

Zusammenfassung Stochastik I

© Tim Baumann, <http://timbaumann.info/uni-spicker>

Der abstrakte Maß- und Wkts-Begriff

Def. Eine **Ereignisalgebra** oder **Boolesche Algebra** ist eine Menge \mathfrak{A} mit zweistelligen Verknüpfungen \wedge („und“) und \vee („oder“), einer einstelligen Verknüpfung \neg (Komplement) und ausgezeichneten Elementen $U \in \mathfrak{A}$ (unmögliches Ereignis) und $S \in \mathfrak{A}$ (sicheres Ereignis), sodass für alle $A, B, C \in \mathfrak{A}$ gilt:

- $A \wedge A = A$
- $A \wedge B = B \wedge A$
- $A \wedge S = A$
- $A \wedge U = U$
- $A \wedge \overline{A} = U$
- $A \wedge (B \wedge C) = (A \wedge B) \wedge C$
- $A \vee A = A$
- $A \vee B = B \vee A$
- $A \vee S = S$
- $A \vee U = A$
- $A \vee \overline{A} = S$
- $A \vee (B \vee C) = (A \vee B) \vee C$
- $A \wedge (B \vee C) = (A \wedge B) \vee (A \wedge C)$

Def. Sei \mathfrak{A} eine Ereignisalgebra und A, B Ereignisse.

- Durch $A \leq B : \iff A \wedge B = B$ (gesprochen A **impliziert** B) ist auf \mathfrak{A} eine Partialordnung definiert.
- A und B heißen **äquivalent**, falls $A \leq B$ und $B \leq A$.
- A und B heißen **unvereinbar**, falls $A \wedge B = U$.

Korollar. In einer Ereignisalgebra \mathfrak{A} gilt mit $A, B \in \mathfrak{A}$:

- $\overline{\overline{A}} = A$
- $A \leq B \iff \overline{B} \leq \overline{A}$ (Kontraposition)
- $\overline{A \vee B} = \overline{A} \wedge \overline{B}$
- $\overline{A \wedge B} = \overline{A} \vee \overline{B}$ (De Morgansche Regeln)

Korollar. Durch Induktion folgt aus den De Morganschen Regeln:

$$\overline{\left(\bigvee_{i=1}^n A_i\right)} = \bigwedge_{i=1}^n \overline{A_i} \quad \text{und} \quad \overline{\left(\bigwedge_{i=1}^n A_i\right)} = \bigvee_{i=1}^n \overline{A_i} \quad \text{für } A_1, \dots, A_n \in \mathfrak{A}.$$

Def. Eine **Algebra** (Mengenalgebra) über Ω ist ein System von Teilmengen $\mathfrak{A} \subset \mathcal{P}(\Omega)$ mit $\Omega \in \mathfrak{A}$, das unter endl. Vereinigungen und Komplementen stabil ist, d. h. für alle $A, B \in \mathfrak{A}$ gilt:

- $\Omega \in \mathfrak{A}$
- $A \cup B \in \mathfrak{A}$
- $A^c := \Omega \setminus A \in \mathfrak{A}$

Bemerkung. Aus den De Morganschen Regeln folgt, dass Mengenalgebren auch unter endlichen Schnitten stabil sind.

Satz (Isomorphiesatz von Stone). Zu jeder Ereignisalgebra \mathfrak{A} gibt es eine Menge Ω , sodass \mathfrak{A} isomorph zu einer Mengenalgebra über Ω ist.

Notation. $A \triangle B := (A \setminus B) \cup (B \setminus A)$ heißt **symm. Differenz**.

Def. Eine **σ -Algebra** über Ω ist eine Algebra $\mathfrak{A} \subset \mathcal{P}(\Omega)$ über Ω , die auch unter abzählbaren Vereinigungen stabil ist, d. h.

$$\bigcup_{n=0}^{\infty} A_n \in \mathfrak{A} \quad \text{für alle Folgen } (A_n)_{n \in \mathbb{N}} \text{ in } \mathfrak{A}.$$

Bemerkung. Jede σ -Algebra ist auch unter abzählb. Schnitten stabil.

Def. Sei $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge in einer σ -Algebra \mathfrak{A} . Setze

$$\limsup A_n := \bigcap_{n=1}^{\infty} \bigcup_{m=n}^{\infty} A_m \in \mathfrak{A}, \quad \liminf A_n := \bigcup_{n=1}^{\infty} \bigcap_{m=n}^{\infty} A_m \in \mathfrak{A}.$$

Bemerkung. In einer σ -Algebra, in der die Mengen mögliche Ereignisse beschreiben, ist der Limes Superior das Ereignis, das eintritt, wenn unendlich viele Ereignisse der Folge A_n eintreten. Der Limes Inferior tritt genau dann ein, wenn alle bis auf endlich viele Ereignisse der Folge A_n eintreten.

Def. Eine Folge $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ in einer σ -Algebra \mathfrak{A} **konvergiert** gegen $A \in \mathfrak{A}$, notiert $\lim_{n \rightarrow \infty} A_n = A$, falls $A = \liminf_{n \rightarrow \infty} A_n = \limsup_{n \rightarrow \infty} A_n$.

Satz. Für isotone / antitone Folgen $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ in \mathfrak{A} gilt:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} A_n = \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n \quad / \quad \lim_{n \rightarrow \infty} A_n = \bigcap_{n=1}^{\infty} A_n$$

Def. Ein **Ring** (Mengenring) über Ω ist ein System von Teilmengen $\mathfrak{R} \subset \mathcal{P}(\Omega)$ mit $\emptyset \in \mathfrak{R}$, das unter endlichen Vereinigungen und Differenzen stabil ist, d. h. für alle $A, B \in \mathfrak{R}$ gilt:

- $\emptyset \in \mathfrak{R}$
- $A \cup B \in \mathfrak{R}$
- $A \setminus B \in \mathfrak{R}$

Bemerkung. Ein Ring ist auch unter Schnitten stabil, da

$$A \cap B = (A \cup B) \setminus (A \triangle B).$$

Def. Ein **σ -Ring** über Ω ist ein Ring $\mathfrak{R} \subset \mathcal{P}(\Omega)$ über Ω , der auch unter abzählbaren Vereinigungen stabil ist, d. h.

$$\bigcup_{n=0}^{\infty} A_n \in \mathfrak{A} \quad \text{für alle Folgen } (A_n)_{n \in \mathbb{N}} \text{ in } \mathfrak{A}.$$

Bemerkung. Jeder σ -Ring ist auch unter abzählb. Schnitten stabil.

Satz. \mathfrak{A} ist $(\sigma$ -) Algebra $\iff \mathfrak{A}$ ist $(\sigma$ -) Ring mit $\Omega \in \mathfrak{A}$.

Satz. Sei $(\mathfrak{A}_i)_{i \in I}$ Familie von $(\sigma$ -) Ringen / $(\sigma$ -) Algebren über Ω . Dann ist der Schnitt $\bigcap_{i \in I} \mathfrak{A}_i$ ein $(\sigma$ -) Ring / eine $(\sigma$ -) Algebra über Ω .

Def. Sei $E \subset \mathcal{P}(\Omega)$. Setze

$$\mathcal{R}(E) := \{\mathfrak{R} \subset \mathcal{P}(\Omega) \mid E \in \mathfrak{R}, \mathfrak{R} \text{ } \sigma\text{-Ring}\} \quad \text{und} \\ \mathcal{A}(E) := \{\mathfrak{A} \subset \mathcal{P}(\Omega) \mid E \in \mathfrak{A}, \mathfrak{A} \text{ } \sigma\text{-Algebra}\}.$$

Dann heißen $\rho(E) := \bigcap_{\mathfrak{R} \in \mathcal{R}(E)} \mathfrak{R}$, $\sigma(E) := \bigcap_{\mathfrak{A} \in \mathcal{A}(E)} \mathfrak{A}$ von E **erzeugter Ring** bzw. von E **erzeugte σ -Algebra**.

Def. Die **Borel-Mengen** in \mathbb{R}^1 sind $\mathfrak{B}(\mathbb{R}^1) := \sigma(\mathcal{E})$, wobei wir \mathcal{E} aus folgenden äquivalenten Optionen wählen dürfen:

- $\{[a, b] \mid a \leq b\}$
- $\{[a, b[\mid a \leq b\}$
- $\{G \subset \mathbb{R}^1 \mid G \text{ abgeschl.}\}$
- $\{F \subset \mathbb{R}^1 \mid F \text{ offen}\}$

Notation. $\overline{\mathbb{R}^1} := \mathbb{R} \cup \{-\infty, +\infty\} = [-\infty, \infty]$

Def. Funktionen mit Wertebereich $\overline{\mathbb{R}^1}$ heißen **numerisch**.

Def. Sei \mathfrak{R} ein Ring über Ω . Eine Fkt. $\mu : \mathfrak{R} \rightarrow [0, \infty]$ heißt

- **Inhalt** auf \mathfrak{R} , falls $\mu(\emptyset) = 0$ und $\mu(A \cup B) = \mu(A) + \mu(B)$ für alle $A, B \in \mathfrak{R}$ mit $A \cap B = \emptyset$ gilt.

- **Prämaß** auf \mathfrak{R} , wenn μ ein Inhalt ist und für alle Folgen $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ in \mathfrak{R} mit $A_i \cap A_j = \emptyset$ für $i \neq j$ und $\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n \in \mathfrak{R}$ gilt:

$$\mu\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n\right) = \sum_{n=1}^{\infty} \mu(A_n) \quad (\sigma\text{-Additivität})$$

- **Maß**, wenn μ Prämaß und \mathfrak{R} in Wahrheit sogar eine σ -Algebra ist. Dann ist die letzte Voraussetzung in Punkt 2 immer erfüllt.

Def. Ein Inhalt/Maß μ auf einem Ring / einer σ -Algebra \mathfrak{A}

- heißt **endlich**, falls $\mu(\Omega) < \infty$,
- heißt **σ -endlich**, falls eine Folge A_n in \mathfrak{A} existiert, sodass $\Omega = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n$ und $\forall i \in \mathbb{N} : \mu(A_i) < \infty$.

Notation. Sei Ω eine Menge, $A \subset \Omega$. Dann heißt

$$\chi_1 = \mathbb{1}_A : \Omega \rightarrow \mathbb{R}, \quad \omega \mapsto |\{\star \mid \omega \in A\}| = \begin{cases} 1, & \text{falls } \omega \in A \\ 0, & \text{falls } \omega \notin A \end{cases}$$

Indikatorfunktion von A .

Beispiel. Sei \mathfrak{R} ein Ring über Ω und $\omega \in \Omega$. Die Abbildung

$$\delta_\omega : \mathfrak{R} \rightarrow [0, \infty], \quad A \mapsto \mathbb{1}_A(\omega)$$

ist dann ein Prämaß auf \mathfrak{R} , genannt **Dirac-(Prä)-Maß**.

Lemma. Sei μ ein Inhalt auf einem Ring \mathfrak{R} . Seien $A, B \in \mathfrak{R}$ und $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ Folge in \mathfrak{R} mit $\mu(A) < \infty$ und $\forall n \in \mathbb{N} : \mu(A_n) < \infty$. Dann:

- $\mu(A \cup B) = \mu(A) + \mu(B) - \mu(A \cap B)$
- $A \subset B \implies \mu(A) \leq \mu(B)$ (Isotonie)
- $A \subset B \implies \mu(B \setminus A) = \mu(B) - \mu(A)$
- $\mu\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) \leq \sum_{i=1}^n \mu(A_i)$ (Subadditivität)

Satz. Sei \mathfrak{R} ein Ring und μ ein Inhalt. Es gelten für $n \in \mathbb{N}$ und $A_1, \dots, A_n \in \mathfrak{R}$ die Ein- und Ausschlussformeln

$$\mu(A_1 \cup \dots \cup A_n) = \sum_{k=1}^n (-1)^{k-1} \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_k \leq n} \mu(A_{i_1} \cap \dots \cap A_{i_k}), \\ \mu(A_1 \cap \dots \cap A_n) = \sum_{k=1}^n (-1)^{k-1} \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_k \leq n} \mu(A_{i_1} \cup \dots \cup A_{i_k}).$$

Satz. Sei μ ein Inhalt auf $\mathfrak{R} \subset \mathcal{P}(\Omega)$. Wir betrachten die Aussagen:

- μ ist ein Prämaß auf \mathfrak{R} .
- Stetigkeit von unten: Für jede monoton wachsende Folge $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ in \mathfrak{R} mit $A := \lim_{n \rightarrow \infty} A_n = \bigcup_{n=0}^{\infty} A_n \in \mathfrak{R}$ gilt $\lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A_n) = \mu(A)$.
- Stetigkeit von oben: Für jede monoton fallende Folge $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ in \mathfrak{R} mit $\mu(A_0) < \infty$ und $A := \lim_{n \rightarrow \infty} A_n = \bigcap_{n=0}^{\infty} A_n \in \mathfrak{R}$ gilt $\lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A_n) = \mu(A)$.
- Für jede monoton fallende Folge $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ in \mathfrak{R} mit $\mu(A_0) < \infty$ und $\lim_{n \rightarrow \infty} A_n = \bigcap_{n=0}^{\infty} A_n = \emptyset$ gilt $\lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A_n) = 0$.

Dann gilt (i) \iff (ii) \implies (iii) \iff (iv). Falls μ endlich ist, so gilt auch (iii) \implies (ii).

Def. Seien $a = (a_1, \dots, a_d), b = (b_1, \dots, b_d) \in \mathbb{R}^d$. Wir schreiben $a \leq b$, falls $a_i \leq b_i$ für alle $i \in \{1, \dots, d\}$ gilt. Dann heißt

$$[a, b] := \{(x_1, \dots, x_d) \in \mathbb{R}^d \mid a_i < x_i \leq b_i \text{ für alle } i \in \{1, \dots, d\}\}$$

von a und b aufgespannter **Elementarquader** in \mathbb{R}^d .

Def. Sei $f : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}^1$ eine Funktion, $x = (x_1, \dots, x_d) \in \mathbb{R}^d$ und $h = (h_1, \dots, h_d) \in \mathbb{R}_{\geq 0}^d$. Dann heißt

$$(\Delta f)([x, x+h]) := \sum_{\delta_1, \dots, \delta_d \in \{0,1\}} (-1)^{d-(\delta_1+\dots+\delta_d)} f(x_1 + \delta_1 h_1, \dots, x_d + \delta_d h_d)$$

Zuwachs von f im Elementarquader $[x, x+h]$.

