

Höhere Analysis

Dr. Philipp Reiter
WS 16/17 Universität Heidelberg

29. Januar 2017

gesetzt in \LaTeX von Sebastian Blänsdorf,
Fabian Krautgasser & Marvin Sipp

Dies ist das Vorlesungsskript zur Vorlesung *Höhere Analysis* bei Dr. Philipp Reiter im Wintersemester 16/17 an der Universität Heidelberg. Da dieses Skript von Studenten angefertigt wird, ist keine Garantie auf Exaktheit und Vollständigkeit gegeben. Ebenso ist dies kein Anspruch auf Originalität, da sich die Inhalte aus vielerlei Fachbüchern zusammen setzen. Wir bitten zu entschuldigen, dass diese nicht explizit angegeben sind.

Inhaltsverzeichnis

1	Lebesgue-Integral	4
1.1	Maßräume	4
1.2	Konstruktion von Maßen	8
1.3	Messbare Funktionen	16
1.4	Integration	18
1.5	Produktmaße	24
1.6	Transformation	29
2	L^p-Räume	34
2.1	Ungleichungen	36
2.2	Vollständigkeit	40
2.3	Approximation	42
3	Fouriertransformation	47
3.1	Definition und Umkehrbarkeit auf L^1	47
3.2	Fortsetzbarkeit auf L^2	52
3.3	Lösung von partiellen Differentialgleichungen (mit konstanten Koeffizienten)	56
4	Differenzierbare Mannigfaltigkeiten	61
4.1	Implizite Funktionen und Untermannigfaltigkeiten	61
4.2	Integration auf Mannigfaltigkeiten	68
4.4	Glatte Ränder	73
5	Differentialformen und der Satz von Stokes	77
5.1	Multilineare Algebra	77
5.2	Differentialformen	80

1 Lebesgue-Integral

1.1 Maßräume

Definition 1 (Algebra). Eine Algebra \mathcal{A} ist eine Familie von Teilmengen einer gegebenen Menge X mit folgenden Eigenschaften:

- $X \in \mathcal{A}$
- $A \in \mathcal{A} \Rightarrow A^c := X \setminus A \in \mathcal{A}$
- $A_1, \dots, A_N \in \mathcal{A}, N \in \mathbb{N} \Rightarrow \bigcup_{k=1}^N A_k \in \mathcal{A}$

Wir sprechen von einer σ -Algebra, wenn $N = \infty$ zulässig ist.

Lemma 2. Sei X eine Menge. \mathcal{A} eine σ -Algebra, $(A_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{A}$. Dann gehören auch $\bigcap_{k=1}^{\infty} A_k$ und beispielsweise $A_1 \setminus A_2$ zu \mathcal{A} .

Beweis. Wir haben

$$\bigcap_{k \in \mathbb{N}} A_k = \underbrace{\left(\bigcup_{k \in \mathbb{N}} \underbrace{A_k^c}_{\in \mathcal{A}} \right)^c}_{\in \mathcal{A}} \in \mathcal{A}$$

Weiter ist $A_1 \setminus A_2 = A_1 \cap \underbrace{A_2^c}_{\in \mathcal{A}} \in \mathcal{A}$ □

Beispiel. Für $X = \{1, 2, 3\}$ ist $\mathcal{A} = \{\emptyset, X, \{1\}, \{2, 3\}\}$

Definition 3. Allgemein ist $\mathfrak{P}(X)$ (=Potenzmenge, Menge aller Teilmengen von X) die größte und $\{\emptyset, X\}$ die kleinste σ -Algebra. Sei $S \subset \mathfrak{P}(X)$, dann stellt

$$\Sigma(S) = \bigcap \{ \mathcal{A} \mid \mathcal{A} \text{ } \sigma\text{-Algebra mit } S \subseteq \mathcal{A} \}$$

tatsächlich eine σ -Algebra dar. Es ist die kleinste σ -Algebra die S enthält und wird als *die von S erzeugte σ -Algebra* bezeichnet. $\Sigma(S)$ ist eindeutig bestimmt.

Ist X eine Menge mit σ -Algebra \mathcal{A} und $Y \subset X$. Dann bezeichnen wir

$$\mathcal{A} \cap Y := \{A \cap Y \mid A \in \mathcal{A}\}$$

als *relative σ -Algebra*. Sie ist in der Tat eine σ -Algebra auf Y .

Lemma 4. Die erzeugte und die relative σ -Algebra sind wohldefiniert, also eindeutig bestimmt, und tatsächlich σ -Algebren.

Beweis. In der Übung. □

Behauptung. Falls $S \subset \mathfrak{P}(X)$ die σ -Algebra $\Sigma = \Sigma(S | X)$ ¹ erzeugt, dann erzeugt für $Y \subset X$ die Menge $S \cap Y$ die σ -Algebra $\Sigma(S \cap Y | Y)$, und

$$\Sigma(S \cap Y | Y) = \Sigma(S | X) \cap Y$$

Beweis.

" \subseteq " Weil $\Sigma \cap Y$ die Mengen aus $S \cap Y$ enthält, gilt $\Sigma(S \cap Y) \subseteq \Sigma(\Sigma \cap Y) = \Sigma \cap Y$

" \supseteq " Betrachte die Menge

$$\{A \in \Sigma(S) \mid A \cap Y \in \Sigma(S \cap Y)\}$$

Dies ist eine σ -Algebra. Weil diese die Menge S enthält, folgt

$$\Sigma(S) \subset \{A \in \Sigma(S) \mid A \cap Y \in \Sigma(S \cap Y)\} \subset \Sigma(S)$$

also Gleichheit und folglich

$$\Sigma(S) \cap Y = \{A \in \Sigma(S) \mid A \cap Y \in \Sigma(S \cap Y)\} \cap Y \subset \Sigma(S \cap Y)$$

□

Definition 5 (Topologischer Raum). Sei X eine Menge. Es gibt ein System von Teilmengen $\mathcal{O} \subset \mathfrak{P}(X)$ mit $\emptyset, X \in \mathcal{O}$, das abgeschlossen ist unter endlichen Schnitten und abzählbaren Vereinigungen. Dieses System (X, \mathcal{O}) heißt *topologischer Raum*. Formal muss gelten:

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

Definition 6 (Borel- σ -Algebra). Ist X ein topologischer Raum, $\mathcal{O} \subset \mathfrak{P}(X)$, so ist $\mathcal{B}(X)$ diejenige σ -Algebra, die von \mathcal{O} erzeugt wird (also die kleinste σ -Algebra, die die offenen Mengen von (X, \mathcal{O}) enthält). Wir bezeichnen $\mathcal{B}(X)$ als *Borel- σ -Algebra*, und die Mengen in \mathcal{B} heißen *Borel-Mengen*.

Notation:

$$\mathcal{B}^n = \mathcal{B}(\mathbb{R}^n), \quad \mathcal{B} = \mathcal{B}^1$$

Bemerkung. Die Familie aller endlichen offenen Intervalle $\subset \mathbb{R}$ erzeugt bereits \mathcal{B} .

Definition 7 (Messraum, Maß, Maßraum). Eine Menge X mit einer σ -Algebra $\mathcal{A} \subset \mathfrak{P}(X)$ heißt *Messraum*. Ein *Maß* ist eine Abbildung $\mu: \mathcal{A} \rightarrow [0, \infty]$ mit:

- $\mu(\emptyset) = 0$
- **σ -Additivität:** Für eine Folge² paarweise disjunkter³ Mengen $(A_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{A}$ ist

¹Hier bezeichnet X den "Raum", der für Σ von Bedeutung ist.

²Folgen sind indizierbar mit \mathbb{N} . Im Unterschied dazu können Familien auch überabzählbar sein.

³ $A_j \cap A_k = \emptyset$ für $j \neq k$

$$\mu\left(\bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k\right) = \sum_{k \in \mathbb{N}} \mu(A_k)$$

Die Elemente in \mathcal{A} heißen *messbar*, und das Tripel (X, \mathcal{A}, μ) heißt somit *Maßraum*.

Definition 8 (σ -Finitheit). Ein Maß heißt σ -finit, falls es eine abzählbare Überdeckung $\{X_k\}_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{A}$ von X gibt, also $X = \bigcup_{k \in \mathbb{N}} X_k$, sodass $\mu(X_k) < \infty \forall k$. μ heißt *endlich*, falls $\mu(X) < \infty$, und *Wahrscheinlichkeitsmaß*, falls $\mu(X) = 1$.

Beispiel 9.

(a) **Zählmaß:** Für X und $\mathcal{A} = \mathfrak{P}(X)$ setze für $A \in \mathcal{A}$

$$\mu(A) = \begin{cases} \#A & : A \text{ endlich} \\ \infty & : \text{sonst} \end{cases}$$

μ ist endlich, wenn X endlich, und σ -finit, wenn X abzählbar ist.

(b) **Dirac-Maß:** Für einen fest gewählten Punkt $x_0 \in X$ und $\mathcal{A} = \mathfrak{P}(X)$ setze für $A \subset X$

$$\mu(A) = \begin{cases} 0 & : x_0 \notin A \\ 1 & : x_0 \in A \end{cases}$$

(c) **Positive Linearkombinationen:** Seien μ_1, μ_2 Maße auf (X, \mathcal{A}) . Dann erhalten wir durch $\mu := \alpha_1 \mu_1 + \alpha_2 \mu_2$ für $\alpha_1, \alpha_2 \geq 0$ wieder ein Maß.

Beispiel 10. Sei μ ein Maß auf (X, \mathcal{A}) und $Y \in \mathcal{A}$. Dann ist $\mu|_Y(A) := \mu(A \cap Y)$ wieder ein Maß auf (X, \mathcal{A}) .

Bemerkung. Für $Y \in \mathcal{A}$ können wir die σ -Algebra \mathcal{A} zu

$$\mathcal{A}|_Y = \{A \in \mathcal{A} \mid A \subset Y\}$$

einschränken. Dann ist $\mu|_Y(A) = \mu(A \cap Y)$, $A \cap Y \in \mathcal{A}$, ein Maß (siehe oben) und $(Y, \mathcal{A}|_Y, \mu|_Y)$ ein Maßraum und dieser ist μ -finit, falls (X, \mathcal{A}, μ) σ -finit ist.

Notation 11.

$$A_k \nearrow A, \text{ falls } A_k \subset A_{k+1} \forall k \in \mathbb{N} \text{ und } A = \bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k$$

$$A_k \searrow A, \text{ falls } A_k \supset A_{k+1} \forall k \in \mathbb{N} \text{ und } A = \bigcap_{k \in \mathbb{N}} A_k$$

Satz 12. Für jeden Maßraum (X, \mathcal{A}, μ) und $(A_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{A}$ gilt:

- (i) $A \subset B \Rightarrow \mu(A) \leq \mu(B)$ (Monotonie)
- (ii) $\mu\left(\bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k\right) \leq \sum_{k \in \mathbb{N}} \mu(A_k)$ (σ -Subadditivität)
- (iii) $A_k \nearrow A \Rightarrow \mu(A_k) \nearrow \mu(A)$
- (iv) $A_k \searrow A \Rightarrow \mu(A_k) \searrow \mu(A)$, für $\mu(A_1) < \infty$

Beweis.

- (i) $A, B \in \mathcal{A}$, $A \subset B \Rightarrow B = A \cup (B \setminus A)$, $B \setminus A \in \mathcal{A}$, woraus folgt

$$\begin{aligned}\mu(B) &= \mu(A) + \mu(B \setminus A) \\ &\geq \mu(A)\end{aligned}$$

- (ii) Wir definieren $(B_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{A}$ induktiv durch $B_1 := A_1$, $B_{k+1} = A_{k+1} \setminus \bigcup_{j=1}^k A_j \in \mathcal{A}$, woraus folgt

$$\bigcup_{k \in \mathbb{N}} B_k = \bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k$$

Nach Definition gilt:

$$\mu\left(\bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k\right) = \mu\left(\bigcup_{k \in \mathbb{N}} B_k\right) = \sum_{k \in \mathbb{N}} \mu(B_k) \stackrel{(i)}{\leq} \sum_{k \in \mathbb{N}} \mu(A_k)$$

- (iii) Definiere $(C_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{A}$ durch $C_1 := A_1$, $C_{k+1} := A_{k+1} \setminus A_k$. Demnach ist

$$\bigcup_{k \in \mathbb{N}} C_k = \bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k = A$$

Die σ -Additivität liefert

$$\mu(A_k) = \sum_{j=1}^k \mu(C_j) \xrightarrow{k \rightarrow \infty} \sum_{k \in \mathbb{N}} \mu(C_k) = \mu(A) \left(\leq \sum_{k \in \mathbb{N}} \mu(A_k) \right)$$

- (iv) $D_k := A_1 \setminus A_k \forall k \in \mathbb{N}$. Damit ist $D_k \nearrow A_1 \setminus A$, und wir haben

$$\mu(A_1) - \mu(A_k) = \mu(A_1 \setminus A_k) \xrightarrow[k \rightarrow \infty]{(iii)} \mu(A_1 \setminus A) = \mu(A_1) - \mu(A)$$

Subtraktion von $\mu(A_1) < \infty$ und Multiplikation mit -1 liefert die Behauptung.

□

Bemerkung 13. *Zählmaß μ auf $X = \mathbb{N}$ und $A_k = \{j \in \mathbb{N} \mid j \geq k\}$, $A_k \searrow \emptyset$, $\mu(A_k) = \infty \forall k \in \mathbb{N}$, $\mu(\emptyset) = 0$. Hieraus erkennt man, dass die Bedingung $\mu(A_1) < \infty$ in Satz 12_(iv) wesentlich ist.*

Definition 14 (Borel-Maß). Sei X ein topologischer Raum mit Borel- σ -Algebra $\mathcal{B}(X)$. Ein Maß μ auf $(X, \mathcal{B}(X))$ heißt *Borel-Maß*, falls es auf Kompakta⁴ stets endliche Werte annimmt.

Beispiel 15. Sei $X = \mathbb{R}$, $\mathcal{A} = \mathcal{B}$. Das Dirac-Maß ist ein Borel-Maß, das Zählmaß hingegen nicht.

⁴Ein topologischer Raum (X, \mathcal{O}) heißt *kompakt*, wenn jede offene Überdeckung $X = \bigcup_{i \in I} U_i$ mit $U_i \in \mathcal{O}$ eine endliche Teilüberdeckung $X = U_{i_1} \cup U_{i_2} \cup \dots \cup U_{i_n}$ mit $i_1, \dots, i_n \in I$ besitzt.

Definition 16 (Regularität). Sei X ein topologischer Raum, (X, \mathcal{A}, μ) ein Maßraum. Das Maß μ heißt *regulär von außen*, wenn für $A \in \mathcal{A}$ gilt:

$$\mu(A) = \inf \{ \mu(U) \mid A \subset U, U \text{ offen} \}.$$

Außerdem heißt das Maß μ *regulär von innen*, wenn für $A \in \mathcal{A}$ gilt:

$$\mu(A) = \sup \{ \mu(K) \mid K \subset A, K \text{ kompakt} \}.$$

Ein Maß heißt *regulär*, wenn es regulär von innen und außen ist.

Beispiel 17. Das Zählmaß ist regulär von innen, jedoch nicht von außen. Das Dirac-Maß ist regulär (X, \mathcal{A} wie in Beispiel 15).

1.2 Konstruktion von Maßen

Strategie:

1. Starte mit einem sogenannten Prämaß λ auf der Algebra endlicher, disjunkter Vereinigungen von Intervallen, λ = Summe der Längen.
2. Dies kann zu einem "äußeren Maß" auf $\mathfrak{P}(\mathbb{R})$ fortgesetzt werden (keine σ -Additivität).
3. Einschränkung auf Borel- σ -Algebren liefert ein Maß.

Definition 18 (Dynkin-System). Eine Familie $\mathcal{D} \subset \mathfrak{P}(X)$, X eine Menge, heißt *Dynkin-System*, falls gilt:

- $X \in \mathcal{D}$
- $A \in \mathcal{D} \Rightarrow A^c \in \mathcal{D}$
- $(A_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{D}, A_k \cap A_m = \emptyset \forall k, m, k \neq m \Rightarrow \bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k \in \mathcal{D}$

Bemerkung 19.

(i) Ein Dynkin-System ist abgeschlossen unter Mengensubtraktion:

$$A, B \in \mathcal{D}, B \subset A \Rightarrow A \setminus B = A \cap B^c = (A^c \cup B)^c \in \mathcal{D}$$

da $B^c, A^c \in \mathcal{D}$, und $A^c \cup B \in \mathcal{D}$, denn $B \cap A^c \subset A \cap A^c = \emptyset$

(ii) Ist $S \subset \mathfrak{P}(X)$, so ist

$$\mathcal{D}(S) = \bigcap \{ \mathcal{D} \mid \mathcal{D} \text{ ist Dynkin-System, } S \subset \mathcal{D} \}$$

das von S erzeugte Dynkin-System.

(iii) Das von S erzeugte Dynkin-System ist wohldefiniert, das heißt es ist eindeutig und tatsächlich ein Dynkin-System.

Lemma 20. Ist \mathcal{D} abgeschlossen unter endlichen Schnitten oder alternativ unter beliebigen (also nicht notwendigerweise disjunkten) endlichen Vereinigungen, so ist \mathcal{D} eine σ -Algebra.

Beweis. In der Übung. □

Lemma 21. Sei S eine (nichtleere) Familie, von Teilmengen einer Menge X , die abgeschlossen ist unter endlichen Schnitten. Dann folgt $\mathcal{D}(S) = \Sigma(S)$.

Beweis. Nach Definition gilt $\mathcal{D}(S) \subset \Sigma(S)$. Die andere Inklusion, $\Sigma(S) \subset \mathcal{D}(S)$, folgt sofort, wenn wir zeigen, dass $\mathcal{D}(S)$ eine σ -Algebra ist. Nach Lemma 20 genügt hierzu der Nachweis, dass $\mathcal{D}(S)$ abgeschlossen ist unter endlichen Schnitten. Hierzu definieren wir für ein festes $A \in \mathcal{D} := \mathcal{D}(S)$:

$$D(A) = \{B \in \mathcal{D} \mid A \cap B \in \mathcal{D}\} \subset \mathcal{D}$$

Ziel: $D(A) = \mathcal{D} \forall A \in \mathcal{D}$

Behauptung. $D(A)$ ist ein Dynkin-System für beliebige $A \in \mathcal{D}$.

Beweis.

- $X \in \mathcal{D}, A \cap X = A \in \mathcal{D} \Rightarrow X \in D(A)$
- $B \in D(A) \Rightarrow B \in \mathcal{D}, A \cap B \in \mathcal{D}$.
Hieraus folgt: $A \cap B^c = A \setminus (B \cap A) \in \mathcal{D}$ (vgl. Bem. 19_(i))
- $B = \bigcup_{k \in \mathbb{N}} B_k, B_k \in D(A) \Rightarrow B_k \in \mathcal{D}, A \cap B_k \in \mathcal{D}$.
Hieraus folgt: $B \in \mathcal{D}, B \cap A = \bigcup (B_k \cap A) \in \mathcal{D} \Rightarrow B \in D(A)$ (da $B_k \cap A \in \mathcal{D}$)

□

Behauptung. $A \in S \Rightarrow S \subset D(A)$, denn $B \in S \Rightarrow A \cap B \in S \subset \mathcal{D} \Rightarrow B \in D(A)$. Da $\mathcal{D} = \mathcal{D}(S)$ das kleinste Dynkin-System ist, das S enthält, folgt

$$\mathcal{D} \subset D(A) \Rightarrow \mathcal{D} = D(A)$$

Für beliebige $U \in S, \mathcal{V} \in \tilde{\mathcal{D}} := D(U)$ folgt nach Definition $U \cap \mathcal{V} \in \mathcal{D}$. Dies impliziert $U \in D(\mathcal{V})$, also $S \subset D(\mathcal{V}) \forall \mathcal{V} \in \mathcal{D}$. Wie eben ist $D(\mathcal{V}) \subset \mathcal{D}$, also $D(\mathcal{V}) = \mathcal{D} \forall \mathcal{V} \in \mathcal{D}$. Folglich ist \mathcal{D} abgeschlossen unter endlichen Schnitten.

□

Bemerkung 22. Lemma 21 lässt sich wie folgt anwenden:

- Verifiziere eine Eigenschaft ε auf einer Menge $S \subset \mathfrak{P}(X)$, die abgeschlossen unter endlichen Schnitten ist.
- Zeige, dass die Menge aller Mengen in $\mathfrak{P}(X)$, die ε enthalten, ein Dynkin-System bildet.
- Schließe, dass ε auf $\Sigma(S)$ gilt.

Lemma 21 gilt auch unter der Voraussetzung "Abgeschlossenheit unter beliebigen endlichen Vereinigungen" (statt der Schnitte).

Satz 23 (Eindeutigkeit der Maße). Sei (X, Σ, μ) ein Maßraum, und $S \subset \mathfrak{P}(X)$ eine Familie von Mengen, die abgeschlossen unter endlichen Schnitten ist, und $\Sigma(S) = \Sigma$. Weiter enthält S eine Folge aufsteigender Mengen $(X_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset S$ mit $X_k \nearrow X$ und $\mu(X_k) < \infty \forall k \in \mathbb{N}$. Dann ist μ auf $\Sigma = \Sigma(S)$ durch die Werte auf S eindeutig bestimmt.

Beweis. Sei μ ein weiteres Maß mit $\tilde{\mu} = \mu$ auf S (Ziel: $\mu = \tilde{\mu}$ überall).

Zunächst ist $\tilde{\mu}(X) \stackrel{\text{Satz 12}}{=} \lim_{k \rightarrow \infty} \tilde{\mu}(\underbrace{X_k}_{\in S}) = \lim_{k \rightarrow \infty} \mu(X_k) \stackrel{\text{Satz 12}}{=} \mu(X)$.

Sei nun $\mu < \infty$. □

Behauptung. $\mathcal{D} = \{A \in \Sigma \mid \tilde{\mu}(A) = \mu(A)\}$ ist ein Dynkin-System (Ziel $\mathcal{D} = \Sigma(S)$)

Beweis. $X \in \mathcal{D}$ wie gesehen. Für $A \in \mathcal{D}$ ist

$$\tilde{\mu}(\underbrace{A^C}_{\in \Sigma}) = \tilde{\mu}(X) - \tilde{\mu}(A) = \mu(X) - \mu(A) = \mu(A^C) \Rightarrow A^C \in \mathcal{D}$$

Abgeschlossenheit unter abzählbaren disjunkten Vereinigungen. Betrachte $(B_k)_{k \in \mathbb{N}}$, $B_j \cap B_k = \emptyset \forall j, k \in \mathbb{N}$, $B_k \in \mathcal{D}$, $B = \bigcup_{k \in \mathbb{N}} B_k$

$$\tilde{\mu}(B) = \sum_{k \in \mathbb{N}} \tilde{\mu}(B_k) = \sum_{k \in \mathbb{N}} \mu(B_k) = \mu(B)$$

Nach Lemma 21 folgt nun $\underbrace{\Sigma(S)}_{\Sigma} = \mathcal{D}(S) \subset \mathcal{D} \subset \Sigma \Rightarrow \mathcal{D} = \Sigma$. Dies zeigt die Behauptung im

Fall $\mu(X) < \infty$. □

Im allgemeinen Fall erhalten wir für jedes $A \in \Sigma$

$$\tilde{\mu}(A) = \lim_{k \rightarrow \infty} \tilde{\mu}(A \cap X_k) \stackrel{5}{=} \lim_{k \in \infty} \mu(A \cap X_k) = \mu(A)$$

Definition 24 (Prämaß). Sei X eine Menge und $\mathcal{A} \subset \mathfrak{P}(X)$ eine Algebra. Ein Prämaß auf X ist eine σ -additive Abbildung $\mu(\mathcal{A}) \rightarrow [0, \infty]$ und $\mu(\emptyset) = 0$.

Bemerkung. Brauche hier σ -Additivität nur für solche (paarweise disjunkten) Folgen $(A_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{A}$ gewährleisten, deren Vereinigung $\bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k$ in \mathcal{A} liegt. Ein Prämaß auf einer σ -Algebra ist ein Maß.

Corollar 25. Sei μ ein σ -finites Prämaß auf einer Algebra \mathcal{A} . Dann gibt es höchstens eine Fortsetzung auf $\Sigma(\mathcal{A})$

⁵Argumentation angewendet auf X_k ($\mu(X_k) < \infty$)

Beweis. Setze $S = \mathcal{A}$ wie in Satz 23. Offenbar ist S abgeschlossen unter endlichen Schnitten. Da X σ -finit ist, gibt es eine Folge $(X_k)_{k \in \mathbb{N}}$ mit $X = \bigcup_{k \in \mathbb{N}} X_k$ und $\mu(X_k) < \infty$. Für $A_k := \bigcup_{j=1}^k X_j$ ist $A_k \nearrow X$ und $\mu(A_k) \leq \sum_{j=1}^k \underbrace{\mu X_j}_{< \infty} < \infty$. Wenn es ein Maß auf (X, σ) gibt, ist es eindeutig (Satz 23). \square

Beispiel 26. Die Menge S aller Intervalle der Form $[a, b)$, $-\infty \leq a \leq b \leq +\infty$, erzeugt unter endlichen Vereinigungen eine Algebra \mathcal{A} . Wir setzen $\mu(\emptyset) := 0$, $\mu([a, b)) = \infty$ (für $a \neq b$). Dies definiert ein Prämaß auf \mathcal{A} . Es gibt (mindestens) zwei Fortsetzungen auf $\Sigma(S)$. a) mit dem Zählmaß (für $A \in \Sigma$ mit $\#A < \infty$) oder b) $\mu(\emptyset) = 0$ und $\mu(A) = +\infty \forall A \in \Sigma \setminus \{\emptyset\}$

Definition 27 (Äußere Maße). Eine Funktion $\mu^*: \mathfrak{P}(X) \rightarrow [0, \infty]$ ist ein *äußeres Maß*⁶ auf X , falls $\forall (A_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathfrak{P}(X)$ die folgenden Eigenschaften erfüllt sind.

- $\mu^*(\emptyset) = 0$
- $\mu^*(A_1) \leq \mu^*(A_2)$, falls $A_1 \subset A_2$ (Monotonie)
- $\mu^*(\bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k) \leq \sum_{k \in \mathbb{N}} \mu^*(A_k)$ (σ -Subadditivität)

Satz 28 (Fortsetzung äußere Maße). Sei μ^* ein äußeres Maß auf einer Menge X . Wir sagen, die Menge $\mathcal{A} \subset \mathfrak{P}(X)$ erfülle die Carathéodory-Bedingung, falls

$$\mu^*(E) = \mu^*(E \cap A) + \mu^*(E \cap A^C) \quad \forall E \subset X$$

gilt. Die Familie Σ aller Mengen $A \subset X$, die die Carathéodory-Bedingung erfüllen, bildet eine σ -Algebra Σ und $\mu^*|_{\Sigma}$ ist ein Maß.

Bemerkung. Maße erfüllen wegen Additivität die Carathéodory-Bedingung

Beweis.

a) **Behauptung.** Σ ist eine Algebra.

Beweis. Offenbar ist $X \in \Sigma$. Abgeschlossenheit unter Komplementbildung ist klar. Für endliche Vereinigungen betrachte $A, B \in \Sigma$. Sei $E \subset X$ beliebig.

$$\mu^*((A \cup B) \cap E) \stackrel{\text{Subadd}}{\leq} \mu^*(A \cap B^C \cap E) + \mu^*(A^C \cap B \cap E) + \mu^*(A \cap B \cap E)$$

Zweifache Anwendung der Carathéodory-Bedingung liefert

$$\begin{aligned} \mu^*(E) &\stackrel{A \in \Sigma}{=} \mu^*(E \cap A) + \mu^*(E \cap A^C) \\ &\stackrel{B \in \Sigma}{=} \mu^*(E \cap A \cap B) + \mu^*(E \cap A \cap B^C) + \mu^*(E \cap A^C \cap B) + \mu^*(E \cap A^C \cap B^C) \end{aligned}$$

Mit der obigen Abschätzung erhalten wir

$$\mu^* \geq \mu^*((A \cup B) \cap E) + \underbrace{\mu^*(E \cap A^C \cap B^C)}_{(A \cup B)^C}$$

\square

⁶Jedes Maß ist ein äußeres Maß

⁷ \leq gilt wegen Subadditivität

b) **Behauptung.** Σ ist eine σ -Algebra.

Beweis. Sei also $(A_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \Sigma$ (Ziel $\bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k \in \Sigma$). Wir können ohne Einschränkung annehmen, dass die A_k paarweise disjunkt sind (vgl. Satz 12). Setze $B_k = \bigcup_{j=1}^k A_j \in \Sigma$, also $B_k \nearrow \bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k$. Nun ist für jedes $E \subset X$

$$\begin{aligned} \mu^*(\underbrace{B_k \cap E}_{\subset X}) &\stackrel{A \in \Sigma}{=} \mu^*(\underbrace{B_k \cap E \cap A_k}_{E \cap A_k}) + \mu^*(\underbrace{B_k \cap E \cap A_k^C}_{= E \cap B_{k-1} \text{ da } (A_k)_{k \in \mathbb{N}} \text{ paarweise disjunkt}^{10}}) \\ &= \sum_{j=1}^k \mu^*(E \cap A_j) \end{aligned}$$

also haben wir:

$$\mu^*(E) \stackrel{B \in \Sigma}{=} \mu^*(E \cap B_k) + \mu^*(E \cap B_k^C) \stackrel{\text{Monotonie (Subadd.) 2er Term } \downarrow}{\geq} \left(\sum_{j=1}^k \mu^*(E \cap A_j) \right) + \mu^*(E \cap A^C)$$

Mit $k \rightarrow \infty$ und Subadditivität erhalten wir

$$\begin{aligned} \mu^*(E) &\geq \left(\sum_{k \in \mathbb{N}} \mu^*(E \cap A_k) \right) + \mu^*(E \cap A^C) \\ &\geq \mu^*\left(\underbrace{\bigcup_{k \in \mathbb{N}} (E \cap A_k)}_{E \cap A}\right) + \mu^*(E \cap A^C) \stackrel{\text{Subadd}}{\geq} \mu^*(E) \end{aligned}$$

Also gilt $A = \bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k \in \Sigma$, und folglich ist Σ eine σ -Algebra (*). □

c) **Behauptung.** $\mu|_{\Sigma}$ ist ein Maß.

Beweis. Hierzu betrachte eine Folge $(A_k)_{k \in \mathbb{N}}$ paarweise disjunkte Mengen in Σ . $\mu^*(\emptyset) = 0$ haben wir schon. Aus (*) folgt mit $E = A := \bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k$

$$\mu^*(A) = \sum_{k \in \mathbb{N}} \mu^*\left(\underbrace{A \cap A_k}_{A_k}\right) + \mu^*\left(\underbrace{A \cap A^C}_{\emptyset}\right) = \sum_{k \in \mathbb{N}} \mu^*(A_k)$$

□

Bemerkung 29. Das soeben konstruierte Maß $\mu^*|_{\Sigma}$ ist vollständig d.h. jede Teilmenge einer Nullmenge⁹ ist messbar.

⁸ $(B_k \cap A) := \bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k = \bigcup_{k \in \mathbb{N}} B_k \Rightarrow B_k^C \supset A^C$

⁹ $A \in \Sigma$ mit $\mu(A) = 0$

Beweis. Sei $A \in \Sigma$ $\mu(A) = 0$, $B \subset A$. Ziel $B \in \Sigma$ ($\Rightarrow \mu(B) = 0$ wg. Monotonie). Sei $E \cap X$

$$\underbrace{\mu^*(E \cap B)}_{\subset B \subset A} \leq \underbrace{\mu^*(A)}_{=0} \quad \underbrace{\mu^*(E \cap B^C)}_{\subset E} \leq \mu^*(E)$$

Insofern ist $\mu^*(E) \geq \mu^*(E \cap B) + \mu^*(E \cap B^C)$, also $B \in \Sigma$. \square

Lebesgue-Maß

- (1) Für ein verallgemeinertes Intervall I der Form (a, b) , $(a, b]$, $[a, b)$, $[a, b]$ mit $-\infty \leq a \leq b \leq +\infty$ setzen wir $\lambda(I) := b - a \in [0, \infty]$

- (2) (TODO)

Lemma 31. Dies ergibt ein eindeutiges σ -finites Prämaß auf der Algebra \mathcal{A} , die aus endlichen Vereinigungen disjunkter Intervalle im obigen Sinne besteht.

Wir setzen $\lambda\left(\bigcup_{j=1}^k I_j\right) = \sum_{j=1}^k \lambda(I_j)$.

- (3) (TODO) Wir erhalten zunächst eine Fortsetzung von λ zu einem äußeren Maß λ^* , also $\lambda^* = \lambda$ auf \mathcal{A} , wobei jede Menge aus \mathcal{A} die Carathéodory-Bedingung erfüllt.

- (4) Satz 28 liefert eine σ -Algebra $\Lambda \supset \mathcal{A}$, sodass $\lambda := \lambda^*|_{\Lambda}$ ein Maß ist.

- (5)

Definition 32. Die Elemente von Λ heißen *Lebesgue-messbare Mengen* (bzw. *Lebesgue-Mengen*) und λ ist das *Lebesgue-Maß*.

Lemma 30 (Ad 3). Sei μ ein Prämaß auf einer Algebra $\mathcal{A} \subset \mathfrak{P}(X)$.

Wir setzen für $A \subset X$

$$\mu^*(A) = \inf \left\{ \sum_{k \in \mathbb{N}} \mu(A_k) \mid (A_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{A}, A \subset \bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k \right\}$$

Dies definiert ein äußeres Maß μ^* mit $\mu^* = \mu$ auf \mathcal{A} und jede Menge aus \mathcal{A} erfüllt die Carathéodory-Bedingung.

Beweis.

1. Teil: Übungsaufgabe 5.

2. Teil: (Carathéodory-Eigenschaft): Sei $E \subset X$ beliebig und $A \subset \mathcal{A}$.

(Ziel: $\mu^*(E) \geq \mu^*(E \cap A^C) + \mu^*(E \cap A)$, "≤" folgt sofort aus der Subadditivität).

Wir betrachten eine beliebige Überdeckung von E durch

$$(B_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{A}, \quad B := \bigcup_{k \in \mathbb{N}} B_k \supset E.$$

Dann ist zunächst auch $(B_k \cap A)_{k \in \mathbb{N}}$ eine Überdeckung von $E \cap A$ und entsprechend $(B_k \cap A^C)_{k \in \mathbb{N}}$ eine Überdeckung von $E \cap A^C$.

