



WESTFÄLISCHE
WILHELMS-UNIVERSITÄT
MÜNSTER



FACHBEREICH 10
MATHEMATIK UND
INFORMATIK

Skript Analysis III.

Mitschrift der Vorlesung „Analysis III.“ von Prof. Dr. Wilhelm Winter

Jannes Bantje

8. März 2015

Aktuelle Version verfügbar bei



<https://github.com/JaMeZ-B/latex-wwu>

GitHub ist eine Internetplattform, auf der viele OpenSource-Projekte gehostet werden. Diese Plattform nutzen wir zur Zusammenarbeit, also findet man hier neben den PDFs auch die \TeX -Dateien. Außerdem ist über diese Plattform auch direktes Mitarbeiten möglich, siehe nächste Seite.



<https://uni-muenster.sciebo.de/public.php?service=files&t=965ae79080a473eb5b6d927d7d8b0462>

Sciebo ist ein Dropbox-Ersatz der Hochschulen in NRW, der von der Uni Münster in leitender Position auf Basis der OpenSource-Software Owncloud aufgebaut wurde. Wenn man auf den Link klickt, kann man die Freigabe zum eigenen Speicher hinzufügen und hat dann immer automatisch die aktuellste Version.



B6WH2DISQ5QVYIRYIEZSF4ZR2IDVKPN3I

BTSync ist ein peer-to-peer Dateisynchronisations-Tool. Dabei werden die Dateien nur auf den Computern der Teilnehmer an einer Freigabe gespeichert. Ein Mini-Computer ist permanent online, sodass jederzeit die aktuellste Version verfügbar ist. Clients gibt es für jedes Betriebssystem. Zugang ist über das obige „Secret“ bzw. den QR-Code möglich




Vorlesungshomepage

http://wwwmath.uni-muenster.de/u/wilhelm.winter/wwinter/analysis_III.html

Hier ist ein Link zur offiziellen Vorlesungshomepage.

Vorwort — Mitarbeit am Skript

Dieses Dokument ist eine Mitschrift aus der Vorlesung „Analysis III., WiSe 2013“, gelesen von Prof. Dr. Wilhelm Winter. Der Inhalt entspricht weitestgehend dem Tafelanschrieb. Für die Korrektheit des Inhalts übernehme ich keinerlei Garantie! Für Bemerkungen und Korrekturen – und seien es nur Rechtschreibfehler – bin ich sehr dankbar. Korrekturen lassen sich prinzipiell auf drei Wegen einreichen:

- Persönliches Ansprechen in der Uni, Mails an [✉ j.bantje@wwu.de](mailto:j.bantje@wwu.de) (gerne auch mit annotieren PDFs) oder Kommentare auf <https://github.com/JaMeZ-B/latex-wwu> .
- *Direktes* Mitarbeiten am Skript: Den Quellcode poste ich auf GitHub (siehe oben), also stehen vielfältige Möglichkeiten der Zusammenarbeit zur Verfügung: Zum Beispiel durch Kommentare am Code über die Website und die Kombination Fork + Pull Request. Wer sich verdient macht oder ein Skript zu einer Vorlesung, die ich nicht besuche, beisteuern will, dem gewähre ich gerne auch Schreibzugriff.

Beachten sollte man dabei, dass dazu ein Account bei github.com  notwendig ist, der allerdings ohne Angabe von persönlichen Daten angelegt werden kann. Wer bei GitHub (bzw. dem zugrunde liegenden Open-Source-Programm „git“) – verständlicherweise – Hilfe beim Einstieg braucht, dem helfe ich gerne weiter. Es gibt aber auch zahlreiche empfehlenswerte Tutorials im Internet.¹

- *Indirektes* Mitarbeiten: \TeX -Dateien per Mail verschicken.

Dies ist nur dann sinnvoll, wenn man einen ganzen Abschnitt ändern möchte (zB. einen alternativen Beweis geben), da ich die Änderungen dann per Hand einbauen muss! Ich freue mich aber auch über solche Beiträge!

¹ zB. <https://try.github.io/levels/1/challenges/1> , ist auf Englisch, aber dafür interaktives LearningByDoing

Inhaltsverzeichnis

1	Gewöhnliche Differentialgleichungen – Existenz und Eindeutigkeit	1
1.1	Definition: Gewöhnliche Differentialgleichungen	1
1.2	Beispiel: Einfache Differentialgleichungen	1
1.3	Bemerkung: geometrische Interpretationen und System von DGL \Leftrightarrow DGL n -ter Ordnung	2
1.4	Definition: Lipschitz bezüglich der 2. Variablen	3
1.5	Satz: Kriterium für lokal Lipschitz (stetig partiell differenzierbar bzgl. der 2. Variablen)	3
1.6	Satz: Eindeutigkeit von Lösungen, wenn f lokal Lipschitz	3
1.7	Satz von Picard-Lindelöf (Existenz einer Lösung)	4
1.8	Beispiel: Anwendung von Picard-Lindelöf	6
1.9	Corollar: Folgerungen aus dem Eindeutigkeits- und Existenzsatz	6
1.10	Beispiel: Winkelfunktionen als Lösungen	6
2	Einige Lösungsmethoden	7
2.1	Trennung der Variablen	7
2.2	Beispiel: Anwendung von 2.1 auf $y' = y^2$	8
2.3	Satz (homogene, lineare Differentialgleichung)	8
2.4	Beispiel: homogene, lineare DGL mit konstanten Koeffizienten	8
2.5	Satz (inhomogene lineare DGL; Variation der Konstanten)	8
2.6	Bemerkung: Variation der Konstanten bei System von linearen DGL	9
2.7	Homogene Differentialgleichungen	9
2.8	Satz: Lösung von homogenen Differentialgleichungen	9
2.9	Beispiel zur Lösung einer homogenen DGL	10
2.10	Beispiel aus der Physik (?)	10
3	Treppenfunktionen: Die L^1-Halbnorm	12
3.1	Definition: Quader, Volumen, Treppenfunktion	12
3.2	Bemerkung: Zerlegung von Quadern in disjunkte Quader	12
3.3	Proposition: Eigenschaften von Treppenfunktionen	12
3.4	Corollar (Fubini für Treppenfunktionen)	14
3.5	Notation für den Funktionswert ∞	14
3.6	Definition: Treppe	14
3.7	Definition: L^1 -Halbnorm	14
3.8	Bemerkungen zur L^1 -Halbnorm	14
3.9	Proposition: Dreiecksungleichung für $\ \cdot\ _1$ gilt auch für unendliche Reihen	15
3.10	Lemma: Volumen eines abgeschlossenen Quaders Q entspricht $\ \chi_Q\ _1$	15
3.11	Lemma: Das Integral einer Treppenfunktion φ ist gleich $\ \varphi\ _1$	16
4	Das Lebesgue-Integral	18
4.1	Definition: Lebesgue-integrierbar	18
4.2	Bemerkung: Limes existiert und Wahl der Approximationsfolge irrelevant	18
4.3	Proposition: Linearität und andere Eigenschaften des Lebesgue-Integrals	18
4.4	Bemerkung: Zerlegung einer Funktion in positiven und negativen Teil	18
4.5	Definition: Integral einer nur auf $A \subset \mathbb{R}^n$ definierten Funktion	19
4.6	Proposition: Regelfunktionen sind Lebesgue-integrierbar	19
4.7	Satz (Translationsinvarianz)	19
4.8	Satz (Beppo Levi mit Treppenfunktionen)	20
4.9	Proposition: Stetige Funktionen lassen sich durch Treppenfunktionen approximieren	21
4.10	Satz: Stetige, beschränkte Funktionen sind über offene, beschränkte Mengen integrierbar	21

4.11 Satz (Fubini für stetige Funktionen auf offenen Teilmengen)	22
5 Messbarkeit in \mathbb{R}^n, Nullmengen	23
5.1 Definition: Lebesgue-messbar	23
5.2 Proposition: Einfache Mengenoperationen auf messbaren Mengen	23
5.3 Proposition: Beschränkte Teilmengen von \mathbb{R}^n sind messbar	23
5.4 Beispiel: Berechnung des Volumens eines Kreises und einer Kugel	23
5.5 Bemerkung: Prinzip von Cavalieri	24
5.6 Proposition und Definition: Nullmenge	24
5.7 Proposition: Teilmengen von Nullmengen und Vereinigungen von Nullmengen	25
5.8 Proposition: f mit $\ f\ _1 < \infty$ ist fast überall endlich	25
5.9 Proposition: Die Integrale fast gleicher Funktionen stimmen überein	25
5.10 Beispiele für Nullmengen	26
5.11 Bemerkung: Alternative Charakterisierung von Nullmengen	26
5.12 Proposition: Beschränkte Folge messbarer Mengen	27
5.13 Bemerkung: Zusammenfassung über Messbarkeit	27
5.14 Satz: Existenz einer beschränkten nicht messbaren Teilmenge in \mathbb{R}	27
5.15 Satz: Volumen eines Parallelotops	28
5.16 Corollar: Volumen eines Quaders unter einer linearen Abbildung	30
6 $L^1(\mathbb{R}^n)$-Konvergenzsätze	31
6.1 Proposition: Der durch $\ f\ _1 = 0$ definierte Unterraum von $\mathcal{L}^1(\mathbb{R}^n)$	31
6.2 Definition: Raum der integrierbaren Funktionen als Quotientenraum	31
6.3 Satz (Riesz-Fischer)	31
6.4 Korollar: Existenz approximierende Folge von Treppenfunktionen für integrierbare f	32
6.5 Bemerkung: Der Übergang zu einer Teilfolge in 6.3 ist wesentlich	32
6.6 Satz (Beppo-Levi)	33
6.7 Corollar: Messbarkeit abzählbarer Vereinigungen messbarer Mengen	33
6.8 Bemerkung: Zusammenfassung über Eigenschaften des Lebesgue-Maßes	34
6.9 Satz von Lebesgue über majorisierte Konvergenz	34
6.10 Corollar: Der Limes einer beschränkten Folge integrierbarer Funktionen ist integrierbar	35
6.11 Corollar: Der Hauptsatz der Integralrechnung gilt auch für das Lebesgue-Integral	35
6.12 Definition: σ -kompakt	36
6.13 Beispiel: σ -kompakte Mengen	36
6.14 Definition: lokal integrierbar	36
6.15 Corollar (Majorantenkriterium)	36
7 Der Satz von Fubini	37
7.1 Lemma über Nullmengen	37
7.2 Bemerkung, warum B in 7.1 ausgeschlossen werden muss	37
7.3 Satz von Fubini	38
7.4 Satz von Tonelli	39
7.5 Beispiel: Anwendung von Fubini	40
7.6 Proposition/Definition: Die Gamma-Funktion	40
7.7 Proposition: Rekursionsformel der Gammafunktion	40
7.8 Satz: Limesdarstellung der Gammafunktion	41
7.9 Corollar: $\Gamma(1/2) = \sqrt{\pi}$	41
7.10 Beispiel: Gaußintegral	42
7.11 Beispiel: Kugelvolumen im \mathbb{R}^n	43
7.12 Beispiel: Euler'sche Betafunktion	43
7.13 Beispiel (Dirichlet)	44

8	Der Transformationssatz	45
8.1	Transformationssatz	45
8.2	Lemma: Urbild einer Nullmenge unter einen C^1 -Diffeomorphismus	46
8.3	Lemma: Abschätzungen für das Volumen eines Quaders mit kompaktem Urbild	46
8.4	Proposition: Transformationssatz für Treppenfunktionen	46
8.5	Beispiel: Affine Transformationen und Polarkoordinaten	47
8.6	Corollar (Integration rotationssymmetrischer Funktionen)	48
9	σ-Algebren und messbare Räume	49
9.1	Erinnerung: Topologien, Stetigkeit in topologischen Räumen	49
9.2	Definition: σ -Algebra, messbarer Raum	49
9.3	Bemerkung: Schnitte und Komposition messbaren Abbildungen in σ -Algebren	49
9.4	Proposition: Kleinste σ -Algebra	49
9.5	Bemerkung: 9.4 lässt sich analog auch auf Topologien übertragen	50
9.6	Definition: σ -Algebra der Borelmengen, Borel-messbar	50
9.7	Bemerkung, welche Mengen Borel sind	50
9.8	Proposition über Abbildungen zwischen topologischen und messbaren Räumen	50
9.9	Proposition: \sup und \limsup von messbaren Funktionen sind messbar	50
9.10	Corollar: Punktweise Limiten und \max, \min messbarer Funktionen sind messbar	51
9.11	Definition: Einfache Funktion	51
9.12	Bemerkung: Summenschreibweise für einfache Funktionen	51
9.13	Prop.: Approximation nichtnegativer, messbarer Funktionen durch einfache Funktionen	51
9.14	Definition: Maß und Maßraum	52
9.15	Proposition: Eigenschaften von Maßen	52
9.16	Beispiele für Maßräume	52
9.17	Definition: Integrierbarkeit, $\ \cdot\ _1$ in Maßräumen	53
9.18	Satz: Das Lebesgue-Maß definiert das Lebesgue-Integral!	53
9.19	Bemerkung: Aussage von Satz 9.18	54
9.20	Definition: Quotientenvektorraum $L^1(\mu)$	54
9.21	Satz: $L^1(\mu)$ ist ein Banachraum	54
9.22	Satz (von Lebesgue über monotone Konvergenz)	54
9.23	Lemma von Fatou	54
9.24	Satz (von Lebesgue über dominierte Konvergenz)	54
9.25	Satz (Darstellungssatz von Riesz)	55
10	Ausblick	56
	Index	A
	Abbildungsverzeichnis	B

1 Gewöhnliche Differentialgleichungen – Existenz und Eindeutigkeit

1.1 Definition

- a) Sei $G \subset \mathbb{R}^2$, $f : G \rightarrow \mathbb{R}$ stetig.

$$y' = f(x, y)$$

heißt **gewöhnliche Differentialgleichung 1. Ordnung**. Eine Lösung von (*) auf dem Intervall I ist eine differenzierbare Funktion $\varphi : I \rightarrow \mathbb{R}$ mit

(i) $\{(x, \varphi(x)) \mid x \in I\} \subset G$

(ii) $\varphi'(x) = f(x, \varphi(x)), x \in I$

- b) Sei $G \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$, $f : G \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig.

$$y' = f(x, y)$$

heißt **System von n Differentialgleichungen 1. Ordnung**. Eine Lösung von (**) auf I ist eine differenzierbare Funktion $\varphi : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ mit

(i) $\{(x, \varphi(x)) \mid x \in I\} \subset G$

(ii) $\varphi'(x) = f(x, \varphi(x)), x \in I$

(**) und (ii) lassen sich auch schreiben als

$$\begin{pmatrix} y_1' \\ \vdots \\ y_n' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1(x, y_1, \dots, y_n) \\ \vdots \\ f_n(x, y_1, \dots, y_n) \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \varphi_1'(x) \\ \vdots \\ \varphi_n'(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1(x, \varphi_1(x), \dots, \varphi_n(x)) \\ \vdots \\ f_n(x, \varphi_1(x), \dots, \varphi_n(x)) \end{pmatrix}$$

- c) Sei $G \subseteq \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$, $f : G \rightarrow \mathbb{R}$ stetig

$$y^{(n)} = f(x, y, y', y'', \dots, y^{(n-1)})$$

heißt **Differentialgleichung n -ter Ordnung**. Eine Lösung von (***) ist eine n -mal differenzierbare Funktion $\varphi : I \rightarrow \mathbb{R}$ mit

(i) $\{(x, \varphi(x), \varphi'(x), \dots, \varphi^{(n-1)}(x)) \mid x \in I\} \subset G$

(ii) $\varphi^{(n)}(x) = f(x, \varphi(x), \varphi'(x), \dots, \varphi^{(n-1)}(x)), x \in I$

1.2 Beispiel

- (i) Sei $y' = \frac{y}{x}$, $G = \mathbb{R}_+^* \times \mathbb{R}$. Lösungen sind Geraden der Form $\varphi(x) = c \cdot x$, wo $c \in \mathbb{R}$ konstant ist. Dann gilt mit $I = (0, \infty)$

$$\varphi'(x) = \frac{c \cdot x}{x} = \frac{\varphi(x)}{x}$$

- (ii) Sei $y' = -\frac{x}{y}$, $G = \mathbb{R} \times \mathbb{R}_+^*$. Lösungen sind Halbkreise der Form $\varphi(x) = \sqrt{c - x^2}$, $x \in (-\sqrt{c}, \sqrt{c}) = I$, $c \in \mathbb{R}_+$

$$\varphi'(x) = \frac{-2x}{2\sqrt{c - x^2}} = -\frac{x}{\varphi(x)}$$

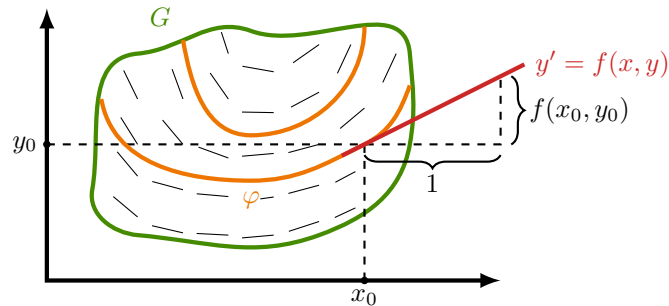
- (iii) $m \cdot \ddot{x} = F(t, x, \dot{x})$

t Zeit, x Ort, \dot{x} Geschwindigkeit, m Masse, \ddot{x} Beschleunigung, F Kraft

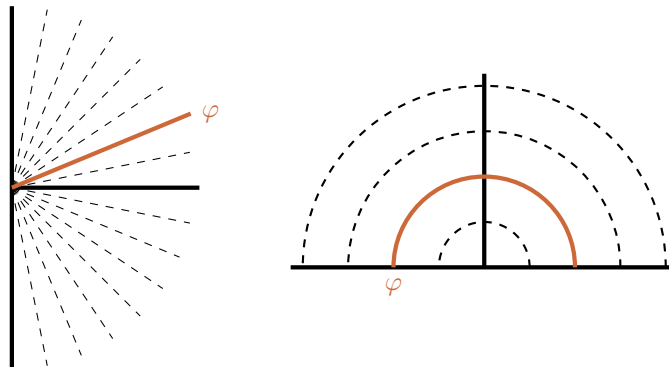
1.3 Bemerkung

(i) geometrische Interpretationen:

- allgemeine Darstellung:



- zu 1.2 (i) und 1.2 (ii)



Symmetrie bei 1.2 (ii): $f(\lambda x, \lambda y) = f(x, y)$ für $(x, y) \in G, \lambda \in \mathbb{R}$

(ii) Sei $G \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$, $f : G \rightarrow \mathbb{R}$ stetig und sei

$$y^{(n)} = f(x, y, y', \dots, y^{(n-1)})$$

eine DGL n -ter Ordnung. Betrachte nun die Gleichung

$$\begin{pmatrix} y_0' \\ \vdots \\ y_{n-2}' \\ y_{n-1}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_{n-1} \\ f(x, y_0, \dots, y_{n-1}) \end{pmatrix}$$

mit $Y = \begin{pmatrix} y_0 \\ \vdots \\ y_{n-1} \end{pmatrix}$, $F(x, Y) = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_{n-1} \\ f(x, y_0, \dots, y_{n-1}) \end{pmatrix}$ schreibt sich $(\star\star)$ als

$$Y' = F(x, Y)$$

ein System von DGL erster Ordnung. Falls $\varphi : I \rightarrow \mathbb{R}$ Lösung von (\star) ist, so ist $\Phi : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ mit

$$\Phi(x) = \begin{pmatrix} \varphi(x) \\ \varphi'(x) \\ \vdots \\ \varphi^{(n-1)}(x) \end{pmatrix}$$

eine Lösung von $(\star\star\star)$. Beweis:

$$\Phi'(x) = \begin{pmatrix} \varphi'(x) \\ \vdots \\ \varphi^{(n-1)}(x) \\ \varphi^{(n)}(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi'(x) \\ \vdots \\ \varphi^{(n-1)}(x) \\ f(x, \varphi(x), \dots, \varphi^{(n-1)}(x)) \end{pmatrix} = F(x, \Phi(x))$$

Falls umgekehrt $\Phi = \begin{pmatrix} \varphi_0 \\ \vdots \\ \varphi_{n-1} \end{pmatrix} : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ Lösung von $(\star\star\star)$ ist, so ist φ_0 Lösung von (\star) . (warum?)

1.4 Definition

Sei $G \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$, $f : G \rightarrow \mathbb{R}^n$.

- (i) f ist Lipschitz (bezüglich der zweiten Variablen), falls $L \geq 0$ existiert, sodass für $(x, y), (x, \bar{y}) \in G$ gilt:

$$\|f(x, y) - f(x, \bar{y})\|_2 \leq L \cdot \|y - \bar{y}\|_2$$

- (ii) f ist lokal Lipschitz (bezüglich der zweiten Variablen), falls gilt: Jedes $(a, b) \in G$ besitzt eine Umgebung U , sodass $f|_{U \cap G}$ Lipschitz ist.

1.5 Satz

Sei $G \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$ offen und $f : G \rightarrow \mathbb{R}^n$, $(x, y) \mapsto f(x, y)$, stetig partiell differenzierbar bezüglich der 2. Variablen, d.h.

$$(x, y) \mapsto \frac{\partial f}{\partial y}(x, y) = \left(\frac{\partial f_i}{\partial y_j}(x, y) \right)_{1 \leq i, j \leq n}$$

ist stetig. Dann ist f lokal Lipschitz.

Beweis

Sei $(a, b) \in G$. Es gibt $r > 0$ sodass $K := [a - r, a + r] \times \overline{B}_{\|\cdot\|_2}(b, r) \subset G$ (warum?)

Dann ist K kompakt nach Heine-Borel. Für $(x, y) \in G$ ist $\frac{\partial f}{\partial y}(x, y) \in M_n(\mathbb{R})$ und $(x, y) \mapsto \left\| \frac{\partial f}{\partial y}(x, y) \right\|$ stetig. K kompakt $\xrightarrow{\text{Ana II., 4.10}} L := \sup \left\{ \left\| \frac{\partial f}{\partial y}(x, y) \right\| \mid (x, y) \in K \right\} < \infty$. Für $(x, y), (x, \bar{y}) \in K$ gilt nach dem Mittelwertsatz (Ana II., 7.11)

$$\|f(x, y) - f(x, \bar{y})\|_2 \leq L \cdot \|y - \bar{y}\|_2 \quad \square$$

1.6 Satz (Eindeutigkeit)

Sei $G \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$, $f : G \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig und lokal Lipschitz. Seien $\varphi, \psi : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ Lösungen von $y' = f(x, y)$. Falls $\varphi(x_0) = \psi(x_0)$ für ein $x_0 \in I$, so gilt $\varphi(x) = \psi(x)$ für alle $x \in I$.

Beweis

1. Behauptung Falls $\varphi(a) = \psi(a)$ für $a \in I$, so existiert $\varepsilon > 0 : \varphi(x) = \psi(x)$ für $x \in [a - \varepsilon, a + \varepsilon] \cap I$.

Beweis

Es gilt $\varphi'(x) = f(x, \varphi(x))$, $\psi'(x) = f(x, \psi(x))$, also

$$\int_a^x (f(t, \varphi(t)) - f(t, \psi(t))) dt = \int_a^x (\varphi'(t) - \psi'(t)) dt = \varphi(x) - \psi(x)$$

f lokal Lipschitz $\Rightarrow \exists L > 0$ und $\delta > 0$ mit

$$\|f(t, \varphi(t)) - f(t, \psi(t))\|_2 \leq L \cdot \|\varphi(t) - \psi(t)\|_2, \quad t \in [a - \delta, a + \delta] \cap I$$

Setze $\varepsilon := \min\{\delta, \frac{1}{2L}\}$. Für $x \in [a - \delta, a + \delta] \cap I$ gilt nun

$$\begin{aligned} \|\varphi(x) - \psi(x)\|_2 &= \left\| \int_a^x (f(t, \varphi(t)) - f(t, \psi(t))) dt \right\|_2 \leq \int_a^x \|f(t, \varphi(t)) - f(t, \psi(t))\|_2 dt \\ &\leq L \cdot \int_a^x \|\varphi(t) - \psi(t)\|_2 dt \end{aligned}$$

Für $x \in [a - \delta, a + \delta] \cap I$ setze $M(x) := \sup\{\|\varphi(t) - \psi(t)\|_2 \mid t \in I, |t - a| \leq |x - a|\} < \infty$. Für $x, \xi \in [a - \delta, a + \delta] \cap I$ mit $|\xi - a| \leq |x - a|$ gilt dann

$$\|\varphi(\xi) - \psi(\xi)\|_2 \leq L \cdot \int_a^\xi \|\varphi(t) - \psi(t)\|_2 dt \leq L \cdot |\xi - a| \cdot M(x) \leq L \cdot |x - a| \cdot M(x)$$

also $M(x) \leq L \cdot |x - a| M(x)$. Für $|x - a| < \varepsilon \leq \frac{1}{2L}$ ergibt sich

$$0 \leq M(x) \leq L \cdot \varepsilon \cdot M(x) \leq \frac{1}{2} M(x)$$

also muss $M(x) = 0$ gelten und $\varphi(x) = \psi(x)$ für $x \in [a - \varepsilon, a + \varepsilon] \cap I$.

