

Skript zur Vorlesung
Analysis III
bei Prof. Dr. Dirk Hundertmark

Karlsruher Institut für Technologie

Wintersemester 2024/25

Dieses Skript ist inoffiziell. Es besteht kein
Anspruch auf Vollständigkeit oder Korrektheit.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung: Motivation für Maßtheorie	4
2 σ-Algebren und Maße	5
2.1 σ -Algebren	5
2.2 Maße und Prämäße	7
3 Dynkinsysteme	11
4 [*] Eindeutigkeit von Maßen und erste Eigenschaften des Lebesgue-Maßes	13
5 [*] Existenz von Maßen	18
6 [*] Messbare Abbildungen und Bildmaße	27
6.1 Messbare Abbildungen	27
6.2 Bildmaße	28
7 [*] Messbare numerische Funktionen	29
8 [*] Elementarfunktionen und ihr Integral	34
9 [*] Das Integral von nicht-negativen meßbaren Funktionen	37
10 [*] Integrierbarkeit	41
10.1 Integration von allgemeinen numerischen Funktionen	41
10.2 Linearität und Monotonie des Integrals	42
10.3 Der Raum $\mathcal{L}^1(\mu)$	43
10.4 Integration über (messbaren) Teilmengen	44
11 [*] Fast überall bestehende Eigenschaften	45
12 [*] Konvergenzsätze	48
12.1 Monotone Konvergenz und das Lemma von Fatou	48
12.2 Majorante Konvergenz (Lebesgue)	49
13 [*] Anwendung der Konvergenzsätze	52
13.1 Parameter-abhängige Integrale	52
13.2 Vergleich des Riemann- mit dem Lebesgue-Integral	53
13.3 Berechnung von $\int_{\mathbb{R}} e^{-x^2} \lambda(dx)$	54
14 [*] Die \mathcal{L}^p-Räume	57
14.1 Definition der \mathcal{L}^p -Räume	57
14.2 Konvergenzsätze	59
15 [*] Produkte von σ-Algebren	63
16 [*] Produktmaße und der Satz von Fubini-Tonelli	65
16.1 Eindeutigkeit von Produktmaßen	65
16.2 Existenz von Produktmaßen	65

0 *Inhaltsverzeichnis*

17 [*] Integrale bezüglich Bildmaß und Jacobi Transformationsformel	71
17.1 Integrale bezüglich Bildmaß	71
17.2 Jacobi-Transformationsformel	71

Alle mit [*] markierten Kapitel sind noch nicht Korrektur gelesen und bedürfen eventuell noch Änderungen.

1 Einleitung: Motivation für Maßtheorie

[21. Okt] Wir wollen in diesem Modul eine Theorie erarbeiten, um Teilmengen des \mathbb{R}^n messen (das heißt ihnen einen Inhalt zuordnen) zu können. Außerdem soll diese Zuordnung eines Inhalts bestimmten (intuitiv klaren) Anforderungen genügen. Wenn wir zum Beispiel zwei Teilmengen des \mathbb{R}^2 A und B , die disjunkt sind und denen wir entsprechende Inhalte zugeordnet haben, betrachten, dann soll nach unserem intuitiven geometrischen Verständnis auch gelten

$$\text{Fläche}(A \cup B) = \text{Fläche}(A) + \text{Fläche}(B)$$

Für einfache Teilmengen des \mathbb{R}^2 haben wir bereits eine Möglichkeit, deren Flächeninhalt zu messen:

Beispiel 1.1.1 (Messen eines Rechtecks). Im Fall eines Rechteckes $R \subseteq \mathbb{R}^2$ mit den Seitenlängen a und b wissen wir bereits, dass wir einen sinnvollen Flächeninhalt durch

$$\text{Fläche}(R) = a \cdot b$$

berechnen können.

Beispiel 1.1.2 (Messen eines Dreiecks). Auch für ein Dreieck $D \subseteq \mathbb{R}^2$ mit Grundfläche g und Höhe h kennen wir die Formel

$$\text{Fläche}(D) = \frac{1}{2}gh$$

Beispiel 1.1.3 (Parkettierung). Wir können auch eine komplexere Form $F \subseteq \mathbb{R}^2$ mittels (abzählbar) unendlich vielen Dreiecken approximieren. Dafür nehmen wir abzählbar viele paarweise disjunkte Dreiecke $(\Delta_n)_n$, sodass $\bigcup_{j \in \mathbb{N}} \Delta_j = F$. Dann gilt

$$\text{Fläche}(F) = \text{Fläche}\left(\bigcup_{j \in \mathbb{N}} \Delta_j\right) \stackrel{(1)}{=} \sum_{j=1}^{\infty} \text{Fläche}(\Delta_j)$$

Bemerkung 1.1.4. Wir wollen dementsprechend ein Maß finden, also nach unserem Verständnis eine Abbildung $\mu : \mathcal{F} \rightarrow [0, \infty]$, wobei $\mathcal{F} \subseteq \mathcal{P}(E) := \{U : U \subseteq E\}$ eine Familie von Teilmengen von $E \neq \emptyset$ ist. Außerdem soll gelten, dass

- (i) $\mu(\emptyset) = 0$
- (ii) Für $A, B \in \mathcal{F}$ mit $A \cap B = \emptyset$ ist $\mu(A \cup B) = \mu(A) + \mu(B)$
- (iii) Für eine Folge $A_n \in \mathcal{F}$ mit $A_n \cap A_m = \emptyset$ für $n \neq m$ ist

$$\mu\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) = \sum_{j=1}^{\infty} \mu(A_n)$$

Diese Liste an Eigenschaften führt wie wir später sehen werden zu einer reichhaltigen Theorie

¹ σ -Additivität

2 σ -Algebren und Maße

2.1 σ -Algebren

Definition 2.1.1 (σ -Algebra). Sei $E \neq \emptyset$ eine Menge. Eine σ -Algebra in E ist ein System von Teilmengen $\mathcal{A} \subseteq \mathcal{P}(E)$ von E mit folgenden Eigenschaften

$$(\Sigma_1) \quad E \in \mathcal{A}$$

$$(\Sigma_2) \quad A \in \mathcal{A} \Rightarrow A^C := E \setminus A \in \mathcal{A}$$

$$(\Sigma_3) \quad \text{Für } (A_n)_n \subseteq \mathcal{A} \text{ gilt } \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{A}. \text{ Das heißt } \mathcal{A} \text{ ist stabil unter (abzählbaren) Vereinigungen}$$

Eine Menge $A \in \mathcal{A}$ heißt messbar (\mathcal{A} -messbar).

Lemma 2.1.2 (Eigenschaften von σ -Algebren). Sei \mathcal{A} eine σ -Algebra in E . Dann gilt

$$(i) \quad \emptyset \in \mathcal{A}$$

$$(ii) \quad A, B \in \mathcal{A} \Rightarrow (A \cup B) \in \mathcal{A} \text{ (das heißt } \mathcal{A} \text{ ist auch stabil unter endlichen Vereinigungen)}$$

$$(iii) \quad \text{Für } (A_n)_n \subseteq \mathcal{A} \text{ gilt } \bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{A}$$

$$(iv) \quad A, B \in \mathcal{A} \Rightarrow A \setminus B = A \cap B^C \in \mathcal{A}$$

Beweis.

$$(i) \quad E \in \mathcal{A} \xrightarrow{(\Sigma_2)} \emptyset = E^C \in \mathcal{A}$$

$$(ii) \quad \text{Wir definieren } A_1 := A, A_2 := B \text{ und } A_i := \emptyset \text{ für } i \geq 3. \text{ Dann gilt gilt } (\Sigma_3)$$

$$A \cup B = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{A}$$

$$(iii) \quad A_n \in \mathcal{A} \Rightarrow (A_n)^C \in \mathcal{A} \Rightarrow \bigcup_{n \in \mathbb{N}} (A_n)^C \in \mathcal{A} \Rightarrow \left(\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \right)^C \right)^C \in \mathcal{A} \Rightarrow \bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{A}$$

$$(iv) \quad A \setminus B = A \cap B^C = A \cap B^C \cap E \cap E \cap \dots \text{ Dann gilt nach (iii), dass } A \setminus B \in \mathcal{A}$$

□

Beispiel 2.1.3. Wir betrachten einige Beispiele für σ -Algebren

- (a) Für eine Mengen E ist die Potenzmenge $\mathcal{P}(E)$ selber nach Definition immer eine σ -Algebra über E .
- (b) $\{\emptyset, E\}$ ist die kleinste σ -Algebra in E .
- (c) Für $A \subseteq E$ gilt $\mathcal{A} := \{\emptyset, A, A^C, E\}$ ist die kleinste σ -Algebra, die A enthält.
- (d) Sei E überabzählbar. Dann ist $\mathcal{A} := \{A \subseteq E : A \text{ oder } A^C \text{ ist abzählbar}\}$ eine σ -Algebra.
- (e) Sei \mathcal{A} eine σ -Algebra in E . Für $F \subseteq E$ beliebig ist $\mathcal{A}_F := \{A \cap F : A \in \mathcal{A}\}$ die Spur- σ -Algebra von F .

- (f) Seien E, E' nicht-leere Mengen, $f : E \rightarrow E'$ eine Funktion und \mathcal{A}' eine σ -Algebra in E' . Dann ist auch

$$\mathcal{A} := \left\{ f^{-1}(A') : A' \in \mathcal{A}' \right\}$$

eine σ -Algebra.

Beweis von (d). Wir prüfen die Kriterien

$$(\Sigma_1) \quad E^C = \emptyset \text{ ist abzählbar} \Rightarrow E \in \mathcal{A}$$

$$(\Sigma_2) \quad A \in \mathcal{A} \Leftrightarrow A \text{ oder } A^C \text{ ist abzählbar} \Leftrightarrow A^C \text{ oder } (A^C)^C \text{ ist abzählbar} \Leftrightarrow A^C \in \mathcal{A}$$

$$(\Sigma_3) \quad \text{Sei } A_n \in \mathcal{A} \text{ für } n \in \mathbb{N}. \text{ Wir unterscheiden 2 Fälle}$$

FALL 1: Alle A_n sind abzählbar. Dann ist auch $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n$ abzählbar.

FALL 2: Ein A_j ist überabzählbar. Dann ist aber $(A_j)^C$ abzählbar $\Rightarrow \bigcap_{n \in \mathbb{N}} (A_n)^C \subseteq (A_j)^C$ ist abzählbar. Dann ist $(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n)^C = \bigcap_{n \in \mathbb{N}} (A_n)^C$ abzählbar. Das heißt $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{A}$. \square

Notation 2.1.4 (Durchschnitt). Seien I eine beliebige Menge und $(\mathcal{A}_j)_{j \in I} \subseteq \mathcal{P}(E)$ eine beliebige Familie von Mengensystemen in E . Dann ist

$$\bigcap_{j \in I} \mathcal{A}_j := \{A : A \subseteq \mathcal{A}_j \forall j \in I\}$$

der Durchschnitt der \mathcal{A}_j .

Satz 2.1.5. Sei I eine beliebige Menge und $(\mathcal{A}_j)_{j \in I}$ eine Familie von σ -Algebren in E . Dann gilt

$$\bigcap_{j \in I} \mathcal{A}_j$$

ist wieder eine σ -Algebra.

Beweis.

$$(\Sigma_1) \quad E \in \mathcal{A}_j \forall j \in I \Rightarrow E \subseteq \bigcap_{j \in I} \mathcal{A}_j$$

$$(\Sigma_2) \quad A \in \bigcap_{j \in I} \mathcal{A}_j \Leftrightarrow A \in \mathcal{A}_j \forall j \in I. \text{ Daraus folgt } A^C \in \mathcal{A}_j \forall j \in I \Rightarrow A^C \in \bigcap_{j \in I} \mathcal{A}_j$$

$$(\Sigma_3) \quad \text{Sei } A_n \in \bigcap_{j \in I} \mathcal{A}_j. \text{ Dann gilt } A_n \in \mathcal{A}_j \forall j \in I \Rightarrow \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{A}_j \forall j \in I \quad \square$$

Satz 2.1.6. Sei $\zeta \subseteq \mathcal{P}(E)$ für E nicht-leer ein System von Teilmengen von E . Dann existiert eine kleinste σ -Algebra $\sigma(\zeta)$ in E , welche ζ enthält. Das heißt

(a) $\sigma(\zeta)$ ist eine σ -Algebra in E und

(b) Für eine σ -Algebra \mathcal{A} in E mit $\zeta \subseteq \mathcal{A}$ folgt $\sigma(\zeta) \subseteq \mathcal{A}$

Wir nennen $\sigma(\zeta)$ in diesem Fall die von ζ erzeugte σ -Algebra und ζ den Erzeuger von $\sigma(\zeta)$.

Beweis. Wir definieren $I := \{\mathcal{A} : \mathcal{A} \text{ ist } \sigma\text{-Algebra und } \zeta \subseteq \mathcal{A}\}$ die Menge aller σ -Algebren, die ζ enthalten. Dabei gilt I nicht-leer, da $\mathcal{P}(E) \in I$. Damit gilt nach Satz 2.1.5, dass

$$\sigma(\zeta) := \bigcap_{\mathcal{A} \in I} \mathcal{A}$$

eine σ -Algebra ist. Dabei ist $\zeta \subseteq \sigma(\zeta)$ nach Forderung an I . Und nach unserer Konstruktion ist auch Anforderung (b) erfüllt. \square

2 σ -Algebren und Maße

Beispiel 2.1.7. Sei $\zeta := \{A\}$. Dann ist $\{\emptyset, A, A^C, E\}$ die von ζ erzeugte σ -Algebra.

Definition 2.1.8. Sei \mathcal{O}_d das System der offenen Mengen im \mathbb{R}^d . Dann definieren wir die *Borel- σ -Algebra*

$$\mathcal{B}_d = \mathcal{B}(\mathbb{R}^d) := \sigma(\mathcal{O}_d)$$

2.2 Maße und Prämaße

Sei in diesem Teilkapitel stets X eine Menge.

[25. Okt] **Notation 2.2.1** (Disjunkte Vereinigung). Seien A, B Mengen mit $A \cap B = \emptyset$. Dann schreiben wir $A \sqcup B := A \cup B$ als disjunkte Vereinigung von A und B .

Definition 2.2.2 (Maß). Ein (positives) Maß μ auf X ist eine Funktion $\mu : \mathcal{A} \rightarrow [0, \infty]$ mit
 (M_0) \mathcal{A} ist eine σ -Algebra.

(M_1) $\mu(\emptyset) = 0$

(M_2) Sei $(A_n)_{n \in \mathbb{N}} \subseteq \mathcal{A}$ eine Folge paarweise disjunkter Mengen. Dann folgt

$$\mu\left(\bigsqcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) = \sum_{n \in \mathbb{N}} \mu(A_n)$$

Definition 2.2.3 (Prämaß). Ist $\mathcal{A} \subseteq \mathcal{P}(X)$ nicht unbedingt eine σ -Algebra und $\mu : \mathcal{A} \rightarrow [0, \infty]$ eine Funktion, so heißt μ Prämaß, falls

(PM_1) $\mu(\emptyset) = 0$ (das setzt also auch voraus, dass $\emptyset \in \mathcal{A}$)

(PM_2) Sind $(A_n)_{n \in \mathbb{N}} \subseteq \mathcal{A}$ paarweise disjunkt und $(\bigsqcup_{n \in \mathbb{N}} A_n) \in \mathcal{A}$, dann folgt

$$\mu\left(\bigsqcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) = \sum_{n \in \mathbb{N}} \mu(A_n)$$

Definition 2.2.4 (Wachsende und fallende Teilmengenfolgen). Sei $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge von Teilmengen von X . Dann nennen wir $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$

- wachsend, falls $A_n \subseteq A_{n+1} \forall n \in \mathbb{N}$
- fallend, falls $A_{n+1} \subseteq A_n \forall n \in \mathbb{N}$

Notation 2.2.5.

1. Für eine wachsende Teilmengenfolge $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ schreiben wir $A_n \nearrow A$, falls $\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n = A$.
2. Für eine fallende Teilmengenfolge $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ schreiben wir $A_n \searrow A$, falls $\bigcap_{n=1}^{\infty} A_n = A$.

Definition 2.2.6 (Messraum und Maßraum). Sei X eine Menge, \mathcal{A} eine σ -Algebra und $\mu : \mathcal{A} \rightarrow [0, \infty]$ ein Maß.

1. Wir nennen das Paar (X, \mathcal{A}) einen Messraum.
2. Wir nennen das Tripel (X, \mathcal{A}, μ) einen Maßraum.

3. Wir nennen μ endlich und (X, \mathcal{A}, μ) einen endlichen Maßraum, falls $\mu(X) < \infty$.
4. Wir nennen μ Wahrscheinlichkeitsmaß (W-Maß) und (X, \mathcal{A}, μ) einen Wahrscheinlichkeitsraum (W-Raum), falls $\mu(X) = 1$.
5. Wir nennen μ σ -endlich, falls es eine Folge $(A_n)_n \subseteq \mathcal{A}$ gibt mit $A_n \nearrow X$ und $\mu(A_n) < \infty \forall n \in \mathbb{N}$. In diesem Fall heißt $(A_n)_n$ eine ausschöpfende Folge.

Satz 2.2.7 (Eigenschaften von Maßen). Seien (X, \mathcal{A}, μ) ein Maßraum sowie $A, B, A_n, B_n \in \mathcal{A}$. Dann gilt

- (i) $A \cap B = \emptyset \Rightarrow \mu(A \sqcup B) = \mu(A) + \mu(B)$ (Additivität)
- (ii) $A \subseteq B \Rightarrow \mu(A) \leq \mu(B)$ (Monotonie)
- (iii) $A \subseteq B$ und $\mu(A) < \infty \Rightarrow \mu(B \setminus A) = \mu(B) - \mu(A)$
- (iv) $\mu(A \cup B) + \mu(A \cap B) = \mu(A) + \mu(B)$ (Starke Additivität)
- (v) $\mu(A \cup B) \leq \mu(A) + \mu(B)$ (Subadditivität)
- (vi) $(A_n)_n \nearrow A \Rightarrow \mu(A) = \sup_{n \in \mathbb{N}} \mu(A_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A_n)$ (Stetigkeit von unten)
- (vii) $(B_n)_n \searrow B$ und $\mu(B_1) < \infty \Rightarrow \mu(B) = \inf_{n \in \mathbb{N}} \mu(B_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(B_n)$ (Stetigkeit von oben)
- (viii) $\mu\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) \leq \sum_{n \in \mathbb{N}} \mu(A_n)$ (σ -Subadditivität)

Beweis.

- (i) Sei $A_1 := A, A_2 := B$ und $A_n := \emptyset$ für $n \geq 3$. Dann gilt

$$\begin{aligned} A \sqcup B &= \bigsqcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \\ \Rightarrow \mu(A \sqcup B) &= \sum_{n=1}^{\infty} \mu(A_n) = \mu(A_1) + \mu(A_2) = \mu(A) + \mu(B) \end{aligned}$$

- (ii) Sei $A \subseteq B$, dann folgt $B = A \sqcup (B \setminus A)$. Mit (i) folgt

$$\mu(B) = \mu(A \sqcup (B \setminus A)) = \mu(A) + \mu(B \setminus A) \geq \mu(A)$$

- (iii) $\mu(B) = \mu(A) + \mu(B \setminus A)$. Dann folgt $\mu(B \setminus A) = \mu(B) - \mu(A)$, falls $\mu(A) < \infty$.

- (iv) Es gilt $A \cup B = A \sqcup (B \setminus (A \cap B))$. Dann folgt

$$\begin{aligned} \mu(A \cup B) + \mu(A \cap B) &= \mu(A \sqcup (B \setminus (A \cap B))) + \mu(A \cap B) \\ &= \mu(A) + \mu(B \setminus (A \cap B)) + \mu(A \cap B) \\ &= \mu(A) + \mu(B) - \mu(A \cap B) + \mu(A \cap B) \\ &= \mu(A) + \mu(B) \end{aligned}$$

- (v) Aus (iv) folgt $\mu(A) + \mu(B) = \mu(A \cup B) + \mu(A \cap B) \geq \mu(A \cup B)$

2 σ -Algebren und Maße

- (vi) Sei $(A_n)_n$ wachsend. Wir definieren eine neue Folge von Mengen $(F_n)_n$ mit $F_1 := A_1$ und $F_n := A_n \setminus A_{n-1}$ für $n \geq 2$. Dann sind F_j paarweise disjunkt und es gilt

$$\begin{aligned} \bigcup_{j=1}^n A_j &= \bigsqcup_{j=1}^n F_j \\ \Rightarrow \mu\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) &= \mu\left(\bigsqcup_{j \in \mathbb{N}} F_j\right) = \sum_{j=1}^{\infty} \mu(F_j) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^n \mu(F_j) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu\left(\bigsqcup_{j=1}^n F_j\right) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A_n) = \sup_{n \in \mathbb{N}} \mu(A_n) \end{aligned}$$

- (vii) Sei $(B_n)_n \searrow B$ mit $\mu(B_1) < \infty$. Wir definieren $A_n := B_1 \setminus B_n \nearrow B_1 \setminus B$ wachsend. Dann gilt nach (vi)

$$\begin{aligned} \mu(B_1 \setminus B) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(B_1 \setminus B_n) \\ \Rightarrow \mu(B_1) - \mu(B) &= \lim_{n \rightarrow \infty} (\mu(B_1) - \mu(B_n)) = \mu(B_1) - \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(B_n) \\ \Rightarrow \mu(B) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(B_n) = \inf_{n \in \mathbb{N}} \mu(B_n) \end{aligned}$$

- (viii) Sei $(A_n)_n \subseteq \mathcal{A}$. Dann ist $A := \bigsqcup_{n \in \mathbb{N}} A_n$. Wir definieren $\hat{A}_k := \bigcup_{j=1}^k A_j$ wachsend. Dann gilt

$$\bigcup_{k=1}^{\infty} \hat{A}_k = \bigcup_{k=1}^{\infty} \bigcup_{n=1}^k A_n = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n$$

Nach (v) gilt

$$\begin{aligned} \mu(A) &= \mu\left(\bigcup_{k=1}^{\infty} \hat{A}_k\right) = \lim_{k \rightarrow \infty} \mu(\hat{A}_k) = \lim_{k \rightarrow \infty} \mu\left(\bigcup_{j=1}^k A_j\right) \\ &\leq \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^k \mu(A_j) = \sum_{n=1}^{\infty} \mu(A_n) \end{aligned} \quad \square$$

Bemerkung 2.2.8.

1. Wir schreiben statt „paarweise disjunkt“ auch kürzer „disjunkt“
2. Satz 2.2.7 überträgt sich auch auf Prämaße, sofern \mathcal{A} stabil bezüglich Durchschnitt, Vereinigung und Mengendifferenz ist (für (i)-(iv)) und sofern \mathcal{A} stabil bezüglich abzählbaren Schnitten und Vereinigungen ist (für die verbleibenden Eigenschaften)

Beispiel 2.2.9 (Dirac-Maß). Sei X eine Menge, \mathcal{A} eine σ -Algebra in X und $x_0 \in X$. Wir definieren

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

Dann ist δ_{x_0} ein Maß in X und wird als *Dirac-Maß* bezeichnet.

Beispiel 2.2.10. Sei $\mathcal{A} := \{A \subseteq \mathbb{R} : A \text{ ist abzählbar oder } A^C \text{ ist abzählbar}\}$. Dann ist \mathcal{A} nach Beispiel 2.1.3 (d) eine σ -Algebra in \mathbb{R} . Wir definieren ein Maß auf \mathcal{A} mit

$$\mu(A) := \begin{cases} 0 & A \text{ ist abzählbar} \\ 1 & A \text{ ist nicht abzählbar} \end{cases}$$

Beispiel 2.2.11 (Zählmaß). Sei (X, \mathcal{A}) ein Messraum. Dann definieren wir das Zählmaß

$$|A| := \begin{cases} \#A & \text{falls } A \text{ endlich} \\ \infty & \text{falls } A \text{ unendlich} \end{cases}$$

wobei $\#A$ die Anzahl an Elementen in A angibt.

Beispiel 2.2.12 (Diskretes W-Maß). Sei $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots\}$ eine abzählbare Menge, $\mathcal{A} = \mathcal{P}(\Omega)$ und $(p_n)_{n \in \mathbb{N}} \subseteq [0, 1]$ mit $\sum_{n \in \mathbb{N}} p_n = 1$. Dann ist

$$\mathbb{P}(A) := \sum_{n \in \mathbb{N}: \omega_n \in A} p_n = \sum_{n \in \mathbb{N}} p_n \delta_{\omega_n}(A)$$

ein sogenanntes diskretes W-Maß. Der Raum $(\Omega, \mathcal{A}, \mathbb{P})$ heißt diskreter W-Raum.

[28. Okt] **Bemerkung 2.2.13** (Ring und Algebra). Ein Mengensystem $R \subseteq \mathcal{P}(X)$ heißt Ring, wenn folgende Eigenschaften erfüllt sind

$$(R_1) \emptyset \in R$$

$$(R_2) A, B \subseteq R \Rightarrow (A \setminus B) \in R$$

$$(R_3) A, B \subseteq R \Rightarrow (A \cup B) \in R$$

Ist ferner $X \in R$, dann heißt R Algebra.

Bemerkung 2.2.14 (Eigenschaften von Mengenringen). Es sei R ein Mengenring. Dann gilt

1. Nach der Mengengleichheit $A \cap B = A \setminus (A \setminus B)$ enthält R auch Schnitte.
2. Wir definieren die symmetrische Mengendifferenz $\Delta : R \times R \rightarrow R$, $(A, B) \mapsto (A \setminus B) \cup (B \setminus A)$. Dann definiert (R, Δ, \cap) einen kommutativen Ring im Sinne der Algebra, wobei Δ der „Addition“ und \cap der „Multiplikation“ entspricht.

3 Dynkinsysteme

Definition 3.1.1 (Dynkinsystem). Ein Mengensystem $\mathcal{D} \subseteq \mathcal{P}(X)$ heißt Dynkinsystem, falls

$$(D_1) \quad X \in \mathcal{D}$$

$$(D_2) \quad D \in \mathcal{D} \Rightarrow D^C \in \mathcal{D}$$

$$(D_3) \quad \text{Für eine paarweise disjunkte Mengenfolge } (D_n)_n \subseteq \mathcal{D} \Rightarrow \bigsqcup_{n \in \mathbb{N}} D_n \in \mathcal{D}$$

Beispiel 3.1.2.

