

§ 4 Konstruktion des Lebesgueintegrals

In diesem Paragraphen sei $\emptyset \neq X \in \mathfrak{B}_d$. Wir schreiben außerdem λ statt λ_d .

Definition

Sei $f : X \rightarrow [0, \infty)$ eine einfache Funktion mit der Normalform $f = \sum_{j=1}^m y_j \mathbb{1}_{A_j}$. Das **Lebesgueintegral** von f ist definiert durch:

$$\int_X f(x) \, dx := \sum_{j=1}^m y_j \lambda(A_j)$$

Satz 4.1

Sei $f : X \rightarrow [0, \infty)$ einfach, $z_1, \dots, z_k \in [0, \infty)$ und $B_1, \dots, B_k \in \mathfrak{B}(X)$ mit $\bigcup B_j = X$ und $f = \sum_{j=1}^k z_j \mathbb{1}_{B_j}$. Dann gilt:

$$\int_X f(x) \, dx = \sum_{j=1}^k z_j \lambda(B_j)$$

Beweis

In der großen Übung. ■

Satz 4.2

Seien $f, g : X \rightarrow [0, \infty)$ einfach, $\alpha, \beta \in [0, \infty)$ und $A \in \mathfrak{B}(X)$.

- (1) $\int_X \mathbb{1}_A(x) \, dx = \lambda(A)$
- (2) $\int_X (\alpha f + \beta g)(x) \, dx = \alpha \int_X f(x) \, dx + \beta \int_X g(x) \, dx$
- (3) Ist $f \leq g$ auf X , so ist $\int_X f(x) \, dx \leq \int_X g(x) \, dx$.

Beweis

- (1) Folgt aus der Definition und 4.1.
- (2) Es seien $f = \sum_{j=1}^m y_j \mathbb{1}_{A_j}$ und $g = \sum_{j=1}^k z_j \mathbb{1}_{B_j}$ die Normalformen von f und g . Dann gilt:

$$\alpha f + \beta g = \sum_{j=1}^m \alpha y_j \mathbb{1}_{A_j} + \sum_{j=1}^k \beta z_j \mathbb{1}_{B_j}$$

4. Konstruktion des Lebesgueintegrals

Dann gilt:

$$\begin{aligned} \int_X (\alpha f + \beta g) &\stackrel{4.1}{=} \sum_{j=1}^m \alpha y_j \lambda(A_j) + \sum_{j=1}^k \beta z_j \lambda(B_j) \\ &= \alpha \sum_{j=1}^m y_j \lambda(A_j) + \beta \sum_{j=1}^k z_j \lambda(B_j) \\ &= \alpha \int_X f(x) \, dx + \beta \int_X g(x) \, dx \end{aligned}$$

- (3) Definiere $h := g - f$. Dann ist $h \geq 0$ und einfach. Sei $h = \sum_{j=1}^m x_j \mathbb{1}_{C_j}$ die Normalform von h , d.h. $x_1, \dots, x_m \geq 0$. Dann gilt:

$$\int_X h(x) \, dx = \sum_{j=1}^m x_j \lambda(C_j) \geq 0$$

Also folgt aus $g = f + h$ und (2):

$$\int_X g(x) \, dx = \int_X f(x) \, dx + \int_X h(x) \, dx \geq \int_X f(x) \, dx \quad \blacksquare$$

Definition

Sei $f : X \rightarrow [0, \infty]$ messbar. (f_n) sei eine für f zulässige Folge. Das **Lebesgueintegral** von f ist definiert als:

$$\int_X f(x) \, dx := \lim_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n(x) \, dx \quad (*)$$

Bemerkung:

- (1) In 4.3 werden wir sehen, dass $(*)$ unabhängig ist von der Wahl der für f zulässigen Folge (f_n) .
- (2) $(f_n(x))$ ist wachsend für alle $x \in X$, d.h.:

$$f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = (\sup_{n \in \mathbb{N}} f_n)(x)$$