Def. $G : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ heißt **maßerzeugende Funktion**, falls

- G ist nicht-fallend in jedem Argument, d. h. für alle $k \in \{1, \dots, d\}$ und $x_1, \dots, x_d \in \mathbb{R}$ ist $f(x_1, \dots, x_{k-1}, -, x_{k+1}, \dots, x_d)$ nicht-fallend.
- G ist rechtsseitig stetig in jedem Argument, d. h. für alle $k \in \{1, \dots, d\}$ und $x_1, \dots, x_d \in \mathbb{R}$ gilt

$$\lim_{h \downarrow 0} f(x_1, \dots, x_{k-1}, x_k + h, x_{k+1}, \dots, x_d) = f(x_1, \dots, x_d).$$

- Für alle $x \in \mathbb{R}^d$ und $h \in \mathbb{R}_{\geq 0}^d$ ist der Zuwachs $(\Delta G)([x, x+h]) \geq 0$.

Def. Eine maßerzeugende Funktion F heißt **Verteilungsfunktion** (VF) in \mathbb{R}^d , falls zusätzlich gilt:

$$\lim_{x_1 \rightarrow \infty} F(x_1, \dots, x_d) = 1 \quad \text{und} \quad \lim_{x_i \rightarrow -\infty} F(x_1, \dots, x_d) = 0$$

für alle $i \in \{1, \dots, d\}$ und $x_1, \dots, \hat{x}_i, \dots, x_d \in \mathbb{R}$ fest.

Bemerkung. Sei $G_i : \mathbb{R}^1 \rightarrow \mathbb{R}_{>0}^1$ für $i \in \{1, \dots, d\}$ maßerzeugende Funktion im \mathbb{R}^1 , dann ist

$$G : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}_{>0}^1, \quad (x_1, \dots, x_d) \mapsto G_1(x_1) \cdot \dots \cdot G_d(x_d)$$

eine maßerzeugende Funktion in \mathbb{R}^d und es gilt für jeden Elementarquader $[a, b] \subset \mathbb{R}^d$ mit $a = (a_1, \dots, a_d), b = (b_1, \dots, b_d)$:

$$(\Delta G)([a, b]) = \prod_{i=1}^d (G_i(b_i) - G_i(a_i)).$$

Satz. Der Ring aller Elementarquader im \mathbb{R}^d ist

$$\mathfrak{R} := \left\{ \bigcup_{i=1}^m [a_i, b_i] \mid m \in \mathbb{N} \text{ und } [a_1, b_1], \dots, [a_m, b_m] \text{ disjunkte Elementarquader im } \mathbb{R}^d \right\}$$

und für jede maßerzeugende Funktion $G : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}^1$ definiert

$$\mu_G : \mathfrak{R} \rightarrow [0, \infty[, \quad \bigcup_{i=1}^m [a_i, b_i] \mapsto \sum_{i=1}^m (\Delta G)([a_i, b_i])$$

einen Inhalt auf \mathfrak{R} , der sogar ein Prämaß ist.

Def. Eine numerische Funktion $\mu^* : \mathcal{P}(\Omega) \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ heißt **äußeres Maß** auf Ω , wenn gilt:

- $\mu^*(\emptyset) = 0$
- $A \subset B \implies \mu^*(A) \leq \mu^*(B)$ (Monotonie)

- Für eine Folge $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ in $\mathcal{P}(\Omega)$ gilt $\mu^*\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) \leq \sum_{n=0}^{\infty} \mu^*(A_n)$.

Bemerkung. Wegen $\mu^*(\emptyset) = 0$ und der Monotonie nimmt ein äußeres Maß nur Werte in $[0, \infty]$ an.

Def. Eine Teilmenge $A \subset \Omega$ heißt **μ^* -messbar**, falls

$$\mu^*(Q) = \mu^*(Q \cap A) + \mu^*(Q \setminus A) \quad \text{für alle } Q \subset \Omega.$$

Satz (Carathéodory). Für ein äußeres Maß $\mu^* : \mathcal{P}(\Omega) \rightarrow [0, \infty]$ ist

- $\mathfrak{A}^* := \{A \subset \Omega \mid A \text{ ist } \mu^*\text{-messbar}\}$ eine σ -Algebra und
- $\mu^*|_{\mathfrak{A}^*}$ ein Maß auf \mathfrak{A}^* .

Satz (1. Fortsetzungssatz). • Sei μ ein Prämaß auf einem Ring \mathfrak{R} über Ω . Dann existiert eine Fortsetzung $\tilde{\mu}$ von μ zu einem Maß auf der von \mathfrak{R} erzeugten σ -Algebra $\mathfrak{A} := \sigma(\mathfrak{R})$, sodass $\tilde{\mu}|_{\mathfrak{R}} = \mu$.

- Falls μ σ -endlich ist, so ist die Fortsetzung eindeutig.

Bemerkung. Im Beweis wird ein äußeres Maß μ^* auf Ω so definiert:

$$\mathfrak{U}(Q) := \left\{ (A_n)_{n \in \mathbb{N}} \mid Q \subset \bigcup_{n=0}^{\infty} A_n \text{ und } A_n \text{ Folge in } \mathfrak{R} \right\},$$

$$\mu^*(Q) := \inf \left(\left\{ \sum_{i=0}^{\infty} \mu(A_n) \mid (A_n)_{n \in \mathbb{N}} \in \mathfrak{U}(Q) \right\} \cup \{\infty\} \right).$$

Das äußere Maß μ^* eingeschränkt auf $\mathfrak{A}^* \supset \mathfrak{A}(\mathfrak{R})$ ist ein Maß.

Def. Sei Ω eine Menge und $\mathfrak{A} \subset \mathcal{P}(\Omega)$ eine σ -Algebra auf Ω , sowie ggf. μ ein Maß auf \mathfrak{A} . Dann heißt

- das Tupel (Ω, \mathfrak{A}) **messbarer Raum**,
- das Tripel $(\Omega, \mathfrak{A}, \mu)$ **Maßraum**.

Satz. Unter den Bedingungen des 1. Fortsetzungssatzes ist \mathfrak{A}^* die größte σ -Algebra $\overline{\mathfrak{A}}$ mit $\mathfrak{A} \subset \overline{\mathfrak{A}}$, sodass $\mu^*|_{\overline{\mathfrak{A}}}$ ein Maß ist.

Def. Sei $(\Omega, \mathfrak{A}, \mu)$ ein Maßraum. Eine Menge $N \subset \Omega$ heißt **Nullmenge**, falls es ein $A \in \mathfrak{A}$ gibt, sodass $N \subset A$ und $\mu(A) = 0$.

Def. Ein Maßraum $(\Omega, \mathfrak{A}, \mu)$ heißt **vollständig**, falls jede Nullmenge $N \subset \Omega$ ein Element von \mathfrak{A} ist.

Satz. $(\Omega, \mathfrak{A}^*, \mu^*|_{\mathfrak{A}^*})$ ist vollständig für jedes bel. äußere Maß μ^* .

Satz. Jeder Maßraum $(\Omega, \mathfrak{A}, \mu)$ kann zu einem vollständigen Maßraum $(\Omega, \mathfrak{A}_c, \mu_c)$ erweitert werden mit

$$\mathfrak{A}_c := \{A \cup N \mid A \in \mathfrak{A}, N \text{ } \mu\text{-Nullmenge}\}, \quad \mu_c(A \cup N) := \mu(A).$$

Satz. Sei μ ein σ -endliches Prämaß auf dem Ring \mathfrak{R} über Ω sowie $\overline{\mathfrak{A}} := \sigma(\mathfrak{R})$. Dann gilt $\mathfrak{A}^* = \mathfrak{A}_c$ und $\mu^*|_{\mathfrak{A}^*} = \tilde{\mu}_c$, wobei $\tilde{\mu}$ das eindeutig fortgesetzte Maß ist.

Sprechweise. Eine Eigenschaft oder Aussage gilt für **fast alle** $\omega \in \Omega$ oder **μ -fast-überall**, wenn es eine Nullmenge $N_0 \subset \Omega$ gibt, sodass die Aussage oder Eigenschaft für alle $\omega \in N_0^c$ gilt.

Def. Sei $(\Omega, \mathfrak{A}, \mu)$ ein Maßraum.

- Dann heißt μ **diffus** (atomlos), falls $\mu(\{\omega\}) = 0$ für alle $\omega \in \Omega$.

- Sei η ein weiteres Maß auf (Ω, \mathfrak{A}) . Dann heißt μ **absolut stetig** bezüglich η (notiert $\mu \ll \eta$), falls

$$\eta(A) = 0 \implies \mu(A) = 0 \quad \text{für alle } A \in \mathfrak{A}.$$

Def. Die von den Elementarquadern im \mathbb{R}^d erzeugte σ -Algebra heißt **Borel- σ -Algebra** $\mathfrak{B}(\mathbb{R}^d)$. Das von der maßerzeugenden Funktion

$$G : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}, \quad (x_1, \dots, x_d) \mapsto x_1 \cdot \dots \cdot x_d$$

erzeugte Prämaß auf dem von den Elementarquadern erzeugten Ring μ_G , das zu einem Maß $\tilde{\mu}_G$ auf $\mathfrak{B}(\mathbb{R}^d)$ fortgesetzt wird, heißt **Lebesgue-Borel-Maß**. Die durch Hinzunahme aller Nullmengen vervollständigte σ -Algebra $\mathfrak{A}^* = \mathfrak{B}(\mathbb{R}^d)_c$ heißt **Lebesgue- σ -Algebra** und das fortgesetzte Maß $\lambda_d := \mu_G^*$ **Lebesgue-Maß**.

Satz. Das Lebesgue-Maß auf dem \mathbb{R}^d ist bewegungsinvariant, d. h.

$$\forall A \in \mathfrak{B}(\mathbb{R}^d), O \in \text{SO}_d, x \in \mathbb{R}^d : \lambda_d(O \cdot A + x) = \lambda_d(A).$$

Das Lebesgue-Maß ist bis auf einen multiplikativen Faktor das einzige verschiebungsinvariante Maß auf $(\mathbb{R}^d, \mathfrak{B}(\mathbb{R}^d))$.

Sprechweise. Sei (Ω, \mathfrak{A}) ein messbarer Raum. Wir nennen Ω abstrakte Grundmenge und die Elemente von Ω Elementarereignisse. Die σ -Algebra \mathfrak{A} enthält zufällige Ereignisse, unter anderem das sichere Ereignis Ω und das unmögliche Ereignis \emptyset .

Def. Sei $(\Omega, \mathfrak{A}, \mathbb{P})$ ein Maßraum mit $\mathbb{P}(\Omega) = 1$. Dann heißt \mathbb{P} **Wahrscheinlichkeitsmaß** (W-Maß) und das Tripel $(\Omega, \mathfrak{A}, \mathbb{P})$ **Wahrscheinlichkeitsraum** (W-Raum).

Sprechweise. Sei $(\Omega, \mathfrak{A}, \mathbb{P})$ ein W-Raum und $A, B \in \mathfrak{A}$. Wir sagen:

- A ist **fast sicher**, wenn $\mathbb{P}(A) = 1$.
- A ist **fast unmöglich**, wenn $\mathbb{P}(A) = 0$.
- A und B sind **äquivalent**, wenn $\mathbb{P}(A \triangle B) = 0$.

Bemerkung. Sei μ ein W-Maß auf $\mathfrak{L}(\mathbb{R}^1)$. Dann definiert $x \mapsto F_\mu(x) := \mu([-\infty, x])$ eine VF. Für eine VF $F : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$ definiert umgekehrt $\mu_F([a, b]) := F(b) - F(a)$ ein W-Maß auf $\mathfrak{L}(\mathbb{R}^1)$. Analog funktioniert dies auf dem \mathbb{R}^d .

Def (Wichtige Verteilungsfunktionen).

- **Exponentialverteilung** mit Parameter $\lambda > 0$:

$$F_\lambda(x) = \max(0, 1 - \exp(-\lambda x)) \quad \text{Exp}(\lambda)$$

- **Poisson-Verteilung** mit Parameter $\lambda > 0$:

$$F_\lambda(x) = \sum_{0 \leq n \leq x} \frac{\lambda^n}{n!} \exp(-\lambda) \quad \text{Poi}(\lambda)$$

- **Gleichverteilung** auf $[a, b]$: $F(x) = \min(1, \max(0, \frac{x-a}{b-a}))$
- **Normalverteilung** (Gaußverteilung) mit EW μ und Varianz σ^2 :

$$F_{\mu\sigma^2}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dt \quad \text{N}(\mu, \sigma^2)$$

$$\text{erfüllt } F'_{\mu\sigma^2}(x) = \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad F_{\mu\sigma^2}(\mu - x) = 1 - F_{\mu\sigma^2}(\mu + x)$$

- d -dimensionale **Normalverteilung** mit Erwartungswertvektor $m \in \mathbb{R}^d$ positiv definiter Kovarianzmatrix $C \in \mathbb{R}^{d \times d}$:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^d \det C}} \int_{-\infty, x]} \exp(-\tfrac{1}{2}(y - m)^T C^{-1}(y - m)) \, dy$$

- **2-dimensionale Exponentialverteilung** mit $\lambda, \mu > 0, \nu \geq 0$:

$$F(x,y) = \begin{cases} 0, & \text{falls } x < 0 \text{ oder } y < 0, \text{ ansonsten:} \\ 1 - e^{-(\lambda+\nu)x} - e^{-(\mu+\nu)y} + e^{-(\lambda x + \mu y + \nu \max(x,y))} \end{cases}$$

Elementare Wahrscheinlichkeitsrechnung

Def. Ein Ereignis $A \in \mathfrak{A}$ trete bei n Versuchen genau $h_n(A) \in \mathbb{N}$ mal auf. Dann heißt

- $h_n(A)$ **absolute Häufigkeit** von A ,
- $H_n(A) := \frac{h_n(A)}{n}$ **relative Häufigkeit** von A .

Bemerkung. Unmittelbar klar:

- $H_n(A) \in [0, 1]$ • $H_n(A) \leq H_n(B)$ für $A \subset B$
- $H_n(A \sqcup B) = H_n(A) + H_n(B)$ für $A \cap B = \emptyset$

Bemerkung. Bei wachsendem n stabilisiert sich normalerweise der Wert $H_n(A)$. Dieser Grenzwert ist die Wahrscheinlichkeit von A .

