

ANALYSIS III

10. AUFGABENBLATT

Jendrik Stelzner

7. Januar 2014

Aufgabe 1. (Gegenbeispiele)

a)

Wir betrachten die Funktion $f : (0, 1) \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto 1/\sqrt{x}$. Diese ist auf jedem kompakten Teilintervall von $(0, 1)$ Riemann-integrierbar und $f = |f|$ ist auf $(0, 1)$ uneigentlich Riemann-integrierbar mit

$$\int_0^1 f(x) dx = \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{x}} dx = \lim_{s \downarrow 0} \int_s^1 \frac{1}{\sqrt{x}} dx = \lim_{s \downarrow 0} 2\sqrt{x} \Big|_{x=s}^1 = \lim_{s \downarrow 0} 2 - 2\sqrt{s} = 2.$$

Also ist f auf $(0, 1)$ auch Lebesgue-integrierbar, weshalb $f \in \mathcal{L}((0, 1))$. Es ist jedoch $f^2 \notin \mathcal{L}^2((0, 1))$: Für alle $x \in (0, 1)$ ist $|f(x)|^2 = f(x)^2 = 1/x$. Für die Funktionenfolge

$$h_n := \chi_{[1/n, 1]} f^2$$

gilt auf $(0, 1)$ überall $h_n \leq h_{n+1}$ für alle $n \in \mathbb{N}$ und $\lim_{n \rightarrow \infty} h_n = f^2$. Nach dem Satz über monotone Konvergenz ist also

$$\int_{(0,1)} |f|^2 d\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{(0,1)} h_n d\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{[1/n, 1]} h_n d\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{1/n}^1 \frac{1}{x} dx = \infty.$$

b)

Wir betrachten die Funktion $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto 1/(x + 1)$. Es ist $f \notin \mathcal{L}(\mathbb{R})$: Für die Funktionenfolge

$$f_n := \chi_{[-n, n]} f$$

ist auf \mathbb{R} überall $f_n \leq f_{n+1}$ für alle $n \in \mathbb{N}$ und $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n = f = |f|$. Daher ist nach dem Satz über monotone Konvergenz

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}} |f| d\lambda &= \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{\mathbb{R}} f_n d\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{[-n, n]} f_n d\lambda \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{-n}^n \frac{1}{x+1} dx = 2 \lim_{n \rightarrow \infty} \int_1^{n+1} \frac{1}{x} dx \\ &= 2 \int_1^{\infty} \frac{1}{x} dx = \infty. \end{aligned}$$

Es ist jedoch $f \in \mathcal{L}^2(\mathbb{R})$: Für die Funktionenfolge

$$h_n := \chi_{[-n,n]} f^2$$

ist auf \mathbb{R} überall $h_n \leq h_{n+1}$ für alle $n \in \mathbb{N}$ und $\lim_{n \rightarrow \infty} h_n = f^2 = |f|^2$. Also ist nach dem Satz über monotone Konvergenz

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}} f^2 d\lambda &= \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{\mathbb{R}} h_n d\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{[-n,n]} f^2 d\lambda \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{-n}^n \frac{1}{(x+1)^2} dx = 2 \lim_{n \rightarrow \infty} \int_1^{n+1} \frac{1}{x^2} dx \\ &= 2 \int_1^\infty \frac{1}{x^2} dx < \infty. \end{aligned}$$

Aufgabe 2. (Noch mehr Konvergenz)

a)

Angenommen, es ist $f_n \rightarrow f$ im Maß. Dann ist offenbar auch $f_{n_j} \rightarrow f$ im Maß für jede Teilfolge n_j . Daher gibt es für jede Teilfolge n_j eine Teilfolge j_k so dass $f_{n_{j_k}} \rightarrow f$ punktweise für μ -fast alle $x \in \Omega$.

Die zu zeigende Umkehrung gilt im Allgemeinen nicht: Man betrachte etwa den Maßraum $(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}), \lambda)$ und die Funktionenfolge $f_n = \chi_{[n, \infty)}$ auf \mathbb{R} . Es ist $f_n \rightarrow 0$ punktweise, also ist auch $f_{n_{j_k}} \rightarrow 0$ punktweise für alle Teilfolgen n_j und j_k . Es ist jedoch nicht $f_n \rightarrow f$ im Maß. Die Implikation gilt jedoch für endliche Maßräume, weshalb wir die Implikation unter der zusätzlichen Annahme $\mu(\Omega) < \infty$ zeigen.

