in} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{k1} & \dots & a_{kn} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} = 0$$

Also folgt eine „Orthogonalitätsrelation“:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \operatorname{Adj}_{kj}(A) = \det(A) \cdot \delta_{ik}$$

Zusammenhang zur Inversen $B := A^{-1}$:

$$\begin{aligned} A \cdot B &= E_n \\ \sum_j a_{ij} \cdot b_{jk} &= \delta_{ik} \end{aligned}$$

Also folgt:

$$b_{jk} = \frac{1}{\det(A)} \operatorname{Adj}_{kj}(A)$$

Beispiel

Betrachte eine 2×2 -Matrix:

$$A^{-1} = \frac{1}{\det(A)} \begin{pmatrix} \operatorname{Adj}_{11}(A) & -\operatorname{Adj}_{21}(A) \\ -\operatorname{Adj}_{12}(A) & \operatorname{Adj}_{22}(A) \end{pmatrix} = \frac{1}{\det(A)} \begin{pmatrix} a_{22} & -a_{12} \\ -a_{21} & a_{11} \end{pmatrix}$$

Überprüfe:

$$\begin{aligned} A \cdot B &= \frac{1}{\det(A)} \begin{pmatrix} a_{22} & -a_{12} \\ -a_{21} & a_{11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} = \\ &= \frac{1}{\det(A)} \begin{pmatrix} a_{22}a_{11} - a_{12}a_{21} & a_{22}a_{12} - a_{12}a_{22} \\ -a_{21}a_{11} + a_{11}a_{21} & -a_{21}a_{12} + a_{11}a_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Zurück zum Beweis

Mit der Kettenregel folgt:

$$\frac{d}{dt} \det(A(t)) = \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial}{\partial a_{ij}} \det A \cdot \dot{a}_{ij}$$

Sei i, j fest, so gilt:

$$\det(A) = \sum_{k=1}^n a_{ik} \operatorname{Adj}_{ik}(A)$$

Nun ist $\operatorname{Adj}_{ik}(A)$ unabhängig von a_{ij} und man erhält:

$$\frac{\partial}{\partial a_{ij}} \det(A) = \operatorname{Adj}_{ij}(A)$$

Also gilt:

$$\frac{d}{dt} \det(A(t)) = \sum_{i,j=1}^n \operatorname{Adj}_{ij} \cdot \dot{a}_{ij} = \det(A) \sum_{i,j} b_{ji} \cdot \dot{a}_{ij} = \det(A) \sum_j \left(B \cdot \dot{A} \right)_{jj} = \det(A) \operatorname{Tr} \left(B \cdot \dot{A} \right)$$

Es folgt:

$$\frac{d}{dt} \det A = \det A \cdot \operatorname{Tr} \left(A^{-1} \cdot \dot{A} \right)$$

□_{5.1.3}

5.1.4 Bemerkung

$$\tilde{g}_{lm}(y) = g_{ij}(x) \frac{\partial x^i}{\partial y^l} \frac{\partial x^j}{\partial y^m} = \frac{\partial x^i}{\partial y^l} g_{ij}(x) \frac{\partial x^j}{\partial y^m}$$

$$\tilde{g}(y) = \left(\frac{\partial x}{\partial y} \right)^T g(x) \left(\frac{\partial x}{\partial y} \right)$$

$$\det \tilde{g} = \det g \cdot \det \left(\frac{\partial x}{\partial y} \right)^T \det \left(\frac{\partial x}{\partial y} \right) = \det g \left(\det \left(\frac{\partial x}{\partial y} \right) \right)^2$$

$$\sqrt{\det \tilde{g}} = \pm \sqrt{\det g(x)} \det \left(\frac{\partial x}{\partial y} \right)$$

Dabei ist $+$, falls $\det \left(\frac{\partial x}{\partial y} \right) > 0$ und $-$, falls $\det \left(\frac{\partial x}{\partial y} \right) < 0$.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{\det \tilde{g}}} \frac{\partial}{\partial y^k} \sqrt{\det \tilde{g}} &= \frac{1}{\sqrt{\det \tilde{g}}} \frac{\partial x^i}{\partial y^k} \frac{\partial}{\partial x^i} \sqrt{\det \tilde{g}} = \\ &= \frac{\partial}{\partial y^k} \left(\ln \sqrt{\det \tilde{g}} \right) = \frac{\partial}{\partial y^k} \left(\ln \left(\sqrt{\det g} \right) + \ln \left(\det \left(\frac{\partial x}{\partial y} \right) \right) \right) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{\det g}} \frac{\partial x^i}{\partial y^k} \frac{\partial}{\partial x^i} \sqrt{\det g} + \left(\det \left(\frac{\partial x}{\partial y} \right) \right)^{-1} \frac{\partial x^i}{\partial y^k} \frac{\partial}{\partial x^i} \det \left(\frac{\partial x}{\partial y} \right) \end{aligned}$$

Mit

$$\det \left(\frac{\partial x}{\partial y} \right) = \left(\det \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) \right)^{-1}$$

folgt:

$$\begin{aligned} \det \left(\frac{\partial x}{\partial y} \right)^{-1} \cdot \frac{\partial}{\partial x^i} \det \left(\frac{\partial x}{\partial y} \right) &= \det \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) \cdot \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\det \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) \right)^{-1} = \\ &= - \left(\det \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) \right)^{-1} \cdot \frac{\partial}{\partial x^i} \det \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) = \\ &= - \left(\det \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) \right)^{-1} \cdot \det \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) \cdot \operatorname{Tr} \left(\left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^{-1} \cdot \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) \right) = \\ &= - \operatorname{Tr} \left(\left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^{-1} \cdot \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) \right) = - \frac{\partial x^l}{\partial y^k} \cdot \frac{\partial^2 y^k}{\partial x^i \partial x^l} \end{aligned}$$

Also gilt:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{\det \tilde{g}}} \left(\frac{\partial}{\partial y^k} \sqrt{\det \tilde{g}} \right) \tilde{v}^k &= \frac{1}{\sqrt{\det g}} \frac{\partial x^l}{\partial y^k} \left(\frac{\partial}{\partial x^l} \sqrt{\det g} \right) \tilde{v}^k - \frac{\partial x^i}{\partial y^k} \frac{\partial x^l}{\partial y^m} \frac{\partial^2 y^m}{\partial x^l \partial x^i} \tilde{v}^k = \\ &\stackrel{v^l = \frac{\partial x^l}{\partial y^k} \tilde{v}^k}{=} \frac{1}{\sqrt{\det g}} \left(\frac{\partial}{\partial x^l} \sqrt{\det g} \right) v^l - \frac{\partial x^l}{\partial y^m} \frac{\partial^2 y^m}{\partial x^l \partial x^i} v^i \end{aligned}$$

Es folgt:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{\det \tilde{g}}} \left(\frac{\partial}{\partial y^j} \sqrt{\det \tilde{g}} \tilde{v}^j \right) &= \frac{1}{\sqrt{\det \tilde{g}}} \left(\frac{\partial}{\partial y^j} \sqrt{\det \tilde{g}} \right) \tilde{v}^j + \frac{\partial}{\partial y^j} \tilde{v}^j = \\ &= \frac{1}{\sqrt{\det g}} \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\sqrt{\det g} \right) v^i - \frac{\partial x^l}{\partial y^m} \left(\frac{\partial^2 y^m}{\partial x^l \partial x^i} \right) v^i \\ &\quad + \underbrace{\frac{\partial x^l}{\partial y^j} \frac{\partial y^j}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial x^l} v^i}_{=\partial_i^l} + \frac{\partial x^l}{\partial y^j} \left(\frac{\partial^2 y^j}{\partial x^i \partial x^l} \right) v^i = \\ &= \frac{1}{\sqrt{\det g}} \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\sqrt{\det g} \right) v^i + \frac{\partial}{\partial x^i} (v^i(x)) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{\det g}} \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\sqrt{\det g} v^i(x) \right) \end{aligned}$$

5.1.5 Lemma und Definition (Divergenz)

Sei v ein Tensorfeld der Stufe $(1,0)$, also ein Vektorfeld.

Dann ist die *Divergenz* von v in einer Karte (x,U) definiert durch

$$\operatorname{div}(v) = \frac{1}{\sqrt{\det g}} \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\sqrt{\det g} v^i \right)$$

Diese Definition ist unabhängig von der Wahl der Karte.

Beweis

Dies ergibt sich durch explizite Rechnung, indem man das Transformationsverhalten betrachtet.

□_{5.1.5}

5.1.6 Bemerkung

Mit der kovarianten Ableitung gilt:

$$\operatorname{div}(v) = \nabla_i v^i$$

Dies geht auch für allgemeine Tensorfelder:

$$\nabla_i T^{ij} = w^j$$

w ist ein Vektorfeld.

5.2 Der Satz von Gauß auf kompakten Mannigfaltigkeiten

Motivation:

Der Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung ist:

$$\int_a^b f'(x) dx = f|_a^b$$

Versuche dies auf höhere Dimensionen zu verallgemeinern.

Sei $\Omega \subseteq \mathbb{R}^n$ und v ein Vektorfeld und die Normale sei ν .

$$\int_{\Omega} \operatorname{div}(v) d\mu_{\Omega} = \int_{\partial\Omega} \langle v, \nu \rangle d\mu_{\Omega}$$

Bei uns ist $\Omega = M$ eine kompakte Mannigfaltigkeit und $\partial\Omega = \emptyset$. Wir wollen also zeigen:

$$\int_M \operatorname{div}(v) d\mu_M = 0$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(v) &= \frac{1}{\sqrt{\det g}} \frac{\partial}{\partial x^j} \left(\sqrt{\det g} v^j \right) \\ d\mu_M &= \sqrt{\det g} dx^1 \wedge \dots \wedge dx^n \\ \operatorname{div}(v) d\mu_M &= \frac{\partial}{\partial x^j} \left(\sqrt{\det g} v^j \right) dx^1 \wedge \dots \wedge dx^n \end{aligned}$$

5.2.1 Theorem

Sei (M, g) eine kompakte Riemannsche Mannigfaltigkeit und v ein Vektorfeld auf M . Dann gilt:

$$\int_M \operatorname{div}(v) d\mu_M = 0$$

Beweis

Wähle einen Atlas $(x_n, U_n)_{n \in \{1, \dots, N\}}$ und untergeordnete Zerlegung der Eins $(\eta_k)_{k \in \{1, \dots, K\}}$. Dann ist nach Definition des Integrals

$$\int_M \operatorname{div}(v) d\mu_M = \sum_k \int_{x_{n_k}(U_{n_k})} (\eta_k \cdot \operatorname{div}(v)) \circ x_{n_k}^{-1} \cdot \sqrt{\det(g \circ x_{n_k}^{-1})} dx^1 \wedge \dots \wedge dx^n$$

Es ist $x_{n_k}(U_{n_k}) \subseteq \mathbb{R}^n$ und $\text{supp}(\eta_k) \subseteq U_{n_k}$. Also folgt mit der Schreibweise $f(x)$ für $f \circ x^{-1}$:

$$\begin{aligned} \int_M \text{div}(v) \, d\mu_M &= \sum_{k=1}^K \int_{\mathbb{R}^n} \eta_k(x) \frac{1}{\sqrt{\det g(x)}} \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\sqrt{\det g(x)} v^i(x) \right) \sqrt{\det g(x)} \, d^n x \\ &= \sum_{k=1}^K \int_{\mathbb{R}^n} \eta_k(x) \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\sqrt{\det g(x)} v^i(x) \right) \, d^n x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}^n} \eta_k(x) \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\sqrt{\det g(x)} v^i(x) \right) \, d^n x &= \int_{-\infty}^{\infty} dx_1 \int_{-\infty}^{\infty} dx_2 \dots \int_{-\infty}^{\infty} dx_n \eta_k \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\sqrt{\det g(x)} v^i(x) \right) = \\ &= \sum_{i=1}^n \int_{-\infty}^{\infty} dx_1 \int_{-\infty}^{\infty} dx_2 \dots \int_{-\infty}^{\infty} dx_n \eta_k \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\sqrt{\det g(x)} v^i(x) \right) \end{aligned}$$

Gehe jetzt alle Summanden durch und wende den Satz von Fubini an:

$$\begin{aligned} &\int_{-\infty}^{\infty} dx_1 \int_{-\infty}^{\infty} dx_2 \dots \int_{-\infty}^{\infty} dx_n \eta_k \frac{\partial}{\partial x^1} \left(\sqrt{\det g(x)} v^1(x) \right) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} dx_2 \int_{-\infty}^{\infty} dx_3 \dots \int_{-\infty}^{\infty} dx_n \int_{-\infty}^{\infty} dx_1 \eta_k \frac{\partial}{\partial x^1} \left(\sqrt{\det g(x)} v^1(x) \right) = \\ &\stackrel{\text{part. Int.}}{=} \int_{-\infty}^{\infty} dx_2 \int_{-\infty}^{\infty} dx_3 \dots \int_{-\infty}^{\infty} dx_n \int_{-\infty}^{\infty} dx_1 \left(-\frac{\partial}{\partial x^1} \eta_k \right) \sqrt{\det g(x)} v^1(x) \end{aligned}$$

Der Randterm der partiellen Integration verschwindet, da M kompakt ist. Also folgt:

$$\int_{\mathbb{R}^n} \eta_k \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\sqrt{\det g} v^i \right) \, d^n x = - \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\partial}{\partial x^i} \eta_k \right) \cdot v^i \sqrt{\det g} \, d^n x = - \int_M v(\eta_k) \, d\mu_M$$

Summiere über k :

$$\int_M \text{div}(v) \, d\mu_M = \sum_{k=1}^K \left(- \int_M v(\eta_k) \, d\mu_M \right) = - \int_M v \left(\sum_{k=1}^K \eta_k \right) \, d\mu_M = - \int_M v(1) \, d\mu_M = 0$$

□_{5.2.1}

5.2.2 Definition

Sei $u \in C^\infty(M, \mathbb{R})$.

$$\begin{aligned} Du &= \left(\frac{\partial}{\partial x^i} u \right) \cdot dx^i \in T^{0,1}M \\ \text{grad}(u) &= (\text{grad}(u))^i \frac{\partial}{\partial x^i} \in T^{1,0}M \\ (\text{grad}(u))^i &= g^{ij} \cdot \frac{\partial}{\partial x^j} u \end{aligned}$$

Laplace-Beltrami-Operator: TODO: Symbol

$$\Delta \setminus u := \text{div}(\text{grad}(u)) = \frac{1}{\sqrt{\det(g)}} \frac{\partial}{\partial x^j} \left(\sqrt{\det(g)} g^{jk} \frac{\partial}{\partial x^k} u \right)$$

alternativer Beweis von 5.1.5

Wähle $h \in C_0^\infty(M)$. Sei (x, U) eine Karte, so gewählt, dass $\text{supp}(h) \subseteq U$ ist. Dann ist

$$\int_M v(h) \, d\mu_M$$

unabhängig von der Wahl der Karte definiert und es gilt:

$$\begin{aligned} \int_M v(h) \, d\mu_M &= \int_{\mathbb{R}^n} v^i(x) \left(\frac{\partial}{\partial x^i} h \right) \sqrt{\det g} \, dx = \\ &\stackrel{\text{partielle Integration}}{=} - \int_{\mathbb{R}^n} h \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\sqrt{\det g} v^i \right) \, dx \cdot \frac{\sqrt{\det g}}{\sqrt{\det g}} = \\ &= - \int_M h \frac{1}{\sqrt{\det g}} \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\sqrt{\det g} v^i \right) \, d\mu_M = \int_M h \cdot \text{div}(v) \, d\mu_M \end{aligned}$$

Dies ist für alle h unabhängig von der Wahl der Karte.

