Analysis III, Wintersemester 2013-2014, Prof. Dr. Singhof

Marten Lienen

17. Januar 2014

Kapitel 1

Maß- und Integrationstheorie

Kapitel 2

Vektoranalysis

§10 Untermannigfaltigkeiten des $\mathbb{R}^n$

§11 Zusammenhängende metrische Räume

Beweis. Beweisskizee als Hilfestellung für Übung:

a) Sei M zusammenhängend. Sei $x_0 \in M$. Sei $A := \{x \in M \mid \textit{es gibt einen Weg } w : [0,1] \to M \textit{ mit } w(0) = x_0 \textit{ und } w(1) =$
Zu zeigen: $A = M$. Dann ist $A \neq \emptyset$, denn $x_0 \in A$.

   A ist offen in M Sei $a \in A$. Nach der Folgerung aus Satz 1 von §10 besitzt a eine Umgebung U in M, die homöomorph zu $\mathbb{R}^n$ ist. Ist $x \in U$, so gibt es einen Weg w in U mit $w(0) = a$, $w(1) = x$. Es gibt einen Weg v von x_0 nach a. Deshalb gibt es auch einen Weg von x_0 nach x.

   A ist abgeschlossen in M Weil M zusammenhängend ist, folgt $A = M$.

b) Ähnlich

c) folgt direkt aus b)

□

§12 Kompakte metrische Räume

Definition. *Ist X eine Menge und ist $\{A_i \mid i \in \Lambda\}$ eine Menge von Teilmengen von X so heißt $\{A_i \mid i \in \Lambda\}$ eine Überdeckung von X, wenn $X = \cup_{i\in\Lambda} A_i$.*

Definition. *Sei X ein metrischer Raum und $\{A_i \mid i \in \Lambda\}$ eine Überdeckung von X. Dann heißt $\{A_i \mid i \in \Lambda\}$ eine offene Überdeckung von X, wenn alle A_i offen in X sind.*

Definition. *Ein metrischer Raum heißt kompakt, wenn jede offene Überdeckung von X eine endliche Teilüberdeckung besitzt, wenn also gilt: Ist $\{A_i \mid i \in \Lambda\}$ eine offene Überdeckung von X, so gibt es $n \in \mathbb{N}$ und $i_1, \dots, i_n \in \Lambda$ mit $X = A_{i_1} \cup \dots \cup A_{i_n}$.*

Bemerkung. *Eine Teilmenge A eines metrischen Raumes X ist genau dann kompakt, wenn gilt: Sind $A_i (i \in \Lambda)$ offene Teilmengen von X mit $A \subseteq \cup_{i\in\Lambda} A_i$, so gibt es ein $n \in \mathbb{N}$ und $i_1, \dots, i_n \in \Lambda$ mit $A \subseteq A_{i_1} \cup \dots \cup A_{i_n}$.*

Satz 1. *Seien X, Y metrische Räume und sei $f : X \to Y$ stetig. Ist K eine kompakte Teilmenge von X, so ist $f(K)$ kompakt.*

Beweis. Seien $A_i (i \in \Lambda))$ offene Teilmengen von Y mit $f(K) \subseteq \cup_{i\in\Lambda} A_i$. Weil f stetig ist, ist $f^{-1}(A_i)$ offen in X $\forall i \in \Lambda$. Es ist $K \subseteq f^{-1}(\cup_{i\in\Lambda}) A_i = \cup_{i\in\Lambda} f^{-1}(A_i)$. Es gibt also ein $n \in \mathbb{N}$ und $i_1, \dots, i_n \in \Lambda$ mit $K \subseteq f^{-1}(A_{i_1}) \cup \dots \cup f^{-1}(A_{i_n})$. Daraus folgt

$$f(K) \subseteq f(f^{-1}(A_{i_1}) \cup \dots \cup f^{-1}(A_{i_n})) = f(f^{-1}(A_{i_1})) \cup \dots \cup f(f^{-1}(A_{i_n})) = A_{i_1} \cup \dots \cup A_{i_n} \tag{2.1}$$

□

Satz 2. *Jede abgeschlossene Teilmenge A eines kompakten metrischen Raumes X ist kompakt.*