Wir erhalten hieraus

$$\sum_{k \in \mathbb{N}} \mu(B_k) = \sum_{k \in \mathbb{N}} \mu(B_k \cap A) + \sum_{k \in \mathbb{N}} \mu(B_k \cap A^c) \geq \mu^*(E \cap A) + \mu^*(E \cap A^c)$$

Indem wir das Infimum über $(B_k)_{k \in \mathbb{N}}$ mit $\bigcup_{k \in \mathbb{N}} B_k \supset E$ nehmen, folgt

$$\mu^*(E) \geq \mu^*(E \cap A) + \mu^*(E \cap A^c).$$

□

Dies erledigt (3). Für (2) erbringen wir

Beweis von Lemma 31.

(a) \mathcal{A} ist eine Algebra. In der Tat, $\mathbb{R} = (-\infty, \infty)$. Das Komplement einer endlichen Vereinigung disjunkter Intervalle (möglicherweise verallgemeinert) besitzt wieder diese Form.

Für den Fall endlicher Vereinigungen betrachte zunächst den Fall zweier aus je einem Intervall bestehender Mengen (\rightarrow entweder disjunkte Vereinigung oder neues Intervall) und fahre induktiv fort.

(b) Offenbar gilt $\lambda(\emptyset) = 0$. Für σ -Additivität ist $\lambda(\bigcup_{k \in \mathbb{N}} I_k) = \sum_{k \in \mathbb{N}} \lambda(I_k)$ für alle paarweise disjunkten Folgen $(I_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{A}$ zu zeigen.

- Weil jedes I_k eine endliche Vereinigung disjunkter Intervalle ist, können wir umsortieren und umnummerieren und somit ohne Einschränkungen voraussetzen, dass jedes I_k ein Intervall ist (Nach wie vor $(I_k)_{k \in \mathbb{N}}$ paarweise disjunkt).
- Weiter können wir voraussetzen, dass $I := \bigcup_{k \in \mathbb{N}} I_k$ (= disjunkte Vereinigung endlich vieler Intervalle, da $\in \mathcal{A}$) aus genau einem Intervall besteht (betrachte jede Komponente der Vereinigung separat).

Wir haben erreicht:

$$\sum_{j=1}^{\infty} \lambda(I_j) \longleftarrow \sum_{j=1}^k \lambda(I_j) \stackrel{\text{Add.}}{\downarrow} \lambda\left(\bigcup_{j=1}^k I_j\right) \stackrel{\text{Monot.}^{10}}{\downarrow} \lambda\left(\bigcup_{j=1}^{\infty} I_j\right) = \lambda(I)$$

Für die andere Richtung wählen wir zunächst für jedes $k \in \mathbb{N}$ ein *offenes* $J_k \supset I_k$ mit

$$\lambda(J_k) \leq \lambda(I_k) + \frac{\varepsilon}{2^k}$$

für ein zu bestimmendes $\varepsilon > 0$.

¹⁰ $\lambda\left(\bigcup_{j=1}^k B_j\right) = \sum_{j \in \mathbb{N}} \lambda(B_j)$ vgl. Beweis zu Satz 12(i).

Sei zunächst I kompakt. Dann können wir endlich viele J_k auswählen, sodass diese I überdecken¹¹. Wir können durch Umnummerierung erreichen, dass dies die ersten K Elemente sind und wir haben

$$\lambda(I) \stackrel{\text{Monot.}}{\leq} \lambda\left(\bigcup_{j=1}^K J_j\right) \stackrel{\text{Subadd.}}{\leq} \sum_{j=1}^K \lambda(J_j) \stackrel{\text{Konstr.}}{\leq} \varepsilon + \sum_{j=1}^K \lambda(I)$$

Mit $\varepsilon \searrow 0$ folgt σ -Additivität für kompakte I . Da wir mit Additivität und $\lambda(\{x\}) = \lambda([x, x]) = 0 \forall x \in \mathbb{R}$ Endpunkte an Intervalle hinzufügen / entfernen können, folgt die Behauptung auch für beschränkte I .

Sei I nun ein unbeschränktes Intervall, damit ist $\lambda(I) = \infty$.

Zu zeigen ist, $\sum_{j=1}^{\infty} \lambda(I_j) = \infty$.

Sei $\xi \in I$. Durch Hinzufügen eines Punktes (sofern erforderlich) können wir erreichen, dass I abgeschlossen ist. Damit ist $I \cap [-x, x]$ kompakt für jedes $x \in \mathbb{R}$ und wird folglich von den ersten K Elementen überdeckt, $K = K(\xi)$.

Demnach erhalten wir

$$\sum_{j=1}^{\infty} \lambda(I_j) \geq \sum_{j=1}^K \lambda(I_j) \stackrel{\text{Konstr. } J_k}{\geq} \left(\sum_{j=1}^K \lambda(J_j) \right) - \varepsilon \stackrel{\text{s.o.}}{\geq} \lambda(I \cap [-x, x]) - \varepsilon \geq x - |\xi| - \varepsilon$$

Hieraus folgt

$$\sum_{j=1}^{\infty} \lambda(I_j) \geq x - |\xi| - \varepsilon \xrightarrow{x \rightarrow \infty} \infty.$$

□

¹¹Satz von Heine-Borel

Riemann-Integral



$$\int f \approx \sum_{j=1}^k (x_j - x_{j-1}) f(x_j)$$

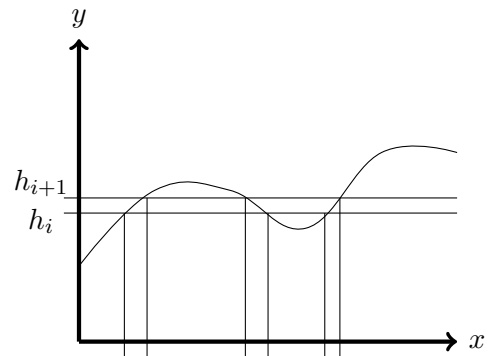
Kriterium

(Obersumme – Untersumme) $\rightarrow 0$

f muss hinreichend „schön“ sein (z. B. nicht überabzählbar viele Sprünge).

z. B. nicht Riemann-integrierbar: $\chi_{\mathbb{Q}}$

Lebesgue-Integral



$$\int f \approx \sum_{k \in \mathbb{N}} h_k \lambda(f^{-1}([h_k, h_{k+1}]))$$

Hierfür müssen die Urbilder der Intervalle messbar sein.

1.3 Messbare Funktionen

Definition 33. Seien $(X, \Sigma_X), (Y, \Sigma_Y)$ Messräume. Eine Funktion $f: X \rightarrow Y$ heißt *messbar* (eigentlich Σ_X - Σ_Y -messbar), falls $f^{-1}(A) \in \Sigma_X \forall A \in \Sigma_Y$.

Ist X ein topologischer Raum und Σ_X die entsprechende Borel- σ -Algebra, so nennen wir eine messbare Funktion *Borel-Funktion*.

Bemerkung 34. Es genügt, Messbarkeit für ein Messsystem $S \subset \mathfrak{P}(Y)$ mit $\Sigma(S) = \Sigma_Y$ zu überprüfen.

In der Tat ist $f^{-1}(A) \in \Sigma_X$ für jedes $A \in S$, es folgt

$$f^{-1}(A^c) = f^{-1}(Y \setminus A) = X \setminus f^{-1}(A) = (f^{-1}(A))^c \in \Sigma_X.$$

Weiter ist

$$f^{-1}\left(\bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k\right) = \bigcup_{k \in \mathbb{N}} \underbrace{f^{-1}(A_k)}_{\in \Sigma_X} \in \Sigma_X.$$

Im Folgenden häufig $(Y, \Sigma) = (\mathbb{R}^n, \mathcal{B}^n)$.

Lemma 35. Eine Funktion $f: (X, \Sigma) \rightarrow (\mathbb{R}^n, \mathcal{B}^n)$ ist genau dann messbar, wenn

$$f^{-1}(I) \in \Sigma \forall I = \bigtimes_{j=1}^n (a_j, \infty), a_1, \dots, a_n \in \mathbb{R}$$

Insbesondere ist f genau dann messbar, wenn jede seiner Komponenten $x \mapsto \langle f(x), e_\ell \rangle$, $\ell = 1, \dots, n$ messbar ist, und eine komplexwertige Funktion ist messbar genau dann, wenn Real- und Imaginärteil messbar sind.

Beweis. Die σ -Algebra, die von den verallgemeinerten Quadern I erzeugt wird, enthält sämtliche Quader der Form $\times_{j=1}^n (a_j, b_j)$, $-\infty < a_j < b_j < \infty$. Diese bilden eine Basis für die Topologie und führen somit auf \mathcal{B}^n . Hieraus folgt unmittelbar die zweite Aussage. \square

Die Intervalle (a_j, ∞) können äquivalent durch $[a_j, \infty)$ beziehungsweise $(-\infty, a_j)$ und $(-\infty, a_j]$ ersetzt werden.

Lemma 36. Seien $(X, \Sigma_X), (Y, \Sigma_Y), (Z, \Sigma_Z)$ Messräume. Sind $f: X \rightarrow Y, g: Y \rightarrow Z$ messbar, dann ist auch $g \circ f: X \rightarrow Z$ messbar. Sind Σ_X, Σ_Y Borel- σ -Algebren und X, Y entsprechend topologische Räume, so ist jede stetige Funktion $f: X \rightarrow Y$ messbar.

Beweis. Das Urbild offener Mengen (diese erzeugen die Borel- σ -Algebra Σ_Y) ist aufgrund der Stetigkeit offen, also messbar (da Σ_X alle offenen Mengen enthält). Ist $C \in \Sigma_Z$ messbar, so ist es auch $B := g^{-1}(C) \in \Sigma_Y$ und $A := f^{-1}(B) \in \Sigma_X$. \square

Lemma 37. Sind $f, g: (X, \Sigma) \rightarrow (\mathbb{R}, \mathcal{B})$ messbar, so auch $f + g$ und $f \cdot g$.

Beweis. Addition und Multiplikation sind stetige Abbildungen

$$(\mathbb{R}, \mathcal{B}) \times (\mathbb{R}, \mathcal{B}) \rightarrow (\mathbb{R}, \mathcal{B}).$$

Somit folgt die Behauptung nach Lemma 36. \square

Notation 38. Gelegentlich möchte man die Werte $\pm\infty$ zulassen; wir setzen $\overline{\mathbb{R}} = \mathbb{R} \cup \{-\infty, \infty\}$. Wir nennen $A \subset \overline{\mathbb{R}}$ Borel-Menge, wenn $A \subset \mathbb{R}$ eine Borel-Menge ist. Entsprechend ist $f: X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ eine Borel-Funktion, wenn $f^{-1}(\{-\infty, \infty\})$ beide Borel-Mengen sind und $f|_{X \setminus f^{-1}(\{\pm\infty\})}$ eine Borel-Funktion ist. Die entsprechende Borel- σ -Algebra zu $\overline{\mathbb{R}}$ wird mit $\overline{\mathcal{B}}$ bezeichnet.

Bemerkung 39. Wegen $\{+\infty\} = \bigcap_{k \in \mathbb{N}} (k, +\infty]$, $\{-\infty\} = \overline{\mathbb{R}} \setminus \bigcup_{k \in \mathbb{N}} (-k, +\infty]$ ist $f: X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ messbar genau dann, wenn $f((a, +\infty]) \in \Sigma \forall a \in \mathbb{R}$. Auch hier können wir alternativ $[a, +\infty]$ beziehungsweise $[-\infty, a)$ oder $[-\infty, a]$ verwenden. Insofern gilt Lemma 37 auch für $f, g: (X, \Sigma) \rightarrow (\overline{\mathbb{R}}, \overline{\mathcal{B}})$, wenn man Ausdrücke der Form $\infty - \infty$ beziehungsweise $0 \cdot \infty$ vermeidet. In der Regel setzt man $\infty - \infty = 0, 0 \cdot \infty = 0$.

Wichtig: Die Menge der messbaren Funktionen ist unter Grenzwertbildung abgeschlossen, genauer:

Lemma 40. Sei $(f_k)_{k \in \mathbb{N}}$ eine Folge messbarer Funktionen $(X, \Sigma) \rightarrow (\overline{\mathbb{R}}, \overline{\mathcal{B}})$. Dann sind auch $\sup_{k \in \mathbb{N}} f_k, \inf_{k \in \mathbb{N}} f_k, \limsup_{k \rightarrow \infty} f_k, \liminf_{k \rightarrow \infty} f_k$ messbar¹².

¹²Sei $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge reeller Zahlen. Dann ist der Limes inferior von $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ definiert als $\liminf_{n \rightarrow \infty} x_n := \sup_{n \in \mathbb{N}} \inf_{k \geq n} x_k$. Analog ist der Limes superior von $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ definiert als $\limsup_{n \rightarrow \infty} x_n := \inf_{n \in \mathbb{N}} \sup_{k \geq n} x_k$.

Beweis. Wir haben

$$\left(\sup_{k \in \mathbb{N}} f_k\right)^{-1}((a, \infty]) \stackrel{(*)}{=} \bigcup_{k \in \mathbb{N}} f_k^{-1}((a, \infty])$$

und dies ist $\forall a \in \mathbb{R}$ messbar. Hierbei wurde

$$x \in \left(\sup_{k \in \mathbb{N}} f_k\right)^{-1}((a, \infty]) \stackrel{(*)}{\iff} \sup_{k \in \mathbb{N}} f_k(x) > a \iff \exists k_0 \in \mathbb{N}: f_{k_0}(x) > a$$

verwendet. Die restlichen Aussagen folgen mit

$$\inf_{k \in \mathbb{N}} f_k = -\sup_{k \in \mathbb{N}} (-f_k), \quad \liminf_{n \rightarrow \infty} f_k = \sup_{k \in \mathbb{N}} \inf_{j \geq k} f_j, \quad \limsup_{n \rightarrow \infty} f_k = \inf_{n \in \mathbb{N}} \sup_{j \geq k} f_j.$$

□

Zusatz zu Lemma 40: Für messbare f, g sind auch $\min(f, g)$, $\max(f, g)$, $|f| = \max(f, -f)$, $f^\pm = \max(\pm f, 0) (\geq 0)$ sowie alle punktweisen Limites messbarer Funktionen messbar.

1.4 Integration

Im Folgenden sei (X, Σ, μ) ein Maßraum.

Definition 41. Eine messbare Funktion $f: (X, \Sigma) \rightarrow (\mathbb{R}, \mathcal{B})$ heißt *einfach*, wenn ihr Bild endlich ist, das heißt, es gibt Mengen $A_1, \dots, A_m \in \Sigma$, $\alpha_1, \dots, \alpha_m \in \mathbb{R}$ mit

$$f = \sum_{j=1}^m \alpha_j \chi_{A_j},$$

wobei χ_M die *charakteristische Funktion*

$$\chi_M(x) = \begin{cases} 0 & : x \notin M \\ 1 & : x \in M \end{cases}$$

bezeichnet. Wir können fordern, dass die A_j paarweise disjunkt sind, die α_j paarweise verschieden und $\bigcup A_j = X$ gilt: in diesem Fall ist $f(X) = \{\alpha_1, \dots, \alpha_m\}$ und $f^{-1}(\{\alpha_j\}) = A_j \forall j = 1, \dots, m$ und diese Darstellung ist eindeutig. Der Vektorraum einfacher Funktionen wird mit $S(X, \mu)$ bezeichnet.

Definition 42 (Integral). Das Integral einer nicht-negativen, einfachen Funktion über der Menge $A \in \Sigma$ wird durch

$$\int_A f \, d\mu := \sum_{j=1}^m \alpha_j \mu(A_j \cap A)$$

erklärt, wobei wir $0 \cdot \infty = 0$ vereinbaren.

Lemma 43. Das Integral hat die folgenden Eigenschaften:

- (i) $\int_A f \, d\mu = \int_X f \chi_A \, d\mu$, $f \in S(X, \mu)$, $f \geq 0$, $A \in \Sigma$
- (ii) $\int_{\bigcup_{k \in \mathbb{N}} B_k} f \, d\mu = \sum_{k \in \mathbb{N}} \int_{B_k} f \, d\mu$, für paarweise disjunkte $(B_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \Sigma$
- (iii) $\int_A \alpha f \, d\mu = \alpha \int_A f \, d\mu$ für $\alpha \geq 0$
- (iv) $\int_A (f + g) \, d\mu = \int_A f \, d\mu + \int_A g \, d\mu$, $g \in S(X, \mu)$
- (v) $A \subset B$, $B \in \Sigma \Rightarrow \int_A f \, d\mu \leq \int_B f \, d\mu$
- (vi) $f \leq g \Rightarrow \int_A f \, d\mu \leq \int_A g \, d\mu$ für $g \in S(X, \mu)$, $g \geq 0$

Beweis.

- (i) folgt sofort aus Definition 42, denn $\sum_{j=1}^m \alpha_j \mu(A_j \cap A) = \sum_{j=1}^m \beta_j \mu(A_j)$ für B_j , die auf $f \cdot \chi_{A_j}$ angepasst sind.
- (ii) $\mu(A_j \cap \bigcup_{n \in \mathbb{N}} B_n) = \sum_{k \in \mathbb{N}} \mu(A_j \cap B_k)$ (man darf Reihe über nicht negative Zahlen beliebig umsortieren.)
- (iii) klar.
- (iv) Für $f = \sum_{j=1}^m \alpha_j \chi_{A_j}$, $g = \sum_{k=1}^n \beta_k \chi_{B_k}$ (wie in Definition 42) haben wir mit $C_{jk} = A_j \cap B_k$

$$\begin{aligned} \int_A (f + g) \, d\mu &\stackrel{(ii)}{=} \sum_{j,k} \int_{C_{jk}} (f + g) \, d\mu = \sum_{j,k} (\alpha_j + \beta_k) \mu(C_{jk}) \\ &= \underbrace{\sum_{j,k} \alpha_j \mu(C_{jk})}_{=\sum_{j=1}^m \alpha_j \mu(A_j)} + \sum_{j,k} \beta_k \mu(C_{jk}) = \int_A f \, d\mu + \int_A g \, d\mu \end{aligned}$$

- (v) folgt aus der Monotonie von μ

- (vi) erhält man wie in (iv) mit

$$\int_A f \, d\mu = \sum_{j,k} \alpha_j \mu(C_{jk}) \stackrel{(*)}{\leq} \sum_{j,k} \beta_k \mu(C_{jk}) = \int_A g \, d\mu,$$

wobei für (*) gilt: auf C_{jk} : $\alpha_j \leq \beta_k$ (wegen $f < g$, C_{jk} paarweise disjunkt).

□

Definition 44 (Integral). Sei (X, Σ, μ) ein Maßraum, $A \in \Sigma$, $f: (X, \Sigma) \rightarrow (\mathbb{R}, \mathcal{B})$ messbar und nicht negativ. Dann ist

$$\int_A f \, d\mu := \sup \left\{ \int_A g \, d\mu \mid g \in S(X, \mu), g \leq f, g \geq 0 \right\}$$

Bis auf (ii) und (iv) übertragen sich die Aussagen aus Lemma 43 auf bel. nicht-negative messbare Funktionen durch Approximation.

Satz 45 (Monotone Konvergenz/ Beppo Levi). Sei $(f_k)_{k \in \mathbb{N}}$ eine Folge messbarer nicht-negativer Funktionen $f_k: (X, \Sigma) \rightarrow (\mathbb{R}, \mathcal{B})$ mit $f_k \nearrow f$. Dann ist für $A \in \Sigma$

$$\int_A f_k d\mu \rightarrow \int_A f d\mu$$

Beweis. (f messbar wegen Lemma 40). Aus Lemma 43 (vi) erhalten wir zunächst die Monotonie von $\int_A f_k d\mu$ und hieraus die Konvergenz gegen ein $\varphi \in [0, \infty]$. Aus $f_k \leq f$ und 43(vi) folgt $\varphi \leq \int_A f d\mu$. Für die Umkehrung wählen wir ein $g \in S(X, \mu)$, $g \geq 0$, $g \leq f$. Mit $A_K := \{x \in A \mid f_k(x) \geq \vartheta \cdot g(x)\}$ für ein festes $\vartheta \in (0, 1)$. Nun ist $A_k \nearrow A$ ($\bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k \supset A$ erfordert $\vartheta \in (0, 1)$) und hieraus

$$\underbrace{\int_A f_k d\mu}_{k \rightarrow \infty \nearrow \varphi} \stackrel{43(v)}{\geq} \int_{A_k} f_k d\mu \geq \int_{A_k} \varphi g d\mu \stackrel{43(ii)}{=} \varphi \int_{A_k} g d\mu \rightarrow \varphi \int_A g d\mu$$

Insbesondere gilt dies auch für $\varphi = 1$, also $\varphi \geq \int_A g d\mu$. Durch Supremumsbildung erhalten wir $\varphi = \int_A f d\mu$. \square

Bemerkung 46. Für jede nicht-negative Funktion f mit einer monoton steigenden Folge nicht-negativer, einfacher Funktionen $(g_k)_{k \in \mathbb{N}}$, $g_k \nearrow f$ ist $\int_A g_k d\mu \nearrow \int_A f d\mu$. Eine geeignete Folge $(g_k)_{k \in \mathbb{N}}$ lässt sich folgendermaßen konstruieren:

$$g_k(x) := \sum_{j=0}^{k2^k} \frac{j}{2^k} \chi_{f^{-1}(A_j)}(x) \text{ mit } A_j = \begin{cases} [\frac{j}{2^k}, \frac{j+1}{2^k}), & j = 0, \dots, k2^k - 1 \\ [k, \infty), & j = k2^k \end{cases}$$

Ist f (gleichmäßig¹³) beschränkt, so konvergiert $(g_k)_{k \in \mathbb{N}}$ gleichmäßig, denn $f \in M$ impliziert $0 \leq f - g_k < \frac{1}{2^k}$ für $k > M$. Mit Satz 45 überträgt man auch 43(ii) und (iv), da Grenzwerte über nicht-negative Größen vertauschen.

Lemma 47. Ist $f \geq 0$ messbar, so wird durch $\nu(A) := \int_A f d\mu$ ein Maß mit $\int g d\nu = \int gf d\mu$ für jedes messbare $g \geq 0$ definiert und wir schreiben $d\nu = f d\mu$

Beweis.

$$\nu(\emptyset) = \int_{\emptyset} f d\mu \stackrel{(i)}{=} \int \underbrace{\chi_{\emptyset}}_{=0} f d\mu \stackrel{(i)}{=} 0 \cdot \int f d\mu \stackrel{0 \cdot \infty = 0}{=} 0$$

Weiterhin ist

$$\nu(A \cup B) = \int_{(A \cup B)} f d\mu \stackrel{(ii)}{=} \int_A f d\mu + \int_B f d\mu = \nu(A) + \nu(B) \text{ für } (A \cap B) = \emptyset$$

¹³Sei X eine beliebige Menge. Dann heißt eine Familie \mathcal{F} von auf X definierten, reellwertigen Funktionen gleichmäßig beschränkt, wenn es eine reelle Zahl S gibt, für die gilt: $\forall x \in X \forall f \in \mathcal{F}: |f(x)| \leq S$. Das heißt, S ist eine gemeinsame obere Schranke für die Werte der Beträge aller Funktionen aus \mathcal{F} .

Für abzählbare Vereinigungen liefert *Lemma 43 (ii)*

$$\nu\left(\bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k\right) = \int_{\bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k} f \, d\mu \stackrel{(ii)}{=} \sum_{k \in \mathbb{N}} \int_{A_k} f \, d\mu = \sum_{k \in \mathbb{N}} \nu(A_k)$$

Ist g einfach und nicht-negativ, so gilt $g = \sum_{j=1}^m \alpha_j \chi_{B_j}$ für disjunkte $B_j \in \Sigma$, $\bigcup B_j = X$ und $\alpha_j \geq 0$, und wir haben

$$\int g \, d\nu = \sum_{j=1}^m \alpha_j \nu(A_j) = \sum_{j=1}^m \alpha_j \int_{B_j} f \, d\mu \stackrel{43(iii)}{=} \sum_{j=1}^m \int \alpha_j f \chi_{B_j} \, d\mu \stackrel{43(iv)}{=} \int \underbrace{\left(\sum_{j=1}^m \alpha_j \chi_{B_j} \right)}_{=g} f \, d\mu$$

Approximation liefert die Behauptung für beliebige $g \geq 0$ mit *Satz 45*. \square

Satz 48 (Lemma von Fatou). Sei (X, Σ, μ) ein Maßraum. Ist $(f_k)_{k \in \mathbb{N}}$ eine Folge nicht-negativer Funktionen $(X, \Sigma) \rightarrow (\mathbb{R}, \mathcal{B})$, so haben wir für ein beliebiges $A \in \Sigma$

$$\int_A \liminf_{k \rightarrow \infty} f_k \, d\mu \leq \liminf_{k \rightarrow \infty} \int_A f_k \, d\mu$$

Bemerkung 49. Im Allgemeinen können wir keine Gleichheit erwarten. Z.B. ist für $f_k = \chi_{[k, k+1]}$, $k \in \mathbb{N}$, einerseits $f_k(X) \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0 \, \forall x \in \mathbb{R}$ nicht gleichmäßig, andererseits $\int_{\mathbb{R}} f_k \, dx = 1$. Genauso für $f_k = k \chi_{(0, 1/k)}$ und $f_k = \frac{1}{k} \chi_{(0, k)}$ (in letzterem Fall haben wir sogar gleichmäßige Konvergenz).

Beweis: Lemma von Fatou. Wir setzen $g_k := \inf_{j \geq k} f_j$, also $g_k \nearrow \liminf_{j \rightarrow \infty} f_j$. Weiterhin $g_k \leq f_k \, \forall k \in \mathbb{N}$, folglich $\int_A g_k \, d\mu \leq \int_A f_k \, d\mu$ nach *Lemma 43(vi)*. Übergang zum $\liminf_{k \rightarrow \infty}$ liefert

$$\liminf_{k \rightarrow \infty} \int g_k \, d\mu = \lim_{k \rightarrow \infty} \int g_k \, d\mu \stackrel{\text{Satz 45}}{=} \int_A \lim_{k \rightarrow \infty} g_k \, d\mu = \int_A \liminf_{k \rightarrow \infty} f_k \, d\mu$$

\square

Definition 50 (Nochmal Integral). Sei (X, Σ, μ) ein Maßraum $A \in \Sigma$ $f : (X, \Sigma) \rightarrow (\mathbb{R}, \mathcal{B})$ messbar. Ist $\int_A f^\pm \, d\mu < \infty$, so nennen wir f über A integrierbar und wir setzen

$$\int_A f \, d\mu := \int_A f^+ \, d\mu - \int_A f^- \, d\mu \in \mathbb{R}$$

Die Menge der über A integrierbaren Funktionen bezeichnen wir $\mathcal{L}^1(A, \mu)$

Lemma 51. Unter der Bedingung von Definition 50 ist das Integral linear und erfüllt sämtliche Eigenschaften aus Lemma 43. Eine Funktion ist genau dann integrierbar, wenn ihr Betrag integrierbar ist. Darüber hinaus gilt für integrierbare Funktionen $f, g : X \rightarrow \mathbb{R}$

$$\left| \int_A f \, d\mu \right| \leq \int_A |f| \, d\mu$$

und die Dreiecksungleichung

$$\int |f + g| d\mu \leq \int_A |f| d\mu + \int_A |g| d\mu$$

Beweis. Linearität und Lemma 43 verifiziert man unmittelbar. Setze $\varphi := \int f d\mu$, dann ist

$$|\varphi| = (\text{sign } \varphi) \varphi \stackrel{\text{Linearität}}{=} \int_A (\text{sign } \varphi) f d\mu \stackrel{43(vi)}{\leq} \int_A |f| d\mu$$

Die Dreiecksungleichung folgt mit $|f + g| \leq |f| + |g|$ aus der Linearität des Integrals. \square

Lemma 52. Sei (X, Σ, μ) ein Maßraum, $f: X \rightarrow \mathbb{R}$, messbar

(i) Wir haben $\int_X |f| d\mu = 0 \Leftrightarrow f(x) = 0$ für μ -fast alle $x \in X$

(ii) Ist f außerdem integrierbar oder nicht negativ und $A \in \Sigma$, so ist

$$\mu(A) = 0 \Rightarrow \int_A f d\mu = 0$$

Beweis. ÜZ3/A10 \square

Insofern ändert sich der Wert eines Integranten nicht, wenn wir den Integranten auf einer Nullmenge abändern.

Lemma 53 (Noch Fatou). Sei (X, Σ, μ) ein Maßraum, $A \in \Sigma$, $(f_k)_{k \in \mathbb{N}}$ eine Folge messbarer Funktionen $X \rightarrow \mathbb{R}$ und $g: X \rightarrow \mathbb{R}$ integrierbar, dann gilt

$$\begin{aligned} \int_A \liminf_{k \rightarrow \infty} f_k d\mu &\leq \liminf_{k \rightarrow \infty} \int_A f_k d\mu, \text{ falls } g \leq f_k \forall k \in \mathbb{N} \\ \limsup_{k \rightarrow \infty} \int_A f_k d\mu &\leq \int_A \limsup_{k \rightarrow \infty} f_k d\mu, \text{ falls } f_k \leq g \forall k \in \mathbb{N} \end{aligned}$$

Beweis. Man wende für die erste Ungleichung das Fatou-Lemma auf $f_k - g$ an und subtrahiere $\int_A g d\mu$ auf beiden Seiten.

Die zweite Aussage folgt mit $\liminf_{k \rightarrow \infty} (-f_k) = -\limsup_{k \rightarrow \infty} f_k$ \square

Satz 54 (Dominierte Konvergenz). Sei (X, Σ, μ) ein Maßraum, $A \in \Sigma$, $(f_k)_{k \in \mathbb{N}}$ eine Folge messbarer Funktionen $X \rightarrow \mathbb{R}$, die punktweise¹⁴ fast überall, d.h. bis auf μ -Nullmengen gegen $f: X \rightarrow \mathbb{R}$ konvergiere. Gibt es eine Majorante, das heißt ein integrierbares $g: X \rightarrow \mathbb{R}$ mit $\sup_{k \in \mathbb{N}} |(f_k)_{k \in \mathbb{N}}| \leq g$, so ist auch f integrierbar und wir haben $\int_A f_k d\mu \xrightarrow{k \rightarrow \infty} \int_A f d\mu$.

Beweis. Nach Voraussetzung ist $-g \leq f_k \leq g \forall k \in \mathbb{N}$, folglich erhalten wir mit Lemma 53

$$\int_A f d\mu = \int_A \liminf_{k \rightarrow \infty} f_k d\mu \stackrel{53}{\leq} \liminf_{k \rightarrow \infty} \int_A f_k d\mu \leq \limsup_{k \rightarrow \infty} \int_A f_k d\mu \stackrel{53}{\leq} \int_A \underbrace{\limsup_{k \rightarrow \infty} f_k}_{\lim_{k \rightarrow \infty} f_k = f} d\mu$$

\square

¹⁴Sei $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}, f_n: D \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktionenfolge. Die Funktionenfolge heißt punktweise konvergent gegen eine Funktion $f: D \rightarrow \mathbb{R}$, wenn $\forall x \in D$ gilt: $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x)$

Zur Notwendigkeit der Voraussetzung an g , vergleiche *Beispiel 46*.

Bemerkung 55. Für stetige und Lebesgue-integrierbare Funktionen auf reellen Intervallen stimmen Riemann- und Lebesgue-Integral überein.

Sei $f \in C^0(a, b)$ Lebesgue-integrierbar auf (a, b) .

Wir setzen

$$F(x) = \int_{(a,x]} f \, d\lambda, \quad x \in (a, b)$$

Wir behaupten $F \in C^1(a, b)$ mit $F'(x) = f(x) \, \forall x \in (a, b)$.

In der Tat, für $\varepsilon > 0$ ist

$$\begin{aligned} \frac{F(x+\varepsilon) - F(x)}{\varepsilon} &\stackrel{\text{Lem. 43}}{=} \frac{1}{\varepsilon} \int_{(x, x+\varepsilon]} f(\xi) \, d\lambda(\xi) = \frac{1}{\varepsilon} \int_{(x, x+\varepsilon]} (f(x) + f(\xi) - f(x)) \, d\lambda(\xi) \\ &\stackrel{\text{Lem. 43}}{=} \frac{1}{\varepsilon} \int_{(x, x+\varepsilon]} f(x) \, d\lambda(\xi) + \frac{1}{\varepsilon} \int_{(x, x+\varepsilon]} \underbrace{(f(\xi) - f(x))}_{\leq \sup_{\eta \in (x, x+\varepsilon]} |f(\eta) - f(x)|} \, d\lambda(\xi) \\ &\stackrel{\text{Lem. 45}}{\leq} \frac{1}{\varepsilon} f(x) \underbrace{\lambda((x, x+\varepsilon])}_{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon} \lambda((x, x+\varepsilon]) \sup |f(\eta) - f(x)|. \end{aligned}$$

Wir haben also

$$\frac{F(x+\varepsilon) - F(x)}{\varepsilon} = f(x) + \int_{(x, x+\varepsilon]} (f(\xi) - f(x)) \, d\lambda(\xi)$$

mit

$$\left| \int_{(x, x+\varepsilon]} (f(\xi) - f(x)) \, d\lambda(\xi) \right| \stackrel{\text{L. 51}}{\leq} \frac{1}{\varepsilon} \int_{(x, x+\varepsilon]} |f(\xi) - f(x)| \, d\lambda(\xi) \leq \sup_{\eta \in (x, x+\varepsilon]} |f(\eta) - f(x)| \xrightarrow[\text{Stetig.}]{\varepsilon \searrow 0} 0.$$

Für $\varepsilon < 0$ argumentiere analog.

Ist f stetig auf einem kompakten Intervall, so ist f beschränkt und messbar, also Lebesgue-integrierbar.

Allgemeiner ist jede beschränkte messbare Funktion auf einem kompakten Intervall genau dann Riemann-integrierbar, wenn die Menge ihrer Unstetigkeitsstellen eine Lebesgue-Nullmenge ist.

In diesem Fall stimmen Riemann- und Lebesgue-Integral überein. Diese Aussage gilt nicht für verallgemeinerte Intervalle.