Diracfolge, konvergiert im Limes $n \rightarrow \infty$ gegen $(\text{div}(v))(x)$.

Sei $\eta \in C_0^\infty(\mathbb{R})$, $\eta \geq 0$ und $\eta(0) > 0$.

TODO: Abb1-Plot von $e^{-\frac{1}{(x-1)^2}}$ einfügen.

Sei $x_0 \in x(U)$.

$$h_m(x) = m^n \eta(m \|x - x_0\|)$$

$$\int_{\mathbb{R}^n} h_m(x) \, d^n x$$

TODO: Abb2

Substitution

$$u = m(x - x_0) \qquad d^n u = m^n \cdot d^n x$$

liefert:

$$\int_{\mathbb{R}^n} h_m(x) \, d^n x = \int_{\mathbb{R}^n} \frac{1}{m^n} \cdot m^n \cdot \eta(\|u\|) \, d^n u = c > 0$$

Dies ist unabhängig von m .

$$\int_M h_m \underbrace{\left(\text{div}(v) \cdot \sqrt{\det g} \right)}_{\text{stetig}} \, d^n x \xrightarrow{m \rightarrow \infty} \text{div}(v(x_0)) \sqrt{\det(g(x_0))} \cdot c$$

□_{5.1.5}

5.2.3 Korollar und Definition

Sei (M, g) eine kompakte Riemannsche Mannigfaltigkeit und $u \in C^\infty(M)$ und $\Delta u = 0$. Dann nennt man u *harmonisch* und u ist konstant.

Die Gleichung heißt Laplace-Gleichung.

TODO: Symbol

Beweis

Es gilt

$$0 = (\Delta \setminus u) \cdot u = \operatorname{div}(\operatorname{grad}(u) \cdot u) - g(\operatorname{grad} u, \operatorname{grad} u)$$

wegen:

$$\begin{aligned} (\Delta \setminus u) \cdot u &= \frac{1}{\sqrt{\det g}} \frac{\partial}{\partial x^j} \left(\sqrt{\det g} \operatorname{grad}^j(u) \right) \cdot u = \\ &= \underbrace{\frac{1}{\sqrt{\det g}} \frac{\partial}{\partial x^j} \left(\sqrt{\det g} ((\operatorname{grad}^j u) \cdot u) \right)}_{\operatorname{div}(u \cdot \operatorname{grad}(u))} - \frac{1}{\sqrt{\det g}} \sqrt{\det g} \underbrace{\operatorname{grad}^j(u) (\partial_j u)}_{=g^{ij}(\partial_i u)(\partial_j u)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} g_{jk} g^{kl} &= \delta_j^l \\ g^{ij} \partial_i u \partial_j u &= g^{ij} \partial_i u \partial_l u = g_{ik} (g^{ji} \partial_i u) (g^{kl} \partial_l u) = g_{ij} \partial^i u \partial^j u = g(\operatorname{grad}(u), \operatorname{grad}(u)) \end{aligned}$$

Integriere jetzt über M :

$$\begin{aligned} 0 &= \int_M (\operatorname{div}(u \cdot \operatorname{grad}(u)) - g(\operatorname{grad}(u), \operatorname{grad}(u))) \, d\mu_M = \\ &= \underbrace{\int_M \operatorname{div}(u \cdot \operatorname{grad}(u)) \, d\mu_M}_{=0} - \int_M g(\operatorname{grad}(u), \operatorname{grad}(u)) \, d\mu_M = \\ &= - \int_M \underbrace{g(\operatorname{grad}(u), \operatorname{grad}(u))}_{\geq 0} \, d\mu_M \end{aligned}$$

Also ist $g(\operatorname{grad}(u), \operatorname{grad}(u)) = 0$, das heißt $\operatorname{grad}(u) = 0$ und somit $\partial_j u = 0$, also ist u konstant.
 $\square_{5.2.3}$

5.2.4 Bemerkung

Ist f eine holomorphe Funktion, dann ist:

$$\Delta_{\mathbb{R}^2} \operatorname{Re}(f) = \Delta_{\mathbb{R}^2} \operatorname{Im}(f) = 0$$

Der Satz von Liouville aus Analysis III sagt:

Ist f beschränkt und auf ganz \mathbb{C} holomorph, dann ist f konstant.

Hier haben wir das Analogon auf kompakten Riemannschen Mannigfaltigkeiten.

Vergleiche auch mit der Poisson-Gleichung aus der Physik:

$$\Delta \phi = 4\pi k \rho \qquad \text{Newtonsches Gravitationsgesetz}$$

5.3 Mannigfaltigkeiten mit Rand

Betrachte den Halbraum:

$$\mathbb{R}_-^n := \{x \in \mathbb{R}^n \mid x^1 \leq 0\}$$

TODO: Abb3

Die Topologie auf \mathbb{R}_-^n ist die von \mathbb{R}^n induzierte Relativtopologie, das heißt $\Omega \subseteq \mathbb{R}_-^n$ ist genau dann offen, wenn es eine offene Menge $U \subseteq \mathbb{R}^n$ gibt, sodass $U \cap \mathbb{R}_-^n = \Omega$ ist.

Zum Beispiel ist $\Omega = B_1(0) \cap \mathbb{R}_-^n$ ist bezüglich der Relativtopologie offen, da $B_1(0) \subseteq \mathbb{R}^n$ offen ist, aber Ω ist in \mathbb{R}^n nicht offen.

5.3.1 Definition

Sei $\Omega \subseteq \mathbb{R}_-^n$ offen. Eine Funktion $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ heißt (k -mal stetig) differenzierbar in $x \in \Omega$, falls es eine Umgebung U von x im \mathbb{R}^n gibt, und eine Fortsetzung \tilde{f} von f gibt, also $\tilde{f} : U \rightarrow \mathbb{R}$ und $\tilde{f}|_{U \cap \Omega} = f|_{U \cap \Omega}$, die (k -mal stetig) differenzierbar ist.

f heißt (k -mal stetig) differenzierbar in Ω , falls f in jedem Punkt $x \in \Omega$ differenzierbar ist.

TODO: Abb4

5.3.2 Lemma

Sei $\Omega \subseteq \mathbb{R}_-^n$ offen bezüglich der Relativtopologie und $f \in C^k(\Omega, \mathbb{R})$, so gibt es ein offenes $U \subseteq \mathbb{R}^n$ mit $\Omega \subseteq U$ und eine Fortsetzung $\tilde{f} : U \rightarrow \mathbb{R}$.

Beweis

Für jedes $x \in \Omega$ gibt es ein U^x und eine Fortsetzung $\tilde{f}^x : U^x \rightarrow \mathbb{R}$.

TODO: Abb5

Wähle eine abzählbare untergeordnete Zerlegung der Eins $(\eta_k)_{k \in \mathbb{N}}$, das heißt η_k ist lokal endlich, $\sum_{k \in \mathbb{N}} \eta_k = 1$ und $\text{supp}(\eta_k) \subseteq U^{x(k)}$ für alle $k \in \mathbb{N}$. Dies ist nach Satz 1.3.4 und Theorem 1.3.5 immer möglich.

Setze nun $\tilde{f}_k = \eta_k \cdot \tilde{f}^{x(k)}$ und:

$$\tilde{f}(x) = \sum_k \eta_k(x) \tilde{f}^{x(k)}(x)$$

Dann wissen wir:

- Für alle $x \in \Omega$ gibt es eine offene Umgebung $V \subseteq \mathbb{R}^n$, sodass $\eta_k|_V = 0$ für fast alle k ist. Damit ist klar, dass die Reihe konvergiert, denn sie reduziert sich auf eine endliche Summe. Außerdem ist \tilde{f} wieder glatt.
- Sei $x \in \Omega$, dann folgt:

$$\tilde{f}(x) = \sum_k \eta_k(x) \cdot \underbrace{\tilde{f}^{x(k)}(x)}_{=f(x)} = \sum_k \eta_k(x) f(x) = f(x) \underbrace{\left(\sum_k \eta_k(x) \right)}_{=1}$$

□_{5.3.2}

5.3.3 Definition (Mannigfaltigkeit mit Rand)

Eine *Mannigfaltigkeit mit Rand* ist ein separabler, topologischer Hausdorff-Raum, der lokal homöomorph zu einer offenen Teilmenge von \mathbb{R}_+^n ist.

Wie bei Mannigfaltigkeiten kann man definieren:

- Karten
- Atlas
- maximaler Atlas
- differenzierbare Struktur (Kartenwechsel in C^p sind)
- C^k -Struktur

5.3.4 Lemma und Definition

Sei M eine differenzierbare Mannigfaltigkeit mit Rand.

Ein Punkt $p \in M$ heißt *Randpunkt*, wenn es eine Karte (x, U) um p gibt, sodass $x(p) \in \mathbb{R}_0^n = \{x \in \mathbb{R}^n \mid x^1 = 0\}$ ist.

Ansonsten heißt p *innerer Punkt*.

TODO: Abb6

Diese Begriffe sind wohldefiniert, das heißt zu einem gegebenen Punkt $p \in M$ kann es nicht zwei Karten (x, U) und (y, V) geben, sodass $(y(p))_1 = 0$ und $(x(p))_1 \neq 0$.

Beweis

Angenommen es gäbe solche Karten (x, U) und (y, V) um p . Dann ist

$$x \circ y^{-1} : y(U \cap V) \rightarrow x(U \cap V)$$

ein Diffeomorphismus.

Definiere g als die Projektion auf die erste Komponente, also für $v \in \mathbb{R}^n$

$$g(v) = v^1$$

Dann ist $g|_{y(V)} \leq 0$. Betrachte $f := g \circ y \circ x^{-1} : x(U \cap V) \rightarrow \mathbb{R}$. Dann gilt:

$$f(x(p)) = g(y(p)) = 0$$

$$Df|_{x(p)} = \underbrace{Dg|_{y(x)}}_{\neq 0} \cdot \underbrace{D(y \circ x^{-1})|_{x(p)}}_{\text{invertierbar}} \neq 0$$

Also hat $Df|_{x(p)}$ Rang 1, das heißt Höchstrang. Betrachte die Kurve:

$$c(\tau) = x(p) + \tau \cdot \text{grad}(f)$$

Dann ist:

$$\frac{d}{d\tau} (f \circ c)|_{\tau=0} > 0$$

Also gibt es ein $\tau \in \mathbb{R}$ und $c(\tau) =: z$ mit $f(z) = f(c(\tau)) > 0$. Dann ist $(y \circ x^{-1})(z) \in y(V)$. Damit folgt der Widerspruch:

$$g(y \circ x^{-1}(z)) = f(z) > 0$$

□_{5.3.4}

5.3.5 Definition

Der *Rand* von M ist:

$$\partial M := \{p \in M \mid p \text{ ist Randpunkt}\} \subseteq M$$

Dies ist eine $(n-1)$ -dimensionale differenzierbare Mannigfaltigkeit, denn für $p \in \partial M$ ist für jede Karte (x, U) um p schon $x(p) = 0$.

TODO: Abb1

Betrachte:

$$\tilde{x} : U \cap \partial M \rightarrow \mathbb{R}_0^n \cong \mathbb{R}^{n-1}$$

Dann ist $(\tilde{x}, U \cap \partial M)$ eine Karte von ∂M .

Das *Innere*, $M^\circ := M \setminus \partial M$ ist eine n -dimensionale Mannigfaltigkeit ohne Rand.

5.3.6 Beispiel

Sei N^n eine glatte Mannigfaltigkeit (ohne Rand) und sei $\varphi : N^n \rightarrow \mathbb{R}$ von der Klasse C^∞ und a sei ein regulärer Wert von φ .

$$M := \varphi^{-1}((-\infty, a])$$

ist dann eine Mannigfaltigkeit mit Rand $\partial M = \varphi^{-1}(a)$.

5.3.7 Definition

Nun zum Tangentialraum:

Für innere Punkte geht dies wie bisher. Sei also p ein Randpunkt.

TODO: Abb2

$f \circ x^{-1} : x(U) \rightarrow \mathbb{R}$ ist eine glatte Funktion. Dann gibt es ein offenes $V \subseteq \mathbb{R}^n$ mit $x(U) \subseteq V$ und ein $\tilde{g} : V \rightarrow \mathbb{R}$, dass glatt ist, und für das $\tilde{g}|_{x(U)} = f \circ x^{-1}|_{x(U)}$ gilt.

Zu jedem $f \in F_p^\infty M$ können wir einen Repräsentanten $g := f \circ x^{-1}$ fortsetzen auf eine Umgebung $V \subseteq \mathbb{R}^n$ von $x(p)$.

Man kann $F_p^\infty(M)$ also mit den Funktionskeimen $F_{x(p)}^\infty(x(U))$ auffassen, wobei $F_{x(p)}^\infty(x(U))$ die Funktionskeime von $C^\infty(\mathbb{R}^n)$ in $x(p) \in \mathbb{R}^n$ ist. Also kann man auch $T_p M$ wie bisher als Derivationen auf $F_p^\infty(M)$ definieren.

Dies ist wieder ein n -dimensionaler Vektorraum, aufgespannt durch die Richtungsableitungen:

$$\left. \frac{\partial}{\partial x^1} \right|_p, \dots, \left. \frac{\partial}{\partial x^n} \right|_p$$

5.3.8 Bemerkung

Sei $p \in \partial M$.

$T_p M$ ist ein n -dimensionaler Vektorraum.

$T_p \partial M$ ist ein $(n-1)$ -dimensionaler Vektorraum.

TODO: Abb3

Sei $\hat{g} \in C^\infty(\hat{V} \subseteq \mathbb{R}_-^n)$ mit $\hat{V} := V \cap \mathbb{R}_-^n$. Dann kann \hat{g} ausgedehnt werden zu $g \in C^\infty(V, \mathbb{R}_-^n)$. Eine Derivation, die auf \hat{g} wirkt, kann aufgefasst werden als Derivation auf g , die tangential zu \mathbb{R}_0^n verläuft.

$T_p \partial M$ wird aufgespannt von $\frac{\partial}{\partial x^2}, \dots, \frac{\partial}{\partial x^n}$, $T_p M$ dagegen von $\frac{\partial}{\partial x^1}, \frac{\partial}{\partial x^2}, \dots, \frac{\partial}{\partial x^n}$.

Damit kann $T_p \partial M$ identifiziert werden mit dem Unterraum $\left\langle \frac{\partial}{\partial x^2}, \dots, \frac{\partial}{\partial x^n} \right\rangle \subseteq T_p M$.

