

Maß- und Integrationstheorie

Vorlesung 9

Integrierbare Funktionen



Wir führen nun das *Lebesgue-Integral* für messbare Funktionen auf einem Maßraum ein. Dieser Integralbegriff hat gegenüber dem Riemann-Integral folgende Vorteile.

- (1) Der Integralbegriff bekommt ein maßtheoretisches Fundament.
- (2) Es kann über einer (fast) beliebigen Menge integriert werden.
- (3) Es kann eine weit größere Funktionenklasse integriert werden.
- (4) Das Grenzwertverhalten von Funktionenfolgen ist einfacher.
- (5) Man kann Funktionen auf Nullmengen abändern, ohne das Integral zu verändern.
- (6) Uneigentliche Integrale werden direkt mitbehandelt.
- (7) Die Summe einer abzählbaren Familie reeller Zahlen ist ein Spezialfall.

DEFINITION 9.1. Es sei M eine Menge und

$$f: M \longrightarrow \overline{\mathbb{R}}_{\geq 0}$$

eine nichtnegative Funktion. Dann nennt man die Menge

$$S(f) = \{(x, y) \in M \times \overline{\mathbb{R}} \mid 0 \leq y \leq f(x)\}$$

den *Subgraphen* der Funktion.

LEMMA 9.2. *Es sei (M, \mathcal{A}) ein Messraum und*

$$f: M \longrightarrow \overline{\mathbb{R}}$$

eine messbare Funktion. Dann sind der Graph $\Gamma(f)$ und der Subgraph $S(f)$ messbare Teilmengen in $M \times \overline{\mathbb{R}}$.

Beweis. Die Projektion

$$p_2: M \times \overline{\mathbb{R}} \longrightarrow \overline{\mathbb{R}}, (x, y) \longmapsto y,$$

ist nach Lemma 4.9 messbar, und ebenso ist

$$\psi: M \times \overline{\mathbb{R}} \xrightarrow{p_1} M \xrightarrow{f} \overline{\mathbb{R}}$$

messbar. Nach Lemma 4.11 und Lemma 8.3 ist dann auch die Abbildung¹

$$\varphi: M \times \overline{\mathbb{R}} \xrightarrow{\psi \times p_2} \overline{\mathbb{R}} \times \overline{\mathbb{R}} \xrightarrow{\neg} \overline{\mathbb{R}}$$

messbar. Es ist

$$\Gamma(f) = \{(x, y) \in M \times \overline{\mathbb{R}} \mid y = f(x)\} = \varphi^{-1}(0)$$

und

$$S(f) = \{(x, y) \in M \times \overline{\mathbb{R}} \mid 0 \leq y \leq f(x)\} = p_2^{-1}(\overline{\mathbb{R}}_{\geq 0}) \cap \varphi^{-1}(\overline{\mathbb{R}}_{\geq 0}),$$

so dass diese beiden Mengen messbar sind. \square

DEFINITION 9.3. *Es sei (M, \mathcal{A}, μ) ein σ -endlicher Maßraum und*

$$f: M \longrightarrow \overline{\mathbb{R}}_{\geq 0}$$

eine messbare numerische nichtnegative Funktion. Dann heißt

$$\int_M f \, d\mu := (\mu \otimes \lambda^1)(S(f))$$

das *Integral* von f über M (zum Maß μ).

Diese Definition ist sowohl unmittelbar anschaulich als auch vom theoretischen Standpunkt her sehr schlagkräftig, da sie auf dem Maßbegriff beruht. Dagegen ist sie für Berechnungen direkt nicht geeignet, weshalb wir im Folgenden entsprechende Rechenstechniken entwickeln werden. Diese Definition lässt die Möglichkeit zu, dass die Funktion den Wert ∞ annimmt, und dass das Integral diesen Wert annimmt. Im Fall von numerischen Funktion, die auch negative Werte annehmen können, führt man den Integralbegriff auf die Integrale der positiven und negativen Teilfunktion zurück. Dies ergibt aber nur dann Sinn, wenn beide Teilintegrale endlich sind.

¹Für diese Argumentation setzt man $\infty - \infty = -\infty - (-\infty) = 0$ und ansonsten $\infty - x = \infty$ u.s.w. Man kann auch die messbaren Mengen $f^{-1}(\infty) \times \{\infty\}$ und $f^{-1}(-\infty) \times \{-\infty\}$ aus dem Graphen bzw. Subgraphen herausnehmen und nur \mathbb{R} -wertige Funktionen betrachten.

