

Stochastik I

Notizen zu einer Vorlesung an der
Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, Sommer 2024

Matthias Birkner

Vorläufige Version, 10. Juli 2024

Kommentare, Korrekturvorschläge, Hinweise auf (Tipp-)fehler gerne per Email an
`birkner@mathematik.uni-mainz.de` senden

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen der Maßtheorie	2
1.1	Mengensysteme, σ -Algebren	2
1.2	Mengenfunktionen, Maße	7
1.3	Messbare Funktionen, Zufallsvariablen	18
2	Unabhängigkeit	23
2.1	Asymptotische Ereignisse	24
3	Integral und Erwartungswert	27
3.1	Gleichgradige Integrierbarkeit	39
3.2	Parameterintegrale	42
3.3	Zur Dichtetransformation	43
3.4	Zum Zusammenhang mit dem Riemann-Integral	44
4	Gesetz der großen Zahlen	47
4.1	Fluktuationen von Summen unabhängiger Zufallsvariablen	50
5	Produktmaße und Übergangskerne	53
5.1	(Übergangs-)Kerne	56
5.2	Faltung	60
6	Zur bedingten Erwartung	61
7	Martingale (in diskreter Zeit)	68
7.1	Grundlegendes	69
7.2	Martingalkonvergenzsatz	73
7.3	Gleichgradig integrierbare Martingale und optionales Stoppen	75
7.4	\mathcal{L}^2 -Martingale	78
7.5	Zum Satz von Radon-Nikodým	82
8	Zum zentralen Grenzwertsatz	84
8.1	Zu charakteristischen Funktionen und schwacher Konvergenz	84
8.2	Zentraler Grenzwertsatz (in \mathbb{R}^1)	92

Kapitel I

Grundlagen der Maßtheorie

In diesem Kapitel geht es um grundlegende Begriffe und Sätze der Maßtheorie, insoweit sie für die Diskussion und Fundierung der Stochastik benötigt werden. Nachzulesen (und z.T. weiterführend) z.B. bei Klenke [Kl, Kapitel 1], Williams [Wi, Chapter 1], Kallenberg [Ka, Chapter 1 and 2], Durrett [Du, Appendix].

I.1 Mengensysteme, σ -Algebren

Sei Ω (nicht-leere) Menge (der „Ergebnisraum“ oder „Stichprobenraum“), $2^\Omega := \{B : B \subset \Omega\}$ die Potenzmenge.

Definition 1.1. $\mathcal{A} \subset 2^\Omega$ heißt eine σ -Algebra (über Ω), falls gilt

- i) $\Omega \in \mathcal{A}$,
- ii) $A \in \mathcal{A} \Rightarrow A^c \in \mathcal{A}$,
- iii) $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{A} \Rightarrow \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n \in \mathcal{A}$.

Falls \mathcal{A} i), ii) und

$$\text{iii')} \quad A, B \in \mathcal{A} \Rightarrow A \cap B \in \mathcal{A}$$

erfüllt, so heißt \mathcal{A} eine Algebra.

Beobachtung 1.2. 1. Ist \mathcal{A} eine σ -Algebra, so gilt auch

- iv) $\emptyset = \Omega^c \in \mathcal{A}$,
- v) $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{A} \Rightarrow \bigcap_{n=1}^{\infty} A_n = \left(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n^c \right)^c \in \mathcal{A}$

(wir verwenden die de Morgan'sche Regel: $(\bigcap_n A_n)^c = \bigcup_n A_n^c$).

2. Eine Algebra \mathcal{A} erfüllt

$$A_1, A_2, \dots, A_n \in \mathcal{A} \Rightarrow A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n \in \mathcal{A} \text{ und } A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n \in \mathcal{A}$$

3. $\{\emptyset, \Omega\}$ und 2^Ω sind σ -Algebren.

4. Eine σ -Algebra ist insbesondere eine Algebra, denn

$$A \cup B = A \cup B \cup \emptyset \cup \emptyset \cup \emptyset \cup \dots$$

Definition 1.3. Ein Paar (Ω, \mathcal{A}) mit \mathcal{A} σ -Algebra über Ω heißt ein *messbarer Raum* (auch: Messraum oder Ereignisraum).

$A \in \mathcal{A}$ heißt (\mathcal{A} -)messbare Teilmenge von Ω .

Bemerkung 1.4. Seien $\mathcal{A}_i, i \in I$ σ -Algebren über Ω (wobei I eine beliebige Indexmenge), so ist

$$\bigcap_{i \in I} \mathcal{A}_i \quad \text{ebenfalls eine } \sigma\text{-Algebra über } \Omega.$$

Beweis. *i), ii)* sind klar, zu *iii)*:

$$A_1, A_2, \dots \in \bigcap_{i \in I} \mathcal{A}_i \iff \forall n \in \mathbb{N}, i \in I : A_n \in \mathcal{A}_i,$$

somit gilt

$$A_1, A_2, \dots \in \bigcap_{i \in I} \mathcal{A}_i \implies \forall i \in I : \bigcup_n A_n \in \mathcal{A}_i \implies \bigcup_n A_n \in \bigcap_{i \in I} \mathcal{A}_i.$$

□

Definition 1.5. Für $\mathcal{C} \subset 2^\Omega$ heißt

$$\sigma(\mathcal{C}) := \bigcap \{ \mathcal{A} : \mathcal{A} \text{ ist } \sigma\text{-Algebra mit } \mathcal{C} \subset \mathcal{A} \subset 2^\Omega \},$$

die von \mathcal{C} erzeugte σ -Algebra. Dies ist offenbar die kleinste σ -Algebra über Ω , die \mathcal{C} umfasst.

Erinnerung 1.6 (Topologie). $\tau \subset 2^\Omega$ heißt eine Topologie (auf Ω), wenn gilt

- i)* $\emptyset, \Omega \in \tau$,
- ii)* $A, B \in \tau \implies A \cap B \in \tau$
- iii)* $\mathcal{F} \subset \tau$ beliebige Teilmenge $\implies \bigcup_{A \in \mathcal{F}} A \in \tau$.

$A \in \tau$ sind/heißten die offenen Teilmengen in Ω (bzgl. τ).

Wenn Ω eine Metrik d trägt (d.h. $d : \Omega \times \Omega \rightarrow [0, \infty)$ mit $\forall x, y, z \in \Omega$: i) $d(x, y) = d(y, x)$, ii) $d(x, y) = 0 \iff x = y$, iii) $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$),

so erzeugt d eine Topologie τ via

$$A \in \tau \iff \forall x \in A : \exists r > 0 : B_r(x) \subset A$$

wo $B_r(x) := \{y \in \Omega : d(x, y) < r\}$ die offene Kugel um x mit Radius r ist.

Auf $\Omega = \mathbb{R}^m$ verwenden wir (meist)

$$d(x, y) = \left(\sum_{i=1}^m (x_i - y_i)^2 \right)^{1/2}, \quad x = (x_1, \dots, x_m), \quad y = (y_1, \dots, y_m),$$

den Euklidischen Abstand.

Definition 1.7. Wenn Ω eine Topologie τ trägt, so heißt die von den offenen Mengen erzeugte σ -Algebra $\sigma(\tau)$ die *Borel- σ -Algebra*¹, man schreibt $\mathcal{B}(\Omega) := \sigma(\tau)$.

Beispiel 1.8 (Borel- σ -Algebra auf \mathbb{R}^d). Für $a = (a_1, \dots, a_d), b = (b_1, \dots, b_d) \in \mathbb{R}^d$ schreibe $a \leq b$ (bzw. $a < b$), wenn $a_i \leq b_i$ (bzw. $a_i < b_i$) für $i = 1, 2, \dots, d$,

$$[a, b] := \{x \in \mathbb{R}^d : a \leq x \leq b\} = \prod_{i=1}^d [a_i, b_i]$$

analog $(a, b], (a, b)$.

Jedes der folgenden Mengensysteme erzeugt $\mathcal{B}(\mathbb{R}^d)$:

$$\mathcal{C}_0 := \{B_r(x) : x \in \mathbb{Q}^d, r \in \mathbb{Q} \cap (0, \infty)\}$$

$$\mathcal{C}_1 := \{(-\infty, b] : b \in \mathbb{R}^d\}$$

$$\mathcal{C}_2 := \{(a, b] : a, b \in \mathbb{R}^d, a < b\}$$

$$\mathcal{C}_3 := \{[a, b] : a, b \in \mathbb{R}^d, a \leq b\}$$

$$\mathcal{C}_4 := \{(a, b) : a, b \in \mathbb{R}^d, a < b\}$$

Beweis. Es genügt für $i = 0, \dots, 4$ zu zeigen, dass $\mathcal{C}_i \subset \mathcal{B}(\mathbb{R}^d)$ und dass $\mathcal{O} \in \sigma(\mathcal{C}_i)$ für jede offene Menge $\mathcal{O} \subset \mathbb{R}^d$ (denn $\mathcal{C}_i \subset \mathcal{B}(\mathbb{R}^d) \Rightarrow \sigma(\mathcal{C}_i) \subset \mathcal{B}(\mathbb{R}^d); \tau \subset \sigma(\mathcal{C}_i) \Rightarrow \sigma(\tau) \subset \sigma(\mathcal{C}_i)$).

Betrachte \mathcal{C}_0 : Offenbar ist $\mathcal{C}_0 \subset \tau \subset \mathcal{B}(\mathbb{R}^d)$, $\mathcal{O} \subset \mathbb{R}^d$ offen lässt sich darstellen als

$$\mathcal{O} = \bigcup_{n=1}^{\infty} B_{r_n}(x_n) \in \sigma(\mathcal{C}_0)$$

mit geeigneten $x_n \in \mathbb{Q}^d \cap \mathcal{O}$ und $r_n \in \mathbb{Q}_+$. \mathcal{C}_4 kann analog behandelt werden. Wegen

$$[a, b] = \bigcap_n \left(a - \left(\frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n}\right), b + \left(\frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n}\right) \right) \in \sigma(\mathcal{C}_4),$$

$$(a, b) = \bigcup_n \left[a + \left(\frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n}\right), b - \left(\frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n}\right) \right] \in \sigma(\mathcal{C}_3)$$

ist $\sigma(\mathcal{C}_3) = \sigma(\mathcal{C}_4)$, analog $\sigma(\mathcal{C}_2) = \sigma(\mathcal{C}_4)$.

Wegen

$$(-\infty, b] = \bigcup_n [(-n, \dots, -n), b] \in \sigma(\mathcal{C}_3)$$

ist $\sigma(\mathcal{C}_1) \subset \sigma(\mathcal{C}_3)$, wegen

$$(a, b] = (-\infty, b] \setminus \left(\bigcup_{i=1}^d (-\infty, c^{(i)}) \right) \quad \text{mit } c^{(i)} = (b_1, \dots, b_{i-1}, a_i, b_{i+1}, \dots, b_d)$$

ist $\sigma(\mathcal{C}_2) \subset \sigma(\mathcal{C}_1)$. □

¹nach Émile Borel, 1871–1956

Bemerkung. Für $\Omega = \mathbb{R}$ ist

$$\mathcal{A} = \left\{ \bigcup_{j=1}^k I_j : k \in \mathbb{N}, I_1, \dots, I_k \text{ paarw. disjunkte (möglicherw. halb-unendliche) Intervalle} \right\}$$

eine Algebra.

Definition 1.9. $\mathcal{C} \subset 2^\Omega$ heißt *schnittstabil*, wenn

$$\text{für alle } A, B \in \mathcal{C} : A \cap B \in \mathcal{C}$$

Beobachtung. Die Mengensysteme $\mathcal{C}_1 - \mathcal{C}_4$ aus Bsp. 1.8 sind \cap -stabil.

Definition 1.10. $\Omega \neq \emptyset$. $\mathcal{D} \subset 2^\Omega$ heißt ein *Dynkin-System*² (auch: ein λ -System), wenn gilt

- i) $\Omega \in \mathcal{D}$,
- ii) $A \in \mathcal{D} \Rightarrow A^c \in \mathcal{D}$,
- iii) $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{D}$ paarweise disjunkt $\Rightarrow \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n \in \mathcal{D}$.

Bemerkung 1.11. 1. \mathcal{A} σ -Algebra $\Rightarrow \mathcal{A}$ Dynkin-System

- 2. \mathcal{D} Dynkin-System, so ist $\emptyset = \Omega^c \in \mathcal{D}$, für $D_1, \dots, D_n \in \mathcal{D}$ paarweise disjunkt ist $D_1 \cup D_2 \cup \dots \cup D_n = D_1 \cup D_2 \cup \dots \cup D_n \cup \emptyset \cup \emptyset \cup \dots \in \mathcal{D}$.
- 3. \mathcal{D} Dynkin-System, $D_1, D_2 \in \mathcal{D}$ mit $D_1 \subset D_2$, so ist $D_2 \setminus D_1 = (D_1 \cup D_2^c)^c \in \mathcal{D}$.
- 4. Im Allgemeinen ist ein Dynkin-System nicht abgeschlossen unter \cap (und somit keine Algebra). Betrachte z.B. Ω endlich mit $|\Omega| \in 2\mathbb{N} \cap [4, \infty)$, $\mathcal{D} := \{A \subset \Omega : |A| \text{ ist gerade}\}$ ist ein Dynkin-System.

Proposition 1.12. Ein Dynkin-System \mathcal{D} ist eine σ -Algebra g.d.w. \mathcal{D} \cap -stabil ist.

Beweis. „ \Rightarrow “ : ✓

„ \Leftarrow “ : Seien $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{D}$. Wir konstruieren (induktiv) $(D_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{D}$, D_i paarweise disjunkt mit $\bigcup_n D_n = \bigcup_n A_n$:

$$\text{Setze } D_1 := A_1, D_2 := A_2 \setminus (A_1 \cap A_2) \in \mathcal{D}, \text{ also } D_1 \cup D_2 = A_1 \cup A_2,$$

gegeben paarw. disj. $D_1, \dots, D_n \in \mathcal{D}$ mit $D_1 \cup \dots \cup D_n = A_1 \cup \dots \cup A_n$ setze

$$D_{n+1} := A_{n+1} \setminus \left(\bigcup_{j=1}^n D_j \cap A_{n+1} \right) \in \mathcal{D},$$

dann ist $\bigcup_{j=1}^{n+1} D_j = \bigcup_{j=1}^{n+1} A_j$. □

²nach Evgenii Dynkin, 1924–2014

Beobachtung und Definition 1.13. $\mathcal{D}_i, i \in I$ (beliebige Indexmenge) Dynkin-Systeme (über Ω), so ist $\bigcap_{i \in I} \mathcal{D}_i$ wiederum ein Dynkin-System.

Für $\mathcal{E} \subset 2^\Omega$ heißt

$$\delta(\mathcal{E}) := \bigcap \{ \mathcal{D} : \mathcal{D} \text{ ist Dynkin-System mit } \mathcal{E} \subset \mathcal{D} \}$$

das von \mathcal{E} erzeugte Dynkin-System. Dies ist offenbar das kleinste Dynkin-System über Ω , das \mathcal{E} umfasst.

Satz 1.14. $\mathcal{E} \subset 2^\Omega$ \cap -stabil, so gilt $\delta(\mathcal{E}) = \sigma(\mathcal{E})$.

Beweis. Stets gilt: $\delta(\mathcal{E}) \subset \sigma(\mathcal{E})$.

Zeige: $\delta(\mathcal{E})$ ist \cap -stabil.

Sei $B \in \delta(\mathcal{E})$,

$$\mathcal{D}_B := \{ A \subset \Omega : A \cap B \in \delta(\mathcal{E}) \}$$

ist ein Dynkin-System:

1) $\Omega \cap B = B \in \delta(\mathcal{E})$, also $\Omega \in \mathcal{D}_B$.

2) Sei $A \in \mathcal{D}_B$. $A^c \cap B = B \setminus (A \cap B) \in \delta(\mathcal{E})$, also $A^c \in \mathcal{D}_B$.

3) Seien $A_1, A_2, A_3, \dots \in \mathcal{D}_B$ paarweise disjunkt, dann ist

$$\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n \right) \cap B = \bigcup_{n=1}^{\infty} \underbrace{(A_n \cap B)}_{\in \delta(\mathcal{E})} \in \delta(\mathcal{E}), \quad \text{also auch } \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n \in \mathcal{D}_B.$$

Zeige $\mathcal{E} \subset \mathcal{D}_B$: Betrachte zunächst den Fall $(B =) E \in \mathcal{E}$, dann gilt $A \cap E \in \mathcal{E} \subset \delta(\mathcal{E})$ für jedes $A \in \mathcal{E}$ (denn \mathcal{E} ist nach Voraussetzung \cap -stabil), also gilt $\mathcal{E} \subset \mathcal{D}_B$ in diesem Fall.

Somit gilt auch $\delta(\mathcal{E}) \subset \mathcal{D}_B$ für jedes $E \in \mathcal{E}$.

Für $B \in \delta(\mathcal{E})$, $E \in \mathcal{E}$ ist daher $E \cap B \in \delta(\mathcal{E})$. Mithin gilt $E \in \mathcal{D}_B$ für $E \in \mathcal{E}, B \in \delta(\mathcal{E})$, d.h. $\mathcal{E} \subset \mathcal{D}_B$.

Da \mathcal{D}_B für jedes $B \in \delta(\mathcal{E})$ selbst ein Dynkin-System ist, folgt $\delta(\mathcal{E}) \subset \mathcal{D}_B$, d.h. $\delta(\mathcal{E})$ ist \cap -stabil wie behauptet.

Mit Prop. 1.12 folgt $\delta(\mathcal{E}) = \sigma(\mathcal{E})$. □

Bemerkung 1.15 (Algebren, Ringe, Halbringe). Die Mengenoperationen $A \Delta B := (A \setminus B) \cup (B \setminus A)$ („symmetrische Differenz“) und $A \cap B$ erfüllen die Axiome eines kommutativen Rings im Sinne der Algebra (Δ entspricht „+“, \cap entspricht „ \times “, \emptyset ist die additive 0, Ω ist die multiplikative 1).

Ein Ring \mathcal{A} (im Sinne der Mengensysteme) erfüllt

- i) $\emptyset \in \mathcal{A}$,
- ii) $A, B \in \mathcal{A} \Rightarrow A \cup B \in \mathcal{A}$,
- iii) $A, B \in \mathcal{A} \Rightarrow A \setminus B \in \mathcal{A}$

insbesondere gilt für einen Ring \mathcal{A} auch

$$A, B \in \mathcal{A} \Rightarrow A \cap B = A \setminus (A \setminus B) \in \mathcal{A}$$

und \mathcal{A} ist abgeschlossen unter endlichen Vereinigungen.

Ein *Halbring* \mathcal{A} (im Sinne der Mengensysteme) erfüllt $\emptyset \in \mathcal{A}$, für $A, B \in \mathcal{A}$ gilt $A \cap B \in \mathcal{A}$ und $A \setminus B = \bigcup_{j=1}^m C_j$ für geeignete paarweise disjunkte $C_1, \dots, C_m \in \mathcal{A}$

Ein „klassisches“ Beispiel eines (Mengen-)Rings über \mathbb{R} ist

$$\{\text{endl. Vereinigungen von Intervallen aus } \mathbb{R}\},$$

ein „klassisches“ Beispiel eines (Mengen-)Halbrings über \mathbb{R} ist

$$\{\text{endl. Intervalle aus } \mathbb{R}\}.$$

1.2 Mengenfunktionen, Maße

Definition 1.16. (Ω, \mathcal{A}) ein messbarer Raum. Eine Abbildung $\mu : \mathcal{A} \rightarrow [0, \infty]$ heißt ein *Maß* (auf (Ω, \mathcal{A})), wenn gilt $\mu(\emptyset) = 0$ und

$$A_1, A_2, \dots \in \mathcal{A} \text{ paarw. disjunkt} \Rightarrow \mu\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n\right) = \sum_{n=1}^{\infty} \mu(A_n)$$

(μ ist σ -additiv).

μ heißt *endliches Maß*, wenn $\mu(\Omega) < \infty$; μ heißt *Wahrscheinlichkeitsmaß*, wenn $\mu(\Omega) = 1$; μ heißt *σ -endlich*, wenn es eine Folge $(C_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{A}$ gibt mit $\bigcup_n C_n = \Omega$ und $\mu(C_n) < \infty$ für alle n .

Wenn \mathcal{A} (nur) eine Algebra ist: $\mu : \mathcal{A} \rightarrow [0, \infty]$ mit

$$\mu(A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n) = \mu(A_1) + \dots + \mu(A_n)$$

heißt ein *Inhalt* (d.h. ein Inhalt μ ist endlich additiv); μ heißt in diesem Fall ein *Prämaß*, wenn es σ -additiv ist.

Bemerkung 1.17. Sei μ Maß

1. $A, B \in \mathcal{A}, A \subset B \Rightarrow \mu(A) \leq \mu(B)$ (denn $\mu(B) = \mu(A) + \mu(B \setminus A)$)
2. $\mu(A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n) \leq \mu(A_1) + \mu(A_2) + \dots + \mu(A_n)$
3. Wenn $\mu(\Omega) < \infty$, so gilt für $A, B \in \mathcal{A}$

$$\mu(A \cup B) = \mu(A) + \mu(B) - \mu(A \cap B)$$

4. Wenn $\mu(\Omega) < \infty$, so gilt für $A_1, \dots, A_n \in \mathcal{A}, n \in \mathbb{N}$

$$\mu(A_1 \cup \dots \cup A_n) = \sum_{\emptyset \neq K \subset \{1, \dots, n\}} (-1)^{|K|-1} \mu\left(\bigcap_{k \in K} A_k\right)$$

(„Einschluss-Ausschluss-Regel“).

Beispiel. 1. Für beliebiges Ω und $a \in \Omega$ definiert für $A \in \mathcal{A}$

$$\delta_a(A) = \begin{cases} 1, & a \in A, \\ 0, & a \notin A \end{cases}$$

das Dirac-Maß δ_a im Punkt a .

2. Für abzählbares Ω (ausgestattet mit $\mathcal{A} = 2^\Omega$) ist

$$\mu(A) = \#A, \quad A \subset \Omega$$

das Zählmaß.

Satz 1.18 (Maße sind durch ihre Werte auf einem \cap -stabilen Erzeuger festgelegt). Seien μ_1, μ_2 Maße auf messbarem Raum (Ω, \mathcal{A}) , \mathcal{E} ein \cap -stabiler Erzeuger von \mathcal{A} , es gelte

$$\mu_1(C) = \mu_2(C) \quad \text{für alle } C \in \mathcal{E}$$

und es gebe $(C_n)_n \subset \mathcal{E}$ mit $C_1 \subset C_2 \subset \dots, \bigcup_n C_n = \Omega, \mu_1(C_n) < \infty$.

Dann gilt $\mu_1 = \mu_2$ auf \mathcal{A} .

Beweis. Fixiere $E \in \mathcal{E}$ mit $\mu_1(E) (= \mu_2(E)) < \infty$,

$$\mathcal{D}_E := \{A \in \mathcal{A} : \mu_1(A \cap E) = \mu_2(A \cap E)\}$$

ist ein Dynkin-System: $\Omega \in \mathcal{D}_E$ n. Vor.; sei $A \in \mathcal{D}_E$, so ist :

$$\begin{aligned} \mu_1(A^c \cap E) &= \mu_1(E) - \mu_1(A \cap E) \\ &= \mu_2(E) - \mu_2(A \cap E) = \mu_2(A^c \cap E), \end{aligned}$$

d.h. auch $A^c \in \mathcal{D}_E$; seien $A_1, A_2, A_3, \dots \in \mathcal{D}_E$ paarweise disjunkt :

$$\begin{aligned} \mu_1\left(\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n\right) \cap E\right) &= \mu_1\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} (A_n \cap E)\right) = \sum_{n=1}^{\infty} \mu_1(A_n \cap E) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \mu_2(A_n \cap E) = \mu_2\left(\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n\right) \cap E\right), \end{aligned}$$

d.h. $\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n \in \mathcal{D}_E$.

Nach Voraussetzung ist $\mathcal{E} \subset \mathcal{D}_E$, also (mit Satz 1.14)

$$\mathcal{D}_E \supset \delta(\mathcal{E}) = \sigma(\mathcal{E}) = \mathcal{A}.$$

Sei $(C_n)_n \subset \mathcal{E}$ mit $C_n \nearrow \Omega$ wie oben, $B_n := C_n \setminus C_{n-1}$ ($C_0 := \emptyset$), also

$$C_N = \bigcup_{n=1}^N B_n \quad \text{für jedes } N \in \mathbb{N}.$$

Sei $A \in \mathcal{A}$: Für $i = 1, 2$ ist

$$\begin{aligned}\mu_i(A) &= \mu_i\left(A \cap \bigcup_{n=1}^{\infty} B_n\right) = \mu_i\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} (A \cap B_n)\right) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \mu_i(A \cap B_n) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N \mu_i(A \cap B_n) \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \mu_i(A \cap C_N)\end{aligned}$$

und der Ausdruck in der letzten Zeile hängt nach obigem nicht von i ab.

Somit gilt $\mu_1(A) = \mu_2(A)$ für alle $A \in \mathcal{A}$. □

Beispiel 1.19 (W' maße auf \mathbb{R}^d und Verteilungsfunktionen). μ W'maß auf $(\mathbb{R}^d, \mathcal{B}(\mathbb{R}^d))$, $F_\mu : \mathbb{R}^d \rightarrow [0, 1]$,

$$F_\mu(x) = \mu((-\infty, x]), \quad x = (x_1, \dots, x_d) \in \mathbb{R}^d$$

ist die *Verteilungsfunktion* von μ .

μ ist durch F_μ festgelegt (nach Satz 1.18, denn $\sigma((-\infty, x] : x \in \mathbb{R}^d) = \mathcal{B}(\mathbb{R}^d)$ und $\{(-\infty, x] : x \in \mathbb{R}^d\}$ ist \cap -stabil).

Proposition 1.20. $\mathcal{G} \subset 2^\Omega$ Algebra, μ endlich additiv auf \mathcal{G} mit $\mu(\emptyset) = 0$. Wir betrachten folgende Eigenschaften:

- i) μ σ -additiv (auf \mathcal{G})
- ii) μ aufsteigend stetig : $(A_n)_n \subset \mathcal{G}$ mit $A_n \nearrow A \in \mathcal{G} \Rightarrow \mu(A_n) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \mu(A)$
- iii) μ absteigend stetig : $(A_n)_n \subset \mathcal{G}$ mit $A_n \searrow A \in \mathcal{G}$ und $\mu(A_n) < \infty \Rightarrow \mu(A_n) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \mu(A)$
- iv) μ stetig in \emptyset : $(A_n)_n \subset \mathcal{G}$ mit $A_n \searrow \emptyset$ und $\mu(A_n) < \infty \Rightarrow \mu(A_n) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$

Stets gilt i) \iff ii), iii) \iff iv), ii) \Rightarrow iii).

Wenn $\mu(\Omega) < \infty$ so gilt auch iii) \Rightarrow ii), d.h. dann sind i)-iv) äquivalent.

Beweis. „i) \iff ii)“ : $\mathcal{G} \ni A_n \nearrow A \in \mathcal{G}$, setze $B_n := A_n \setminus A_{n-1}$ (mit $A_0 := \emptyset$), dann ist $\bigcup_{n=1}^N B_n = A_N \nearrow_{N \rightarrow \infty} A$.

Wenn i) gilt, so ist

$$\mu(A) = \mu\left(\bigcup_n B_n\right) = \sum_{n=1}^{\infty} \mu(B_n) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N \mu(B_n) = \lim_{N \rightarrow \infty} \mu(A_N),$$

d.h. dann gilt auch ii).

Analog: Seien $B_1, B_2, \dots \in \mathcal{G}$ paarweise disjunkt mit

$$A_N := B_1 \cup \dots \cup B_N \nearrow_{N \rightarrow \infty} \bigcup_n B_n =: A \in \mathcal{G}.$$

Wenn ii) gilt, so gilt wie oben $\mu(A) = \mu\left(\bigcup_n B_n\right) = \sum_{n=1}^{\infty} \mu(B_n)$, d.h. dann gilt auch i).

„iii) \Rightarrow iv)^k : ✓

„iv) \Rightarrow iii)^k : Sei $A_n \searrow A \in \mathcal{G}$, $\mu(A_n) < \infty$. $\mathcal{G} \ni B_n := A_n \setminus A \searrow_{n \rightarrow \infty} \emptyset$ und $\mu(B_n) \leq \mu(A_n) < \infty$.
Somit

$$\mu(A_n) = \mu(A) + \mu(B_n) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \mu(A),$$

denn $\mu(B_n) \rightarrow 0$ n. Vor.

„ii) \Rightarrow iii)^k : Sei $A_n \searrow A \in \mathcal{G}$, $\mu(A_n) < \infty$, setze $B_n := A_1 \setminus A_n \nearrow_{n \rightarrow \infty} A_1 \setminus A$ (und $A_1 = B_n \cup A_n$),
somit (nach ii))

$$\mu(A_n) = \mu(A_1) - \mu(B_n) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \underbrace{\mu(A_1) - \mu(A_1 \setminus A)}_{=\mu(A) + \mu(A_1 \setminus A)} = \mu(A),$$

d.h. iii) gilt.

Sei weiter $\mu(\Omega) < \infty$, dann gilt „iii) \Rightarrow ii)^k : $A_n \nearrow A \in \mathcal{G}$, also $B_n := \Omega \setminus A_n \searrow \Omega \setminus A =: B$,

$$\mu(A_n) = \mu(\Omega) - \mu(B_n) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \mu(\Omega) - \mu(B) = \mu(A).$$

□

Definition 1.21. Ein Tripel $(\Omega, \mathcal{A}, \mu)$, wo \mathcal{A} eine σ -Algebra über Ω ($\neq \emptyset$) und μ ein Maß auf \mathcal{A} ist, heißt ein *Maßraum*. Wenn μ ein Wahrscheinlichkeitsmaß ist, so heißt $(\Omega, \mathcal{A}, \mu)$ (auch) ein *Wahrscheinlichkeitsraum*.

Satz 1.22 (Carathéodorys³ Maßfortsetzungssatz). $\mathcal{A} \subset 2^\Omega$ Algebra, μ Prämaß auf \mathcal{A} . Dann gibt es ein Maß $\tilde{\mu}$ auf $\sigma(\mathcal{A})$, das auf \mathcal{A} mit μ übereinstimmt.

Wenn μ σ -endlich ist, so ist $\tilde{\mu}$ dadurch eindeutig bestimmt.

Definition 1.23. $\nu : 2^\Omega \rightarrow [0, \infty]$ mit $\nu(\emptyset) = 0$,

- i) $\forall C_1 \subset C_2 \subset \Omega : \nu(C_1) \leq \nu(C_2)$ („Monotonie“)
- ii) $\forall (C_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset 2^\Omega : \nu\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} C_n\right) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \nu(C_n)$ („ σ -Subadditivität“)

heißt ein *äußeres Maß*.

Lemma 1.24. μ Prämaß auf Algebra \mathcal{A} .

$$\mu^*(C) := \inf \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \mu(A_n) : (A_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{A} \text{ mit } \bigcup_n A_n \supset C \right\}, \quad C \subset \Omega$$

ist ein äußeres Maß mit $\mu^*(A) = \mu(A)$ für $A \in \mathcal{A}$.

³Constantin Carathéodory, 1873–1950

Beweis. 1) Zeige $\mu^* = \mu$ auf \mathcal{A} : Sei $A \in \mathcal{A}$, wähle $\varepsilon > 0$.

Nach Def. gibt es $(A_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{A}$ mit $A \subset \bigcup_n A_n$ und

$$\mu^*(A) \leq \sum_n \mu(A_n) \leq \mu^*(A) + \varepsilon$$

o.E. mit $A_n \subset A$ und A_1, A_2, \dots paarweise disjunkt (sonst gehe über zu $A'_n := A_n \cap A \in \mathcal{A}$ und dann zu $A''_n := A'_n \setminus \left(\bigcup_{j=1}^{n-1} A'_j\right) \in \mathcal{A}$), somit $A = \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n$ und

$$\mu^*(A) \leq \sum_n \mu(A_n) = \mu(A) \leq \mu^*(A) + \varepsilon,$$

mit $\varepsilon \downarrow 0$ folgt $\mu^*(A) = \mu(A)$.

Insbesondere gilt $\mu^*(\emptyset) = \mu(\emptyset) = 0$.

2) Sei $C \subset C' \subset \Omega$, so gilt $\mu^*(C) \leq \mu^*(C')$, denn $C' \subset \bigcup_n A_n \Rightarrow C \subset \bigcup_n A_n$.

3) Sei $(C_n)_n \subset 2^\Omega$, wähle $\varepsilon > 0$.

Für $n \in \mathbb{N}$ gibt es $A_{n,i} \in \mathcal{A}$, $i \in \mathbb{N}$ mit $C_n \subset \bigcup_{i=1}^{\infty} A_{n,i}$ und

$$\mu^*(C_n) \leq \sum_{i=1}^{\infty} \mu(A_{n,i}) \leq \mu^*(C_n) + \frac{\varepsilon}{2^n}.$$

Sei B_m , $m \in \mathbb{N}$ eine Aufzählung von $\{A_{n,i} : n, i \in \mathbb{N}\}$, es ist

$$\bigcup_n C_n \subset \bigcup_{n,i} A_{n,i} = \bigcup_m B_m,$$

also

$$\begin{aligned} \mu^*\left(\bigcup_n C_n\right) &\leq \sum_m \mu(B_m) = \sum_n \sum_i \mu(A_{n,i}) \\ &\leq \sum_n \left(\mu^*(C_n) + \frac{\varepsilon}{2^n}\right) = \varepsilon + \sum_n \mu^*(C_n). \end{aligned}$$

Mit $\varepsilon \downarrow 0$ folgt σ -Subadditivität von μ^* . □

Definition 1.25. μ^* ein äußeres Maß. $A \subset \Omega$ heißt μ^* -messbar, wenn gilt

$$\forall C \subset \Omega : \mu^*(C) \geq \mu^*(A \cap C) + \mu^*(A^c \cap C)$$

(wegen σ -Subadditivität von μ^* gilt dann tatsächlich $\mu^*(C) = \mu^*(A \cap C) + \mu^*(A^c \cap C)$ für $C \subset \Omega$).

Beweis von Satz 1.22. Definiere μ^* wie in Lemma 1.24, setze

$$\mathcal{A}_* := \{A \subset \Omega : A \text{ ist } \mu^*\text{-messbar}\}.$$

1) Zeige $\mathcal{A} \subset \mathcal{A}_*$: Sei $A \in \mathcal{A}$ fest. Zu $C \subset \Omega$, $\varepsilon > 0$ sei $(A_n)_n \subset \mathcal{A}$ mit $C \subset \bigcup_n A_n$ und

$$\mu^*(C) \leq \sum_n \mu(A_n) \leq \mu^*(C) + \varepsilon.$$

Es ist

$$A \cap C \subset \bigcup_n \underbrace{(A \cap A_n)}_{\in \mathcal{A}}, \quad A^c \cap C \subset \bigcup_n \underbrace{(A^c \cap A_n)}_{\in \mathcal{A}},$$

also

$$\begin{aligned} \mu^*(A \cap C) + \mu^*(A^c \cap C) &\leq \sum_n \mu(A \cap A_n) + \sum_n \mu(A^c \cap A_n) \\ &= \sum_n \mu((A \cap A_n) \cup (A^c \cap A_n)) = \sum_n \mu(A_n) \leq \mu^*(C) + \varepsilon, \end{aligned}$$

mit $\varepsilon \downarrow 0$ folgt $\mu^*(C) \geq \mu^*(A \cap C) + \mu^*(A^c \cap C)$, d.h. die Behauptung.

2) Zeige: \mathcal{A}_* ist eine Algebra: $\emptyset \in \mathcal{A}_*$ ✓; $A \in \mathcal{A}_* \Rightarrow A^c \in \mathcal{A}_*$ ✓ (Def. 1.25 ist symmetrisch bzgl. Vertauschung von A und A^c)

Seien nun $A, B \in \mathcal{A}_*$: Für $C \subset \Omega$ ist

$$\begin{aligned} \mu^*(C) &= \mu^*(B \cap C) + \mu^*(B^c \cap C) \\ &= \mu^*(A \cap B \cap C) + \mu^*(A^c \cap B \cap C) + \mu^*(A \cap B^c \cap C) + \mu^*(A^c \cap B^c \cap C). \end{aligned} \quad (1.1)$$

Ersetzen wir C durch $(A \cup B) \cap C = (A \cap C) \cup (B \cap C)$ in (1.1), so ergibt sich

$$\mu^*((A \cup B) \cap C) = \mu^*(A \cap B \cap C) + \mu^*(A^c \cap B \cap C) + \mu^*(A \cap B^c \cap C) \quad (1.2)$$

(denn $\mu^*((A^c \cap B^c \cap (A \cup B) \cap C) = \mu^*(\emptyset) = 0$). Einsetzen von (1.2) in (1.1) liefert

$$\begin{aligned} \mu^*(C) &= \mu^*((A \cup B) \cap C) + \mu^*(A^c \cap B^c \cap C) \\ &= \mu^*((A \cup B) \cap C) + \mu^*((A \cup B)^c \cap C), \end{aligned}$$

da dies für beliebiges C stimmt, gilt $A \cup B \in \mathcal{A}_*$.

3) Zeige: \mathcal{A}_* ist ein Dynkin-System.

Seien $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{A}_*$ paarw. disjunkt, $A := \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n$. Für $A_1, A_2 \in \mathcal{A}_*$ mit $A_1 \cap A_2 = \emptyset$ und beliebiges $C \subset \Omega$ liefert (1.2)

$$\mu^*((A_1 \cup A_2) \cap C) = \mu^*(A_1^c \cap A_2 \cap C) + \mu^*(A_1 \cap A_2^c \cap C),$$

induktiv folgt für $n \in \mathbb{N}$

$$\mu^*\left(\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) \cap C\right) = \sum_{i=1}^n \mu^*(A_i \cap C) \quad \text{für alle } C \subset \Omega.$$

Für $n \in \mathbb{N}$ ist $\bigcup_{i=1}^n A_i \in \mathcal{A}_*$ nach 2), also gilt für jedes $C \subset \Omega$

$$\begin{aligned} \mu^*(C) &= \mu^*\left(\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) \cap C\right) + \underbrace{\mu^*\left(\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right)^c \cap C\right)}_{\supset A^c \cap C} \\ &\geq \sum_{i=1}^n \mu^*(A_i \cap C) + \mu^*(A^c \cap C). \end{aligned}$$

Mit $n \rightarrow \infty$ folgt

$$\mu^*(C) \geq \sum_{i=1}^{\infty} \mu^*(A_i \cap C) + \mu^*(A^c \cap C). \quad (1.3)$$

Andererseits ist

$$\begin{aligned} \mu^*(C) &= \mu^*((A \cap C) \cup (A^c \cap C)) = \mu^*\left(\left(\bigcup_{i=1}^{\infty} (A_i \cap C)\right) \cup (A^c \cap C)\right) \\ &\leq \sum_{i=1}^{\infty} \mu^*(A_i \cap C) + \mu^*(A^c \cap C) \end{aligned} \quad (1.4)$$

(wir verwenden die σ -Subadditivität von μ^*). (1.3) und (1.4) liefern

$$\mu^*(C) = \sum_{i=1}^{\infty} \mu^*(A_i \cap C) + \mu^*(A^c \cap C), \quad (1.5)$$

da $\mu^*(A \cap C) = \mu^*\left(\left(\bigcup_{i=1}^{\infty} (A_i \cap C)\right)\right) \leq \sum_{i=1}^{\infty} \mu^*(A_i \cap C)$ und $\mu^*(C) \leq \mu^*(A \cap C) + \mu^*(A^c \cap C)$ gilt (nochmals σ -Subadditivität von μ^*), impliziert dies

$$\mu^*(C) = \mu^*(A \cap C) + \mu^*(A^c \cap C),$$

also $A \in \mathcal{A}_*$.

4) 2) und 3) zeigen mit Prop. 1.12, dass \mathcal{A}_* eine σ -Algebra ist; wegen 1) gilt $\sigma(\mathcal{A}) \subset \mathcal{A}_*$.

Zeige: μ^* ist σ -additiv auf \mathcal{A}_* :

Seien $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{A}_*$ paarweise disjunkt, setze $A := \bigcup_{i=1}^{\infty} A_i \in \mathcal{A}_*$ an Stelle von C in (1.5) ein:

$$\mu^*\left(\bigcup_{i=1}^{\infty} A_i\right) = \sum_{i=1}^{\infty} \mu^*(A_i)$$

(denn $A \cap A_i = A_i$ n. Vor., $\mu^*(A^c \cap A) = \mu^*(\emptyset) = 0$). Somit leistet $\tilde{\mu} := \mu^*|_{\sigma(\mathcal{A})}$ das Gewünschte.