5.3.9 Definition (Riemannsche Metrik)

Eine *Riemannsche Metrik* ist eine bilineare Abbildung $g_p : T_p M \times T_p M \rightarrow \mathbb{R}$, die symmetrisch und positiv definit ist und glatt von p abhängt. Allgemein führen wir $T^{p,q} M$ ein wie bisher.

5.3.10 Definition (Normale)

Sei (M, g) eine Riemannsche Mannigfaltigkeit mit Rand ∂M .

Für $p \in \partial M$ heißt $\nu \in T_p M$ eine *Normale*, falls $\nu \perp T_p \partial M \subseteq T_p M$, das heißt für alle $w \in T_p \partial M$ gilt $g(\nu, w) = 0$.

Wir betrachten also eine orthogonale Zerlegung von $T_p M = T_p \partial M \oplus \langle \nu \rangle$. Außerdem normieren wir ν , das heißt es gilt $\langle \nu, \nu \rangle = 1$.

TODO: Abb4

Eine Normale heißt *innere Normale*, falls es eine C^1 -Kurve $C : [0, \varepsilon) \rightarrow M$ mit $c(0) = p$ gibt, sodass die Derivation, die definiert ist durch

$$\hat{\nu}(f) := \frac{d}{dt}(f \circ c)|_{t=0} := \lim_{\delta \searrow 0} \frac{d}{dt}(f \circ c)|_{t=\delta}$$

mit ν übereinstimmt.

Sonst heißt ν *äußere Normale*.

$$g_p|_{T_p \partial M \times T_p \partial M} : T_p \partial M \times T_p \partial M \rightarrow \mathbb{R}$$

definiert eine Riemannsche Metrik auf ∂M , die sogenannte *induzierte Metrik*.

Die induzierte Metrik und die äußere Normale hängen glatt von p ab.

5.4 Der allgemeine Gaußsche Divergenzsatz

5.4.1 Theorem

Sei (M^n, g) eine kompakte Riemannsche Mannigfaltigkeit mit Rand ∂M , ν die äußere Normale und u ein Vektorfeld auf M . Dann gilt:

$$\int_M \operatorname{div}(u) \, d\mu = \int_{\partial M} \langle \nu, u \rangle \, d\mu_{\partial M}$$

Dabei ist $d\mu_{\partial M}$ bezüglich der induzierten Metrik und $\langle \nu, u \rangle$ das Skalarprodukt auf $T_p M$, das heißt die Riemannsche Metrik.

Beweis

Überdecke M mit endlich vielen Karten und wähle eine untergeordnete Zerlegung der Eins $(\eta_k)_{k=1,\dots,K}$.

$$\begin{aligned} \int_M \operatorname{div}(u) \, d\mu &= \sum_{k=1}^K \int_M \eta_k \operatorname{div}(u) \, d\mu_M = \\ &= \sum_{k=1}^K \left(\int_{x_{n_k}(U_{n_k})} (\eta_k \operatorname{div}(u)) \circ x_{n_k}^{-1} \cdot \sqrt{\det(g \circ x_{n_k}^{-1})} \, d^n x \right) \end{aligned}$$

Kürzere Schreibweise:

$$\int_{x_{n_k}(U_{n_k})} (\eta_k(x) \operatorname{div}(u)(x)) \cdot \sqrt{\det(g(x))} \, d^n x$$

Falls das Kartengebiet U_{n_k} den Rand von M nicht schneidet, also $U_{n_k} \cap \partial M = \emptyset$, können wir genau wie früher partiell integrieren.

Es genügt also, eine Karte am Rand zu betrachten:

$$\int_{\mathbb{R}^n} \eta_k \operatorname{div}(u) \sqrt{\det g} \, d^n x = \int_{\mathbb{R}^n} \eta_k \partial_j \left(\sqrt{\det g} u^j \right) \, d^n x \stackrel{\text{part. Int.}}{=} - \int_M u(\eta_{n_k}) \, d\mu_M$$

TODO: Abb5

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}_-^n} \eta \cdot (\operatorname{div} v) \sqrt{\det g} \, d^n x &= \int_{\mathbb{R}_-^n} \eta \cdot \frac{1}{\sqrt{\det g}} \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\sqrt{\det g} v^i \right) \sqrt{\det g} \, d^n x = \\ &= \int_{-\infty}^0 dx_1 \int_{-\infty}^{\infty} dx_2 \dots \int_{-\infty}^{\infty} \eta \cdot \frac{1}{\sqrt{\det g}} \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\sqrt{\det g} v^i \right) \sqrt{\det g} \, d^n x = \\ &= - \int_{\mathbb{R}_-^n} \left(\frac{\partial}{\partial x^i} \eta \right) \cdot \sqrt{\det g} v^i \, d^n x + \int_{-\infty}^{\infty} dx_2 \dots \int_{-\infty}^{\infty} dx_n \eta \sqrt{\det g} v^1 \Big|_{x^1=0} = \\ &= - \int_M u(\eta) \cdot d\mu_M + \int_{\mathbb{R}_0^n} \eta \sqrt{\det g} v^1 \Big|_{x^1=0} \, d^{n-1} x \end{aligned}$$

Dabei ist:

$$\int_{-\infty}^0 dx_1 f(x_1) = \lim_{\varepsilon \searrow 0} \int_{-\infty}^{\varepsilon} f_\varepsilon(x_1) \, dx_1$$

TODO: Abb6

Summand mit $i = 1$ genauer:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} dx_2 \dots \int_{-\infty}^{\infty} dx_n \left(\int_{-\infty}^0 dx_1 \eta \frac{\partial}{\partial x^1} \left(\sqrt{\det g} v^1 \right) \right) &= \\ = \int_{-\infty}^{\infty} dx_2 \dots \int_{-\infty}^{\infty} dx_n \left(\eta \sqrt{\det g} v^1 \Big|_{x^1=0} - \int_{-\infty}^0 dx_1 \frac{\partial}{\partial x^1} (\eta) \cdot \sqrt{\det g} v^1 \right) \end{aligned}$$

Sei $p \in \partial M \cap U_{n_k}$.

$$\nu = \nu^j \cdot \frac{\partial}{\partial x^j}$$

Da ν senkrecht auf $T_p \partial M = \langle \frac{\partial}{\partial x^2}, \dots, \frac{\partial}{\partial x^n} \rangle$ steht, gilt für alle $\alpha \in \{2, \dots, n\}$:

$$0 = g \left(\nu, \frac{\partial}{\partial x^\alpha} \right) = g_{ij} \nu^i \cdot \left(\frac{\partial}{\partial x^\alpha} \right)^j = g_{ij} \nu^i \cdot \delta_\alpha^j = g_{i\alpha} \nu^i = \nu_\alpha$$

Also gilt:

$$\nu_i = (c, 0, \dots, 0)$$

Bestimme c :

$$1 = \langle \nu, \nu \rangle = g_{ij} \nu^i \nu^j = g^{ij} \nu_i \nu_j = g^{11} \cdot c^2$$

Also gilt:

$$c = \frac{1}{\sqrt{g^{11}}}$$

Nun berechne g^{11} mit $\alpha, \beta \in \{2, \dots, n\}$ und der Cramerschen Regel:

$$g^{11} = \frac{1}{\det g} \det (g_{\alpha\beta})_{\alpha, \beta \in \{2, \dots, n\}}$$

$$g(u, \nu) = u^j \nu_j = u^1 \cdot c = u^1 \cdot \frac{\sqrt{\det (g_{ij})_{i, j \in \{1, \dots, n\}}}}{\sqrt{\det (g_{\alpha\beta})_{\alpha, \beta \in \{2, \dots, n\}}}}$$

Damit folgt:

$$\begin{aligned} \eta_k \sqrt{\det g} \cdot u^1 \mathrm{d}^{n-1}x &= \eta_k u^1 \frac{\sqrt{\det (g_{ij})_{i, j \in \{1, \dots, n\}}}}{\sqrt{\det (g_{\alpha\beta})_{\alpha, \beta \in \{2, \dots, n\}}}} \cdot \sqrt{\det (g_{\alpha\beta})_{\alpha, \beta \in \{2, \dots, n\}}} \mathrm{d}^{n-1}x = \\ &= \eta_k g(u, \nu) \cdot \mathrm{d}\mu_{\partial M} \end{aligned}$$

Wir erhalten also:

$$\int_{\mathbb{R}_{<0}^n} \eta_k \cdot \operatorname{div}(u) \sqrt{\det g} \mathrm{d}^n x = - \int_M u(\eta_k) \mathrm{d}\mu_M + \int_{\partial M} \eta_k \cdot \langle u, \nu \rangle \mathrm{d}\mu_{\partial M}$$

Summiere nun über k . Dies ist eine endliche Summe, weil M kompakt ist.

Verwende dabei, dass $\sum_k u(\eta_k) = u(1) = 0$.

□_{5.4.1}

5.4.2 Theorem (Greensche Formeln)

Sei (M, g) kompakte Mannigfaltigkeiten mit Rand und $f, g \in C^\infty(M, \mathbb{R})$.

$$\int_M f \cdot \Delta \backslash g \mathrm{d}\mu_M = - \int_M \langle \mathrm{D}f, \mathrm{D}g \rangle \mathrm{d}\mu_M + \int_{\partial M} f \cdot \nu(g) \mathrm{d}\mu_{\partial M}$$

$$\int_M (f \cdot \Delta \backslash g - g \cdot \Delta \backslash f) \mathrm{d}\mu_M = \int_{\partial M} f \cdot \nu(g) \mathrm{d}\mu_{\partial M} - \int_{\partial M} (f \nu(g) - \nu(f) g) \mathrm{d}\mu_{\partial M}$$

Beweis

Es gilt:

$$\langle Df, Dg \rangle = g \langle \operatorname{grad} f, \operatorname{grad} g \rangle$$

$$f \cdot \Delta g = \operatorname{div} (f \cdot \operatorname{grad} (g)) - \langle Df, Dg \rangle$$

Denn es gilt:

$$\begin{aligned} f \cdot \Delta g &= f \cdot \frac{1}{\sqrt{\det g}} \partial_j \left(\sqrt{\det g} \partial^j g \right) = \frac{1}{\sqrt{\det g}} \partial_j \left(\sqrt{\det g} f \cdot \partial^j g \right) - (\partial_j f) (\partial^j g) = \\ &= \operatorname{div} (f \cdot \operatorname{grad} (g)) - \langle Df, Dg \rangle \end{aligned}$$

Integriere auf beiden Seiten:

$$\begin{aligned} \int_M f \cdot \Delta g \, d\mu_M &= - \int_M \langle Df, Dg \rangle \, d\mu_M + \int_M \operatorname{div} (f \cdot \operatorname{grad} (g)) \, d\mu_M = \\ &= - \int_M \langle Df, Dg \rangle \, d\mu_M + \int_{\partial M} \langle f \cdot \operatorname{grad} (g), \nu \rangle \, d\mu_{\partial M} = \\ &= - \int_M \langle Df, Dg \rangle \, d\mu_M + \int_{\partial M} f \cdot \nu (g) \, d\mu_{\partial M} \end{aligned}$$

Für die zweite Gleichung betrachte die erste Gleichung, vertauscht f und g , und subtrahiert dies von der ersten Gleichung. $\square_{5.4.2}$

5.4.3 Randwertprobleme

Seien $\varrho \in C^\infty(M, \mathbb{R})$ und $\varphi \in C^\infty(\partial M, \mathbb{R})$ gegeben.

Betrachte folgende Gleichungssysteme:

– Dirichlet-Problem:

$$\begin{aligned} \Delta f &= \varrho && \text{(Poisson-Gleichung)} \\ f|_{\partial M} &= \varphi && \text{(Dirichlet-Randbedingung)} \end{aligned}$$

– Neumann-Problem:

$$\begin{aligned} \Delta f &= \varrho && \text{(Poisson-Gleichung)} \\ \nu(f)|_{\partial M} &= \varphi && \text{(Neumann-Randbedingung)} \end{aligned}$$

5.4.4 Korollar

Die Lösung des Dirichlet-Problems ist eindeutig und das Neumann-Problem ist bis auf eine additive Konstante eindeutig.

Beweis

Seien f_1 und f_2 zwei Lösungen. Dann erfüllt $f := f_1 - f_2$ die Gleichung:

$$\Delta \backslash f = 0$$

$$f|_{\partial M} = 0 \quad \text{bzw.} \quad \nu(f) = 0$$

Nach der ersten Greenschen Formel für $g = f$ gilt dann:

$$0 = \int_M f \cdot \Delta \backslash f \, d\mu_M = - \int_M \langle Df, Dg \rangle \, d\mu_M + \int_{\partial M} \underbrace{f}_{=0 \text{ (Dirichlet)}} \cdot \underbrace{\nu(f)}_{=0 \text{ (Neumann)}} \, d\mu_{\partial M}$$

Also folgt:

$$\int_M \underbrace{\langle Df, Dg \rangle}_{\geq 0} \, d\mu_M = 0$$

Also gilt $Df = 0$ und somit ist f konstant.

□_{5.4.4}

5.4.5 Theorem (Mittelwertgleichung)

Sei f harmonisch, $\Delta f = 0$ in $\Omega \subseteq \mathbb{R}^n$ offen.

Sei $p \in \Omega$ und $r \in \mathbb{R}_{>0}$, sodass $B_r(p) \subseteq \Omega$. Es folgt:

$$f(p) = \frac{1}{\text{vol}(S_r^{(p)})} \int_{S_r^{(p)}} f \, d\mu$$

Dabei ist

$$S_r^{(p)} := \left\{ q \in \mathbb{R}^n \mid \|p - q\| = r \right\}$$

$$\text{vol}(S_r^{(p)}) := \int_{S_r^{(p)}} d\mu$$

und $d\mu$ das zugehörige Oberflächenmaß bezüglich der induzierten Metrik.

Bemerkung

Bei holomorphen Funktionen folgt die Mittelwertgleichung aus dem Cauchyschen Theorem:

$$f(0) = \frac{1}{2\pi i} \oint_{\partial B_r(0)} \frac{f(z)}{z} dz$$

Beweis

Es gilt:

$$0 = \Delta f = \text{div}(\text{grad}(f))$$

Setze zur Einfachheit $p = 0$.