Beispiel. $\int_0^\infty \frac{\sin x}{x} \, dx$ existiert als Riemann-Integral $\lim_{R \nearrow \infty} \int_0^R \frac{\sin(x)}{x} \, dx$, andererseits ist $\int_0^\infty \left| \frac{\sin x}{x} \right| \, dx = \infty$, also keine Lebesgue-Integrierbarkeit.

1.5 Produktmaße

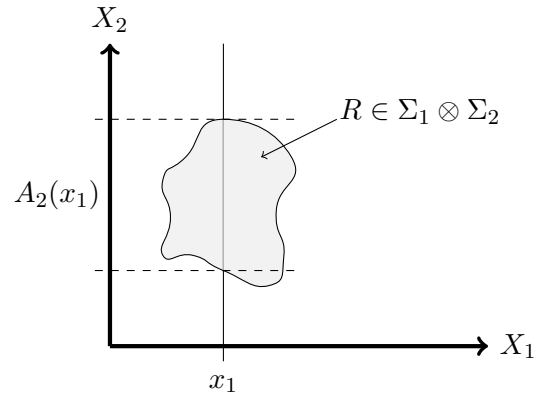
Notation 56. Für Messräume $(X_1, \Sigma_1), (X_2, \Sigma_2)$ bezeichnen wir die σ -Algebra, die alle „Rechtecke“ der Form $A_1 \times A_2$ mit $A_1 \in \Sigma_1, A_2 \in \Sigma_2$ enthält, mit $\Sigma_1 \otimes \Sigma_2$.

Lemma 57 (Schnitt-Eigenschaft). Für Messräume $(X_1, \Sigma_1), (X_2, \Sigma_2)$ und $A \in \Sigma_1 \otimes \Sigma_2 \subset \mathfrak{P}(X_1 \times X_2)$ liegen die Schnitte

$$A_1(x_2) = \{x_1 \in X_1 \mid (x_1, x_2) \in A\}$$

$$A_2(x_1) = \{x_2 \in X_2 \mid (x_1, x_2) \in A\} \quad \forall x_1 \in X_1 \text{ bzw. } x_2 \in X_2$$

in Σ_1 bzw. Σ_2 .



Beweis. Setze $S = \{A \in \Sigma_1 \otimes \Sigma_2 \mid A_1(x_2) \in \Sigma_1\}$. Natürlich ist $A_1 \times A_2 \in S$ für alle $A_1 \in \Sigma_1, A_2 \in \Sigma_2$. Insofern genügt es zu zeigen, dass S eine σ -Algebra ist. In der Tat ist $X_1 \times X_2 \in S$ und für $A \in S$ ist

$$(A^c)_1(x_2) = \{x_1 \mid (x_1, x_2) \in A^c\} = \{x_1 \mid (x_1, x_2) \in A\}^c = \underbrace{(A_1(x_2))^c}_{\in \Sigma_1} \in \Sigma_1.$$

Für $(A_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset S$ haben wir

$$\left(\bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k \right)_1(x_2) = \left\{ x_1 \mid (x_1, x_2) \in \bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k \right\} = \bigcup_{k \in \mathbb{N}} \underbrace{\{x_1 \mid (x_1, x_2) \in A_k\}}_{=(A_k)_1(x_2) \in \Sigma_1} \in \Sigma_1$$

Für $A_2(x_1)$ argumentiere analog. □

Corollar 58. Seien $(X_1, \Sigma_1), (X_2, \Sigma_2)$ Messräume und sei $f: (X_1 \times X_2, \Sigma_1 \otimes \Sigma_2) \rightarrow (\mathbb{R}, \mathcal{B})$ messbar.

Dann ist $x_1 \mapsto f(x_1, x_2)$ für jedes $x_2 \in X_2$ auf X_1 messbar und entsprechend $x_2 \mapsto f(x_1, x_2)$ für jedes $x_1 \in X_1$ auf X_2 .

Beweis. Für $B \in \mathcal{B}$ und $x_2 \in X_2$ ist $f^{-1}(\cdot, x_2)(B) \stackrel{!}{\in} \Sigma_1$.

In der Tat haben wir $A := f^{-1}(B) \stackrel{f \text{ messb.}}{\in} \Sigma_1 \otimes \Sigma_2$, also ist

$$f^{-1}(\cdot, x_2)(B) = \{x_1 \in X_1 \mid f(x_1, x_2) \in B\} = \{x_1 \in X_1 \mid (x_1, x_2) \in A\} = A_1(x_2) \in \Sigma_1$$

und Lemma 57. □

Ziel: Definiere Produktmaß $\mu_1 \otimes \mu_2$ auf $\Sigma_1 \otimes \Sigma_2$ mit

$$(*) \quad (\mu_1 \otimes \mu_2)(A_1 \times A_2) = \mu_1(A_1)\mu_2(A_2) \quad \forall A_1 \in \Sigma_1, A_2 \in \Sigma_2$$

Sind μ_1 und μ_2 beide σ -finit, so folgt Eindeutigkeit des Produktmaßes (Existenz müssen wir noch zeigen) aus Satz 23.

Satz 59. Sind $(X_1, \Sigma_1, \mu_1), (X_2, \Sigma_2, \mu_2)$ Maßräume mit σ -finiten Maßen und $A \in \Sigma_1 \otimes \Sigma_2$. Dann sind die Abbildungen $x_1 \mapsto \mu_2(A_2(x_1))$, $x_2 \mapsto \mu_1(A_1(x_2))$ auf X_1 bzw. X_2 messbar und es gilt

$$\int_{X_1} \mu_2(A_2(x_1)) \, d\mu_1(x_1) = \int_{X_2} \mu_1(A_1(x_2)) \, d\mu_2(x_2).$$

Beweis. Übungsaufgabe. □

Definition 60. Seien $(X_1, \Sigma_1, \mu_1), (X_2, \Sigma_2, \mu_2)$ Maßräume mit σ -finiten Maßen.

Für $A \in \Sigma_1 \otimes \Sigma_2$ setzen wir

$$(\mu_1 \otimes \mu_2)(A) := \int_{X_1} \underbrace{\mu_2(A_2(x_1))}_{=\int_{X_2} \chi_A(x_1, x_2) \, d\mu_2(x_2)} \, d\mu_1(x_1) = \int_{X_2} \underbrace{\mu_1(A_1(x_2))}_{=\int_{X_1} \chi_A(x_1, x_2) \, d\mu_1(x_1)} \, d\mu_2(x_2)$$

Bemerkung. $\chi_{A_1(x_2)}(x_1) = \chi_A(x_1, x_2) = \chi_{A_2(x_1)}(x_2)$

Lemma 61. Das Produktmaß ist für σ -finite Maße ebenfalls ein Maß und es ist eindeutig bezüglich (*).

Beweis. Eindeutigkeit: siehe oben; $(\mu_1 \otimes \mu_2)(\emptyset) = 0$ ist klar und σ -Additivität folgt mit dem Satz über monotone Konvergenz:

$$\begin{aligned} \underbrace{(\mu_1 \otimes \mu_2) \left(\bigcup_{k=1}^{\tau} A_k \right)}_{\substack{\xrightarrow{\tau \rightarrow \infty} (\mu_1 \otimes \mu_2) \left(\bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k \right) \\ \text{vgl. Bew. Satz 12}}} &\stackrel{\text{Def.}}{=} \int_{X_1} \mu_2 \left(\underbrace{\left(\bigcup_{k=1}^{\tau} A_k \right)_2}_{=\bigcup_{k=1}^{\tau} (A_k)_2(x_1)} (x_1) \right) \, d\mu_1(x_1) \\ &\stackrel{\sigma\text{-Add.}}{=} \int_{X_1} \sum_{k=1}^{\tau} \mu_2((A_k)_2(x_1)) \, d\mu_1(x_1) = \sum_{k=1}^{\tau} (\mu_1 \otimes \mu_2)(A_k) \end{aligned}$$

□

Satz 62 (Fubini). Seien $(X_1, \Sigma_1, \mu_1), (X_2, \Sigma_2, \mu_2)$ Maßräume mit σ -finiten Maßen und $f: (X_1 \times X_2, \Sigma_1 \otimes \Sigma_2) \rightarrow (\mathbb{R}, \mathcal{B})$ messbar.

(i) (Tonelli) Ist f nicht-negativ, so sind $\int_{X_2} f(\cdot, x_2) d\mu_2(x_2)$ und $\int_{X_1} f(x_1, \cdot) d\mu_1(x_1)$ als Funktion auf X_1 bzw. X_2 beide messbar und es gilt

$$\begin{aligned} \iint_{X_1 \times X_2} f(x_1, x_2) d(\mu_1 \otimes \mu_2)(x_1, x_2) &= \int_{X_1} \left(\int_{X_2} f(x_1, x_2) d\mu_2(x_2) \right) d\mu_1(x_1) \\ &= \int_{X_2} \left(\int_{X_1} f(x_1, x_2) d\mu_1(x_1) \right) d\mu_2(x_2). \end{aligned}$$

(ii) Allgemein ist $f \in \mathcal{L}^1(X_1 \times X_2, \mu_1 \otimes \mu_2)$ äquivalent zu

$$\begin{aligned} \int_{X_1} |f(x_1, \cdot)| d\mu_1(x_1) &\in \mathcal{L}(X_2, \mu_2) \\ \text{bzw.} \quad \int_{X_2} |f(\cdot, x_2)| d\mu_2(x_2) &\in \mathcal{L}(X_1, \mu_1) \end{aligned}$$

und in diesem Fall gilt (i).

Beweis. Aufgrund der Linearität erhalten wir aus Satz 59 für eine einfache Funktion $f = \sum_{j=1}^k \alpha_j \chi_{A_j}$, $\alpha_j \geq 0$, $A_j \in \Sigma_1 \otimes \Sigma_2$, $A_i \cap A_j = \emptyset$, $X = \bigcup_{j=1}^k A_j$

$$\int_{X_2} f(\cdot, x_2) d\mu_2(x_2) = \sum_{j=1}^k \alpha_j \underbrace{\mu_2((A_j)_2(\cdot))}_{\text{messbar nach Satz 59}}$$

Weiterhin ist

$$\begin{aligned} \iint_{X_1 \times X_2} f(x_1, x_2) d(\mu_1 \otimes \mu_2)(x_1, x_2) &= \sum_{j=1}^k \alpha_j \iint_{X_1 \times X_2} \chi_{A_j}(x_1, x_2) d(\mu_1 \otimes \mu_2)(x_1, x_2) \\ &\stackrel{\text{Def. 60}_k}{=} \sum_{j=1}^k \alpha_j \int_{X_1} \left(\int_{X_2} \chi_{A_j}(x_1, x_2) d\mu_2(x_2) \right) d\mu_1(x_1) \\ &= \int_{X_1} \left(\int_{X_2} f(x_1, x_2) d\mu_2(x_2) \right) d\mu_1(x_1) \\ &= \dots = \int_{X_2} \left(\int_{X_1} f(x_1, x_2) d\mu_1(x_1) \right) d\mu_2(x_2) \end{aligned}$$

Sei nun $(f_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset S(X_1 \times X_2, m\mu_1 \otimes \mu_2)$ mit $0 \leq f_k \nearrow f$. Dann haben wir

$$\int_{X_2} f_k(\cdot, x_2) d\mu_2(x_2) \leq \int_{X_2} f(\cdot, x_2) d\mu_2(x_2) \quad \forall k \in \mathbb{N}$$

und

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \int_{X_2} f_k(\cdot, x_2) d\mu_2(x_2) \stackrel{\text{Satz 45}}{=} \int_{X_2} f(\cdot, x_2) d\mu_2(x_2)$$

Nun sind erneut die Voraussetzungen für Satz 45 erfüllt und wir erhalten

$$\begin{aligned} \lim_{k \rightarrow \infty} \int_{X_1} \int_{X_2} f_k(x_1, x_2) d\mu_2(x_2) d\mu_1(x_1) &= \int_{X_1} \lim_{k \rightarrow \infty} \int_{X_2} f_k(x_1, x_2) d\mu_2(x_2) d\mu_1(x_1) \\ &= \int_{X_1} \int_{X_2} f(x_1, x_2) d\mu_2(x_2) d\mu_1(x_1) \end{aligned}$$

Genauso mit 1 und 2 vertauscht.

Einmalige Anwendung von Satz 45 liefert

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \iint_{X_1 \times X_2} f_k(x_1, x_2) d(\mu_1 \otimes \mu_2)(x_1, x_2) = \iint_{X_1 \times X_2} f(x_1, x_2) d(\mu_1 \otimes \mu_2)(x_1, x_2)$$

(ii) folgt sofort auf (i) mit $f = f^+ - f^-$ und $|f| = f^+ + f^-$.

Erinnerung: $f \in \mathcal{L}^1(X_1 \times X_2) \iff \iint |f| d(\mu_1 \otimes \mu_2)(x_1, x_2) < \infty$. □

Beispiel 63. Sei $X = \mathbb{R}^2$, $\Sigma = \mathcal{B}^2$, $f(x, y) = \frac{x-y}{(x+y)^3}$. Wir betrachten das Riemann-Integral

$$\int_0^1 \int_0^1 f(x, y) dx dy \stackrel{15}{=} - \int_0^1 \frac{dy}{(1+y)^2} = \frac{1}{1+y} \Big|_0^1 = -\frac{1}{2}$$

Wäre $f \in \mathcal{L}^1([0, 1]^2)$, so folge aus dem Satz 62 (Fubini) zunächst die Integrierbarkeit der Funktionen

$$\int_{(0,1)} f(x_1, \cdot) d\lambda(x_1), \int_{(0,1)} f(\cdot, x_2) d\lambda(x_2)$$

und da f auf $(0, 1) \times (0, 1)$ stetig ist, erhalten wir Übereinstimmung von Lebesgue- und Riemann-Integral und erneut mit Satz 62

$$\iint f(x_1, x_2) dx_1 dx_2 = \iint f(x_1, x_2) dx_2 dx_1. \quad \nleftrightarrow$$

Lemma 64. Seien $(X_1, \Sigma_1), (X_2, \Sigma_2)$ Messräume und $S_1 \subset \Sigma_1, S_2 \subset \Sigma_2$ mit $\Sigma_{X_1}(S_1) = \Sigma_1, \Sigma_{X_2}(S_2) = \Sigma_2$. Dann gilt

$$\underbrace{\Sigma_1 \otimes \Sigma_2}_{\substack{\sigma\text{-Algebra erzeugt von} \\ A_1 \times A_2, A_j \in \Sigma_j}} \stackrel{\substack{\supset \text{ haben} \\ \text{wir schon}}}{=} \underbrace{\Sigma_{X_1 \times X_2}(S_1 \times S_2)}_{\substack{\sigma\text{-Algebra erzeugt von} \\ A_1 \times A_2, A_j \in S_j}} =: \Sigma,$$

wobei $S_1 \times S_2 = \{A_1 \times A_2 \mid A_1 \in S_1, A_2 \in S_2\}$.

¹⁵ $\frac{d}{dx} \frac{x}{(x+y)^2} = \frac{1}{(x+y)^2} - 2 \frac{x}{(x+y)^3} = \frac{x-y}{(x+y)^3}$ und $\int_0^1 \int_0^1 f(x, y) dx dy = \frac{1}{2}$

Beweis.

” \supset ” klar.

” \subset ” Die Menge $\{A_1 \in \Sigma_1 \mid A_1 \times X_1 \in \Sigma\}$ ist eine σ -Algebra (nachrechnen!), die S_1 enthält, also identisch mit Σ_1 . Insbesondere mit $\Sigma_1 \times X_2 \stackrel{\text{def}}{=} \{A_1 \times X_2 \mid A_1 \in \Sigma_1\} \subset \Sigma$, ebenso gilt $X_1 \times \Sigma_2 \subset \Sigma$. Nun folgt

$$\begin{aligned}\Sigma_1 \times \Sigma_2 &= \{A_1 \times A_2 \mid A_1 \in \Sigma_1, A_2 \in \Sigma_2\} \\ &= \{(A_1 \times X_2) \cap (X_1 \times A_2) \mid A_1 \in \Sigma_1, A_2 \in \Sigma_2\} \\ &\stackrel{\text{def}}{=} (\Sigma_1 \times X_2) \cap (X_1 \times \Sigma_2) \subset \Sigma\end{aligned}$$

Weil Σ eine σ -Algebra ist, folgt $\Sigma_1 \otimes \Sigma_2 \subset \Sigma$.

□

Lemma 65. Gegeben seien Maßräume (X_j, Σ_j, μ_j) , $j = 1, 2, 3$, mit σ -finiten Maßen. Dann gilt $(\Sigma_1 \otimes \Sigma_2) \otimes \Sigma_3 = \Sigma_1 \otimes (\Sigma_2 \otimes \Sigma_3)$ und $(\mu_1 \otimes \mu_2) \otimes \mu_3 = \mu_1 \otimes (\mu_2 \otimes \mu_3)$.

Beweis. Die erste Identität folgt, weil beide Seiten jeweils von Mengen $A_1 \times A_2 \times A_3$, $A_j \in \Sigma_j$ erzeugt werden. Darüber hinaus stimmen die beiden Maße wegen

$$\begin{aligned}((\mu_1 \otimes \mu_2) \otimes \mu_3)(A_1 \times A_2 \times A_3) &= \mu_1(A_1)\mu_2(A_2)\mu_3(A_3) \\ &= (\mu_1 \otimes (\mu_2 \otimes \mu_3))(A_1 \times A_2 \times A_3)\end{aligned}$$

auf allen ”Rechtecken” überein und damit nach Satz 23 (Eindeutigkeit) überall. □

Satz 66 (Lebesgue-Maß). Das durch $\lambda^n := \lambda_1 \otimes \lambda_2 \otimes \dots \otimes \lambda_n$ definierte Lebesgue-Maß auf \mathbb{R}^n besitzt die folgenden Eigenschaften (im Folgenden verwenden wir immer die Borel- σ -Algebra)

(i) Durch die Werte auf der Menge \mathcal{I} sämtlicher Quader der Form $I = \times_{j=1}^n I_j$, wobei I_j Intervalle sind, ist λ^n eindeutig bestimmt.

(ii) Für jedes $B \in \mathcal{B}^n$ gilt:

$$\lambda^n(B) = \inf \left\{ \sum_{k \in \mathbb{N}} \lambda^n(A_k) \mid (A_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{I}, B \subset \bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k \right\}$$

(vgl. Lemma 30).

(iii) Das Maß λ^n ist translationsinvariant und bis auf Normierung das einzige Borelmaß mit dieser Eigenschaft.

Bemerkung. Das Produktmaß zweier vollständiger Maße (Bem. 29) ist i.A. nicht vollständig.

Beweis Lebesgue-Maß.

(i) Da \mathcal{I} unter Schnitten abgeschlossen ist, und wegen Lemma 64 die Borel- σ -Algebra \mathcal{B}^n erzeugt, folgt die Behauptung mit dem Eindeutigkeitssatz (23).

- (ii) Sei \mathcal{A} die Algebra (nachrechnen!) endlicher Vereinigungen disjunkter Quader aus \mathcal{I} . Nun ist $\mu := \lambda^n|_{\mathcal{A}}$ ein Prämaß. Die angegebene Formel ist gerade die Konstruktion des äußeren Maßes in Lemma 30, und mit Satz 28 erhalten wir eine σ -Algebra Σ mit $\mathcal{A} \subset \Sigma$, sodass $(\mathbb{R}^n, \Sigma, \mu^*|_{\Sigma})$ ein Maßraum ist. Weil \mathcal{A} sämtliche offenen Quader $\times_{j=1}^n (a_j, b_j)$ enthält, folgt $\mathcal{B}^n = \Sigma(\mathcal{A}|\mathbb{R}^n) \subset \Sigma$ und $\mu^*|_{\mathcal{B}^n}$ ist ein Maß auf \mathcal{B}^n , was zu zeigen war.
- (iii) Die Translationsinvarianz ergibt sich unmittelbar aus (ii). Sei nun μ ein weiteres translationsinvariantes Maß auf $(\mathbb{R}^n, \mathcal{B}^n)$. Sei Q_r ein halboffener Würfel mit Seitenlänge r . Wir nehmen $\mu(Q_1) = 1$ an. Weil wir Q_1 in m^n Würfel der Kantenlänge $\frac{1}{m}$ zerlegen können, folgt mit Translationsinvarianz und Additivität des Maßes:

$$1 = \mu(Q_1) = m^n \mu\left(Q_{\frac{1}{m}}\right) \Rightarrow \mu\left(Q_{\frac{1}{m}}\right) = m^{-n}.$$



Hieraus folgt $\mu(Q_r) = r^n \forall r \in \mathbb{Q} \cap (0, \infty)$. Mit Satz 12(iii) folgt das $\forall r > 0$. Hieraus erhält man $\mu = \lambda^n$ auf \mathcal{I} und, mit (i), auf \mathcal{B}^n .

□

1.6 Transformation

Lemma 67 (Bildmaß). Seien (X, Σ_X) , (Y, Σ_Y) Messräume auf $f: X \rightarrow Y$ messbar. Ist μ ein Maß auf (X, Σ_X) so wird durch

$$(f_*\mu)(B) := \underbrace{\mu(f^{-1}(B))}_{\stackrel{\text{Def}}{=} \{x \in X \mid f(x) \in B\}}, \quad B \in \Sigma_Y$$

ein Maß auf Y definiert, das Bildmaß von μ bezüglich f . Wir haben $(f_*\mu)(B) = 0 \forall B \in \Sigma_Y$ mit $B \cap f(X) = \emptyset$.

Beweis. Wir haben $f_*\mu(\emptyset) = \mu(f^{-1}(\emptyset)) = 0$, da $f^{-1}(\emptyset) = \emptyset$ und $(f_*\mu)(\bigcup_{k \in \mathbb{N}} B_k) = \mu(f^{-1}(\bigcup_{k \in \mathbb{N}} B_k))$ für eine Folge paarweise disjunkter Mengen $(B_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \Sigma_Y$. Dann wird durch $A_k := f^{-1}(B_k)$ ebenfalls wieder eine Folge paarweise disjunkter Mengen erzeugt (nachrechnen!) und wir haben wegen $f^{-1}(\bigcup_{k \in \mathbb{N}} B_k) = \bigcup_{k \in \mathbb{N}} f^{-1}(B_k)$ und σ -Additivität

$$(f_*\mu)\left(\bigcup_{k \in \mathbb{N}} B_k\right) = \mu\left(\bigcup_{k \in \mathbb{N}} f^{-1}(B_k)\right) = \sum_{k \in \mathbb{N}} \mu(f^{-1}(B_k)) = \sum_{k \in \mathbb{N}} (f_*\mu)(B_k).$$

Ist $B \in \Sigma_Y$ mit $B \cap f(X) = \emptyset$, so folgt $(f_*\mu)(B) = \mu(f^{-1}(B)) = \mu(\emptyset) = 0$.

□

Satz 68. Sei (X, Σ, μ) ein Maßraum, Y ein topologischer Raum, $f: (X, \Sigma) \rightarrow (Y, \mathcal{B}(Y))$, $g: (Y, \mathcal{B}(Y)) \rightarrow (\mathbb{R}, \mathcal{B})$ messbar. Nun ist $g \circ f: X \rightarrow \mathbb{R}$ genau dann μ -fast überall nicht-negativ oder integrierbar, wenn das auf g bzgl. $f_*\mu$ zutrifft, und in diesem Fall gilt:

$$\int_Y g \, d(f_*\mu) = \int_X (g \circ f) \, d\mu.$$

Beweis. Für $A = \{x \in X \mid (g \circ f)(x) \geq 0\}$ und $B = \{y \in Y \mid g(y) \geq 0\}$ gilt:

$$(f_*\mu)(B) = \mu(f^{-1}(B)) = \mu(\{x \in X \mid f(x) \in B\}) = \mu(A).$$

Also $(f_*\mu)(B^c) = \mu(A^c)$. Für die Integrierbarkeit betrachten wir zunächst einfache Funktionen g . Sei also $g = \sum_{j=1}^k \alpha_j \chi_{B_j}$, $\alpha_j \geq 0$, $B_j \in \mathcal{B}(Y)$, $B_i \cap B_j = \emptyset$, $Y = \bigcup_{j=1}^k B_j$. Zunächst ist $\chi_{B_j} \circ f = \chi_{f^{-1}(B_j)}$. Damit erhalten wir

$$\begin{aligned} \int_Y g \, d(f_*\mu) &= \sum_{j=1}^k \alpha_j \int_Y \chi_{B_j} \, d(f_*\mu) = \sum_{j=1}^k \alpha_j \mu(f^{-1}(B_j)) \\ &= \sum_{j=1}^k \alpha_j \int_X \chi_{f^{-1}(B_j)} \, d\mu = \sum_{j=1}^k \alpha_j \int_X \chi_{B_j} \circ f \, d\mu = \int_X (g \circ f) \, d\mu \end{aligned}$$

Sei g eine messbare, nicht-negative Funktion. Wie in Bem. 55 konstruieren wir eine Folge nicht negativer Funktionen $(g_k)_k \subset S(Y, f_*\mu)$ mit $g_k \nearrow g$. Dann ist (wie eben gezeigt) auch $g_k \circ f$ eine Folge nicht-negativer Funktionen mit $g_k \circ f \nearrow g \circ f$. Der Satz 45 über monotone Konvergenz liefert

$$\int_X g_k \circ f \nearrow \int_X g \circ f, \quad \int_Y g_k \, d(f_*\mu) \nearrow \int_Y g \, d(f_*\mu).$$

Mit $g = g^+ - g^-$ folgt die Identität im allgemeinen Fall, aus der sich ebenfalls die Äquivalenz der Integrierbarkeit ergibt. \square

Beispiel 69. a) Verkettung von Bildmaßen: $f: X \rightarrow Y, Y \rightarrow Z$

$$\begin{aligned} (g \circ f)_*\mu(C) &= \mu((g \circ f)^{-1}(C)) = \mu((f^{-1} \circ g^{-1})(C)) \\ &= \mu(f^{-1}(g^{-1}(C))) = f_*\mu(g^{-1}(C)) \\ &= g_*f_*\mu(C) \end{aligned}$$

b) Sei $f: X \rightarrow Mx + b, \in \mathbb{R}^{n \times n}$ invertierbar, $b \in \mathbb{R}$

$$\mathbb{Z}: f_*\lambda^n = \frac{1}{|\det M|} \lambda^n$$

Zunächst $f_*\lambda^n$ ist translationsinvariant und damit nach Satz 66, iii) ist $f_*\lambda^n$ ein Vielfaches von λ^n . Da M invertierbar, existieren $V_1, V_2 \in D(n)$, D Diagonalmatrix, sodass $M = V_1 D V_2$.

c)

$$\int_A \underbrace{g(Mx + b)}_f \, d\lambda^n = \int_A (g \circ f) \, d\lambda^n \stackrel{\text{Satz 68}}{=} \int_{MA+b} g \, df_*\lambda^n \stackrel{b)}{=} \frac{1}{|\det M|} \int_{MA+b} g \, d\lambda^n$$

Satz 70 (Transformationssatz). Seien $U, V \subset \mathbb{R}^n$ offen und $f \in C^1(U, V)$, f Diffeomorphismus¹⁶, dann gilt $(f^{-1})_* \lambda^n = |J_f| \lambda^n$, $J_f = \det(Df)$, Df Jacobi-Matrix und es gilt:

$$\int_U (g \circ f) |J_f| d\lambda^n = \int_V g d\lambda^n$$

\forall nicht negativen oder integrierbaren Funktionen $g := V \rightarrow \mathbb{R}$.

Beweis. Wir betrachten zunächst $g = 1$ und offene Quader, $R, \bar{R} \subset U$, also \mathbb{Z}

$$\int_R |J_f| d\lambda^n = \int_{f(R)} d\lambda^n = \lambda^n(f(R))$$

Betrachte $\frac{\chi_{B_1(0)}}{\lambda^n(B_1(0))}$ und setze $\varphi_\varepsilon(y) = \varepsilon^{-n} \varphi(\frac{y}{\varepsilon})$, $\varepsilon > 0$. Es gilt nach 69c) mit $M = \begin{pmatrix} 1/\varepsilon & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & 1/\varepsilon \end{pmatrix}$

$$\int_{\mathbb{R}^n} \varphi_\varepsilon(y) d\lambda^n(y) = 1.$$

Definiere

$$\begin{aligned} I_\varepsilon &= \int_{f(R)} |J_f(f^{-1}(y))| \int_R \varphi_\varepsilon(f(z) - y) d\lambda^n(z) d\lambda^n(y) \\ &= \int_{f(R)} |J_f(f^{-1}(y))| h_\varepsilon(y) d\lambda^n(y) \end{aligned}$$

Nach Definition von φ_ε ist $h_\varepsilon \neq 0$ für $\varepsilon < \varepsilon_0$ nur für $z \in K := f^{-1}(B_\varepsilon(y))$ K kompakt. Setze $x: f^{-1}(y) \in K$, dann erhalten wir mit der Transformation $z \mapsto x + \varepsilon z$ und $W_\varepsilon(x) = \frac{1}{\varepsilon}(K - x)$ aus 69c)

$$\begin{aligned} h_\varepsilon(y) &= \int_K \varphi_\varepsilon(f(z) - y) d\lambda^n(z) \\ &= \varepsilon^{-n} \int_K \varphi\left(\frac{f(z) - y}{\varepsilon}\right) d\lambda^n(z) \\ &= \int_{W_\varepsilon(x)} \varphi\left(\frac{f(x + \varepsilon z) - f(x)}{\varepsilon}\right) d\lambda^n(z) \end{aligned}$$

Wegen $\left| \frac{f(x + \varepsilon z) - f(x)}{\varepsilon} \right| \geq \frac{|z|}{C}$, für $C := \sup_k |D(f^{-1})|$ und $z \in \mathbb{R}$ mit $x + \varepsilon z \in U$ ist der Integrand beschränkt für $z \in B_C(0)$ überdeckt und wir erhalten mit dem Satz von der dominierten Konvergenz:

¹⁶ $f \in C^1(U, V)$, $f^{-1} \in C^1(V, U)$

$$\begin{aligned}
\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} h_\varepsilon(y) &= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{B_C(0)} \varphi\left(\frac{f(x + \varepsilon z) - f(x)}{\varepsilon}\right) d\lambda^n(z) \\
&= \int_{B_C(0)} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \varphi\left(\frac{f(x + \varepsilon z) - f(x)}{\varepsilon}\right) d\lambda^n(z).
\end{aligned}$$

Weiters ist

$$\varphi\left(\frac{f(x + \varepsilon z) - f(x)}{\varepsilon}\right) \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0} \varphi(Df(x)z)$$

Betrachte $z \in \mathbb{R}^n |Df(x)z| = 1$ ist Nullmenge. Somit gilt die Konvergenz fast überall und mit Lemma 52:

$$\begin{aligned}
\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} h_\varepsilon(y) &= \int_{B_C(0)} \varphi(Df(x)z) d\lambda^n(z) \\
&\stackrel{17}{=} \frac{1}{|\det Df(x)|} \int_{Df(x)B_C(0)} \varphi(x) d\lambda^n(x) \\
&= |J_f(f^{-1}(y))|^{-1}
\end{aligned}$$

Der Satz von der dominierten Konvergenz ergibt dann:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} I_\varepsilon = \int_{f(R)} 1 d\lambda^n(x) = \lambda^n(f(R))$$

Für die linke Seite benutze Fubini

$$I_\varepsilon = \int_R \int_{f(R)} |J_f(f^{-1}(y))| \varphi_\varepsilon(f(z) - y) d\lambda^n(y) d\lambda^n(z)$$

Weil $f(z)$ für $z \in R$ ein innerer Punkt ist von $f(R)$ impliziert die Stetigkeit von $|J_f(f^{-1}(\cdot))|$

$$\begin{aligned}
&\int_{B_\varepsilon f(z)} |J_f(f^{-1}(y))| \varphi_\varepsilon(f(z) - y) d\lambda^n(y) \\
&= \int_{B_\varepsilon f(z)} (|J_f(f^{-1}(y))| - |J_f(f^{-1}(f(z)))| + |J_f(f^{-1}(f(z)))|) \varphi_\varepsilon(f(z) - y) d\lambda^n(y) \\
&= |J_f(z)| + \int_{B_\varepsilon f(z)} \underbrace{(|J_f(f^{-1}(y))| - |J_f(f^{-1}(f(z)))|)}_{\leq \sup_{\eta \in B_\varepsilon(f(z))} |J_f(f^{-1}(\eta)) - J_f(f^{-1}(f(z)))|} \varphi_\varepsilon(f(z) - y) d\lambda^n(y) \\
&\leq \sup_{\eta \in B_\varepsilon(f(z))} |J_f(f^{-1}(\eta)) - J_f(f^{-1}(f(z)))| \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0} 0
\end{aligned}$$

¹⁷69c)

Dominierte Konvergenz $\rightarrow \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} I_\varepsilon = \int_R |J_f(z)| d\lambda^n(z)$.

Setze für $B \in \mathcal{B}(v)$ $\mu(B) = \int_B |J_f(z)| d\lambda^n(z)$ ist ein Maß nach Lemma 47. Das Rechtecke die Borelsche σ -Algebra erzeugen, folgt mit dem 1. Schritt und dem Eindeutigkeitssatz (Satz 23) die Identität $\mu(\cdot) = \lambda^n(f(\cdot)) = (f^{-1})_* \lambda^n$ auf $(B)(v)$ Damit gilt der Satz $\forall g = \chi_B, \in \mathcal{B}(v)$. Funktionen $g = g^+ - g^-$ \square

Beispiel (Polarkoordinaten). Wir betrachten $T_2: [0, \infty) \times [0, 2\pi) \rightarrow \mathbb{R}^2$ mit

$$T_2(\rho, \varphi) = (\rho \cos(\varphi), \rho \sin(\varphi))$$

$$\det DT_2(\rho, \varphi) = \det \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & -\rho \sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & \rho \cos(\varphi) \end{pmatrix} = \rho$$

$$U \subseteq [0, \infty) \times [0, 2\pi)$$

$$\int_U g(\rho \cos(\varphi), \rho \sin(\varphi)) \rho d\lambda(\rho, \varphi) = \int_{T_2(U)} g d\lambda^2$$

Beispiel (Sphärische Koordinaten).

$$T_3(\rho, \varphi, \omega) = (\rho \sin(\omega) \cos(\varphi), \rho \sin(\omega) \sin(\varphi), \rho \cos(\omega))$$

$$\rho \in [0, \infty), \varphi \in [0, 2\pi), \omega \in [0, \pi]$$

$$\det DT_3 = \rho^2 \sin(\omega)$$

$$U \subseteq [0, \infty) \times [0, 2\pi) \times [0, \pi]$$

$$\int_U g(T_3(\rho, \varphi, \omega)) \rho^2 \sin(\omega) d\lambda(\rho, \varphi, \omega) = \int_{T_3(K)} g d\lambda^3$$

2 L^p -Räume

Notation. Im Folgenden sei (X, Σ, μ) ein Maßraum.

