

Vorlesungsmitschrift

DIFF II

Prof. Dr. Dorothea Bahns

Henry Ruben Fischer

Auf dem Stand vom 30. Juli 2020

Disclaimer

Nicht von Professor Bahns durchgesehene Mitschrift, keine Garantie auf Richtigkeit ihrerseits.

Inhaltsverzeichnis

1. Metrische Räume	6
1.I. Charakterisierung topologischer Grundbegriffe in metrischen Räumen	17
1.II. Vollständigkeit	19
1.III. Betrachtungen in vollständigen metrischen Räumen	21
1.IV. Stetige Abbildungen auf metrischen Räumen	27
1.V. Kompaktheit	30
1.VI. Äquivalenz von Metriken	36
2. Normierte Vektorräume	38
2.I. Stetige Abbildungen in normierten Vektorräumen	44
2.I.1. Lineare Abbildungen	44
2.II. Vektorräume mit Skalarprodukt	49
3. Differenzierbarkeit in \mathbb{R}^n	55
3.I. Geometrische Anschauung, partielle Ableitung	59
3.II. Beispiele und Erläuterungen	63
3.III. Implizite Funktionen	72
3.IV. Der Satz von der Umkehrabbildung	81
3.V. Lokale Extrema unter Nebenbedingungen	88
3.VI. Höhere Ableitungen, Taylorformel	92
3.VII. Der Laplace-Operator	95
3.VIII. Taylor-Formel, lokale Extrema	100
3.IX. Lokale Extrema	103
4. Untermannigfaltigkeiten des \mathbb{R}^n	109
4.I. Tangential- und Normalraum	130
4.II. Flächenbemessung auf Untermannigfaltigkeiten	138
5. Differentialgleichungen	143
5.I. Geometrische Interpretation	143
5.II. Existenz- und Eindeutigkeitssatz	145
5.III. Lineare Differentialgleichungen	160
5.IV. Lineare DGL-Systeme mit konstanten Koeffizienten	172

Inhaltsverzeichnis

6. Lebesgue-Integration	182
6.I. Etwas Maßtheorie	190
6.II. Weitere Folgerungen	192
6.III. Messbare Funktionen	196
6.IV. Zum Verhältnis von Lebesgue- / Riemann-Integral	197
6.V. Produkt-Maße	200
6.VI. Der Transformationssatz	207
7. Integration auf Untermannigfaltigkeiten	214
7.I. Der Integralsatz von Gauß	220
7.II. Tensorkalkül und Differentialformen	228
7.III. Zusammenhang zu Integration auf Untermannigfaltigkeiten	233
Definitionen	240
Wichtige Sätze	242

Vorlesungsverzeichnis

1.	Mo 20.04. 10:15	6
2.	Do 23.04. 10:15	16
3.	Mo 27.04. 10:15	25
4.	Do 30.04. 10:15	36
5.	Mo 04.05. 10:15	44
6.	Do 07.05. 10:15	55
7.	Mo 11.05. 10:15	63
8.	Do 14.05. 10:15	74
9.	Mo 17.05. 10:15	80
10.	Do 21.05. 10:15	88
11.	Mo 25.05. 10:15	100
12.	Do 28.05. 10:15	109
13.	Do 04.06. 10:15	122
14.	Mo 08.06. 10:15	130
15.	Do 11.06. 10:15	143
16.	Mo 15.06. 10:15	153
17.	Do 18.06. 10:15	162
18.	Mo 15.06. 10:15	171
19.	Do 25.10. 10:15	182
20.	Mo 29.06. 10:15	190
21.	Do 02.07. 10:15	199
22.	Mo 06.07. 10:15	207
23.	Do 09.07. 10:15	214
24.	Mo 13.07. 10:15	223
25.	Do 16.07. 10:15	231

Kapitel 1.

Metrische Räume

Vorlesung 1

Mo 20.04. 10:15

Ziel. Konvergenz, Stetigkeit ... sollten in einem allgemeineren Rahmen konzeptualisiert werden.

Erinnerung (DIFF I). Eine Folge $(a_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{R}$ konvergiert gegen den Grenzwert a

$$\iff \forall \varepsilon > 0 \ \exists N \in \mathbb{N} \text{ s. d. } |a_n - a| < \varepsilon \ \forall n \geq N$$

$(a - \varepsilon, a + \varepsilon)$ wird auch ε -Umgebung von a in \mathbb{R} genannt. Somit lautet die obige Definition in Worten: In jeder noch so kleinen ε -Umgebung von a befinden sich alle bis auf endlich viele Folgenglieder.

Man benötigt für die Formulierung der Definition also lediglich einen Begriff von „(kleine) Umgebung“. Diesen Begriff möchten wir nun verallgemeinern.

Definition 1.1. Sei X eine Menge. Ein System \mathcal{T} von Teilmengen von X heißt Topologie auf X falls gilt:

- $\emptyset, X \in \mathcal{T}$.
- Sind U und $V \in \mathcal{T}$, so gilt $U \cap V \in \mathcal{T}$.
- Ist I eine Indexmenge und $U_i \in \mathcal{T}$ für alle $i \in I$, so gilt auch $\bigcup_{i \in I} U_i \in \mathcal{T}$.

Notation. Ein topologischer Raum ist ein Tupel (X, \mathcal{T}) , wobei X Menge ist und \mathcal{T} eine Topologie auf X .

Eine Teilmenge $U \subset X$ heißt *offen*, falls gilt $U \in \mathcal{T}$. Eine Teilmenge $A \subset X$ heißt *abgeschlossen* falls ihr Komplement $X \setminus A$ offen ist.

Beispiele 1.2. i) $X = \text{beliebige Menge. } \mathcal{T} = \{ \emptyset, X \}$.

Beweis. 1.1.a) klar

1.1.b) $\emptyset \cap X = \emptyset \in \mathcal{T}$, $X \cap X = X \in \mathcal{T}$, $\emptyset \cap \emptyset = \emptyset \in \mathcal{T}$

1.1.c) $\bigcup_{i \in I} U_i = \begin{cases} X & \text{falls eins der } U_i = X \text{ ist} \\ \emptyset & \text{falls nicht} \end{cases}$ \square

„Klumpentopologie“

ii) $X = \mathbb{R}$

\mathcal{T} = alle Teilmengen $U \subset \mathbb{R}$ mit der Eigenschaft:

$$\forall x \in U \quad \exists \varepsilon > 0 \text{ s. d. } (x - \varepsilon, x + \varepsilon) \subset U$$

Beweis von 1.1.a), 1.1.b) und 1.1.c) als HA (etwas allgemeiner). Hier stellen wir fest, dass insbesondere die offenen Intervalle (a, b) in diesem Sinne offen (also $\in \mathcal{T}$) sind, halb-abgeschlossene und abgeschlossene dagegen nicht.

Beweis. 1. **Beh** Zu $x \in [a, b]$ wähle $\varepsilon = \min\{\{|x - a|, |x - b|\}\}$

2. **Beh** Zu $x = a \in [a, b]$ kann man kein $\varepsilon > 0$ finden s. d. $(a - \varepsilon, a + \varepsilon) \subset [a, b]$, denn $a - \varepsilon/2 \in (a - \varepsilon, a + \varepsilon)$ aber $a - \varepsilon/2 < a$, also $\notin [a, b]$. \square

Abgeschlossene Intervalle sind in diesem Sinn abgeschlossen, denn $\mathbb{R} \setminus [a, b]$ ist nach Definition von \mathcal{T} und Eigenschaft 1.1.c) offen.

Diese Topologie heißt Standard-Topologie auf \mathbb{R} . Wird nichts anderes gesagt, sehen wir \mathbb{R} als mit der Standard-Topologie versehen an.

Definition 1.3. Sei (X, \mathcal{T}) topologischer Raum. Sei $x \in X$. Eine Teilmenge $V \subset X$ heißt *Umgebung von x* , falls es eine offenen Menge $U \subset X$ gibt mit $x \in U$ und $U \subset V$.

Beispiele. i) $V = (a, b)$ ist eine Umgebung für jedes $x \in (a, b)$, aber *nicht* für $x = a$.



ii) $(a - \varepsilon, a + \varepsilon)$, $\varepsilon > 0$, ist eine Umgebung von a .