5) Zur Eindeutigkeit: Seien $A_1 \subset A_2 \subset \dots \in \mathcal{A}$ mit $A_n \nearrow \Omega$, $\mu(A_n) < \infty$ für alle $n \in \mathbb{N}$, $\tilde{\mu}_1, \tilde{\mu}_2$ zwei Maße auf $\sigma(\mathcal{A})$ mit $\mu = \tilde{\mu}_1 = \tilde{\mu}_2$ auf \mathcal{A} . Dann gilt $\tilde{\mu}_1 = \tilde{\mu}_2$ auf $\sigma(\mathcal{A})$ nach Satz 1.18, da \mathcal{A} \cap -stabil ist. \square

Erinnerung 1.26. Eine *Verteilungsfunktion* (einer Wahrscheinlichkeitsverteilung auf \mathbb{R}) ist eine Funktion $F : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$, die nicht-fallend und rechtsstetig ist mit $\lim_{x \rightarrow \infty} F(x) = 1$, $\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0$.

Satz 1.27. Zu jeder Verteilungsfunktion F gehört genau ein W -maß μ_F auf $(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}))$ mit

$$\mu_F((-\infty, x]) = F(x), \quad x \in \mathbb{R}.$$

Beweis. Betrachte

$$\begin{aligned} J_1 &:= \{(a, b] : a < b\}, \quad J_2 := \{(-\infty, b] : b \in \mathbb{R}\}, \quad J_3 := \{(a, \infty) : a \in \mathbb{R}\}, \quad J := J_1 \cup J_2 \cup J_3, \\ \mathcal{G} &:= \left\{ \bigcup_{j=1}^n I_j : n \in \mathbb{N}, I_j \in J \right\} \cup \{\emptyset\}. \end{aligned}$$

\mathcal{G} ist eine Algebra.

Für $A = \bigcup_{k=1}^n I_k \in \mathcal{G}$ mit $I_k = (a_k, b_k] (\cap \mathbb{R})$ definieren wir

$$\mu(A) := \sum_{k=1}^n (F(b_k) - F(a_k))$$

(mit Setzungen $F(-\infty) = 0, F(\infty) = 1$).

μ ist wohldefiniert: Wenn man $I_k = (a_k, b_k]$ ersetzt durch $I_k = I'_k \cup I''_k$ mit $I'_k = (a_k, c_k], I''_k = (c_k, b_k]$ und einem $c_k \in (a_k, b_k)$, so ändert sich wegen

$$F(b_k) - F(a_k) = (F(b_k) - F(c_k)) + (F(c_k) - F(a_k))$$

der Wert von $\mu_F(A)$ nicht.

Es gilt $\mu(\emptyset) = 0$ und $\mu(\mathbb{R}) = 1$, μ ist additiv.

Zur σ -Additivität: Nach Prop. 1.20 genügt es zu zeigen, dass μ stetig in \emptyset ist.

a) (nahezu Kompaktheit)

Zeige: Für $I \in \mathcal{J}$ und $\varepsilon > 0$ gibt es $u, v \in \mathbb{R}, u \leq v$ mit

$$[u, v] \subset I \quad \text{und} \quad \mu((u, v]) > \mu(I) - \varepsilon$$

Für $I = (a, b] \in \mathcal{J}_1$ verwende $v = b$ und verwende, dass wegen Rechtsstetigkeit von F gilt

$$\lim_{u \downarrow a} \mu((u, v]) = \lim_{u \downarrow a} F(v) - F(u) = F(b) - F(a) = \mu((a, b]),$$

für $I \in \mathcal{J}_2$ bzw. $I \in \mathcal{J}_3$ verwende $\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0$ bzw. $\lim_{x \rightarrow \infty} F(x) = 1$.

Analog: Für allgemeines $A \in \mathcal{G}$ und $\varepsilon > 0$ gibt es $B \in \mathcal{G}$ beschränkt mit $\overline{B} \subset A$ und $\mu(A \setminus B) < \varepsilon$.

b) Seien $A_n \in \mathcal{G}, A_1 \supset A_2 \supset \dots$ mit $\inf_{n \in \mathbb{N}} \mu(A_n) \geq \varepsilon$ für ein $\varepsilon > 0$.

Zeige: Dann gilt $\bigcap_n A_n \neq \emptyset$

Für $n \in \mathbb{N}$ wähle nach a) $B_n \in \mathcal{G}, B_n$ beschränkt (also $\overline{B_n}$ kompakt) mit $B_n \subset \overline{B_n} \subset A_n$ und $\mu(A_n \setminus B_n) \leq 2^{-n-1}\varepsilon$, es ist

$$\mu\left(A_n \setminus \bigcap_{k=1}^n B_k\right) \leq \mu\left(\bigcup_{k=1}^n (A_k \setminus B_k)\right) \leq \sum_{k=1}^n 2^{-k-1}\varepsilon = \frac{\varepsilon}{2} \sum_{k=1}^n 2^{-k} < \frac{\varepsilon}{2}$$

(für die erste Ungleichung verwende $A_k \supset A_n$ für $k \leq n$), demnach

$$\mu\left(\bigcap_{k=1}^n B_k\right) = \mu(A_n) - \mu\left(A_n \setminus \bigcap_{k=1}^n B_k\right) \geq \frac{\varepsilon}{2},$$

somit ist

$$K_n := \bigcap_{k=1}^n \overline{B_k} \supset \bigcap_{k=1}^n B_k \neq \emptyset$$

kompakt und nicht leer mit $K_n \subset A_n, K_n \supset K_{n+1}$.

Es folgt

$$\bigcap_{n=1}^{\infty} A_n \supset \bigcap_{n=1}^{\infty} K_n \neq \emptyset$$

(Cantor'scher Durchschnittsatz).

□

Lemma 1.28. (Ω, \mathcal{A}) messbarer Raum, μ_1, μ_2, \dots Maße darauf, $c_1, c_2, \dots \geq 0$, so ist $\mu := \sum_n c_n \mu_n$ ebenfalls ein Maß auf (Ω, \mathcal{A}) .

Wenn alle μ_n W -Maße sind und $\sum_n c_n = 1$, so ist auch μ ein W -Maß.

Beweis. Offenbar ist $\mu(A) = \sum_n c_n \mu_n(A) \geq 0$ für $A \in \mathcal{A}$ und $\mu(\emptyset) = 0$.

Zur σ -Additivität: Seien $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{A}$ paarw. disjunkt,

$$\begin{aligned} \mu\left(\bigcup_{j=1}^{\infty} A_j\right) &= \sum_n c_n \mu_n\left(\bigcup_{j=1}^{\infty} A_j\right) = \sum_n c_n \sum_j \mu_n(A_j) \\ &= \sum_j \sum_n c_n \mu_n(A_j) = \sum_j \mu(A_j) \end{aligned}$$

□

Satz 1.29 (Konstruktion des (Borel-)Lebesgue-Maßes⁴ auf \mathbb{R}). Es gibt genau ein Maß λ auf $(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}))$ mit $\lambda((a, b]) = b - a$ für $a < b$.

Beweis. 1) $F_1(x) := (x \wedge 1) \vee 0$ ist Verteilungsfunktion, sei $\lambda_{(0,1]}$ das nach Satz 1.27 zugehörige W -Maß.

Offenbar gilt $\lambda_{(0,1]}(A) = 0$ wenn $A \subset (0, 1]^c$,

$$\lambda_{(0,1]}((u, v]) = F_1(v) - F_1(u) = v - u \quad \text{für } 0 \leq u < v \leq 1.$$

Analog betrachte für $m \in \mathbb{Z}$: $F_m(x) := ((x - m + 1) \wedge 1) \vee 0$ mit zugehörigem Maß $\lambda_{(m-1, m]}$; es erfüllt

$$\lambda_{(m-1, m]}(A) = \lambda_{(m-1, m]}((A \cap (m-1, m])), \quad A \in \mathcal{B}(\mathbb{R}^d)$$

und $\lambda_{(m-1, m]}((u, v]) = (v \wedge m) - (u \vee (m-1))$.

$\lambda := \sum_{m \in \mathbb{Z}} \lambda_{(m-1, m]}$ ist ein Maß mit

$$\lambda((a, b]) = \sum_{m=\lceil a \rceil}^{\lfloor b \rfloor} (b \wedge (m+1)) - (a \vee m) = b - a \quad \text{für } a < b.$$

Eindeutigkeit folgt aus Satz 1.18 (die Menge der Intervalle $(a, b]$ ist ein \cap -stabiler Erzeuger von $\mathcal{B}(\mathbb{R}^d)$, vgl. Bsp. 1.8; λ ist σ -endlich, wähle z.B. $C_n := [-n, n]$, $n \in \mathbb{N}$ als \mathbb{R} ausschöpfende Folge). □

Bemerkung 1.30. 1. Das Lebesgue-Maß λ auf $(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}))$ ist translationsinvariant, d.h. $\lambda(A + x) = \lambda(A)$ für $A \in \mathcal{B}(\mathbb{R})$, $x \in \mathbb{R}$.

2. (Analogon von Satz 1.27 für allgemeine endliche Maße) Jede beschränkte, nicht-fallende, rechtsstetige Funktion $F : \mathbb{R} \rightarrow [0, \infty)$ mit $\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0$ steht via

$$\mu_F((-\infty, x]) = F(x), \quad x \in \mathbb{R}$$

in eindeutiger Beziehung zu einem endlichen Maß μ_F auf $(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}))$.

⁴Henri Lebesgue, 1875–1941

3. (Lebesgue-Stieltjes-Maße) Zu $F : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ nicht-fallend und rechtsstetig gibt es genau ein Maß μ_F auf $(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}))$ mit

$$\mu_F((a, b]) = F(b) - F(a), \quad -\infty < a < b < \infty.$$

Betrachte dazu (analog zum Beweis von Satz 1.29) $F_m(x) = F((x \wedge m) \vee (m - q)) - F(m - 1)$, $m \in \mathbb{Z}$ und zugehöriges μ_{F_m} aus 2), $\mu_F := \sum_{m \in \mathbb{Z}} \mu_{F_m}$ leistet das Gewünschte.

Eindeutigkeit folgt aus Satz 1.18.

Zum d -dimensionalen Fall:

Definition 1.31. $F : \mathbb{R}^d \rightarrow [0, 1]$ heißt eine d -dimensionale Verteilungsfunktion, wenn es folgenden Bedingungen genügt:

1. F rechtsstetig, d.h. $x_n \searrow x$ (koordinatenweise) $\Rightarrow F(x_n) \rightarrow F(x)$
2. $F(x_n) \rightarrow 1$ wenn $x_n \rightarrow (+\infty, \dots, +\infty)$
3. $F(x_n) \rightarrow 0$ wenn $\min_{i=1, \dots, d} x_{n,i} \rightarrow -\infty$
4. Für $x = (x_1, \dots, x_d) < y = (y_1, \dots, y_d)$ (koordinatenweise), parametrisiere die Ecken des d -Quaders $(x, y]$ mit $\{1, 2\}^d$ via $\{u = (z_1^{(i_1)}, \dots, z_d^{(i_d)}) : i_1, \dots, i_d \in \{1, 2\}\}$ wo $z_j^{(1)} = x_j$, $z_j^{(2)} = y_j$, es muss gelten

$$\sum_{u \text{ Ecken}} (-1)^{\#\{1 \leq m \leq d : i_m = 1\}} F(u) \left(= \mu_F((x, y]) \right) \geq 0$$

Satz 1.32. \mathcal{W} -maße auf $(\mathbb{R}^d, \mathcal{B}(\mathbb{R}^d))$ und d -dimensionale Verteilungsfunktionen F stehen in 1-1-Beziehung via

$$\mu_F((-\infty, x]) = F(x), \quad x \in \mathbb{R}^d.$$

Beweisskizze. Beweis analog zum Beweis von Satz 1.27, man verwendet als Algebra

$$\mathcal{G} = \left\{ \bigcup_{j=1}^n I_{j,1} \times I_{j,2} \times \dots \times I_{j,d} : n \in \mathbb{N}, I_{j,k} \in J \right\},$$

die Menge der endlichen Vereinigungen (ggfs. verallgemeinerter) d -dimensionaler Quader. □

Korollar 1.33 (d -dimensionale Produktmaße). Seien μ_1, \dots, μ_d \mathcal{W} -maße auf $(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}))$, dann gibt es genau ein \mathcal{W} -maß μ auf $(\mathbb{R}^d, \mathcal{B}(\mathbb{R}^d))$ mit

$$\mu((-\infty, x]) = \prod_{i=1}^d \mu_i((-\infty, x_i]), \quad x = (x_1, \dots, x_d) \in \mathbb{R}^d.$$

Man schreibt $\mu = \mu_1 \otimes \dots \otimes \mu_d$ es gilt

$$\mu(A_1 \times A_2 \times \dots \times A_d) = \mu_1(A_1) \cdot \mu_2(A_2) \cdot \dots \cdot \mu_d(A_d), \quad A_1, \dots, A_d \in \mathcal{B}(\mathbb{R}). \quad (1.6)$$

Beweis. Sei F_i die Verteilungsfunktion von $\mu_i, i = 1, \dots, d$,

$$F(x) := F_1(x_1)F_2(x_2)\cdots F_d(x_d), \quad x = (x_1, \dots, x_d) \in \mathbb{R}^d.$$

Zeige: F ist d -dim. Verteilungsfunktion:

$$a = (a_1, \dots, a_d) < (b_1, \dots, b_d) = b$$

$$\begin{aligned} \prod_{i=1}^d \mathbf{1}(a_i < x_i \leq b_i) &= \prod_{i=1}^d (\mathbf{1}(x_i \leq b_i) - \mathbf{1}(x_i \leq a_i)) \\ &= \sum_{K \subset \{1, \dots, d\}} (-1)^{|K|} \mathbf{1}(x \leq e(a, b, K)) \end{aligned}$$

$$\text{mit } e(a, b, K)_i = \begin{cases} a_i, & i \in K, \\ b_i, & i \notin K \end{cases}$$

F erfüllt

$$\begin{aligned} \sum_{K \subset \{1, \dots, d\}} (-1)^{|K|} F(e(a, b, K)) &= \sum_{K \subset \{1, \dots, d\}} (-1)^{|K|} \left(\prod_{i \in K} F_i(a_i) \right) \left(\prod_{i \notin K} F_i(b_i) \right) \\ &= \prod_{i=1}^d (F(b_i) - F(a_i)) \geq 0 \end{aligned}$$

für beliebiges $a, b \in \mathbb{R}^d, a < b$, d.h. F ist d -dim. Verteilungsfunktion.

Zur Formel (1.6): Nach obigen gilt (1.6), wenn $A_i = (-\infty, x_i]$ für gewisse $x_i \in \mathbb{R}$. Seien x_2, \dots, x_d fixiert, betrachte für $A \in \mathcal{B}(\mathbb{R})$

$$\mu'_1(A) := \mu(A \times (-\infty, x_2] \times (-\infty, x_3] \times \cdots \times (-\infty, x_d]), \quad \mu''_1(A) := \mu_1(A) \prod_{i=2}^d \mu((-\infty, x_i]).$$

μ'_1 und μ''_1 sind Maße auf $(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}))$, die auf allen Halbointervallen der Form $(-\infty, x_1]$ übereinstimmen, nach Satz 1.18 gilt somit $\mu'_1 = \mu''_1$, d.h. in (1.6) dürfen wir $(-\infty, x_1]$ durch eine allgemeine Borel-Menge A_1 ersetzen.

Fixieren wir nun $A_1 \in \mathcal{B}(\mathbb{R}), x_3, \dots, x_d \in \mathbb{R}$ und betrachten für $A \in \mathcal{B}(\mathbb{R})$

$$\mu'_2(A) := \mu(A_1 \times A \times (-\infty, x_3] \times \cdots \times (-\infty, x_d]), \quad \mu''_2(A) := \mu_1(A_1) \mu_2(A) \prod_{i=3}^d \mu((-\infty, x_i]),$$

so folgt analog $\mu'_2 = \mu''_2$, d.h. in (1.6) dürfen wir $(-\infty, x_1]$ und $(-\infty, x_2]$ jeweils durch eine allgemeine Borel-Menge A_1 bzw. A_2 ersetzen. Iteration dieses Arguments zeigt (1.6) allgemein. \square

Satz 1.34 (d -dimensionales Lebesguemaß). *Es gibt genau ein translationsinvariantes Maß λ auf $(\mathbb{R}^d, \mathcal{B}(\mathbb{R}^d))$ mit $\lambda((0, 1]^d) = 1$.*

Beweis. Als Übung. \square

Definition 1.35 (Nullmengen). $(\Omega, \mathcal{A}, \mu)$ Maßraum. $N \in \mathcal{A}$ heißt (μ) -Nullmenge, wenn $\mu(N) = 0$ gilt.

$$\mathcal{N}_\mu := \{N \subset \Omega : \exists A \in \mathcal{A} \text{ mit } N \subset A \text{ und } \mu(A) = 0\}$$

Offenbar gilt

$$N_1, N_2, \dots \in \mathcal{N}_\mu \Rightarrow \bigcup_j N_j \in \mathcal{N}_\mu$$

Sprechweisen μ -fast überall (abgekürzt μ -f.ü.), bzw. auch μ -fast sicher, abgekürzt μ -f.s., wenn μ ein \mathbb{W} -maß ist: Eine Eigenschaft

$$E(\omega) \text{ gilt } \mu\text{-f.ü., wenn } \{\omega \in \Omega : E(\omega) \text{ gilt nicht}\} \in \mathcal{N}_\mu$$

Für $A, B \in \mathcal{A}$ schreibt man $A = B \pmod{\mu}$, wenn $A \Delta B \in \mathcal{N}_\mu$.

Bericht 1.36 (Maßvervollständigung, siehe z.B. [Kl, Bem. 1.70]).

$$\mathcal{A}_\mu = \sigma(\mathcal{A} \cup \mathcal{N}_\mu) = \{B \subset \Omega : \exists A \in \mathcal{A} : A \Delta B \in \mathcal{N}_\mu\}$$

ist eine σ -Algebra und

$$\mu(B) := \mu(A) \quad \text{wenn } A \in \mathcal{A} \text{ mit } A \Delta B \in \mathcal{N}_\mu$$

ist wohldefinierte Fortsetzung von μ auf \mathcal{A}_μ .

1.3 Messbare Funktionen, Zufallsvariablen

Definition 1.37. $(\Omega, \mathcal{A}), (\Omega', \mathcal{A}')$ messbare Räume. Eine Abbildung $f : \Omega \rightarrow \Omega'$ heißt \mathcal{A} - \mathcal{A}' -messbar (oft auch nur *messbar*, wenn die beteiligten σ -Algebren aus dem Kontext klar sind), wenn gilt

$$\forall B \in \mathcal{A}' : f^{-1}(B) = \{\omega \in \Omega : f(\omega) \in B\} \in \mathcal{A}.$$

Beobachtung 1.38. 1. (Indikatorfunktion). $A \in \mathcal{A}, \mathbf{1}_A : \Omega \rightarrow \{0, 1\}$,

$$\mathbf{1}_A(\omega) = \begin{cases} 1, & \text{falls } \omega \in A, \\ 0, & \text{falls } \omega \notin A \end{cases}$$

ist messbar ($\mathbf{1}_A^{-1}(\{0\}) = A^c, \mathbf{1}_A^{-1}(\{1\}) = A \in \mathcal{A}$).

2. (Komposition messbarer Abbildungen). $(\Omega_1, \mathcal{A}_1), (\Omega_2, \mathcal{A}_2), (\Omega_3, \mathcal{A}_3)$ messbare Räume, $f : \Omega_1 \rightarrow \Omega_2$ und $g : \Omega_2 \rightarrow \Omega_3$ seien $(\mathcal{A}_1$ - \mathcal{A}_2 - bzw. \mathcal{A}_2 - \mathcal{A}_3 -)messbar. Dann ist $h := g \circ f$ $(\mathcal{A}_1$ - \mathcal{A}_3 -)messbar, denn für $B \in \mathcal{A}_3$ ist

$$h^{-1}(B) = f^{-1}\left(\underbrace{g^{-1}(B)}_{\in \mathcal{A}_2}\right) \in \mathcal{A}_1.$$

Beobachtung und Definition 1.39 (Erzeugte σ -Algebra). Sei (Ω', \mathcal{A}') messbarer Raum, $\Omega \neq \emptyset$, $h : \Omega \rightarrow \Omega'$.

$$\sigma(h) = \{h^{-1}(B) : B \in \mathcal{A}'\}$$

ist die kleinste σ -Algebra auf Ω , bezüglich der h messbar ist. (Falls \mathcal{A} σ -Algebra auf Ω und h \mathcal{A} - \mathcal{A}' -messbar, so gilt natürlich $\sigma(h) \subset \mathcal{A}$.)

$\sigma(h)$ heißt die von h erzeugte σ -Algebra.

Sind allgemeiner $(\Omega_i, \mathcal{A}_i)$, $i \in I$ messbarere Räume und $h_i : \Omega \rightarrow \Omega_i$ (I beliebige Indexmenge), so bezeichnet $\sigma(h_i, i \in I)$ die kleinste σ -Algebra auf Ω , bezüglich der alle h_i , $i \in I$ messbar sind.

Lemma 1.40 (Messbarkeit auf Erzeugermenge genügt). $f : \Omega \rightarrow \Omega'$, $\mathcal{E}' \subset 2^{\Omega'}$ mit $\sigma(\mathcal{E}') = \mathcal{A}'$, so ist f \mathcal{A} - \mathcal{A}' -messbar g.d.w.

$$\forall B \in \mathcal{E}' : f^{-1}(B) = \{\omega \in \Omega : f(\omega) \in B\} \in \mathcal{A}.$$

Beweis. „ \Rightarrow “ : \checkmark

„ \Leftarrow “ : $\tilde{\mathcal{A}} := \{B \subset \Omega' : f^{-1}(B) \in \mathcal{A}\}$ ist eine σ -Algebra, n. Vor. gilt $\sigma(\mathcal{E}') = \mathcal{A}'$, also auch $\tilde{\mathcal{A}} = \mathcal{A}'$. \square

Im Fall reellwertiger Funktionen lassen wir oft auch die Werte $+\infty$ oder $-\infty$ zu (Übergang von \mathbb{R} zu $\overline{\mathbb{R}} = \mathbb{R} \cup \{-\infty\} \cup \{+\infty\}$). Man spricht dann auch von „numerischen Funktionen“.

Korollar 1.41. 1. Insbesondere für $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ (wobei \mathbb{R} die Borel- σ -Algebra $\mathcal{B}(\mathbb{R})$ trägt) genügt es (mit Bsp. 1.8) zu prüfen, dass

$$f^{-1}(I) \in \mathcal{A} \quad \text{für alle Intervalle } I = [a, b]$$

(oder auch für alle offenen Intervalle, oder für alle Halboffene Intervalle $(-\infty, b]$, $b \in \mathbb{R}$, etc.) gilt.

2. (Topologischer Fall). Wenn $f : \Omega \rightarrow E$, wobei E topologischer Raum mit Borel- σ -Algebra $\mathcal{B}(E)$, so genügt für Messbarkeit

$$f^{-1}(\mathcal{O}) \in \mathcal{A} \quad \text{für jedes offene } \mathcal{O} \subset E.$$

Insbesondere: falls Ω selbst ein topologischer Raum (versehen mit seiner Borel- σ -Algebra) ist, so sind alle stetigen Abbildungen messbar.

Definition 1.42 (Produkttraum, Produkt- σ -Algebra). I endl. oder abzählbar, (S_i, \mathcal{A}_i) , $i \in I$ messbare Räume $S = \times_{i \in I} S_i = \{s = (s_i)_{i \in I} : s_i \in S_i\}$,

$$\mathcal{A}_{\otimes} := \sigma\left(\left\{\prod_{i \in I} A_i : A_i \in \mathcal{A}_i\right\}\right)$$

(die von den „verallgemeinerten Quadern“ erzeugte σ -Algebra) heißt die *Produkt- σ -Algebra* (der \mathcal{A}_i).

Mit den Koordinatenabbildungen (oder Projektionsabbildungen) $\pi_i : S \rightarrow S_i$, $\pi_i((s_j)_{j \in I}) = s_i$ ist $\mathcal{A}_{\otimes} = \sigma(\pi_i, i \in I)$.

Lemma 1.43 (Messbarkeit im Produktfall). S wie in Def. 1.42, $f : \Omega \rightarrow S$, $f(\omega) = (f_i(\omega))_{i \in I}$ ist messbar g.d.w.

$$f_i : \Omega \rightarrow S_i \quad \text{messbar für jedes } i \in I.$$

Beweis. „ \Rightarrow “ : $\pi_i : S \rightarrow S_i$ ist messbar, mit Beob. 1.38 daher auch $f_i = \pi_i \circ f$

„ \Leftarrow “ : Mengen $A = \prod_{i \in I} A_i$ mit $A_i \in \mathcal{A}_i$ erzeugen \mathcal{A}_{\otimes} und für ein solches A ist

$$f^{-1}(A) = \{\omega \in \Omega : f_i(\omega) \in A_i, i \in I\} = \bigcap_{i \in I} f_i^{-1}(A_i) \in \mathcal{A}_{\otimes}$$

n. Vor., Beh. folgt mit Lemma 1.40. □

Beobachtung 1.44. $S = \overline{\mathbb{R}}^{\infty}$, $\inf : S \rightarrow \mathbb{R}$ mit $\inf((x_n)_{n \in \mathbb{N}}) = \inf_n x_n$ und $\sup : S \rightarrow \mathbb{R}$ mit $\sup((x_n)_{n \in \mathbb{N}}) = \sup_n x_n$ sind $\mathcal{B}(\overline{\mathbb{R}}^{\infty})$ - $\mathcal{B}(\overline{\mathbb{R}})$ -messbar:

Für $x \in \mathbb{R}$ ist

$$\begin{aligned} \inf^{-1}([x, \infty]) &= [x, \infty] \times [x, \infty] \times [x, \infty] \times \dots \in \mathcal{B}(\overline{\mathbb{R}}^{\infty}), \\ \sup^{-1}([-\infty, x]) &= [-\infty, x] \times [-\infty, x] \times [-\infty, x] \times \dots \in \mathcal{B}(\overline{\mathbb{R}}^{\infty}). \end{aligned}$$

Lemma 1.45. E topologischer Raum mit Borel- σ -Algebra $\mathcal{B}(E)$, $f_1, f_2, \dots : \Omega \rightarrow E$ seien (\mathcal{A} - $\mathcal{B}(E)$ -) messbar, $f : \Omega \rightarrow E$ und es gelte

$$f(\omega) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(\omega) \quad \text{für alle } \omega \in \Omega$$

Dann ist f (\mathcal{A} - $\mathcal{B}(E)$ -)messbar.

Beweis. Sei $\mathcal{O} \subset E$ offen, dann ist

$$f^{-1}(\mathcal{O}) = \bigcup_n \bigcap_{m \geq n} f_m^{-1}(\mathcal{O}) \in \mathcal{A}$$

□

Definition 1.46 (Elementare Funktionen). (Ω, \mathcal{A}) messbarer Raum. $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ der Form $f(\omega) = \sum_{i=1}^n a_i \mathbf{1}_{A_i}(\omega)$ mit $n \in \mathbb{N}$, $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{R}$, $A_1, \dots, A_n \in \mathcal{A}$ heißt eine *elementare Funktion*.

Lemma 1.47. (Ω, \mathcal{A}) messbarer Raum.

1. Elementare Funktionen sind messbar.
2. Für \mathcal{A} - $\mathcal{B}(\overline{\mathbb{R}})$ -messbares $f : \Omega \rightarrow [0, \infty]$ gibt es eine Folge von elementaren Funktionen f_n mit $f_n \nearrow_{n \rightarrow \infty} f$.
3. Jedes \mathcal{A} - $\mathcal{B}(\overline{\mathbb{R}})$ -messbare $f : \Omega \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ kann punktweise durch elementare Funktionen approximiert werden.

Beweis. 1. Schreibe $f = \sum_{i=1}^n a_i \mathbf{1}_{A_i}$ und o.E. seien die A_i paarweise disjunkt mit $\bigcup_{i=1}^n A_i = \Omega$, dann ist $f^{-1}(B) = \bigcup_{i: a_i \in B} A_i \in \mathcal{A}$ für $B \subset \mathbb{R}$.

2. Wähle z.B. $f_n(\omega) = (2^{-n} \lfloor 2^n f(\omega) \rfloor) \wedge n$.

3. Zerlege $f = f^+ - f^-$, dann verwende 2. □

Lemma 1.48 (Faktorisierungslemma). $(\Omega, \mathcal{A}), (\Omega', \mathcal{A}')$ messbare Räume, $f : \Omega \rightarrow \Omega'$ (\mathcal{A} - \mathcal{A}' -)messbar. Dann ist $g : \Omega \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ $\sigma(f)$ - $\mathcal{B}(\overline{\mathbb{R}})$ -messbar g.d.w.

es gibt ein \mathcal{A}' - $\mathcal{B}(\overline{\mathbb{R}})$ messbares $h : \Omega' \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ mit $g = h \circ f$.

Beweis. „ \Leftarrow “ : ✓

„ \Rightarrow “ : Sei zunächst $g \geq 0$. Zeige: Es gibt $A_1, A_2, \dots \in \sigma(f), \alpha_1, \alpha_2, \dots \in [0, \infty)$ mit

$$g = \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \mathbf{1}_{A_n} \tag{1.7}$$

Sei dazu $g_n := (2^{-n} \lfloor 2^n g \rfloor) \wedge n, B_{n,i} := \{\omega : g_n(\omega) - g_{n-1}(\omega) = i2^{-n}\}, i = 0, 1, \dots, 2^n$ ($B_{n,i} \in \sigma(f)$ n. Vor.), also

$$g_n - g_{n-1} = \sum_{i=0}^{2^n} i2^{-n} \mathbf{1}_{B_{n,i}}$$

Umsummieren $(n, i) \mapsto m \in \mathbb{N}$ liefert

$$g = g_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (g_n - g_{n-1}) = \sum_{m=1}^{\infty} \alpha_m \mathbf{1}_{A_m}$$

mit geeigneten $\alpha_m \in [0, \infty), A_m \in \sigma(f)$.

Wegen $A_m \in \sigma(f)$ gibt es $B_m \in \mathcal{A}'$ mit $f^{-1}(B_m) = A_m$, setze

$$h := \sum_{m=1}^{\infty} \alpha_m \mathbf{1}_{B_m}$$

Im allgemeinen Fall wähle zu g^+, g^- wie oben h^+, h^- , setze $h := h^+ - h^-$. □

Definition 1.49 (Bildmaß). $(\Omega, \mathcal{A}, \mu)$ Maßraum, (Ω', \mathcal{A}') messbarer Raum, $f : \Omega \rightarrow \Omega'$ messbar.

$$\mathcal{A}' \ni A' \mapsto \mu(f^{-1}(A'))$$

ist ein Maß auf (Ω', \mathcal{A}') , es heißt das *Bildmaß* von μ unter f und wird mit $\mu \circ f^{-1}$ bezeichnet (manchmal schreibt man auch $f(\mu)$).

1.3.1 Erinnerung: Wahrscheinlichkeitstheoretische Interpretation

Definition 1.50. $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ W'raum, (S, \mathcal{A}) messbarer Raum. $A \in \mathcal{F}$ heißen *Ereignisse*, eine $(\mathcal{F}$ - \mathcal{A} -)messbare Abbildung $X : \Omega \rightarrow S$ heißt eine *Zufallsvariable* (mit Werten in S), oft kürzt man Zufallsvariable als ZV ab, auch die Benennung *Zufallsgröße* ist verbreitet.

Für $B \in \mathcal{A}$ schreibt man

$$\{X \in B\} := X^{-1}(B) \quad (\in \mathcal{F})$$

für das Ereignis „ X nimmt einen Wert in B an“.

Das Bildmaß $\mathbb{P} \circ X^{-1}$ heißt die *Verteilung* von X , man schreibt auch $\mathcal{L}(X)$ und $X \sim \mu$, falls $\mathbb{P} \circ X^{-1} = \mu$.

Beispiel 1.51. 1. μ W'maß auf (S, \mathcal{A}) , so ist $X = \text{Id}_S$ ZV auf (S, \mathcal{A}, μ) mit $X \sim \mu$.

Insbesondere ist $U := \text{Id}_{[0,1]}$ eine uniform auf $[0, 1]$ verteilte ZV auf $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P}) = ([0, 1], \mathcal{B}([0, 1]), \lambda_{[0,1]})$.

2. F Verteilungsfunktion auf \mathbb{R} , so gibt es eine ZV X auf $([0, 1], \mathcal{B}([0, 1]), \mathbb{P})$, $\mathbb{P} = \lambda_{[0,1]}$, mit $\mathbb{P}(X \leq x) = F(x)$, $x \in \mathbb{R}$.

Kapitel 2

Unabhängigkeit

Definition 2.1. $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ W'raum.

1. $\mathcal{C}_i \subset \mathcal{F}, i \in I$ (I beliebige Indexmenge) heißen *unabhängig*, wenn für jedes endliche $J \subset I, J \neq \emptyset$

$$\text{für beliebige } A_j \in \mathcal{C}_j, j \in J \text{ gilt } \mathbb{P}\left(\bigcap_{j \in J} A_j\right) = \prod_{j \in J} \mathbb{P}(A_j).$$

2. Ereignisse $A_i \in \mathcal{F}, i \in I$ heißen unabhängig, wenn dies für $\mathcal{C}_i := \{\emptyset, A_i, A_i^c, \Omega\}$ gilt.
3. ZVn $X_i, i \in I$ heißen unabhängig, wenn $\sigma(X_i), i \in I$ unabhängig sind.

Lemma 2.2. $\mathcal{C}_i \subset \mathcal{F}, i \in I, \mathcal{C}_i \cup \{\emptyset\}$ seien \cap -stabil. Dann gilt

$$(\mathcal{C}_i, i \in I) \text{ u.a. g.d.w. } (\sigma(\mathcal{C}_i), i \in I) \text{ u.a.}$$

Beweis. (Es ist nur „ \Rightarrow “ zu zeigen). Wir zeigen: Für $J \subset J' \subset I, |J'| < \infty$ gilt

$$\mathbb{P}\left(\bigcap_{j \in J'} A_j\right) = \prod_{j \in J'} \mathbb{P}(A_j) \quad \text{für jede Wahl } \begin{cases} A_j \in \sigma(\mathcal{C}_j), & j \in J, \\ A_j \in \mathcal{C}_j, & j \in J' \setminus J \end{cases} \quad (2.1)$$

per Induktion nach $n := |J|$.

Nach Voraussetzung gilt (2.1) für $n = 0$.

Nehmen wir an, (2.1) ist für alle J mit $n := |J|$ erfüllt. Betrachte $\tilde{J} := J \cup \{j_0\}$ wo $|J| = n$ und $j_0 \in I \setminus J$; sei $J \subset J' \subset I$.

Seien $A_j \in \sigma(\mathcal{C}_j)$ für $j \in J, A_j \in \mathcal{C}_j$ für $j \in J' \setminus \tilde{J}$, betrachte folgende Maße (auf (Ω, \mathcal{F})):

$$\mu(A) := \mathbb{P}\left(A \cap \bigcap_{j \in J' \setminus \{j_0\}} A_j\right), \quad \tilde{\mu}(A) := \mathbb{P}(A) \cdot \prod_{j \in J' \setminus \{j_0\}} \mathbb{P}(A_j), \quad A \in \mathcal{F}.$$

Nach Induktionsannahme stimmen μ und $\tilde{\mu}$ auf $\mathcal{C}_{j_0} \cup \{\emptyset, \Omega\}$, das ein \cap -stabiler Erzeuger von $\sigma(\mathcal{C}_{j_0})$ ist, überein, mit Satz 1.18 also

$$\mu = \tilde{\mu} \text{ auf } \sigma(\mathcal{C}_{j_0}),$$

d.h. (2.1) gilt für $n + 1$. □

Bemerkung 2.3. 1. $\mathcal{F} \ni A_i, i \in I$ sind u.a. g.d.w.

$$\mathbb{P}\left(\bigcap_{j \in J} A_j\right) = \prod_{j \in J} \mathbb{P}(A_j) \quad \text{für jedes endliche } J \subset I.$$

2. $\mathcal{C}_i \subset \mathcal{F}, i \in I$ u.a., $I = \bigcup_{k \in K} I_k$ (wobei K eine beliebige Menge ist), so sind auch $\tilde{\mathcal{C}}_k := \bigcup_{i \in I_k} \mathcal{C}_i$, $k \in K$ unabhängig.

Beweis. 1. folgt aus Lemma 2.2, denn $\{A_i\}$ ist ein \cap -stabiler Erzeuger der σ -Algebra $\{\emptyset, A_i, A_i^c, \Omega\}$.

2. ✓ (zu $A_j \in \tilde{\mathcal{C}}_{k_j}, j = 1, \dots, n$ mit k_1, \dots, k_n paarw. verschieden gibt es i_1, \dots, i_n paarw. verschieden mit $A_j \in \mathcal{C}_{i_j}$)

□

Beispiel. 1) X_1, X_2, \dots, X_d reellwertige ZVn sind u.a. g.d.w.

$$\mathbb{P}\left(\bigcap_{j=1}^d \{X_j \leq x_j\}\right) = \prod_{j=1}^d \mathbb{P}(X_j \leq x_j) \quad \text{für alle } x = (x_1, \dots, x_d) \in \mathbb{R}^d$$

(d.h. g.d.w. ihre gemeinsame Verteilungsfunktion Produktgestalt hat).

2) $X_i, i \in I$ diskrete ZVn, d.h. $X_i : \Omega \rightarrow S_i$ messbar (wobei S_i endlich oder abzählbar, mit σ -Algebra $\mathcal{A} = 2^{S_i}$).

$(X_i, i \in I)$ unabhängig g.d.w.

$$\text{für } J \subset I, |J| < \infty, x_j \in S_j \text{ gilt } \mathbb{P}\left(\bigcap_{j \in J} \{X_j = x_j\}\right) = \prod_{j \in J} \mathbb{P}(X_j = x_j).$$

2.1 Asymptotische Ereignisse

In diesem Abschnitt geht es um Ereignisse, die gewissermaßen (wenn man bei der Nummerierung an einen Zeitablauf denkt) „unendlich spät“ entschieden werden.

Definition 2.4. Seien A_1, A_2, \dots Ereignisse,

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} A_n := \bigcap_{n \geq 1} \bigcup_{m \geq n} A_m$$

(„unendlich viele der A_n treten ein“),

$$\liminf_{n \rightarrow \infty} A_n := \bigcup_{n \geq 1} \bigcap_{m \geq n} A_m$$

(„von einem (möglicherweise zufälligen) Index ab treten alle A_n ein“).

Beachte: Es ist $\left(\liminf_{n \rightarrow \infty} A_n\right)^c = \limsup_{n \rightarrow \infty} A_n^c$, also mit Indikatorvariablen ausgedrückt

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \mathbf{1}_{A_n}(\omega) = \mathbf{1}_{\limsup_n A_n}(\omega), \quad \liminf_{n \rightarrow \infty} \mathbf{1}_{A_n}(\omega) = \mathbf{1}_{\liminf_n A_n}(\omega).$$

Lemma 2.5 (Lemma von Borel-Cantelli¹). Seien A_1, A_2, \dots Ereignisse, $A = \limsup_{n \rightarrow \infty} A_n$.

$$1. \sum_{n=1}^{\infty} \mathbb{P}(A_n) < \infty \implies P(A) = 0$$

$$2. \sum_{n=1}^{\infty} \mathbb{P}(A_n) = \infty \text{ und die } A_1, A_2, \dots \text{ seien unabhängig} \implies P(A) = 1$$

Beweis. 1. Für jedes n ist

$$0 \leq \mathbb{P}(A) \leq \mathbb{P}\left(\bigcup_{m \geq n} A_m\right) \leq \sum_{m=n}^{\infty} \mathbb{P}(A_m) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0,$$

also gilt $\mathbb{P}(A) = 0$.

2. Es ist

$$\begin{aligned} \mathbb{P}\left(\bigcap_{m \geq n} A_m^c\right) &= \lim_{n' \rightarrow \infty} \mathbb{P}\left(\bigcap_{m=n}^{n'} A_m^c\right) = \lim_{n' \rightarrow \infty} \prod_{m=n}^{n'} (1 - \mathbb{P}(A_m)) \\ &= \prod_{m=n}^{\infty} (1 - \mathbb{P}(A_m)) = \exp\left(\sum_{m=n}^{\infty} \log(1 - \mathbb{P}(A_m))\right) \\ &\leq \exp\left(-\sum_{m=n}^{\infty} \mathbb{P}(A_m)\right) = 0 \end{aligned}$$

für jedes n (verwende $\log(1-x) \leq -x$ für $x \in [0, 1]$), also $\mathbb{P}(A^c) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \mathbb{P}\left(\bigcap_{m \geq n} A_m^c\right) = 0$. \square

Beispiel 2.6. Seien X_1, X_2, \dots u.a. $\{0, 1\}$ -wertig mit $\mathbb{P}(X_i = 1) = p_i \in (0, 1)$, so gilt

$$\{X_i = 1 \text{ } \infty\text{-oft}\} \text{ f.s. g.d.w. } \sum_{i=1}^{\infty} p_i = \infty.$$

(Dies ist insbesondere erfüllt, wenn $p_i \equiv p > 0$: wenn man eine p -Münze unendlich oft wirft, wird man mit Sicherheit unendlich viele Erfolge beobachten.)

Andererseits: Mit $A_n := \{X_1 = 1\}$, $n \in \mathbb{N}$ ist $\limsup_n A_n = A_1$, also $\mathbb{P}(\limsup_n A_n) = p_1 \in (0, 1)$, d.h. man kann in Lemma 2.5, 2. nicht (ohne weitere Voraussetzungen) auf die Unabhängigkeit verzichten.