Angenommen, es ist nicht $f_n \rightarrow f$ im Maß. Dann gibt es ein $\delta > 0$, so dass

$$\mu(\{x \in \Omega : |f_n(x) - f(x)| \geq \delta\}) \not\rightarrow 0 \text{ für } n \rightarrow \infty.$$

Also gibt es ein $\varepsilon > 0$ und Teilfolge n_j so dass

$$\mu(\{x \in \Omega : |f_{n_j}(x) - f(x)| \geq \delta\}) \geq \varepsilon \text{ für alle } j \in \mathbb{N}. \quad (1)$$

Es gibt daher keine Teilfolge j_k mit $f_{n_{j_k}} \rightarrow f$ punktweise fast überall: Sonst gebe es wegen $\mu(\Omega) < \infty$ nämlich eine Teilfolge k_l mit $f_{n_{j_{k_l}}} \rightarrow f$ im Maß, also insbesondere

$$\lim_{l \rightarrow \infty} \mu \left(\left\{ x \in \Omega : |f_{n_{j_{k_l}}}(x) - f(x)| \geq \delta \right\} \right) = 0,$$

was im Widerspruch zu (1) steht.

b)

Es sei

$$A := \{x \in \Omega : f_n(x) \not\rightarrow f(x) \text{ für } n \rightarrow \infty\}$$

und für alle $\varepsilon > 0$ und $k \in \mathbb{N}$ sei

$$A_{\varepsilon,k} := \{x \in \Omega : |f_k(x) - f(x)| \geq \varepsilon\}.$$

Offenbar ist $A_{\varepsilon,k} \in \mathcal{A}$ für alle $k \in \mathbb{N}$ und $\varepsilon > 0$. Daher ist auch

$$\begin{aligned} A &= \{x \in \Omega : \text{es gibt } \varepsilon > 0 \text{ mit } |f_n(x) - f(x)| \geq \varepsilon \text{ für unendlich viele } n \in \mathbb{N}\} \\ &= \bigcup_{n \geq 1} \bigcap_{m \in \mathbb{N}} \bigcup_{k \geq m} A_{1/n,k} \in \mathcal{A}. \end{aligned}$$

Für alle $\varepsilon > 0$ und $k \in \mathbb{N}$ ist nach der Tschebyschow-Ungleichung

$$\mu(A_{\varepsilon,k}) = \mu(\{x \in \Omega : |f_k(x) - f(x)| \geq \varepsilon\}) \leq \frac{1}{\varepsilon} \int_{\Omega} |f_k - f| d\mu.$$

Daher ist für alle $\varepsilon > 0$ und $m \in \mathbb{N}$

$$\mu \left(\bigcup_{k \geq m} A_{\varepsilon,k} \right) \leq \sum_{k \geq m} \mu(A_{\varepsilon,k}) \leq \frac{1}{\varepsilon} \sum_{k \geq m} \int_{\Omega} |f_k - f| d\mu. \quad (2)$$

Da $\sum_{n \in \mathbb{N}} \int_{\Omega} |f_n - f| d\mu < \infty$ ist

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{k \geq m} \int_{\Omega} |f_k - f| d\mu = 0.$$

Zusammen mit (2) folgt damit, dass für alle $\varepsilon > 0$

$$\mu \left(\bigcap_{m=0}^{\infty} \bigcup_{k \geq m} A_{\varepsilon,k} \right) = \lim_{m \rightarrow \infty} \mu \left(\bigcup_{k \geq m} A_{\varepsilon,k} \right) = 0,$$

denn es ist klar, dass es sich bei $(\bigcup_{k \geq m} A_{\varepsilon,k})_{m \in \mathbb{N}}$ um eine fallende Folge handelt, und es ist $\mu(\bigcup_{k \geq m} A_{\varepsilon,k}) < \infty$ für m groß genug. Also ist

$$\mu(A) = \mu \left(\bigcup_{n \geq 1} \bigcap_{m=0}^{\infty} \bigcup_{k \geq m} A_{1/n,k} \right) \leq \sum_{n \geq 1} \mu \left(\bigcap_{m=0}^{\infty} \bigcup_{k \geq m} A_{1/n,k} \right) = \sum_{n \geq 1} 0 = 0.$$

Daher ist $\mu(A) = 0$. Da nach Definition $f_n(x) \rightarrow f(x)$ für alle $x \in A^c$ konvergiert also $f_n \rightarrow f$ punktweise μ -fast überall.