1. Jede σ -Algebra ist ein Dynkinsystem.
2. Sei X eine $2n$ -elementige Menge. Dann ist $\mathcal{D} := \{A \subseteq X : A \text{ hat eine gerade Anzahl an Elementen}\}$ ein Dynkinsystem, aber keine σ -Algebra.

Lemma 3.1.3. Sei I eine beliebige Indexmenge und $(\mathcal{D}_j)_{j \in I}$ eine Familie von Dynkinsystemen in X , dann ist $\bigcap_{j \in I} \mathcal{D}_j$ wieder ein Dynkinsystem.

Beweis. (Übung) □

Satz 3.1.4. Sei $\mathcal{G} \subseteq \mathcal{P}(X)$. Dann existiert das kleinste Dynkinsystem $\delta(\mathcal{G})$, welches \mathcal{G} enthält. Wir nennen $\delta(\mathcal{G})$ das von \mathcal{G} erzeugte Dynkinsystem.

Beweis. $\mathcal{P}(X)$ ist ein Dynkinsystem. Wir definieren also

$$I = \{\mathcal{D} \subseteq \mathcal{P}(X) : \mathcal{D} \text{ ist ein Dynkinsystem und } \mathcal{G} \subseteq \mathcal{D}\} \neq \emptyset$$

Anschließend setzen wir analog zum Schnitt über σ -Algebren

$$\delta(\mathcal{G}) := \bigcap_{\mathcal{D} \in I} \mathcal{D}$$
□

Definition 3.1.5. Sei $\mathcal{D} \subseteq \mathcal{P}(X)$. Wir nennen \mathcal{D} \cap -stabil, falls $A, B \in \mathcal{D} \Rightarrow (A \cap B) \in \mathcal{D}$. Analog dazu nennen wir \mathcal{D} \cup -stabil, falls $A, B \in \mathcal{D} \Rightarrow (A \cup B) \in \mathcal{D}$.

Frage: Wann ist ein Dynkinsystem eine σ -Algebra?

Lemma 3.1.6. Sei \mathcal{D} ein Dynkinsystem. Dann gilt \mathcal{D} ist genau dann eine σ -Algebra, wenn $A, B \in \mathcal{D} \Rightarrow (A \cap B) \in \mathcal{D}$.

Beweis. „ \Rightarrow “ Sei \mathcal{D} eine σ -Algebra. Dann ist \mathcal{D} ein Dynkinsystem. Seien $A, B \in \mathcal{D}$. Dann folgt $A^C, B^C \in \mathcal{D} \Rightarrow A \cap B = (A^C \cup B^C)^C \in \mathcal{D}$.

„ \Leftarrow “ Zu zeigen ist Eigenschaft (Σ_3) . Sei $(D_n)_n \subseteq \mathcal{D}$ eine Mengenfolge. Wir definieren $D'_0 := \emptyset$ und $D'_n := D_1 \cup D_2 \cup \dots \cup D_n$. Dann ist $(D'_n)_n$ eine aufsteigende Folge und es gilt

$$\bigcup_{n \in \mathbb{N}} D_n = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} D'_n = \bigsqcup_{n \in \mathbb{N}} (D'_n \setminus D'_{n-1})$$

Außerdem ist

$$\bigsqcup_{n \in \mathbb{N}} (D'_n \setminus D'_{n-1}) \in \mathcal{D} \text{ falls } (D'_n \setminus D'_{n-1}) \in \mathcal{D} \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

Und es gilt $D'_n \setminus D'_{n-1} = (D'_n \cap (D'_{n-1})^C) \in \mathcal{D}$, falls $D'_n \in \mathcal{D} \forall n \in \mathbb{N}_0$. Wir haben also unsere Behauptung gezeigt, wenn wir gezeigt haben, dass \mathcal{D} \cup -stabil ist. Es gilt aber

$$A \cup B = (A^C \cap B^C)^C \in \mathcal{D}$$

Damit ist (Σ_3) gezeigt. \square

Satz 3.1.7. Sei X eine beliebige Menge und $\mathcal{G} \subseteq \mathcal{P}(X)$. Dann folgt aus \mathcal{G} ist \cap -stabil, dass $\delta(\mathcal{G})$ \cap -stabil ist.

Beweis. Wir nehmen ein beliebiges $D \in \delta(\mathcal{G})$ und definieren

$$\mathcal{D}_D := \{Q \in \mathcal{P}(X) : Q \cap D \in \delta(\mathcal{G})\}$$

Behauptung: \mathcal{D}_D ist ein Dynkinsystem

(D₁) Da $X \cap D = D \in \delta(\mathcal{G})$ folgt $X \in \mathcal{D}_D$.

(D₂) Sei $Q \in \mathcal{D}_D$. Dann ist auch $Q^C \in \mathcal{D}_D$, denn $Q^C \cap D = (Q^C \cup D^C) \cap D = (Q \cap D)^C \cap D = D \setminus (Q \cap D) \in \delta(\mathcal{G})$.

(D₃) (Siehe handschriftliches Skript)

Nun können wir folgendermaßen argumentieren: Da \mathcal{G} \cap -stabil ist, gilt

$$\begin{aligned} & \forall G, D \in \mathcal{G} : G \cap D \in \mathcal{G} \subseteq \delta(\mathcal{G}) \\ & \Leftrightarrow \forall D \in \mathcal{G} : \mathcal{G} \subseteq \mathcal{D}_D \\ & \Rightarrow \forall D \in \mathcal{G} : \delta(\mathcal{G}) \subseteq \delta(\mathcal{D}_D) \stackrel{\text{(Beh.)}}{=} \mathcal{D}_D \\ & \Leftrightarrow \forall D \in \mathcal{G} \forall G \in \delta(\mathcal{G}) : G \cap D \in \delta(\mathcal{G}) \end{aligned}$$

Aus Symmetriegründen gilt dann

$$\begin{aligned} & \forall G \in \delta(\mathcal{G}) \forall D \in \mathcal{G} : D \cap G = G \cap D \in \delta(\mathcal{G}) \\ & \Leftrightarrow \forall G \in \delta(\mathcal{G}) : \mathcal{G} \subseteq \mathcal{D}_G \\ & \Rightarrow \delta(\mathcal{G}) \subseteq \delta(\mathcal{D}_G) = \mathcal{D}_G \quad \forall G \in \delta(\mathcal{G}) \\ & \Leftrightarrow \forall D, G \in \delta(\mathcal{G}) : D \cap G \in \delta(\mathcal{G}) \end{aligned}$$

Das heißt $\delta(\mathcal{G})$ ist σ -stabil. \square

Korollar 3.1.8. Sei X eine beliebige Menge und $\mathcal{G} \subseteq \mathcal{P}(X)$. Wenn \mathcal{G} \cap -stabil ist, dann ist $\delta(\mathcal{G})$ eine σ -Algebra und es gilt $\sigma(\mathcal{G}) = \delta(\mathcal{G})$.

Beweis. Nach Satz 3.1.7 ist $\delta(\mathcal{G})$ \cap -stabil und damit nach Lemma 3.1.6 eine σ -Algebra. Damit gilt dann $\sigma(\mathcal{G}) \subseteq \delta(\mathcal{G})$, da $\sigma(\mathcal{G})$ die kleinste σ -Algebra ist, die \mathcal{G} enthält. Außerdem ist $\delta(\mathcal{G}) \subseteq \delta(\sigma(\mathcal{G})) = \sigma(\mathcal{G})$. \square

4 [*] Eindeutigkeit von Maßen und erste Eigenschaften des Lebesgue-Maßes

[04. Nov] **Satz 4.1.1** (Eindeutigkeitssatz). Sei (X, \mathcal{A}) ein beliebiger Messraum und $\mathcal{A} = \sigma(\mathcal{E})$ für $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{P}(X)$. Ferner seien μ, ν Maße auf \mathcal{A} mit

- (a) \mathcal{E} ist \cap -stabil
- (b) Es gibt Mengen $G_n \in \mathcal{E}$ mit $G_n \nearrow X$ ($X = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} G_n$) mit $\mu(G_n), \nu(G_n) < \infty \forall n \in \mathbb{N}$

Dann gilt: Aus $\mu(A) = \nu(A) \forall A \in \mathcal{E}$ folgt $\mu = \nu$ auf \mathcal{A} . Das heißt unter den obigen Voraussetzungen wird ein Maß eindeutig durch seine Werte auf dem Erzeuger definiert.

Beweis. Da \mathcal{E} \cap -stabil ist, folgt nach Korollar 3.1.8, dass $\delta(\mathcal{E}) = \sigma(\mathcal{E}) = \mathcal{A}$. Wir halten $n \in \mathbb{N}$ fest und betrachten

$$\mathcal{D}_n := \{A \in \mathcal{A} : \mu(G_n \cap A) = \nu(G_n \cap A)\}$$

\mathcal{D}_n ist ein Dynkinsystem:

(D₁) Folgt direkt.

(D₂) Sei $A \in \mathcal{D}_n$. Dann ist

$$\begin{aligned} \mu(G_n \cap A^C) &= \mu(G_n \setminus A) = \mu(G_n \setminus (A \cap G_n)) \\ &= \mu(G_n) - \mu(A \cap G_n) \\ &= \nu(G_n) - \nu(A \cap G_n) \\ &= \nu(G_n \cap A^C) \\ \Rightarrow A^C &\in \mathcal{D}_n \end{aligned}$$

(D₃) Sei $(A_m)_m \subseteq \mathcal{D}_n$ eine Folge paarweise disjunkter Mengen. Dann gilt

$$\begin{aligned} \mu\left(\left(\bigsqcup_{m \in \mathbb{N}} A_m\right) \cap G_n\right) &= \mu\left(\bigsqcup_{m \in \mathbb{N}} (A_m \cap G_n)\right) = \sum_{m \in \mathbb{N}} \mu(A_m \cap G_n) \\ &= \sum_{m \in \mathbb{N}} \nu(A_m \cap G_n) = \nu\left(\left(\bigsqcup_{m \in \mathbb{N}} A_m\right) \cap G_n\right) \\ \Rightarrow \bigsqcup_{m \in \mathbb{N}} A_m &\in \mathcal{D}_n \end{aligned}$$

Nach Konstruktion von \mathcal{D}_n gilt $\mathcal{D}_n \subseteq \mathcal{A}$. Andererseits ist $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{D}_n$. Sei $A \in \mathcal{E}$ und $A \cap G_n \in \mathcal{E}$, da \mathcal{E} \cap -stabil. Nach Voraussetzung gilt $\nu(A \cap G_n) = \mu(A \cap G_n)$, also folgt $A \in \mathcal{D}_n$.

Da $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{D}_n \Rightarrow \sigma(\mathcal{E}) = \delta(\mathcal{E}) \subseteq \delta(\mathcal{E}) = \mathcal{D}_n$. Damit gilt $\sigma(\mathcal{E}) \subseteq \mathcal{D}_n$. Das heißt $\forall A \in \sigma(\mathcal{E})$ folgt $\mu(A \cap G_n) = \nu(A \cap G_n)$.

Für $A \in \sigma(\mathcal{E})$ definieren wir eine aufsteigende Folge $A_n := A \cap G_n \nearrow A$. Da μ, ν Maße sind, sind sie von unten stetig. Das heißt

$$\begin{aligned} \mu(A) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A \cap G_n) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \nu(A \cap G_n) = \nu(A) \end{aligned}$$

□

Bemerkung 4.1.2 (Ausschöpfende Folgen). Wir nennen $(G_n)_n$ im Sinne von Satz 4.1.1 eine ausschöpfende Folge. Wir nennen ein Maß μ auf \mathcal{A} σ -endlich, wenn es eine Folge $(G_n)_n \subseteq \mathcal{A}$ gibt mit $G_n \nearrow X$ und $\mu(G_n) < \infty \forall n \in \mathbb{N}$.

Satz 4.1.3 (Eigenschaften der Borelmengen). In Definition 2.1.8 hatten wir $\mathcal{B}(\mathbb{R}^d) := \sigma(\mathcal{O}_d)$, wobei \mathcal{O} das System offener Teilmengen im \mathbb{R}^d war. Wir definieren nun

- \mathcal{A}_d : System der abgeschlossenen Teilmengen im \mathbb{R}^d
- \mathcal{K}_d : System der kompakten Teilmengen im \mathbb{R}^d

Dann gilt $\sigma(\mathcal{K}_d) = \sigma(\mathcal{A}_d) = \sigma(\mathcal{O}_d) = \mathcal{B}(\mathbb{R}^d)$.

Beweis. SCHRITT 1: $\sigma(\mathcal{A}_d) = \sigma(\mathcal{O}_d)$ ist klar, da σ -Algebren stabil unter Komplementbildung sind.

SCHRITT 2: Es gilt $\mathcal{K}_d \subseteq \mathcal{A}_d \Rightarrow \sigma(\mathcal{K}_d) \subseteq \sigma(\mathcal{A}_d)$.

SCHRITT 3: Für $n \in \mathbb{N}$ definieren wir $K_n := \{|x| < n\}$. Sei $A \in \mathcal{A}_d$, dann ist $A \cap K_n$ kompakt und

$$\begin{aligned} \bigcup_{n \in \mathbb{N}} K_n &= \mathbb{R}^d \\ A &= \bigcup_{n \in \mathbb{N}} (A \cap K_n) \in \sigma(\mathcal{K}_d) \\ &\Rightarrow A \subseteq \sigma(\mathcal{K}_d) \\ &\Rightarrow \sigma(\mathcal{A}_d) \subseteq \sigma(\sigma(\mathcal{K}_d)) = \sigma(\mathcal{K}_d) \\ &\Rightarrow \sigma(\mathcal{K}_d) = \sigma(\mathcal{A}_d) = \sigma(\mathcal{O}_d) \quad \square \end{aligned}$$

Im Folgenden nehmen wir an, dass das Lebesgue-Maß λ^d auf $\mathcal{B}(\mathbb{R}^d)$ existiert. Wir werden das später noch beweisen, aber entwickeln das Maß nun nach unserem geometrischen Verständnis unter der Annahme, dass es existiert (das tut es) und untersuchen erste Eigenschaften:

Beobachtung 4.1.4. Wir betrachten den Fall $d = 1$ und ein halboffenes Intervall $I := [a, b)$. Dann muss gelten $\lambda^1(I) = b - a$. Wir betrachten allgemeine d mit $a, b \in \mathbb{R}^d$ wobei $a \leq b$ (das heißt $a_j \leq b_j$). Dann sei

$$[a, b) := \left\{ x \in \mathbb{R}^d : a_j \leq x_j \leq b_j \forall j \in \{1, \dots, d\} \right\}$$

und wir definieren nach unserem geometrischen Verständnis

$$\lambda^d([a, b)) := \prod_{j=1}^d (b_j - a_j)$$

Definition 4.1.5. Es sei $J^d := \{[a, b) : a, b \in \mathbb{R}^d, a \leq b\}$ das Mengensystem der halboffenen Intervalle im \mathbb{R}^d .

Bemerkung 4.1.6 (Translationsinvarianz des Lebesgue-Maß). Es sei $c \in \mathbb{R}^d$ und wir definieren eine Translation $T_c(x) := x + c$ mit inverser Funktion T_c^{-1} . Dann gilt für ein halboffenes Intervall $I := [a, b)$

$$\begin{aligned} \lambda^d(T_c^{-1}(I)) &= \lambda^d([a - c, b - c)) \\ &= \prod_{j=1}^d (b_j - c_j - (a_j - c_j)) \end{aligned}$$

4 [*] Eindeutigkeit von Maßen und erste Eigenschaften des Lebesgue-Maßes

$$= \prod_{j=1}^d (b_j - a_j) = \lambda^d(I)$$

Das heißt auf J^d ist λ^d invariant unter Translation.

Lemma 4.1.7. Sei $B \in \mathcal{B}^d$ eine Borelmenge und $c \in \mathbb{R}^d$. Dann ist $B + c := \{b + c : b \in B\} \in \mathcal{B}^d$.

Beweis. Sei $c \in \mathbb{R}^d$ fest. SCHRITT 1: Wir wenden das „Wünsch-dir-was“-Vorgehen an und definieren

$$\mathcal{A} := \left\{ A \in \mathcal{B}^d : A + c \in \mathcal{B}^d \right\}$$

Dann ist \mathcal{A} eine σ -Algebra (Übung).

SCHRITT 2: \mathcal{O}_d ist translationsinvariant. Das heißt $\mathcal{O}_d \subseteq \mathcal{A} \Rightarrow \mathcal{B}^d = \sigma(\mathcal{O}_d) \subseteq \sigma(\mathcal{A}) = \mathcal{A}$. Das heißt $\mathcal{B}^d \subseteq \mathcal{A}$. Damit sind die Borelmengen translationsinvariant. \square

[8. Nov] (fehlt)

[18. Nov] **Satz 4.1.8.** Es gilt

$$T(\lambda^d) = \lambda^d \quad \forall T \in \text{Bew}(\mathbb{R}^d)$$

Beweis. SCHRITT 1: Sei $T \in \text{Bew}(\mathbb{R}^d) : T(0) = 0$. Das heißt T ist linear. Dann definieren wir eine Translation

$$\begin{aligned} T_a(x) &:= x + a \\ \Rightarrow (T_a \circ T)(x) &= T(x) + a \\ &= T(x) + T(b) \\ &= T(x + b) = (T \circ T_b)(x) \\ \Rightarrow T_a \circ T &= T \circ T_b \end{aligned} \quad (b := T^{-1}(a))$$

Wir definieren

$$\begin{aligned} \mu &:= T(\lambda^d) &= \lambda^d \circ T^{-1} \\ T_a(\mu) &= T_a(T(\lambda^d)) = T_a \circ T(\lambda^d) \\ &= T \circ T_b(\lambda^d) = T(T_b(\lambda_d)) \\ &= T(\lambda^d) = \mu \end{aligned}$$

Damit ist μ invariant unter Translation. Das heißt nach dem Eindeutigkeitssatz, dass $\mu = \alpha \lambda^d$.
Frage: Warum ist $\alpha = 1$?

Wir betrachten die abgeschlossene Einheitskugel $B := \{x \in \mathbb{R}^d : |x| \leq 1\}$. Dann folgt

$$\begin{aligned} T^{-1}(B) &= B \\ \Rightarrow \lambda^d(B) &= \lambda^d(T^{-1}(B)) = \mu(B) = \alpha \lambda^d(B) \\ \Rightarrow \alpha &= 1 \text{ falls } 0 < \lambda^d(B) < \infty \\ \Rightarrow T(\lambda^d) &= \lambda^d \quad \forall T \in \text{Bew}(\mathbb{R}^d) : T(0) = 0 \end{aligned}$$

SCHRITT 2: Sei $T \in \text{Bew}(\mathbb{R}^d)$ beliebig und wir setzen $c := T(0)$ und $S := T_{-c} \circ T \in \text{Bew}(\mathbb{R}^d)$.
Dann gilt

$$\begin{aligned} S(0) &= T_{-c}(T(0)) = T_{-c}(c) = 0 \\ \Rightarrow S(\lambda^d) &= \lambda^d \text{ nach SCHRITT 1} \end{aligned}$$

Wir wollen das aber noch für allgemeine Bewegungen zeigen. Es gilt

$$\begin{aligned} T &= T_c \circ S \\ \Rightarrow T(\lambda^d) &= T_c(S(\lambda_d)) = T_c(\lambda^d) = \lambda^d \end{aligned}$$

nach SCHRITT 1. □

Beispiel 4.1.9 (Lebesgue-Maß von einem Punkt). Sei $x \in \mathbb{R}^d$. Was ist dann $\lambda^d(\{x\})$? Wir definieren für $\varepsilon > 0$

$$J := [x, x + \varepsilon)$$

4 [*] Eindeutigkeit von Maßen und erste Eigenschaften des Lebesgue-Maßes

$$\begin{aligned} &\Rightarrow x \in J \\ \Rightarrow \lambda^d(\{x\}) &\leq \lambda^d(J) = \varepsilon^d \rightarrow 0 \\ \Rightarrow \lambda^d(\{x\}) &= 0 \quad \forall x \in \mathbb{R}^d \end{aligned}$$

Damit ist auch das Lebesgue-Maß von einer Menge von abzählbar vielen Punkten $A := \bigcup_{n \in \mathbb{N}} \{x_n\}$ null, da

$$\begin{aligned} \lambda^d(A) &\leq \sum_{n \in \mathbb{N}} \lambda^d(\{x_n\}) = 0 \\ \Rightarrow \lambda^d(\mathbb{Q}^d) &= 0 \end{aligned}$$

Beispiel 4.1.10 (Lebesgue-Maß einer Hyperebene). Es sei $j \in \{1, \dots, d\}$ und wir definieren eine Hyperebene $H_j := \{x \in \mathbb{R}^d : x_j = 0\}$. Was ist dann $\lambda^d(H_j)$? Wir definieren

$$J_n := \left\{ x \in \mathbb{R}^d : -n \leq x_k \leq n, k \neq j \wedge -\frac{\varepsilon}{(2n)^{d-1}2 \cdot 2^n} \leq x_j \leq \frac{\varepsilon}{2 \cdot 2^n (2n)^{d-1}} \right\}$$

Damit ist

$$\begin{aligned} H_j &\subseteq \bigcup_{n \in \mathbb{N}} J_n \\ \lambda^d(H_j) &\leq \lambda^d \left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} J_n \right) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \lambda^d(J_n) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} (2n)^{d-1} \cdot \frac{2\varepsilon}{2(2n)^{d-1}2^n} \\ &= \varepsilon \sum_{n=1}^{\infty} 2^{-n} = \varepsilon \quad \forall \varepsilon > 0 \\ \Rightarrow \lambda^d(H_j) &= 0 \end{aligned}$$

Dieses Result gilt auch für allgemeine Hyperebenen, da wir eine Bewegung finden, die diese auf eine Hyperebene der Form H_j abbildet.

5 [*] Existenz von Maßen

Definition 5.1.1 (Halbring). Eine Familie $\mathcal{S} \subseteq \mathcal{P}(X)$ heißt Halbring, falls

$$(S_1) \quad \emptyset \in \mathcal{S}$$

$$(S_2) \quad A, B \in \mathcal{S} \Rightarrow A \cap B \in \mathcal{S}$$

$$(S_3) \quad A, B \in \mathcal{S} \text{ existieren endlich viele disjunkte Mengen } S_1, \dots, S_M \in \mathcal{S} \text{ mit } A \setminus B = \bigsqcup_{j=1}^M S_j$$

Satz 5.1.2 (Nach Carathéodory). Sei $\mathcal{S} \subseteq \mathcal{P}(X)$ ein Halbring und $\mu : \mathcal{S} \rightarrow [0, \infty]$ ein Prämaß. Dann existiert (mindestens) eine Fortsetzung von μ zu einem Maß μ auf $\sigma(\mathcal{S})$. Falls μ σ -endlich auf \mathcal{S} ist, dann ist die Fortsetzung eindeutig.

[25. Nov] **Definition 5.1.3** (Äußere Maße). Eine Abbildung $\mu^* : \mathcal{P}(X) \rightarrow [0, \infty]$ ist ein äußeres Maß, falls

$$(i) \quad \mu^*(\emptyset) = 0 \quad (\text{Normierung})$$

$$(ii) \quad A \subseteq B \Rightarrow \mu^*(A) \leq \mu^*(B) \quad (\text{Monotonie})$$

$$(iii) \quad \mu^*(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n) \leq \sum_{n \in \mathbb{N}} \mu^*(A_n) \quad (\sigma\text{-Subadditivität})$$

Konstruktion 5.1.4. Zu einem Prämaß μ auf \mathcal{S} gibt es ein äußeres Maß.

Nehme $A \subseteq X$. Wir bepflastern A mit Mengen aus \mathcal{S} :

$$\mathcal{C}(A) := \left\{ (S_n)_{n \in \mathbb{N}} : S_n \in \mathcal{S} \ \forall n \in \mathbb{N} \wedge A \subseteq \bigcup_{n \in \mathbb{N}} S_n \right\} \quad (\text{Cover})$$

$\mathcal{C}(A) = \emptyset$ ist dabei möglich. Gegeben ein Prämaß $\mu : \mathcal{S} \rightarrow [0, \infty]$ definieren wir nun

$$\mu^*(A) := \begin{cases} \inf \{ \sum_{n \in \mathbb{N}} \mu(S_n) : (S_n)_{n \in \mathbb{N}} \in \mathcal{C}(A) \} & \text{falls } \mathcal{C}(A) \neq \emptyset \\ +\infty & \text{falls } \mathcal{C}(A) = \emptyset \end{cases}$$

Lemma 5.1.5. Das in Konstruktion 5.1.4 definierte μ^* ist ein äußeres Maß.

Beweis.

$$(i) \quad \text{Wir nehmen } S_n = \emptyset. \text{ Dann gilt } \mu^*(\emptyset) = 0$$

$$(ii) \quad \text{Sei } A \subseteq B. \text{ Angenommen } \mathcal{C}(B) \neq \emptyset \Rightarrow \mathcal{C}(B) \subseteq \mathcal{C}(A)$$

$$\begin{aligned} \mu^*(B) &= \inf \left\{ \sum_{n \in \mathbb{N}} \mu(S_n) : (S_n)_{n \in \mathbb{N}} \in \mathcal{C}(B) \right\} \\ &\geq \inf \left\{ \sum_{n \in \mathbb{N}} \mu(S_n) : (S_n)_{n \in \mathbb{N}} \in \mathcal{C}(B) \right\} \\ &= \mu^*(A) \end{aligned}$$

$$(iii) \quad \text{Es gilt } \mu^*(A_n) = \inf \{ \sum_{n \in \mathbb{N}} \mu(S_n) : (S_n)_{n \in \mathbb{N}} \in \mathcal{C}(A_n) \}. \text{ Für jedes } n \in \mathbb{N} \text{ existiert ein } (S_{n,m})_m \in \mathcal{C}(A_n) \text{ mit}$$

$$\sum_{m \in \mathbb{N}} \mu(S_{n,m}) \leq \mu^*(A_n) + \varepsilon \Sigma^n \quad \forall \varepsilon > 0$$

5 [*] Existenz von Maßen

$$\begin{aligned}
\Rightarrow \mu^*(A) &\leq \sum_{n,m \in \mathbb{N}} \mu(S_{n,m}) \\
&= \sum_{n \in \mathbb{N}} \left(\sum_{m \in \mathbb{N}} \mu(S_{n,m}) \right) \\
&\leq \sum_{n \in \mathbb{N}} (\mu^*(A_n) + \varepsilon \Sigma^n) \\
&= \sum_{m \in \mathbb{N}} \mu^*(A_m) + \varepsilon \quad \forall \varepsilon > 0
\end{aligned} \tag*{\square}$$

Konstruktion 5.1.6 (Prämaß auf erzeugtem Ring). Sei μ ein Prämaß auf einem Halbring \mathcal{S} . Wir wollen μ zu einem Prämaß auf dem erzeugten Mengenring forsetzen. Dazu gehen wir wie folgt vor.