Def. Seien $A, B \in \mathfrak{A}$ Ereignisse, $n \in \mathbb{N}$ die Anzahl der Versuche. Dann heißt

$$H_n(A \mid B) := \frac{H_n(A \cap B)}{H_n(B)} = \frac{h_n(A \cap B)}{h_n(B)}$$

die **relative Wahrscheinlichkeit** von A unter der Bedingung B .

Bemerkung. Offenbar gilt:

- $H_n(A \mid B) \in [0, 1]$ • $H_n(A_1 \mid B) \leq H_n(A_2 \mid B)$ für $A_1 \subset A_2$
- $H_n(A_1 \sqcup A_2 \mid B) = H_n(A_1 \mid B) + H_n(A_2 \mid B)$ für $A_1 \cap A_2 = \emptyset$

Def. Sei $\Omega \in \mathfrak{L}(\mathbb{R}^d)$ mit $\lambda_d(\Omega) > 0$. Dann heißt das W-Maß

$$\mathbb{P} : \mathfrak{L}(\Omega) \rightarrow [0, 1], \quad A \mapsto \frac{\lambda_d(A)}{\lambda_d(\Omega)} \quad \textbf{Gleichverteilung.}$$

Def. Sei Ω eine endliche Menge. Dann definiert

$$\mathbb{P} : \mathcal{P} \rightarrow [0, 1], \quad A \mapsto \frac{|A|}{|\Omega|} = \frac{\# \text{ günstige Fälle}}{\# \text{ mögliche Fälle}}$$

ein W-Maß auf $(\Omega, \mathcal{P}(\Omega))$, genannt **Laplace’sche Wkt.**

Bemerkung. Damit sind Berechnungen von Wkten mit kombinatorischen Überlegungen möglich.

Lemma (Fundamentalprinzip des Zählens). Seien A_1, \dots, A_n endliche Mengen. Dann gilt $|A_1 \times \dots \times A_n| = |A_1| \cdot \dots \cdot |A_n|$.

Lemma. Sei A eine endliche Menge, $r \leq n := |A| < \infty$. Dann ist die Anzahl der r -Tupel mit Elementen aus A gleich

	Mit Wdh.	Ohne Wdh.
Mit Ordnung	n^r	$\frac{n!}{(n-r)!}$
Ohne Ordnung	$\frac{(n+r-1)!}{r!}$	$\binom{n}{r} := \frac{n!}{r!(n-r)!}$

Lemma. Sei A eine endliche Menge, $n := |A| < \infty$. Dann ist die Anzahl der möglichen Zerlegungen von A in disjunkte Mengen B_1, \dots, B_k mit $|B_i| = n_i$ und $n_1 + \dots + n_k = n$ gleich

$$\binom{n}{n_1, \dots, n_k} := \frac{n!}{n_1! \cdot \dots \cdot n_k!}. \quad \textbf{(Multinomialkoeffizient)}$$

Modell. Eine Urne enthalte N Kugeln, darunter $M \leq N$ schwarze. Dann ist ist die Wkt für das Ereignis A_m^n , dass sich unter n gezogenen Kugeln genau $m \leq \min(n, M)$ schwarze Kugeln befinden,

$$\mathbb{P}(A_m^n) = \frac{\binom{M}{m} \binom{N-M}{n-m}}{\binom{N}{n}}. \quad \textbf{(hypergeometrische Verteilung)}$$

Bemerkung. Für Maximum-Likelihood-Schätzungen:

- Der Ausdruck $\binom{N-M}{n-m} / \binom{N}{n}$ wird maximal bei $N := \lfloor \frac{n-M}{m} \rfloor$.
- Der Ausdruck $\binom{M}{m} \cdot \binom{N-M}{n-m}$ wird maximal bei $M := \lfloor \frac{m(N-1)}{n} \rfloor$.

Modell. Eine Urne enthalte N Kugeln in $k \leq N$ verschiedenen Farben, darunter N_1 in der ersten Farbe, ..., N_k in der k -ten Farbe, $N_1 + \dots + N_k = N$. Dann ist ist die Wkt für das Ereignis A_{n_1, \dots, n_k}^n , dass sich unter n gezogenen Kugeln genau $n_1 \leq N_1$ Kugeln der ersten Farbe, ..., und $n_k \leq N_k$ Kugeln der k -ten Farbe befinden, $n_1 + \dots + n_k = n$, gleich

$$\mathbb{P}(A_{n_1, \dots, n_k}^n) = \frac{\binom{N_1}{n_1} \cdot \dots \cdot \binom{N_k}{n_k}}{\binom{N}{n}}.$$

Diese W-Verteilung heißt **polyhypergeometrische Verteilung**.

Def. Sei $(\Omega, \mathfrak{A}, \mathbb{P})$ ein W-Raum und $A, B \in \mathfrak{A}$. Dann heißt

$$\mathbb{P}(A \mid B) := \begin{cases} \frac{\mathbb{P}(A \cap B)}{\mathbb{P}(B)}, & \text{falls } \mathbb{P}(B) > 0 \\ 0, & \text{falls } \mathbb{P}(B) = 0 \end{cases}$$

Wahrscheinlichkeit von A unter der Bedingung B .

Bemerkung. Falls $\mathbb{P}(B) > 0$ gilt, so ist $\mathbb{P}(- \mid B)$ ein W-Maß über B auf der Spur- σ -Algebra $\mathfrak{A}|_B$.

Lemma. Seien $A_1, \dots, A_k \in \mathfrak{A}$, dann gilt die Pfadregel:

$$\mathbb{P}(A_1 \cap \dots \cap A_k) = \mathbb{P}(A_1) \cdot \prod_{i=2}^k \mathbb{P}(A_i \mid A_1 \cap \dots \cap A_{i-1}).$$

Satz. Sei $(\Omega, \mathfrak{A}, \mathbb{P})$ ein W-Raum und $A_1, \dots \in \mathfrak{A}$ ein vollständiges Ereignissystem, d. h. paarweise disjunkt mit

$$\Omega = \bigsqcup_{i=1}^{\infty} A_i.$$

Dann gilt für jedes $B \in \mathfrak{A}$ mit $\mathbb{P}(B) > 0$

$$\mathbb{P}(B) = \sum_{i=1}^{\infty} \mathbb{P}(B \mid A_i) \cdot \mathbb{P}(A_i) \quad \text{(Formel der totalen Wkt)}$$

$$\mathbb{P}(A_n \mid B) = \frac{\mathbb{P}(B \mid A_n) \cdot \mathbb{P}(A_n)}{\sum_{i=1}^{\infty} \mathbb{P}(B \mid A_i) \cdot \mathbb{P}(A_i)} \quad \textbf{(Bayessche Formel)}$$

Sprechweise. In der Bayesischen Statistik heißt

- $\mathbb{P}(A_i)$ **A-priori-Wahrscheinlichkeit**,
- $\mathbb{P}(A_i \mid B)$ **A-posteriori-Wahrscheinlichkeit**.

Def. Zwei Ereignisse $A, B \in \mathfrak{A}$ heißen **(\mathbb{P} -)unabhängig**, falls

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

Bemerkung. • $A \in \mathfrak{A}$ mit $\mathbb{P}(A) = 0$ ist unabhängig zu jedem $B \in \mathfrak{A}$.

- Wenn $A, B \in \mathfrak{A}$ unabhängig, dann sind auch unabhängig:

$$(A^c, B), \quad (A, B^c), \quad (A^c, B^c)$$

Satz. $A, B \in \mathfrak{A}$ unabhängig $\iff \mathbb{P}B \mid A = \mathbb{P}(B)$.

Def. Sei $(A_i)_{i \in I}$ (I bel.) eine Familie von Ereignissen in \mathfrak{A} .

- **vollständig unabhängig**, falls

$$\mathbb{P}(A_{i_1} \cap A_{i_2} \cap \dots \cap A_{i_m}) = \mathbb{P}(A_{i_1}) \cdot \mathbb{P}(A_{i_2}) \cdot \dots \cdot \mathbb{P}(A_{i_n})$$

für alle $i_1, \dots, i_n \in I$ mit $2 \leq n < \infty$ und

- **paarweise unabhängig**, falls

$$\mathbb{P}(A_i \cap A_j) = \mathbb{P}(A_i) \cdot \mathbb{P}(A_j) \quad \text{für alle } i, j \in I, i \neq j.$$

Achtung. Aus paarweiser Unabhängigkeit folgt nicht vollständige Unabhängigkeit (Gegenbeispiel: Bernsteins Tetraeder).

Def. Sei $(\Omega, \mathfrak{A}, \mathbb{P})$ ein W-Raum und $\mathfrak{A}_1, \mathfrak{A}_2 \subset \mathfrak{A}$ Ereignissysteme. Dann heißen \mathfrak{A}_1 und \mathfrak{A}_2 **unabhängig**, falls

$$\mathbb{P}(A_1 \cap A_2) = \mathbb{P}(A_1) \cdot \mathbb{P}(A_2) \quad \text{für alle } A_1 \in \mathfrak{A}_1, A_2 \in \mathfrak{A}_2.$$

Satz. Seien $\mathfrak{A}_1, \mathfrak{A}_2 \subset \mathfrak{A}$ unabhängige Ereignissysteme, die Algebren sind. Dann sind auch die σ -Algebren $\sigma(\mathfrak{A}_1)$ und $\sigma(\mathfrak{A}_2)$ unabhängig.

Satz. Sei $(\Omega, \mathfrak{A}, \mathbb{P})$ ein W-Raum, $(A_i)_{i \in \mathbb{N}}$ Folge von unabhängigen Ereignissen mit gleicher Erfolgswkt $\mathbb{P}(A_i) = p$ für alle $i \in \mathbb{N}$. Für $k \leq n, k, n \in \mathbb{N}$ ist dann die Wahrscheinlichkeit, dass genau k Stück der Ereignisse A_1, \dots, A_n eintreten, genau

$$B(k, n, p) := \binom{n}{k} p^k (1 - p)^{n-k}$$

Die zugehörige VF $x \mapsto \sum_{0 \leq k \leq x} B(k, n, p)$ heißt **Binomialverteilung**.

Lemma. Voraussetzung wir im vorherigen Satz. Sei $r, k \in \mathbb{N}, 1 \leq r$, dann ist die Wkt für das Ereignis $A_k^{(r)}$, dass beim Versuch A_{k+r} der r -te Erfolg eintritt, gleich

$$\mathbb{P}(A_k^{(r)}) = \binom{k+r-1}{r-1} p^r (1 - p)^k.$$

Im Spezialfall $r = 1$ ist $\mathbb{P}(A_k^{(1)}) = p(1 - p)^k$.

Satz. Sei $(\Omega, \mathfrak{A}, \mathbb{P})$ ein W-Raum, $A_1, \dots, A_r \in \mathfrak{A}$ mit $p_i := \mathbb{P}(A_i)$ für $i = 1, \dots, k$ und $p_1 + \dots + p_r = 1$. Dann ist die Wahrscheinlichkeit, dass bei $n \in \mathbb{N}$ Versuchen A_1 genau n_1 -mal, A_2 genau n_2 -mal, ..., A_r genau n_r -mal auftritt ($n_1 + \dots + n_r = n$), genau

$$B(n_1, \dots, n_r, n, p_1, \dots, p_r) := \binom{n}{n_1, \dots, n_r} p_1^{n_1} \cdot \dots \cdot p_r^{n_r}.$$

Diese W-Verteilung heißt **Multinomialverteilung**.

Satz. Für $0 \leq m \leq n, p \in [0, 1]$ gilt

$$\frac{\binom{M}{m} \binom{N-M}{n-m}}{\binom{N}{n}} \xrightarrow[M/N \rightarrow p]{M, N \rightarrow \infty} \binom{n}{m} p^m (1 - p)^{n-m}.$$

Satz (GWS von Poisson). Für $m \in \mathbb{N}$, $\lambda \in \mathbb{R}_{>0}$ gilt

$$\binom{n}{m} p_m^n (1-p_n)^{n-m} \xrightarrow[n p_n \rightarrow \lambda]{n \rightarrow \infty} \frac{\lambda^m}{m!} \exp(-\lambda).$$

Def. Sei (Ω, \mathfrak{A}) ein messbarer Raum mit zwei W-Maßen \mathbb{P}_1 und \mathbb{P}_2 . Dann heißt

$$d_\infty(\mathbb{P}_1, \mathbb{P}_2) := \sup_{A \in \mathfrak{A}} |\mathbb{P}_1(A) - \mathbb{P}_2(A)|$$

Totalvariation des signierten Maßes $\mathbb{P}_1 - \mathbb{P}_2$.

Satz. Seien \mathbb{P}_1 und \mathbb{P}_2 zwei W-Maße auf $(\mathbb{N}, \mathcal{P}(\mathbb{N}))$, $\mathbb{P}_1(\{i\}) = p_i$, $\mathbb{P}_2(\{i\}) = q_i$ für alle $i \in \mathbb{N}$. Dann gilt

$$d_\infty(\mathbb{P}_1, \mathbb{P}_2) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{\infty} |p_i - q_i|.$$

Lemma. Für $n, k \in \mathbb{N}$, $p \in [0, 1]$ und \mathbb{P}_1 und \mathbb{P}_2 wie eben definiert durch $p_i := \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}$, $q_i := \frac{(np)^k}{k!} \exp(-np)$ gilt

$$d_\infty(\mathbb{P}_1, \mathbb{P}_2) \leq 2np^2.$$

Lemma (Borel-Cantelli). Sei $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge von Ereignissen über $(\Omega, \mathfrak{A}, \mathbb{P})$. Dann gilt für $A = \limsup_{n \rightarrow \infty} A_n$

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

Falls die Ereignisse $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ unabhängig sind, so gilt

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

also zusammengefasst $\mathbb{P}(A) \in \{0, 1\}$.

Def. Sei $(\mathfrak{A}_n)_{n \in \mathbb{N}}$ Folge von σ -Algebren über Ω . Dann ist

$$\mathcal{T}_\infty = \bigcap_{n=1}^{\infty} \mathcal{T}_n \quad \text{mit} \quad \mathcal{T}_n := \sigma\left(\bigcup_{k=n}^{\infty} \mathfrak{A}_k\right)$$

die **terminale σ -Algebra** von $(\mathfrak{A}_n)_{n \in \mathbb{N}}$.