Die äußere Normale ist:

$$\nu(x) = \frac{x}{\|x\|}$$

TODO: Abb1

$$\begin{aligned} 0 &= \int_{B_r(0)} \Delta f \, d\mu_M = \int_{B_r(0)} \operatorname{div}(\operatorname{grad}(f)) \, d\mu_M = \\ &= \int_{S_r} \langle \operatorname{grad}(f), \nu \rangle \, d\mu_{S_r} \end{aligned}$$

Also gilt:

$$0 = \int_{S_r} \nu(f) \, d\mu_{S_r}$$

Skaliere nun um:

$$0 = \int_{S_r} \nu(f)|_x \, d\mu_{S_r}(x) \stackrel{y=\frac{x}{r}}{=} \int_{d\mu_{S_1}(y)=\frac{1}{r^{n-1}}d\mu_{S_r}(x)} r^{n-1} \nu(f)|_{ry} \, d\mu_{S_1}(y)$$

Weiterer Trick:

$$\frac{d}{dr} f(ry) = Df|_{ry} \cdot y = (\nu f)(ry)$$

Denn es gilt:

$$y = \nu = \frac{x}{\|x\|}$$

Damit folgt:

$$0 = r^{n-1} \frac{d}{dr} \int_{S_1} f(ry) \, d\mu_{S_1}(y)$$

Also ist

$$F(r) := \int_{S_1} f(ry) \, d\mu_{S_1}(y) = c$$

unabhängig von r .

$$c = \lim_{r \rightarrow 0} F(r) \stackrel{\text{gln. Konvergenz}}{=} \int_{S_1 \text{ kompakt}} \left(\lim_{r \rightarrow 0} f(ry) \right) \, d\mu_{S_1}(y) = f(0) \cdot \operatorname{vol}(S_1)$$

Also gilt:

$$\begin{aligned} f(0) &= \frac{c}{\operatorname{vol}(S_1)} = \frac{1}{\operatorname{vol}(S_1)} \int_{S_1} f(ry) \, d\mu_{S_1} y = \\ &\stackrel{x=ry}{=} \frac{1}{r^{n-1} \operatorname{vol}(S_1)} \int_{S_r} f(x) \, d\mu_{S_r}(x) = \frac{1}{\operatorname{vol}(S_r)} \int_{S_r} f(x) \, d\mu_{S_r}(x) \end{aligned}$$

□_{5.4.5}

5.4.6 Theorem (Satz von Gauß auf nicht-kompakten Mannigfaltigkeiten)

Sei (M, g) eine Riemannsche Mannigfaltigkeit mit Rand mit kompaktem Rand ∂M .

Sei u ein glattes Vektorfeld, sodass $\operatorname{div}(u)$ integrierbar ist.

Nehme außerdem an, dass es eine untergeordnete Zerlegung der Eins (η_k) gibt, sodass $\operatorname{supp}(\eta_k)$ kompakt und $\sum_k |u(\eta_k)|$ integrierbar ist.

Dann gilt:

$$\int_M \operatorname{div}(u) \, d\mu_M = \int_{\partial M} \langle u, \nu \rangle \, d\mu_{\partial M}$$

Beweis

Es gilt:

$$\begin{aligned} \int_M \operatorname{div}(u) \, d\mu_M &= \sum_{k=1}^{\infty} \int_{x_{n_k}(U_{n_k})} (\eta_k \operatorname{div}(u)) \circ x_{n_k}^{-1} \sqrt{\det g \circ x_{n_k}^{-1}} \, d^n x = \\ &= \underbrace{\sum_{k=1}^{\infty} \int_M u(\eta_k) \, d\mu}_{\text{absolut konvergent}} + \underbrace{\sum_{k=1}^{\infty} \int_{\partial M} \eta_k \langle u, \nu \rangle \, d\mu_{\partial M}}_{\text{endliche Summe}} \end{aligned}$$

□_{5.4.6}

5.4.7 Theorem (Gaußscher Divergenzsatz im \mathbb{R}^3)

Sei u ein glattes Vektorfeld im \mathbb{R}^3 mit $\operatorname{div}(u) \in L^1(\mathbb{R}^3)$ und:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} |x|^2 |u(x)| = 0$$

Dann ist $\int_{\mathbb{R}^2} \operatorname{div}(u) \, d^3 x = 0$.

Bemerkung

- Mit Rand, also für ein offenes $\Omega \subseteq \mathbb{R}^3$ und $M = \mathbb{R}^3 \setminus \Omega$ mit glattem Rand, geht es analog.
- Die Bedingung

$$\lim_{x \rightarrow \infty} |x|^2 |u(x)| = 0$$

kann abgeschwächt werden, am besten mit Lebesgue-Integral.

Beweis

Wähle $\eta_R \in C_0^\infty(\mathbb{R})$ mit $\eta_R|_{[0,R]} = 1$ und $\eta_R|_{[R+1,\infty)} = 0$ und $|\eta'_R| \leq 2$.

TODO: ABb1

Nach dem Satz von Gauß gilt, da $\eta_R \cdot u$ einen kompakten Träger hat:

$$\int_{\mathbb{R}^3} \operatorname{div}(\eta_R(|x|) \cdot u(x)) \, dx = 0$$

Also folgt, wenn man $\tilde{\eta}_R := \eta_R(|x|) : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ betrachtet:

$$\int_{\mathbb{R}^3} \eta_R(|x|) \operatorname{div}(u) \, d^3x = - \int_{\mathbb{R}^3} u(\tilde{\eta}_R) \, d^3x$$

Mit $R \rightarrow \infty$ folgt aus Dominiertem Konvergenz:

$$\int_{\mathbb{R}^3} \operatorname{div}(u) \, d^3x = 0$$

$$\left| \int_{\mathbb{R}^3} u(\tilde{\eta}_R) \, d^3x \right| \leq \int_{\mathbb{R}^3} |u(\tilde{\eta}_R)| \, d^3x$$

$$|u(\tilde{\eta}_R)| \leq |u| \cdot |D\tilde{\eta}_R| = |u| \cdot |\eta'_R|$$

$$\int_{\mathbb{R}^3} |u(\tilde{\eta}_R)| \, d^3x \leq 2 \int_{\mathbb{R}^3} |u| \cdot \chi \, d^3x$$

Dabei ist χ die charakteristische Funktion der Menge:

$$\{x \in \mathbb{R}^3 \mid R \leq |x| \leq R+1\}$$

Denn:

$$D\eta_R(|x|) = D\eta\left(\sqrt{|x|^2}\right)$$

Es folgt:

$$\frac{\partial}{\partial x^j} \eta_R = \eta'_R(|x|) \frac{x^j}{\sqrt{|x|^2}}$$

$$\operatorname{grad}(\eta) = \eta'(|x|) \frac{x}{|x|}$$

$$|\operatorname{grad}(\eta)| = |\eta'(|x|)| \leq 2$$

$$2 \int_{\mathbb{R}^3} |u| \cdot \chi \, d^3x \leq 2 \sup_{R \leq |x| \leq R+1} |u(x)| \cdot 4\pi(R+1)^2 \leq 4 \cdot 4\pi \sup_{R \leq |x| \leq R+1} |u(x)| |x|^2 \xrightarrow{R \rightarrow \infty} 0$$

□_{5.4.7}

6 Differentialformen

Betrachte eine Mannigfaltigkeit M^n ohne Riemannsche Metrik.

Frage

Wie kann man eine Ableitung einführen?

Partielle Ableitungen liefern im Allgemeinen keine sinnvolle Ableitung, da sie von der Wahl der Koordinaten abhängen, zum Beispiel:

$$v \in T^{0,1}M$$

$$v = v_k(x) dx^k = \tilde{v}_l(y) dy^l$$

$$\tilde{v}_l = \frac{\partial x^k}{\partial y^l} v_k(x)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{v}_l}{\partial y^m} &= \frac{\partial}{\partial y^m} \left(\frac{\partial x^k}{\partial y^l} v_k(x) \right) = \underbrace{\frac{\partial x^n}{\partial y^m} \cdot \frac{\partial}{\partial x^n}}_{=\frac{\partial}{\partial y^m}} \left(\frac{\partial x^k}{\partial y^l} v_k(x) \right) = \\ &= \frac{\partial x^n}{\partial y^m} \frac{\partial x^k}{\partial y^l} \frac{\partial v_k}{\partial x^n} + \frac{\partial x^n}{\partial y^m} v_k(x) \frac{\partial^2 x^k}{\partial x^n \partial y^l} = \\ &= \underbrace{\frac{\partial x^n}{\partial y^m} \frac{\partial x^k}{\partial y^l} \frac{\partial v_k}{\partial x^n}}_{\text{entspricht Transformationsverhalten eines Tensors}} + \underbrace{v_k(x) \frac{\partial^2 x^k}{\partial y^m \partial y^l}}_{\text{unerwünschter Zusatzterm}} \end{aligned}$$

Um den unerwünschten Zusatzterm zum Verschwinden zu bringen, *antisymmetrisiert* man:

$$F_{jk}(x) := \frac{\partial v_k(x)}{\partial x^j} - \frac{\partial v_j(x)}{\partial x^k} \qquad \tilde{F}_{lm}(x) := \frac{\partial \tilde{v}_l(x)}{\partial y^l} - \frac{\partial \tilde{v}_j(x)}{\partial y^m}$$

Es folgt:

$$\begin{aligned} \tilde{F}_{lm}(x) &= \frac{\partial x^k}{\partial y^l} \frac{\partial x^n}{\partial y^m} \frac{\partial v_k}{\partial x^n} + v_k(x) \frac{\partial^2 x^k}{\partial y^l \partial y^m} - \frac{\partial x^k}{\partial y^m} \frac{\partial x^n}{\partial y^l} \frac{\partial v_k}{\partial x^n} - v_k(x) \frac{\partial^2 x^k}{\partial y^m \partial y^l} = \\ &= \frac{\partial x^a}{\partial y^l} \cdot \frac{\partial x^b}{\partial y^m} \left(\frac{\partial v_a}{\partial x^b} - \frac{\partial v_b}{\partial x^a} \right) = \frac{\partial x^a}{\partial y^l} \cdot \frac{\partial x^b}{\partial y^m} F_{ab}(x) \end{aligned}$$

Also ist

$$F := F_{ab}(x) dx^a \otimes dx^b = \tilde{F}_{lm}(x) dy^l \otimes dy^m$$

ein Tensor der Stufe (0,2). Man schreibt auch

$$F = dv$$

und d heißt *äußere Ableitung*.

Anwendung in der Physik

Betrachte das Vektorpotential \vec{A} mit Magnetfeld $\vec{B} = \text{rot}(\vec{A})$ und φ das elektrostatische Potential.

Betrachte im 4-dimensionalen Minkowskiraum das elektromagnetische Potential $A = (\varphi, \vec{A})$. Dann ist

$$F = dA$$

der Feldstärketensor. Nichtrelativistisch:

$$\left(\text{rot}(\vec{A})\right)^i = \varepsilon^{ijk} \underbrace{\partial_j A_k}_{=dA}$$

Betrachte im Folgenden nur Tensorfelder der Stufe (0,k), die *alternierend* sind, das heißt:

$$A_{i_1 \dots i_l \dots i_m \dots i_k} = -A_{i_1 \dots i_m \dots i_l \dots i_k}$$

Wir schreiben solche Tensorfelder als

$$\Lambda^k(M)$$

und bezeichnen sie als *Differentialformen*.

Die *äußere Ableitung* ist:

$$d : \Lambda^k(M) \rightarrow \Lambda^{k+1}(M)$$

Der ε -Tensor lässt sich verallgemeinern zum *Hodge-Stern*:

$$* : \Lambda^k(M) \rightarrow \Lambda^{n-k}(M)$$

6.1 Alternierende Formen

Sei E ein n -dimensionaler Vektorraum. (Später werden wir $E = T_p M$ wählen.)

E^* sei der zugehörige Dualraum und:

$$E^{0,k} := \underbrace{E^* \otimes \dots \otimes E^*}_{k \text{ Faktoren}}$$

6.1.1 Definition

Eine Abbildung $\varphi : E^k \rightarrow \mathbb{R}$ heißt multilinear, falls sie in jedem Argument linear ist.

Die multilinearen Abbildungen bilden einen Vektorraum $M^k(E)$.

Auf den multilinearen Abbildungen bilden einen Vektorraum $M^k(E)$.

Auf den multilinearen Abbildungen kann man ein Tensorprodukt einführen:

$$\begin{aligned} \otimes : M^k(E) \times M^l(E) &\rightarrow M^{k+l} \\ (\varphi_1 \otimes \varphi_2)(v_1, \dots, v_{k+l}) &= \varphi_1(v_1, \dots, v_k) \varphi_2(v_{k+1}, \dots, v_{k+l}) \end{aligned}$$

\otimes ist bilinear.

6.1.2 Satz

Sei $\varphi^1, \dots, \varphi^n$ eine Basis von E^* . Dann bilden die Vektoren

$$\varphi^{i_1} \otimes \dots \otimes \varphi^{i_k}; \quad 1 \leq i_1, \dots, i_k \leq n$$

eine Basis von $M^k(E)$. Insbesondere gilt $\dim(M^k(E)) = n^k$.

Beweis

$$(\varphi^{i_1} \otimes \dots \otimes \varphi^{i_k})(e_{j_1}, \dots, e_{j_k}) = \varphi^{i_1}(e_{j_1}) \dots \varphi^{i_k}(e_{j_k}) = \delta_{j_1}^{i_1} \dots \delta_{j_k}^{i_k}$$

Dabei ist (e_k) eine Basis von E und (φ^k) sei die duale Basis, das heißt $\varphi^k(e_l) = \delta_l^k$.

a) Die Vektoren $(\varphi^{i_1} \otimes \dots \otimes \varphi^{i_k})_{1 \leq i_1 \dots i_k \leq n}$ spannen $M^k(E)$ auf.

Sei $T \in M^k(E)$. Setze $t_{i_1 \dots i_k} = T(e_{i_1}, \dots, e_{i_k})$.

Sei $w_i \in E$, so stelle es in der Basis dar:

$$w_i = \sum_{k=1}^n w_i^k e_k$$

Aus der Multilinearität folgt:

$$T(w_1, \dots, w_k) = w_1^{i_1} \dots w_k^{i_k} T(e_{i_1}, \dots, e_{i_k}) = w_1^{i_1} \dots w_k^{i_k} t_{i_1 \dots i_k}$$

$$(\varphi^{i_1} \otimes \dots \otimes \varphi^{i_k})(w_1, \dots, w_k) = w_1^{j_1} \dots w_k^{j_k} (\varphi^{i_1} \otimes \dots \otimes \varphi^{i_k})(e_{j_1}, \dots, e_{j_k}) = w_1^{i_1} \dots w_k^{i_k}$$

Also gilt:

$$T(w_1, \dots, w_k) = t_{i_1 \dots i_k} (\varphi^{i_1} \otimes \dots \otimes \varphi^{i_k})(w_1, \dots, w_k)$$

Es folgt:

$$T = t_{i_1 \dots i_k} (\varphi^{i_1} \otimes \dots \otimes \varphi^{i_k})$$

b) Die Vektoren $(\varphi^{i_1} \otimes \dots \otimes \varphi^{i_k})_{1 \leq i_1 \dots i_k \leq n}$ sind linear unabhängig, denn aus

$$\sum \lambda_{i_1 \dots i_k} \varphi^{i_1} \otimes \dots \otimes \varphi^{i_k} = 0$$

folgt durch anwenden von $e_{j_1} \otimes \dots \otimes e_{j_k}$:

$$\lambda_{j_1 \dots j_k} = 0$$

Also sind alle Koeffizienten Null und somit folgt die lineare Unabhängigkeit.

Zusammenhang zum Tensorprodukt: Sei $T \in M^k(E)$, also ist

$$T : E \times \dots \times E \rightarrow \mathbb{R}$$

multilinear. Dann gibt es eine eindeutige lineare Abbildung

$$\hat{T} : E \otimes \dots \otimes E \rightarrow \mathbb{R}$$

mit:

$$T(w_1, \dots, w_k) = \hat{T}(w_1 \otimes \dots \otimes w_k)$$

Also ist $\hat{T} \in (E \otimes \dots \otimes E)^* \cong E^* \otimes \dots \otimes E^*$.