Definition 1 (L^p -„Norm“). Die L^p -Norm einer messbaren Funktion $f: (X, \Sigma) \rightarrow (\mathbb{R}, \mathcal{B})$ wird durch

$$\|f\|_{L^p} := \left(\int_X |f|^p d\mu \right)^{1/p}, \quad p \in [1, \infty)$$

erklärt.

Mit $\mathcal{L}^p(X, \mu)$ bezeichnen wir die Menge aller messbaren Funktionen $f: (X, \Sigma) \rightarrow (\mathbb{R}, \mathcal{B})$, deren L^p -Norm endlich ist.

Zunächst ist $\mathcal{L}^p(X, \mu)$ wegen

$$|f + g|^p \leq 2^p \max(|f|, |g|)^p \leq 2^p(|f|^p + |g|^p)$$

ein Vektorraum.

Ziele:

- (1) L^p -Norm ist tatsächlich eine Norm. (Problem: Nullmengen – herausteilen $\rightarrow L^p$ -Raum)
- (2) Dreiecksungleichung mit Minkowski (\Leftarrow Hölder \Leftarrow Jensen)
- (3) L^p -Räume sind Banachräume
- (4) Approximation von L^p -Funktionen

Lemma 2. Sei $f: (X, \Sigma) \rightarrow (\mathbb{R}, \mathcal{B})$ messbar.

Dann gilt

$$\int_X |f|^p d\mu = 0 \iff f = 0 \quad \mu\text{-fast überall.}$$

Beweis. Mit $g := |f|^p$ erhalten wir aus Lemma I.52

$$\int_X g d\mu = 0 \iff g = 0 \quad \mu\text{-f. ü.} \iff f = 0 \quad \mu\text{-f. ü.}$$

□

Also folgt $\|g\|_{L^p} = 0 \implies g = 0$ μ -fast überall.

Wir setzen

$$\mathcal{N}(X, \mu) = \{f: (X, \Sigma) \longrightarrow (\mathbb{R}, \mathcal{B}) \mid f \text{ messbar}, f(x) = 0 \text{ } \mu\text{-f. ü.}\}.$$

Offenbar ist \mathcal{N} ein linearer Unterraum von \mathcal{L}^p . Insofern können wir den Quotientenraum¹ bilden und definieren

$$L^p(X, \mu) := \mathcal{L}^p(X, \mu) / \mathcal{N}(X, \mu).$$

Für $X \subset \mathbb{R}^n$ schreiben wir $L^p(X) := L^p(X, \lambda^n)$.

Aus Lemma 2 folgt die Wohldefiniertheit der L^p -Norm auf L^p .

Man beachte, dass für $f \in L^p(X, \mu)$ und $x \in X$ der Wert $f(x)$ im Allgemeinen nicht wohldefiniert ist (es sei denn, es gibt einen stetigen Vertreter von f und stetige Funktionen mit unterschiedlichen Werten gehören zu verschiedenen Äquivalenzklassen in L^p , z. B. λ^n).

Im Fall $p = 2$ haben wir einen Hilbertraum (d. h. einen vollständigen (wegen Riesz-Fischer) normierten Raum mit Skalarprodukt $\langle f, g \rangle = \int_X f(x) \overline{g(x)} \, d\mu(x)$).

Im Fall $p = \infty$ definieren wir das *essentielle Supremum* von f

$$\begin{aligned} \|f\|_{L^\infty} &:= \inf\{s \geq 0 \mid \mu(\{x \in X \mid |f(x)| \geq s\}) = 0\} \\ &= \sup\{s \geq 0 \mid \mu(\{x \in X \mid |f(x)| \geq s\}) > 0\} \end{aligned}$$

Wir bezeichnen mit $B(X, \mu)$ die Menge der essentiell beschränkten Funktionen und wir setzen wie gehabt

$$L^\infty(X, \mu) = B(X, \mu) / \mathcal{N}(X, \mu)$$

und $\|f\|_{L^\infty(x, \mu)}$ ist nach Konstruktion unabhängig vom gewählten Vertreter.

Beispiel 3.

$$\|\chi_{\mathbb{Q}}\|_{L^\infty(\mathbb{R}, \lambda)} = 0, \quad \|\chi_{\mathbb{Q}}\|_{L^\infty(\mathbb{R}, \delta_0)} = 1$$

\uparrow
Dirac

Sei X ein metrischer Raum, der *lokal kompakt* ist (d. h. jeder Punkt aus X besitzt eine kompakte Umgebung).

Dann heißt $f: (X, \Sigma) \longrightarrow (\mathbb{R}, \mathcal{B})$ *lokal p -integrierbar*, falls $f \in L^p(K, \mu)$ für jedes Kompaktum $K \subset X$ gilt.

Die Menge aller lokal p -integrierbaren Funktionen (bzw. die Menge deren Äquivalenzklassen) wir mit $L^p_{\text{loc}}(X, \mu)$ bezeichnet.

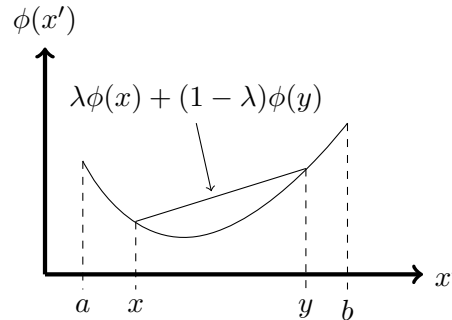
¹ Sei V ein Vektorraum und $U \subset V$ ein Unterraum. Für $v_1, v_2 \in V$ wird durch $v_1 \sim v_2 :\iff v_1 - v_2 \in U$ eine Äquivalenzrelation definiert. Es ist also für jeden Punkt $v \in V$ die Äquivalenzklasse $[v] := v + U := \{v + u \mid v \in U\}$. Der Quotienten- bzw. Faktorraum von V nach U ist durch $V/U := \{[v] \mid v \in V\}$ definiert.

2.1 Ungleichungen

Erinnerung: Eine reelle Funktion $\phi: (a, b) \rightarrow (\mathbb{R})$ heißt *konvex*, falls

$$\phi(\lambda x + (1 - \lambda)y) \leq \lambda\phi(x) + (1 - \lambda)\phi(y)$$

für alle $x, y \in (a, b)$, $\lambda \in (0, 1)$ bzw. *strikt konvex*, wenn die strikte Ungleichung (also „<“) gilt.



Jede Norm auf einem Vektorraum X ist konvex, denn für $f, g \in X$ und $\lambda \in (0, 1)$ gilt

$$\|\lambda f + (1 - \lambda)g\|_X \leq \lambda\|f\|_X + (1 - \lambda)\|g\|_X.$$

Wir erhalten für jede konvexe Funktion ϕ mit $a < x < z < y < b$, also $z = \lambda x + (1 - \lambda)y$ für ein $\lambda \in (0, 1)$

$$(*) \quad \frac{\phi(z) - \phi(x)}{z - x} \leq \frac{\phi(y) - \phi(x)}{y - x} \leq \frac{\phi(y) - \phi(z)}{y - z}$$

und die Ungleichung ist strikt, wenn ϕ strikt konvex ist.

Lemma 4. Die folgenden Aussagen gelten für jedes konvexe $\phi: (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$:

- (i) Die Funktion ϕ ist lokal Lipschitz-stetig, d. h. für jedes kompakte Intervall $I \subset (a, b)$ gibt es ein $L_I < \infty$ mit $|\phi(x) - \phi(y)| \leq L_I|x - y|$ für alle $x, y \in I$.
- (ii) Die links- und rechtsseitigen Ableitungen

$$\phi'_\pm(x) = \lim_{h \searrow 0} \frac{\phi(x \pm h) - \phi(x)}{\pm h}$$

existieren und sind monoton nicht-fallend.

Darüber hinaus existiert ϕ' bis auf eine Nullmenge.

- (iii) Für ein festes $\bar{x} \in (a, b)$ und jedes $\alpha \in [\phi'_-(\bar{x}), \phi'_+(\bar{x})]$ gilt

$$\phi(y) \geq \phi(\bar{x}) + \alpha(y - \bar{x}) \quad \forall y \in (a, b).$$

Diese Ungleichung ist strikt für strikt konvexe ϕ und $y \neq \bar{x}$.

Beweis. Setze $D(x, y) := \frac{\phi(x) - \phi(y)}{x - y}$. Aus (*) folgt

$$D(x, z) \leq D(x, y) \leq D(y, z)$$

für $x < z < y$.

Damit ist $0 < \varepsilon_1 < \varepsilon_2 \implies D(\underbrace{x + \varepsilon_1}_=z, x) \leq D(\underbrace{x + \varepsilon_2}_=y, x)$, also $\varepsilon \mapsto D(x + \varepsilon, x)$ monoton

steigend und (auf Kompakta) beschränkt. Folglich existiert $\phi'_+(x)$ und analog $\phi'_-(x)$.

Wegen $D(x - \varepsilon, x) \leq D(x + \varepsilon, x)$ folgt $\phi'_-(x) \leq \phi'_+(x)$ und weiter $\phi'_+(x) \leq \phi'_-(y)$ für $x < y$, sodass wir insgesamt

$$\phi'_-(x) \leq \phi'_+(x) \leq \phi'_-(y) \leq \phi'_+(y)$$

erhalten.

Da eine monotone Funktion nur abzählbar viele Sprungstellen haben kann, folgt (ii).

Aus (*) gewinnen wir direkt $\phi'_+(x) \leq D(x, y) \leq \phi'_-(y)$, was die äquivalenten Ungleichungen

$$\phi(y) \geq \phi(x) + \phi'_\pm(x)(y - x) \iff \phi(y) \geq \phi(x) + \alpha(y - x)$$

impliziert \Rightarrow (iii).

Für $a < \alpha < x < y < \beta < b$ ist

$$\phi'_+(\alpha) \leq D(x, y) \leq \phi'_-(\beta).$$

Somit folgt (i) mit $L_{[\alpha, \beta]} := \{|\phi'_+(\alpha)|, |\phi'_-(\beta)|\}$. □

Satz 5 (Jensen). Sei $\phi: (a, b) \longrightarrow \mathbb{R}$ konvex für $-\infty \leq a < b \leq +\infty$.

Ist μ ein Wahrscheinlichkeitsmaß auf (X, Σ) und $f \in \mathcal{L}^1(X, \mu)$ mit $a < f(x) < b$ für alle $x \in X$, dann ist der negative Teil von $\phi \circ f$ integrierbar und

$$\phi \left(\int_X f \, d\mu \right) \leq \int_X (\phi \circ f) \, d\mu.$$

Ist $\phi \geq 0$ nicht-fallend, $f \geq 0$ und $\phi(b) := \lim_{x \nearrow b} \phi(x)$, so gilt die Schlussfolgerung auch für nicht-integrierbare (messbare) f .

Beweis. Eigenschaft (iii) des Lemmas impliziert

$$\underbrace{\phi(f(x))}_{\in (a, b)} \geq \underbrace{\phi(\bar{x})}_{\in \mathbb{R}} + \underbrace{\alpha}_{\in \mathbb{R}} \underbrace{(f(x) - \bar{x})}_{\in \mathbb{R}} \quad \forall x \in X \text{ und } \bar{x} = \int_X f \, d\mu \in (a, b).$$

Damit ist $(\phi \circ f)_-$ integrierbar und wir erhalten

$$\int_X \phi(f(x)) \, d\mu(x) \geq \phi(\bar{x}) + \alpha \left(\int_X f(x) \, d\mu(x) - \bar{x} \right),$$

was die Behauptung für $f \in \mathcal{L}^1(X, \mu)$ zeigt.

Ist nun $f \geq 0$, aber $f \notin \mathcal{L}^1(X, \mu)$, so setzen wir $X_n := \{x \in X \mid \underbrace{f(x)}_{\geq 0 \text{ n. V.}} \leq n\}$ und erhalten

aus dem bislang Gezeigten

$$\phi \left(\frac{1}{\mu(X_n)} \int_{X_n} f \, d\mu \right) \leq \frac{1}{\mu(X_n)} \int_{X_n} (\phi \circ f) \, d\mu.$$

Für $n \rightarrow \infty$ erhalten wir wegen $X_n \nearrow X$ einerseits $\mu(X_n) \nearrow \mu(X)$ und die Konvergenz der Integrale aus dem Satz über monotone Konvergenz. \square

Satz 6 (Hölder). Seien $p, p' \in [1, \infty)$ dual, das heißt $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = 1$. Ist $f \in L^p(X, \mu)$ und $g \in L^{p'}(X, \mu)$, so folgt $fg \in L^1(X, \mu)$ und

$$\|fg\|_{L^1} \leq \|f\|_{L^p} \cdot \|g\|_{L^{p'}}.$$

Beweis. Den Fall $p, p' \in \{1, \infty\}$ erhalten wir direkt aus den Eigenschaften des Integrals, vgl. Lemma I.48. Wir können weiter $g \neq 0$ in $L^{p'}$ voraussetzen und $\|g\|_{L^{p'}} = 1$ annehmen². Sei $A = \{x \in X \mid g(x) \neq 0\}$. Wir erhalten mit

$$(1 - p')p = p'p \left(\frac{1}{p'} - 1 \right) = p'p \left(-\frac{1}{p} \right) = -p'$$

durch Anwenden der Jensen-Ungleichung auf $\varphi(y) = |y|^p$, für $y \in \mathbb{R}$, und $h = |f||g|^{1-p'}$ auf das Maß ν , mit

$$d\nu = |g|^{p'} \, d\mu \quad \left(\nu(x) = \int_X 1 \, d\nu = \int_X |g|^{p'} \, d\mu = \|g\|_{L^{p'}}^{p'} = 1 \right),$$

$$\begin{aligned} \|fg\|_{L^1}^p &= \left| \int_X \underbrace{|fg|}_{\leq |f||g|} \, d\mu \right|^p \leq \left| \int_A \underbrace{|f||g|^{1-p'}}_h \underbrace{|g|^{p'}}_{d\nu} \, d\mu \right|^p = \varphi \left(\int_A h \, d\nu \right) \\ &\stackrel{\text{Jensen}}{\leq} \int_A (\varphi \circ h) \, d\nu = \int_A |f|^p \underbrace{|g|^{(1-p')p} |g|^{p'}}_{=1} \, d\mu \stackrel{A \subset X}{\leq} \|f\|_{L^p}^p. \end{aligned}$$

\square

Zusatz: Im Fall $p \in (1, \infty)$ ist $y \mapsto |y|^p$ strikt konvex, sodass Gleichheit impliziert, dass $h = |f||g|^{1-p'}$ konstant ist, d.h. $g = 0$ oder $|f| = \lambda |g|^{p'-1}$ für ein $\lambda \in \mathbb{R}$.

Corollar 7. Für jedes $f \in L^p(X, \mu)$ mit $p \in [1, \infty)$ gilt

$$\|f\|_{L^p} = \sup \left\{ \int_X fg \, d\mu \mid g \in L^{p'}(X, \mu), \|g\|_{L^{p'}} = 1 \right\}.$$

²Dies ist möglich, da wir uns ein $\tilde{g} := \frac{g}{\|g\|_{L^{p'}}$ definieren können, und mit diesem \tilde{g} den Beweis führen können.

Daher gilt der Beweis auch für g .

³Statt X auch A möglich, da g auf $X \setminus A = 0$ ist.

Beweis. "≥" folgt sofort aus Hölder. Für "≤" wählen wir geeignete "Testfunktion" g . Im Fall $p \in (1, \infty)$ nehmen wir

$$g = \frac{\text{sign}(f)|f|^{p-1}}{\| |f|^{p-1} \|_{L^p}} \quad (\text{für } f \neq 0 \in L^p).$$

Für $p = 1$ wählen wir $g = \text{sign}(f)$. □

Lemma 8. Sei μ ein σ -finites Maß, $f: (X, \Sigma) \rightarrow (\mathbb{R}, \mathcal{B})$ messbar und $p \in [1, \infty)$. Gilt $f \cdot s \in L^1(X, \mu)$ für jedes $s \in S(X, \mu) \cap \mathcal{L}^1(X, \mu)$, so folgt $f \in L^p(X, \mu)$ und

$$\|f\|_{L^p} = \sup \left\{ \int_X f \cdot s \, d\mu \mid s \in S(X, \mu) \cap \mathcal{L}^1(X, \mu), \|s\|_{L^{p'}} = 1 \right\}.$$

Beweis. In der Übung. □

Satz 9 (Minkowski). Seien μ, ν zwei σ -finite Maße auf Maßräumen $(X, \Sigma, \mu), (Y, \Upsilon, \nu)$ und f eine $(\mu \otimes \nu)$ -messbare Funktion. Dann haben wir für $p \in [1, \infty)$

$$\underbrace{\left\| \int_Y f(\cdot, y) \, d\nu(y) \right\|_{L^p}}_{(\int_X |\int_Y f(x, y) \, d\nu(y)|^p \, d\mu(x))^{1/p}} \leq \underbrace{\int_Y \|f(\cdot, y)\|_{L^p} \, d\nu(y)}_{\int_Y (\int_X |f(x, y)|^p \, d\mu(x))^{1/p} \, d\nu(y)}.$$

Beweis. Sei $g \in L^p(X, \mu)$ mit $g \geq 0$ und $\|g\|_{L^{p'}} = 1$. Aus I.62 (Fubini) folgt

$$\int_X g(x) \int_Y |f(x, y)| \, d\nu(y) \, d\mu(x) = \int_Y \underbrace{\int_X |f(x, y)| g(x) \, d\mu(x)}_{\leq \|f(\cdot, y)\|_{L^p} \|g\|_{L^{p'}}} \, d\nu(y)$$

Durch Anwenden von Lemma 8 schließen wir, dass die linke Seite gerade die L^p -Norm von $\int_Y f(\cdot, y) \, d\nu(y)$ ist. □

Ist $\nu = \delta_{\eta_1} + \delta_{\eta_2}$, $\eta_1, \eta_2 \in Y$, so haben wir (Aufgabe 19)

$$\|f(\cdot, \eta_1) + f(\cdot, \eta_2)\|_{L^p} \leq \|f(\cdot, \eta_1)\|_{L^p} + \|f(\cdot, \eta_2)\|_{L^p}.$$

(Im Falle von $p = \infty$ rechne direkt nach.)

Aus Fatous Lemma I.48 erhalten wir die Unterhaltsstetigkeit der Normen: Gilt $f_n \rightarrow f$ punktweise μ -fast überall, so haben wir

$$\|f\|_{L^p}^p = \int_X \liminf_{k \rightarrow \infty} |f_k|^p \, d\mu \leq \liminf_{k \rightarrow \infty} \underbrace{\int_X |f_k|^p \, d\mu}_{=\|f_k\|_{L^p}^p}.$$

Diese Ungleichung lässt sich wie folgt quantisieren:

Lemma 10. Sei $p \in [1, \infty)$ und $f_k \in L^p(X, \mu)$ mit $M := \sup_{k \in \mathbb{N}} \|f_k\|_{L^p} < \infty$ konvergiere punktweise μ -fast überall gegen eine Grenzfunktion f . Dann ist $f \in L^p(X, \mu)$ und

$$\|f_k\|_{L^p}^p - \|f_k - f\|_{L^p}^p \xrightarrow{k \rightarrow \infty} \|f\|_{L^p}^p.$$

Beweis. Mit Fatou erhalten wir sofort

$$\|f\|_{L^p} \leq \liminf_{k \rightarrow \infty} \|f_k\|_{L^p} \leq M.$$

Weiterhin gibt es $\forall \varepsilon > 0$ ein $C_\varepsilon < \infty$ mit

$$|s - t|^p - |t|^p - |s|^p \leq \varepsilon |t|^p + C_\varepsilon |s|^p.$$

Mit $t = f - f_k$, $s = f$ erhalten wir

$$\underbrace{|f_k|^p - |f - f_k|^p - |f|^p}_{=:A} \leq \varepsilon \underbrace{|f - f_k|^p + C_\varepsilon |f|^p}_{=:B}.$$

Nun ist $B - A \geq 0$ und wir erhalten

$$\begin{aligned} C_\varepsilon \|f\|_{L^p}^p &\leq \liminf_{k \rightarrow \infty} \int_X \left(\varepsilon \underbrace{|f - f_k|^p}_{\leq |f| + |f_k|} + C_\varepsilon |f|^p - |f_k|^p - |f_k - f|^p - |f|^p \right) d\mu \\ &\leq \varepsilon \left(\underbrace{2 \sup_{k \in \mathbb{N}} \|f_k\|_{L^p}^p}_{\leq M} \right)^p + C_\varepsilon \|f\|_{L^p}^p - \limsup_{k \rightarrow \infty} \int_X |f_k|^p - |f_k - f|^p - |f|^p d\mu. \end{aligned}$$

Die Behauptung folgt mit $\varepsilon \searrow 0$. □

2.2 Vollständigkeit

Satz 11 (Riesz-Fischer (Vollständigkeit)). Der Raum $L^p(X, \mu)$ ist für $p \in [1, \infty]$ vollständig mithin ein Banachraum

Bemerkung. Wir verwenden hierzu die Vollständigkeit von \mathbb{R} . Sei zunächst $p < \infty$ und $(f_k)_{k \in \mathbb{N}}$ eine Cauchyfolge. $\forall \varepsilon > 0 \exists K = K(\varepsilon) \in \mathbb{N}$

$$\forall j, k \geq K : \|f_j - f_k\|_{L^p} < \varepsilon$$

Wir möchten zeigen, dass es ein Grenzelement $f \in L^p(X, \mu)$ mit $\|f_k - f\|_{L^p} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$ gibt. Es genügt die für eine Teilfolge von $(f_k)_{k \in \mathbb{N}}$ zu verifizieren. Durch Aussortieren von Elementen der Folge könne wir $\|f_{k+1} - f_k\|_{L^p} \leq 2^{-k} \forall k \in \mathbb{N}$.

Mit $f_0 := 0$, $g_k := f_k - f_{k-1} \forall k \in \mathbb{N}$ $G := \sum_{k \in \mathbb{N}} |g_k|$ erhalten wir

$$\left\| \sum_{j=1}^k |g_j| \right\|_{L^p} \leq \sum_{j=1}^k \|g_j\|_{L^p} \leq \|g_1\|_{L^p} + \sum_{j=1}^k 2^{-j} \leq \|g_1\|_{L^p} + 1$$

Aus dem Satz der monotonen Konvergenz (I. 45) gewinnen wir $G \in L^p$ und wir haben insbesondere $G(x) < \infty$ für fast alle $x \in X$. Ans diesen Punkten konvergiert

$$\tilde{f} = \sum_{k \in \mathbb{N}} g_k = \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^k g_j = \lim_{k \rightarrow \infty} f_k$$

absolut. Dort ist also $\left| f_k(x) - \tilde{f}(x) \right|^p \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$ und wir haben

$$\left| f_k - \tilde{f} \right|^p = \left| \sum_{j=1}^k g_j - \sum_{j=1}^{\infty} g_j \right|^p = \left| \sum_{j=k+1}^{\infty} g_j \right|^p \leq \left| \sum_{j=1}^{\infty} |g_j| \right|^p \leq |G|^p$$

dort wo $G < \infty$. Nun ist $|G|^p \in L^1$, mit $f = \liminf_{k \rightarrow \infty} f_k$ erhalten wir eine messbare Funktion mit $f = \tilde{f}$ μ -fast überall. Nun folgt aus dem Satz über dominierte Konvergenz (I. 54)

$$\|f_k - f\|_{L^p}^p = \int_X |f_k - f|^p d\mu \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$$

Im Fall $p = \infty$ gilt für die Cauchyfolge $(f_k)_{k \in \mathbb{N}}$

$$\forall m \in \mathbb{N} \exists M(m) \in \mathbb{N} \forall j, k \geq M \|f_k - f_j\|_{L^\infty} < \frac{1}{m}$$

Also gibt es eine μ -Nullmenge $A_{j,k,m} \in \Sigma$ mit

$$|f_j(x) - f_k(x)| \leq \frac{1}{m} \quad \forall x \in X \setminus A_{j,k,m}$$

Nun ist auch $A = \bigcup_{m \in \mathbb{N}} \bigcup_{j,k \geq M} A_{j,k,m}$ eine μ -Nullmenge. Folglich ist $(f_k(x))_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{R}$ für jedes $x \in X \setminus A$ eine Cauchy-Folge und konvergiert gegen $f(x) := \liminf_{k \rightarrow \infty} f_k(x)$

Damit haben wir zunächst $|f_j(x) - f(x)| \leq \frac{1}{m} \quad \forall x \in X \setminus A$ und $j \geq M$. Weiterhin ist f messbar (I.40). Nun gilt.

$$\begin{aligned} \|f_k - f\|_{L^\infty} &= \sup\{s \geq 0 \mid \mu(\{x \in X \mid |f_k(x) - f(x)| \geq s\}) > 0\} \\ &= \sup\{s \geq 0 \mid \mu(\{x \in X \setminus A \mid \underbrace{|f_k(x) - f(x)|}_{\leq \frac{1}{m} \text{ falls } k \geq M} \geq s\}) > 0\} \\ &\quad \underbrace{\hspace{10em}}_{=\emptyset \text{ falls } k \geq M \text{ und } s > \frac{1}{m}} \\ &\leq \frac{1}{m} \text{ für } k \geq M \end{aligned}$$

Also $\|f_k - f\|_{L^\infty} \rightarrow 0$ für $k \rightarrow \infty$

Corollar 12. Konvergiert eine Folge in $L^p(X, \mu)$, $p \in [1, \infty]$, so gibt es eine Teilfolge, die punktweise μ -fast überall konvergiert (A. 24). Die Grenzwerte einer in L^p und L^q , $p, q \in [1, \infty]$ konvergierenden Folge stimmen fast überall überein.

Beispiel 13 (Raumschiff).

$$\underbrace{\chi_{[0, \frac{1}{2}]}, \chi_{[\frac{1}{2}, 1]}, \chi_{[0, \frac{1}{3}]}, \chi_{[\frac{1}{3}, \frac{2}{3}]}, \chi_{[\frac{2}{3}, 1]}, \chi_{[0, \frac{1}{4}]}}_{|||_{L^p} = \frac{1}{2}} \quad \underbrace{\chi_{[\frac{1}{3}, \frac{2}{3}]}, \chi_{[\frac{2}{3}, 1]}}_{|||_{L^p} = \frac{1}{3}}$$

Also Konvergenz gegen Nullfunktion in L^p , aber nicht punktweise fast überall. Für $p = \infty$ braucht man nicht zu einer Teilfolge überzugehen.

2.3 Approximation

Definition 14. Eine Teilmenge A eines topologischen Raums X heißt dicht, falls es zu jedem Punkt $x \in X$ eine gegen x konvergierende Folge in A gibt.

Erinnerung (A.13): Eine Folge $(\xi_k)_{k \in \mathbb{N}}$ konvergiert gegen $\xi_0 \in X$, falls es für jede offene Umgebung U von ξ_0 (also U offen $\xi_0 \in U$) ein $K = K(\xi_0, U) \in \mathbb{N}$ mit $\xi_k \in U \forall k \geq K$ gibt.

Satz 15. Sei X ein lokal kompakter (jeder Punkt liegt in einer kompakten Umgebung) metrischer Raum und μ ein reguläres Borelmaß (endliche Werte auf Kompakta)

$$\text{reg. von innen: } \mu(A) = \sup\{\mu(K) \mid A \supset K \text{ kompakt}\}$$

$$\text{reg. von außen: } \mu(A) = \inf\{\mu(U) \mid A \subset U \text{ offen}\}$$

Dann ist die Menge $C_c^0(X)$ aller stetigen Funktionen $X \rightarrow \mathbb{R}$ mit kompaktem Träger dicht in $L^p(X, \mu)$, $p \in [1, \infty)$. Hierbei wird für $f: X \rightarrow \mathbb{R}$

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

als Träger von f (support) bezeichnet.

Beweis. Wie in Bem. I.46 erläutert, können wir nicht negative messbare Funktionen durch eine Folge einfacher Funktionen bzgl L^1 -Norm approximieren. Man überträgt das Argument leicht auf eine beliebige integrierbare Funktionen und Funktionen aus \mathcal{L}^p (bzgl L^p -Norm) $p \in [1, \infty)$. Die in I.46 konstruierten einfachen Funktionen waren linearkombinationen charakteristischer Funktionen von Urbildern halboffener Mengen, da das Maß nach Voraussetzung regulär von innen ist, können wir diese durch Kompakta beliebig gut approximieren. Folglich genügt es zu zeigen, dass χ_K für kompakte $K \subset X$ bezüglich L^p -Norm beliebig gut durch stetige Funktionen approximiert werden kann. Aufgrund äußerer Regularität finden wir für $\varepsilon > 0$ eine offene Menge U mit $K \subset U$ und $\mu(U \setminus K) = \mu(U) - \mu(K) < \varepsilon$. Wir setzen

$$f_\varepsilon(x) = \frac{\text{dist}(x, U^C)^4}{\text{dist}(x, K) + \text{dist}(x, U^C)^4}. \text{ Dies liefert eine stetige Funktion } X \rightarrow [0, 1] \text{ mit}$$

$$f_\varepsilon(x) = 0 \Leftrightarrow \text{dist}(x, U^C) = 0 \Leftrightarrow x \notin U$$

$$f_\varepsilon(x) = 1 \Leftrightarrow \text{dist}(x, K) = 0 \Leftrightarrow x \in K!$$

⁴ $\text{dist}(x, Y) = \inf_{y \in Y} \text{dist}(x, y)$

Wegen

$$\int_X \underbrace{|f_\varepsilon - \chi_K|^p}_{=0 \text{ auf } U^C \cup K} d\mu = \int_{U \setminus K} \underbrace{|f_\varepsilon - \chi_K|^p}_{=0}_{\leq 1} d\mu \leq \mu(U \setminus K) < \varepsilon$$

folgt $\|f_\varepsilon - \chi_K\|_{L^p} \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0} 0$

□

Die Aussage gilt nicht für $p = \infty$, da für stetige Funktionen L^∞ -Norm und Supremumsnorm übereinstimmen und der gleichmäßige Limes stetiger Funktionen ist wieder stetig.

Definition 16 (Faltung). Für integrierbare $f, g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ setzen wir:

$$(f * g)(x) = \int_{\mathbb{R}^n} f(x - y)g(y) d\lambda^n(y) = \int_{\mathbb{R}^n} f(y)g(x - y) d\lambda^n(y)$$

und bezeichnen den Ausdruck $f * g$ als *Faltung*.

Die Faltung ist selbst integrierbar, wir haben nämlich:

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}^n} |f * g| d\lambda^n &\leq \int_{\mathbb{R}^n} \int_{\mathbb{R}^n} |f(x - y)| |g(y)| d\lambda^n(y) d\lambda^n(x) \\ &\stackrel{\text{Fubini}}{=} \int_{\mathbb{R}^n} \underbrace{\int_{\mathbb{R}^n} |f(x - y)| d\lambda^n(x)}_{\substack{= \int_{\mathbb{R}^n} |f(x)| d\lambda^n(x) = \|f\|_{L^1} \\ \uparrow \\ \text{Trafo.}}} |g(y)| d\lambda^n(y) = \|f\|_{L^1} \|g\|_{L^1} < \infty \end{aligned}$$

Lemma 17. Die Faltung besitzt die folgenden Eigenschaften:

- (i) Für $x \in \mathbb{R}^n$ ist die Funktion $f(x - \cdot)g(\cdot)$ genau dann integrierbar, wenn $f(\cdot)g(x - \cdot)$ integrierbar ist und in diesem Fall gilt

$$(f * g)(x) = (g * f)(x).$$

- (ii) Für $\phi \in C_c^k(\mathbb{R}^n)$, $k \in \mathbb{N}$ und $f \in L_{loc}^1(\mathbb{R}^n)$ folgt $f * \phi \in C^k(\mathbb{R}^n)$ und

$$\partial_\alpha(f * \phi) = (\partial_\alpha \phi) * f$$

für jede partielle Ableitung einer Ordnung $\leq k$. Dabei ist α ein sogenannter Multiindex.

- (iii) Für $\phi \in C_c^k(\mathbb{R}^n)$, $k \in \mathbb{N}$, $f \in L_c^1(\mathbb{R}^n)$ (d. h. es gibt einen Rapresentanten mit kompaktem Trager) ist

$$f * \phi \in C_c^k(\mathbb{R}^n)$$

- (iv) Für $\phi \in L^1(\mathbb{R}^n)$, $f \in L^p(\mathbb{R}^n)$, $p \in [1, \infty]$ gilt auch $f * \phi \in L^p(\mathbb{R}^n)$ und wir haben

$$\|f * \phi\|_{L^p} \leq \|\phi\|_{L^1} \|f\|_{L^p}. \quad (\text{Young-Ungleichung})$$

Beweis.

- (i) folgt durch Koordinatenwechsel (vgl. Bemerkung vor Trafo-Satz).
- (ii) folgt induktiv durch vertauschen von Differentiation und Integration (siehe Übungsaufgabe 9).
- (iii) Ist $\text{supp } f \cup \text{supp } \phi \subset B_R(0)$ für $R > 0$, so erhalten wir für $x \in \mathbb{R}^n$

$$\begin{aligned} (f * \phi)(x) &\stackrel{\text{Def.}}{=} \int_{\mathbb{R}^n} f(y) \phi(x-y) \, d\lambda^n(y) \stackrel{!}{\neq} 0 \\ &\implies y, x-y \stackrel{!}{\in} B_R(0) \implies x = (x-y) + y \stackrel{!}{\in} B_{2R}(0). \end{aligned}$$

Demnach ist $\text{supp } f * \phi \in B_{2R}(0)$.

- (iv) Für $p = \infty$ ist

$$\begin{aligned} \|f * \phi\|_{L^\infty} &= \left\| \int_{\mathbb{R}^n} f(y) \phi(\cdot - y) \, d\lambda^n(y) \right\|_{L^\infty} \\ &\stackrel{\text{Hölder}}{\downarrow} \leq \|f\|_{L^\infty} \left\| \int_{\mathbb{R}^n} \phi(\cdot - y) \, d\lambda^n(y) \right\|_{L^\infty} = \|\phi\|_{L^1} \|f\|_{L^\infty} \end{aligned}$$

Sei nun $p \in [1, \infty)$. Wir können $\|\phi\|_{L^1} = 1$ annehmen.