2. Behauptung $\varphi(x) = \psi(x)$ für $x \in [x_0, \infty) \cap I$.

Beweis

Lücke schließen mit
 φ, ψ stetig

Setze $x_1 := \sup\{\xi \in I \mid \varphi|_{[x_0, \xi]} = \psi|_{[x_0, \xi]}\}$, dann gilt $x_1 > x_0$. Falls $x_1 \notin I$, ist die Behauptung bewiesen. Falls $x_1 \in I$ und $[x_0, x_1] = [x_0, \infty) \cap I$, so ist die Behauptung auch wieder bewiesen. Sei nun $x_1 \in I$ und $[x_0, x_1] \neq [x_0, \infty) \cap I$. Dann existiert $\eta > 0$ mit $[x_0, x_1 + \eta] \subset I$. Nach der 1. Behauptung existiert $\varepsilon > 0$ sodass $\varphi(x) = \psi(x)$ für $x \in [x_1 - \varepsilon, x_1 + \varepsilon] \cap I$. Setze $\zeta := \min\{\varepsilon, \eta\}$, dann $\varphi|_{[x_0, x_1 + \zeta]} = \psi|_{[x_0, x_1 + \zeta]}$ ∇

3. Behauptung $\varphi(x) = \psi(x)$ für $x \in (-\infty, x_0] \cap I$

Beweis

Analog zu Behauptung 2.

$\Rightarrow \varphi(x) = \psi(x)$ für $x \in (-\infty, \infty) \cap I$. □

1.7 Satz (Picard-Lindelöf)

Sei $G \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$ offen, $f : G \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig und lokal Lipschitz, $(x_0, y_0) \in G$. Dann existiert $\varepsilon > 0$, sodass

$$y' = f(x, y)$$

auf $[x_0 - \varepsilon, x_0 + \varepsilon]$ eine Lösung φ mit der Anfangsbedingung $\varphi(x_0) = y_0$ hat. Dabei ist $\varphi(x) = \lim_{k \rightarrow \infty} \varphi_k(x)$, wo $\varphi_0 \equiv y_0$ und

$$\varphi_{k+1}(x) = y_0 + \int_{x_0}^x f(t, \varphi_k(t)) dt$$

Beweis

1. Schritt: Es gibt $r > 0$ sodass $K := [x_0 - r, x_0 + r] \times \overline{B}_{\|\cdot\|_2}(y_0, r) \subset G$ und $f|_K$ Lipschitz ist mit der Konstanten L . K kompakt, f stetig $\Rightarrow M := \sup\{\|f(x, y)\|_2 \mid (x, y) \in K\} < \infty$. Setze $\varepsilon := \min\{r, \frac{r}{M}\} > 0$ (dürfen $M > 0$ annehmen).

2. Schritt $\varphi : [x_0 - \varepsilon, x_0 + \varepsilon] \rightarrow \mathbb{R}^n$ erfüllt (\star) mit Anfangsbedingung $\varphi(x_0) = y_0$ genau dann, wenn

$$\varphi(x) = y_0 + \int_{x_0}^x f(t, \varphi(t)) \, dt$$

gilt für alle $x \in [x_0 - \varepsilon, x_0 + \varepsilon]$ (Fundamentalsatz). Wir definieren induktiv Funktionen $\varphi_k : [x_0 - \varepsilon, x_0 + \varepsilon] \rightarrow \mathbb{R}^n$ durch $\varphi_0(x) = y_0$, $x \in [x_0 - \varepsilon, x_0 + \varepsilon]$,

$$\varphi_{k+1} := y_0 + \int_{x_0}^x f(t, \varphi_k(t)) \, dt \quad , \quad x \in [x_0 - \varepsilon, x_0 + \varepsilon]$$

Zu zeigen: φ_k ist wohldefiniert für $k \in \mathbb{N}$, φ_k konvergiert gleichmäßig auf $[x_0 - \varepsilon, x_0 + \varepsilon]$ gegen eine Lösung φ .

3. Schritt $(\star\star\star)$ ist wohldefiniert, falls $\|\varphi_k(x) - y_0\|_2 \leq r$ für $x \in [x_0 - \varepsilon, x_0 + \varepsilon]$. $k = 0$ trivial. Falls die Aussage für k gilt, so folgt

$$\|\varphi_{k+1} - y_0\|_2 \leq \int_{x_0}^x \|f(t, \varphi_k(t))\|_2 \, dt \leq M \cdot |x - x_0| \leq M \cdot \varepsilon \leq r \quad x \in [x_0 - \varepsilon, x_0 + \varepsilon]$$

$\Rightarrow (\star\star\star)$ ist wohldefiniert für alle $k \in \mathbb{N}$

4. Schritt Wir zeigen

$$\|\varphi_{k+1}(x) - \varphi_k(x)\|_2 \leq M \cdot L^k \cdot \frac{|x - x_0|^{k+1}}{(k+1)!}$$

für $k \in \mathbb{N}$, $x \in [x_0 - \varepsilon, x_0 + \varepsilon]$. $k = 0$:

$$\|\varphi_1(x) - \varphi_0(x)\|_2 = \left\| \int_{x_0}^x f(t, y_0) \, dt \right\|_2 \leq \int_{x_0}^x \|f(t, y_0)\|_2 \, dt \leq M \cdot \frac{|x - x_0|^{0+1}}{(0+1)!}$$

$k - 1 \mapsto k$:

$$\begin{aligned} \|\varphi_{k+1}(x) - \varphi_k(x)\|_2 &= \int_{x_0}^x \left\| f(t, \varphi_k(t)) - f(t, \varphi_{k-1}(t)) \right\|_2 \, dt \\ &\leq \int_{x_0}^x \|f(t, \varphi_k(t)) - f(t, \varphi_{k-1}(t))\|_2 \, dt \\ &\leq \int_{x_0}^x L \cdot \|\varphi_k(t) - \varphi_{k-1}(t)\|_2 \, dt \\ &\leq M \cdot L^k \int_{x_0}^x \frac{|t - x_0|^k}{k!} \, dt \\ &= M \cdot L^k \frac{|x - x_0|^{k+1}}{(k+1)!} \end{aligned}$$

5. Schritt Die Reihe $\sum_{k=0}^{\infty} (\varphi_{k+1} - \varphi_k)$ wird majorisiert durch $\sum_{k=0}^{\infty} M \cdot \frac{L^k \cdot \varepsilon^{k+1}}{(k+1)!}$

$$\left(\left\| \sum_{k=0}^{k_0} \varphi_{k+1}(x) - \varphi_k(x) \right\|_2 \right) \leq \sum_{k=0}^{k_0} \|\varphi_{k+1}(x) - \varphi_k(x)\|_2 \leq \sum_{k=0}^{k_0} \frac{M \cdot L^k \cdot |x - x_0|^{k+1}}{(k+1)!} \leq \sum_{k=0}^{k_0} \frac{M \cdot L^k \cdot \varepsilon^{k+1}}{(k+1)!}$$

Teleskopsumme

und konvergiert daher gleichmäßig; Der Limes ist stetig auf $[x_0 - \varepsilon, x_0 + \varepsilon]$. Wir erhalten

$$\varphi := \lim_{k \rightarrow \infty} \varphi_k = \lim_{k \rightarrow \infty} y_0 + \sum_{l=0}^k \varphi_{l+1} - \varphi_l = y_0 + \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{l=0}^k \varphi_{l+1} - \varphi_l = y_0 + \sum_{k=0}^{\infty} \varphi_{k+1} - \varphi_k$$

$\varphi : [x_0 - \varepsilon, x_0 + \varepsilon] \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig. Für $k \in \mathbb{N}$, $x \in [x_0 - \varepsilon, x_0 + \varepsilon]$ gilt

$$\|f(x, \varphi(x)) - f(x, \varphi_k(x))\|_2 \leq L \cdot \|\varphi(x) - \varphi_k(x)\|_2$$

warum?

$\varphi_l \xrightarrow{k \rightarrow \infty} \varphi$ gleichmäßig $\Rightarrow \left(x \mapsto f(x, \varphi_k(x))\right) \xrightarrow{k \rightarrow \infty} \left(x \mapsto f(x, \varphi(x))\right)$ gleichmäßig

$$\varphi(x) \xrightarrow{k \rightarrow \infty} \varphi_{k+1}(x) = y_0 + \int_{x_0}^x f(t, \varphi_k(t)) dt \xrightarrow{k \rightarrow \infty} y_0 + \int_{x_0}^x f(t, \varphi(t)) dt$$

$\Rightarrow (\star\star)$

□

1.8 Beispiel

Betrachte $y' = 2 \cdot x \cdot y$, $G = \mathbb{R} \times \mathbb{R}$. Gesucht: Lösung φ mit $\varphi(0) = y_0$. Setze $\varphi_0(x) := y_0$, $x \in \mathbb{R}$.
 $\varphi_{k+1}(x) := y_0 + \int_0^x 2t\varphi_k(t) dt$, $x \in \mathbb{R}$. Dann

$$\varphi_1(x) = y_0 + 2 \int_0^x t \cdot y_0 dt = y_0 + y_0 \cdot x^2$$

$$\varphi_2(x) = y_0 + \int_0^x 2t(y_0 + y_0 \cdot t^2) dt = y_0 + y_0 \cdot x^2 + y_0 \cdot \frac{x^4}{2}$$

Induktion liefert dann: $\varphi(x) = y_0(1 + x^2 + \frac{x^4}{2!} + \frac{x^6}{3!} + \frac{x^8}{4!} + \dots + \frac{x^{2k}}{k!})$ also $\varphi_k(x) \xrightarrow{k \rightarrow \infty} y_0 \cdot e^{x^2}$

1.9 Corollar

Sei $G \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$ offen, $f : G \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig und lokal Lipschitz.

(i) Seien $\varphi, \psi : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ zwei Lösungen von

$$x^{(n)} = f(x, y, y', \dots, y^{(n-1)})$$

über dem Intervall I . Falls für $x_0 \in I$ gilt:

$$\varphi(x_0) = \psi(x_0), \dots, \varphi^{(n-1)}(x_0) = \psi^{(n-1)}(x_0)$$

so ist $\varphi = \psi$ über I .

(ii) Zu $(x_0, y_0, y_1, \dots, y_{n-1}) \in G$ existiert $\varepsilon > 0$ und eine Lösung $\varphi : [x_0 - \varepsilon, x_0 + \varepsilon] \rightarrow \mathbb{R}^n$ vom (\star) mit

$$\varphi(x_0) = y_0, \varphi'(x_0) = y_1, \dots, \varphi^{(n-1)}(x_0) = y_{n-1}$$

Beweis

Bemerkung 1.3 (ii), Satz 1.6, Satz 1.7

□

1.10 Beispiel

$y'' = -y$ ist eine Differentialgleichung 2. Ordnung. Lösungen sind $\sin(x)$, $\cos(x)$, $2 \sin(x) + \cos(x)$. Allgemeiner gilt: Für Konstanten $c_1, c_2 \in \mathbb{R}$ betrachte

$$\varphi(x) = c_1 \sin(x) + c_2 \cos(x)$$

Dann gilt φ löst $y'' = -y$ und $\varphi(0) = c_2$ und $\varphi'(0) = c_1$. Mit Eindeutigkeit folgt, dass alle diese Funktionen Lösungen sind.

2 Einige Lösungsmethoden

2.1 Trennung der Variablen

Betrachte die Differentialgleichung

$$y' = f(x) \cdot g(y)$$

An dieser Stelle benehmen wir uns mal wie Physiker:

$$\frac{dy}{dx} = f(x) \cdot g(y) \iff \frac{1}{g(y)} dy = f(x) dx \iff \int \frac{1}{g(y)} dy = \int f(x) dx$$

Satz: Seien $I, J \in \mathbb{R}$ Intervalle $f : I \rightarrow \mathbb{R}, g : J \rightarrow \mathbb{R}^*$ stetig. Für $(x_0, y_0) \in I \times J$ definiere $F : I \rightarrow \mathbb{R}, G : J \rightarrow \mathbb{R}$ durch

$$F(x) = \int_{x_0}^x f(t) dt \quad G(y) = \int_{y_0}^y \frac{1}{g(s)} ds$$

Sei $I' \subset I$ ein Intervall mit $x_0 \in I'$ und $F(I') \subset G(J)$. Dann besitzt

$$y' = f(x) \cdot g(y)$$

eine eindeutige Lösung $\varphi : I' \rightarrow J$ mit $\varphi(x_0) = y_0$. Diese Lösung erfüllt:

$$G(\varphi(x)) = F(x) \quad \text{für } x \in I'$$

Beweis

Schritt 1: Sei $\varphi : I' \rightarrow \mathbb{R}$ eine Lösung von (\star) mit $\varphi(x_0) = y_0$. Wir zeigen, dass φ $(\star\star)$ erfüllt: Wir haben: $\varphi'(x) = f(x)g(\varphi(x)), x \in I'$. Also

$$F(x) = \int_{x_0}^x f(t) dt = \int_{x_0}^x \frac{\varphi'(t)}{g(\varphi(t))} dt = \int_{\varphi(x_0)}^{\varphi(x)} \frac{ds}{g(s)} = \int_{y_0}^{\varphi(x)} \frac{ds}{g(s)} = G(\varphi(x))$$

Schritt 2 (Eindeutigkeit): $G'(y) = \frac{1}{g(y)} \neq 0$ ist stetig $\Rightarrow G$ ist stetig differenzierbar und streng monoton. Daraus folgt: G besitzt eine stetig differenzierbare Umkehrfunktion $H : G(J) \rightarrow \mathbb{R}$. Aus $(\star\star)$ folgt

$$\varphi(x) = H(G(\varphi(x))) = H(F(x)) \quad x \in I'$$

$\Rightarrow \varphi$ eindeutig bestimmt durch F und H .

Schritt 3 (Existenz): Betrachte H aus 2. und definiere $\varphi : I' \rightarrow \mathbb{R}$ durch $\varphi(x) = H(F(x)), x \in I'$. φ ist wohldefiniert, da $F(I') \subset G(J)$. H, F stetig differenzierbar, also auch φ . Anfangsbedingung:

$$\varphi(x_0) = H(F(x_0)) = H(0) = y_0$$

Weiter gilt $G(\varphi(x)) = F(x)$

$$\Rightarrow f(x) = F'(x) = (G \circ \varphi)'(x) = G'(\varphi(x)) \cdot \varphi'(x) = \frac{1}{g(\varphi(x))} \cdot \varphi'(x)$$

Daraus folgt $\varphi'(x) = f(x) \cdot g(\varphi(x))$. Also löst φ (\star) . □

2.2 Beispiel

$$y' = y^2 = f(x) \cdot g(y)$$

Dann $f(x) = 1, g(y) = y^2$. Anfangsbedingung $\varphi(0) = y_0 \in \mathbb{R}$

1. $y_0 = 0$: Aus $y_0 = 0$ folgt, dass $\varphi(x) \equiv 0$ löst (*)
2. $y_0 > 0$: Aus $y_0 > 0$ folgt: Sei $\varphi : I \rightarrow \mathbb{R}$ eine Lösung von (*) mit $\varphi(0) = y_0 > 0$. Falls es $x \in I$ gibt mit $\varphi(x) < 0$, dann existiert nach dem Zwischenwertsatz ein $\bar{x} \in I$ mit $\varphi(\bar{x}) = 0$. Dies ist ein Widerspruch zur Eindeutigkeit der Lösung \nexists
 $\Rightarrow \varphi(x) > 0$ für alle $x \in I$. $f : I = \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, g : J = \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_+^*$. $f(x) = 1, g(x) = x^2$. Setze nun:
 $F : I \rightarrow \mathbb{R}, G : J \rightarrow \mathbb{R}$

$$F(x) = \int_0^x f(t) dt = x$$

$$G(y) = \int_{y_0}^y \frac{1}{g(s)} ds = \int_{y_0}^y \frac{1}{s^2} ds = \frac{1}{y_0} - \frac{1}{y}$$

Für $I' = (-\infty, \frac{1}{y_0})$ gilt $F(I') = (-\infty, \frac{1}{y_0})$ und somit $F(I') \subset G(J)$. Nach 2.1 besitzt (*) eine eindeutige Lösung $\varphi : I' \rightarrow \mathbb{R}_+^*$ mit $\frac{1}{y_0} - \frac{1}{\varphi(x)} = x \leadsto \varphi(x) = \frac{y_0}{1-x \cdot y_0}$

3. $y_0 < 0$: Analog zu 2. $I' = (\frac{1}{y_0}, \infty)$ $\varphi(x) = \frac{y_0}{1-x \cdot y_0}$

2.3 Satz (homogene, lineare Differentialgleichung)

Sei I ein Intervall, $a : I \rightarrow \mathbb{R}$ stetig, $x_0 \in I, y_0 \in \mathbb{R}$. Dann besitzt

$$y' = a(x)y$$

genau eine Lösung $\varphi : I \rightarrow \mathbb{R}$ mit $\varphi(x_0) = y_0$ gegeben durch:

$$\varphi(x) = y_0 \cdot e^{\int_{x_0}^x a(t) dt}$$

Beweis

$$\varphi(x_0) = y_0 \quad \checkmark$$

φ wie in (***) ist eine Lösung von (*) (Nachrechnen). Da $(x, y) \mapsto a(x) \cdot y$ Lipschitz \Rightarrow Lösung ist eindeutig (1.6) \square

2.4 Beispiel

$$y' = c \cdot y$$

hat Lösungen der Form $\varphi(x) = y_0 e^{c|x-x_0|}$ mit $\varphi(x_0) = y_0$. (*) ist eine homogene lineare Differentialgleichung mit konstanten Koeffizienten.

2.5 Satz (inhomogene lineare DGL; Variation der Konstanten)

Sei $I \subset \mathbb{R}$ ein Intervall, $a, b : I \rightarrow \mathbb{R}$ stetig, $x_0 \in I, y_0 \in \mathbb{R}$. Dann besitzt

$$y' = a(x) \cdot y + b(x)$$

genau eine Lösung $\psi : I \rightarrow \mathbb{R}$ mit $\psi(x_0) = y_0$, nämlich

$$\psi(x) = \underbrace{y_0 \cdot \varphi(x)}_{\text{homogene Lösung}} + \underbrace{\varphi(x) \cdot \int_{x_0}^x \varphi(t)^{-1} b(t) dt}_{\text{inhomogene Lösung}} = \varphi(x) \underbrace{\left(y_0 + \int_{x_0}^x \varphi(t)^{-1} b(t) dt \right)}_{\text{Variation der Konstanten}}$$

wobei $\varphi(x) = e^{\int_{x_0}^x a(t) dt}$ eine Lösung der homogenen linearen DGL $y' = a(x)y$ mit $\varphi(x_0) = 1$ ist.

Beweis

ψ löst (*): einsetzen. $f(x, y) = a(x)y + b(x)$ ist lokal Lipschitz \Rightarrow Eindeutigkeit. □

2.6 Bemerkung

Der Ansatz lässt sich (zum Teil) auf Systeme von linearen Differentialgleichungen der Form

$$y' = Ay + b \quad y, b : I \rightarrow \mathbb{R}^n, A : I \rightarrow M_n(\mathbb{R})$$

übertragen. (*) schreibt sich auch als

$$\begin{pmatrix} y_1' \\ \vdots \\ y_n' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} \cdot y_1 + \dots + a_{1n} \cdot y_n \\ \vdots \\ a_{n1} \cdot y_1 + \dots + a_{nn} \cdot y_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}$$

Es gilt:

$$\{\text{Lösungen der inhomogenen linearen DGL}\} = \psi_0 + \{\text{Lösungen der homogenen linearen DGL}\}$$

wobei ψ_0 (irgend-)eine Lösung der inhomogenen linearen DGL ist. Die Lösungen der homogenen linearen DGL bilden einen Vektorraum.

2.7 Homogene Differentialgleichungen

Betrachte

$$y' = f\left(\frac{y}{x}\right)$$

Mit $z = \frac{y}{x}$ ergibt sich $y = x \cdot z$, also $y' = x \cdot z' + z$ und damit $x \cdot z' + z = f(z)$, also

$$z' = \frac{1}{x}(f(z) - z)$$

(**) lässt sich mit Trennung der Variablen behandeln (siehe 2.1).

2.8 Satz

Seien $I \subset \mathbb{R}^*$, $J \subset \mathbb{R}$ Intervalle, $f : J \rightarrow \mathbb{R}$ stetig und $G := \{(x, y) \in \mathbb{R}^* \times \mathbb{R} \mid \frac{y}{x} \in J\}$. Sei $(x_0, y_0) \in G$ ein Punkt mit $x_0 \in I$. Dann gilt: Eine Funktion $\varphi : I \rightarrow \mathbb{R}$ ist Lösung von $y' = f(\frac{y}{x})$ (*) genau dann, wenn $\psi : I \rightarrow \mathbb{R}$, $\psi(x) := \frac{\varphi(x)}{x}$ Lösung ist von $z' = \frac{1}{x}(f(z) - z)$ (**) mit $\psi(x_0) = \frac{y_0}{x_0}$.

Beweis

Nachrechnen □

2.9 Beispiel

Betrachte

$$y' = 1 + \frac{y}{x} + \left(\frac{y}{x}\right)^2$$

auf $\mathbb{R}^* \times \mathbb{R}$ mit Anfangsbedingung (x_0, y_0) . Die Substitution $z = \frac{y}{x}$ liefert

$$z' = \underbrace{\frac{1}{x}}_{=:f(x)} \underbrace{(1+z^2)}_{=:g(z)}$$

mit Anfangsbedingung $(x_0, \frac{y_0}{x_0})$. Trennung der Variablen (Satz 2.1) liefert:

$$\arctan(\psi(x)) - \arctan\left(\frac{y_0}{x_0}\right) = \int_{\frac{y_0}{x_0}}^{\psi(x)} \frac{1}{1+s^2} ds = G(\psi(x)) = F(x) = \int_{x_0}^x \frac{1}{t} dt = \ln x - \ln x_0 = \ln \frac{x}{x_0}$$

$\Rightarrow \psi(x) = \tan\left(\ln \frac{x}{x_0} + \arctan \frac{y_0}{x_0}\right)$ und $\varphi(x) = x \cdot \psi(x)$ löst das Anfangswertproblem $y' = 1 + \frac{y}{x} + \left(\frac{y}{x}\right)^2, (x_0, y_0)$.

2.10 Beispiel

Sei $U : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ zweimal stetig differenzierbar. Betrachte

$$\ddot{x} = -\text{grad } U(x)$$

d.h. wir suchen $x : I \rightarrow \mathbb{R}^3, x(t) = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{pmatrix}$ mit $\ddot{x}(t) = -\text{grad } U(x(t)), t \in I$, also

$$\begin{pmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \\ \ddot{x}_3(t) \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \frac{\partial U}{\partial x_1}(x_1(t), x_2(t), x_3(t)) \\ \frac{\partial U}{\partial x_2}(x_1(t), x_2(t), x_3(t)) \\ \frac{\partial U}{\partial x_3}(x_1(t), x_2(t), x_3(t)) \end{pmatrix}$$

Wir nehmen an, dass das Potential U in $0 \in \mathbb{R}^3$ ein lokales Maximum hat und interessieren uns für Lösungen x von $(*)$ in einer kleinen Umgebung von 0.