Satz (Null-Eins-Gesetz von Kolmogorow). Sei $(\mathfrak{A}_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge von unabhängigen Unter- σ -Algebren in einem W-Raum $(\Omega, \mathfrak{A}, \mathbb{P})$. Dann gilt $\mathbb{P}(A) \in \{0, 1\}$ für alle Ereignisse $A \in \mathcal{T}_\infty$ der terminalen σ -Algebra.

Integrationstheorie

Def. Seien $(\Omega_1, \mathfrak{A}_1)$ und $(\Omega_2, \mathfrak{A}_2)$ messbare Räume. Dann heißt $f : \Omega_1 \rightarrow \Omega_2$ **$(\mathfrak{A}_1, \mathfrak{A}_2)$ -messbar**, falls

$$f^{-1}(A_2) \in \mathfrak{A}_1 \quad \text{für alle } A_2 \in \mathfrak{A}_2.$$

Notation. Für solches f schreiben wir $f : (\Omega_1, \mathfrak{A}_1) \rightarrow (\Omega_2, \mathfrak{A}_2)$.

Beobachtung. Sei (Ω, \mathfrak{A}) messbarer Raum, $A \subset \Omega$, dann gilt

$$\mathbb{1}_A \text{ } (\mathfrak{A}, \mathfrak{L}(\mathbb{R}^1))\text{-messbar} \iff A \in \mathfrak{A}.$$

Lemma. Die Verkettung messbarer Abbildungen ist messbar, d. h. für $f : (\Omega_1, \mathfrak{A}_1) \rightarrow (\Omega_2, \mathfrak{A}_2)$ und $g : (\Omega_2, \mathfrak{A}_2) \rightarrow (\Omega_3, \mathfrak{A}_3)$ gilt $g \circ f : (\Omega_1, \mathfrak{A}_1) \rightarrow (\Omega_3, \mathfrak{A}_3)$.

Lemma. Sei $f : \Omega \rightarrow \Omega'$ eine Abb. und $\mathcal{E}' \subset \mathcal{P}(\Omega)$, dann ist

$$\mathfrak{A}(f^{-1}(\mathcal{E}')) = f^{-1}(\mathfrak{A}(\mathcal{E}')).$$

Lemma. Sei (Ω, \mathfrak{A}) ein messbarer Raum und $f : \Omega \rightarrow \Omega'$ eine Abbildung, sowie $\mathcal{E} \subset \mathcal{P}(\Omega')$. Dann gilt

$$f \text{ ist } (\mathfrak{A}, \sigma(\mathcal{E}))\text{-messbar} \iff f^{-1}(E) \in \mathfrak{A} \text{ für alle } E \in \mathcal{E}.$$

Notation. Seien $f, g : \Omega \rightarrow \overline{\mathbb{R}^1}$ zwei numerische Funktionen. Setze

$$\{f \leq g\} := \{\omega \in \Omega \mid f(\omega) \leq g(\omega)\} \subset \Omega$$

und definiere analog $\{f < g\}$, $\{f \geq g\}$, $\{f > g\}$, $\{f = g\}$, $\{f \neq g\}$.

Satz. Für eine Funktion $f : (\Omega, \mathfrak{A}) \rightarrow (\overline{\mathbb{R}^1}, \overline{\mathfrak{B}})$ sind äquivalent:

- f ist messbar
- $\forall a \in \mathbb{R} : \{f \geq a\} = f^{-1}([a, \infty]) \in \mathfrak{A}$
- $\forall a \in \mathbb{R} : \{f > a\} \in \mathfrak{A}$
- $\forall a \in \mathbb{R} : \{f \leq a\} \in \mathfrak{A}$
- $\forall a \in \mathbb{R} : \{f < a\} \in \mathfrak{A}$

Def. • Sei (Ω, \mathfrak{A}) ein messbarer Raum, $f : \Omega' \rightarrow \Omega$ eine Abbildung, dann heißt

$$\sigma(f) := f^{-1}(\mathfrak{A}) := \{f^{-1}(A) \mid A \in \mathfrak{A}\}$$

die **von f erzeugte σ -Algebra**.

• Sei $(\Omega_i, \mathfrak{A}_i)_{i \in I}$ eine Familie von messbaren Räumen, $f_i : \Omega' \rightarrow \Omega_i$ für alle $i \in I$ eine Abbildung. Dann heißt

$$\sigma((f_i)_{i \in I}) := \sigma\left(\bigcup_{i \in I} \sigma(f_i)\right) = \sigma\left(\bigcup_{i \in I} f_i^{-1}(\mathfrak{A}_i)\right)$$

die **von der Familie $(f_i)_{i \in I}$ erzeugte σ -Algebra**.

Def. Sei $(\Omega', \mathfrak{A}', \mu')$ ein Maßraum, (Ω, \mathfrak{A}) ein messbarer Raum, $f : (\Omega', \mathfrak{A}') \rightarrow (\Omega, \mathfrak{A})$. Dann ist durch

$$\mu'_f := \mu' \circ f^{-1} : \mathfrak{A} \rightarrow [0, \infty], \quad A \mapsto \mu'(f^{-1}(A))$$

ein Maß auf (Ω, \mathfrak{A}) , das sog. **Bildmaß** von μ' unter f , definiert.

Satz. Für zwei numerische Funktionen $f, g : (\Omega, \mathfrak{A}) \rightarrow (\overline{\mathbb{R}^1}, \overline{\mathfrak{B}})$ gilt:

- $\{f < g\} \in \mathfrak{A}$
- $\{f > g\} \in \mathfrak{A}$
- $\{f = g\} \in \mathfrak{A}$
- $\{f \leq g\} \in \mathfrak{A}$
- $\{f \geq g\} \in \mathfrak{A}$
- $\{f \neq g\} \in \mathfrak{A}$

Satz. Seien $f, g : (\Omega, \mathfrak{A}) \rightarrow (\overline{\mathbb{R}^1}, \overline{\mathfrak{B}})$ messbare numerische Funktionen und $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$. Dann auch messbar (\dagger : falls $0 \notin \text{Bild}(f)$):

- $\lambda \cdot f$
- $f + \mu \cdot g$
- $f \cdot g$
- $\frac{1}{f} (\dagger)$
- $\frac{g}{f} (\dagger)$

Satz. Seien $f_n : (\Omega, \mathfrak{A}) \rightarrow (\overline{\mathbb{R}^1}, \overline{\mathfrak{B}})$, $n \in \mathbb{N}$ messbare numerische Funktionen, dann auch messbar:

- $\sup_{n \in \mathbb{N}} f_n$
- $\inf_{n \in \mathbb{N}} f_n$
- $\liminf_{n \in \mathbb{N}} f_n$
- $\limsup_{n \in \mathbb{N}} f_n$

Dabei werden Infimum, Supremum, usw. punktweise gebildet.

Def. Für $f : \Omega \rightarrow \overline{\mathbb{R}^1}$ heißen die Funktionen

- $|f| := \max(f, -f) : \Omega \rightarrow [0, \infty]$ **Betrag** von f
- $f^+ := \max(f, 0) : \Omega \rightarrow [0, \infty]$ **Positivteil** von f
- $f^- := -\min(f, 0) : \Omega \rightarrow [0, \infty]$ **Negativteil** von f

Satz. Falls $f : (\Omega, \mathfrak{A}) \rightarrow (\overline{\mathbb{R}^1}, \overline{\mathfrak{B}})$ messbar, dann auch $|f|$, f^+ und f^- .

Satz. • Sei (Ω, \mathcal{O}) ein topologischer Raum und $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig. Dann ist $f(\sigma(\mathcal{O}), \mathfrak{B}(\mathbb{R}^n))$ -messbar.

• $\sigma(\mathcal{O})$ ist die kleinste σ -Algebra, bezüglich der alle stetigen Funktionen $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ Borel-messbar sind.

Satz (von Lusin). Sei $M \in \mathfrak{L}(\mathbb{R}^n)$ mit $\lambda_n(M) < \infty$ und $f : M \rightarrow \mathbb{R}$ beschränkt. Dann ist f genau dann Borel-messbar, wenn gilt:

$$\forall \epsilon > 0 : \exists K_\epsilon \subset M \text{ kompakt} : \lambda_n(M \setminus K_\epsilon) < \epsilon \text{ und } f|_{K_\epsilon} \text{ stetig.}$$

Def. Eine Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ heißt **Càdlàg-Funktion** (continue à droite, limite à gauche), falls für alle $x \in \mathbb{R}$ gilt:

$$\lim_{y \uparrow x} f(y) \text{ existiert} \quad \text{und} \quad \lim_{y \downarrow x} f(y) = f(x).$$

Beobachtung. Jede kumulierte VF ist eine Càdlàg-Funktion.

Def. Die **Variation** von $g : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ bzgl. einer Zerlegung $Z = \{a = x_0 < \dots < x_n = b\}$ von $[a, b]$ ist die nicht-negative Zahl

$$V(g, Z) := \sum_{j=1}^n |g(x_j) - g(x_{j-1})|.$$

Die **Totalvariation** von $g : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ ist

$$V_a^b(g) := \sup \{V(g, Z) : Z \text{ Zerlegung von } [a, b]\} \in \mathbb{R}_{\geq 0} \cup \{\infty\}.$$

Falls $V_a^b(g) < \infty$, so heißt g **von beschränkter Variation**.

Satz. Es sind messbar:

- Monotone Funktionen
- Càdlàg-Funktionen
- Funktionen von beschränkter Variation

Def. Eine \mathfrak{A} -messbare numerische Funktion X über einem W-Raum $(\Omega, \mathfrak{A}, \mathbb{P})$ heißt **Zufallsgröße** (ZG) oder **Zufallsvariable**.

Bemerkung. Häufig fordert man zusätzlich $\mathbb{P}(\{X = \pm\infty\}) = 0$.

Notation. Für eine ZG X und eine Fkt. $g : \mathbb{R}^1 \rightarrow \overline{\mathbb{R}^1}$ schreiben wir

$$f(X) := f \circ X : \Omega \rightarrow \overline{\mathbb{R}^1}.$$

Def. Das durch die ZG X induzierte Bildmaß

$$P_X : \mathfrak{L}(\mathbb{R}^1) \rightarrow [0, 1], \quad B \mapsto \mathbb{P}(\{X \in B\}) = \mathbb{P}(X^{-1}(B))$$

heißt **Verteilungsgesetz** der ZG X und

$$F_X : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, \quad x \mapsto P_X([-\infty, x]) = \mathbb{P}(\{X \leq x\})$$

heißt **Verteilungsfunktion** (VF) der ZG X .

Satz. Sei F eine VF auf \mathbb{R}^1 . Dann existiert ein W-Raum $(\Omega, \mathfrak{A}, \mathbb{P})$ und eine ZG X auf Ω derart, dass $F_X = F$.

Beweis. 1. Möglichkeit: Wähle $\Omega := \mathbb{R}^1$, $\mathfrak{A} := \mathfrak{L}(\mathbb{R}^1)$ und $\mathbb{P} := \mu_F$ als das von F erzeugte Maß und setze $X := \text{id}$.

2. Möglichkeit: Wähle $\Omega := [0, 1]$, $\mathfrak{A} := \mathcal{L}([0, 1])$, $\mathbb{P} := \lambda_1$. Setze

$$X(w) := F^-(w) := \inf\{F \geq w\} \quad \text{für } w > 0, \quad X(0) := \lim_{w \downarrow 0} F^-(w)$$

Def. Sei X_1, \dots, X_n eine endliche Familie von ZGn über $(\Omega, \mathfrak{A}, \mathbb{P})$. Diese Familie heißt **stochastisch unabhängig**, falls

$$\mathbb{P}\left(\bigcap_{i=1}^n \{X_i \in B_i\}\right) = \prod_{i=1}^n \mathbb{P}(\{X_i \in B_i\}) \quad \text{für alle } B_1, \dots, B_n \in \mathfrak{L}(\mathbb{R}^1).$$

Satz. Seien X_1, \dots, X_n unabhängige ZGn über $(\Omega, \mathfrak{A}, \mathbb{P})$ und $g_1, \dots, g_n : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ Borel-messbar. Setze $Y_i := g_i(X_i) := g_i \circ X_i$ für $i = 1, \dots, n$, dann sind auch Y_1, \dots, Y_n unabhängige ZGn.

Def. Eine Funktion $f : (\Omega, \mathfrak{A}) \rightarrow (\mathbb{R}, \mathfrak{B})$ heißt **einfache Funktion** oder **Elementarfunktion** auf (Ω, \mathfrak{A}) , wenn gilt:

- f ist messbar
 - $f(\Omega) \subset [0, \infty[$
 - $f(\Omega)$ ist endlich
- Die Menge aller elementaren Funktionen auf (Ω, \mathfrak{A}) ist $\mathbb{E}(\Omega, \mathfrak{A})$.

Notation. $a \wedge b := \min\{a, b\}$ und $a \vee b := \max\{a, b\}$

Satz. Seien $f, g \in \mathbb{E}(\Omega, \mathfrak{A})$ und $a \geq 0$. Dann auch in $\mathbb{E}(\Omega, \mathfrak{A})$:

- $f + g$
- $f \cdot g$
- $f \vee g$
- $f \wedge g$
- $a \cdot f$

Def. Sei $f \in \mathbb{E}(\Omega, \mathfrak{A})$ und $\Omega = A_1 \sqcup \dots \sqcup A_k$ eine disjunkte Vereinigung von Mengen mit $A_j \in \mathfrak{A}$ für alle $j = 1, \dots, k$, sodass $f(A_j) = \{y_j\}$, dann heißt die Darstellung

$$f = \sum_{j=1}^k y_j \cdot \mathbb{1}_{A_j} \quad \text{kanonische Darstellung.}$$

Def. Sei $(\Omega, \mathfrak{A}, \mu)$ ein Maßraum, $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ elementar. Dann heißt

die (von der Darstellung $f = \sum_{j=1}^k y_j \cdot \mathbb{1}_{A_j}$ unabh.) Zahl

$$\int_{\Omega} f \, d\mu := \sum_{j=1}^k y_j \mu(A_j) \quad \text{\textbf{\textit{\mu-Integral}}} \text{ von } f.$$

Satz. Es gilt für $f, g \in \mathbb{E}(\Omega, \mathfrak{A})$, $a, b \geq 0$:

- $\int \mathbb{1}_A \, d\mu = \mu(A)$
- $f \leq g \implies \int f \, d\mu \leq \int g \, d\mu$
- $\int a \cdot f + b \cdot g \, d\mu = a \cdot \int f \, d\mu + b \cdot \int g \, d\mu$

Satz. Sei $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine isotone (= monotone) Folge elementarer Funktionen über (Ω, \mathfrak{A}) . Dann gilt für jede elementare Funktion f mit $f \leq \sup_{n \in \mathbb{N}} f_n$ die Ungleichung $\int f \, d\mu \leq \sup_{n \in \mathbb{N}} \int f_n \, d\mu$.