6.1.3 Definition

Sei $f : E \rightarrow F$ linear.

Die duale Abbildung oder der *Pullback* von f ist die lineare Abbildung:

$$\begin{aligned} f^* : M^k(F) &\rightarrow M^k(E) \\ (f^*T)(u_1, \dots, u_k) &:= T(f(u_1), \dots, f(u_k)) \end{aligned}$$

6.1.4 Definition

Ein $\varphi \in M^k(E)$ heißt *alternierend* (oder *total antisymmetrisch*), falls es antisymmetrisch unter Vertauschung zweier Argumente ist, das heißt:

$$\varphi(u_1, \dots, u_a, \dots, u_b, \dots, u_k) = -\varphi(u_1, \dots, u_b, \dots, u_a, \dots, u_k)$$

Die alternierenden multilinearen Abbildungen werden mit $\Omega^k(E) \subseteq M^k(E)$ bezeichnet. Sei S_k die symmetrische Gruppe, also die Permutationsgruppe von $\{1, \dots, k\}$.

$$\begin{aligned} \text{Alt} : M^k(E) &\rightarrow \Omega^k(E) \\ (\text{Alt}T)(v_1, \dots, v_k) &:= \frac{1}{k!} \sum_{\sigma \in S_k} \text{sgn}(\sigma) T(v_{\sigma(1)}, \dots, v_{\sigma(k)}) \end{aligned}$$

6.1.5 Beispiel

$$M^1(E) = E^*$$

$M^2(E) \ni T : E \times E \rightarrow \mathbb{R}$ ist bilinear.

(e_i) sei Basis von E und (φ^i) die zugehörige duale Basis, also $\varphi^i(e_j) = \delta_j^i$.

$$(\varphi^i \otimes \varphi^j)(u, v) := \varphi^i(u) \cdot \varphi^j(v)$$

$$T(u, v) = T(u^i e_i, v^j e_j) = u^i v^j T(e_i, e_j) = T(e_i, e_j) (\varphi^i \otimes \varphi^j)(u, v)$$

Also gilt:

$$T = T(e_i, e_j) \underbrace{\varphi^i \otimes \varphi^j}_{\in E^* \otimes E^*}$$

Daher kann man T auf kanonische Weise mit einem Element aus $E^* \otimes E^*$.

6.1.6 Definition

Wir definieren das *Wedge-Produkt* (oder Dachprodukt) durch:

$$\begin{aligned} \wedge : \Omega^k \times \Omega^l &\rightarrow \Omega^{k+l} \\ (\omega, \eta) &\mapsto \omega \wedge \eta := \frac{(k+l)!}{k! \cdot l!} \text{Alt}(\omega \otimes \eta) \end{aligned}$$

Dabei ist der Vorfaktor Konvention.

6.1.7 Satz

- Aus $\Omega \in \Omega^k(E)$ folgt $\text{Alt}(\Omega) = \Omega$.
- \wedge ist bilinear.
- $\omega \wedge \eta = (-1)^{kl} \eta \wedge \omega$
- $f^*(\omega \wedge \eta) = (f^*\omega) \wedge (f^*\eta)$
- \wedge ist assoziativ:

$$(\omega \wedge \eta) \wedge \Theta = \omega \wedge (\eta \wedge \Theta)$$

Beweis

$$\text{Alt}(\omega \otimes \eta) = (-1)^{kl} \text{Alt}(\eta \otimes \omega)$$

$$(f^*\omega)(u_1, \dots, u_k) = \omega(fu_1, \dots, fu_k)$$

$$\begin{aligned}
\left(\underbrace{\omega}_k \wedge \underbrace{\eta}_l \right) \wedge \underbrace{\Theta}_m &= \frac{(k+l+m)!}{(k+l)!m!} \text{Alt}((\omega \wedge \eta) \otimes \Theta) = \\
&= \frac{(k+l+m)!}{(k+l)!m!} \cdot \frac{(k+l)!}{k!l!} \text{Alt}(\text{Alt}(\omega \otimes \eta) \otimes \Theta) = \\
&= \frac{(k+l+m)!}{k!l!m!} \text{Alt}(\text{Alt}(\omega \otimes \eta) \otimes \Theta) = \\
&= \frac{(k+l+m)!}{k!l!m!} \text{Alt}(\omega \otimes \text{Alt}(\eta \otimes \Theta))
\end{aligned}$$

□_{6.1.7}

6.1.8 Satz

Die Vektoren

$$\varphi^{i_1} \wedge \varphi^{i_2} \wedge \dots \wedge \varphi^{i_k}$$

mit $1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_k \leq n$ bilden eine Basis von $\Omega^k(E)$ und:

$$\dim(\Omega^k(E)) = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

Beweis

Sei $T \in \Omega^k(E) \subseteq M^k(E)$ mit $1 \leq i_1, \dots, i_k \leq n$. Die Basisdarstellung in $M^k(E)$ ist:

$$T = t_{i_1 \dots i_k} \varphi^{i_1} \otimes \dots \otimes \varphi^{i_k}$$

Es folgt:

$$\text{Alt}(T) = t_{i_1 \dots i_k} \text{Alt}(\varphi^{i_1} \otimes \dots \otimes \varphi^{i_k}) = ct_{i_1 \dots i_k} \varphi^{i_1} \wedge \dots \wedge \varphi^{i_k}$$

Daher ist $\varphi_{i_1} \wedge \dots \wedge \varphi_{i_k}$ ein Erzeugendensystem von $\Omega^k(E)$.

$$\varphi_{i_1} \wedge \varphi_{i_2} = -\varphi_{i_2} \wedge \varphi_{i_1}$$

Allgemein ist $\varphi_{i_1} \wedge \dots \wedge \varphi_{i_k}$ total antisymmetrisch und insbesondere verschwindet es, wenn zwei Indizes übereinstimmen.

Ordne die Indizes so um, dass sie aufsteigend sind und es gilt:

$$\text{Alt}(T) = \sum_{1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_k \leq n} \tilde{t}_{i_1 \dots i_k} \varphi^{i_k} \wedge \dots \wedge \varphi^{i_1}$$

Also sind die Vektoren $(\varphi^{i_1} \wedge \dots \wedge \varphi^{i_k})_{1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_k \leq n}$ sind ein Erzeugendensystem.

Um die lineare Unabhängigkeit zu zeigen, betrachtet man:

$$(\varphi^{i_1} \wedge \dots \wedge \varphi^{i_k})(e_{j_1}, \dots, e_{j_k}) = c \delta_{j_1}^{i_1} \dots \delta_{j_k}^{i_k}$$

□_{6.1.8}

Insbesondere ist $\dim(\Omega^n(E)) = 1$. $\Omega^n(E)$ wird aufgespannt von $\varphi^1 \wedge \varphi^2 \wedge \dots \wedge \varphi^n$.

6.1.9 Satz

Sei $\omega \in \Omega^n(E)$. Dann gilt:

$$\omega(v_1, \dots, v_n) = \det(A) \cdot \omega(e_1, \dots, e_n)$$

Dabei ist:

$$v_j = a_j^k e_k$$

$$A := (a_j^i)_{ij} = \begin{pmatrix} v_1^1 & v_1^2 & \dots & v_1^n \\ v_2^1 & v_2^2 & \dots & v_2^n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_n^1 & v_n^2 & \dots & v_n^n \end{pmatrix}$$

Beweis

Definiere:

$$\mathcal{E}(v_1, \dots, v_n) := \det(a_j^i)$$

Diese Abbildung ist multilinear und total antisymmetrisch aufgrund der Eigenschaften der Determinante.

Da $\dim(\Omega^n(E))$ eindimensional ist, ist $\omega = c \cdot \mathcal{E}$. Um c zu bestimmen, betrachte:

$$\begin{aligned} \omega(e_1, \dots, e_n) &= c \cdot \mathcal{E}(e_1, \dots, e_n) = c \cdot \det(\mathbb{1}) \\ \Rightarrow c &= \omega(e_1, \dots, e_n) \end{aligned}$$

□_{6.1.9}

6.1.10 Beispiel

Sei $E = \mathbb{R}^n$ mit der kanonischen Basis. Betrachte \mathcal{E} wie eben.

Stelle \mathcal{E} in Komponenten dar:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}(v_1, \dots, v_n) &= \epsilon_{i_1 \dots i_n} v_1^{i_1} \dots v_n^{i_n} \\ \epsilon_{123 \dots n} &= 1 \end{aligned}$$

Daher ist $\epsilon_{i_1 \dots i_n}$ total antisymmetrisch:

$$\epsilon_{\sigma(1) \dots \sigma(n)} = \text{sgn}(\sigma)$$

$\epsilon_{i_1 \dots i_n}$ heißt *total antisymmetrisches Symbol* oder *Levi-Civita-Symbol*.

Im \mathbb{R}^3 gilt:

$$\epsilon_{ijk} a_l^i a_m^j a_n^k = \det(A) \cdot \epsilon_{lmn}$$

6.2 Differentialformen, Orientierbarkeit

Sei M^n eine differenzierbare Mannigfaltigkeit. Setze $E = T_p M$ und betrachte $\Omega^k(T_p M)$.

Was heißt differenzierbar?

TODO: ABb1

Sei $U \subseteq M$ offen und

$$x : U \rightarrow x(U) \subseteq \mathbb{R}^n$$

eine Karte. Dann ist

$$x_*|_p : T_p M \rightarrow T_{x(p)} \mathbb{R}^n \cong \mathbb{R}^n$$

eine lineare Abbildung.

$$\begin{aligned} x_*|_p : \Omega^k(T_{x(p)} \mathbb{R}^n) &\rightarrow \Omega^k(T_p M) \\ (x_*|_p \omega) (\underbrace{u_1, \dots, u_k}_{\in (T_p M)^k}) &:= \omega \left((x_*|_p u_1, \dots, x_*|_p u_k) \right) \end{aligned}$$

Definiere Differentialformen auf $x(U) \subseteq \mathbb{R}^n$ durch

$$T = \sum_{1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_k \leq n} t_{i_1 \dots i_k}(x) dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k}$$

mit $t_{i_1 \dots i_k} \in C^\infty(x(U))$.

6.2.1 Definition

Eine *Differentialform* φ der Stufe k auf M ist eine Abbildung, die jedem $p \in M$ ein Element aus $\Omega^k(T_p M)$ zuordnet, sodass für jede Karte (x, U) nun $(x^{-1})^* \varphi$ ein glatter Tensor auf $x(U)$ ist, also in der kanonischen Basisdarstellung glatte Koeffizienten hat.

TODO: ABb2

Bemerkung

Äquivalent hätte man sagen können:

φ ist eine total antisymmetrisches Tensorfeld der Stufe $(0, k)$.

Lokale Darstellung

$$\varphi = \varphi_{i_1 \dots i_k}(x) \cdot dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k}$$

Wir wollen mit Hilfe von n -Formen die Orientierung einführen. Sei $\omega \in \Omega^n(E)$:

$$\omega(v_1, \dots, v_n) = \det(a_j^i) \omega(e_1, \dots, e_n)$$

6.2.2 Definition

Sei $\omega \in \Omega^n(M) \setminus \{0\}$. Eine lineare Abbildung

$$f : E \rightarrow E$$

heißt *orientierungserhaltend*, falls $\omega(fv_1, \dots, fv_n)$ das gleiche Vorzeichen hat, wie $\omega(v_1, \dots, v_n)$ für alle $v_1, \dots, v_n \in E$.

- Diese Definition hängt nicht von der Wahl von ω ab.
- Es genügt, eine feste Basis (v_1, \dots, v_n) von E zu betrachten.

TODO: Abb3

Die Kartenwechselabbildung $y \circ x^{-1}$ heißt *orientierungserhaltend*, falls

$$(y \circ x^{-1})_*|_p : T_{x(p)}\mathbb{R}^n \cong \mathbb{R}^n \rightarrow T_{y(p)}\mathbb{R}^n \cong \mathbb{R}^n$$

orientierungserhaltend für alle $p \in U \cap V$ ist.

Ein Atlas \mathcal{A} von M heißt *orientierungserhaltend*, falls alle Kartenwechselabbildungen orientierungserhaltend sind.

Wenn M einen orientierungserhaltenden Atlas zulässt, so heißt M *orientierbar*.

(M, \mathcal{A}) mit orientierungserhaltendem Atlas \mathcal{A} heißt *orientiert*.

6.2.3 Beispiel

- i) Der Torus ist orientierbar.

TODO: Abb4

- ii) Das Möbiusband ist *nicht* orientierbar.

TODO: Abb5

Kartenwechselabbildung *nicht orientierungserhaltend*.

6.2.4 Theorem

Eine differenzierbare Mannigfaltigkeit ist genau dann orientierbar, wenn es eine nirgends verschwindende n -Form auf M gibt.

Beweis

„ \Leftarrow “: TODO: Beweis als Übungsaufgabe einfügen

Deswegen zeige jetzt nur die Hinrichtung:

6.2.5 Lemma

Auf einer orientierten Riemannschen Mannigfaltigkeiten (M^n, g) ist durch

$$\varepsilon = \sqrt{\det(g)} \epsilon_{i_1 \dots i_n} dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_n}$$

eine kanonische n -Form gegeben, die sogenannte *Volumenform*.

Beweis

Betrachte wieder das Transformationsverhalten:

$$g = g_{ij}(x) dx^i \otimes dx^j = \tilde{g}_{ab}(y) dy^a \otimes dy^b$$

Bei der Herleitung des Volumenmaßes haben wir bereits gesehen:

$$\begin{aligned} \sqrt{\det \tilde{g}} &= \sqrt{\det g} \left| \det \left(\frac{\partial x^i}{\partial y^a} \right) \right| \\ dx^i &= \frac{\partial x^i}{\partial y^a} dy^a \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sqrt{\det g} \epsilon_{i_1 \dots i_n} dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_n} &= \sqrt{\det g} \epsilon_{i_1 \dots i_n} \left(\frac{\partial x^{i_1}}{\partial y^{a_1}} dy^{a_1} \right) \wedge \dots \wedge \left(\frac{\partial x^{i_n}}{\partial y^{a_n}} dy^{a_n} \right) = \\ &= \sqrt{\det g} \epsilon_{i_1 \dots i_n} \frac{\partial x^{i_1}}{\partial y^{a_1}} \dots \frac{\partial x^{i_n}}{\partial y^{a_n}} dy^{a_1} \wedge \dots \wedge dy^{a_n} = \\ &= \sqrt{\det g} \det \left(\frac{\partial x^i}{\partial y^a} \right) \epsilon_{i_1 \dots i_n} dy^{a_1} \wedge \dots \wedge dy^{a_n} = \\ &\stackrel{\det \left(\frac{\partial x^i}{\partial y^a} \right) > 0}{=} \sqrt{\det \tilde{g}} \epsilon_{i_1 \dots i_n} dy^{a_1} \wedge \dots \wedge dy^{a_n} \end{aligned}$$

Dabei ist $\det \left(\frac{\partial x^i}{\partial y^a} \right) > 0$, da die Kartenwechselabbildungen orientierungserhaltend sind. $\square_{6.2.5}$

6.2.6 Lemma

Auf jeder differenzierbaren Mannigfaltigkeit M^n kann man eine Riemannsche Metrik g einführen, die nicht eindeutig und nicht kanonisch ist.