Beweis. Seien $A_i (i \in \Lambda))$ offene Teilmengen von X mit $A \subseteq \cup_{i \in \Lambda} A_i$. Die A_i zusammen mit $X \setminus A$ bilden eine offene Überdeckung von X. Weil X kompakt ist, gibt es eine endliche Teilüberdeckung von X, d.h. es gibt ein $n \in \mathbb{N}$ und $i_1, \ldots, i_n \in \Lambda$ mit $X = A_{i_i} \cup \cdots \cup A_{i_n} \cup (X \setminus A) \Rightarrow A \setminus A_{i_1} \cup \cdots \cup A_{i_n}$. □

Satz 3. *Jede kompakte Teilmenge A eines metrischen Raumes X ist abgeschlossen in X.*

Beweis. Zeige $X \setminus A$ ist offen in X. Sei $x \in X \setminus A$. Wir wollen zeigen: $X \setminus A$ ist Umgebung von x in X. Ist $y \in A$, so ist $y \neq x$; deswegen gibt es offene Teilmengen $U_y und V_y$ von X mit $x \in U_y$, $y \in V_y$ und $U_y \cap V_y = \emptyset$. Dann ist $A \subseteq \cup_{y \in A} V_y$. Weil A kompakt ist, gibt es ein $n \in \mathbb{N}$ und Punkte $y_1, \ldots, y_n \in A$ mit $A \subseteq V_{y_1} \cup \cdots \cup V_{y_n} = V$. Sei $U := U_{y_1} \cap \cdots \cap U_{Y-n}$. Dann ist U eine offene Umgebung von x mit $U \cap V = \emptyset$, also $U \subseteq X \setminus A$. □

Satz 4. *Seien X, Y metrische Räume; X sei kompakt und $f : X \to Y$ sei stetig und bijektiv. Dann ist $f^{-1} : Y \to X$ stetig. Deswegen ist f ein Homöomorphismus.*

Beweis. Wir zeigen: Ist A abgeschlossen in X, so ist $f(A) = (f^{-1})^{-1}(A)$ abgeschlossen in Y. Nach Satz 2 ist A abgeschlossen $\Rightarrow$ nach Satz 1 ist $f(A)$ kompakt $\Rightarrow$ nach Satz 3 $f(A)$ ist abgeschlossen in Y. □

Definition. *Sei X ein metrischer Raum, (x_n) eine Folge in X und $a \in X$. Dann heißt a ein Häufungspunkt von (x_n), wenn es eine Teilfolge von (x_n) gibt, die gegen a konvergiert; äquivalent dazu: Wenn es für jede Umgebung U von a in X unendlich viele $n \in \mathbb{N}$ gibt mit $x_n \in U$.*

Satz 5. *Sei X ein metrischer Raum. Äquivalent sind:*

a) X ist kompakt

b) Jede Folge in X besitzt eine Häufungspunkt in X

c) X ist vollständig und für jedes $\varepsilon > 0$ gibt es ein $n \in \mathbb{N}$ und $x_n, \ldots, x_n \in X$ mit $X = \cup_{i=1}^n B_\varepsilon(x_i)$

Beweis. *a)* $\Rightarrow$ *b)*: Sei X kompakt und (x_n) eine Folge in X. Sei F_n der Abschluss der Menge $\{x_n, x_{n+1}, x_{n+2}, \ldots\}$ in X. Wir werden zeigen, dass $\cap_{n=1}^\infty F_n \neq \emptyset$. (Ein Element von $\cap_{n=1}^\infty F_n$ ist ein Häufungspunkt von (x_n))

Angenommen, es sei $\cap_{n=1}^\infty F_n = \emptyset$. Sei $A_n := X \setminus F_n$. Dann ist A_n offen in X und $\cap_{n=1}^\infty A_n = \cap_n (X \setminus F_n) = X \setminus \cap_n F_n = X$. Deswegen bilden die A_n mit $n \in \mathbb{N}$ eine offene Überdeckung von X. Weil X kompakt ist, gibt es $n_n, \ldots, n_k \in \mathbb{N}$ mit $X = A_{n_1} \cup \cdots \cup A_{n_k}$. Für $n \geq m$ ist $F_n \subseteq F_m$, also $A_n \supseteq A_m$. Ist $n_0 = \max\{n_1, \ldots, n_k\}$, so ist also $X = A_{n_0} \Rightarrow F_{n_0} = \emptyset$, Widerspruch, da $x_{n_0} \in F_{n_0}$.