Lemma 1.4. Eine Teilmenge $V \subset X$ eines topologischen Raumes (X, \mathcal{T}) ist offen gdw für alle $x \in V$ gilt: V ist Umgebung von x .

Beweis. „ \Rightarrow “ Ist V offen, so erfüllt $U = V$ für jedes x die Bedingung $x \in U$ und $U \subset V \Rightarrow V$ ist Umgebung.

„ \Leftarrow “ Zu $x \in V$ wähle U_x s.d. $x \in U_x$, $U \subset V$. Dann gilt $V = \bigcup_{x \in U} U_x$ und das ist offen (nach 1.1.c)). \square

Definition 1.5 (Konvergenz in topologischen Räumen). Sei (X, \mathcal{T}) topologischer Raum. Sei $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge in X . Dann ist $(x_n)_n$ konvergent mit Grenzwert x , $x_n \rightarrow x$ in (X, \mathcal{T}) , falls es in jeder Umgebung V von x ein $N \in \mathbb{N}$ gibt, s.d. $x_n \in V \quad \forall n \geq N$.

Beispiele. i) In der Klumpentopologie konvergieren alle Folgen gegen jedes $x \in X$.

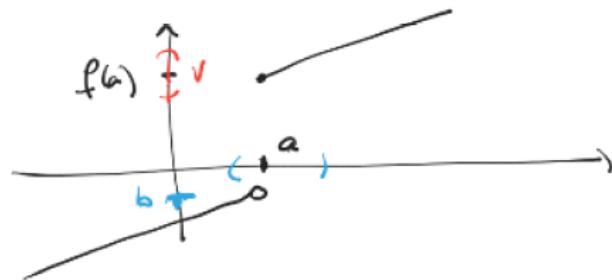
ii) Mit unseren obigen Überlegungen folgern wir, dass Konvergenz in \mathbb{R} im Sinn von Definition 1.5 mit Konvergenz, wie wir sie in der DIFF I kennengelernt haben.

Lemma 1.6. Sei (X, \mathcal{T}) topologischer Raum. Ist (X, \mathcal{T}) ein Hausdorff-Raum, gibt es also zu je zwei Punkten $x, y \in X$ mit $x \neq y$ Umgebungen U von x und V von y mit $U \cap V = \emptyset$, so ist der Grenzwert einer konvergenten Folge eindeutig.

Beweis. Seien x und y Grenzwert einer Folge $(x_n)_n$. Angenommen $x \neq y$, so wähle U Umgebung von x , V Umgebung von y mit $U \cap V = \emptyset$. Dann gibt es (wegen der Konvergenz) $N \in \mathbb{N}$ s.d. $x_n \in U \quad \forall n \geq N$ und $M \in \mathbb{N}$ s.d. $x_n \in V \quad \forall n \geq M$. Widerspruch zu $U \cap V = \emptyset$. \square

Definition 1.7. Seien (X, \mathcal{T}) und $(Y, \tilde{\mathcal{T}})$ topologische Räume. Sei $f: X \rightarrow Y$ eine Abbildung. Dann heißt f stetig in $a \in X$, falls es zu jeder Umgebung V von $f(a) \in Y$ eine Umgebung U von a gibt, s.d. $f(U) \subset V$. f heißt stetig (auf X), falls f stetig in allen $a \in X$ ist.

Bemerkung. Wir werden später sehen, dass diese Definition für $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit unserer Definition aus der DIFF I übereinstimmt (ε - δ -Kriterium).



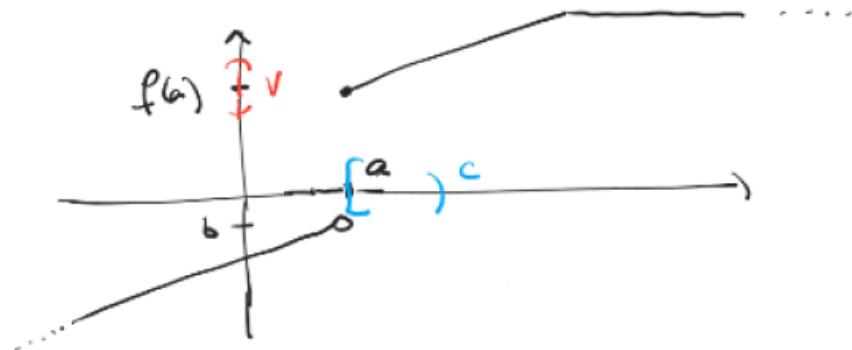
Für jede Umgebung U von a gilt: $f(U)$ enthält auch Punkte $< b$, also außerhalb V

Satz 1.8. Sei $f: X \rightarrow Y$ Abbildung zwischen topologischen Räumen. Dann ist f stetig auf X gdw für jede offene Teilmenge $V \subset Y$ das Urbild $f^{-1}(V)$, also $\{x \in X \mid f(x) \in V\}$ offen in X ist.

Beweis. „ \Rightarrow “ Sei f stetig vorausgesetzt. Sei V offen in Y . Ist das Urbild $f^{-1}(V)$ leer, sind wir fertig.

Sei also $a \in f^{-1}(V)$. Dann gibt es nach Voraussetzung eine Umgebung U von a s.d. $f(U) \subset V$. Also gilt $U \subset f^{-1}(V)$. Somit besitzt also jeder Punkt $a \in f^{-1}(V)$ eine Umgebung U mit $U \subset f^{-1}(V)$ und somit ist $f^{-1}(V)$ selbst Umgebung jedes seiner Elemente $\stackrel{1.4}{\Rightarrow} f^{-1}(V)$ ist offen.

„ \Leftarrow “ Sei $a \in X$ beliebig. Sei V eine Umgebung von $f(a)$. Dann gibt es \tilde{V} offen mit $f(a) \in \tilde{V}$ und $\tilde{V} \subset V$. Nach Voraussetzung ist das Urbild $U := f^{-1}(\tilde{V})$ offen. U enthält a , ist also Umgebung von a und es gilt $f(U) = \tilde{V} \subset V \Rightarrow f$ ist stetig in a . \square



$$f^{-1}(V) = [a, c) \text{ ist nicht offen in } \mathbb{R}$$

Bemerkung. Äquivalent: f ist genau dann stetig, wenn das Bild jeder abgeschlossenen Menge abgeschlossen ist.

Vorsicht:

Es ist immer Offenheit in X (bzw. Y) gemeint!

Zur Veranschaulichung:

Betrachtet man im Beispiel oben als Definitionsbereich $X = [a, \infty)$, so ist die Funktion stetig! Dies ist konsistent, da $[a, c)$ in $X = [a, \infty)$ versehen mit der Standard-Topologie tatsächlich offen ist:

Definition / Satz 1.9. Sei (X, \mathcal{T}) topologischer Raum. Sei $\tilde{X} \subset X$ eine Teilmenge. Dann induziert \mathcal{T} auf \tilde{X} eine Topologie, die sogenannte *Teilraum-Topologie* vermöge

$$\mathcal{T}_{\tilde{X}} := \{ U \cap \tilde{X} \mid U \in \mathcal{T} \}.$$

Den (einfachen) Beweis, dass dies in der Tat eine Topologie definiert, lassen wir weg.

In unserem Beispiel ist $X = \mathbb{R}$, $\tilde{X} = [a, \infty)$ und da $(a - \varepsilon, c)$ offen in \mathbb{R} ist ($\varepsilon > 0$), ist nach Definitionsbereich $[a, c) = (a - \varepsilon, c) \cap [a, \infty)$ offen in $[a, \infty)$.

Dies ist der tiefere Grund, weshalb man bei Funktionen den Raum, in dem sie ihre Werte annehmen (im Beispiel oben $Y = \mathbb{R}$) angeben sollte, nicht ihr Bild.

Denn in $Y = (-\infty, b) \cup [f(a), \infty)$ wäre das Bild von $[a - \varepsilon, c] \forall \varepsilon > 0$ in der Tat abgeschlossen, denn sein Komplement

$$Y \setminus ([b - \delta, b) \cup [f(a), f(c)]) = -(-\infty, b - \delta) \cup (f(c), \infty)$$

wäre offen.