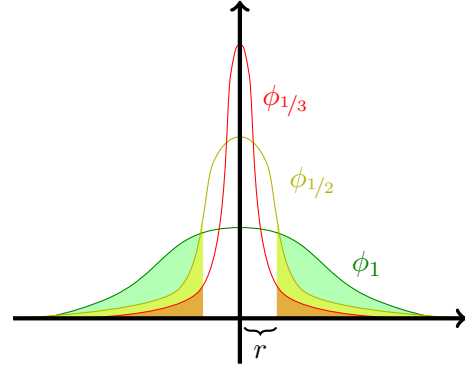
Anwendung der Jensenschen Ungleichung liefert (mit $\varphi(\xi) = |\xi|^p$, $d\mu = |\phi| \, d\lambda^n$, also μ ein Wahrscheinlichkeitsmaß)

$$\begin{aligned} \|f * \phi\|_{L^p}^p &\leq \int_{\mathbb{R}^n} \left| \int_{\mathbb{R}^n} |f(x-y)| |\phi(y)| \, d\lambda^n(y) \right|^p \, d\lambda^n(x) \\ &= \int_{\mathbb{R}^n} \underbrace{\varphi \left(\int_{\mathbb{R}^n} |f(x-y)| \, d\mu(y) \right)}_{\leq \int_{\mathbb{R}^n} \varphi(|f(x-y)|) \, d\mu(y)} \, d\lambda^n(x) \\ &\stackrel{\text{Fubini}}{\leq} \int_{\mathbb{R}^n} \underbrace{\int_{\mathbb{R}^n} |f(x-y)|^p \, d\lambda^n(x)}_{\stackrel{\text{Trafo.}}{=} \|f\|_{L^p}^p} \, d\mu(y) = \|f\|_{L^p}^p \end{aligned}$$

□

Definition 18. Eine Familie $(\phi_\varepsilon)_{\varepsilon>0}$ integrierbarer Funktionen $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ heißt *approximative Identität*, falls

- (i) $\sup_{\varepsilon>0} \|\phi_\varepsilon\|_L^1 < \infty$
(auch häufig zu finden: $\phi_\varepsilon \geq 0 \quad \forall \varepsilon > 0$)
- (ii) $\int_{\mathbb{R}^n} \phi_\varepsilon \, d\lambda^n = 1 \quad \forall \varepsilon > 0$
- (iii) $\int_{\mathbb{R}^n \setminus B_r(0)} |\phi_\varepsilon| \, d\lambda^n \xrightarrow{\varepsilon \searrow 0} 0 \quad \forall r > 0$



Ein *Glättungskern* (engl. *mollifier*) ist eine nicht-negative Funktion $\phi \in C_c^0(\mathbb{R}^n)$ mit $\|\phi\|_{L^1} = 1$.

Bemerkung 19. Aus jedem Glättungskern ϕ erhält man vermöge

$$\phi_\varepsilon(x) = \varepsilon^{-n} \phi\left(\frac{x}{\varepsilon}\right), \quad \phi \in C_c^\infty(\mathbb{R}^n)$$

eine *approximative Identität*. Häufig zum Einsatz kommt der *Standard-Glättungskern*

$$x \mapsto \begin{cases} \exp\left(\frac{1}{|x|^2-1}\right), & \text{falls } |x| < 1 \\ 0, & \text{falls } |x| \geq 1 \end{cases} \quad (\text{Übungsaufgabe 25}).$$

Für den Rest dieses Kapitels verwenden wir (ohne Beweis) die Regularität des Lebesgue-Maßes.

Lemma 20. Sei $(\phi_\varepsilon)_{\varepsilon>0}$ eine *approximative Identität* und $f \in L^p(\mathbb{R}^n)$, $p \in [1, \infty)$.

Dann gilt

$$\|f * \phi_\varepsilon - f\|_{L^p} \xrightarrow{\varepsilon \searrow 0} 0.$$

Beweis. Sei zunächst $f \in C_c^0(\mathbb{R}^n)$. Wir fixieren ein $\delta > 0$ und erhalten aufgrund der gleichmäßigen Stetigkeit (nach dem Satz von Heine) von f

$$|f(x-y) - f(x)| \xrightarrow{|y| \searrow 0} 0 \quad \text{gleichmäßig in } x.$$

Weiterhin erhalten wir aufgrund des kompakten Trägers für $|y| < r$ (r hinreichend klein)

$$\begin{aligned} \|f(\cdot - y) - f\|_{L^p} &= \left(\int_{B_r(\text{supp } f)} |f(x-y) - f(x)|^p \, d\lambda^n(x) \right)^{1/p} \\ &\leq \|f(\cdot - y) - f\|_{L^\infty} \left(\int_{B_r(\text{supp } f)} 1^p \, d\lambda^n(x) \right)^{1/p} \\ &\leq \frac{\delta}{2 \sup_{\varepsilon>0} \|\phi_\varepsilon\|_{L^1}} \quad \text{für } r \text{ hinreichend klein.} \end{aligned}$$

⁵Für $E \subset \mathbb{R}^n$ definiere $B_s(E) := \bigcup_{\xi \in E} B_s(\xi)$.

Nun ist weiter

$$(f * \phi_\varepsilon)(x) - f(x) = \int_{\mathbb{R}^n} \phi_\varepsilon(y)(f(x-y) - f(x)) \, d\lambda^n(y)$$

und die Minkowski-Ungleichung (Satz 9) liefert

$$\begin{aligned} \|f * \phi_\varepsilon - f\|_{L^p} &\stackrel{\Delta\text{-Ungl.}}{\leq} \left\| \underbrace{\int_{B_r(0)} \phi_\varepsilon(y)(f(\cdot - y) - f(\cdot)) \, d\lambda^n(y)}_{(*)} \right\|_{L^p} \\ &\quad + \left\| \underbrace{\int_{\mathbb{R}^n \setminus B_r(0)} \phi_\varepsilon(y)(f(\cdot - y) - f(\cdot)) \, d\lambda^n(y)}_{(**)} \right\|_{L^p}, \end{aligned}$$

wobei man die beiden Terme weiter abschätzen kann:

$$\begin{aligned} (*) &\leq \int_{B_r(0)} |\phi_\varepsilon(y)| \underbrace{\|f(\cdot - y) - f\|_{L^p}}_{\leq \delta / (2 \sup_{\varepsilon > 0} \|\phi_\varepsilon\|_{L^1})} \, d\lambda^n(y) \leq \delta/2 \\ (**) &\leq \int_{\mathbb{R}^n \setminus B_r(0)} |\phi_\varepsilon(y)| \underbrace{\|f(\cdot - y) - f\|_{L^p}}_{\leq 2\|f\|_{L^p}} \, d\lambda^n(y) \leq 2\|f\|_{L^p} \int_{\mathbb{R}^n \setminus B_r(0)} |\phi_\varepsilon(y)| \, d\lambda^n(y) \end{aligned}$$

$(**) \leq \frac{\delta}{2}$ für hinreichend kleine $\varepsilon > 0$.

Somit ist die Behauptung für $f \in C_c^0(\mathbb{R}^n)$ gezeigt.

Da diese Funktionen nach Satz 15 dicht in $L^p(\mathbb{R}^n)$ liegen, wählen wir für eine allgemeine Funktion $f \in L^p(\mathbb{R}^n)$ eine Folge $(f_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset C_c^0(\mathbb{R}^n)$ mit $\|f_k - f\|_{L^p} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$ und erhalten

$$\begin{aligned} \|f * \phi_\varepsilon - f\|_{L^p} &\leq \underbrace{\|f * \phi_\varepsilon - f_k * \phi_\varepsilon\|_{L^p}}_{= \|(f - f_k) * \phi_\varepsilon\|_{L^p}} + \underbrace{\|f_k * \phi_\varepsilon - f_k\|_{L^p}}_{\substack{\xrightarrow{\varepsilon \searrow 0} 0 \\ \text{f. festes } k}} + \underbrace{\|f_k - f\|_{L^p}}_{\xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0} \\ &\leq \underbrace{\|f - f_k\|_{L^p}}_{\xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0} \underbrace{\|\phi_\varepsilon\|_{L^1}}_{\leq M} \end{aligned}$$

Wähle erst k hinreichend groß und dann ε hinreichend klein \implies Behauptung. \square

Satz 21. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen. Dann liegt die Menge $C_c^\infty(\Omega)$ aller glatten Funktionen mit kompaktem Träger dicht in $L^p(\Omega)$ für $p \in [1, \infty)$.

Beweis. Nach Satz 15 genügt es zu zeigen, dass jede Funktion aus $C_c^0(\mathbb{R}^n)$ durch Funktionen aus $C_c^\infty(\mathbb{R}^n)$ approximiert werden kann, denn wir können $f|_{\mathbb{R}^n \setminus \Omega} = 0$ setzen.

Wir wählen einen Glättungskern ϕ und schließen, dass $f * \phi_\varepsilon$ kompakte Träger hat und C^∞ -glatt ist (vgl. Lemma 17(iii)).

Die Behauptung folgt nun aus Lemma 20. \square

3 Fouriertransformation

3.1 Definition und Umkehrbarkeit auf L^1

Definition 1 (Fouriertransformation). Für $f \in L^1(\mathbb{R}^n)$ definieren wir

$$\widehat{f}(p) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2}} \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle p, x \rangle} f(x) \, d\lambda^n(x), \quad p \in \mathbb{R}^n,$$

wobei $\langle \cdot, \cdot \rangle$ das Skalarprodukt darstellt.

Offenbar ist $\mathcal{F}: f \mapsto \widehat{f}$ eine lineare Abbildung, die beschränkt ist. Eine lineare Abbildung A zwischen normierten Räumen X, Y , $A: X \rightarrow Y$ heißt *beschränkt*, falls es eine Konstante $C > 0$ mit $\|Ax\|_Y \leq C \cdot \|x\|_X \quad \forall x \in X$ gibt.

Im Folgenden ist $C_b^0(X)$ der Raum der stetigen und beschränkten Funktionen $X \rightarrow \mathbb{R}$, $B \subset \mathbb{R}^n$. Also $C_b^0 = C^0 \cap \mathcal{L}^\infty$.

Lemma 2. Die Fouriertransformation \mathcal{F} ist eine lineare beschränkte Abbildung $L^1(\mathbb{R}^n) \rightarrow C_b^0(\mathbb{R}^n)$ mit

$$\|\widehat{f}\|_{L^\infty} \leq \frac{1}{(2\pi)^{n/2}} \|f\|_{L^1}.$$

Ist f nicht-negativ, so gilt Gleichheit.

Beweis. Die Abschätzung ergibt sich sofort aus der Definition. Es bleibt Stetigkeit von \widehat{f} zu zeigen. Hierzu wählen wir eine Folge $(p_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{R}^n$, $p_k \rightarrow p_0 \in \mathbb{R}^n$ für $k \rightarrow \infty$. Wegen $|e^{-i\langle p, x \rangle}| = 1$ ist $|f|$ eine integrierbare Majorante des Integranden und mit dem Satz über dominierte Konvergenz folgt die Behauptung. Ist $f \geq 0$, so haben wir

$$\begin{aligned} \|f\|_{L^1} &= \int_{\mathbb{R}^n} |f| \, d\lambda^n = \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle 0, x \rangle} f(x) \, d\lambda^n(x) \\ &= (2\pi)^{n/2} \widehat{f}(0) \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Def } L^\infty}}{\leq} (2\pi)^{n/2} \|\widehat{f}\|_{L^\infty} \leq \|f\|_{L^1}. \end{aligned}$$

□

Lemma 3. Für $f, g \in L^1(\mathbb{R}^n)$, $a, p \in \mathbb{R}^n$, $\lambda > 0$ gilt:

- (i) $\widehat{f(\cdot + a)}(p) = e^{-i\langle a, p \rangle} \widehat{f}(p)$, wobei die linke Seite die Fourier-Transformierte $x \mapsto f(x + a)$ ist.

- (ii) $\widehat{e^{-i\langle \cdot, a \rangle}} f(p) = \widehat{f}(p - a)$
- (iii) $\widehat{f(\lambda \cdot)}(p) = \frac{1}{\lambda^n} \widehat{f}\left(\frac{p}{\lambda}\right)$
- (iv) $\widehat{f(-\cdot)}(p) = \widehat{f}(-p)$
- (v) $\widehat{f}g, f\widehat{g} \in L^1$ mit $\int \widehat{f}g = \int f\widehat{g}$

Beweis. In der Übung. □

Lemma 4. Sei $f \in C^1(\mathbb{R}^n)$ mit $\lim_{|x| \rightarrow \infty} f(x) = 0$ und $f, \partial_j f \in L^1(\mathbb{R}^n)$ für ein $j \in \{1, \dots, n\}$. Dann ist

$$\widehat{\partial_j f}(p) = ip_j \widehat{f}(p) \quad \forall p \in \mathbb{R}^n.$$

Sind umgekehrt f und $(x \mapsto x_j f(x))$ integrierbar (also $\in L^1$), so ist \widehat{f} nach p_j differenzierbar und es gilt

$$\widehat{\cdot_j f(\cdot)}(p) = i \partial_j \widehat{f}(p) \quad \forall p \in \mathbb{R}^n.$$

Beweis. Partielle Integration liefert im ersten Fall

$$\begin{aligned} (2\pi)^{n/2} \widehat{\partial_j f}(p) &= \int_{\mathbb{R}^n} \underbrace{e^{-i\langle p, x \rangle} \frac{\partial f}{\partial x_j}(x)}_{\text{stetig!}} d\lambda^n(x) \stackrel{\text{P.I.}}{=} - \int_{\mathbb{R}^n} \frac{\partial e^{-i\langle p, x \rangle}}{\partial x_j} f(x) d\lambda^n(x) \\ &= ip_j \int_{\mathbb{R}^n} e^{-i\langle p, x \rangle} f(x) d\lambda^n(x) = (2\pi)^{n/2} ip_j \widehat{f}(p). \end{aligned}$$

Für den zweiten Fall erhalten wir aus Aufgabe 9

$$\begin{aligned} \widehat{\cdot_j f(\cdot)}(p) &= \frac{1}{(2\pi)^{n/2}} \int_{\mathbb{R}^n} x_j f(x) e^{-i\langle x, p \rangle} d\lambda^n(x) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2}} \int_{\mathbb{R}^n} \underbrace{i \frac{\partial e^{-i\langle x, p \rangle}}{\partial p_j} f(x)}_{\underbrace{\frac{\partial}{\partial p_j} \left(i e^{-i\langle x, p \rangle} \right)}_{|\cdot| \leq 1}} d\lambda^n(x) \\ &= i \frac{\partial}{\partial p_j} \widehat{f}(p), \end{aligned}$$

was insbesondere die partielle Differenzierbarkeit von \widehat{f} beweist. □

Notation 5. Das soeben bewiesene Resultat überträgt sich induktiv auf den Fall höherer Ableitungen. Für $f \in C^k(\mathbb{R}^n)$, $k \in \mathbb{N}$, $\alpha \in (\mathbb{N} \cup \{0\})^n$, $|\alpha| \leq k$ setzen wir

$$\partial_\alpha f := \frac{\partial^{|\alpha|} f}{\partial x_1^{\alpha_1} \cdots \partial x_n^{\alpha_n}}, \quad \text{wobei } x^\alpha = x_1^{\alpha_1} \cdots x_n^{\alpha_n}, \quad |\alpha| = \alpha_1 + \dots + \alpha_n \text{ ist.}$$

Ein Element $\alpha \in (\mathbb{N} \cup \{0\})^n$ heißt *Multiindex* und $|\alpha|$ ist seine Ordnung. Natürlich ist $(\lambda x)^\alpha = \lambda^{|\alpha|} x^\alpha$ für $\lambda \in \mathbb{R}$.

Definition 6 (Schwartz-Raum). Wir definieren

$$\mathcal{S}(\mathbb{R}^n) := \left\{ f \in C^\infty(\mathbb{R}^n) \mid \forall \alpha, \beta \in (\mathbb{N} \cup \{0\})^n: \sup_{x \in \mathbb{R}^n} |x^\alpha (\partial_\beta f)(x)| < \infty \right\}.$$

Die Elemente heißen *Schwartz-Funktionen* bzw. *schnell-fallende Funktionen*.

Bemerkung 7. Offenbar ist $\mathcal{S}(\mathbb{R}^n) \subset L^p(\mathbb{R}^n)$ für $p \in [1, \infty]$ und wegen $C_c^\infty(\mathbb{R}^n) \subset \mathcal{S}(\mathbb{R}^n)$ (insbesondere $\mathcal{S}(\mathbb{R}^n) \neq \emptyset$) ist $\mathcal{S}(\mathbb{R}^n)$ für $p \in [1, \infty)$ nach Satz II.21 sogar dicht in $L^p(\mathbb{R}^n)$. Mit f liegen auch $x \mapsto x^\alpha f(x)$ und $\partial_\alpha f$ für jeden Multiindex α im Schwartz-Raum.

Lemma 8. Die Fouriertransformation \mathcal{F} ist ein Operator $\mathcal{F}: \mathcal{S}(\mathbb{R}^n) \rightarrow \mathcal{S}(\mathbb{R}^n)$. Insbesondere gilt für jeden Multiindex $\alpha \in (\mathbb{N} \cup \{0\})^n$, $f \in \mathcal{S}(\mathbb{R}^n)$, $p \in \mathbb{R}^n$:

$$\widehat{\partial_\alpha f}(p) = (ip)^\alpha \widehat{f}(p) \quad \text{und} \quad \widehat{\cdot^\alpha f(\cdot)}(p) = i^{|\alpha|} \partial_\alpha \widehat{f}(p).$$

Beweis. Die Formeln erhält man induktiv aus Lemma 4. Insbesondere ist $\widehat{f} \in C^\infty(\mathbb{R}^n)$. Um $\widehat{f} \in \mathcal{S}(\mathbb{R}^n)$ zu zeigen, verwenden wir zunächst, dass \widehat{f} nach Lemma 2 beschränkt ist. Damit f nach Bemerkung 7 auch $(x \mapsto \partial_\alpha(x^\beta f(x))) \in \mathcal{S}(\mathbb{R}^n)$ gilt und dessen Fourier-Transformierte ebenfalls beschränkt ist, erhalten wir eine gleichmäßige Schranke aus

$$p^\alpha \partial_\beta \widehat{f}(p) = i^{-|\beta|} p^\alpha \widehat{\cdot^\beta f(\cdot)}(p) = i^{-|\alpha|-|\beta|} \underbrace{\partial_\alpha(\widehat{\cdot^\beta f(\cdot)})}_{\substack{\in \mathcal{S}(\mathbb{R}^n) \\ \text{gleichmäßig beschränkt in } p \text{ wegen Lemma 2}}}(p)$$

für beliebige Multiindizes $\alpha, \beta \in (\mathbb{N} \cup \{0\})^n$. □

”Moral”: Das Abklingverhalten einer Funktion korrespondiert mit der Regularität¹ der Fourier-Transformierten, und die Regularität einer Funktion umgekehrt mit dem Abklingverhalten ihrer Fourier-Transformierten.

Insbesondere verschwindet die Fourier-Transformierte einer integrierbaren Funktion im Unendlichen, was im folgenden Corollar gezeigt wird. Mit $C_0^0(\mathbb{R}^n)$ bezeichnen wir den Raum aller stetigen Funktionen f , die $\lim_{|x| \rightarrow \infty} f(x) = 0$ erfüllen.

Corollar 9 (Riemann-Lebesgue). Die Fouriertransformation bildet $L^1(\mathbb{R}^n)$ auf $C_0^0(\mathbb{R}^n)$ ab.

Beweis. Sei zunächst $f \in C_c^\infty(\mathbb{R})$. Dann ist für $p \in \mathbb{R}^n$ mit $p_j \neq 0$

$$\left| \widehat{f}(p) \right| \stackrel{\text{Lemma 4}}{=} \left| \frac{1}{ip_j} \widehat{\partial_j f}(p) \right| \stackrel{\text{Lemma 2}}{\leq} \frac{\|\partial_j f\|_{L^1}}{|2\pi|^{\frac{n}{2}} |p_j|}$$

folglich

$$\left| \widehat{f}(p) \right| \leq \min_{j \in \{1, \dots, n\}, p_j \neq 0} \frac{\|\partial_j f\|_{L^1}}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} |p_j|} \leq \frac{\max \|\partial_j f\|_{L^1}}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} \max_j |p_j|} \xrightarrow{\|p\| \rightarrow \infty} 0$$

¹Glattheit

Zu beliebigem $f \in L^1(\mathbb{R}^n)$ finden wir nach Satz 2.21 eine Folge $(f_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset C_c^\infty(\mathbb{R}^n)$ und $\|f_k - f\|_{L^1} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$. Nun ist für

$$\begin{aligned} |\widehat{f}(p)| &\leq \underbrace{|\widehat{f_k}(p)|}_{\substack{\text{für festes} \\ k \in \mathbb{N} \xrightarrow{|p| \rightarrow \infty} 0}} + \underbrace{\|\widehat{f_k} - \widehat{f}\|_{L^\infty}}_{= \|\widehat{f_k - f}\|_{L^\infty} \stackrel{\text{Lemma 2}}{\leq} C \|f_k - f\|_{L^1} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0 \end{aligned}$$

□

Satz 10 (Fourierinversion). *Die Fouriertransformation ist eine (beschränkte lineare) invertierbare Abbildung.*

$$\mathcal{F}: L^1(\mathbb{R}^n) \longrightarrow C_0^0(\mathbb{R}^n)$$

Die Inverse ist durch

$$f(x) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}}} \int_{\mathbb{R}^n} e^{ipx - \frac{\varepsilon^2 |p|^2}{2}} \widehat{f}(p) \, d\lambda^n(p)$$

gegeben, wobei der Grenzwert bezüglich der L^1 -Norm zu verstehen ist.

Beweis. Wir betrachten die Funktion $\phi \in C^\infty(\mathbb{R}^n)$, $\phi(x) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}}} e^{-\frac{x^2}{2}}$ und definiere $\phi_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon^n} \phi(\frac{\cdot}{\varepsilon})$. Nach A17 ist $\int_{\mathbb{R}^n} \phi \, d\lambda^n = 1$ insofern ist $(\phi_\varepsilon)_{\varepsilon > 0}$ eine approximative Identität. Weiter ist

$$\widehat{\phi(\varepsilon \cdot)}(p) \stackrel{\text{Lemma 3 (iii)}}{=} \frac{1}{\varepsilon^n} \widehat{\phi}\left(\frac{p}{\varepsilon}\right) \stackrel{\text{Ü.A.}}{=} \frac{1}{\varepsilon^n} \phi\left(\frac{p}{\varepsilon}\right) = \phi_\varepsilon(p)$$

Nun haben wir $\forall x \in \mathbb{R}^n$

$$\begin{aligned} \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}}} \int_{\mathbb{R}^n} e^{ipx - \frac{\varepsilon^2 |p|^2}{2}} \widehat{f}(p) \, d\lambda^n(p) &= \int_{\mathbb{R}^n} e^{ipx} \phi(\varepsilon p) \widehat{f}(p) \, d\lambda^n(p) \\ &= \int_{\mathbb{R}^n} \widehat{f(\cdot + x)}(p) \phi(\varepsilon p) \, d\lambda^n(p) \stackrel{\text{Lemma 3(v)}}{=} \int_{\mathbb{R}^n} f(p+x) \underbrace{\widehat{\phi(\varepsilon \cdot)}(p)}_{\phi_\varepsilon(p)} \, d\lambda^n(p) \end{aligned}$$

Sei $y = -p$

$$\int_{\mathbb{R}^n} f(x-y) \underbrace{\phi_\varepsilon(-y)}_{=\phi_\varepsilon(y)} \, d\lambda^n(y) = (f * \phi_\varepsilon)(x)$$

Nach Lemma 2.20 konvergiert die rechte Seite für $\varepsilon \rightarrow 0$ bezüglich der L^1 -Konvergenz gegen f . □

Corollar 11. Für $f \in L^1(\mathbb{R}^n)$ mit $\widehat{f} \in L^1(\mathbb{R}^n)$ gilt $\widetilde{\widehat{f}} = f$ wobei $\check{f}(p) := \widehat{f}(-p)$. Also $\check{\check{f}}(p) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}}} \int_{\mathbb{R}^n} e^{ipx} f(x) d\lambda^n(x)$ Insofern ist \mathcal{F} eine Bijektion auf:

$$F^1(\mathbb{R}^n) = \{f \in L^1(\mathbb{R}^n) \mid \widehat{f} \in L^1(\mathbb{R}^n)\}$$

und insbesondere ist $\mathcal{F}|_{\mathcal{S}(\mathbb{R}^n)} : \mathcal{S}(\mathbb{R}^n) \longrightarrow \mathcal{S}(\mathbb{R}^n)$ eine Bijektion.

Beweis. Wegen $\phi(\varepsilon p) \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}}}$ für alle $p \in \mathbb{R}^n$ erhalten wir $\left| e^{ipx} \phi(\varepsilon p) \widehat{f}(p) \right| < \frac{|\widehat{f}(p)|}{(2\pi)^{\frac{n}{2}}}$. Nach Voraussetzung liefert dies eine integrierbare Majorante und wir dürfen in der Formel aus Satz 10 Grenzwert und Integration vertauschen (Um punktweise Konvergenz zu erhalten, gehen wir zunächst von einer Teilfolge über (L^p -Konvergenz \rightarrow punktweise Konvergenz für eine Teilfolge) und erhalten die Konvergenz insgesamt (und teilfolgenunabhängig aus dem Teilfolgenprinzip)). Nun folgt $\widetilde{\widehat{f}} = f$ wie behauptet \square

Lemma 12 (Plancherel-Identität). Sei $f \in F^1(\mathbb{R}^n)$. Dann ist $f, \widehat{f} \in L^2(\mathbb{R}^n)$ und

$$\underbrace{\|f\|_{L^2}^2 = \|\widehat{f}\|_{L^2}^2}_{\text{Plancherel Identität}} \leq (2\pi)^{-\frac{n}{2}} \|f\|_{L^1} \|\widehat{f}\|_{L^1}$$

Beweis. Aus dem Satz von Fubini folgt

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}^n} |\widehat{f}(p)|^2 d\lambda^n(p) &= \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}}} \int_{\mathbb{R}^n} \int_{\mathbb{R}^n} f(x) \underbrace{e^{-ipx} \overline{\widehat{f}(p)}}_{=e^{ipx} \widehat{f}(p)} d\lambda^n(x) d\lambda^n(p) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}}} \int_{\mathbb{R}^n} f(x) \underbrace{\int_{\mathbb{R}^n} e^{ipx} \widehat{f}(p) d\lambda^n(p)}_{=(2\pi)^{\frac{n}{2}} \widetilde{\widehat{f}}(x) = (2\pi)^{\frac{n}{2}} f(x)} \\ &= \int_{\mathbb{R}^n} \underbrace{f(x) \overline{f(x)}}_{|f(x)|^2} d\lambda^n(x) \\ \text{Insbesondere } \|\widehat{f}\|_{L^2}^2 &\leq \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}}} \int_{\mathbb{R}^n} |f(x)| d\lambda^n(x) \int_{\mathbb{R}^n} \underbrace{|e^{ipx}|}_{=1} |\widehat{f}(p)| d\lambda^n(p) \end{aligned}$$

\square

Satz 13 (Unschärferelation). Für $f \in \mathcal{S}(\mathbb{R}^n)$, $p_0, x_0 \in \mathbb{R}$, $j = 1, \dots, n$ gilt.

$$\|(\cdot - x_0)f(\cdot)\|_{L^2} \left\| (\cdot - p_0)\widehat{f}(\cdot) \right\|_{L^2} \geq \frac{1}{2} \|f\|_{L^2}^2$$

Beweis. Indem wir f durch $\widehat{f}(x) := e^{-ix_j p_0} f(x + x_0 \widehat{e}_j)$ ersetzen, erhalten wir

$$\begin{aligned} \|(\cdot_j - x_0)(f \cdot)\|_{L^2}^2 &= \int_{\mathbb{R}^n} |(x_j - x_0)f(x)|^2 d\lambda^n(x) \\ &= \int_{\mathbb{R}^n} |x_j f(x + x_0 \widehat{e}_j)|^2 d\lambda^n(x) \\ &= \left\| \cdot_j \widehat{f}(\cdot) \right\|_{L^2}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \|(\cdot_j - p_0)(f \cdot)\|_{L^2}^2 &= \int_{\mathbb{R}^n} |(p_j - p_0)f(p)|^2 d\lambda^n(p) \\ &= \int_{\mathbb{R}^n} |p_j f(p + p_0 \widehat{e}_j)|^2 d\lambda^n(p) \\ &= \left\| \cdot_j \widehat{f}(\cdot) \right\|_{L^2}^2 \end{aligned}$$

und $\|f\|_{L^2}^2 = \left\| \widehat{f} \right\|_{L^2}^2$ Sodass wir ohne Einschränkung $p_0 = x_0 = 0$ annehmen dürfen. Nun liefert partielle Integration

$$\|f\|_{L^2}^2 = \int_{\mathbb{R}^n} 1 |f(x)|^2 d\lambda^n(x) \stackrel{f \in \mathcal{S}}{=} 0 - \int_{\mathbb{R}^n} x_j \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} |f(x)|^2}_{=2f(x) \frac{\partial}{\partial x_j} f(x)} d\lambda^n(x)$$

demnach ist

$$\|f\|_{L^2}^2 \stackrel{\text{Cauchy Schwarz}}{\leq} 2 \left\| \cdot_j f(\cdot) \right\|_{L^2} \underbrace{\left\| \frac{\partial f}{\partial x_j}(\cdot) \right\|_{L^2}}_{\stackrel{\text{Plancherel}}{=} \left\| \frac{\partial \widehat{f}}{\partial x_j} \right\| \stackrel{\text{Lemma 4}}{=} \left\| i \cdot_j \widehat{f}(\cdot) \right\|_{L^2} = \left\| \cdot_j \widehat{f}(\cdot) \right\|_{L^2}}$$

□

3.2 Fortsetzbarkeit auf L^2

Satz 14 (Fortsetzung linearer Abbildungen). Sei X ein normierter Raum mit dichter Teilmenge \mathcal{V} , und Y sei ein Banachraum. Ist $A: \mathcal{V} \rightarrow Y$ eine lineare und beschränkte Abbildung, das heißt, es gibt insbesondere ein $C_A > 0$ mit $\underbrace{\|A_x\|_Y}_{=A(x)} \leq C_A \|x\|_X \forall x \in \mathcal{V}$ so gibt es genau eine

Fortsetzung \tilde{A} , also eine lineare und beschränkte Abbildung $\tilde{A}: X \rightarrow Y$, $\tilde{A}|_{\mathcal{V}} = A$, die die

Abschätzung mit der selben Konstante $C_A \forall x \in X$ erfüllt. Ein \mathbb{R} -Vektorraum erfüllt die folgenden Axiome:²

$$\begin{aligned}\|x\| &= 0 \leftrightarrow x = 0 \quad \forall x \in X \\ \|\lambda x\| &= |\lambda| \|x\| \quad \forall \lambda \in \mathbb{R}, x \in X \\ \|x + y\| &\leq \|x\| + \|y\| \quad \forall x, y \in X.\end{aligned}$$

Beweis. Sei $(x_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{V}$ eine Cauchyfolge, dann ist wegen

$$\|Ax_j - Ax_k\|_Y = \|A(x_j - x_k)\|_Y \leq C_A \|x_j - x_k\|_X \rightarrow 0$$

und $(A_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset Y$ eine Cauchyfolge und diese besitzt einen eindeutigen Grenzwert $\tilde{A}x_0 := \lim_{k \rightarrow \infty} Ax_j$, sofern $x_0 = \lim_{k \rightarrow \infty} x_k \in X$ existiert. Damit ist $\tilde{A}: X \rightarrow Y$ eindeutig gegeben, denn für eine Folge $(x_k)_{k \in \mathbb{N}}, (y_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{V}$ mit $x_k \xrightarrow{k \rightarrow \infty} x_0 \xleftarrow{k \rightarrow \infty} y_k$ ist

$$\begin{aligned}\|Ax_k - Ay_k\|_Y &= \|A(x_k - y_k)\|_Y \leq C_A \|x_k - y_k\|_X \\ &\leq C_A (\|x_k - x_0\|_X + \|y_k - x_0\|_X) \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0\end{aligned}$$

Aufgrund von Stetigkeit von Vektoraddition und skalarer Multiplikation erhalten wir die Linearität von \tilde{A} und aus der Stetigkeit der Normen die behauptete Abschätzung. \square

Satz 15 (Plancherel). Die Fouriertransformation \mathcal{F} lässt sich zu einer linearen beschränkten Abbildung $\tilde{\mathcal{F}}: L^2(\mathbb{R}^n) \rightarrow L^2(\mathbb{R}^n)$ fortsetzen, die unitär ist, d. h.

$$\langle \tilde{\mathcal{F}}(f), \tilde{\mathcal{F}}(g) \rangle_{L^2} = \langle f, g \rangle_{L^2} \quad \forall f, g \in L^2(\mathbb{R}^n).$$

Beweis. Nach Satz III.21 liegt $C_c^\infty(\mathbb{R}^n) \subset \mathcal{S}(\mathbb{R}^n)$ dicht in $L^2(\mathbb{R}^n)$.

Nach Lemma 8 ist \mathcal{F} eine lineare und bijektive Selbstabbildung des Schwarzraumes und wegen $\mathcal{S}(\mathbb{R}^n) \subset F^1(\mathbb{R}^n)$ erhalten wir die Beschränktheit aus der Plancherel-Identität (Lemma 12). Nach Satz 14 gibt es eine eindeutige lineare Fortsetzung $\tilde{\mathcal{F}}: L^2(\mathbb{R}^n) \rightarrow L^2(\mathbb{R}^n)$ mit $\|\tilde{\mathcal{F}}(f)\|_{L^2} \leq \|f\|_{L^2}$.