Wir setzen $\mathcal{S}_\cup := \{S_1 \sqcup S_2 \sqcup \dots \sqcup S_n : S_j \in \mathcal{S}\}$ und definieren

$$\bar{\mu}(S_1 \sqcup \dots \sqcup S_n) = \sum_{j=1}^n \mu(S_j)$$

Wir zeigen die Wohldefiniertheit von μ . Angenommen $S_1 \sqcup \dots \sqcup S_n = T_1 \sqcup \dots \sqcup T_n$ und $S_j, T_j \in \mathcal{S}$. Dann gilt

$$\begin{aligned}
S_j &= S_j \cap \left(\bigsqcup_{k=1}^n S_k \right) = S_j \cap \left(\bigsqcup_{k=1}^n T_k \right) \\
&= \bigsqcup_{k=1}^n (S_j \cap T_k)
\end{aligned}$$

Analog ist auch

$$\begin{aligned}
T_k &= \bigsqcup_{j=1}^n (T_k \cap S_j) \\
\Rightarrow S_1 \sqcup \dots \sqcup S_M &= \bigsqcup_{j=1}^M \bigsqcup_{k=1}^N (S_j \cap T_k) \\
\Rightarrow \bar{\mu}(S_1 \sqcup \dots \sqcup S_n) &= \bar{\mu} \left(\bigsqcup_{j=1}^M \bigsqcup_{k=1}^N (S_j \cap T_k) \right) \\
\sum_{n=1}^M \sum_{k=1}^N \mu(S_j \cap T_k) &= \sum_{k=1}^N \mu(T_k) = \bar{\mu}(T_1 \sqcup \dots \sqcup T_N)
\end{aligned}$$

Das heißt $\bar{\mu}$ ist wohldefiniert.

Frage: Wie verhält sich \mathcal{S}_\cup unter allgemeinen (endlichen) Vereinigungen und Schnitten? Wir betrachten $S, T \in \mathcal{S}_\cup$ mit

$$\begin{aligned}
S \cap T &= (S_1 \sqcup \dots \sqcup S_M) \cap (T_1 \sqcup \dots \sqcup T_N) \\
&= \bigsqcup_{j=1}^M \bigsqcup_{k=1}^N (S_j \cap T_k) \in \mathcal{S}_\cup
\end{aligned}$$

Das heißt \mathcal{S}_\cup ist stabil unter (endlichen) Schnitten.

$$S \setminus T = (S_1 \sqcup \dots \sqcup S_M) \setminus (T_1 \sqcup \dots \sqcup T_N)$$

$$\begin{aligned}
 \Rightarrow S \cap T^C &= (S_1 \sqcup \cdots \sqcup S_M) \cap \bigcap_{n=1}^N T_k^C \\
 &= \bigsqcup_{j=1}^M \left(S_j \cap \bigcap_{k=1}^N T_k^C \right) \\
 &= \bigsqcup_{j=1}^M \bigcap_{k=1}^N (S_j \cap T_k^C) \in \mathcal{S}_\cup
 \end{aligned}$$

Das heißt für $S, T \in \mathcal{S}_\cup$ ist auch $S \setminus T \in \mathcal{S}_\cup$. Außerdem können wir schreiben

$$S \cup T = (S \setminus T) \sqcup (S \cap T) \sqcup (T \setminus S) \in \mathcal{S}_\cup$$

Das heißt \mathcal{S}_\cup ist ein Mengenring und $\bar{\mu}$ ist eine Fortsetzung von μ auf \mathcal{S}_\cup .

$$\Rightarrow \bar{\mu}(T \cup S) = \bar{\mu}(S \setminus T) + \bar{\mu}(S \cap T) + \bar{\mu}(T \setminus S)$$

Das heißt $\bar{\mu}$ ist definiert für endlich viele Vereinigungen von Mengen aus \mathcal{S}_\cup .

Behauptung: $\bar{\mu}$ ist ein Prämaß auf \mathcal{S}_\cup . Also ist zu zeigen, dass $\bar{\mu}$ σ -additiv auf \mathcal{S}_\cup ist. Wir nehmen $(T_k)_k \subseteq \mathcal{S}_\cup$

$$T := \bigsqcup_{k \in \mathbb{N}} T_k \in \mathcal{S}_\cup$$

Zu zeigen:

$$\bar{\mu}(T) = \sum_{k \in \mathbb{N}} \bar{\mu}(T_k)$$

Nach Definition von \mathcal{S}_\cup gibt es $(S_n)_n \subseteq \mathcal{S}$ und Indizes $0 = i(0) \leq i(1) \leq i(2) \leq \dots$ mit

$$\begin{aligned}
 T_k &= S_{i(k-1)+1} \sqcup \cdots \sqcup S_{i(k)} & (k \in \mathbb{N}) \\
 T &= U_1 \sqcup \cdots \sqcup U_L \\
 U_l &:= \bigsqcup_{i \in J_l} S_i
 \end{aligned}$$

Indexmengen $J_1, \dots, J_l \subseteq \mathbb{N}$ paarweise disjunkt und $J_1 \sqcup \dots \sqcup J_L = \mathbb{N}$

$$\begin{aligned}
 \bar{\mu}(T) &= \bar{\mu}(U_1 \sqcup \dots \sqcup U_L) \\
 &= \bar{\mu}(U_1) + \dots + \bar{\mu}(U_l) \\
 &= \mu(U_1) + \dots + \mu(U_l) \\
 &= \sum_{i \in J_1} \mu(S_i) + \dots + \sum_{i \in J_L} \mu(S_i) \\
 &= \sum_{j=1}^{\infty} \mu(S_j) = \sum_{k=1}^{\infty} \bar{\mu}(T_k)
 \end{aligned}$$

[29. Nov] **Bemerkung 5.1.7** (Prämaß und äußeres Maß). Wenn wir ein Prämaß μ auf einem Halbring \mathcal{S} haben, dann gilt

$$\mu(A) = \mu^*(A) \quad \forall A \in \mathcal{S}$$

wobei μ^* das in Konstruktion 5.1.4 definierte äußere Maß ist. Das heißt μ^* ist eine Fortsetzung von μ .

5 [*] Existenz von Maßen

Beweis. Sei $A \in \mathcal{S}$ und $(S_j)_j \in \mathcal{C}(A)$ Überdeckung von A . Dann gilt

$$\mu(A) = \overline{\mu}(A) = \overline{\mu}\left(\left(\bigcup_{j \in \mathbb{N}} S_j\right) \cap A\right)$$

Wegen der σ -Subadditivität von $\overline{\mu}$ gilt

$$\leq \sum_{j=1}^{\infty} \overline{\mu}(S_j \cap A) \leq \sum_{j=1}^{\infty} \overline{\mu}(S_j)$$

Wir nehmen das Infimum auf beiden Seiten und erhalten

$$\Rightarrow \mu(A) \leq \mu^*(A) \quad \forall A \in \mathcal{S}$$

Wir wollen noch zeigen, dass $\mu(A) \geq \mu^*(A)$. Für ein $A \in \mathcal{S}$ nehmen wir $(S_j)_j$ mit $S_1 := A$, $S_2 = S_3 = \dots = \emptyset$

$$\begin{aligned} &\Rightarrow \mu^*(A) \leq \mu(A) \quad \forall A \in \mathcal{S} \\ &\Rightarrow \mu^*(A) = \mu(A) \quad \forall A \in \mathcal{S} \end{aligned}$$

□

Definition 5.1.8 (Zerlegungsbedingung). Sei μ^* ein äußeres Maß auf $\mathcal{P}(X)$. Dann sagen wir $A \subseteq X$ erfüllt die Zerlegungsbedingung, falls

$$\mu^*(B) = \mu^*(B \cap A) + \mu^*(B \setminus A) \quad \forall B \subseteq X \tag{5.1.1}$$

Außerdem definieren wir

$$\mathcal{A}_* := \{A \subseteq X : A \text{ erfüllt die Zerlegungsbedingung 5.1.1}\}$$

Bemerkung 5.1.9. Die Bedingung 5.1.1 ist äquivalent zu der Bedingung

$$\mu^*(B) \geq \mu^*(B \cap A) + \mu^*(B \setminus A) \quad \forall B \subseteq X$$

da die Ungleichung in die andere Richtung bereits durch die σ -Subadditivität von μ^* gegeben ist.

Lemma 5.1.10. Sei μ^* das vom Prämäss μ auf \mathcal{S} erzeugte äußere Maß. Dann gilt

$$\mathcal{S} \subseteq \mathcal{A}_*$$

Beweis. Sei $A \in \mathcal{S}$. Wir wollen zeigen, dass

$$\mu^*(B) = \mu^*(B \cap A) + \mu^*(B \setminus A) \quad \forall B \subseteq X$$

O.B.d.A sei $\mathcal{C}(B) \neq \emptyset$. Sei $(B_n)_n \in \mathcal{C}(B)$, $B_n \in \mathcal{S}$. Dann gilt

$$\begin{aligned} B_n &= (B_n \cap A) \sqcup (B_n \setminus A) \\ \Rightarrow \mu(B_n) &= \overline{\mu}(B_n) = \overline{\mu}((B_n \cap A)) + \overline{\mu}(B_n \setminus A) \\ \Rightarrow \sum_{n=1}^{\infty} \mu(B_n) &= \sum_{n=1}^{\infty} (\mu(B_n \cap A)) + \sum_{n=1}^{\infty} (\overline{\mu}(B_n \setminus A)) \end{aligned}$$

Es gilt $(B_n \cap A)_n \in \mathcal{C}(B \cap A)$ und $(B_n \setminus A)_n \in \mathcal{C}(B \setminus A)$

$$\begin{aligned} &\geq \mu^*(B \cap A) + \overline{\mu}^*(B \setminus A) \\ &= \mu^*(B \cap A) + \mu^*(B \setminus A) \\ \Rightarrow \mu(B) &\geq \mu^*(B \cap A) + \mu^*(B \setminus A) \end{aligned}$$

□

Wir sind jetzt in der Lage, den Satz von Carathéodory zu beweisen.

Beweis von Satz 5.1.2. SCHRITT 1: Wir zeigen, dass \mathcal{A}_* eine Algebra ist. Die Stabilität unter Komplementbildung und $\emptyset \in \mathcal{A}_*$ zeigt sich leicht. Wir wollen also noch zeigen, dass $A_1 \cup A_2 \in \mathcal{A}_*$. Das heißt es soll gelten

$$\mu^*(B) = \mu^*(B \cap (A_1 \cup A_2)) + \mu^*(B \setminus (A_1 \cup A_2))$$

Wir definieren

$$\begin{aligned} B_1 &:= (A_1 \cap B) \setminus A_2 \\ B_2 &:= (A_2 \cap B) \setminus A_1 \\ B_3 &:= B \cap A_1 \cap A_2 \\ B_4 &:= B \setminus (A_1 \cup A_2) \end{aligned}$$

Dann gilt

$$\begin{aligned} B \cap (A_1 \cup A_2) &= (B \cap A_1) \cup (B \cap A_2) \\ &= B_1 \cup B_2 \cup B_3 \\ B \setminus (A_1 \cup A_2) &= B_4 \end{aligned}$$

Das heißt es ist zu zeigen, dass

$$\mu(B) = \mu(B_1 \sqcup B_2 \sqcup B_3) + \mu(B_4)$$

A_1 erfüllt die Zerlegungsbedingung. Also

$$\begin{aligned} \mu^*(B) &= \mu^*(B \cap A_1) + \mu^*(B \setminus A_1) \\ &= \mu^*(B_1 \cup B_3) + \mu^*(B_2 \cup B_4) \end{aligned}$$

Verwende A_2 , um $B_1 \cup B_3$ zu zerlegen

$$\begin{aligned} \mu^*(B_1 \cup B_3) &= \mu^*((B_1 \cup B_2) \cap A_2) + \mu^*((B_1 \cup B_2) \setminus A_2) \\ &= \mu^*(B_1) + \mu^*(B_3) \end{aligned}$$

Genauso zerlegen von $B_2 \cup B_4$ mittels A_2

$$\begin{aligned} \mu^*(B_2 \cup B_4) &= \mu^*(B_2) + \mu^*(B_4) \\ \Rightarrow \mu^*(B) &= \mu^*(B_1) + \mu^*(B_2) + \mu^*(B_3) + \mu^*(B_4) \end{aligned}$$

Machen dasselbe mit $\overline{B} := B_1 \cup B_2 \cup B_3$

$$\Rightarrow \mu^*(B_1 \cup B_2 \cup B_3) = \mu^*(B_1) + \mu^*(B_2) + \mu^*(B_3)$$

Es folgt dann $A_1 \cup A_2$ erfüllt die Zerlegungsbedingung und damit $A_1 \cup A_2 \in \mathcal{A}_*$.

[02. Dez] SCHRITT 2: Wir zeigen, dass μ^* endlich additiv auf \mathcal{A}_* ist. Seien $A_1, A_2 \in \mathcal{A}_*$ mit $A_1 \cap A_2 = \emptyset$. Wir benutzen A_1 , um $A_1 \sqcup A_2$ zu zerlegen. Es gilt

$$\begin{aligned} \mu^*(A_1 \sqcup A_2) &= \mu^*((A_1 \sqcup A_2) \setminus A_1) + \mu^*((A_1 \sqcup A_2) \setminus A_2) \\ &= \mu^*(A_1) + \mu^*(A_2) \end{aligned}$$

5 [*] Existenz von Maßen

SCHRITT 3: Wir zeigen, dass \mathcal{A}_* eine σ -Algebra und μ^* ein Maß auf \mathcal{A}_* ist. Sei $(A_j)_j \subseteq \mathcal{A}_*$ und $A = \bigsqcup_{j \in \mathbb{N}} A_j$. Zu zeigen ist

$$\mu^*(B) = \mu^*(B \cap A) + \mu^*(B \setminus A) \quad \forall B \subseteq X$$

Dabei reicht \geq zu zeigen, da die andere Ungleichung allgemein erfüllt ist. Wir definieren

$$F_n := \bigsqcup_{j=1}^n A_j \in \mathcal{A}_*$$

mit $F_n \nearrow A$ und

$$B \setminus A \subseteq B \setminus F_n \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

Also wird B von F_n zerlegt

$$\begin{aligned} \mu^*(B) &= \mu^*(B \cap F_n) + \mu^*(B \setminus F_n) \\ &= \mu^*\left(B \cap \left(\bigsqcup_{j=1}^n A_j\right)\right) + \mu^*\left(B \cap \bigcap A_j^C\right) \end{aligned}$$

Wegen der endlichen Additivität von μ^* gilt

$$\begin{aligned} &= \sum_{j=1}^n \mu^*(B \cap A_j) + \mu^*\left(B \cap \bigcap A_j^C\right) \\ B \cap A &= B \cap \left(\bigsqcup_{j \in \mathbb{N}} A_j\right) = \bigsqcup_{j \in \mathbb{N}} (B \cap A_j) \\ \Rightarrow \mu^*(B \cap A) &= \mu^*\left(\bigsqcup_{j \in \mathbb{N}} (B \cap A_j)\right) \\ &\stackrel{\sigma\text{-Subadd.}}{\leq} \sum_{j \in \mathbb{N}} \mu^*(B \cap A_j) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu^*(B \cap A) + \mu^*(B \setminus A) &\leq \sum_{j=1}^n \mu^*(B \cap A_j) + \mu^*(B \setminus A) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^n (\mu^*(B \cap A_j) + \mu^*(B \setminus A)) \end{aligned}$$

Aber wir wissen $B \setminus A \subseteq B \setminus F_n$. Damit folgt

$$\begin{aligned} &\leq \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^n (\mu^*(B \cap A_j) + \mu^*(B \setminus F_n)) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} (\mu^*(B \cap F_n) + \mu^*(B \setminus F_n)) = \mu(B) \end{aligned}$$

Das heißt A erfüllt die Zerlegungsbedingung und damit $A = \bigsqcup_{j \in \mathbb{N}} A_j \in \mathcal{A}_*$. Das heißt \mathcal{A}_* ist ein Dynkinssystem. Wir wollen Satz 3.1.6 anwenden und müssen daher noch zeigen, dass \mathcal{A}_* \cap -stabil ist. Es gilt

$$A_1 \cap A_2 = (A_1^C \cup A_2^C)^C \in \mathcal{A}_*$$

für $A_1, A_2 \in \mathcal{A}_*$. Damit ist \mathcal{A}_* nach Lemma 3.1.6 eine σ -Algebra.

SCHRITT 4: Wir zeigen, dass μ^* ein Maß auf \mathcal{A}_* ist. Sei

$$B := A = \bigsqcup_{j \in \mathbb{N}} A_j \in \mathcal{A}$$

Wir zerlegen B mittels A

$$\begin{aligned} \Rightarrow \mu^*(B) &\geq \sum_{j=1}^n \mu^*(B \cap A_j) + \mu^*(B \setminus A) \\ \Rightarrow \mu^*(A) &\geq \sum_{j=1}^n \mu^*(A_j) \end{aligned}$$

Durch die σ -Subadditivität haben wir auch die Ungleichung in die andere Richtung. Also folgt

$$\mu^*(A) = \mu^*\left(\bigsqcup_{j \in \mathbb{N}} A_j\right) = \sum_{j \in \mathbb{N}} \mu^*(A_j) \quad \square$$

Um den Satz von Carathéodory auf λ^d anwenden zu können, brauchen wir noch

- $\mathcal{J}^d :=$ Mengensystem der (rechts-)halboffenen Intervalle im \mathbb{R}^d ist ein Halbring
- $\lambda^d : \mathcal{J}^d \rightarrow [0, \infty]$ ist ein Prämaß

Lemma 5.1.11. Seien X_1, X_2 Mengen und \mathcal{S}_1 ein Halbring in X_1 sowie \mathcal{S}_2 Halbring in X_2 . Dann gilt $\mathcal{S}_1 \times \mathcal{S}_2$ ist ein Halbring in $X_1 \times X_2$.

Beweis.

(S₁) $\emptyset \in \mathcal{S}_1 \times \mathcal{S}_2$ folgt direkt aus $\emptyset \in \mathcal{S}_1$ und $\emptyset \in \mathcal{S}_2$

(S₂) Seien $J_1^1, J_1^2 \in \mathcal{S}_1$ und $J_2^1, J_2^2 \in \mathcal{S}_2$. Dann gilt

$$(J_1^1 \times J_2^1) \cap (J_1^2 \times J_2^2) = (J_1^1 \cap J_1^2) \times (J_2^1 \cap J_2^2) \in \mathcal{S}_1 \times \mathcal{S}_2$$

(S₃) (Übung)

□

Satz 5.1.12.

$$\mathcal{J}^d := \{[a, b) : a, b \in \mathbb{R}^d, a < b\}$$

ist ein Halbring.

Beweis. Für eine Dimension (das heißt $d = 1$) zeigen sich die Halbring-Eigenschaften von \mathcal{J}^1 direkt durch Fallunterscheidungen. Wir wollen also für höhere Dimensionen einfach Lemma 5.1.11 induktiv anwenden. Wir definieren also

$$\mathcal{J}^2 := \mathcal{J}^1 \times \mathcal{J}^1$$

Das ist nach dem Lemma ein Halbring

$$\Rightarrow \mathcal{J}^3 := \mathcal{J}^2 \times \mathcal{J}^1 \text{ ist ein Halbring}$$

⋮

$$\Rightarrow \mathcal{J}^d := \mathcal{J}^{d-1} \times \mathcal{J}^1 \text{ ist ein Halbring} \quad \square$$

5 [*] Existenz von Maßen

Lemma 5.1.13. Sei μ endlich-additiv auf einem Halbring \mathcal{S} . Wir betrachten die folgenden Aussagen

- (a) μ ein Prämaß
- (b) $A_n \in \mathcal{S} \wedge A_n \nearrow A \in \mathcal{S} \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A_n) = \mu(A)$
- (c) $A_n \in \mathcal{S} \wedge A_n \searrow A \in \mathcal{S} \wedge \mu(A_1) < \infty \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A_n) = \mu(A)$
- (d) $A_n \in \mathcal{S} \wedge A_n \searrow \emptyset \wedge \mu(A_1) < \infty \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} A_n = 0$

Dann gilt (a) \Leftrightarrow (b) \Rightarrow (c) \Leftrightarrow (d). Gilt ferner $\mu(A) < \infty \forall A \in \mathcal{S}$, dann ist auch (c) \Rightarrow (b). In diesem Fall sind also alle Aussagen äquivalent und damit verwendbar, um zu prüfen, ob μ ein Prämaß ist.

Beweis. (Später) □

Satz 5.1.14. Sei λ^d für $A \in \mathcal{J}^d$ mit

$$A = \times_{j=1}^d [a_j, b_j) = [a, b)$$

definiert als

$$\lambda^d([a, b)) := \prod_{j=1}^d (b_j - a_j)$$

Dann ist λ^d ein Prämaß auf \mathcal{J}^d .

Beweis. Es gilt $\lambda^d(\emptyset) = \lambda^d([a, a)) = 0$. ?? □

[06. Dez]

Wir wollen Maße nun einfacher darstellen, als nur als Fortsetzung eines Prämaßes, was auf einem Halbring definiert ist. Dafür sei nun μ ein Borelmaß auf \mathbb{R}^d mit $\mu(K) < \infty$ für alle kompakten Mengen $K \subseteq \mathbb{R}^d$.

Konstruktion 5.1.15 (Maße mit Funktionen identifizieren). Wir betrachten zunächst nur den Fall $d = 1$. Wir wollen μ auf den halboffenen Intervallen durch eine Funktion $F : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ darstellen. Das heißt es soll gelten

$$\mu([a, b)) = F(b) - F(a) \quad \forall a, b \in \mathbb{R}$$

Welche Eigenschaften hat dann die Funktion F ?

1. F ist monoton wachsend

$$F(b) - F(a) = \mu([a, b)) \geq 0 \quad \forall b \geq a$$

2. F ist ?seitig stetig. Wir betrachten eine Folge $x_n \rightarrow b$ ($a < b$) mit $x_n \leq x_{n+1}$. Dann gilt

$$\bigcup_{n \in \mathbb{N}} [a, x_n) = [a, b)$$

Da μ ein Maß ist, ist es von unten stetig. Das heißt es gilt

$$\begin{aligned} F(x_n) - F(a) &= \mu([a, x_n)) \nearrow \mu([a, b)) = F(b) - F(a) \\ &\Rightarrow \lim_{x \nearrow b} F(x) = F(b) \end{aligned}$$

Beispiel 5.1.16 (Dirac-Maß).

Satz 5.1.17. Jede wachsende Funktion $F : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ die von rechts stetig ist und (von links Grenzwerte hat) erzeugt ein Borelmaß μ_F , sodass

$$\mu_F([a, b)) = F(b) - F(a) \quad \forall a, b \in \mathbb{R} : a \leq b$$

Ferner: Sei $G : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ wachsend und von rechts stetig mit $\mu_G = \mu_F$. Dann folgt

$$\exists c \in \mathbb{R} : G(x) = F(x) + C \quad \forall x \in \mathbb{R}$$

Beweis. Der letzte Teil zeigt sich durch nachrechnen direkt. Erster Teil: Siehe Literatur. \square

6 [*] Messbare Abbildungen und Bildmaße

6.1 Messbare Abbildungen

Definition 6.1.1. Seien (X, \mathcal{A}) und (X', \mathcal{A}') Messräume und $T : X \rightarrow X'$ eine Funktion. Dann heißt T $\mathcal{A} - \mathcal{A}'$ -messbar, falls

$$T^{-1}(A') \in \mathcal{A} \quad \forall A' \in \mathcal{A}'$$

Beispiel 6.1.2.

1. Konstante Funktionen sind messbar
2. Wir betrachten $(X, \mathcal{O}), (X', \mathcal{O}')$ mit \mathcal{O} Mengensystem der offenen Mengen. Dann ist eine stetige Funktion $T : \mathcal{B}(\mathcal{O}) - \mathcal{B}(\mathcal{O}')$ -messbar, da die Urbilder offener Mengen unter stetigen Funktionen offen sind

Satz 6.1.3. Seien $(X, \mathcal{A}), (X', \mathcal{A}')$ Messräume und $\mathcal{E}' \subseteq \mathcal{P}(X')$ Erzeuger von $\mathcal{A}' = \sigma(\mathcal{E}')$. Dann ist T genau dann $\mathcal{A}-\mathcal{A}'$ -messbar, wenn

$$T^{-1}(E') \in \mathcal{A} \quad \forall E' \in \mathcal{E}'$$

Beweis. $\Sigma' := \{A' \subseteq X' : T^{-1}(A') \in \mathcal{A}\}$ ist eine σ -Algebra in X' (Übung) mit $\mathcal{E}' \subseteq \Sigma'$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \mathcal{A}' &= \sigma(\mathcal{E}') \subseteq \sigma(\Sigma') = \Sigma' \\ \Rightarrow \mathcal{A}' &= \Sigma' \end{aligned}$$

□

Satz 6.1.4. Seien $(X_1, \mathcal{A}_1), (X_2, \mathcal{A}_2), (X_3, \mathcal{A}_3)$ Messräume und $T_1 : X_1 \rightarrow X_2$ $\mathcal{A}_1-\mathcal{A}_2$ -messbar sowie $T_2 : X_2 \rightarrow X_3$ $\mathcal{A}_2-\mathcal{A}_3$ -messbar. Dann ist $T_2 \circ T_1 : X_1 \rightarrow X_3$ $\mathcal{A}_1-\mathcal{A}_3$ -messbar.