DEFINITION 9.4. Es sei (M, \mathcal{A}, μ) ein σ -endlicher Maßraum und

$$f: M \longrightarrow \overline{\mathbb{R}}$$

eine messbare numerische Funktion. Dann heißt f *integrierbar*, wenn die beiden Integrale $\int_M f_+ d\mu$ und $\int_M f_- d\mu$ endlich sind. In diesem Fall nennt man

$$\int_M f d\mu = \int_M f_+ d\mu - \int_M f_- d\mu$$

das *Integral* von f .

Mit dieser Situation ergibt sich der leicht paradoxe Sprachgebrauch, dass eine nichtnegative Funktion stets ein Integral besitzt, dass aber, wenn dieses Integral unendlich ist, die Funktion nicht integrierbar ist. Die Integrierbarkeit ist, abgesehen von der vorausgesetzten Messbarkeit, die aber nahezu immer erfüllt ist, in erster Linie ein Endlichkeitsbegriff. In diese Richtung weist auch das folgende Lemma.

LEMMA 9.5. *Es sei (M, \mathcal{A}, μ) ein σ -endlicher Maßraum und*

$$f: M \longrightarrow \overline{\mathbb{R}}$$

eine messbare numerische Funktion. Dann sind folgende Eigenschaften äquivalent.

- (1) f ist integrierbar.
- (2) Der positive und der negative Teil von f sind integrierbar.
- (3) Die Betragsfunktion $|f|$ ist integrierbar.
- (4) Es gibt eine integrierbare messbare Funktion

$$h: M \longrightarrow \overline{\mathbb{R}}_{\geq 0}$$

mit $|f(x)| \leq h(x)$ für alle $x \in M$.

Beweis. Die Äquivalenz von (1) und (2) ist die Definition von integrierbar. Für die Äquivalenz von (2) und (3) verwendet man die Beziehung $|f| = f_+ + f_-$. Dabei ist der Subgraph von $|f|$ die Vereinigung der beiden Subgraphen zu f_+ bzw. f_- , wobei der Durchschnitt dieser Subgraphen aus der Menge $M \times \{0\}$ besteht und somit nach Aufgabe 9.4 das Maß 0 besitzt. Also ist²

$$\begin{aligned} \int_M |f| d\mu &= (\mu \otimes \lambda^1)(S(|f|)) \\ &= (\mu \otimes \lambda^1)(S(f_+)) + (\mu \otimes \lambda^1)(S(f_-)) \\ &= \int_M f_+ d\mu + \int_M f_- d\mu, \end{aligned}$$

und die beiden Summanden sind genau dann endlich, wenn die Summe endlich ist. Aus (3) folgt (4), indem man $h = |f|$ nimmt. Wenn (4) erfüllt ist, so ist der Subgraph von $|f|$ im Subgraphen von h enthalten, und die Monotonie

²Wir werden später sehen, dass generell das Integral mit der Addition von Funktionen verträglich ist, das haben wir hier aber noch nicht zur Verfügung.

des Maßes $\mu \otimes \lambda^1$ ergibt die Endlichkeit von $\int_M |f| d\mu$, also (3). Aus (3) folgt entsprechend (2), da der Subgraph von f_+ bzw. von f_- eine Teilmenge des Subgraphen zu $|f|$ ist. \square

Für eine messbare Teilmenge $T \subseteq M$ setzt man

$$\int_T f d\mu := \int_T (f|_T) d\mu,$$

d.h. man schaut sich die auf den Teilmaßraum T eingeschränkte Funktion an. Man könnte genauso gut die Funktion f durch diejenige Funktion \tilde{f} ersetzen, die auf T mit f übereinstimmt und die außerhalb davon gleich 0 ist. Wenn man die Indikatorfunktion e_T zu einer messbaren Teilmenge $T \subseteq M$ heranzieht, so ergibt sich

$$\int_M e_T d\mu = \int_T 1 d\mu = \mu(T).$$

Diese Beschreibung des Maßes als ein Integral kann durchaus nützlich sein.

Man kann den Subgraphen als

$$S(f) = S^o(f) \uplus \Gamma(f)$$

schreiben, wobei $\Gamma(f) = \{(x, y) \in M \times \overline{\mathbb{R}} \mid y = f(x)\}$ der Graph ist und

$$S^o(f) = \{(x, y) \in M \times \overline{\mathbb{R}} \mid 0 \leq y < f(x)\}$$

gesetzt wird. Das folgende Lemma zeigt, dass der Graph eine Nullmenge ist und dass man somit den Subgraphen durch dieses $S^o(f)$ ersetzen kann. Dies ist für einige Ausschöpfungseigenschaften von Vorteil.