Korollar. Seien $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ und $(g_n)_{n \in \mathbb{N}}$ isotone Folgen elementarer Funktionen mit $\sup_{n \in \mathbb{N}} f_n = \sup_{n \in \mathbb{N}} g_n$. Dann ist $\sup_{n \in \mathbb{N}} \int f_n \, d\mu = \sup_{n \in \mathbb{N}} \int g_n \, d\mu$.

Satz. Sei $f : (\Omega, \mathfrak{A}, \mu) \rightarrow (\overline{\mathbb{R}^1}, \mathfrak{L}(\overline{\mathbb{R}^1}))$ nichtnegativ. Dann gibt es eine isotone Folge $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ elementarer Funktionen mit $\sup_{n \in \mathbb{N}} f_n = f$.

Def. Sei $f : (\Omega, \mathfrak{A}, \mu) \rightarrow (\overline{\mathbb{R}^1}, \mathfrak{L}(\overline{\mathbb{R}^1}))$ nichtnegativ und $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge elementarer Funktionen mit $\sup_{n \in \mathbb{N}} f_n = f$. Dann heißt

$$\int f \, d\mu := \sup_{n \in \mathbb{N}} \int f_n \, d\mu \quad \text{\textbf{\textit{\mu-Integral}}} \text{ von } f.$$

Def. Eine \mathfrak{A} -messbare, numerische Fkt. $f : (\Omega, \mathfrak{A}, \mu) \rightarrow (\overline{\mathbb{R}^1}, \mathfrak{L}(\overline{\mathbb{R}^1}))$ heißt **μ -integrierbar**, falls

$$\int f^+ \, d\mu < \infty \quad \text{und} \quad \int f^- \, d\mu < \infty.$$

In diesem Fall definieren wir das **Lebesgue-Integral** von f als

$$\int_{\Omega} f \, d\mu := \int_{\Omega} f^+ \, d\mu - \int_{\Omega} f^- \, d\mu.$$

Satz. Sei $f : (\Omega, \mathfrak{A}, \mu) \rightarrow (\overline{\mathbb{R}^1}, \mathfrak{L}(\overline{\mathbb{R}^1}))$ messbar. Dann sind äquivalent:

- f ist μ -integrierbar
- f^+ und f^- sind μ -integrierbar
- $|f|$ ist μ -integrierbar
- $\exists \mu$ -integrierbare Funktion g mit $|f| \leq g$

Satz. Seien $f, g : (\Omega, \mathfrak{A}, \mu) \rightarrow (\overline{\mathbb{R}^1}, \mathfrak{L}(\overline{\mathbb{R}^1}))$ μ -integrierbar und $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$. Dann sind auch μ -integrierbar:

- $f \pm g$
- $f \vee g$
- $f \wedge g$
- $\alpha \cdot f$

Es gilt: • $\int_{\Omega} (\alpha \cdot f + \beta \cdot g) \, d\mu = \alpha \int_{\Omega} f \, d\mu + \beta \int_{\Omega} g \, d\mu$ (Linearität)

• $|\int_{\Omega} f \, d\mu| \leq \int_{\Omega} |f| \, d\mu$ • $f \leq g \implies \int_{\Omega} f \, d\mu \leq \int_{\Omega} g \, d\mu$ (Monotonie)

Achtung. Das Produkt $(f \cdot g)$ ist i. A. nicht μ -integrierbar!

Def. Sei $(\Omega, \mathfrak{A}, \mu)$ ein Maßraum und $f : (\Omega, \mathfrak{A}) \rightarrow (\overline{\mathbb{R}^1}, \mathcal{L}(\overline{\mathbb{R}^1}))$. Für $p \in [1, \infty[$ heißt f **p -integrierbar**, falls $|f|^p$ μ -integrierbar ist.

$$L^p(\Omega, \mathfrak{A}, \mu) := \{f : \Omega \rightarrow \overline{\mathbb{R}^1} \mid f \text{ } p\text{-integrierbar, also } \int_{\Omega} |f|^p \, d\mu < \infty\},$$

$$L^\infty(\Omega, \mathfrak{A}, \mu) := \{f : \Omega \rightarrow \overline{\mathbb{R}^1} \mid \exists C > 0 : |f| \leq C \text{ fast überall}\}$$

ist dann ein VR, genannt **Lebesgue-Raum** (L^p -Raum), mit Norm

$$\|f\|_p := \left(\int_{\Omega} |f|^p \, d\mu\right)^{\frac{1}{p}}$$

$$\|f\|_\infty := \text{ess sup}_{\omega \in \Omega} |f(\omega)| := \inf\{C \in \mathbb{R} \mid |f| \leq C \text{ fast-überall}\}$$

Wir betrachten in L^p zwei Funktionen als gleich, wenn sie bis auf einer Nullmenge übereinstimmen. Die Δ -Ungleichung in L^p wird auch **Minkowski-Ungleichung** genannt.

Satz. Der $L^p(\mu)$ ist ein vollständiger normierter Raum, d. h. jede Cauchy-Folge bzgl. der Norm $\|\cdot\|_p$ ist auch konvergent.

Satz. Sei $f \in L^p(\Omega, \mathfrak{A}, \mu)$, $g \in L^q(\Omega, \mathfrak{A}, \mu)$ mit $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$. Dann ist $fg \in L^1(\Omega, \mathfrak{A}, \mu)$ und es gilt

$$\|fg\|_1 \leq \|f\|_p \cdot \|g\|_q \quad \text{\textbf{\textit{(Hölder-Ungleichung)}}}.$$

Bemerkung. Für $p = 2$ ist $L^p(\Omega, \mathfrak{A}, \mu)$ der Hilbertraum der quadratisch integrierbaren Funktionen mit dem Skalarprodukt

$$\langle f, g \rangle := \int_{\Omega} (f \cdot g) \, d\mu.$$

Mit $q = 2$ folgt aus der Hölder-Ungleichung

$$|\langle f, g \rangle| = \|fg\|_1 \leq \|f\|_2 \cdot \|g\|_2 \quad \text{\textbf{\textit{(Cauchy-Schwarz-Ungl.)}}}$$

Satz. Sei $f : (\Omega, \mathfrak{A}, \mu) \rightarrow (\overline{\mathbb{R}^1}, \mathcal{L}(\overline{\mathbb{R}^1}))$ nichtnegativ. Dann gilt

$$\int_{\Omega} f \, d\mu = 0 \quad \iff \quad f \stackrel{\text{f.ü.}}{=} 0.$$

Satz (von der monotonen Konvergenz). Sei für alle $n \in \mathbb{N}$ die Funktion $f_n : (\Omega, \mathfrak{A}, \mu) \rightarrow (\overline{\mathbb{R}^1}, \mathcal{L}(\overline{\mathbb{R}^1}))$ nicht negativ und \mathfrak{A} -messbar, sodass $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine isotone Folge ist. Dann gilt

$$\int_{\Omega} \lim_{n \rightarrow \infty} f_n \, d\mu = \int_{\Omega} \sup_{n \in \mathbb{N}} f_n \, d\mu = \sup_{n \in \mathbb{N}} \int_{\Omega} f_n \, d\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{\Omega} f_n \, d\mu.$$

Korollar (Beppo Levi). Sei $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge nicht negativer, \mathfrak{A} -messbarer, numerischer Funktionen auf $(\Omega, \mathfrak{A}, \mu)$. Dann gilt

$$\int_{\Omega} \sum_{n=1}^{\infty} f_n \, d\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{\Omega} f_n \, d\mu.$$

Satz. Sei $(\Omega, \mathfrak{A}, \mu)$ ein Maßraum und $f : (\Omega, \mathfrak{A}) \rightarrow (\overline{\mathbb{R}^1}, \mathcal{L}(\overline{\mathbb{R}^1}))$ nichtnegativ und μ -integrierbar. Dann definiert

$$\nu : \mathfrak{A} \rightarrow [0, \infty], \quad A \mapsto \int_A f \, d\mu = \int_{\Omega} f \cdot \chi_A \, d\mu$$

ein zu μ absolut stetiges, endliches Maß auf (Ω, \mathfrak{A}) .

Lemma (Fatou). Sei für $n \in \mathbb{N}$ die Fkt. $f_n : (\Omega, \mathfrak{A}, \mu) \rightarrow (\mathbb{R}^1, \mathfrak{L}(\mathbb{R}^1))$ nicht negativ und \mathfrak{A} -messbar. Dann gilt

$$\int_{\Omega} \liminf_{n \rightarrow \infty} f_n \, d\mu \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_{\Omega} f_n \, d\mu.$$

Falls $\int_{\Omega} \sup_{n \in \mathbb{N}} f_n \, d\mu < \infty$, gilt zusätzlich

$$\int_{\Omega} \limsup_{n \rightarrow \infty} f_n \, d\mu \geq \limsup_{n \rightarrow \infty} \int_{\Omega} f_n \, d\mu.$$

Def. Eine Folge $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ \mathfrak{A} -messbarer, numerischer Fktn. über $(\Omega, \mathfrak{A}, \mu)$ **konvergiert μ -fast-überall** gegen $f : \Omega \rightarrow \mathfrak{A}$, falls

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(\omega) = f(\omega) \quad \text{für } \mu\text{-fast-alles } \omega \in \Omega \text{ gilt.}$$

Satz (Riesz). Sei $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ Folge in $L^p(\Omega, \mathfrak{A}, \mu)$, $f_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{f. \ddot{u.}} f$ mit $f \in L^p(\mu)$. Dann gilt

$$f_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{L^p(\mu)} f \iff \int_{\Omega} |f_n|^p d\mu \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} \int_{\Omega} |f|^p d\mu.$$

Satz (von der majorisierten Konvergenz). Sei $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ Folge \mathfrak{A} -messbarer numerischer Funktionen auf $(\Omega, \mathfrak{A}, \mu)$ und $g \in L^1(\mu)$ nicht negativ, sodass $|f_n| \leq g$ für alle $n \in \mathbb{N}$. Sei desweiteren $f : \Omega \rightarrow \overline{\mathbb{R}^1}$ messbar mit $f_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{\mu\text{-f.}\ddot{u.}} f$. Dann ist

$$f \in L^1(\mu) \quad \text{mit} \quad \int_{\Omega} f d\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{\Omega} f_n d\mu.$$

Satz. Sei $f : (\Omega, \mathfrak{A}, \mu) \rightarrow (\Omega', \mathfrak{A}')$ und $\mu' := \mu \circ f^{-1}$ das Bildmaß von μ unter f . Sei $g : (\Omega', \mathfrak{A}') \rightarrow (\mathbb{R}^1, \mathfrak{B}(\mathbb{R}^1))$ nicht negativ. Dann gilt

$$\int_{\Omega'} g d\mu' = \int_{\Omega} (g \circ f) d\mu.$$

Satz (Transformationssatz). Sei $U, \tilde{U} \subseteq \mathbb{R}^d$ und sei $\phi : U \rightarrow \tilde{U}$ ein C^1 -Diffeomorphismus. Dann ist eine Funktion $f : \tilde{U} \rightarrow \overline{\mathbb{R}^1}$ genau dann auf \tilde{U} Lebesgue-Borel-integrierbar, wenn $(f \circ \phi) \cdot |\det(D\phi)| : U \rightarrow \overline{\mathbb{R}^1}$ auf U Lebesgue-Borel-integrierbar ist. In diesem Fall gilt

$$\int_U (f \circ \phi) \cdot |\det(D\phi)| d\lambda_d = \int_{\phi(U)} f d\lambda_d = \int_{\tilde{U}} f d\lambda_d.$$

Obige Gleichung ist auch erfüllt, wenn lediglich $f \geq 0$ gilt.

Def. Für eine ZG $X : (\Omega, \mathfrak{A}, \mathbb{P}) \rightarrow (\overline{\mathbb{R}^1}, \mathfrak{B}(\overline{\mathbb{R}^1}))$ heißt die Zahl

$$\mathbb{E}X := \int_{\Omega} X d\mathbb{P} \quad \text{Erwartungswert von } X.$$

Bemerkung. Für eine konstante ZGe $X : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$, also $\forall \omega \in \Omega : X(\omega) = x$, gilt $\mathbb{E}X = x$.

Satz. Der Erwartungswert ist linear, d. h. für ZGn X und Y und $\lambda \in \mathbb{R}$ gilt $\mathbb{E}(\lambda X + Y) = \lambda \mathbb{E}X + \mathbb{E}Y$.

Satz. $\mathbb{E}X = \int_{\mathbb{R}^1} \text{id} dP_X$, wobei $P_X := \mathbb{P} \circ X^{-1}$.

Korollar. Sei $g : \mathbb{R}^1 \rightarrow \mathbb{R}^1$ messbar und P_X -integrierbar. Dann gilt

$$\mathbb{E}g(X) = \int_{\mathbb{R}^1} g dP_X = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) dP_X(x),$$

wobei rechts ein uneigentliches Riemann-Stieltjes-Integral steht.

Def. Für Zufallsvektoren $X = (X_1, \dots, X_k)$ mit Werten in \mathbb{R}^k definieren wir $\mathbb{E}X := (\mathbb{E}X_1, \dots, \mathbb{E}X_k)$.

Bemerkung. Sei $X = (X_1, \dots, X_k)$ ein Zufallsvektor und $g : \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}$ Borel-messbar und P_X -integrierbar. Dann ist

$$\mathbb{E}g(X_1, \dots, X_k) = \int_{\mathbb{R}^k} g dP_X.$$

Satz. Sei F_X VF einer ZG $X : (\Omega, \mathfrak{A}, \mathbb{P}) \rightarrow (\mathbb{R}^1, \mathfrak{L}(\mathbb{R}^1))$. Dann existiert für Lebesgue-fast-alles $x \in \mathbb{R}^1$ die Ableitung $F'_X(x)$.

Def. Sei F_X VF einer ZG $X : (\Omega, \mathfrak{A}, \mathbb{P}) \rightarrow (\mathbb{R}^1, \mathfrak{L}(\mathbb{R}^1))$.

