

B5A1 Zeigen Sie, dass eine Folge $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ genau dann gleichgradig integrierbar ist, wenn

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \limsup_{n \rightarrow \infty} E[|X_n| \mathbb{1}_{\{|X_n| > k\}}] = 0. \quad (1)$$

Sei zunächst (X_n) gleichgradig integrierbar. Dann gilt nach Definition von gleichgradiger Integrierbarkeit, dass

$$0 = \lim_{k \rightarrow \infty} \sup_{n \in \mathbb{N}} E[|X_n| \mathbb{1}_{\{|X_n| > k\}}].$$

Insbesondere heißt das, dass für ein gegebenes $n \in \mathbb{N}$ gilt, dass

$$0 = \lim_{k \rightarrow \infty} \sup_{m \geq n} E[|X_m| \mathbb{1}_{\{|X_m| > k\}}].$$

Damit gilt auch für das Infimum über diese $n \in \mathbb{N}$, dass

$$0 = \lim_{k \rightarrow \infty} \inf_{n \in \mathbb{N}} \sup_{m \geq n} E[|X_m| \mathbb{1}_{\{|X_m| > k\}}],$$

was nach der Definition des \limsup Gleichung (1) liefert. *Hier sollte man sich überlegen, ob man den Limes über k ebenfalls, wie in der Argumentation unten, mittels eines ε umschreiben sollte.*

Genüge nun (X_n) Gleichung (1). Wir wollen zeigen, dass (X_n) gleichgradig integrierbar ist. Sei hierfür ein $\varepsilon > 0$ gegeben. Da Gleichung (1) gilt, gibt es ein $k_0 \in \mathbb{N}$, sodass für alle $k > k_0$

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} E[|X_n| \mathbb{1}_{\{|X_n| > k\}}] < \varepsilon.$$

Damit ist die Teilfolge $(\sup_{m \geq n} E[|X_m| \mathbb{1}_{\{|X_m| > k\}}])_n$ für alle $n \in \mathbb{N}$ beschränkt. Hier könnte man eventuell noch direkt ein Argument bringen, warum schon Beschränktheit durch ε folgt. Also gibt es auch ein n_0 , sodass für alle $n \geq n_0$ gilt

$$E[|X_n| \mathbb{1}_{\{|X_n| > k\}}] < \varepsilon.$$

Nach Lemma 24 gilt, dass alle X_n integrierbar sind. Also gibt es für alle X_1, \dots, X_{n_0-1} jeweils Schranken $k_1, \dots, k_{n_0-1} \in \mathbb{N}$, sodass für die $n = 1, \dots, n_0 - 1$ gilt

$$E[|X_n| \mathbb{1}_{\{|X_n| > k_n\}}] < \varepsilon.$$

Setze nun $K = k_0 \vee \dots \vee k_{n_0-1}$, dann gilt für alle $k \geq K$ und alle $n \in \mathbb{N}$, dass

$$E[|X_n| \mathbb{1}_{\{|X_n| > k\}}] < \varepsilon,$$

also insbesondere, dass

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \sup_{n \in \mathbb{N}} E[|X_n| \mathbb{1}_{\{|X_n| > k\}}] < \varepsilon.$$

Hier fehlt noch die Folgerung von Korollar 27. Es sollte also gezeigt werden, dass falls $\|X_n\|_p \rightarrow \|X\|_p$, dann $\lim_{k \rightarrow \infty} \limsup_{n \rightarrow \infty} E[|X_n|^p \mathbb{1}_{|X_n|^p > k}] = 0$. Es gelte $\|X_n\|_p \rightarrow \|X\|_p$. Da die Folge $E[|X_n|^p]$ dann konvergent ist, ist sie beschränkt. Sei $c \in \mathbb{R}$ vorgegeben. Angenommen, es gelte, dass $\lim_{k \rightarrow \infty} \limsup_{n \rightarrow \infty} E[|X_n|^p \mathbb{1}_{|X_n|^p > k}] > 0$. Eventuell kann man folgern, dass $E[|X_n|^p]$ nicht beschränkt ist.