- (3) Aus 4.2(3) folgt dass $(\int_X f_n(x) \, dx)$ wachsend ist, d.h.:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n(x) \, dx = \sup \left\{ \int_X f_n(x) \, dx \mid n \in \mathbb{N} \right\} = \int_X f(x) \, dx$$

Bezeichnung:

Für messbare Funktionen $f : X \rightarrow [0, \infty]$ definiere

$$M(f) := \left\{ \int_X g \, dx \mid g : X \rightarrow [0, \infty) \text{ einfach und } g \leq f \text{ auf } X \right\}$$

Satz 4.3

Ist $f : X \rightarrow [0, \infty]$ messbar und (f_n) zulässig für f , so gilt:

$$L := \lim_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n \, dx = \sup M(f)$$

Insbesondere ist $\int_X f(x) \, dx$ wohldefiniert.

Folgerungen 4.4

Ist $f : X \rightarrow [0, \infty]$ messbar, so ist $\int_X f(x) \, dx = \sup M(f)$.

Beweis

Sei $\int_X f_n \, dx \in M(f) \forall n \in \mathbb{N}$. Dann ist

$$L = \sup \left\{ \int_X f_n \, dx \mid n \in \mathbb{N} \right\} \leq \sup M(f)$$

Sei nun g einfach und $0 \leq g \leq f$. Sei weiter

$$g = \sum_{j=1}^m y_j \mathbb{1}_{A_j}$$

die Normalform von g .

Sei $\alpha > 1$ und $B_n := \{\alpha f_n \geq g\}$. Dann ist

$$B_n \in \mathfrak{B}(X) \text{ und } (B_n \subseteq B_{n+1}, \text{ sowie } \mathbb{1}_{B_n} g \leq \alpha f_n).$$

Sei $x \in X$.

Fall 1: Ist $f(x) = 0$, so ist wegen $0 \leq g \leq f$ auch $g(x) = 0$. Somit ist $x \in B_n$ für jedes $n \in \mathbb{N}$.

Fall 2: Ist $f(x) > 0$, so ist

$$\frac{1}{\alpha} g(x) < f(x)$$

(Dies ist klar für $g(x) = 0$ und falls gilt: $g(x) > 0$, so ist $\frac{1}{\alpha} g(x) < g(x) \leq f(x)$.)

Da f_n zulässig für f ist, gilt: $f_n(x) \rightarrow f(x)$ ($n \rightarrow \infty$), weshalb ein $n(x) \in \mathbb{N}$ existiert mit:

$$\frac{1}{\alpha} g(x) < f(x) \text{ für jedes } n \geq n(x)$$

Es folgt $x \in B_n$ für jedes $n \geq n(x)$.

Fazit: $X = \bigcup B_n$.

$$A_j = A_j \cap X = A_j \cap \left(\bigcup B_n \right) = \bigcup (A_j \cap B_n) \text{ und } A_j \cap B_n \subseteq A_j \cap B_{n+1}$$

Aus 1.7 folgt $\lambda(A_j) = \lim_{n \rightarrow \infty} \lambda(A_j \cap B_n)$. Das liefert:

$$\begin{aligned} \int_X g \, dx &= \sum_{j=1}^m y_j \lambda(A_j) = \sum_{j=1}^m y_j \lim_{n \rightarrow \infty} \lambda(A_j \cap B_n) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^m y_j \lambda(A_j \cap B_n) \stackrel{4.1}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \int_X \mathbb{1}_{B_n} g \, dx \\ &\leq \lim_{n \rightarrow \infty} \int_X \alpha f_n \, dx = \alpha L \end{aligned}$$

4. Konstruktion des Lebesgueintegrals

g war einfach und $0 \leq g \leq f$ beliebig, sodass

$$\sup M(f) \leq \alpha L \xrightarrow{\alpha \rightarrow 1} \sup M(f) \leq L \quad \blacksquare$$

Satz 4.5

Seien $f, g : X \rightarrow [0, \infty]$ messbar und $\alpha, \beta \geq 0$.