$x(t) \equiv 0$ ist Lösung, d.h. das System ist im Minimum im Gleichgewicht. Wir nehmen weiter an, dass

$$A := (\text{Hess } U)(0) = \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x_i \partial x_j}(0) \right)_{i,j} \in M_3(\mathbb{R})$$

positiv definit ist, d.h. es existiert $S \in M_3(\mathbb{R})$ orthogonal mit

$$B := S^{-1}AS = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & 0 \\ & \lambda_2 & \\ 0 & & \lambda_3 \end{pmatrix}, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 > 0$$

Ana. II \leadsto

$$U(\xi) = U(0 + \xi) = U(0) + \frac{1}{2} \langle \xi | A \xi \rangle + \beta(\xi)$$

für ein $\beta : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ mit $\lim_{\xi \rightarrow 0} \frac{\beta(\xi)}{\|\xi\|_2} = 0$. Wir approximieren nun $U(\xi)$ durch

$$\tilde{U}(\xi) := U(0) + \frac{1}{2} \langle \xi | A \cdot \xi \rangle$$

Wie in Ana. II 8.6 (i) erhält man

$$\text{grad}(\xi \mapsto \langle \xi | A \cdot \xi \rangle) = 2A \cdot x$$

Also $\text{grad } \tilde{U}(x) = A \cdot x$

$$\leadsto \ddot{x} = -Ax$$

$y := S^{-1}x \Rightarrow \ddot{y} = S^{-1}\ddot{x} = S^{-1}(-A)x = -S^{-1}ASS^{-1}x = -BS^{-1}x = -By$. Also folgt:

$$\ddot{y} = -By = - \begin{pmatrix} \lambda_1 & & \\ & \lambda_2 & \\ & & \lambda_3 \end{pmatrix} y, \quad \begin{pmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \\ \ddot{y}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\lambda_1 y \\ -\lambda_2 y \\ -\lambda_3 y \end{pmatrix}$$

mit den Lösungen $y_i(t) = \alpha_i \cdot \cos(\sqrt{\lambda_i} \cdot t) + \beta_i \cdot \sin(\sqrt{\lambda_i} \cdot t)$, $\alpha_i, \beta_i \in \mathbb{R}$ $i = 1, 2, 3$

3 Treppenfunktionen: Die L^1 -Halbnorm

3.1 Definition

- a) Ein **Quader** $Q \subset \mathbb{R}^n$ ist eine Teilmenge der Form $Q = I_1 \times I_2 \times \dots \times I_n$, wo $I_j \subset \mathbb{R}, j = 1, \dots, n$ ein beschränktes, nicht leeres Intervall ist.
(Wir lassen offene, halboffene, abgeschlossene und Intervalle mit einem Punkt zu.)
- b) Das **Volumen** eines Quaders wie in a) definieren wir als $v(Q) := |I_1| \cdot |I_2| \cdot \dots \cdot |I_n|$
($|I_j|$ ist die Länge von I_j)
- c) $\varphi : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ heißt **Treppenfunktion**, falls paarweise disjunkte Quader $Q_1, \dots, Q_s \subset \mathbb{R}^n$ existieren mit $\varphi|_{Q_j}$ konstant für $j = 1, \dots, s$ und

$$\varphi|_{\mathbb{R}^n \setminus \bigcup_{j=1}^s Q_j} \equiv 0$$

φ lässt sich dann schreiben als

$$\varphi = \sum_{j=1}^s c_j \cdot \chi_{Q_j}$$

auch mit $\mathbb{1}_{Q_j}$ bezeichnet

wo $\chi_{Q_j} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ die charakteristische Funktion von Q_j ist,

$$\chi_{Q_j}(x) = \begin{cases} 1, & \text{falls } x \in Q_j \\ 0, & \text{falls } x \notin Q_j \end{cases}$$

Wir schreiben $\mathcal{T}_{\mathbb{R}^n} := \{\text{Treppenfunktionen auf } \mathbb{R}^n\}$.

- d) Für eine Treppenfunktion φ wie in c) definieren wir das **Integral**

$$\int_{\mathbb{R}^n} \varphi(x) dx := \sum_{j=1}^s c_j \cdot v(Q_j)$$

Wir schreiben auch $\int \varphi dx$.

3.2 Bemerkung

Falls $Q_1, \dots, Q_s \subset \mathbb{R}^n$ Quader sind (nicht notwendig paarweise disjunkt), $c_1, \dots, c_s \in \mathbb{R}$, so ist $\varphi = \sum_{j=1}^s c_j \cdot \chi_{Q_j}$ eine Treppenfunktion: Es existieren paarweise disjunkte Quader $Q'_1, \dots, Q'_{s'} \subset \mathbb{R}^n$ mit $\varphi|_{Q'_i} \equiv c_i$ und $\bigcup Q_j = \bigcup Q'_i \rightsquigarrow \varphi = \sum_{i=1}^{s'} c'_i \cdot \chi_{Q'_i}$

3.3 Proposition

- a) $\mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$ ist ein Vektorraum über \mathbb{R} .
- b) $\int_{\mathbb{R}^n} \varphi(x) dx$ hängt nicht von der Darstellung $\varphi = \sum_{k=1}^s c_k \cdot \chi_{Q_k}$ ab (wo $Q_1, \dots, Q_s \subset \mathbb{R}^n$ Quader sind und $c_1, \dots, c_s \in \mathbb{R}$)
- c) Es gilt
- $\int (\alpha \cdot \varphi + \beta \cdot \psi) dx = \alpha \cdot \int \varphi dx + \beta \cdot \int \psi dx$, $\varphi, \psi \in \mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$, $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$. Mit anderen Worten ($\varphi \mapsto \int \varphi dx$) ist lineares Funktional auf $\mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$
 - $|\int \varphi dx| \leq \int |\varphi| dx$
 - $\varphi \leq \psi \implies \int \varphi dx \leq \int \psi dx$

Beweisa) 1. $Q, Q' \subset \mathbb{R}^n$ Quader $\Rightarrow Q \cap Q'$ Quader2. $\varphi = \sum_{k=1}^s c_k \cdot \chi_{Q_k}, \psi = \sum_{l=1}^{s'} c'_l \cdot \chi_{Q'_l} \in \mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}, \alpha, \beta \in \mathbb{R}$. Dann gilt o.E. $\cup Q_k = \cup Q'_l$

$$\alpha \cdot \varphi + \beta \cdot \psi = \sum_{\substack{j=1, \dots, s \\ l=1, \dots, s'}} (\alpha \cdot c_k + \beta \cdot c'_l) \cdot \chi_{Q_k \cap Q'_l} \in \mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$$

b) Für $n = 1$: Analysis I.Sei die Behauptung für $n - 1$ bewiesen. Betrachte

$$\varphi = \sum_{k=1}^s c_k \cdot \chi_{Q_k} \in \mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$$

Jeder Quader Q_k lässt sich schreiben als $Q_k = Q'_k \times Q''_k$ mit Quadern $Q'_k \subset \mathbb{R}$ und $Q''_k \subset \mathbb{R}^{n-1}$
 $Q_k = (I_1) \times (I_2 \times \dots \times I_n)$. Es gilt für $(x, y) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}^{n-1} = \mathbb{R}^n$. Dann gilt

$$\chi_{Q_k}((x, y)) = \chi_{Q'_k}(x) \cdot \chi_{Q''_k}(y)$$

Für $y \in \mathbb{R}^{n-1}$ definieren wir $\varphi_y : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ durch $\varphi(y) := \varphi(x, y)$ (φ_y hängt nicht von der Darstellung in (\star) ab). Dann gilt:

$$\varphi_y(x) = \sum_{k=1}^s c_k \cdot \chi_{Q_k}(x, y) = \sum_{k=1}^s c_k \cdot \chi_{Q'_k}(x) \cdot \chi_{Q''_k}(y)$$

Also

$$\varphi_y = \sum_{k=1}^s c_k \cdot \chi_{Q'_k} \cdot \chi_{Q''_k} \in \mathcal{T}_{\mathbb{R}}$$

nach Bemerkung 3.2. Aus Analysis I folgt $\int \varphi_y(x) dx$ ist wohldefiniert und hängt nicht von der Darstellung $(\star\star)$ ab:

$$\Phi(y) := \int \varphi_y(x) dx = \sum_{k=1}^s c_k \cdot \chi_{Q'_k}(y) \cdot v(Q'_k)$$

Dann ist $\Phi : \mathbb{R}^{n-1} \rightarrow \mathbb{R}$ definiert durch $y \mapsto \Phi(y)$, eine Treppenfunktion, denn nach $(\star\star\star)$

$$\Phi = \sum_{k=1}^s c_k \cdot v(Q'_k) \cdot \chi_{Q''_k}$$

I.V. $\Rightarrow \int \Phi(y) dy$ ist wohldefiniert und hängt nicht von der Darstellung $(\star\star\star)$ ab; es gilt

$$\int_{\mathbb{R}^{n-1}} \Phi(y) dy = \sum_{k=1}^s c_k \cdot v(Q'_k) \cdot v(Q''_k)$$

also

$$\int_{\mathbb{R}^{n-1}} \left(\int \varphi_y(x) dx \right) dy = \sum_{k=1}^s c_k \cdot v(Q_k)$$

und die linke Seite hängt nicht von der Darstellung (\star) ab.

c) Übung, benutze $(\star\star\star\star)$. □

3.4 Corollar (Fubini für Treppenfunktionen)

Für $\varphi \in \mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$ gilt mit $\mathbb{R}^n = \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^{n-p}$

$$\int_{\mathbb{R}^n} \varphi(z) \, dz = \int_{\mathbb{R}^{n-p}} \left(\int_{\mathbb{R}^p} \varphi(x, y) \, dx \right) dy$$

Beweis

Benutze wiederholt ($\star \star \star \star$) aus 3.3 b)

□

3.5 Notation

Wir verstehen $(-\infty, \infty] = \mathbb{R} \cup \{\infty\}$ mit Ordnung und Operationen von \mathbb{R} und

- $c < \infty, \forall c \in \mathbb{R},$
- $\infty \cdot c = c \cdot \infty = \infty, c \in \mathbb{R}^*,$
- $\infty + c = c + \infty = \infty, c \in \mathbb{R} \cup \{\infty\},$
- $\infty \cdot 0 = 0 \cdot \infty = 0.$

3.6 Definition

Sei $f : \mathbb{R}^n \rightarrow (-\infty, \infty]$ eine Abbildung. Eine **Treppe** über f ist eine Reihe

$$\Phi = \sum_{k=0}^{\infty} c_k \cdot \chi_{Q_k}$$

mit folgenden Eigenschaften:

- (i) $Q_k \subset \mathbb{R}^n$ sind offene Quader, $c_k \in \mathbb{R}_+$
- (ii) $|f(x)| \leq \Phi(x) := \sum_{k=0}^{\infty} c_k \cdot \chi_{Q_k}(x) \in (-\infty, \infty], x \in \mathbb{R}^n$

I für "Inhalt"

Wir setzen $I(\Phi) := \sum_{k=0}^{\infty} c_k \cdot v(Q_k) \in (-\infty, \infty]$

3.7 Definition

Sei $f : \mathbb{R}^n \rightarrow (-\infty, \infty]$. Wir setzen

$$\|f\|_1 := \inf \{I(\Phi) \mid \Phi \text{ Treppe über } f\}$$

3.8 Bemerkung

1. Eine Treppe über f existiert für jedes f (warum?), daher $\|f\|_1 \in [0, \infty]$ für jedes f .
2. Für $f, g : \mathbb{R}^n \rightarrow (-\infty, \infty], \lambda \in \mathbb{R}$ gilt:
 - (i) $\|\lambda \cdot f\|_1 = |\lambda| \cdot \|f\|_1$
 - (ii) $\|f + g\|_1 \leq \|f\|_1 + \|g\|_1$
 - (iii) $|f| \leq |g| \implies \|f\|_1 \leq \|g\|_1$

Beweis: Übung.

3. Es gilt nicht: $\|f\|_1 = 0 \implies f \equiv 0$ (Übung)
 $\|\cdot\|_1$ ist also **Halbnorm** auf $\{f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \mid \|f\|_1 < \infty\}$ VR: Siehe 6.1 und 6.2

für stetige f allerdings
schon

3.9 Proposition

Für $f_0, f_1, \dots : \mathbb{R}^n \rightarrow [0, \infty]$ definiert $x \mapsto \sum_{k=0}^{\infty} f_k(x) = \lim_{K \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^K f_k(x)$, $x \in \mathbb{R}^n$ eine Abbildung $\sum_{k=0}^{\infty} f_k : \mathbb{R}^n \rightarrow [0, \infty]$. Es gilt

$$\left\| \sum_{k=0}^{\infty} f_k \right\|_1 \leq \sum_{k=0}^{\infty} \|f_k\|_1$$

Beweis

Sei $\varepsilon > 0$. Für jedes $k \in \mathbb{N}$ wähle eine Treppe $\Phi_k = \sum_{i=0}^{\infty} c_{k,i} \cdot \chi_{Q_{k,i}}$ über f_k mit $I(\Phi_k) \leq \|f_k\|_1 + \frac{\varepsilon}{2^{k+1}}$. Wähle eine Bijektion $\gamma : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N} \times \mathbb{N}$ und setze

$$\Phi := \sum_{l \in \mathbb{N}} c_{\gamma(l)} \cdot \chi_{Q_{\gamma(l)}} = \sum_{\substack{k \in \mathbb{N} \\ i \in \mathbb{N}}} c_{k,i} \cdot \chi_{Q_{k,i}}$$

Dann gilt

- $\Phi = \sum_{k=0}^{\infty} \Phi_k$, insbesondere ist Φ nicht abhängig von γ
- Φ ist Treppe über $\sum_{k \in \mathbb{N}} f_k$
-

$$\begin{aligned} \left\| \sum_{k=0}^{\infty} f_k \right\|_1 &\leq I(\Phi) = \sum_{l=0}^{\infty} c_{\gamma(l)} \cdot v(Q_{\gamma(l)}) \stackrel{*}{=} \sum_{k=0}^{\infty} I(\Phi_k) \\ &\leq \sum_{k=0}^{\infty} \left(\|f_k\|_1 + \frac{\varepsilon}{2^{k+1}} \right) \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \|f_k\|_1 + \varepsilon \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \left\| \sum_{k=0}^{\infty} f_k \right\|_1 \leq \sum_{k=0}^{\infty} \|f_k\|_1$$

Für \star benutze: $(a_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset [0, \infty]$, $\beta : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ Bijektion, dann gilt

$$S_K = \sum_{k=0}^K a_k \xrightarrow{K \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^{\infty} a_k = \sum_{k=0}^{\infty} a_{\beta(k)} \xleftarrow{L \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^L a_{\beta(k)} = V_L$$

gilt nur, da $a_k \geq 0$;
 \Rightarrow Riemannscher
 Umordnungssatz

□

3.10 Lemma

Sei $Q \subset \mathbb{R}^n$ ein abgeschlossener Quader. Dann gilt

$$\|\chi_Q\|_1 = v(Q) \left(=: \int \chi_Q dx \right)$$

Beweis

Zu jedem $\varepsilon > 0$ existiert ein offener Quader $Q' \subset \mathbb{R}^n$ mit $Q \subset Q'$ und $v(Q') \leq v(Q) + \varepsilon$. $\chi_{Q'}$ ist dann Treppe über χ_Q . Es gilt

$$I(\chi_{Q'}) = v(Q') \leq v(Q) + \varepsilon$$

also $\|\chi_Q\|_1 = \inf \{ I(\Phi) \mid \Phi \text{ Treppe über } \chi_Q \} \leq v(Q)$. Sei nun $\Phi = \sum_k c_k \cdot \chi_{Q_k}$ eine Treppe über χ_Q . Zu $\varepsilon > 0$ und $x \in Q$ existieren wegen $\chi_Q(x) \leq \Phi(x)$ ein $N(x) \in \mathbb{N}$ mit

$$1 - \varepsilon = \chi_Q(x) - \varepsilon \leq \sum_{k=0}^{N(x)} c_k \cdot \chi_{Q_k}(x)$$

Die Q_k sind offen, daher existiert eine Umgebung $U(x)$, so dass gilt: $x \in Q_k \Rightarrow U(x) \subset Q_k$ für $k = 0, \dots, N(x)$. Für $y \in U(x)$ erhalten wir

$$1 - \varepsilon \leq \sum_{k=0}^{N(x)} c_k \cdot \chi_{Q_k}(x) \leq \sum_{k=0}^{N(x)} c_k \cdot \chi_{Q_k}(y)$$

$(U(x))_{x \in Q}$ ist eine offene Überdeckung von Q . Q ist kompakt, also gilt nach Heine-Borel

$$\exists x_1, \dots, x_L \in Q : Q \subset \bigcup_{i=1}^L U(x_i)$$

Setze $N := \max\{N(x_1), \dots, N(x_L)\}$, dann gilt für $y \in Q$

$$\sum_{k=0}^N c_k \cdot \chi_{Q_k}(y) \geq 1 - \varepsilon = (1 - \varepsilon) \chi_Q(y)$$

also $\sum_{k=0}^N c_k \cdot \chi_{Q_k} \geq (1 - \varepsilon) \cdot \chi_Q$. Mit Proposition 3.3 folgt dann

$$I(\Phi) \geq \sum_{k=0}^N c_k \cdot v(Q_k) = \int \left(\sum_{k=0}^N c_k \cdot \chi_{Q_k}(y) \right) dy \geq \int (1 - \varepsilon) \chi_Q(y) dy = (1 - \varepsilon) v(Q)$$

Es folgt $I(\Phi) \geq v(Q)$ und damit $\|\chi_Q\|_1 \geq v(Q)$ □

3.11 Lemma

Für jedes $\varphi \in \mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$ gilt

$$\|\varphi\|_1 = \int |\varphi| dx$$

Beweis

1. Es existieren paarweise disjunkte Quader $Q_1, \dots, Q_s, P_1, \dots, P_r \subset \mathbb{R}^n$ und $c_1, \dots, c_s, d_1, \dots, d_r \in \mathbb{R}$ mit

- $\varphi = \sum_{k=1}^s c_k \cdot \chi_{Q_k} + \sum_{l=1}^r d_l \cdot \chi_{P_l}$
- $Q_k \subset \mathbb{R}^n$ ist offen für $k = 1, \dots, s$
- $v(P_l) = 0$, $l = 1, \dots, r$ (d.h. P_l ist von der Form $I_{l,1} \times \dots \times I_{l,n}$ und mindestens ein $I_{l,j}$ besteht nur aus einem Punkt)

(Übung)

Es gilt dann $|\varphi| = \sum_{k=1}^s |c_k| \cdot \chi_{Q_k} + \sum_{l=1}^r |d_l| \cdot \chi_{P_l}$ (die Quader sind paarweise disjunkt). Sei nun $\varepsilon > 0$. Zu jedem P_l existiert ein offener Quader P'_l mit $P_l \subset P'_l$ und $v(P'_l) < \varepsilon$. Dann ist

$$\Phi := \sum_{k=1}^s |c_k| \cdot \chi_{Q_k} + \sum_{l=1}^r |d_l| \cdot \chi_{P'_l}$$

eine Treppe über $|\varphi|$ also auch über φ . Es ist

$$I(\Phi) = \sum_{k=1}^s |c_k| \cdot v(Q_k) + \sum_{l=1}^r |d_l| \cdot v(P'_l) \leq \sum_{k=1}^s |c_k| \cdot v(Q_k) + \varepsilon \cdot \sum_{l=1}^r |d_l|$$

also $\|\varphi\|_1 \leq \sum_{k=1}^s |c_k| \cdot v(Q_k) = \int |\varphi| dx$

2. Sei nun $Q \subset \mathbb{R}^n$ ein abgeschlossener Quader mit $(\bigcup Q_k) \cup (\bigcup P_l) \subset Q$, d.h. $\varphi|_{\mathbb{R}^n \setminus Q} \equiv 0$. Setze $M := \max\{|c_k|, |d_l|\} = \max|\varphi| \in \mathbb{R}$. Setze $\psi := M \cdot \chi_Q - |\varphi|$ dann ist $0 < \psi = |\psi| \in \mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$. Nach Teil 1. gilt

$$\|\psi\|_1 \leq \int |\psi| \, dx = \int \psi \, dx$$

Wir erhalten

$$\begin{aligned}
 \int |\varphi| &= \int (M \cdot \chi_Q - \psi) \, dx = M \cdot \int \chi_Q \, dx - \int \psi \, dx \\
 &= M \cdot \|\chi_Q\|_1 - \int \psi \, dx \\
 &= \|M \cdot \chi_Q\|_1 - \int \psi \, dx \\
 &\leq \|M \cdot \chi_Q\|_1 - \|\psi\|_1 \\
 &= \| |\varphi| + \psi \|_1 - \|\psi\|_1 \\
 &\leq \| |\varphi| \|_1 \\
 &= \|\varphi\|_1
 \end{aligned}$$

□

4 Das Lebesgue-Integral

4.1 Definition

$f : \mathbb{R}^n \rightarrow (-\infty, \infty]$ heißt **Lebesgue integrierbar**, falls eine Folge $(\varphi_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$ existiert mit

$$\|f - \varphi_k\|_1 \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$$

Wir setzen

siehe auch 3.1

$$\int_{\mathbb{R}^n} f(x) \, dx := \lim_{k \rightarrow \infty} \int_{\mathbb{R}^n} \varphi_k(x) \, dx$$

Wir schreiben auch $\int f \, dx$.

4.2 Bemerkung

- 1) Der Limes in (\star) existiert, denn $(\int \varphi_k(x) \, dx)_{k \in \mathbb{N}}$ ist eine Cauchyfolge:

für geeignete k, l

$$\left| \int \varphi_k \, dx - \int \varphi_l \, dx \right| \leq \int |\varphi_k - \varphi_l| \, dx = \|\varphi_k - \varphi_l\|_1 \leq \|\varphi_k - f\|_1 + \|f - \varphi_l\|_1 \leq \varepsilon$$

Ebenso: Der Limes in (\star) hängt nicht von der Wahl der Approximationsfolge $(\varphi_k)_{k \in \mathbb{N}}$ ab. (D.h. für eine weitere Folge $(\psi_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$ mit $\|\psi_k - f\|_1 \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$, so ist $\lim_k \int \psi_k \, dx = \int \varphi_k \, dx$)

- 2) Sei $\varphi \in \mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$. Dann ist φ Lebesgue integrierbar und das Integral stimmt mit dem aus (3.1) überein.

4.3 Proposition

Seien $f, g : \mathbb{R}^n \rightarrow (-\infty, \infty]$ integrierbar, $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$. Dann gilt

- a) $\alpha \cdot f + \beta \cdot g$ ist integrierbar; es gilt

$$\int (\alpha \cdot f + \beta \cdot g) \, dx = \alpha \cdot \int f \, dx + \beta \cdot \int g \, dx.$$

Insbesondere ist $\mathcal{L}^1(\mathbb{R}^n) := \{f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \mid f \text{ Lebesgue integrierbar}\}$ ein Vektorraum über \mathbb{R} und $\int : \mathcal{L}^1(\mathbb{R}^n) \rightarrow \mathbb{R}$ ist linear.

- b) $|f|$ ist integrierbar und es gilt:

$$\left| \int f \, dx \right| \leq \int |f| \, dx = \|f\|_1$$

- c) Ist $f \leq g$, so folgt $\int f \, dx \leq \int g \, dx$

(Monotonie)

- d) Aus g beschränkt folgt $f \cdot g$ ist integrierbar.

Beweis

- a) Seien $(\varphi_k)_{k \in \mathbb{N}}, (\psi_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$ mit $\|f - \varphi_k\|_1, \|g - \psi_k\|_1 \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$. Dann ist $\alpha \cdot \varphi_k + \beta \cdot \psi_k \in \mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$ und

$$\|\alpha \cdot f + \beta \cdot g - \alpha \cdot \varphi_k - \beta \cdot \psi_k\|_1 \leq |\alpha| \cdot \|f - \varphi_k\|_1 + |\beta| \cdot \|g - \psi_k\|_1 \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$$

- b) benutze $||f| - |\varphi_k|| \leq |f - \varphi_k|$, also $||f| - |\varphi_k||_1 \leq \|f - \varphi_k\|_1$, sowie $\|f\|_1 - \|f - \varphi_k\|_1 \leq \|\varphi_k\|_1 \leq \|f\|_1 + \|f - \varphi_k\|_1$

- c) Übung

- d) Übung

□

4.4 Bemerkung

Falls f integrierbar ist, so auch

$$f_+ := \max\{f, 0\} = \frac{1}{2} \cdot (f + |f|)$$

$$f_- := \max\{-f, 0\} = \frac{1}{2} \cdot (-f + |f|)$$

Dann gilt $f = f_+ - f_-$ und $f_+ \cdot f_- = 0$. Entsprechend für

$$\max\{f, g\} = \frac{1}{2}(f + g + |f - g|),$$

$$\min\{f, g\} = \frac{1}{2}(f + g - |f - g|)$$

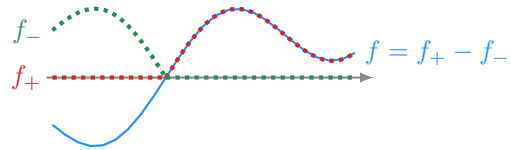


Abb. 1: Zerteilung von f in f_+ und f_-

4.5 Definition

Sei $A \subset \mathbb{R}^n$, $f : A \rightarrow (-\infty, \infty]$. f heißt integrierbar über A , falls $f_A : \mathbb{R}^n \rightarrow (-\infty, \infty]$ gegeben durch

triviale Fortsetzung

$$f_A(x) = \begin{cases} f(x), & \text{falls } x \in A \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

integrierbar ist. Wir schreiben

$$\int_A f \, dx := \int_{\mathbb{R}^n} f_A \, dx \quad , \quad \|f\|_{1,A} := \|f_A\|_1$$

$$\mathcal{L}^1(A) := \{g : A \rightarrow \mathbb{R} \mid g \text{ integrierbar über } A\}$$

Proposition 4.3 und Bemerkung 4.4 gelten entsprechend.

4.6 Proposition

Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ eine Regelfunktion. Dann ist f Lebesgue integrierbar und die Integrale stimmen überein.