Beweis

Sei $(\eta_k)_{k \in \mathbb{N}}$ sei eine abzählbare Zerlegung der Eins, untergeordnet zu einem abzählbaren Atlas (x_n, U_n) , genauer $\text{supp}(\eta_k) \subseteq U_{n_k}$.

TODO: Abb1

Sei

$$g_{ij} = \delta_{ij}$$

die Euklidische Metrik auf \mathbb{R}^n . Mit dem Pullback definiere:

$$\begin{aligned} g^{(k)} &:= \eta_k \cdot x_{n_k}^*(\delta) \in T^{0,2}U \\ g &:= \sum_{k \in \mathbb{N}} \eta_k x_{n_k}^*(\delta) \end{aligned}$$

Ist dann eine Riemannsche Metrik auf M^n .

$\square_{6.2.6}$

Beweis von 6.2.4

Wähle eine Orientierung und eine Riemannsche Metrik nach 6.2.6. Dann gibt es nach 6.2.4 eine nirgends verschwindende n -Form. $\square_{6.2.4}$

6.3 Die äußere Ableitung, der deRham-Komplex

Die äußere Ableitung ist eine Abbildung:

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

6.3.1 Definition

Sei $\varphi \in \Omega^0(M) := C^\infty(M)$.

$$d\varphi := D\varphi = \varphi_* = \left(\frac{\partial}{\partial x^j} \varphi \right) dx^j \in \Omega^1(M)$$

Sei $\varphi \in \Omega^k(M)$, dann ist:

$$\varphi = \varphi_{i_1 \dots i_k} dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k}$$

Definiere:

$$d\varphi := \left(\frac{\partial}{\partial x^j} \varphi_{i_1 \dots i_k} \right) dx^j \wedge dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k}$$

6.3.2 Theorem (Rechenregeln)

Für $\omega \in \Omega^k(M)$ und $\eta \in \Omega^l(M)$ gilt:

i) Für $\lambda \in \mathbb{R}$ gilt:

$$\begin{aligned} d(\omega + \eta) &= d\omega + d\eta \\ d(\lambda\omega) &= \lambda d\omega \end{aligned}$$

ii) $d(\omega \wedge \eta) = (d\omega) \wedge \eta + (-1)^k \omega \wedge (d\eta)$

iii) $d(d\omega) = 0$

Beweis

i) ist klar nach Definition.

ii) Darstellung in einer Basis:

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_{i_1 \dots i_k} dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} \\ \eta &= \eta_{j_1 \dots j_l} dx^{j_1} \wedge \dots \wedge dx^{j_l} \end{aligned}$$

$$\omega \wedge \eta = \omega_{i_1 \dots i_k} \eta_{j_1 \dots j_l} dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} \wedge dx^{j_1} \wedge \dots \wedge dx^{j_l}$$

$$\begin{aligned} d(\omega \wedge \eta) &= \frac{\partial}{\partial x^a} (\omega_{i_1 \dots i_k} \eta_{j_1 \dots j_l}) dx^a \wedge dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} \wedge dx^{j_1} \wedge \dots \wedge dx^{j_l} = \\ &= \frac{\partial}{\partial x^a} (\omega_{i_1 \dots i_k}) \eta_{j_1 \dots j_l} dx^a \wedge dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} \wedge dx^{j_1} \wedge \dots \wedge dx^{j_l} + \\ &\quad + \omega_{i_1 \dots i_k} \frac{\partial}{\partial x^a} (\eta_{j_1 \dots j_l}) \cdot (-1)^k dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} \wedge dx^a \wedge dx^{j_1} \wedge \dots \wedge dx^{j_l} = \\ &= (d\omega \wedge \eta) + (-1)^k \omega \wedge (d\eta) \end{aligned}$$

iii) Es gilt:

$$\begin{aligned}
 d\omega &= \frac{\partial}{\partial x^a} \omega_{i_1 \dots i_k} dx^a \wedge dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} \\
 d(d\omega) &= \frac{\partial}{\partial x^b} \left(\frac{\partial}{\partial x^a} \omega_{i_1 \dots i_k} \right) dx^b \wedge dx^a \wedge dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} = \\
 &= \frac{\partial}{\partial x^b x^a} \omega_{i_1 \dots i_k} dx^b \wedge dx^a \wedge dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} = \\
 &= -\frac{\partial}{\partial x^a \partial x^b} \omega_{i_1 \dots i_k} dx^a \wedge dx^b \wedge dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} = \\
 &= -\frac{\partial}{\partial x^b \partial x^a} \omega_{i_1 \dots i_k} dx^a \wedge dx^b \wedge dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} = -d(d\omega)
 \end{aligned}$$

Also folgt $d(d\omega) = 0$.

□_{6.3.2}

6.3.3 Satz

Die äußere Ableitung ist unabhängig von der Wahl des Koordinatensystems definiert.

Beweis

1. Beweis: Rechne das Transformationsverhalten nach:

$$\omega = \omega_{i_1 \dots i_k} dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} = \tilde{\omega}_{i_1 \dots i_k} dy^{a_1} \wedge \dots \wedge dy^{a_k}$$

$$\tilde{\omega}_{i_1 \dots i_k} = \omega_{i_1 \dots i_k} \frac{\partial x^{i_1}}{\partial y^{a_1}} \dots \frac{\partial x^{i_k}}{\partial y^{a_k}}$$

Berechne $d\omega$ im Koordinatensystem:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial y^b} \tilde{\omega}_{i_1 \dots i_k} dy^b \wedge dy^{a_1} \wedge \dots \wedge dy^{a_k} &= \frac{\partial}{\partial y^b} \left(\omega_{i_1 \dots i_k} \frac{\partial x^{i_1}}{\partial y^{a_1}} \dots \frac{\partial x^{i_k}}{\partial y^{a_k}} \right) dy^b \wedge dy^{a_1} \wedge \dots \wedge dy^{a_k} = \\
 &= \frac{\partial}{\partial y^b} (\omega_{i_1 \dots i_k}) \frac{\partial x^{i_1}}{\partial y^{a_1}} \dots \frac{\partial x^{i_k}}{\partial y^{a_k}} dy^b \wedge dy^{a_1} \wedge \dots \wedge dy^{a_k} + \\
 &\quad + \omega_{i_1 \dots i_k} \underbrace{\frac{\partial x^{i_1}}{\partial y^b \partial y^{a_1}} \frac{\partial x^{i_2}}{\partial y^{a_2}} \dots \frac{\partial x^{i_k}}{\partial y^{a_k}}}_{\text{symmetrisch in } a_1 \leftrightarrow b} + \underbrace{\frac{\partial x^{i_1}}{\partial y^{a_1}} \dots \frac{\partial x^{i_k}}{\partial y^{a_k}}}_{\text{antisymmetrisch in } a_1 \leftrightarrow b} dy^b \wedge dy^{a_1} \wedge \dots \wedge dy^{a_k} \\
 &= \frac{\partial x^j}{\partial y^b} \frac{\partial}{\partial x^j} (\omega_{i_1 \dots i_k}) \frac{\partial x^{i_1}}{\partial y^{a_1}} \dots \frac{\partial x^{i_k}}{\partial y^{a_k}} dy^b \wedge dy^{a_1} \wedge \dots \wedge dy^{a_k} = \\
 &= \frac{\partial}{\partial x^j} (\omega_{i_1 \dots i_k}) \left(\frac{\partial x^j}{\partial y^b} dy^b \right) \wedge \left(\frac{\partial x^{i_1}}{\partial y^{a_1}} dy^{a_1} \right) \wedge \dots \wedge \left(\frac{\partial x^{i_k}}{\partial y^{a_k}} dy^{a_k} \right) = \\
 &= \frac{\partial}{\partial x^j} (\omega_{i_1 \dots i_k}) dx^j \wedge dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k}
 \end{aligned}$$

□_{1. Beweis}

2. Beweis (elegante Methode): Seien $V \subseteq \mathbb{R}^n$, $U \subseteq \mathbb{R}$ offen $\omega \in \Omega^k(V)$ und:

$$f : U \rightarrow V$$

Dann ist der Pushforward

$$f_* : T_p U \rightarrow T_{f(p)} V$$

und der Pullback:

$$\begin{aligned} f^* : \Omega^k(V) &\rightarrow \Omega^k(U) \\ (f^*\omega)(v_1, \dots, v_k) &= \omega(f_*v_1, \dots, f_*v_k) \end{aligned}$$

Behauptung:

$$f^*(d\omega) = d(f^*\omega)$$

Betrachtet man diese Gleichung speziell für $f = y \circ x^{-1}$, so liefert sie gerade das gewünschte Transformationsverhalten der äußeren Ableitung.

Beweis: Sei $\omega \in \Omega^k$ und

$$f : M \rightarrow N$$

diffbar.

$$\begin{aligned} f_* : T_p M &\rightarrow T_{f(p)} N \\ u &\mapsto (\eta \mapsto u(\eta \circ f)) \end{aligned}$$

$$(f_*u)(\eta) = u(\eta \circ f)$$

$$\begin{aligned} f^* : \Omega^k(N) &\rightarrow \Omega^k(M) \\ (f^*\omega)(u_1, \dots, u_k) &:= \omega(f_*u_1, \dots, f_*u_k) \end{aligned}$$

Aus Theorem ??6.3.2 wissen wir:

$$d : \Omega^k(N) \rightarrow \Omega^{k+1}(N)$$

ist linear und es gilt mit der Definition

$$\text{grad}(\omega) := k \quad \Leftrightarrow \quad \omega \in \Omega^k(N)$$

gilt die gradierte Leibniz-Regel

$$d(\omega \wedge \eta) = d\omega \wedge \eta + (-1)^{\text{grad}(\omega)} \omega \wedge d\eta$$

und $d^2 = 0$. Gehe induktiv nach der Stufe von ω vor:

Induktionsanfang bei $k = 0$: Sei $\omega \in \Omega^0(N)$ also $\omega \in C^\infty(N)$. Richtungsableitung:

$$d\omega(u) = u(\omega) = (D\omega)u = D_u\omega$$

Sei $v \in T_p M$, dann ist $f_*v \in T_{f(p)} N$.

$$\begin{aligned} (f^*(d\omega))(v) &= d\omega(f_*v) = (f_*v)(\omega) = v(\omega \circ f) = \\ &= d(\omega \circ f)(v) = d(f^*\omega)(v) \end{aligned}$$

Denn es gilt:

$$\begin{aligned}(f^*\omega)(p) &= \omega|_{f(p)} \\ f^*\omega &= \omega \circ f\end{aligned}$$

$$(f^*\omega)(u_1, \dots, u_k) = \omega(f_*u_1, \dots, f_*u_k) \Big|_{f(p)}$$

Also gilt:

$$f^*(d\omega) = d(f^*\omega)$$

Induktionsschritt $k \rightsquigarrow k+1$: Sei $\omega \in \Omega^k(N)$. Betrachte zunächst die $k+1$ -Form $\omega \wedge dx^i$. Mit der Leibniz-Regel folgt:

$$d(\omega \wedge dx^i) = d\omega \wedge dx^i + (-1)^{\text{grad}(\omega)} \omega \wedge \underbrace{d(dx^i)}_{=0}$$

Mit

$$\begin{aligned}f^*(\omega \wedge \eta)(u_1, \dots, u_k) &= (\omega \wedge \eta)(f_*u_1, \dots, f_*u_k) = \omega(f_*\dots) \cdot \eta(f_*\dots) = \\ &= (f^*\omega) \wedge (f^*\eta)(u_1, \dots, u_k)\end{aligned}$$

folgt:

$$f^*(d(\omega \wedge dx^i)) = f^*(d\omega \wedge dx^i) = f^*(d\omega) \wedge f^*(dx^i)$$

Nach Induktionsvoraussetzung (IV) gilt:

$$f^*(d\omega) = d(f^*\omega)$$

Damit folgt:

$$\begin{aligned}f^*(d(\omega \wedge dx^i)) &= d(f^*\omega) \wedge f^*(dx^i) = d(f^*\omega \wedge f^*dx^i) - (-1)^{\text{grad}(\omega)} \omega \wedge d(f^*dx^i) = \\ &\stackrel{\text{IV}}{=} d(f^*\omega \wedge f^*dx^i) - (-1)^{\text{grad}(\omega)} \omega \wedge f^*d(dx^i) = \\ &= d(f^*(\omega \wedge dx^i))\end{aligned}$$

Verwende nun die Linearität von d und f^* .

□ Behauptung

Das Transformationsverhalten kann man ausdrücken als

$$f^* \underbrace{(d\omega)}_{\text{auf } y(U \cap V) \subseteq \mathbb{R}^n} = d \underbrace{(f^*\omega)}_{\text{auf } x(U \cap V) \subseteq \mathbb{R}^n}$$

mit $f = y \circ x^{-1}$ und ω als Differentialform auf einer offenen Teilmenge des \mathbb{R}^n aufgefasst wird.

□ 2. Beweis

Bemerkung

Es gilt:

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

$$0 \xrightarrow{d} \mathbb{R} \xrightarrow{d} C^\infty(M) = \Omega^0(M) \xrightarrow{d} \Omega^1(M) \xrightarrow{d} \Omega^2(M) \rightarrow \dots \xrightarrow{d} \Omega^n(M) \xrightarrow{d} 0$$

Für den letzten Schritt beachte:

$$d\omega = \frac{\partial}{\partial x^j} \omega_{i_1, \dots, i_k} dx^j \wedge dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k}$$

Im Fall $k = n$ hat man $(n+1)$ -Faktoren dx^{j_l} . Wenigstens zwei der Indizes j_l müssen daher übereinstimmen.

Wegen der Antisymmetrie erhalten wir null.

Außerdem gilt $d^2 = 0$, das heißt es gilt:

$$d(\Omega^k) \subseteq \ker(d|_{\Omega^{k+1}})$$

Außerdem definiere:

$$d : 0 \rightarrow \mathbb{R}$$

$$0 \mapsto 0$$

$$d : \mathbb{R} \rightarrow C^\infty(M)$$

$$\lambda \mapsto (m \mapsto \lambda)$$

Dies nennt man allgemein einen *Kettenkomplex*.

6.3.4 Definition

Der durch die äußere Ableitung gegebene Kettenkomplex heißt *deRham-Komplex*.

Ein $\omega \in \ker(d)$ heißt *geschlossene Differentialform*.

Ein $\omega \in \operatorname{im}(d)$ heißt *exakte Differentialform*.

Bemerkung

$d(\Omega^{k-1}(M))$ sind die exakten Differentialformen.

$\ker(d|_{\Omega^k(M)})$ sind die geschlossenen Differentialformen.

Jede exakte Differentialform ist geschlossen, denn es gilt $d^2 = 0$.

Im Allgemeinen ist aber *nicht* jede geschlossene Differentialform exakt.