Dagegen ist

$$\mathbb{R} \setminus ([b - \delta, b) \cup [f(a), f(c)]) = -(-\infty, b - \delta) \cup [b, f(a)] \cup (f(c), \infty)$$

für kein $\delta > 0$ offen.

Definition / Satz 1.10. Seien (X, \mathcal{T}_X) und (Y, \mathcal{T}_Y) topologische Räume. Betrachte das *kartesische Produkt* $X \times Y = \{ (x, y) \mid x \in X, y \in Y \}$. Dann nennt man das System

$$\mathcal{T} := \left\{ U \subset X \times Y \mid \begin{array}{l} U = \text{beliebige Vereinigung von Mengen der Form} \\ V \times W, V \in \mathcal{T}_X, W \in \mathcal{T}_Y \end{array} \right\}$$

Produkttopologie. Und dies definiert in der Tat eine Topologie auf $X \times Y$.

Beweis. 1.1.a) klar

1.1.b)

$$\begin{aligned} U &= \bigcup_{\alpha} U_{\alpha} \times W_{\alpha} \\ V &= \bigcup_{\beta} \tilde{V}_{\beta} \times \tilde{W}_{\beta} \\ U \cap V &= \bigcup_{\alpha, \beta} \underbrace{(V_{\alpha} \cap \tilde{V}_{\beta})}_{\text{offen in } X} \times \underbrace{(W_{\alpha} \cap \tilde{W}_{\beta})}_{\text{offen in } Y}. \end{aligned}$$

1.1.c)

$$\bigcup_{\rho} \left(\bigcup_{\alpha} V_{\alpha}^{(\rho)} \times W_{\alpha}^{(\rho)} \right) = \bigcup_{\rho, \alpha} V_{\alpha}^{(\rho)} \times W_{\alpha}^{(\rho)}. \quad \square$$

Wir kommen nun zu einer wichtigen Beispiel-Klasse für Topologien:

Definition 1.11. Sei X eine Menge. Eine *Metrik* auf X ist eine Abbildung

$$d: X \times X \rightarrow \mathbb{R}$$

mit den Eigenschaften

- a) $d(x, y) = 0 \iff x = y$ „ d ist nicht ausgeartet.“
- b) $d(x, y) = d(y, x) \quad \forall x, y \in X$ „ d ist symmetrisch.“
- c) $d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y) \quad \forall x, y, z \in X$ „Es gilt die Dreiecksungleichung.“

Ein *metrischer Raum* ist ein Tupel (X, d) , wobei X eine Menge ist und d eine Metrik auf X . Meist schreibt man nur X , weil Missverständnisse ausgeschlossen sind.

Bemerkung. Aus den Axiomen folgt auch

$$d(x, y) \geq 0 \quad \forall x, y \in X,$$

denn

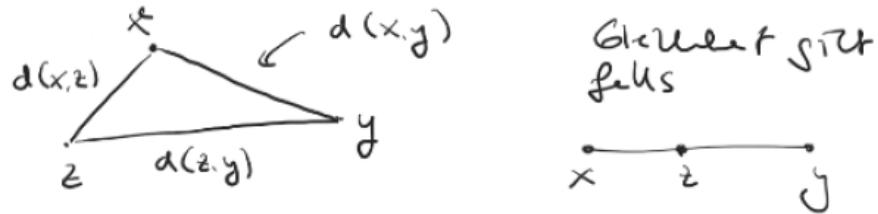
$$0 = d(x, x) \stackrel{\substack{\uparrow \\ 1.11.a)}{\leq} d(x, y) + d(y, x) = \stackrel{\substack{\uparrow \\ \triangle\text{-Ungl.}}}{2d(x, y)} \stackrel{\substack{\uparrow \\ \text{Symm.}}}{= 2d(x, y).$$

Beispiele. i) $\mathbb{R}, d(x, y) = |x - y|$.

ii) X Menge, $d(x, y) = \begin{cases} 1 & x \neq y \\ 0 & x = y \end{cases}$, „triviale“ oder „diskrete Metrik“.

iii) (aus AGLA I) \mathbb{R}^n , $d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$, „Euklidische Metrik“.

Eine Metrik misst den *Abstand* zwischen zwei Punkten. Im zweiten Beispiel sind alle verschiedenen Punkte gleich weit von einander entfernt. Für $n = 1$ stimmt iii) mit i) überein. Mit iii) wird auch der Name der Dreiecksungleichung klar:



Definition 1.12. Sei (X, d) ein metrischer Raum. Seien $x \in X$, $\varepsilon > 0$. Dann nennt man

$$B_\varepsilon(x) := \{ y \in X \mid d(x, y) < \varepsilon \}$$

den (offenen) ε -Ball um x .

Beispiele. i) $B_\varepsilon(x) = (x - \varepsilon, x + \varepsilon)$.

$$\text{ii)} \quad B_\varepsilon(x) = \begin{cases} x & \varepsilon \leq 1 \\ X & \varepsilon > 1 \end{cases}$$

$$\text{iii)} \quad B_\varepsilon(x) = \text{ (Diagramm eines Kreises mit gestrichelter Linie und Kreuzlinien im Inneren)}$$

Satz 1.13. Sei (X, d) ein metrischer Raum. Dann wird durch

$$\mathcal{T}_d := \{ U \subset X \mid \forall x \in U \ \exists \varepsilon > 0 \text{ s.d. } B_\varepsilon(x) \subset U \}$$

eine Topologie definiert.

Beweis. Als Hausaufgabe. □

Bemerkungen 1.14. i) 1.2.ii) ist ein Spezialfall dieser Aussage

ii) Die „offenen“ ε -Bälle sind tatsächlich offen: Zu $y \in B_\varepsilon(x)$ wähle $\tilde{\varepsilon} := \varepsilon - d(x, y) > 0$.



Dann ist $B_{\tilde{\varepsilon}}(y) = \{ z \mid d(y, z) < \tilde{\varepsilon} \} \subset B_\varepsilon(x)$. Denn für alle $z \in B_{\tilde{\varepsilon}}(y)$ ist

$$\begin{aligned} d(x, z) &\leq d(x, y) + d(y, z) < d(x, y) + \tilde{\varepsilon} \\ &= d(x, y) + \varepsilon - d(x, y) = \varepsilon \end{aligned}$$

- iii) Bezuglich der diskreten Metrik ist jede Teilmenge offen.
- iv) Die Klumpentopologie wird nicht von einer Metrik erzeugt (wenn X mehr als 1 Element enthält).

Beweis. Seien $x, y \in X$, $x \neq y$. Angenommen \exists Metrik d .

$$\begin{aligned} \implies d(x, y) &\neq 0 \implies d(x, y) = c > 0 \\ \implies B_c(x) &\text{ ist offen.} \\ \implies B_c(x) &= \emptyset \text{ oder } = X \\ \implies B_c(x) &= X \end{aligned}$$

□

↳ , da $y \notin B_c(x)$.

- v) Ein metrischer Raum ist hausdorffsch. → HA.

Wir formulieren nun Konvergenz und Stetigkeit für metrische Räume:

Bemerkungen 1.15. Sei (X, d) metrischer Raum.

Definition 1.3 $V \subset X$ heißt Umgebung von $x \in X$, falls es $\varepsilon > 0$ gibt s. d. $B_\varepsilon(x) \subset V$.

Definition 1.5 $(x_n)_n$ konvergiert mit Grenzwert x , falls es zu jedem $\varepsilon > 0$ ein $N \in \mathbb{N}$ gibt s. d. $x_n \in B_\varepsilon(x) \quad \forall n \geq N$.

Definition 1.7 Sei (Y, \tilde{d}) weiterer metrischer Raum, $f: X \rightarrow Y$ eine Abbildung. Dann ist f stetig a gdw :

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta > 0 \text{ s. d. } f(B_\delta(a)) \subset B_\varepsilon(f(a)).$$

Bemerkungen. i) 1.15 ist das ε - δ -Kriterium.

ii) Die Einschränkung auf ε -Bälle in 1.15 und 1.15 (statt allgemeiner Umgebungen) ist keine echte Einschränkung: Gilt etwas für all Umgebungen, so speziell auch für ε -Bälle.