Beweis. Sei $A_3 \in \mathcal{A}_3$. Dann ist

$$(T_2 \circ T_1)^{-1}(A_3) = T_1^{-1} \underbrace{\left(T_2^{-1}(A_3) \right)}_{\in \mathcal{A}_2} \in \mathcal{A}_3 \quad \square$$

Bemerkung 6.1.5. Sei I eine Index-Menge und (X_j, \mathcal{A}_j) ein Messraum für $j \in I$. Abbildung $T_j : X \rightarrow X_j$. Dann ist $\sigma\left(\bigcup_{j \in I} T_j^{-1}(\mathcal{A}_j)\right)$ die kleinste σ -Algebra, auf X , für die alle Abbildungen T_j messbar (also $\sigma\left(\bigcup_{j \in I} T_j^{-1}(\mathcal{A}_j)\right)$ - \mathcal{A}_j -messbar) sind.

Satz 6.1.6. $S : X_0 \rightarrow X$ ist $\mathcal{A}_0-\mathcal{A}$ -messbar. Dann ist $\mathcal{A} = \sigma\left(\bigcup_{j \in I} T_j^{-1}(\mathcal{A}_j)\right)$ genau dann, wenn

$$T_j \circ S : X_0 \rightarrow X_j \text{ ist } \mathcal{A}_0-\mathcal{A}_j\text{-messbar}$$

Beweis. „ \Rightarrow “ Folgt direkt aus Satz 6.1.4.

„ \Leftarrow “ Nehmen $E \in \bigcup_{j \in I} T_j^{-1}(\mathcal{A}_j)$. Dann ist $E \in T_j^{-1}(\mathcal{A}_j)$ für ein $j \in I$. Dann ist $E = T_j^{-1}(\mathcal{A}_j)$. Es folgt $S^{-1}(E) = S^{-1}\left(T_j^{-1}(\mathcal{A}_j)\right) = (T_j \circ S)^{-1}(\mathcal{A}_j) \subseteq \mathcal{A}_0$.

$\mathcal{E} := \bigcup_{j \in I} T_j^{-1}(\mathcal{A}_j)$ ist Erzeuger von $\mathcal{A} := \sigma(\mathcal{E})$. Damit folgt die Behauptung. □

6.2 Bildmaße

[09. Dez] **Notation 6.2.1.** Seien $(X, \mathcal{A}), (X', \mathcal{A}')$ Messräume. Wir schreiben $T : (X, \mathcal{A}) \rightarrow (X', \mathcal{A}')$ für eine Funktion $T : X \rightarrow X'$, die \mathcal{A} - \mathcal{A}' -messbar ist.

Konstruktion 6.2.2. Sei μ ein Maß auf (X, \mathcal{A}) und $T : (X, \mathcal{A}) \rightarrow (X', \mathcal{A}')$ eine Funktion. Wir nehmen $A' \in \mathcal{A}'$ und definieren

$$\mu'(A') := \mu(T^{-1}(A'))$$

Dann ist μ' ein Maß auf (X', \mathcal{A}') .

Definition 6.2.3 (Bildmaß). Im Sinne von Konstruktion 6.2.2 nennen wir μ' das Bild von μ unter T . Das heißt wir schreiben

$$\mu' := T(\mu)$$

Es gilt

$$T(\mu)(A') := \mu(T^{-1}(A'))$$

Bemerkung 6.2.4 (Transitivität der Bildmaße). Ist $T_1 : (X_1, \mathcal{A}_1) \rightarrow (X_2, \mathcal{A}_2)$, $T_2 : (X_2, \mathcal{A}_2) \rightarrow (X_3, \mathcal{A}_3)$ und μ ein Maß auf (X_1, \mathcal{A}_1) . Dann gilt

$$\begin{aligned} (T_2 \circ T_1)(\mu) &= T_2(T_1(\mu)) \\ (T_2 \circ T_1)^{-1} &= T_1^{-1} \circ T_2^{-1} \\ \Rightarrow (T_2 \circ T_1)^{-1}(A_3) &= T_1^{-1}(T_2^{-1}(A_3)) \end{aligned}$$

7 [*] Messbare numerische Funktionen

Definition 7.1.1 ($\overline{\mathbb{R}}$). Wir schreiben $\overline{\mathbb{R}} := \mathbb{R} \cup \{-\infty, \infty\}$ für die Menge der reellen Zahlen einschließlich $\pm\infty$. Wir definieren die algebraischen Operationen wie folgt:

$$\begin{aligned}
 x + \infty &:= \infty \quad \forall x \in \mathbb{R} \\
 x - \infty &:= -\infty \quad \forall x \in \mathbb{R} \\
 \infty + \infty &:= \infty \\
 -\infty + (-\infty) &= -\infty - \infty := -\infty \\
 -\infty < x < \infty &\quad \forall x \in \mathbb{R} \\
 x \cdot \infty &:= \infty \quad \forall x > 0 \\
 x \cdot (-\infty) &:= -\infty \quad \forall x > 0 \\
 x \cdot \infty &:= (-\infty) \quad \forall x < 0 \\
 x \cdot (-\infty) &:= \infty \quad \forall x < 0 \\
 0 \cdot (\pm\infty) &:= 0 \\
 \frac{x}{\pm\infty} &:= 0 \quad \forall x \in \mathbb{R} \\
 \infty \cdot \infty &= \infty \\
 \infty \cdot (-\infty) &= -\infty
 \end{aligned}$$

Dabei bleiben Ausdrücke wie $\infty - \infty$ nicht definiert. Wir definieren offene Mengen im $\overline{\mathbb{R}}$ wie folgt: $U \subseteq \overline{\mathbb{R}}$ ist offen, wenn

$$\forall x \in U \cap \mathbb{R} \exists R > 0: (x - R, x + R) \subseteq U$$

Außerdem muss für den Fall $\infty \in U$ zu sätzlich gelten

$$\exists R > 0: (R, \infty] \subseteq U$$

Analog muss für $-\infty \in U$ gelten

$$\exists L > 0: [-\infty, L) \subseteq U$$

Mit dieser Definition können wir die Borel- σ -Algebra auf $\overline{\mathbb{R}}$ definieren mit $\overline{\mathcal{B}}^1 = \mathcal{B}(\overline{\mathbb{R}}) = \overline{\mathcal{B}}$.

Dann gilt für die Spur- σ -Algebra $\overline{\mathcal{B}}^1 \cap \mathbb{R} = \mathcal{B}^1$.

Bemerkung 7.1.2 (Identitätsfunktion). Sei (X, \mathcal{A}) ein Messraum und $A \in \mathcal{A}$. Dann definieren wir die Identitätsfunktion (von A) mit

$$\mathbf{1}_A(x) := \begin{cases} 1 & x \in A \\ 0 & x \notin A \end{cases}$$

Diese ist Borel-messbar. Außerdem gilt

$$\begin{aligned}
 A \subseteq B &\Rightarrow \mathbf{1}_A \leq \mathbf{1}_B \\
 \mathbf{1}_{A^C} &= 1 - \mathbf{1}_A
 \end{aligned}$$

Definition 7.1.3 (Numerische Funktion). Eine numerische Funktion ist eine Funktion $f : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$. Ist \mathcal{A} eine σ -Algebra in X , so heißt f \mathcal{A} -messbar, falls es \mathcal{A} - $\overline{\mathcal{B}}$ -messbar ist. Das heißt

$$\forall B \in \overline{\mathcal{B}}: f^{-1}(B) \in \mathcal{A}$$

Satz 7.1.4. Sei \mathcal{A} eine σ -Algebra auf X . Dann ist eine numerische Funktion $f : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ genau dann \mathcal{A} -messbar, wenn

$$\{x \in X : f(x) \geq \alpha\} \in \mathcal{A} \quad \forall \alpha \in \mathbb{R}$$

Beweis. Wir setzen $\bar{\mathcal{E}} := \{[\alpha, \infty] : \alpha \in \mathbb{R}\}$. Zu zeigen ist $\sigma(\bar{\mathcal{E}}) = \bar{\mathcal{B}}^1$

(1) Es gilt $[\alpha, \infty] \in \bar{\mathcal{B}}^1 \forall \alpha \in \mathbb{R}$. Das heißt

$$\begin{aligned} & \Rightarrow \Sigma := \sigma(\bar{\mathcal{E}}) \subseteq \bar{\mathcal{B}}^1 \\ & [\alpha, \beta) = [\alpha, \infty] \setminus [\beta, \infty] \in \bar{\mathcal{B}}^1 \quad (\alpha \leq \beta) \\ & \Rightarrow [\alpha, \beta) \in \mathbb{R} \cap \bar{\mathcal{B}}^1 \\ & \Rightarrow \mathcal{B}^1 \subseteq \mathbb{R} \cap \bar{\mathcal{B}}^1 = \sigma(\mathbb{R} \cap \bar{\mathcal{B}}^1) \end{aligned}$$

(2) Es gilt

$$\begin{aligned} \{+\infty\} &= \bigcap_{n \in \mathbb{N}} [n, \infty] \in \sigma(\mathcal{E}) \\ \{-\infty\} &= \bigcap_{n \in \mathbb{N}} [-n, \infty]^C \in \sigma(\mathcal{E}) \\ \Rightarrow \forall \bar{G} \in \Sigma: \bar{G} \cap \mathbb{R} &= \bar{G} \cap (\{-\infty, \infty\}^C) = \Sigma \\ \Rightarrow \mathbb{R} \cap \Sigma &:= \Sigma \\ \Rightarrow \mathcal{B}^1 &\subseteq \Sigma \\ \Rightarrow \bar{\mathcal{B}}^1 &= \mathcal{B}^1 \cup \{0, \{-\infty\}, \{\infty\}, [-\infty, \infty)\} \subseteq \Sigma \end{aligned}$$

Also ist $\bar{\mathcal{E}}$ ein Erzeuger von $\bar{\mathcal{B}}^1$ und es genügt die Maßeigenschaften auf dem Erzeuger zu haben.

□

Satz 7.1.5. Sei \mathcal{A} eine σ -Algebra auf X . Dann ist eine numerische Funktion $f : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ genau dann \mathcal{A} -messbar, wenn eine der folgenden äquivalenten Bedingungen erfüllt ist:

$$\{x \in X : f(x) \geq \alpha\} \in \mathcal{A} \quad \forall \alpha \in \mathbb{R} \tag{1}$$

$$\Leftrightarrow \{x \in X : f(x) > \alpha\} \in \mathcal{A} \quad \forall \alpha \in \mathbb{R} \tag{2}$$

$$\Leftrightarrow \{x \in X : f(x) \leq \alpha\} \in \mathcal{A} \quad \forall \alpha \in \mathbb{R} \tag{3}$$

$$\Leftrightarrow \{x \in X : f(x) < \alpha\} \in \mathcal{A} \quad \forall \alpha \in \mathbb{R} \tag{4}$$

Beweis. Die Äquivalenz zu (1) folgt direkt aus Satz 7.1.4. Warum sind die anderen Aussagen dazu äquivalent? (Übung). □

Satz 7.1.6. Für messbare Funktionen $f, g : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ und (X, \mathcal{A}) ein Messraum folgt

$$\{f < g\}, \{f \leq g\}, \{f = g\}, \{f \neq g\} \in \mathcal{A}$$

Beweis. \mathbb{Q} ist abzählbar. Dann ist

$$\{f < g\} = \{x \in X : f(x) < g(x)\}$$

$$\begin{aligned}
 &= \bigcup_{r \in \mathbb{Q}} \{f < r\} \cap \{r < g\} \in \mathcal{A} \\
 \{f \leq g\} &= \{f > g\}^C \\
 \{f = g\} &= \{f \leq g\} \cap \{f \geq g\} = \mathcal{A} \\
 \{f \neq g\} &= \{f = g\}^C \in \mathcal{A} \quad \square
 \end{aligned}$$

[13. Dez] **Satz 7.1.7.** Seien $f, g : X \rightarrow \mathbb{R}$ \mathcal{A} -messbar. Dann folgt $f \pm g$ (falls definiert) sowie $f \cdot g$ sind messbar.

Beweis.

$$\begin{aligned}
 \{f - g \geq \alpha\} &= \left\{ f \geq \underbrace{g + \alpha}_{=: h} \right\} \\
 &= \{f \geq h\}
 \end{aligned}$$

Das heißt es reicht aus zu zeigen, dass $\alpha + g$ (bzw. h) messbare Funktionen für ein festes $\alpha \in \mathbb{R}$ sind. g ist messbar, das heißt

$$\begin{aligned}
 \{g \leq \beta\} &\in \mathcal{A} \\
 h \geq \beta \Leftrightarrow g + \alpha &\geq \beta \Leftrightarrow g \leq \beta - \alpha \\
 \{h \geq \beta\} &= \{g \leq \beta - \alpha\}
 \end{aligned}$$

Das ist messbar, da g messbar ist und wir Satz 7.1.6 anwenden können. Damit ist h und damit $f - g$ messbar.

Um zu zeigen, dass auch $f + g$ messbar ist, können wir einfach zeigen, dass $-g$ messbar ist. Es gilt

$$\{-g \geq \gamma\} = \{g \geq -\gamma\}$$

Damit ist $-g$, also auch $f - (-g) = f + g$ messbar.

Wir zeigen noch die Messbarkeit von $f \cdot g$. Annahme: f und g sind reellwertig

$$\begin{aligned}
 (f + g)^2 - (f - g)^2 &= 4fg \\
 \Rightarrow fg &= \frac{1}{4} ((f + g)^2 - (f - g)^2)
 \end{aligned}$$

Das heißt es reicht aus, zu zeigen, dass die Messbarkeit einer Funktion h auch die Messbarkeit von h^2 impliziert

$$\begin{aligned}
 \{h^2 \geq \beta\} &= X \quad \text{falls } \beta \leq 0 \\
 \{h^2 \geq \beta\} &= \{h \geq \sqrt{\beta}\} \cup \{h \leq -\sqrt{\beta}\} \in \mathcal{A} \quad \text{falls } \beta > 0
 \end{aligned}$$

Damit haben wir die Messbarkeit von h^2 gezeigt. Wir wollen nun noch die Annahme loswerden, dass f und g reellwertig sind. Wir definieren

$$\begin{aligned}
 X_1 &:= \{fg = +\infty\} \cup (\{f > 0\} \cap \{g = \infty\} \cup (\{f < 0\} \cap \{g = -\infty\})) \\
 &\quad \cup (\{f = \infty\} \cap \{g \geq 0\} \cup \{f = \infty\} \cap \{g < 0\}) (?) \\
 X_2 &:= \{fg = -\infty\} \\
 X_3 &:= \{fg = 0\} = \{f = 0\} \cup \{g = 0\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_4 &:= (X_1 \cup X_2 \cup X_3)^C \\ \Rightarrow f, g : X_4 &\rightarrow \mathbb{R} \text{ sind reellwertig} \\ fg &= fg\mathbf{1}_{X_4} + \infty\mathbf{1}_{X_1} - \infty\mathbf{1}_{X_2} + 0\mathbf{1}_{X_3} \end{aligned}$$

Damit ist fg nach Voraussetzung messbar, da $X_4 \in \mathcal{A}$. \square

Satz 7.1.8 (WICHTIG). Sei $(f_n)_n$ eine Folge messbarer Funktionen $f_n : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$. Dann sind $\sup_n f_n$, $\inf_n f_n$, $\limsup_{n \rightarrow \infty} f_n$ sowie $\liminf_{n \rightarrow \infty} f_n$ messbar.

Bemerkung 7.1.9. Sei $s := \sup_n f_n = \sup_{n \in \mathbb{N}} f_n$ ist punktweise definiert. Das heißt

$$s(x) = \left(\sup_n f_n \right)(x) := \sup_n f_n(x) = \sup \{f_n(x) : n \in \mathbb{N}\}$$

Beweis von Satz 7.1.8. Sei $s(x) := \sup_n f_n(x)$. Dann ist

$$\begin{aligned} \{s \leq \alpha\} &= \{x : s(x) \leq \alpha\} =: A_1 \\ \bigcup_{n \in \mathbb{N}} \{f_n \leq \alpha\} &= \bigcap_{n \in \mathbb{N}} \{x \in X : f_n(x) < \alpha\} = A_2 \in \mathcal{A} \end{aligned}$$

Wir zeigen $A_1 = A_2$. Sei $x \in A_1$. Dann ist

$$\begin{aligned} \alpha &\geq s(x) = \sup f_n(x) \geq f_n(x) \\ \Rightarrow f_m(x) &\leq \alpha \quad \forall m \in \mathbb{N} \\ \Rightarrow A_1 &\subseteq A_2 \end{aligned}$$

Sei $x \in A_2$. Dann folgt

$$\begin{aligned} f_n(x) &\leq \alpha \quad \forall n \in \mathbb{N} \\ \Rightarrow \sup f_n(x) &\leq \alpha \Rightarrow x \in A_1 \end{aligned}$$

Damit ist $A_1 = A_2$. Es gilt

$$\inf_n f_n = -\sup_n (-f_n)$$

ist messbar

$$\begin{aligned} \left(\limsup_n f_n \right)(x) &= \inf_n \sup_{\alpha \geq n} f_\alpha(x) \\ \left(\liminf_n f_n \right)(x) &= \sup_n \inf_{\alpha \geq n} f_\alpha(x) \end{aligned} \quad \square$$

Korollar 7.1.10. Sei $(f_n)_n$ eine Folge messbarer Funktionen auf X und (X, \mathcal{A}) ein Messraum. Angenommen $\forall x \in X$ existiert der Grenzwert $f(x) := \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$ (wir schreiben auch $f = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n$). Dann ist f messbar.

Beweis.

$$f = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n = \limsup_{n \rightarrow \infty} f_n = \liminf_{n \rightarrow \infty} f_n$$

Damit ist f nach dem vorherigen Satz messbar. \square

Korollar 7.1.11. Seien $f_1, \dots, f_n : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ messbare Funktionen. Dann sind

$$f_1 \vee f_2 \vee \dots \vee f_n := \max(f_1, f_2, \dots, f_n) \quad (\text{punktweise})$$

sowie

$$f_1 \wedge f_2 \wedge \dots \wedge f_n := \min(f_1, f_2, \dots, f_n)$$

messbar.

Beweis. Nehme die Folge $(\bar{f}_n)_n$ mit $\bar{f}_m = f_m$ für $1 \leq m \leq n$ und $\bar{f}_m = f_n$ für $m > n$. Damit ist

$$f_1 \vee \dots \vee f_n = \sup_n \bar{f}_n$$

messbar nach Satz 7.1.8. Die zweite Behauptung zeigt sich analog. \square

Notation 7.1.12. Sei $f : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ eine Funktion. Wir definieren

$$\begin{aligned} f_+ &:= f \vee 0 = \max(f, 0) \geq 0 && (\text{Positivteil}) \\ f_- &:= (-f) \vee 0 \geq 0 && (\text{Negativteil}) \end{aligned}$$

Damit gilt außerdem

$$\begin{aligned} f &= f_+ - f_- \\ |f| &= f_+ + f_- \end{aligned}$$

Korollar 7.1.13. Sei $f : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ eine Funktion. Dann ist f genau dann \mathcal{A} -messbar, wenn f_+ und f_- messbar sind.

Korollar 7.1.14. Sei $f : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ eine \mathcal{A} -messbare Funktion. Dann ist $|f|$ messbar.

8 [*] Elementarfunktionen und ihr Integral

Definition 8.1.1. Es sei (X, \mathcal{A}) ein Messraum. Wir definieren $E_+ := E_+(X, \mathcal{A})$ als die Menge aller nicht-negativen Elementarfunktionen. Das heißt $u \in E_+$, falls $u : X \rightarrow \mathbb{R}_+ = [0, \infty)$ \mathcal{A} -messbar ist und $\text{Bild}(u)$ endlich viele Werte annimmt. Das heißt

$$u(X) = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$$

mit

$$\begin{aligned} 0 \leq \alpha_j < \infty \quad \forall j \leq n \\ \alpha_i \neq \alpha_n \quad \forall i \neq j \end{aligned}$$

Wir setzen $A_j := u^{-1}(\{\alpha_j\}) \in \mathcal{A}$. Damit gilt $u(x) = \sum_{j=1}^n \alpha_j 1_{A_j}(x)$. Wir haben den Raum X nun folgendermaßen disjunkt zerlegt: $X = A_1 \sqcup A_2 \sqcup \dots \sqcup A_n$.

Sind umgekehrt nicht-notwendigerweise disjunkte $\tilde{A}_1, \dots, \tilde{A}_n \in \mathcal{A}$. Dann ist $\sum_{j=1}^n \tilde{\alpha}_j 1_{\tilde{A}_j}$ eine Elementarfunktion.

Bemerkung 8.1.2 (Eigenschaften von E_+). Sei $\alpha \in \mathbb{R}_+$ und $u, v \in E_+$. Dann gilt

- $\alpha u \in E_+$
- $u + v \in E_+$
- $u - v \in E_+$
- $u \wedge v \in E_+$
- $u \vee v \in E_+$

Beweis. Folgt direkt aus der Definition und den Messbarkeitseigenschaften aus dem letzten Kapitel. \square

Notation 8.1.3 (Normaldarstellung). Sei $u \in E_+$. Dann schreiben wir $u(x) = \sum_{j=1}^n \alpha_j 1_{A_j}$ als Normaldarstellung mit $\bigsqcup_{j=1}^n A_j = X$.

Lemma 8.1.4. Sei $u \in E_+ = E_+(X, \mathcal{A})$ mit Normaldarstellungen

$$u = \sum_{j=1}^n \alpha_j 1_{A_j} = \sum_{k=1}^m \beta_k 1_{B_k}$$

Sei μ ein Maß auf (X, \mathcal{A}) . Dann gilt

$$\sum_{j=1}^n \alpha_j \mu(A_j) = \sum_{k=1}^m \beta_k \mu(B_k)$$

Das heißt die Uneindeutigkeit der Normaldarstellung verschwindet bei der Verwendung eines Maßes.

Beweis.

$$\begin{aligned} X &= A_1 \sqcup \dots \sqcup A_m \\ &= B_1 \sqcup \dots \sqcup B_n \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Rightarrow A_j &= \bigsqcup_{k=1}^n (A_j \cap B_k) & B_k &= \bigsqcup_{j=1}^m (A_j \cap B_k) \\
 \Rightarrow 1_{A_j} &= \sum_{k=1}^n 1_{A_j \cap B_k} & 1_{B_k} &= \sum_{j=1}^m 1_{A_j \cap B_k} \\
 \Rightarrow u &= \sum_{j=1}^n \alpha_j 1_{A_j} & = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m \alpha_j 1_{A_j \cap B_k} &= \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m \beta_k 1_{A_j \cap B_k}
 \end{aligned}$$

Jeder Punkt $x \in X$ liegt in genau einer Menge $A_j \cap B_k$

$$\begin{aligned}
 u(x) &= \alpha_{j_0} 1_{A_{j_0} \cap B_k}(x) = \beta_{k_0} 1_{A_{j_0} \cap B_{k_0}}(x) \\
 \sum_{j=1}^m \alpha_j \mu(A_j) &= \sum_{j=1}^m \alpha_j \mu\left(\bigcup_{k=1}^n A_j \cap B_k\right) \\
 &= \sum_{k=1}^n \mu(A_j \cap B_k) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m \alpha_j \mu(A_j \cap B_k) \\
 &= \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m \beta_k \mu(A_j \cap B_k) = \sum_{k=1}^n \beta_k \mu(B_k) \quad \square
 \end{aligned}$$

[16. Dez] **Definition 8.1.5.** Sei (X, \mathcal{A}, μ) ein Maßraum und u eine Elementarfunktion. Dann heißt die von der spezifischen Normaldarstellung $\mu = \sum_{j=1}^n \alpha_j 1_{A_j}$ unabhängige Zahl (Lemma 8.1.4)

$$\int u \, d\mu := \sum_{j=1}^n \alpha_j \mu(A_j)$$

das (μ -)Integral von u (über X). Wir schreiben auch

$$\int u \, d\mu = \int_X u \, d\mu = \int_X u(x) \, d\mu(x) = \int_X u(x) \mu(dx)$$

und definieren in diesem Sinne eine Abbildung

$$\begin{aligned}
 E_+ &\rightarrow \overline{\mathbb{R}} \\
 u &\mapsto \int u \, d\mu
 \end{aligned}$$

Lemma 8.1.6 (Eigenschaften des Integrals). Für $A \subseteq X$, $\alpha \in \mathbb{R}$ und $u, v \in E_+$ gilt

- (i) $\int 1_A \, d\mu = \mu(A)$
- (ii) $\int \alpha u \, d\mu = \alpha \int u \, d\mu$
- (iii) $\int (u + v) \, d\mu = \int u \, d\mu + \int v \, d\mu$
- (iv) $u \leq v \Rightarrow \int u \, d\mu \leq \int v \, d\mu$

Beweis. (i) und (ii) folgen direkt aus der Definition. Für (iii) sei

$$u = \sum_{j=1}^m \alpha_j 1_{A_j} \quad v = \sum_{k=1}^n \beta_k 1_{B_k}$$

$$\begin{aligned}
 & \Rightarrow A_j = \bigsqcup_{k=1}^n A_j \cap B_k \quad B_k = \bigsqcup_{j=1}^m A_j \cap B_k \\
 u &= \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \alpha_j 1_{A_j \cap B_k} \quad v = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \beta_k 1_{A_j \cap B_k} \\
 &\Rightarrow u + v = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n (\alpha_j + \beta_k) 1_{A_j \cap B_k} \\
 \int u \, d\mu &= \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \alpha_j \mu(A_j \cap B_k) \quad \int v \, d\mu = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \beta_k \mu(A_j \cap B_k) \\
 \int (u + v) \, d\mu &= \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n (\alpha_j + \beta_k) \mu(A_j \cap B_k) \\
 &= \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \alpha_j \mu(A_j \cap B_k) + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \beta_k \mu(A_j \cap B_k) = \int u \, d\mu + \int v \, d\mu
 \end{aligned}$$

Für (iv) gilt mit der Definition, die wir auch schon bei (iii) verwendet haben, dass $\alpha_j \leq \beta_k$ auf $A_j \cap B_k$

$$\Rightarrow \int u \, d\mu = \sum_j^k \alpha_j \mu(A_j \cap B_k) \leq \sum_j \sum_k \beta_k \mu(A_j \cap B_k) = \int v \, d\mu$$

9 [*] Das Integral von nicht-negativen meßbaren Funktionen

Satz 9.1.1. Für jede wachsende Folge $(u_n)_n \subseteq E_+$ und jedes $u \in E_+$ gilt

$$u \leq \sup_{n \in \mathbb{N}} u_n \Rightarrow \int u \, d\mu \leq \sup_{n \in \mathbb{N}} \int u_n \, d\mu$$

Beweis. Sei $u = \sum_{j=1}^m \alpha_j 1_{A_j}$ und $0 < \delta < 1$. Wir definieren $B_n := \{x \in X : u_n(x) \geq \delta u(x)\}$. Wir wissen nach Voraussetzung, dass $u_n \leq u_{n+1}$, das heißt $\sup_{n \in \mathbb{N}} u_n(x) \geq u(x) \forall x \in X$. Sei $x \in X$ fest. Ist $u(x) > 0$, dann gilt $\exists N(x) \in \mathbb{N} : u_n(x) \geq \delta u(x)$ für $n \geq N(x)$.