- F_X heißt **diskret**, falls F_X höchstens abzählbar viele Sprungstellen $x_1, x_2, \dots \in \mathbb{R}$ besitzt mit

$$\forall j \in J \subset \mathbb{N} : p_j := F_X(x_j) - \lim_{x \uparrow x_j} F_X(x) > 0, \quad \sum_{j=1}^{\infty} p_j = 1.$$

Dann ist F_X zwischen den Sprüngen konstant.

- F_X heißt **stetig** (diffus, atomlos), wenn F_X in jedem Punkt stetig ist. Dann gilt $P_X(\{X = x\}) = 0$ für alle $x \in \mathbb{R}$.

Für stetige Verteilungen ergibt sich eine weitere Unterteilung:

- F_X heißt **absolutstetig** (totalstetig), wenn es für alle $\epsilon > 0$ ein $\delta > 0$ gibt, sodass für höchstens abzählbar viele, disjunkte Intervalle $I_k =]a_k, b_k]$ mit $k \in J \subset \mathbb{N}$ gilt:

$$\sum_{k \in J} (b_k - a_k) < \delta \implies \sum_{k \in J} (F_X(b_k) - F_X(a_k)) < \epsilon.$$

- F_X heißt **singulärstetig** (stetig, aber nicht absolutstetig), wenn die Wachstumspunkte von F_X eine Nullmenge bilden, also

$$\lambda_1(\{x \in \mathbb{R}^1 \mid \forall \epsilon > 0 : F(x + \epsilon) - F(x - \epsilon) > 0\}) = 0$$

oder äquivalent dazu die Ableitung fast-überall verschwindet, also

$$\lambda_1(\{x \in \mathbb{R}^1 \mid F'_X(x) = 0\}) = 1.$$

Satz. Jede VF F auf \mathbb{R}^1 besitzt eine eindeutige Zerlegung (Lebesgue-Zerlegung) als konvexe Linearkombination einer diskreten, einer singulär-stetigen und einer absolut-stetigen VF

$$F = \alpha_d F_d + \alpha_s F_s + \alpha_a F_a \quad \text{mit} \quad \alpha_d, \alpha_s, \alpha_a \geq 0, \alpha_d + \alpha_s + \alpha_a = 1.$$

Def. Falls F_X absolut-stetig, dann heißt die nicht negative, Lebesgue-messbare Funktion

$$f = f_X = F'_X : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}, \quad x \mapsto \begin{cases} F'_X(x), & \text{falls Ableitung ex.} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

(Wahrscheinlichkeits-)Dichte (WD) von F_X bzw. von X .

Bemerkung. Dann gilt für alle $y \in \mathbb{R}$:

$$\int_{-\infty}^y f_X(x) dx = F_X(y), \quad \text{also insbesondere} \quad \int_{-\infty}^{\infty} f_X(x) dx = 1.$$

Bemerkung. F_X ist als VF genau dann absolut stetig, wenn das Maß P_X bezüglich λ_1 absolut stetig ist (also $P_X \ll \lambda_1$ gilt).

Satz. $\begin{cases} \int_{\mathbb{R}^1} x \cdot f_X(x) dx, & \text{falls } F_X \text{ absolutstetig mit WD } f_X \\ \sum_{j \in J} x_j \cdot p_j, & \text{falls } F_X \text{ diskret mit Sprüngen } p_j \\ & \text{bei } x_j, j \in J \subset \mathbb{N} \end{cases}$

Satz (Erwartungswerte bekannter Zufallsverteilungen).

- Für $X \sim \text{Poi}(\lambda) : \mathbb{E}X = \lambda$
- Für $N \sim N(\mu, \sigma^2) : \mathbb{E}X = \mu$
- Für $X \sim \text{Exp}(\lambda) : \mathbb{E}X = \frac{1}{\lambda}$
- Für $N \sim N(0, 1) : \mathbb{E}|X| = \sqrt{\frac{2}{\pi}}$

Bemerkung. Die Cauchy-Verteilung hat die VF bzw. die W-Dichte

$$F(x) = \frac{1}{\pi} \arctan(x) + \frac{1}{2}, \quad f(x) = \frac{1}{\pi(1+x^2)}.$$

Eine Cauchy-verteilte ZG X hat keinen EW, da $\int_{\mathbb{R}^1} |x| \cdot f(x) dx = \infty$.

Def. Seien $X_1, \dots, X_d : (\Omega, \mathfrak{A}, \mathbb{P}) \rightarrow (\mathbb{R}^1, \mathfrak{B}(\mathbb{R}^1))$ ZGn,

$$F = F_{(X_1, \dots, X_d)} : \mathbb{R}^d \rightarrow [0, 1], \quad (x_1, \dots, x_d) \mapsto \mathbb{P}(X_1 \leq x_1, \dots, X_k \leq x_k)$$

die dazugehörige VF und $P = P_{(X_1, \dots, X_d)}$ das von der VF induzierte Maß auf $\mathfrak{B}(\mathbb{R}^d)$.

- F heißt **diskret**, falls es eine höchstens abzählbare Menge $\{y_i \in \mathbb{R}^d \mid i \in I\}$ mit $I \subset \mathbb{N}$ gibt, sodass

$$\forall i \in I : P(\{y_i\}) > 0 \quad \text{und} \quad \sum_{i \in I} P(\{y_i\}) = 0.$$

- F heißt **stetig**, wenn $P(\{y\}) = 0$ für alle $y \in \mathbb{R}^1$.
- F heißt **absolut stetig**, falls das Maß P absolut stetig bzgl. dem Lebesgue-Maß ist, also $P \ll \lambda_d$ gilt. Dazu äquivalent: Für alle $\epsilon > 0$ gibt es ein $\delta > 0$, sodass für höchstens abzählbar viele, disjunkte Elementarquader $Q_j =]a_j, b_j]$ mit $j \in J \subset \mathbb{N}$ gilt:

$$\sum_{j \in J} \lambda_d(Q_j) \leq \delta \implies \sum_{j \in J} P(Q_j) = \sum_{j \in J} (\Delta F) Q_j \leq \epsilon.$$

- F heißt **singulär stetig**, wenn F stetig ist und eine Lebesgue-Menge S mit $\lambda_d(S) = 0$ und $P(S) = 1$ existiert.

Bemerkung. Falls F absolut stetig, ex. die W-Dichte, die f. ü. durch

$$f = f_{(X_1, \dots, X_d)} : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}, \quad (x_1, \dots, x_d) \mapsto \frac{\partial^d}{\partial x_1 \dots \partial x_d} F(x_1, \dots, x_d)$$

gegeben ist und $\int f(y) dy = F(x)$ für alle $x \in \mathbb{R}^d$ erfüllt.

Satz. Sei X eine ZG und $g : \mathbb{R}^1 \rightarrow \mathbb{R}^1$ messbar. Dann gilt

$$\mathbb{E}g(X) = \begin{cases} \int_{\mathbb{R}^1} g(x) \cdot f_X(x) dx, & \text{falls } F_X \text{ absolutstetig mit WD } f_X \\ \sum_{j \in J} g(x_j) \cdot p_j, & \text{falls } F_X \text{ diskret mit Sprüngen } p_j \\ & \text{bei } x_j, j \in J \subset \mathbb{N} \text{ (und wohldefiniert)} \end{cases}$$

Def. Eine **Zerlegung** eines Intervalls $[a, b]$ ist eine geordnete endliche Menge $Z = \{a = x_0 < x_1 < \dots < x_k = b\} \subset [a, b]$. Eine weitere Zerlegung \tilde{Z} desselben Intervalls heißt **Verfeinerung** von Z , falls $\tilde{Z} \supset Z$.

Notation. Die Menge aller Zerlegungen von $[a, b]$ ist $\mathcal{Z}([a, b])$.

Def. Eine Menge von Stützstellen bzgl. einer Zerlegung $\{x_0 < \dots < x_k\}$ von $[a, b]$ ist eine Menge $\{\xi_1, \dots, \xi_k\}$ mit $\xi_i \in]x_{i-1}, x_i[$ für $i \in \{1, \dots, k\}$.

Def. Für zwei Funktionen $f, g : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$, eine Zerlegung $Z = \{a = x_0 < \dots < x_n = b\}$ von $[a, b]$ und Stützstellen ξ_1, \dots, ξ_n bzgl. Z heißt die Summe

$$S(f, dg, Z, \xi_1, \dots, \xi_n) := \sum_{j=1}^n f(\xi_j)(g(x_j) - g(x_{j-1}))$$

Riemann-Stieltjes-Summe von f bzgl. g und der Zerlegung Z mit Stützstellen ξ_1, \dots, ξ_n .

Def. Seien $f, G : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$. Die Funktion f heißt **Riemann-Stieltjes-integrierbar** (RS-integrierbar) bzgl. der **Gewichtsfunktion** G , wenn gilt: Es gibt ein $\iota \in \mathbb{R}$, sodass für alle $\epsilon > 0$ eine Zerlegung Z_ϵ von $[a, b]$ existiert, sodass für alle Verfeinerungen $Z \supset Z_\epsilon$ und Wahlen von Stützstellen ξ_1, \dots, ξ_n gilt:

$$|\iota - S(f, dG, Z, \xi_1, \dots, \xi_n)| \leq \epsilon.$$

Dieses (eindeutig bestimmte) ι heißt **Riemann-Stieltjes-Integral** (RS-Integral) von f bzgl. G , geschrieben

$$\int_a^b f(x) dG(x) := \iota.$$

Bemerkung. Mit $G := \text{id}$ erhalten wir aus dem RS-Integral das gewöhnliche Riemann-Integral.

Satz. Das RS-Integral ist sowohl in der integrierten Funktion als auch der Gewichtsfunktion linear.

Satz. Für f bzgl. G auf $[a, b]$ RS-int'bar und G stetig diff'bar gilt

$$\int_a^b f(x) dG(x) = \int_a^b f(x) \cdot G'(x) dx.$$

Satz (Partielle Integration). Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ bzgl. $G : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ RS-integrierbar. Dann ist auch G bzgl. f RS-integrierbar und es gilt

$$\int_a^b f(x) dG(x) = [G(x) \cdot f(x)]_a^b - \int_a^b G(x) df(x).$$

Bemerkung. Wir können uneigentliche RS-Integrale analog zu uneigentlichen Riemann-Integralen definieren.

Satz. $\mathbb{E}X = \int_{\mathbb{R}^1} \text{id} dP_X = \int_{-\infty}^{\infty} x dF_X(x)$

Def. Sei X eine ZG über $(\Omega, \mathfrak{A}, \mathbb{P})$ und $k \in \mathbb{N}$. Dann heißt

- $\mathbb{E}X^k$ **k -tes Moment**,
- $\mathbb{E}|X|^k$ **k -tes absolutes Moment**,
- $\mathbb{E}(X - \mathbb{E}X)^k$ **k -tes zentriertes Moment**,
- $\mathbb{E}|X - \mathbb{E}X|^k$ **k -tes zentriertes absolutes Moment**,
- $\text{Var}(X) := \mathbb{D}^2 X := \mathbb{E}(X - \mathbb{E}X)^2$ **Varianz** (Dispersion, Streuung),
- $\sqrt{\text{Var}(X)}$ **Standardabweichung** von X .

Lemma. Es gilt $\text{Var}(X) = \mathbb{E}(X - \mathbb{E}X)^2 = \mathbb{E}X^2 - (\mathbb{E}X)^2 \geq 0$.

Lemma. $\mathbb{E}X^k = \int_{\Omega} X^k d\mathbb{P} = \int_{\mathbb{R}^1} \text{id}^k dP_X = \int_{-\infty}^{\infty} x^k dF_X =$

$$= \begin{cases} \int_{\mathbb{R}^1} x^k \cdot f_X(x) dx, & \text{falls } F_X \text{ absolutstetig mit WD } f_X \\ \sum_{j \in J} x_j^k \cdot p_j, & \text{falls } F_X \text{ diskret mit Sprüngen } p_j \\ & \text{bei } x_j, j \in J \subset \mathbb{N} \end{cases}$$

Bemerkung. Falls $\mathbb{E}|X|^k < \infty$, dann existiert auch $\mathbb{E}X^k$.

Lemma. Es gilt für eine ZG X und $a, b, c \in \mathbb{R}^1$:

- $\text{Var}(aX + b) = a^2 \text{Var}(X)$ • $\text{Var}(X) \leq \mathbb{E}(X - c)^2$
- $\text{Var}(X) = 0 \iff \mathbb{E}(X - \mathbb{E}X) = 0 \iff X \equiv \text{const } \mathbb{P}$ -fast-sicher

Satz (Verallgemeinerte Tschebyschow-Ungleichung). X sei eine ZG und $g : [0, \infty[\rightarrow [0, \infty[$ monoton steigend. Dann gilt für alle $\epsilon > 0$:

$$\mathbb{P}(|X| \geq \epsilon) \leq \frac{\mathbb{E}g(|X|)}{g(\epsilon)}$$

Korollar. • **Markow-Ungleichung:** $\mathbb{P}(|X| \geq \epsilon) \leq \frac{\mathbb{E}X}{\epsilon}$.

- **Tschebyschow-Ungleichung:** $\mathbb{P}(|X - \mathbb{E}X| \geq \epsilon) \leq \frac{\text{Var}(X)}{\epsilon^2}$.