- (1) $\int_X (\alpha f + \beta g)(x) \, dx = \alpha \int_X f(x) \, dx + \beta \int_X g(x) \, dx$
- (2) Ist $f \leq g$ auf X , so gilt $\int_X f(x) \, dx \leq \int_X g(x) \, dx$
- (3) $\int_X f(x) \, dx = 0 \iff \lambda(\{f > 0\}) = 0$

Beweis

- (1) (f_n) und (g_n) seien zulässig für f bzw. g . Weiter sei $(h_n) := \alpha(f_n) + \beta(g_n)$. Dann ist wegen 3.7 und $\alpha, \beta \geq 0$, dass (h_n) zulässig für $\alpha f + \beta g$ ist. Dann:

$$\begin{aligned} \int_X (\alpha f + \beta g) \, dx &= \lim_{n \rightarrow \infty} \int_X (\alpha f_n + \beta g_n) \, dx \\ &\stackrel{4.2}{=} \alpha \lim_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n \, dx + \beta \lim_{n \rightarrow \infty} \int_X g_n \, dx \\ &= \alpha \int_X f \, dx + \beta \int_X g \, dx \end{aligned}$$

- (2) Wegen $f \leq g$ auf X ist $M(f) \subseteq M(g)$ und somit auch $\sup M(f) \leq \sup M(g)$. Aus 4.4 folgt nun die Behauptung.

- (3) Setze $A := \{f > 0\} = \{x \in X : f(x) > 0\}$.

“ \implies ” Sei $\int_X f \, dx = 0$ und $A_n := \{f > \frac{1}{n}\}$. Dann ist $A = \bigcup A_n$ und $f \geq \frac{1}{n} \mathbb{1}_{A_n}$. Damit folgt:

$$0 = \int_X f \, dx \stackrel{(2)}{\geq} \int_X \frac{1}{n} \mathbb{1}_{A_n} \, dx = \frac{1}{n} \lambda(A_n)$$

Es ist also $\lambda(A_n) = 0$ und damit gilt weiter

$$\lambda(A) = \lambda\left(\bigcup A_n\right) \stackrel{1.7}{\leq} \sum \lambda(A_n) = 0$$

Also ist auch $\lambda(A) = 0$.

“ \impliedby ” Sei $\lambda(A) = 0$, (f_n) zulässig für f und $c_n := \max\{f_n(x) : x \in X\}$. Dann ist $f_n \leq c_n \mathbb{1}_A$ und es gilt:

$$0 \leq \int_X f_n \, dx \stackrel{(2)}{\leq} \int_X c_n \mathbb{1}_A \, dx = c_n \lambda(A) \stackrel{\text{Vor.}}{=} 0$$

Es ist also $\int_X f_n \, dx = 0$ für jedes $n \in \mathbb{N}$ und somit auch $\int_X f \, dx = 0$ ■

Satz 4.6 (Satz von Beppo Levi (Version I))

Sei (f_n) eine Folge messbarer Funktionen $f_n : X \rightarrow [0, \infty]$ und es gelte $f_n \leq f_{n+1}$ auf X für jedes $n \in \mathbb{N}$.

- (1) Für alle $x \in X$ existiert $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$.
- (2) Die Funktion $f : X \rightarrow [0, \infty]$ definiert durch:

$$f(x) := \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$$

ist messbar.

$$(3) \quad \int_X \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) \, dx = \int_X f(x) \, dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n(x) \, dx$$