Definition 2.7. (Ω, \mathcal{A}) messbarer Raum, $\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2, \dots \subset \mathcal{A}$ Teil- σ -Algebren.

$$\mathcal{T} := \bigcap_{n \geq 1} \mathcal{T}_n \quad \text{mit } \mathcal{T}_n := \sigma(\mathcal{A}_n, \mathcal{A}_{n+1}, \mathcal{A}_{n+2}, \dots)$$

heißt die (von der Folge $\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2, \dots$ erzeugte) terminale σ -Algebra.

¹nach Émile Borel (1871–1956) und Francesco Cantelli (1875–1966)

Beispiel 2.8. X_n reellwertige ZVn (auf $(\Omega, \mathcal{A}, \mathbb{P})$), $\mathcal{A}_n = \sigma(X_n)$. Dann sind

$$\{\limsup_n X_n \leq c\}, \{(X_n) \text{ konvergiert}\} = \{\liminf_n X_n \geq \limsup_n X_n\},$$

$$\{\sum_n |X_n| < \infty\}, \{\sum_n X_n \text{ konvergiert}\} \in \mathcal{T}.$$

Satz 2.9 (Kolmogorovs 0-1-Gesetz). $(\Omega, \mathcal{A}, \mathbb{P})$ *W*raum, $\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2, \dots \subset \mathcal{A}$ (unter \mathbb{P}) *unabhängige Teil- σ -Algebren*. Dann gilt

$$\mathbb{P}(A) \in \{0, 1\} \quad \text{für alle } A \in \mathcal{T}.$$

(Man sagt: „ \mathcal{T} ist trivial“).

Beweis. Sei $\sigma_n := \sigma(\mathcal{A}_1, \dots, \mathcal{A}_n)$, für $n \in \mathbb{N}$ sind σ_n und \mathcal{T}_{n+1} unabhängig (nach Bem. 2.3), also sind auch σ_n und $\mathcal{T} \subset \mathcal{T}_{n+1}$ unabhängig.

$\sigma_\infty := \bigcup_{n=1}^\infty \sigma_n$ ist eine \cap -stabile Erzeugermenge von $\sigma(\mathcal{A}_k, k \in \mathbb{N})$ [beachte: für $A, B \in \sigma_\infty$ gibt es ein n mit $A, B \in \sigma_n$, daher auch $A \cap B \in \sigma_n \subset \sigma_\infty$], und σ_∞ ist unabhängig von \mathcal{T} , nach Lemma 2.2 also

$$\mathcal{T} \text{ und } \sigma(\mathcal{A}_k, k \in \mathbb{N}) \supset \mathcal{T} \text{ sind u.a.,}$$

insbesondere für $A \in \mathcal{T}$:

$$\mathbb{P}(A) = \mathbb{P}(A \cap A) = \mathbb{P}(A) \cdot \mathbb{P}(A).$$

□

Beispiel. Seien X_1, X_2, \dots u.a. reelle ZVn, dann ist $\mathbb{P}(\sum_{n=1}^\infty X_n \text{ konvergiert}) \in \{0, 1\}$.

Kapitel 3

Integral und Erwartungswert

Sei (S, \mathcal{A}, μ) Maßraum.

Notation. Für $f, g: S \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ messbar, $A \in \mathcal{B}(\overline{\mathbb{R}})$, $z \in \overline{\mathbb{R}}$ schreiben wir

$$\begin{aligned} \{f \in A\} &:= f^{-1}(A), & \{f = z\} &:= f^{-1}(\{z\}), \\ \{f = g\} &:= \{x \in S : f(x) = g(x)\} = (f - g)^{-1}(\{0\}), \\ \{f \geq g\} &:= \{x \in S : f(x) \geq g(x)\} = (f - g)^{-1}([0, \infty]), & \text{etc.} \end{aligned}$$

Definition und Beobachtung 3.1 (Elementares Integral). Für

$$f \in \mathcal{E}^+ := \{\text{nicht-negative elementare Funktionen}\}$$

mit Darstellung $f = \sum_{i=1}^n a_i \mathbf{1}_{A_i}$ ($a_i \in \mathbb{R}_+$, $A_i \in \mathcal{A}$) ist

$$I(f) := \sum_{i=1}^n a_i \mu(A_i) = \sum_{z \in f(S)} z \mu(\{f = z\})$$

(mit Konvention $0 \cdot \infty = 0$) wohldefiniert.

Beweis. Sei

$$\{C_1, \dots, C_m\} = \left\{ \bigcap_{j=1}^n B_j : B_j = A_j \text{ oder } B_j = A_j^c \right\} \setminus \{\emptyset\},$$

d.h. die C_k sind paarweise disjunkt mit $S = \bigcup_{k=1}^m C_k$ und für $i = 1, \dots, n$ gibt es $J_i \subset \{1, \dots, m\}$ mit

$$A_i = \bigcup_{k \in J_i} C_k$$

Für $x \in C_k$ ist

$$f(x) = \sum_{i: J_i \ni k} a_i =: \gamma_k$$

Sei $f(S) = \{\gamma_k : k = 1, \dots, m\} = \{z_1, \dots, z_\ell\}$, für $j = 1, \dots, \ell$ setze

$$G_j := \{k \in \{1, \dots, m\} : \gamma_k = z_j\}$$

$$\begin{aligned} \sum_i a_i \mu(A_i) &= \sum_i \sum_{k \in J_i} a_i \mu(C_k) = \sum_k \mu(C_k) \sum_{i: k \in J_i} a_i \\ &= \sum_k \gamma_k \mu(C_k) = \sum_j z_j \mu\left(\bigcup_{k \in G_j} C_k\right) = \sum_j z_j \mu(\{f = z_j\}) \end{aligned}$$

□

Definition 3.2. Für $f : S \rightarrow \overline{\mathbb{R}}_+$ heißt

$$\int f d\mu := \sup \{I(h) : h \in \mathcal{E}^+, h \leq f\}$$

das Integral¹ von f bezüglich μ .

(Manchmal schreibt man auch $\mu(f) := \int f d\mu$ oder auch $\int f(x) \mu(dx)$, wenn die „Integrationsvariable“ betont werden soll.)

Beobachtung 3.3 (Markov-Ungleichung²). Für $f : S \rightarrow \overline{\mathbb{R}}_+$ messbar, $a > 0$ gilt

$$\mu(\{f \geq a\}) \leq \frac{1}{a} \int f d\mu$$

(denn $\mathcal{E}^+ \ni h := a \mathbf{1}_{f^{-1}([a, \infty])} \leq f$, also $I(h) = a\mu(\{f \geq a\}) \leq \int f d\mu$).

Lemma 3.4. $f, g : S \rightarrow \overline{\mathbb{R}}_+$ messbar.

$$i) f \leq g \text{ } \mu\text{-f.}\ddot{u}. \implies \int f d\mu \leq \int g d\mu.$$

$$ii) f = g \text{ } \mu\text{-f.}\ddot{u}. \implies \int f d\mu = \int g d\mu.$$

$$iii) f = 0 \text{ } \mu\text{-f.}\ddot{u}. \iff \int f d\mu = 0.$$

$$iv) \int f d\mu < \infty \implies f < \infty \text{ } \mu\text{-f.}\ddot{u}.$$

Beweis. *i)* Sei h Elementarfunktion mit $h \leq f$, dann ist $\tilde{h} := h \mathbf{1}_{\{f \leq g\}}$ ebenfalls Elementarfunktion und erfüllt $\tilde{h} \leq g$,

$$\begin{aligned} I(\tilde{h}) &= \sum_{z \in \epsilon h(S) \setminus \{0\}} z \mu(\{\tilde{h} = z\}) = \sum_z \mu(\{\tilde{h} = z\} \cap \{f \leq g\}) \\ &= \sum_z \mu(\{h = z\}) = I(h) \end{aligned}$$

die Beh. folgt damit aus Def. 3.2.

ii) Dies folgt aus *i)*.

iii) „ \implies “ folgt aus *ii)*, zu „ \impliedby “: Sei $\int f d\mu = 0$, dann ist

$$\begin{aligned} \mu(\{f \geq \frac{1}{n}\}) &\leq n \int f d\mu = 0 \quad \text{für jedes } n \in \mathbb{N} \text{ (mit Beob. 3.3),} \\ \mu(\{f > 0\}) &= \mu(\{f \geq 1\}) + \sum_{n=1}^{\infty} \mu(\{\frac{1}{n+1} \leq f < \frac{1}{n}\}) = 0 \end{aligned}$$

¹Präziser: das Lebesgue-Integral, nach Henri Lebesgue (1875–1941)

²nach Andrei Andrejewich Markov (1856–1922)

iv) $h := n\mathbf{1}_{\{f=\infty\}} \leq f$ für jedes $n \in \mathbb{N}$, also

$$I(h) = n\mu(\{f = \infty\}) \leq \int f d\mu < \infty$$

und

$$\mu(\{f = \infty\}) \leq \frac{1}{n} \int f d\mu \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0.$$

□

Lemma 3.5. $f_n, n \in \mathbb{N}$ messbar, $0 \leq f_1 \leq f_2 \leq \dots \nearrow f = \sup_{n \in \mathbb{N}} f_n$, so gilt

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

Beweis. Nach Lemma 3.4 ist $n \mapsto \int f_n d\mu$ monoton wachsend und

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int f_n d\mu \leq \int f d\mu.$$

Sei $\varepsilon > 0$, h Elementarfunktion mit $0 \leq h \leq f$,

$$h_n := (h - \varepsilon)^+ \mathbf{1}_{\{f_n > h - \varepsilon\}}$$

ist Elementarfunktion mit $0 \leq h_n \leq f_n$,

$$I(h_n) = \sum_{\tilde{z}} \tilde{z} \mu(\{h_n = \tilde{z}\}) = \sum_z (z - \varepsilon)^+ \mu(\{h = z, f_n > h - \varepsilon\}) \leq \int f_n d\mu$$

(beachte: die Summen enthalten jeweils nur endlich viele Terme), nach Voraussetzung ist

$$\{f_n > h - \varepsilon\} \nearrow \{f > h - \varepsilon\} = S \quad \text{für } n \rightarrow \infty$$

also

$$\mu(\{h = z, f_n > h - \varepsilon\}) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \mu(\{h = z\})$$

und somit

$$\sum_z (z - \varepsilon)^+ \mu(\{h = z\}) \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \int f_n d\mu$$

für jedes $\varepsilon > 0$, mit $\varepsilon \downarrow 0$ auch

$$I(h) = \sum_z z \mu(\{h = z\}) \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \int f_n d\mu$$

Def. 3.2 impliziert $\lim_n \int f_n d\mu \geq \int f d\mu$, d.h. die Behauptung.

□

(Gegen-)Beispiel. $(S, \mathcal{A}, \mu) = ([0, 1], \mathcal{B}([0, 1]), \lambda_{[0,1]})$, $f_n = n \mathbf{1}_{(0,1/n)}$, so gilt

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = 0 =: f(x) \quad \text{für jedes } x \in [0, 1],$$

$$\text{aber } \int f_n d\lambda_{[0,1]} = n \frac{1}{n} = 1 \not\rightarrow 0 = \int 0 d\lambda_{[0,1]}$$

Lemma 3.6. Sei $f : S \rightarrow \overline{\mathbb{R}}_+$ messbar und $f(S)$ höchstens abzählbar, dann gilt

$$\int f d\mu = \sum_{z \in f(S)} z \mu(\{f = z\})$$

(mit beliebiger Summationsreihenfolge).

Beweis. Betrachte zunächst f Elementarfunktion: Sei $0 \leq h \leq f$ Elementarfunktion, dann ist für $z > y$

$$\mu(\{f = y, h = z\}) = \mu(\emptyset) = 0,$$

also

$$\begin{aligned} I(h) &= \sum_z z \mu(\{h = z\}) = \sum_z \sum_y z \mu(\{f = y, h = z\}) \\ &\leq \sum_z \sum_y y \mu(\{f = y, h = z\}) = \sum_y y \mu(\{f = y\}) \quad (= I(f)) \end{aligned}$$

d.h. die Formel gilt in diesem Fall.

Allgemeiner Fall: Sei y_1, y_2, \dots irgendeine Aufzählung von $f(S)$, $(z_n)_n \subset \overline{\mathbb{R}}_+ \setminus f(S)$ mit $z_n \nearrow \infty$,

$$f_n := \sum_{i=1}^n y_i \mathbf{1}_{\{f=y_i\}} + z_n \mathbf{1}_{\{f=\infty\}}$$

also $0 \leq f_1 \leq f_2 \leq \dots \nearrow f$, Beh. folgt mit Lemma 3.5. □

Lemma 3.7. $f, g : S \rightarrow \overline{\mathbb{R}}_+$ m.b., $\alpha, \beta \in \overline{\mathbb{R}}_+$, so gilt

$$\int \alpha f + \beta g d\mu = \alpha \int f d\mu + \beta \int g d\mu.$$

Beweis. 1) Seien zunächst $f(S), g(S)$ abzählbar (und somit auch $(f+g)(S)$ abzählbar):

$$\begin{aligned} \int \alpha f + \beta g d\mu &= \sum_z z \mu(\{\alpha f + \beta g = z\}) \\ &= \sum_z z \sum_{\substack{u,v: \\ \alpha u + \beta v = z}} \mu(\{f = u, g = v\}) = \sum_{u,v} (\alpha u + \beta v) \mu(\{f = u, g = v\}) \\ &= \alpha \sum_{u,v} u \mu(\{f = u, g = v\}) + \beta \sum_{u,v} v \mu(\{f = u, g = v\}) \\ &= \alpha \sum_u u \mu(\{f = u\}) + \beta \sum_v v \mu(\{g = v\}) = \alpha \int f d\mu + \beta \int g d\mu \end{aligned}$$

nach Lemma 3.6.

2) Allgemeiner Fall: $f_n := 2^{-n} \lfloor 2^n f \rfloor \wedge n$, $g_n := 2^{-n} \lfloor 2^n g \rfloor \wedge n$ nehmen jeweils nur endlich viele Werte an, $f_n \nearrow f, g_n \nearrow g$ für $n \rightarrow \infty$. Beh. folgt mit 1) und Lemma 3.5. □

Definition 3.8. $f : S \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ messbar heißt μ -integrierbar, wenn $\int |f| d\mu < \infty$. Man setzt dann

$$\int f d\mu := \int f^+ d\mu - \int f^- d\mu \quad (\in \mathbb{R})$$

$$\mathcal{L}^1(\mu) := \{f : f \mu\text{-integrierbar}\}$$

Für $f \notin \mathcal{L}^1(\mu)$ mit $\int f^+ d\mu \wedge \int f^- d\mu < \infty$ setzt man ebenso, wobei dann die Werte $+\infty$ oder $-\infty$ vorkommen (beachte: ist wohldefiniert).

Man schreibt auch

$$\int f(x) \mu(dx) := \mu(f) := \int f d\mu,$$

abkürzend oft auch für $A \in \mathcal{A}$

$$\int_A f d\mu := \int f \mathbf{1}_A d\mu.$$

Satz 3.9. $f, g \in \mathcal{L}^1(\mu)$

i) $|f| < \infty$ μ -f.ü., für $f \geq 0$ μ -f.ü. gilt $\int f d\mu = 0 \iff f = 0$ μ -f.ü.

ii) $f \leq g$ μ -f.ü. $\implies \int f d\mu \leq \int g d\mu$, insbesondere: $f = g$ μ -f.ü. $\implies \int f d\mu = \int g d\mu$

iii) $\left| \int f d\mu \right| \leq \int |f| d\mu$

iv) $\int af + bg d\mu = a \int f d\mu + b \int g d\mu$ für $a, b \in \mathbb{R}$

Beweis. i) Dies folgt aus Lemma 3.4, iii).

ii) $f \leq g$ f.ü. $\iff f^+ \leq g^+$ f.ü. und $f^- \geq g^-$ f.ü., Beh. folgt aus Lemma 3.4, i).

iii) $\left| \int f d\mu \right| = \left| \int f^+ d\mu - \int f^- d\mu \right| \leq \left| \int f^+ d\mu \right| + \left| \int f^- d\mu \right| = \int \underbrace{f^+ + f^-}_{=|f|} d\mu$

iv) Folgt aus Lemma 3.7 (zerlege $f = f^+ - f^-$, $g = g^+ - g^-$). □

Bemerkung 3.10. 1. $\|f\|_1 := \int |f| d\mu$ definiert somit eine Halbnorm auf $\mathcal{L}^1(\mu)$, definiert man $f \sim g$ $:\Leftrightarrow f = g$ μ -f.ü., so ist $L^1(\mu) := \mathcal{L}^1(\mu) / \sim$ ein normierter Raum.

2. Im diskreten Fall $S = \{x_1, x_2, \dots\}$ (mit $\mathcal{A} = 2^S$), $\mu = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \delta_{x_n}$ mit $a_n \geq 0$ ist

$$\mathcal{L}^1(\mu) = \left\{ f : S \rightarrow \overline{\mathbb{R}} : \sum_{n=1}^{\infty} a_n |f(x_n)| < \infty \right\}$$

Satz 3.11 (Monotone Konvergenz, Satz von (Beppo) Levi³). $f_1, f_2, \dots \in \mathcal{L}^1(\mu)$, $f_n \nearrow f$ μ -f.ü., dann gilt

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

(die Gleichung ist möglicherweise als $+\infty = +\infty$ zu lesen).

³Beppo Levi, 1875–1961

Beweis. Sei $N \in \mathcal{A}$ mit $\mu(N) = 0$ und

$$f_n(x) \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} f(x) \text{ für alle } x \in S \setminus N.$$

$$0 \leq \tilde{f}_n := \mathbf{1}_{N^c}(f_n - f_1) \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} \mathbf{1}_{N^c}(f - f_1)$$

also (mit Lemma 3,5)

$$\begin{aligned} \int \tilde{f}_n d\mu &\xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} \int \mathbf{1}_{N^c}(f - f_1) d\mu = \int f - f_1 d\mu \\ &= \int f_n d\mu - \int f_1 d\mu = \int f d\mu - \int f_1 d\mu \end{aligned}$$

Wegen $f_1 \leq f$ μ -f.ü. gilt $f^- \in \mathcal{L}^1(\mu)$ unter den Voraussetzungen von Satz 3.11 automatisch, und wir entnehmen dem Argument insbesondere, dass $f \in \mathcal{L}^1(\mu)$ genau dann gilt, wenn $\lim_{n \rightarrow \infty} \int f_n d\mu < \infty$ gilt. \square

Satz 3.12 (Lemma von Fatou⁴). $f, f_1, f_2, \dots \in \mathcal{L}^1(\mu)$ mit $f_n \geq f$ μ -f.ü., so gilt

$$\int \liminf_n f_n d\mu \leq \liminf_n \int f_n d\mu$$

Beweis. O.E. seien $f_1, f_2, \dots \geq 0$ f.ü., sonst gehe über zu $f_n - f$.

Sei $g_n := \inf_{m \geq n} f_m$, dann gilt $\int g_n d\mu \leq \int f_n d\mu$ für jedes n und $g_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} \liminf_{k \rightarrow \infty} f_k$, also

$$\int \liminf_{k \rightarrow \infty} f_k d\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \int g_n d\mu \leq \liminf_n \int f_n d\mu$$

(wir verwenden Satz 3.11 für das Gleichheitszeichen). \square

Satz 3.13 (Dominierte Konvergenz, Konvergenzsatz von Lebesgue). f, f_1, f_2, \dots messbare Funktionen, es gelte

$$f_n \rightarrow f \text{ } \mu\text{-f.ü. und } |f_n| \leq g \text{ } \mu\text{-f.ü. für ein } g \in \mathcal{L}^1(\mu).$$

Dann gilt $f, f_1, f_2, \dots \in \mathcal{L}^1(\mu)$ und

$$\int |f_n - f| d\mu \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} 0, \quad \text{insbesondere } \int f_n d\mu \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} \int f d\mu.$$

Beweis. $\int |f_n| d\mu, \int |f| d\mu \leq \int g d\mu < \infty$, d.h. $f, f_1, f_2, \dots \in \mathcal{L}^1(\mu)$.

$$0 \leq 2g - |f - f_n| \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} 2g \text{ } \mu\text{-f.ü.,}$$

also

$$\int 2g d\mu \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int 2g - |f - f_n| d\mu = \underbrace{\int 2g d\mu}_{\in [0, \infty)} - \limsup_{n \rightarrow \infty} \underbrace{\int |f - f_n| d\mu}_{\geq 0}$$

somit $\limsup_{n \rightarrow \infty} \int |f - f_n| d\mu = 0$.

Schließlich

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

\square

⁴Pierre Fatou, 1878–1929

Satz 3.14 (Maßtransformation und Integral). $(S, \mathcal{A}), (S', \mathcal{A}')$ messbare Räume, μ Maß auf (S, \mathcal{A}) , $f : S \rightarrow S'$ messbar, $\mu' := \mu \circ f^{-1}$

Für $g \in \mathcal{L}^1(\mu')$ oder $g : S' \rightarrow \overline{\mathbb{R}}_+$ gilt

$$\int g d\mu' = \int g \circ f d\mu \quad (3.1)$$

Beobachtung 3.15 (Monotonieprinzip). (S, \mathcal{A}) messbarer Raum, sei $\mathcal{K} \subset \{f : f : S \rightarrow \overline{\mathbb{R}}_+ \text{ messbar}\}$ mit

i) $a, b \in \mathbb{R}_+, f, g \in \mathcal{K} \implies af + bg \in \mathcal{K}$

ii) $(f_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{K}, f_n \nearrow f \implies f \in \mathcal{K}$

iii) $\mathbf{1}_A \in \mathcal{K}$ für $A \in \mathcal{A}$

Dann gilt $\mathcal{K} = \{f : f : S \rightarrow \overline{\mathbb{R}}_+ \text{ messbar}\}$.

(Beweis: Approximiere allgemeines messbares f wachsend via $\mathcal{K} \ni f_n = 2^{-n} \lfloor 2^n f \rfloor \wedge n \nearrow f$.)

Beweis von Satz 3.14. Sei $\mathcal{K}_+ = \{g : g : S' \rightarrow \overline{\mathbb{R}}_+ \text{ messbar}, (3.1) \text{ gilt für } g\}$.

Für $g = \mathbf{1}_{A'}$ mit $A' \in \mathcal{A}'$ gilt

$$\int g d\mu' = \mu'(A') = \mu(f^{-1}(A')) = \int g \circ f d\mu$$

nach Def., also $\mathbf{1}_{A'} \in \mathcal{K}_+$.

\mathcal{K}_+ erfüllt Eigenschaft i) aus Beob 3.15 wegen der Linearität des Integrals (vgl. Satz 3.9) und Eigenschaft ii) wegen des Satzes von der monotonen Konvergenz (Satz 3.11). Somit

$$\mathcal{K}_+ = \{g : g : S' \rightarrow \overline{\mathbb{R}}_+ \text{ messbar}\}$$

Für $g \in \mathcal{L}^1(\mu')$ gilt (3.1) jeweils für g^+ und g^- . □

Bemerkung und Schreibweise. Für $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ W'raum, $X \in \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$ oder $X : \Omega \rightarrow \overline{\mathbb{R}}_+$ messbar schreibt man

$$\mathbb{E}[X] := \int X d\mathbb{P} \quad \text{„Erwartungswert“ von } X$$

Für eine (S', \mathcal{A}') -wertige ZV Y mit Verteilung $\nu, g : S' \rightarrow \overline{\mathbb{R}}, g \in \mathcal{L}^1(\nu)$ gilt

$$\mathbb{E}[g(Y)] = \int g \circ Y d\mathbb{P} = \int g d\nu$$

Definition 3.16. μ, ν Maße auf $(S, \mathcal{A}), h : S \rightarrow \overline{\mathbb{R}}_+$ messbar heißt (eine) *Dichte* von ν bezüglich μ , wenn gilt

$$\nu(A) = \int \mathbf{1}_A h d\mu, \quad A \in \mathcal{A}.$$

Man schreibt $\nu = h\mu$, symbolisch auch $d\nu = h d\mu, \frac{d\nu}{d\mu} = h$.

Lemma 3.17. μ Maß auf (S, \mathcal{A}) , $h : S \rightarrow \overline{\mathbb{R}}_+$ messbar, so definiert

$$\nu(A) := \int \mathbf{1}_A h d\mu, \quad A \in \mathcal{A}$$

ein Maß auf (S, \mathcal{A}) (ν ist endlich, wenn $h \in \mathcal{L}^1(\mu)$), für $f : S \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ m.b. mit $f \geq 0$ μ -f.ü. oder $fh \in \mathcal{L}^1(\mu)$ gilt

$$\int f d\nu = \int fh d\mu \quad (3.2)$$

Beweis. Offenbar $\nu(\emptyset) = 0$, seien $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{A}$ paarw. disjunkt:

$$\nu\left(\bigcup_n A_n\right) = \int \mathbf{1}_{\bigcup_n A_n} h d\mu = \int \sum_n \mathbf{1}_{A_n} h d\mu = \sum_n \int \mathbf{1}_{A_n} h d\mu = \sum_n \nu(A_n)$$

mit Satz von der monotonen Konvergenz (Satz 3.11).

$$\{f : f : S \rightarrow \overline{\mathbb{R}}_+ \text{ messbar, (3.2) gilt für } f\}$$

erfüllt die Voraussetzungen des Monotonieprinzips (Beob 3.15), also gilt (3.2) für jedes messbare $f \geq 0$.

Falls $fh \in \mathcal{L}^1(\mu)$, so gilt (3.2) mit $hf^+ = (hf)^+$ und $hf^- = (hf)^-$ separat. \square

Lemma 3.18. $\nu = h\mu = h'\mu$ mit $h, h' : S \rightarrow \overline{\mathbb{R}}_+$ m.b., ν σ -endlich $\implies h < \infty$ μ -f.ü. und $h = h'$ μ -f.ü.

Beweis. Sei ν endlich. Wegen $\int h d\mu = \nu(S) < \infty$ gilt $\mu(\{h = \infty\}) = 0$ und analog $\mu(\{h' = \infty\}) = 0$. Wir können daher im Folgenden o.E. annehmen, dass $h, h' < \infty$ auf S gilt (ansonsten ersetze h durch $h\mathbf{1}_{\{h < \infty\}}$ und h' durch $h'\mathbf{1}_{\{h' < \infty\}}$, hier mit der Interpretation $\infty \cdot 0 = 0$). Es ist

$$\begin{aligned} & \nu(\{h > h'\}) + \int (h - h')^+ d\mu \\ &= \int \mathbf{1}_{\{h > h'\}} h' d\mu + \int \mathbf{1}_{\{h > h'\}} (h - h') d\mu \\ &= \int \mathbf{1}_{\{h > h'\}} h d\mu = \nu(\{h > h'\}), \end{aligned}$$

also $(h - h')^+ = 0$ μ -f.ü., analog $(h - h')^- = 0$ μ -f.ü.

Im allgemeinen Fall seien $\mathcal{A} \ni A_n \nearrow S$ mit $\nu(A_n) < \infty$, obiges zeigt

$$\int \mathbf{1}_{A_n} (h - h')^+ d\mu = \int \mathbf{1}_{A_n} (h - h')^- d\mu = 0$$

für jedes n . \square

Definition 3.19. Für $1 \leq p < \infty$ sei

$$\mathcal{L}^p(\mu) := \left\{ f : S \rightarrow \overline{\mathbb{R}} \text{ messbar} : |f|^p \text{ ist } \mu\text{-integrierbar} \right\}$$

und für $f \in \mathcal{L}^p(\mu)$ sei $\|f\|_p := \left(\int |f|^p d\mu \right)^{1/p}$.

$$\|f\|_\infty := \inf \{ M \in \mathbb{R}_+ : |f| \leq M \text{ } \mu\text{-f.ü.} \}$$

heißt *essentielles Supremum* (von f bezüglich μ), $\mathcal{L}^\infty(\mu) := \{ f : S \rightarrow \overline{\mathbb{R}} \text{ m.b.} : \|f\|_\infty < \infty \}$.

Bemerkung. Wir haben in Definition 3.19 prinzipiell als Wertebereich von f die erweiterte reelle Achse $\overline{\mathbb{R}} = \mathbb{R} \cup \{+\infty, -\infty\}$ zugelassen. Offenbar gilt für $f \in \mathcal{L}^p(\mu)$ (mit einem $1 \leq p \leq \infty$) analog zum Argument im Beweis von Lemma 3.18, dass $\mu(\{f = +\infty\} \cup \{f = -\infty\}) = 0$ und wir könnten f durch $f \mathbf{1}_{\{|f| < \infty\}}$ ersetzen. Wir werden solche Ersetzungen im Folgenden ggf. stillschweigend durchführen, so dass für $f, g \in \mathcal{L}^p(\mu)$ Ausdrücke wie $f + g, f - g, fg$, etc. stets wohldefiniert sind. Mit dieser Lesung ist $\mathcal{L}^p(\mu)$ für $1 \leq p \leq \infty$ insbesondere ein Vektorraum.

Satz 3.20 (Hölder-Ungleichung⁵). $p, q \in [1, \infty]$ mit $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1, f \in \mathcal{L}^p(\mu), g \in \mathcal{L}^q(\mu)$

Dann ist $f \cdot g \in \mathcal{L}^1(\mu)$ mit

$$\|f \cdot g\|_1 \leq \|f\|_p \cdot \|g\|_q.$$

(Für $p = q = 2$ ist dies die Cauchy-Schwarz-Ungleichung.)

Beweis. Die Fälle $p = 1, q = \infty$ (oder umgekehrt) sowie $\|f\|_p = 0$ oder $\|g\|_q = 0$ sind trivial, seien also

$$p, q > 1, \quad \alpha := \|f\|_p, \beta := \|g\|_q > 0$$

Für $a, b > 0$ gilt

$$\log(ab) = \frac{1}{p} \log(a^p) + \frac{1}{q} \log(b^q) \leq \log\left(\frac{1}{p} a^p + \frac{1}{q} b^q\right)$$

(dies folgt aus der Konkavität der Logarithmusfunktion), also

$$\frac{|f(x)|}{\alpha} \cdot \frac{|g(x)|}{\beta} \leq \frac{1}{p} \frac{|f(x)|^p}{\alpha^p} + \frac{1}{q} \frac{|g(x)|^q}{\beta^q},$$

somit

$$\frac{1}{\alpha \beta} \int |fg| d\mu \leq \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1.$$

□

Satz 3.21 (Jensen'sche Ungleichung⁶). (S, \mathcal{A}, μ) W -raum, $k : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \cup \{+\infty\}$ konvex, $f \in \mathcal{L}^1(\mu)$.
Dann ist $\int k \circ f d\mu$ wohldefiniert und es gilt

$$\int k \circ f d\mu \geq k\left(\int f d\mu\right)$$

Beweis. Erinnerung:

$$k \text{ ist konvex} \iff \forall x, y \in \mathbb{R}, \alpha \in [0, 1] : \alpha k(x) + (1 - \alpha)k(y) \geq k(\alpha x + (1 - \alpha)y)$$

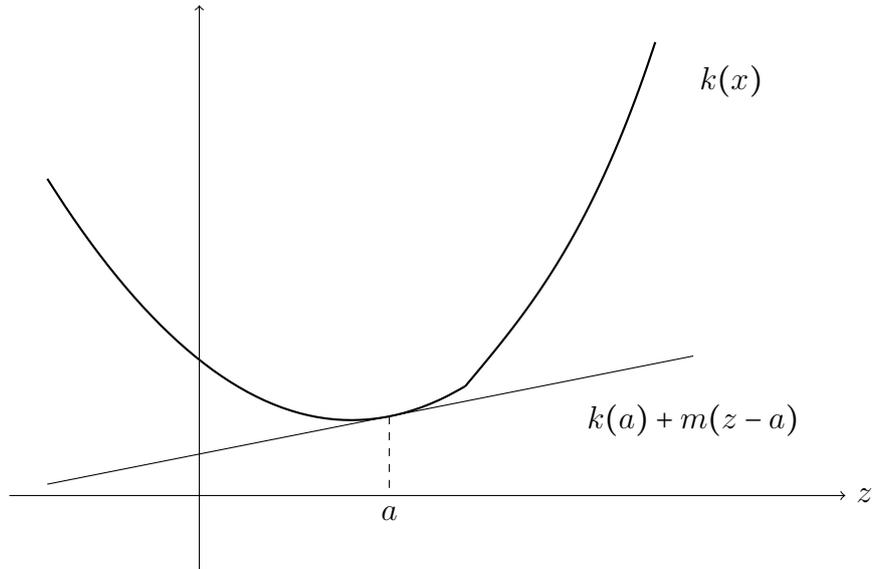
und zu jedem $a \in \mathbb{R}$ gibt es $m = m(a) \in \mathbb{R}$, so dass

$$\forall z \in \mathbb{R} : k(a) + m(z - a) \leq k(z)$$

gilt (eine konvexe Funktion liegt oberhalb jeder ihrer Tangenten).

⁵Otto Hölder, 1859–1937

⁶nach Johan Ludvig Jensen, 1859–1925 benannt



Seien a, m wie oben, so ist

$$(k \circ f)^- \leq (k(a) + m(f - a))^- \leq |k(a)| + |m|(|f| + |a|)$$

also $\int (k \circ f)^- d\mu < \infty$ und

$$\int (k \circ f)(x) \mu(dx) \geq k(a) + m\left(\int f(x) \mu(dx) - a\right),$$

die Wahl $a = \int f d\mu$ liefert die Behauptung.

(Da $f \in \mathcal{L}^1(\mu)$, gilt $\mu(\{|f| < \infty\}) = 1$ und man kann den Wert von $k \circ f$ auf der μ -Nullmenge $\{|f| = \infty\}$ beispielsweise $= 0$ setzen, ohne die Aussage zu ändern. Alternativ kann man beobachten, dass für eine konvexe Funktion k stets $k(\infty) = \lim_{x \rightarrow \infty} k(x), k(-\infty) = \lim_{x \rightarrow -\infty} k(x) \in \overline{\mathbb{R}}$ existieren.) \square

Definition 3.22 (Konvergenzarten). (S, \mathcal{A}, μ) Maßraum, $f, f_1, f_2, \dots : S \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ m.b.

i) $f_n \rightarrow f$ μ -fast überall (abgekürzt μ -f.ü.; wenn $\mu(S) = 1$, so sagt man auch „fast sicher“, abgekürzt f.s.), wenn

$$\{x : f_n(x) \not\rightarrow f(x)\} = \bigcup_{\varepsilon \in \mathbb{Q} \cap (0, \infty)} \bigcap_n \bigcup_{m \geq n} \{|f_m - f| > \varepsilon\}$$

eine μ -Nullmenge ist.

ii) $f_n \rightarrow f$ im Maß $\mu : \Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0 : \mu(\{|f_n - f| > \varepsilon\}) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$
(man sagt auch „ μ -stochastisch“ und schreibt $f_n \rightarrow f$ (μ -)stoch.)

iii) $1 \leq p \leq \infty, f, f_1, f_2, \dots \in \mathcal{L}^p(\mu)$. $f_n \rightarrow f$ im p -ten Mittel (auch „in $\mathcal{L}^p(\mu)$ “, geschrieben $f_n \xrightarrow{\mathcal{L}^p(\mu)} f$) : $\Leftrightarrow \|f_n - f\|_p \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$

Bemerkung 3.23. i) $\mu(S) < \infty, f_n \rightarrow f$ μ -f.ü. $\implies f_n \rightarrow f$ im Maß

ii) $f_n \xrightarrow{\mathcal{L}^p(\mu)} f$ für ein $p \in [1, \infty]$ $\implies f_n \rightarrow f$ im Maß

iii) Die Limiten sind jeweils μ -f.ü. eindeutig bestimmt.

Beweis. i) $A_{n,\varepsilon} := \{ \sup_{m \geq n} |f_m - f| > \varepsilon \} \supset A_{n+1,\varepsilon}$, somit

$$\infty > \mu(A_{n,\varepsilon}) \underset{n \rightarrow \infty}{\searrow} \mu\left(\bigcap_n A_{n,\varepsilon}\right) = 0 \quad \text{für jedes } \varepsilon > 0$$

und $\mu(\{|f_n - f| > \varepsilon\}) \leq \mu(A_{n,\varepsilon})$.

ii) Sei $1 \leq p < \infty$:

$$\mu(\{|f_n - f| > \varepsilon\}) = \mu(\{|f_n - f|^p > \varepsilon^p\}) \leq \frac{1}{\varepsilon^p} \int |f_n - f|^p d\mu \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

mit Markov-Ungleichung (Beob. 3.3).

Für $p = \infty$ beachte, dass $\mu(\{|f_n - f| > \varepsilon\}) = 0$ für $\varepsilon > \|f_n - f\|_\infty$ gilt.

iii) Es gelte $f_n \rightarrow f$ und $f_n \rightarrow g$ jeweils im Maß, so ist für $\varepsilon > 0$

$$\mu(\{|f - g| > \varepsilon\}) \leq \mu(\{|f_n - f| > \frac{\varepsilon}{2}\}) + \mu(\{|f_n - g| > \frac{\varepsilon}{2}\}) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0.$$

□

(Gegen-)Beispiel. Für ein Gegenbeispiel zur Umkehrung seien X_1, X_2, \dots u.a., $X_n \sim \text{Ber}_{1/n}$, dann gilt

$$X_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{\text{stoch.}} 0 \quad (\text{denn für jedes } 1 > \varepsilon > 0 \text{ ist } \mathbb{P}(|X_n - 0| > \varepsilon) = \frac{1}{n} \rightarrow 0),$$

aber

$$\mathbb{P}\left(\underbrace{\{X_n = 1 \text{ } \infty\text{-oft}\}}_{=\limsup_{n \rightarrow \infty} \{X_n = 1\}}\right) = 1$$

Bemerkung. Wir haben in Definition 3.22 (und implizit in Bemerkung 3.23) auch $\pm\infty$ als prinzipiell mögliche Werte der Approximanden f_n und des potentiellen Limesobjekts f zugelassen. Für $f_n, f \in \mathcal{L}^p(\mu)$ für ein $1 \leq p \leq \infty$ werden solche Werte wie oben bemerkt höchstens auf einer Menge vom μ -Maß 0 angenommen und können daher für die betrachteten Konvergenzbegriffe ignoriert werden.

Im ganz allgemeinen Fall können natürlich Ausdrücke wie $f_n - f$ in der Tat undefiniert sein (und beispielsweise um Konvergenz der f_n gegen f auch an Stellen x , an denen $f(x) = \infty$ gilt, zu beschreiben, würde man für solche x offenbar fordern wollen, dass es für jedes $M > 0$ ein n_0 gibt mit $f_n(x) \geq M$ für $n \geq n_0$, etc.). Ein einerseits eleganter (und sehr allgemein gangbarer) Weg, mit diesem Problem umzugehen ohne Fallunterscheidungen einzuführen, besteht darin, $\overline{\mathbb{R}} = \mathbb{R} \cup \{+\infty, -\infty\}$ via

$$d(x, y) = |\arctan(x) - \arctan(y)|, \quad x, y \in \mathbb{R} \cup \{+\infty, -\infty\}$$

als vollständigen und separablen Raum $(\overline{\mathbb{R}}, d)$ aufzufassen (mit $\arctan(\pm\infty) = \pm\pi/2$ ist $\overline{\mathbb{R}} \ni x \mapsto \arctan(x) \in [-\pi/2, \pi/2]$ ein Homöomorphismus, und eingeschränkt auf \mathbb{R} ist Konvergenz bezüglich der Metrik d äquivalent zu „gewöhnlicher“ Konvergenz auf den reellen Zahlen). Dann definiert man

$$f_n \rightarrow f \text{ } \mu\text{-stochastisch} \iff \forall \varepsilon > 0 : \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(\{x : d(f_n(x), f(x)) > \varepsilon\}) = 0$$

und $f_n \rightarrow f$ μ -fast überall $\iff \mu(\{x : d(f_n(x), f(x)) \not\rightarrow 0\}) = 0$ (siehe z.B. [KL, Definition 6.2], [Ka, Chapter 5]).

Andererseits verliert man damit die recht suggestiven Schreibweisen $f_n - f$, etc., aus Definition 3.22 und Bemerkung 3.23, die im reellen Fall natürlich mit der obigen, abstrakten Definition zusammenfallen, und die insbesondere beim „Rechnen“ mit Grenzwerten nützlich sind (mit dem Verständnis, dass die Wohldefiniertheitsfrage natürlich geklärt sein muss).

Lemma 3.24. $f_1, f_2, \dots : S \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ m.b. mit

$$\lim_{m, n \rightarrow \infty} \mu(\{|f_m - f_n| > \varepsilon\}) = 0 \quad \text{für alle } \varepsilon > 0.$$

Dann gibt es $n_k \nearrow_{k \rightarrow \infty} \infty$, $f : S \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ m.b. mit $f_{n_k} \rightarrow f$ μ -f.ü. für $k \rightarrow \infty$.

Insbesondere: $f_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} g$ im Maß μ , so gibt es eine Teilfolge mit $f_{n_k} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} g$ μ -f.ü.