Dass $\tilde{\mathcal{F}}$ unitär ist, erhält man mit Lemma 12 aus

$$\begin{aligned}4\langle f, g \rangle_{L^2} &= 4 \int_{\mathbb{R}^n} f(x) \overline{g(x)} d\lambda^n(x) \\ &= \|f + g\|_{L^2}^2 - \|f - g\|_{L^2}^2 + i \|f - ig\|_{L^2}^2 - i \|f + ig\|_{L^2}^2 \\ &= \dots = 4\langle \tilde{\mathcal{F}}(f), \tilde{\mathcal{F}}(g) \rangle_{L^2}.\end{aligned}$$

\uparrow
Lemma 12

\square

²Es sei V eine Menge, $(K, +, \cdot)$ ein Körper X heißt normierter Raum, wenn es eine Abbildung

$\|\cdot\|_X: X \rightarrow [0, \infty]$ mit $\oplus: V \times V \rightarrow V$ eine innere zweistellige Verknüpfung, genannt Vektoraddition, und $\odot: K \times V \rightarrow V$ eine äußere zweistellige Verknüpfung, genannt Skalarmultiplikation. Man nennt dann (V, \oplus, \odot) ein Vektorraum über dem Körper K oder kurz K -Vektorraum. (Eigenschaften Vektoraddition, Skalarmultiplikation siehe Wikipedia)

Bemerkung. Solange der Integrand von \widehat{f} in $L^1(\mathbb{R}^n)$ liegt, lässt sich $\widetilde{\mathcal{F}}(f)$ direkt mit der Formel aus Definition 1 berechnen. In der Regel lässt sich $\widetilde{\mathcal{F}}$ für $f \in L^2(\mathbb{R}^n)$ nur als Grenzwert einer Folge $\widehat{f_k}$, $(f_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{S}(\mathbb{R}^n)$, $f_k \xrightarrow[k \rightarrow \infty]{\text{in } L^2} f$, darstellen.

Lemma 16. Wir haben $\left\| \widetilde{\mathcal{F}}(f) \right\|_{L^\infty} \leq (2\pi)^{-n/2} \|f\|_{L^1}$ für alle $f \in L^1 \cap L^2$.

Beweis. Sofern $f \in L_c^1(\mathbb{R}^n)$ gilt, folgt $f \in L^2(\mathbb{R}^n)$ und nach Lemma III.20 konvergiert $\underbrace{f * \phi_\varepsilon}_{\in C_c^\infty(\mathbb{R}^n) \subset \mathcal{S}(\mathbb{R}^n)}$ für eine geeignete approximative Identität in $C_c^\infty(\mathbb{R}^n)$ bezüglich der L^1 -Norm und der

L^2 -Norm gegen f . Die Behauptung gilt für $f * \phi_\varepsilon$ nach Lemma 2 und für $\varepsilon \searrow 0$ erhalten wir das gewünschte mit der Stetigkeit der Norm.

Für allgemeine $f \in L^1(\mathbb{R}^n) \cap L^2(\mathbb{R}^n)$ betrachten wir $f_R = f \chi_{B_R(0)}$.

Dann ist $f_R \xrightarrow{R \nearrow \infty} f$ in L^1 und L^2 (dominierte Konvergenz) und wir erhalten die Behauptung durch Approximation. \square

Insbesondere gilt für $f \in L^2(\mathbb{R}^n)$ ($\implies f \chi_{B_R(0)} \longrightarrow f$ in L^2)

$$\widetilde{\mathcal{F}}(f)(p) = \lim_{R \nearrow \infty} \frac{1}{(2\pi)^{n/2}} \int_{B_R(0)} e^{-ipx} f(x) \, d\lambda^n(x),$$

wobei der Grenzwert bezüglich der L^2 -Norm zu verstehen ist und für $f \in F^1(\mathbb{R}^n)$ entfallen kann.

Lemma 17. Für $f, g \in \mathcal{S}(\mathbb{R}^n)$ gilt $f * g, fg \in \mathcal{S}(\mathbb{R}^n)$ und wir haben

$$\widehat{f * g} = (2\pi)^{n/2} \widehat{f} \widehat{g} \quad \text{und} \quad \widehat{fg} = (2\pi)^{-n/2} \widehat{f} * \widehat{g}.$$

Für $f, g \in L^1(\mathbb{R}^n)$ erhalten wir aus $f * g \in L^1(\mathbb{R}^n)$ die erste Abschätzung.

Beweis. Für $f, g \in \mathcal{S}(\mathbb{R}^n)$ sind $f * g, fg \in \mathcal{S}(\mathbb{R}^n)$ und wir erhalten $f * g \in L^1(\mathbb{R}^n)$ aus der Young-Ungleichung (Lemma III.17(iv)).

Nun ist

$$\widehat{f * g}(p) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2}} \int_{\mathbb{R}^n} e^{-ipx} \int_{\mathbb{R}^n} f(y) g(x-y) \, d\lambda^n(y) \, d\lambda^n(x).$$

Nun erhalten wir mit Fubini

$$\begin{aligned} \widehat{f * g}(p) &= \frac{(2\pi)^{n/2}}{(2\pi)^{n/2}} \int_{\mathbb{R}^n} e^{-ipy} f(y) \underbrace{\frac{1}{(2\pi)^{n/2}} \int_{\mathbb{R}^n} e^{-ip(x-y)} \, d\lambda^n(x)}_{=\widehat{g}(p)} \, d\lambda^n(y) \\ &= (2\pi)^{n/2} \widehat{f} \widehat{g}. \end{aligned}$$

Wegen $\mathcal{S}(\mathbb{R}^n) \subset L^1(\mathbb{R}^n)$ erhalten wir aus dem soeben Gezeigten für $f, g \in \mathcal{S}(\mathbb{R}^n)$

$$\widehat{f * g}(p) = (2\pi)^{n/2} \widehat{f\hat{g}} \in \mathcal{S}(\mathbb{R}^n),$$

denn nach *Lemma 8* haben wir zunächst $\widehat{f}, \widehat{g} \in \mathcal{S}(\mathbb{R}^n)$ und folglich $\widehat{f\hat{g}} \in \mathcal{S}(\mathbb{R}^n)$.
Weil \mathcal{F} nach *Satz 10* injektiv auf $L^1(\mathbb{R}^n)$ ist, erhalten wir

$$f * g = \mathcal{F}^{-1}(\widehat{f * g}) = (2\pi)^{n/2} \mathcal{F}^{-1}(\underbrace{\widehat{f\hat{g}}}_{\in \mathcal{S}}) \stackrel{\text{Corollar 11}}{\downarrow} \in \mathcal{S}(\mathbb{R}^n).$$

Nach *Corollar 11* gilt diese Identität auch bei Ersetzen von (f, g) durch (\check{f}, \check{g}) und so erhalten wir für alle $p \in \mathbb{R}^n$

$$\begin{aligned} (2\pi)^{-n/2} (\widehat{f * g})(p) &= (2\pi)^{-n/2} (\check{f} * \check{g})(-p) = \mathcal{F}^{-1}(\widehat{\check{f}\check{g}})(-p) \\ &= \mathcal{F}^{-1}(fg)(-p) = \check{f}\check{g}(-p) = \widehat{f\hat{g}}(p). \end{aligned}$$

□

Corollar 18. Die Faltung zweier Funktionen $f, g \in L^2(\mathbb{R}^n)$ liegt im Bild von \mathcal{F} , welches seinerseits eine Teilmenge von $C_0^0(\mathbb{R}^n)$ ist, und wir haben $\|f * g\|_{L^\infty} \leq \|f\|_{L^2} \|g\|_{L^2}$ sowie

$$\begin{array}{c} \widehat{f\hat{g}} \\ \uparrow \\ fg \in L^1 \end{array} = (2\pi)^{-n/2} \check{\mathcal{F}}(f) \check{\mathcal{F}}(g).$$

Beweis. Aus der Cauchy-Schwarz-Ungleichung erhalten wir unmittelbar

$$\begin{aligned} |(f * g)(x)| &= \left| \int_{\mathbb{R}^n} f(y)g(x-y) \, d\lambda^n(y) \right| \leq \int_{\mathbb{R}^n} |f(y)| |g(x-y)| \, d\lambda^n(y) \\ &\leq \left(\int_{\mathbb{R}^n} |f(y)|^2 \, d\lambda^n(y) \right)^{1/2} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |g(x-y)|^2 \, d\lambda^n(y) \right)^{1/2} \\ &= \|f\|_{L^2} \|g\|_{L^2} \quad \forall x \in \mathbb{R}^n. \end{aligned}$$

Hieraus folgt zunächst $f * g \in L^\infty(\mathbb{R}^n)$.

Wir wählen $(f_k)_{k \in \mathbb{N}}, (g_k)_{k \in \mathbb{N}} \in \mathcal{S}(\mathbb{R}^n)$ mit $f_k \rightarrow f$ und $g_k \rightarrow g$ in $L^2(\mathbb{R}^n)$. Zunächst ist

$$\begin{aligned} \underbrace{\|f_k g_k - f g\|_{L^1}}_{\in \mathcal{S} \subset L^1} &\leq \|f_k - f\|_{L^2} \|g\|_{L^2} - \|f\|_{L^2} \|g_k - g\|_{L^2} \\ &\leq \underbrace{\|f_k - f\|_{L^2}}_{\rightarrow 0} \underbrace{\|g_k - g\|_{L^2}}_{\rightarrow 0} + \underbrace{\|f_k - f\|_{L^2}}_{\rightarrow 0} \underbrace{\|g\|_{L^2}}_{< \infty} + \underbrace{\|f\|_{L^2}}_{< \infty} \underbrace{\|g_k - g\|_{L^2}}_{\rightarrow 0} \end{aligned}$$

und wir erhalten nach *Lemma 2*

$$\underbrace{\|\widehat{f_k g_k} - \widehat{f g}\|_{L^\infty}}_{\in L^1} \leq (2\pi)^{-n/2} \|f_k g_k - f g\|_{L^1} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0.$$

Weiter ist

$$\begin{aligned} \left\| \widehat{f_k} * \widehat{g_k} - \widetilde{\mathcal{F}}(f) * \widetilde{\mathcal{F}}(g) \right\|_{L^\infty} &\stackrel{\text{siehe oben}}{\leq} \underbrace{\left\| \widehat{f_k} - \widetilde{\mathcal{F}}(f) \right\|_{L^\infty}}_{\rightarrow 0} \underbrace{\left\| \widehat{g_k} - \widetilde{\mathcal{F}}(g) \right\|_{L^\infty}}_{\rightarrow 0} + \underbrace{\left\| \widehat{f_k} - f \right\|_{L^2}}_{\rightarrow 0} \underbrace{\left\| \widetilde{\mathcal{F}}(g) \right\|_{L^2}}_{< \infty} \\ &\quad + \underbrace{\left\| \widetilde{\mathcal{F}}(f) \right\|_{L^2}}_{< \infty} \underbrace{\left\| \widehat{g_k} - \widetilde{\mathcal{F}}(g) \right\|_{L^2}}_{\rightarrow 0}. \end{aligned}$$

Für die linke Seite ist zu beachten, dass $f_k, g_k \in \mathcal{S}(\mathbb{R}^n)$ und somit auch $\widehat{f_k}, \widehat{g_k} \in \mathcal{S}(\mathbb{R}^n)$. Ebenso gilt mit $f, g \in L^2(\mathbb{R}^n)$ auch $\widetilde{\mathcal{F}}(f), \widetilde{\mathcal{F}}(g) \in L^2(\mathbb{R}^n)$ und $\widetilde{\mathcal{F}}(f) * \widetilde{\mathcal{F}}(g) \in L^\infty(\mathbb{R}^n)$. Nun gilt bezüglich Konvergenz in L^∞

$$\widehat{f g} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} \widehat{f_k g_k} \stackrel{\text{Lemma 17}}{\downarrow} (2\pi)^{-n/2} \widehat{f_k} * \widehat{g_k} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} (2\pi)^{-n/2} \widetilde{\mathcal{F}}(f) * \widetilde{\mathcal{F}}(g).$$

Da $f g \in L^1(\mathbb{R}^n) \implies \widehat{f g} \in C_0^0(\mathbb{R}^n)$ nach Riemann-Lebesgue (*Lemma 9*) erhalten wir (bei Wahl eines stetigen Vertreters auf der rechten Seite)

$$\widehat{f g} = (2\pi)^{-n/2} \widetilde{\mathcal{F}}(f) \widetilde{\mathcal{F}}(g) \quad \text{für alle Punkte aus } \mathbb{R}^n$$

Indem wir (f, g) durch $(\widetilde{\mathcal{F}}^{-1} f, \widetilde{\mathcal{F}}^{-1} g)$ ersetzen, folgt

$$\begin{aligned} f * g &= (2\pi)^{n/2} (2\pi)^{-n/2} \widetilde{\mathcal{F}}(\widetilde{\mathcal{F}}^{-1}(f)) * \widetilde{\mathcal{F}}(\widetilde{\mathcal{F}}^{-1}(g)) \\ &= (2\pi)^{n/2} \underbrace{\widetilde{\mathcal{F}}(\widetilde{\mathcal{F}}^{-1}(f))}_{\in L^2} \underbrace{\widetilde{\mathcal{F}}(\widetilde{\mathcal{F}}^{-1}(g))}_{\in L^2}, \text{ also } f * g \in \text{Bild } \mathcal{F}. \end{aligned}$$

□

3.3 Lösung von partiellen Differentialgleichungen (mit konstanten Koeffizienten)

Die Poisson-Gleichung auf \mathbb{R}^n ist durch

$$-\Delta u = f$$

gegeben, wobei Δ der Laplace-Operator mit

$$\Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2} + \cdots + \frac{\partial^2 u}{\partial x_n^2}$$

ist.

Zunächst gehen wir davon aus, dass die Daten f und die Lösung u in $\mathcal{S}(\mathbb{R}^n)$ liegen. Insbesondere nehmen wir an, dass eine Lösung existiert. Anwenden der Fourier-Transformation liefert:

$$|p|^2 \widehat{u}(p) = - \sum_{j=1}^n (ip_j)^2 \widehat{u}(p) = - \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 u}{\partial x_j^2}(p) = -\widehat{\Delta u}(p) = \widehat{f}(p)$$

$$\xrightarrow{p \neq 0} \widehat{u}(p) = |p|^{-2} \widehat{f}(p)$$

Die Funktion $p \mapsto |p|^{-2}$ liegt für $n \geq 3$ in $L^1(\mathbb{R}^n)$ und insofern erhalten wir mit *Corollar 11*

$$u = \widehat{(|\cdot|^{-2} \widehat{f})},$$

wobei das Argument in Klammern $\in L^1$ ist. Bei der Herleitung haben wir lediglich $f, |\cdot|^{-2} \widehat{f}(\cdot) \in L^1(\mathbb{R}^n)$ verwendet. Wenn wir $\widehat{f} \in L^1$ voraussetzen, folgt $|p|^2 \widehat{u}(p) = \widehat{f}(p) \in L^1$ und *Lemma 4* (Abklingverhalten von \widehat{g} liefert Information über Glattheit von g) liefert $u \in C^2$ ("klassische Lösung").

Definition 19 (Gamma-Funktion). Wir setzen für $z \in \mathbb{C}, \operatorname{Re} z > 0$

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty x^{z-1} e^{-x} d\lambda(x).$$

Die Gamma-Funktion ist für $\operatorname{Re} z > 0$ wohldefiniert und erfüllt die Funktionalgleichung

$$z\Gamma(z) = \Gamma(z+1),$$

wobei $\Gamma(1) = 1$ ist. Hieraus erhält man unmittelbar $\Gamma(n) = (n-1)!$ für $n \in \mathbb{N}$.

Lemma 20 (Riesz-Potential). Sei $\alpha \in (0, n)$, $g \in L^1(\mathbb{R}^n) \cap L^\infty(\mathbb{R}^n)$, $(p \mapsto |p|^{-\alpha} \widehat{g}(p)) \in L^1(\mathbb{R}^n)$. Dann ist $\forall \xi \in \mathbb{R}^n$

$$\widehat{|\cdot|^{-\alpha} \widehat{g}(\cdot)}(\xi) = \int_{\mathbb{R}^n} I_\alpha(|\xi - y|) g(y) d\lambda^n(y),$$

mit

$$I_\alpha(r) = \frac{\Gamma\left(\frac{n-\alpha}{2}\right)}{2^\alpha \pi^{n/2} \Gamma\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \frac{1}{r^{n-\alpha}}.$$

Beweis. Wir setzen $\phi_t(p) = \exp\left(-\frac{t|p|^2}{2}\right)$ und erhalten zunächst für $p \neq 0$ (und ab dem 2ten Schritt mit $\sigma(t) := \frac{t|p|^2}{2}$)

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \phi_t(p) t^{\frac{\alpha}{2}-1} d\lambda(t) &= \int_0^\infty e^{-\frac{t|p|^2}{2}} t^{\frac{\alpha}{2}-1} d\lambda(t) = 2|p|^{-2} \int_0^\infty \left(2|p|^{-2} \sigma\right)^{\frac{\alpha}{2}-1} e^{-\sigma} d\lambda(\sigma) \\ &= \left(2|p|^{-2}\right)^{\frac{\alpha}{2}} \int_0^\infty \sigma^{\frac{\alpha}{2}-1} e^{-\sigma} d\lambda(\sigma) = \left(2|p|^{-2}\right)^{\frac{\alpha}{2}} \Gamma\left(\frac{\alpha}{2}\right) \\ &= C_\alpha |p|^{-\alpha} \text{ mit } C_\alpha = 2^{\frac{\alpha}{2}} \Gamma\left(\frac{\alpha}{2}\right). \end{aligned}$$

Nun ist

$$\begin{aligned}
\overline{|\cdot|^{-\alpha} \widehat{g}(\cdot)}(\xi) &\stackrel{\text{Def}}{=} \frac{1}{(2\pi)^{n/2}} \int_{\mathbb{R}^n} \underbrace{e^{i\langle p, \xi \rangle} |p|^{-\alpha} \widehat{g}(p)}_{\in L^1} d\lambda^n(p) \\
&= \frac{1}{(2\pi)^{n/2} C_\alpha} \int_{\mathbb{R}^n} e^{i\langle p, \xi \rangle} \int_0^\infty \phi_t(p) t^{\frac{\alpha}{2}-1} d\lambda(t) \widehat{g}(p) d\lambda^n(p) \\
&\stackrel{\text{Fubini}}{=} \frac{1}{(2\pi)^{n/2} C_\alpha} \int_0^\infty \int_{\mathbb{R}^n} e^{i\langle p, \xi \rangle} \underbrace{\phi_t(p) \widehat{g}(p)}_{= t^{\frac{n}{2}} \widehat{\phi_{1/t}}(p)} d\lambda^n(p) t^{\frac{\alpha}{2}-1} d\lambda(t),
\end{aligned}$$

denn wir haben $\widehat{\phi_1} = \phi_1$ nach *Aufgabe 30b* und folglich für $t > 0$ und $p \in \mathbb{R}$

$$\begin{aligned}
\widehat{\phi_t}(p) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mathbb{R}} e^{-ipx} \phi_t(x) d\lambda(x) \stackrel{\tilde{x}=\sqrt{t}x}{=} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mathbb{R}} e^{-i\tilde{x}p/\sqrt{t}} \phi_1(\tilde{x}) \frac{d\lambda(\tilde{x})}{\sqrt{t}} \\
&= \frac{1}{\sqrt{t}} \widehat{\phi_1}\left(\frac{p}{\sqrt{t}}\right) = \frac{1}{\sqrt{t}} \phi_1\left(\frac{p}{\sqrt{t}}\right) = \frac{1}{\sqrt{t}} \phi_{\frac{1}{t}}(p).
\end{aligned}$$

Wegen $\phi_1, g \in L^1$ folgt mit *Lemma 17*

$$\widehat{\phi \cdot \widehat{g}} = (2\pi)^{-n/2} \widehat{\phi \cdot * g}.$$

Weiterhin ist \widehat{g} beschränkt und $\widehat{\phi} \in \mathcal{S}(\mathbb{R}^n) \subset L^1(\mathbb{R}^n)$, also ist $\widehat{\phi} \cdot \widehat{g} \in L^1$ und

$$\mathcal{F}^{-1}(\widehat{\phi \cdot \widehat{g}}) = (2\pi)^{n/2} \mathcal{F}^{-1}(\widehat{\phi \cdot * g}) = (2\pi)^{-n/2} \phi \cdot * g.$$

Nun können wir erneut den Satz von Fubini anwenden und erhalten

$$\overline{|\cdot|^{-2} \widehat{g}(\cdot)}(\xi) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} C_\alpha} \int_0^\infty \int_{\mathbb{R}^n} e^{i\langle p, \xi \rangle} \underbrace{\phi_{\frac{1}{t}}(p) \widehat{g}(p)}_{=(2\pi)^{-n/2} \widehat{\phi_{\frac{1}{t}} * g}(p)} d\lambda^n(p) t^{\frac{\alpha-n}{2}-1} d\lambda(t)$$

$$\begin{aligned}
&\stackrel{\text{Satz 10: } \phi \cdot * g, \widehat{\phi \cdot * g} \in L^1}{=} \frac{1}{(2\pi)^{n/2} C_\alpha} \int_0^\infty \left(\phi_{\frac{1}{t}} * g \right)(\xi) t^{\frac{\alpha-n}{2}-1} d\lambda(t) \\
&\stackrel{\text{Def. Faltung}}{=} \frac{1}{(2\pi)^{n/2} C_\alpha} \int_0^\infty \int_{\mathbb{R}^n} \phi_{\frac{1}{t}}(\xi - y) g(y) d\lambda^n(y) t^{\frac{\alpha-n}{2}-1} d\lambda(t),
\end{aligned}$$

und mit $\tilde{t} = \frac{1}{t}$ und $d\tilde{t} = -\frac{dt}{t^2} = -\tilde{t}^2 dt$ erhalten wir

$$\begin{aligned}
& \stackrel{\text{Trafosatz}}{=} \frac{1}{(2\pi)^{n/2} C_\alpha} \int_0^\infty \int_{\mathbb{R}^n} \phi_{\tilde{t}}(\xi - y) g(y) d\lambda^n(y) \tilde{t}^{\frac{n-\alpha}{2}+1-2} d\lambda(\tilde{t}) \\
& \stackrel{\text{Fubini}}{=} \frac{1}{(2\pi)^{n/2} C_\alpha} \int_{\mathbb{R}^n} \underbrace{\int_0^\infty \phi_{\tilde{t}}(\xi - y) \tilde{t}^{\frac{n-\alpha}{2}-1} d\lambda(\tilde{t})}_{\text{siehe oben} = C_{n-\alpha} |\xi - y|^{-(n-\alpha)}} g(y) d\lambda^n(y) \\
& = \underbrace{\frac{C_{n-\alpha}/C_\alpha}{(2\pi)^{n/2}}}_{(*)} \int_{\mathbb{R}^n} \frac{g(y)}{|\xi - y|^{n-\alpha}} d\lambda^n(y) = \int_{\mathbb{R}^n} I_\alpha(|\xi - y|) g(y) d\lambda^n(y).
\end{aligned}$$

Hierbei kann $(*)$ dargestellt werden durch

$$(*) = (2\pi)^{-n/2} \frac{2^{\frac{n-\alpha}{2}} \Gamma\left(\frac{n-\alpha}{2}\right)}{2^{\frac{\alpha}{2}} \Gamma\left(\frac{\alpha}{2}\right)}.$$

□

Satz 21 (Poisson-Gleichung). Sei $n \geq 3$, $f \in L^1(\mathbb{R}^n) \cap L^\infty(\mathbb{R}^n)$, $\hat{f}, \left(|\cdot|^{-2} \hat{f}\right) \in L^1(\mathbb{R}^n)$. Dann ist

$$u = \Phi * f, \quad \Phi(x) = I_2(|x|)$$

eine (klassische) Lösung der Poisson-Gleichung $-\Delta u = f$. Die Funktion Φ wird auch als Fundamentallösung bezeichnet.

Allgemeines Prinzip

Gegeben sei eine lineare PDE

$$P(i\partial)u = f, \quad P(i\partial) = \sum_{|\alpha| \leq k} b_\alpha i^{|\alpha|} \partial_\alpha.$$

Dann ist formal eine Lösung durch

$$u = \widehat{\frac{f}{P(\cdot)}}$$

gegeben. $P(p) = \sum_{|\alpha| \leq k} b_\alpha i^{|\alpha|} p^\alpha$. Hier ist $\frac{1}{P(\cdot)}$ ein "Fourier-Multiplikator".

Helmholtz-Gleichung

$$-\Delta u + u = f$$

$$\rightsquigarrow u(x) = \underbrace{\left(1 + |\cdot|^2\right)^{-1}}_{p \mapsto \frac{1}{1+|p|^2}} \widehat{f}(x)$$

Analog zeigt man für $\alpha \in (0, n)$, $f \in L^1 \cap L^\infty$, $(1 + |\cdot|^2)^{-\alpha/2} \widehat{f} \in L^1$. Dann ist

$$\left(1 + |p|^2\right)^{-\alpha/2} \widehat{f} = \int_{\mathbb{R}^n} I_{\frac{n-\alpha}{2}}(|x-y|) f(y) \, d\lambda^n(y).$$

Hier ist

$$I_\alpha(r) = \frac{2}{(4\pi)^{\alpha/2} \Gamma(\frac{\alpha}{2})} \left(\frac{r}{2}\right)^{-\frac{n-\alpha}{2}} K_{\frac{n-\alpha}{2}}(r), \quad r > 0$$

und

$$K_\nu(r) = K_{-\nu} = \frac{1}{2} \left(\frac{r}{2}\right)^\nu \int_0^\infty e^{-t - \frac{r^2}{4t}} \frac{dt}{t^{\nu+1}}, \quad r > 0, \quad \nu \in \mathbb{R}.$$

4 Differenzierbare Mannigfaltigkeiten

4.1 Implizite Funktionen und Untermannigfaltigkeiten

Definition 1.

- (i) Seien X, Y topologische Räume. Eine stetige Abbildung $f: X \rightarrow Y$ die bijektiv ist und deren Inverse ebenfalls stetig ist, heißt *Homöomorphismus*.
- (ii) Seien X, Y normierte Räume. Ein Homöomorphismus $F: X \rightarrow Y$ heißt *(C^1 -) Diffeomorphismus*, wenn $f \in C^1(X, Y)$, $f^{-1} \in C^1(Y, X)$. Entsprechend *C^k -Diffeomorphismus* für $f, f^{-1} \in C^k$.

Satz 2 (Umkehrsatz, Satz über die Umkehrfunktion). Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ eine nichtleere, offene Menge und $f \in C^1(\Omega, \mathbb{R}^n)$. Dann ist die Invertierbarkeit der Jacobimatrix $Df(\xi)$ in $\xi \in \Omega$ äquivalent zur Existenz einer lokalen Umkehrfunktion von f in einer Umgebung $f(\xi)$.

Genauer gibt es eine offene Teilmenge $\mathcal{V} \subset \Omega$, $\mathcal{W} \subset \mathbb{R}^n$ mit $\xi \in \mathcal{V}$ und $F(\xi) \in \mathcal{W}$, $\mathcal{W} \subset \text{Bild } f$, sodass $f|_{\mathcal{V}}$ ein Diffeomorphismus $\mathcal{V} \rightarrow \mathcal{W}$ ist. Insbesondere gilt

$$(D((f|_{\mathcal{V}})^{-1}))(f(x)) = (Df(x))^{-1} \forall x \in \mathcal{V}$$

Beweis. Siehe Analysis II, verwende vor allem Banachschen Fixpunktsatz. □

Corollar 3 (Globaler Umkehrsatz). Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen und nichtleer, $f \in C^1(\Omega, \mathbb{R}^n)$.

Ist die Jacobi-Matrix $Df(x)$ für alle $x \in \Omega$ invertierbar und ist f injektiv (!), so liefert f einen Diffeomorphismus $\Omega \rightarrow \mathcal{W} := \text{Bild } f$.

Insbesondere ist \mathcal{W} offen, und die Identität aus Satz 2 gilt für alle $x \in \Omega$.

Beweis. Nach Voraussetzung ist $f: \Omega \rightarrow \mathcal{W}$ bijektiv und C^1 . Satz 2 impliziert nun, dass $Df(x) \forall x \in \Omega$ invertierbar ist und dass f^{-1} in jedem Punkt $y = f(f^{-1}(y)) \in \mathcal{W}$ stetig differenzierbar ist. □



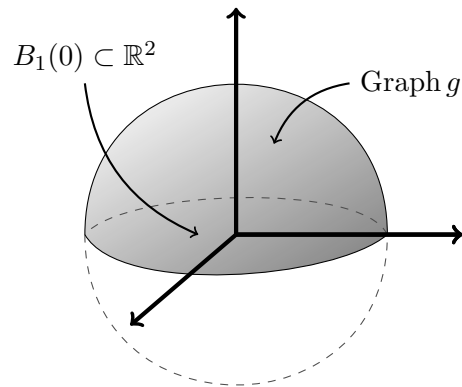
Sei $f: X \rightarrow Y$, dann ist
 $\text{Graph } f = \{(x, f(x)) \mid x \in X\} \subset X \times Y$.

Beispielweise können wir die Sphäre

$$\begin{aligned}\mathbb{S}^2 &= \{(x_1, x_2, y) \in \mathbb{R}^3 \mid \underbrace{x_1^2 + x_2^2 + y^2}_{f(x_1, x_2, y) = x_1^2 + x_2^2 + y^2 - 1} = 1\} \\ &= f^{-1}(\{0\})\end{aligned}$$

für $y > 0$ als Graph der Funktion

$g(x_1, x_2) = \sqrt{1 - x_1^2 - x_2^2}$, $(x_1, x_2) \in B_1(0) \subset \mathbb{R}^2$ darstellen.



Allgemein möchte man eine (Hyper-) Fläche der Form $M = \{X, Y \in \mathbb{R}^{k+m} \mid f(x, y) = 0\}$ lokal als Graph einer Funktion $x \rightarrow g(x) \in \mathbb{R}^m$ schreiben, also $(x, g(x)) \in M$.

Grafik folgt in Kürze.

Satz 4 (implizite Funktionen). Seien $k, m \in \mathbb{N}$, $\Omega \subset \mathbb{R}^{k+m}$ eine offene Menge und $f \in C^1(\Omega, \mathbb{R}^m)$. Es gebe ein $(\xi, \eta) \in \Omega$ mit $f(\xi, \eta) = 0$ und $\det D_y f(\xi, \eta) \neq 0$, wobei $D_y f(x, y) = \left(\frac{\partial f_j}{\partial y_l}(x, y) \right)_{j,l=1,\dots,m}$.

Dann gibt es offene Umgebungen $U \subset \mathbb{R}^k$ von ξ und $V \subset \mathbb{R}^m$ von η und ein $\phi \in C^1(U, V)$ mit

$$\{(x, y) \in U \times V \mid f(x, y) = 0\} = \{(x, \phi(x)) \mid x \in U\} \text{ und}$$

$$D\phi(x) = -(D_y f(x, \phi(x)))^{-1} D_x f(x, \phi(x)) \forall x \in U$$

Beweis. Wir definieren $F: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^{k+m}$ durch

$$F(x, y) = \underbrace{\left(x, \underbrace{f(x, y)}_{\in \mathbb{R}^m} \right)}_{\in \mathbb{R}^k}$$

und erhalten $DF(x, y) = \begin{pmatrix} \mathbb{1}_{k \times k} & 0 \\ D_x f(x, y) & D_y f(x, y) \end{pmatrix}$.

Insbesondere ist $\det DF(\xi, \eta) = \underbrace{(\det \mathbb{1}_{k \times k})}_{=1} \underbrace{(\det D_y f(\xi, \eta))}_{\neq 0}$ also $DF(\xi, \eta) \in \text{GL}(k+m)^1$.

¹Menge der invertierbaren $(k+m) \times (k+m)$ -Matrizen, *general linear group*

Nun erhalten wir aus Satz 2 offene Mengen $\mathcal{W}, \tilde{\mathcal{W}} \subset \mathbb{R}^{k+m}$ mit $(\xi, \eta) \in \mathcal{W}, F(\xi, \eta) \in \tilde{\mathcal{W}}$, sodass $F|_{\mathcal{W}}$ ein Diffeomorphismus $\mathcal{W} \rightarrow \tilde{\mathcal{W}}$ liefert. Durch verkleinern von \mathcal{W} (ohne Ändern der Notation, betrifft auch $\tilde{\mathcal{W}}$) können wir $\mathcal{W} = U \times V$ annehmen wobei U und V offene Umgebungen von ξ bzw. η sind.

Grafik folgt in Kürze.

Weiter setzen wir $G = (F|_{\mathcal{W}})^{-1}: \tilde{\mathcal{W}} \rightarrow \mathcal{W}$.

Wegen $F(x, y) = (x, f(x, y)) \forall (x, y) \in \Omega \supset U \times V$ gibt es eine Funktion $g: \tilde{\mathcal{W}} \rightarrow V$ mit

$$\begin{aligned} G(\tilde{x}, \tilde{y}) &= (\tilde{x}, g(\tilde{x}, \tilde{y})) \quad \forall (\tilde{x}, \tilde{y}) \in \tilde{\mathcal{W}} \\ f(\tilde{x}, g(\tilde{x}, \tilde{y})) &= \tilde{y} \quad \forall (\tilde{x}, \tilde{y}) \in \tilde{\mathcal{W}} \\ g(x, f(x, y)) &= y \quad \forall (x, y) \in \mathcal{W} = U \times V \end{aligned}$$

Wegen $(\xi, 0) = (\xi, f(\xi, \eta)) = F(\xi, \eta) \in \tilde{\mathcal{W}}$ erhalten wir nach verkleinern von U (\mathcal{W} bleibt unverändert, U nach wie vor offene Umgebung von ξ) $F(U \times \{0\}) \subset \tilde{\mathcal{W}}$, insbesondere ist $g(x, 0) \forall x \in U$ definiert. Für alle $(x, y) \in U \times V$ gilt nun

$$f(x, y) \iff F(x, y) = (x, 0) \iff (x, y) = G(x, 0) = (x, g(x, 0)) \iff y = g(x, 0)$$

Mit der Definition $\phi: U \rightarrow V, x \rightarrow g(x, 0)$, ergibt sich

$$f(x, y) = 0 \iff y = \phi(x) \quad \forall (x, y) \in U \times V.$$

Da G ein Diffeomorphismus ist, folgt $g \in C^1(\tilde{\mathcal{W}}, V)$ und $\phi \in C^1(U, V)$. Mit der Kettenregel erhalten wir $f(x, \phi(x)) \forall x \in U = 0 \rightarrow D_x f(x, \phi(x)) + \underbrace{D_y f(x, \phi(x))}_{\text{invertierbar wegen Umkehrsatz}} D\phi(x) = 0$.

invertierbar wegen Umkehrsatz

□

Grundkonzepte der Untermannigfaltigkeiten. Mannigfaltigkeiten „sehen lokal so aus“ wie eine Umgebung im \mathbb{R}^k für ein $k \in \mathbb{N}$.