b) $\Rightarrow$ *c)*: Sei (x_n) eine Cauchy-Folge in X. Dann besitzt (x_n) einen Häufungspunkt a, d.h. eine Teilfolge von (x_n) konvergiert gegen a. Nach Aufgabe 40 konvergiert (x_n) gegen a. Deswegen ist X vollständig.

Sei $\varepsilon > 0$. Angenommen X ist nicht die Vereinigung von endlich vielen Kugeln von Radius ε. Dann definiert man induktiv eine Folge (x_n) in X, so dass gilt: Ist $n \neq m$, so ist $d(x_n, x_m) \geq \varepsilon$. Dann kann (x_n) keinen Häufungspunkt besitzen, Widerspruch.

c) $\Rightarrow$ *a)*: Sei $\{A_i \mid i \in \Lambda\}$ offene Überdeckung von X. Angenommen, es gäbe keine endliche Teilüberdeckung. Wir werden induktiv eine Folge (B_n) von Kugeln vom Radius $\frac{1}{2^n}$ definieren, von denen jede nicht durch endlich viele A_i überdeckt wird:

$n = 0$ Nach Vorraussetzung wird X von endlich vielen Kugeln vom Radius 1 überdeckt. Von diesen kann eine nicht von endlich vielen A_i überdeckt werden; nenne sie B_0.

$n - 1 \to n$ Sei bereits B_{n-1} konstruiert. Weil X von endlich vielen Kugeln vom Radius $\frac{1}{2^n}$ überdeckt wird, gibt es unter diesen eine, die nicht von endlich vielen der A_i überdeckt wird und nicht-leeren Schnitt mit B_{n-1} hat. B_n habe den Mittelpunkt x_n. Wegen $B_n \cap B_{n-1} \neq \emptyset$ ist $d(x_n, x_{n-1}) \leq \frac{1}{2^n} + \frac{1}{2^{n-1}} \leq \frac{1}{2^{n-2}}$. Ist also $n \leq p < q$, so $d(x_p, x_q) \leq d(x_p, x_{p-1}) + \cdots + d(x_{q-1}, x_q) \leq \frac{1}{2^{p-2}} \leq \frac{1}{2^{n-2}}$.

Deswegen ist (x_n) eine Cauchy-Folge, konvergiert also gegen ein $a \in X$. Es gibt ein $i_0 \in \Lambda$ mit $a \in A_{i_0}$. Da A_{i_0} offen ist, existiert $\varepsilon > 0$ mit $B_\varepsilon(a) \subseteq A_{i_0}$. Für großes n ist $x_n \in B_{\frac{\varepsilon}{2}}(a)$ und $B_n \subseteq B_\varepsilon(a)$. Daher ist B_n für großes n in A_{i_0} enthalten, Widerspruch. □

Satz 6 (Heine-Borel)**.** *Für eine Teilmenge X von $\mathbb{R}^n$ sind äquivalent:*

a) X ist kompakt

b) X ist beschränkt und abgeschlossen in $\mathbb{R}^n$

Beweis. *a)* $\Rightarrow$ *b)*: Ist X kompakt, so ist X abgeschlossen in $\mathbb{R}^n$ nach Satz 3. Nach Satz 5 wird X durch endlich viele Kugeln vom Radius 1 überdeckt, ist also beschränkt.

b) $\Rightarrow$ *a)*: Weise Bedingung *c)* vom Satz 5 nach:

- X ist vollständig: Sei (x_m) eine Cauchy-Folge in X. Weil $\mathbb{R}^n$ vollständig ist, konvergiert (x_m) gegen ein $a \in \mathbb{R}^n$. Weil X abgeschlossen in $\mathbb{R}^n$ ist, ist $a \in X$.