Beweis

- (1) Für alle $x \in X$ ist $(f_n(x))$ wachsend, also konvergent in $[0, +\infty]$.
- (2) folgt aus 3.5.
- (3) Sei $(u_j^{(n)})_{j \in \mathbb{N}}$ zulässig für f_n und $v_j := \max \{u_j^{(1)}, u_j^{(2)}, \dots, u_j^{(j)}\}$. Aus 3.7 folgt, dass v_j einfach ist und aus der Konstruktion lässt sich nachrechnen, dass gilt:

$$0 \leq v_j \leq v_{j+1} \text{ und } v_j \leq f_n \leq f \text{ und } f_n = \sup_{j \in \mathbb{N}} u_j^{(n)} \leq \sup_{j \in \mathbb{N}} v_j \text{ (auf } X)$$

Damit ist (v_j) zulässig für f und es gilt:

$$\int_X f \, dx = \lim_{j \rightarrow \infty} \int_X v_j \, dx \leq \lim_{j \rightarrow \infty} \int_X f_j \, dx \leq \int_X f \, dx \quad \blacksquare$$

Satz 4.7 (Satz von Beppo Levi (Version II))

Sei (f_n) eine Folge messbarer Funktionen $f_n : X \rightarrow [0, \infty]$.

- (1) Für alle $x \in X$ existiert $s(x) := \sum_{j=1}^{\infty} f_j(x)$.
- (2) $s : X \rightarrow [0, \infty]$ ist messbar.
- (3) $\int_X \sum_{j=1}^{\infty} f_j(x) \, dx = \sum_{j=1}^{\infty} \int_X f_j(x) \, dx$

Beweis

Setze

$$s_n := \sum_{j=1}^n f_j$$

Dann erfüllt (s_n) die Voraussetzungen von 4.6. Aus 4.6 und 4.5(1) folgt die Behauptung. ■

Satz 4.8

Sei $f : X \rightarrow [0, \infty]$ messbar und es sei $\emptyset \neq Y \in \mathfrak{B}(X)$ (also $Y \subseteq X$ und $Y \in \mathfrak{B}_d$). Dann sind die Funktionen $f|_Y : Y \rightarrow [0, \infty]$ und $\mathbb{1}_Y \cdot f : X \rightarrow [0, \infty]$ messbar und es gilt:

$$\int_Y f(x) \, dx := \int_Y f|_Y(x) \, dx = \int_X (\mathbb{1}_Y \cdot f)(x) \, dx$$

Beweis

Fall 1: Die Behauptung ist klar, falls f einfach ist. (Übung!)

Fall 2: Sei (f_n) zulässig für f und $g_n := f_n|_Y, h_n := \mathbb{1}_Y f_n$. Dann ist (g_n) zulässig für $f|_Y$ und (h_n) ist zulässig für $\mathbb{1}_Y f_n$. Insbesondere sind $f_n|_Y$ und $\mathbb{1}_Y f_n$ nach 3.5 messbar. Weiter gilt:

$$\int_Y f|_Y \, dx \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \int_Y g_n \, dx \stackrel{\text{Fall 1}}{=} \int_X h_n \, dx \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \int_X \mathbb{1}_Y f \, dx \quad \blacksquare$$

Definition

Sei $f : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ messbar. f heißt (Lebesgue-) **integrierbar** (über X), genau dann wenn $\int_X f_+(x) \, dx < \infty$ und $\int_X f_-(x) \, dx < \infty$.

In diesem Fall heißt:

$$\int_X f(x) \, dx := \int_X f_+(x) \, dx - \int_X f_-(x) \, dx$$

das (Lebesgue-) **Integral** von f (über X).