Beweis. Wähle $n_1 < n_2 < \dots$, so dass für $m \geq n_k$ gilt

$$\mu(\{|f_m - f_{n_k}| > 2^{-k}\}) \leq 2^{-k},$$

insbesondere für $A_k := \{|f_{n_{k+1}} - f_{n_k}| > 2^{-k}\}$ gilt $\mu(A_k) \leq 2^{-k}$ und $\sum_{k=1}^{\infty} \mu(A_k) < \infty$, mit Borel-Cantelli (Lemma 2.5) also

$$\mu(\limsup_{k \rightarrow \infty} A_k) = 0.$$

Auf $(\limsup_{k \rightarrow \infty} A_k)^c$ gilt

$$\sum_{k=1}^{\infty} |f_{n_{k+1}} - f_{n_k}| < \infty,$$

d.h. $f_{n_m} = f_{n_1} + \sum_{k=1}^{m-1} (f_{n_{k+1}} - f_{n_k})$ konvergiert μ -f.ü.

Zum Zusatz: Beachte

$$\mu(\{|f_m - f_n| > \varepsilon\}) \leq \mu(\{|f_m - g| > \frac{\varepsilon}{2}\}) + \mu(\{|f_n - g| > \frac{\varepsilon}{2}\}) \xrightarrow{m, n \rightarrow \infty} 0.$$

□

Satz 3.25. $1 \leq p \leq \infty$, f_1, f_2, \dots Cauchy-Folge in $\mathcal{L}^p(\mu)$, d.h. $\lim_{m, n \rightarrow \infty} \|f_n - f_m\|_p = 0$.

Dann gibt es ein $f \in \mathcal{L}^p(\mu)$ mit $f_n \rightarrow f$ in $\mathcal{L}^p(\mu)$.

Beweis. Betrachte $1 \leq p < \infty$: Nach Bem. 3.23, ii) und Lemma 3.24 gibt es $f : S \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ m.b. und $n_k \nearrow \infty$ mit $f_{n_k} \rightarrow f$ μ -f.ü. Es ist

$$\begin{aligned} \int |f_m - f|^p d\mu &\leq \liminf_{k \rightarrow \infty} \int |f_m - f_{n_k}|^p d\mu \\ &\leq \sup_{n \geq m} \int |f_m - f_n|^p d\mu \xrightarrow{m \rightarrow \infty} 0 \end{aligned}$$

n. Vor. Insbesondere $f = f_m - (f_m - f) \in \mathcal{L}^p(\mu)$ und $\|f_m - f\|_p \rightarrow 0$.

□

Satz 3.26 (Minkowski-Ungleichung⁷). $1 \leq p \leq \infty$, $f, g \in \mathcal{L}^p(\mu)$, so gilt

$$\|f + g\|_p \leq \|f\|_p + \|g\|_p$$

Beweis. Fälle $p = 1$, $p = \infty$ oder falls $\int |f + g|^p d\mu = 0$: ✓

Sei $1 < p < \infty$, $0 < \int |f + g|^p d\mu < \infty$, setze

$$q := \frac{p}{p-1} (> 1), \quad \text{somit } \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1.$$

$$\begin{aligned} \int |f + g|^p d\mu &\leq \int |f| |f + g|^{p-1} d\mu + \int |g| |f + g|^{p-1} d\mu \\ &\leq \left(\left(\int |f|^p d\mu \right)^{1/p} + \left(\int |g|^p d\mu \right)^{1/p} \right) \underbrace{\left(\int |f + g|^{(p-1)q} d\mu \right)^{1/q}}_{= \left(\int |f + g|^p d\mu \right)^{(p-1)/p}} \end{aligned}$$

wobei wir für das zweite Ungleichheitszeichen die Hölder-Ungleichung (Satz 3.20) verwenden. □

Beobachtung 3.27. Für $1 \leq p \leq \infty$ ist $L^p(\mu) = \{[f] : f \in \mathcal{L}^p(\mu)\}$ mit $[f] = \{g : g = f \mu\text{-f.ü.}\}$ ein Banachraum, $L^2(\mu)$ ist mit Skalarprodukt $\langle [f], [g] \rangle := \int fg d\mu$ ein Hilbertraum.

Bemerkung 3.28. Sei $\mu(S) < \infty$, $1 \leq r < s \leq \infty$. Es gilt $\mathcal{L}^s(\mu) \subset \mathcal{L}^r(\mu)$ und die Einbettung $\mathcal{L}^s(\mu) \ni f \mapsto f \in \mathcal{L}^r(\mu)$ ist stetig.

Beweis. Fall $s = \infty$: Sei $f \in \mathcal{L}^\infty(\mu)$, so ist

$$\|f\|_r = \left(\int |f|^r d\mu \right)^{1/r} \leq \left((\|f\|_\infty)^r \mu(S) \right)^{1/r} = (\mu(S))^{1/r} \|f\|_\infty.$$

Fall $s < \infty$: Sei $f \in \mathcal{L}^s(\mu)$, $p := \frac{s}{r} (> 1)$, $q := \frac{1}{1-1/p} (= \frac{s}{s-r})$, so ist $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$ und

$$\begin{aligned} \|f\|_r &= \left(\int 1 \cdot |f|^r d\mu \right)^{1/r} \\ &\leq \left(\left(\int 1^q d\mu \right)^{1/q} \left(\int (|f|^r)^p d\mu \right)^{1/p} \right)^{1/r} = (\mu(S))^{1/r-1/s} \|f\|_s. \end{aligned}$$

mit Hölder-Ungleichung (Satz 3.20). □

3.1 Gleichgradige Integrierbarkeit

Definition 3.29. Sei $1 \leq p < \infty$. Ein Teilmenge $\mathcal{F} \subset \mathcal{L}^p(\mu)$ heißt *gleichgradig p-integrierbar* (für $p = 1$ meist einfach *gleichgradig integrierbar*), wenn gilt

$$\inf_{g \in \mathcal{L}^p(\mu), g \geq 0} \sup_{f \in \mathcal{F}} \int_{\{|f| > g\}} |f|^p d\mu = 0$$

⁷Hermann Minkowski, 1864–1909

Bemerkung 3.30. $\mathcal{F} \subset \mathcal{L}^p(\mu)$ mit $|\mathcal{F}| < \infty$ ist gleichgradig p -integrierbar.

Satz 3.31. Sei $1 \leq p < \infty$, $f_1, f_2, \dots \in \mathcal{L}^p(\mu)$, $f : S \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ m.b. Dann sind äquivalent

i) $f_n \rightarrow f$ in $\mathcal{L}^p(\mu)$

ii) $f_n \rightarrow f$ im Maß μ und $\{f_n, n \in \mathbb{N}\}$ ist gleichgradig p -integrierbar.

Beweis. „i) \Rightarrow ii)“ : Konvergenz in $\mathcal{L}^p(\mu)$ impliziert Konvergenz im Maß (Bem. 3.23, ii)), zu zeigen bleibt: $\{f_n : n \in \mathbb{N}\}$ ist gleichgradig p -integrierbar.

Sei $h := 2|f|$ ($\in \mathcal{L}^p(\mu)$), für jede Teilfolge $n_1 < n_2 < \dots \nearrow \infty$ gibt es eine Teilteilstolge $(n'_k)_k$ mit

$$|f_{n'_k}|^p \mathbf{1}_{\{|f_{n'_k}| \leq h\}} \xrightarrow[k \rightarrow \infty]{} |f|^p \quad \mu\text{-f.ü.}$$

(verwende Lemma 3.24), somit

$$\int_{\{|f_{n'_k}| \leq h\}} |f_{n'_k}|^p d\mu \xrightarrow[k \rightarrow \infty]{} \int |f|^p d\mu$$

(gemäß Satz von der dominierten Konvergenz, Satz 3.13) und

$$\int_{\{|f_{n'_k}| > h\}} |f_{n'_k}|^p d\mu \leq 2^p \underbrace{\int |f_{n'_k} - f|^p d\mu}_{\rightarrow 0 \text{ für } k \rightarrow \infty \text{ n. Vor.}} + 2^p \underbrace{\int |f|^p \mathbf{1}_{\{|f_{n'_k}| > h\}} d\mu}_{\rightarrow 0 \text{ (dom. Konv.)}}$$

Insbesondere gilt

$$\int_{\{|f_n| > h\}} |f_n|^p d\mu \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} 0.$$

Zu $\varepsilon > 0$ wähle n_0 mit $\int_{\{|f_n| > h\}} |f_n|^p d\mu \leq \varepsilon$ für $n > n_0$, setze $g := |f_1| + \dots + |f_{n_0}| + h$, so gilt

$$\sup_n \int_{\{|f_n| > g\}} |f_n|^p d\mu \leq \varepsilon$$

„ii) \Rightarrow i)“ : o.E. sei $f_n \rightarrow f$ μ -f.ü. (sonst gehe zu μ -f.ü. konvergenter Teilfolge über gemäß Lemma 3.24), es ist

$$\int |f|^p d\mu \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int |f_n|^p d\mu \quad (< \infty)$$

also $f \in \mathcal{L}^p(\mu)$.

Zeige: $\int |f_n - f|^p d\mu \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} 0$:

Zu $\varepsilon > 0$, $0 \leq g \in \mathcal{L}^p(\mu)$ gem. Voraussetzung setze $h := g + 2|f|$. Wie vorher ist

$$\int_{\{|f_n| \leq h\}} |f_n|^p d\mu \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} \int |f|^p d\mu,$$

somit

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \left| \int |f_n|^p d\mu - \int |f|^p d\mu \right| \leq \limsup_{n \rightarrow \infty} \int_{\{|f_n| > h\}} |f_n|^p d\mu \leq \varepsilon.$$

Weiter ist

$$0 \leq 2^p(|f|^p + |f_n|^p) - |f - f_n|^p \rightarrow 2^{p+1}|f|^p \quad \mu\text{-f.ü.},$$

mit Lemma von Fatou (Satz 3.12) daher

$$2^{p+1} \int |f|^p d\mu \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \left(2^p \int |f|^p d\mu + 2^p \int |f_n|^p d\mu - \int |f_n - f|^p d\mu \right).$$

Somit gilt $\limsup_{n \rightarrow \infty} \int |f_n - f|^p d\mu = 0$. □

Bemerkung 3.32. Sei $\mu(S) < \infty$, dann ist die Bedingung

$$\inf_{M \in \mathbb{R}_+} \sup_{f \in \mathcal{F}} \int_{\{|f| > M\}} |f| d\mu = 0 \quad (3.3)$$

äquivalent zur gleichgradigen Integrierbarkeit (von \mathcal{F} bzgl. μ).

Beweis. Da jedes $M \in \mathbb{R}_+$, aufgefasst als konstante Funktion, in $\mathcal{L}^1(\mu)$ liegt, impliziert (3.3) gleichgradige Integrierbarkeit.

Zeige: Sei $\mathcal{F} \subset \mathcal{L}^1(\mu)$ gleichgradig integrierbar \Rightarrow (3.3):

Zu $\varepsilon > 0$ wähle $g \in \mathcal{L}^1(\mu)$, $g \geq 0$ mit

$$\int_{\{|f| > g\}} |f| d\mu < \frac{\varepsilon}{2} \quad \text{für } f \in \mathcal{F},$$

wähle $M > 0$ mit $\int_{\{|g| \geq M\}} |g| d\mu < \frac{\varepsilon}{2}$, somit

$$\int_{\{|f| > M\}} |f| d\mu \leq \int_{\{|f| > g\}} |f| d\mu + \int \mathbf{1}_{\{|g| \geq M\}} |g| d\mu = \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon$$

□

Satz 3.33. Sei $\mu(S) < \infty$, $\mathcal{F} \subset \mathcal{L}^1(\mu)$.

\mathcal{F} ist gleichgradig integrierbar g.d.w.

es gibt $H : [0, \infty) \rightarrow [0, \infty)$ mit $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{H(x)}{x} = \infty$ und $\sup_{f \in \mathcal{F}} \int H(|f|) d\mu < \infty$.

H kann monoton wachsend und konvex gewählt werden.

Beweis. „ \Leftarrow “ : $K_M := \inf_{x \geq M} \frac{H(x)}{x} \nearrow \infty$, also

$$\begin{aligned} \sup_{f \in \mathcal{F}} \int_{\{|f| > M\}} |f| d\mu &\leq \sup_{f \in \mathcal{F}} \frac{1}{K_M} \int_{\{|f| > M\}} H(|f|) d\mu \\ &\leq \frac{1}{K_M} \sup_{f \in \mathcal{F}} \int H(|f|) d\mu \xrightarrow{M \rightarrow \infty} 0 \end{aligned}$$

„ \Rightarrow “ : Sei \mathcal{F} gleichgradig integrierbar, wähle (gem. Bem. 3.32) $M_n \nearrow \infty$ mit

$$\forall f \in \mathcal{F} : \int (|f| - M_n)^+ d\mu \leq \int_{\{|f| > M_n\}} |f| d\mu \leq 2^{-n},$$

setze $H(x) := \sum_{n=1}^{\infty} (x - M_n)^+$, für $x \geq 2M_n$ ist

$$\frac{H(x)}{x} \geq \sum_{j=1}^n \left(1 - \frac{M_j}{x}\right) \geq \frac{n}{2}, \quad \text{also } \frac{H(x)}{x} \xrightarrow{x \rightarrow \infty} \infty$$

und

$$\forall f \in \mathcal{F} : \int H(|f|) d\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \int (|f| - M_n)^+ d\mu \leq \sum_{n=1}^{\infty} 2^{-n} < \infty.$$

□

Korollar 3.34. $\mu(S) < \infty$, $p > 1$, $\mathcal{F} \subset \mathcal{L}^p(\mu)$ ($\subset \mathcal{L}^1(\mu)$) mit $\sup_{f \in \mathcal{F}} \|f\|_p < \infty$ („ \mathcal{F} ist $\mathcal{L}^p(\mu)$ -beschränkt“), so ist \mathcal{F} gleichgradig integrierbar.

(Wähle $H(x) = x^p$ in Satz 3.33.)

3.2 Parameterintegrale

(S, \mathcal{A}, μ) Maßraum, U metrischer Raum, $f : S \times U \rightarrow \mathbb{R}$

Satz 3.35. Sei $u_0 \in U$, es gelte

i) $u \mapsto f(x, u)$ ist stetig in u_0 für μ -f.a. $x \in S$

ii) $x \mapsto f(x, u)$ ist messbar für alle $u \in U$

iii) $h : x \mapsto \sup_{u \in U} |f(x, u)|$ liegt in $\mathcal{L}^1(\mu)$

Dann ist $F : U \rightarrow \mathbb{R}$, $F(u) = \int f(x, u) \mu(dx)$ stetig in u_0

Beweis. Sei $U \ni u_n \rightarrow u_0$:

$$|F(u_n) - F(u_0)| \leq \int \underbrace{|f(x, u_n) - f(x, u_0)|}_{\leq 2h(x)} \mu(dx) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

mit dominierter Konvergenz (Satz 3.13).

□

Satz 3.36. $U \subset \mathbb{R}$ offenes Intervall, $f : S \times U \rightarrow \mathbb{R}$ mit

i) $\forall u \in U : x \mapsto f(x, u)$ liegt in $\mathcal{L}^1(\mu)$

ii) Für μ -f.a. $x \in S$ ist $u \mapsto f(x, u)$ nach u differenzierbar (mit Ableitung $f'(x, u)$)

iii) $h : x \mapsto \sup_{u \in U} |f'(x, u)|$ liegt in $\mathcal{L}^1(\mu)$

Dann ist für $u \in U$ $f'(\cdot, u) \in \mathcal{L}^1(\mu)$ und $F(u) = \int f(x, u) \mu(dx)$ ist auf U diff'bar mit $F'(u) = \int f'(x, u) \mu(dx)$.

Beweis. Sei $U \ni u_n \neq u_0, u_n \rightarrow u_0$ für $n \rightarrow \infty$,

$$g_n(x) := \frac{f(x, u_n) - f(x, u_0)}{u_n - u_0}, \quad \text{also } g_n \rightarrow f'(\cdot, u_0) \text{ } \mu\text{-f.ü.}$$

Zwischenwertsatz der Differentialrechnung liefert:

$$\exists v_n(x) \in U \text{ mit } g_n(x) = f'(x, v_n(x)) \quad \text{für } \mu\text{-f.a. } x,$$

somit $|g_n| \leq h$ μ -f.ü.

Dominierte Konvergenz (Satz 3.13) liefert $f'(\cdot, u_0) \in \mathcal{L}^1(\mu)$ und

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{F(u_n) - F(u_0)}{u_n - u_0} = \lim_{n \rightarrow \infty} \int g_n(x) \mu(dx) = \int f'(x, u_0) \mu(dx)$$

□

Beispiel 3.37 (Laplace-Transformierte). $X \geq 0$ ZV auf W'raum $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$, $U = [0, \infty)$, $f(x, u) = e^{-ux}$. Dann ist $F(u) := \mathbb{E}[e^{-uX}]$ ∞ -oft diff'bar in $(0, \infty)$ und

$$F^{(k)}(u) = (-1)^k \mathbb{E}[X^k e^{-uX}]$$

3.3 Zur Dichtetransformation

Satz 3.38 (Dichtetransformationsformel). $U, V \subset \mathbb{R}^d$ offen, $\psi : U \rightarrow V$ ein C^1 -Diffeomorphismus, μ Maß auf U mit Dichte f bzgl. dem Lebesgue-Maß λ auf \mathbb{R}^d , dann hat das Bildmaß $\nu := \mu \circ \psi^{-1}$ (auf V) die Dichte

$$g(v) = \frac{1}{|\det D\psi(\psi^{-1}(v))|} f(\psi^{-1}(v)), \quad v \in V$$

bezüglich λ , wo $D\psi(u) = \left(\frac{\partial \psi_i}{\partial u_j}(u) \right)_{i,j=1}^d$ die Jacobi-Matrix (von ψ an der Stelle $u \in U$) ist.

Satz 3.39 (Transformationsformel von Jacobi, „ d -dimensionale Substitution“). $U, V \subset \mathbb{R}^d$ offen, $\varphi : U \rightarrow V$ C^1 -Diffeomorphismus, dann gilt

$$\lambda(\varphi(B)) = \int_B |\det D\varphi| d\lambda \quad \text{für } B \subset U \text{ Borel-messbar} \quad (3.4)$$

und

$$\int_V f(v) \lambda(dv) = \int_U f(\varphi(u)) |\det D\varphi(u)| \lambda(du) \quad \text{für } f \in \mathcal{L}^1(\lambda|_V) \quad (3.5)$$

Satz 3.38 folgt aus Satz 3.39 mit der Wahl $\varphi = \psi^{-1}$: Für $A \in \mathcal{B}(V)$ ist

$$\begin{aligned} (\mu \circ \psi^{-1})(A) &= \mu(\psi^{-1}(A)) = \int_U (\mathbf{1}_{\psi^{-1}(A)} \cdot f)(u) \lambda(du) \\ &= \int_V (\mathbf{1}_{\psi^{-1}(A)} \cdot f)(\psi^{-1}(v)) |\det(D\psi^{-1})(v)| \lambda(dv) \\ &= \int_V \mathbf{1}_A(v) \frac{f(\psi^{-1}(v))}{|\det D\psi(\psi^{-1}(v))|} \lambda(dv) \end{aligned}$$

(denn $(D\psi^{-1})(v) = (D\psi)^{-1}(\psi^{-1}(v))$ gemäß dem Satz über die Ableitung der Umkehrfunktion).

Beweise von Satz 3.39 finden sich in Analysis-Lehrbüchern, z.B. G. Kersting und M. Brokate, *Maß und Integral*, S. 107, H. Heuser, *Analysis, Teil 2*, Satz 205.2 ("Substitutions-Regel"), O. Forster, *Analysis 3*, Kap. 9, Satz 1 ("Transformationsformel").

Wir betrachten hier nur eine *Beweisheuristik*.

Zu (3.4): Es genügt, (3.4) für halboffene Quader $B = (a, b]$ mit $a, b \in \mathbb{Q}^d$ und $[a, b] \subseteq U$ zu zeigen (diese bilden einen \cap -stabilen Erzeuger von $\mathcal{B}(U)$).

Sei dazu $Q_c := (-c, c]^d$ mit $c > 0$. Da eine differenzierbare Funktion „lokal fast wie eine lineare Funktion aussieht“, gilt

$$\varphi(x + Q_c) \approx \varphi(x) + (D\varphi(x))(Q_c) \quad \text{für } x \in U \text{ und kleine Werte von } c.$$

Präziser: Sind $K \subseteq U$ kompakt und $0 < \varepsilon < 1$, so gilt für genügend kleine $c > 0$

$$\forall x \in K : \quad \varphi(x) + (1 - \varepsilon) \cdot (D\varphi(x))(Q_c) \subseteq \varphi(x + Q_c) \subseteq \varphi(x) + (1 + \varepsilon) \cdot (D\varphi(x))(Q_c), \quad (3.6)$$

d.h. das Bild des Würfels $x + Q_c$ unter φ lässt sich von außen und innen unter Benutzung des Parallelotops $(D\varphi(x))(Q_c)$ „einschachteln“.

Dann betrachtet man eine Folge von immer feiner werdenden Zerlegungen von $B = (a, b]$ in disjunkte „Kopien“ von Q_c und verwendet den Satz von der dominierten Konvergenz, um (3.4) für B aus (3.6) zu folgern.

Zu (3.5): Für $f = \mathbf{1}_A$ mit $A = \varphi^{-1}(B)$ folgt dies direkt aus (3.4). Allgemeines $f \geq 0$ kann man in monoton wachsender Weise mittels Linearkombinationen von Indikatorfunktionen approximieren (vgl. Beob. 3.15, „Monotonieprinzip“), schließlich zerlege $\mathcal{L}^1(\lambda|_V) \ni f = f^+ - f^-$.

3.4 Zum Zusammenhang mit dem Riemann-Integral

Erinnerung 3.40 (Riemann-Integral). $I = [a, b]$, $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ beschränkt, $\mathbf{t} = \{t_0, t_1, \dots, t_n\}$ mit $a = t_0 < t_1 < \dots < t_n = b$ Partition von $[a, b]$ mit Feinheit $w(\mathbf{t}) = \max_{1 \leq i \leq n} (t_i - t_{i-1})$, $o_j = o_j(f, \mathbf{t}) := \sup_{t_{j-1} \leq t \leq t_j} f(t)$, $u_j = u_j(f, \mathbf{t}) := \inf_{t_{j-1} \leq t \leq t_j} f(t)$.

$$U_{\mathbf{t}}(f) := \sum_{j=1}^n u_j \cdot (t_j - t_{j-1}), \quad O_{\mathbf{t}}(f) := \sum_{j=1}^n o_j \cdot (t_j - t_{j-1})$$

heißen die Unter- und die Obersumme (von f bezgl. der Partition \mathbf{t}).

f heißt (eigentlich) *Riemann-integrierbar* (auf I), wenn gilt

$$\lim_{m \rightarrow \infty} U_{\mathbf{t}^{(m)}}(f) = \lim_{m \rightarrow \infty} O_{\mathbf{t}^{(m)}}(f) =: \int_a^b f(x) dx$$

für jede Folge von Partitionen $(\mathbf{t}^{(m)})_{m \in \mathbb{N}}$ mit $w(\mathbf{t}^{(m)}) \rightarrow 0$. (Man kann dabei o.E. annehmen, dass $\mathbf{t}^{(m)} \subset \mathbf{t}^{(m+1)}$ gilt, d.h. die $\mathbf{t}^{(m)}$ bilden eine Folge von Verfeinerungen, sonst gehe sukzessive zur gemeinsamen Verfeinerung über.)

Satz 3.41. $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ sei beschränkt, $C := \{x \in [a, b] : f \text{ stetig in } x\}$, $D := [a, b] \setminus C$. Dann gilt

i) $C, D \in \mathcal{B}([a, b])$ und $f \cdot \mathbf{1}_C$ ist Borel-messbar

ii) f ist Riemann-integrierbar (über $[a, b]$) g.d.w. $\lambda(D) = 0$,

in diesem Fall gilt für sein Riemann-Integral

$$\int_a^b f(x) dx = \int f \cdot \mathbf{1}_C d\lambda \quad (= \int_{[a,b]} f d\lambda, \text{ sofern } f \text{ Borel-messbar})$$

Beweisskizze. i) Sei $\mathbf{t}^{(m)} = \{t_0^{(m)}, t_1^{(m)}, \dots, t_{n_m}^{(m)}\}$, $m \in \mathbb{N}$ eine Folge von Verfeinerungen mit $w(\mathbf{t}^{(m)}) \rightarrow 0$,

$$g_m := \sum_{j=1}^{n_m} u_j(f, \mathbf{t}^{(m)}) \mathbf{1}_{(t_{j-1}^{(m)}, t_j^{(m)})}, \quad h_m := \sum_{j=1}^{n_m} o_j(f, \mathbf{t}^{(m)}) \mathbf{1}_{(t_{j-1}^{(m)}, t_j^{(m)})},$$

dann ist $g_m \leq f \leq h_m$ und $U_{\mathbf{t}^{(m)}}(f) = \int g_m d\lambda$, $O_{\mathbf{t}^{(m)}}(f) = \int h_m d\lambda$. Die Folge $(g_m)_m$ steigt auf gegen eine Borel-messbare Funktion g , $(h_m)_m$ steigt ab gegen eine Borel-messbare Funktion h , somit gilt $g \leq f \leq h$ auf I , weiter ist

$$\{x \in I : g(x) < h(x)\} \subset D \subset \{x \in I : g(x) < h(x)\} \cup \bigcup_{m=1}^{\infty} \{t_0^{(m)}, t_1^{(m)}, \dots, t_{n_m}^{(m)}\}$$

und man gewinnt daraus die geforderten Messbarkeitseigenschaften.

ii) Es ist

$$\begin{aligned} \int g d\lambda &= \lim_{m \rightarrow \infty} \int g_m d\lambda = \lim_{m \rightarrow \infty} U_{\mathbf{t}^{(m)}}(f), \\ \int h d\lambda &= \lim_{m \rightarrow \infty} \int h_m d\lambda = \lim_{m \rightarrow \infty} O_{\mathbf{t}^{(m)}}(f) \end{aligned}$$

(mit dominierter Konvergenz), wegen $g \leq h$ also

$$g = h \text{ } \lambda\text{-f.ü.} \iff \lambda(D) = 0 \iff f \text{ Riemann-integrierbar.}$$

Das Beispiel $f = \mathbf{1}_{\mathbb{Q} \cap [0,1]}$ zeigt, dass eine Lebesgue-integrierbare Funktion nicht Riemann-integrierbar sein muss.

Für das uneigentliche Riemann-Integral über die Achse oder eine Halbachse, das man im Sinne eines Grenzwerts bezüglich der Integrationsgrenze definiert (sofern dieser Grenzwert existiert), gilt die analoge Aussage nicht immer: Beispielsweise existiert

$$\int_0^\infty \frac{\sin(x)}{x} dx = \lim_{R \rightarrow \infty} \int_0^R \frac{\sin(x)}{x} dx (= \pi/2)$$

im Sinne der uneigentlichen Riemann-Integrale, aber die Funktion $\sin(x)/x$ liegt nicht in $\mathcal{L}^1(\lambda|_{[0,\infty)})$ (denn $\int_{[0,\infty)} |\sin(x)/x| \lambda(dx) = \infty$).

Kapitel 4

Gesetz der großen Zahlen

Erinnerung 4.1 (Varianz und Kovarianz). $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ W'raum, $X, Y \in \mathcal{L}^2(\mathbb{P})$.

$$\text{Var}[X] := \mathbb{E}[(X - \mathbb{E}[X])^2] = \mathbb{E}[X^2] - (\mathbb{E}[X])^2 \quad (\geq 0), \quad \text{die Varianz von } X$$

$(\sqrt{\text{Var}[X]})$ ist die *Streuung* oder *Standardabweichung* von X

$$\begin{aligned} \text{Cov}[X, Y] &:= \mathbb{E}[(X - \mathbb{E}[X])(Y - \mathbb{E}[Y])] \\ &= \mathbb{E}[XY] - \mathbb{E}[X]\mathbb{E}[Y] \quad (= \text{Cov}[X, Y]), \end{aligned} \quad \text{die Kovarianz von } X \text{ und } Y$$

Für $X, Y, Z \in \mathcal{L}^2(\mathbb{P})$, $a, b \in \mathbb{R}$ gilt

$$\text{Cov}[aX + bY, Z] = a\text{Cov}[X, Z] + b\text{Cov}[Y, Z]$$

(die Kovarianz ist eine symmetrische Bilinearform), insbesondere gilt

$$\text{Var}[aX] = \text{Cov}[aX, aX] = a^2\text{Var}[X].$$

X und Y heißen *unkorreliert*, wenn $\text{Cov}[X, Y] = 0$; für paarweise unkorrelierte $X_1, \dots, X_n \in \mathcal{L}^2(\mathbb{P})$ gilt

$$\text{Var}[X_1 + \dots + X_n] = \sum_{i,j=1}^n \text{Cov}[X_i, X_j] = \sum_{i=1}^n \text{Var}[X_i].$$

Erinnerung 4.2. $X, Y \in \mathcal{L}^2(\mathbb{P})$ unabhängig $\implies X, Y$ unkorreliert.

Die Umkehrung gilt i.A. nicht.

Beweis. Falls X und Y jeweils höchstens abzählbar viele Werte annehmen:

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[XY] &= \sum_{x,y} xy\mathbb{P}(X = x, Y = y) = \sum_{x,y} xy\mathbb{P}(X = x)\mathbb{P}(Y = y) \\ &= \left(\sum_x x\mathbb{P}(X = x) \right) \left(\sum_y y\mathbb{P}(Y = y) \right) = \mathbb{E}[X]\mathbb{E}[Y], \end{aligned}$$

also $\text{Cov}[X, Y] = \mathbb{E}[XY] - \mathbb{E}[X]\mathbb{E}[Y] = 0$.

Allgemeiner Fall: o.E. seien $X, Y \geq 0$ (sonst zerlege $X = X^+ - X^-$, $Y = Y^+ - Y^-$), es ist

$$\mathbb{E}[XY] = \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{E}[2^{-n} \lfloor 2^n X \rfloor 2^{-n} \lfloor 2^n Y \rfloor] = \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{E}[2^{-n} \lfloor 2^n X \rfloor] \mathbb{E}[2^{-n} \lfloor 2^n Y \rfloor] = \mathbb{E}[X] \mathbb{E}[Y]$$

(verwende monotone Konvergenz, Satz 3.11).

Ein „Gegen-“ Beispiel: Sei X symmetrisch verteilt mit $0 < \mathbb{E}[X^4] < \infty$ (z.B. $X \sim \mathcal{N}_{0,1}$), dann sind X und $Y := X^2$ wegen $\mathbb{E}[XY] = \mathbb{E}[X^3] = 0 = \mathbb{E}[X] = \mathbb{E}[X] \mathbb{E}[Y]$ unkorreliert, aber nicht unabhängig. □

Erinnerung 4.3 (Chebyshev¹-Ungleichung). Für $X \in \mathcal{L}^2(\mathbb{P})$ und $a > 0$ gilt

$$\mathbb{P}(|X - \mathbb{E}[X]| \geq a) \leq \frac{\text{Var}[X]}{a^2}$$

(denn $a^2 \mathbb{P}(|X - \mathbb{E}[X]| \geq a) = a^2 \mathbb{P}(|X - \mathbb{E}[X]|^2 \geq a^2) \leq \mathbb{E}[|X - \mathbb{E}[X]|^2]$ gemäß Markov-Ungleichung, Beob 3.3).

Erinnerung 4.4 (Schwaches Gesetz der großen Zahlen via Chebyshev-Ungleichung). $X_1, X_2, \dots \in \mathcal{L}^2(\mathbb{P})$ paarweise unkorrelierte ZVn mit $\mathbb{E}[X_i] = 0$, $\sup_{i \in \mathbb{N}} \mathbb{E}[X_i^2] =: c < \infty$, dann gilt für $S_n := X_1 + \dots + X_n$

$$\frac{1}{n} S_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} 0 \quad \mathbb{P}\text{-stochastisch,}$$

denn für $\varepsilon > 0$ gilt

$$\mathbb{P}(|S_n| > \varepsilon n) \leq \frac{1}{\varepsilon^2 n^2} \text{Var}[S_n] = \frac{1}{\varepsilon^2 n^2} \sum_{i=1}^n \text{Var}[X_i] \leq \frac{c}{\varepsilon^2 n} \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} 0$$

Proposition 4.5. Seien $X_1, X_2, \dots \in \mathcal{L}^2(\mathbb{P})$ paarweise unabhängige ZVn mit $\sup_{i \in \mathbb{N}} \mathbb{E}[X_i^2] =: c < \infty$, es gelte $\mathbb{E}[X_n^+] \rightarrow \mu_+ \in \mathbb{R}$, $\mathbb{E}[X_n^-] \rightarrow \mu_- \in \mathbb{R}$. Dann gilt für $S_n := X_1 + \dots + X_n$

$$\frac{1}{n} S_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} \mu := \mu_+ - \mu_- \quad \text{fast sicher.}$$

Beweis. O.E. seien $X_i \geq 0$ (sonst betrachte X_i^+ und X_i^- separat); setze $\mu_i := \mathbb{E}[X_i]$, n. Vor. gilt $\mu_i \rightarrow \mu \in \mathbb{R}$ für $i \rightarrow \infty$.

Sei $a > 1$, $k_n := \lceil a^n \rceil$

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \mathbb{P}\left(\left|\frac{1}{k_n} \sum_{i=1}^{k_n} (X_i - \mu_i)\right| > a^{-n/4}\right) &\leq \sum_{n=1}^{\infty} a^{n/2} \text{Var}\left[\frac{1}{k_n} \sum_{i=1}^{k_n} (X_i - \mu_i)\right] = \sum_{n=1}^{\infty} a^{n/2} \frac{1}{k_n^2} \sum_{i=1}^{k_n} \text{Var}[X_i] \\ &\leq \sum_{n=1}^{\infty} a^{n/2} \frac{c}{k_n} \leq c \sum_{n=1}^{\infty} a^{-n/2} < \infty, \end{aligned}$$

also gibt es mit Borel-Cantelli-Lemma (Lemma 2.5) ein zufälliges N_0 mit

$$\left|\frac{1}{k_n} \sum_{i=1}^{k_n} (X_i - \mu_i)\right| = \left|\frac{1}{k_n} S_{k_n} - \underbrace{\frac{1}{k_n} \sum_{i=1}^{k_n} \mu_i}_{\rightarrow \mu}\right| \leq a^{-n/4} \quad \text{für } n \geq N_0$$

¹Pafnuty Lvovich Chebyshev, 1821–1894.

und insbesondere gilt $\frac{1}{k_n} S_{k_n} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \mu$ fast sicher.

Sei $b > a (> 1)$, dann ist $k_{n+1} \leq b k_n$ (für n gen. groß), also für $k_n \leq m \leq k_{n+1}$

$$\frac{1}{b} \underbrace{\frac{S_{k_n}}{k_n}}_{\rightarrow \mu} \leq \frac{S_{k_n}}{k_{n+1}} \leq \frac{S_m}{m} \leq \frac{S_{k_{n+1}}}{k_n} \leq b \underbrace{\frac{S_{k_{n+1}}}{k_{n+1}}}_{\rightarrow \mu}$$

somit

$$\left(\frac{1}{b} - 1\right)\mu \leq \liminf_{m \rightarrow \infty} \left(\frac{S_m}{m} - \mu\right) \leq \limsup_{m \rightarrow \infty} \left(\frac{S_m}{m} - \mu\right) \leq (b - 1)\mu$$

mit $b \downarrow 1$ folgt die Beh. □

Satz 4.6 (Starkes Gesetz der großen Zahlen). $X_1, X_2, \dots \in \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$ seien identisch verteilt und paarweise unabhängig, dann gilt

$$\frac{1}{n}(X_1 + \dots + X_n) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \mu := \mathbb{E}[X_1] \quad \text{fast sicher.} \quad (4.1)$$

Lemma 4.7. X_1, X_2, \dots wie in Satz 4.6, $Y_n := X_n \mathbf{1}_{\{|X_n| \leq n\}}$, $T_n := Y_1 + \dots + Y_n$. Dann gilt

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mathbb{E}[Y_n^2]}{n^2} \leq \mathbb{E}[|X_1|] + 1$$

und $\frac{1}{n} T_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \mu$ f.s. impliziert (4.1).

Beweis. Für $x > 0$ ist

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^2}{n^2} \mathbf{1}_{\{x \leq n\}} = \frac{x^2}{(\lceil x \rceil)^2} + \sum_{n=\lceil x \rceil+1}^{\infty} x^2 \frac{1}{n^2} \leq 1 + x^2 \int_{\lceil x \rceil}^{\infty} \frac{1}{y^2} dy = 1 + \frac{x^2}{\lceil x \rceil} \leq 1 + x,$$

somit

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mathbb{E}[Y_n^2]}{n^2} &= \sum_{n=1}^{\infty} \mathbb{E}\left[\frac{X_n^2}{n^2} \mathbf{1}_{\{|X_n| \leq n\}}\right] \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \mathbb{E}\left[\frac{X_1^2}{n^2} \mathbf{1}_{\{|X_1| \leq n\}}\right] = \mathbb{E}\left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{X_1^2}{n^2} \mathbf{1}_{\{|X_1| \leq n\}}\right] \leq \mathbb{E}[1 + |X_1|]. \end{aligned}$$

Es ist

$$\sum_{n=1}^{\infty} \mathbb{P}(X_n \neq Y_n) = \sum_{n=1}^{\infty} \mathbb{P}(|X_n| > n) = \sum_{n=1}^{\infty} \mathbb{P}(|X_1| > n) \leq \mathbb{E}[|X_1|] < \infty$$

mit Borel-Cantelli-Lemma (Lemma 2.5) gibt es ein zufälliges N_0 , so dass $X_n = Y_n$ für $n \geq N_0$, insbesondere

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \quad \text{f.s.}$$

Wegen $\frac{1}{n}(X_1 + \dots + X_n) = \frac{1}{n} T_n + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)$ impliziert dies die zweite Behauptung. □

Beweis von Satz 4.6. O.E. seien $X_n \geq 0$ (sonst zerlege in $X_n = X_n^+ - X_n^-$).

Sei $a > 1$, $k_n := \lceil a^n \rceil$ ($\geq a^n/2$). Für $m \in \mathbb{N}$ ist

$$\sum_{n: k_n \geq m} k_n^{-2} \leq \sum_{n=\lceil (\log m)/(\log a) \rceil}^{\infty} \frac{4}{a^{2n}} = \frac{4}{1-a^{-2}} a^{-2\lceil (\log m)/(\log a) \rceil} \leq \frac{4a^2}{1-a^{-2}} m^{-2}$$

Sei T_n wie in Lemma 4.7. Für $\delta > 0$ ist

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \mathbb{P}\left(|T_{k_n} - \mathbb{E}[T_{k_n}]| > \delta k_n\right) &\leq \delta^{-2} \sum_{n=1}^{\infty} k_n^{-2} \sum_{m=1}^{k_n} \text{Var}[Y_m] \\ &= \delta^{-2} \sum_{m=1}^{\infty} \text{Var}[Y_m] \sum_{n: k_n \geq m} k_n^{-2} \leq \delta^{-2} \frac{4a^2}{1-a^{-2}} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\mathbb{E}[Y_m^2]}{m^2} < \infty \end{aligned}$$

mit Borel-Cantelli also

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{T_{k_n} - \mathbb{E}[T_{k_n}]}{k_n} \right| \leq \delta \quad \text{f.s.}$$

(für jedes $\delta > 0$), zudem gilt $\mathbb{E}[Y_n] = \mathbb{E}[X_n \mathbf{1}_{\{|X_n| \leq n\}}] = \mathbb{E}[X_1 \mathbf{1}_{\{|X_1| \leq n\}}] \rightarrow \mathbb{E}[X_1] = \mu$ (dominierte Konvergenz), also auch $\mathbb{E}[T_{k_n}]/k_n \rightarrow \mu$, d.h.

$$\frac{T_{k_n}}{k_n} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \mu \quad \text{f.s.}$$

Wie im Beweis von Proposition 4.5 folgt $T_m/m \rightarrow \mu$ f.s. für $m \rightarrow \infty$, mit Lemma 4.7 folgt die Beh. \square

4.1 Fluktuationen von Summen unabhängiger Zufallsvariablen

Satz 4.8 (Kolmogorov-Ungleichungen). $X_1, X_2, \dots \in \mathcal{L}^2(\mathbb{P})$ unabhängig, $\mathbb{E}[X_n] = 0$, $S_n = X_1 + \dots + X_n$. Es gilt für $x > 0$

$$\mathbb{P}\left(\max\{S_k : 1 \leq k \leq n\} \geq x\right) \leq \frac{\text{Var}[S_n]}{x^2 + \text{Var}[S_n]}, \quad (4.2)$$

$$\mathbb{P}\left(\max\{|S_k| : 1 \leq k \leq n\} \geq x\right) \leq \frac{\text{Var}[S_n]}{x^2}. \quad (4.3)$$

Beweis. Sei $A_k := \{S_1, \dots, S_{k-1} < x, S_k \geq x\}$, $k = 1, \dots, n$, also

$$A := \left\{ \max_{1 \leq k \leq n} S_k \geq x \right\} = \bigcup_{k=1}^n A_k$$

Für $c > 0$ ist

$$\begin{aligned} \text{Var}[S_n] + c^2 &= \mathbb{E}[S_n^2 + c] = \mathbb{E}[(S_n + c)^2] \geq \mathbb{E}[(S_n + c)^2 \mathbf{1}_A] \\ &= \sum_{k=1}^n \mathbb{E}[(S_n + c)^2 \mathbf{1}_{A_k}] = \sum_{k=1}^n \mathbb{E}\left[\underbrace{((S_k + c)^2 + 2(S_k + c)(S_n - S_k) + (S_n - S_k)^2)}_{\geq 0} \mathbf{1}_{A_k}\right] \\ &\geq \sum_{k=1}^n \left\{ \mathbb{E}[(S_k + c)^2 \mathbf{1}_{A_k}] + \underbrace{2 \mathbb{E}[(S_k + c) \mathbf{1}_{A_k} (S_n - S_k)]}_{=\mathbb{E}[(S_k + c) \mathbf{1}_{A_k}] \mathbb{E}[S_n - S_k] = 0} \right\} \\ &= \sum_{k=1}^n \mathbb{E}[(S_k + c)^2 \mathbf{1}_{A_k}] \geq (x + c)^2 \sum_{k=1}^n \mathbb{P}(A_k) = (x + c)^2 \mathbb{P}(A) \end{aligned}$$

also

$$\mathbb{P}(A) \leq \frac{\text{Var}[S_n] + c^2}{(x + c)^2}$$

mit Wahl $c = \text{Var}[S_n]/x$ folgt

$$\mathbb{P}(A) \leq \frac{c(x + c)}{(x + c)^2} = \frac{c}{c + x} = \frac{cx}{cx + x^2} = \frac{\text{Var}[S_n]}{x^2 + \text{Var}[S_n]},$$

d.h. (4.2).