6.3.5 Definition (deRham-Kohomologie)

Weil $d\Omega^{k-1}(M) \subseteq \ker(d|_{\Omega^k})$ ein Teilraum ist, kann man die Äquivalenzrelation

$$\omega \sim \omega' \Leftrightarrow \omega - \omega' \in d\Omega^{k-1}(M)$$

auf $\ker(d|_{\Omega^k})$ definieren. Damit ist die *deRham-Kohomologie*

$$H^k(\Omega) := \ker(d|_{\Omega^k(M)}) / d\Omega^{k-1}(M) := \ker(d|_{\Omega^k(M)}) / \sim$$

ein Vektorraum.

$\dim(H^k) \in \mathbb{N}$ beschreibt die Topologie von M .

6.3.6 Definition

Ein offenes Gebiet $A \subseteq \mathbb{R}^n$ heißt sternförmig bezüglich $a \in A$, falls mit jedem $x \in A$ auch

$$\overline{ax} := \{ta + (1-t)x \mid t \in [0,1]\} \subseteq A$$

ist.

TODO: Abb1

6.3.7 Theorem (Poincarésches Lemma)

Sei $A \subseteq \mathbb{R}^n$ sternförmig bezüglich 0. Dann ist jede geschlossene Form auf A exakt.

(Also ist die deRham-Kohomologie trivial.)

Beweis für den Fall $k = 1$

Sei ω eine geschlossene 1-Form, das heißt

$$\omega = \omega_i dx^i$$

$$d\omega = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \partial_i \omega_j - \partial_j \omega_i = 0$$

Für

$$\varphi(x) := \int_0^1 \omega_i(tx) dt x^i$$

gilt:

$$\begin{aligned} d\varphi(x) &= \left(\frac{\partial}{\partial x^j} \varphi(x) \right) dx^j = \left(\int_0^1 t \cdot \underbrace{\partial_j \omega_i}_{=\partial_i \omega_j} \Big|_{tx} dt \right) x^i dx^j + \left(\int_0^1 \omega_i \Big|_{tx} dt \right) \delta_j^i dx^j = \\ &= \left(\int_0^1 t \cdot \underbrace{\partial_j \omega_i}_{=\partial_i \omega_j} \Big|_{tx} dt \right) x^i dx^j + \left(\int_0^1 \omega_j \Big|_{tx} dt \right) dx^j \end{aligned}$$

Es gilt:

$$\partial_j \omega_i \Big|_{tx} x^i dx^j \stackrel{\omega \text{ geschlossen}}{=} \partial_i \omega_j \Big|_{tx} x^i dx^i \stackrel{\text{Kettenregel}}{=} \frac{d}{dt} \omega_j \Big|_{tx} dx^j$$

Es folgt:

$$\begin{aligned} d\varphi(x) &= \left(\int_0^1 t \cdot \partial_j \omega_i \Big|_{tx} dt \right) x^i dx^j + \left(\int_0^1 \omega_j \Big|_{tx} dt \right) dx^j \\ &= \left(\int_0^1 \frac{d}{dt} (t \cdot \omega_j \Big|_{tx}) dt \right) dx^j \stackrel{\text{part. Int.}}{=} \omega_j(x) dx^j \end{aligned}$$

Also ist φ eine 0-Form mit $d\varphi = \omega$, das heißt ω ist exakt.

□ Beweis für $k = 1$

Frobenius „Integrabilitätsbedingungen“

Frage: Sei ω_i gegeben. Gibt es ein φ so, dass $\omega_i = \frac{\partial}{\partial x^i} \varphi$ ist?

Falls ja, folgt $\frac{\partial}{\partial x^j} \omega_i = \frac{\partial^2}{\partial x^i \partial x^j} \varphi$, also gilt $\partial_i \omega_j = \partial_j \omega_i$.

Also ist $\partial_i \omega_j = \partial_j \omega_i$ eine notwendige Bedingung.

Diese Bedingung ist auch hinreichend, wenn das Gebiet einfach zusammenhängend ist.

Beweis für k -Formen

Lasse die Summe über Tensorindizes weg. Sei ω ein k -Form mit $k \geq 1$.

$$\begin{aligned} \varphi &:= \sum_{\alpha=1}^k (-1)^{\alpha-1} \left(\int_0^1 t^{k-1} \omega_{i_1 \dots i_k}(tx) dt \right) x^{i_\alpha} dx^{i_1} \wedge \dots \wedge \widehat{dx^{i_\alpha}} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} \\ d\varphi(x) &= \underbrace{\sum_{\alpha=1}^k (-1)^{\alpha-1} \left(\int_0^1 t^{k-1} \omega_{i_1 \dots i_k}(tx) dt \right) \underbrace{\frac{\partial x^{i_\alpha}}{\partial x^j}}_{=\delta_j^{i_\alpha}} dx^j \wedge dx^{i_1} \wedge \dots \wedge \widehat{dx^{i_\alpha}} \wedge \dots \wedge dx^{i_k}}_{=:A} + \\ &\quad + \underbrace{\sum_{\alpha=1}^k (-1)^{\alpha-1} \left(\int_0^1 t^k \partial_j \omega_{i_1 \dots i_k}(tx) dt \right) x^{i_\alpha} dx^j \wedge dx^{i_1} \wedge \dots \wedge \widehat{dx^{i_\alpha}} \wedge \dots \wedge dx^{i_k}}_{=:B} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A &= \sum_{\alpha=1}^k (-1)^{\alpha-1} \left(\int_0^1 t^{k-1} \omega_{i_1 \dots i_k}(tx) dt \right) dx^{i_\alpha} \wedge dx^{i_1} \wedge \dots \wedge \widehat{dx^{i_\alpha}} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} = \\ &= \sum_{\alpha=1}^k \left(\int_0^1 t^{k-1} \omega_{i_1 \dots i_k}(tx) dt \right) dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_\alpha} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} = \\ &= k \cdot \left(\int_0^1 t^{k-1} \omega_{i_1 \dots i_k}(tx) dt \right) dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} \end{aligned}$$

Für B nenne $j \rightarrow i_\alpha$ und $i_\alpha \rightarrow l$.

$$\begin{aligned} B &= \sum_{\alpha=1}^k (-1)^{\alpha-1} \left(\int_0^1 t^k \partial_{i_\alpha} \omega_{i_1 \dots l \dots i_k}(tx) dt \right) x^l dx^{i_\alpha} \wedge dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_{\alpha-1}} \wedge dx^{i_{\alpha+1}} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} = \\ &= \sum_{\alpha=1}^k \left(\int_0^1 t^k \partial_{i_\alpha} \omega_{i_1 \dots l \dots i_k}(tx) dt \right) x^l dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} \end{aligned}$$

ω ist geschlossen, das heißt:

$$\begin{aligned} 0 &= (\partial_l \omega_{i_1 \dots i_k} - \partial_{i_1} \omega_{l i_1 \dots i_k} - \partial_{i_2} \omega_{i_1 l i_3 \dots i_k} - \dots - \partial_{i_k} \omega_{i_1 \dots i_{k-1} l}) dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} = \\ &= (\partial_l \omega_{i_1 \dots i_k} - k \partial_{i_\alpha} \omega_{i_1 \dots l \dots i_k}) dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} \end{aligned}$$

Also folgt:

$$\partial_{i_\alpha} \omega_{i_1 \dots l \dots i_k} = \frac{1}{k} \partial_l \omega_{i_1 \dots i_k} dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k}$$

Damit erhält man:

$$\begin{aligned} B &= \frac{1}{k} \sum_{\alpha=1}^k \left(\int_0^1 t^k \partial_l \omega_{i_1 \dots i_k}(tx) dt \right) x^l dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} = \\ &= \left(\int_0^1 t^k \partial_l \omega_{i_1 \dots i_k}(tx) dt \right) x^l dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} \end{aligned}$$

Insgesamt gibt das:

$$\begin{aligned}
 d\varphi &= k \cdot \left(\int_0^1 t^{k-1} \omega_{i_1 \dots i_k}(tx) dt \right) dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} + \left(\int_0^1 t^k \partial_l \omega_{i_1 \dots i_k}(tx) dt \right) x^l dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} = \\
 &= \left(\int_0^1 t^{k-1} \omega_{i_1 \dots i_k}(tx) + t^k \partial_l \omega_{i_1 \dots i_k}(tx) dt \right) dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} = \\
 &= \left(\int_0^1 \frac{d}{dt} \left(t^k \omega_{i_1 \dots i_k} \right) \Big|_{tx} dt \right) dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} = \\
 &= \omega_{i_1 \dots i_k}(x) dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_k} = \omega
 \end{aligned}$$

□_{6.3.7}

6.4 Integration von Differentialformen

Sei M^n eine differenzierbare Mannigfaltigkeit (*keine* Riemannsche Metrik), zur Einfachheit kompakt.

Sei $\omega \in \Omega^k(M)$. Was ist $\int_M \omega$?

Für $k \neq n$ geht das nicht.

Für $k = n$ ist:

$$\omega = \omega_{i_1 \dots i_n} dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_n}$$

Beispiel

Hätten wir eine Riemannsche Metrik, könnten wir für ω die Volumenform nehmen:

$$\omega := \sqrt{\det(g)} \epsilon_{i_1 \dots i_n} dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_n}$$

$$\int \omega_{12 \dots n} dx^1 dx^2 \dots dx^n = \int \sqrt{\det g} \underbrace{\epsilon_{1 \dots n}}_{=1} dx^1 \dots dx^n$$

6.4.1 Definition

Sei $(\eta_k)_{k=1, \dots, K}$ eine Zerlegung der Eins, die einem Atlas (x_n, U_n) untergeordnet ist, der endlich gewählt werden kann, da M^n kompakt ist. Also sei $\text{supp}(\eta_k) \subseteq U_{n_k}$.

Für $\varphi \in \Omega^n(M)$ definiere:

$$\int_M \varphi := \sum_{k=1}^K \int_{x_{n_k}(U_{n_k})} (x_{n_k}^{-1})^* (\eta_k \cdot \varphi) \Big|_x \left(\frac{\partial}{\partial x^1}, \dots, \frac{\partial}{\partial x^n} \right) dx^1 \dots dx^n$$

Oder kürzer:

$$\int_M \varphi = \sum_k \int \eta_k \varphi_{1 \dots n}(x) dx^1 \dots dx^n$$

Denn es gilt:

$$\varphi = \varphi_{i_1 \dots i_n}(x) dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_n}$$

$$\varphi \left(\frac{\partial}{\partial x^1}, \dots, \frac{\partial}{\partial x^n} \right) = \varphi_{12 \dots n}(x)$$

6.4.2 Satz

Das Integral aus Definition 6.4.1 ist unabhängig von der Wahl der Karten und der Zerlegung der Eins definiert.

Beweis

Auf M gibt es eine Riemannsche Metrik g .

In jeder Karte ist dann bis auf ein Vorzeichen eine eindeutige n -Form

$$\varepsilon = \pm \sqrt{\det g} \epsilon_{i_1 \dots i_n} dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_n}$$

gegeben. Da die n -Formen in jedem Punkt bis auf ein Vielfaches eindeutig sind, können wir φ in der Form

$$\varphi = f \cdot \varepsilon$$

mit $f \in C^\infty(U)$ schreiben, also:

$$\varphi_{i_1 \dots i_n}(x) = f(x) \sqrt{\det(g)} \epsilon_{i_1 \dots i_n}$$

Es folgt:

$$\int \eta_k \varphi_{1 \dots n}(x) dx^1 \dots dx^n = \int_{\mathbb{R}^n} \eta_k f(x) \sqrt{\det g} \underbrace{\epsilon_{12 \dots n}}_{=1} dx^1 \dots dx^n = \int \eta_k f d\mu_g$$

Hieran sieht man, dass das Integral unabhängig von Kartenwechseln ist, welche die Orientierung erhalten.

Bei Kartenwechseln, die die Orientierung umkehren, kehrt sich das Vorzeichen von f und ε um, das Integral bleibt wieder erhalten. $\square_{6.4.2}$

Oder durch elementare Rechnung:

$$\omega = \omega_{i_1 \dots i_n}(x) dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_n}$$

$$dx^i = \frac{\partial x^i}{\partial y^j} dy^j$$

Damit folgt:

$$\omega = \omega_{i_1 \dots i_n} \frac{\partial x^{i_1}}{\partial y^{j_1}} \dots \frac{\partial x^{i_n}}{\partial y^{j_n}} dy^{j_1} \wedge \dots \wedge dy^{j_n} = \left(\det \frac{\partial x^i}{\partial y^j} \right) \cdot \omega_{j_1 \dots j_n} dy^{j_1} \wedge \dots \wedge dy^{j_n}$$

$$\omega_{1 \dots n}(y) = \det \left(\frac{\partial x^i}{\partial y^j} \right) \omega_{1 \dots n}(x)$$

$$\int \eta_k \omega_{1 \dots n}(y) dy^1 \dots dy^n = \int \eta_k \omega_{1 \dots n}(x) \underbrace{\det \left(\frac{\partial x^i}{\partial y^j} \right) dy^1 \dots dy^n}_{=: dx^1 \dots dx^n}$$

$\square_{2. \text{Beweis}}$

6.5 Der Satz von Stokes

6.5.1 Theorem

Sei M^n eine kompakte differenzierbare Mannigfaltigkeit (ohne Rand) und $\omega \in \Omega^{n-1}(M)$. Dann gilt für die äußere Ableitung $d\omega \in \Omega^n(M)$:

$$\int_M (d\omega) = 0$$

Später: Mannigfaltigkeit mit Rand:

$$\int_M d\omega = \int_{\partial M} \omega$$

Anhang

Danksagungen

Mein besonderer Dank geht an Professor Finster, der diese Vorlesung hielt und es mir gestattete, diese Vorlesungsmitschrift zu veröffentlichen.

Außerdem möchte ich mich ganz herzlich bei allen bedanken, die durch aufmerksames Lesen Fehler gefunden und mir diese mitgeteilt haben.

Andreas Völklein

GNU Free Documentation License

Version 1.3, 3 November 2008

Copyright © 2000, 2001, 2002, 2007, 2008 Free Software Foundation, Inc.

`<https://fsf.org/>`

Everyone is permitted to copy and distribute verbatim copies of this license document, but changing it is not allowed

0. PREAMBLE

The purpose of this License is to make a manual, textbook, or other functional and useful document “free” in the sense of freedom: to assure everyone the effective freedom to copy and redistribute it, with or without modifying it, either commercially or noncommercially. Secondly, this License preserves for the author and publisher a way to get credit for their work, while not being considered responsible for modifications made by others.

This License is a kind of “copyleft”, which means that derivative works of the document must themselves be free in the same sense. It complements the GNU General Public License, which is a copyleft license designed for free software.

We have designed this License in order to use it for manuals for free software, because free software needs free documentation: a free program should come with manuals providing the same freedoms that the software does. But this License is not limited to software manuals; it can be used for any textual work, regardless of subject matter or whether it is published as a printed book. We recommend this License principally for works whose purpose is instruction or reference.