Beachte:

Ist $f : X \rightarrow [0, \infty]$ messbar, so ist f genau dann integrierbar, wenn gilt:

$$\int_X f(x) \, dx < \infty$$

Beispiel

Sei $X \in \mathfrak{B}_1$, $f(x) := \begin{cases} 1 & , x \in X \cap \mathbb{Q} \\ 0 & , x \in X \setminus \mathbb{Q} \end{cases} = \mathbb{1}_{X \cap \mathbb{Q}}$. $X, \mathbb{Q} \in \mathfrak{B}_1 \implies X \cap \mathbb{Q} \in \mathfrak{B}_1 \implies f$ ist messbar.

$$0 \leq \int_X f(x) \, dx = \int_X \mathbb{1}_{X \cap \mathbb{Q}} \, dx = \lambda(X \cap \mathbb{Q}) \leq \lambda(\mathbb{Q}) = 0$$

Das heißt: $f \in \mathfrak{L}^1(X)$, $\int_X f \, dx = 0$. Ist speziell $X = [a, b]$ ($a < b$), so gilt: $f \in \mathfrak{L}^1([a, b])$, aber $f \notin R([a, b])$.

Satz 4.9 (Charakterisierung der Integrierbarkeit)

Sei $f : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ messbar. Die folgenden Aussagen sind äquivalent:

- (1) f ist integrierbar.
- (2) Es existieren integrierbare Funktionen $u, v : X \rightarrow [0, +\infty]$ mit $u(x) = v(x) = \infty$ für kein $x \in X$ und $f = u - v$ auf X .
- (3) Es existiert eine integrierbare Funktion $g : X \rightarrow [0, +\infty]$ mit $|f| \leq g$ auf X .
- (4) $|f|$ ist integrierbar.

Zusatz:

(1) $\mathfrak{L}^1(X) = \{f : X \rightarrow \mathbb{R} \mid f \text{ ist messbar und } \int_X |f| \, dx < \infty\}$ (folgt aus (1)-(4)).

(2) Sind u, v wie in (2), so gilt: $\int_X f \, dx = \int_X u \, dx - \int_X v \, dx$.

Beweis (des Satzes)

(1) \Rightarrow (2) $u := f_+, v := f_-$.

(2) \Rightarrow (3) $g := u + v$, dann ist $u, v \geq 0, g \geq 0, \int_X g \, dx \stackrel{4.5}{=} \int_X u \, dx + \int_X v \, dx < \infty. \Rightarrow g$ ist integrierbar und: $|f| = |u - v| \leq |u| + |v| = u + v = g$ auf X .

(3) \Rightarrow (4) **4.5** $\Rightarrow \int_X |f| \, dx \leq \int_X g \, dx < \infty \Rightarrow f$ ist integrierbar.

(4) \Rightarrow (1) $f_+, f_- \leq |f|$ auf $X. \Rightarrow 0 \leq \int_X f_{\pm} \, dx \leq \int_X |f| \, dx < \infty \stackrel{Def.}{\Rightarrow} f$ ist integrierbar. \blacksquare

Beweis (des Zusatzes)

(1) \checkmark

(2) Es ist $f = u - v = f_+ - f_- \Rightarrow u + f_- = f_+ + v$.

$$\begin{aligned} \Rightarrow \int_X u \, dx + \int_X f_- \, dx &\stackrel{4.5}{=} \int_X (u + f_-) \, dx = \int_X (f_+ + v) \, dx \stackrel{4.5}{=} \int_X f_+ \, dx + \int_X v \, dx \\ &\Rightarrow \int_X u \, dx - \int_X v \, dx = \int_X f_+ \, dx - \int_X f_- \, dx \stackrel{Def.}{=} \int_X f \, dx. \end{aligned} \quad \blacksquare$$

Folgerungen 4.10

Sei $f : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ integrierbar und $N := \{|f| = +\infty\} = \{x \in X : |f(x)| = +\infty\}$. Dann ist $N \in \mathfrak{B}(X)$ und $\lambda(N) = 0$.

Beweis

3.4 $\Rightarrow N \in \mathfrak{B}(X). n\mathbb{1}_N \leq |f|$ für alle $n \in \mathbb{N}$. Dann:

$$n \cdot \lambda(N) = \int_X n\mathbb{1}_N \, dx \stackrel{4.5}{\leq} \int_X |f| \, dx \stackrel{4.9}{<} \infty \text{ für alle } n \in \mathbb{N}$$

Also: $0 \leq n\lambda(N) \leq \int_X |f| \, dx \quad \forall n \in \mathbb{N} \Rightarrow \lambda(N) = 0$ \blacksquare

Satz 4.11

$f, g : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ seien integrierbar und es sei $\alpha \in \mathbb{R}$.