Für (4.3) betrachte

$$\tilde{A} := \left\{ \max_{1 \leq k \leq n} |S_k| \geq x \right\} = \bigcup_{k=1}^n \tilde{A}_k \quad \text{mit} \quad \tilde{A}_k := \left\{ |S_1|, \dots, |S_{k-1}| < x, |S_k| \geq x \right\},$$

wie oben (mit Wahl $c = 0$) folgt

$$\text{Var}[S_n] \geq \sum_{k=1}^n \mathbb{E}[S_k^2 \mathbf{1}_{\tilde{A}_k}] \geq x^2 \sum_{k=1}^n \mathbb{P}(\tilde{A}_k) = x^2 \mathbb{P}(\tilde{A}).$$

□

Korollar 4.9. X_1, X_2, \dots u.a. mit $\mathbb{E}[X_n] = 0$, $c := \sup_n \text{Var}[X_n] < \infty$, $S_n = X_1 + \dots + X_n$, dann gilt für $\varepsilon > 0$

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \frac{|S_n|}{\sqrt{n}(\log n)^{1/2+\varepsilon}} = 0 \quad \text{f.s.}$$

Beweis. Sei $\ell(n) := \sqrt{n}(\log n)^{1/2+\varepsilon}$, $k_n := 2^n$, für $\delta > 0$ sei

$$A_{n,\delta} := \left\{ \max_{k \leq k_n} |S_k| > \delta \ell(k_n) \right\}.$$

Nach Satz 4.8 ist

$$\sum_{n=1}^{\infty} \mathbb{P}(A_{n,\delta}) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\delta^2 \ell(k_n)^2} \text{Var}[S_{k_n}] \leq \sum_{n=1}^{\infty} \frac{ck_n}{\delta^2 \ell(k_n)^2} = \frac{c}{\delta^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(\log(2^n))^{1+2\varepsilon}} < \infty,$$

mit Borel-Cantelli also

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\ell(k_n)} \max \{|S_k| : k \leq k_n\} \leq \delta \quad \text{f.s.}$$

Mit $\delta \downarrow 0$ folgt $\max \{|S_k| : k \leq k_n\} / \ell(k_n) \rightarrow 0$ f.s. für $n \rightarrow \infty$ und daher auch

$$\limsup_{m \rightarrow \infty} \frac{|S_m|}{\ell(m)} \leq \limsup_{m \rightarrow \infty} \underbrace{\frac{\ell(k_{\lceil \log_2 m \rceil})}{\ell(m)}}_{\text{ist beschr.}} \frac{\max \{|S_k| : k \leq k_{\lceil \log_2 m \rceil}\}}{\ell(k_{\lceil \log_2 m \rceil})} = 0 \quad \text{f.s.}$$

□

Satz 4.10. 1) $X_1, X_2, \dots \in \mathcal{L}^2(\mathbb{P})$ u.a, $\mathbb{E}[X_n] = 0$, $\sum_{n=1}^{\infty} \text{Var}[X_n] < \infty$, dann konvergiert $\sum_{n=1}^{\infty} X_n$ f.s.

2) $X_1, X_2, \dots \in \mathcal{L}^2(\mathbb{P})$ u.a, es gelte für ein $a > 0$ mit $Y_n := X_n \mathbf{1}_{\{|X_n| \leq a\}}$

$$i) \sum_{n=1}^{\infty} \mathbb{P}(|X_n| > a) < \infty$$

$$ii) \sum_{n=1}^{\infty} \mathbb{E}[Y_n] < \infty$$

$$iii) \sum_{n=1}^{\infty} \text{Var}[Y_n] < \infty$$

Dann konvergiert $\sum_{n=1}^{\infty} X_n$ f.s.

Beweis. 1) $S_n := X_1 + \dots + X_n$, für $m < n$ und $\varepsilon > 0$ ist

$$\mathbb{P}\left(\max_{m \leq k \leq n} |S_k - S_m| > \varepsilon\right) \leq \varepsilon^{-2} \text{Var}[S_n - S_m] = \varepsilon^{-2} \sum_{k=m}^n \text{Var}[X_k]$$

nach Satz 4.8, mit $n \rightarrow \infty$ folgt

$$\mathbb{P}\left(\max_{k \geq m} |S_k - S_m| > \varepsilon\right) \leq \varepsilon^{-2} \sum_{k=m}^{\infty} \text{Var}[X_k] \quad \left(\xrightarrow{m \rightarrow \infty} 0\right).$$

Sei $W_m := \sup_{\ell, k \geq m} |S_k - S_\ell|$, offenbar ist W_m nicht-wachsend in m und

$$\mathbb{P}(W_m \geq 2\varepsilon) \leq 2\mathbb{P}\left(\max_{k \geq m} |S_k - S_m| > \varepsilon\right) \xrightarrow{m \rightarrow \infty} 0$$

somit gilt $W_m \rightarrow 0$ f.s. für $m \rightarrow \infty$, d.h. $(S_n)_n$ ist f.s. Cauchy-Folge und daher konvergent.

2) 1) zusammen mit ii) und iii) liefert

$$\sum_{n=1}^{\infty} (Y_n - \mathbb{E}[Y_n]) \text{ konvergiert f.s.} \quad \text{und} \quad \sum_{n=1}^{\infty} \mathbb{E}[Y_n] \text{ konvergiert.}$$

i) und Borel-Cantelli-Lemma liefern $X_n = Y_n$ für $n \geq N_0$ für ein (zufälliges) $N_0 < \infty$, folglich konvergiert auch $\sum_{n=1}^{\infty} X_n$ f.s. □

Beispiel. Z_1, Z_2, \dots u.i.v. $\sim \mathcal{N}_{0,1}$, $t \in \mathbb{R}$, $X_n := Z_n \frac{1}{n} \sin(n\pi t)$. $\sum_{n=1}^{\infty} X_n$ konvergiert fast sicher.

Kapitel 5

Produktmaße und Übergangskerne

Lemma 5.1. Seien (S_1, \mathcal{A}_1) und (S_2, \mathcal{A}_2) messbare Räume, $f : S_1 \times S_2 \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ $(\mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2)$ - $(\mathcal{B}(\mathbb{R}))$ -messbar, $A \in \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$. Für $\tilde{x}_1 \in S_1, \tilde{x}_2 \in S_2$ gilt

$$\begin{aligned} A_{\tilde{x}_1} &:= \{x_2 \in S_2 : (\tilde{x}_1, x_2) \in A\} \in \mathcal{A}_2 \\ A_{\tilde{x}_2} &:= \{x_1 \in S_1 : (x_1, \tilde{x}_2) \in A\} \in \mathcal{A}_1 \\ f_{\tilde{x}_1} : S_2 &\rightarrow \overline{\mathbb{R}}, \quad x_2 \mapsto f_{\tilde{x}_1}(x_2) = f(\tilde{x}_1, x_2) \quad \text{ist } \mathcal{A}_2\text{-}\mathcal{B}(\mathbb{R})\text{-messbar} \\ f_{\tilde{x}_2} : S_1 &\rightarrow \overline{\mathbb{R}}, \quad x_1 \mapsto f_{\tilde{x}_2}(x_1) = f(x_1, \tilde{x}_2) \quad \text{ist } \mathcal{A}_1\text{-}\mathcal{B}(\mathbb{R})\text{-messbar} \end{aligned}$$

Sei $f \geq 0$, μ_i σ -endliches Maß auf (S_i, \mathcal{A}_i) (für $i = 1, 2$).

$$\begin{aligned} I_1 : x_2 &\mapsto \int_{S_1} f(x_1, x_2) \mu_1(dx_1) \quad \text{ist } \mathcal{A}_2\text{-}\mathcal{B}(\mathbb{R})\text{-messbar} \\ I_2 : x_1 &\mapsto \int_{S_2} f(x_1, x_2) \mu_2(dx_2) \quad \text{ist } \mathcal{A}_1\text{-}\mathcal{B}(\mathbb{R})\text{-messbar} \end{aligned} \tag{5.1}$$

Beweis. $\pi_i : S_1 \times S_2 \rightarrow S_i$ ($i = 1, 2$) seien die kanonischen Koordinatenprojektionen, $\tilde{x}_1 \in S_1$, $\iota : S_2 \rightarrow S_1 \times S_2, S_2 \ni x_2 \mapsto \iota(x_2) = (\tilde{x}_1, x_2)$ die Einbettung.

$\pi_1 \circ \iota$ ist konstant ($\equiv \tilde{x}_1$), insbesondere \mathcal{A}_1 -m.b.; $\pi_2 \circ \iota = \text{Id}_{S_2}$ ist \mathcal{A}_2 -m.b., also mit Lemma 1.43: ι ist \mathcal{A}_2 - $(\mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2)$ -messbar. Demnach: $A_{\tilde{x}_1} = \iota^{-1}(A) \in \mathcal{A}_2$, $f_{\tilde{x}_1} = f \circ \iota$ ist \mathcal{A}_2 -messbar.

Der Fall mit fixiertem $\tilde{x}_2 \in S_2$ geht analog.

Seien zunächst μ_1, μ_2 jeweils endliche Maße. (5.1) gilt für $f = \mathbf{1}_{A_1 \times A_2}$ mit $A_i \in \mathcal{A}_i$, denn dann ist $I_1(x_2) = \mu_1(A_1) \mathbf{1}_{A_2}(x_2)$, $I_2(x_1) = \mu_2(A_2) \mathbf{1}_{A_1}(x_1)$. Daher enthält

$$\mathcal{D} := \{A \in \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2 : (5.1) \text{ gilt für } f = \mathbf{1}_A\}$$

zumindest alle Zylindermengen $A = A_1 \times A_2$. \mathcal{D} ist ein Dynkin-System, da $\{A_1 \times A_2 : A_1 \in \mathcal{A}_1, A_2 \in \mathcal{A}_2\}$ ein \cap -stabiler Erzeuger von $\mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$ ist, folgt mit Satz 1.14, dass $\mathcal{D} = \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$.

Folglich:

$$(5.1) \text{ gilt für alle Elementarfunktionen.}$$

Ein allgemeines messbares $f \geq 0$ kann wachsend mit Elementarfunktionen approximiert werden, z.B. via

$$f = \lim_{n \rightarrow \infty} 2^{-n} [2^n f] \wedge n,$$

mit monotoner Konvergenz (Satz 3.11) und der Tatsache, dass der punktweise Limes messbarer Funktionen messbar ist (Lemma 1.45), folgt: (5.1) gilt allgemein.

Falls μ_i (nur) σ -endlich sind: Seien $B_n \nearrow S_1, C_n \nearrow S_2$ mit $\mu_1(B_n), \mu_2(C_n) < \infty$, so gilt (5.1) für $f_n(x_1, x_2) := \mathbf{1}_{B_n}(x_1)\mathbf{1}_{C_n}(x_2)f(x_1, x_2) \nearrow f(x_1, x_2)$. \square

Satz 5.2. Seien $(S_i, \mathcal{A}_i, \mu_i), i = 1, 2$ σ -endliche Maßräume, $S = S_1 \times S_2, \mathcal{A} = \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$.
Es gibt genau ein Maß μ (geschrieben $\mu = \mu_1 \otimes \mu_2$) auf (S, \mathcal{A}) mit

$$\mu(A_1 \times A_2) = \mu_1(A_1)\mu_2(A_2), \quad A_1 \in \mathcal{A}_1, A_2 \in \mathcal{A}_2. \quad (5.2)$$

μ heißt das Produktmaß von μ_1 und μ_2 ; μ ist σ -endlich.

Für $f \geq 0$ \mathcal{A} - $\mathcal{B}(\overline{\mathbb{R}})$ -messbar oder $f \in \mathcal{L}^1(\mu_1 \otimes \mu_2)$ gilt

$$\begin{aligned} \int_S f d(\mu_1 \otimes \mu_2) &= \int_{S_2} \left(\int_{S_1} f(x_1, x_2) \mu_1(dx_1) \right) \mu_2(dx_2) \\ &= \int_{S_1} \left(\int_{S_2} f(x_1, x_2) \mu_2(dx_2) \right) \mu_1(dx_1) \end{aligned} \quad (5.3)$$

Beweis. Eindeutigkeit und σ -Endlichkeit von μ ✓

Zur Existenz: Setze

$$\mu(A) := \int_{S_2} \left(\int_{S_1} \mathbf{1}_A(x_1, x_2) \mu_1(dx_1) \right) \mu_2(dx_2), \quad A \in \mathcal{A}$$

(ist wohldefiniert: gemäß Lemma 5.1 ist $x_2 \mapsto \int_{S_1} \mathbf{1}_A(x_1, x_2) \mu_1(dx_1) \geq 0$ eine messbare Funktion von x_2).

μ ist ein Maß: Offenbar $\mu(\emptyset) = 0$, seien $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{A}$ paarweise disjunkt, $A := \bigcup_n A_n$.

$$\begin{aligned} \mu(A) &= \int_{S_2} \left(\int_{S_1} \sum_{n=1}^{\infty} \mathbf{1}_{A_n}(x_1, x_2) \mu_1(dx_1) \right) \mu_2(dx_2) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \int_{S_2} \left(\int_{S_1} \mathbf{1}_{A_n}(x_1, x_2) \mu_1(dx_1) \right) \mu_2(dx_2) = \sum_{n=1}^{\infty} \mu(A_n) \end{aligned}$$

und für $A_1 \in \mathcal{A}_1, A_2 \in \mathcal{A}_2$ ist

$$\begin{aligned} \mu(A_1 \times A_2) &= \int_{S_2} \left(\int_{S_1} \mathbf{1}_{A_1}(x_1) \mathbf{1}_{A_2}(x_2) \mu_1(dx_1) \right) \mu_2(dx_2) \\ &= \int_{S_2} \mathbf{1}_{A_2}(x_2) \underbrace{\left(\int_{S_1} \mathbf{1}_{A_1}(x_1) \mu_1(dx_1) \right)}_{=\mu_1(A_1)} \mu_2(dx_2) = \mu_1(A_1)\mu_2(A_2). \end{aligned}$$

Zu (5.3):

$$\tilde{\mu}(A) := \int_{S_1} \left(\int_{S_2} \mathbf{1}_A(x_1, x_2) \mu_2(dx_2) \right) \mu_1(dx_1), \quad A \in \mathcal{A}$$

ist ebenfalls ein Maß, das (5.2) erfüllt, also $\mu = \tilde{\mu}$.

Demnach gilt (5.3) für $f = \mathbf{1}_A$ mit $A \in \mathcal{A}$.

$$\{f \geq 0 : f \text{ m.b.}, (5.3) \text{ gilt für } f\}$$

erfüllt die Voraussetzungen von Beob. 3.15, also gilt (5.3) für jedes messbare $f \geq 0$ (möglicherweise als $+\infty = +\infty = +\infty$).

Sei nun $f = f^+ - f^- \in \mathcal{L}^1(\mu)$.

$$C_1 := \left\{ x_1 \in S_1 : \int_{S_2} f^+(x_1, x_2) \mu_2(dx_2) = \infty \text{ oder } \int_{S_2} f^-(x_1, x_2) \mu_2(dx_2) = \infty \right\}$$

erfüllt $\mu_1(C_1) = 0$,

$$C_2 := \left\{ x_2 \in S_2 : \int_{S_1} f^+(x_1, x_2) \mu_1(dx_1) = \infty \text{ oder } \int_{S_1} f^-(x_1, x_2) \mu_1(dx_1) = \infty \right\}$$

erfüllt $\mu_2(C_2) = 0$, somit

$$\mu(M) = 0 \text{ für } M := C_1 \times S_2 \cup S_1 \times C_2 = (C_1^c \times C_2^c)^c$$

und

$$\begin{aligned} \int_S f d(\mu_1 \otimes \mu_2) &= \int_S \mathbf{1}_{M^c} (f^+ - f^-) d(\mu_1 \otimes \mu_2) \\ &= \int_{S_1} \mathbf{1}_{C_1^c} \int_{S_2} \mathbf{1}_{C_2^c} (f^+ - f^-) d\mu_2 d\mu_1 = \int_{S_1} \int_{S_2} (f^+ - f^-) d\mu_2 d\mu_1 \\ &= \int_{S_2} \mathbf{1}_{C_2^c} \int_{S_1} \mathbf{1}_{C_1^c} (f^+ - f^-) d\mu_1 d\mu_2 = \int_{S_2} \int_{S_1} (f^+ - f^-) d\mu_1 d\mu_2. \end{aligned}$$

□

Satz 5.3. $(S_i, \mathcal{A}_i, \mu_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$ σ -endliche Maßräume, $S := \times_{i=1}^n S_i$, $\mathcal{A} := \otimes_{i=1}^n \mathcal{A}_i$. Es gibt genau ein Maß μ auf (S, \mathcal{A}) mit

$$\mu(A_1 \times \dots \times A_n) = \prod_{i=1}^n \mu_i(A_i), \quad \text{für } A_i \in \mathcal{A}_i, i = 1, \dots, n.$$

μ heißt das Produktmaß von μ_1, \dots, μ_n , geschrieben $\mu = \mu_1 \otimes \dots \otimes \mu_n = \otimes_{i=1}^n \mu_i$.

Falls $(S_i, \mathcal{A}_i, \mu_i) = (S_1, \mathcal{A}_1, \mu_1)$ für $i = 2, \dots, n$, so schreibt man auch $\mu = \mu_1^{\otimes n}$.

Beweis. Induktiv: Für $n = 2$ ist dies Satz 5.2. Sei $n > 2$,

$$\tilde{S} := S_1 \times \dots \times S_{n-1}, \quad \tilde{\mathcal{A}} := \mathcal{A}_1 \otimes \dots \otimes \mathcal{A}_{n-1}.$$

Das gewünschte Maß $\tilde{\mu} = \mu_1 \otimes \dots \otimes \mu_{n-1}$ auf $(\tilde{S}, \tilde{\mathcal{A}})$ existiert nach Ind.ann. Dann ist $S = \tilde{S} \times S_n$ und das gewünschte $\mu = \tilde{\mu} \otimes \mu_n$ existiert nach Satz 5.2. □

5.1 (Übergangs-)Kerne

Definition 5.4. Seien (S_1, \mathcal{A}_1) und (S_2, \mathcal{A}_2) messbare Räume. $\kappa: S_1 \times \mathcal{A}_2 \rightarrow [0, \infty]$ heißt (σ) -endlicher Kern von (S_1, \mathcal{A}_1) nach (S_2, \mathcal{A}_2) , falls gilt

- i) Für alle $A_2 \in \mathcal{A}_2$ gilt: $S_1 \ni x \mapsto \kappa(x, A_2)$ ist $(\mathcal{A}_1 - \mathcal{B}(\mathbb{R}))$ -messbar.
- ii) Für alle $x \in S_1$ gilt: $\kappa(x, \cdot)$ ist ein (σ) -endliches Maß auf (S_2, \mathcal{A}_2) .

κ heißt *stochastischer Kern* oder *Markov-Kern*, wenn in ii) gefordert wird, dass $\kappa(x, \cdot)$ ein W'maß ist. κ heißt *sub-stochastisch* oder *sub-Markov*, wenn $\kappa(x, S_2) \leq 1$ für alle $x \in S_1$ gilt.

Beispiel.

- i) Sei $S_1 = S_2 = S$ höchstens abzählbar, $\mathcal{A}_1 = \mathcal{A}_2 = 2^S$ und $(p_{xy})_{x,y \in S}$ eine stochastische Matrix. Dann ist $\kappa(x, A) := \sum_{y \in A} p_{xy}$ ein stochastischer Kern von S nach S .
- ii) Sei $S_1 = S_2 = \mathbb{R}$, $\mathcal{A}_1 = \mathcal{A}_2 = \mathcal{B}(\mathbb{R})$ und ν ein W'maß auf \mathbb{R} . Dann ist $\kappa(x, A) := (\delta_x * \nu)(A) = \nu(A - x)$ ein stochastischer Kern.
(Interpretation: $\kappa(x, \cdot)$ beschreibt einen zufälligen Sprung gemäß ν von x aus.)

Lemma 5.5. κ endlicher Übergangskern von (S_1, \mathcal{A}_1) nach (S_2, \mathcal{A}_2) , $f: S_1 \times S_2 \rightarrow [0, \infty]$ $\mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$ - $\mathcal{B}(\mathbb{R})$ -messbar. Dann definiert

$$I_f: S_1 \rightarrow [0, \infty], \quad I_f(x_1) = \int_{S_2} f(x_1, x_2) \kappa(x_1, dx_2)$$

eine \mathcal{A}_1 - $(\mathcal{B}(\mathbb{R}))$ -messbare Abbildung.

Beweis. Nach Lemma 5.1 ist $x_2 \mapsto f(x_1, x_2)$ \mathcal{A}_2 -messbar, d.h. das Integral ist erklärt.

$$\mathcal{D} := \{ A \in \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2 : I_{1_A} \text{ ist } \mathcal{A}_1\text{-messbar} \}$$

umfasst die Zylindermengen $\mathcal{L} = \{ A_1 \times A_2 : A_1 \in \mathcal{A}_1, A_2 \in \mathcal{A}_2 \}$, ist ein Dynkin-System, da \mathcal{L} ein \cap -stabiler Erzeuger von $\mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$ ist, folgt mit Satz 1.14, dass $\mathcal{D} = \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$, d.h. die Behauptung gilt für jedes $f = 1_A$, $A \in \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$ und daher auch für Elementarfunktionen.

Ein allgemeines messbares $f \geq 0$ kann wachsend mit Elementarfunktionen approximiert werden, z.B. via

$$f = \lim_{n \rightarrow \infty} 2^{-n} \lfloor 2^n f \rfloor \wedge n,$$

mit monotoner Konvergenz (Satz 3.11) und der Tatsache, dass der punktweise Limes messbarer Funktionen messbar ist (Lemma 1.45), folgt der allgemeine Fall. \square

Satz und Definition 5.6 (Produkt von Kernen, „zweistufiges Experiment“). (S_i, \mathcal{A}_i) , $i = 0, 1, 2$ m.b. Räume, κ_1 endlicher Kern von (S_0, \mathcal{A}_0) nach (S_1, \mathcal{A}_1) , κ_2 endlicher Kern von $(S_0 \times S_1, \mathcal{A}_0 \otimes \mathcal{A}_1)$ nach (S_2, \mathcal{A}_2) . Dann ist $\kappa_1 \otimes \kappa_2: S_0 \times \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2 \rightarrow [0, \infty]$,

$$(\kappa_1 \otimes \kappa_2)(x_0, A) = \int_{S_1} \int_{S_2} 1_A(x_1, x_2) \kappa_2((x_0, x_1), dx_2) \kappa_1(x_0, dx_1)$$

ein σ -endlicher Kern von (S_0, \mathcal{A}_0) nach $(S_1 \times S_2, \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2)$, $\kappa_1 \otimes \kappa_2$ heißt das Produkt von κ_1 und κ_2 .

Sind κ_1 und κ_2 (sub-)stochastisch, so auch $\kappa_1 \otimes \kappa_2$.

Analog definieren wir $\kappa_1 \otimes \kappa_2$, wenn κ_2 Kern von (S_1, \mathcal{A}_1) nach (S_2, \mathcal{A}_2) , indem wir κ_2 formal als Kern von $(S_0 \times S_1, \mathcal{A}_0 \otimes \mathcal{A}_1)$ nach (S_2, \mathcal{A}_2) auffassen, der nicht von der S_0 -Koordinate abhängt.

Beweis. Sei $A \in \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2$:

$$f_A : S_0 \times S_1 \ni (x_0, x_1) \mapsto \int_{S_2} \mathbf{1}_A(x_1, x_2) \kappa_2((x_0, x_1), dx_2)$$

ist $\mathcal{A}_0 \otimes \mathcal{A}_1$ -m.b. nach Lemma 5.5, also ist auch

$$S_0 \ni x_0 \mapsto (\kappa_1 \otimes \kappa_2)(x_0, A) = \int_{S_1} f_A(x_0, x_1) \kappa_1(x_0, dx_1)$$

\mathcal{A}_0 -m.b. (wiederum nach Lemma 5.5).

Für $x_0 \in S_0$ ist

$$\mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2 \ni A \mapsto (\kappa_1 \otimes \kappa_2)(x_0, A) \quad (\geq 0)$$

σ -additiv gem. Satz von der monotonen Konvergenz.

Sei $A_{x_0, n} := \{x_1 \in S_1 : \kappa_2((x_0, x_1), S_2) \leq n\} \nearrow_{n \rightarrow \infty} S_1$ und

$$(\kappa_1 \otimes \kappa_2)(x_0, A_{x_0, n} \times S_2) \leq n \kappa_1(x_0, A_{x_0, n}),$$

d.h. $\kappa_1 \otimes \kappa_2$ ist σ -endlich. □

Korollar 5.7. $(S_1, \mathcal{A}_1, \mu)$ Maßraum mit $\mu(S_1) < \infty$, (S_2, \mathcal{A}_2) messbarer Raum, κ endlicher Kern von S_1 nach S_2 .

Dann gibt es ein eindeutiges σ -endliches Maß $\mu \otimes \kappa$ (auf $(S_1 \times S_2, \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2)$) mit

$$\mu \otimes \kappa(A_1 \times A_2) = \int_{A_1} \kappa(x_1, A_2) \mu(dx_1), \quad A_1 \in \mathcal{A}_1, A_2 \in \mathcal{A}_2$$

Ist κ stochastisch und μ ein W maß, so ist auch $\mu \otimes \kappa$ ein W maß.

Beweis. Setze $S_0 = \{0\}$, $\mathcal{A}_0 = \{\emptyset, \{0\}\}$, $\kappa_1(0, A_1) = \mu(A_1)$ und $\kappa_2 = \kappa$ in Satz 5.6. □

Korollar und Definition 5.8. $n \in \mathbb{N}$, (S_i, \mathcal{A}_i) , $i = 0, 1, \dots, n$ m.b. Räume, κ_i (sub-)stochastischer Kern von $(\times_{j=0}^{i-1} S_j, \otimes_{j=0}^{i-1} \mathcal{A}_j)$ nach (S_i, \mathcal{A}_i) (oder von $(S_{i-1}, \mathcal{A}_{i-1})$ nach (S_i, \mathcal{A}_i)) für $i = 1, \dots, n$.

Setze (rekursiv)

$$\bigotimes_{j=1}^i \kappa_j = \kappa_1 \otimes \dots \otimes \kappa_i := (\kappa_1 \otimes \dots \otimes \kappa_{i-1}) \otimes \kappa_i.$$

$\bigotimes_{j=1}^i \kappa_j$ ist substochastischer Kern von (S_0, \mathcal{A}_0) nach $(\times_{j=1}^i S_j, \otimes_{j=1}^i \mathcal{A}_j)$ (stochastisch, falls dies für alle κ_j gilt).

Ist weiter μ endliches Maß auf (S_0, \mathcal{A}_0) , so ist $\mu_i := \mu \otimes \bigotimes_{j=1}^i \kappa_j$ endliches Maß auf $(\times_{j=0}^i S_j, \otimes_{j=0}^i \mathcal{A}_j)$; $\mu \otimes \bigotimes_{j=1}^i \kappa_j$ ist W maß, wenn $\mu(S_0) = 1$ und alle κ_j stochastisch sind.

(Verwende induktiv Satz 5.6 und Kor. 5.7.)

Wir betrachten folgende Situation:

$$\begin{aligned} & (\Omega_i, \mathcal{A}_i), i = 0, 1, 2, \dots \quad \text{messbare Rume,} \\ \Omega^{(i)} & := \prod_{j=0}^i \Omega_j \text{ versehen mit } \mathcal{A}^{(i)} := \bigotimes_{j=0}^i \mathcal{A}_j, \\ \Omega & := \prod_{j=0}^{\infty} \Omega_j \text{ versehen mit } \mathcal{A} := \bigotimes_{j=0}^{\infty} \mathcal{A}_j. \end{aligned}$$

Weiter sei

$$\begin{aligned} & P_0 \text{ ein W'maß auf } (\Omega_0, \mathcal{A}_0), \\ & \kappa_i \text{ stochastischer Kern von } (\Omega^{(i-1)}, \mathcal{A}^{(i-1)}) \text{ nach } (\Omega_i, \mathcal{A}_i) \text{ fur } i = 0, 1, 2, \dots, \\ & P_i := P_0 \otimes \bigotimes_{j=1}^i \kappa_j \quad (\text{ist ein W'maß auf } (\Omega^{(i)}, \mathcal{A}^{(i)}) \text{ nach Kor. 5.8}) \end{aligned}$$

Beobachtung. Fur $i \in \mathbb{N}$, $A \in \mathcal{A}^{(i)}$ gilt

$$P_{i+1}(A \times \Omega_{i+1}) = P_i(A)$$

Sei

$$\mathcal{C} := \left\{ A \times \Omega_{i+1} \times \Omega_{i+2} \times \dots : i \in \mathbb{N}, A \in \mathcal{A}^{(i)} \right\}$$

\mathcal{C} ist eine Algebra mit $\sigma(\mathcal{C}) = \mathcal{A}$.

Satz 5.9 (Ionescu-Tulcea¹). *Es gibt genau ein W'maß P auf (Ω, \mathcal{A}) , das*

$$P\left(A \times \prod_{j=k+1}^{\infty} \Omega_j\right) = P_k(A) \quad \text{fur } A \in \mathcal{A}^{(k)}, k \in \mathbb{N} \quad (5.4)$$

erfullt.

Beweis. Eindeutigkeit ✓

Definiere P auf \mathcal{C} via (5.4): ist wohldefiniert, ist Inhalt (mit $P(\Omega) = 1$)).

Zeige: Seien $A_1 \supset A_2 \supset \dots$, $A_n \in \mathcal{C}$ mit $\alpha := \inf_{n \in \mathbb{N}} P(A_n) > 0$, so gilt $\bigcap_n A_n \neq \emptyset$

O.E. sei $A_n = A'_n \times \Omega_{n+1} \times \Omega_{n+2} \times \dots$ mit einem $A'_n \in \mathcal{A}^{(n)}$, setze

$$h_{m,n}(\omega_0, \dots, \omega_m) := \left(\bigotimes_{j=m+1}^n \kappa_j \right) \left((\omega_0, \dots, \omega_m), A'_n \right) \quad \text{fur } n \geq m, \omega_i \in \Omega_i.$$

Fur $n = m$ lese das triviale Produkt als „Identitatskern“, d.h.

$$h_{m,m}(\omega_0, \dots, \omega_m) = \mathbf{1}_{A'_m} \left((\omega_0, \dots, \omega_m) \right)$$

¹Cassius Ionescu-Tulcea, 1923–2021

Es gilt

$$\begin{aligned}
h_{m,n+1}(\omega_0, \dots, \omega_m) &= \left(\bigotimes_{j=m+1}^{n+1} \kappa_j \right) ((\omega_0, \dots, \omega_m), A'_{n+1}) \\
&\leq \left(\bigotimes_{j=m+1}^{n+1} \kappa_j \right) ((\omega_0, \dots, \omega_m), A'_n \times \Omega_{n+1}) \\
&= \left(\bigotimes_{j=m+1}^n \kappa_j \right) ((\omega_0, \dots, \omega_m), A'_n) = h_{m,n}(\omega_0, \dots, \omega_m),
\end{aligned}$$

also

$$h_{m,n}(\omega_0, \dots, \omega_m) \searrow_{n \rightarrow \infty} \inf_{n \geq m} h_{m,n}(\omega_0, \dots, \omega_m) =: h_m(\omega_0, \dots, \omega_m)$$

und

$$\int_{\Omega_0 \times \dots \times \Omega_m} h_m dP_m = \inf_{n \geq m} \int_{\Omega_0 \times \dots \times \Omega_m} h_{m,n} dP_m = \inf_{n \geq m} P_n(A'_n) = \inf_{n \geq m} P(A_n) > 0.$$

Zeige:

$$\text{es gibt } (\tilde{\omega}_0, \tilde{\omega}_1, \tilde{\omega}_2, \dots) \in \Omega \text{ mit } h_m(\tilde{\omega}_0, \tilde{\omega}_1, \dots, \tilde{\omega}_m) \geq \alpha \quad \forall m \quad (5.5)$$

induktiv nach m :

$m = 0$: ✓

Seien $\tilde{\omega}_0, \tilde{\omega}_1, \dots, \tilde{\omega}_m$ gewählt, so dass (5.5) (für dieses m) gilt:

$$\begin{aligned}
&\int_{\Omega_{m+1}} h_{m+1}(\tilde{\omega}_0, \dots, \tilde{\omega}_m, \omega_{m+1}) \kappa_{m+1}((\tilde{\omega}_0, \dots, \tilde{\omega}_m), d\omega_{m+1}) \\
&= \inf_{n \geq m+1} \int_{\Omega_{m+1}} h_{m+1,n}(\tilde{\omega}_0, \dots, \tilde{\omega}_m, \omega_{m+1}) \kappa_{m+1}((\tilde{\omega}_0, \dots, \tilde{\omega}_m), d\omega_{m+1}) \\
&= \inf_{n \geq m+1} h_{m,n}(\tilde{\omega}_0, \dots, \tilde{\omega}_m) = h_m(\tilde{\omega}_0, \dots, \tilde{\omega}_m) \geq \alpha
\end{aligned}$$

Nach Konstruktion ist

$$\alpha \leq h_{m,m}(\tilde{\omega}_0, \tilde{\omega}_1, \dots, \tilde{\omega}_m) = \mathbf{1}_{A'_m}((\tilde{\omega}_0, \tilde{\omega}_1, \dots, \tilde{\omega}_m)) \quad \text{für alle } m \in \mathbb{N},$$

somit

$$(\tilde{\omega}_0, \tilde{\omega}_1, \dots) \in \bigcap_{m=1}^{\infty} A_m \neq \emptyset.$$

□

Korollar 5.10 (Abzählbar unendliches Produktmaß). Seien $(\Omega_i, \mathcal{A}_i, P_i)$, $i \in \mathbb{N}_0$ W 'räume. Es gibt genau ein W 'maß P , geschrieben $P = \bigotimes_{i=0}^{\infty} P_i$, auf $\Omega := \times_{i=0}^{\infty} \Omega_i$, $\mathcal{A} := \bigotimes_{i=0}^{\infty} \mathcal{A}_i$ mit

$$P(A_0 \times \dots \times A_n \times \Omega_{n+1} \times \dots) = \prod_{i=0}^n P_i(A_i) \quad \text{für } n \in \mathbb{N}, A_i \in \mathcal{A}_i.$$

(Wähle $\kappa_i((\omega_0, \dots, \omega_{i-1}), \cdot) = P_i(\cdot)$ in Satz 5.9.)

Korollar 5.11. S endl. oder abzählbar, μ W 'maß auf S , $(p_{x,y})_{x,y \in S}$ stochastische Matrix auf S . Es gibt genau ein W 'maß P auf $S^{\mathbb{Z}_+}$ mit

$$P(\{x_0\} \times \{x_1\} \times \dots \times \{x_n\} \times S^{\mathbb{N}}) = \mu_{x_0} p_{x_0, x_1} \dots p_{x_{n-1}, x_n} \quad \text{für } n \in \mathbb{N}, x_0, \dots, x_n \in S$$

5.2 Faltung

Definition 5.12. Für messbare $f, g : \mathbb{R}^d \rightarrow [0, \infty]$ ist die *Faltung* $f * g : \mathbb{R}^d \rightarrow [0, \infty]$ gegeben durch

$$(f * g)(x) = \int_{\mathbb{R}^d} f(y)g(x-y) \lambda^d(dy), \quad x \in \mathbb{R}^d$$

Für endliche Maße μ, ν auf $(\mathbb{R}^d, \mathcal{B}(\mathbb{R}^d))$ ist die Faltung $\mu * \nu$ gegeben durch

$$(\mu * \nu)(A) = \int_{\mathbb{R}^d} \nu(A-x) \mu(dx), \quad A \in \mathcal{B}(\mathbb{R}^d)$$

Lemma 5.13. $f * g : \mathbb{R}^d \rightarrow [0, \infty]$ ist messbar, es gelten $f * g = g * f$ und $\int (f * g) d\lambda = \left(\int f d\lambda \right) \left(\int g d\lambda \right)$.

$\mu * \nu = \nu * \mu$ ist ein endliches Maß mit $(\mu * \nu)(\mathbb{R}^d) = \mu(\mathbb{R}^d)\nu(\mathbb{R}^d)$.

Beweis. Dies folgt aus Satz 5.2. □

Satz 5.14. *i)* X, Y unabhängige \mathbb{R}^d -wertige ZVn mit Dichte f_X bzw. f_Y , so hat $X + Y$ die Dichte $f_X * f_Y$.

ii) $\mu = f \lambda^d, \nu = g \lambda^d$ endliche Maße auf \mathbb{R}^d mit Dichten bzgl. dem d -dimensionalen Lebesgue-Maß λ^d , so ist $\mu * \nu = (f * g) \lambda^d$

Beweis. *i)* Sei $x \in \mathbb{R}^d, A = \{(u, v) \in \mathbb{R}^d \times \mathbb{R}^d : u + v \leq x\}$:

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(X + Y \leq x) &= \mathbb{P}((X, Y) \in A) \\ &= \int_{\mathbb{R}^d \times \mathbb{R}^d} \mathbf{1}_A(u, v) f_X(u) f_Y(v) (\lambda^d)^{\otimes 2}(d(u, v)) \\ &= \int_{\mathbb{R}^d} \left(\int_{\mathbb{R}^d} \mathbf{1}_A(u, v) f_X(u) \lambda^d(du) \right) f_Y(v) \lambda^d(dv) \\ &= \int_{\mathbb{R}^d} \left(\int_{(-\infty, x-v]} f_X(u) \lambda^d(du) \right) f_Y(v) \lambda^d(dv) \\ &= \int_{\mathbb{R}^d} \left(\int_{(-\infty, x]} f_X(u-v) \lambda^d(du) \right) f_Y(v) \lambda^d(dv) \\ &= \int_{(-\infty, x]} \left(\int_{\mathbb{R}^d} f_X(u-v) f_Y(v) \lambda^d(dv) \right) \lambda^d(du) = \int_{(-\infty, x]} (f_X * f_Y) d\lambda^d \end{aligned}$$

ii) Analoge Rechnung □

Kapitel 6

Zur bedingten Erwartung

Erinnerung 6.1. Sei $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ W'raum, $B \in \mathcal{F}$ mit $\mathbb{P}(B) > 0$.

$$\mathbb{P}(A | B) = \frac{\mathbb{P}(A \cap B)}{\mathbb{P}(B)}, \quad A \in \mathcal{F}$$

heißt die *bedingte Wahrscheinlichkeit von A, gegeben B*.

$\mathbb{P}(\cdot | B)$ definiert durch diese Formel ein W'Maß auf (Ω, \mathcal{F}) mit $\mathbb{P}(B | B) = 1$, für $Y \in \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$ ist

$$\mathbb{E}[Y | B] = \int Y(\omega) \mathbb{P}(d\omega | B) = \frac{\mathbb{E}[\mathbf{1}_B Y]}{\mathbb{P}(B)}.$$

Bemerkung 6.2 (Diskreter Fall der bedingten Erwartung). X und Y ZVn (auf einem W'raum $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$), $Y \in \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$, X nehme höchstens abzählbar viele Werte x_1, x_2, \dots an. Setze

$$f(x) := \mathbb{E}[Y | \{X = x\}] \quad \text{für } x \in \{x_1, x_2, \dots\}$$

und $\mathbb{E}[Y | X] := f(X)$.