- Für alle $a > 0$ gilt $\mathbb{P}(|X| \geq \epsilon) \leq \frac{\mathbb{E} \exp(a|X|)}{\exp(a\epsilon)}$.

$$\begin{aligned} 0 > B = \mathbb{E} \exp(a|X|) &\geq \frac{a^n \mathbb{E}|X|^n}{n!} \\ \implies \mathbb{E}|X|^n &\leq \frac{B}{a^n} n! \text{ für alle } n \in \mathbb{N} \\ \implies |\mathbb{E}X^n| &\leq \frac{B}{a^n} n! \\ \implies \mathbb{E} \exp(zX) &\text{ ist analytisch für } |z| < a \end{aligned}$$

Def. $\mathbb{E} \exp(zX)$ heißt momenterzeugende Funktion der ZG X oder VF F_X .

$$X = N(\mu, \sigma^2) \implies \mathbb{E} \exp(zX) = \exp\left(z\mu + \frac{\sigma^2}{2} z^2\right) \text{ für } z \in \mathbb{C}$$

Höldersche Ungleichung:

$$\begin{aligned} |\mathbb{E}XY| &\leq \mathbb{E}|XY| \leq (\mathbb{E}|X|^p)^{\frac{1}{p}} \cdot (\mathbb{E}|Y|^q)^{\frac{1}{q}} \text{ für } p, q \geq 1 \\ \implies \text{Cauchy-Schwarz-Bunjakowski-Ungleichung} &\text{ für } p = q = 2: \end{aligned}$$

$$|\mathbb{E}XY| \leq \sqrt{\mathbb{E}(X^2)\mathbb{E}(Y^2)}$$

Verallgemeinerung:

$$\mathbb{E}(X_1^{n_1} \dots X_k^{n_k}) \leq (\mathbb{E}|X_1|^{n_1})^{\frac{n_1}{n}} \dots (\mathbb{E}|X_k|^{n_k})^{\frac{n_k}{n}}, n = n_1 + \dots + n_k$$

Jensensche Ungleichung

Sei $g : \mathbb{R}^1 \rightarrow \mathbb{R}^1$ konvex auf einem Intervall J , d. h.

$$g(\alpha x + (1 - \alpha)y) \leq \alpha g(x) + (1 - \alpha)g(y) \text{ für alle } x, y \in I \text{ und } \alpha \in [0, 1]$$

Per Induktion folgt: $g(\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i) \leq \sum_{i=1}^n \alpha_i g(x_i)$ für $x_1, \dots, x_n \in J$,

$$\alpha_i \geq 0, \alpha_1 + \dots + \alpha_n = 1$$

Satz. $g(\mathbb{E}X) \leq \mathbb{E}g(X)$, falls $\mathbb{P}(X \in J) = 1$ und $\mathbb{E}|X| < \infty$

$$g(x) = |x|^{\frac{n}{m}} \text{ für } 0 < m \leq n, \implies \text{Ljapunow-Ungleichung}$$

Problem (Momentenproblem). Unter welchen Bedingungen ist eine Zahlenfolge $c_0 = 1, c_1, c_2, \dots$ eine Momentenfolge einer ZG X , d. h. $c_n = \mathbb{E}X^n$.

Antwort.

$$0 \leq \mathbb{E}(z_0 + z_1 X + \dots + z_n X^n)^2 = \mathbb{E}\left(\sum_{i,j=1}^n z_i z_j X^{i+j}\right) = \sum_{i,j=1}^n z_i z_j c_{i+j}$$

genau dann, wenn

$$\det \begin{pmatrix} c_0 & c_1 & \dots & c_n \\ c_1 & c_2 & \dots & c_{n+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_n & c_{n+1} & \dots & c_{2n} \end{pmatrix} \geq 0.$$

Problem. Wann ist die zugehörige VF F_X eindeutig festgelegt?

$$c_n = \int_{-\infty}^{\infty} x^n dF_X(x) \text{ (Stieltjes-MP)}, c_n = \int_{-\infty}^{\infty} x^n dF_X(x) \text{ (Hamburger MP)}$$

Hinreichende Bedingung für Bestimmtheit:

$$\text{Stieltjes-MP: } \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{c_{2n}^{\frac{1}{2n}}} = \infty$$

$$\text{Hamburger MP: } \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{c_{2n}^{\frac{1}{2n}}} = \infty$$

(Carleman-Kriterien)

Def. Sei $X = (X_1, \dots, X_k)$ eine k -dimensionale ZV über $(\Omega, \mathfrak{A}, \mathbb{P})$. X_1, \dots, X_k heißen **stochastisch unabhängig**, falls

$$\mathbb{P}\left(\bigcap_{i=1}^k \{X_i \in B_i\}\right) = \prod_{i=1}^k \mathbb{P}(\{X_i \in B_i\})$$

für alle $B_1, \dots, B_k \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^1)$. Dies ist genau dann der Fall, wenn

$$\mathbb{P}(X_1 \leq x_1, \dots, X_k \leq x_k) = \mathbb{P}(X_1 \leq x_1) \dots \mathbb{P}(X_k \leq x_k)$$

für alle $x_1, \dots, x_k \in \mathbb{R}$. Falls die W-Dichte $f_X(x_1, \dots, x_k) = \frac{\partial}{\partial x_1 \dots \partial x_k} F(x_1, \dots, x_k)$ existiert (also F_X absolut stetig), ist dies äquivalent zu

$$f_X(x_1, \dots, x_k) = f_{X_1}(x_1) \dots f_{X_k}(x_k).$$

Für diskrete Verteilungen ist dies äquivalent zu

$$\mathbb{P}(X_1 = x_1, \dots, X_k = x_k) = \mathbb{P}(X_1 = x_1) \dots \mathbb{P}(X_k = x_k)$$

für alle $x_1, \dots, x_k \in \mathbb{R}$.

Def. Für eine k -dimensionale ZV $X = (X_1, \dots, X_k)$ heißt

$$F_{(X_{i_1}, \dots, X_{i_l})}(x_{i_1}, \dots, x_{i_l}) = \lim_{x_j \rightarrow \infty_{j \in \{1, \dots, k\} \setminus \{i_1, \dots, i_l\}}} F(X_1, \dots, X_k)(x_1, \dots, x_k)$$

für $1 \leq i_1 < \dots < i_l \leq k, l = 1, \dots, k-1$ **l -dimensionale Rand-(Marginal-)verteilungsfunktion.**

Falls $f_X(x_1, \dots, x_k)$ existiert, so existieren sämtliche Randdichten

$$f_{(X_{i_1}, \dots, X_{i_k})}(x_{i_1}, \dots, x_{i_k}) = \int_{\mathbb{R}^{k-l}} f_{(X_1, \dots, X_k)}(x_1, \dots, x_k) d(x_1, \widehat{x_{i_1}}, \dots, \widehat{x_{i_k}}, \dots, x_k)$$

Analog folgt für eine diskrete ZV die Diskretheit der Randverteilungen $k=2$:

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(X_1 = x_m^{(1)}) &= \sum_{x_m^{(2)}} \mathbb{P}(X_1 = x_m^{(1)}, X_2 = x_m^{(2)}) \\ \mathbb{P}(X_2 = x_m^{(2)}) &= \sum_{x_m^{(1)}} \mathbb{P}(X_1 = x_m^{(1)}, X_2 = x_m^{(2)}) \end{aligned}$$

wobei $x_m = (x_m^{(1)}, \dots, x_m^{(k)})$ die Massenschwerpunkte sind.

Wichtig: Im allgemeinen bestimmen die Randverteilungen nicht die gemeinsame Verteilung des Vektors.

Def. (X, Y) sei eine zweidimensionale ZV über $(\Omega, \mathfrak{A}, \mathbb{P})$ mit $\mathbb{E}X^2 < \infty, \mathbb{E}Y^2 < \infty$. Dann heißt

$$\text{Cov}(X, Y) := \mathbb{E}(XY) - \mathbb{E}X\mathbb{E}Y = \mathbb{E}((X - \mathbb{E}X) \cdot (Y - \mathbb{E}Y))$$

Kovarianz von X und Y und

$$\text{Cor}(X, Y) := \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{Var}(X) \cdot \text{Var}(Y)}}$$

Korrelation von X und Y .

Satz. • Falls X, Y unabhängig, so gilt $\text{Cov}(X, Y) = \text{Cor}(X, Y) = 0$
• $|\text{Cor}(X, Y)| \leq 1$
• $\text{Cor}(X, Y) = 1 \iff \exists a, b \in \mathbb{R}^1 : \mathbb{P}(Y = aX + b) = 1$.

Def. Falls $\text{Cor}(X, Y) = 0$, so heißen X, Y **unkorreliert**.

Achtung. Aus Unkorreliertheit folgt i. A. nicht Unabhängigkeit!

Beispiel. Sei X eine ZG mit der symmetrischen Dichte

$$f_X(x) = f_X(-x) \text{ und } \int_{-\infty}^{\infty} |x|^3 f_X(x) dx < \infty, \text{ dann ist } \text{Cov}(X, X^2) = 0, \text{ aber } X \text{ und } X^2 \text{ nicht unabhängig.}$$

Bemerkung. • $\text{Cor}(X, Y) = 1$: positive Korrelation

- $\text{Cor}(X, Y) = -1$: negative Korrelation
- $\text{Cor}(X, Y) = 0$: Unkorreliertheit

Wichtig: Falls (X, Y) eine zweidimensionale Normalverteilung besitzt, so folgt aus $\text{Cor}(X, Y) = 0$ die Unabhängigkeit von X und Y .

Satz. X_1, \dots, X_n seien paarweise unkorrelierte ZGn mit $\mathbb{E}X_i^2 < \infty$ für $i = 1, \dots, n$. Dann gilt

$$\text{Var}(X_1 + \dots + X_n) = \text{Var}(X_1) + \dots + \text{Var}(X_n)$$

Wir wollen die Kovarianz der ZG X und Y berechnen.

1. Fall: Es existiert eine gemeinsame WD von (X, Y) , $f_{(X, Y)}(x, y)$

$$(\text{Lebesgue-messbar, } \geq 0, \int_{\mathbb{R}^2} f_{(X, Y)}(x, y) d(x, y) = 1)$$

Beispiel: 2-dimensionale Normalverteilungsdichte

$$f_{(X, Y)}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left(-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left(\frac{(x-\mu_1)^2}{\sigma_1^2} + \frac{(y-\mu_2)^2}{\sigma_2^2} - \frac{2(x-\mu_1)(y-\mu_2)\rho}{\sigma_1\sigma_2}\right)\right),$$

wobei $\mu_1 = \mathbb{E}X, \mu_2 = \mathbb{E}Y, \sigma_1^2 = \text{Var}(X), \sigma_2^2 = \text{Var}(Y)$

$$\mathbb{E}(X \cdot Y) = \int_{\mathbb{R}^2} x \cdot y \cdot f_{(X, Y)}(x, y) d(x, y) = \mu_1 \cdot \mu_2 + \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \rho$$

Also: $\text{Cov}(X, Y) = \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \rho$ und $\text{Cor}(X, Y) = \rho \in [-1, 1]$.

Randverteilungen:

$$f_X(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{(X, Y)}(x, y) dy \quad f_Y(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{(X, Y)}(x, y) dx$$

$$\mathbb{E}X = \int_{-\infty}^{\infty} x f_X(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x f_{(X, Y)}(x, y) dx dy$$

2. Fall: (X, Y) mit Werten in einer höchstens abzählbaren Menge an (x_i, y_i) wird mit Wahrscheinlichkeit $p_{ij} > 0$ angenommen, $i, j = 1, 2, \dots$

$$\mathbb{P}((X, Y) = (x_i, y_i)) = \mathbb{P}(X = x_i, Y = y_j)$$

$$\mathbb{E}(X \cdot Y) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} x_i \cdot y_j p_{ij}$$

$$\mathbb{E}X = \sum_{i=1}^{\infty} x_i \mathbb{P}(X = x_i) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} x_i p_{ij}$$

$$\mathbb{E}Y = \sum_{j=1}^{\infty} y_j \mathbb{P}(Y = y_j) = \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} y_j p_{ij}$$

$$\text{Cov}(X, Y) = \mathbb{E}(X \cdot Y) - (\mathbb{E}X) \cdot (\mathbb{E}Y) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} x_i y_j (p_{ij} - p_i \cdot q_j)$$

$$\text{mit } p_i := \sum_{j=1}^{\infty} p_{ij}, q_j := \sum_{i=1}^{\infty} p_{ij}$$

3. Fall: (X, Y) ist singulär-stetig verteilt oder besitzt eine singulär-stetige Komponente

Beispiel: Zweidimensionale Exponentialverteilung ...

$$\overline{F}(x, y) = \mathbb{P}(X > x, Y > y) = \exp(-(\lambda x + \mu y + \nu \max(x, y)))$$

$$F(x, y) = \mathbb{P}(A^c \cap B^c) = \mathbb{P}((A \cup B)^c) = 1 - \mathbb{P}(A \cup B) = 1 - \mathbb{P}(A) - \mathbb{P}(B) + \mathbb{P}(A \cap B)$$

$$\mathbb{E}XY = \int_{\mathbb{R}^2} x \cdot y dF(x, y) = \dots = - \int_0^{\infty} [y \cdot \mathbb{P}(X > x, Y > y)]_{y=0}^{y=\infty} dx + \int_{\mathbb{R}_{\geq 0}^2} \mathbb{P}(X > x, Y > y) d(x, y)$$

Für $(X, Y) \in \mathbb{R}^2$ gilt

$$\mathbb{E}(XY) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \underbrace{\mathbb{P}(X > x, Y > y)}_{=\overline{F}(x, y)} dx dy$$

Falls $(X, Y) \in \mathbb{R}^2$, so gilt:

$$\mathbb{E}(X \cdot Y) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} (\mathbb{P}(X > x, Y > y) + \mathbb{P}(X \leq -x, Y \leq -y) - \mathbb{P}(X \geq x, Y \leq -y) - \mathbb{P}(X \leq -x, Y \geq y)) dx dy$$

Beispiel:

$$\mathbb{E}(X \cdot Y) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \exp(-\lambda x - \mu y - \nu \max(x, y)) dx dy = \dots = \frac{1}{\lambda(\mu + \nu)} + \frac{1}{\mu(\lambda + \nu)}$$

$$\mathbb{E}X = \int_0^{\infty} x dF(x) = \int_0^{\infty} \mathbb{P}(X > x) dx = \frac{1}{\lambda + \nu}$$

$$\text{Cor}(X, Y) = \dots = \frac{\nu}{(\lambda + \nu)(\mu + \nu)(\lambda + \mu + \nu)}$$

Also: $\nu = 0$ genau dann, wenn X und Y unabhängig

$Y = g(X)$, $g : \mathbb{R}^1 \rightarrow \mathbb{R}^1$ Borel-messbar

$$F_Y(y) = \mathbb{P}(Y \leq y) = \mathbb{P}(Y \text{ in }]-\infty, y]) = \mathbb{P}(X \in g^{-1}(]-\infty, y]))$$

Beispiel: $Y = X^2, y \geq 0$

$$F_Y(y) = \mathbb{P}(X^2 \leq y) = \mathbb{P}(|X| \leq \sqrt{y}) = \mathbb{P}(-\sqrt{y} \leq X \leq \sqrt{y}) = \mathbb{P}(X = -\sqrt{y}) + F_X(\sqrt{y}) - F_X(-\sqrt{y}) = F_X(\sqrt{y}) - \lim_{z \uparrow -\sqrt{y}} F_X(z)$$

Satz. X sei absolut stetig mit Dichte f_X und $\mathbb{P}(X \in D) = 1$ für $D \subset \mathbb{R}^1$ offen und $g : D \rightarrow \mathbb{R}^1$ eine C^1 -Funktion mit $g'(x) > 0$ für alle $x \in D$. Dann ist $Y = g(X)$ absolut-stetig mit der Dichte

$$f_Y(y) = \begin{cases} 0, & \text{für } y \in \mathbb{R}^1 \setminus g(D) \\ \frac{f_X(g^{-1}(y))}{|g'(g^{-1}(y))|} & \text{für } y \in g(D) \end{cases}$$

Beispiel. $Y = e^{N(\mu, \sigma^2)} + c$

Dann heißt Y logarithmisch normalverteilt

$$\frac{g(x)}{g'(x)} = \frac{e^x \pm c}{1 - F(x, 0) - \overline{F}(0, y) + \overline{F}(x, y)}$$

Ausgelassen: Rechnungen

Bemerkung. Falls die Ableitung $g'(x), x \in D$ wechselndes Vorzeichen besitzt, so muss in Monotoniebereiche unterteilt werden.