Aufgabe 3. ($\|f\|_{\infty}$ als Grenzwert von $\|f\|_p$)

Angenommen, es ist $f \in \mathcal{L}^{\infty}(\Omega, \mathcal{A}, \mu)$. Dann ist für alle $p \in [1, \infty)$

$$\int_{\Omega} |f|^p d\mu \leq \int_{\Omega} \|f\|_{\infty}^p = \mu(\Omega) \|f\|_{\infty}^p < \infty,$$

da $|f(x)| \leq \|f\|_{\infty}$ für μ -fast alle $x \in \Omega$, und damit $f \in \mathcal{L}^p(\Omega, \mathcal{A}, \mu)$. Da für alle $p \in [1, \infty)$

$$\|f\|_p = \left(\int_{\Omega} |f|^p d\mu \right)^{1/p} \leq \mu(\Omega)^{1/p} \|f\|_{\infty} \leq \max\{1, \mu(\Omega)\} \|f\|_{\infty} \quad (3)$$

ist

$$\sup_{p \in [1, \infty)} \|f\|_p \leq \max\{1, \mu(\Omega)\} \|f\|_{\infty} < \infty.$$

Angenommen, es ist $f \in \mathcal{L}^p(\Omega, \mathcal{A}, \mu)$ für alle $p \in [1, \infty)$ und $\sup_{p \in [1, \infty)} \|f\|_p < \infty$. Für $M := \sup_{p \in [1, \infty)} \|f\|_p$ ist wegen der Tschebyschow-Ungleichung für alle $p \in [1, \infty)$

$$\begin{aligned}\mu(\{x \in \Omega : |f(x)| \geq M+1\}) &= \mu(\{x \in \Omega : |f(x)|^p \geq (M+1)^p\}) \\ &\leq \frac{1}{(M+1)^p} \int_{\Omega} |f|^p d\mu = \left(\frac{\|f\|_p}{M+1}\right)^p \leq \left(\frac{M}{M+1}\right)^p.\end{aligned}$$

Da $0 \leq M/(M+1) < 1$ folgt damit, dass

$$\mu(\{x \in \Omega : |f(x)| \geq M+1\}) \leq \lim_{p \rightarrow \infty} \left(\frac{M}{M+1}\right)^p = 0,$$

also

$$\mu(\{x \in \Omega : |f(x)| \geq M+1\}) = 0.$$

Es ist daher $f \in \mathcal{L}^\infty(\Omega, \mathcal{A}, \mu)$.

Wir zeigen nun, dass unter den obigen Bedingungen

$$\lim_{p \rightarrow \infty} \|f\|_p = \|f\|_\infty.$$

Ist $f(x) = 0$ für μ -fast alle $x \in \Omega$, also $\|f\|_p = 0$ für ein $p \in [1, \infty]$, und damit auch $\|f\|_p = 0$ für alle $p \in [1, \infty]$, so ist nichts weiter zu zeigen. Es wird daher im Folgenden davon ausgegangen, dass nicht $f(x) = 0$ für μ -fast alle $x \in \Omega$. Insbesondere ist dann auch $\mu(\Omega) > 0$.

Aus diesen Annahmen folgt, dass $\|f\|_\infty > 0$. Sei $\|f\|_\infty > \varepsilon > 0$ beliebig aber fest, und

$$A := \{x \in \Omega : |f(x)| \geq \|f\|_\infty - \varepsilon\}.$$

Nach Definition von $\|f\|_\infty$ und ε ist $\mu(A) > 0$. Für alle $p \in [1, \infty)$ ist

$$\begin{aligned}\|f\|_p &= \left(\int_{\Omega} |f|^p d\mu\right)^{1/p} \geq \left(\int_A |f|^p d\mu\right)^{1/p} \\ &\geq \left(\int_A (\|f\|_\infty - \varepsilon)^p d\mu\right)^{1/p} = \mu(A)^{1/p}(\|f\|_\infty - \varepsilon),\end{aligned}$$

und deshalb

$$\liminf_{p \rightarrow \infty} \|f\|_p \geq \liminf_{p \rightarrow \infty} \mu(A)^{1/p}(\|f\|_\infty - \varepsilon) = \|f\|_\infty - \varepsilon.$$