Und gilt eine Inklusion für alle ε -Bälle (etwa $x_n \in B_\varepsilon(x) \quad \forall n \geq N(\varepsilon)$), so auch für beliebige Umgebungen U von x , da es immer einen ε -Ball $B_\varepsilon(x)$ gibt, der ganz in U enthalten ist.

Beispiele 1.16. i) \mathbb{R}^m mit der Euklidischen Metrik. $(x_n)_{n \geq 1}$ Folge in \mathbb{R}^m , also $n \mapsto x_n = (x_n^{(1)}, \dots, x_n^{(m)}) \in \mathbb{R}^m$.

$$\text{ii) } x_n = \left(\frac{1}{n} \cos(n), \frac{1}{n} \sin(n), a, \dots, a \right)$$

Behauptung. $x_n \rightarrow (0, 0, a, \dots, a) =: x$.

Beweis. Sei $\varepsilon > 0$. Es gilt

$$\begin{aligned} d(x_n, x)^2 &= \sum_{i=1}^m (x_n^{(i)} - x^{(i)})^2 \\ &= \left(\frac{1}{n} \cos(n) - 0 \right)^2 + \left(\frac{1}{n} \sin(n) - 0 \right)^2 + (a - a)^2 + \dots + (a - a)^2 \\ &= \frac{1}{n^2} (\cos(n)^2 + \sin(n)^2) = \frac{1}{n^2} \\ \implies d(x_n, x) &= \frac{1}{n} \\ \implies d(x_n, x) < \varepsilon &\quad \forall n \geq N \text{ mit } N > \frac{1}{\varepsilon} \\ \implies x_n &\in B_\varepsilon(x) \quad \forall n \geq N. \end{aligned}$$

□

$$\text{iii) } X = C([a, b]), d(f, g) := \|f - g\|_\infty \text{ mit } \|f - g\|_\infty = \sup_{x \in [a, b]} |f(x) - g(x)|.$$

1. Beh d ist eine Metrik auf X .

Beweis. 1.11.a):

$$\begin{aligned} \sup_{x \in [a, b]} |f(x) - g(x)| &= 0 \\ \iff |f(x) - g(x)| &= 0 \quad \forall x \\ \iff f(x) &= g(x) \quad \forall x. \end{aligned}$$

1.11.b):

$$\begin{aligned} |f(x) - g(x)| &= |g(x) - f(x)| \quad \forall x \\ \implies d(f, g) &= d(g, f). \end{aligned}$$

1.11.c):

$$\begin{aligned} |f(x) - g(x)| &= |f(x) - h(x) + h(x) - g(x)| \\ &\leq |f(x) - h(x)| + |h(x) - g(x)| \\ &\quad \uparrow \text{\triangle-Ungl. für $|\cdot|$ auf \mathbb{R}} \\ \implies \triangle\text{-Ungl. für } d. & \end{aligned}$$

□

2. Beh $(f_n)_n \subset C([0, 1])$, $f_n(x) = x^n$, konvergiert nicht (vgl. DIFF I).

Beweis. Wir wissen aus der DIFF I, dass wenn Konvergenz vorliegt, der Grenzwert gleich dem punktweisen Grenzwert ist. Dieser ist

$$f(x) = \begin{cases} 1 & x = 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}.$$

Aber

$$\sup_{x \in [0, 1]} |f_n(x) - f(x)| = \sup_{x \in [0, 1]} |x^n| = 1.$$

□

iv) $X = C([0, 1])$, $d(f, g) = \int_0^1 |f(x) - g(x)| dx$.

1. Beh d ist eine Metrik auf $C([0, 1])$.

Beweis. HA.

□

2. Beh $(f_n)_n \subset C([0, 1])$, $f_n(x) = x^n$ konvergiert, und zwar gegen $f(x) = 0 \quad \forall x$.

Beweis.

$$\int_0^1 |f_n(x) - 0| dx \implies d(f_n, f) = \frac{1}{n+1} < \varepsilon \quad \forall n \geq N \text{ mit } N \geq \frac{1}{\varepsilon}. \quad \square$$

sie

Vorlesung 2

Do 23.04. 10:15

Bevor wir uns mit offenen und abgeschlossenen Mengen und sogenannten vollständigen metrischen Räumen näher befassen, beweisen wir noch zwei nützliche Lemmata zu Konvergenz und Stetigkeit:

Lemma 1.17. (X, d) sei metrischer Raum.

Eine Folge $(x_n)_n$ in X konvergiert in X gegen $a \in X$

$$\iff (d(x_n, a))_n \text{ ist Nullfolge (in } \mathbb{R}).$$

Beweis.

$$d(x_n, a) = |d(x_n, a) - 0|.$$

Also ist

$$d(x_n, a) < \varepsilon \iff |d(x_n, a) - 0| < \varepsilon. \quad \square$$

Lemma 1.18. Seien (X, d_x) und (Y, d_y) metrische Räume, $f: X \rightarrow Y$ eine Abbildung. Dann gilt:

f ist in $a \in X$ stetig \iff für jede Folge $(a_n)_n$ mit $a_n \rightarrow a$ in X gilt

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f(a_n) = f(\underbrace{\lim_{n \rightarrow \infty} a_n}_{=a}).$$

Notation.

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x) = f(a).$$

Beweis. „ \implies “ Sei das ε - δ -Kriterium erfüllt (1.15). Sei $(x_n)_n$ Folge in X mit $x_n \rightarrow a$ in X . Sei $\varepsilon > 0$. Dann $\exists \delta > 0$ s. d.

$$d_Y(f(x), f(a)) < \varepsilon \quad \forall x \in B_\delta(a) \subset X.$$

Wegen der Konvergenz $\exists N = N(\delta)$ s. d.

$$\begin{aligned} x_n &\in B_\delta(a) \quad \forall n \geq N \\ \implies f(x_n) &\in B_\varepsilon(f(a)) \subset Y \quad \forall n \geq N. \end{aligned}$$

Also gilt $f(x_n) \rightarrow f(a)$.

„ \Leftarrow “ Gelte $\lim_{x \rightarrow a}(x) = f(a)$.

Angenommen, das ε - δ -Kriterium wäre verletzt. Dann gäbe es $\varepsilon > 0$ s. d. für alle $\delta > 0$ ein $x \in X$ existierte s. d.

$$\begin{aligned} x \in B_\delta(a) \text{ aber } f(x) \notin B_\varepsilon(f(a)) \\ \text{also } d_y(f(x), f(a)) \geq \varepsilon. \end{aligned}$$

Insbesondere gäbe es zu $\delta = \frac{1}{n}$ ein solches x , nennen wir es x_n . Dann gilt für alle n : $d(x_n, a) < \frac{1}{n}$, aber $d_y(f(x_n), f(a)) \geq \varepsilon$, somit $x_n \rightarrow a$ aber $f(x_n) \not\rightarrow f(a)$ (wegen 1.17). \square

1.I. Charakterisierung topologischer Grundbegriffe in metrischen Räumen

Lemma 1.19. Sei (X, d) metrischer Raum. Dann ist $A \subset X$ abgeschlossen \iff für jede Folge $(a_n)_n$, $a_n \in A$, die in X konvergiert, gilt:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n \in A.$$

Beweis. O.B.d.A. $\emptyset \neq A \neq X$.

„ \Rightarrow “ Sei $(a_n)_n$, $a_n \in A$, konvergent in X . Sei $a = \lim a_n$. Angenommen $a \notin A$. Nach Voraussetzung ist $X \setminus A$ offen, also ist $X \setminus A$ Umgebung von $a \Rightarrow \exists N$ s. d.

$$a_n \in X \setminus A \quad \forall n \geq N \text{ (wegen Konvergenz)}$$

$\not\rightarrow$ zu $a_n \in A$.