Definition 5 (Immersion). Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ nichtleer und offen, $\phi \in C^1(\Omega, \mathbb{R}^m)$, $m \geq n$.

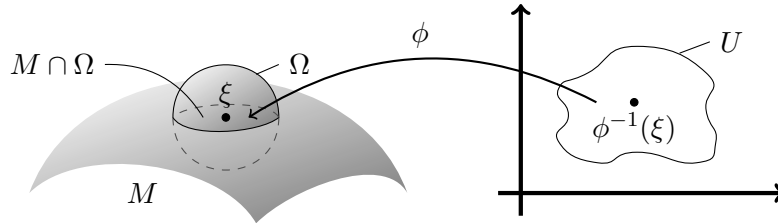
Die Abbildung ϕ heißt *Immersion*, falls der Rang von $D\phi(x) \forall x \in \Omega$ stets maximal ist (also gleich n).

(Alternativ: $D\phi(x): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ ist (linear und) injektiv.)

Definition 6 (Untermannigfaltigkeit). Seien $m, n \in \mathbb{N} \cup \{0\}$, $m \leq n$.

Eine C^1 -Untermannigfaltigkeit des \mathbb{R}^n mit Dimension m (kurz: Mannigfaltigkeit) ist eine nicht-leere Menge $M \subset \mathbb{R}^n$ (Notation M^m) mit der folgenden Eigenschaft:

Für jedes $\xi \in M$ existiert eine offene Umgebung $\Omega \subset \mathbb{R}^n$, $\xi \in \Omega$, eine (offene) Menge $U \subset \mathbb{R}^m$ und eine Immersion $\phi \in C^1(U, \mathbb{R}^n)$, die U homöomorph auf Bild $\phi = M \cap \Omega$.



Die Abbildung ϕ heißt (lokale) Parametrisierung von M um ξ , ihre Umkehrung $\phi: M \cap \Omega \rightarrow U$ bzw. das Paar (ϕ^{-1}, U) heißt Karte und eine Familie von Karten, deren Urbilder ganz M überdecken, bildet einen Atlas.

Bemerkung 7. Die Dimension einer Mannigfaltigkeit ist wohldefiniert. — Eine nichtleere Teilmenge des \mathbb{R}^n ist genau dann eine n -dimensionale Mannigfaltigkeit, wenn sie offen ist.

Notation 8 (Lineare Algebra). Sei X ein endlich-dimensionaler (reeller) Vektorraum mit innerem Produkt $\langle \cdot, \cdot \rangle$. Das orthogonale Komplement V^\perp eines Unterraums $V \subset X$ ist durch

$$V^\perp = \{x \in X \mid \langle x, v \rangle = 0 \quad \forall v \in V\}$$

gegeben, und wir haben $V \oplus V^\perp = X$. Ist Y ein weiterer endlich-dimensionaler Vektorraum und $A: X \rightarrow Y$ eine lineare Abbildung, so setzen wir

$$\text{Kern } A = \{x \in X \mid Ax = 0\} \subset X,$$

$$\text{Bild } A = \{Ax \mid x \in X\} \subset Y,$$

und es gilt $\underbrace{\dim \text{Kern } A}_{\text{Defekt}} + \underbrace{\dim \text{Bild } A}_{\text{Rang}} = \dim X$.

Satz 9. Für $m, n \in \mathbb{N}$, $m \leq n$ und eine nichtleere Menge $M \subset \mathbb{R}^n$ sind die folgenden Aussagen äquivalent:

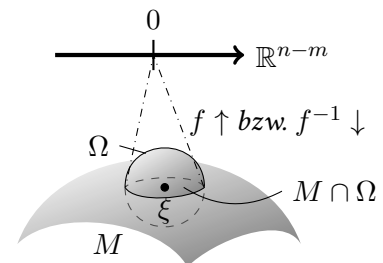
- (i) (Untermannigfaltigkeit) Für jedes $\xi \in M$ gibt es eine offene Umgebung $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ von ξ , eine Menge $U \subset \mathbb{R}^m$ und eine Immersion $\phi \in C^1(U, \mathbb{R}^n)$, die U homöomorph auf

$$M \cap \Omega = \phi(U)$$

abbildet.

- (ii) (Gleichungsdefinierte Mannigfaltigkeit) Zu jedem $\xi \in M$ gibt es eine offene Umgebung $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ von ξ und eine Abbildung $f \in C^1(\Omega, \mathbb{R}^{n-m})$ mit $\text{Rang } Df(x) = n - m \quad \forall x \in \Omega$ und

$$M \cap \Omega = f^{-1}(\{0_{\mathbb{R}^{n-m}}\}).$$



(iii) (Graphendarstellung) Zu jedem $\xi \in M$ gibt es eine offene Umgebung $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ von ξ , eine offene Menge $U \subset \mathbb{R}^m$ und ein $g \in C^1(U, \mathbb{R}^{n-m})$ mit

$$M \cap \Omega = \Pi(\text{Graph } g),$$

wobei $\Pi \in \text{GL}(n)$ eine Permutationsmatrix ist.

Eine Permutationsmatrix Π ist durch einen Zykel² $\sigma \in \mathfrak{S}_n$ eindeutig charakterisiert, und es gilt $\Pi e_j = e_{\sigma(j)}$ für $j = 1, \dots, n$.

Beweis. „(i) \implies (ii)“: Wir konstruieren eine Funktion f mithilfe des Umkehrsatzes.

Sei also M eine m -dimensionale Untermannigfaltigkeit des \mathbb{R}^n wie in (i) und $\eta = \phi^{-1}(\xi) \in U$. Da ϕ eine Immersion ist, besitzt $D\phi(\eta)$ einen vollen Rang und die Spalten von $D\phi$ spannen einen linearen Unterraum T auf.

Grafik folgt in Kürze.

Mit P_T bezeichnen wir die orthogonale Projektion $\mathbb{R}^n \longrightarrow T \subset \mathbb{R}^n$. Weiterhin setzen wir $\phi_T := P_T \circ \phi: U \longrightarrow T \subset \mathbb{R}^n$. Insbesondere gilt $\text{Rang } D\phi_T = m$, denn

$$D\phi_T = D(P_T \circ \phi) = \underbrace{((DP_T) \circ \phi)}_{=P_T} D\phi.$$

Entsprechend ist

$$D\phi_T(\mathbb{R}^n) = P_T \underbrace{D\phi(\mathbb{R}^n)}_{=T} = T.$$

Nach einem Koordinatenwechsel können wir $T = \mathbb{R}^m \times \{0_{\mathbb{R}^{n-m}}\}$ annehmen und setzen außerdem $N = \{0_{\mathbb{R}^n}\} \times \mathbb{R}^{n-m}$ und $\phi_N = P_N \circ \phi: U \longrightarrow N$, wobei P_N die orthogonale Projektion auf N bezeichnet.

Der Umkehrsatz liefert nun eine offene Umgebung $\tilde{U} \subset U$ von η , so dass

$$\phi_T|_{\tilde{U}}: \tilde{U} \longrightarrow \phi_T(\tilde{U}) =: \tilde{V}$$

²zyklische Permutation, siehe Lineare Algebra I

³ $A = P_T, v \in \mathbb{R}^n$

$$\frac{A(x + \tau v) - A(x)}{\tau} = Av \implies DA = A$$

ein Diffeomorphismus ist.

Insbesondere gibt es eine inverse Abbildung

$$\psi := (\phi_T|_{\tilde{U}})^{-1} \in C^1(\tilde{V}, \tilde{U}).$$

Wir wählen $\tilde{\Omega} \subset \Omega$ mit $\xi \in \Omega$ und $\phi^{-1}(\tilde{\Omega} \cap M) \subset \tilde{U}$. Weiter setzen wir $\Omega^* = (\tilde{V} \oplus N) \cap \tilde{\Omega} \subset \Omega$, d. h. für jedes $x \in \Omega^*$ gibt es eine Zerlegung $x = x_T + x_N$ wobei $x_T \in \tilde{V} \subset T$ und $x_N \in N$. Mit

$$f(x) = f(x_T + x_N) = \underbrace{x_N}_{\in N} - \underbrace{\phi_N(\psi(x_T))}_{\in N}$$

erhalten wir eine Abbildung $f \in C^1(\Omega^*, N)$.

Aus $D_N f = \mathbb{1}_{n-m}$ erhalten wir $\text{Rang } D\psi(x) = \dim N = n - m \quad \forall x \in \Omega^*$.

Somit bleibt $\Omega^* \cap M = \{x \in \Omega^* \mid f(x) = 0\}$ zu zeigen.

Sei hierzu $x \in \Omega^*$, d. h. $x \in \tilde{\Omega}$ mit $x = x_T + x_N$, $x_T \in \tilde{V} \subset T$, $x_N \in N$.

Nun setzen wir $u = \psi(x_T) \in \tilde{U}$, also $x_T = \phi_T(u)$.

Wir haben $f(x) = 0 \iff x_N = \phi_N(u) \iff x = \phi(u) \in M \cap \Omega$.

„(ii) \implies (iii)“: Sei M eine gleichungsdefinierte Mannigfaltigkeit. Zu $x \in M$ wählen wir Ω und f aus (ii). Nach Umnummerierung der Koordinaten (was auf die Permutationsmatrix Π führt) erhalten wir $D_z f(\xi) \in \text{GL}(n - m)$, wobei $x = (y, z) \in \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^{n-m}$.

Aus dem Satz über implizite Funktionen gewinnen wir eine offene Umgebung $U \times V \subset \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^{n-m}$ von $\xi = (\eta, \zeta)$ und eine Funktion $g \in C^1(U, V)$ mit

$$\text{Graph } g = \{(y, z) \in U \times V \mid f(y, z) = 0\} = M \cap (U \times V).$$

(iii) \implies (i): Unter den Voraussetzungen von (iii) erhalten wir mit

$$\phi: y \mapsto \Pi(y, g(y))$$

eine Abbildung aus $C^1(U, \mathbb{R}^n)$. Folglich ist $\phi(U) = M \cap \Omega$ und es bleibt zu zeigen, dass ϕ eine Immersion ist und einen Homöomorphismus liefert.

Aus der Definition liest man unmittelbar die Injektivität von ϕ sowie $\text{Rang } D\phi = m$ ab.

Nach Voraussetzung ist ϕ stetig und die Stetigkeit von ϕ^{-1} sieht man wie folgt:

Eine konvergente Folge in Bild ϕ lässt sich durch eine Folge $(y_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset U$ mit

$$\phi(y_k) = \Pi(y_k, g(y_k)) \longrightarrow w \in \text{Bild } \phi \subset \mathbb{R}^n \text{ darstellen.}$$

Mit $(y, z) = \Pi^{-1}(w)$ ergibt sich $(y_k, g(y_k)) \longrightarrow (y, z)$ und insbesondere $y_k \longrightarrow y$.

Somit ist M eine Mannigfaltigkeit. □

Definition 10 (Tangententialraum/Normalraum). Sei $M \subset \mathbb{R}^n$ eine m -dimensionale Mannigfaltigkeit und $\xi \in M$. Ein Vektor $v \in \mathbb{R}^n$ heißt *Tangententialvektor an M im Punkt ξ* , falls es eine Kurve $\gamma \in C^1((-\varepsilon, \varepsilon), M)$, $\varepsilon > 0$, mit $\gamma(0) = \xi$, $\gamma'(0) = v$ gibt.

Die Menge aller Tangentialvektoren wird *Tangententialraum an M im Punkt $\xi \in M$* genannt und mit $T_\xi M$ bezeichnet.

Der *Normalraum an M in ξ* ist das orthogonale Komplement $N_\xi M = (T_\xi M)^\perp$.

Satz 11. Sei $M \subset \mathbb{R}^n$ eine m -dimensionale Mannigfaltigkeit, $\xi \in M$, $m \leq n$.
 Sei $\phi \in C^1(U, \mathbb{R}^n)$ eine lokale Parametrisierung von M an ξ und sei f wie in Satz 9(ii).
 Dann gilt

$$\begin{aligned} T_\xi M &= \text{Bild } D\phi(0) = \text{Kern } Df(\xi), \\ N_\xi M &= (\text{Bild } D\phi(0))^\perp = \text{span}(\nabla f_1(\xi), \dots, \nabla f_{n-m}(\xi)). \end{aligned}$$

Insbesondere ist $T_\xi M$ wirklich ein Vektorraum und wir haben

$$\dim T_\xi M = m, \quad \dim N_\xi M = n - m.$$

Beweis. Wir können $\phi(0) = \xi$ annehmen. Wir zeigen zunächst $\text{Bild } D\phi(0) \subset T_\xi M$.
 Für $w \in \text{Bild } D\phi(0)$ gibt es ein $u \in \mathbb{R}^m$ mit $w = D\phi(0)u$.
 Für $\gamma(t) = \phi(tu)$ gilt $\gamma(0) = \phi(0) = \xi$ und $\gamma'(0) = D\phi(0)u = w$. Damit ist $w \in T_\xi M$.
 Weiterhin ist $T_\xi M \subset \text{Kern } Df(\xi)$. Sei hierzu $v \in T_\xi M$. Definitionsgemäß gibt es eine Kurve $\gamma: (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow M$ mit $\gamma(0) = \xi$ und $\gamma'(0) = v$. Wir können $\varepsilon > 0$ so klein wählen, dass $\text{Bild } \gamma$ in $M \cap \Omega$ enthalten ist, wobei Ω die in Satz 9(ii) angegebene offene Menge bezeichnet.
 Wegen $\text{Bild } \gamma \subset M$ gilt insbesondere $f \circ \gamma \equiv 0$, also

$$0 = (f \circ \gamma)'(0) = Df(\gamma(0))\gamma'(0) = Df(\xi)v,$$

folglich ist $v \in \text{Kern } Df(\xi)$. Damit haben wir insgesamt:

$$\text{Bild } D\phi(0) \subset T_\xi M \subset \text{Kern } Df(\xi)$$

Wegen $\dim \text{Bild } D\phi(0) = \text{Rang } D\phi(0) = m$ und

$$\dim \text{Kern } Df(\xi) = n - \text{Rang } Df(\xi) = n - (n - m) = m$$

folgt die behauptete Identität. Insbesondere ist $T_\xi M$ ein m -dimensionaler Vektorraum.
 Wir erhalten nach Definition $N_\xi M = (T_\xi M)^\perp = (\text{Bild } D\phi(0))^\perp$. Sei nun $w = \nabla f_j(\xi)$ für ein $j = 1, \dots, n - m$ und $v \in T_\xi M$.
 Wir erhalten

$$\langle w, v \rangle = \sum_{k=1}^n \frac{\partial f_j}{\partial x_k}(\xi) v_k = (Df(\xi)v)_j = 0,$$

da $T_\xi M = \text{Kern } Df(\xi)$.

Nun folgt $w \perp T_\xi M$, also $w \in N_\xi M$, und mithin

$$\text{span}(\nabla f_1(\xi), \dots, \nabla f_{n-m}(\xi)) \subset N_\xi M.$$

Wegen $\text{Rang } Df(\xi) = n - m$ handelt es sich bei beiden Mengen um Vektorräume der Dimension $n - m$ und diese sind folglich gleich. \square

Satz 12 (Tangentialebene). Für jeden Punkt ξ einer Mannigfaltigkeit M ist mit $\Xi = \xi + T_\xi M$

$$\frac{1}{r} \sup \{ \text{dist}(x, \Xi) \mid x \in M \cap B_r(\xi) \} \xrightarrow{r \searrow 0} 0.$$

Grafik folgt in Kürze.

Motivationsfragen:

- Was ist oben und was ist unten? (Orientierbarkeit)
- Wie sieht es mit Rändern aus, wann sind sie „glatt“, wann sind sie selbst Mannigfaltigkeiten?

4.2 Integration auf Mannigfaltigkeiten

Ziel: Verallgemeinerung des Lebesgue-Integrals auf Mannigfaltigkeiten.

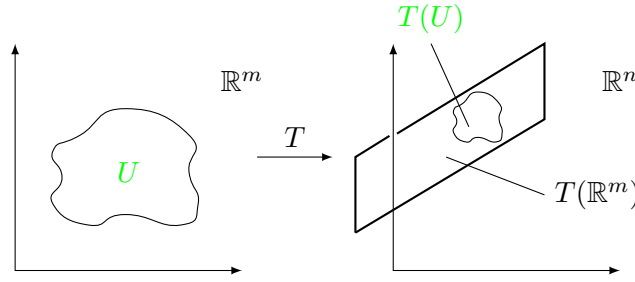
Strategie:

1. Nach Definition können wir uns eine Mannigfaltigkeit M lokal mit einer Immersion $\varphi: U \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ parametrisieren – also betrachten wir zunächst Stücke von Mannigfaltigkeiten.
2. Eine "beliebige" Mannigfaltigkeit zerlegen wir in endlich viele überlappende Teilstücke mit lokalen Parametrisierungen (wir setzen also voraus, dass M einen endlichen Atlas besitzt). Der Wert des Integrals ist unabhängig vom gewählten Atlas. Wichtigstes Hilfsmittel: Partition der Eins.

Zunächst der lineare Fall. Für eine lineare Abbildung $T: \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n, n \geq m$, und eine messbare Menge $U \subset \mathbb{R}^m$ möchten wir den "m-dimensionalen Flächeninhalt" von $T(U)$ angeben. Wir erwarten, dass der n-dimensionale "Flächeninhalt" von $T(U)$ im Fall $m < n$ Null beträgt⁴.

Lemma 13. Sei $T \in \mathbb{R}^{n \times m}$ (charakterisiert lineare Abbildung $\mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$) mit Rang $m, n \geq m$. Dann gibt es $Q \in \mathbb{R}^{n \times m}$ und $S \in \mathbb{R}^{m \times m}$ mit $T = QS$, wobei Q eine Isometrie ist, das heißt $|Qv|_{\mathbb{R}^n} = |v|_{\mathbb{R}^m} \forall v \in \mathbb{R}^m$ und $|\det S| = \sqrt{\det T^T T}$.

⁴Siehe Aufgabe 18: \mathbb{S}^{n-1} ist eine λ^n -Nullmenge.



Beweis. Mit e_1, \dots, e_m bezeichnen wir die Standard-Einheitsbasis des \mathbb{R}^m . Weiter wählen wir eine Orthonormalbasis $\{f_1, \dots, f_n\}$ des \mathbb{R}^n mit $T(\mathbb{R}^m) = \text{span}\{f_1, \dots, f_m\}$.

Nun können wir $Q \in \mathbb{R}^{n \times m}$ durch $Qe_j = f_j, j = 1, \dots, m$ eindeutig definieren und für

$$v = \sum_{j=1}^m v_j e_j, \quad w = \sum_{k=1}^m w_k e_k$$

erhalten wir

$$\langle Qv, Qw \rangle_{\mathbb{R}^n} \stackrel{5}{=} \sum_{j,k} v_j w_k \delta_{jk} = \sum_{j=1}^m v_j w_j = \langle v, w \rangle_{\mathbb{R}^m},$$

also $|Qv|_{\mathbb{R}^n} = |v|_{\mathbb{R}^m} \forall v \in \mathbb{R}^m$, und

$$\langle Q^T Q v, w \rangle_{\mathbb{R}^m} = w^T Q^T Q v = (Qw)^T Q v = \langle Qv, Qw \rangle_{\mathbb{R}^n} = \langle v, w \rangle_{\mathbb{R}^m},$$

woraus $Q^T Q = \text{id}_{\mathbb{R}^m}$ ersichtlich ist. Nach Konstruktion ist Q auf $T(\mathbb{R}^m)$ invertierbar, somit ist $S := Q^{-1}T \in \mathbb{R}^{m \times m}$ wohldefiniert, und $\text{Rang } S = m$. Wir haben $QS = T$ und

$$\begin{aligned} \det(T^T T) &= \det((QS)^T QS) = \det(S^T \underbrace{Q^T Q}_{\text{id}_{\mathbb{R}^m}} S) \\ &= \det(S^T S) \\ &= \det(S) \det(S^T) \\ &= |\det S|^2. \end{aligned}$$

□

Wir möchten einen "Flächeninhalt" definieren, der invariant unter Isometrien (Translation, Rotation, Spiegelung) ist. Insofern sollte der Flächeninhalt von $T(U)$ mit dem von $Q^{-1}T(U) = S(U)$ übereinstimmen. Wegen $S(U) \subset \mathbb{R}^m$ können wir das m -dimensionale Lebesgue-Maß verwenden und erhalten:

$$\lambda^m(S(U)) = \int_{S(U)} 1 \, d\lambda^m \stackrel{\text{I.69c}}{=} |\det S| \int_U 1 \, d\lambda^m = \sqrt{\det(T^T T)} \lambda^m(U).$$

⁵ $\langle f_j, f_k \rangle_{\mathbb{R}^m} = \delta_{jk}$

Definition 14 (Integral auf lokaler Parametrisierung). Seien $m, n \in \mathbb{N}, m \leq n, U \subset \mathbb{R}^n$ offen, $\varphi \in C^1(U, \mathbb{R}^n)$ eine Immersion, die U homöomorph auf Bild φ abbildet. Dann definieren wir den mehrdimensionalen Flächeninhalt von Bild φ durch

$$\text{vol}^m(\text{Bild } \varphi) = \int_U \sqrt{\det((D\varphi)^\top(D\varphi))} \, d\lambda^m,$$

wobei $\det((D\varphi)^\top(D\varphi))$ mit *Gram-Determinante* bezeichnet wird. Eine Funktion $f: \text{Bild } \varphi \rightarrow \mathbb{R}$ heißt integrierbar, falls

$$(f \circ \varphi) \sqrt{\det((D\varphi)^\top(D\varphi))}$$

auf U integrierbar ist.

Das m -dimensionale Flächenintegral auf Bild φ ist durch

$$\int_{\text{Bild } \varphi} f \, dA^m = \int_U (f \circ \varphi) \sqrt{\det((D\varphi)^\top(D\varphi))} \, d\lambda^m$$

gegeben. Entsprechend sind die Räume $L^p(\text{Bild } \varphi)$ erklärt.

Im Fall $n = m$ ergibt sich mit $\varphi = \text{id}$:

$$\int_U f \, dA^n = \int_U f \, d\lambda^n.$$

Lemma 15 (Wohldefiniertheit des Flächeninhalts). Seien $n, m \in \mathbb{N}, m \leq n, U_1, U_2 \subset \mathbb{R}^m$ offen und $\varphi_1 \in C^1(U_1, \mathbb{R}^n), \varphi_2 \in C^1(U_2, \mathbb{R}^n)$ Immersionen, die U_1 beziehungsweise U_2 homöomorph auf eine Menge $W \subset \mathbb{R}^n$ abbilden. Sei weiterhin $f: W \rightarrow \mathbb{R}$ messbar. Dann ist $(f \circ \varphi_1) \sqrt{\det((D\varphi_1)^\top(D\varphi_1))}$ genau dann integrierbar, wenn $(f \circ \varphi_2) \sqrt{\det((D\varphi_2)^\top(D\varphi_2))}$ integrierbar ist und wir haben

$$\int_{U_1} (f \circ \varphi_1) \sqrt{\det((D\varphi_1)^\top(D\varphi_1))} \, d\lambda^m = \int_{U_2} (f \circ \varphi_2) \sqrt{\det((D\varphi_2)^\top(D\varphi_2))} \, d\lambda^m.$$

Beweis. Wir setzen $\psi = \varphi_1^{-1} \circ \varphi_2: U_2 \rightarrow U_1$. Wenn wir zeigen, dass ψ ein Diffeomorphismus ist, so folgt die Behauptung mit dem *Transformationssatz (I.70)* wegen

$$\int_{U_1} (f \circ \varphi_1) \sqrt{\det((D\varphi_1)^\top(D\varphi_1))} \, d\lambda^m = \int_{U_2} (f \circ \underbrace{\varphi_1 \circ \psi}_{\varphi_2}) \sqrt{\det((D\varphi_1 \circ \psi)^\top(D\varphi_1 \circ \psi))} |\det D\psi| \, d\lambda^m,$$

woraus wir mit $D\varphi_2 = D(\varphi_1 \circ \psi) = (D\varphi_1 \circ \psi) D\psi$ und

$$\begin{aligned} \det((D\varphi_2)^\top(D\varphi_2)) &= \det((D\psi)^\top \underbrace{(D\varphi_1 \circ \psi)^\top(D\varphi_1 \circ \psi)}_{\in \mathbb{R}^{m \times m}} (D\psi)) \\ &= \det(D\psi) \det((D\varphi_1 \circ \psi)^\top(D\varphi_1 \circ \psi)) \det(D\psi) \\ &= |\det D\psi|^2 \det((D\varphi_1 \circ \psi)^\top(D\varphi_1 \circ \psi)) \end{aligned}$$

die geforderte Identität erhalten.

Es bleibt zu zeigen, dass ψ ein Diffeomorphismus ist. Als Verkettung zweier Homöomorphismen ist ψ wieder ein Homöomorphismus. Insofern genügt der Nachweis, dass $\psi, \psi^{-1} \in C^1$ sind. Aus Symmetriegründen können wir uns auf $\psi \in C^1$ beschränken.

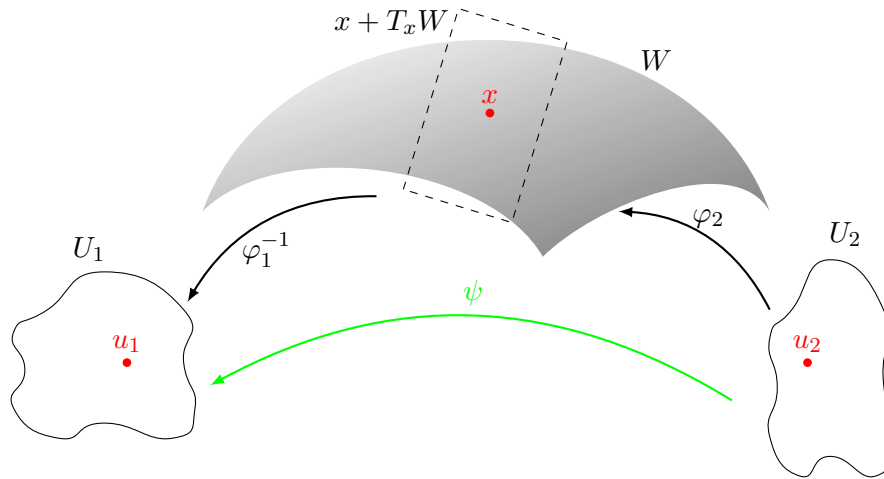
Zur Charakterisierung von φ_1^{-1} fixieren wir ein beliebiges $u_2 \in U_2$ und setzen $x = \varphi_2(u_2)$, $u_1 = \varphi_1^{-1}(x) = \psi(u_2)$. Die Spalten von $D\varphi_1(u_1)$ spannen den Tangentialraum $T_x W$ an W im Punkt x auf. Mit P bezeichnen wir die Projektion $P: \mathbb{R}^n \rightarrow T_x W \cong \mathbb{R}^m$. Nach der Kettenregel haben wir für $P \circ \varphi_1: U_1 \rightarrow T_x W$

$$D(P \circ \varphi_1)(u_1) = DP(\underbrace{\varphi_1(u_1)}_x) D\varphi_1(u_1) = P(D\varphi_1(u_1)) = D\varphi_1(u_1).$$

Insbesondere ist $\text{Rang } D(P \circ \varphi_1)(u_1) = \text{Rang } D\varphi_1(u_1) = m$.

Nach dem Umkehrsatz ist $P \circ \varphi_1$ in einer Umgebung von u_1 invertierbar. Folglich gibt es Umgebungen $\tilde{U}_1 \subset \mathbb{R}^m, \tilde{W} \subset T_x W$ mit $u_1 \in \tilde{U}_1$ und $g \in C^1(\tilde{W}, \tilde{U}_1)$ mit $g \circ P \circ \varphi_1 = \text{id}_{\tilde{U}_1}$.

Wir setzen $\tilde{U}_2 = \varphi_2^{-1}(\tilde{W})$ und erhalten $\psi = \varphi_1^{-1} \circ \varphi_2 = g \circ P \circ \varphi_2$ auf \tilde{U}_2 . Insbesondere ist $\psi|_{\tilde{U}_2} \in C^1(\tilde{U}_2, \mathbb{R}^m)$. Da u_2 beliebig war, folgt $\psi \in C^1(U_2, \mathbb{R}^m)$.



□

Im folgenden beschränkt wir uns auf Mannigfaltigkeiten, die einen endlichen Atlas besitzen, dies betrifft insbesondere kompakte Mannigfaltigkeiten. Ziel ist es, die auf lokale Parametrisierungen definierten Flächenintegrale zu einem Integral auf der gesamten Mannigfaltigkeit zusammenzukleben.

Definition 16 (Partition der Eins). Gegeben sei eine Überdeckung der Mannigfaltigkeit $M \subset \mathbb{R}^n$ durch die Mengen W_1, \dots, W_l , d.h. $M = \bigcup_{j=1}^l W_j$. Eine Familie $(\alpha_j)_{j=1, \dots, l}$ messbarer Funktionen $M \rightarrow \mathbb{R}$ heißt eine der Überdeckung $(W_j)_{j=1, \dots, l}$ untergeordnete Partition der Eins, wenn

- 1) $\text{Bild } \alpha_j \subset [0, 1]$ für $j = 1, \dots, l$
- 2) $\alpha_j \equiv 0$ auf $M \setminus W_j$ für $j = 1, \dots, l$

3) $\sum_{j=1}^l \alpha_j \equiv 1$ auf M .

Für einen endlichen Atlas $(\varphi_j^{-1}: W_j \rightarrow U_j)_{j=1,\dots,l}$ einer Mannigfaltigkeit M konstruieren wir eine der Überdeckung $(W_j)_{j=1,\dots,l}$ untergeordnete Partition der Eins $(\alpha_j)_{j=1,\dots,l}$, sodass $\alpha_j \circ \varphi_j$ jeweils messbar ist, durch $\alpha_1 = \chi_{W_1}, \alpha_2 = \chi_{W_2 \setminus W_1}, \dots, \alpha_j = \chi_{W_j \setminus (W_1 \cup \dots \cup W_{j-1})}$. Dann ist $\alpha_j \circ \varphi_j = \chi_{U_j \setminus \varphi_j^{-1}(W_1 \cup \dots \cup W_{j-1})}$

Definition 17 (Integral auf Mannigfaltigkeit). Sei $M \subset \mathbb{R}^n$ eine m -dimensionale Mannigfaltigkeit mit endlichem Atlas. $(\varphi_j^{-1}: W_j \rightarrow U_j)_{j=1,\dots,l}$ ⁶ Eine Funktion $f: M \rightarrow \mathbb{R}$ heißt integrierbar, wenn $f\chi_{W_j} \forall j = 1, \dots, l$ integrierbar im Sinne von Def. 14. Ist $(\alpha_j)_{j=1,\dots,l}$ eine der Überdeckung $(W_j)_{j=1,\dots,l}$ untergeordnete Partition der Eins und ist $\alpha_j \circ \varphi_j$ messbar für alle $j = 1, \dots, l$, so definieren wir das Integral von f über M durch

$$\begin{aligned} \int_M f \, dA^m &= \sum_{j=1}^l \int_M \alpha_j f \, dA^m \\ &= \sum_{j=1}^l \int_{U_j} \underbrace{(\alpha_j \circ \varphi_j)(f \circ \varphi_j)}_{=(\alpha_j f) \circ \varphi_j} \sqrt{\det((D\varphi_j)^T(D\varphi_j))} \, d\lambda^m \end{aligned}$$

Entsprechend sind die Räume $L^p(M)$ erklärt.

Lemma 18. Das Integral auf einer Mannigfaltigkeit ist wohldefiniert und hängt insbesondere nicht vom gewählten Atlas ab.

Beweis. Zunächst ist wegen Bild $\alpha_j \subset [0, 1]$ mit $f\chi_{W_j}$ auch $\alpha_j f\chi_{W_j} = \alpha_j f$ integrierbar. Seien nun $(\varphi_j^{-1}: W_j \rightarrow U_j)_{j=1,\dots,l}$ und $(\tilde{\varphi}_k^{-1}: \tilde{W}_k \rightarrow \tilde{U}_k)_{k=1,\dots,\tilde{l}}$ Atlanten mit untergeordneten Partitionen der Eins $(\alpha_j)_{j=1,\dots,l}$ und $(\tilde{\alpha}_k)_{k=1,\dots,\tilde{l}}$. Ist $f\chi_{W_j} \forall j = 1, \dots, l$ integrierbar, so auch $\alpha_j f\chi_{\tilde{W}_k} \forall j, k$. Nach Def 14 ist dann auch $f\chi_{\tilde{W}_k} = \sum_{j=1}^l \underbrace{\alpha_j f\chi_{\tilde{W}_k}}_{\equiv 1}$ integrierbar und wir haben

$$\sum_{j=1}^l \int_M \alpha_j f \, dA^m = \sum_{j=1}^l \sum_{k=1}^{\tilde{l}} \int_M \alpha_j \tilde{\alpha}_k f \, dA^m = \sum_{k=1}^{\tilde{l}} \int_M \tilde{\alpha}_k f \, dA^m.$$

□

Definition 19. Sei $M \subset \mathbb{R}^n$ eine m -dimensionale Mannigfaltigkeit mit endlichem Atlas. Ist $S \subset \mathbb{R}^n$ eine Teilmenge und ist χ_S integrierbar im Sinne von Def. 17, so nennen wir S integrierbar und definieren den m -dim Flächeninhalt von S durch $\text{vol}^m(S) = \int_M \chi_S \, dA^m$. Im Fall $\text{vol}^m(S) = 0$ sprechen wir von einer m -dimensionalen Nullmenge. Eine Funktion $f: S \rightarrow \mathbb{R}$ heißt über A integrierbar, falls $f\chi_S$ im Sinne von Definition 17 integrierbar ist und wir setzen

$$\int_S f \, dA^m = \int_M f\chi_S \, dA^m$$

⁶ Alternativ: $\varphi_j: U_j \rightarrow W_j$

Entsprechend sind Räume $L^p(S)$ erklärt. Ist S in M offen, d.h. ist selbst eine Mannigfaltigkeit, so stimmt letztere Definition mit dem Integralbegriff auf Def. 17 überein.