Aus der Beliebigkeit von $0 < \varepsilon < \|f\|_\infty$ folgt damit, dass

$$\liminf_{p \rightarrow \infty} \|f\|_p \geq \|f\|_\infty.$$

Andererseits folgt aus (3), dass

$$\limsup_{p \rightarrow \infty} \|f\|_p \leq \limsup_{p \rightarrow \infty} \mu(\Omega)^{1/p} \|f\|_\infty = \|f\|_\infty.$$

Es ist also

$$\|f\|_\infty \leq \liminf_{p \rightarrow \infty} \|f\|_p \leq \limsup_{p \rightarrow \infty} \|f\|_p \leq \|f\|_\infty,$$

und deshalb

$$\lim_{p \rightarrow \infty} \|f\|_p = \|f\|_\infty.$$

Aufgabe 4.

Lemma 1. Sei $(\Omega, \mathcal{A}, \mu)$ ein Maßraum und $f \in \mathcal{L}^p(\Omega, \mathcal{A}, \mu)$ für $p \in [1, \infty]$. Für alle $\alpha \in [1, p]$, mit $\alpha \neq \infty$ falls $p = \infty$, ist $|f|^\alpha \in \mathcal{L}^{p/\alpha}(\Omega, \mathcal{A}, \mu)$ mit $\| |f|^\alpha \|_{p/\alpha} = \|f\|_p^\alpha$.

Beweis. Ist $p = \infty$, so ist für alle $M \geq 0$

$$\{x \in \Omega : |f(x)| \leq M\} = \{x \in \Omega : |f(x)|^\alpha \leq M^\alpha\}.$$

Daher ist auch $|f|^\alpha \in \mathcal{L}^\infty(\Omega, \mathcal{A}, \mu)$ und $\| |f|^\alpha \|_\infty = \|f\|_\infty^\alpha$. Ist $p < \infty$, so ist

$$\int_{\Omega} (|f|^\alpha)^{p/\alpha} d\mu = \int_{\Omega} |f|^\alpha d\mu < \infty,$$

also $|f|^\alpha \in \mathcal{L}^{p/\alpha}(\Omega, \mathcal{A}, \mu)$, und

$$\| |f|^\alpha \|_{p/\alpha} = \left(\int_{\Omega} (|f|^\alpha)^{p/\alpha} d\mu \right)^{\alpha/p} = \left(\int_{\Omega} |f|^p d\mu \right)^{\alpha/p} = \|f\|_p^\alpha.$$

□

a)

Für $p = q$ ist nichts zu zeigen, weshalb im Folgenden nur der Fall $p < q$ betrachtet wird. Ist $q = \infty$, so ergeben sich die Aussagen direkt aus **Aufgabe 3**, und aus (3) insbesondere die Ungleichung $\|f\|_p \leq C\|f\|_q$ mit $C = \max\{\mu(\Omega), 1\}$. Daher wird im Folgenden nur der Fall $p < q < \infty$ betrachtet.

Sei $f \in \mathcal{L}^q(\Omega, \mathcal{A}, \mu)$. Nach Lemma 1 ist $|f|^p \in \mathcal{L}^{q/p}(\Omega, \mathcal{A}, \mu)$ mit $\| |f|^p \|_{q/p} = \|f\|_q^p$. Da $\mu(\Omega) < \infty$ ist $1 \in \mathcal{L}^{1/(1-p/q)}(\Omega, \mathcal{A}, \mu)$ mit

$$\|1\|_{1/(1-p/q)} = \left(\int_{\Omega} 1^{1/(1-p/q)} d\mu \right)^{1-p/q} = \left(\int_{\Omega} 1 d\mu \right)^{1-p/q} = \mu(\Omega)^{1-p/q}$$