Beweis

Sei $(\varphi_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{T}([a, b])$ eine Folge von Treppenfunktionen mit $\|f - \varphi_k\|_{\infty, [a, b]} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$. Dann

$$\begin{aligned} \|f_{[a, b]} - (\varphi_k)_{[a, b]}\|_1 &= \| |f - \varphi_k|_{[a, b]} \|_1 = \| |(f - \varphi_k)_{[a, b]}| \cdot \chi_{[a, b]} \|_1 \\ &\leq \| |f - \varphi_k|_{\infty, [a, b]} \cdot \chi_{[a, b]} \|_1 \\ &= \|f - \varphi_k\|_{\infty, [a, b]} \cdot (b - a) \\ &\xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0 \end{aligned}$$

$\Rightarrow f$ ist Lebesgue integrierbar und

$$\int_{[a, b]} f \, dx \stackrel{4.5}{=} \int_{\mathbb{R}} f_{[a, b]} \, dx \stackrel{4.1}{=} \lim_{k \rightarrow \infty} \int_{\mathbb{R}} (\varphi_k)_{[a, b]} \, dx = \lim_{k \rightarrow \infty} \int_a^b \varphi_k \, dx = \int_a^b f \, dx$$

□ die letzten beiden Integrale sind Riemann-Integrale

4.7 Satz (Translationsinvarianz)

Sei $f : \mathbb{R}^n \rightarrow (-\infty, \infty]$ integrierbar und $a \in \mathbb{R}^n$. Dann ist auch $f_a : \mathbb{R}^n \rightarrow (-\infty, \infty]$, gegeben durch $f_a(x) := f(x - a)$ integrierbar und es gilt

$$\int_{\mathbb{R}^n} f \, dx = \int_{\mathbb{R}^n} f_a \, dx$$

Beweis

Für jeden Quader $Q \subset \mathbb{R}^n$ ist $a + Q := \{x \in \mathbb{R}^n \mid x - a \in Q\}$ wieder ein Quader.

(warum?)

Es gilt

$$\int \chi_Q dx = v(Q) = v(a + Q) = \int \chi_{a+Q} dx = \int (\chi_Q)_a dx$$

Der Satz gilt daher für Funktionen der Form χ_Q ; wegen der Linearität auch für $f \in \mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$, denn $(\alpha \cdot f + \beta g)_a = \alpha \cdot f_a + \beta \cdot g_a$.

Ist nun $g : \mathbb{R}^n \rightarrow (-\infty, \infty]$ eine Abbildung und $\Phi = \sum_{k=0}^{\infty} c_k \cdot \chi_{Q_k}$ eine Treppe über g , so ist $\Phi_a := \sum_{k=0}^{\infty} c_k \cdot (\chi_{Q_k})_a$ eine Treppe über g_a und $I(\Phi) = I(\Phi_a) \Rightarrow \|g\|_1 = \|g_a\|_1$.
Sei $(\varphi_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$ mit $\|f - \varphi_k\|_1 \rightarrow 0$. Dann gilt auch

$$\|f_a - (\varphi_k)_a\|_1 = \|(f - \varphi_k)_a\|_1 = \|f - \varphi_k\|_1 \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0.$$

Also ist f_a integrierbar; es gilt weiter

$$\int f_a dx = \lim_{k \rightarrow \infty} \int (\varphi_k)_a dx = \lim_{k \rightarrow \infty} \int \varphi_k = \int f dx. \quad \square$$

4.8 Satz (Beppo Levi mit Treppenfunktionen)

Sei $f : \mathbb{R}^n \rightarrow (-\infty, \infty]$ eine Abbildung und $(\varphi_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$ eine Folge von Treppenfunktionen mit

- (i) $(\varphi_k)_{k \in \mathbb{N}}$ ist monoton wachsend,
- (ii) $\varphi_k \xrightarrow{k \rightarrow \infty} f$ punktweise und
- (iii) $(\int \varphi_k)_{k \in \mathbb{N}}$ ist beschränkt (also konvergent, da monoton).

Dann ist f integrierbar und es gilt

$$\int f dx = \lim_{k \rightarrow \infty} \int \varphi_k dx$$

Beweis

Für $x \in \mathbb{R}^n$ gilt

$$\begin{aligned} f(x) - \varphi_m(x) &= \lim_{k \rightarrow \infty} (\varphi_k(x) - \varphi_m(x)) \\ &= \lim_{k \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=m}^{k-1} \varphi_{i+1}(x) - \varphi_i(x) \right) \\ &= \sum_{i=m}^{\infty} \varphi_{i+1}(x) - \varphi_i(x) \end{aligned}$$

Teleskopsumme

Es folgt

$$f - \varphi_m = \sum_{i=m}^{\infty} \underbrace{\varphi_{i+1} - \varphi_i}_{\geq 0}$$

Damit ergibt sich

$$\begin{aligned}
 \Rightarrow \|f - \varphi_m\|_1 &\stackrel{3.9}{\leq} \sum_{i=m}^{\infty} \|\varphi_{i+1} - \varphi_i\|_1 \\
 &\stackrel{3.11}{=} \sum_{i=m}^{\infty} \int |\varphi_{i+1} - \varphi_i| \, dx = \sum_{i=m}^{\infty} \int (\varphi_{i+1} - \varphi_i) \, dx \\
 &= \sum_{i=m}^{\infty} \left(\int \varphi_{i+1} \, dx - \int \varphi_i \, dx \right) \\
 &= \lim_{k \rightarrow \infty} \int \varphi_k \, dx - \int \varphi_m \, dx \xrightarrow{m \rightarrow \infty} 0
 \end{aligned}
 \quad \square$$

4.9 Proposition

Sei $U \subset \mathbb{R}^n$ offen und $f : U \rightarrow \mathbb{R}_+$ und stetig. Dann existiert $(\varphi_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$ mit

- $\varphi_k : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}_+$,
- $(\varphi_k)_{k \in \mathbb{N}}$ monoton wachsend,
- $\varphi_k \xrightarrow{k \rightarrow \infty} f_U$ punktweise.

Beweis

Sei $Q_{x,t} \subset \mathbb{R}^n$ für $(x,t) \in \mathbb{Q}^n \times \mathbb{Q}$ durch $Q_{x,t} := [x_1 - t, x_1 + t] \times \dots \times [x_n - t, x_n + t]$. Setze

$$Q'_{x,t} := \begin{cases} Q_{x,t} & \text{falls } Q_{x,t} \subset U \\ \emptyset & \text{sonst} \end{cases}$$

und

$$c_{x,t} := \begin{cases} \min\{f(y) \mid y \in Q'_{x,t}\} & \text{falls } Q'_{x,t} \neq \emptyset \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

(Das Minimum existiert aufgrund der Kompaktheit von $Q'_{x,t}$)

Dann gilt für $(x,t) \in \mathbb{Q}^n \times \mathbb{Q}$ folgendes: $c_{x,t} \cdot \chi_{Q'_{x,t}} \leq f$. Außerdem gilt: Zu jedem $y \in U$, $\varepsilon > 0$ existiert ein $(x,t) \in \mathbb{Q}^n \times \mathbb{Q}$ mit

$$|c_{x,t} \cdot \chi_{Q'_{x,t}}(y) - f(y)| < \varepsilon$$

Wähle $\gamma : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{Q}^n \times \mathbb{Q}$ surjektiv und definiere $\varphi_k : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ durch

$$\varphi_k(y) := \max \left\{ c_{\gamma(i)} \cdot \chi_{Q'_{\gamma(i)}}(y) \mid i = 0, \dots, k \right\}$$

Dann ist $(\varphi_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$ wie gewünscht.

(warum?)

4.10 Satz

Sei $U \subset \mathbb{R}^n$ offen und beschränkt, $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ stetig und beschränkt. Dann ist f über U integrierbar.

Beweis

siehe auch 4.4

Wegen $f = f_+ - f_-$ (mit $f_+, f_- : U \rightarrow \mathbb{R}_+$ stetig) und Proposition (4.3) genügt es zu zeigen, dass f_+ und f_- integrierbar sind. Wir dürfen also o.E.d.A. annehmen, dass $0 \leq f \leq M \in \mathbb{R}_+$. Wähle $(\varphi_k)_\mathbb{N} \subset \mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$ wie in (4.9). (D.h. $\varphi_k \geq 0$, $\varphi_k \rightarrow f_U$ monoton und punktweise). Wähle $Q \subset \mathbb{R}^n$ ein Quader mit $U \subseteq Q$, dann ist

$$\int \varphi_k dx \leq \int M \cdot \chi_U dx \leq \int M \cdot \chi_Q dx = M \cdot v(Q) < \infty$$

Mit Satz 4.8 folgt: f_U ist integrierbar über \mathbb{R}^n , also ist f integrierbar über U . \square

4.11 Satz (Fubini für stetige Funktionen auf offenen Teilmengen)

Sei $U \subset \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^q$ offen und beschränkt, $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ stetig und beschränkt. Für $y \in \mathbb{R}^q$ definiere $f_y : \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}$ durch $f_y(x) := f_U(x, y)$. Dann ist f_y integrierbar, die Funktion $F : \mathbb{R}^q \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch $F(y) := \int_{\mathbb{R}^n} f_y(x) dx$ ist ebenfalls integrierbar und es ist

$$\int_{\mathbb{R}^n} f_U(x, y) d(x, y) = \int_{\mathbb{R}^q} F(y) dy = \int_{\mathbb{R}^q} \left(\int_{\mathbb{R}^p} f_U(x, y) dx \right) dy.$$

Beweis

O.E.d.A. $0 \leq f \leq M$. Sei $(\varphi_k)_\mathbb{N} \subset \mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$ wie in Proposition 4.9; wie im Beweis von 4.10 ist $(\int \varphi_k dx)_\mathbb{N}$ beschränkt. Nach Satz 4.8 gilt

$$\int_{\mathbb{R}^n} f_U(x, y) d(x, y) = \lim_{k \rightarrow \infty} \int_{\mathbb{R}^n} \varphi_k(x, y) d(x, y)$$

Für $y \in \mathbb{R}^q$ ist $\psi_{y,k} : \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}$, definiert durch $\psi_{y,k}(x) := \varphi_k(x, y)$ in $\mathcal{T}_{\mathbb{R}^p}$ (wie in 3.3). Dann gilt $\psi_{y,k} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} f_y$ punktweise und monoton wachsend. Wie im Beweis von 4.10 sieht man, dass $(\int_{\mathbb{R}^p} \psi_{y,k} dx)_\mathbb{N}$ beschränkt ist. Mit Satz 4.8 folgt

$$F(y) := \int_{\mathbb{R}^p} f_U(x, y) dx = \int_{\mathbb{R}^p} f_y(x) dx = \lim_{k \rightarrow \infty} \int_{\mathbb{R}^p} \psi_{y,k}(x) dx$$

Definiere $\Phi_k : \mathbb{R}^q \rightarrow \mathbb{R}$ durch $\Phi_k(y) := \int_{\mathbb{R}^p} \varphi_k(x, y) dx$ wie im Beweis 3.3 (bzw. 3.4), sieht man $\Phi_k \in \mathcal{T}_{\mathbb{R}^q}$. Es gilt

$$\int_{\mathbb{R}^q} \Phi_k(y) dy = \int_{\mathbb{R}^n} \varphi_k(x, y) d(x, y) \leq \int_{\mathbb{R}^n} f_U(x, y) d(x, y) < \infty$$

Die Folge $(\Phi_k)_\mathbb{N}$ ist monoton (wegen der Monotonie der φ_k und des Integrals). Es gilt $\Phi_k(y) \xrightarrow{k \rightarrow \infty} F(y)$, d.h. $\Phi_k \nearrow F$ punktweise und monoton. Mit 4.8 folgt, dass F integrierbar ist mit

$$\int_{\mathbb{R}^q} F(y) dy = \lim_{k \rightarrow \infty} \int_{\mathbb{R}^q} \Phi_k(y) dy = \lim_{k \rightarrow \infty} \int_{\mathbb{R}^n} \varphi_k(x, y) d(x, y) = \int_{\mathbb{R}^n} f_U(x, y) d(x, y) \quad \square$$

5 Messbarkeit in \mathbb{R}^n , Nullmengen

5.1 Definition

Eine Menge $A \subset \mathbb{R}^n$ heißt **Lebesgue-messbar**, falls χ_A integrierbar ist. Wir setzen $v(A) := \int_{\mathbb{R}^n} \chi_A$.

5.2 Proposition

Seien $A, B \subset \mathbb{R}^n$ messbar, dann sind $A \cup B, A \cap B$ messbar mit $v(A \cup B) = v(A) + v(B) - v(A \cap B)$. Falls $A \subset B$ gilt, so ist $v(A) \leq v(B)$.

Beweis

Benutze (4.3) und:

$$(i) \quad \chi_{A \cup B} = \chi_A + \chi_B - \chi_{A \cap B}$$

$$(ii) \quad A \subset B \implies \chi_A \leq \chi_B$$

□

5.3 Proposition

Sei $A \subset \mathbb{R}^n$ beschränkt und offen oder kompakt. Dann ist A messbar.

Beweis

- 1) Sei $A \subset \mathbb{R}^n$ beschränkt und offen. Dann ist $f \equiv 1$ stetig und beschränkt ($f : A \rightarrow \mathbb{R}$). Mit 4.10 folgt, dass f_A integrierbar ist. $\Rightarrow f_A = \chi_A$ integrierbar $\Rightarrow A$ messbar.
- 2) Sei A kompakt. Dann existiert ein offener Quader $Q \subset \mathbb{R}^n$ mit $A \subseteq Q$, dann ist $Q \setminus A \subset \mathbb{R}^n$ _{offen} und beschränkt, also sind $\chi_{Q \setminus A}, \chi_Q$ integrierbar, also $\chi_A = \chi_Q - \chi_{Q \setminus A}$ integrierbar. □

5.4 Beispiel

$$(i) \quad U_r := B_{\mathbb{R}^2}(0, r) \subset \mathbb{R}^2 \text{ _{offen}}$$

$$\begin{aligned}
 v(U_r) &= \int_{\mathbb{R}^2} \chi_{U_r}(x, y) \, d(x, y) = \int_{\mathbb{R}} \left(\int_{\mathbb{R}} \chi_{U_r}(x, y) \, dx \right) dy \\
 &= \int_{\mathbb{R}} \left(\int_{\mathbb{R}} \chi_{(-r, r)}(y) \cdot \chi_{(-\sqrt{r^2-y^2}, \sqrt{r^2-y^2})}(x) \, dx \right) dy \\
 &= \int_{\mathbb{R}} \chi_{(-r, r)}(y) \cdot \left(\int_{\mathbb{R}} \chi_{(-\sqrt{r^2-y^2}, \sqrt{r^2-y^2})}(x) \, dx \right) dy \\
 &= \int_{\mathbb{R}} \chi_{(-r, r)}(y) \cdot 2 \cdot \sqrt{r^2 - y^2} \, dy \\
 &= \int_{-r}^r 2 \cdot \sqrt{r^2 - y^2} \, dy \\
 &= 2 \cdot \int_{-r}^r r \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{y}{r}\right)^2} \, dy \\
 &= 2 \cdot \int_{s(-r)}^{s(r)} r \cdot r \cdot \sqrt{1 - s^2} \, ds \\
 &= 2 \cdot r^2 \cdot \int_{-1}^1 \sqrt{1 - s^2} \, ds \\
 &= r^2 \cdot \pi
 \end{aligned}$$

S^1 ist die Sphäre, also die Kugeloberfläche

(ii) $S^1 \subset \mathbb{R}^2$ kompakt also messbar nach 5.3. $S_1 \subset U_{1+\varepsilon} \setminus U_1$. Mit 5.2 folgt

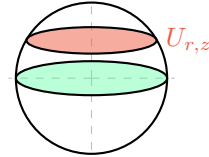
$$v(U_{1+\varepsilon}) = v(U_1 \cup (U_{1+\varepsilon} \setminus U_1)) = v(U_1) + v(U_{1+\varepsilon} \setminus U_1) - v(\emptyset)$$

damit folgt

$$v(S^1) \leq v(U_{1+\varepsilon}) - v(U_1) = \pi \cdot ((1+\varepsilon)^2 - 1^2) \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0} 0$$

(iii) $K_r := B_{\mathbb{R}^3}(0, r) \subset \mathbb{R}^3$ offen.

$$U_{r,z} := B_{\mathbb{R}^2}(0, \sqrt{r^2 - z^2})$$



$$\begin{aligned} v(K_r) &= \int_{\mathbb{R}^3} \chi_{K_r}(x, y, z) \, d(x, y, z) = \int_{\mathbb{R}} \left(\int_{\mathbb{R}^2} \chi_{K_r}(x, y, z) \, d(x, y) \right) dz \\ &= \int_{\mathbb{R}} \left(\int_{\mathbb{R}^2} \chi_{(-r,r)}(z) \cdot \chi_{U_{r,z}}(x, y) \, d(x, y) \right) dz \\ &= \int_{\mathbb{R}} \chi_{(-r,r)}(z) \left(\int_{\mathbb{R}^2} \chi_{U_{r,z}}(x, y) \, d(x, y) \right) dz \\ &= \int_{\mathbb{R}} \chi_{(-r,r)}(z) \cdot (\pi \cdot (r^2 - z^2)) \, dz && \text{nach i)} \\ &= \pi r^2 \int_{-r}^r 1 \, dz - \pi \int_{-r}^r z^2 \, dz \\ &= \pi r^2 \cdot 2r - \pi \cdot 2 \cdot \frac{r^3}{3} \\ &= \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \end{aligned} \quad \square$$

5.5 Bemerkung

Seien $U, W \subset \mathbb{R}^{n-1} \times \mathbb{R}$ offen. Setze $U_y := \{x \in \mathbb{R}^{n-1} \mid (x, y) \in U\}$ für $y \in \mathbb{R}$, $W_y := \{x \in \mathbb{R}^{n-1} \mid (x, y) \in W\}$ für $y \in \mathbb{R}$. Dann gilt $v_{\mathbb{R}^n}(U) = v_{\mathbb{R}^n}(W)$, falls gilt

$$v_{\mathbb{R}^{n-1}}(U_y) = v_{\mathbb{R}^{n-1}}(W_y) \quad \text{für alle } y \in \mathbb{R},$$

denn $v_{\mathbb{R}^n}(U) = \int_{\mathbb{R}} v_{\mathbb{R}^{n-1}}(U_y) \, dy = \int_{\mathbb{R}} v_{\mathbb{R}^{n-1}}(W_y) \, dy = v_{\mathbb{R}^n}(W)$ gilt nach Fubini (4.11). Mit Translationsinvarianz (4.7) ergibt sich das **Prinzip von Cavalieri**:

5.6 Proposition und Definition

$N \subset \mathbb{R}^n$ heißt **Lebesgue-Nullmenge**, falls sie eine der folgenden äquivalenten Eigenschaften erfüllt:

(i) N ist messbar und $v(N) = 0$

(ii) $\|\chi_N\|_1 = 0$

Sei $E : \mathbb{R}^n \rightarrow \{\text{wahr, falsch}\}$, so sagen wir E gilt **fast überall** (f.ü.), falls $N_E := \{x \in \mathbb{R}^n \mid E(x) = \text{falsch}\}$ eine Nullmenge ist.

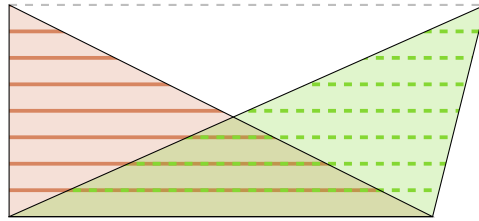


Abbildung 2: Prinzip von Cavalieri: Beide Dreiecke haben den gleichen Flächeninhalt

Beweis

(i) \Rightarrow (ii): $0 \leq \|\chi_N\|_1 \stackrel{4.3 \text{ b)}}{=} \int \chi_N \, dx = v(N) = 0$.

(ii) \Rightarrow (i): Setze $\varphi_k \equiv 0 \in \mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$ für $k \in \mathbb{N}$, dann

$$\|\chi_N - \varphi_k\|_1 = \|\chi_N\|_1 = 0$$

also ist χ_N integrierbar. Nach Proposition 4.3 b) gilt $0 \leq \int \chi_N \, dx = \|\chi_N\|_1 = 0$ □

5.7 Proposition

- (i) Jede Teilmenge einer Nullmenge ist eine Nullmenge.
- (ii) Jede abzählbare Vereinigung von Nullmengen ist eine Nullmenge.

Beweis

(i) Sei $M \subset N$. Es folgt $0 \leq \chi_M \leq \chi_N$. Mit Bemerkung 3.8 folgt $0 \leq \|\chi_M\|_1 \leq \|\chi_N\|_1$

(ii) Sei $N = \bigcup_{k=0}^{\infty} N_k$. Dann gilt $0 \leq \chi_N \leq \sum_{k=0}^{\infty} \chi_{N_k}$. Nach Bemerkung 3.8 und Proposition 3.9 gilt

$$0 \leq \|\chi_N\|_1 \leq \left\| \sum_{k=0}^{\infty} \chi_{N_k} \right\|_1 \leq \sum_{k=0}^{\infty} \|\chi_{N_k}\|_1 = 0 \quad \square$$

5.8 Proposition

Sei $f : \mathbb{R}^n \rightarrow (-\infty, \infty]$ eine Abbildung mit $\|f\|_1 < \infty$. Dann ist f fast überall endlich, d.h. $N := \{x \in \mathbb{R}^n \mid f(x) = \infty\}$ ist eine Nullmenge.

Beweis

Für $\varepsilon > 0$ ist $0 \leq \chi_N \leq \varepsilon \cdot |f|$, also

$$0 \leq \|\chi_N\|_1 \stackrel{3.8}{\leq} \|\varepsilon \cdot |f|\|_1 \stackrel{3.8}{=} \varepsilon \cdot \|f\|_1 \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0} 0$$

Daraus folgt $\|\chi_N\|_1 = 0$ □

5.9 Proposition

Seien $f, g : \mathbb{R}^n \rightarrow (-\infty, \infty]$ Abbildungen mit $f = g$ fast überall. Falls f integrierbar ist, dann auch g und es gilt

$$\int f \, dx = \int g \, dx$$

Beweis

Sei $N := \{x \in \mathbb{R}^n \mid f(x) \neq g(x)\}$, dann gilt $\int \chi_N dx = 0$ nach Voraussetzung. Definiere $h : \mathbb{R}^n \rightarrow (-\infty, \infty]$ durch

$$h(x) := \infty \cdot \chi_N(x) = \begin{cases} \infty, & \text{falls } x \in N \\ 0, & \text{falls } x \notin N \end{cases}$$

Dann gilt $h = \sum_{k=0}^{\infty} \chi_N$ und $\|h\|_1 \stackrel{3.9}{\leq} \sum_{k=0}^{\infty} \|\chi_N\|_1 = 0$. f ist integrierbar, als gilt $\exists (\varphi_k)_{\mathbb{N}} \subset \mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$ mit $\|f - \varphi_k\|_1 \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$. Es gilt $|g - \varphi_k| \leq |f - \varphi_k| + h$ also

$$\|g - \varphi_k\|_1 \leq \|f - \varphi_k\|_1 + \|h\|_1 \leq \|f - \varphi_k\|_1 + \|h\|_1 \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$$

mit (4.1) folgt: g integrierbar und $\int g dx = \lim_{k \rightarrow \infty} \int \varphi_k dx = \int f dx$ □

5.10 Beispiele

(i) \mathbb{Q} ist Nullmenge in \mathbb{R} : $v(\{x\}) = 0$, $x \in \mathbb{R}$. \mathbb{Q} ist abzählbare Vereinigung solcher Einpunktmengen, also ist \mathbb{Q} nach 5.7 (ii) eine Nullmenge.

(Alternativ: Benutze Satz 4.8 (Beppo-Levi))

(ii) Sei $C \subset [0, 1]$ die Cantormenge, dann ist C eine Nullmenge:

$$[0, 1] \setminus C = \bigcup_{l=0}^{\infty} U_l$$

Setze $\varphi_k := \chi_{\bigcup_{l=0}^k U_l}$, $k \in \mathbb{N}$. Dann ist $(\varphi_k)_{\mathbb{N}} \subset \mathcal{T}_{\mathbb{R}}$, $\varphi_k \xrightarrow{k \rightarrow \infty} \chi_{[0,1] \setminus C}$ monoton wachsend und punktweise und $\int \varphi_k dx \leq 1$, $k \in \mathbb{N}$.

Mit 4.8 folgt

$$\begin{aligned} \int \chi_{[0,1] \setminus C} dx &= \lim_{k \rightarrow \infty} \int \varphi_k dx = \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{l=0}^k v(U_l) dx \\ &= \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{l=0}^k \frac{2^l}{3^{l+1}} = \frac{1}{3} \sum_{l=0}^{\infty} \left(\frac{2}{3}\right)^l = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{1 - \frac{2}{3}} = 1 \end{aligned}$$

Es folgt

$$\int \chi_C dx = \int (\chi_{[0,1]} - \chi_{[0,1] \setminus C}) dx = \int \chi_{[0,1]} dx - \int \chi_{[0,1] \setminus C} dx = 1 - 1 = 0$$

Die Cantormenge ist also eine überabzählbare Nullmenge! □

5.11 Bemerkung

Nullmengen lassen sich auch wie folgt charakterisieren:

$N \subset \mathbb{R}^n$ ist Nullmenge genau dann, wenn Folgendes gilt:

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists Q_0, Q_1, \dots \subset \mathbb{R}^n \text{ offene Quader mit } N \subset \bigcup_{i \in \mathbb{N}} Q_i \text{ und } \sum_{i \in \mathbb{N}} v(Q_i) < \varepsilon$$

(ohne Beweis)

5.12 Proposition

Sei $Q \subset \mathbb{R}^n$ ein Quader und $A_0, A_1, \dots \subset Q$ eine Folge messbarer Mengen. Dann ist $\bigcup_{l \in \mathbb{N}} A_l$ messbar.