Lemma 20. Sei $M \subset \mathbb{R}^n$ eine m -dimensionale Nullmenge. Ist f integrierbar, so ist auch \hat{f} integrierbar und wir haben $\int_M f \, dA^m = \int_M \hat{f} \, dA^m$.

Beweis. Ist $S \subset M$ eine m -dimensionale Nullmenge, so gilt für jede Karte $\varphi^{-1}: W \rightarrow U$

$$\begin{aligned} 0 = \text{vol}^m(S) &\geq \int_M \chi_{S \cap W} \, dA^m = \int_U (\chi_S \circ \varphi) \sqrt{\det((D\varphi)^T D\varphi)} \, d\lambda^m \\ &= \int_{U \cap \varphi^{-1}(S)} \sqrt{\det((D\varphi)^T D\varphi)} \, d\lambda^m. \end{aligned}$$

Da der Radikand positiv ist (φ ist Immersion & Lemma 13) folgt $\lambda^m(U \cap \varphi^{-1}(S)) = 0$ (Lemma 1.52). Gilt nun $f = \hat{f}$ auf M/S so haben wir $\hat{f} \circ \varphi = f \circ \varphi$ fast überall in U für jede Karte $\varphi^{-1}: W \rightarrow U$. □

Achtung! An dieser Stelle ist die Ausarbeitung des Skriptes noch unvollständig.
In Kürze werden hier weitere Abschnitte zu finden sein.

4.4 Glatte Ränder

Definition 26 (Relativtopologie und Rand). Sei (X, \mathcal{O}) ein topologischer Raum, $Y \subset X$ eine nichtleere Teilmenge von X . Wir bezeichnen

$$\mathcal{O} \cap Y := \{U \cap Y \mid U \in \mathcal{O}\}$$

als *Relativtopologie* von Y bezüglich X .

Der Rand ∂Y ist die Menge aller Punkte $x \in X$, für die jedes $U \in \mathcal{O}$ mit $x \in U$ Punkte aus Y und $Y^c = X \setminus Y$ enthält. Insbesondere ist $(Y, \mathcal{O} \cap Y)$ wieder ein topologischer Raum.

Grafik folgt in Kürze.

Definition 27 (Glatte Ränder und adaptierte Karten). Sei $M \subset \mathbb{R}^n$ eine m -dimensionale Mannigfaltigkeit und $\Omega \subset M$. Wir sagen Ω habe einen *glatten Rand*, falls es für jedes $p \in \partial\Omega$ eine Karte $\varphi^{-1}: W \rightarrow U$ mit $p \in W$ und $\varphi(U \cap \{x_1 \leq 0\}) = \Omega \cap W$ sowie

$\varphi(U \cap \{x_1 = 0\}) = \partial\Omega \cap W$ gibt. Eine solche Karte φ^{-1} heißt Ω -adaptiert. Ein Atlas heißt Ω -adaptiert, falls sämtliche seiner Karten deren Definitionsbereich $\partial\Omega$ schneidet, Ω -adaptiert sind.

Grafik folgt in Kürze.

Lemma 28. *Sei M eine m -dimensionale Mannigfaltigkeit im \mathbb{R}^n , $\Omega \subset M$ eine Teilmenge mit glattem Rand. Dann gibt es einen Ω -adaptierten Atlas. Ist M orientiert und $m \geq 2$, so kann man erreichen, dass dieser Atlas orientiert ist.*

Beweis. Nach Definition erhalten wir eine (abzählbare) Familie in M offener Mengen, die $\partial\Omega$ überdecken und auf denen jeweils Karten definiert sind. Der Definitionsbereich aller weiteren Karten des Atlas schränken wir so ein, dass kein Punkt aus $\partial\Omega$ enthalten ist.

Durch Ausnutzen der Glattheit des Randes erhalten wir so aus einem gegebenen Atlas \mathcal{A}_0 einen Ω -adaptierten Atlas \mathcal{A} . Wir nehmen nun an, dass \mathcal{A}_0 orientiert ist. Indem wir bei der Konstruktion von \mathcal{A} die Definitionsbereiche entsprechend einschränken, finden wir für jede Karte $\varphi^{-1}: W \rightarrow U$ aus \mathcal{A} ein $\tilde{\varphi}^{-1}: \tilde{W} \rightarrow \tilde{U}$ aus \mathcal{A}_0 mit $W \subset \tilde{W}$, wobei $\det D(\tilde{\varphi}^{-1} \circ \varphi)$ auf W das Vorzeichen nicht ändert. Ersetzen wir nun sämtliche Karten $\varphi^{-1} \in \mathcal{A}$, für die dieses Vorzeichen negativ ist, durch $(\varphi \circ S)^{-1}$, wobei S die Spiegelung an $(\mathbb{R} \times m)^\perp$ ist, das heißt, $Se_j = e_j$ für $j = 1, \dots, m-1$, $Se_m = -e_m$, so erhalten wir einen Ω -adaptierten Atlas $\hat{\mathcal{A}}$ mit $\det(\tilde{\varphi}^{-1} \circ \varphi) > 0 \forall \varphi^{-1} \in \mathcal{A}$ (und $\tilde{\varphi}$ wie eben gefordert). Für Karten

$\varphi_1^{-1}: W_1 \rightarrow U_1$, $\varphi_2^{-1}: W_2 \rightarrow U_2$ aus $\hat{\mathcal{A}}$ und $W_1 \cap W_2 \neq \emptyset$ und $\tilde{\varphi}_1^{-1}: \tilde{W}_1 \rightarrow \tilde{U}_1$, $\tilde{\varphi}_2^{-1}: \tilde{W}_2 \rightarrow \tilde{U}_2$, wobei $W_1 \subset \tilde{W}_1$ und $W_2 \subset \tilde{W}_2$, gilt nun:

$$\begin{aligned} \varphi_2^{-1} \circ \varphi_1 &= \underbrace{(\varphi_2^{-1} \circ \tilde{\varphi}_2)}_{= (\tilde{\varphi}_2^{-1} \circ \varphi_2)} \circ (\tilde{\varphi}_2^{-1} \circ \tilde{\varphi}_1) \circ (\tilde{\varphi}_1^{-1} \circ \varphi_1), \\ &= (\tilde{\varphi}_2^{-1} \circ \varphi_2) \end{aligned}$$

und dies ist orientierungstreu, da Verkettungen und Umkehrungen orientierungstreuer Abbildungen wieder orientierungstreu sind. Die Karten aus \mathcal{A}_0 und $\hat{\mathcal{A}}$ sind gleichorientiert, denn für eine Karte $\tilde{\varphi}_1^{-1}: \tilde{W}_1 \rightarrow \tilde{U}_1$ aus \mathcal{A}_0 und eine weitere Karte $\varphi_2^{-1}: W_2 \rightarrow U_2$ aus $\hat{\mathcal{A}}$ mit $W_1 \cap W_2 \neq \emptyset$ ist der Kartenwechsel

$$\varphi_2^{-1} \circ \varphi_1 = \underbrace{(\varphi_2^{-1} \circ \tilde{\varphi}_1)}_{\mathcal{A}_0\text{-Kartenwechsel}} \circ \underbrace{(\tilde{\varphi}_1^{-1} \circ \varphi_1)}_{\text{orientierungstreu nach Karten von } \hat{\mathcal{A}}}$$

auf seinem Definitionsbereich orientierungstreu. □

Grafik folgt in Kürze.

Satz 29 (Ränder als Mannigfaltigkeiten). *Sei M eine m -dimensionale Mannigfaltigkeit im \mathbb{R}^n , $m, n \in \mathbb{N}$, $m \leq n$. Ist $\Omega \subset M$ eine Teilmenge mit glattem Rand, so ist ∂M eine $(m-1)$ -dimensionale Mannigfaltigkeit im \mathbb{R}^n . Ist M orientierbar, so ist auch ∂M .*

Beweis. Für einen Ω -adaptierten Atlas \mathcal{A} und $\varphi^{-1}: W \rightarrow U$ aus \mathcal{A} mit $\partial\Omega \cap W \neq \emptyset$ definieren wir eine stetige, bijektive Abbildung $\tilde{\varphi}^{-1}: \partial\Omega \cap W \rightarrow \tilde{U}$, wobei

$$\tilde{U} := \{x' \in \mathbb{R}^{m-1} \mid (0, x') \in U \subset \mathbb{R}^m\}, \quad \tilde{\varphi}(x') = \varphi(0, x'), \quad x' \in \tilde{U}.$$

Wenn U offen ist, so ist auch \tilde{U} eine offene Teilmenge in \mathbb{R}^{m-1} . Weiterhin ist $\partial\Omega \cap W$ offen in $\partial\Omega$. Weil auch die Umkehrabbildung $\tilde{\varphi}^{-1} = P \circ \varphi^{-1}|_{\partial\Omega \cap W}$ stetig ist, wobei P die Projektion $(x_1, x') \mapsto x'$ bezeichnet, ist $\tilde{\varphi}$ ein Homöomorphismus. Wegen $D\tilde{\varphi} = \left(\frac{\partial\varphi}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial\varphi}{\partial x_m}\right)$ und $\text{Rang } D\varphi = m$ hat $D\tilde{\varphi}$ vollen Rang mit $m-1$ und ∂M ist eine Mannigfaltigkeit. Nun sei M orientiert. Fall $m = 1$ führt auf Punktmengen. Also $m \geq 2$. Nach Lemma 28 können wir annehmen, dass \mathcal{A} aus gleichorientierten Ω -adaptierten Karten besteht. Zu zeigen bleibt, dass nun auch alle Karten aus dem Atlas $\tilde{\mathcal{A}}$ gleich orientiert sind, wobei $\tilde{\mathcal{A}}$ der Atlas für $\partial\Omega$ ist, der aus offenen Karten $\tilde{\varphi}^{-1}$ besteht, die wie oben aus adaptierten Karten $\varphi^{-1} \in \mathcal{A}$ hervorgehen, deren Definitionsbereich $\partial\Omega$ schneidet. Hierzu betrachten wir Karten

$\varphi_1^{-1}: W_1 \rightarrow U_1$, $\varphi_2^{-1}: W_2 \rightarrow U_2$ aus \mathcal{A}_0 mit $W_1 \cap W_2 \cap \partial\Omega \neq \emptyset$. Wie oben erhalten wir hieraus Karten $\tilde{\varphi}_1^{-1}: \partial\Omega \cap W_1 \rightarrow \tilde{U}_1$, $\tilde{\varphi}_2^{-1}: \partial\Omega \cap W_2 \rightarrow \tilde{U}_2$ aus $\tilde{\mathcal{A}}$. Der Kartenwechsel $\tilde{\psi} := \tilde{\varphi}_2^{-1} \circ \tilde{\varphi}_1: \varphi_1^{-1}(\partial\Omega \cap W_1 \cap W_2) \rightarrow \varphi_2^{-1}(\partial\Omega \cap W_1 \cap W_2)$ ist durch $\tilde{\psi}(x') = P \circ \varphi_2^{-1} \circ \varphi_1(0, x') = (\psi_2(0, x'), \dots, \psi_m(0, x'))$, gegeben, wobei $(0, x') \in \varphi_1^{-1}(\partial\Omega \cap W_1 \cap W_2)$ und $\psi = \varphi_2^{-1} \circ \varphi_1: \varphi_1^{-1}(W_1 \cap W_2) \rightarrow \varphi_2^{-1}(W_1 \cap W_2)$ ein Kartenwechsel ist. Man erhält $D\tilde{\psi}(x')$ als rechte untere $(m-1) \times (m-1)$ -Untermatrix von $D\psi(0, x')$.

Weil nun $\varphi_1^{-1}, \varphi_2^{-1}$ beide Ω -adaptiert sind, gilt:

$$\psi_1(0, x_2, \dots, x_m) = 0 \text{ und } \psi_j(x_1, x_2, \dots, x_m) \leq 0 \text{ für } x_1 \leq 0.$$

Damit ist

$$\frac{\partial\psi_1}{\partial x_j}(0, x_2, \dots, x_m) \begin{cases} \geq 0 & \text{für } j = 1 \\ = 0 & \text{für } j = 2, \dots, m \end{cases}.$$

Insofern haben wir

$$0 < \det D\psi(0, x') = \det \begin{pmatrix} \frac{\partial \psi_1}{\partial x_1} & \mathbf{0} \\ \star & D\tilde{\psi}(x') \end{pmatrix} = \underbrace{\frac{\partial \psi_1}{\partial x_1}}_{>0} \det D\tilde{\psi}(x'),$$

also $\det D\tilde{\psi}(x') > 0$.

□

5 Differentialformen und der Satz von Stokes

Hier: ω definiert auf offener Umgebung von M im \mathbb{R}^n , Differentialformen wirken auf ganz \mathbb{R}^n .

1. Alternierende k-Formen auf endlich-dimensionalen Vektorräumen
2. Differentialformen, ordne jedem Punkt $p \in M$ eine alternierende ¹ k-Form zu.
3. Integration von Differentialformen auf Mannigfaltigkeiten (Satz von Stokes)
4. Anwendung (Satz von Gauß)

5.1 Multilineare Algebra

Multilinearität heißt: Messen des k-dimensionalen Volumens kleiner Maschen

Definition 1 (k-Formen). Eine (alternierende) k-Form auf einem n-dimensionalen, reellen Vektorraum V ist eine (in jedem Argument) lineare Abbildung $\omega: V^k \longrightarrow \mathbb{R}$, die bei der Vertauschung zweier Einträge das Vorzeichen wechselt. Der Vektorraum der k-Form wird mit $\text{Alt}^k V$ bezeichnet, $k \in \mathbb{N}$ und wir setzen $\text{Alt}^0 V = \mathbb{R}$

Beispiel 2. Die Determinante $(v_1, \dots, v_k) \mapsto \det(v_1, \dots, v_k)$, $v_1, \dots, v_k \in \mathbb{R}^k$ ist eine k-Form.

Für $k=1$ ist die Bedingung des Alternierens leer, wir haben also $\text{Alt}^1 V = V' \cong V$ wobei V' den Dualraum von V bezeichnet.

Bemerkung 3. Für eine lineare Abbildung $\omega: V^k \longrightarrow \mathbb{R}$ sind äquivalent:

a) ω wechselt beim Vertauschen zweier Einträge das Vorzeichen

$$\omega(v_1, \dots, v_j, \dots, v_l, \dots, v_k) = -\omega(v_1, \dots, v_l, \dots, v_j, \dots, v_k)$$

b) ω verschwindet, wenn zwei Einträge gleich sind.

$$0 = \omega(a + b, a + b) = \underbrace{\omega(a, a) + \omega(b, b)}_{=0} + \omega(a, b) + \omega(b, a)$$

c) ω verschwindet, wenn die Einträge linear abhängig sind.

¹alternierend: berücksichtige Orientierung der Mannigfaltigkeit

²isomorph

d) Für eine Permutation $\pi^3 \in \mathfrak{S}_k^4$ auf $\{1, \dots, k\}$ gilt

$$\omega(v_1, \dots, v_k) = (\text{sign } \pi) \omega(v_{\pi(1)}, \dots, v_{\pi(k)})$$

Definition 4 (Äußeres Produkt). Zu $\omega \in \text{Alt}^k V$ und $\eta \in \text{Alt}^l V$, $k, l \in \mathbb{N}$, definieren wir das äußere Produkt (Dachprodukt) $\omega \wedge \eta \in \text{Alt}^{k+l} V$ durch

$$(\omega \wedge \eta)(v_1, \dots, v_{k+l}) = \frac{1}{k!l!} \sum_{\pi \in \mathfrak{S}_{k+l}} (\text{sign } \pi) \omega(v_{\pi(1)}, \dots, v_{\pi(k)}) \eta(v_{\pi(k+1)}, \dots, v_{\pi(k+l)})$$

Mit Hilfe von Bemerkung 3d), weißt man nach, dass $\omega \wedge \eta$ tatsächlich ein Element aus $\text{Alt}^{k+l} V$ darstellt.

Lemma 5. Das äußere Produkt $\wedge: \text{Alt}^k V \times \text{Alt}^l V \longrightarrow \text{Alt}^{k+l} V$ ist bilinear, assoziativ und antikommutativ. Das heißt $\eta \wedge \omega = (-1)^{kl}(\omega \wedge \eta)$ für $\omega \in \text{Alt}^k V$, $\eta \in \text{Alt}^l V$. Für $\omega \in \text{Alt}^k V$, $1 \in \text{Alt}^0 V$ ist $1 \wedge \omega = \omega \wedge 1$

Beweis. Bilinearität und $1 \wedge \omega = \omega$ sind klar. Die Permutation $(1, \dots, k+l) \mapsto (k+1, \dots, k+l, 1, \dots, k)$ besitzt das Signum $(-1)^{kl}$, woraus sich die Antikommutativität ergibt. Für $\omega \in \text{Alt}^k V$, $\eta \in \text{Alt}^l V$, $\xi \in \text{Alt}^m V$ zeigen wir

$$\begin{aligned} ((\omega \wedge \eta) \wedge \xi)(v_1, \dots, v_{k+l+m}) &= (\omega \wedge (\eta \wedge \xi))(v_1, \dots, v_{k+l+m}) \\ &= \sum_{\pi \in \mathfrak{S}_{k+l+m}} \frac{\text{sign}(\pi)}{k!l!m!} \omega(v_{\pi(1)}, \dots, v_{\pi(k)}) \\ &\quad \eta(v_{\pi(k+1)}, \dots, v_{\pi(k+l)}) \\ &\quad \xi(v_{\pi(k+l+1)}, \dots, v_{\pi(k+l+m)}). \quad (\star) \end{aligned}$$

Wir betrachten $\omega \wedge (\eta \wedge \xi)$, der Fall $(\omega \wedge \eta) \wedge \xi$ läuft analog. Zunächst ist

$$\begin{aligned} (\omega \wedge (\eta \wedge \xi))(v_1, \dots, v_{k+l+m}) &= \sum_{\pi \in \mathfrak{S}_{k+l+m}} \frac{\text{sign}(\pi)}{k!(l+m)!} \omega(v_{\pi(1)}, \dots, v_{\pi(k)}) \\ &\quad (\eta \wedge \xi)(v_{\pi(k+1)}, \dots, v_{\pi(k+l+m)}). \quad (\star\star) \end{aligned}$$

Wir betrachten $a = (a_1, \dots, a_k)$, $a_j \in \{1, \dots, k+l+m\}$, paarweise verschieden. Jede Permutation $\pi \in \mathfrak{S}_{k+l+m}$ mit $\pi(j) = a_j \forall j = 1, \dots, k$ lässt sich durch

$$\pi(j) = \begin{cases} a_j^5: j = 1, \dots, k \\ \tau_a(k + \tilde{\pi}(j - k)): j = k+1, \dots, k+l+m \end{cases}$$

darstellen, wobei $\tau_a \in \mathfrak{S}_{k+l+m}$ eine entsprechend gewählte Permutation ist mit

$$\tau_a(j) = a_j, j = 1, \dots, k \text{ und } \tilde{\pi} \in \mathfrak{S}_{l+m}$$

³ $\pi: \{1, \dots, k\} \xrightarrow{\text{bijektiv}} \{1, \dots, k\}$

⁴symmetrische Gruppe

⁵ $= \tau_a(j)$

Indem wir die Summierung in (\star) zunächst über π mit der gerade aufgeführten Zerlegung durchführen, erhalten wir

$$\sum_a \frac{\text{sign } \tau_a}{k!} \omega(v_{a_1}, \dots, v_{a_k}) \underbrace{\sum_{\tilde{\pi} \in \mathfrak{S}_{l+m}} \frac{\text{sign}(\tilde{\pi})}{l!m!} \eta(v_{\tau_a(k+\tilde{\pi}(1))}, \dots, v_{\tau_a(k+\tilde{\pi}(l))}) \xi(v_{\tau_a(k+\tilde{\pi}(l+1))}, \dots, v_{\tau_a(k+\tilde{\pi}(l+m))})}_{=(\eta \wedge \xi)_{v_{\tau_a(k+\tilde{\pi}(l+1))}, \dots, v_{\tau_a(k+\tilde{\pi}(l+m))}}}$$

Für $(\star\star)$ erhalten wir entsprechend:

$$\sum_a \frac{\text{sign } \tau_a}{k!} \omega(v_{a_1}, \dots, v_{a_k}) \sum_{\tilde{\pi} \in \mathfrak{S}_{l+m}} \frac{\text{sign } \tilde{\pi}}{(l+m)!} (\eta \wedge \xi)(v_{\tau_a(k+\tilde{\pi}(1))}, \dots, v_{\tau_a(k+\tilde{\pi}(l+m))})$$

Wegen $(\eta \wedge \xi)(v_{\tau_a(k+\tilde{\pi}(1))}, \dots, v_{\tau_a(k+\tilde{\pi}(l+m))}) = (\text{sign } \tilde{\pi})(\eta \wedge \xi)(v_{\tau_a(k+1)}, \dots, v_{\tau_a(k+l+m)})$ und $\# \mathfrak{S}_{l+m} = (l+m)!$ folgt Gleichheit. \square

Bemerkung 6. Durch Induktion erhalten wir wie in gedarde erbrachten Beweis für $\omega_j \in \text{Alt}^{k_j} V$ $j = 1, \dots, N$

$$(\omega_1 \wedge \dots \wedge \omega_N)(v_1, \dots, v_{k_1+\dots+k_N}) = \sum_{\pi \in \mathfrak{S}_{k_1+\dots+k_N}} \frac{\text{sign } \pi}{k_1! \dots k_N!} \prod_{j=1}^N \omega_j(v_{\pi(k_1+\dots+k_{j-1}+1)}, \dots, v_{\pi(k_1+\dots+k_j)})$$

Für $k_1 = \dots = k_N = 1$, $\omega_1, \dots, \omega_N \in \text{Alt}^1 V = V^1$, $v_1, \dots, v_N \in V$ ist demnach

$$(\omega_1 \wedge \dots \wedge \omega_N)(v_1, \dots, v_N) \stackrel{6}{=} \det((\omega_j(v_l))_{j,l=1,\dots,N}).$$

Satz 7. Für eine Basis $(\delta_1, \dots, \delta_n)$ des Dualraums V' ist $(\delta_{j_1} \wedge \dots \wedge \delta_{j_k} \mid 1 \leq j_1 < j_2 < \dots < j_k \leq n)$ eine Basis der $\text{Alt}^k V$. Ist (e_1, \dots, e_n) die zu $(\delta_1, \dots, \delta_n)$ duale Basis von V ($\delta_j(e_k) = \delta_{jk}$ ⁷) so haben wir $\omega = \sum_{j_1 < \dots < j_k} a_{j_1, \dots, j_k} \delta_{j_1} \wedge \dots \wedge \delta_{j_k}$ mit $a_{j_1, \dots, j_k} = \omega(e_{j_1}, \dots, e_{j_k}) \in \mathbb{R}$. Mithin ist $\dim \text{Alt}^l V = \binom{n}{l}$, insbesondere $\text{Alt}^k V = \{0\}$ für $k > n$.

Beweis. Indem wir auf beiden Seiten der behaupteten Gleichungen die Argumente $(e_{j_1}, \dots, e_{j_k})$ einsetzen, ergibt sich $\omega(e_{j_1}, \dots, e_{j_k}) = a_{j_1, \dots, j_k}$, was nach Definition korrekt ist. Da wir mit alternierenden k -Formen arbeiten, gilt die Gleichung für beliebige Argumente.

Ist $\sum_{j_1 < \dots < j_k} b_{j_1, \dots, j_k} \delta_{j_1} \wedge \dots \wedge \delta_{j_k} = 0$ so erhält man durch Einsetzen von $(e_{j_1}, \dots, e_{j_k})$ mit $j_1 < \dots < j_k$ sofort $b_{j_1, \dots, j_k} = 0$ und somit lineare Unabhängigkeit. \square

Definition 8. Für eine lineare Abbildung $f: V \rightarrow W$ zwischen endlich-dimensionalen Vektorräumen und $\omega \in \text{Alt}^k W$ erhalten wir durch

$$(f^* \omega)(v_1, \dots, v_k) = \omega(f(v_1), \dots, f(v_k))$$

die zurückgeholte Form $f^* \omega \in \text{Alt}^k V$. Dabei ist $f^*: \text{Alt}^k W \rightarrow \text{Alt}^k V$.

⁶Determinantenformel

⁷jetzt Kroneckerdelta

Lemma 9. Für eine lineare Abbildung $f: V \longrightarrow W$ zwischen endlich-dimensionalen reellen Vektorräumen und $\omega \in \text{Alt}^k W$, $\eta \in \text{Alt}^\ell W$ gilt:

$$f^*(\omega \wedge \eta) = (f^*\omega) \wedge (f^*\eta).$$

Beweis. Wir haben

$$\begin{aligned} f^*(\omega \wedge \eta)(v_1, \dots, v_{k+\ell}) &= \frac{1}{k!\ell!} \sum_{\pi \in \mathfrak{S}_{k+\ell}} (\text{sign } \pi) \omega(f(v_{\pi(1)}, \dots, v_{\pi(k)})) \eta(f(v_{\pi(k+1)}, \dots, v_{\pi(k+\ell)})) \\ &= \frac{1}{k!\ell!} \sum_{\pi \in \mathfrak{S}_{k+\ell}} (\text{sign } \pi) (f^*\omega)(v_{\pi(1)}, \dots, v_{\pi(k)}) (f^*\eta)(v_{\pi(k+1)}, \dots, v_{\pi(k+\ell)}) \\ &= ((f^*\omega) \wedge (f^*\eta))(v_1, \dots, v_{k+\ell}). \end{aligned}$$

□

Lemma 10. Ist V ein endlich-dimensionaler, reeller Vektorraum, $f: V \longrightarrow V$ linear, sowie $\omega \in \text{Alt}^k V$, $n = \dim V$, so erhalten wir $f^*\omega = (\det f)\omega$.

Beweis. Nach Satz V.7 ist $\dim \text{Alt}^n V = 1$, und wegen der Linearität von $f^*: \text{Alt}^n V \longrightarrow \text{Alt}^n V$ gibt es ein $\lambda \in \mathbb{R}$ mit $f^*\omega = \lambda\omega \forall \omega \in \text{Alt}^n V$. Mit einem Isomorphismus $\Phi: V \longrightarrow \mathbb{R}^n$ und $\tilde{\omega} = \Phi^* \det$ ergibt sich für die Standardeinheitsbasis $(e_1, \dots, e_n) \subset \mathbb{R}^n$:

$$\begin{aligned} \lambda &= \lambda \det(e_1, \dots, e_n) = \lambda \tilde{\omega}(\Phi^{-1}(e_1), \dots, \Phi^{-1}(e_n)) = f^*\tilde{\omega}(\Phi^{-1}(e_1), \dots, \Phi^{-1}(e_n)) \\ &= \tilde{\omega}(f\Phi^{-1}(e_1), \dots, f\Phi^{-1}(e_n)) = \det(\Phi f \Phi^{-1}(e_1), \dots, \Phi f \Phi^{-1}(e_n)) = \det f. \end{aligned}$$

□

5.2 Differentialformen

Definition 11 (Differentialform). Eine Differentialform der Ordnung k , $k \in \mathbb{N} \cup \{0\}$, auf einer offenen Menge $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ist eine Abbildung $\omega: \Omega \longrightarrow \text{Alt}^k \mathbb{R}^n$.

Beispiel 12 (Differentialie und Differentialform). Differentialformen der Ordnung 0 sind wegen $\text{Alt}^0 \mathbb{R}^n = \mathbb{R}$ gerade die reellwertigen Funktionen auf Ω . Ist $f \in C^1(\Omega)$, so liefert $x \mapsto df(x) \in (\mathbb{R}^n)' \cong \mathbb{R}^n$ eine Differentialform der Ordnung 1 (mit $(\mathbb{R}^n)'$ bezeichnen wir den Dualraum zu \mathbb{R}^n). $(f(x+h) - f(x) = (Lx)h + o(|h|), Lx: \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}, Lx$ oder $df(x)$, $Df(x))$. Die Menge der Differentialformen der Ordnung k wird mit punktweiser Addition und punktweiser skalarer Multiplikation zu einem Vektorraum. Auch das äußere Produkt definiert man punktweise.

Notation 13. Wir betrachten die Projektionsabbildung $x_j: \Omega \subset \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}$, $x \mapsto \langle x, e_j \rangle = x_j$, $j = 1, \dots, n$. Nun erhält man

$$\nabla x_j(x) e_k = \langle e_j, e_k \rangle = \delta_{jk}, \quad j, k = 1, \dots, n,$$

sodass $(dx_j)_{j=1,\dots,n}$ die zur Standardbasis (e_1, \dots, e_n) des \mathbb{R}^n duale Basis des $(\mathbb{R}^n)'$ ist. Nach Satz V.7 lässt sich jede Differentialform der Ordnung k eindeutig durch

$$\omega = \sum_{1 \leq j_1 < \dots < j_k \leq n} a_{j_1, \dots, j_k} dx_{j_1} \wedge \dots \wedge dx_{j_k}$$

darstellen, wobei $a_{j_1, \dots, j_k} = \omega(e_{j_1}, \dots, e_{j_k})$ ist. Für $f \in C^1(\Omega)$ haben wir

$$df(x) = \sum_{j=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_j}(x) dx_j,$$

denn $\sum_{j=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_j}(x) dx_j(e_k) = \frac{\partial f}{\partial x_k}(x) = df(x)e_k$, da $dx_j(e_k) = \delta_{jk}$.

Definition 14 (Zurückgeholte Form). Für offene Mengen $\Omega_1 \subset \mathbb{R}^m$, $\Omega_2 \subset \mathbb{R}^n$, $f \in C^1(\Omega_1, \Omega_2)$ und eine Differentialform ω der Ordnung k auf Ω_2 ist die *auf Ω_1 zurückgeholte Form* $f^*\omega$ durch

$$(f^*\omega)(x)(v_1, \dots, v_k) = \omega(f(x))(df(x)v_1, \dots, df(x)v_k)$$

erklärt.

Satz 15 (Äußere Ableitung). Für $k \in \mathbb{N} \cup \{0\}$ gibt es genau eine Abbildung d von der Menge der differenzierbaren k -Formen nach $\text{Alt}^{k+1} \mathbb{R}^n$, die

- (i) linear ist,
- (ii) im Fall $k = 0$, für eine differenzierbare Abbildung $f: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$, das Differential df liefert,
- (iii) für jede differenzierbare Differentialform ω der Ordnung k und eine differenzierbare Differentialform η der Ordnung 0 die Produktregel

$$d(\omega \wedge \eta) = (d\omega) \wedge \eta + (-1)^k \omega \wedge (d\eta)$$

erfüllt und

- (iv) für $\omega \in C^2(\Omega, \text{Alt}^k \mathbb{R}^n)$ der Exaktheitsbedingung $dd\omega = 0$ genügt.

Ist $\omega = \sum_{j_1 < \dots < j_k} a_{j_1, \dots, j_k} dx_{j_1} \wedge \dots \wedge dx_{j_k}$, so erhalten wir

$$d\omega = \sum_{j_1 < \dots < j_k} da_{j_1, \dots, j_k} \wedge dx_{j_1} \wedge \dots \wedge dx_{j_k}.$$

Definition 16. Für eine differenzierbare Differentialform ω wird d die *äußere Ableitung*, *Cartan-Ableitung* oder *Differential* genannt.

Beispiel 17.

(i) Jede differenzierbare Differentialform ω der Ordnung $(n-1)$ auf \mathbb{R}^n kann als

$$\omega = \sum_{j=1}^n (-1)^{j-1} f_j \, dx_1 \wedge \dots \wedge dx_{j-1} \wedge dx_{j+1} \wedge \dots \wedge dx_n$$

dargestellt werden, wobei f_1, \dots, f_n geeignete reelle differenzierbare Funktionen sind. Wir haben dann

$$\begin{aligned} d\omega & \stackrel{ddx_j=0}{=} \sum_{j=1}^n (-1)^{j-1} \underbrace{(df_j) \wedge dx_1 \wedge \dots \wedge dx_{j-1} \wedge dx_{j+1} \wedge \dots \wedge dx_n}_{= \sum_{\ell=1}^n \frac{\partial f_j}{\partial x_\ell} dx_\ell \wedge dx_1 \wedge \dots \wedge dx_{j-1} \wedge dx_{j+1} \wedge \dots \wedge dx_n} \\ & = \sum_{j=1}^n \underbrace{\frac{\partial f}{\partial x_j}}_{=\text{div } f} dx_1 \wedge \dots \wedge dx_n. \end{aligned}$$

(ii) Für $n=3$ können wir eine Differentialform der Ordnung 1 als $\omega = f_1 dx_1 + f_2 dx_2 + f_3 dx_3$ mit skalaren Funktionen f_1, f_2, f_3 schreiben. Sofern sie differenzierbar sind, folgt

$$\begin{aligned} d\omega &= df_1 \wedge dx_1 + df_2 \wedge dx_2 + df_3 \wedge dx_3 \\ &= \frac{\partial f_1}{\partial x_2} dx_2 \wedge dx_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_3} dx_3 \wedge dx_1 \\ &\quad + \frac{\partial f_2}{\partial x_1} dx_1 \wedge dx_2 + \frac{\partial f_2}{\partial x_3} dx_3 \wedge dx_2 \\ &\quad + \frac{\partial f_3}{\partial x_2} dx_2 \wedge dx_3 + \frac{\partial f_3}{\partial x_1} dx_1 \wedge dx_3 \\ &= \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1} - \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right) dx_1 \wedge dx_2 + \left(\frac{\partial f_3}{\partial x_2} - \frac{\partial f_2}{\partial x_3} \right) dx_2 \wedge dx_3 \\ &\quad + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_3} - \frac{\partial f_3}{\partial x_1} \right) dx_3 \wedge dx_1 \\ &= \text{rot } f \cdot d\vec{F}, \end{aligned}$$

wobei $d\vec{F} = \begin{pmatrix} dx_2 \wedge dx_3 \\ dx_3 \wedge dx_1 \\ dx_1 \wedge dx_2 \end{pmatrix}$ das vektorielle Flächenelement ist, $d\vec{S} = \begin{pmatrix} dx_1 \\ dx_2 \\ dx_3 \end{pmatrix}$ das vektorielle Linienelement, $dV = dx_1 \wedge dx_2 \wedge dx_3$ das Volumenelement ist.

Wir haben

$$df = \nabla f \cdot d\vec{S}, \quad d(g \cdot d\vec{S}) = (\text{rot } g) \cdot d\vec{F}, \quad d(h \cdot d\vec{F}) = (\text{div } f) dV.$$