Aus $u_{n+1} \geq u_n$ folgt $B_n \subseteq B_{n+1}$. Außerdem ist $\forall x \in X : x \in B_n$ für ein ausreichend großes n . Also haben wir $B_n \nearrow X$. Auch ist $u_n \geq \delta u 1_{B_n}$

$$\begin{aligned} &\Rightarrow \int u_n \, d\mu \geq \int \delta u 1_{B_n} \, d\mu \\ &u = \sum_{j=1}^n \alpha_j 1_{A_j} \\ &\Rightarrow u 1_{B_n} = \sum_{j=1}^n \alpha_j 1_{A_j \cap B_n} \\ &\delta \int u 1_{B_n} \, d\mu = \delta \int \sum_{j=1}^n \alpha_j 1_{A_j \cap B_n} \, d\mu \\ &= \delta \sum_{j=1}^n \alpha_j \mu(A_j \cap B_n) \rightarrow \delta \sum_{j=1}^n \alpha_j \mu(A_j) \\ &\Rightarrow \sup_{n \in \mathbb{N}} \int u_n \, d\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \int u \, d\mu \geq \delta \sum_{j=1}^n \alpha_j \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A_j \cap B_n) = \delta \sum_{j=1}^n \alpha_j 1_{A_j} = \delta \int u \, d\mu \end{aligned}$$

Das gilt für alle $\delta < 1$. Mit dem Limes für $\delta \rightarrow 1$ folgt dann die Behauptung. \square

Korollar 9.1.2. Seien $(u_n)_n, (v_n)_n \subseteq E_+$ wachsende Folgen von Elementarfunktionen. Dann gilt

$$\sup_{n \in \mathbb{N}} u_n = \sup_{n \in \mathbb{N}} v_n \Rightarrow \sup_{n \in \mathbb{N}} \int u_n \, d\mu = \sup_{n \in \mathbb{N}} \int v_n \, d\mu$$

Beweis. Nach dem vorherigen Satz und $u_n \leq \sup_{n \in \mathbb{N}} v_n$ gilt

$$\begin{aligned} &\int u_n \, d\mu \leq \sup_{n \in \mathbb{N}} \int v_n \, d\mu \\ &\Rightarrow \sup_{n \in \mathbb{N}} \int u_n \, dx \leq \sup_{n \in \mathbb{N}} \int v_n \, d\mu \end{aligned}$$

Aus Symmetriegründen gilt dann

$$\Rightarrow \sup_{n \in \mathbb{N}} \int u_n \, dx = \sup_{n \in \mathbb{N}} \int v_n \, d\mu$$

\square

Notation 9.1.3. Wir schreiben $E^* = E_+^* = E_+^*(X, \mathcal{A})$ für die Menge aller numerischen meßbaren Funktionen $f \geq 0$ auf X , für die es eine wachsende Folge $(u_n)_n \subseteq E_+$ gibt, sodass $\sup_{n \in \mathbb{N}} u_n = f$. Für $f \in E_+^n$ ist dann

$$\int f d\mu := \sup \left\{ \int u_n d\mu : u_n \subseteq E_+, \sup_{n \in \mathbb{N}} u_n = f \right\}$$

Das nennen wir das (μ -)Integral von f .

[20. Dez] **Bemerkung 9.1.4** (Eigenschaften des Integrals). Seien $f, g \in E^*$ und $\alpha \in \mathbb{R}_+$. Dann gilt

- (i) $\alpha f \in E^*$
- (ii) $f \pm g \in E^*$
- (iii) $fg \in E^*$
- (iv) $f \vee g := \max(f, g) \in E^*$
- (v) $f \wedge g := \min(f, g) \in E^*$
- (vi) $\int (\alpha f) d\mu = \alpha \int f d\mu$
- (vii) $\int (f + g) d\mu = \int f d\mu + \int g d\mu$
- (viii) $f \leq g \Rightarrow \int f d\mu \leq \int g d\mu$

Beweis.

(i)-(v) Beachte $f = \sup_{n \in \mathbb{N}} u_n$ und $g = \sup_{n \in \mathbb{N}} v_n$. Damit lassen sich entsprechende Folgen finden, um auch Kombinationen von f und g im obigen Sinne zu finden.

(vi) (Übung)

(vii) Es ist $f = \lim_{n \rightarrow \infty} u_n$, $g = \lim_{n \rightarrow \infty} v_n$. Das heißt

$$\begin{aligned} \int f d\mu &= \sup_{n \in \mathbb{N}} \int u_n d\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \int u_n d\mu \\ \int g d\mu &= \sup_{n \in \mathbb{N}} \int v_n d\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \int v_n d\mu \\ \int f + g d\mu &= \sup_{n \in \mathbb{N}} \int (u_n + v_n) d\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \int (u_n + v_n) d\mu \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\int u_n d\mu + \int v_n d\mu \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \int u_n d\mu + \lim_{n \rightarrow \infty} \int v_n d\mu \\ &= \int f d\mu + \int g d\mu \end{aligned}$$

(viii) $f \leq g \Rightarrow u_k \leq \sup_{n \in \mathbb{N}} v_n$. Wir definieren $(\tilde{u}_n)_n$ mit $\tilde{u}_n := u_k$ für ein festes k

$$\begin{aligned} &\Rightarrow \sup_{n \in \mathbb{N}} \tilde{u}_k = u_k \leq \sup_{n \in \mathbb{N}} v_n \\ &\Rightarrow \int u_k d\mu = \sup_{n \in \mathbb{N}} \int \tilde{u}_k d\mu \leq \sup_{n \in \mathbb{N}} \int v_n d\mu = \int g d\mu \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\Rightarrow \int u_k \, d\mu \leq \int g \, d\mu \\ &\Rightarrow \int f \, d\mu = \sup_{k \in \mathbb{N}} \int u_k \, d\mu = \int g \, d\mu \end{aligned}$$

□

Bemerkung 9.1.5 (Interpretation des Integrals). Das Integral bezüglich einem Maß μ ist eine monotone Linearform von E^* nach $[0, \infty]$. Aber was ist E^* ?

Notation 9.1.6. Es sei $\mathcal{M}_+ := \mathcal{M}_+(X, \mathcal{A}) := \{f : x \rightarrow [0, \infty], f \text{ ist } \mathcal{A}\text{-messbar}\}$.

Satz 9.1.7. $E^*(X, \mathcal{A}) = \mathcal{M}_+(X, \mathcal{A})$.

Beweis. $E^* \subseteq \mathcal{M}_+$ ist klar. Wir zeigen die Inklusion in die andere Richtung. Wir definieren für ein $n \in \mathbb{N}, j \in \{0, \dots, n2^n\}$

$$\begin{aligned} A_{j,n} &:= \begin{cases} \{f \geq j2^{-n}\} \cap \{f \leq (j+1)2^{-n}\} & j \in \{0, \dots, n2^n - 1\} \\ \{f \geq n\} & j = n2^n - 1 \end{cases} \\ &= \begin{cases} \{j2^{-n} \leq f \leq (j+1)2^{-n}\} & j \in \{0, \dots, n2^n - 1\} \\ \{f \geq n\} & j = n2^n - 1 \end{cases} \end{aligned}$$

Für ein festes n ist $A_{j,n} \cap A_{k,n} = \emptyset$ für $j \neq k$. Wir setzen

$$u_n := \sum_{j=0}^{n2^n} j2^{-n} 1_{A_{j,n}}$$

Behauptung 1: $u_n \leq u_{n+1} \forall n \in \mathbb{N}$. Bew.:

$$\begin{aligned} A_{2k,n+1} &= \left\{ 2k2^{-(n+1)} \leq f \leq (2k+1)2^{-(n+1)} \right\} = \left\{ k2^{-n} \leq f \leq (2k+1)2^{-(n+1)} \right\} \\ A_{2k+1,n+1} &= \left\{ (2k+1)2^{-(n+1)} \leq f \leq (2k+1)2^{-(n+1)} \right\} \\ \Rightarrow A_{k,n} &= A_{2k,n+1} \sqcup A_{2k+1,n+1} \\ \Rightarrow u_n &\leq u_{n+1} \end{aligned}$$

Damit ist auch $u_n \leq f \forall n \in \mathbb{N}$. Umgekehrt auf $A_{j,n}$ ist $f(x) \leq (j+1)2^{-n} = u_n(x) + 2^{-n}$. Das heißt $\lim_{n \rightarrow \infty} u_n = f$ für $x \in A_{j,n}$. Insgesamt gilt damit $\lim_{n \rightarrow \infty} u_n = f$. □

Satz 9.1.8 (Monotone Konvergenz). Sei $(f_n)_n$ eine wachsende Folge in $E^*(X, \mathcal{A})$. Dann folgt $\sup_{n \in \mathbb{N}} f_n \in E^*$ und $\sup_{n \in \mathbb{N}} \int f_n \, d\mu = \int \sup_{n \in \mathbb{N}} f \, d\mu$.

Beweis. Sei $f := \sup_{n \in \mathbb{N}} f_n$. Dann reicht es, zu zeigen, dass $\exists (v_n)_n \subseteq E_+$ wachsend mit $\sup_{n \in \mathbb{N}} v_n = f$ und $v_n \leq f_n$. Denn in diesem Fall ist

$$\begin{aligned} \int v_n \, d\mu &\leq \int f_n \, d\mu \leq \sup_{n \in \mathbb{N}} \int f_n \, d\mu \\ \Rightarrow \sup_{n \in \mathbb{N}} \int v_n \, d\mu &\leq \sup_{n \in \mathbb{N}} \int f_n \, d\mu \end{aligned}$$

Mit Bemerkung 9.1.9 folgt dann

$$\sup_{n \in \mathbb{N}} \int f_n \, d\mu = \int \sup_{n \in \mathbb{N}} f_n \, d\mu$$

9.1 Integral nicht-negativer Funktionen

Wir brauchen also nur noch die Existenz von $(v_n)_n$. Zu (f_n) existiert ein $(u_{m,n})_n \subseteq E_+$ mit $u_{m,n} \leq u_{m-1,n}$ sowie $f_n = \sup_m u_{m,n}$. Das heißt

$$\begin{aligned} v_m &\leq v_{m+1} \\ \Rightarrow \sup_m v_m &\in E_+ \end{aligned}$$

Behauptung: $\sup_m v_m = f = \sup_n f_n$. Da $u_{m,n} \leq f_n \leq f_{n+1}$

$$\Rightarrow \sup_m v_m \leq \sup_m f_m = f$$

Auch ist $v_m = u_{m-1} \vee u_{m-2} \vee \dots \geq u_{m,n} \rightarrow f_n$

$$\begin{aligned} f_n &= \sup_m u_{m,n} = \sup_m v_m \\ \Rightarrow f &= \sup_n f_n \leq \sup_m v_m \leq f \\ \Rightarrow f &= \sup_{m \in \mathbb{N}} v_m \end{aligned} \quad \square$$

Bemerkung 9.1.9. Im Sinne von Satz 9.1.8 gilt die Ungleichung $\sup_{n \in \mathbb{N}} \int f_n d\mu \leq \int \sup_{n \in \mathbb{N}} f d\mu$ allgemein. Die Voraussetzung, dass die Folge wächst ist nur für die Ungleichung in die andere Richtung relevant.

Korollar 9.1.10. Sei $(f_n)_n \subseteq E^*$. Dann folgt $\sum_{n=1}^{\infty} f_n \in E^*$ und $\int \left(\sum_{n=1}^{\infty} f_n \right) d\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \int f_n d\mu$.

Beweis. Wir haben $f_n \geq 0$. Das heißt die Partialsummen von $(f_n)_n$ sind monoton wachsend. Damit ergibt sich die Behauptung direkt aus Satz 9.1.8. \square

10 [*] Integrierbarkeit

10.1 Integration von allgemeinen numerischen Funktionen

Wir haben $f \geq 0$ messbar auf X . Dann ist $\int_X f d\mu$ wohldefiniert. Wir wollen das auch auf Funktionen mit negativen Werten erweitern.

Definition 10.1.1. Eine numerische Funktion $f : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ heißt (μ) -integrierbar, wenn sie \mathcal{A} -messbar ist sowie $\int f_+ d\mu, \int f_- d\mu \in \mathbb{R}$. In diesem Fall definieren wir

$$\int f d\mu = \int f_+ d\mu - \int f_- d\mu$$

Satz 10.1.2. Sei $f : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ messbar und μ ein Maß auf \mathcal{A} . Dann sind folgende Aussagen äquivalent

- (i) f_+ und f_- sind integrierbar
- (ii) Es existieren integrierbare Funktionen $u, v \geq 0$ mit $f = u - v$
- (iii) Es existiert eine integrierbare Funktion $g \geq 0$ mit $|f| \leq g$
- (iv) $|f|$ ist integrierbar

[10. Jan] Im Fall (ii) ist $\int f d\mu = \int u d\mu - \int v d\mu$.

Beweis. (i) \Rightarrow (ii): Wir wählen $u = f_+$ und $v = f_-$. Damit existieren die geforderten Funktionen.
(ii) \Rightarrow (iii): u und v sind integrierbare, nicht-negative Funktionen. Damit ist auch $u + v$ integrierbar und nicht-negativ und es gilt

$$\begin{aligned} f &= u - v \leq u \leq u + v \\ -f &= v - u \leq v \leq v + u \\ \Rightarrow |f| &\leq u + v =: g \end{aligned}$$

(iii) \Rightarrow (iv): Aus der Monotonie des Integrals (für nicht-negative, integrierbare Funktionen) folgt

$$\int |f(x)| d\mu(x) \leq \int g(x) d\mu(x) < \infty$$

(iv) \Rightarrow (i): Es gilt $f_+ \leq |f|$ und $f_- \leq |f|$. Das heißt nach der Argumentation aus der vorherigen Implikation sind f_+ und f_- integrierbar.

Im Fall (ii) ist $f = u - v = f_+ - f_-$. Daraus folgt

$$\begin{aligned} &\Rightarrow u + f_- = f_+ + v \\ &\Rightarrow \int u d\mu + \int f_- d\mu = \int f_+ d\mu + \int v d\mu \\ &\Rightarrow \int u d\mu - \int v d\mu = \int f_+ d\mu - \int f_- d\mu = \int f d\mu \end{aligned}$$

□

Bemerkung 10.1.3 (Komplexwertige Integrale). Eine messbare Funktion $f : X \rightarrow \mathbb{C}$ ist integrierbar, falls $\operatorname{Re}(f)$ und $\operatorname{Im}(f)$ integrierbar sind. Wir definieren dann

$$\int f d\mu = \int \operatorname{Re}(f) d\mu + i \int \operatorname{Im}(f) d\mu$$

Eine entsprechende Version von Satz 10.1.2 gilt dann auch für komplexe Funktionen.

10.2 Linearität und Monotonie des Integrals

Satz 10.2.1. Seien f, g integrierbar und $\alpha \in \mathbb{R}$. Dann sind αf und $f + g$ ebenfalls integrierbar und es gilt

$$\int \alpha f \, d\mu = \alpha \int f \, d\mu \quad (\text{i})$$

$$\int f + g \, d\mu = \int f \, d\mu + \int g \, d\mu \quad (\text{ii})$$

Außerdem sind auch $\max(f, g)$ und $\min(f, g)$ integrierbar. (iii)

Beweis.

- (i) Es gilt $(\alpha f)_+ = \alpha f_+$ und $(\alpha f)_- = \alpha f_-$, falls $\alpha \geq 0$ sowie $(\alpha f)_- = \alpha f_+$ und $(\alpha f)_+ = \alpha f_-$, falls $\alpha < 0$. Für $\alpha \geq 0$ gilt

$$\begin{aligned} \int \alpha f \, d\mu &= \int (\alpha f)_+ \, d\mu - \int (\alpha f)_- \, d\mu = \int \alpha f_+ \, d\mu - \int \alpha f_- \, d\mu \\ &= \alpha \int f_+ \, d\mu - \alpha \int f_- \, d\mu = \alpha \int f \, d\mu \end{aligned}$$

Der Fall $\alpha < 0$ zeigt sich analog.

- (ii) f und g lassen sich in positiv- und negativ-Teil zerlegen. Das heißt

$$f + g = f_+ - f_- + g_+ - g_- = \underbrace{f_+ + g_+}_{=:u} - \underbrace{f_- + g_-}_{=:v}$$

Mit Satz 10.1.2 folgt die Integrierbarkeit von $f + g$ und es gilt

$$\begin{aligned} \int f + g \, d\mu &= \int u \, d\mu - \int v \, d\mu = \int f_+ + g_+ \, d\mu - \int f_- + g_- \, d\mu \\ &= \int f_+ \, d\mu - \int f_- \, d\mu + \int g_+ \, d\mu - \int g_- \, d\mu = \int f \, d\mu + \int g \, d\mu \end{aligned}$$

- (iii) Es gilt $|\max(f, g)| \leq |f| + |g|$ sowie $|\min(f, g)| \leq |f| + |g|$. Damit folgt die Integrierbarkeit direkt aus Satz 10.1.2, da f und g integrierbar sind.

□

Bemerkung 10.2.2. Für komplexe Funktionen $f, g : X \rightarrow \mathbb{C}$ gilt Satz 10.2.1 analog (mit $\alpha \in \mathbb{C}$).

Beweis. Der Beweis ist eine Standardrechnung und funktioniert genauso wie der Beweis des Satzes für reelle Funktionen mit einer zusätzlichen Zerlegung in Real- und Imaginärteil. □

Satz 10.2.3. Seien f, g integrierbar auf X . Dann gilt

$$f \leq g \Rightarrow \int f \, d\mu \leq \int g \, d\mu \quad (\text{Monotonie})$$

sowie

$$\left| \int f \, d\mu \right| \leq \int |f| \, d\mu \quad (\text{Dreiecksungleichung})$$

Beweis. Monotonie: Aus $f \leq g$ folgen $f_+ \leq g_+$ und $f_- \geq g_-$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \int f \, d\mu &= \int f_+ \, d\mu - \int f_- \, d\mu \\ &\leq \int g_+ \, d\mu - \int g_- \, d\mu = \int g \, d\mu \end{aligned}$$

Dreiecksungleichung: Da $f \leq |f|$ und $-f \leq |f|$ folgt aus der Monotonie

$$\begin{aligned} \int f \, d\mu &\leq \int |f| \, d\mu \\ - \int f \, d\mu &= \int -f \, d\mu \leq \int |f| \, d\mu \\ \Rightarrow \left| \int f \, d\mu \right| &\leq \int |f| \, d\mu \end{aligned}$$

□

Bemerkung 10.2.4. Sei $f : X \rightarrow \mathbb{C}$ integrierbar. Bisher haben sich alle Sätze und Argumente für reelle Funktionen ohne Probleme auch auf komplexe Funktionen übertragen. Bei Satz 10.2.3 ist hier jedoch etwas Vorsicht geboten. Wir versuchen, die Dreiecksungleichung analog zum vorherigen Beweis auch auf komplexe Funktionen zu übertragen:

$$\begin{aligned} \left| \int f \, d\mu \right| &= \left| \int \operatorname{Re}(f) \, d\mu + i \int \operatorname{Im}(f) \, d\mu \right| \\ &\leq \left| \int \operatorname{Re}(f) \, d\mu \right| + \left| \int \operatorname{Im}(f) \, d\mu \right| \\ &\leq \int |\operatorname{Re}(f)| \, d\mu + \int |\operatorname{Im}(f)| \, d\mu \\ &= \int |\operatorname{Re}(f)| + |\operatorname{Im}(f)| \, d\mu \end{aligned}$$

Die einzige Abschätzung, die wir jetzt noch sinnvoll machen können, um wieder $|f|$ im Integral stehen zu haben, ist, sowohl Real- als auch Imaginärteil gegen den Betrag abzuschätzen

$$\leq 2 \int |f| \, d\mu$$

Der Faktor, den wir hier zusätzlich erhalten, ergibt sich aber nicht aus den Eigenschaften des komplexen Integrals, sondern entsteht nur durch unsere zu großzügigen Abschätzungen. Wir führen stattdessen ein besseres Argument mit Polarkoordinaten: (*fehlt*)

10.3 Der Raum $\mathcal{L}^1(\mu)$

Definition 10.3.1. Wir definieren $\mathcal{L}^1(\mu) := \mathcal{L}^1(\mu, \mathbb{R})$ als die Menge aller μ -integrierbaren reellen Funktionen auf X . Analog dazu ist $\mathcal{L}^1(\mu, \mathbb{C})$ die Menge aller μ -integrierbaren komplexen Funktionen. Aus Satz 10.2.1 und der zugehörigen Bemerkung folgt bereits, dass $\mathcal{L}^1(\mu, \mathbb{R})$ bzw. $\mathcal{L}^1(\mu, \mathbb{C})$ Vektorräume bezüglich Addition und Multiplikation mit $\alpha \in \mathbb{R}$ bzw. $\alpha \in \mathbb{C}$ sind.

Es gilt

$$\left| \int f \, dx - \int g \, d\mu \right| = \left| \int f - g \, d\mu \right| \leq \int |f - g| \, d\mu$$

Damit definiert $\|f\|_1 := \int |f| \, d\mu$ eine Halbnorm auf unserem Vektorraum. Dabei ist $\|f\|_1$ keine Norm, denn aus $\|f\|_1 = 0$ folgt nicht-notwendigerweise, dass $f = 0$. Betrachten wir dafür das Lebesgue-Maß und die Funktion $f = 1_0$. Dann gilt $\int |f| \, d\lambda^1 = \lambda^1(\{0\}) = 0$, aber f ist nicht die Nullfunktion.

10.4 Integration über (messbaren) Teilmengen

Definition 10.4.1. Sei f eine messbare numerische Funktion, die entweder nicht-negativ oder integrierbar bezüglich μ ist. Sei weiter $A \in \mathcal{A}$. Dann setzt man

$$\int_A f d\mu = \int f \cdot 1_A d\mu$$

und nennt $\int_A f d\mu$ das (μ -)Integral von f über A .

Bemerkung 10.4.2. Seien $A, B \in \mathcal{A}$. Dann gilt $1_{A \cup B} + 1_{A \cap B} = 1_A + 1_B$. Das heißt

$$\int_{A \cup B} f dx + \int_{A \cap B} f dx = \int_A f dx + \int_B f d\mu$$

Insbesondere gilt $\int_{A \cup B} f d\mu = \int_A f d\mu + \int_B f d\mu$, falls $A \cap B = \emptyset$.

Beweis. (Übung) □

Zusätzlich übertragen sich auch Monotonie, Linearität und Dreiecksungleichung (mit entsprechenden Einschränkungen auf die Menge A).

Lemma 10.4.3.

11 [*] Fast überall bestehende Eigenschaften

[13. Jan] **Definition 11.1.1.** Sei (X, \mathcal{A}, μ) ein Maßraum und E eine Eigenschaft, die für $x \in X$ sinnvoll definiert ist. Dann sagen wir E ist (μ) -fast-sicher wahr oder E gilt (μ) -fast-sicher (abgekürzt (μ) -fs. und im Englischen (μ) -almost-everywhere bzw. (μ) -ae.), falls es eine Nullmenge $N \in \mathcal{A}$ (d.h. $\mu(N) = 0$) gibt, sodass E gilt für alle $x \notin N$.

Beispiel 11.1.2. Sei $f : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ eine messbare, numerische Funktion. Dann ist f μ -fast-überall endlich, falls $\exists N \in \mathcal{A} : \mu(N) = 0 \wedge (\forall x \in N^C : f(x) \in \mathbb{R})$.

Beispiel 11.1.3. Sei f_n eine Folge von messbaren Funktionen. Dann gilt $f_n \rightarrow f$ μ -fs. genau dann, wenn eine Nullmenge $N \in \mathcal{A}$ existiert, sodass $f_n(x) \rightarrow f(x)$ für alle $x \in N^C$ und $n \rightarrow \infty$.

Satz 11.1.4. Sei $f \in \mathcal{M}_+(X, \mathcal{A})$ eine nicht-negative, messbare Funktion. Dann gilt $\int f d\mu = 0$ genau dann, wenn $f = 0$ μ -fast-überall.

Beweis. „ \Rightarrow “: Wir definieren $N := \{f > 0\} \in \mathcal{A}$. Dann gilt

$$\begin{aligned} N &= \bigcup_{n \in \mathbb{N}} \underbrace{\left\{ f > \frac{1}{n} \right\}}_{=: N_n \in \mathcal{A}} \\ \mu(N_n) &= \mu\left(\left\{ f > \frac{1}{n} \right\}\right) = \int 1_{\{f > \frac{1}{n}\}} d\mu \\ &= \int_{\{f > \frac{1}{n}\}} 1 d\mu \leq \int_{\{f > \frac{1}{n}\}} nf d\mu \\ &\leq n \int f d\mu = 0 \\ \Rightarrow \mu(N) &= 0 \end{aligned}$$

„ \Leftarrow “: Angenommen $f = 0$ μ -fs. Das heißt es existiert eine Nullmenge N , sodass $f(x) = 0 \forall x \in N^C$. Sei $u_m := m \cdot 1_N$, dann gilt $\forall x \in X$, dass $f(x) \leq \sup_m u_m(x) =: u(x)$.

$$0 \leq \int f d\mu \leq \int u d\mu = \lim_{m \rightarrow \infty} \int u_m d\mu = \lim_{m \rightarrow \infty} (m\mu(N)) = 0 \quad \square$$

Korollar 11.1.5. Sei $f : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ eine beliebige meßbare, numerische Funktion und $N \in \mathcal{A}$ eine μ -Nullmenge. Dann ist f über N integrierbar und $\int_N f d\mu = 0$.

Beweis. FALL 1: Ist $f \geq 0$, dann folgt die Behauptung direkt aus Satz 11.1.4.