B5A2 Sei (Ω, \mathcal{F}, P) ein Wahrscheinlichkeitsraum und $(A_n)_{n \geq 1}$ eine Folge in \mathcal{F} . Es sei

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} A_n := \bigcap_{n=1}^{\infty} \bigcup_{k=n}^{\infty} A_k, \quad \liminf_{n \rightarrow \infty} A_n := \bigcup_{n=1}^{\infty} \bigcap_{k=n}^{\infty} A_k.$$

Zeigen Sie, dass gilt

$$\liminf_{n \rightarrow \infty} A_n \subseteq \limsup_{n \rightarrow \infty} A_n, \\ P\left(\liminf_{n \rightarrow \infty} A_n\right) \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} P(A_n) \leq \limsup_{n \rightarrow \infty} P(A_n) \leq P\left(\limsup_{n \rightarrow \infty} A_n\right).$$

Wir möchten zunächst zeigen, dass $\liminf_{n \rightarrow \infty} A_n \subseteq \limsup_{n \rightarrow \infty} A_n$. Sei hierfür $\omega \in \liminf_{n \rightarrow \infty} A_n$. Wie wir in der Übung besprochen haben, heißt das, dass ein $n_0 \in \mathbb{N}$ existiert, sodass für alle $n \geq n_0$ gilt, dass $\omega \in A_n$. Um zu zeigen, dass $\omega \in \limsup_{n \rightarrow \infty} A_n$, sei ein $m_0 \in \mathbb{N}$ beliebig vorgegeben. Da für $n \geq n_0$ gilt, dass $\omega \in A_n$, ist $\omega \in A_{m_0 \vee n_0}$. Damit gilt auch für alle $m_0 \in \mathbb{N}$, dass ein $m \geq m_0$ existiert, sodass $\omega \in A_m$, nämlich $m = m_0 \vee n_0$. Somit ist $\omega \in \limsup_{n \rightarrow \infty} A_n$.

Nun überlegen wir uns, warum die Ungleichungen gelten. $\mathbb{1}_{A_n}$ hat $\mathbb{1}_{\Omega}$ als integrierbare Majorante. Damit gelten die erste und dritte Ungleichung jeweils nach dem Lemma von Fatou, *beziehungsweise die dritte nach majorisierter Konvergenz*.

Hier fehlt noch eine Rechnung für die mittlere Ungleichung.

B5A3 Sei $\lambda > 0$ und für jedes $n \in \mathbb{N}_0$ sei X_n eine Poisson-verteilte Zufallsvariable zum Parameter λ . Zeigen Sie mit Hilfe des Lemmas von Borel–Cantelli, dass

$$P(\{\text{Für unendlich viele } n \text{ gilt } X_n > n\}) = 0.$$

Es gilt genau dann $\omega \in \{\text{Für unendlich viele } n \text{ gilt } X_n > n\}$, wenn $\forall n \geq 0 \exists m \geq n \omega \in \{X_m > n\}$, also genau dann, wenn $\omega \in \limsup\{X_n > n\}$. Das Lemma von Borel–Cantelli besagt, dass $P(\limsup A_n) = 0$, falls $\sum_{n \geq 0} P(A_n) < \infty$. Die Idee ist also, zu zeigen, dass $\sum_{n \geq 0} P(\{X_n > n\}) < \infty$, dann folgt die Behauptung mit dem Lemma von Borel–Cantelli. Die Poissonverteilung ist gegeben durch $P(X_n = k) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^k}{k!}$. Damit ist

$$\sum_{n=0}^{\infty} P(X_n > n) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=n+1}^{\infty} e^{-\lambda} \frac{\lambda^k}{k!}.$$

So, ähnlich wie wir es im Beweis zum starken Gesetz der Großen Zahlen in der Ausführung als Theorem 49 gemacht haben, können wir die Indices umschreiben. Die Terme haben folgende Indices

| n | | | | | | | |
|-----|----------|---|---|---|---|-----|--|
| k | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | ... | |
| | 1 | | 2 | 3 | 4 | ... | |
| | 2 | | | 3 | 4 | ... | |
| | 3 | | | | 4 | ... | |
| | \vdots | | | | | ... | |

Es kommt also der Term mit Index $n+1$ immer $n+1$ mal vor. Wir können für die obige Summe dann schreiben

$$\sum_{n=0}^{\infty} P(X_n > n) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) e^{-\lambda} \frac{\lambda^{(n+1)}}{(n+1)!}.$$