- Weil X beschränkt ist, wird X für jedes $\varepsilon > 0$ durch endlich viele $B_\varepsilon(x_i)$ überdeckt.

$\square$

Definition. *Ein metrischer Raum X heißt lokalkompakt, wenn jeder Punkt $a \in X$ eine kompakte Umgebung in X besitzt.*

Beispiel.
- *$\mathbb{R}^n$ ist lokalkompakt, aber nicht kompakt*
- *Jede Untermannigfaltigkeit des $\mathbb{R}^n$ ist lokalkompakt*

§13 Tangentialräume und Orientierungen

Definition. *Sei M eine n-dimensionale Untermannigfaltigkeit von $\mathbb{R}^n$ und $a \in M$. Ein Element $v \in \mathbb{R}^n$ heißt Tangentialvektor an M im Punkt a, wenn es ein offenes Intervall I in $\mathbb{R}$ mit $0 \in I$ und eine C^1-Abbildung $\psi : I \to \mathbb{R}^n$ gibt mit:*

- $\psi(I) \in M$
- $\psi(0) = a$
- $\psi'(0) = v$

Mit $T_a(M)$ bezeichnet man die Menge aller Tangentialvektoren an M im Punkt a und nennt $T_a(M)$ den Tangentialraum an M in a.

Satz 1. *Sei M eine n-dimensionaler linearer Teilraum von $\mathbb{R}^n$.*

a) $T_a(M)$ ist en n-dimensionaler linearer Teilraum von $\mathbb{R}^n$

b) Sei $\varphi : W \to V$ eine Karte von M und $a \in V$. Sei $b \in W$ mit $\varphi(b) = a$. Dann ist $T_a(M) = Bild(D\varphi(b)) = \{D\varphi(b) \cdot u \mid u \in \mathbb{R}^n\}$

c) Sei U eine offene Umgebung von a in $\mathbb{R}^n$ und sei $g : U \to \mathbb{R}^{N-n}$ eine Submersion mit $M \cap U = \{x \in U \mid g(x) = 0\}$. Dann ist:

$$T_a(M) = Kern(Dg(a)) = \{v \in \mathbb{R}^n \mid Dg(a) \cdot v = 0\} \tag{2.2}$$

Beweis. Analysis II, §16, Satz 5 $\square$

Beispiel.

$$M = S^{N-1} \tag{2.3}$$

Sei $U = \{x \in \mathbb{R}^N \mid x \neq 0\}$ und $g : U \to \mathbb{R}$ gegeben durch $g(x) = x_1^2 + \cdots + x_N^2 - 1$. Dann ist $S^{N-1} = \{x \in U \mid g(x) = 0\}$.

$$Dg(x) = 2x^T \tag{2.4}$$

Nach Satz 1c) ist $T_a(S^{N-1}) = \{v \in \mathbb{R}^n \mid 2a^T v = 0\} = a^T$.

Beispiel. *Sei M ein n-dimensionaler affiner Teilraum von $\mathbb{R}^N$, d.h. es gibt ein $x_0 \in \mathbb{R}^N$ und einen n-dimensionalen linearen Teilraum E von $\mathbb{R}^n$ mit $M = x_0 + E$. Dann ist M eine n-dimensionale Untermannigfaltigkeit von $\mathbb{R}^N$: Sei $h : \mathbb{R}^n \to E$ ein linearer Isomorphismus. Sei $\varphi(y) := x_0 + h(y)$, $\varphi : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^N$. Für $y \in \mathbb{R}^n$ ist $D\varphi(y) \cdot u = h(u)$. Deswegen ist φ eine Karte von M mit $\varphi(\mathbb{R}^n) = M$. Sei $a \in M$ und $b \in \mathbb{R}^n$ mit $\varphi(b) = a$. Nach Satz 1b) ist $T_a(M) = Bild(D\varphi(b)) = Bild(h) = E$.*

Beispiel. *Sei M wie im vorigen Beispiel und sei U offen in M. Dann ist U eine n-dimensionale Untermannigfaltigkeit von $\mathbb{R}^N$ und für $a \in U$ ist $T_a(u) = E$.*

Definition. *Sei M eine n-dimensionale Untermannigfaltigkeit von $\mathbb{R}^n$ und $a \in M$. Ein Element $v \in \mathbb{R}^N$ heißt Normalenvektor an M in a, wenn $\langle v \mid w \rangle = 0 \forall w \in T_a(M)$. Die Menge aller Normalenvektoren an M in a wird mit $N_a(M)$ bezeichnet und heißt der Normalenraum an M in a.*

$$N_a(M) = T_a(M)^T \tag{2.5}$$

Dies ist ein $(N - n)$-dimensionaler Teilraum vom $\mathbb{R}^n$.