Offenbar ist $\mathbb{E}[Y | X]$ $\sigma(X)$ -messbar (es ist eine Funktion von X) und für $A \in \sigma(X)$ gilt

$$\mathbb{E}[Y \mathbf{1}_A] = \mathbb{E}[\mathbb{E}[Y | X] \mathbf{1}_A]$$

(klar für $A = \{X = x_i\}$ und dann auch für $A = \{X \in B\}$ mit $B \subset \{x_1, x_2, \dots\}$; jedes $A \in \sigma(X)$ hat diese Form).

Wir betrachten im folgenden einen W'raum $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$.

Definition 6.3. $X \in \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$, $\mathcal{G} \subset \mathcal{F}$ Teil- σ -Algebra. Eine reellwertige ZV Y heißt (eine Version der) bedingte(n) Erwartung von X gegeben \mathcal{G} (geschrieben $\mathbb{E}[X | \mathcal{G}]$), wenn gilt

- i) Y ist \mathcal{G} -messbar,
- ii) $\mathbb{E}[Y \mathbf{1}_A] = \mathbb{E}[X \mathbf{1}_A]$ für alle $A \in \mathcal{G}$.

Bemerkung. Äquivalent kann ii) durch ii') ersetzt werden:

ii') $\mathbb{E}[Y \cdot H] = \mathbb{E}[X \cdot H]$ für alle reellwertigen, beschr., \mathcal{G} -messbaren ZV H .

Falls $\mathcal{G} = \sigma(Z)$ für eine Zufallsvariable Z , so schreibt man oft auch $\mathbb{E}[X | Z] := \mathbb{E}[X | \sigma(Z)]$.

Satz 6.4. Für $X \in \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$ existiert $\mathbb{E}[X | \mathcal{G}]$ und ist eindeutig (bis auf \mathbb{P} -f.s.-Gleichheit).

Beweis von Satz 6.4 (Eindeutigkeit). Seien Y, \tilde{Y} bedingte Erwartungen.

$$\mathbb{E}[Y \cdot \mathbf{1}_{\{Y > \tilde{Y}\}}] = \mathbb{E}[X \cdot \mathbf{1}_{\{Y > \tilde{Y}\}}] = \mathbb{E}[\tilde{Y} \cdot \mathbf{1}_{\{Y > \tilde{Y}\}}],$$

also $\mathbb{E}[(Y - \tilde{Y}) \cdot \mathbf{1}_{\{Y > \tilde{Y}\}}] = 0 \Rightarrow \mathbb{P}(Y > \tilde{Y}) = 0$; analog gilt $\mathbb{P}(\tilde{Y} > Y) = 0$, also $Y = \tilde{Y}$ \mathbb{P} -f.s. \square

Satz 6.5. $\mathcal{H} \subset \mathcal{L}^2(\mathbb{P})$ abgeschlossener Unterraum. Zu $X \in \mathcal{L}^2(\mathbb{P})$ gibt es (bis auf \mathbb{P} -f.s. Gleichheit) genau ein $Y \in \mathcal{H}$ mit

$$i) \|Y - X\|_2 = \inf \{ \|W - X\|_2 : W \in \mathcal{H} \}$$

$$ii) \mathbb{E}[(X - Y)Z] = 0 \text{ für alle } Z \in \mathcal{H}$$

Y ist (die Äquivalenzklasse) der orthogonalen Projektion von X auf \mathcal{H} , auch $\text{Proj}_{\mathcal{H}}(X)$ geschrieben.

Beweis. Wähle $Y_n \in \mathcal{H}$ mit

$$\|X - Y_n\|_2 \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \alpha := \inf \{ \|W - X\|_2 : W \in \mathcal{H} \}$$

Es ist

$$\|X - Y_n\|_2^2 + \|X - Y_m\|_2^2 = 2\|X - \frac{1}{2}(Y_n + Y_m)\|_2^2 + 2\|\frac{1}{2}(Y_n - Y_m)\|_2^2$$

wegen $\lim_{n \rightarrow \infty} \|X - Y_n\|_2^2 = \lim_{m \rightarrow \infty} \|X - Y_m\|_2^2 = \alpha^2 \leq \liminf_{n, m \rightarrow \infty} \|X - \frac{1}{2}(Y_n + Y_m)\|_2^2$ folgt

$$\limsup_{n, m \rightarrow \infty} \|Y_n - Y_m\|_2 = 0,$$

d.h. $(Y_n)_n \subset \mathcal{L}^2(\mathbb{P})$ ist Cauchy-Folge.

Demnach gibt es $Y \in \mathcal{L}^2(\mathbb{P})$ mit $Y_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{\mathcal{L}^2(\mathbb{P})} Y$ ($\mathcal{L}^2(\mathbb{P})$ ist vollständig, Satz 3.25). Wähle (mit Bem. 3.23 und Lemma 3.24) Teilfolge $(n_k)_k$ mit $Y = \lim_{k \rightarrow \infty} Y_{n_k}$ \mathbb{P} -f.s., dann ist $Y \in \mathcal{H}$ mit

$$\alpha^2 \leq \mathbb{E}[(X - Y)^2] \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \mathbb{E}[(X - Y_n)^2] = \alpha^2$$

Sei $Z \in \mathcal{H}$, für $t \in \mathbb{R}$ ist

$$\mathbb{E}[(X - (Y - tZ))^2] \geq \mathbb{E}[(X - Y)^2]$$

(nach Wahl von Y), also

$$2t \mathbb{E}[(X - Y)Z] + t^2 \mathbb{E}[Z^2] \geq 0 \quad \text{für alle } t \in \mathbb{R},$$

was $\mathbb{E}[(X - Y)Z] = 0$ erzwingt.

(Übrigens: Für $Y \in \mathcal{H}$ gilt $i) \Leftrightarrow ii).$)

Zur Eindeutigkeit: \tilde{Y} erfülle ebenfalls i), es ist

$$\begin{aligned} \left(X - \frac{1}{2}(Y + \tilde{Y})\right)^2 &= \left(\frac{1}{2}(X - Y) + \frac{1}{2}(X - \tilde{Y})\right)^2 \\ &\leq \frac{1}{2}(X - Y)^2 + \frac{1}{2}(X - \tilde{Y})^2, \end{aligned}$$

die Ungleichung ist strikt auf $\{Y \neq \tilde{Y}\}$.

Wäre $\mathbb{P}(Y \neq \tilde{Y}) > 0$, so wäre

$$\mathbb{E}\left[\left(X - \frac{1}{2}(Y + \tilde{Y})\right)^2\right] < \frac{1}{2}\mathbb{E}[(X - Y)^2] + \frac{1}{2}\mathbb{E}[(X - \tilde{Y})^2] = \frac{1}{2}\alpha + \frac{1}{2}\alpha = \alpha,$$

ein Widerspruch, da $(Y + \tilde{Y})/2 \in \mathcal{H}$. □

Beweis von Satz 6.4 (Existenz). Sei zunächst $X \in \mathcal{L}^2(\mathbb{P})$,

$$\mathcal{H} := \{Y \in \mathcal{L}^2(\mathbb{P}) : Y \text{ ist } \mathcal{G}\text{-messbar}\} \subset \mathcal{L}^2(\mathbb{P})$$

ist ein abgeschlossener Unterraum, $Y := \text{Proj}_{\mathcal{H}}(X)$ (nach Satz 6.5) leistet das Gewünschte.

Beachte:

$$X \geq 0 \Rightarrow Y := \mathbb{E}[X | \mathcal{G}] \geq 0 \quad \text{f.s.},$$

denn dann ist $0 \leq \mathbb{E}[X \mathbf{1}_{\{Y < 0\}}] = \mathbb{E}[Y \mathbf{1}_{\{Y < 0\}}]$.

Sei nun $X \in \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$, $X \geq 0$:

$$Y_n := \mathbb{E}[X \wedge n | \mathcal{G}] \nearrow Y (\geq 0) \quad \text{(f.s.)}$$

($X \wedge n \in \mathcal{L}^2(\mathbb{P})$, nutze dann obige Monotonie-Eigenschaft, um $\mathbb{E}[X \wedge n | \mathcal{G}] \leq \mathbb{E}[X \wedge (n+1) | \mathcal{G}]$ f.s. zu sehen), für $A \in \mathcal{G}$ gilt

$$\mathbb{E}[X \mathbf{1}_A] = \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{E}[(X \wedge n) \mathbf{1}_A] = \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{E}[Y_n \mathbf{1}_A] = \mathbb{E}[Y \mathbf{1}_A]$$

(mit monotoner Konvergenz).

Für allgemeines $X \in \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$ leistet

$$Y := \mathbb{E}[X^+ | \mathcal{G}] - \mathbb{E}[X^- | \mathcal{G}]$$

das Gewünschte. □

Satz 6.6. $X, Y \in \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$, $\mathcal{G} \subset \mathcal{F}$ Teil- σ -Algebra.

i) $\mathbb{E}[aX + bY | \mathcal{G}] = a\mathbb{E}[X | \mathcal{G}] + b\mathbb{E}[Y | \mathcal{G}]$ f.s. für $a, b \in \mathbb{R}$ (Linearität)

ii) $X \leq Y$ f.s. $\Rightarrow \mathbb{E}[X | \mathcal{G}] \leq \mathbb{E}[Y | \mathcal{G}]$ f.s. (Monotonie)

iii) $|\mathbb{E}[X | \mathcal{G}]| \leq \mathbb{E}[|X| | \mathcal{G}]$ f.s. (Dreiecksungleichung)

iv) Es gelte $\mathbb{E}[|XY|] < \infty$ und Y sei \mathcal{G} -messbar, dann ist

$$\mathbb{E}[XY | \mathcal{G}] = Y \cdot \mathbb{E}[X | \mathcal{G}] \text{ f.s.,}$$

insbesondere ist $\mathbb{E}[Y|\mathcal{G}] = Y$ f.s. („Herausziehen von Bekanntem“)

v) Sind $\sigma(X)$ und \mathcal{G} unabhängig, so ist $\mathbb{E}[X | \mathcal{G}] = \mathbb{E}[X]$ f.s. (Verhalten bei Unabhängigkeit)

vi) $\mathcal{G}' \subset \mathcal{G}$ Teil- σ -Algebra, so ist

$$\mathbb{E}[\mathbb{E}[X | \mathcal{G}] | \mathcal{G}'] = \mathbb{E}[X | \mathcal{G}'] \text{ f.s.,}$$

(„Turmeigenschaft“) insbesondere ist

$$\mathbb{E}[\mathbb{E}[X | \mathcal{G}]] = \mathbb{E}[X]$$

vii) $0 \leq X_n \nearrow X$ f.s. für $n \rightarrow \infty$, so gilt

$$\mathbb{E}[X_n | \mathcal{G}] \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} \mathbb{E}[X | \mathcal{G}] \text{ f.s. und in } \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$$

(monotone Konvergenz)

viii) X_n reelle ZVn mit $|X_n| \leq Y \forall n$ und $X_n \rightarrow X$ f.s., so gilt

$$\mathbb{E}[X_n | \mathcal{G}] \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} \mathbb{E}[X | \mathcal{G}] \text{ f.s. und in } \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$$

(dominierte Konvergenz)

Beweis. (Die folgenden Gleichungen, etc. gelten jeweils f.s., auch wenn wir dies in der Notation nicht explizit machen.)

i) $a\mathbb{E}[X | \mathcal{G}] + b\mathbb{E}[Y | \mathcal{G}]$ ist \mathcal{G} -messb., und für $A \in \mathcal{G}$ gilt

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[\mathbf{1}_A(a\mathbb{E}[X | \mathcal{G}] + b\mathbb{E}[Y | \mathcal{G}])] &= a\mathbb{E}[\mathbf{1}_A\mathbb{E}[X | \mathcal{G}]] + b\mathbb{E}[\mathbf{1}_A\mathbb{E}[Y | \mathcal{G}]] \\ &= a\mathbb{E}[\mathbf{1}_AX] + b\mathbb{E}[\mathbf{1}_AY] = \mathbb{E}[\mathbf{1}_A(aX + bY)] \end{aligned}$$

ii) $A := \{\mathbb{E}[X | \mathcal{G}] > \mathbb{E}[Y | \mathcal{G}]\} \in \mathcal{G}$ und

$$0 \leq \mathbb{E}[\underbrace{\mathbf{1}_A(Y - X)}_{\geq 0 \text{ f.s.}}] = \mathbb{E}[\mathbf{1}_A(\mathbb{E}[Y | \mathcal{G}] - \mathbb{E}[X | \mathcal{G}])] \leq 0,$$

also $\mathbb{P}(A) = 0$.

iii) $|\mathbb{E}[X | \mathcal{G}]| \stackrel{j)}{=} |\mathbb{E}[X^+ | \mathcal{G}] - \mathbb{E}[X^- | \mathcal{G}]| \leq \mathbb{E}[X^+ | \mathcal{G}] + \mathbb{E}[X^- | \mathcal{G}] \stackrel{j)}{=} \mathbb{E}[|X| | \mathcal{G}]$

iv) Seien zunächst $X, Y \geq 0$, $Y_n := 2^{-n} \lfloor 2^n Y \rfloor \wedge n$ ($\nearrow Y$).

Für $A \in \mathcal{G}$ ist

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[\mathbf{1}_A Y \mathbb{E}[X | \mathcal{G}]] &= \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{E}[\mathbf{1}_A Y_n \mathbb{E}[X | \mathcal{G}]] \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{E}\left[\mathbf{1}_A \sum_{k=0}^{n2^n} \frac{k}{2^n} \mathbf{1}_{\{Y_n = k/2^n\}} \mathbb{E}[X | \mathcal{G}]\right] \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^{n2^n} \frac{k}{2^n} \mathbb{E}[\mathbf{1}_{A \cap \{Y_n = k/2^n\}} X] \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{E}[\mathbf{1}_A Y_n X] = \mathbb{E}[\mathbf{1}_A Y X] \end{aligned}$$

Für den allg. Fall zerlege $X = X^+ - X^-$, $Y = Y^+ - Y^-$, verwende *i*).

v) Für $A \in \mathcal{G}$ gilt $\mathbb{E}[\mathbf{1}_A X] = \mathbb{E}[\mathbf{1}_A] \mathbb{E}[X] = \mathbb{E}[\mathbf{1}_A \mathbb{E}[X]]$

vi) Sei $A \in \mathcal{G}'$

$$\mathbb{E}[\mathbf{1}_A \mathbb{E}[X | \mathcal{G}]] = \mathbb{E}[\mathbf{1}_A X] = \mathbb{E}[\mathbf{1}_A \mathbb{E}[X | \mathcal{G}']]$$

d.h. $\mathbb{E}[X | \mathcal{G}']$ erfüllt die Def. von $\mathbb{E}[\mathbb{E}[X | \mathcal{G}] | \mathcal{G}']$.

Zum Zusatz: Stets ist $\mathbb{E}[X | \{\emptyset, \Omega\}] = \mathbb{E}[X]$

vii) $\mathbb{E}[X_n | \mathcal{G}]$ ist (f.s.) nicht-fallend in n nach *ii*),

$$\mathbb{E}\left[|\mathbb{E}[X | \mathcal{G}] - \mathbb{E}[X_n | \mathcal{G}]\right] \stackrel{iii)}{\leq} \mathbb{E}\left[\mathbb{E}[|X - X_n| | \mathcal{G}]\right] \stackrel{iv)}{=} \mathbb{E}[|X - X_n|] \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

also $\mathbb{E}[X_n | \mathcal{G}] \rightarrow \mathbb{E}[X | \mathcal{G}]$ in $\mathcal{L}^1(\mathbb{P})$.

Weiterhin: Für monotone Folgen von ZVn impliziert $\mathcal{L}^1(\mathbb{P})$ -Konvergenz f.s.-Konvergenz: Seien $Z_n \nearrow Z$ und $Z \rightarrow Z_n$ in $\mathcal{L}^1(\mathbb{P})$, dann auch $Z_n \nearrow Z = \sup_m Z_m$ stochastisch, $\mathbb{P}\left(\bigcap_{m \geq n} \{|Z_m - Z| < \varepsilon\}\right) = \mathbb{P}(Z - \varepsilon < Z_n) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 1$, somit

$$\mathbb{P}\left(\bigcup_n \bigcap_{m \geq n} \{|Z_m - Z| < \varepsilon\}\right) = 1 \quad \text{für jedes } \varepsilon > 0.$$

viii) $0 \leq Z_n := \sup_{m \geq n} |X_m - X| (\leq 2Y)$, $Z_n \searrow 0$ f.s. für $n \rightarrow \infty$.

$$\mathbb{E}\left[|\mathbb{E}[X | \mathcal{G}] - \mathbb{E}[X_n | \mathcal{G}]\right] \stackrel{iii)}{\leq} \mathbb{E}\left[\mathbb{E}[|X - X_n| | \mathcal{G}]\right] \stackrel{iv)}{=} \mathbb{E}[|X - X_n|] \leq \mathbb{E}[Z_n] \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0,$$

also $\mathbb{E}[X_n | \mathcal{G}] \rightarrow \mathbb{E}[X | \mathcal{G}]$ in $\mathcal{L}^1(\mathbb{P})$. Weiter ist

$$\mathbb{E}\left[\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{E}[Z_n | \mathcal{G}]\right] \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \mathbb{E}[Z_n] = 0$$

d.h. $\mathbb{E}[Z_n | \mathcal{G}] \rightarrow 0$ f.s., somit

$$\left[|\mathbb{E}[X | \mathcal{G}] - \mathbb{E}[X_n | \mathcal{G}]\right] \leq \mathbb{E}[|X - X_n| | \mathcal{G}] \leq \mathbb{E}[Z_n | \mathcal{G}] \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \quad \text{f.s.}$$

□

Satz 6.7 (Jensen'sche Ungleichung für die bedingte Erwartung). $X \in \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$, $k : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \cup \{+\infty\}$ konvex, dann gilt

$$\mathbb{E}[k(X) | \mathcal{G}] \geq k(\mathbb{E}[X | \mathcal{G}]) \quad \text{f.s.}$$

Beweis. Die Behauptung ist offenbar erfüllt (mit Satz 6.6, *i*), wenn k affin-linear ist, d.h. $k(x) = ax + b$ mit gewissen $a, b \in \mathbb{R}$.

Sei nun k konvex und nicht von dieser Form. Man kann die Funktion k als das Supremum ihrer Stützgeraden schreiben, d.h.

$$k(x) = \sup\{ax + b : (a, b) \in S\} \quad \text{mit } S := \{(a, b) \in \mathbb{R}^2 : ay + b \leq k(y) \forall y \in \mathbb{R}\}$$

und es gilt auch ($(a, b) \mapsto ax + b$ ist stetig für jedes $x \in \mathbb{R}$ und da k keine Gerade ist, kann man zu $(a, b) \in S$ gewisse $(a_m, b_m) \in S \cap \mathbb{Q}^2$ finden mit $a_m \rightarrow a, b_m \rightarrow b$ für $m \rightarrow \infty$)

$$k(x) = \sup\{ax + b : (a, b) \in S \cap \mathbb{Q}^2\}.$$

Sei $(a_n, b_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Aufzählung von $S \cap \mathbb{Q}^2$, für jedes n gilt

$$\mathbb{E}[k(X) | \mathcal{G}] \geq \mathbb{E}[a_n X + b_n | \mathcal{G}] = a_n \mathbb{E}[X | \mathcal{G}] + b_n \quad \text{f.s.}$$

(mit Satz 6.6, *ii*) und *i*), daher auch (man muss oben nur abzählbar viele Ausnahmemengen betrachten)

$$\mathbb{E}[k(X) | \mathcal{G}] \geq \sup\{a_n \mathbb{E}[X | \mathcal{G}] + b_n : n \in \mathbb{N}\} = k(\mathbb{E}[X | \mathcal{G}]) \quad \text{f.s.}$$

□

Bemerkung 6.8. X, Y reelle ZVn mit gemeinsamer Dichte $f_{X,Y}$, d.h.

$$\mathbb{P}((X, Y) \in A) = \int_A f_{X,Y}(x, y) \lambda^{\otimes 2}(d(x, y)) \quad \text{für } A \in \mathcal{B}(\mathbb{R}^2),$$

$Y \in \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$.

Sei für $x \in \mathbb{R}$

$$f_X(x) := \int_{\mathbb{R}} f_{X,Y}(x, y) \lambda(dy) \quad \text{die Marginaldichte von } X,$$

$$\varphi(x) := \int_{\mathbb{R}} y \frac{f_{X,Y}(x, y)}{f_X(x)} \lambda(dy) \mathbf{1}_{f_X(x) > 0}.$$

Dann gilt

$$\mathbb{E}[Y | \sigma(X)] = \varphi(X) \quad \text{f.s.}$$

denn für $B \in \mathcal{B}(\mathbb{R})$ ist

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[\mathbf{1}_{\{X \in B\}} \varphi(X)] &= \int_{\mathbb{R}} \mathbf{1}_B(x) \varphi(x) f_X(x) \lambda(dx) \\ &= \int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}} \mathbf{1}_B(x) y f_{X,Y}(x, y) \lambda(dy) \lambda(dx) \\ &= \int_{\mathbb{R}^2} \mathbf{1}_B(x) y f_{X,Y}(x, y) \lambda^{\otimes 2}(d(x, y)) = \mathbb{E}[\mathbf{1}_{\{X \in B\}} Y]. \end{aligned}$$

Bericht 6.9. (Zu regulären Versionen bedingter Verteilungen) Wenn $Y = 1_B$ für ein Ereignis $B \in \mathcal{A}$, so schreibt man gelegentlich auch $\mathbb{P}(B \mid \mathcal{G}) = \mathbb{E}[Y \mid \mathcal{G}]$. Man muss allerdings etwas vorsichtig sein bei der Interpretation von $\mathbb{P}(\cdot \mid \mathcal{G})$ als ein (zufälliges) Maß, da i.A. überabzählbar viele B in Frage kommen und damit die Kompatibilität der in der Definition der bedingten Erwartung implizit vorkommenden Nullmengen (vgl. Def. 6.3) wenigstens a priori unklar bleibt.

In „gutartigen“ Fällen ist eine konsistente Wahl möglich, das Stichwort dazu lautet „reguläre bedingte Verteilung einer Zufallsvariable“. Wir skizzieren hier knapp den reellwertigen Fall:

Sei X reellwertige ZV (auf einem W'raum $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$), $\mathcal{G} \subset \mathcal{F}$ Teil- σ -Algebra. Dann gibt es einen stochastischen Kern $\kappa_{X|\mathcal{G}}$ von (Ω, \mathcal{G}) nach $(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}))$ mit

$$\kappa_{X|\mathcal{G}}(\omega, B) = \mathbb{E}[\mathbf{1}_{\{X \in B\}} \mid \mathcal{G}](\omega) \text{ f.s. für alle } B \in \mathcal{B}(\mathbb{R}),$$

d.h. (vgl. Def. 5.4)

für jedes $B \in \mathcal{B}(\mathbb{R})$ ist $\omega \mapsto \kappa_{X|\mathcal{G}}(\omega, B)$ eine Version von $\mathbb{E}[\mathbf{1}_{\{X \in B\}} \mid \mathcal{G}]$ und
für jedes ω ist $\kappa_{X|\mathcal{G}}(\omega, \cdot)$ ein W'maß auf $(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}))$.

Die Hauptidee besteht darin, das gewünschte Maß $\kappa_{X|\mathcal{G}}(\omega, \cdot)$ auf \mathbb{R} anhand seiner Verteilungsfunktion zu charakterisieren (vgl. Satz 1.27), die zielführende Beobachtung ist dann, dass eine Verteilungsfunktion (wegen der Monotonie) bereits durch ihre Werte an abzählbar vielen Stellen festgelegt ist. Man betrachtet also $B = (-\infty, r]$, $r \in \mathbb{Q}$ und setzt

$$F_r := \mathbb{E}[\mathbf{1}_{(-\infty, r]}(X) \mid \mathcal{G}].$$

Dann gilt (mit den Eigenschaften der bedingten Erwartung aus Satz 6.6) wie gewünscht \mathbb{P} -f.s.: $F_r \leq F_{r'}$, für $r < r'$, ($r, r' \in \mathbb{Q}$), $\lim_{n \rightarrow \infty} F_{r + \frac{1}{n}} = F_r$ für $r \in \mathbb{Q}$, $\lim_{n \rightarrow \infty} F_n = 1$, $\lim_{n \rightarrow -\infty} F_n = 0$.

Wegen der Abzählbarkeit von \mathbb{Q} gibt es $N \in \mathcal{F}$ mit $\mathbb{P}(N) = 0$, so dass obiges für $\omega \in \Omega \setminus N$ und alle $r, r' \in \mathbb{Q}$ gilt. Dann definiert

$$\tilde{F}_s := \begin{cases} \inf\{F_r : r \geq s, r \in \mathbb{Q}\}, & \omega \in \Omega \setminus N, \\ \overline{F}_s, & \omega \in N, \end{cases}$$

wobei \overline{F} irgendeine Verteilungsfunktion ist, die (zufällige) Verteilungsfunktion von $k_{X, \mathcal{G}}$. Details finden sich beispielsweise in [Kl, Kap. 8.3, speziell Satz 8.28].

Man kann dieses Argument relativ leicht erweitern auf die Situation, dass der Wertebereich (E, \mathcal{B}) von X ein sogenannter Standard-Borel-Raum ist (auch der Name Borel'scher Raum ist üblich), d.h. wenn es ein $A \in \mathcal{B}(\mathbb{R})$ und eine Bijektion $\phi : E \rightarrow A$ gibt, so dass ϕ und ϕ^{-1} jeweils messbar sind (dann sind (E, \mathcal{B}) und $(A, \mathcal{B}(A))$ isomorph als messbare Räume). Dann ist nämlich $X' := \phi \circ X$ eine reellwertige ZV, und die Argumentation oben greift (vgl. auch [Kl, Satz 8.36]).

Schließlich kann man zeigen, dass jeder separable und vollständige metrische Raum E , versehen mit seiner Borel- σ -Algebra, ein Standard-Borel-Raum ist (siehe z.B. L.C.G. Rogers, D. Williams, *Diffusions, Markov processes and martingales*, Bd. I, Ch. II.82; L. Breiman, *Probability*, Appendix 7). Solche Wertebereiche heißen *polnische Räume*, sie spielen in der allgemeinen Theorie der Stochastik eine wichtige Rolle (beispielsweise sind \mathbb{R}^d oder $C([0, 1])$ mit Supremumsnorm polnisch).

Kapitel 7

Martingale (in diskreter Zeit)

Martingale¹ sind (u.a.) eine mathematische Formalisierung des Begriffs des fairen Spiels und der Vorstellung, dass man dabei nicht auf systematische Weise gewinnen kann.

Wir betrachten sozusagen zum „Appetit-Anregen“ folgendes Beispiel:

Beispiel 7.1. Betrachte eine faire Münzwurffolge, d.h. seien W_1, W_2, \dots unabhängig und identisch uniform verteilt auf $\{K, Z\}$. Sei

$$R := \min \{k \in \mathbb{N} : (W_k, W_{k+1}, W_{k+2}, W_{k+3}) = (Z, K, Z, K)\}.$$

Zum Zeitpunkt $R + 3$ können wir sehen, dass das Muster (Z, K, Z, K) zum ersten Mal „fertig“ ist ($R + 3$ ist eine sog. Stoppzeit, siehe Def. 7.11 unten).

Um $\mathbb{E}[R]$ zu bestimmen stellen wir uns ein „fairer Casino“ vor:

Setze vor dem i -ten Wurf x Euro, erhalte $2x$ Euro oder 0 Euro je nach Ausgang (und jeder mögliche Ausgang hat W'keit $1/2$). Spieler i steigt in Runde i in das Spiel ein und setzt einen Euro auf Z . Falls er gewinnt, setzt er in Runde $i + 1$ zwei Euro auf K . Gewinnt er wieder, setzt er in Runde $i + 2$ vier Euro auf Z . Sollte er wieder gewinnen, setzt er in Runde $i + 3$ acht Euro auf K . Gewinnt er auch dieses Spiel, hört er auf. Sei nun $X_{i,n}$ der Gewinn des i -ten Spielers nach der n -ten Runde und

$$X_n := \sum_{i=1}^n X_{i,n}$$

der Gesamtgewinn aller Spieler nach Runde n . Aufgrund der „Fairness“ sollte gelten

$$0 = \mathbb{E}[X_0] = \mathbb{E}[X_n] = \mathbb{E}[X_{R+3}]. \quad (*)$$

(Wir werden die Theorie hinter $(*)$ entwickeln, siehe Korollar 7.19 unten.)

Zum Zeitpunkt $R + 3$ hat Spieler R einen Gewinn von 15 Euro, Spieler $R + 2$ hat einen Gewinn von 3 Euro und die anderen $R + 1$ Spieler, die bisher mitgespielt haben, haben einen Gewinn von -1 Euro, das heißt

$$X_{R+3} = 15 + 3 - (R + 1).$$

¹Zur farbigen Geschichte des Begriffs Martingale siehe beispielsweise den Artikel von Roger Mansuy, The origins of the word “martingale”, Electronic Journal for History of Probability and Statistics, Vol. 5 no. 1, (2009), <http://www.jehps.net>.

(*) liefert

$$0 = \mathbb{E}[X_{R+3}] = \mathbb{E}[R - 17],$$

und damit $\mathbb{E}[R] = 17$.

7.1 Grundlegendes

Im Folgenden sei $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ ein Wahrscheinlichkeitsraum.

Definition 7.2. Eine Familie $(\mathcal{F}_n)_{n=0,1,\dots}$ von (Teil-) σ -Algebren mit

$$\mathcal{F}_0 \subset \mathcal{F}_1 \subset \mathcal{F}_2 \subset \dots \subset \mathcal{F}$$

heißt *Filtration*. $(\Omega, \mathcal{F}, (\mathcal{F}_n)_{n=0,1,\dots}, \mathbb{P})$ heißt *filtrierter Wahrscheinlichkeitsraum*.

Bemerkung 7.3. i) Interpretation: \mathcal{F}_n enthält diejenigen Ereignisse, die bis zum Zeitpunkt n entschieden sind.

ii) Ist $X = (X_n)_{n=0,1,\dots}$ eine Familie von Zufallsvariablen (ein sog. stochastischer Prozess), so ist $\mathcal{F}_n = \sigma(X_1, \dots, X_n)$, $n \in \mathbb{N}_0$ eine Filtration (die von X erzeugte Filtration).

Definition 7.4. Es sei $X = (X_n)_n$ ein stochastischer Prozess und $(\mathcal{F}_n)_n$ eine Filtration. X heißt *adaptiert* (an $(\mathcal{F}_n)_n$), wenn X_n \mathcal{F}_n -messbar ist für alle $n \in \mathbb{N}_0$.

Definition 7.5. Es sei $X = (X_n)_n$ ein (reellwertiger) stochastischer Prozess und $(\mathcal{F}_n)_n$ eine Filtration. X heißt ein *Martingal* (bzgl. $(\mathcal{F}_n)_n$ unter \mathbb{P}), wenn gilt:

- i) X ist adaptiert (an $(\mathcal{F}_n)_n$).
- ii) $X_n \in \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$ für $n \in \mathbb{N}_0$.
- iii) $\mathbb{E}[X_{n+1} | \mathcal{F}_n] = X_n$ f.s. für jedes $n \in \mathbb{N}_0$.

Falls in iii) $\mathbb{E}[X_{n+1} | \mathcal{F}_n] \geq X_n$ gilt, so heißt X ein *Submartingal*. Falls $\mathbb{E}[X_{n+1} | \mathcal{F}_n] \leq X_n$ gilt, so heißt X ein *Supermartingal*.

Bemerkung 7.6. Induktiv folgt für ein Martingal X

$$\mathbb{E}[X_n | \mathcal{F}_m] = X_m \text{ f.s. für alle } 0 \leq m \leq n.$$

(bzw. „ \geq “ für ein Sub- und „ \leq “ für ein Supermartingal.

Beispiel 7.7. i) Seien Y_1, Y_2, \dots unabhängige, reelle Zufallsvariablen mit $Y_n \in \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$ und $\mathbb{E}[Y_n] = 0$ für alle $n \in \mathbb{N}$. Sei $S_0 := 0$ und $S_n := Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n = S_{n-1} + Y_n$ für $n \in \mathbb{N}$. Dann ist $(S_n)_n$ ein Martingal bezgl. $(\mathcal{F}_n)_n$ mit $\mathcal{F}_n = \sigma(S_1, \dots, S_n) = \sigma(Y_1, \dots, Y_n)$, $n \in \mathbb{N}$ (und $\mathcal{F}_0 = \{\emptyset, \Omega\}$), denn $S_n \in \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$ als Summe von $\mathcal{L}^1(\mathbb{P})$ -Variablen und es gilt

$$\mathbb{E}[S_{n+1} | \mathcal{F}_n] = \mathbb{E}[S_n + Y_{n+1} | \mathcal{F}_n] = \underbrace{\mathbb{E}[S_n | \mathcal{F}_n]}_{=S_n \text{ f.s.}} + \underbrace{\mathbb{E}[Y_{n+1} | \mathcal{F}_n]}_{=\mathbb{E}[Y_{n+1}]=0 \text{ f.s.}} = S_n \text{ f.s.}$$

ii) Pólyas Urne: Eine Urne enthalte anfangs $s > 0$ schwarze und $w > 0$ weiße Kugeln. Ziehe jeweils eine Kugel rein zufällig und lege sie zusammen mit einer neuen Kugel der selben Farbe zurück. Sei X_n die Anzahl weißer Kugeln nach n Zügen und $A_n := \frac{X_n}{s+w+n}$ der Anteil weißer Kugeln in der Urne. Dann ist $(A_n)_n$ ein Martingal bzgl. $\mathcal{F}_n = \sigma(A_0, \dots, A_n)$, denn auf $\{X_n = k\}$ gilt

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[A_{n+1} | \mathcal{F}_n] &= \frac{k}{s+w+n} \cdot \frac{k+1}{s+w+n+1} + \frac{w+s+n-k}{s+w+n} \cdot \frac{k}{s+w+n+1} \\ &= \frac{k}{s+w+n} \cdot \underbrace{\frac{k+1+w+s+n-k}{w+s+n+1}}_{=1} = A_n. \end{aligned}$$

Definition 7.8. Sei $(\mathcal{F}_n)_n$ eine Filtration. Ein stochastischer Prozess $(C_n)_n$ heißt *previsibel* (bzgl. $(\mathcal{F}_n)_n$), auch vorhersagbar, wenn C_n \mathcal{F}_{n-1} -messbar ist für jedes $n \in \mathbb{N}$ (C_0 spielt hier keine Rolle).

Definition 7.9. Sei $(X_n)_n$ adaptiert und $(C_n)_n$ previsibel bzgl. $(\mathcal{F}_n)_n$. Setze

$$(C \bullet X)_0 := 0, \quad (C \bullet X)_n := \sum_{m=1}^n C_m (X_m - X_{m-1}), \quad n \in \mathbb{N}. \quad (7.1)$$

Der Prozess $C \bullet X = ((C \bullet X)_n)_{n \in \mathbb{N}_0}$ heißt (*diskretes*) *stochastisches Integral* von C bezüglich X . $C \bullet X$ ist (offenbar) adaptiert.

Spielinterpretation: $C \bullet X$ ist ein akkumulierter Gewinnprozess für einen Spieler, der in der m -ten Runde jeweils C_m -fachen Einsatz setzt.

Lemma 7.10. Es sei $(X_n)_n$ ein Martingal und $(C_n)_n$ ein previsibler Prozess bzgl. $(\mathcal{F}_n)_n$. Es gelte mindestens eine der folgenden drei Bedingungen

i) $(C_n)_n$ ist lokal beschränkt, d.h. es gibt Konstanten c_n mit $|C_n| \leq c_n$ f.s. für alle $n \in \mathbb{N}$.

ii) $(X_n - X_{n-1})_n$ ist lokal beschränkt und $C_n \in \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$ für alle $n \in \mathbb{N}$.

iii) $X_n, C_n \in \mathcal{L}^2(\mathbb{P})$ für alle $n \in \mathbb{N}_0$.

Dann ist $C \bullet X$ ein Martingal. Ist $C_n \geq 0$ für alle $n \in \mathbb{N}_0$ und X ein Sub- bzw. Supermartingal, so auch $C \bullet X$.

Beweis. i), ii) oder iii) garantieren, dass $C_m(X_m - X_{m-1}) \in \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$, denn für iii) gilt mit der Cauchy-Schwarz-Ungleichung

$$\mathbb{E}[|C_m(X_m - X_{m-1})|] \leq (\mathbb{E}[C_m^2])^{\frac{1}{2}} (\mathbb{E}[(X_m - X_{m-1})^2])^{\frac{1}{2}} < \infty.$$

Also gilt

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[(C \bullet X)_{n+1} | \mathcal{F}_n] &= \underbrace{\mathbb{E}[C_{n+1}(X_{n+1} - X_n) | \mathcal{F}_n]}_{=C_{n+1} \cdot \underbrace{\mathbb{E}[X_{n+1} - X_n | \mathcal{F}_n]}_{=0} \text{ f.s.}} + \underbrace{\mathbb{E}[(C \bullet X)_n | \mathcal{F}_n]}_{=(C \bullet X)_n \text{ f.s.}} = (C \bullet X)_n \text{ f.s.} \end{aligned}$$

□

Definition 7.11. Sei $(\mathcal{F}_n)_n$ eine Filtration. Eine Zufallsvariable T mit Werten in $\mathbb{N}_0 \cup \{\infty\}$ heißt eine $((\mathcal{F}_n)_n)$ -*Stoppzeit*, wenn $\{T \leq n\} \in \mathcal{F}_n$ für alle $n \in \mathbb{N}_0$ gilt. Für eine Stoppzeit T ist

$$\mathcal{F}_T := \{A \in \mathcal{F} \mid A \cap \{T \leq n\} \in \mathcal{F}_n \text{ für alle } n \in \mathbb{N}\}$$

eine σ -Algebra, sie heißt die $(\sigma$ -*Algebra der*) T -*Vergangenheit*.

Interpretation: \mathcal{F}_T enthält diejenigen Ereignisse, die sich zu dem (zufälligen) Zeitpunkt T entscheiden lassen.

Bemerkung 7.12. T ist genau dann eine Stoppzeit, wenn $\{T = n\} \in \mathcal{F}_n$ für alle $n \in \mathbb{N}_0$, denn $\{T = n\} = \{T \leq n\} \cap \{T \leq n-1\}^c$.

Beispiel 7.13. i) Jede Konstante t_0 ist eine Stoppzeit.

ii) Es sei $(X_n)_n$ ein adaptierter stochastischer Prozess mit Werten in (E, \mathcal{B}) und $K \in \mathcal{B}$. Dann ist

$$T := \inf \{n \in \mathbb{N}_0 \mid X_n \in K\}$$

(mit Interpretation $\inf \emptyset = \infty$) eine Stoppzeit, denn $\{T \leq n\} = \bigcup_{m=0}^n \{X_m \in K\} \in \mathcal{F}_n$.

Bemerkung. $L := \sup \{n \in \mathbb{N}_0 \mid X_n \in K\}$ ist im Allgemeinen keine Stoppzeit.

Lemma 7.14. Sind σ, τ Stoppzeiten, so sind auch $\sigma \wedge \tau$, $\sigma \vee \tau$ und $\sigma + \tau$ Stoppzeiten.

Beweis. Sei $n \in \mathbb{N}_0$. Es gilt

$$\{\sigma \vee \tau \leq n\} = \{\sigma \leq n\} \cap \{\tau \leq n\} \in \mathcal{F}_n, \quad \{\sigma \wedge \tau \leq n\} = \{\sigma \leq n\} \cup \{\tau \leq n\} \in \mathcal{F}_n.$$

Also sind $\sigma \wedge \tau$ und $\sigma \vee \tau$ Stoppzeiten. Dann sind auch $\sigma \wedge n$ und $\tau \wedge n$ Stoppzeiten, also gilt insbesondere für $m \leq n$: $\{\sigma \wedge n \leq m\}, \{\tau \wedge n \leq m\} \in \mathcal{F}_m \subset \mathcal{F}_n$. Dann sind

$$\sigma' := \sigma \wedge n + \mathbf{1}_{\{\sigma > n\}}, \quad \tau' := \tau \wedge n + \mathbf{1}_{\{\tau > n\}}$$

\mathcal{F}_n -messbar, also ist auch $\sigma' + \tau'$ \mathcal{F}_n -messbar. Somit gilt

$$\{\sigma + \tau \leq n\} = \{\sigma' + \tau' \leq n\} \in \mathcal{F}_n,$$

also ist auch $\sigma + \tau$ eine Stoppzeit. □

Bemerkung. $\sigma - \tau$ ist im Allgemeinen keine Stoppzeit.

Lemma 7.15. Sind σ, τ Stoppzeiten mit $\sigma \leq \tau$, dann gilt $\mathcal{F}_\sigma \subset \mathcal{F}_\tau$.

Beweis. Sei $A \in \mathcal{F}_\sigma$ und $n \in \mathbb{N}_0$. Da $\{\tau \leq n\} \subset \{\sigma \leq n\}$, gilt

$$A \cap \{\tau \leq n\} = \underbrace{(A \cap \{\sigma \leq n\})}_{\in \mathcal{F}_n} \cap \{\tau \leq n\} \in \mathcal{F}_n.$$

□

Beobachtung 7.16. Sei $(\mathcal{F}_n)_n$ eine Filtration, T eine Stoppzeit mit $T < \infty$ f.s. und $(X_n)_n$ ein adaptierter stochastischer Prozess mit Werten in (E, \mathcal{B}) . Dann ist $X_T = X_{T(\omega)}(\omega)$ eine \mathcal{F}_T -messbare Zufallsvariable und $X^{(T)} = (X_n^{(T)})_{n \in \mathbb{N}_0} = (X_{T \wedge n})_{n \in \mathbb{N}_0}$ ein adaptierter stochastischer Prozess.