FALL 2: Ist $f = f_+ - f_-$, dann haben wir nach FALL 1, dass

$$\begin{aligned} \int_N f_+ d\mu &= 0 = \int_N f_- d\mu \\ \Rightarrow \int_N f d\mu &= \int_N f_+ d\mu - \int_N f_- d\mu = 0 \end{aligned}$$

□

Satz 11.1.6. Seien f, g messbare, numerische Funktionen auf X , (X, \mathcal{A}, μ) ein Maßraum sowie $f = g$ μ -fs. Dann gilt

$$(i) \quad f, g \geq 0 \Rightarrow \int f d\mu = \int g d\mu.$$

(ii) f integrierbar \Rightarrow g integrierbar mit $\int g \, d\mu = \int f \, d\mu$.

Beweis. Sei $N = \{f \neq g\}$. Dann ist N eine Nullmenge.

(i) Es gilt

$$0 = \int_N f \, d\mu = \int_N g \, d\mu = 0$$

Sei $M := N^C$

$$\begin{aligned} &\Rightarrow \int_M f \, d\mu = \int 1_M f \, d\mu = \int 1_M g \, d\mu = dx \int_M g \, d\mu \\ &\Rightarrow \int f \, d\mu = \int_N f \, d\mu + \int_M f \, d\mu = \int_N g \, d\mu + \int_M g \, d\mu = \int g \, d\mu \end{aligned}$$

(ii) Es ist $f_+ = g_+$ μ -fs. sowie $f_- = g_-$ μ -fs. Damit gilt nach (i), dass

$$\begin{aligned} &\underbrace{\int f_+ \, d\mu}_{<\infty} = \int g_+ \, d\mu \\ &\Rightarrow \int f \, d\mu = \int f_+ \, d\mu - \int f_- \, d\mu = \int g \, d\mu \end{aligned}$$

□

Korollar 11.1.7. Seien f, g meßbare, numerische Funktionen auf X und $|f| \leq g$ μ -fast-überall und g integrierbar. Dann ist f integrierbar (bezüglich μ).

Beweis. Sei $\tilde{g} := g \vee |f| = \max(g, |f|)$. Damit ist $\tilde{g} = g$ fast-überall nach Voraussetzung und $|f| \leq \tilde{g}$. Damit gilt nach Satz 11.1.6, dass

$$\begin{aligned} &\int \tilde{g} \, d\mu = \int g \, d\mu < \infty \\ &\Rightarrow \int |f| \, d\mu \leq \int \tilde{g} \, d\mu = \int g \, d\mu < \infty \\ &\Rightarrow f \text{ ist integrierbar} \end{aligned}$$

□

Satz 11.1.8. Sei f eine integrierbare, numerische Funktion auf (X, \mathcal{A}, μ) . Dann ist f μ -fs. reellwertig (d.h. f ist μ -fs. endlich). Ferner hat die Menge $\{f \neq 0\}$ ein σ -endliches Maß.

Beweis. Sei $N := \{|f| = \infty\} \in \mathcal{A}$. Dann gilt für beliebiges $\alpha \geq 0$, dass $\alpha 1_N \leq |f|$. Damit folgt außerdem

$$\begin{aligned} \alpha \mu(N) &= \int_N \alpha 1_N \, d\mu \leq \int_N |f| \, d\mu \leq \int |f| \, dx < \infty \\ &\Rightarrow \mu(N) \leq \frac{1}{\alpha} \int |f| \, d\mu \rightarrow 0 \text{ für } \alpha \rightarrow \infty \\ &\Rightarrow \mu(N) = 0 \end{aligned}$$

Also ist $|f| < \infty$ μ -fs. Zu zeigen bleibt die zweite Behauptung

$$\{f \neq 0\} = \{|f| > 0\} = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} \underbrace{\left\{ |f| \geq \frac{1}{n} \right\}}_{=: A_n}$$

11 [*] Fast überall bestehende Eigenschaften

$$\begin{aligned}\mu(A_n) &= \int_{A_n} 1 \, d\mu = \int_{A_n} n |f| \, d\mu \\ &= n \int_{A_n} |f| \, d\mu \leq n \int |f| \, d\mu < \infty \\ \Rightarrow \mu(A_n) &< \infty \quad \forall n \in \mathbb{N}\end{aligned}$$

Also hat $\{f \neq 0\}$ ein σ -endliches Maß.

□

Bemerkung 11.1.9. Sei $A \in \mathcal{A}$ und $f : A \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ ($A \cap \mathcal{A}$)-messbar. Wir definieren

$$\tilde{f}(x) := \begin{cases} f(x) & x \in A \\ 0 & x \notin A \end{cases}$$

Dann ist $\tilde{f} : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ \mathcal{A} -messbar und genau dann integrierbar, wenn f über A integrierbar ist. Wir sagen f ist μ -fast-überall definiert, falls $\mu(A^C) = 0$ und es gilt

$$\int \tilde{f} \, d\mu = \int_X \tilde{f} \, d\mu = \int_A f \, d\mu$$

12 [*] Konvergenzsätze

12.1 Monotone Konvergenz und das Lemma von Fatou

Satz 12.1.1 (Erweiterung von der monotonen Konvergenz). Sei $g \geq 0$ integrierbar und $f_n \geq -g \forall n \in \mathbb{N}$ und $f_n \leq f_{n+1} \forall n \in \mathbb{N}$. Dann gilt

$$\int \lim_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \int f_n d\mu = \sup_n \int f_n d\mu$$

Beweis. Sei $h_n := f_n - g \geq 0$ mit $h_n \leq h_{n+1}$. Dann ist

$$\begin{aligned} \int \lim_{n \rightarrow \infty} h_n d\mu &= \lim_{n \rightarrow \infty} \int h_n d\mu = \int (f + g) d\mu \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \int f_n d\mu + \int g d\mu \leq \int f_n d\mu + \int g d\mu \quad (\text{??}) \end{aligned}$$

□

[16. Jan] **Lemma 12.1.2** (Lemma von Fatou). Sei $(f_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{M}_+(X, \mathcal{A})$ eine Folge nicht-negativer², messbarer numerischer Funktionen. Dann gilt

$$\int \liminf_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int f_n d\mu$$

Beweis. Nach Def. ist

$$\begin{aligned} f &:= \liminf_{n \rightarrow \infty} f_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \underbrace{\inf_{k \geq n} f_k}_{=: g_n} \\ &\Rightarrow g_n \leq g_{n+1} \\ \int f d\mu &= \int \lim_{n \rightarrow \infty} g_n d\mu \stackrel{\text{Satz 9.1.8}}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \int g_n d\mu \\ &= \liminf_{n \rightarrow \infty} \int g_n d\mu \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int f_n d\mu \quad \square \end{aligned}$$

Lemma 12.1.3 (Leicht verallgemeinertes Fatou). Sei $g \geq 0$ eine μ -integrierbare Funktion und $(f_n)_n$ eine Folge von meßbaren numerischen Funktionen mit $f_n \geq -g$ μ -fs. für $n \in \mathbb{N}$ und $f_n \leq f_{n+1}$. Dann sind f_n und $f := \liminf_{n \rightarrow \infty} f_n$ quasi-integrierbar (d.h. $\int (f_n)_- d\mu < \infty$ und $\int f_- d\mu < \infty$) und es ist

$$-\infty < \int \liminf_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int f_n d\mu \leq \infty$$

Beweis. Da $(f_n)_- \leq g$ und $f_- \leq g$ μ -fs. folgt f_n und f sind quasi-integrierbar. Das heißt es existiert N_n mit $\mu(N_n) = 0$ und $f_n(x) \leq f_{n+1}(x)$ $x \in N_n^C$. Es sei $h_n := f_n + g \geq 0 \Rightarrow h_n \leq h_{n+1}$ fast überall. Das heißt

$$\begin{aligned} \liminf_{n \rightarrow \infty} h_n &= \liminf_{n \rightarrow \infty} (f_n + g) = \left(\liminf_{n \rightarrow \infty} f_n \right) + g = f + g \geq 0 \\ N &= \bigcup_n N_n \Rightarrow \mu(N) \leq \sum_{j=1}^{\infty} \mu(N_j) = C \end{aligned}$$

²Es reicht sogar, nur zu fordern, dass $0 \leq f_n$ μ -fs.

12 [*] Konvergenzsätze

und

$$f_n(x) \leq f_{n+1}(x) \quad \forall x \in N^C, n \in \mathbb{N}$$

und

$$\begin{aligned} \mu(M) &= 0 \quad f \geq -g \text{ auf } M^C \\ \mu(M_n) &= 0 \quad f_n \geq -g \text{ auf } M^C \\ \tilde{M} &= M \cup \bigcup_{n \in \mathbb{N}} M_n \cup N \Rightarrow \mu(\tilde{M}) = 0 \end{aligned}$$

und

$$f_n \leq f_{n+1} \quad f_n \geq -g \quad f \geq -g \text{ auf } M^C$$

Redefiniere f_n, f auf $f_n(x) = f(x) = 0$ für $x \in M$. Nach Lemma 12.1.2 gilt dann

$$\begin{aligned} \int \liminf_{n \rightarrow \infty} (f_n + g) d\mu &\leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int (f_n + g) d\mu \\ \Rightarrow \int \liminf_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu + \int g d\mu &\leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int f_n d\mu + \int g d\mu \\ \Rightarrow \int \liminf_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu &\leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int f_n d\mu \end{aligned} \quad \square$$

Korollar 12.1.4 (lim sup-Version von Fatou). Sei $g \geq 0$ integrierbar und $(f_n)_n$ eine Folge messbarer numerischer Funktionen mit $f_n \leq g$ μ -fast-überall. Dann gilt $f := \limsup_{n \rightarrow \infty} f_n$ ist quasi-integrierbar und

$$\int f d\mu = \int \limsup_{n \rightarrow \infty} f d\mu \geq \limsup_{n \rightarrow \infty} \int f_n d\mu$$

Beweis. Wende Lemma 12.1.3 auf $h_n := g - f_n$ an und $\liminf_{n \rightarrow \infty} h_n = g - \limsup_{n \rightarrow \infty} f_n$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \int \liminf_{n \rightarrow \infty} h_n d\mu &\leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int h_n d\mu = \int g d\mu - \limsup_{n \rightarrow \infty} \int f_n d\mu \\ \Rightarrow \int g d\mu - \int f d\mu &\leq \int g d\mu - \limsup_{n \rightarrow \infty} \int f_n d\mu \\ \Rightarrow \limsup_{n \rightarrow \infty} \int f_n d\mu &\leq \int \limsup_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu \end{aligned} \quad \square$$

12.2 Majorante Konvergenz (Lebesgue)

Satz 12.2.1. Seien $f, f_n : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ meßbare Funktionen und $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n = f$ μ -fast-überall. und es gebe eine μ -integrierbare Funktion $g \geq 0$ mit $|f_n| \leq g$ μ -fast-überall. Dann sind f_n, f integrierbar und

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int f_n d\mu = \int f d\mu \tag{1}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int |f_n| d\mu = \int |f| d\mu \tag{1'}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int |f - f_n| d\mu = 0 \tag{2}$$

Beweis.

$$\begin{aligned} \left| \int f \, d\mu - \int f_n \, d\mu \right| &= \left| \int (f - f_n) \, d\mu \right| \\ &\leq \int |f - f_n| \, d\mu \rightarrow 0 \text{ für } n \rightarrow \infty \\ \left| \int |f| \, d\mu - \int |f_n| \, d\mu \right| &= \left| \int (|f| - |f_n|) \, d\mu \right| \\ &\leq \int |f| - |f_n| \, d\mu \leq \int |f - f_n| \, d\mu \end{aligned}$$

Das heißt es gelten (1) und (1'), sofern (2) gilt. Wir beweisen zusätzlich noch (2)

$$\begin{aligned} 0 &\leq \int |f - f_n| \, d\mu \\ 0 &\leq h_n = |f - f_n| \leq |f| + |f_n| \leq |f| + |g| \leq g + g = 2g \text{ } \mu\text{-fs.} \end{aligned}$$

Nach Korollar 12.1.4 gilt dann

$$\begin{aligned} \limsup_{n \rightarrow \infty} \int h_n \, d\mu &\leq \int \limsup_{n \rightarrow \infty} h_n \, d\mu \\ &= \int \limsup_{n \rightarrow \infty} |f - f_n| \, d\mu = 0 \text{ } \mu\text{-fs.} \\ \Rightarrow \limsup_{n \rightarrow \infty} \int |f - f_n| \, d\mu &= 0 \end{aligned}$$

□

Bemerkung 12.2.2. Der vorherigen Satz gilt auch für komplexwertige Funktionen.

[17. Jan] **Satz 12.2.3.** Seien $f_n, f : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ (oder \mathbb{C}) integrierbar mit $f_n \rightarrow f$ μ -fs. Dann gilt

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int |f_n| \, d\mu = \int |f| \, d\mu$$

genau dann, wenn

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int |f - f_n| \, d\mu = 0$$

Beweis. „ \Leftarrow “:

$$\begin{aligned} \left| \int |f| \, d\mu - \int |f_n| \, d\mu \right| &= \left| \int |f| - |f_n| \, d\mu \right| \\ &\leq \int ||f| - |f_n|| \, d\mu \leq \int |f - f_n| \, d\mu \rightarrow 0 \end{aligned}$$

„ \Rightarrow “: Sei $g_n := |f_n| + |f| - |f - f_n| \geq 0$ μ -fs. Dann folgt mit Lemma 12.1.2

$$\begin{aligned} \int \liminf_{n \rightarrow \infty} g_n \, d\mu &\leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int g_n \, d\mu \\ \liminf_{n \rightarrow \infty} g_n &= 2|f| - 0 = 2|f| \\ \int g_n \, d\mu &= \int |f_n| \, d\mu + \int |f| \, d\mu - \int |f - f_n| \, d\mu \\ \Rightarrow \liminf_{n \rightarrow \infty} \int g_n \, d\mu &= 2 \int |f| \, d\mu - \limsup_{n \rightarrow \infty} \int |f - f_n| \, d\mu \\ \Rightarrow 0 &\leq \limsup_{n \rightarrow \infty} \int |f - f_n| \, d\mu \leq 0 \end{aligned}$$

□

12 [*] Konvergenzsätze

Satz 12.2.4. Seien $f, f_n : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ (oder C) meßbar und es gebe $g \geq 0$ μ -integrierbar mit $\left| \sum_{k=1}^n f_k \right| \leq g$ μ -fs. Ferner existiere $f := \sum_{n=1}^{\infty} f_n = \lim_{L \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^L f_n$ μ -fs. Dann sind f_n und f integrierbar und

$$\int f \, d\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \int f_n \, d\mu$$

Beweis. (Übung) □

13 [*] Anwendung der Konvergenzsätze

13.1 Parameter-abhängige Integrale

Satz 13.1.1. Sei T ein metrischer Raum, (X, \mathcal{A}, μ) ein Maßraum und $f : T \times X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ (oder \mathbb{C}) eine Funktion mit

- (i) $x \mapsto f(t, x)$ ist μ -integrierbar $\forall t \in T$
- (ii) $t \mapsto f(t, x)$ ist stetig in t_0 für μ -fast-alle $x \in X$
- (iii) Es existiert eine μ -integrierbare Funktion $g \geq 0$, sodass $|f(t, \cdot)| \leq g$ μ -fs. $\forall t \in T$

Dann gilt

$$\begin{aligned}\varphi : T &\rightarrow \mathbb{R} \\ t &\mapsto \int f(t, x) \mu(dx)\end{aligned}$$

ist stetig in t_0 .

Beweis. Zu zeigen: Sei $(t_n)_n \subseteq T$ mit $t_n \rightarrow t_0$, dann muss folgen $\varphi(t_n) \rightarrow \varphi(t_0)$.

Wir haben Nullmenge N_1 , sodass $f(t_n, x) \rightarrow f(t_0, x)$ für $x \in N_1^C$ und wir haben Nullmenge M_n , sodass $|f(t_n, x)| \leq g(x) \forall x \in M_n^C$. Das heißt für $M := \bigcup_n M_n$ gilt $|f(t_n, x)| \leq g(x) \forall x \in M^C$. Wir definieren $\tilde{N} := M \cup N$ auch Nullmenge und beide obigen Folgerungen gelten für alle $n \in \mathbb{N}, x \in \tilde{N}^C$. Das heißt nach Satz 12.2.1 folgt mit $f_n := f(t_n, \cdot)$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int f_n d\mu = \int f d\mu = \int f(t_0, x) \mu(dx) = \varphi(t_0) = \lim_{n \rightarrow \infty} \int f(t_n, x) \mu(dx) \quad \square$$

Lemma 13.1.2 (Differentiationslemma). Sei $I \subseteq \mathbb{R}$ eine nicht-ausgeartete Intervall (das heißt weder leer noch einpunktig) und $f : I \times X \rightarrow \mathbb{R}$ (oder \mathbb{C}) eine Funktion mit

- (i) $f(t, \cdot)$ ist μ -integrierbar $\forall t \in I$
- (ii) $t \mapsto f(t, x)$ ist differenzierbar auf I für alle $x \in X$
- (iii) Es existiert eine μ -integrierbare Funktion $g \geq 0$ mit $|f'(t, \cdot)| \leq g$ μ -fs. $\forall t \in I$ (das heißt es existiert eine Nullmenge $N \in \mathcal{A}$ mit $|f'(t, x)| \leq g(x) \forall x \in N^C, t \in I$)

Dann ist $\varphi(t) := \int f(t, x) \mu(dx)$ differenzierbar auf I und $\forall t \in I$ ist $f'(t, \cdot)$ μ -integrierbar mit

$$\varphi'(t) = \int f'(t, x) \mu(dx)$$

Beweis. Sei $t_0 \in I$ beliebig und $(t_n)_n \subseteq I$ eine Folge mit $t_n \rightarrow t_0$, wobei $t_n \neq t_0 \forall n \in \mathbb{N}$. Dann soll gelten

$$h_n(x) := \frac{f(t_n, x) - f(t_0, x)}{t_n - t_0} \rightarrow f'(t_0, x)$$

Nach Voraussetzung ist h_n μ -integrierbar.

Aus dem Mittelwertsatz der Differentialrechnung folgt

$$\frac{f(t, x) - f(t_0, x)}{t - t_0} = f'(\xi_t, x)$$

13 [*] Anwendung der Konvergenzsätze

für ein ξ_t zwischen t_0 und t

$$\Rightarrow \left| \frac{f(t_n, x) - f(t_0, x)}{t_n - t_0} \right| = |f'(\xi_{t_n}, x)| \leq g(x)$$

Nach Satz 12.2.1 folgt

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \int h_n d\mu &= \int \lim_{n \rightarrow \infty} h_n d\mu = \int f'(t_0, x) d\mu \\ \Rightarrow \varphi \text{ ist differenzierbar in } t_0 \text{ und } \varphi'(t_0) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\varphi(t_n) - \varphi(t_0)}{t_n - t_0} = \int f'(t_0, x) \mu(dx) \quad \square \end{aligned}$$

Korollar 13.1.3 (Mehrdimensionaler Fall). Sei $U \subseteq \mathbb{R}^d$ offen und $f : U \times X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ (oder \mathbb{C}) mit

- (i) $f(t, \cdot)$ ist μ -integrierbar $\forall t \in U$
- (ii) $t \mapsto f(t, x)$ ist auf U partiell differenzierbar μ -fs. in der Variablen $t_j \forall x \in X$
- (iii) Es existiert eine μ -integrierbare Funktion $g \geq 0$ mit

$$\left| \frac{\partial f}{\partial t_j}(t, x) \right| \leq g(x) \text{ } \mu\text{-fs. für alle } x \in X \text{ und } t \in U$$

Dann ist $\varphi(t) := \int f(t, x) \mu(dx)$ partiell differenzierbar bezüglich t_j und

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t_j}(x) = \int \frac{\partial f}{\partial t_j}(t, x) \mu(dx)$$

Beweis. Halte alle Variablen bis auf t_j und x fest und wende Lemma 13.1.2 an. \square

13.2 Vergleich des Riemann- mit dem Lebesgue-Integral

Satz 13.2.1. Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{K} \in \{\mathbb{R}, \mathbb{C}\}$ differenzierbar und f' beschränkt. Dann ist f' Lebesgue-integrierbar auf $[a, b]$ und

$$\int_a^b f' d\lambda = f(b) - f(a)$$

Warnung: f' braucht hierfür nicht Riemann-integrierbar zu sein.

[20. Jan] *Beweis.* (Übung) \square

Satz 13.2.2. Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ Borel-meßbar. Ist f Riemann-integrierbar (also auch beschränkt), so ist f Lebesgue-integrierbar mit

$$\int_a^b f dx = \int_a^b f d\lambda$$

Beweis. (Übung) \square

13.3 Berechnung von $\int_{\mathbb{R}} e^{-x^2} \lambda(dx)$

Korollar 13.2.3. Sei $f \geq 0$ Borel-meßbar auf (a, b) und Riemann-integrierbar über den kompakten Teilintervallen von $[a, b]$. Dann ist f genau dann Lebesgue-integrierbar über (a, b) , wenn das uneigentliche Riemann-integral

$$\lim_{\tilde{a} \searrow a, \tilde{b} \nearrow b} \int_{\tilde{a}}^{\tilde{b}} f \, dx$$

existiert und das Riemann-Integral und Lebesgue-Integral gleich sind.

Warnung:

$$\int_0^\infty \frac{\sin(x)}{x} \, dx = \lim_{b \rightarrow \infty} \int_0^b \frac{\sin(x)}{x} \, dx$$

existiert, aber ist nicht Lebesgue-integrierbar über $[0, \infty)$, denn

$$\begin{aligned} \int_1^\infty \frac{(\sin(x))_+}{x} \, d\lambda(dx) &= \infty \\ \int_1^\infty \frac{(\sin(x))_-}{x} \, d\lambda(dx) &= \infty \end{aligned}$$

Beweis. (Übung) □

13.3 Berechnung von $\int_{\mathbb{R}} e^{-x^2} \lambda(dx)$

Anwendung 13.3.1. Wir setzen

$$f(t, x) := \frac{e^{-t(1+x^2)}}{1+x^2} \quad (x \in \mathbb{R}, t \geq 0)$$

und wählen als Ansatz

$$\begin{aligned} a^2 + b^2 &\geq 2ab && (a, b \geq 0) \\ \Rightarrow 1 + x^2 &\geq 2|x| \geq |x| \\ \Rightarrow e^{-t(1+x^2)} &\leq e^{-t|x|} \\ \Rightarrow 0 \leq f(t, x) &\leq e^{-t|x|} \\ 0 \leq \int_a^b f(t, x) \lambda(dx) &\leq \int_0^n e^{-t|x|} \lambda(dx) \\ &= \int_0^n e^{-t|x|} \, dx = \frac{1}{t} \left[-e^{-tx} \right]_0^n \\ &= \frac{1}{t} \left[1 - e^{-tn} \right] \rightarrow \frac{1}{t} \\ \Rightarrow \int_0^\infty f(t, x) \lambda(dx) &\text{ existiert für } t > 0 \end{aligned}$$

Genauso zeigt sich

$$\Rightarrow \int_{-\infty}^0 f(t, x) \lambda(dx) \text{ existiert für } t > 0$$

13 [*] Anwendung der Konvergenzsätze

Wir betrachten noch den Fall $t = 0$. Dann ist

$$\begin{aligned} f(0, x) &= \frac{1}{1+x^2} \leq \frac{1}{x^2} \\ \Rightarrow f &\text{ ist Lebesgue-integrierbar auf } \mathbb{R} \text{ für } t = 0 \end{aligned}$$

Sei $x \in \mathbb{R}$ fest, dann ist $0 \leq t \mapsto f(t, x)$ stetig und $0 \leq f(t, x) \leq \frac{1}{1+x^2}$ ist eine integrierbare Majorante

$$\varphi(t) = \int_{\mathbb{R}} f(t, x) \lambda(dx) \text{ ist stetig über } t \geq 0$$

und $f(t, x)$ ist differenzierbar für $t > 0$. Für $t_0 > 0$, $t \geq t_0$

$$\begin{aligned} \partial_t f(t, x) &= \frac{-1}{1+x^2} (1+x^2) e^{-t(1+x^2)} \\ &= e^{-t(1+x^2)} \\ |\partial_t f(t, x)| &= e^{-t(1+x^2)} \leq e^{-t|x|} \leq e^{-t_0|x|} \text{ ist Majorante} \end{aligned}$$

Difffbarkeit: Für $t > t_0$ ist φ diff.-bar mit

$$\varphi'(t) = \int_{\mathbb{R}} e^{-t(1+x^2)} \lambda(dx)$$

Da $t_0 > 0$ beliebig, ist φ difffbar $\forall t > 0$. $t > 0$

$$\begin{aligned} \varphi'(t) &= - \int_{-\infty}^{\infty} e^{-t(1+x^2)} \lambda(dx) \\ &= - \int_{-\infty}^{\infty} e^{-t(1+x^2)} dx \\ &= - \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{-n}^{\infty} e^{-t(1+x^2)} dx \end{aligned}$$

Substitution $x = t^{-\frac{1}{2}}y$

$$\begin{aligned} \int_{-n}^n e^{-t(1+x^2)} dx &= t^{-\frac{1}{2}} \int_{-n\sqrt{t}}^{n\sqrt{t}} e^{-t(1+t^{-1}y)} dy \\ &= t^{-\frac{1}{2}} e^{-t} \int_{-n\sqrt{t}}^{n\sqrt{t}} e^{-y^2} dy \rightarrow t^{-\frac{1}{2}} e^{-t} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-y^2} dy \\ &=: -G t^{-\frac{1}{2}} e^{-t} \\ \varphi'(t) &= -G t^{-\frac{1}{2}} e^{-t} \end{aligned}$$

Für $0 < \alpha < s$

$$\begin{aligned} \varphi(x) - \varphi(\alpha) &= \int_{\alpha}^s \varphi'(t) dt \\ &= -G \int_{\alpha}^s e^{-t} t^{-\frac{1}{2}} dt \end{aligned}$$

Substitution $t = r^2$, $dt = 2r dr$

$$\int_{\alpha}^s e^t t^{-\frac{1}{2}} dt = 2 \int_{\sqrt{\alpha}}^{\sqrt{s}} e^{-r^2} t^{-\frac{1}{2}} 2r dr$$

13.3 Berechnung von $\int_{\mathbb{R}} e^{-x^2} \lambda(dx)$

$$\begin{aligned}
\varphi(s) - \varphi(\alpha) &= -2G \int_{\sqrt{\alpha}}^{\sqrt{s}} e^{-r^2} dr \\
\Rightarrow \varphi(s) - \varphi(0) &= \lim_{\alpha \searrow 0} (\varphi(s) - \varphi(\alpha)) \\
&= -2G \lim_{\alpha \searrow 0} \int_{\sqrt{\alpha}}^{\sqrt{s}} e^{-t^2} \lambda(dt) \\
&= -2G \int_0^{\sqrt{s}} e^{-t^2} \lambda(dt) \\
\Rightarrow \lim_{s \rightarrow \infty} (\varphi(s) - \varphi(0)) &= -2G \lim_{s \rightarrow \infty} \int_0^{\sqrt{s}} e^{-t^2} \lambda(dt) \\
&= -2G \int_0^{\infty} e^{-t^2} \lambda(dx) = -G \int_{-\infty}^{\infty} e^{-r^2} \lambda(dr) = -G^2 \\
\Rightarrow \lim_{s \rightarrow \infty} \varphi(s) &= 0 \\
\Rightarrow t\varphi(0) &= tG^2 \\
0 \leq \varphi(s) &= \int_{\mathbb{R}} \frac{e^{-s(1+x^2)}}{1+x^2} \lambda(dx) \\
\int_{-n}^n \frac{1}{1+x^2} dx &= \arctan(n) - \arctan(-n) = 2 \arctan(n) \\
\frac{d}{dx} \arctan(x) &= \frac{1}{1+x^2} \\
\Rightarrow \int_{\mathbb{R}} e^{-x^2} \lambda(dx) &= \sqrt{\pi}
\end{aligned}$$

14 [*] Die \mathcal{L}^p -Räume

14.1 Definitino der \mathcal{L}^p -Räume

Sei $p \geq 1$ und $f : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ (oder \mathbb{C}) meßbar sowie (X, \mathcal{A}) ein Messraum. Dann ist auch $|f|$ meßbar. Das heißt $|f|^p$ ist meßbar und $\{|f|^p > \alpha\} = \{|f| > \alpha^{\frac{1}{p}}\}$ für $\alpha \geq 0$.