Beweis

Wende Beppo-Levi an auf

$$\varphi_k := \chi_{\bigcup_{l=0}^k A_l}$$

□

spätere Variante von
Beppo-Levi

5.13 Bemerkung

Wir haben jetzt:

- Beschränkte offene Mengen sind messbar.
- Kompakte Mengen sind messbar.
- beschränkte abzählbare Vereinigungen von messbaren Mengen sind messbar.
- Komplemente messbarer Mengen in beschränkten messbaren Mengen sind messbar.

Frage: Existieren überhaupt (beschränkte) nicht messbare Mengen?

5.14 Satz

\mathbb{R} besitzt² eine beschränkte Teilmenge, die nicht messbar ist.

Beweis

Für $x \in [0, 1]$ definiere $E_x := \{y \in [0, 1] \mid x - y \in \mathbb{Q}\} \subset [0, 1]$. Dann gilt für $x, x' \in [0, 1]$: $E_x = E_{x'}$ oder $E_x \cap E_{x'} = \emptyset$. ($\exists y \in E_x \cap E_{x'} \iff \exists y \in [0, 1] x - y \in \mathbb{Q} \text{ und } x' - y \in \mathbb{Q} \iff x - x' \in \mathbb{Q} \iff E_x = E_{x'}$). Es gilt $[0, 1] = \bigcup_{x \in [0, 1]} E_x$.

Setze $A := \{E \mid E = E_x \text{ für ein } x \in [0, 1]\} \subset \mathcal{P}([0, 1])$. Sei $f: A \rightarrow [0, 1]$ eine Funktion mit $f(E) \in E$, $E \in A$. f existiert nach dem Auswahlaxiom. Setze $M := f(A) \subset [0, 1]$. Sei $J := \mathbb{Q} \cap [-1, 1]$, dann ist J abzählbar, d.h. es existiert $(j_i)_{i \in \mathbb{N}}$ mit $J = \{j_0, j_1, \dots\}$ und $j_i \neq j_{i'}$ für $i \neq i'$. Setze $M_i := M + j_i = \{y + j_i \mid y \in M\} \subset [-1, 2]$.

Behauptungen:

- (i) $[0, 1] \subset \bigcup_{i \in \mathbb{N}} M_i = \{y + j_i \mid y \in M, i \in \mathbb{N}\}$
- (ii) $M_i \cap M_{i'} = \emptyset$ falls $i \neq i'$

Beweis:

- (i) $x \in [0, 1]$, dann ist $f(E_x) \in E_x$, d.h. $x - f(E_x) \in \mathbb{Q} \cap [-1, 1] = J$. Also ist $x - f(E_x) = j_i$ für ein $i \in \mathbb{N}$. Daraus folgt $x = f(E_x) + j_i \in M_i$.
- (ii) Falls $z \in M_i \cap M_{i'}$, $i \neq i'$, so gilt $z = y + j_i$, $z = y' + j_{i'}$ für $y, y' \in M$, $j_i \neq j_{i'}$. Es gilt $y = f(E_x) \in E_x$, $y' = f(E_{x'}) \in E_{x'}$, $x, x' \in [0, 1]$. Es folgt $y - y' \in \mathbb{Q} \cap [-1, 1]$ und $E_x \cap E_{x'} \neq \emptyset$, also $E_x = E_{x'}$. Andererseits $j_i \neq j_{i'}$, also $y \neq y'$.

Wir haben nun $[0, 1] \subset \bigcup_{i \in \mathbb{N}} M_i \subset [-1, 2]$. Angenommen M sei messbar. Wegen Translationsinvarianz ist dann auch M_i messbar, $i \in \mathbb{N}$ und $v(M) = v(M_i)$. Weiter gilt

$$v(M_i) = \int \chi_{M_i} dx = \|\chi_{M_i}\|_1$$

² in ZFC

Wegen $[0, 1] \subset \bigcup_{i \in \mathbb{N}} M_i$ gilt außerdem

$$0 \leq \chi_{[0,1]} \leq \chi_{\bigcup_{i \in \mathbb{N}} M_i}$$

also

$$1 = v([0, 1]) = \int \chi_{[0,1]} dx \stackrel{4.3}{=} \|\chi_{[0,1]}\|_1 \leq \left\| \sum_{i \in \mathbb{N}} \chi_{M_i} \right\|_1 \stackrel{3.9}{\leq} \sum_{i \in \mathbb{N}} \|\chi_{M_i}\|_1 = \sum_{i \in \mathbb{N}} v(M_i)$$

$\Rightarrow v(M) > 0$. Wähle $K \in \mathbb{N}$ so groß, dass $(K+1) \cdot v(M) > 3$ ist, dann

$$3 < (K+1) \cdot v(M) = \sum_{i=0}^K v(M_i) = v\left(\bigcup_{i=0}^K M_i\right) \leq v([-1, 2]) = 3 \quad \text{!}$$

□

5.15 Satz

Seien $\underline{x}_1, \dots, \underline{x}_n \in \mathbb{R}^n$. Setze

$$P(\underline{x}_1, \dots, \underline{x}_n) := \left\{ \underline{x} \in \mathbb{R}^n \mid \exists t_1, \dots, t_n \in [0, 1] : \underline{x} = \sum_{i=1}^n t_i \cdot \underline{x}_i \right\}$$

Dann gilt

$$v(P(\underline{x}_1, \dots, \underline{x}_n)) = |\det(\underline{x}_1, \dots, \underline{x}_n)| = \left| \det \begin{pmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n,1} & \cdots & x_{n,n} \end{pmatrix} \right|$$

Beweis

Sei

$$D : \underbrace{\mathbb{R}^n \times \dots \times \mathbb{R}^n}_{n\text{-mal}} \rightarrow \mathbb{R}$$

eine Abbildung mit

$$(D1) \quad D(\underline{a}_1, \dots, \lambda \underline{a}_i, \dots, \underline{a}_n) = |\lambda| \cdot D(\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_i, \dots, \underline{a}_n) \text{ für } i \in \{1, \dots, n\}, \lambda \in \mathbb{R}, \underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n \in \mathbb{R}^n$$

$$(D2) \quad D(\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_i + \underline{a}_j, \dots, \underline{a}_j, \dots, \underline{a}_n) = D(\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n) \text{ für } i < j, \underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n \in \mathbb{R}^n$$

$$(D3) \quad D(\underline{e}_1, \dots, \underline{e}_n) = 1, \text{ wo } \underline{e}_i \text{ der } i\text{-te Einheitsvektor ist.}$$

Für $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n \in \mathbb{R}^n$ ist $D(\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n)$ durch (D1), (D2), (D3) mittels elementaren Spaltenumformungen bestimmt (Vergleiche Charakterisierung der Determinante in der Linearen Algebra). Daraus folgt: Es kann höchstens eine Abbildung mit (D1), (D2), (D3) geben. Andererseits erfüllt

$$(\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n) \mapsto |\det(\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n)|$$

(D1), (D2) und (D3). Es genügt zu zeigen: Die Abbildung

$$(\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n) \mapsto v(P(\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n))$$

erfüllt (D1), (D2), (D3).

- (D3): $v(P(\underline{e}_1, \dots, \underline{e}_n)) = 1^n = 1$
- Falls $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$ linear abhängig sind, dann gilt

$$v(P(\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n)) \stackrel{\text{Übung}}{=} 0 = |\det(\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n)|$$

und (D1), (D2) sind erfüllt.

Seien also $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$ linear unabhängig.

(D1) : Für $i \in \{1, \dots, n\}$, $\lambda \in \mathbb{R}$ setze $P_\lambda := P(\underline{a}_1, \dots, \lambda \cdot \underline{a}_i, \dots, \underline{a}_n)$; wir wollen

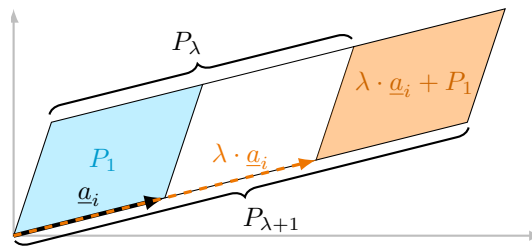
$$v(P_\lambda) = |\lambda| \cdot v(P_1)$$

zeigen:

a) Zunächst für $\lambda \in \mathbb{N}^*$:

$$\lambda = 1 \checkmark$$

$$\lambda \mapsto \lambda + 1: \text{Es gilt } P_{\lambda+1} = P_\lambda \cup (\lambda \cdot \underline{a}_i + P_1)$$



Weiter gilt $P_\lambda \cap (\lambda \cdot \underline{a}_i + P_1) \subset \lambda \cdot \underline{a}_i + \text{span}\{\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_i, \dots, \underline{a}_n\}$ mit $\dim \leq n - 1$. Also ist

$$v(P_\lambda \cap (\lambda \cdot \underline{a}_i + P_1)) = 0$$

Also folgt

$$\begin{aligned} v(P_{\lambda+1}) &= v(P_\lambda) + v(\lambda \cdot \underline{a}_i + P_1) - v(P_\lambda \cap \lambda \cdot \underline{a}_i + P_1) = v(P_\lambda) + v(P_1) - 0 \\ &\stackrel{(\text{I.V.})}{=} \lambda \cdot v(P_1) + v(P_1) = (\lambda + 1) \cdot v(P_1) \end{aligned}$$

Induktion $\leadsto (\star)$ für $\lambda \in \mathbb{N}^*$. Ebenso zeigt man $v(P_{q \cdot \lambda}) = q \cdot v(P_\lambda)$, $q \in \mathbb{N}^*$, $\lambda \in \mathbb{R}$

b) Jetzt für $\lambda = \frac{p}{q}$ mit $p, q \in \mathbb{N}^*$:

Nach a) gilt $v(P_{q \cdot \lambda}) = v(P_p) = p \cdot v(P_1)$ und $v(P_{q \cdot \lambda}) = q \cdot v(P_\lambda)$, also

$$p \cdot v(P_1) = q \cdot v(P_\lambda) \implies v(P_\lambda) = \frac{p}{q} \cdot v(P_1) = |\lambda| \cdot v(P_1).$$

c) $\lambda \in \mathbb{R}_+^*$: Zu $\varepsilon > 0$ wähle $r_1, r_2 \in \mathbb{Q}_+^*$ mit $r_1 \leq \lambda \leq r_2$ und $r_2 - r_1 < \frac{\varepsilon}{v(P_1)}$.

(Da $\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n$ linear unabhängig, enthält $P_1 = P(\underline{a}_1, \dots, \underline{a}_n)$ einen offenen Quader, also ist $v(P_1) > 0$).

Dann gilt $P_{r_1} \subset P(\lambda) \subset P_{r_2}$ und

$$\begin{aligned} v(P_{r_1}) &\leq v(P_\lambda) \leq v(P_{r_2}) \\ r_1 \cdot v(P_1) &\leq \lambda \cdot v(P_1) \leq r_2 \cdot v(P_1) \end{aligned}$$

und

Wir erhalten

$$|v(P_\lambda) - \lambda \cdot v(P_1)| \leq r_2 \cdot v(P_1) - r_1 \cdot v(P_1) = (r_2 - r_1) \cdot v(P_1) < \varepsilon$$

Also $v(P_\lambda) = \lambda \cdot v(P_1)$, $\lambda \in \mathbb{R}_+^*$

d) $\lambda = 0$: P_0 liegt in einer Hyperebene. Nach einer Übung folgt dann

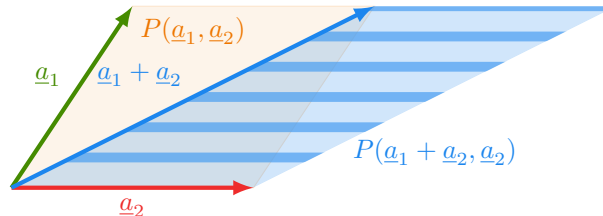
$$v(P_0) = 0 = 0 \cdot v(P_1)$$

e) $\lambda < 0$: $P_\lambda = \lambda \cdot \underline{a}_i + P_{-\lambda}$ und wegen Translationsinvarianz (4.7) gilt dann

$$v(P_\lambda) = v(P_{-\lambda}) = (-\lambda) \cdot v(P_1) = |\lambda|v(P_1)$$

Es folgt (\star) für $\lambda \in \mathbb{R} \Rightarrow D1$

(D2) : (nur Idee)



geschickte Zerlegung + Translationsinvarianz

5.16 Corollar

Sei $T : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ linear und $Q \subset \mathbb{R}^n$ ein Quader. Dann gilt

$$v(T(Q)) = |\det T| \cdot v(Q)$$

Beweis

O.E. $Q \subset \mathbb{R}^n$ abgeschlossen. Es gibt $\underline{a} \in \mathbb{R}^n$, $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in \mathbb{R}$ mit $Q = \underline{a} + P(\alpha \cdot \underline{e}_1, \dots, \alpha_n \cdot \underline{e}_n)$. Dann ist $v(Q) = v(P(\alpha \cdot \underline{e}_1, \dots, \alpha_n \cdot \underline{e}_n)) = |\alpha_1 \cdot \dots \cdot \alpha_n|$ und

$$T(Q) = T(\underline{a}) + T(P(\alpha \cdot \underline{e}_1, \dots, \alpha_n \cdot \underline{e}_n)) = T(\underline{a}) + P(\alpha \cdot T(\underline{e}_1), \dots, \alpha_n \cdot T(\underline{e}_n))$$

Also

$$v(T(Q)) \stackrel{D1}{=} |\alpha_1 \cdot \dots \cdot \alpha_n| \cdot v(P(T(\underline{e}_1), \dots, T(\underline{e}_n))) = |\alpha_1 \cdot \dots \cdot \alpha_n| \cdot |\det T|$$

□

6 $L^1(\mathbb{R}^n)$ -Konvergenzsätze

$\mathcal{L}^1(\mathbb{R}^n)$ Raum der integrierbaren Funktionen

6.1 Proposition

$$\mathcal{N} = \{f \in \mathcal{L}^1(\mathbb{R}^n) \mid \|f\|_1 = 0\}$$

ist ein Untervektorraum von $\mathcal{L}^1(\mathbb{R}^n)$.

Beweis

folgt aus $\|\alpha f + \beta g\|_1 \leq |\alpha| \cdot \|f\|_1 + |\beta| \cdot \|g\|_1$

6.2 Definition

$$L^1(\mathbb{R}^n) = \mathcal{L}^1(\mathbb{R}^n) / \mathcal{N}$$

ist ein Quotientenvektorraum versehen mit der Norm

$$\|f + \mathcal{N}\|_1 := \|f\|_1$$

Falls $f \in \mathcal{L}^1(\mathbb{R}^n)$, so schreiben wir $[f]$ oder nur f für $f + \mathcal{N}$.

6.3 Satz (Riesz-Fischer)

$L^1(\mathbb{R}^n)$ ist vollständig. Ist $([f_k])_{k \in \mathbb{N}} \subset L^1(\mathbb{R}^n)$ eine Cauchyfolge mit Limes $[f]$, so existiert eine Teilfolge $(f_{k_\nu})_{\nu \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{L}^1(\mathbb{R}^n)$ mit $f_{k_\nu} \xrightarrow{\nu \rightarrow \infty} f$ punktweise fast überall und:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \int f_k \, dx = \int f \, dx$$

Beweis

Sei $([f_k])_k \subset L^1(\mathbb{R}^n)$ Cauchy, d.h. $(f_k)_k \subset \mathcal{L}^1(\mathbb{R}^n)$ erfüllt:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N} : \forall m, n \geq N : \|f_m - f_n\|_1 < \varepsilon$$

Wähle Indizes $k_0 < k_1 < \dots$ mit

$$\|f_k - f_{k_\nu}\|_1 \leq 2^{-(\nu+1)} \quad \text{falls } k \geq k_\nu.$$

Es gilt dann $\sum_{\nu=0}^{\infty} \|f_{k_{\nu+1}} - f_{k_\nu}\|_1 \leq 1$. Setze

$$g_\nu := f_{k_{\nu+1}} - f_{k_\nu}$$

$$g := \sum_{\nu=0}^{\infty} |g_\nu|$$

Dann sind $g_\nu \in \mathcal{L}^1(\mathbb{R}^n)$, $g : \mathbb{R}^n \rightarrow [0, \infty]$ und $\|g\|_1 \leq 1$ (nach 3.9). Nach 5.8 ist g fast überall endlich, d.h. $M = \{x \in \mathbb{R}^n \mid g(x) = \infty\}$ ist eine Nullmenge. Es folgt, dass die Reihe $\sum_{\nu=0}^{\infty} g_\nu(x)$ absolut konvergiert für $x \in \mathbb{R}^n \setminus M$. Definiere $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ durch

$$f(x) = \begin{cases} f_{k_0}(x) + \sum_{\nu=0}^{\infty} g_\nu(x) = \lim_{\nu \rightarrow \infty} f_{k_\nu}(x), & \text{falls } x \notin M \\ 0, & \text{falls } x \in M \end{cases}$$

Teleskopsumme

Noch zu zeigen: f ist integrierbar, $\|f_k - f\|_1 \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$ und (\star) .

Sei $\varepsilon > 0$. Wähle $\sigma \in \mathbb{N}$ mit

$$\sum_{\nu=\sigma}^{\infty} \|g_{\nu}\|_1 < \varepsilon \quad \text{und} \quad \|f_k - f_{k_{\sigma}}\|_1 < \varepsilon \quad \forall k \geq k_{\sigma}$$

Sei $\varphi \in \mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$ mit $\|f_{k_{\sigma}} - \varphi\|_1 < \varepsilon$. Dann gilt

$$\|f - \varphi\|_1 \leq \|f - f_{k_{\sigma}}\|_1 + \|f_{k_{\sigma}} - \varphi\|_1 \leq 2\varepsilon$$

Es gilt weiter

$$\begin{aligned} f(x) &= f_{k_0}(x) + \sum_{\nu=0}^{\infty} g_{\nu}(x) = f_{k_{\sigma}}(x) + \sum_{\nu=\sigma}^{\infty} g_{\nu}(x) \\ \implies f - f_{k_{\sigma}} &= \sum_{\nu=\sigma}^{\infty} g_{\nu} \end{aligned}$$

$\Rightarrow f \in \mathcal{L}^1(\mathbb{R}^n)$. Für $k \geq k_{\sigma}$ gilt

$$\|f - f_k\|_1 \leq \|f - f_{k_{\sigma}}\|_1 + \|f_{k_{\sigma}} - f_k\|_1 \leq \varepsilon + \varepsilon$$

d.h. $\|f - f_k\|_1 \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$. Trivialerweise gilt $f_{k_{\nu}} \rightarrow f$ punktweise fast überall (für $x \notin M$). Für (\star) :

$$\left| \int f \, dx - \int f_k \, dx \right| \leq \int |f - f_k| \, dx = \|f - f_k\|_1 \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0 \quad \square$$

6.4 Korollar

³ Sei $f \in \mathcal{L}^1(\mathbb{R}^n)$. Dann existiert $(\varphi_{\nu})_{\nu \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$ mit:

- (i) $\|f - \varphi_{\nu}\|_1 \xrightarrow{\nu \rightarrow \infty} 0$
- (ii) $\sum_{\nu=0}^{\infty} \|\varphi_{\nu+1} - \varphi_{\nu}\|_1 < \infty$
- (iii) $\varphi_{\nu} \xrightarrow{\nu \rightarrow \infty} f$ punktweise, fast überall

Beweis

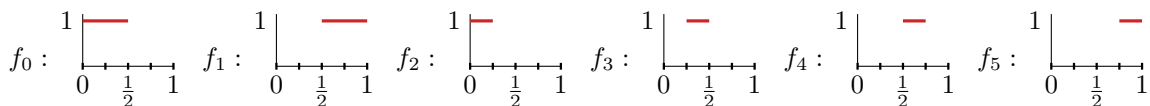
Da $f \in \mathcal{L}^1(\mathbb{R}^n)$ existiert $(\psi_k)_k \subset \mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$ mit $\|f - \psi_k\|_1 \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$. Dann gilt:

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists N \in \mathbb{N} : \forall m, n \geq N : \|\psi_n - \psi_m\|_1 < \varepsilon$$

Nach Beweis von 6.3 existiert eine Teilfolge $(\psi_{k_{\nu}})_{\nu}$ mit $\sum_{\nu=0}^{\infty} \|\psi_{k_{\nu+1}} - \psi_{k_{\nu}}\|_1 \leq 1$ und so dass $\psi_{k_{\nu}} \xrightarrow{\nu \rightarrow \infty} \tilde{f}$ punktweise fast überall. Dann gilt $f = \tilde{f}$ fast überall (da $\|f - \tilde{f}\|_1 = 0$). Also auch $\psi_{k_{\nu}} \xrightarrow{\nu \rightarrow \infty} f$ fast überall. \square

6.5 Bemerkung

Der Übergang zu einer Teilfolge in 6.3 ist wesentlich. Betrachte dazu



...Dann gilt: $\|f_k - 0\|_1 \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$, aber es gibt kein $x \in [0, 1]$ mit $f_k(x) \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$. Wie sieht eine Teilfolge $(f_{k_{\nu}})_{\nu \in \mathbb{N}}$ aus mit $f_{k_{\nu}} \xrightarrow{\nu \rightarrow \infty} 0$ fast überall?

³ Ist $\|f - g\|_1 = 0$ für $f, g \in \mathcal{L}^1(\mathbb{R}^n)$, dann gilt $f(x) = g(x)$ fast überall

6.6 Satz (Beppo-Levi)

Sei $(f_k)_{k \in \mathbb{N}}$ eine monoton wachsende Folge integrierbarer Funktionen. $f_k : \mathbb{R}^n \rightarrow (-\infty, \infty]$, so dass $(\int f_k dx)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{R}$ beschränkt ist. Sei $f : \mathbb{R}^n \rightarrow (-\infty, \infty]$ der punktweise Limes, d.h. $f(x) = \lim_{k \rightarrow \infty} f_k(x)$. Dann ist f integrierbar und

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \int f_k dx = \int f dx$$

Beweis

Es ist $f_k \leq f_{k+1}$, also $\int f_k dx \leq \int f_{k+1} dx$, d.h. die Folge $(\int f_k dx)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{R}$ ist monoton wachsend und beschränkt, also konvergent. Also gilt auch

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists N \in \mathbb{N} : \forall m, k \geq N : \left| \int f_k dx - \int f_m dx \right| < \varepsilon$$

Falls $m \geq k \geq N$, dann

$$\|f_m - f_k\|_1 = \int |f_m - f_k| dx = \int (f_m - f_k) dx = \int f_m dx - \int f_k dx \leq \left| \int f_m dx - \int f_k dx \right|$$

Damit folgt: $([f_k])_k \subset L^1(\mathbb{R}^n)$ ist Cauchy. Sei $\tilde{f} \in L^1(\mathbb{R}^n)$ eine Funktion mit $\|f_k - \tilde{f}\|_1 \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$ (existiert nach 6.3). Nach 6.3 gibt es eine Teilfolge $(f_{k_\nu})_\nu$ mit $f_{k_\nu} \xrightarrow{\nu \rightarrow \infty} \tilde{f}$ fast überall und

$$\lim_{\nu \rightarrow \infty} \int f_{k_\nu} dx = \int \tilde{f} dx$$

$\Rightarrow f = \tilde{f}$ fast überall. Daher $f \in L^1(\mathbb{R}^n)$ und

$$\int f dx = \int \tilde{f} dx = \lim_{\nu \rightarrow \infty} \int f_{k_\nu} dx = \lim_{k \rightarrow \infty} \int f_k dx \quad \square$$

6.7 Corollar

- a) Seien $A_1 \subset A_2 \subset \dots \subset \mathbb{R}^n$ messbar. Dann ist $\bigcup_{k=0}^{\infty} A_k$ messbar genau dann, wenn die Folge $(v(A_k))_{k \in \mathbb{N}}$ beschränkt ist; in diesem Fall ist

$$v\left(\bigcup_{k=0}^{\infty} A_k\right) = \sup_k v(A_k)$$

- b) Seien $B_0, B_1, \dots \subset \mathbb{R}^n$ messbar so dass $B_i \cap B_j$ Nullmengen sind für $i \neq j$. Dann ist $\bigcup_{k \in \mathbb{N}} B_k$ messbar genau dann wenn $\sum_{k=0}^{\infty} v(B_k) < \infty$; in diesem Fall ist

$$v\left(\bigcup_{k \in \mathbb{N}} B_k\right) = \sum_{k=0}^{\infty} v(B_k)$$

Beweis

- a) Beppo-Levi mit $f_k := \chi_{A_k}$,

$$f = \lim_{k \rightarrow \infty} f_k = \chi_{\bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k}$$

- b) folgt aus a) mit $A_k := \bigcup_{i=0}^k B_i$ und

$$v(A_k) = \sum_{i=0}^k v(B_i) \quad \square$$

6.8 Bemerkung

Setze $\Lambda := \{E \mid E \subset \mathbb{R}^n \text{ messbar}\} \subset \mathcal{P}(\mathbb{R}^n)$. Die Abbildung $v : \Lambda \rightarrow \mathbb{R}_+$ heißt auch **Lebesgue-Maß** und es gilt:

(M0) Λ enthält alle kompakten und beschränkten offenen Mengen.