1. APPLICABILITY AND DEFINITIONS

This License applies to any manual or other work, in any medium, that contains a notice placed by the copyright holder saying it can be distributed under the terms of this License. Such a notice grants a world-wide, royalty-free license, unlimited in duration, to use that work under the conditions stated herein. The “**Document**”, below, refers to any such manual or work. Any member of the public is a licensee, and is addressed as “**you**”. You accept the license if you copy, modify or distribute the work in a way requiring permission under copyright law.

A “**Modified Version**” of the Document means any work containing the Document or a portion of it, either copied verbatim, or with modifications and/or translated into another language.

A “**Secondary Section**” is a named appendix or a front-matter section of the Document that deals exclusively with the relationship of the publishers or authors of the Document to the Document’s overall subject (or to related matters) and contains nothing that could fall directly within that overall subject. (Thus, if the Document is in part a textbook of mathematics, a Secondary Section may not explain any mathematics.) The relationship could be a matter of historical connection with the subject or with related matters, or of legal, commercial, philosophical, ethical or political position regarding them.

The “**Invariant Sections**” are certain Secondary Sections whose titles are designated, as being those of Invariant Sections, in the notice that says that the Document is released under this License. If a section does not fit the above definition of Secondary then it is not allowed to be designated as Invariant. The Document may contain zero Invariant Sections. If the Document does not identify any Invariant Sections then there are none.

The “**Cover Texts**” are certain short passages of text that are listed, as Front-Cover Texts or Back-Cover Texts, in the notice that says that the Document is released under this License. A Front-Cover Text may be at most 5 words, and a Back-Cover Text may be at most 25 words.

A “**Transparent**” copy of the Document means a machine-readable copy, represented in a format whose specification is available to the general public, that is suitable for revising the document straightforwardly with generic text editors or (for images composed of pixels) generic paint programs or (for drawings) some widely available drawing editor, and that is suitable for input to text formatters or for automatic translation to a variety of formats suitable for input to text formatters. A copy made in an otherwise Transparent file format whose markup, or absence of markup, has been arranged to thwart or discourage subsequent modification by readers is not Transparent. An image format is not Transparent if used for any substantial amount of text. A copy that is not “Transparent” is called “**Opaque**”.

Examples of suitable formats for Transparent copies include plain ASCII without markup, Texinfo input format, L^AT_EX input format, SGML or XML using a publicly available DTD, and standard-conforming simple HTML, PostScript or PDF designed for human modification. Examples of transparent image formats include PNG, XCF and JPG. Opaque formats include proprietary formats that can be read and edited only by proprietary word processors, SGML or XML for which the DTD and/or processing tools are not generally available, and the machine-generated HTML, PostScript or PDF produced by some word processors for output purposes only.

The “**Title Page**” means, for a printed book, the title page itself, plus such following pages as are needed to hold, legibly, the material this License requires to appear in the title page. For works in formats which do not have any title page as such, “Title Page” means the text near the most prominent appearance of the work’s title, preceding the beginning of the body of the text.

The “**publisher**” means any person or entity that distributes copies of the Document to the public.

A section “**Entitled XYZ**” means a named subunit of the Document whose title either is precisely XYZ or contains XYZ in parentheses following text that translates XYZ in another language. (Here XYZ stands for a specific section name mentioned below, such as “**Acknowledgements**”, “**Dedications**”, “**Endorsements**”, or “**History**”.) To “**Preserve the Title**” of such a section when you modify the Document means that it remains a section “Entitled XYZ” according to this definition.

The Document may include Warranty Disclaimers next to the notice which states that this License applies to the Document. These Warranty Disclaimers are considered to be included by reference in this License, but only as regards disclaiming warranties: any other implication that

these Warranty Disclaimers may have is void and has no effect on the meaning of this License.

2. VERBATIM COPYING

You may copy and distribute the Document in any medium, either commercially or noncommercially, provided that this License, the copyright notices, and the license notice saying this License applies to the Document are reproduced in all copies, and that you add no other conditions whatsoever to those of this License. You may not use technical measures to obstruct or control the reading or further copying of the copies you make or distribute. However, you may accept compensation in exchange for copies. If you distribute a large enough number of copies you must also follow the conditions in section 3.

You may also lend copies, under the same conditions stated above, and you may publicly display copies.

3. COPYING IN QUANTITY

If you publish printed copies (or copies in media that commonly have printed covers) of the Document, numbering more than 100, and the Document's license notice requires Cover Texts, you must enclose the copies in covers that carry, clearly and legibly, all these Cover Texts: Front-Cover Texts on the front cover, and Back-Cover Texts on the back cover. Both covers must also clearly and legibly identify you as the publisher of these copies. The front cover must present the full title with all words of the title equally prominent and visible. You may add other material on the covers in addition. Copying with changes limited to the covers, as long as they preserve the title of the Document and satisfy these conditions, can be treated as verbatim copying in other respects.

If the required texts for either cover are too voluminous to fit legibly, you should put the first ones listed (as many as fit reasonably) on the actual cover, and continue the rest onto adjacent pages.

If you publish or distribute Opaque copies of the Document numbering more than 100, you must either include a machine-readable Transparent copy along with each Opaque copy, or state in or with each Opaque copy a computer-network location from which the general network-using public has access to download using public-standard network protocols a complete Transparent copy of the Document, free of added material. If you use the latter option, you must take reasonably prudent steps, when you begin distribution of Opaque copies in quantity, to ensure that this Transparent copy will remain thus accessible at the stated location until at least one year after the last time you distribute an Opaque copy (directly or through your agents or retailers) of that edition to the public.

It is requested, but not required, that you contact the authors of the Document well before redistributing any large number of copies, to give them a chance to provide you with an updated version of the Document.

4. MODIFICATIONS

You may copy and distribute a Modified Version of the Document under the conditions of sections 2 and 3 above, provided that you release the Modified Version under precisely this License, with the Modified Version filling the role of the Document, thus licensing distribution

and modification of the Modified Version to whoever possesses a copy of it. In addition, you must do these things in the Modified Version:

- A. Use in the Title Page (and on the covers, if any) a title distinct from that of the Document, and from those of previous versions (which should, if there were any, be listed in the History section of the Document). You may use the same title as a previous version if the original publisher of that version gives permission.
- B. List on the Title Page, as authors, one or more persons or entities responsible for authorship of the modifications in the Modified Version, together with at least five of the principal authors of the Document (all of its principal authors, if it has fewer than five), unless they release you from this requirement.
- C. State on the Title page the name of the publisher of the Modified Version, as the publisher.
- D. Preserve all the copyright notices of the Document.
- E. Add an appropriate copyright notice for your modifications adjacent to the other copyright notices.
- F. Include, immediately after the copyright notices, a license notice giving the public permission to use the Modified Version under the terms of this License, in the form shown in the Addendum below.
- G. Preserve in that license notice the full lists of Invariant Sections and required Cover Texts given in the Document's license notice.
- H. Include an unaltered copy of this License.
- I. Preserve the section Entitled "History", Preserve its Title, and add to it an item stating at least the title, year, new authors, and publisher of the Modified Version as given on the Title Page. If there is no section Entitled "History" in the Document, create one stating the title, year, authors, and publisher of the Document as given on its Title Page, then add an item describing the Modified Version as stated in the previous sentence.
- J. Preserve the network location, if any, given in the Document for public access to a Transparent copy of the Document, and likewise the network locations given in the Document for previous versions it was based on. These may be placed in the "History" section. You may omit a network location for a work that was published at least four years before the Document itself, or if the original publisher of the version it refers to gives permission.
- K. For any section Entitled "Acknowledgements" or "Dedications", Preserve the Title of the section, and preserve in the section all the substance and tone of each of the contributor acknowledgements and/or dedications given therein.
- L. Preserve all the Invariant Sections of the Document, unaltered in their text and in their titles. Section numbers or the equivalent are not considered part of the section titles.
- M. Delete any section Entitled "Endorsements". Such a section may not be included in the Modified Version.
- N. Do not retitle any existing section to be Entitled "Endorsements" or to conflict in title with any Invariant Section.
- O. Preserve any Warranty Disclaimers.

If the Modified Version includes new front-matter sections or appendices that qualify as Secondary Sections and contain no material copied from the Document, you may at your option designate some or all of these sections as invariant. To do this, add their titles to the list of Invariant Sections in the Modified Version's license notice. These titles must be distinct from any other section titles.

You may add a section Entitled "Endorsements", provided it contains nothing but endorsements of your Modified Version by various parties—for example, statements of peer review or that the text has been approved by an organization as the authoritative definition of a standard.

You may add a passage of up to five words as a Front-Cover Text, and a passage of up to 25 words as a Back-Cover Text, to the end of the list of Cover Texts in the Modified Version. Only one passage of Front-Cover Text and one of Back-Cover Text may be added by (or through arrangements made by) any one entity. If the Document already includes a cover text for the same cover, previously added by you or by arrangement made by the same entity you are acting on behalf of, you may not add another; but you may replace the old one, on explicit permission from the previous publisher that added the old one.

The author(s) and publisher(s) of the Document do not by this License give permission to use their names for publicity for or to assert or imply endorsement of any Modified Version.

5. COMBINING DOCUMENTS

You may combine the Document with other documents released under this License, under the terms defined in section 4 above for modified versions, provided that you include in the combination all of the Invariant Sections of all of the original documents, unmodified, and list them all as Invariant Sections of your combined work in its license notice, and that you preserve all their Warranty Disclaimers.

The combined work need only contain one copy of this License, and multiple identical Invariant Sections may be replaced with a single copy. If there are multiple Invariant Sections with the same name but different contents, make the title of each such section unique by adding at the end of it, in parentheses, the name of the original author or publisher of that section if known, or else a unique number. Make the same adjustment to the section titles in the list of Invariant Sections in the license notice of the combined work.

In the combination, you must combine any sections Entitled "History" in the various original documents, forming one section Entitled "History"; likewise combine any sections Entitled "Acknowledgements", and any sections Entitled "Dedications". You must delete all sections Entitled "Endorsements".

6. COLLECTIONS OF DOCUMENTS

You may make a collection consisting of the Document and other documents released under this License, and replace the individual copies of this License in the various documents with a single copy that is included in the collection, provided that you follow the rules of this License for verbatim copying of each of the documents in all other respects.

You may extract a single document from such a collection, and distribute it individually under this License, provided you insert a copy of this License into the extracted document, and follow this License in all other respects regarding verbatim copying of that document.

7. AGGREGATION WITH INDEPENDENT WORKS

A compilation of the Document or its derivatives with other separate and independent documents or works, in or on a volume of a storage or distribution medium, is called an “aggregate” if the copyright resulting from the compilation is not used to limit the legal rights of the compilation’s users beyond what the individual works permit. When the Document is included in an aggregate, this License does not apply to the other works in the aggregate which are not themselves derivative works of the Document.

If the Cover Text requirement of section 3 is applicable to these copies of the Document, then if the Document is less than one half of the entire aggregate, the Document’s Cover Texts may be placed on covers that bracket the Document within the aggregate, or the electronic equivalent of covers if the Document is in electronic form. Otherwise they must appear on printed covers that bracket the whole aggregate.

8. TRANSLATION

Translation is considered a kind of modification, so you may distribute translations of the Document under the terms of section 4. Replacing Invariant Sections with translations requires special permission from their copyright holders, but you may include translations of some or all Invariant Sections in addition to the original versions of these Invariant Sections. You may include a translation of this License, and all the license notices in the Document, and any Warranty Disclaimers, provided that you also include the original English version of this License and the original versions of those notices and disclaimers. In case of a disagreement between the translation and the original version of this License or a notice or disclaimer, the original version will prevail.

If a section in the Document is Entitled “Acknowledgements”, “Dedications”, or “History”, the requirement (section 4) to Preserve its Title (section 1) will typically require changing the actual title.

9. TERMINATION

You may not copy, modify, sublicense, or distribute the Document except as expressly provided under this License. Any attempt otherwise to copy, modify, sublicense, or distribute it is void, and will automatically terminate your rights under this License.

However, if you cease all violation of this License, then your license from a particular copyright holder is reinstated (a) provisionally, unless and until the copyright holder explicitly and finally terminates your license, and (b) permanently, if the copyright holder fails to notify you of the violation by some reasonable means prior to 60 days after the cessation.

Moreover, your license from a particular copyright holder is reinstated permanently if the copyright holder notifies you of the violation by some reasonable means, this is the first time you have received notice of violation of this License (for any work) from that copyright holder, and you cure the violation prior to 30 days after your receipt of the notice.

Termination of your rights under this section does not terminate the licenses of parties who have received copies or rights from you under this License. If your rights have been terminated and not permanently reinstated, receipt of a copy of some or all of the same material does not give you any rights to use it.

10. FUTURE REVISIONS OF THIS LICENSE

The Free Software Foundation may publish new, revised versions of the GNU Free Documentation License from time to time. Such new versions will be similar in spirit to the present version, but may differ in detail to address new problems or concerns. See <https://www.gnu.org/copyleft/>.

Each version of the License is given a distinguishing version number. If the Document specifies that a particular numbered version of this License "or any later version" applies to it, you have the option of following the terms and conditions either of that specified version or of any later version that has been published (not as a draft) by the Free Software Foundation. If the Document does not specify a version number of this License, you may choose any version ever published (not as a draft) by the Free Software Foundation. If the Document specifies that a proxy can decide which future versions of this License can be used, that proxy's public statement of acceptance of a version permanently authorizes you to choose that version for the Document.

11. RELICENSING

"Massive Multiauthor Collaboration Site" (or "MMC Site") means any World Wide Web server that publishes copyrightable works and also provides prominent facilities for anybody to edit those works. A public wiki that anybody can edit is an example of such a server. A "Massive Multiauthor Collaboration" (or "MMC") contained in the site means any set of copyrightable works thus published on the MMC site.

"CC-BY-SA" means the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 license published by Creative Commons Corporation, a not-for-profit corporation with a principal place of business in San Francisco, California, as well as future copyleft versions of that license published by that same organization.

"Incorporate" means to publish or republish a Document, in whole or in part, as part of another Document.

An MMC is "eligible for relicensing" if it is licensed under this License, and if all works that were first published under this License somewhere other than this MMC, and subsequently incorporated in whole or in part into the MMC, (1) had no cover texts or invariant sections, and (2) were thus incorporated prior to November 1, 2008.

The operator of an MMC Site may republish an MMC contained in the site under CC-BY-SA on the same site at any time before August 1, 2009, provided the MMC is eligible for relicensing.

ADDENDUM: How to use this License for your documents

To use this License in a document you have written, include a copy of the License in the document and put the following copyright and license notices just after the title page:

Copyright © YEAR YOUR NAME.

Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.3 or any later version published by the Free Software Foundation;

with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts.

A copy of the license is included in the section entitled "GNU Free Documentation License".

If you have Invariant Sections, Front-Cover Texts and Back-Cover Texts, replace the "with ... Texts." line with this:

with the Invariant Sections being LIST THEIR TITLES, with the Front-Cover Texts being LIST, and with the Back-Cover Texts being LIST.

If you have Invariant Sections without Cover Texts, or some other combination of the three, merge those two alternatives to suit the situation.

If your document contains nontrivial examples of program code, we recommend releasing these examples in parallel under your choice of free software license, such as the GNU General Public License, to permit their use in free software.