Kürzen mit $n+1$ und herausziehen von einem Faktor $\lambda e^{-\lambda}$ ergibt

$$= \lambda e^{-\lambda} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\lambda^n}{n!}.$$

Mit der Definition der Exponentialfunktion erhalten wir

$$= \lambda e^{-\lambda} e^{\lambda} = \lambda < \infty .$$

B5A4 Nennen Sie jeweils ein Beispiel und ein Gegenbeispiel von reellwertigen Zufallsvariablen $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ und einer Menge $A \in \mathcal{B}(\mathbb{R})$ für die folgenden Identitäten

1. $P\left(\left\{\limsup_{n \rightarrow \infty} X_n \in A\right\}\right) = P\left(\limsup_{n \rightarrow \infty} \{X_n \in A\}\right)$
2. $P\left(\limsup_{n \rightarrow \infty} \{X_n \in A\}\right) = \limsup_{n \rightarrow \infty} P(\{X_n \in A\})$
3. $\limsup_{n \rightarrow \infty} P(\{X_n \in A\}) = P\left(\left\{\limsup_{n \rightarrow \infty} X_n \in A\right\}\right)$

Als Beispiel können wir $X_n = 0$ mit $A = \{0\}$ wählen. Da für alle $n \in \mathbb{N}$ gilt, $X_n = 0$, ist auch $\limsup X_n = \inf_{n \geq 1} \sup_{m \geq n} X_n = 0$. Somit ist $\{\omega \in \Omega \mid \limsup X_n \in A\} = \Omega$ und $P(\limsup X_n \in A) = 1$. Genauso gilt für alle $n \in \mathbb{N}$, unabhängig von der Wahl von $\omega \in \Omega$, dass $X_n \in A$, sodass $\omega \in \limsup \{X_n \in A\}$ für alle $\omega \in \Omega$ gilt. Hiermit ist $P(\limsup \{X_n \in A\}) = P(\Omega) = 1$. Schließlich gilt unabhängig von der Wahl von $n \in \mathbb{N}$, dass $P(\{\omega \in \Omega \mid X_n \in A\}) = 1$, sodass $\limsup P(X_n \in A) = 1$.

Als Gegenbeispiel zu Punkt 3 können wir Aufgabe 4 von Blatt 4 wählen, wo X_n stochastisch, aber nicht fast sicher konvergierte. Sei $A = B_\varepsilon(0)$, dann ist $\limsup_{n \rightarrow \infty} P(X_n \in A) = 1$, ich finde jedoch immer ein $n \in \mathbb{N}$, sodass $X_n > \varepsilon$, wodurch $\limsup X_n \notin A$ und somit $P(\limsup X_n \in A) < 1$.

Es fehlen noch Gegenbeispiele zu Punkt 1. und Punkt 2.

B5A5 Sei X_1, X_2, \dots eine Folge von reellwertigen Zufallsvariablen auf einem Wahrscheinlichkeitsraum (Ω, \mathcal{F}, P) , $\mathcal{F}_n := \sigma(X_n)$ für alle n und $S_n := \sum_{k=1}^n X_k$. Zeigen Sie oder widerlegen Sie durch ein Gegenbeispiel, dass die folgenden Ereignisse terminale Ereignisse sind, also in der terminalen σ -Algebra liegen.

1. $\{\omega \in \Omega \mid X_n(\omega) = 0\}$ für ein $n \in \mathbb{N}$,
2. $\{\omega \in \Omega \mid X_n(\omega) = 0 \text{ für ein } n \in \mathbb{N}\}$,
3. $\{\omega \in \Omega \mid X_n(\omega) = 0 \text{ für endlich viele } n \in \mathbb{N}\}$,
4. $\{\omega \in \Omega \mid S_n(\omega) = 0 \text{ für endlich viele } n \in \mathbb{N}\}$,
5. $\{\omega \in \Omega \mid (X_n(\omega))_n \text{ enthält eine monoton wachsende Teilfolge}\}$,
6. $\{\omega \in \Omega \mid \limsup S_n(\omega) > \liminf S_n(\omega)\}$.

Zumindest bei Punkt 1 bis Punkt 4 kann ich $X_n = 1$ wählen, damit die Ereignisse nicht terminal sein können.

Hier fehlt noch eine Aussage zu Punkt 5 und Punkt 6.