(M1) $A, B \in \Lambda, A \subseteq B \implies v(A) \leq v(B)$.

(M2) Für $a \in \mathbb{R}^n, E \in \Lambda$ ist $a + E \in \Lambda$ und $v(a + E) = v(E)$.

(M3) Für $B_0, B_1, \dots \in \Lambda$ paarweise disjunkt mit $\sum_{k \in \mathbb{N}} v(B_k) < \infty$ ist $\bigcup_{k \in \mathbb{N}} B_k \in \Lambda$ und es gilt

$$v\left(\bigcup_{k \in \mathbb{N}} B_k\right) = \sum_{k \in \mathbb{N}} v(B_k).$$

(M4) $v(\emptyset) = 0$ und $v([0, 1]^n) = 1$.

Man kann zeigen: Das Lebesgue-Maß ist durch diese Eigenschaften eindeutig bestimmt.

6.9 Satz von Lebesgue über majorisierte Konvergenz

Sei $f_k : \mathbb{R}^n \rightarrow (-\infty, \infty], k \in \mathbb{N}$ eine Folge integrierbarer Funktionen. Sei $f : \mathbb{R}^n \rightarrow (-\infty, \infty]$ eine weitere Funktion mit $f_k \xrightarrow{k \rightarrow \infty} f$ punktweise fast überall. Sei $F : \mathbb{R}^n \rightarrow [0, \infty]$ integrierbar mit $F \geq |f_k|, k \in \mathbb{N}$. Dann ist f integrierbar und es gilt

$$\int f \, dx = \lim_{k \rightarrow \infty} \int f_k \, dx$$

Beweis

warum?

Mittels Proposition 5.8 dürfen wir annehmen, dass f_k, F nur Werte in \mathbb{R} annehmen. Wir dürfen außerdem annehmen, dass $f_k \rightarrow f$ punktweise überall.

Setze

$$g_{k,\nu} := \max\{f_k, \dots, f_{k+\nu}\} \quad , \quad g_k := \sup_{i \geq k} f_i \quad k, \nu \in \mathbb{N}$$

Dann sind $g_{k,\nu}, g_k : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ Funktionen mit $g_{k,\nu} \xrightarrow{\nu \rightarrow \infty} g_k$ punktweise monoton wachsend. Die $g_{k,\nu}$ sind integrierbar und $\int g_{k,\nu} \, dx \leq \int F \, dx < \infty$. Mit Beppo-Levi (6.6) folgt: g_k ist integrierbar und es gilt

$$\int g_k \, dx = \lim_{\nu \rightarrow \infty} \int g_{k,\nu} \, dx$$

Weiter gilt $|\int g_{k,\nu} \, dx| \leq \int F \, dx$, also auch $|\int g_k \, dx| \leq \int F \, dx, k \in \mathbb{N}$. Es gilt $g_k \xrightarrow{k \rightarrow \infty} f$ punktweise monoton fallend, also $-g_k \xrightarrow{k \rightarrow \infty} -f$ punktweise monoton wachsend. Da

$$\int -g_k \, dx \leq \left| \int g_k \, dx \right| \leq \left| \int F \, dx \right| < \infty$$

ist $(\int -g_k \, dx)_{k \in \mathbb{N}}$ beschränkt und wieder nach Beppo-Levi (6.6) ist $-f$ integrierbar mit

$$\int -f \, dx = \lim_{k \rightarrow \infty} \int -g_k \, dx \implies \int f \, dx = \lim_{k \rightarrow \infty} \int g_k \, dx$$

Definiere nun

$$h_{k,\nu} := \min\{f_k, \dots, f_{k+\nu}\} \quad , \quad h_k := \inf_{i \geq k} f_i \quad k, \nu \in \mathbb{N}$$

Dann gilt $h_{k,\nu} \xrightarrow{\nu \rightarrow \infty} h_k$ punktweise monoton fallend und $h_k \xrightarrow{k \rightarrow \infty} f$ punktweise monoton wachsend. Wie oben zeigt man

$$\int f \, dx = \lim_{k \rightarrow \infty} \int h_k \, dx$$

Wegen $h_k \leq f_k \leq g_k$ gilt

$$\int f \, dx = \lim_{k \rightarrow \infty} \int h_k \, dx \leq \lim_{k \rightarrow \infty} \int f_k \, dx \geq \lim_{k \rightarrow \infty} \int g_k \, dx = \int f \, dx \quad \square$$

6.10 Corollar

Sei $A \subset \mathbb{R}^n$ messbar, $f_k : A \rightarrow \mathbb{R}$, $k \in \mathbb{N}$ beschränkte Folge integrierbarer Funktionen. Falls $(f_k)_{k \in \mathbb{N}}$ punktweise fast überall gegen $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ konvergiert, so ist f integrierbar und es gilt

$$\int_A f \, dx = \lim_{k \rightarrow \infty} \int_A f_k \, dx$$

Beweis

Mit 6.9 und χ_A mal der Konstanten aus der Beschränktheit als Majorante. \square

6.11 Corollar

Sei $f : [a, x] \rightarrow \mathbb{R}$ differenzierbar mit beschränkter Ableitung f' . Dann ist f' Lebesgue-integrierbar und so gilt

$$f(x) - f(a) = \int_{[a,x]} f' \, dx$$

Beweis

- f ist differenzierbar, also stetig. Definiere $f_k : [a, x] \rightarrow \mathbb{R}$ durch

$$f_k(t) := \begin{cases} (k+1) \cdot \left(f\left(t + \frac{1}{k+1}\right) - f(t) \right), & \text{falls } t \in [a, x - \frac{1}{k+1}] \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

vgl. Differenzenquotient

Dann gilt $f_k \xrightarrow{k \rightarrow \infty} f'$ punktweise auf $[a, x]$.

- $(f_k)_{k \in \mathbb{N}}$ ist beschränkt: Nach Mittelwertsatz existiert ein $s \in (t, t + \frac{1}{k+1})$ mit

$$\frac{f\left(t + \frac{1}{k+1}\right) - f(t)}{\frac{1}{k+1}} = f'(s),$$

also gilt $|f_k(t)| \leq \sup\{|f'(r)| \mid r \in [a, x]\} < \infty$ (dieses Supremum hängt nicht von k oder t ab).

- f_k ist integrierbar: f_k ist stetig auf $[a, x - \frac{1}{k+1}]$ und konstant 0 auf $(x - \frac{1}{k+1}, x]$, also Regelfunktion (warum?). Es gilt

$$\int_a^x f_k(t) \, dt = \frac{1}{k+1} \cdot \left(\int_{x - \frac{1}{k+1}}^x f(t) \, dt - \int_a^{x - \frac{1}{k+1}} f(t) \, dt \right).$$

MWS der Integralrechnung (Anal, Satz 13.13) liefert: Es existiert ein $\bar{t}_k \in [x - \frac{1}{k+1}, x]$ mit

$$f(\bar{t}_k) \cdot \frac{1}{k+1} = \int_{x - \frac{1}{k+1}}^x f(t) \, dt$$

entsprechend für $\bar{s}_k \in [a, a + \frac{1}{k+1}]$. f stetig \implies

$$\int_a^x f_k(t) dt = \frac{1}{\frac{1}{k+1}} \cdot \left(\int \dots - \int \dots \right) = f(\bar{t}_k) - f(\bar{s}_k) \xrightarrow{k \rightarrow \infty} f(x) - f(a)$$

mit 6.10 folgt: f' ist Lebesgue-integrierbar und es gilt

$$\int_{[a,x]} f' dx = \lim_{k \rightarrow \infty} \int_{[a,x]} f_k dt = \lim_{k \rightarrow \infty} \int_a^x f_k(t) dt = f(x) - f(a) \quad \square$$

6.12 Definition

$A \subset \mathbb{R}^n$ heißt σ -**kompakt**, falls A abzählbare Vereinigung kompakter Mengen ist.

6.13 Beispiel

Folgende Mengen sind alle σ -kompakt:

- offene Mengen
- abgeschlossene Mengen
- endliche Durchschnitte σ -kompakter Mengen
- abzählbare Vereinigungen σ -kompakter Mengen

6.14 Definition

Sei $A \subseteq \mathbb{R}^n$ σ -kompakt. Dann heißt $f : A \rightarrow (-\infty, \infty]$ **lokal integrierbar**, falls für jedes kompakte $K \subset A$ die Funktion $f|_K : K \rightarrow (-\infty, \infty]$ integrierbar ist.

6.15 Corollar (Majorantenkriterium)

Sei $A \subset \mathbb{R}^n$ σ -kompakt, $f : A \rightarrow (-\infty, \infty]$ lokal integrierbar. Sei $F : A \rightarrow (-\infty, \infty]$ integrierbar mit $F \geq |f|$. Dann ist f integrierbar über A .

Beweis

Sei $A = \bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k$ mit $A_k \subseteq A_{k+1}$ kompakt für alle $k \in \mathbb{N}$. Dann ist $f|_{A_k}$ integrierbar, also auch

$$f_k := f_A \cdot \chi_{A_k} = (f|_{A_k})_{A_k}$$

es gilt dann $f_k \xrightarrow{k \rightarrow \infty} f$ punktweise und $|f_k| \leq F$. Mit Satz 6.9 folgt, dass f integrierbar ist. \square

7 Der Satz von Fubini

7.1 Lemma

Sei $A \subset \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^q$ eine Nullmenge. Dann existiert eine Nullmenge $B \subset \mathbb{R}^q$ so, dass für jedes $y \in \mathbb{R}^q \setminus B$ die Menge

$$A_y := \{x \in \mathbb{R}^p \mid (x, y) \in A\} \subset \mathbb{R}^p$$

eine Nullmenge im \mathbb{R}^p ist.

Beweis

A ist Nullmenge, d.h. $\|\chi_A\|_1 = 0$. Sei $\varepsilon > 0$. Dann existiert eine Treppe⁴ $\Phi = \sum_{k=0}^{\infty} c_k \cdot \chi_{Q_k}$ über χ_A mit $I(\Phi) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k v(Q_k) < \varepsilon$. Es ist $Q_k = Q'_k \times Q''_k$, wo $Q'_k \subset \mathbb{R}^p$ und $Q''_k \subset \mathbb{R}^q$ offene Quader sind. Definiere $a : \mathbb{R}^q \rightarrow (-\infty, \infty]$ durch

$$a(y) := \|\chi_{A_y}\|_{1, \mathbb{R}^p}$$

Für $x \in \mathbb{R}^p$ gilt

$$\chi_{A_y}(x) \leq \chi_A(x, y) \leq \Phi(x, y) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k \cdot \chi_{Q'_k}(x) \cdot \chi_{Q''_k}(y)$$

also $\chi_{A_y} \leq \sum_{k=0}^{\infty} c_k \cdot \chi_{Q''_k}(y) \cdot \chi_{Q'_k}$ und nach 3.9 gilt

$$a(y) = \|\chi_{A_y}\|_1 \leq \sum_{k=0}^{\infty} c_k \cdot \chi_{Q''_k}(y) \cdot \|\chi_{Q'_k}\|_{1, \mathbb{R}^p} = \sum_{k=0}^{\infty} c_k \cdot v(Q'_k) \cdot \chi_{Q''_k}(y),$$

somit $a \leq \sum_{k=0}^{\infty} c_k \cdot v(Q'_k) \cdot \chi_{Q''_k} =: \Psi$. Ψ ist Treppe über a . Aber

$$\|a\|_{1, \mathbb{R}^q} \leq I(\Psi) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k \cdot v(Q'_k) \cdot v(Q''_k) = I(\Phi) < \varepsilon$$

also gilt $\|a\|_{1, \mathbb{R}^q} = 0$. Für $l \in \mathbb{N}$ setze $B_l := \left\{y \in \mathbb{R}^q \mid a(y) \geq \frac{1}{l+1}\right\}$. Dann ist $B_l \subset \mathbb{R}^q$ Nullmenge (warum?). Daraus folgt mit 5.7

$$B := \bigcup_{l \in \mathbb{N}} B_l \text{ Nullmenge}$$

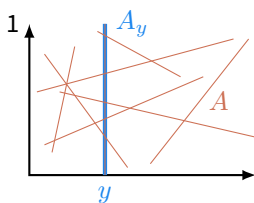
aber $B = \{y \in \mathbb{R}^q \mid a(y) > 0\}$ also

$$\forall y \in \mathbb{R}^q \setminus B : 0 = a(y) = \|\chi_{A_y}\|_1$$

$\Rightarrow A_y$ Nullmenge. □

7.2 Bemerkung

In 7.1 ist es wesentlich, die Nullmenge B auszuschließen:



$A \subset \mathbb{R}^2$ ist eine Nullmenge, aber $A_y = [0, 1] \subset \mathbb{R}$ ist keine Nullmenge!

⁴ $c_k \in \mathbb{R}_+$, Q_k offene Quader in $\mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^q$

7.3 Satz von Fubini

Sei $f : \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^q \rightarrow (-\infty, \infty]$ integrierbar.

- a) Die Funktion $f_y : \mathbb{R}^p \rightarrow (-\infty, \infty]$ mit $f_y(x) := f(x, y)$ ist für fast alle $y \in \mathbb{R}^q$ integrierbar, d.h. f_y ist integrierbar für $y \in \mathbb{R}^q \setminus N$, für eine Nullmenge $N \subset \mathbb{R}^q$.
- b) Definiere $F : \mathbb{R}^q \rightarrow (-\infty, \infty)$ durch

$$F(y) := \begin{cases} \int_{\mathbb{R}^p} f_y \, dx, & \text{falls } y \in \mathbb{R}^q \setminus N \\ 0, & \text{falls } y \in N \end{cases}$$

Dann ist F integrierbar und es gilt

$$\int_{\mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^q} f(x, y) \, d(x, y) = \int_{\mathbb{R}^q} F(y) \, dy$$

”Kürzer”:

$$\int_{\mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^q} f(x, y) \, d(x, y) = \int_{\mathbb{R}^q} \left(\int_{\mathbb{R}^p} f_y(x) \, dx \right) dy$$

Beweis

- a) Nach Corollar 6.4 existiert $(\varphi_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{T}_{\mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^q}$ und eine Nullmenge $A \subset \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^q$ mit $\|f - \varphi_k\|_1 \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$ und
- (i) $\varphi_k(x, y) \xrightarrow{k \rightarrow \infty} f(x, y)$ für $(x, y) \in \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^q \setminus A$
- (ii) $\sum_{k=0}^{\infty} \|\varphi_{k+1} - \varphi_k\|_1 < \infty$

Nach Lemma 7.1 existiert eine Nullmenge $N' \subset \mathbb{R}^q$ so dass für $y \in \mathbb{R}^q \setminus N'$ gilt:

$$A_y := \{x \in \mathbb{R}^p \mid (x, y) \in A\} \subset \mathbb{R}^p$$

ist eine Nullmenge. Aber für $x \in \mathbb{R}^p \setminus A_y$ gilt $(x, y) \notin A$, also

(iii) Für $y \in \mathbb{R}^q \setminus N'$ gilt

$$(x \mapsto \varphi_k(x, y)) \quad (\varphi_k)_y \xrightarrow{k \rightarrow \infty} f_y \quad \text{punktweise fast überall, d.h. für } x \in \mathbb{R}^p \setminus A_y$$

Setze

$$H_k(y) := \int_{\mathbb{R}^p} \underbrace{|\varphi_{k+1}(x, y) - \varphi_k(x, y)|}_{\in \mathcal{T}(\mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^q)} \, dx = \int_{\mathbb{R}^p} \underbrace{|(\varphi_{k+1})_y(x) - (\varphi_k)_y(x)|}_{\in \mathcal{T}(\mathbb{R}^p)} \, dx = \|(\varphi_{k+1})_y - (\varphi_k)_y\|_{1, \mathbb{R}^p}$$

Dann gilt nach Fubini für Treppenfunktionen(3.4):

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}^q} H_k(y) \, dy &= \int_{\mathbb{R}^q} \left(\int_{\mathbb{R}^p} |\varphi_{k+1}(x, y) - \varphi_k(x, y)| \, dx \right) dy = \int_{\mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^q} |\varphi_{k+1} - \varphi_k| \, d(x, y) \\ &= \|\varphi_{k+1} - \varphi_k\|_{1, \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^q} \end{aligned}$$

Nach (ii) gilt dann

$$\sum_{k=0}^{\infty} \int_{\mathbb{R}^q} H_k(y) \, dy < \infty$$

Nun ist $\left(\sum_{k=0}^i H_k\right)_{i \in \mathbb{N}}$ eine monoton wachsende Folge von integrierbaren Funktionen; die Folge der Integrale $\left(\int_{\mathbb{R}^q} \left(\sum_{k=0}^i H_k\right) dy\right)_{i \in \mathbb{N}}$ ist beschränkt durch $\sum_{k=0}^{\infty} \int_{\mathbb{R}^q} H_k(y) dy \stackrel{(*)}{<} \infty$. nach Beppo-Levi (6.6) ist dann

$$H := \sum_{k=0}^{\infty} H_k : \mathbb{R}^q \rightarrow (-\infty, \infty]$$

integrierbar und nach 5.8 ist H außerhalb einer Nullmenge $N'' \subset \mathbb{R}^q$ endlich. Wir erhalten

$$(iv) \quad \sum_{k=0}^{\infty} \|(\varphi_{k+1})_y - (\varphi_k)_y\|_{1, \mathbb{R}^p} = \sum_{k=0}^{\infty} H_k(y) = H(y) < \infty \quad \text{für } y \in \mathbb{R}^q \setminus N''$$

Setze $N := N' \cup N'' \subset \mathbb{R}^q$.

Für $y \in \mathbb{R}^q \setminus N$ gilt nach (iv): $((\varphi_k)_y)_{k \in \mathbb{N}}$ ist Cauchy-Folge bezüglich $\|\cdot\|_{1, \mathbb{R}^p}$ also bildet

$$\left([\varphi_k]_y\right)_{k \in \mathbb{N}} \subset L^1(\mathbb{R}^p)$$

eine Cauchy-Folge und konvergiert nach 6.3 in $L^1(\mathbb{R}^p)$ gegen ein $[g] \in L^1(\mathbb{R}^p)$ für ein $g \in \mathcal{L}^1(\mathbb{R}^p)$. Ebenfalls nach 6.3 gilt für eine Teilfolge $((\varphi_{k_\nu})_y)_{k \in \mathbb{N}}$ mit $(\varphi_{k_\nu})_y \xrightarrow{\nu \rightarrow \infty} g$ punktweise fast überall.

Nach (iii) ist dann $g = f_y$ fast überall, also ist f_y integrierbar für $y \in \mathbb{R}^q \setminus N$.

b) Nach Satz 6.3 gilt außerdem für $y \in \mathbb{R}^q \setminus N$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \int_{\mathbb{R}^p} \varphi_k(x, y) dx = \int_{\mathbb{R}^p} f(x, y) dx$$

Wir setzen $\Phi_k(y) := \int_{\mathbb{R}^p} \varphi_k(x, y) dx$, $k \in \mathbb{N}$. Dann ist $\Phi_k \in \mathcal{T}_{\mathbb{R}^q}$ (vgl. Fubini für Treppenfunktionen, 3.4) und es gilt

$$(v) \quad \Phi_k \xrightarrow{k \rightarrow \infty} F \text{ punktweise auf } \mathbb{R}^q \setminus N \quad (\text{nach } (**))$$

$$(vi) \quad \sum_{k=0}^{\infty} \|\Phi_{k+1} - \Phi_k\|_{1, \mathbb{R}^q} \leq \sum_{k=0}^{\infty} \|H_k\|_{1, \mathbb{R}^q} = \sum_{k=0}^{\infty} \|\varphi_{k+1} - \varphi_k\|_{1, \mathbb{R}^q \times \mathbb{R}^p} \stackrel{(ii)}{<} \infty.$$

Wegen (vi) ist $(\Phi_k)_{k \in \mathbb{N}}$ Cauchy bzgl. $\|\cdot\|_{1, \mathbb{R}^q}$, also konvergiert nach 6.3 eine Teilfolge $(\Phi_{k_\nu})_{\nu \in \mathbb{N}}$ punktweise fast überall gegen ein $G \in \mathcal{L}^1(\mathbb{R}^q)$. Wegen (v) gilt $F = G$ fast überall und F ist integrierbar.

Wieder nach 6.3 gilt

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}^q} F(y) dy &\stackrel{6.3}{=} \lim_{k \rightarrow \infty} \int_{\mathbb{R}^q} \Phi_k(y) dy \stackrel{3.4}{=} \lim_{k \rightarrow \infty} \int_{\mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^q} \varphi_k(x, y) d(x, y) \\ &\stackrel{4.2}{=} \int_{\mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^q} f(x, y) d(x, y) \end{aligned} \quad \square$$

7.4 Satz von Tonelli

Sei $f : \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^q \rightarrow (-\infty, \infty]$ lokal integrierbar. f ist genau dann integrierbar, wenn wenigstens eines der Integrale

$$\int_{\mathbb{R}^q} \left(\int_{\mathbb{R}^p} |f(x, y)| dx \right) dy \quad (*) \quad , \quad \int_{\mathbb{R}^p} \left(\int_{\mathbb{R}^q} |f(x, y)| dy \right) dx \quad (**)$$

existiert. In diesem Fall gilt die Formel aus 7.3.

Beweis

" \Rightarrow ": f integrierbar $\Rightarrow |f|$ integrierbar; Existenz von (\star) und $(\star\star)$ folgt aus 7.3.

" \Leftarrow ": Nach 6.15 genügt es zu zeigen, dass $|f|$ integrierbar ist. Sei $W_k := [-k, k]^p \times [-k, k]^q$; setze

$$f_k := \min\{|f|, |f| \cdot \chi_{W_k}\}, k \in \mathbb{N}$$

Dann konvergiert $(f_k)_{k \in \mathbb{N}}$ punktweise monoton wachsend gegen $|f|$. Außerdem gilt

$$0 \leq \int_{\mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^q} f_k(x, y) d(x, y) \stackrel{7.3}{=} \int_{\mathbb{R}^q} \left(\int_{\mathbb{R}^p} f_k(x, y) dx \right) dy \leq \int_{\mathbb{R}^q} \left(\int_{\mathbb{R}^p} |f(x, y)| dx \right) dy \stackrel{\text{falls } (\star) \text{ ex.}}{<} \infty$$

$\Rightarrow \left(\int_{\mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^q} f_k(x, y) d(x, y) \right)_{k \in \mathbb{N}}$ beschränkt. Mit Beppo-Levi (6.6) folgt $|f|$ ist integrierbar. \square

7.5 Beispiel

$$f(x, y) := \begin{cases} \frac{x-y}{(x+y)^3}, & \text{falls } x+y \neq 0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

ist nicht integrierbar über $[0, 1] \times [0, 1]$, und

$$\int_0^1 \left(\int_0^1 f(x, y) dx \right) dy \neq \int_0^1 \left(\int_0^1 f(x, y) dy \right) dx$$

Beweis

Übung.

Exkurs: Die Gammafunktion

7.6 Proposition/Definition

Für $x > 0$ ist $(t \mapsto t^{x-1}e^{-t})$ integrierbar über $(0, \infty)$. Wir definieren die **Gammafunktion**

$$\Gamma(x) := \int_{(0, \infty)} t^{x-1} e^{-t} dt$$

Beweis

1. $0 \leq t^{x-1}e^{-t} \leq t^{x-1}$. t^{x-1} ist integrierbar über $(0, 1]$, denn

$$\int_{(0, 1]} t^s dt \stackrel{6.6}{=} \lim_{k \rightarrow \infty} \int_{[\frac{1}{k+1}, 1]} t^s dt = \lim_{k \rightarrow \infty} \int_{\frac{1}{k+1}}^1 t^s dt = \lim_{k \rightarrow \infty} \left| \frac{1}{s+1} t^{s+1} \right|_{\frac{1}{k+1}}^1 = \frac{1}{s+1} \quad \text{für } s > -1$$

2. $0 \leq t^{x-1}e^{-t} \leq \frac{1}{t^2}$, falls $t \geq t_0$ für ein geeignetes t_0 , denn $t^2 \cdot t^{x-1}e^{-t} \xrightarrow{t \rightarrow \infty} 0$. Aber $\frac{1}{t^2}$ ist integrierbar über $[t_0, \infty)$, also auch $t^{x-1}e^{-t}$.

3. $t^{x-1}e^{-t}$ ist stetig, also auch integrierbar auf $[1, t_0]$. \square

7.7 Proposition

Für $x > 0$ gilt $\Gamma(x+1) = x \cdot \Gamma(x)$. Weiter gilt $\Gamma(1) = 1$, also $\Gamma(n+1) = n!$, $n \in \mathbb{N}^*$.