„ \Leftarrow “ Wir zeigen, dass $X \setminus A$ offen ist. Sei also $b \in X \setminus A$. Es gibt $\varepsilon > 0$ s. d. $B_\varepsilon(b) \cap A = \emptyset$, also $B_\varepsilon(b) \subset X \setminus A$.

Denn angenommen es gibt kein solches ε . Dann gilt für alle $\varepsilon > 0$: $B_\varepsilon(b) \cap A \neq \emptyset$, also kann man zu jedem $k \geq 1$ ein $x_k \in A$ finden mit $d(x_k, b) < \frac{1}{k} = \varepsilon$.

$$\Rightarrow x_k = b \underset{\text{VOR}}{\Rightarrow} b \in A.$$

$\not\rightarrow$ Widerspruch zu $b \in X \setminus A$.

Also gibt es ein solches $\varepsilon > 0$, also ist $X \setminus A$ offen. \square

Definition 1.20. Sei (X, d) metrischer Raum, $M \subset X$. Ein Punkt $y \in X$ heißt *Randpunkt* von M , falls in jeder Umgebung von y sowohl Punkte von M als auch $X \setminus M$ liegen.

Notation. $\partial M = \{ \text{Randpunkte von } M \}$

Beispiel $(\mathbb{R}^n, d_{\text{Eucl.}})$. Kugel im \mathbb{R}^m :

$$K^n := \{ x \in \mathbb{R}^n \mid \|x - 0\|_{\text{E}} \leq R \} \subset \mathbb{R}^n$$

Sphäre:

$$\partial K^n = \{ x \in \mathbb{R}^n \mid \|x\|_{\text{E}} = R \} = S^{n-1}$$

Beispiel. $\mathbb{Q} \subset \mathbb{R}$. $\partial \mathbb{Q} = \mathbb{R}$.

Satz 1.21. Sei (X, d) metrischer Raum. Sei $M \subset X$. Dann gilt

- i) $M \setminus \partial M$ ist offen.
- ii) $M \cup \partial M$ ist abgeschlossen.
- iii) ∂M ist abgeschlossen.

Beweis. 1.21.i): $a \in M \setminus \partial M \implies \exists \varepsilon > 0$ s. d. $B_\varepsilon(a) \cap X \setminus M = \emptyset$. Für dieses gilt auch $B_\varepsilon \cap \partial M = \emptyset$ (denn angenommen $\exists y \in B_\varepsilon(a) \cap \partial M$, dann wäre (da $y \in \partial M$ und $B_\varepsilon(a)$ eine Umgebung von y) $B_\varepsilon(a) \cap (X \setminus M) \neq \emptyset$ VOR).

Also gilt $B_\varepsilon(a) \subset M \setminus \partial M \implies$ Beh.

1.21.ii): Es gilt $\partial M = \partial X \setminus M$ (nach Definition), $(X \setminus M) \setminus \partial X \setminus M$ ist offen nach 1.21.i) \implies

$$X \setminus ((X \setminus M) \setminus \partial X \setminus M) = (X \setminus (X \setminus M)) \cup \partial X \setminus M = M \cup \partial M$$

Manipulation mit Mengen

ist offen.



1.21.iii):

$$\begin{aligned}\partial M &= (M \cup \partial M) \setminus (M \setminus \partial M) \\ \implies X \setminus \partial M &= X \setminus \left(\underbrace{M \cup \partial M}_{\substack{\text{(abgeschl. nach 1.21.ii))} \\ \text{offen}}} \right) \cup \left(\underbrace{M \setminus \partial M}_{\substack{\text{offen nach 1.21.i)}} \right).\end{aligned}\quad \square$$

Notation. Sei $M \subset X$.

$M^\circ := M \setminus \partial M$ heißt das *Innere* von M .

$\overline{M} := M \cup \partial M$ heißt der *Abschluss* von M .

Nach 1.19 können wir \overline{M} konstruieren, indem wir zu M noch alle Grenzwerte von Folgen $(x_n)_n$, $x_n \in M$, die in X konvergieren, hinzunehmen.

Beispiel. $M = [a, b)$, $\overline{M} = [a, b]$.

Bemerkung (als Hausaufgabe).

$$M \subset X \text{ offen} \iff M \cap \partial M = \emptyset.$$

$$M \subset X \text{ abgeschlossen} \iff \partial M \subset M.$$

1.II. Vollständigkeit

Definition 1.22. Sei (X, d) ein metrischer Raum. Eine Folge $(y_n)_n \subset X$ heißt *Cauchy-Folge*, falls gilt

$$\forall \varepsilon > 0 \ \exists N \in \mathbb{N} \text{ s. d. } d(y_n, y_m) < \varepsilon \ \forall n, m \geq N.$$

Lemma 1.23. Sei (X, d) ein metrischer Raum. Eine konvergente Folge in X ist eine *Cauchy-Folge*.

Beweis. Sei $(y_n)_n$ konvergente Folge mit Grenzwert y (eindeutig wegen 1.14.v) und 1.6). Sei $\varepsilon > 0$.

Dann gibt es $N \in \mathbb{N}$ s. d. $d(y_m, y) < \varepsilon \ \forall m \geq N$.

$$\implies d(y_n, y_m) \underset{\triangle}{\leq} d(y_n, y) + d(y, y_m) < \varepsilon \ \forall n, m \leq N.\quad \square$$

Bemerkung. Nicht jede Cauchy-Folge konvergiert:

Beispiel $((\mathbb{Q}, |\cdot|))$. $y_{n+1} = \frac{1}{2}y_n + \frac{1}{y_n}$, $y_0 = 1$.

Check. Es gilt für $n \geq 1$

$$\left[\frac{1}{y_{n+1}}, y_{n+1} \right] \subset \left[\frac{1}{y_n}, y_n \right] \quad (*)$$

und für $l_n := y_n - \frac{1}{y_n}$

$$\begin{aligned} l_{n+1} &\leq \frac{1}{4y_{n+1}}l_n^2 \leq \frac{1}{4}l_n^2 \\ \implies d(y_n, y_m) &= |y_n - y_m| \leq |y_n - \frac{1}{y_n}| = l_n \xrightarrow{\text{O.B.d.A. } m \geq n} 0. \\ &\implies y_m \in \left[\frac{1}{y_n}, y_n \right] \text{ wg. } (*) \end{aligned} \quad (**)$$

$\mathbb{Q} \subset \mathbb{R}$ und somit $(y_n)_n \subset \mathbb{R}$. In \mathbb{R} konvergiert jede Cauchy-Folge. Nennen wir den Grenzwert $a \in \mathbb{R}$. Es gilt dann

$$\underbrace{y_{n+1}}_{\xrightarrow{a}} = \underbrace{\frac{1}{2}y_n}_{\frac{1}{2}a} + \underbrace{\frac{1}{y_n}}_{\frac{1}{a}},$$

also $a^2 = 2$. Aber $\sqrt{2} \notin \mathbb{Q}$.

Definition 1.24. Ein metrischer Raum, in dem jede Cauchy-Folge konvergiert heißt *vollständig*.

Beispiele 1.25. i) $\mathbb{R}, |\cdot|$ ist vollständig (DIFF I).

ii) $(C([a, b], \mathbb{R}), d_{L^1})$ mit $d_{L^1}(f, g) = \int_a^b |f(t) - g(t)| dt$ (vgl. HA Blatt 1, A1) ist *nicht* vollständig.

iii) $(C([a, b], \mathbb{R}), d_{\sup})$, mit

$$d_{\sup} = \|f - g\|_{\infty} = \sup_{t \in [a, b]} |f(t) - g(t)|,$$

ist vollständig. Den Beweis führen wir später allgemeiner.

Zunächst einige

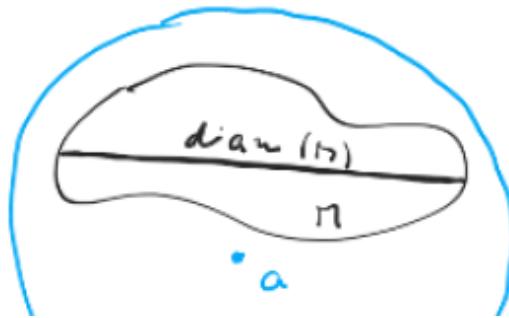
1.III. Betrachtungen in vollständigen metrischen Räumen

Definition 1.26. Sei (X, d) metrischer Raum, $M \subset X$,

$$\text{diam}(M) := \sup_{x, y \in M} d(x, y) \text{ „Durchmesser“ (englisch „diameter“).}$$

M heißt *beschränkt*, falls $\text{diam}(M) < \infty$.