Beispiel. $Y = e^{N(\mu, \sigma^2)} + c$, speziell $\mu = 0, \sigma^2 = 1, c = 0$, dann

$$f_Y(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\log y)^2}{2}\right).$$

Die Funktion

$$f_a(y) := f_Y(y) \cdot (1 + a \cdot \sin(2\pi \log y)), y \in \mathbb{R}_{>0}^1, a \in [0, 1]$$

Für $a \in [0, 1]$ ist dann $\int_{-\infty}^{\infty} f_a(y) dy = 1$

$$\mathbb{E}Y^n = \int_0^{\infty} y^n f_Y(y) dy = \dots = \exp(-\frac{n^2}{2})$$

und

$$\int_0^{\infty} y^n f_a(y) dy = \exp(-\frac{n^2}{2})$$

Sei $X = (X_1, \dots, X_k)$ ein k -dimensionaler Zufallsvektor, $g = (g_1, \dots, g_k) : \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^k$ mit $g_i : \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^1$ für $i = 1, \dots, k$ Borel-messbar. Dann ist $Y = g(X)$ ein k -dimensionaler ZV mit $P_Y = P_X \circ g^{-1}$ Falls $f_{(X_1, \dots, X_k)}$ eine W-Dichte von X ist und g ein C^1 -Diffeomorphismus ist, dann existiert die W-Dichte von $f_{(Y_1, \dots, Y_k)}$ von Y .

Satz. Seien $G, H \subseteq \mathbb{R}^k$ offen und $g = (g_1, \dots, g_k) : G \rightarrow H$ ein C^1 -Diffeomorphismus. Dann findet man Funktionen $h_i : H \rightarrow \mathbb{R}^1$, $i = 1, \dots, k$ mit $h(y_1, \dots, y_k) = (h_1(y_1, \dots, y_k), \dots, h_k(y_1, \dots, y_k))$ für $(y_1, \dots, y_k) \in H$, sodass für die Dichte von $Y = (Y_1, \dots, Y_k)$ gilt:

$$f_{(Y_1, \dots, Y_k)}(y_1, \dots, y_k) = \begin{cases} \frac{f_{(X_1, \dots, X_k)}(h_1(y_1, \dots, y_k), \dots, h_k(y_1, \dots, y_k))}{|\det Dg(h_1(y_1, \dots, y_k), \dots, h_k(y_1, \dots, y_k))|} \\ 0, \end{cases}$$

Beachte:

$$\det D(h)(y_1, \dots, y_k) = \frac{1}{\det D(g)(h_1(y_1, \dots, y_k), \dots, h_k(y_1, \dots, y_k))}$$

Beispiel (Box-Muller-Transformation).

$$Y_1 = g_1(X_1, X_2) = \sqrt{-2 \log(X_1)} \sin(2\pi X_2)$$

$$Y_2 = g_2(X_1, X_2) = \sqrt{-2 \log(X_1)} \cos(2\pi X_2)$$

mit X_1 und X_2 gleichverteilt auf $[0, 1]$.

$$f_{(X_1)}(x_1, x_2) = \mathbb{1}_{]0,1[}$$

Behauptung: Dann ist $f_{(Y_1, Y_2)} = \phi(y_1) \cdot \phi(y_2)$, wobei

$$\phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{y^2}{2}) \text{ oder } Y_1, Y_2 \sim N(0, 1) \text{ und unabhängig.}$$

Beispiel.

$$Y_1 = g_1(X_1, X_2) = \sqrt{X_1^2 + X_2^2}$$

$$Y_2 = g_2(X_1, X_2) = \begin{cases} \arctan(\frac{X_2}{X_1}) & \text{für } X_2 \geq 0, X_1 \in \mathbb{R}^1 \setminus \{0\} \\ \arctan(\frac{X_2}{X_1}) + \pi, & \text{für } X_2 < 0, X_1 \in \mathbb{R}^1 \setminus \{0\} \end{cases}$$

Wenn $X_1, X_2 \sim N(0, \sigma^2)$, unabhängig \implies

$$f_{(X_1, X_2)}(x_1, x_2) = \phi(\frac{x_1}{\sigma}) \phi(\frac{x_2}{\sigma})$$

$$\text{Ergebnis: } f_{(Y_1, Y_2)}(y_1, y_2) = \frac{1}{2\pi} \cdot \underbrace{\frac{y_1}{\sigma^2} \exp(-\frac{y_1^2}{\sigma^2})}_{\text{Dichte der Rayleigh-Verteilung}} \quad \text{für}$$

$$(y_1, y_2) \in]0, \infty[\times]0, 2\pi[$$

$$F_{Y_1}(y) = \dots = 1 - \exp(-\frac{y^2}{2\sigma^2})$$

Satz. (X, Y) besitze eine gemeinsame Dichte $f_{(X, Y)}$ (also $\mathbb{P}(X = 0) = \mathbb{P}(Y = 0) = 0$). Dann gilt für die Dichten von $Z_1 := X + Y$, $Z_2 := X \cdot Y$, $Z_3 := \frac{X}{Y}$.

$$f_{Z_1}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{(X, Y)}(z - y, y) dy \stackrel{\text{f. unabh.}}{=}$$

$$f_{Z_2}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{(X, Y)}(z/y, y) \cdot \frac{1}{|y|} dy = \dots$$

$$f_{Z_3}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{(X, Y)}(x \cdot y, y) \cdot |y| dy = \dots$$

Beispiel. Seien X, Y unabhängig, $N(0, 1)$ -verteilt, $Z := \frac{X}{Y}$. Dann:

$$f_Z(z) = \dots = \frac{1}{\pi(1+z^2)}$$

Beispiel. Sei nun $X \sim F_X$ unabhängig von $Y \sim F_Y$. Dann

$$\mathbb{E}g(X, Y) = \int_{\mathbb{R}^2} g(x, y) dP_{(X, Y)} = \dots = \int_{\mathbb{R}^1} \int_{\mathbb{R}^1} g(x, y) dP_X(x) dP_Y(y)$$

Mit Verteilungsfunktionen kann man schreiben:

$$\mathbb{E}g(X, Y) = \int_{\mathbb{R}^2} g(x, y) dF_{X, Y}(x, y) = \int_{\mathbb{R}^1} \int_{\mathbb{R}^1} g(x, y) dF_X(x) dF_Y(y)$$

für $(y_1, \dots, y_k) \in H$

$$\text{sonst } \mathbb{P}(X + Y \leq z) = \dots = \int_{\mathbb{R}^1} F_X(z - y) dF_Y(y) =: (F_X * F_Y)(z)$$

Faltung von F_X und F_Y

Bemerkung. • $F_X * F_Y = F_Y * F_X$

• $F_{X+Y} = F_X * F_Y$

• Falls X oder Y eine Dichte besitzen, so auch $X + Y$:

$$f_{X+Y}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_X(z-y) dF_Y(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f_Y(z-x) dF_X(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_Y(z-x) f_X(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} f_X(x) f_Y(z-x) dx$$

• Verallgemeinerung: $F_{X_1 + \dots + X_n} = F_{X_1} * \dots * F_{X_n}$, falls X_1, \dots, X_n unabhängig.

Gewisse Verteilungen sind „faltungsstabil“, d. h. bei der Faltung bleibt der Verteilungstyp erhalten

Beispiel. X_i sei Poisson-verteilt mit Paramter $\lambda_i > 0$, $i = 1, 2$. Dann ist $X_1 + X_2$ Poisson-verteilt mit Parameter $\lambda_1 + \lambda_2$, falls X_1 und X_2 unabhängig sind.

Beispiel. Sei $X_i \stackrel{d}{=} N(\mu_i, \sigma_i^2)$, $i = 1, 2$ unabhängig. Dann:

$$X_1 + X_2 \stackrel{d}{=} N(\mu_1 + \mu_2, \sigma_1^2 + \sigma_2^2).$$

Satz. Falls X_1 und X_2 unabhängig und $X_1 + X_2$ normalverteilt

(also $X_1 + X_2 \stackrel{d}{=} N(\mu, \sigma^2)$), dann sind X_1 und X_2 normalverteilt. Falls X_1 und X_2 unabhängig und $X_1 + X_2$ Poisson-verteilt (also

$$X_1 + X_2 \stackrel{d}{=} Poi(\lambda)), \text{ dann sind } X_1 \text{ und } X_2 \text{ Poisson-verteilt.}$$

Wichtige Ergebnisse über Summen unabhängiger ZGn:

• $\frac{1}{n}(X_1 + \dots + X_n) \xrightarrow[\mathbb{P}\text{-fast-überall}]{n \rightarrow \infty} \mathbb{E}X_1$ falls X_1, \dots, X_n unabhängig, identisch verteilt und $\mathbb{E}|X_1| < \infty$ (GGZ)

• $\sqrt{n}(\frac{1}{n}(X_1 + \dots + X_n) - \mathbb{E}X_1) \xrightarrow[d]{n \rightarrow \infty} N(0, \text{Var}(X_1))$, falls $\text{Var}(X_1) < \infty$

Seien $(\Omega_i, \mathfrak{A}_i)$ für $i \in \{1, \dots, n\}$ messbare Räume.

Dann ist $\Omega = \Omega_1 \times \dots \times \Omega_n$ das kartesische Produkt der Mengen.

Def.

$$\mathfrak{A} := \sigma\left(\pi_1^{-1}(\mathfrak{A}_1) \cup \dots \cup \pi_n^{-1}(\mathfrak{A}_n)\right),$$

wobei $\pi_i : \Omega \rightarrow \Omega_i, (\omega_1, \dots, \omega_n) \mapsto \omega_i$ die Projektionsabbildungen sind, heißt **Produkt- σ -Algebra** von $\mathfrak{A}_1, \dots, \mathfrak{A}_n$, notiert $\mathfrak{A} = \mathfrak{A}_1 \otimes \dots \otimes \mathfrak{A}_n$.

$$\mathfrak{A} = \sigma(\{A_1 \times \dots \times A_n \mid A_1 \in \mathfrak{A}_1, \dots, A_n \in \mathfrak{A}_n\})$$

$$\pi_i^{-1}(A_i) = \Omega_1 \times \dots \times A_i \times \dots \times \Omega_n.$$

Lemma. Sei \mathcal{E}_i mit $\sigma(E_i) = \mathfrak{A}_i$ und es existieren Folgen $(E_i^k)_{k \in \mathbb{N}}$ in \mathcal{E}_i mit $E_i^k \uparrow \Omega_i$. Dann gilt:

$$\bigotimes_{i=1}^n = \sigma(\{E_1 \times \dots \times E_n \mid E_1 \in \mathcal{E}_1, \dots, E_n \in \mathcal{E}_n\})$$

Bemerkung. Auf die Zusatzvoraussetzung der monoton aufsteigenden Mengenfolge können wir nicht verzichten.

Satz. $\mathcal{L}(\mathbb{R}^n) = \mathcal{L}(\mathbb{R}^1) \otimes \dots \otimes \mathcal{L}(\mathbb{R}^1)$

Lemma. $(\tilde{\Omega}', \tilde{\mathfrak{A}})$ sei ein messbarer Raum. Dann gilt:

$f : \tilde{\Omega} \rightarrow \Omega_1 \times \dots \times \Omega_n$ genau dann $(\tilde{\mathfrak{A}}, \mathfrak{A})$ -messbar, wenn für alle $i \in \{1, \dots, n\}$ die Abbildung $f_i := \pi_i \circ f : \tilde{\Omega} \rightarrow \Omega_i$ $(\tilde{\mathfrak{A}}, \mathfrak{A}_i)$ -messbar ist.

Satz. Sei μ_1 auf $(\Omega_1, \mathfrak{A}_1)$ und μ_2 auf $(\Omega_2, \mathfrak{A}_2)$ zwei σ -endliche Maße. Dann existiert genau ein Maß $\mu := \mu_1 \times \mu_2$ auf $\mathfrak{A} = \mathfrak{A}_1 \otimes \mathfrak{A}_2$ mit der Eigenschaft

$$\forall A_1 \in \mathfrak{A}_1, A_2 \in \mathfrak{A}_2 : (\mu_1 \times \mu_2)(A_1 \times A_2) = \mu_1(A_1) \cdot \mu_2(A_2).$$

Das Maß μ ist dann auch σ -endlich auf (Ω, \mathfrak{A}) .

Korollar. Das Produkt-W-Maß $\mathbb{P} = \mathbb{P}_1 \times \mathbb{P}_2$ ist das einzige W-Maß auf $\mathfrak{A}_1 \otimes \mathfrak{A}_2$ mit der Eigenschaft:

• $\mathbb{P}(A_1 \times \Omega_2) = \mathbb{P}_1(A_1)$ und $\mathbb{P}(\Omega_1 \times A_2) = \mathbb{P}_2(A_2)$
• $\mathbb{P}(B_1 \cap B_2) = \mathbb{P}(B_1) \times \mathbb{P}(B_2)$ für $B_1 = A_1 \times \Omega_2$, $B_2 = \Omega_1 \times A_2$

Korollar. Für $k, l \in \mathbb{N}_{>0}$ mit $k + l = n$ gilt $\lambda_n = \lambda_k \times \lambda_l$