Beweis. Sei $B \in \mathcal{B}$. Dann ist

$$\{X_T \in B\} = \bigcup_{n=0}^{\infty} \underbrace{\{T = n, X_n \in B\}}_{\in \mathcal{F}_n \subset \mathcal{F}} \in \mathcal{F},$$

also ist X_T \mathcal{F} -messbar. Ebenso gilt

$$\{X_T \in B\} \cap \{T \leq n\} = \bigcup_{k=0}^n \underbrace{\{T = k, X_k \in B\}}_{\in \mathcal{F}_k} \subset \mathcal{F}_n,$$

also ist X_T \mathcal{F}_T -messbar.

Weiter ist $X_n^{(T)} = X_{T \wedge n}$ messbar bzgl. $\mathcal{F}_{T \wedge n} \subset \mathcal{F}_n$, d.h. $(X_n^{(T)})_n$ ist adaptiert. \square

Bemerkung 7.17. $(X_n^{(T)})_n$ ist auch adaptiert an $\mathcal{F}^{(T)} := (\mathcal{F}_{T \wedge n})_n$.

Lemma 7.18. Sei T eine Stoppzeit. Ist $(X_n)_n$ ein (Sub- / Super-) Martingal, so auch $(X_n^{(T)})_n$.

Beweis. Sei $C_n := \mathbf{1}_{\{T \geq n\}}$, $n \in \mathbb{N}$. $(C_n)_n$ ist previsibel, denn $\{T \geq n\} = \{T \leq n-1\}^c \in \mathcal{F}_{n-1}$. Schreibe

$$X_{T \wedge n} = X_0 + \sum_{m=1}^{T \wedge n} (X_m - X_{m-1}) = X_0 + \sum_{m=1}^n \mathbf{1}_{\{T \geq m\}} (X_m - X_{m-1}) = (C \bullet X)_n + X_0.$$

Damit folgt die Behauptung aus Lemma 7.10. \square

Korollar 7.19. Sei X ein Supermartingal und T eine Stoppzeit. Es gelte mindestens eine der folgenden Bedingungen

- i) T ist beschränkt.
- ii) X ist beschränkt, d.h. $\sup_{n \in \mathbb{N}_0} |X_n| \leq c$ f.s. für ein $c \in \mathbb{R}_+$, und $T < \infty$ f.s.
- iii) $\mathbb{E}[T] < \infty$ und $\sup_{n \in \mathbb{N}} |X_n - X_{n-1}| \leq c$ f.s. für ein $c \in \mathbb{R}_+$.

Dann gilt $\mathbb{E}[X_T] \leq \mathbb{E}[X_0]$. (Im Falle eines Martingals gilt Gleichheit.)

Beweis. Angenommen i) gilt, dann existiert ein $m \in \mathbb{N}$ mit $T \leq m$. Nach Lemma 7.18 ist $(X_{T \wedge n})_n$ ein Supermartingal, also gilt

$$\mathbb{E}[X_0] = \mathbb{E}[X_{T \wedge 0}] \geq \mathbb{E}[X_{T \wedge m}] = \mathbb{E}[X_T].$$

Gilt ii), so ist $\mathbb{E}[X_T] = \lim_{m \rightarrow \infty} \mathbb{E}[X_{T \wedge m}] \leq \mathbb{E}[X_0]$ mit dem Satz von der dominierten Konvergenz (Satz 3.13).

Gilt iii), dann folgt $T < \infty$ f.s. und $X_{T \wedge m} \xrightarrow{m \rightarrow \infty} X_T$ f.s.

Es gilt

$$\sup_{m \in \mathbb{N}_0} |X_{T \wedge m}| \leq \sup_{m \in \mathbb{N}_0} (|X_0| + (T \wedge m) \cdot c) \leq |X_0| + cT.$$

Da $|X_0| + cT \in \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$, ist dies eine integrierbare Majorante für $X_{T \wedge m}$ und es folgt wiederum mit dem Satz von der dominierten Konvergenz (Satz 3.13)

$$\mathbb{E}[X_T] = \lim_{m \rightarrow \infty} \mathbb{E}[X_{T \wedge m}] \stackrel{i)}{\leq} \mathbb{E}[X_0].$$

□

Nochmal zu Beispiel 7.1. An dieser Stelle haben wir genug Theorie entwickelt, um Beispiel 7.1 „rigoros“ behandeln zu können:

$R + 3$ und X dort erfüllen die Bedingung *iii)* von Korollar 7.19: Es gilt

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(R > 4k) &\leq \mathbb{P}((W_{4j+1}, W_{4j+2}, W_{4j+3}, W_{4j+4}) \neq (Z, K, Z, K) \text{ für } j = 0, 1, \dots, k-1) \\ &= (1 - (1/2)^4)^k \end{aligned}$$

somit $\mathbb{E}[R] = \sum_{r=1}^{\infty} \mathbb{P}(R \geq r) < \infty$, zudem $|X_n - X_{n-1}| \leq 1 + 2 + 4 + 8 = 15$.

7.2 Martingalkonvergenzsatz

Sei $(X_n)_n$ ein adaptierter, reellwertiger Prozess und $-\infty < a < b < \infty$.

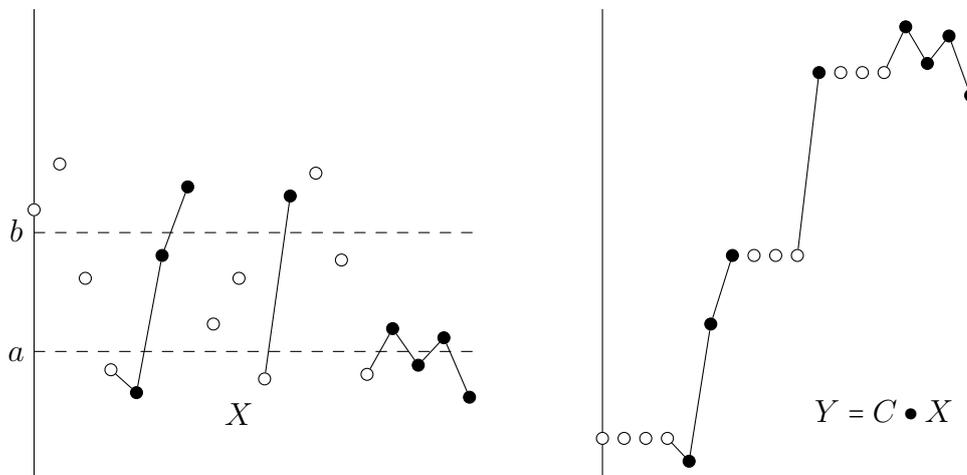


Abbildung 7.1: Aufkreuzungen

Setze $C_1 := \mathbf{1}_{\{X_0 < a\}}$ und für $n > 1$ rekursiv (siehe auch Abbildung 7.1)

$$C_n := \mathbf{1}_{\{C_{n-1}=1, X_{n-1} \leq b\}} + \mathbf{1}_{\{C_{n-1}=0, X_{n-1} < a\}}.$$

$(C_n)_n$ ist previsibel. Sei weiter

$$U_n^{(a,b)} := \sum_{k=1}^n \mathbf{1}_{\{C_k=1, C_{k+1}=0\}}$$

die Anzahl der abgeschlossenen Aufkreuzungen von unter a nach über b bis zur Zeit n . $U_n^{(a,b)}$ ist \mathcal{F}_n -messbar. Setze $Y := C \bullet X$, so gilt

$$Y_n \geq (b-a)U_n^{(a,b)} - (X_n - a)^-.$$

Lemma 7.20 (Doob's² Aufkreuzungslemma). *Sei X ein Supermartingal. Dann gilt für alle $n \in \mathbb{N}$*

$$\mathbb{E}[U_n^{(a,b)}] \leq \frac{1}{b-a} \mathbb{E}[(X_n - a)^-].$$

Beweis. Nach Lemma 7.10 ist $Y = C \bullet X$ ein Supermartingal. Also gilt

$$0 = \mathbb{E}[Y_0] \geq \mathbb{E}[Y_n] \geq (b-a)\mathbb{E}[U_n^{(a,b)}] - \mathbb{E}[(X_n - a)^-].$$

□

Satz 7.21 (Doob's (Super-)Martingalkonvergenzsatz). *Ist $(X_n)_n$ ein Supermartingal mit $\sup_n \mathbb{E}[X_n^-] < \infty$, dann gibt es ein $X_\infty \in \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$ mit $X_n \rightarrow X_\infty$ f.s.*

Beweis. Sei $a < b$. Es gilt $U_n^{(a,b)} \nearrow U_\infty^{(a,b)} = \sup_m U_m^{(a,b)}$ nach Konstruktion. Da

$$\mathbb{E}[U_\infty^{(a,b)}] = \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{E}[U_n^{(a,b)}] \leq \sup_n \frac{1}{b-a} \mathbb{E}[(X_n - a)^-] \leq \sup_n \frac{1}{b-a} (\mathbb{E}[X_n^-] + |a|) < \infty$$

ist $U_\infty^{(a,b)} < \infty$ f.s. Für

$$O_{a,b} := \left\{ \liminf_{n \rightarrow \infty} X_n < a \right\} \cap \left\{ \limsup_{n \rightarrow \infty} X_n > b \right\} \subset \left\{ U_\infty^{(a,b)} = \infty \right\}$$

gilt also $\mathbb{P}(O_{a,b}) = 0$. Damit folgt

$$\mathbb{P}\left(\liminf_{n \rightarrow \infty} X_n < \limsup_{n \rightarrow \infty} X_n \right) = \mathbb{P}\left(\bigcup_{\substack{a < b \\ a, b \in \mathbb{Q}}} O_{a,b} \right) = 0.$$

Mit $X_\infty := \limsup_{n \rightarrow \infty} X_n$ gilt also $X_n \rightarrow X_\infty$ f.s. Es bleibt $X_\infty \in \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$ zu zeigen. Es gilt:

$$\mathbb{E}[X_\infty^-] = \mathbb{E}[\liminf_{n \rightarrow \infty} X_n^-] \stackrel{\text{Fatou}}{\leq} \liminf_{n \rightarrow \infty} \mathbb{E}[X_n^-] < \infty$$

nach Voraussetzung und

$$\mathbb{E}[X_\infty^+] = \mathbb{E}[\liminf_{n \rightarrow \infty} X_n^+] \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \mathbb{E}[X_n^+] = \liminf_{n \rightarrow \infty} (\mathbb{E}[X_n^-] + \mathbb{E}[X_n]) \leq \mathbb{E}[X_0] + \sup_n \mathbb{E}[X_n^-] < \infty.$$

□

Bemerkung 7.22. 1. Die analoge Aussage von Satz 7.21 gilt für ein Submartingal $(X_n)_n$ mit $\sup_n \mathbb{E}[X_n^+] < \infty$.

2. In der Situation von Satz 7.21 liegt im Allgemeinen keine \mathcal{L}^1 -Konvergenz vor, insbesondere ist $\mathbb{E}[X_\infty] \neq \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{E}[X_n]$ möglich, betrachte zum Beispiel die symmetrische gewöhnliche Irrfahrt startend in 1, gestoppt bei Erreichen der 0.

²Joseph L. Doob, 1910-2004

7.3 Gleichgradig integrierbare Martingale und optionales Stoppen

Satz 7.23. Sei $(X_n)_n$ ein gleichgradig integrierbares Supermartingal. Dann existiert $X_\infty \in \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$ mit $X_n \rightarrow X_\infty$ f.s. und in $\mathcal{L}^1(\mathbb{P})$. Es gilt

$$\mathbb{E}[X_\infty \mid \mathcal{F}_n] \leq X_n \text{ f.s. für alle } n \in \mathbb{N}.$$

(Analog gilt $\mathbb{E}[X_\infty \mid \mathcal{F}_n] \geq X_n$, falls $(X_n)_n$ ein gleichgradig integrierbares Submartingal, und $\mathbb{E}[X_\infty \mid \mathcal{F}_n] = X_n$, falls $(X_n)_n$ ein gleichgradig integrierbares Martingal.)

Beweis. Die Existenz von X_∞ mit $X_n \rightarrow X_\infty$ f.s. folgt aus Satz 7.21. Aufgrund der gleichgradigen Integrierbarkeit gilt $\mathbb{E}[|X_n - X_\infty|] \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$. Weiter gilt für $n \geq m$:

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[|\mathbb{E}[X_\infty \mid \mathcal{F}_m] - \mathbb{E}[X_n \mid \mathcal{F}_m]|] &= \mathbb{E}[|\mathbb{E}[X_\infty - X_n \mid \mathcal{F}_m]|] \leq \mathbb{E}[\mathbb{E}[|X_\infty - X_n| \mid \mathcal{F}_m]] \\ &= \mathbb{E}[|X_\infty - X_n|] \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \end{aligned}$$

und damit ist

$$\mathbb{E}[(\mathbb{E}[X_\infty \mid \mathcal{F}_m] - X_m)^+] \leq \underbrace{\mathbb{E}[(\mathbb{E}[X_\infty \mid \mathcal{F}_m] - \mathbb{E}[X_n \mid \mathcal{F}_m])^+]}_{\rightarrow 0} + \underbrace{\mathbb{E}[(\mathbb{E}[X_n \mid \mathcal{F}_m] - X_m)^+]}_{\leq X_m \text{ für } n > m}.$$

Also gilt $\mathbb{E}[X_\infty \mid \mathcal{F}_m] \leq X_m$ f.s. □

Satz 7.24. Sei $Y \in \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$ und $(\mathcal{F}_n)_n$ eine Filtration. Sei $\mathcal{F}_\infty := \sigma(\mathcal{F}_n, n \in \mathbb{N})$ und $X_n := \mathbb{E}[Y \mid \mathcal{F}_n]$. Dann ist $(X_n)_n$ ein gleichgradig integrierbares Martingal und es gilt

$$X_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} X_\infty := \mathbb{E}[Y \mid \mathcal{F}_\infty] \text{ f.s. und in } \mathcal{L}^1(\mathbb{P}).$$

Lemma 7.25. $Y \in \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$ und $\mathcal{F}_n \subset \mathcal{F}$ σ -Algebren, dann ist $(\mathbb{E}[Y \mid \mathcal{F}_n])_{n \in \mathbb{N}}$ gleichgradig integrierbar.

Beweis. Es existiert (mit Bem. 3.30 und Satz 3.33) ein $h: [0, \infty) \rightarrow [0, \infty)$ konvex und monoton wachsend mit $\frac{h(x)}{x} \xrightarrow{x \rightarrow \infty} \infty$ und $\mathbb{E}[h(|Y|)] < \infty$.

Es gilt mit der (bedingten) Jensen-Ungleichung (Satz 6.7)

$$\sup_n \mathbb{E}[h(|\mathbb{E}[Y \mid \mathcal{F}_n]|)] \leq \sup_n \mathbb{E}[\mathbb{E}[h(|Y|) \mid \mathcal{F}_n]] = \mathbb{E}[h(|Y|)] < \infty.$$

□

Beweis von Satz 7.24. $(X_n)_n$ ist ein Martingal und nach Lemma 7.25 gleichgradig integrierbar. Nach Satz 7.23 gilt

$$X_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} X_\infty := \limsup_{m \rightarrow \infty} X_m \text{ f.s. und in } \mathcal{L}^1(\mathbb{P}),$$

X_∞ ist \mathcal{F}_∞ -messbar.

Es bleibt $X_\infty = \mathbb{E}[Y \mid \mathcal{F}_\infty]$ zu zeigen. Ohne Einschränkung sei $Y \geq 0$ (ansonsten betrachte Y^+ , Y^- separat). Insbesondere ist dann $X_\infty \geq 0$ f.s.

Für $A \in \mathcal{F}_\infty$ sind $\mu_1(A) := \mathbb{E}[X_\infty \mathbf{1}_A]$ und $\mu_2(A) := \mathbb{E}[Y \mathbf{1}_A]$ endliche Maße auf $(\Omega, \mathcal{F}_\infty, \mathbb{P})$. Sei $A \in \mathcal{F}_m \subset \mathcal{F}_\infty$. Dann gilt

$$\mu_1(A) = \mathbb{E}[X_\infty \mathbf{1}_A] = \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{E}[X_n \mathbf{1}_A] \stackrel{n \geq m}{=} \mathbb{E}[Y \mathbf{1}_A] = \mu_2(A).$$

Da $\bigcup_{m \in \mathbb{N}} \mathcal{F}_m$ ein schnittstabiler Erzeuger von \mathcal{F}_∞ ist, folgt $\mu_1 = \mu_2$ mit Satz 1.18. \square

Bemerkung 7.26. Für ein gleichgradig integrierbares Martingal $(X_n)_n$ gilt

$$\mathbb{E}[X_\infty | \mathcal{F}_n] = X_n \text{ für alle } n \in \mathbb{N}.$$

Solche Martingale heißen *Doob'sche Martingale*.

Lemma 7.27. Sei $(X_n)_n$ ein Supermartingal und T eine Stoppzeit mit $T \leq m$ f.s. für ein $m \in \mathbb{N}$. Dann ist $X_T \in \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$ und es gilt $\mathbb{E}[X_m | \mathcal{F}_T] \leq X_T$ f.s. Im Falle eines Martingals gilt Gleichheit.

Beweis. Nach Lemma 7.18 ist $(X_{T \wedge n})_n$ ein Supermartingal. Es gilt $X_T \in \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$, denn $X_T = X_{T \wedge m}$ f.s. Für $A \in \mathcal{F}_T$ gilt

$$\mathbb{E}[X_m \mathbf{1}_A] = \sum_{n=0}^m \underbrace{\mathbb{E}[X_m \mathbf{1}_{A \cap \{T=n\}}]}_{\in \mathcal{F}_n} \leq \sum_{n=0}^m \mathbb{E}[X_n \mathbf{1}_{A \cap \{T=n\}}] = \mathbb{E}\left[\left(\sum_{n=0}^m X_n \mathbf{1}_{\{T=n\}}\right) \mathbf{1}_A\right] = \mathbb{E}[X_T \mathbf{1}_A].$$

\square

Lemma 7.28. Ist $(X_n)_n$ ein gleichgradig integrierbares Martingal, so ist $\{X_T | T \text{ Stoppzeit}\}$ gleichgradig integrierbar.

Beweis. Da $(X_n)_n$ gleichgradig integrierbar ist, existiert (mit Satz 3.33) ein $h: [0, \infty) \rightarrow [0, \infty)$ konvex und monoton wachsend mit $\frac{h(x)}{x} \xrightarrow{x \rightarrow \infty} \infty$ und $\mathbb{E}[h(|X_n|)] =: M < \infty$. Sei T eine Stoppzeit und $n \in \mathbb{N}$. Es gilt

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[h(|X_T|) \mathbf{1}_{\{T \leq n\}}] &= \mathbb{E}[h(|X_{T \wedge n}|) \mathbf{1}_{\{T \leq n\}}] \stackrel{7.27}{=} \mathbb{E}[h(|\mathbb{E}[X_n | \mathcal{F}_{T \wedge n}]|) \mathbf{1}_{\{T \leq n\}}] \\ &\leq \mathbb{E}[h(\mathbb{E}[|X_n| | \mathcal{F}_{T \wedge n}]) \mathbf{1}_{\{T \leq n\}}] = \mathbb{E}[\mathbb{E}[h(|X_n|) \mathbf{1}_{\{T \leq n\}} | \mathcal{F}_{T \wedge n}]] \\ &\leq M. \end{aligned}$$

Mit $n \rightarrow \infty$ folgt $\mathbb{E}[h(|X_T|) \mathbf{1}_{\{T < \infty\}}] \leq M$, das heißt

$$\sup_{T \text{ Stoppzeit}} \mathbb{E}[h(|X_T|)] \leq 2M < \infty.$$

\square

Satz 7.29 (optional-sampling-Theorem). Es sei $(X_n)_n$ ein gleichgradig integrierbares Martingal, $X_\infty := \lim X_n$ und T eine Stoppzeit. Dann ist $X_T \in \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$ und es gilt $\mathbb{E}[X_\infty | \mathcal{F}_T] = X_T$ f.s. Insbesondere gilt $\mathbb{E}[X_T] = \mathbb{E}[X_\infty] = \mathbb{E}[X_0]$. Ist S eine Stoppzeit mit $S \leq T$, so gilt $\mathbb{E}[X_T | \mathcal{F}_S] = X_S$ f.s.

Beweis. Nach Satz 7.24 gilt $\mathbb{E}[X_\infty | \mathcal{F}_m] = X_m$ f.s. und nach Lemma 7.27 ist

$$\mathbb{E}[X_m | \mathcal{F}_{T \wedge m}] = X_{T \wedge m} \text{ f.s.}$$

Also ist

$$\mathbb{E}[X_\infty | \mathcal{F}_{T \wedge m}] = \mathbb{E}[\mathbb{E}[X_\infty | \mathcal{F}_m] | \mathcal{F}_{T \wedge m}] = X_{T \wedge m} \text{ f.s.}$$

Sei nun $A \in \mathcal{F}_T$. Dann ist $A \cap \{T \leq m\} \in \mathcal{F}_{T \wedge m}$, denn für $n \in \mathbb{N}_0$ gilt $A \cap \{T \leq m\} \cap \{T \leq n\} = A \cap \{T \leq m \wedge n\} \in \mathcal{F}_{m \wedge n} \subset \mathcal{F}_n$. Somit gilt

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[X_\infty \mathbf{1}_{A \cap \{T \leq m\}}] &= \mathbb{E}[\mathbb{E}[X_\infty \mathbf{1}_{A \cap \{T \leq m\}} | \mathcal{F}_{T \wedge m}]] \\ &= \mathbb{E}[X_{T \wedge m} \mathbf{1}_{A \cap \{T \leq m\}}] = \mathbb{E}[X_T \mathbf{1}_{A \cap \{T \leq m\}}]. \end{aligned} \quad (7.2)$$

Sei ohne Einschränkung $X_\infty \geq 0$ (sonst betrachte X_∞^+, X_∞^- separat). $m \rightarrow \infty$ in (7.2) mit monotoner Konvergenz liefert

$$\mathbb{E}[X_\infty \mathbf{1}_{A \cap \{T < \infty\}}] = \mathbb{E}[X_T \mathbf{1}_{A \cap \{T < \infty\}}].$$

(Alternativ: Verwende dominierte Konvergenz, das erspart die Zerlegung in Positiv- und Negativteil.)

Nach Definition gilt aber auch

$$\mathbb{E}[X_\infty \mathbf{1}_{A \cap \{T = \infty\}}] = \mathbb{E}[X_T \mathbf{1}_{A \cap \{T = \infty\}}],$$

d.h. $\mathbb{E}[X_\infty \mathbf{1}_A] = \mathbb{E}[X_T \mathbf{1}_A]$.

Sei $S \leq T$ eine Stoppzeit. Dann ist $\mathcal{F}_S \subset \mathcal{F}_T$, also gilt

$$\mathbb{E}[X_T | \mathcal{F}_S] = \mathbb{E}[\mathbb{E}[X_\infty | \mathcal{F}_T] | \mathcal{F}_S] = \mathbb{E}[X_\infty | \mathcal{F}_S] = X_S \text{ f.s.}$$

□

Bemerkung und Definition 7.30. Sei $(X_n)_n$ ein adaptierter Prozess mit $X_n \in \mathcal{L}^1(\mathbb{P})$ für $n \in \mathbb{N}_0$. Dann ist $X_n = M_n + A_n$ mit

$$M_0 := X_0, \quad M_n := X_0 + \sum_{k=1}^n (X_k - \mathbb{E}[X_k | \mathcal{F}_{k-1}]),$$

$$A_0 := 0, \quad A_n := \sum_{k=1}^n (\mathbb{E}[X_k | \mathcal{F}_{k-1}] - X_{k-1}).$$

wobei $(M_n)_n$ ein Martingal und $(A_n)_n$ previsibel ist. Die Darstellung $X = M + A$ als Summe eines Martingals M und eines previsiblen Prozesses A mit $A_0 = 0$ heißt *Doob-Zerlegung*, sie ist f.s. eindeutig.

$(X_n)_n$ ist genau dann ein Super- bzw. Submartingal, wenn $(A_n)_n$ nicht-wachsend bzw. nicht-fallend ist.

Beweis. Wir zeigen nur die Eindeutigkeit. Angenommen $X = M + A = M' + A'$. Sei

$$\tilde{M}_n := M_n - M'_n = A'_n - A_n.$$

Dann ist $(\tilde{M}_n)_n$ ein previsibles Martingal mit $\tilde{M}_0 = 0$. Also ist $\tilde{M}_n \equiv \tilde{M}_0 \equiv 0$ f.s., denn

$$\tilde{M}_{n-1} = \mathbb{E}[\tilde{M}_n | \mathcal{F}_{n-1}] = \tilde{M}_n \text{ f.s.}$$

□

Satz 7.31. Sei $(X_n)_n$ ein gleichgradig integrierbares Supermartingal und seien S, T Stoppzeiten mit $S \leq T$. Dann gilt $\mathbb{E}[X_T | \mathcal{F}_S] \leq X_S$ f.s.

Beweis. Sei $X_n = M_n + A_n$ die Doob-Zerlegung. Dann gilt $A_n \searrow A_\infty \leq 0$. Es ist

$$\mathbb{E}[|A_n|] = \mathbb{E}[-A_n] = \mathbb{E}[M_n - X_n] = \mathbb{E}[M_n - M_0 + X_0 - X_n] \leq \mathbb{E}[|X_n| + \mathbb{E}[|X_0|]] \leq C$$

für alle n mit einer geeigneten Konstante $C < \infty$.

Somit ist $(A_n)_n$ gleichgradig integrierbar und damit auch $(M_n)_n = (X_n - A_n)_n$. Also gilt

$$\mathbb{E}[X_T | \mathcal{F}_S] = \underbrace{\mathbb{E}[M_T | \mathcal{F}_S]}_{=M_S \text{ f.s.}} + \mathbb{E}[A_T | \mathcal{F}_S] \leq M_S + \mathbb{E}[A_S | \mathcal{F}_S] = M_S + A_S = X_S.$$

□

7.4 \mathcal{L}^2 -Martingale

Bemerkung 7.32. Sei $(X_n)_n$ ein Martingal und $\varphi: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ konvex, sodass $\mathbb{E}[\varphi(X_n)]$ für alle n existiert. Dann ist $(\varphi(X_n))_n$ ein Submartingal, denn

$$\mathbb{E}[\varphi(X_{n+1}) | \mathcal{F}_n] \geq \varphi(\mathbb{E}[X_{n+1} | \mathcal{F}_n]) = \varphi(X_n).$$

Die Aussage gilt ebenso, wenn $(X_n)_n$ ein Submartingal und φ konvex und nicht fallend ist.

Bericht 7.33. Eine Funktion $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ heißt *harmonisch*, wenn sie die Mittelwerteigenschaft besitzt:

$$f(x) = \frac{1}{2a} \int_{x-a}^{x+a} f(y) dy \quad \forall x \in \mathbb{R}, a > 0$$

(man fordert auch, dass f lokal beschränkt und messbar ist, so dass die Integrale stets existieren).

$f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ heißt *subharmonisch*, wenn $f(x) \leq \frac{1}{2a} \int_{x-a}^{x+a} f(y) dy$ und *superharmonisch*, wenn $f(x) \geq \frac{1}{2a} \int_{x-a}^{x+a} f(y) dy$ für alle $x \in \mathbb{R}, a > 0$.

Man kann zeigen: Auf \mathbb{R} sind genau die konvexen Funktionen subharmonisch, zusammen mit Bemerkung 7.32 motiviert dies den Namen Submartingal (und entsprechend auch den Namen Supermartingal).

Beobachtung 7.34. Sei $(X_n)_n$ ein quadratintegriables Martingal, d.h. $X_n \in \mathcal{L}^2(\mathbb{P})$ für alle $n \in \mathbb{N}$. Dann gilt $\mathbb{E}[(X_k - X_l)(X_l - X_m)] = 0$ für alle $0 \leq m \leq l \leq k$, denn

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[(X_k - X_l)(X_l - X_m)] &= \mathbb{E}[\mathbb{E}[(X_k - X_l)(X_l - X_m) | \mathcal{F}_l]] \\ &= \mathbb{E}[(X_l - X_m)(\mathbb{E}[X_k | \mathcal{F}_l] - X_l)] \\ &= \mathbb{E}[(X_l - X_m)(X_l - X_l)] = \mathbb{E}[0] = 0. \end{aligned}$$

Erinnerung (vgl. Beob. 3.27). $\|X\|_2 := \sqrt{\mathbb{E}[X^2]}$ ist eine Norm und $\langle X, Y \rangle := \mathbb{E}[XY]$ ist ein Skalarprodukt, $\mathcal{L}^2(\mathbb{P})$ ist ein Hilbertraum (wenn man \mathbb{P} -f.s.-Gleichheit „herausfaktoriert“).

Man spricht Beob. 7.34 auch aus als: „Martingalinkremente über disjunkte Zeitintervalle sind orthogonal.“

Lemma und Definition 7.35. Sei $(X_n)_n$ ein quadratintegrables Martingal.

$$A_n := \sum_{k=1}^n \mathbb{E}[(X_k - X_{k-1})^2 \mid \mathcal{F}_{k-1}]$$

ist der eindeutig bestimmte previsible Prozess mit $A_0 := 0$, sodass $(X_n^2 - A_n)_n$ ein Martingal ist. Man schreibt auch $(\langle X \rangle_n)_n = (A_n)_n$. $\langle X \rangle$ heißt quadratische Variation von X . (In der Literatur werden auch folgende Namen verwendet: Wachsender Prozess, previsible quadratische Variation, Spitzklammerprozess von X .)

Beweis. Es gilt:

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[X_{n+1}^2 - A_{n+1} \mid \mathcal{F}_n] &= \mathbb{E}[(X_{n+1} - X_n)^2 + 2(X_{n+1} - X_n)X_n + X_n^2 - A_{n+1} \mid \mathcal{F}_n] \\ &= \underbrace{\mathbb{E}[(X_{n+1} - X_n)^2 \mid \mathcal{F}_n] - A_{n+1}}_{=-A_n} + X_n^2 + \underbrace{2X_n \mathbb{E}[X_{n+1} - X_n \mid \mathcal{F}_n]}_{=0} \\ &= X_n^2 - A_n. \end{aligned}$$

Die Eindeutigkeit folgt aus der Eindeutigkeit der Doob-Zerlegung (Bem. und Def. 7.30). □

Insbesondere gilt also:

$$\mathbb{E}[X_n^2] = \mathbb{E}[X_0^2] + \mathbb{E}[\langle X \rangle_n] = \mathbb{E}[X_0^2] + \sum_{k=1}^n \mathbb{E}[(X_k - X_{k-1})^2]$$

und

$$\sup_n \mathbb{E}[X_n^2] < \infty \iff \sup_n \mathbb{E}[\langle X \rangle_n] < \infty.$$

Satz 7.36. Sei $(M_n)_n$ ein \mathcal{L}^2 -Martingal. Dann gilt:

i) $\{\langle M \rangle_\infty < \infty\} \stackrel{f.s.}{\subset} \left\{ \lim_{n \rightarrow \infty} M_n \text{ existiert} \right\}$.

ii) Wenn $|M_n - M_{n-1}| \leq c$ für alle n für ein $c < \infty$, so gilt auch

$$\left\{ \lim_{n \rightarrow \infty} M_n \text{ existiert} \right\} \stackrel{f.s.}{\subset} \{\langle M \rangle_\infty < \infty\}.$$

iii) $\{\langle M \rangle_\infty = \infty\} \stackrel{f.s.}{\subset} \left\{ \frac{M_n}{\langle M \rangle_n} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \right\}$.

Bemerkung 7.37. iii) impliziert das Starke Gesetz der großen Zahlen für $M_n = Y_1 + \dots + Y_n$ mit Y_i unabhängig und identisch verteilt mit $\mathbb{E}[Y_1] = 0$ und $\text{Var}[Y_1] < \infty$.

Lemma 7.38 (Kroneckers Lemma). Sei $(x_n)_n \subset \mathbb{R}$ mit $s_k = \sum_{n=1}^k x_n \rightarrow s_\infty \in \mathbb{R}$. Ist $0 \leq b_n \nearrow \infty$, dann gilt $\frac{1}{b_n} \sum_{k=1}^n b_k x_k \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$.

Beweis von Satz 7.36. Sei $k \in \mathbb{R}^+$.

$$S_k := \inf \{n \in \mathbb{N}_0 \mid \langle M \rangle_{n+1} > k\}$$

ist eine Stoppzeit. Nach Lemma 7.18 und Lemma 7.35 ist $(M_{n \wedge S_k}^2 - \langle M \rangle_{n \wedge S_k})_n$ ein Martingal, also gilt

$$\sup_n \mathbb{E}[M_{n \wedge S_k}^2] = \mathbb{E}[M_0] + \underbrace{\sup_n \mathbb{E}[\langle M \rangle_{n \wedge S_k}]}_{\leq k} \leq \infty,$$

das heißt $(M_{n \wedge S_k})_n$ ist \mathcal{L}^2 -beschränkt. Also existiert $\lim_n M_{n \wedge S_k}$ f.s. für jedes $k \in \mathbb{R}^+$. Es gilt $\{\langle M \rangle_\infty < \infty\} = \bigcup_{k \in \mathbb{N}} \{S_k = \infty\}$ und $\bigcup_{k \in \mathbb{N}} \{S_k = \infty, \lim_n M_{n \wedge S_k} \text{ existiert}\} \subset \{\lim_n M_n \text{ existiert}\}$, damit gilt i).

Sei $K > 0$. $T_K := \inf \{n \in \mathbb{N}_0 \mid |M_n| > K\}$ ist eine Stoppzeit und es gilt

$$\mathbb{E}[\underbrace{M_{n \wedge T_K}^2}_{\leq (K+c)^2} - \langle M \rangle_{n \wedge T_K}] = \mathbb{E}[M_0^2].$$

Also folgt mit monotoner Konvergenz

$$\mathbb{E}[\langle M \rangle_{T_K}] = \sup_n \mathbb{E}[\langle M \rangle_{n \wedge T_K}] \leq \mathbb{E}[M_0^2] + (K+c)^2 < \infty.$$

Demnach ist $\langle M \rangle_{T_K} < \infty$ f.s. und es gilt

$$\begin{aligned} & \mathbb{P} \left(\underbrace{\left\{ \lim_{n \rightarrow \infty} M_n \text{ existiert} \right\}}_{\subset \bigcup_{k \in \mathbb{N}} \{T_k = \infty\}} \cap \{\langle M \rangle_\infty = \infty\} \right) \\ & \leq \mathbb{P} \left(\bigcup_{K \in \mathbb{N}} \{T_K = \infty\} \cap \{\langle M \rangle_\infty = \infty\} \cap \{\langle M \rangle_{T_K} < \infty\} \right) = 0. \end{aligned}$$

Also gilt ii).

Weiter sei

$$W_n := \sum_{k=1}^n \frac{M_k - M_{k-1}}{1 + \langle M \rangle_k} = ((1 + \langle M \rangle)^{-1} \bullet M)_n.$$

Nach Lemma 7.10 ist $(W_n)_n$ ein Martingal und es gilt

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[(W_n - W_{n-1})^2 \mid \mathcal{F}_{n-1}] &= \frac{1}{(1 + \langle M \rangle_n)^2} \mathbb{E}[(M_n - M_{n-1})^2 \mid \mathcal{F}_{n-1}] = \frac{\langle M \rangle_n - \langle M \rangle_{n-1}}{(1 + \langle M \rangle_n)^2} \\ &\leq \frac{(\langle M \rangle_n + 1) - (\langle M \rangle_{n-1} + 1)}{(1 + \langle M \rangle_n)(1 + \langle M \rangle_{n-1})} = \frac{1}{1 + \langle M \rangle_{n-1}} - \frac{1}{1 + \langle M \rangle_n}. \end{aligned}$$

Also gilt

$$\langle W \rangle_\infty = \lim_{N \rightarrow \infty} \langle W \rangle_N \leq \limsup_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{1 + \langle M \rangle_{n-1}} - \frac{1}{1 + \langle M \rangle_n} \right) \leq 1$$

und somit $W_n \rightarrow W_\infty$ f.s. nach i). Wähle nun $b_n = 1 + \langle M \rangle_n$ und $x_n = \frac{M_n - M_{n-1}}{1 + \langle M \rangle_n}$ in Lemma 7.38, dann folgt $\sum_{k=1}^n b_k x_k = \sum_{k=1}^n M_k - M_{k-1} = M_n - M_0$, d.h. iii) gilt. \square

Im Folgenden sei $(X_n)_n$ ein stochastischer Prozess mit Werten in \mathbb{R} und

$$X_n^* := \max_{0 \leq k \leq n} X_k, \quad |X|_n^* := \max_{0 \leq k \leq n} |X_k|.$$

Lemma 7.39. Sei $(X_n)_n$ ein Submartingal und $\lambda \geq 0$. Dann gilt

$$\lambda \mathbb{P}(X_n^* \geq \lambda) \leq \mathbb{E}[X_n \mathbf{1}_{\{X_n^* \geq \lambda\}}] \leq \mathbb{E}[|X_n| \mathbf{1}_{\{X_n^* \geq \lambda\}}] (\leq \mathbb{E}[|X_n|]).$$

Beweis. Sei $T := \inf \{k \in \mathbb{N}_0 \mid X_k \geq \lambda\} \wedge n$. T ist eine beschränkte Stoppzeit und es gilt mit Korollar 7.19

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[X_n \mathbf{1}_{\{X_n^* \geq \lambda\}}] + \mathbb{E}[X_n \mathbf{1}_{\{X_n^* < \lambda\}}] &= \mathbb{E}[X_n] \stackrel{7.19}{\geq} \mathbb{E}[X_T] = \mathbb{E}[X_T \mathbf{1}_{\{X_n^* \geq \lambda\}}] + \mathbb{E}[X_T \mathbf{1}_{\{X_n^* < \lambda\}}] \\ &\geq \lambda \mathbb{P}(X_n^* \geq \lambda) + \mathbb{E}[X_n \mathbf{1}_{\{X_n^* < \lambda\}}]. \end{aligned}$$

□

Satz 7.40 (Doob's \mathcal{L}^p -Ungleichungen). Sei $(X_n)_n$ ein Martingal oder ein nichtnegatives Submartingal.

i) Für $p \geq 1$ und $\lambda > 0$ gilt $\lambda^p \mathbb{P}(|X|_n^* \geq \lambda) \leq \mathbb{E}[|X_n|^p]$.

ii) Für $p > 1$ gilt $\mathbb{E}[|X_n|^p] \leq \mathbb{E}[(|X|_n^*)^p] \leq \left(\frac{p}{p-1}\right)^p \mathbb{E}[|X_n|^p]$.

Bemerkung. Für ein \mathcal{L}^2 -Martingal gestattet dies, $\mathbb{E}[(|X|_n^*)^2]$ durch $\mathbb{E}[\langle X \rangle_n]$ zu kontrollieren, denn $\mathbb{E}[X_n^2] = \mathbb{E}[X_0^2] + \mathbb{E}[\langle X \rangle_n]$.