Bemerkung. M ist beschränkt $\iff \exists R \geq 0$ und $a \in X$ s. d. $M \subset B_R(a)$



Beispiel. $\text{diam}([a, b]) = b - a$

Satz 1.27 (Schachtelungsprinzip). Sei (X, d) ein *vollständiger* metrischer Raum und sei $A_0 \subset A_1 \subset A_2 \subset \dots$ Eine Familie nicht-leerer abgeschlossener Teilmengen von X mit

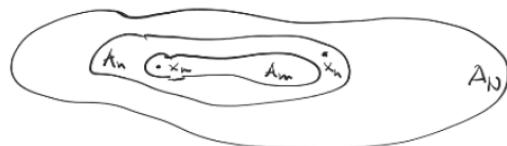
$$\text{diam}(A_k) \rightarrow 0 \text{ (in } \mathbb{R} \text{) für } k \rightarrow \infty.$$

Dann gibt es genau einen Punkt $a \in X$ der in *allen* A_k liegt.

Beweis. Eindeutigkeit: Angenommen $\exists x \neq y$ mit $x \in A_k \quad \forall k$ und $y \in A_k \quad \forall k$. Dann kann $\text{diam}(A_k)$ keine Nullfolge sein, da $d(x, y) \neq 0$.

Existenz: Wähle $x_n \in A_n$. Dann ist $(x_n)_n$ eine Cauchy-Folge, denn

$$d(x_n, x_m) \leq \text{diam } A_N \text{ für } n, m \geq N$$



$$d(x_n, x_m) \leq \text{diam } A_N \text{ für}$$

$$\xrightarrow{\substack{\uparrow \\ \text{Vollständigkeit}}} x_n \rightarrow x \text{ in } X,$$

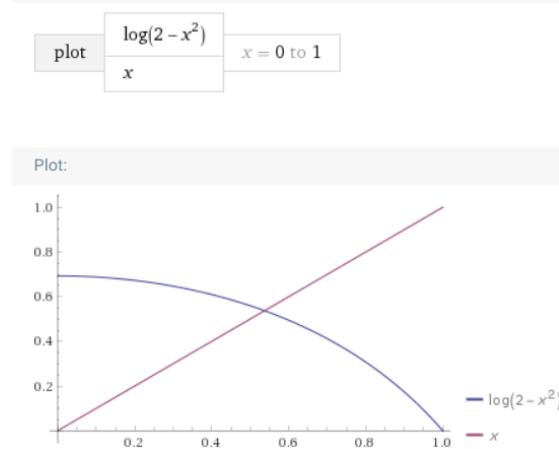
Da $x_n \in A_k \quad \forall n \geq k$, folgt mit 1.19: $x \in A_k \quad \forall k$. \square

Ein sehr wichtiger Satz, der viele Anwendungen hat ist der folgende:

Satz 1.28 (Banach'scher Fixpunktsatz). Sei (X, d_X) ein *vollständiger* metrischer Raum. Sei $M \subset X$ eine *abgeschlossene* Teilmenge und $\Phi: M \rightarrow X$ eine Abbildung mit $\Phi(M) \subset M$ und es gebe $0 \leq L < 1$ s. d.

$$d_X(\Phi(x), \Phi(y)) \leq L d_X(x, y) \quad \forall x, y \in M \quad (\text{„}\Phi\text{ ist Kontraktion“}).$$

Dann gibt es genau ein t_* s. d. $\Phi(t_*) = t_*$. Ein solches t_* heißt *Fixpunkt* von Φ .



$$X = \mathbb{R}, M = [0, 1], \log(2 - x^2), (\text{WolframAlpha})$$

Beispiel.

Beweis. Eindeutigkeit: Seien $\Phi(t_*) = t_*$, $\Phi(\tilde{t}_*) = \tilde{t}_*$. Dann gilt

$$\begin{aligned} d(t_*, \tilde{t}_*) &= d(\Phi(t_*), \Phi(\tilde{t}_*)) \\ &\leq d(t_*, \tilde{t}_*) \end{aligned}$$

Da $L < 1$ ist, folgt $d(t_*, \tilde{t}_*) = 0$, also $t_* = \tilde{t}_*$.

Existenz: Wir betrachten die Folge $x_0 \in M$ beliebig, $x_n := \Phi(x_{n-1})$ für $n \geq 1$.

Behauptung. $(x_n)_n$ konvergiert in M und zwar gegen de Fixpunkt.

Beweis. • $(x_n)_n$ ist Cauchy-Folge:

$$d(x_{n+1}, x_n) \leq L d(x_n, x_{n-1}) \quad \forall n \geq 1.$$

$$\frac{\parallel \Phi(x_n) - \Phi(x_{n-1})}{\parallel \Phi(x_n)}$$

Iteration liefert

$$d(x_{n+1}, x_n) \leq L^2 d(x_{n-1}, x_{n-2}) \leq \dots \leq L^n d(x_1, x_0).$$

Zudem gilt

$$\begin{aligned} d(x_{n+k}, x_n) &\stackrel{\triangle}{\leq} d(x_{n+k}, x_{n+k-1}) \\ &\quad + d(x_{n+k-1}, x_{n+k-2}) \\ &\quad \vdots \\ &\quad + d(x_{n+1}, x_n) \\ &\leq \underbrace{(L^{n+k-1} + L^{n+k-2} + \dots + L^n)}_{= L^n \sum_{r=0}^{k-1} L^r \leq L^n \sum_{r=0}^{\infty} L^r = \frac{L^n}{1-L}} d(x_1, x_0) \\ &\quad \text{geom. Reihe } (L < 1) \end{aligned}$$

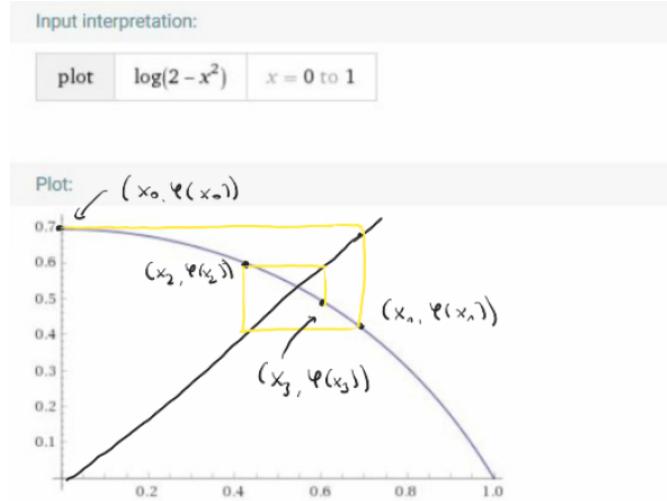
\implies (wegen $L < 1$) Beh.

- Da X vollständig ist, konvergiert $(x_n)_n$. Setze $t_* = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n$.
- Da M abgeschlossen ist, ist $t_* \in M$ nach 1.19.
- t_* ist der gesuchte Fixpunkt:

$$t_* = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \Phi(x_{n-1}) = \Phi(t_*)$$

\square

Kontraktionen sind stetig und 1.18



$$x_0 = 0, x_1 \ln(2 - (\ln 2)^2) \approx 0,42, x_3 \approx 0,60, x_4 \approx 0,49$$

Bemerkung. Kontraktionen sind stetig: Zu $\varepsilon > 0$ wähle $\delta = \varepsilon/L$.

Bemerkung. Die Konvergenz ist recht schnell:

$$d(x_n, t_*) \leq \frac{L^n}{1-L} d(x_1, x_0) \quad (L < 1).$$

Alle Voraussetzungen sind notwendig, gilt eine nicht, so gibt es nicht unbedingt einen Fixpunkt (oder keinen eindeutigen).