LEMMA 9.6. *Es sei (M, \mathcal{A}, μ) ein σ -endlicher Maßraum und*

$$f: M \longrightarrow \overline{\mathbb{R}}$$

eine messbare numerische Funktion. Dann ist der Graph $\Gamma(f)$ eine Nullmenge in $M \times \overline{\mathbb{R}}$.

Beweis. Die Mengen $f^{-1}(\infty) \times \{\infty\}$ und $f^{-1}(-\infty) \times \{-\infty\}$, die beide Teilmengen des Graphen sind, sind Nullmengen in $M \times \overline{\mathbb{R}}$. Man kann also annehmen, dass von vornherein eine messbare Funktion

$$f: M \longrightarrow \mathbb{R}$$

vorliegt. Ferner können wir annehmen, dass μ ein endliches Maß ist, da zu einer Ausschöpfung $M_n \uparrow M$ mit $\mu(M_n) < \infty$ auch $M_n \times \mathbb{R}$ eine Ausschöpfung von $M \times \mathbb{R}$ ist. Wenn der Durchschnitt des Graphen mit allen $M_n \times \mathbb{R}$ das Maß 0 hat, so auch der Gesamtgraph. Nehmen wir nun an, dass $(\mu \otimes \lambda^1)(\Gamma(f)) > 0$ ist. Es ist

$$\Gamma(f) = \bigsqcup_{n \in \mathbb{Z}} (\Gamma(f) \cap (M \times [n, n+1]))$$

eine disjunkte abzählbare Vereinigung, so dass mindestens einer dieser „Streifen“ ein positives Maß haben muss. Wir können M durch $f^{-1}([n, n+1])$

ersetzen und daher annehmen, dass das Bild von f in $[n, n + 1]$ liegt. Wir betrachten die abzählbar unendlich vielen Verschiebungen

$$\Gamma(f) + q \text{ mit } q \in \mathbb{Q} \cap [0, 1].$$

Diese sind paarweise disjunkt und sie liegen alle in $M \times [n, n + 2]$. Wegen der Translationsinvarianz von λ^1 ist auch für jedes q die Abbildung

$$M \times \mathbb{R} \longrightarrow M \times \mathbb{R}, (x, t) \longmapsto (x, t + q),$$

maßtreu (man betrachte die Quader, die das Produktmaß festlegen, siehe Aufgabe 9.15), und daher besitzt jede Verschiebung des Graphen das gleiche Maß wie der Graph selbst. Aus

$$\begin{aligned} \sum_{q \in \mathbb{Q} \cap [0, 1]} (\mu \otimes \lambda^1)(\Gamma(f) + q) &= (\mu \otimes \lambda^1) \left(\bigsqcup_{q \in \mathbb{Q} \cap [0, 1]} (\Gamma(f) + q) \right) \\ &\leq (\mu \otimes \lambda^1)(M \times [n, n + 2]) \\ &= \mu(M) \cdot 2 \\ &< \infty \end{aligned}$$

ergibt sich ein Widerspruch. □

Die Tschebyschow-Abschätzung

Für einen endlichen Maßraum M und eine integrierbare Funktion

$$f: M \longrightarrow \mathbb{R}$$

ist $\int_M f d\mu$ eine reelle Zahl. Bei $\mu(M) \in \mathbb{R}_+$ nennt man den Quotienten $h = \frac{\int_M f d\mu}{\mu(M)}$ den *Durchschnittswert* oder *Mittelwert* der Funktion f , da ja $\int_M f d\mu$ den gleichen Wert hat wie das Integral

$$\int_M h d\mu = h \cdot \mu(M)$$

zur konstanten Funktion h .

Die folgende Aussage nennt man *Tschebyschow-Abschätzung* oder *Tschebyschow-Ungleichung*.