Nach der Hölder-Ungleichung ist daher

$$\int_{\Omega} |f|^p d\mu = \int_{\Omega} 1 \cdot |f|^p \leq \|1\|_{1/(1-p/q)} \| |f|^p \|_{q/p} = \mu(\Omega)^{1-p/q} \|f\|_q^p.$$

Also ist $f \in \mathcal{L}^p(\Omega, \mathcal{A}, \mu)$ mit

$$\|f\|_p \leq \mu(\Omega)^{1/p-1/q} \|f\|_q.$$

b)

Sei $f \in \mathcal{L}^1(\Omega, \mathcal{A}, \mu) \cap \mathcal{L}^\infty(\Omega, \mathcal{A}, \mu)$ und $p \in [1, \infty)$ beliebig aber fest. Für den Fall $p = 1$ ist nichts zu zeigen, weshalb im Folgenden nur der Fall $1 < p$ betrachtet wird. Da $f \in \mathcal{L}^\infty(\Omega, \mathcal{A}, \mu)$ ist nach Lemma 1 auch $|f|^{p-1} \in \mathcal{L}^\infty(\Omega, \mathcal{A}, \mu)$ mit $\|f^{p-1}\|_\infty = \|f\|_\infty^{p-1}$. Da $f \in \mathcal{L}^1(\Omega, \mathcal{A}, \mu)$ ist daher nach der Hölder-Ungleichung

$$\int_{\Omega} |f|^p d\mu = \int_{\Omega} |f| \cdot |f|^{p-1} d\mu \leq \|f\|_1 \|f^{p-1}\|_\infty = \|f\|_1 \|f\|_\infty^{p-1}.$$

Es ist daher $f \in \mathcal{L}^p(\Omega, \mathcal{A}, \mu)$ und

$$\|f\|_p = \left(\int_{\Omega} |f|^p d\mu \right)^{1/p} \leq \|f\|_1^{1/p} \|f\|_\infty^{(p-1)/p}.$$

c)

Ist $p = q$, so ist zwangsweise auch $r = p = q$ und die Aussagen gelten offenbar; auch wenn $p < q$ und $r = p$ oder $r = q$ sind sie offensichtlich. Es wird daher im Folgenden nur der Fall $p < r < q$ betrachtet.

Wir bemerken direkt, dass es in diesem Fall ein eindeutiges $\theta \in [0, 1]$ mit $1/r = (1 - \theta)/p + \theta/q$ gibt, wobei $\theta \in (0, 1)$, da die Abbildung $[0, 1] \rightarrow [1/q, 1/p]$, $\theta \mapsto (1 - \theta)/p + \theta/q$ eine Bijektion ist.

Da $f \in \mathcal{L}^p(\Omega, \mathcal{A}, \mu)$ und $f \in \mathcal{L}^q(\Omega, \mathcal{A}, \mu)$ ist nach Lemma 1 sowohl

$$|f|^{r(1-\theta)} \in \mathcal{L}^{p/(r(1-\theta))}(\Omega, \mathcal{A}, \mu) \text{ mit } \| |f|^{r(1-\theta)} \|_{p/(r(1-\theta))} = \| f \|_p^{r(1-\theta)}$$

als auch

$$|f|^{r\theta} \in \mathcal{L}^{q/(r\theta)}(\Omega, \mathcal{A}, \mu) \text{ mit } \| f^{r\theta} \|_{q/(r\theta)} = \| f \|_q^{r\theta}.$$

Da

$$\frac{r(1-\theta)}{p} + \frac{r\theta}{q} = r \left(\frac{1-\theta}{p} + \frac{\theta}{q} \right) = 1$$

ist nach der Hölderungleichung

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} |f|^r d\mu &= \int_{\Omega} |f|^{r(1-\theta)} |f|^{r\theta} d\mu \leq \| |f|^{r(1-\theta)} \|_{p/(r(1-\theta))} \| f^{r\theta} \|_{q/(r\theta)} \\ &= \| f \|_p^{r(1-\theta)} \| f \|_q^{r\theta}. \end{aligned}$$

Es ist also $f \in \mathcal{L}^r(\Omega, \mathcal{A}, \mu)$ mit

$$\| f \|_r = \left(\int_{\Omega} |f|^r \right)^{1/r} \leq \| f \|_p^{1-\theta} \| f \|_q^\theta.$$