(1) αf ist integrierbar und $\int_X (\alpha f) \, dx = \alpha \int_X f \, dx$.

(2) Ist $f + g : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ auf X definiert, so ist $f + g$ integrierbar und es gilt:

$$\int_X (f + g) \, dx = \int_X f \, dx + \int_X g \, dx$$

(Für $f = +\infty$ und $g = -\infty$ ist $f + g$ beispielsweise nicht definiert.)

(3) $\mathfrak{L}^1(X)$ ist ein reeller Vektorraum und die Abbildung $f \mapsto \int_X f \, dx$ ist linear auf $\mathfrak{L}^1(X)$.

- (4) $\max\{f, g\}$ und $\min\{f, g\}$ sind integrierbar.
- (5) Ist $f \leq g$ auf X , so ist $\int_X f \, dx \leq \int_X g \, dx$.
- (6) $|\int_X f \, dx| \leq \int_X |f| \, dx$. (Dreiecksungleichung für Integrale)
- (7) Sei $\emptyset \neq Y \in \mathfrak{B}(X)$. Dann sind die Funktionen $f|_Y : Y \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ und $\mathbf{1}_Y \cdot f : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ integrierbar und

$$\int_Y f(x) \, dx := \int_Y f|_Y(x) \, dx = \int_X (\mathbf{1}_Y \cdot f)(x) \, dx$$

- (8) Sei $\lambda(X) < \infty$ und $h : X \rightarrow \mathbb{R}$ sei messbar und beschränkt. Dann: $h \in \mathfrak{L}^1(X)$ und $|\int_X h \, dx| \leq \|h\|_\infty \lambda(X)$ (mit $\|h\|_\infty := \sup\{|h(x)| : x \in X\}$)

Beweis

- (1) folgt aus $\alpha f)_\pm = \alpha f_\pm$, falls $\alpha \geq 0$ und $\alpha f)_\pm = -\alpha f_\mp$, falls $\alpha < 0$.

- (2) Es gilt $f + g = \underbrace{f_+ + g_+}_{=:u} - \underbrace{(f_- + g_-)}_{=:v}$. Dann:

$$\int_X u \, dx = \int_X f_+ + g_+ \, dx \stackrel{4.5}{=} \int_X f_+ \, dx + \int_X g_+ \, dx < \infty$$

Genauso: $\int_X v \, dx < \infty$

Mit Satz 4.9 folgt: $f + g$ ist integrierbar. Weiter:

$$\begin{aligned} \int_X (f + g) \, dx &\stackrel{4.9}{=} \int_X u \, dx - \int_X v \, dx \\ &= \int_X f_+ \, dx + \int_X g_+ \, dx - \left(\int_X f_- \, dx + \int_X g_- \, dx \right) \\ &= \int_X f \, dx + \int_X g \, dx \end{aligned}$$

- (3) folgt aus (1) und (2).

- (4) Mit Satz 3.5 folgt: $\max\{f, g\}$ ist messbar. Es gilt:

$$0 \leq |\max\{f, g\}| \leq |f| + |g|$$

Mit 4.9 und Aussage (2) folgt $|f| + |g|$ ist integrierbar. Dann folgt mit Satz 4.9: $\max\{f, g\}$ ist integrierbar.

Analog zeigt man: $\min\{f, g\}$ ist integrierbar.