Vorlesung 3

Mo 27.04. 10:15

Lemma 1.29 (Cauchy-Kriterium für gleichmäßige Konvergenz).

- a) Sei (X, d_x) metrischer Raum, sei (Y, d_Y) ein *vollständiger* metrischer Raum. Sei $f_n: X \rightarrow Y$ Folge von Funktionen. Dann konvergiert f_n gegen f bezüglich

$$d_{\sup}(h, g) := \sup_{t \in X} \underbrace{d_Y(f(t), g(t))}_{\in \mathbb{R}} \quad h, g: X \rightarrow Y$$

$$\iff \forall \varepsilon > 0 \exists N = N(\varepsilon) \in \mathbb{N} \text{ s.d.}$$

$$d_Y(f_n(t), f_m(t)) < \varepsilon \quad \forall t \in X \quad n, m \geq N(\varepsilon). \quad (*)$$

Notation. Man spricht von *gleichmäßiger Konvergenz*.**Beachte:**

Der wesentliche Punkt in (*) ist, dass N unabhängig von t gewählt werden kann.

Beweis. Wir stellen zunächst fest, dass d_{\sup} auf

$$\mathcal{F} := \{f: X \rightarrow Y \mid \text{Für je zwei Funktionen gilt: } d_{\sup}(f_1, f_2) < \infty\}$$

eine Metrik definiert (auch wenn Y nicht vollständig ist).

1.11.a)

$$\begin{aligned} d_{\sup}(f, g) &= 0 \\ \iff d_Y(f(t), g(t)) &= 0 \quad \forall t \in X \\ \iff f(t) &= g(t) \quad \forall t \in X \\ &\quad \uparrow \\ &\quad d_Y \text{ ist Metrik} \end{aligned}$$

1.11.b)

$$d_{\sup}(f, g) = \sup d_Y(f(t), g(t)) = \sup d_Y(g(t), f(t)) = d_{\sup}(g, f)$$

1.11.c)

$$\begin{aligned} d_{\sup}(f, g) &= \sup \underbrace{d_Y(f(t), g(t))}_{\leq d_Y(f(t), h(t)) + d_Y(h(t), g(t))} \\ &\leq \sup d_Y(f(t), h(t)) + \sup d_Y(h(t), g(t)) \\ &= d_{\sup}(f, h) + d_{\sup}(h, g) \end{aligned}$$

Zum Beweis der Behauptung:

„ \implies “

$$\sup_t d_Y(f_n(t), f(t)) < \varepsilon \quad \forall n \geq N(\varepsilon)$$

impliziert

$$d_Y(f_n(t), f(t)) < \varepsilon \quad \forall t \in X \quad \forall n \geq N(\varepsilon),$$

somit für alle $t \in X$

$$\begin{aligned} d_Y(f_n(t), f_m(t)) &\stackrel{\Delta(d_Y)}{\leq} d_Y(f_n(t), f(t)) + d_Y(f(t), f_m(t)) \\ &< 2\varepsilon \quad \forall n, m \geq N(\varepsilon) \end{aligned}$$

„ \Leftarrow “ Gelte (*). Dann ist für jedes $t \in X$, dass $(f_n(t))_n$ ist Cauchy-Folge in Y .

Vollständigkeit von $Y \implies (f_n(t))_n$ konvergiert. Setze $f(t) := \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(t)$.

Wir zeigen f_n konvergiert bezüglich d_{\sup} gegen f . Sei also $\varepsilon > 0$. Wähle in (*) $m \geq N(\varepsilon)$ fest. Dann gilt für alle t :

$$\begin{aligned} \varepsilon &\geq \lim_{n \rightarrow \infty} d_Y(f_n(t), f_m(t)) \\ &= d_Y(f(t), f_m(t)). \end{aligned}$$

\uparrow
 d_Y ist stetig

Das gilt für alle $m \geq N(\varepsilon)$, $\forall t$, also auch für das Supremum \implies Beh. \square

b) Seien X, Y metrische Räume, $(f_n)_n$ eine Folge *stetiger* Funktionen $f_n: X \rightarrow Y$, die gleichmäßig konvergiere. Dann ist die Grenzfunktion $f: X \rightarrow Y$.

Beweis. Sei $a \in X$. Sei $\varepsilon > 0$. Gleichmäßige Konvergenz $\implies \exists N = N(\varepsilon) \in \mathbb{N}$ s. d.

$$d_Y(f(t), f_n(t)) < \varepsilon \quad \forall t \in X \quad \forall n \geq N$$

f_n stetig in $a \implies \exists \delta > 0$ s. d.

$$\begin{aligned} d_Y(f_N(t), f_N(a)) &< \varepsilon \quad \forall t \text{ mit } d_X(t, a) < \delta \\ \implies d_Y(f(t), f(a)) &\stackrel{\Delta}{\leq} d_Y(f(t), f_N(t)) + d_Y(f_N(t), f_N(a)) + d_Y(f_N(a), f(a)) \quad \square \\ &< 3\varepsilon \quad \forall t \text{ mit } d_X(t, a) < \delta. \end{aligned}$$

Folgerung.

$$(C([a, b], \mathbb{R}), d_{\sup}),$$

Stellt man diese Bedingung, ist automatisch garantiert, dass $d_{\sup}(f_1, f_2) = \sup_{t \in [a, b]} |f_1(t) - f_2(t)| < \infty$

ist vollständig.

Beweis. Sei $(f_n)_n$ Cauchy-Folge in $C(D, \mathbb{R})$ bezüglich d_{\sup} , d. h. zu $\varepsilon > 0 \exists N = N(\varepsilon)$ s. d.

$$\begin{aligned} d_{\sup}(f_n, f_m) &< \varepsilon \quad \forall n, m \geq N(\varepsilon) \\ \implies d_Y(f_n(t), f_m(t)) &= |f_n(t) - f_m(t)| < \varepsilon \quad \forall n, m \geq N(\varepsilon) \quad \forall t \in D. \end{aligned}$$

\mathbb{R} ist vollständig

$\stackrel{1.29}{\implies} (f_n)_n$ konvergiert bezüglich d_{\sup} gegen seinen punktweisen Grenzwert

$$f(t) := \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(t) \quad (\text{Konvergenz in } \mathbb{R})$$

$\stackrel{1.29.b)}{\implies} t \mapsto f(t)$ ist stetig. □

1.IV. Stetige Abbildungen auf metrischen Räumen

Lemma 1.30. Seien X, Y, Z metrische Räume, $f: X \rightarrow Y$, $g: Y \rightarrow Z$, $f(X) \subset Y$. Ist f stetig in $a \in X$ und g stetig in $b = f(a) \in Y$, so ist $g \circ f: X \rightarrow Z$ stetig in a .

Beweis. (Über Folgenstetigkeit, Lemma 1.18) Sei $x_n \rightarrow a \implies \lim f(x_n) = (a) = b$ und $\lim g(f(x_n)) = g(b) = g(f(a)) \implies \lim g \circ f(x_n) = g \circ f(a)$.

Definition 1.31. Auf dem \mathbb{R}^n ist durch

$$d_{\max}(x, y) := \max_{i \in \{1, \dots, n\}} |x_i - y_i|.$$

eine Metrik definiert.

Bemerkungen. i) $d_{\max}(x, y) = d_{\sup}(x, y)$, fasst man x und y als Abbildungen

$$x: \{1, \dots, n\} \rightarrow \mathbb{R}$$

auf, $x(i) = x_i$.

- ii) Eine Folge $(x_m)_m \subset \mathbb{R}^n$, $x_m = (x_m^1, \dots, x_m^n)$ konvergiert bezüglich d_{\max} \iff Alle Komponentenfolgen $(x_m^i)_m$ ($1 \leq i \leq n$) konvergieren in \mathbb{R} .

Beweis. „ \implies “ Zu $\varepsilon > 0 \exists N$ s. d. $\max|x_m^i - a_m^i| < \varepsilon \quad \forall m \geq N$.