Beweis

1.)

$$\begin{aligned}
 \Gamma(x+1) &= \int_{(0,\infty)} t^{x+1-1} e^{-t} dt \stackrel{6.6}{=} \lim_{k \rightarrow \infty} \int_{\frac{1}{k+1}}^k t^x e^{-t} dt = \lim_{k \rightarrow \infty} \left(-t^x e^{-t} \Big|_{\frac{1}{k+1}}^k + \int_{\frac{1}{k+1}}^k x \cdot t^{x-1} \cdot e^{-t} dt \right) \\
 &= x \cdot \lim_{k \rightarrow \infty} \int_{\frac{1}{k+1}}^k t^{x-1} e^{-t} dt \\
 &= x \cdot \int_{(0,\infty)} t^{x-1} e^{-t} dt = x \cdot \Gamma(x)
 \end{aligned}$$

$$2.) \Gamma(1) = \int_{(0,\infty)} e^{-t} dt = 1.$$

$$3.) \Gamma(n+1) = n! \text{ nach Induktion.} \quad \square$$

7.8 SatzFür $x > 0$ gilt

$$\Gamma(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n! \cdot n^x}{x \cdot (x+1) \cdot \dots \cdot (x+n)}$$

Beweis

Es ist $e^{-t} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{t}{n}\right)^n$ für $t > 0$ (Analysis I). Die Folge ist monoton wachsend in n . Setze

$$f_n(t) := \begin{cases} t^{x-1} \cdot \left(1 - \frac{t}{n}\right)^n, & \text{falls } 0 < t \leq n \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Dann gilt für $t \in (0, \infty)$: $f_n(t) \rightarrow t^{x-1} e^{-t}$ monoton wachsend. Wir erhalten für $x > 0$

$$\begin{aligned}
 \Gamma(x) &= \int_{(0,\infty)} t^{x-1} e^{-t} dt \stackrel{n \rightarrow \infty}{\leftarrow} \int_{(0,\infty)} f_n(t) dt = \lim_{k \rightarrow \infty} \int_{\frac{1}{k+1}}^n t^{x-1} \cdot \left(1 - \frac{t}{n}\right)^n dt \\
 &= \lim_{k \rightarrow \infty} \left(\frac{t^x}{x} \cdot \left(1 - \frac{t}{n}\right)^n \Big|_{\frac{1}{k+1}}^n + \int_{\frac{1}{k+1}}^n \frac{t^x}{x} \cdot \left(1 - \frac{t}{n}\right)^{n-1} dt \right) \\
 &= 0 + \lim_{k \rightarrow \infty} \left(\frac{t^{x+1}}{(x+1)x} \left(1 - \frac{t}{n}\right)^{n-1} \Big|_{\frac{1}{k+1}}^n - \int_{\frac{1}{k+1}}^n \frac{t^{x+1}}{(x+1)x} \cdot \frac{n-1}{n} \left(1 - \frac{t}{n}\right)^{n-2} dt \right) \\
 &= 0 + \frac{n-1}{n} \cdot \frac{1}{(x+1)x} \cdot \int_0^n t^{x+1} \cdot \left(1 - \frac{t}{n}\right)^{n-2} dt = \dots \\
 &= \frac{(n-1) \cdot (n-2) \cdot \dots \cdot 1}{n \cdot n \cdot \dots \cdot n} \cdot \frac{1}{x \cdot (x+1) \cdot \dots \cdot (x+n-1)} \cdot \int_0^n t^{x+n+1} \left(1 - \frac{t}{n}\right)^{n-n} dt \\
 &= \frac{n! \cdot n^x}{x \cdot (x+1) \cdot \dots \cdot (x+n-1)} \quad \square
 \end{aligned}$$

7.9 Corollar

$$\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \sqrt{\pi}$$

Das ist ein Knaller!

Beweis

$$\begin{aligned}\Gamma\left(\frac{1}{2}\right)^2 &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n! \cdot n^{\frac{1}{2}}}{\frac{1}{2}(1 + \frac{1}{2}) \cdot \dots \cdot (n + \frac{1}{2})} \cdot \frac{n! \cdot n^{\frac{1}{2}}}{(1 - \frac{1}{2}) \cdot (2 - \frac{1}{2}) \cdot \dots \cdot (n - \frac{1}{2})(n + \frac{1}{2})} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2 \cdot (n!)^2 \cdot n}{(n + \frac{1}{2}) \cdot (1^2 - \frac{1}{4})(2^2 - \frac{1}{4}) \cdot \dots \cdot (n^2 - \frac{1}{4})} \\ &= 2 \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{n + \frac{1}{2}} \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n!)^2}{(1^2 - \frac{1}{4}) \cdot \dots \cdot (n^2 - \frac{1}{4})} \\ &= 2 \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \underbrace{\prod_{k=1}^n \frac{k^2}{k^2 - \frac{1}{4}}}_{=: c_n}\end{aligned}$$

Setze $A_m := \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^m t \, dt$. Dann gilt $A_0 = \frac{\pi}{2}$, $A_1 = 1$, $A_m = \frac{m-1}{m} A_{m-2}$, $m \geq 2$ (partielle Integration).
Induktion \leadsto

$$\begin{aligned}A_{2n} &= \frac{(2n-1)(2n-3) \cdot \dots \cdot 3 \cdot 1}{2n \cdot (2n-2) \cdot \dots \cdot 4 \cdot 2} \cdot \frac{\pi}{2} \\ A_{2n+1} &= \frac{2n \cdot (2n-2) \cdot \dots \cdot 4 \cdot 2}{(2n+1) \cdot (2n-1) \cdot \dots \cdot 5 \cdot 3} \cdot 1\end{aligned}$$

Es gilt $\sin^{2n+2} t \leq \sin^{2n+1} t \leq \sin^{2n} t$, $t \in [0, \frac{\pi}{2}]$, also

$$A_{2n+2} \leq A_{2n+1} \leq A_{2n}.$$

Damit gilt dann $\frac{A_{2n+2}}{A_{2n}} = \frac{2n+1}{2n+2} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 1$, also

$$\begin{aligned}1 \stackrel{\infty \leftarrow n}{\leq} \frac{A_{2n+2}}{A_{2n}} &\leq \underbrace{\frac{A_{2n+1}}{A_{2n}}} \leq \frac{A_{2n}}{A_{2n}} = 1 \\ &= \left(\prod_{k=1}^n \frac{4k^2}{4k^2-1} \right) \cdot \frac{2}{\pi} = c_n \cdot \frac{2}{\pi} \rightarrow 1\end{aligned}$$

Also $c_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \frac{\pi}{2}$, woraus die Behauptung folgt. □

7.10 Beispiel

Es gilt

$$\int_{\mathbb{R}^n} e^{-\|x\|_2^2} \, dx = \pi^{\frac{n}{2}} \quad \text{insbesondere} \quad \int_{\mathbb{R}} e^{-t^2} \, dt = \pi^{\frac{1}{2}}$$

Beweis

Mit $n = t^2$, $\frac{dn}{dt} = 2t$, $dt = \frac{n^{-\frac{1}{2}}}{2} \, dn$

$$\int_{\mathbb{R}} e^{-t^2} \, dt \stackrel{?}{=} 2 \cdot \int_{(0,\infty)} e^{-t^2} \, dt = \int_{(0,\infty)} n^{-\frac{1}{2}} e^{-n} \, dn = \Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \sqrt{\pi}$$

Weiter gilt nach Fubini (7.3) und Tonelli (7.4)

$$\begin{aligned}\int_{\mathbb{R}^n} e^{-\|x\|_2^2} \, dx &= \int_{\mathbb{R}^n} e^{-(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)} \, d(x_1, \dots, x_n) = \int_{\mathbb{R}^{n-1}} \left(\int_{\mathbb{R}} e^{-(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)} \, dx_1 \right) d(x_2, \dots, x_n) \\ &= \int_{\mathbb{R}^{n-1}} \left(\int_{\mathbb{R}} e^{-x_1^2} \, dx_1 \right) e^{-(x_2^2 + \dots + x_n^2)} d(x_2, \dots, x_n) \\ &= \dots = \left(\pi^{\frac{1}{2}} \right)^n = \pi^{\frac{n}{2}}\end{aligned}$$

□

7.11 Beispiel

Für das Kugelvolumen im \mathbb{R}^n gilt

$$v(B_{\mathbb{R}^n}(0, R)) = \frac{\pi^{\frac{n}{2}} \cdot R^n}{\Gamma(\frac{n}{2} + 1)} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

Beweis

Übung (vgl. Beispiel 5.4)

□

7.12 Beispiel

Wir definieren die **Euler'sche Betafunktion** $B : (0, \infty) \times (0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}_+$ durch

$$B(x, y) := \int_{(0,1)} t^{x-1} (1-t)^{y-1} dt \stackrel{\text{Subs. } t=1/(1+u)}{=} \int_{(0,\infty)} \frac{u^{x-1}}{(1+u)^{x+y}} du$$

(Warum existiert das Integral?)

Behauptung:

$$B(x, y) = \frac{\Gamma(x) \cdot \Gamma(y)}{\Gamma(x+y)}$$

Beweis

Mit Substitution $t = R \cdot s$, $\frac{dt}{ds} = R$

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt = \int_0^\infty (R \cdot s)^{z-1} e^{-Rs} \cdot R ds = R^z \int_0^\infty s^{z-1} e^{-Rs} ds$$

Dann gilt für $z = x + y$, $R = 1 + u$

$$\begin{aligned} &\leadsto \frac{1}{\Gamma(x, y)} \cdot \int_0^\infty t^{x+y-1} e^{-(1+u)t} dt = \frac{1}{(1+u)^{x+y}} \\ &\leadsto B(x, y) = \frac{1}{\Gamma(x+y)} \cdot \int_0^\infty u^{x-1} \left(\int_0^\infty t^{x+y-1} e^{-(1+u)t} dt \right) du \\ &= \frac{1}{\Gamma(x+y)} \int_0^\infty \left(\int_0^\infty u^{x-1} t^{x+y-1} e^{-(1+u)t} dt \right) du \\ &= \frac{1}{\Gamma(x+y)} \cdot \int_0^\infty \left(\int_0^\infty u^{x-1} t^{x+y-1} e^{-(1+u)t} du \right) dt \\ &= \frac{1}{\Gamma(x+y)} \cdot \int_0^\infty t^{x+y-1} e^{-t} \cdot \left(\int_0^\infty u^{x-1} e^{-ut} du \right) dt \end{aligned}$$

Substitution $ut = s$

$$= \frac{\Gamma(x)}{\Gamma(x+y)} \cdot \int_0^\infty t^{y-1} e^{-t} dt = \frac{\Gamma(x) \cdot \Gamma(y)}{\Gamma(x+y)}$$

□

7.13 Beispiel (Dirichlet)

Sei $\triangle := \{(x, y) \in (0, \infty) \times (0, \infty) \mid x + y < 1\}$ das **Standardsimplex** im \mathbb{R}^2 und $f : \triangle \rightarrow \mathbb{R}_+$ gegeben durch $f(x, y) := x^{p-1} \cdot y^{q-1}$, $p, q > 0$. Es gilt

$$\begin{aligned} \int_{\triangle} f(x, y) \, d(x, y) &= \int_{(0,1)} \left(\int_{(0,1-y)} f(x, y) \, dx \right) dy = \int_{(0,1)} y^{q-1} \left(\int_{(0,1-y)} x^{p-1} \, dx \right) dy \\ &= \int_{(0,1)} y^{q-1} \frac{1}{p} \cdot (1-y)^p \, dy \\ &= \frac{1}{p} \cdot B(q, p+1) \\ &= \frac{1}{p} \cdot \frac{\Gamma(q) \cdot \Gamma(p+1)}{\Gamma(q+p+1)} \\ &= \frac{\Gamma(q) \cdot \Gamma(p)}{\Gamma(q+p+1)} \end{aligned}$$

8 Der Transformationssatz

Erinnerung: $T : [a, b] \rightarrow [c, d]$ bijektiv, stetig differenzierbar, $f : [c, d] \rightarrow \mathbb{R}$ stetig. Dann gilt

$$\int_a^b f(T(x)) \frac{dT}{dx}(x) dx = \int_{T(a)}^{T(b)} f(t) dt,$$

$$\text{also } \int_{[a,b]} f(T(x)) \left| \frac{dT}{dx}(x) \right| dx = \int_{[c,d]=T([a,b])} f(t) dt$$

8.1 Transformationssatz

Seien $U, V \subset \mathbb{R}^n$ offen, $T : U \rightarrow V$ ein C^1 -**Diffeomorphismus**⁵; sei $f : V \rightarrow (-\infty, \infty]$ eine Funktion. Dann ist f über V integrierbar, genau dann wenn

$$(f \circ T) \cdot |\det(DT)|$$

über U integrierbar ist. In diesem Fall gilt

$$\int_U (f \circ T)(x) \cdot |\det(DT(x))| dx = \int_V f(y) dy$$

Beweis (Skizze)

Strategie: Sei V ein Quader und f eine Treppenfunktion. T^{-1} ist differenzierbar, d.h. für $y \in V$ gilt

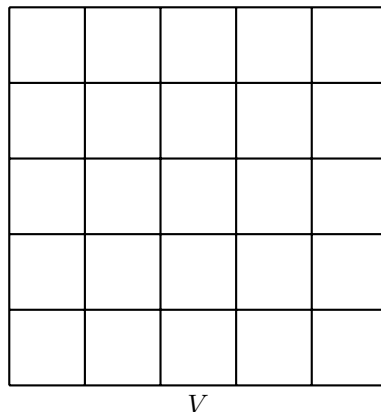


Abbildung 3: Veranschaulichung der Beweisstrategie von 8.1

$$T^{-1}(y + \xi) = T^{-1}(y) + D(T^{-1})(y)\xi + \varphi(\xi)$$

,wo $D(T^{-1})(y) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ linear (und invertierbar) ist und $\varphi : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine Abbildung mit $\frac{1}{\|\xi\|_2} \varphi(\xi) \xrightarrow{\xi \rightarrow 0} 0$. Setze $\tilde{P}_k := P_k - x_k$, $\tilde{Q}_k := Q_k - y_k$, dann

$$\begin{aligned} \tilde{P}_k = P_k - x_k &= T^{-1}(Q_k) - T^{-1}(y_k) \approx T^{-1}(y_k) + D(T^{-1})(y_k)(\tilde{Q}_k) - T^{-1}(y_k) \\ &= D(T^{-1})(T(x_k))(\tilde{Q}_k) = (DT(x_k))^{-1}(\tilde{Q}_k) \end{aligned}$$

⁵ T stetig diff'bar, T^{-1} stetig diff'bar

Es folgt

$$\begin{aligned} v(P_k) = v(\tilde{P}_k) &\approx v((DT(x_k))^{-1}(\tilde{Q}_k)) \stackrel{5.16}{=} \left| \det(DT(x_k))^{-1} \right| \cdot v(\tilde{Q}_k) \\ &= |\det DT(x_k)|^{-1} \cdot v(Q_k) \end{aligned}$$

also $|\det DT(x_k)| \cdot v(P_k) \approx v(Q_k)$. Daraus folgt

$$\begin{aligned} \int_V f(y) dy &= \sum_k f(y_k) \cdot v(Q_k) \stackrel{!}{\approx} \sum_k f(T(x_k)) \cdot |\det DT(x_k)| \cdot v(P_k) \\ &\stackrel{!}{\approx} \int_U f \circ T(x) \cdot |\det DT(x)| dx. \end{aligned}$$

8.2 Lemma

Sei T, U, V wie in 8.1, $N \subset V$ eine Nullmenge. Dann ist $T^{-1}(N)$ eine Nullmenge.

Beweisidee

Man darf $N \subset K \subseteq V$ für ein kompaktes K annehmen, benutze dann, dass $T^{-1}|_K$ Lipschitz ist, sowie Bemerkung 5.11 (N lässt sich durch abzählbar viele Quader mit kleinem Gesamtvolumen überdecken). \square

8.3 Lemma

Sei $P \subset U$ eine kompakte Teilmenge, sodass $Q := T(P) \subset V$ ein kompakter Quader ist. Dann gilt:

$$\min_{x \in P} |\det DT(x)| \cdot v(P) \leq v(Q) \leq \max_{x \in P} |\det DT(x)| \cdot v(P)$$

Beweis benutzt:

Corollar 5.16, Lemma 8.2, Kompaktheit von P und Stetigkeit von $(x \mapsto |\det DT(x)|)$ \square

8.4 Proposition

Der Transformationssatz 8.1 gilt für $f_V \in \mathcal{T}(\mathbb{R}^n)$ mit $\text{supp } f := \overline{\{x \in V \mid f(x) \neq 0\}} \subset V$.

Beweis (Skizze)

Wegen Linearität und Lemma 8.2 genügt es den Satz für $f = \chi_Q$ zu beweisen, wo $Q \subset V$ ein kompakter Quader ist. Integrierbarkeit von $(\chi_Q \circ T) \cdot |\det DT|$ folgt aus Kompaktheit von $T^{-1}(Q)$ und Stetigkeit von $(x \mapsto |\det DT(x)|)$. Zu zeigen: $\int_{T^{-1}(Q)} |\det DT(x)| dx = \int_Q 1 dy$

Sei $\varepsilon > 0$. $|\det DT^{-1}|^{-1}$ ist gleichmäßig stetig auf Q , daher existieren $Q_1, \dots, Q_r \subset Q$ kompakte Quader, sodass

$$(i) \quad Q = \bigcup_{i=1}^r Q_i$$

$$(ii) \quad Q_i \cap Q_{i'} \text{ ist Nullmenge, falls } i \neq i'$$

$$(iii) \quad \max_{y \in Q_i} |\det D(T^{-1})(y)|^{-1} - \min_{y \in Q_i} |\det D(T^{-1})(y)|^{-1} \leq \varepsilon, \quad i = 1, \dots, r$$

Wegen $D(T^{-1})(T(x)) = DT(x)^{-1}$ und $\det(A^{-1}) = (\det A)^{-1}$ (für $A \in M_n(\mathbb{R})$), gilt

$$|\det D(T^{-1})(T(x))|^{-1} = |\det DT(x)|$$

Satz von der Umkehrabbildung

Für $P_i := T^{-1}(Q_i)$ erhalten wir:

$$\max_{x \in P_i} |\det(DT(x))| - \min_{x \in P_i} |\det(DT(x))| \stackrel{(iii)}{\leq} \varepsilon$$

Dann gilt:

$$\left| \int_{P_i} |\det DT(x)| dx - v(Q_i) \right| \stackrel{(\star), 8.3}{\leq} \varepsilon \cdot v(P_i)$$

Es folgt

$$\int_{T^{-1}(Q)} |\det DT(x)| dx \stackrel{(ii), 8.2}{=} \sum_{i=1}^r \int_{P_i} |\det DT(x)| dx \stackrel{\substack{\sum_{i=1}^r \varepsilon \cdot v(P_i) \\ = \varepsilon \cdot v(T^{-1}(Q))}}{=} \sum_{i=1}^r v(Q_i) = v(Q) = \int_Q 1 dy$$

$\varepsilon > 0$ beliebig \Rightarrow Behauptung. □

Beweis von 8.1 (Skizze)

Sei f integrierbar über V . Konstruiere Treppenfunktionen $(\varphi_k)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{T}(\mathbb{R}^n)$ mit

(i) $\text{supp } \varphi_k \subset V$

(ii) $\|\varphi_k - \varphi_l\|_1 \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$

(iii) Für eine Nullmenge $N \subset V$ gilt: $\varphi_k \xrightarrow{k \rightarrow \infty} f_V$ punktweise auf $V \setminus N$. (mit 6.3)

Nach Proposition 8.4 gilt:

$$\begin{aligned} \left\| (\varphi_k \circ T) \cdot |\det(DT)| - (\varphi_l \circ T) \cdot |\det(DT)| \right\|_1 &= \int_U |\varphi_k \circ T - \varphi_l \circ T| \cdot |\det(DT)| dx \\ &\stackrel{8.4}{=} \int_V |\varphi_k - \varphi_l| dy \\ &= \|\varphi_k - \varphi_l\|_1 \end{aligned}$$

$\Rightarrow ((\varphi_k \circ T) \cdot |\det(DT)|)_{k \in \mathbb{N}}$ ist Cauchy-Folge bezüglich $\|\cdot\|_1$. Weiter gilt

$$(\varphi_k \circ T) \cdot |\det(DT)| \xrightarrow{k \rightarrow \infty} (f_V \circ T) \cdot |\det(DT)|$$

punktweise fast überall, d.h. auf $U \setminus T^{-1}(N)$ ($T^{-1}(N)$ ist Nullmenge nach 8.2). Nach dem Satz von Riesz-Fischer (6.3) ist dann $(f_V \circ T) \cdot |\det(DT)|$ integrierbar über U und

$$\int_U (f \circ T) \cdot |\det(DT)| dx = \lim_{k \rightarrow \infty} \int_U (\varphi_k \circ T) \cdot |\det(DT)| dx \stackrel{8.4}{=} \lim_{k \rightarrow \infty} \int_V \varphi_k dy \stackrel{6.3}{=} \int_V f dy.$$

Rückrichtung $T \rightsquigarrow T^{-1}$ □

8.5 Beispiel

(i) Sei $A \in GL(n, \mathbb{R})$ eine invertierbare $n \times n$ -Matrix, $b \in \mathbb{R}^n$. Sei $T: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ die **affine Transformation** $x \mapsto Ax + b$. Dann gilt $DT(x) = A$, $x \in \mathbb{R}^n$ (vgl. Ana II) und f ist über $K \subset \mathbb{R}^n$ integrierbar genau dann, wenn $f \circ T$ über $T^{-1}(K)$ integrierbar ist und es gilt

$$|\det A| \cdot \int_{T^{-1}(K)} f(Ax + b) dx = \int_K f(y) dy.$$

Für $A \in O(n)$ (orthogonale Matrix) gilt

$$v(T(K)) = v(K)$$

(Bewegungsinvarianz des Lebesgue-Maßes).

(ii) Polarkoordinaten in \mathbb{R}^2

$P_2 : (0, \infty) \times (-\pi, \pi) \rightarrow \mathbb{R}^2 \setminus (-\infty, 0] \times \{0\}$, $\begin{pmatrix} r \\ \varphi \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} r \cdot \cos \varphi \\ r \cdot \sin \varphi \end{pmatrix}$ ist bijektiv. Es ist

$$DP_2 \begin{pmatrix} r \\ \varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -r \sin \varphi \\ \sin \varphi & r \cos \varphi \end{pmatrix}$$

und $\det DP_2 \begin{pmatrix} r \\ \varphi \end{pmatrix} = r > 0$. Daraus folgt $DP_2 \begin{pmatrix} r \\ \varphi \end{pmatrix}$ ist invertierbar $\Rightarrow P_2$ ist C^1 -Diffeomorphismus. Für $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ integrierbar gilt nun

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}^2} f(x, y) \, d(x, y) &= \int_{\mathbb{R}^2 \setminus (-\infty, 0] \times \{0\}} f(x, y) \, d(x, y) = \int_{(0, \infty) \times (-\pi, \pi)} f(P_2(r, \varphi)) \cdot r \, d(r, \varphi) \\ &= \int_{(0, \infty)} r \left(\int_{(-\pi, \pi)} f(P_2(r, \varphi)) \, d\varphi \right) dr \end{aligned}$$

(iii) Kugelkoordinaten im \mathbb{R}^3

$P_3 : (0, \infty) \times (-\pi, \pi) \times (-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}) \rightarrow \mathbb{R}^3 \setminus (-\infty, 0] \times \{0\} \times \mathbb{R}$

$$\begin{pmatrix} r \\ \varphi \\ \theta \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} r \cdot \cos \varphi \cdot \cos \theta \\ r \cdot \sin \varphi \cdot \cos \theta \\ r \cdot \sin \theta \end{pmatrix}$$

ist bijektiv. Es gilt

$$\det \left(DP_3 \begin{pmatrix} r \\ \varphi \\ \theta \end{pmatrix} \right) = r^2 \cdot \cos \theta > 0$$

für $r > 0, \theta \in (-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$. Für f integrierbar gilt

$$\int_{\mathbb{R}^3} f(x, y, z) \, d(x, y, z) = \int_{(0, \infty)} \int_{(-\pi, \pi)} \int_{(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})} f(P_3(r, \varphi, \theta)) \cdot r^2 \cdot \cos \theta \, d\theta \, d\varphi \, dr$$

(iv)

$$\int_{\mathbb{R}^3} \chi_{B(0, R)} \, d(x, y, z) = \dots = \frac{4}{3} \pi R^3$$

8.6 Corollar (Integration rotationssymmetrischer Funktionen)

Sei $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion, welche sich in der Form $g(x) = f(\|x\|_2)$ schreiben lässt für eine Funktion $f : \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}$. Dann ist g über \mathbb{R}^n integrierbar genau dann, wenn $f(r) \cdot r^{n-1}$ über $(0, \infty)$ integrierbar ist. In diesem Fall gilt

$$\int_{\mathbb{R}^n} g(x) \, dx = n \cdot v(B_{\mathbb{R}^n}(0, 1)) \cdot \int_{(0, \infty)} f(r) r^{n-1} \, dr$$

Beweis

Für $n = 2, 3$ Übung. Für $n > 3$ ohne Beweis.