- (5) Nach Voraussetzung ist $f \leq g$ auf X . Dann gilt: $f_+ \leq g_+$ auf X und $f_- \geq g_-$ auf X . Es folgt:

$$\int_X f \, dx = \int_X f_+ \, dx - \int_X f_- \, dx \stackrel{4.5}{\leq} \int_X g_+ \, dx - \int_X g_- \, dx = \int_X g \, dx$$

- (6) Es ist $\pm f \leq |f|$. Mit Aussage (1) und (5) folgt: $\pm \int_X f \, dx = \int_X (\pm f) \, dx \leq \int_X |f| \, dx$.
Es ist $\int_X f \, dx = |\int_X f \, dx|$ oder $-\int_X f \, dx = |\int_X f \, dx|$

- (7) Mit Bemerkung (2) vor 3.1 und Satz 3.6.(2) folgt: $f|_Y$ und $\mathbb{1}_Y \cdot f$ sind messbar. Es gilt: $(f|_Y)_\pm = (f_\pm)|_Y$ und $(\mathbb{1}_Y \cdot f)_\pm = \mathbb{1} \cdot f_\pm$. Weiterhin gilt $0 \leq \mathbb{1}_Y f_\pm \leq f_\pm$. Mit 4.9 folgt dann, daß $\mathbb{1}_Y f_\pm$ integrierbar ist. Dann:

$$\begin{aligned} \int_X (\mathbb{1}_Y f) dx &= \int_X \mathbb{1} f_+ dx - \int_X \mathbb{1}_Y f dx \\ &= \underbrace{\int_Y (f_+)|_Y dx}_{<\infty} - \underbrace{\int_Y (f_-)|_Y dx}_{<\infty} \end{aligned}$$

Es folgt: $f|_Y$ ist integrierbar und $\int_Y f|_Y dx = \int_Y (f_+)|_Y dx - \int_Y (f_-)|_Y dx = \int_X (\mathbb{1}_Y f) dx$.

- (8) Es ist $|h| \leq \|h\|_\infty \cdot \mathbb{1}_X$. Dann folgt:

$$\int_X |h| dx \leq \int_X \|h\|_\infty \mathbb{1}_X dx = \|h\|_\infty \lambda(X) < \infty$$

Damit: $|h|$ ist integrierbar und mit 4.9 auch h . Da h beschränkt ist, folgt: $h \in \mathfrak{L}^1(X)$. Schließlich:

$$\left| \int_X h dx \right| \leq \int_X |h| dx \leq \|h\|_\infty \lambda(X) \quad \blacksquare$$

Satz 4.12

- (1) Sind $\emptyset \neq A, B \in \mathfrak{B}(X)$ disjunkt, $X = A \cup B$ und ist $f : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ integrierbar (über X), so ist f integrierbar über A und integrierbar über B und es gilt:

$$\int_X f dx = \int_A f dx + \int_B f dx$$

- (2) Ist $\emptyset \neq K \subseteq \mathbb{R}^d$ kompakt und $f : K \rightarrow \mathbb{R}$ stetig, so ist $f \in \mathfrak{L}^1(K)$.

Beweis

- (1) Aus 4.11(7) folgt: f ist integrierbar über A und integrierbar über B . Es ist

$$\begin{aligned} \int_X f(x) dx &= \int_X (\mathbb{1}_{A \cup B} \cdot f)(x) dx = \int_X ((\mathbb{1}_A + \mathbb{1}_B) f)(x) dx \\ &= \int_X (\mathbb{1}_A f + \mathbb{1}_B f)(x) dx \stackrel{4.11(2)}{=} \int_X \mathbb{1}_A f dx + \int_X \mathbb{1}_B f dx \stackrel{4.11(7)}{=} \int_A f dx + \int_B f dx. \end{aligned}$$

- (2) K ist kompakt, also gilt: $\lambda(K) < \infty$. Aus 3.2(1) folgt, dass f messbar ist. Analysis II („stetige Funktionen auf kompakten Mengen nehmen Minimum und Maximum an“) liefert: f ist beschränkt. Insgesamt folgt mit 4.11(8) schließlich: $f \in \mathfrak{L}^1(K)$. \blacksquare