Beweis von Satz 7.40. i) $(|X_n|^p)_n$ ist ein Submartingal, also folgt die Aussage durch Anwenden von Lemma 7.39 auf $(|X_n|^p)_n$.

ii) Sei $c > 0$. Es gilt:

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[(|X|_n^* \wedge c)^p] &= \mathbb{E}\left[\int_0^{|X|_n^* \wedge c} p\lambda^{p-1} d\lambda\right] = \mathbb{E}\left[\int_0^c p\lambda^{p-1} \mathbf{1}_{\{|X|_n^* \geq \lambda\}} d\lambda\right] \\ &\stackrel{\text{Fubini}}{=} \int_0^c p\lambda^{p-1} \mathbb{P}(|X|_n^* \geq \lambda) d\lambda \leq \int_0^c p\lambda^{p-1} \frac{1}{\lambda} \mathbb{E}[|X_n| \mathbf{1}_{\{|X|_n^* \geq \lambda\}}] d\lambda \\ &\stackrel{\text{Fubini}}{=} p \mathbb{E}\left[|X_n| \int_0^{c \wedge |X|_n^*} \lambda^{p-2} d\lambda\right] = \frac{p}{p-1} \mathbb{E}[|X_n| (|X|_n^* \wedge c)^{p-1}] \\ &\stackrel{\text{Hölder}}{\leq} \frac{p}{p-1} \mathbb{E}[(|X|_n^* \wedge c)^p]^{\frac{p-1}{p}} \mathbb{E}[|X_n|^p]^{\frac{1}{p}}. \end{aligned}$$

Für $c \rightarrow \infty$ folgt mit monotoner Konvergenz

$$\mathbb{E}[(|X|_n^*)^p] \leq \frac{p}{p-1} \mathbb{E}[(|X|_n^*)^p]^{\frac{p-1}{p}} \mathbb{E}[|X_n|^p]^{\frac{1}{p}}$$

und durch Umstellen und Potenzieren dieser Ungleichung erhält man

$$\mathbb{E}[(|X|_n^*)^p] \leq \left(\frac{p}{p-1}\right)^p \mathbb{E}[|X_n|^p].$$

□

Korollar 7.41 (eine Form der Kolmogorov-Ungleichung, vgl. Satz 4.8). $X_1, X_2, \dots \in \mathcal{L}^2(\mathbb{P})$ unabhängig, $\mathbb{E}[X_n] = 0$, $S_n := X_1 + \dots + X_n$ ($S_0 := 0$). Es gilt für $x > 0$

$$\mathbb{P}\left(\max\{|S_k| : 1 \leq k \leq n\} \geq x\right) \leq \frac{\text{Var}[S_n]}{x^2}.$$

Beweis. $(S_n)_n$ ist ein Martingal (siehe Bsp. 7.7, i)), Satz 7.40, i) liefert

$$\mathbb{P}\left(\max\{|S_k| : 1 \leq k \leq n\} \geq x\right) \leq \frac{\mathbb{E}[S_n^2]}{x^2}.$$

□

7.5 Zum Satz von Radon-Nikodým

Sei (S, \mathcal{A}) ein messbarer Raum, μ, ν Maße auf (S, \mathcal{A}) . ν ist *absolut stetig* bezüglich μ , geschrieben $\nu \ll \mu$, wenn für jedes $A \in \mathcal{A}$ gilt

$$\mu(A) = 0 \implies \nu(A) = 0.$$

Wenn ν eine Dichte bezüglich μ besitzt ($\nu = h\mu$, also $\nu(A) = \int \mathbf{1}_A h \, d\mu$ mit einem $h : S \rightarrow \overline{\mathbb{R}}_+$ messbar, vgl. Def. 3.16), so gilt offenbar $\nu \ll \mu$.

Satz 7.42 (Eine Form des Satzes von Radon-Nikodým³). Sei (S, \mathcal{A}) separabler messbarer Raum (d.h. $\mathcal{A} = \sigma(A_1, A_2, \dots)$ ist abzählbar erzeugt), μ, ν endliche Maße auf (S, \mathcal{A}) mit $\nu \ll \mu$. Dann gibt es ein $h \geq 0$, $h \in \mathcal{L}^1(\mu)$ mit $\nu = h\mu$.

Beweis. O.E. sei $\mu(S), \nu(S) > 0$, dann sind $P(\cdot) := \mu(\cdot)/\mu(S)$, $Q(\cdot) := \nu(\cdot)/\nu(S)$ W'maße auf (S, \mathcal{A}) mit $Q \ll P$ und es genügt zu zeigen, dass $Q = XP$ für ein $X \in \mathcal{L}^1(P)$.

Wir beobachten zunächst:

$$\text{für } \varepsilon > 0 \text{ gibt es } \delta > 0 \text{ mit } P(B) < \delta \implies Q(B) < \varepsilon \quad (*)$$

Wenn $(*)$ nicht gälte, so gäbe es $B_n \in \mathcal{A}$ und ein $\varepsilon_0 > 0$ mit

$$P(B_n) \leq 2^{-n}, \quad n \in \mathbb{N}, \quad \inf_{n \in \mathbb{N}} Q(B_n) \geq \varepsilon_0.$$

Dann gälte für $C := \limsup_{n \rightarrow \infty} B_n = \bigcap_n \bigcup_{m \geq n} B_m$ einerseits $P(C) = 0$ mit Borel-Cantelli, andererseits wegen $\inf_{n \in \mathbb{N}} Q(\bigcup_{m \geq n} B_m) \geq \varepsilon_0$ auch $Q(C) \geq \varepsilon_0$ im Widerspruch zu $Q \ll P$.

Sei

$$\mathcal{F}_n := \sigma(A_1, \dots, A_n) = \{C_{n,1}, \dots, C_{n,m_n}\}$$

(mit $S = \bigcup_{k=1}^{m_n} C_{n,k}$, $C_{n,k} \neq \emptyset$), für $\omega \in S$ setze

$$X_n(\omega) = \begin{cases} \frac{Q(C_{n,k})}{P(C_{n,k})}, & \omega \in C_{n,k} \text{ und } P(C_{n,k}) > 0, \\ 0, & \omega \in C_{n,k} \text{ und } P(C_{n,k}) = 0. \end{cases}$$

³Johann Radon, 1887–1956; Otton Nikodým, 1887–1974

$X_n \geq 0$ ist \mathcal{F}_n -messbar, $X_n \in \mathcal{L}^1(P)$ mit $\mathbb{E}_P[X_n] = 1$ und für $B \in \mathcal{F}_n$ (d.h. $B = \bigcup_{j \in J} C_{n,j}$ für ein $J \subset \{1, \dots, m_n\}$) ist

$$\mathbb{E}_P[X_n \mathbf{1}_B] = \sum_{j \in J} \mathbb{E}_P[X_n \mathbf{1}_{C_{n,j}}] = \sum_{j \in J} Q(C_{n,j}) = Q(B),$$

d.h. X_n ist die Dichte von $Q|_{\mathcal{F}_n}$ bzgl. $P|_{\mathcal{F}_n}$.

Offenbar ist $(\mathcal{F}_n)_n$ eine Filtration, für $B' \in \mathcal{F}_n (\subset \mathcal{F}_{n+1})$ ist $\mathbb{E}_P[X_{n+1} \mathbf{1}_{B'}] = Q(B') = \mathbb{E}_P[X_n \mathbf{1}_{B'}]$ nach obigem, d.h.

$$\mathbb{E}_P[X_{n+1} | \mathcal{F}_n] = X_n \quad (\text{f.s.})$$

$(X_n)_n$ ist also ein nicht-negatives (P) -Martingal.

Zeige: $\{X_n, n \in \mathbb{N}\}$ ist gleichgradig (P) -integrierbar.

Zu $\varepsilon > 0$ wähle $\delta > 0$ gemäß $(*)$, setze $M := 1/\delta$, dann gilt für jedes $n \in \mathbb{N}$

$$P(X_n > M) \leq \frac{1}{M} \mathbb{E}_P[X_n] = \delta,$$

mit $(*)$ also

$$\mathbb{E}_P[X_n \mathbf{1}_{\{X_n \geq M\}}] = Q(X_n > M) \leq \varepsilon.$$

Mit Satz 7.23 gibt es $X_\infty \in \mathcal{L}^1(P)$ mit $\mathbb{E}_P[X_\infty] = 1$ und $X_n = \mathbb{E}_P[X_\infty | \mathcal{F}_n] \rightarrow X_\infty$ f.s. und in $\mathcal{L}^1(P)$.

X_∞ leistet das Gewünschte: Das W'maß $\tilde{Q}(A) := \mathbb{E}_P[X_\infty \mathbf{1}_A]$, $A \in \mathcal{A}$ erfüllt

$$\tilde{Q}(B) = \mathbb{E}_P[X_\infty \mathbf{1}_B] = \mathbb{E}_P[X_n \mathbf{1}_B] = Q(B) \quad \text{falls } B \in \mathcal{F}_n \text{ für ein } n \in \mathbb{N},$$

d.h. $Q = \tilde{Q}$ auf $\bigcup_n \mathcal{F}_n$ (und dies ist ein \cap -stabiler Erzeuger von \mathcal{A}). Mit Satz 1.18 folgt $Q = \tilde{Q}$. \square

Bericht 7.43. 1. Man nennt die Dichte h von $\nu = h\mu$ bezüglich μ auch die Radon-Nikodým-Ableitung (von ν bezüglich μ) und notiert dies auch als $\frac{d\nu}{d\mu} = h$.

2. Satz 7.42 gilt genauso, wenn μ und ν σ -endlich sind (zerlege $S = \bigcup_k S_k$, so dass $\mu(S_k), \nu(S_k) < \infty$, dann gibt es jeweils $\frac{d\mathbf{1}_{S_k}\nu}{d\mathbf{1}_{S_k}\mu}$).

Auch auf die Forderung, dass \mathcal{A} einen abzählbaren Erzeuger besitzt, kann man verzichten, siehe z.B. [Wi, Ch. 14.13].

Kapitel 8

Zum zentralen Grenzwertsatz

8.1 Zu charakteristischen Funktionen und schwacher Konvergenz

Definition 8.1. μ endliches Maß auf $(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}))$, die Funktion

$$\varphi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}, \quad \varphi(t) = \int_{\mathbb{R}} e^{itx} \mu(dx) \quad \left(:= \int_{\mathbb{R}} \cos(tx) \mu(dx) + i \int_{\mathbb{R}} \sin(tx) \mu(dx) \right)$$

(mit $i = \sqrt{-1}$ der imaginären Einheit) heißt die *charakteristische Funktion* von μ (man schreibt oft auch $\varphi = \varphi_{\mu}$, um die Abhängigkeit von μ zu betonen).

Für eine reellwertige ZV X (definiert auf einem W'raum $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$) heißt

$$\varphi_X : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}, \quad \varphi_X(t) = \mathbb{E}[e^{itX}]$$

die *charakteristische Funktion* von X (d.h. formal $\varphi_X = \varphi_{\mathcal{L}(X)}$).

Lemma 8.2. Sei $\varphi = \varphi_X$ die charakteristische Funktion einer reellen ZV X . Es gilt

i) $|\varphi(t)| \leq \varphi(0) = 1$

ii) φ ist gleichmäßig stetig auf \mathbb{R}

iii) $\varphi_{-X}(t) = \overline{\varphi_X(t)}$

iv) $\varphi_{aX+b}(t) = e^{itb} \varphi_X(at)$ für $a, b \in \mathbb{R}$

v) X und Y unabhängige reelle ZVn $\implies \varphi_{X+Y}(t) = \varphi_X(t) \varphi_Y(t)$

Beweis. Wir notieren $\mu := \mathcal{L}(X)$.

i) $|\varphi(t)| \leq \int_{\mathbb{R}} |e^{itx}| \mu(dx) = \int_{\mathbb{R}} 1 \mu(dx) = \mu(\mathbb{R}) = 1$

ii) Sei $\varepsilon > 0$. Wähle $0 < M < \infty$ mit $\mu([-M, M]^c) < \varepsilon/4$ und $\delta > 0$ so klein, dass $\sup\{|e^{iy} - 1| : y \in \mathbb{R}, |y| \leq \delta\} < \varepsilon/2$, dann ist für $t_1, t_2 \in \mathbb{R}$ mit $|t_1 - t_2| < \delta/M$

$$\begin{aligned} |\varphi(t_1) - \varphi(t_2)| &\leq \int_{\mathbb{R}} |e^{it_1x} - e^{it_2x}| \mu(dx) = \int_{\mathbb{R}} |e^{it_2x}| \cdot |e^{i(t_1-t_2)x} - 1| \mu(dx) \\ &\leq 2 \int_{[-M, M]^c} \mu(dx) + \int_{[-M, M]} |e^{i(t_1-t_2)x} - 1| \mu(dx) < 2 \frac{\varepsilon}{4} + \frac{\varepsilon}{2} \mu([-M, M]) \leq \varepsilon \end{aligned}$$

iii) $\varphi_{-X}(t) = \mathbb{E}[e^{-itX}] = \mathbb{E}[\overline{e^{itX}}] = \overline{\mathbb{E}[e^{itX}]} = \overline{\varphi_X(t)}$

(zerlege die Erwartungswerte jeweils in Real- und Imaginärteil)

iv) Es ist $\varphi_{aX+b}(t) = \mathbb{E}[e^{it(aX+b)}] = e^{itb} \mathbb{E}[e^{itaX}] = e^{itb} \varphi_X(at)$

v) $\varphi_{X+Y}(t) = \mathbb{E}[e^{it(X+Y)}] = \mathbb{E}[e^{itX} e^{itY}] = \mathbb{E}[e^{itX}] \cdot \mathbb{E}[e^{itY}] = \varphi_X(t) \varphi_Y(t)$,

da der Erwartungswert für Produkte unabhängiger ZVn faktorisiert. □

Beispiel 8.3. I. $\varphi_{\delta_0}(t) = 1$

2. $\varphi_{\text{Ber}_p}(t) = pe^{it} + 1 - p$

3. $\varphi_{\text{Bin}_{n,p}}(t) = (pe^{it} + 1 - p)^n$

4. $\varphi_{\text{Exp}_\lambda}(t) = \int_0^\infty e^{itx} \lambda e^{-\lambda x} dx = \frac{\lambda}{\lambda - it}$

5. Für $Z \sim \mathcal{N}_{0,1}$ ist $\varphi_Z(t) = \exp(-t^2/2)$, ein etwas „hemdsärmeliges“ Argument dafür ist

$$\begin{aligned} \varphi_Z(t) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^\infty e^{itx} e^{-x^2/2} dx \\ &= e^{-t^2/2} \int_{-\infty}^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}(x - it)^2\right) dx = e^{-t^2/2} \end{aligned}$$

(man kann den Integranden in der zweiten Zeile als die „Dichte einer Normalverteilung mit Erwartungswert it “ interpretieren, die Identität kann z.B. mittels Cauchy’schem Integralsatz bewiesen werden).

Ein „unanschauliches“, aber „rein reelles“ Argument: Es ist

$$\varphi_Z(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^\infty e^{itx} e^{-x^2/2} dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^\infty \cos(tx) e^{-x^2/2} dx$$

(wegen Symmetrie ist $\int_{-\infty}^\infty \sin(tx) e^{-x^2/2} dx = 0$), also

$$\varphi'_Z(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^\infty -x \sin(tx) e^{-x^2/2} dx = -\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^\infty t \cos(tx) e^{-x^2/2} dx = -t \varphi_Z(t)$$

wobei wir für die erste Gleichheit unter dem Integral ableiten (man überzeugt sich, dass die Voraussetzungen von Satz 3.36 erfüllt sind) und für die zweite Gleichheit partielle Integration verwenden (beachte $(d/dx) e^{-x^2/2} = -x e^{-x^2/2}$). Somit

$$\frac{d}{dt}(\varphi_Z(t)e^{t^2/2}) = \varphi'_Z(t)e^{t^2/2} + \varphi_Z(t)te^{t^2/2} = 0$$

d.h. für jedes $t \in \mathbb{R}$ ist $\varphi_Z(t)e^{t^2/2} = \varphi_Z(0)e^0 = 1$.

Satz 8.4. μ endliches Maß mit Verteilungsfunktion F_μ (d.h. $F_\mu(x) = \mu((-\infty, x])$) und charakteristischer Funktion φ_μ , dann gilt für $-\infty < a < b < \infty$

$$\begin{aligned} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi} \int_{-T}^T \frac{e^{-ita} - e^{-itb}}{it} \varphi_\mu(t) dt &= \mu((a, b)) + \frac{1}{2}\mu(\{a\}) + \frac{1}{2}\mu(\{b\}) \\ &= \frac{1}{2}(F_\mu(b) + F_\mu(b-)) - \frac{1}{2}(F_\mu(a) + F_\mu(a-)) \end{aligned} \quad (8.1)$$

Korollar 8.5. Insbesondere gilt für endliche Maße $\mu, \tilde{\mu}$ auf \mathbb{R}

$$\mu = \tilde{\mu} \iff \varphi_\mu = \varphi_{\tilde{\mu}}$$

denn $\varphi_\mu = \varphi_{\tilde{\mu}}$ impliziert mit Satz 8.4, dass $\mu((a, b)) = \tilde{\mu}((a, b))$ für alle $a, b \in C := \{x \in \mathbb{R} : \mu(\{x\}) = \tilde{\mu}(\{x\}) = 0\}$ und $\mathbb{R} \setminus C$ ist höchstens abzählbar.

Beweis von Satz 8.4. Für $T > 0$ sei

$$I_T := \int_{-T}^T \frac{e^{-ita} - e^{-itb}}{it} \varphi_\mu(t) dt = \int_{-T}^T \int_{\mathbb{R}} \frac{e^{-ita} - e^{-itb}}{it} e^{itx} \mu(dx) dt = \int_{-T}^T \int_{\mathbb{R}} f_{a,b}(t, x) \mu(dx) dt$$

mit

$$f_{a,b}(t, x) := \frac{e^{-ita} - e^{-itb}}{it} e^{itx} = \int_a^b e^{-ity} dy \cdot e^{itx}$$

(somit $|f_{a,b}(t, x)| \leq b - a$ und $\int_{-T}^T \int_{\mathbb{R}} |f_{a,b}(t, x)| \mu(dx) dt \leq 2T(b - a)\mu(\mathbb{R}) < \infty$).

Mit dem Satz von Fubini (vgl. Satz 5.2) folgt

$$I_T = \int_{\mathbb{R}} \int_{-T}^T \frac{e^{it(x-a)} - e^{it(x-b)}}{it} dt \mu(dx) = \int_{\mathbb{R}} \tilde{f}_{a,b}(T, x) \mu(dx) \quad (8.2)$$

wobei

$$\begin{aligned} \tilde{f}_{a,b}(T, x) &:= \int_{-T}^T \frac{e^{it(x-a)} - e^{it(x-b)}}{it} dt \\ &= \frac{1}{i} \int_{-T}^T \frac{\cos(t(x-a)) - \cos(t(x-b))}{t} dt + \int_{-T}^T \frac{\sin(t(x-a))}{t} - \frac{\sin(t(x-b))}{t} dt \\ &= 0 + 2 \int_0^T \frac{\sin(t(x-a))}{t} dt - 2 \int_0^T \frac{\sin(t(x-b))}{t} dt \end{aligned}$$

denn für festes $x \in \mathbb{R}$ ist $t \mapsto (\cos(t(x-a)) - \cos(t(x-b)))/t$ eine ungerade Funktion von t und $t \mapsto \sin(t(x-a))/t, t \mapsto \sin(t(x-b))/t$ sind gerade Funktionen.

Mit

$$\text{sign}(y) := \begin{cases} 1, & y > 0 \\ 0, & y = 0 \\ -1, & y < 0 \end{cases} \quad \text{und} \quad \text{Si}(y) := \int_0^y \frac{\sin(t)}{t} dt \quad \text{für } y > 0$$

(man nennt $\text{Si}(\cdot)$ auch den „Integralsinus“) ergibt sich daraus mit Substitution

$$\tilde{f}_{a,b}(T, x) = 2 \text{sign}(x - a) \text{Si}(T|x - a) - 2 \text{sign}(x - b) \text{Si}(T|x - b) \quad (8.3)$$

Es gilt

$$\text{Si}(y) \xrightarrow{y \rightarrow \infty} \frac{\pi}{2} \quad (8.4)$$

damit folgt aus (8.3)

$$\sup_{T > 0, x \in \mathbb{R}} |\tilde{f}_{a,b}(T, x)| =: C < \infty$$

und für $x \in \mathbb{R}$ gilt

$$\tilde{f}_{a,b}(T, x) \xrightarrow{T \rightarrow \infty} \begin{cases} 0, & \text{falls } x < a \text{ oder } x > b \\ \pi, & \text{falls } x = a \text{ oder } x = b \\ 2\pi & \text{sonst, d.h. falls } a < x < b \end{cases} \quad (8.5)$$

Somit folgt die Behauptung (8.1) aus (8.2) und (8.3) zusammen mit dem Satz von der dominierten Konvergenz (vgl. Satz 3.13).

Behauptung (8.4), das Limesverhalten von $\text{Si}(\cdot)$, ist eine Aussage aus der Analysis, siehe z.B. [Du] oder [Wi, Exercise E.16.1]. Hier der Vollständigkeit halber ein knappes Argument:

Für $a > 0$ ist

$$\int_0^a \frac{\sin(x)}{x} dx = \int_0^a \int_0^\infty e^{-xy} \sin(x) dy dx = \int_0^\infty \int_0^a e^{-xy} \sin(x) dx dy$$

(beachte, dass $\int_0^a \int_0^\infty |e^{-xy} \sin(x)| dy dx = \int_0^a |\sin(x)| \int_0^\infty e^{-xy} dy dx = \int_0^a |\sin(x)|/x dx < \infty$ gilt, da $(0, \infty) \ni x \mapsto \sin(x)/x$ beschränkt ist; daher ist die Anwendung des Satzes von Fubini gerechtfertigt). Weiter ist

$$\begin{aligned} \int_0^a e^{-xy} \sin(x) dx &= \left[-\frac{e^{-xy} \cos(x) + ye^{-xy} \sin(x)}{1 + y^2} \right]_{x=0}^{x=a} = \frac{1}{1 + y^2} - (\cos(a) + \sin(a)) \frac{e^{-ay}}{1 + y^2} \\ \int_0^\infty \frac{1}{1 + y^2} dy &= [\arctan(y)]_{y=0}^{y=\infty} = \frac{\pi}{2} \\ \int_0^\infty |\cos(a) + \sin(a)| \frac{e^{-ay}}{1 + y^2} dy &\leq 2 \int_0^\infty e^{-ay} dy = \frac{2}{a} \end{aligned}$$

und insgesamt

$$\left| \int_0^a \frac{\sin(x)}{x} dx - \frac{\pi}{2} \right| \leq \frac{2}{a}$$

Mit $a \rightarrow \infty$ folgt (8.4). □

Lemma 8.6. Sei X reelle ZV mit $\mathbb{E}[X] = \mu$, $\mathbb{E}[X^2] = \theta^2 < \infty$, so ist

$$\varphi_X(t) = 1 + it\mu - \frac{1}{2}\theta^2 t^2 + \varepsilon(t)t^2 \quad (8.6)$$

wobei

$$|\varepsilon(t)| \leq \mathbb{E}\left[\frac{|t|}{6}|X|^3 \wedge |X|^2\right] \xrightarrow{t \rightarrow 0} 0 \quad (8.7)$$

Beweis. Für $y \in \mathbb{R}$ ist

$$e^{iy} - \left(1 + iy - \frac{1}{2}y^2\right) = \int_0^y \frac{1}{2}i^3 e^{is}(y-s)^2 ds =: R(y)$$

Einerseits ist

$$|R(y)| \leq \int_0^{|y|} \frac{1}{2}|i^3 e^{is}|(|y-s|)^2 ds = \frac{1}{2} \int_0^{|y|} (|y-s|)^2 ds = \frac{1}{2} \int_0^{|y|} s^2 ds = \frac{1}{6}|y|^3$$

andererseits ist mit partieller Integration

$$\int_0^y i e^{is}(y-s)^2 ds = \underbrace{\left[e^{is}(y-s)^2 \right]_{s=0}^{s=y}}_{=-y^2 = -\int_0^y 2(y-s) ds} - \int_0^y e^{is} 2(y-s)(-1) ds = \int_0^y 2(y-s)(e^{is} - 1) ds$$

auch

$$|R(y)| = \frac{1}{2} \left| \int_0^y i e^{is}(y-s)^2 ds \right| \leq \int_0^y (y-s) |e^{is} - 1| ds \leq 2 \int_0^y (y-s) ds = |y|^2$$

und insgesamt

$$|R(y)| \leq \frac{1}{6}|y|^3 \wedge |y|^2$$

Setzen wir $y = tX$ ein und bilden Erwartungswerte, so folgt

$$\left| \mathbb{E}[e^{itX}] - \mathbb{E}\left[1 + itX - \frac{1}{2}t^2 X^2\right] \right| \leq \mathbb{E}[|R(tX)|] \leq t^2 \mathbb{E}\left[\frac{|t|}{6}|X|^3 \wedge |X|^2\right]$$

□

Satz 8.7. Seien μ_n , $n \in \mathbb{N}$ \mathcal{W} maße auf $(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}))$ mit zugehörigen Verteilungsfunktionen F_n und zugehörigen charakteristischen Funktionen φ_n , es gelte für $t \in \mathbb{R}$

$$\varphi_n(t) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \varphi(t) \quad (8.8)$$

für eine gewisse Funktion $\varphi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$, die stetig in $t = 0$ ist. Dann ist φ die charakteristische Funktion eines (eindeutig bestimmten) \mathcal{W} maßes μ auf \mathbb{R} und die Verteilungsfunktion F von μ erfüllt

$$F_n(x) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} F(x) \quad \text{für jeden Stetigkeitspunkt } x \text{ von } F \quad (8.9)$$

Satz 8.8. Seien $\mu_n, n \in \mathbb{N}$ W 'maße auf $(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}))$ mit zugehörigen Verteilungsfunktionen F_n . Dann gibt es eine Teilfolge $n_k \nearrow \infty$ und eine nicht-fallende, rechtsstetige Funktion $F : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$ mit

$$F_{n_k}(x) \xrightarrow[k \rightarrow \infty]{} F(x) \quad \text{für jeden Stetigkeitspunkt } x \text{ von } F \quad (8.10)$$

Wenn zudem gilt

$$\lim_{M \rightarrow \infty} \sup_{n \in \mathbb{N}} (F_n(-M) + 1 - F_n(M)) = 0 \quad (8.11)$$

so ist F die Verteilungsfunktion eines W 'maßes μ auf $(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}))$.

Beweis. Wir zeigen zunächst mittels eines Diagonalfolgenarguments, dass (8.10) für $x \in \mathbb{Q}$ erreicht werden kann: Sei $\mathbb{Q} = \{q_1, q_2, \dots\}$ eine Aufzählung.

- Offenbar ist $(F_n(q_1))_{n \in \mathbb{N}} \subset [0, 1]$ relativkompakt, wähle eine Folge $(m_{1,k})_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{N}$ mit $m_{1,k} \nearrow_{k \rightarrow \infty} \infty$, so dass gilt $\lim_{k \rightarrow \infty} F_{m_{1,k}}(q_1) =: H(q_1)$.
- $(F_{m_{1,k}}(q_2))_{k \in \mathbb{N}} \subset [0, 1]$ ist relativkompakt, wähle eine Folge $(m_{2,k})_{k \in \mathbb{N}} \subset \{m_{1,1}, m_{1,2}, m_{1,3}, \dots\}$ mit $m_{2,k} \nearrow_{k \rightarrow \infty} \infty$, so dass gilt $\lim_{k \rightarrow \infty} F_{m_{2,k}}(q_2) =: H(q_2)$ (und nach Konstruktion gilt auch $\lim_{k \rightarrow \infty} F_{m_{2,k}}(q_1) = H(q_1)$).
- Wir iterieren diesen Gedanken: Im j -ten Schritt wurde eine Folge $(m_{j,k})_{k \in \mathbb{N}}$ mit $m_{j,k} \nearrow_{k \rightarrow \infty} \infty$ gewählt, so dass gilt

$$\lim_{k \rightarrow \infty} F_{m_{j,k}}(q_\ell) = H(q_\ell) \quad \text{für } \ell = 1, 2, \dots, j$$

Da auch $(F_{m_{j,k}}(q_\ell))_{k \in \mathbb{N}} \subset [0, 1]$ relativkompakt ist, können wir eine Folge $(m_{j+1,k})_{k \in \mathbb{N}} \subset \{m_{j,1}, m_{j,2}, m_{j,3}, \dots\}$ wählen mit $m_{j+1,k} \nearrow_{k \rightarrow \infty} \infty$, so dass zusätzlich gilt $\lim_{k \rightarrow \infty} F_{m_{j+1,k}}(q_{j+1}) =: H(q_{j+1})$, etc.

- Wir setzen $n_k := m_{k,k}$, so gilt

$$\lim_{k \rightarrow \infty} F_{n_k}(q) = H(q) \in [0, 1] \quad \text{für } q \in \mathbb{Q}$$

und die Funktion $H : \mathbb{Q} \rightarrow [0, 1]$ ist nicht-fallend (denn dies gilt für jeden Approximanden).

Setze nun

$$F(x) := \inf \{H(q) : q \in \mathbb{Q}, q > x\} \quad \text{für } x \in \mathbb{R} \quad (8.12)$$

Nach Konstruktion ist $F : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$ nicht-fallend, zudem ist F rechtsstetig: Sei $x \in \mathbb{R}$, zu $\varepsilon > 0$ gibt es nach Definition ein $q_0 = q_0(x, \varepsilon) \in \mathbb{Q} \cap (x, \infty)$ mit $F(x) \leq H(q_0) \leq F(x) + \varepsilon$. Für $y \in [x, q_0)$ ist daher $F(x) \leq F(y) \leq H(q_0) \leq F(x) + \varepsilon$.

Wir prüfen, dass für dieses F die Behauptung (8.10) gilt: Sei $x \in \mathbb{R}$ und $q \in \mathbb{Q} \cap (x, \infty)$, so gilt

$$\limsup_{k \rightarrow \infty} F_{n_k}(x) \leq \limsup_{k \rightarrow \infty} F_{n_k}(q) = H(q)$$

Nehmen wir auf der rechten Seite das Infimum über alle $q \in \mathbb{Q} \cap (x, \infty)$, dann folgt (stets)

$$\limsup_{k \rightarrow \infty} F_{n_k}(x) \leq F(x)$$

Sei nun x ein Stetigkeitspunkt von F (beachte, dass F als beschränkte, nicht-fallende Funktion höchstens abzählbar viele Unstetigkeitsstellen haben kann), d.h. zu $\varepsilon > 0$ gibt es $h = h(x, \varepsilon) > 0$ mit $F(x) \leq F(x - h) + \varepsilon$. Wähle $q \in \mathbb{Q} \cap (x - h, x)$, so folgt

$$\liminf_{k \rightarrow \infty} F_{n_k}(x) \geq \liminf_{k \rightarrow \infty} F_{n_k}(q) = H(q) \geq F(x - h) \geq F(x) - \varepsilon$$

mit $\varepsilon \downarrow 0$ ergibt sich (8.10).

Wenn zusätzlich (8.11) gilt, so gibt es zu jedem $\varepsilon > 0$ ein $M = M(\varepsilon)$ mit

$$F(-M) \leq \varepsilon \quad \text{und} \quad F(M) \geq 1 - \varepsilon$$

d.h. es gilt

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0 \quad \text{und} \quad \lim_{x \rightarrow \infty} F(x) = 1$$

und F ist tatsächlich die Verteilungsfunktion eines \mathbb{W} 'maßes (vgl. Erinnerung 1.26 und Satz 1.27). \square

Lemma und Definition 8.9. Seien $\mu_n, n \in \mathbb{N}$ und μ \mathbb{W} 'maße auf $(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}))$ mit zugehörigen Verteilungsfunktionen F_n bzw. F . Dann sind äquivalent

$$i) F_n(x) \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} F(x) \quad \text{für jeden Stetigkeitspunkt } x \text{ von } F$$

$$ii) \int g d\mu_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} \int g d\mu \quad \text{für jede stetige und beschränkte Funktion } g \text{ auf } \mathbb{R}$$

Man sagt dann, dass die Folge μ_n schwach gegen μ konvergiert und schreibt dies auch als

$$\mu_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} \mu \quad \text{oder} \quad \mu_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{w} \mu$$

Bericht. Die Bezeichnung „schwache Konvergenz“ für den Sachverhalt aus Definition 8.9 ist in der Stochastik üblich, in der Funktionalanalysis würde man dies eher als „schwach-* Konvergenz“ bezeichnen.

Sprechweise 8.10. Seien X, X_1, X_2, \dots reelle Zufallsvariablen (die nicht notwendigerweise alle auf demselben Wahrscheinlichkeitsraum definiert sein müssen). Man sagt, die Folge X_n konvergiert in Verteilung gegen X , wenn $\mathcal{L}(X_n) \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{w} \mathcal{L}(X)$ gilt und notiert dies auch als $X_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{\mathcal{L}} X$ oder $X_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{d} X$ oder $X_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} X$.

Gelegentlich schreibt man auch $X_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{d} \mu$ bzw. $X_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} \mu$, wenn $\mu = \mathcal{L}(X)$ und X unspezifiziert bleibt.

Beweis von Lemma 8.9. Wir zeigen nur „ $i) \Rightarrow ii)$ “ (nur diese Richtung wird hier im weiteren Verlauf benötigt): Sei $U \sim \text{Unif}_{[0,1]}$, setze

$$X_n := \inf\{x \in \mathbb{R} : F_n(x) > U\}, \quad n \in \mathbb{N}$$

$$X := \inf\{x \in \mathbb{R} : F(x) > U\}$$

dann gilt

$$X_n \sim \mu_n, n \in \mathbb{N} \quad \text{und} \quad X \sim \mu$$

Mit $D := \{F(x), F(x-) : x \text{ ist Unstetigkeitsstelle von } F\} \cup \{0, 1\}$ gilt

$$\{U \notin D\} \subset \{X_n \rightarrow X \text{ für } n \rightarrow \infty\}$$

und da F höchstens abzählbar viele Unstetigkeitsstellen hat, ist D abzählbar und $\mathbb{P}(U \in D) = 0$.
Folglich gilt $X_n \rightarrow X$ fast sicher und für $g \in C_b(\mathbb{R})$ ist

$$\int g d\mu_n = \mathbb{E}[g(X_n)] \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \mathbb{E}[g(X)] = \int g d\mu$$

mit dem Satz von der dominierten Konvergenz.

Für die Umkehrung „ii) \Rightarrow i)“ approximiert man Indikatorfunktionen von Halbointervallen auf \mathbb{R} geeignet durch stetige Funktionen, siehe die (Lehrbuch-)Literatur. \square

Beweis von Satz 8.7. Zeige: Die F_n erfüllen Bedingung (8.11) aus Satz 8.8: Es ist für $n \in \mathbb{N}$ und $t \in \mathbb{R}$

$$\varphi_n(t) + \varphi_n(-t) = \int_{\mathbb{R}} 2 \cos(tx) \mu_n(dx) \in [-2, 2]$$

und daher auch $\varphi(t) + \varphi(-t) \in [-2, 2]$.

Stetigkeit von φ in 0 bedeutet

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists \delta > 0 : \forall t \text{ with } |t| < \delta : |1 - \varphi(t)| < \frac{\varepsilon}{4}$$

Fixiere $\varepsilon > 0$, es gibt ein $\delta > 0$ mit

$$0 \leq \frac{1}{\delta} \int_0^\delta (2 - \varphi(t) - \varphi(-t)) dt < \frac{\varepsilon}{2}$$

demnach folgt aus Annahme (8.8) und dominierter Konvergenz, dass es ein $n_0 = n_0(\varepsilon, \delta)$ gibt, so dass für $n \geq n_0$ gilt

$$\begin{aligned} \varepsilon &\geq \frac{1}{\delta} \int_0^\delta (2 - \varphi_n(t) - \varphi_n(-t)) dt \\ &= \frac{1}{\delta} \int_{-\delta}^\delta \left(\int_{\mathbb{R}} 1 - e^{itx} \mu_n(dx) \right) dt = \int_{\mathbb{R}} \frac{1}{\delta} \int_{-\delta}^\delta 1 - e^{itx} dt \mu_n(dx) \end{aligned}$$

(verwende den Satz von Fubini für das letzte Gleichheitszeichen). Weiter ist

$$\frac{1}{\delta} \int_{-\delta}^\delta 1 - e^{itx} dt = 2 - \int_{-\delta}^\delta \frac{\cos(tx)}{\delta} dt = 2 - \left[\frac{\sin(tx)}{\delta x} \right]_{t=-\delta}^{t=\delta} = 2 \left(1 - \frac{\sin(\delta x)}{\delta x} \right) \geq 2 \left(1 - \frac{1}{|\delta x|} \right)^+$$

folglich für $n \geq n_0$

$$\varepsilon \geq \int_{\mathbb{R}} 2 \left(1 - \frac{1}{|\delta x|} \right)^+ \mu_n(dx) \geq \int_{\mathbb{R} \setminus [-2/\delta, 2/\delta]} 1 \mu_n(dx) = \mu_n(\{x : |x| > 2/\delta\})$$

Wähle $M \in (0, \infty)$ mit

$$\max_{n=1,2,\dots,n_0-1} \mu_n([-M', M']^c) \leq \varepsilon$$

dann gilt insgesamt mit $M := M' \vee 2/\delta$

$$\sup_{n \in \mathbb{N}} \mu_n([-M, M]^c) \leq \varepsilon$$

da ε beliebig klein gewählt werden kann, folgt Bedingung (8.11) aus Satz 8.8.

Wir können nun mit Satz 8.8 eine Teilfolge $n_k \nearrow \infty$ und ein W'maß μ mit Verteilungsfunktion F wählen, so dass

$$F_{n_k}(x) \xrightarrow[k \rightarrow \infty]{} F(x) \quad \text{für jeden Stetigkeitspunkt } x \text{ von } F$$

Mit Lemma 8.9 gilt dann auch

$$\int g d\mu_{n_k} \xrightarrow[k \rightarrow \infty]{} \int g d\mu \quad \text{für jede stetige und beschränkte Funktion}$$

insbesondere gilt $\varphi_{n_k}(t) \rightarrow \int e^{itx} \mu(dx) = \varphi_\mu(t)$ für jedes t , d.h. $\varphi = \varphi_\mu$.

Falls (8.9) nicht gälte, so müsste es einen Stetigkeitspunkt x von F , ein $\varepsilon > 0$ und eine (andere) Teilfolge $m_j \nearrow \infty$ mit

$$|F_{m_j}(x) - F(x)| \geq \varepsilon \quad \text{für alle } j$$

geben und wir können wiederum mit Satz 8.8 (ggfs. durch Übergang zu einer Teilteilfolge) annehmen, dass es ein W'maß $\tilde{\mu}$ auf \mathbb{R} mit Verteilungsfunktion \tilde{F} gibt, so dass

$$F_{m_j}(x) \xrightarrow[j \rightarrow \infty]{} \tilde{F}(x) \quad \text{für jeden Stetigkeitspunkt } x \text{ von } \tilde{F}$$

und mit Lemma 8.9 gälte dann auch $\varphi_{m_j}(t) \rightarrow \varphi_{\tilde{\mu}}(t)$. Damit wäre aber $\varphi_\mu = \varphi_{\tilde{\mu}}$ nach Voraussetzung, mit Korollar 8.5 also $\tilde{\mu} = \mu$ und insbesondere $\tilde{F} = F$, was einen Widerspruch ergäbe. \square

8.2 Zentraler Grenzwertsatz (in \mathbb{R}^1)

Satz 8.11 („Zentraler Grenzwertsatz“). *Seien X_1, X_2, \dots u.i.v. reelle ZVn $\in \mathcal{L}^2$ mit $\sigma^2 = \text{Var}[X_1] \in (0, \infty)$, dann gilt für $-\infty \leq a < b \leq \infty$*

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{P}\left(a \leq \frac{X_1 + \dots + X_n - n\mathbb{E}[X_1]}{\sqrt{n\sigma^2}} \leq b\right) = \mathbb{P}(a \leq Z \leq b) \quad \text{mit } Z \sim \mathcal{N}_{0,1}.$$

Mit Sprechweise 8.10 ist die Aussage von Satz 8.11, dass die Folge der (normierten und standardisierten) Partialsummen $(X_1 + \dots + X_n - n\mathbb{E}[X_1])/\sqrt{n\sigma^2}$ in Verteilung gegen die Standardnormalverteilung konvergiert.

Beweis. Wir können im Folgenden o.E. $\mathbb{E}[X_1] = 0$, $\text{Var}[X_1] = 1$ annehmen, ansonsten betrachten wir

$$\tilde{X}_i := \frac{X_i - \mathbb{E}[X_1]}{\sqrt{\text{Var}[X_1]}}$$

Die ZV

$$Y_n := \frac{X_1 + \dots + X_n - n\mathbb{E}[X_1]}{\sqrt{n\sigma^2}}$$

hat charakteristische Funktion

$$\varphi_{Y_n}(t) = \mathbb{E}\left[\exp\left(\frac{it}{\sqrt{n}}(X_1 + \dots + X_n)\right)\right] = \mathbb{E}\left[\prod_{k=1}^n \exp\left(i\frac{t}{n^{1/2}}X_k\right)\right] = \left(\varphi_{X_1}\left(\frac{t}{n^{1/2}}\right)\right)^n$$

mit Lemma 8.6 also für jedes $t \in \mathbb{R}$ (wobei $|\varepsilon(n^{-1/2}t)| \rightarrow 0$ mit $n \rightarrow \infty$)

$$\varphi_{Y_n}(t) = \left(1 - \frac{t^2}{2n} + \frac{t^2\varepsilon(n^{-1/2}t)}{2n}\right)^n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \exp(-t^2/2)$$

und die Behauptung folgt aus Satz 8.7. □

Literaturverzeichnis

- [Kl] A. Klenke, Wahrscheinlichkeitstheorie, 4. Aufl., Springer, 2020.
- [Ka] O. Kallenberg, Foundations of modern probability, 3rd ed., Springer, 2021.
- [Ge] H.-O. Georgii, Einführung in die Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik, 5. Aufl., de Gruyter, 2015.
- [Du] R. Durrett, Probability : theory and examples, Duxbury Press, 2003.
- [Wi] D. Williams, Probability with martingales, Cambridge Univ. Press, 1995.
- [KW] G. Kersting, A. Wakolbinger, Stochastische Prozesse, Springer, 2014.
- [Fe] W. Feller, An Introduction to Probability Theory, Band 1 und Band 2, Wiley 1968 und 1971.
- [Br] L. Breiman: Probability, Wiley, 1968.
- [El] J. Elstrodt: Maß- und Integrationstheorie, 8. Aufl., Springer, 2018.
- [Ba] H. Bauer, Wahrscheinlichkeitstheorie und Grundzüge der Maßtheorie, de Gruyter, 1978.