

Höhere Analysis

Dr. Philipp Reiter
WS 16/17 Universität Heidelberg

5. November 2016

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	Maßtheorie	4
2	Integration	15

1 Maßtheorie

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

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

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 $S \in \mathfrak{P}(X)$ 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.

“ \Leftarrow ” Weil $\Sigma \cap Y$ die Mengen aus $S \cap Y$ enthält, gilt $\Sigma(S \cap Y) \subset \Sigma \cap Y$

“ \Rightarrow ” 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 $\mathcal{O} \subset X$ 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, $\mathcal{O} \subset X$, 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:

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

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

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

$$\cdot \mu(\emptyset) = 0$$

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

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

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

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

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 $\alpha_1, \alpha_2 > 0$ 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.

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

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

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)

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

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

- (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

$$\bigcup_{k=1}^K B_k = \bigcup_{n=1}^K A_n \quad \forall k \in \mathbb{N}$$

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

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

- (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 $\mu(A_1) < \infty$ 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 Kompakten⁴ 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.

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

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

Außerdem heißt das Maß μ *regulär von innen*, wenn gilt:

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

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).

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

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

das von S erzeugte Dynkin-System.

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.

(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.
- SchlieÙe, 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).

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

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

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

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 $A \in \Sigma$

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

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.

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

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

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 Maß⁶ 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

$$\mu^*(E) = {}^7\mu^*(E \cap A) + \mu^*(E \cap A^c) \forall E \cap A \in \mathcal{A}$$

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

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

⁶Jedes Maß ist ein äußeres Maß

⁷ \leq gilt wegen Subadditivität

Mit der obigen Abschätzung erhalten wir

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

□

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 $E \subset X$

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

also haben wir:

$$\mu^*(E) \stackrel{B \in \Sigma}{=} \mu^*(E \cap B_k) + \mu^*(E \cap B_k^c) \geq \left(\sum_{j=1}^k \mu^*(E \cap A_j) \right) + \mu^*(E \cap A^c)$$

Monotonie (Subadd.) 2er Term ↓

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

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

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

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

□

¹⁰ $B_k \cap A := \bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k = \bigcup_{k \in \mathbb{N}} B_k \Rightarrow B_k^c \supset A^c$

Bemerkung 29. Das soeben konstruierte Maß $\mu^*|_{\Sigma}$ ist vollständig d.h. jede Teilmenge einer Nullmenge¹¹ ist messbar.

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

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

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

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

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

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

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 $\bigtimes_{j=1}^n (a_j, b_j)$, $-\infty < a_j < b_j < \infty$. Diese bilden eine Basis für die Topologie und führen somit auf \mathcal{B}^n . Hieraus folgt unmittelbar die zweite Aussage. □

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

Lemma 36. Seien $(X, \Sigma_X), (Y, \Sigma_Y), (Z, \Sigma_Z)$ Maßräume. Sind $f: X \longrightarrow Y$, $g: Y \longrightarrow Z$ messbar, dann ist auch $g \circ f: X \longrightarrow Z$ messbar. Sind Σ_X, Σ_Y Borel- σ -Algebren und X, Y entsprechend topologische Räume, so ist jede stetige Funktion $f: X \longrightarrow Y$ 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 $A := f^{-1}(B) \in \Sigma_X$. □

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

Beweis. Addition und Multiplikation sind stetige Abbildungen

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

Somit folgt die Behauptung nach Lemma 36. □

¹¹ $A \in \Sigma$ mit $\mu(A) = 0$

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.

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

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

□

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 Limes messbarer Funktionen messbar.

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 $\limsup_{n \rightarrow \infty} x_n := \inf_{n \in \mathbb{N}} \sup_{k \geq n} x_k$.

2 Integration

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

Definition 41. Eine messbare Funktion $f: (X, \Sigma) \longrightarrow (\mathbb{R}, \mathcal{B})$ 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) $\int_A (f + g) d\mu = \int_A f d\mu + \int_A g d\mu$, $f, g \in S(X, \mu)$
- (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 $f, g \in S(X, \mu)$, $f, g \geq 0$

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).

□