Satz 4.13

Seien $a, b \in \mathbb{R}$, $a < b$, $X := [a, b]$ und $f \in C(X)$. Dann ist $f \in \mathfrak{L}^1(X)$ und es gilt:

$$L - \int_X f(x) dx = R - \int_a^b f(x) dx$$

4. Konstruktion des Lebesgueintegrals

Beweis

Sei $n \in \mathbb{N}$, $t_j^{(n)} := a + j \frac{b-a}{n}$ ($j = 0, \dots, n$) und $I_j^{(n)} := [t_{j-1}^{(n)}, t_j^{(n)}]$ ($j = 1, \dots, n$).

$$S_n := \sum_{j=1}^n f(t_j^{(n)}) \underbrace{\frac{b-a}{n}}_{=\lambda_1(I_j^{(n)})} \text{ ist Riemannsche Zwischensumme für } \mathcal{R}\text{-}\int_a^b f(x) dx.$$

Aus Analysis I folgt $S_n \rightarrow \mathcal{R}\text{-}\int_a^b f(x) dx$ ($n \rightarrow \infty$). Definiere $f_n := \sum_{j=1}^n f(t_j^{(n)}) \mathbb{1}_{I_j^{(n)}}$. Dann ist f_n einfach und

$$\int_X f_n(x) dx = \sum_{j=1}^n f(t_j^{(n)}) \lambda_1(I_j^{(n)}) = S_n$$

f ist auf X gleichmäßig stetig also konvergiert f_n auf X gleichmäßig gegen f (Übung!), also gilt:

$$\|f_n - f\|_\infty = \sup \{|f_n(x) - f(x)| : x \in X\} \rightarrow 0 \quad (n \rightarrow \infty)$$

Aus 4.12(2) folgt $f \in \mathfrak{L}^1(X)$

$$\left| \mathcal{L}\text{-}\int_X f(x) dx - S_n \right| = \left| \mathcal{L}\text{-}\int_X (f - f_n) dx \right| \stackrel{4.11}{\leq} \int_X (f - f_n) dx \stackrel{4.11}{\leq} \|f - f_n\|_\infty \underbrace{\lambda(X)}_{=b-a} \rightarrow 0$$

Daraus folgt $S_n \rightarrow \mathcal{L}\text{-}\int_X f dx$ ■

Satz 4.14

Sei $a \in \mathbb{R}$, $X := [a, \infty)$ und $f \in C(X)$. Dann gilt:

- (1) f ist messbar.
- (2) $f \in \mathfrak{L}^1(X)$ genau dann wenn das uneigentliche Riemann-Integral $\int_a^\infty f(x) dx$ **absolut** konvergent ist. In diesem Fall gilt:

$$L - \int_X f(x) dx = R - \int_a^\infty f(x) dx$$

Entsprechendes gilt für die anderen Typen uneigentlicher Riemann-Integrale.

Beweis

Eine Hälfte des Beweises folgt in Kapitel 6. ■

Beispiel

- (1) Sei $X = (0, 1]$, $f(x) = \frac{1}{\sqrt{x}}$. Aus Analysis I wissen wir, dass $\mathcal{R}\text{-}\int_0^1 \frac{1}{\sqrt{x}} dx$ (absolut) konvergent ist. Also ist $f \in \mathfrak{L}^1(X)$.
Außerdem wissen wir aus Analysis I, dass $\mathcal{R}\text{-}\int_0^1 \frac{1}{x}$ divergent ist. Also ist $f^2 \notin \mathfrak{L}^1(X)$.
- (2) Sei $X = [0, \infty)$, $f(x) = \frac{\sin(x)}{x}$. Aus Analysis I wissen wir, dass $\mathcal{R}\text{-}\int_1^\infty f(x) dx$ konvergent, aber nicht absolut konvergent ist. Also ist $f \notin \mathfrak{L}^1(X)$.