Beispiel.

$$N_a(S^{n-1}) = \mathbb{R} \cdot a \tag{2.6}$$

Definition. *Sei M eine Hyperfläche in $\mathbb{R}^N$. Ein Einheitsnormalenfeld auf M ist eine stetige Abbildung $\nu : M \to \mathbb{R}^N$ mit $\nu(a) \in N_a(M)$ und $||\nu(a)||_2 = 1 \forall a \in M$.*

Beispiel. *Auf S^{N-1} gibt es zwei Normalfelder: ν_+ und ν_-*

$$\nu_+(a) := a, \nu_-(a) := -a \tag{2.7}$$

Definition. *Seien U, V offen in $\mathbb{R}^n$ und $\varphi : U \to V$ ein Diffeomorphismus. φ heißt orientierungserhalten, wenn $\det(D\varphi(x)) > 0$.*

Definition. *Sei M eine n-dimensionale Untermannigfaltigkeit von $\mathbb{R}^N$ mit $n \geq 1$.*

a) Zwei Karten $\varphi_1 : W_1 \to V_1$ und $\varphi_2 : W_2 \to V_2$ von M heißen gleichorientiert, wenn die Parametertransformation $\tau(\varphi_1, \varphi_2)$ orientierungserhalten ist.

b) Ein Atlas $\mathscr{A}$ von M heißt orientiert, wenn je zwei seiner Karten gleich orientiert sind.

c) M heißt orientierbar, wenn M einen orientierten Atlas besitzt.

d) Zwei Atlanten $\mathscr{A}$ und $\mathscr{B}$ von M heißen äquivalent, wenn jede Karte von $\mathscr{A}$ mit jeder Karte von $\mathscr{B}$ gleichorientiert ist.

e) Eine Äquivalenzklasse σ orientierter Atlanten von M heißt eine Orientierung von M. Man nennt dann (M, σ) eine orientierte Untermannigfaltigkeit.

Bemerkung. *Meist sagt man: "Sei M eine orientierte Manigfaltigkeit." statt "Sei (M, σ) eine orientierte Manigfaltigkeit".*

Beispiel.

- *Sei M eine n-dimensionale Untermannigfaltigkeit von $\mathbb{R}^N$. Es gebe eine Karte φ von M, so dass M das Bild von φ ist. Dann ist $\{\varphi\}$ ein orientierter Atlas von M; daher ist M orientierbar.*
- *Ist insbesondere U offen in $\mathbb{R}^n$, so ist U eine n-dimensionale Untermannigfaltigkeit von $\mathbb{R}^n$ mit Atlas $\{id_U\}$. Er definiert eine Orientierung von U, die sogenannte kanonische Orientierung.*

Bemerkung. *Sei M eine n-dimensionale Untermannigfaltigkeit von $\mathbb{R}^N$ mit $n \geq 1$ und M orientierbar.*

a) Es gibt einen orientierten Atlas $\mathscr{A}$ von M, so dass alle Karten von $\mathscr{A}$ den Definitionsbereich $\mathbb{R}^n$ haben.