LEMMA 9.7. *Es sei (M, \mathcal{A}, μ) ein σ -endlicher Maßraum und*

$$f: M \longrightarrow \overline{\mathbb{R}}_{\geq 0}$$

eine messbare numerische nichtnegative Funktion. Dann gilt für jedes $a \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ die Abschätzung

$$\int_M f d\mu \geq a \cdot \mu\{x \in M \mid f(x) \geq a\}.$$

Beweis. Es sei $T = \{x \in M \mid f(x) \geq a\}$. Dann ist

$$T \times [0, a] \subseteq S(f),$$

also

$$a \cdot \mu(T) = (\mu \otimes \lambda^1)(T \times [0, a]) \leq (\mu \otimes \lambda^1)(S(f)) = \int_M f \, d\mu.$$

□



Pafnuti Lwowitsch Tschebyschow (1821-1894)

Bildmaße und allgemeine Transformationsformel

SATZ 9.8. *Es sei (M, \mathcal{A}, μ) ein σ -endlicher Maßraum, (N, \mathcal{B}) ein Messraum und*

$$\varphi: M \longrightarrow N$$

eine messbare Abbildung. Es sei ν das Bildmaß von μ unter φ , das ebenfalls als σ -endlich vorausgesetzt sei, und es sei

$$f: N \longrightarrow \overline{\mathbb{R}}$$

eine ν -integrierbare Funktion. Dann ist auch $f \circ \varphi$ μ -integrierbar, und es gilt

$$\int_N f \, d\nu = \int_M (f \circ \varphi) \, d\mu.$$

Beweis. Für nichtnegatives f ergibt sich dies unter Verwendung von Aufgabe 5.6 und Aufgabe 9.1 aus

$$\begin{aligned} \int_N f \, d\nu &= (\nu \otimes \lambda^1)(S(f)) \\ &= ((\varphi \times \text{Id})_*(\mu \otimes \lambda^1))(S(f)) \\ &= (\mu \otimes \lambda^1)((\varphi \times \text{Id})^{-1}(S(f))) \\ &= (\mu \otimes \lambda^1)(S(f \circ \varphi)) \end{aligned}$$

$$= \int_M (f \circ \varphi) d\mu.$$

Daraus ergibt sich auch der allgemeine Fall. \square

BEMERKUNG 9.9. Wenn $M = [c, d]$ und $N = [a, b]$ und

$$\varphi: M \longrightarrow N$$

eine differenzierbare bijektive streng wachsende Funktion ist, so gilt für eine stetige Funktion

$$f: N \longrightarrow \mathbb{R}$$

die Substitutionsregel

$$\int_a^b f(t) dt = \int_c^d f(\varphi(s)) \cdot \varphi'(s) ds.$$

Um eine mit der allgemeinen Transformationsformel vergleichbare Substitutionsformel zu haben, muss man auf M die Funktion $g = f \circ \varphi$ mit dem Maß λ^1 und auf N die Funktion $f = (f \circ \varphi) \circ \varphi^{-1}$ betrachten. Die Substitutionsregel liefert dann

$$\int_c^d f(\varphi(s)) ds = \int_a^b f(\varphi(\varphi^{-1}(t))) \cdot (\varphi^{-1})'(t) dt = \int_a^b f(t) \frac{1}{\varphi'(\varphi^{-1}(t))} dt.$$

Links steht das Integral $\int_M f \circ \varphi d\lambda^1$, also muss rechts das Integral $\int_N f d\varphi_*\lambda^1$ stehen. Somit wird das Bildmaß $\varphi_*\lambda^1$ durch die³ Dichte $\frac{1}{\varphi'(\varphi^{-1}(t))}$ bezüglich λ^1 gegeben. Das Bildmaß ist auch durch

$$\begin{aligned} (\varphi_*\lambda^1)([r, s]) &= \lambda^1(\varphi^{-1}([r, s])) \\ &= \lambda^1([\varphi^{-1}(r), \varphi^{-1}(s)]) \\ &= \varphi^{-1}(s) - \varphi^{-1}(r) \\ &= \int_r^s \frac{1}{\varphi'(\varphi^{-1}(u))} du \end{aligned}$$

bestimmt.

³Dichten werden wir in Vorlesung 13 einführen.

Abbildungsverzeichnis

Quelle = Volume under surface.png , Autor = Benutzer Oleg Alexandrov auf Commons, Lizenz = PD	1
Quelle = Chebyshev.jpg , Autor = Benutzer Maksim auf Commons, Lizenz = PD	6
Erläuterung: Die in diesem Text verwendeten Bilder stammen aus Commons (also von http://commons.wikimedia.org) und haben eine Lizenz, die die Verwendung hier erlaubt. Die Bilder werden mit ihren Dateinamen auf Commons angeführt zusammen mit ihrem Autor bzw. Hochlader und der Lizenz.	9
Lizenzklärung: Diese Seite wurde von Holger Brenner alias Bocardodarapti auf der deutschsprachigen Wikiversity erstellt und unter die Lizenz CC-by-sa 3.0 gestellt.	9