Notation 14.1.1. Sei (X, \mathcal{A}, μ) ein Maßraum. Wir schreiben

$$N_p(f) := \left(\int_X |f|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}}$$

Es gilt $0 \leq N_p(f) \leq \infty$. Für $\alpha \in \mathbb{R}$ gilt $N_p(\alpha f) = |\alpha| N_p(f)$

Satz 14.1.2 (Hölder-Ungleichung). Sei $p > 1$ und $1 < q < \infty$ dual zu p (das heißt $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$). Dann gilt für zwei meßbare numerische Funktionen f, g auf X

$$N_1(fg) \leq N_p(f)N_q(g)$$

Beweis. Benutzt die Ungleichung von Young. Für $a, b \geq 0$ folgt $ab \leq \frac{1}{p}a^p + \frac{1}{q}b^q$.

Beweis von der Ungleichung von Young. Sei $G(a) := \frac{1}{p}a^p$. Wir wollen eine Funktion F , sodass $ab \leq G(a) + F(b) \forall a, b \geq 0$. Das ist äquivalent zu

$$F(b) \geq ab - G(a) \quad \forall a \geq 0, b \geq 0 \text{ fest}$$

Die beste Wahl von F ist die kleinste obere Schranke. Das heißt

$$\begin{aligned} F(b) &= \sup_{a \geq 0} (ab - G(a)) \\ \partial_a(ab - G(a)) &= b - G'(a) = b - a^{p-1} \\ \Rightarrow F(b) &= b \cdot b^{\frac{1}{p-1}} - \frac{1}{p} \left(b^{\frac{1}{p-1}} \right)^p \\ &= b^{\frac{1}{p-1}+1} - \frac{1}{p} b^{\frac{p}{p-1}} = \frac{1}{q} b^q \end{aligned} \quad \square$$

[23. Jan] Wir setzen $\sigma = N_p(f)$ und $\tau = N_q(g)$. Im Fall $\tau = 0$ folgt direkt, dass $N_1(fg) = 0$. In diesem Fall ist die Ungleichung erfüllt. Es sei also O.B.d.A. $\sigma > 0$ und $\tau < \infty$ (da die Ungleichung sonst trivialerweise erfüllt ist). Sei $\tilde{f} = \frac{f}{\tau}$, $\tilde{g} = \frac{g}{\sigma}$. Dann ist $N_p(\tilde{f}) = N_q(\tilde{g}) = 1$. Wir müssen also noch zeigen, dass $N_1(\tilde{f}\tilde{g}) \leq 1$ (Skalierungstrick). Es ist

$$\begin{aligned} |\tilde{f}\tilde{g}| &= |\tilde{f}| |\tilde{g}| \leq \frac{1}{p} |\tilde{f}|^p + \frac{1}{q} |\tilde{g}|^q \\ \Rightarrow N_1(\tilde{f}\tilde{g}) &= \int_X |\tilde{f}\tilde{g}| d\mu \leq \int_X \left(\frac{1}{p} |\tilde{f}|^p + \frac{1}{q} |\tilde{g}|^q \right) d\mu \\ &= \frac{1}{p} \int_X |\tilde{f}|^p d\mu + \frac{1}{q} \int_X |\tilde{g}|^q d\mu \\ &= \frac{1}{p} N_p(\tilde{f})^p + \frac{1}{q} N_q(\tilde{g})^q = \frac{1}{p} 1^p + \frac{1}{q} 1^q = 1 \end{aligned} \quad \square$$

Satz 14.1.3. Es seien $f, g : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ (oder \mathbb{C}) zwei numerische Funktionen, für die $f + g$ definiert ist und $1 \leq p < \infty$. Dann gilt

$$N_p(f + g) \leq N_p(f) + N_p(g) \quad (\text{Dreiecksungleichung})$$

Beweis.

$$\begin{aligned} |f+g|^p &\leq (|f|+|g|)^p \leq (2(|f|\vee|g|))^p \\ &= 2^p(|f|\vee|g|) = 2^p(|f|^p\vee|g|^p) \leq 2^p(|f|^p+|g|^p) \\ \Rightarrow N_p(f+g)^p &= \int_X |f+g|^p d\mu \leq 2^p(N_p(f)^p+N_p(g)^p) \end{aligned}$$

Ist $N_p(f), N_p(g) < \infty$, folgt $N_p(f+g) < \infty$

$$\begin{aligned} |f+g|^p &= |f+g||f+g|^{p-1} \leq |f||f+g|^{p-1} + |g||f+g|^{p-1} \\ \Rightarrow N_p(f+g)^p &= \int |f+g|^p d\mu \leq \int |f||f+g|^{p-1} d\mu + \int |g||f+g|^{p-1} d\mu \end{aligned}$$

Es sei $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$. Dann folgt nach Hölder

$$\begin{aligned} &\leq \left(\int |f|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}} \left(\int |f+g|^{p-1} d\mu \right)^{\frac{1}{q}} + \left(\int |g|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}} \left(\int |f+g|^{p-1} d\mu \right)^{\frac{1}{q}} \\ &= N_p(f)N_p(f+g)^{\frac{p}{q}} + N_p(g)N_p(f+g)^{\frac{p}{q}} = (N_p(f) + N_p(g))N_p(f+g)^{p-1} \\ \Rightarrow N_p(f+g) &= N_p(f+g)^p N_p(f+g)^{1-p} \leq N_p(f) + N_p(g) \quad \square \end{aligned}$$

Bemerkung 14.1.4. Ist $N_p(f) < \infty$ und $N_p(g) < \infty$, so ist f, g fast-überall reellwertig und $f+g$ fast-überall definiert.

Definition 14.1.5. Sei $f : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ (oder \mathbb{C}) meßbar. Dann heißt f p -fach integrierbar für $1 \leq p < \infty$, wenn $N_p(f) < \infty$. Wir definieren

$$\mathcal{L}^p(\mu) = \mathcal{L}^p(X, \mathcal{A}, \mu) = \left\{ \text{messbare Funktion } f : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}} : N_p(f) < \infty \right\}$$

Analog schreiben wir $\mathcal{L}_{\mathbb{C}}^p$ für den Raum solcher komplexwertiger Funktionen. Die definierten Räume sind Vektorräume. Zusätzlich gilt Homogenität und Dreiecksungleichung für N_p . Das heißt N_p ist bereits eine Halbnorm. Aber $N_p(f) \Rightarrow f = 0$ gilt nur μ -fast-überall. Das kann man beheben, indem man Äquivalenzklassen von \mathcal{L}^p -Funktionen definiert, die μ -fast-überall gleich sind.

Satz 14.1.6. Seien $f, g \in \mathcal{L}^p(\mu)$. Dann gilt $\alpha f, f+g \in \mathcal{L}^p(\mu)$ sowie $f \wedge g, f \vee g \in \mathcal{L}_{\mathbb{R}}^p(\mu)$.

Beweis. (Übung) \square

Korollar 14.1.7. Sei $f : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ eine messbare, numerische Funktion. Dann ist $f \in \mathcal{L}^p$ genau dann, wenn $f_+, f_- \in \mathcal{L}^p$.

Beweis. „ \Rightarrow “: $f_+ = f \vee 0, f_- = (-f) \vee 0$.

„ \Leftarrow “: Sind $f_{\pm} \in \mathcal{L}^p$. Dann gilt

$$\begin{aligned} f &= f_+ + (-f_-) \\ N_p(f) &\leq N_p(f_+) + N_p(f_-) < \infty \quad \square \end{aligned}$$

Satz 14.1.8. Sei $f \in \mathcal{L}^p, g \in \mathcal{L}^q$ sowie $\frac{1}{q} + \frac{1}{p} = 1$ mit $1 < p < \infty$. Dann ist $fg \in \mathcal{L}^1$.

Beweis. Hölder!

Bemerkung 14.1.9. Man schreibt auch häufig $\|f\|_p = N_p(f)$.

Korollar 14.1.10. Sei $\mu(X) < \infty$. Dann folgt aus $f \in \mathcal{L}^p(\mu) \Rightarrow \mathcal{L}^1(\mu)$ (für $1 \leq p < \infty$).

Beweis.

$$\int_X |f| d\mu = \int_X 1 \cdot |f| d\mu$$

Nach Hölder

$$\leq N_p(f)N_q(1) = (\mu(X))^{\frac{1}{q}} N_p(f)$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$$

$$\Rightarrow N_1(f) \leq (\mu(X))^{\frac{p-1}{p}} N_p(f)$$

□

Satz 14.1.11. Sei $f : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ (oder \mathbb{C}) eine p -fach integrierbare Funktion ($f \in \mathcal{L}^p(\mu)$). g sei fast-überall beschränkt, das heißt es existiert ein $\alpha > 0$ und eine Nullmenge N , sodass $|g(x)| \leq \alpha \forall x \in N^C$. Dann folgt gf ist p -fach integrierbar und $N_p(gf) \leq \alpha N_p(f)$.

Beweis. Es gilt $|fg| = |f||g| \leq |f|\alpha$ μ -fast-überall

$$\Rightarrow N_p(gf)^p = \int |fg|^p d\mu \leq \int \alpha^p |f|^p d\mu = \alpha^p \int |f|^p d\mu = \alpha^p N_p(f)^p$$

□

Notation 14.1.12.

$$\mathcal{L}^\infty(\mu) := \left\{ g : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}} \text{ messbar} : \exists M_g \geq 0, N_g \in \mathcal{A} : \mu(N_g) = 0 \text{ sodass } |g(x)| \leq M_g \forall x \in N_g^C \right\}$$

Definition 14.1.13. Wir definieren $N_\infty(g) := \inf \{M \geq 0 : |g| \leq M \text{ } \mu\text{-fast-überall}\}$. Es gilt

$$N_1(fg) \leq N_1(f)N_\infty(g)$$

Auch

$$N_\infty(f+g) \leq N_\infty(f) + N_\infty(g)$$

Konvention 14.1.14. Wenn wir die \mathcal{L}^p -Räume betrachten, beschränken wir uns auf den Fall $1 \leq p < \infty$, da für $p < 1$ Eigenschaften wie die Dreiecksungleichung verloren gehen und die resultierenden Räume sich daher von denen mit $p \geq 1$ unterscheiden.

14.2 Konvergenzsätze

Sei $1 \leq p < \infty$ und (X, \mathcal{A}, μ) ein Maßraum. N_p ist auf $\mathcal{L}^p(\mu)$ eine Halbnorm. Wir können also auch einen Abstandsbezug definieren:

$$d_p(f, g) := N_p(f - g) = \|f - g\|_p$$

Es gilt $d_p(f, g) = 0 \Rightarrow f = g$ μ -fast-überall. Wir definieren außerdem Folgen $(f_n)_n \subset \mathcal{L}^p(\mu)$. Wir sagen f_n konvergiert im p -ten Mittel gegen f , wenn

$$\lim_{n \rightarrow \infty} d_p(f_n - f) = 0$$

Man sagt auch f_n konvergiert in \mathcal{L}^p gegen f . Wir sagen außerdem, dass $(f_n)_n$ eine Cauchy-Folge in $\mathcal{L}^p(\mu)$ ist, falls

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N} : N_p(f_n - f_m) < \varepsilon \quad \forall m, n \geq N$$

[24. Jan] **Satz 14.2.1.** Sei $(f_n)_n \subseteq \mathcal{L}^p$ eine Folge für $1 \leq p < \infty$ mit $f_n \rightarrow f$ und (X, \mathcal{A}, μ) ein Maßraum. Dann gilt für alle $A \in \mathcal{A}$

$$\int_A |f_n|^p d\mu \rightarrow \int_A |f|^p d\mu$$

Beweis.

$$\begin{aligned} \int_A |f_n|^p d\mu &= \int 1_A |f_n|^p d\mu \\ &= \int |1_A f_n|^p d\mu = N_p(1_A f_n) \\ \Rightarrow |N_p(1_A f_n) - N_p(1_A f)| &\leq N_p(1_A (f_n - f)) \\ &\leq N_p(f_n - f) \rightarrow 0 \end{aligned} \quad \square$$

Satz 14.2.2 (Riesz). Konvergiere $(f_n)_n \subseteq \mathcal{L}^p$ μ -fast-überall gegen $f \in \mathcal{L}^p$. Dann gilt

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int |f_n|^p d\mu = \int |f|^p d\mu$$

genau dann, wenn

$$\lim_{n \rightarrow \infty} N_p(f_n - f) = 0$$

Beweis. „ \Rightarrow “: siehe oben.

„ \Leftarrow “: Schritt 1

$$(\alpha + \beta)^p \leq (2(\alpha \vee \beta))^p = 2^p (\alpha^p \vee \beta^p) \leq 2^p (\alpha^p + \beta^p) \quad (\alpha, \beta \geq 0)$$

Schritt 2: Es gilt

$$\begin{aligned} |\alpha - \beta|^p &\leq |\alpha| + |\beta|^p \leq 2^p (|\alpha|^p + |\beta|^p) \\ g_n &\coloneqq 2^p (|f_n|^p + |f|^p) - |f_n - f|^p \\ \lim_{n \rightarrow \infty} g_n &= 2^{p+1} |f|^p \end{aligned}$$

Nach Fatou gilt

$$\begin{aligned} 2^{p+1} \int |f|^p d\mu &= \int \liminf_{n \rightarrow \infty} f g_n d\mu \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int g_n d\mu \\ &= 2^p \left(\lim_{n \rightarrow \infty} \int |f_n|^p d\mu + \int |f|^p d\mu \right) - \limsup_{n \rightarrow \infty} \left(\int |f_n - f|^p d\mu \right) \\ &\quad - 2^{p+1} \int |f|^p dx - \limsup_{n \rightarrow \infty} (\dots) \\ \Rightarrow \limsup_{n \rightarrow \infty} \int |f_n - f|^p d\mu &= 0 \end{aligned} \quad \square$$

Lemma 14.2.3. Sei $(f_n)_n \subseteq \mathcal{M}_+(X, \mathcal{A})$. Dann gilt

$$N_p \left(\sum_{n=1}^{\infty} f_n \right) \leq \sum_{n=1}^{\infty} N_p(f_n)$$

Beweis. Sei $k \in \mathbb{N}$. Dann ist

$$\begin{aligned} N_p\left(\sum_{n=1}^k f_n\right) &\leq \sum_{n=1}^k N_p(f_n) \leq \sum_{n=1}^{\infty} N_p(f_n) \\ S_k := \sum_{n=1}^k f_n &\text{ monoton wachsend} \\ \lim_{k \rightarrow \infty} N_p(S_k)^p &= \lim_{k \rightarrow \infty} \int |S_k|^p d\mu = \int \lim_{k \rightarrow \infty} |S_k|^p d\mu \\ &= \int \left| \sum_{n=1}^{\infty} f_n \right|^p dx = N_p\left(\sum_{n=1}^{\infty} f_n\right)^p \end{aligned} \quad \square$$

Satz 14.2.4 (Maj. Konvergenz in \mathcal{L}^p). Sei $(f_n)_n$ eine Folge μ -fast-überall definierter Funktionen $f_n \in \mathcal{L}^p(\mu)$. Es existiert ein $\mathcal{L}^p \ni g \geq 0$ mit $|f_n| \leq g$ μ -fast-überall $\forall n \in \mathbb{N}$ und $\lim_{n \rightarrow \infty} |f_n|$ existiert μ -fast-überall.

Dann existiert ein $f \in \mathcal{L}^p(\mu)$, sodass $f_n \rightarrow f$ μ -fast-überall und f_n konvergiert gegen f in $\mathcal{L}^p(\mu)$.

Beweis. Entsprechend der Voraussetzungen existiert eine Nullmenge N_1 , sodass $f(x) := \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$ existiert $\forall x \in N_1^C$. Wir definieren außerdem $f(x) = 0 \forall x \in N_1$. Das heißt $|f| \leq g$ μ -fast-überall. Damit können wir folgern

$$\begin{aligned} N_p(f) &\leq N_p(g) < \infty \\ \Rightarrow f &\in \mathcal{L}^p \\ h_n := |f_n - f|^p &\leq (|f_n| + |f|)^p \leq (g + |f|)^p \leq 2^p (g^p + |f|^p) \end{aligned}$$

μ -fast-sicher. Das heißt es ist zu zeigen $\int h_n d\mu \rightarrow 0$

$$\begin{aligned} g_n &:= 2^p (g^p + |f|^p) - h_n = 2^p (g^p + |f|^p) - |f_n - f|^p \\ \Rightarrow \liminf_{n \rightarrow \infty} g_n &= \lim_{n \rightarrow \infty} g_n = 2^p (g^p + |f|^p) \text{ } \mu\text{-fas-überall} \end{aligned}$$

Ferner

$$\begin{aligned} \int 2^p (g^p + |f|^p) d\mu &= \int \liminf_{n \rightarrow \infty} g_n d\mu \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int g_n d\mu \\ &= \int 2^p (g^p + |f|^p) d\mu - \limsup_{n \rightarrow \infty} \int |f_n - f| d\mu \\ \Rightarrow 0 &\leq \limsup_{n \rightarrow \infty} \int |f_n - f|^p d\mu \leq 0 \\ \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} N_p(f_n - f)^p &= 0 \\ \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} N_p(f_n - f) &= 0 \end{aligned} \quad \square$$

Satz 14.2.5 (Vollständigkeit von \mathcal{L}^p). Sei $1 \leq p < \infty$. Jede Cauchy-Folge $(f_n)_n \subseteq \mathcal{L}^p(\mu)$ konvergiert gegen ein $f \in \mathcal{L}^p(\mu)$ im p -ten Mittel und eine geordnete Teilfolge $(f_{n_k})_k$ konvergiert μ -fast-überall gegen f . Das gilt auch für den Fall $p = \infty$.

Beweis. Sei $(f_n)_n$ eine Cauchy-Folge im \mathcal{L}^p . Dann gilt

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sup_{m \geq n} N_p(f_m - f_n) = 0 \tag{1}$$

Schritt 1: Wir zeigen, dass eine Teilfolge (f_{n_k}) existiert, sodass $\sum_{k=1}^{\infty} N_p(f_{n_{k-1}} - f_{n_k}) < \infty$. Nach (1) gilt

$$\begin{aligned} \exists n_1 \in \mathbb{N}: \sup_{m \geq n_1} N_p(f_m - f_{n_1}) &\leq \frac{1}{2} \\ \Rightarrow \exists n_2 \in \mathbb{N}: \sup_{m \geq n_2} N_p(f_m - f_{n_2}) &\leq \frac{1}{2^2} \\ &\vdots \\ \Rightarrow \exists n_k \in \mathbb{N}: \sup_{m \geq n_k} N_p(f_m - f_{n_k}) &\leq \frac{1}{2^k} \\ \Rightarrow N_p(f_{n_{k+1}} - f_{n_k}) &\leq \sup_{m \geq n_k} N_p(f_m - f_{n_k}) \\ \Rightarrow \sum_{k=1}^{\infty} N_p(f_{n_k} - f_{n_{k-1}}) &\leq \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2^k} = 1 \end{aligned}$$

Schritt 2: Definiere

$$\begin{aligned} g_k &:= f_{n_{k+1}} - f_{n_k} \\ g &:= \sum_{k=1}^{\infty} |g_k| \\ f_{n_{k+1}} &= g_k + f_{n_k} = g_k + g_{k-1} + f_{n_{k-1}} \\ &= g_k + g_{k-1} + \dots + g_1 + f_{n_1} \\ &\leq N_p \left(\sum_{k=1}^{\infty} |g_k| \right) \leq \sum_{k=1}^{\infty} N_p(|g_k|) \leq \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2^k} = 1 \\ \Rightarrow N_p(g) &\leq 1 \\ \Rightarrow g &\in \mathcal{L}^p \\ \Rightarrow g &\text{ ist } \mu\text{-fast-überall endlich} \\ \Rightarrow \exists \text{Nullmenge } M: \sum_{n=1}^{\infty} |g_k(x)| &= g(x) < \infty \quad \forall x \in M^C \\ \Rightarrow \sum_{k=1}^{\infty} g_k(x) &\text{ konvergiert} \quad \forall x \in M^C \\ \Rightarrow \lim_{L \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^L g_k(x) &\text{ existiert} \\ \Rightarrow \lim_{L \rightarrow \infty} f_{n_{L+1}}(x) &= \sum_{k=1}^{\infty} g_k(x) + f_{n_1}(x) \text{ existiert} \quad \forall x \in M^C \\ \Rightarrow (f_{n_k})_k &\text{ konvergiert } \mu\text{-fast-überall} \end{aligned}$$

Schritt 3: Definiere $f(x) := \lim_{k \rightarrow \infty} f_{n_k}(x)$ existiert für μ -fast-alle $x \in X$. Frage: Ist $f \in \mathcal{L}^p$?

□

15 [*] Produkte von σ -Algebren

[30. Jan] Situation: Wir haben endlich viele Messräume (X_j, \mathcal{A}_j) , $j \in \{1, \dots, n\}$. Wir definieren ein Produkt

$$X := \prod_{j=1}^n X_j = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$$

und für ein $x = (x_1, \dots, x_n) \in X$ ist $x_j \in X_j$. Wir definieren außerdem *Projektionsabbildungen*

$$\begin{aligned} p_j : X &\rightarrow X_j \\ x = (x_1, \dots, x_n) &\mapsto x_j \end{aligned}$$

Wir haben σ -Algebren \mathcal{A}_j und wollen nun auch eine σ -Algebra auf X definieren. Versuch für $n = 2$: Wir definieren die Elemente der σ -Algebra als $A_1 \times A_2$ mit $A_1 \in \mathcal{A}_1$, $A_2 \in \mathcal{A}_2$. Allerdings ist

$$\{A_1 \times A_2 : A_1 \in \mathcal{A}_1 \wedge A_2 \in \mathcal{A}_2\}$$

nur ein Halbring, aber im Allgemeinen keine σ -Algebra. Wir setzen also stattdessen

$$\begin{aligned} \bigotimes_{j=1}^n \mathcal{A}_j &:= \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2 \otimes \dots \otimes \mathcal{A}_n := \sigma(p_1, p_2, \dots, p_n) \\ &:= \text{kleinste } \sigma\text{-Algebra auf } X = X_1 \times \dots \times X_n, \text{ sodass} \\ &\quad \text{alle Funktionen } p_j : X \rightarrow X_j \text{ } \mathcal{A} - \mathcal{A}_j\text{-messbar ist.} \end{aligned}$$

Satz 15.1.1. Sei für $j = 1, \dots, n$ ξ_j ein Erzeuger von \mathcal{A}_j ($\mathcal{A}_j = \sigma(\xi_j)$), welcher eine Folge von Mengen $(E_{jk})_{k \in \mathbb{N}}$ mit $E_{jk} \nearrow X_j$ enthält. Dann gilt $\mathcal{A}_1 \otimes \dots \otimes \mathcal{A}_n$ wird von den Mengen $E_1 \times E_2 \times \dots \times E_n$ für $E_j \in \xi_j$ erzeugt.