b) Sei $\mathscr{A}$ ein orientierter Atlas wie in a). Ist $\varphi : \mathbb{R}^n \to V$ eine Karte in $\mathscr{A}$, so definieren wir $\tilde{\varphi} : \mathbb{R}^n \to V$ durch $\tilde{\varphi}(x_1, \ldots, x_n) := \varphi(-x_1, x_2, \ldots, x_n)$. Dann ist $\tilde{\varphi}$ eine Karte von M und φ und $\tilde{\varphi}$ sind nicht gleichorientiert. Sei $\tilde{\mathscr{A}}$ die Menge aller $\tilde{\varphi}$ mit $\varphi \in \mathscr{A}$. Dann ist $\tilde{\mathscr{A}}$ ein orientierter Atlas von M und $\mathscr{A}$ und $\tilde{\mathscr{A}}$ sind nicht äquivalent. Deswegen besitzt M mindestens zwei verschiedene Orientiertungen (falls $M \neq \emptyset$).

c) Ist M orientierbar und zusammenhängend, so besitzt M genau zwei Orientiertungen.

Satz 2. *Sei M eine Hyperfläche in $\mathbb{R}^N$. Dann sind äquivalent:*

a) M ist orientierbar

b) Es gibt ein Einheitsnormalenfeld auf M

Beweis. *a) $\Rightarrow$ b)*: Sei $\mathscr{A}$ ein orientierter Atlas von M. Sei $a \in M$. Wähle eine Karte $\varphi : W \to V$ in $\mathscr{A}$ mit $a \in V$ und sei $b \in W$ mit $\varphi(b) = a$. Die lineare Abbildung $D\varphi(b)$ ist injektiv. Ist $e_1, \ldots, e_n$ die Standardbasis von $\mathbb{R}^n$, so ist $D\varphi(b)e_1, \ldots, D\varphi(b)e_n$ eine Basis von $T_a(M)$ (nach Satz 1). Sei $\nu(a)$ dasjenige der beiden Elemente vom Normalenraum $N_a(M)$ mit Norm 1, für das die Matrix mit den Spalten $D\varphi(b)e_1, \ldots, D\varphi(b)e_n, \nu(a)$ positive Determinante hat. Dann ist ν ein Einheitsnormalenfeld auf M. □

Beispiel.

- *S^{n-1} ist orientierbar, weil es Einheitsnormalenfelder auf S^{n-1} gibt*
- *Das Möbiusband ist nicht orientierbar*

Bemerkung. *Der Beweis von Satz 2 liefert für Hyperflächen eine Bijektion von der Menge der Orientierungen auf die Menge der Einheitsnormalenfelder.*

Satz 3. *Sei M eine n-dimensionale orientierte Untermannigfaltigkeit von $\mathbb{R}^N$, $n \geq 2$. Sei X eine abgeschlossene n-dimensionale Untermannigfaltigkeit mit Rand von M. Dann ist die $(n-1)$-dimensionale Untermannigfaltigkeit ∂X von $\mathbb{R}^N$ orientierbar.*

Beweis. Sei $\mathscr{A}$ ein Atlas von M, der zur gegebenen Orientierung gehört und folgende Eigenschaften hat:

- Ist $\varphi : W \to V$ eine Karte aus $\mathscr{A}$ mit $V \cap \partial X \neq \emptyset$, so ist φ randadaptiert, d.h. $\varphi(\mathbb{R}^n_- \cap W) = X \cap V$, $\varphi(\partial\mathbb{R}^n_- \cap W) = \partial X \cap V$, $\mathbb{R}^n_- := \{x \in \mathbb{R}^n \mid x_1 \leq 0\}$.
- Wenn man eine Karte $\varphi : W \to V$ hat, so setzt man $W_0 := \{x \in \mathbb{R}^{n-1} \mid (0, x) \in W\}$, $V_0 := V \cap \partial X$. $\varphi_0 : W_0 \to V_o$ sei gegeben durch $\varphi_0(x) := \varphi(0, x)$.

Dann bilden die φ_0 eine orientierten Atlas von ∂X. □

Definition. *Ist σ eine Orientierung von M, so liefert der Beweis von Satz 3 eine Orientierung von ∂X, welche die von σ induzierte Orientierung von ∂X heißt.*

§14 Glatte Zerlegung der Eins

Definition. *Sei X ein metrischer Raum, $f : X \to \mathbb{R}$ eine Funktion. Mit Supp(f) bezeichnet man den Abschluss der Menge $\{x \in X \mid f(x) \neq 0\}$ in X und nennt Supp(f) den Träger von f.*