9 σ -Algebren und messbare Räume

9.1 Erinnerung

Sei X eine Menge. $\mathcal{T} \subset \mathcal{P}(X)$ heißt **Topologie** auf X , falls

- (i) $X, \emptyset \in \mathcal{T}$,
- (ii) $U_1, \dots, U_n \in \mathcal{T} \implies \bigcap_{i=1}^n U_i \in \mathcal{T}$,
- (iii) $U_i \in \mathcal{T}, i \in I \implies \bigcup_{i \in I} U_i \in \mathcal{T}$.

(X, \mathcal{T}) heißt **topologischer Raum**, $U \in \mathcal{T}$ heißt **offen**. Falls (X_j, \mathcal{T}_j) , $j = 1, 2$ topologischer Räume sind und $f : X_1 \rightarrow X_2$ eine Abbildung, dann heißt f **stetig**, falls gilt

$$U \in \mathcal{T}_2 \implies f^{-1}(U) \in \mathcal{T}_1.$$

9.2 Definition

Sei X eine Menge. $\Sigma \subset \mathcal{P}(X)$ heißt **σ -Algebra** auf X , falls

- (i) $X \in \Sigma$,
- (ii) $A \in \Sigma \implies X \setminus A \in \Sigma$,
- (iii) $A_n \in \Sigma, n \in \mathbb{N} \implies \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \Sigma$.

(X, Σ) heißt **messbarer Raum**; die Elemente von Σ heißen **messbare Mengen**. (X_j, Σ_j) für $j = 1, 2$ seien messbare Räume, $f : X_1 \rightarrow X_2$ eine Abbildung. f heißt **messbar**, falls gilt

$$A \in \Sigma_2 \implies f^{-1}(A) \in \Sigma_1.$$

9.3 Bemerkung

- (i) σ -Algebren sind abgeschlossen bezüglich abzählbarer Vereinigungen und Durchschnitten.

de Morgan

- (ii) (X_j, Σ_j) für $j = 1, 2, 3$, $f : X_1 \rightarrow X_2$, $g : X_2 \rightarrow X_3$ messbar. $\implies g \circ f : X_1 \rightarrow X_3$ messbar.

9.4 Proposition

Sei X eine Menge und $\mathcal{F} \subset \mathcal{P}(X)$ eine Menge von Teilmengen. Dann existiert eine kleinste σ -Algebra, die \mathcal{F} enthält; diese nennen wir die von \mathcal{F} **erzeugte σ -Algebra** $\Sigma(\mathcal{F})$.

Beweis

Setze

$$\Omega := \left\{ \Gamma \subset \mathcal{P}(X) \mid \Gamma \text{ ist } \sigma\text{-Algebra und } \mathcal{F} \subset \Gamma \right\}$$

Dann ist $\Omega \neq \emptyset$ (denn $\mathcal{P}(X) \in \Omega$). Setze $\Sigma(\mathcal{F}) := \bigcap_{\Gamma \in \Omega} \Gamma \subset \mathcal{P}(X)$. Dann ist $\mathcal{F} \subset \Sigma(\mathcal{F})$, denn $\mathcal{F} \subset \Gamma$ für $\Gamma \in \Omega$. Ist $\Gamma \subset \mathcal{P}(X)$ eine σ -Algebra, welche \mathcal{F} enthält, so ist $\Gamma \in \Omega$ und $\Sigma(\mathcal{F}) \subset \Gamma$. Es bleibt zu zeigen: $\Sigma(\mathcal{F})$ ist σ -Algebra:

- (i) $X \in \Sigma(\mathcal{F})$, denn $X \in \Gamma$ für jedes $\Gamma \in \Omega$.
- (ii) $A \in \Sigma(\mathcal{F}) \implies A \in \Gamma$ für jedes $\Gamma \in \Omega$. Es folgt $X \setminus A \in \Gamma$ für jedes $\Gamma \in \Omega$. Also ist $X \setminus A \in \Sigma(\mathcal{F})$.
- (iii) ebenso. □

9.5 Bemerkung

Die entsprechende Aussage für topologische Räume beweist man analog.

9.6 Definition

- (i) Sei (X, \mathcal{T}) ein topologischer Raum. Wir nennen $\Sigma(\mathcal{T})$ die **σ -Algebra der Borelmengen** auf X und schreiben \mathcal{B}_X für $\Sigma(\mathcal{T})$.
- (ii) Seien $(X, \mathcal{T}_X), (Y, \mathcal{T}_Y)$ topologische Räume, dann heißt $f : X \rightarrow Y$ **Borel-messbar**, falls f messbar ist bezüglich \mathcal{B}_X und \mathcal{B}_Y .

9.7 Bemerkung

Offene und abgeschlossene Mengen sind Borel und ebenso F_σ 's (abzählbare Vereinigungen von abgeschlossenen Mengen), und G_δ 's (abzählbare Durchschnitte von offenen Mengen).

9.8 Proposition

Sei (X, Σ) ein messbarer Raum und (Y, \mathcal{T}) ein topologischer Raum. Sei $f : X \rightarrow Y$ eine Abbildung. Dann gilt

- (i) $\Omega := \{E \subset Y \mid f^{-1}(E) \in \Sigma\}$ ist eine σ -Algebra auf Y .
- (ii) Falls $f^{-1}(E) \in \Sigma$ für jedes $E \in \mathcal{T}$, so ist f messbar (bezüglich Σ und \mathcal{B}_Y). Insbesondere: Falls (X, \mathcal{T}_X) ein topologischer Raum ist und $\Sigma = \mathcal{B}_X$ und falls f stetig ist, so ist f Borel.
- (iii) Falls $Y = \mathbb{R}$ und $f^{-1}((\alpha, \infty)) \in \Sigma$ für jedes $\alpha \in \mathbb{R}$, so ist f messbar.
- (iv) Aussage (iii) gilt analog für $Y = (-\infty, \infty]$ und $(\alpha, \infty]$, wobei \mathcal{T} , die von $\mathcal{T}_{\mathbb{R}}$ und $(\alpha, \infty]$, $\alpha \in \mathbb{R}$ erzeugte Topologie ist.

Beweis

- (i) $f^{-1}(Y) = X, f^{-1}(Y \setminus E) = X \setminus f^{-1}(E), f^{-1}(E_1 \cup E_2 \cup \dots) = f^{-1}(E_1) \cup f^{-1}(E_2) \cup \dots$
- (ii) Setze $\Omega := \{E \subset Y \mid f^{-1}(E) \in \Sigma\}$ wie in (i). Dann gilt $\mathcal{T} \subset \Omega$, also $\mathcal{B}_Y \subset \Omega$ nach (i). $\Rightarrow f^{-1}(E) \in \Sigma$ für jedes $E \in \mathcal{B}_Y \Rightarrow f$ ist messbar.
- (iii) Wieder $\Omega := \{E \subset Y \mid f^{-1}(E) \in \Sigma\}$. Für $\alpha \in \mathbb{R}$ wähle $\alpha_0 < \alpha_1 < \dots < \alpha$ mit $\alpha_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \alpha$. Dann ist $(\alpha_k, \infty) \in \Omega$ für jedes k . Also auch $(-\infty, \alpha_n]$ (nach (i)) und $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} (-\infty, \alpha_n] = (-\infty, \alpha) \in \Omega$. $\Rightarrow (\alpha, \beta) = (-\infty, \beta) \cap (\alpha, \infty) \in \Omega$. Also für jedes $U \in \mathcal{T}_{\mathbb{R}}$ ist $U \in \Omega$, denn $U = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} (\gamma_n, \delta_n)$ (warum?).

Daraus folgt $\mathcal{B}_Y \subset \Omega$, also ist f messbar.

- (iv) Übung. □

9.9 Proposition

Sei (X, Σ) ein messbarer Raum und $f_n : X \rightarrow (-\infty, \infty]$ eine Folge messbarer Funktionen. Dann sind $g := \sup_{n \in \mathbb{N}} f_n$ und $h := \limsup_{n \rightarrow \infty} f_n$ messbar⁶.

⁶ $h(x) = \lim_k \sup_{n \geq k} f_n(x)$

Beweis

$$g^{-1}((\alpha, \infty]) = \underbrace{\bigcup_{k \in \mathbb{N}} \underbrace{f_n^{-1}((\alpha, \infty])}_{\in \Sigma}}_{\in \Sigma} \xrightarrow{9.8} g \text{ messbar}$$

Ebenso für inf an Stelle von sup. Weiter gilt

$$h(x) = \lim_{k \rightarrow \infty} \sup_{n \geq k} f_n(x) = \inf_{k \geq 0} \underbrace{\sup_{n \geq k} f_n(x)}_{\text{messbar}}$$

messbar

□

9.10 Corollar

Seien (X, Σ) und $f_n : X \rightarrow (-\infty, \infty]$ messbar für $n \in \mathbb{N}$.

- (i) Falls $f_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} f$ punktweise, so ist f messbar.
- (ii) Falls $d, e : X \rightarrow (-\infty, \infty]$ messbar sind, so auch $\max\{d, e\}$, $\min\{d, e\}$, also auch d_+ und d_- .

Beweis

$f = \limsup_{n \rightarrow \infty} f_n$; $\max\{d, e\} = \sup\{d, e, e, e, \dots\}$ benutze 9.9. Mit $d_+ = \max\{d, 0\}$, $d_- = \max\{-d, 0\}$ folgt der zweite Teil. □

9.11 Definition

Sei (X, Σ) ein messbarer Raum. $f : X \rightarrow (-\infty, \infty)$ heißt **einfach**, falls $f(X)$ endlich ist.

9.12 Bemerkung

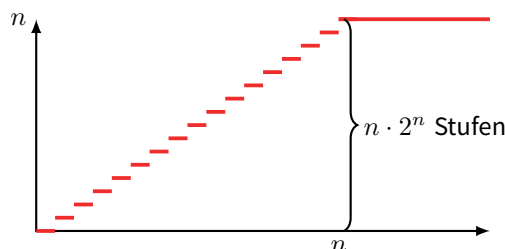
Sei f einfach, dann ist $f = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \chi_{A_i}$ für $\{\alpha_1, \dots, \alpha_n\} = f(X)$ und $A_i = f^{-1}(\{\alpha_i\})$. f ist messbar genau dann, wenn die A_i messbar sind.

9.13 Proposition

Sei (X, Σ) ein messbarer Raum, $f : X \rightarrow [0, \infty]$ messbar. Dann existieren einfache, messbare Funktionen $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ mit $0 \leq f_1 \leq f_2 \leq \dots$ und $f_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} f$ punktweise.

Beweis

Definiere $\varphi_n : [0, \infty] \rightarrow [0, \infty)$ wie folgt:



Dann ist φ_n messbar, also auch $\varphi_n \circ f =: f_n$. Dann gilt $f_n \nearrow f$ punktweise. □

9.14 Definition

Sei (X, Σ) ein messbarer Raum. Ein **Maß** auf (X, Σ) ist eine Abbildungen $\mu : \Sigma \rightarrow [0, \infty]$ mit $\mu(\emptyset) = 0$, welche **abzählbar additiv** ist, d.h. Falls $A_i, i \in \mathbb{N}$ paarweise disjunkte messbare Mengen sind, so gilt

$$\mu\left(\bigcup_{i \in \mathbb{N}} A_i\right) = \sum_{i \in \mathbb{N}} \mu(A_i).$$

(X, Σ, μ) heißt **Maßraum; Wahrscheinlichkeitsraum** falls $\mu(X) = 1$.

9.15 Proposition

Sei (X, Σ, μ) ein Maßraum. Dann gilt

- (i) $A, B \in \Sigma, A \subset B \implies \mu(A) \leq \mu(B)$
- (ii) $A_i \in \Sigma, i \in \mathbb{N}, A_0 \subset A_1 \subset A_2 \subset \dots$, dann gilt $\mu(A_i) \xrightarrow{i \rightarrow \infty} \mu(\bigcup_{i \in \mathbb{N}} A_i)$.
- (iii) $A_i \in \Sigma, i \in \mathbb{N}, A_0 \supset A_1 \supset A_2 \supset \dots$ und $\mu(A_0) < \infty$, dann gilt $\mu(A_i) \xrightarrow{i \rightarrow \infty} \mu(\bigcap_{i \in \mathbb{N}} A_i)$.

Beweis

(i)

$$\mu(B) = \mu\left(\bigcup_{i \in \mathbb{N}} A_i\right) \stackrel{9.14}{=} \sum_{i \in \mathbb{N}} \mu(A_i) \geq \mu(A)$$

mit $A_0 := A, A_1 := B \setminus A, A_2 := \emptyset, A_3 := \emptyset, \dots$ paarweise disjunkt und messbar.

- (ii) Setze $B_0 := A_0, B_1 := A_1 \setminus A_0, B_2 := A_2 \setminus A_1, \dots, B_{i+1} := A_{i+1} \setminus A_i$, dann sind die B_i paarweise disjunkt und messbar;

$$\mu\left(\bigcup_{i \in \mathbb{N}} A_i\right) = \mu\left(\bigcup_{i \in \mathbb{N}} B_i\right) = \sum_{i \in \mathbb{N}} \mu(B_i) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \mu(B_i) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu\left(\bigcup_{i=1}^n B_i\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A_n)$$

- (iii) Übung. □

9.16 Beispiele

- (i) $(X, \mathcal{P}(X), \mu)$ mit $\mu(E) = \begin{cases} 0, & \text{falls } E = \emptyset \\ \infty, & \text{falls } E \neq \emptyset \end{cases}$
- (ii) $(X, \mathcal{P}(X), \mu)$ mit $\mu(E) = \begin{cases} |E|, & \text{falls } E \text{ endlich} \\ \infty, & \text{sonst} \end{cases}$ (Zählmaß)
- (iii) $(X, \mathcal{P}(X), \delta_{x_0})$ mit $\delta_{x_0}(E) = \begin{cases} 1, & \text{falls } x_0 \in E \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$ ist W'raum für jedes X und $x_0 \in X$.
- (iv) Sei μ das Zählmaß auf $(\mathbb{N}, \mathcal{P}(\mathbb{N}))$. Sei $A_i := \{i, i+1, \dots\}, i \in \mathbb{N}$. Dann gilt $A_1 \supset A_2 \supset \dots$ und $\mu(A_i) = \infty$, aber $\mu(\bigcap_{i \in \mathbb{N}} A_i) = 0$. In Proposition 9.15 (iii) ist $\mu(A_0) < \infty$ also wesentlich!

(v)

$$\begin{aligned}\hat{\Lambda} &= \{E \subset \mathbb{R}^n \mid \chi_E \text{ ist lokal integrierbar}\} \\ &= \{E \subset \mathbb{R}^n \mid E \cap K \text{ messbar im Sinne von Abschnitt 6 für jedes kompakte } K \subset \mathbb{R}^n\}\end{aligned}$$

ist σ -Algebra auf \mathbb{R}^n :

- a) $\emptyset, X \in \hat{\Lambda}$ denn für jedes kompakte K ist χ_X über K integrierbar.
 b) Sei $E \subset \mathbb{R}^n, E \in \hat{\Lambda}$ und $K \subset \mathbb{R}^n$ kompakt: $\chi_{(\mathbb{R}^n \setminus E) \cap K} = \chi_{K \setminus (K \cap E)} = \chi_K - \chi_{K \cap E}$ ist integrierbar. Also $\mathbb{R}^n \setminus E \in \hat{\Lambda}$.
 c) abzählbare Vereinigungen ähnlich (mit Beppo-Levi).

 $\hat{\Lambda}$ enthält die Borelmengen auf \mathbb{R}^n (vgl. 6.8). $\lambda : \hat{\Lambda} \rightarrow [0, \infty]$ gegeben durch

$$\lambda(E) := \begin{cases} v(E), & \text{falls } \chi_E \text{ integrierbar} \\ \infty, & \text{sonst} \end{cases}$$

ist ein Maß auf \mathbb{R}^n , das **Lebesgue-Maß** (vgl. Bemerkung 6.8).

- (vi) $f \in \mathcal{L}^1(\mathbb{R}^n) \Rightarrow f$ ist messbar im Sinne von Abschnitt 9 (Benutze 9.8 und Corollar 6.4, f ist fast überall punktwiser Limes von Treppenfunktionen.)

9.17 Definition

Sei (X, Σ, μ) ein Maßraum.

- (i) Für eine einfache, messbare Funktion $s : X \rightarrow [0, \infty)$, $s = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \chi_{A_i}$ definieren wir

$$\int s \, d\mu := \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \mu(A_i)$$

- (ii) Für $f : X \rightarrow [0, \infty]$ messbar definieren wir

vgl. 9.13

$$\int f \, d\mu := \sup \left\{ \int s \, d\mu \mid s \text{ ist einfach, messbar, } 0 \leq s \leq f \right\}$$

- (iii) Falls f nicht notwendig positiv ist, aber $\int f_- \, d\mu < \infty$, so setzen wir $\int f \, d\mu := \int f_+ \, d\mu - \int f_- \, d\mu$.

- (iv) Wir schreiben $\mathcal{L}^1(\mu) := \{f : X \rightarrow \mathbb{R} \mid \int |f| \, d\mu < \infty\}$. $\mathcal{L}^1(\mu)$ ist Vektorraum und die Abbildung $f \mapsto \int f \, d\mu$ ist lineares Funktional auf $\mathcal{L}^1(\mu)$.

- (v) Für $f \in \mathcal{L}^1(\mu)$ setzen wir $\|f\|_1 = \int |f| \, d\mu$. $\|\cdot\|_1$ ist Halbnorm.

9.18 Satz

Für $f \in \mathcal{L}^1(\mathbb{R}^n)$ gilt

$$\int f(x) \, dx = \int f \, d\lambda$$

Beweis

Klar für einfache Funktionen (Linearität). Benutze dann 9.13 und Beppo-Levi für f_+ und f_- . □

9.19 Bemerkung

Wir haben vorher das Lebesgue-Integral definiert und daraus das Lebesgue-Maß erhalten. Der Satz sagt, dass man umgekehrt das Integral von dem Maß erhält.

9.20 Definition

(X, Σ, μ) Maßraum. Wir definieren wieder $\mathcal{N} := \{f \in \mathcal{L}^1(\mu) \mid \int |f| d\mu = 0\}$ und $L^1(\mu) := \mathcal{L}^1(\mu)/\mathcal{N}$. Die folgenden Sätze beweist man wie in Abschnitt 6

9.21 Satz

$(L^1(\mu), \|\cdot\|_1)$ ist vollständig normierter Vektorraum (Banachraum).

9.22 Satz (von Lebesgue über monotone Konvergenz)

Sei (X, Σ, μ) ein Maßraum und $f_n : X \rightarrow [0, \infty]$, $n \in \mathbb{N}$ eine Folge messbarer Funktionen mit $0 \leq f_0 \leq f_1 \leq \dots$. Dann ist $f := \lim_{n \rightarrow \infty} f_n : X \rightarrow [0, \infty]$ messbar und es gilt

$$\int f_n d\mu \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \int f d\mu.$$

9.23 Lemma von Fatou

Sei (X, Σ, μ) ein Maßraum und $f_n : X \rightarrow [0, \infty]$, $n \in \mathbb{N}$, eine Folge messbarer Funktionen. Dann gilt

$$\int \liminf_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int f_n d\mu$$

9.24 Satz (von Lebesgue über dominierte Konvergenz)

Sei (X, Σ, μ) ein Maßraum und $f_n : X \rightarrow (-\infty, \infty]$, $n \in \mathbb{N}$, eine Folge messbarer Funktionen, welche punktweise gegen $f : X \rightarrow (-\infty, \infty]$ konvergiert. Es sei $g : X \rightarrow [0, \infty]$ messbar mit $\int g d\mu < \infty$; es gelte $|f_n| \leq g$. Dann ist $f := \lim_{n \rightarrow \infty} f_n$ integrierbar und es gilt

$$\int f_n d\mu \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \int f d\mu.$$

Haben gesehen: Maß $\mu \rightsquigarrow$ lineares Funktional auf $\mathcal{L}^1(\mu)$. Unter gewissen Umständen lassen sich umgekehrt Funktionale auf Funktionsräumen durch Integrale darstellen.

Erinnerung

Ein topologischer Raum (X, \mathcal{T}) heißt **lokalkompakt** und **Hausdorff** falls gilt:

- (i) Jeder Punkt besitzt eine kompakte Umgebung
- (ii) Je zwei Punkte lassen sich durch offene Mengen trennen.

D.h.

- (i) $\forall x \in X : \exists K \text{ kompakt } \supset V \text{ offen } \ni x$
- (ii) $\forall x \neq y \in X : \exists V, W \in \mathcal{T} : x \in V, y \in W, V \cap W = \emptyset$

$$C_c(X) := \{f : X \rightarrow \mathbb{R} \mid \text{supp } f \text{ kompakt}\}$$

9.25 Satz (Darstellungssatz von Riesz)

Sei (X, \mathcal{T}) ein lokalkompakter Hausdorffraum und sei $\Phi : C_c(X) \rightarrow \mathbb{R}$ ein positives ($f \geq 0 \Rightarrow \Phi(f) \geq 0$) lineares Funktional. Dann existieren eine σ -Algebra Σ auf X mit $\mathcal{B}_X \subset \Sigma$ und ein Maß μ auf (X, Σ) mit folgenden Eigenschaften:

- (i) $\Phi(f) = \int f \, d\mu$ für $f \in C_c(X)$.
- (ii) $\mu(K) < \infty$ für K kompakt.
- (iii) Für $E \in \Sigma$ gilt $\mu(E) = \inf\{\mu(V) \mid E \subset V \in \mathcal{T}\}$
- (iv) Für $E \in \Sigma$ mit $\mu(E) < \infty$ gilt $\mu(E) = \sup\{\mu(K) \mid K \subseteq E \text{ kompakt}\}$
- (v) Falls $E \in \Sigma$, $\mu(E) = 0$, $A \subseteq E$ dann gilt $A \in \Sigma$.

Außerdem ist μ durch diese Eigenschaften eindeutig bestimmt.

□ (ohne Beweis)

Bemerkung

- a) (iii) und (iv): μ ist **reguläres Borelmaß** (von außen und von innen regulär)
- (v): μ ist "vollständig", d.h. Teilmengen von Nullmengen sind wieder Nullmengen.
- b) Der Satz erlaubt es, das Lebesgue-Maß/Integral aus dem Regelintegral für stetige Funktionen mit kompaktem Träger zu gewinnen.

10 Ausblick


lokalkompakte Gruppen: $\leadsto \exists$ (links)invariantes reguläres Borelmaß λ . $\lambda(g \cdot E) = \lambda(E) \leadsto L^1(G, \lambda)$.
Faltung \leadsto Fourieranalysis

Dynamische Systeme: X topologischer Raum, $\alpha : X \rightarrow X$ bijektiv, stetig Borel. Existenz von invarianten Borelmaßen? \leadsto Ergodentheorie.

Mannigfaltigkeiten: $M = \bigcup_{i \in I} U_i$ wo $U_i \approx \mathbb{R}^n$

Räume von Funktionen und Abbildungen zwischen ihnen $L^2(\mu) := \left\{ f : X \rightarrow \mathbb{R} \mid \int |f|^2 d\mu < \infty \right\}$ Skalarprodukt auf $L^2 \leadsto$ Hilbertraum, unendlich dimensionaler euklidischer Vektorraum.

Index

Die **Seitenzahlen** sind mit **Hyperlinks** zu den entsprechenden Seiten versehen, also anklickbar 

abzählbar additiv, 52
affine Transformation, 47

Bewegungsinvarianz, 48
Borel-messbar, 50

Diffeomorphismus, 45
Differentialgleichung
 n -ter Ordnung, 1
 1. Ordnung, 1
 homogene, lineare, 8
 mit konstanten Koeffizienten, 8
 System von n , 1

einfache Funktion, 51
Euler'sche Betafunktion, 43

fast überall, 24

Gammafunktion, 40

Halbnorm, 14
Hausdorff, 54

Integral
 einer Treppenfunktion, 12

kompakter Träger, 46

L^1 -Halbnorm, 14
Lebesgue integrierbar, 18
Lebesgue-Maß, 34, 53
Lebesgue-messbar, 23
Lebesgue-Nullmenge, 24
lokal integrierbar, 36
lokalkompakt, 54

Maß, 52
Maßraum, 52
messbare Abbildung, 49
messbare Mengen, 49
messbarer Raum, 49

offen, 49

Parallelotop, 28
Prinzip von Cavalieri, 24

Quader, 12

reguläres Borelmaß, 55
rotationssymmetrische Funktion, 48

σ -Algebra, 49
 der Borelmengen, 50
 erzeugte, 49
 σ -kompakt, 36
Standardsimplex, 44

Topologie, 49
topologischer Raum, 49
 Stetigkeit, 49
Treppe, 14
Treppenfunktion, 12
triviale Fortsetzung, 19

Volumen, 12

Wahrscheinlichkeitsraum, 52

Zählmaß, 52

Abbildungsverzeichnis

1	Zerteilung von f in f_+ und f_-	19
2	Prinzip von Cavalieri	25
3	Veranschaulichung der Beweisstrategie von 8.1	45