Beweis. Es gilt $\mathcal{A} = \mathcal{A}_1 \otimes \dots \otimes \mathcal{A}_n = \sigma(p_1, \dots, p_n)$ genau dann, wenn p_j $\mathcal{A} - \mathcal{A}_j$ -messbar ist und \mathcal{A} die kleinste solcher σ -Algebren ist. Das heißt nach $\mathcal{A}_j = \sigma(\xi_j)$ gilt p_j ist $\mathcal{A} - \mathcal{A}_j$ -messbar. Das heißt

$$\begin{aligned} &\Leftrightarrow p_j^{-1}(E_j) \in \mathcal{A} \quad \forall E_j \in \xi_j \\ &p_j^{-1}(E_j) = X_1 \times \dots \times X_{j-1} \times E_j \times X_{j+1} \times X_n \\ &\underbrace{p_1^{-1}(E_1) \cap p_2^{-1}(E_2) \cap \dots \cap p_n^{-1}(E_n)}_{\text{ist messbar}} = E_1 \times E_2 \times \dots \times E_n \in \mathcal{A}_1 \otimes \dots \otimes \mathcal{A}_n \\ &\Rightarrow \sigma(\{E_1 \times \dots \times E_n : E_j \in \xi_j\}) \subseteq \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2 \otimes \dots \otimes \mathcal{A}_n \end{aligned}$$

Umgekehrt ist

$$E_1 \times E_2 \times \dots \times E_n \subseteq \mathcal{A}$$

für alle $E_j \in \xi_j$. Nehme für $1 \leq j \leq j$

$$\begin{aligned} F_k &:= E_{1,k} \times \dots \times E_{j-1,k} \times E_j \times E_{j+1,k} \times \dots \times E_{n,k} \subseteq \mathcal{A} \\ F_k &\nearrow X_1 \times \dots \times X_{j-1} \times E_j \times X_{j+1} \times \dots \times X_n = p_j^{-1}(E_j) \\ \Rightarrow p_j &\text{ ist } \mathcal{A} - \mathcal{A}_j\text{-messbar} \end{aligned}$$

Das heißt \mathcal{A} ist die σ -Algebra, die von $E_1 \times E_2 \times \dots \times E_n$ ($E_j \in \xi_j$) erzeugt wird. \square

Bemerkung 15.1.2. Sei $\mathcal{A}_1 = \{\emptyset, X_1\}$ und $\mathcal{A}_2 = \{\emptyset, A, A^C, X_2\}$. Außerdem sei $\xi_1 = \{\emptyset\}$, $\xi_2 = \mathcal{A}_2$. Dann ist

$$\begin{aligned}\xi_1 \times \xi_2 &= \{E_1 \times E_2 : E_1 \in \xi_1, E_2 \in \xi_2\} = \emptyset \\ \Rightarrow \sigma(\xi_1 \times \xi_2) &= \sigma(\emptyset) = \{\emptyset, X_1 \times X_2\} \neq \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2\end{aligned}$$

Das heißt wir brauchen die Bedingung, dass es ausschöpfende Folgen in den Erzeugern gibt, im vorherigen Satz.

Beispiel 15.1.3. Sei $X_j = \mathbb{R}$ und $\mathcal{A}_j = \mathcal{B}^1$, $\xi_j = \mathcal{J}^1$. Dann ist $\xi_1 \times \dots \times \xi_n = \mathcal{J}^n$. Nach Satz 15.1.1 gilt

$$\mathcal{B}^1 \otimes \dots \otimes \mathcal{B}^1 = \sigma(\xi_1 \times \dots \times \xi_n) = \sigma(\mathcal{J}^n) = \mathcal{B}^n$$

Analog gilt auch

$$\mathcal{B}^n \otimes \mathcal{B}^m = \mathcal{B}^{n+m}$$

Das heißt die d -dimensionalen Borel-Mengen sind bereits als d -fache Produkt- σ -Algebra von den eindimensionalen Borel-Mengen definiert.

16 [*] Produktmaße und der Satz von Fubini-Tonelli

16.1 Eindeutigkeit von Produktmaßen

Situation: Wir haben Maßräume $(X_j, \mathcal{A}_j, \mu_j)$, $j \in \{1, \dots, n\}$ und Erzeuger ξ_j von \mathcal{A}_j . Wann gibt es dann ein Maß π auf $\mathcal{A}_1 \otimes \dots \otimes \mathcal{A}_n$ (Produktmaß) mit

$$\pi(E_1 \times \dots \times E_n) = \mu_1(E_1) \cdot \dots \cdot \mu_n(E_n) \quad \forall E_j \in \xi_j$$

und wann ist ein solches Maß eindeutig?

Satz 16.1.1. Seien ξ_j \cap -stabile Erzeuger von σ -Algebren \mathcal{A}_j , $j \in \{1, \dots, m\}$ und es gebe Folgen $(E_{j,k})_{k \in \mathbb{N}} \subseteq \xi_j$ mit $E_{j,k} \nearrow \xi_j$ für $k \rightarrow \infty$ mit $\mu_j(E_{j,k}) < \infty \forall k$. Dann gibt es höchstens ein Produktmaß π mit der Eigenschaft

$$\pi(E_1 \times \dots \times E_n) = \mu_1(E_1) \cdot \dots \cdot \mu_n(E_n) \quad \forall E_j \in \xi_j$$

Beweis. Sei $\xi := \xi_1 \times \dots \times \xi_n$. Dann folgt nach Satz 15.1.1, dass $\mathcal{A}_1 \otimes \dots \otimes \mathcal{A}_n = \sigma(\xi)$ und ξ ist \cap -stabil. Außerdem ist

$$\left(\prod_{j=1}^n E_j \right) \cap \left(\prod_{j=1}^n F_j \right) = \prod_{j=1}^n (E_j \cap F_j)$$

was induktiv aus $E_1 \times E_2 \cap F_1 \times F_2 = (E_1 \cap F_1) \times (E_2 \cap F_2)$ ergibt. Dann gilt

$$\begin{aligned} E_k &:= E_{1,k} \times \dots \times E_{n,k} \nearrow X = X_1 \times \dots \times X_n \\ \mu_j(E_{j,k}) &< \infty \end{aligned}$$

Wenn wir nun definieren, dass

$$\pi(E_1 \times \dots \times E_n) := \prod_{j=1}^n \mu_j(E_j)$$

dann ist π durch die Definition als Prämaß nach dem Eindeutigkeitssatz eindeutig auf ein Maß fortsetzbar. Das heißt es gibt höchstens ein solches Maß. \square

16.2 Existenz von Produktmaßen

Idee für $n = 2$: Für $(X_1, \mathcal{A}_1, \mu_1)$ und $(X_2, \mathcal{A}_2, \mu_2)$ gilt

$$\begin{aligned} \mu_1(A_1) &= \int 1_{A_1}(x_1) \mu_1(dx_1) \\ \mu_2(A_2) &= \int 1_{A_2}(x_2) \mu_2(dx_2) \end{aligned}$$

Wir hätten gerne, dass

$$\begin{aligned} (\mu_1 \otimes \mu_2)(A_1 \times A_2) &\stackrel{!}{=} \mu_1(A_1) \mu_2(A_2) \\ &= \left(\int 1_{A_1}(x_1) \mu_1(dx_1) \right) \left(\int 1_{A_2}(x_2) \mu_2(dx_2) \right) \end{aligned}$$

Vergleiche mit

$$\begin{aligned} & \int \left(\int 1_{A_1}(x_1) 1_{A_2}(x_2) \mu_2(x_2) \right) \mu_1(x_1) \\ &= \int \left(\int 1_{A_2}(x_2) \mu(dx_2) \right) 1_{A_1}(x_1) \mu(dx_1) \\ &= \left(\int 1_{A_1}(x_1) \mu_2(dx_1) \right) \left(\int 1_{A_2}(x_2) \mu_1(dx_2) \right) \end{aligned}$$

[31. Jan] **Konstruktion 16.2.1** (Schnitte im Fall $n = 2$). Es sei $Q \subseteq X_1 \times X_2$ für Messräume $(X_1, \mathcal{A}_1), (X_2, \mathcal{A}_2)$. Dann definieren wir

$$\begin{aligned} Q_{x_1} &:= \{x_2 \in X_2 : (x_1, x_2) \in Q\} \subseteq X_2 \\ Q_{x_2} &:= \{x_1 \in X_1 : (x_1, x_2) \in Q\} \subseteq X_1 \end{aligned}$$

Wir haben dann

$$1_{Q_{x_1}}(x_2) = 1_Q(x_1, x_2) = 1_{Q_{x_2}}(x_1)$$

Lemma 16.2.2. Sei $Q \in \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$. Dann gilt $Q_{x_1} \in \mathcal{A}_2$ und $Q_{x_2} \in \mathcal{A}_1 \forall x_1 \in X_1, x_2 \in X_2$.

Beweis. Prinzip der guten Mengen. Für x_1 -Schnitte (x_2 -Schnitte funktionieren analog) sei

$$\mathcal{C} := \{Q \in \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2 : Q_{x_1} \in \mathcal{A}_2\} \subseteq \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$$

Wir zeigen, dass \mathcal{C} eine σ -Algebra ist:

$$\begin{aligned} (X_1 \times X_2)_{x_1} &= X_2 \\ (Q^C)_{x_1} &= (X_1 \times X_2 \setminus Q)_{x_1} = (X_2 \setminus Q_{x_1}) = (Q_{x_1})^C \\ \left(\bigcup_{n=1}^{\infty} Q_n \right)_{x_1} &= \bigcup_{n=1}^{\infty} (Q_n)_{x_1} \end{aligned}$$

Das heißt \mathcal{C} ist eine σ -Algebra in $X_1 \times X_2$ und

$$\begin{aligned} A_1 \times A_2 &\in \mathcal{C} \quad \forall A_1 \in \mathcal{A}_1, A_2 \in \mathcal{A}_2 \\ \Rightarrow \sigma(\mathcal{A}_1 \times \mathcal{A}_2) &\subseteq \mathcal{C} \subseteq \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2 \\ \Rightarrow \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2 &\subseteq \mathcal{C} \subseteq \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2 \\ \Rightarrow \mathcal{C} &= \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2 \end{aligned}$$

Noch zu zeigen: $x_1 \mapsto \mu_2(Q_{x_1})$ ist \mathcal{A}_1 -messbar. Definieren

$$\begin{aligned} s_Q(x_1) &:= \mu_2(Q_{x_1}) \\ \mathcal{D} &:= \{Q \in \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2 : s_Q \text{ ist } \mathcal{A}_1\text{-messbar}\} \\ s_{Q^C}(x_1) &= \mu_2((Q_{x_1})^C) = \mu_2(X_2 \setminus Q_{x_1}) = \mu_2(X_2) - \mu_2(Q_{x_1}) \end{aligned}$$

Für den letzten Schritt brauchen wir allerdings, dass $\mu_2(X_2) < \infty$

$$\begin{aligned} s_{\bigcup_{n=1}^{\infty} Q_n}(x_1) &= \mu_2 \left(\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} Q_n \right)_{x_1} \right) = \mu_2 \left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} (Q_n)_{x_1} \right) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \mu_2((Q_n)_{x_1}) \end{aligned}$$

□

Satz 16.2.3 (Tonelli). Sei $f \in \mathcal{M}_+(X_1 \times X_2, \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2)$. Dann ist

$$x_1 \mapsto \int_{x_2} f(x_1, x_2) \mu(dx_2)$$

\mathcal{A}_1 -messbar und

$$x_2 \mapsto \int_{x_1} f(x_1, x_2) \mu(dx_1)$$

ist \mathcal{A}_2 -messbar. Außerdem gilt insgesamt

$$\begin{aligned} \int_{X_1 \times X_2} f d(\mu_1 \otimes \mu_2) &= \int_{X_1} \int_{X_2} f(x_1, x_2) \mu_2(dx_2) \mu_1(dx_1) \\ &= \int_{X_2} \int_{X_1} f(x_1, x_2) \mu_1(dx_1) \mu_2(dx_2) \end{aligned}$$

Beweisskizze. Klar, wenn f eine einfache Funktion ≥ 0 ist. Ist f eine meßbare Funktion auf $X_1 \times X_2$, dann verwenden wir eine wachsende Folge einfacher Funktionen $(u_n)_n \nearrow f$. Dann ist

$$\int_{X_1 \times X_2} u_n d(\mu_1 \otimes \mu_2) = \int \int_{X_1} u_n(x_1, x_2) \mu_2(dx_2) \mu_1(dx_1)$$

und aus monotoner Konvergenz folgt dann die Behauptung. Dass sich die Integrale tauschen lassen, zeigt sich analog. \square

Satz 16.2.4 (Fubini). Seien $(X_j, \mathcal{A}_j, \mu_j)$ σ -endliche Maßräume für $j = 1, 2$ und $f : X_1 \times X_2 \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ $\mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$ -messbare Funktionen welche bezüglich des Produktmaßes $\mu_1 \otimes \mu_2$ integrierbar ist. Dann ist $x_1 \mapsto f(x_1, x_2)$ für festes x_2 \mathcal{A}_1 -messbar und für μ_2 -fast-alle x_2 bezüglich μ_1 integrierbar. Das heißt

$$\int f(x_1, x_2) \mu_1(dx_1)$$

existiert für x_2 fest. Und umgekehrt ist $x_2 \mapsto f(x_1, x_2)$ \mathcal{A}_2 -messbar und für alle $x_1 \in X_1$ μ_2 -integrierbar. Ferner gilt

$$\begin{aligned} \int_{X_1 \times X_2} f d(\mu_1 \otimes \mu_2) &= \int_{X_1} \left(\int_{X_2} f(x_1, x_2) \mu_2(dx_2) \right) \mu_1(dx_1) \\ &= \int_{X_2} \left(\int_{X_1} f(x_1, x_2) \mu_1(dx_1) \right) \mu_2(dx_2) \end{aligned}$$

[06. Feb] **Wichtig:** Die Voraussetzung für Satz 16.2.4 ist bereits, dass f $\mu_1 \otimes \mu_2$ -integrierbar ist. Beziehungsweise äquivalent, dass $|f|$ $\mu_1 \otimes \mu_2$ -integrierbar ist. Zu wissen, dass das der Fall ist, ist eigentlich gerade unser Ursprungsproblem, aber hier können wir Satz 16.2.3 anwenden, da $|f| \geq 0$. Das heißt, genau dann, wenn nach Tonelli eines der einzelnen Integrale von $|f|$ endlich ist, können wir dann Fubini anwenden.

Beispiel 16.2.5. Sei $f(x_1, x_2) := 1_{\mathbb{Q}}(x_1)$. Dann ist

$$\int f(x_1, x_2) \lambda^1(dx_1) = 0 \quad \forall x_2 \in X_2$$

$$\begin{aligned}
 \int f(x_1, x_2) \lambda^1(dx_2) &= \int 1_{\mathbb{Q}}(x_1) \lambda^1(dx_2) \\
 &= 1_{\mathbb{Q}}(x_1) \lambda^1(\mathbb{R}) = \infty \times 1_{\mathbb{Q}}(x_1) \\
 &= \begin{cases} 0 & x_1 \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q} \\ \infty & x_1 \in \mathbb{Q} \end{cases}
 \end{aligned}$$

Zerlege $f = f_+ - f_-$. Dann ist $|f| \mu_1 \otimes \mu_2$ -integrierbar, genau dann, wenn $f_+, f_- \mu_1 \otimes \mu_2$ -integrierbar sind. Nach Tonelli folgt

$$\begin{aligned}
 \int \int f_{\pm}(x_1, x_2) \mu_2(dx_2) \mu_1(dx_1) &< \infty \\
 \Rightarrow \int f_{\pm}(x_1, x_2) \mu_2(dx_2) &< \infty
 \end{aligned}$$

für μ_1 -fast-alle x_1

$$\int f_{\pm}(x_1, x_2) \mu_1(dx_1) < \infty$$

für μ_2 -fast-alle x_2 nach Tonelli und Symmetrie. Das heißt nach Tonelli

$$\begin{aligned}
 \int_{X_2} \int_{X_1} f_{\pm}(x_1, x_2) \mu_1(dx_1) \mu_2(dx_2) &= \int f_{\pm} d(\mu_1 \otimes \mu_2) \\
 \Rightarrow \int f d(\mu_1 \otimes \mu_2) &= \int \int f_+(x_1, x_2) \mu_1(dx_1) \mu_2(dx_2) \\
 &\quad - \int \int f_-(x_1, x_2) \mu_1(dx_1) \mu_2(dx_2) \\
 &= \int f(x_1, x_2) \mu_1(dx_1) \mu_2(dx_2)
 \end{aligned}$$

Mit den Einzelintegralen oben folgt dann

$$\Rightarrow \int \int f d(\lambda^1 \otimes \lambda^2) = 0$$

Satz 16.2.6 (Extrem nützlich). Sei (X, \mathcal{A}, μ) ein σ -endlicher Maßraum und $f : x \rightarrow [0, \infty]$ messbar sowie $\phi : [0, \infty] \rightarrow [0, \infty]$ monoton wachsend, stetig, $\phi(0) = 0$ und ϕ diff. bar auf $(0, \infty)$. Dann ist

$$\int \phi \circ f d\mu := \int_X \phi(f) d\mu = \int_0^\infty \phi'(t) \mu(\{f \geq t\}) \lambda^1(dt)$$

Beweis.

$$\begin{aligned}
 \phi(a) &= \phi(0) + \int_0^a \phi'(s) ds \\
 &= \int_0^a \phi'(s) ds = \int_0^\infty \phi'(s) 1_{[0,a]}(s) ds \\
 \Rightarrow \phi(f(x)) &= \int_0^\infty \phi'(s) 1_{[0,f(x)]}(s) ds \\
 \Rightarrow \int \phi \circ f d\mu &= \int \left(\int_0^\infty \phi'(s) 1_{[0,f(x)]}(s) ds \right) \mu(dx) \\
 &= \int \left(\int_0^\infty \phi'(s) 1_{\{f \geq s\}}(x) ds \right) \mu(dx)
 \end{aligned}$$

16 [*] Produktmaße und der Satz von Fubini-Tonelli

Wir müssten uns jetzt noch überlegen, dass $(s, x) \mapsto \phi'(s)1_{\{f \geq s\}}(x) \geq 0$ $\mathcal{B}^1 \otimes \mathcal{A}$ -messbar ist. Dann können wir mit Tonelli folgern, dass

$$\begin{aligned} &= \int_0^\infty \left(\int \phi'(s)1_{\{f \geq s\}} d\mu \right) ds \\ &= \int_0^\infty \phi'(s)\mu(\{f \geq s\}) ds \end{aligned} \quad \square$$

„Richtiger“ Beweis. Wir definieren $\mathcal{B}_+ := [0, \infty] \cap \mathcal{B}^1$ und $\lambda_+ := \lambda^1|_{\mathcal{B}_+}$. $F(x, t) = (f(x), t) \in \mathbb{R}^2$. $F : X \times \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}^2$ ist $\mathcal{A} \otimes \mathcal{B}_+$ -messbar. Dann ist $p_j(s_1, s_2) := s_j$ die Koordinatenprojektion und $p_1 \circ F = f$ sowie $f_2 \circ F(x, t) = t$. Wir betrachten $E := \{(x, t) \in X \times \mathbb{R}_+ : f(x) \geq t\} \in \mathcal{A} \otimes \mathcal{B}_+$. Dann ist $E = F^{-1}(\{(s, t) : s \geq t\}) \in \mathcal{A} \times \mathcal{B}_+$. Nach Tonelli gilt

$$\begin{aligned} \int \left(\int \phi'(t)1_E(x, t)\lambda_+(dt) \right) \mu(dx) &= \int \int \phi'(t)1_E(x, t)\mu(dx)\lambda_+(dt) \\ &= \int \phi'(t) \left(\int 1_E(x, t)\mu(dx) \right) \lambda_+(dt) \\ &= \int \phi'(t)\mu(\{f \geq t\})\lambda_+(dt) \end{aligned}$$

Ferner

$$\begin{aligned} \int_0^a \phi'(t)\lambda_+(dt) &= \int_{(0, a]} \phi'(t) dt \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{[\frac{1}{n}, a]} \phi'(t) dt = \lim_{n \rightarrow \infty} \phi(a) - \phi\left(\frac{1}{n}\right) = \phi(a) \\ \int \phi'(t)1_E(x, t)\lambda_+(dt) &= \int_{(0, \infty)} \phi'(t)1_{\{f(x) \geq t\}}\lambda^1(dt) \\ &= \int_0^{f(x)} \phi'(t) dt = \phi(f(x)) \\ \Rightarrow \int \int \phi'(t)1_E(x, t)\lambda_+(\mu(dx)) &= \int \phi(f(x))\mu(dx) \\ &= \int \phi \circ f d\mu \end{aligned} \quad \square$$

Beispiel 16.2.7. Sei $\phi(a) = a$, $\phi' = 1$. Dann ist $\phi \circ f = f$ und

$$\begin{aligned} \int f d\mu &= \int_0^\infty \phi'(t)\mu(\{f \geq t\})\lambda^1(dt) \\ &= \int_0^\infty \mu(\{f \geq t\}) dt \end{aligned}$$

Das heißt wir messen an jeder Stelle t das Maß des Levels, wo $f \geq t$. Da das in der Vorstellung einer Funktion, die stufenweise steigt und dann stufenweise wieder sinkt (was dem Querschnitt eines mehrstöckigen Hochzeitskuchen ähnelt), nennt sich diese Darstellung auch *Wedding cake representation*.

Beispiel 16.2.8. Sei $\phi(a) = a^p \Rightarrow \phi'(a) = pa^{p-1}$. Dann gilt

$$\begin{aligned} \int f^p d\mu &= p \int_0^\infty t^{p-1}\mu(\{f \geq t\}) dt \\ \int |f|^p d\mu &= p \int_0^\infty t^{p-1}\mu(\{|f| \geq t\}) dt \end{aligned}$$

[07. Feb] **Satz 16.2.9.** Zu σ -endlichen Maßen μ_j auf \mathcal{A}_j , $j = 1, \dots, n$ existiert genau ein Produktmaß π auf $(\mathcal{A}_1 \otimes \dots \otimes \mathcal{A}_n)$ mit

$$\pi(A_1 \times \dots \times A_n) = \prod_{j=1}^n \mu_j(A_j)$$

Beweis. Sei $\mathcal{E}_j := \mathcal{A}_j$ als Erzeuger. Nach dem Eindeutigkeitssatz für Maße gibt es also höchstens ein solches Produktmaß. Um auch die Existenz zu beweisen, gehen wir induktiv vor. Wir setzen

$$\begin{aligned}\pi_l &:= \mu_1 \otimes \dots \otimes \mu_l \quad 2 \leq l \leq n \\ \Rightarrow \pi_2 &= \mu_1 \otimes \mu_2 \quad \text{auf } \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2 \\ \Rightarrow \pi_3 &= \pi_2 \otimes \mu_3 \quad \text{auf } (\mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2) \otimes \mathcal{A}_3 \\ &= (\mu_1 \otimes \mu_2) \otimes \mu_3\end{aligned}$$

Wir könnten π_3 aber auch definieren als

$$\pi'_3 = \mu_1 \otimes (\mu_2 \otimes \mu_3)$$

Nach dem Eindeutigkeitssatz muss aber gelten

$$\pi_3 = \pi'_3$$

Wenn man dieses Argument iteriert, folgt die Assoziativität des Produktmaßes im Allgemeinen. Das heißt, da wir die Existenz des Produktmaß zweier Maße bereits gezeigt haben, ergibt sich induktiv die Behauptung. \square

17 [*] Integrale bezüglich Bildmaß und Jacobi Transformationsformel

17.1 Integrale bezüglich Bildmaß

Wir haben (X, \mathcal{A}) , (X', \mathcal{A}') Messräume und $T : X \rightarrow X'$ eine $\mathcal{A} - \mathcal{A}'$ -messbare Funktion sowie μ ein Maß auf (X, \mathcal{A}) . Dann ist $T(\mu)$ definiert durch $T(\mu)(A') := \mu(T^{-1}(A'))$ für $A' \in \mathcal{A}'$. Wie hängt das Integrieren bezüglich Maß und Bildmaß zusammen?

Satz 17.1.1. Seien (X, \mathcal{A}) , (X', \mathcal{A}') Messräume und $T : X \rightarrow X'$ eine $\mathcal{A} - \mathcal{A}'$ -messbare Funktion, μ ein Maß auf (X, \mathcal{A}) sowie $f : X' \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ eine Funktion. Dann gilt: Ist f bezüglich $T(\mu)$ integrierbar, so ist $f \circ T$ bezüglich μ integrierbar und es gilt

$$\int_{X'} f dT(\mu) = \int_X f \circ T d\mu \quad (1)$$

Ist $f \geq 0$, so gilt (1) immer.

Beweis. Mit algebraischer Induktion. (Siehe Übung). \square

17.2 Jacobi-Transformationsformel

Situation: Seien $X, Y \subseteq \mathbb{R}^d$ offen und $\Phi : X \rightarrow Y$ ein Diffeomorphismus (d.h. bijektiv, stetig differenzierbar und Φ^{-1} auch stetig differenzierbar)

Satz 17.2.1 (Jacobi). Sei $\Phi : X \rightarrow Y$ mit $X, Y \subseteq \mathbb{R}^d$ offen ein Diffeomorphismus. Dann gilt

(i) Für $A \in \mathcal{B}^d \cap X$

$$\lambda^d(\Phi(A)) = \int_A |\det D\Phi| d\lambda^d$$

(ii) Für alle $f : X \rightarrow [0, \infty]$ numerischen, meßbaren Funktionen

$$\begin{aligned} \int_Y f d\lambda^d &= \int_X f \circ \Phi |\det D\Phi| d\lambda^d \\ &= \int_X f(\Phi(x)) |\det D\Phi(x)| \lambda^d(dx) \end{aligned}$$

(iii) $f : Y \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ ist genau dann über Y Lebesgue-integrierbar, wenn $f \circ \Phi |\det D\Phi|$ über X Lebesgue-integrierbar ist und es gilt

$$\int_X f d\lambda^d = \int_X f \circ \Phi |\det D\Phi| d\lambda^d$$

Beweis.

(i) Es reicht zu zeigen, dass $\forall f \in \mathcal{M}_*(Y, \mathcal{B}^d \cap Y)$ ist

$$\int_Y f d\lambda^d \leq \int_X f \circ \Phi |\det D\Phi| d\lambda^d \quad (2)$$

Haben wir nämlich die Ungleichung (2), definieren wir $\Psi := \Phi^{-1}$, $h := f \circ \Phi |\det D\Phi \circ \Psi|$, dann folgt mit (2)

$$\Rightarrow \int_X h d\lambda^d \leq \int_Y h \circ \Psi |\det D\Psi| d\lambda^d$$

Außerdem ist

$$\begin{aligned} D\Psi(y) &= D(\Phi^{-1})(y) = (D\Phi(\Psi(y)))^{-1} = [D\Phi \circ \Psi]^{-1} \\ \Rightarrow \det D\Psi(y) &= \frac{1}{\det D\Phi(\Psi(y))} \end{aligned}$$

Gemeinsam folgt dann

$$\begin{aligned} \int_X f \circ \Phi |\det D\Phi| d\lambda^d &\leq ?? \\ &\leq \int_Y h \circ \Psi |\det D\Psi| d\lambda^d \\ &= \int_Y f \underbrace{|\det D\Phi \circ \Psi| |\det D\Psi|}_{=1} d\lambda^d = \int_Y f d\lambda^d \end{aligned}$$

Das heißt wir aus (2) erhalten wir auch die Ungleichung in die andere Richtung und damit Gleichheit. Wir müssen nun noch (2) beweisen: ???

□