„ \impliedby “ Zu $\varepsilon > 0 \exists N_i$ s. d. $|x_m^i - a_m^i| < \varepsilon \quad \forall m \geq N_i$

$$\implies \max_i |x_m^i - a_m^i| < \varepsilon \quad \forall m \geq N = \max\{\{N_1, \dots, N_n\}\}.$$

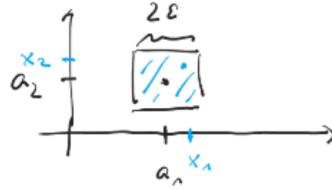
□

- iii) Es folgt: (\mathbb{R}^n, d_{\max}) ist vollständig.

- iv) $B_\varepsilon(a)$ bezüglich dieser Metrik:

$$\left\{ x \in \mathbb{R}^n \mid \max_{i \in \{1, \dots, n\}} |x_i - a_i| < \varepsilon \right\},$$

Würfel mit Seitenlängen 2ε um a .



Lemma 1.32. Sei (X, d) metrischer Raum. Sei \mathbb{R}^n mit d_{\max} versehen. Eine Abbildung $f: X \rightarrow \mathbb{R}^n$, $f = (f_1, \dots, f_n)^T$,

$$f(y) = (f_1(y), \dots, f_n(y))^T \in \mathbb{R}^n, y \in X.$$

$f_i: X \rightarrow \mathbb{R}$, $i \in \{1, \dots, n\}$, „Komponenten-Funktionen“, ist genau dann stetig in $a \in X$, falls alle f_i stetig in a sind.

Beweis. Mit Folgenstetigkeit direkt aus Bemerkung 1.31.ii). Hier nochmals mit ε - δ -Kriterium.

Notation. $\underline{n} = \{1, \dots, n\}$.

„ \implies “ Sei also $f: X \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig in a . Sei $\varepsilon > 0$. Dann $\exists \delta > 0$ s. d.

$$\begin{aligned} & \max_{i \in \underline{n}} |f_i(y) - f_i(a)| < \varepsilon \quad \forall y \in B_\delta(a) \\ & \qquad \qquad \qquad \uparrow \text{bezüglich } d \\ \implies & |f_i(y) - f_i(a)| < \varepsilon \quad \forall y \in B_\delta(a) \quad \forall i \in \underline{n} \\ \implies & f_i \text{ sind stetig in } a. \end{aligned}$$

„ \Leftarrow “ Seien also die $f_i: X \rightarrow \mathbb{R}$, $i \in \underline{n}$, stetig in a . Sei $\varepsilon > 0$. Dann $\exists \delta_i > 0$ s. d.

$$|f_i(y) - f_i(a)| < \varepsilon \quad \forall y \in B_{\delta_i}(a) \subset X.$$

Wähle $d := \min\{\{\delta_1, \dots, \delta_n\}\}$. Dann ist

$$\max_{i \in \underline{n}} |f_i(y) - f_i(a)| < \varepsilon \quad \forall y \in B_d(a).$$

□

Lemma 1.33. Folgende Abbildungen sind stetig:

$$\begin{aligned} \text{add: } \mathbb{R}^2 &\rightarrow \mathbb{R}, \quad \text{add}(x, y) = x + y \\ \text{mult: } \mathbb{R}^2 &\rightarrow \mathbb{R}, \quad \text{mult}(x, y) = x \cdot y \\ \text{quot: } \mathbb{R} \times \underset{\substack{\parallel \\ \mathbb{R} \setminus \{0\}}}{} \mathbb{R}^* &\rightarrow \mathbb{R}, \quad \text{quot}(x, y) = x/y. \end{aligned}$$

Hierbei sei \mathbb{R}^2 , $\mathbb{R} \times \mathbb{R}^*$, mit d_{\max} versehen.

Beweis. Sei $((x_m, y_m))_m \subset \mathbb{R}^2$ mit $(x_m, y_m) \rightarrow (x, y)$ (bezüglich d_{\max})

$$\begin{aligned} &\xrightarrow[\text{Bem 1.31.ii)}]{} x_m \rightarrow x \text{ und } x_m \rightarrow y \text{ in } \mathbb{R} \\ &\implies \lim(x_m + y_m) = x + y \\ &\lim(x_m \cdot y_m) = x \cdot y \\ &\lim(x_m / y_m) = x/y \quad \text{falls } y_m \neq 0, y \neq 0. \end{aligned}$$

□

Folgerung. Sei (X, d) metrischer Raum. Seien $f, g: X \rightarrow \mathbb{R}$ stetig. Dann sind auch

$$\begin{aligned} f + g: X &\rightarrow \mathbb{R}, \quad (f + g)(x) = f(x) + g(x) \text{ und} \\ g \cdot g: X &\rightarrow \mathbb{R}, \quad (g \cdot g)(x) = f(x) \cdot g(x) \end{aligned}$$

stetig. Gilt $g(x) \neq 0 \quad \forall x \in X$, so ist auch

$$f/g: X \rightarrow \mathbb{R}, \quad (f/g)(x) = f(x)/g(x)$$

stetig.

Beweis.

$$1.32 \implies \begin{pmatrix} f \\ g \end{pmatrix}: X \rightarrow \mathbb{R}^2, \quad \begin{pmatrix} f \\ g \end{pmatrix}(x) = \begin{pmatrix} f(x) \\ g(x) \end{pmatrix}$$

ist stetig.

Es ist

$$\begin{aligned} f + g &= \text{add} \circ \begin{pmatrix} f \\ g \end{pmatrix} \\ f + g &= \text{mult} \circ \begin{pmatrix} f \\ g \end{pmatrix} \\ f/g &= \text{quot} \circ \begin{pmatrix} f \\ g \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Mit 1.33 und 1.30 folgt die Behauptung. \square

Beispiel. Polynomische Funktionen $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$

$$x \mapsto \sum_{0 \leq k_i \leq r} c_{k_1 \dots k_n} \underbrace{x_1^{k_1} \dots x_n^{k_n}}_{\in \mathbb{R}}$$

sind stetig.

Bemerkung 1.34. Wir werden später sehen, dass die Aussage in 1.33 auch gilt, wenn man den \mathbb{R}^2 z. B. mit dem Euklidischen Abstand versieht.

1.V. Kompaktheit

Definition 1.35. Sei (X, d) metrischer Raum, $M \subset X$. Eine *offene Überdeckung von M* ist eine Familie $(U_i)_{i \in I}$ von offenen Teilmengen $U_i \subset X$ mit $M \subset \bigcup_{i \in I} U_i$ (I eine beliebige Indexmenge).

Definition 1.36. $M \subset X$ heißt *kompakt*, falls es zu *jeder* offenen Überdeckung von $\bigcup_{i \in I} U_i$ von M *endlich* viele Indizes i_1, \dots, i_N gibt s. d.

$$M \subset U_{i_1} \cup \dots \cup U_{i_N}.$$

Achtung. Ein nicht-kompakter Raum kann eine endliche Überdeckung $U_1 \cup \dots \cup U_N$ besitzen. Die Aussage der Definition ist, dass man aus *jeder* offenen Überdeckung endlich viele offene Mengen wählen kann, die M noch ganz überdecken!

Beispiele 1.37. i) $[a, b]$ ist kompakt (Beweis später).

ii) (a, b) ist nicht kompakt (obwohl etwa (a, b) eine endliche offene Überdeckung ist!)

Beweis.

$$U_j = \left(a + \frac{1}{j}, b \right), \quad j \geq 1$$

$$\bigcup_j U_j = (a, b)$$

aber es gibt *kein* N s. d. $\bigcup_{j=1}^N U_j \supset (a, b)$, denn z. B. $a + \frac{1}{N+1} \notin \bigcup_{j=1}^N U_j$. \square

- iii) Sei $(x_n)_n \subset X$ gegen a konvergente Folge. Dann ist $M = \{x_n \mid n \in \mathbb{N}\} \cup \{a\}$ kompakt.

Beweis. Sei $(U_j)_j$ eine offene Überdeckung von M

$$a \in M \implies \exists j_0 \text{ s. d. } a \in U_{j_0}$$

U_{j_0} ist offen, also eine Umgebung von a .

$$\implies \exists N \text{ s. d. } x_n \in U_{j_0} \quad \forall n \geq N.$$

\square

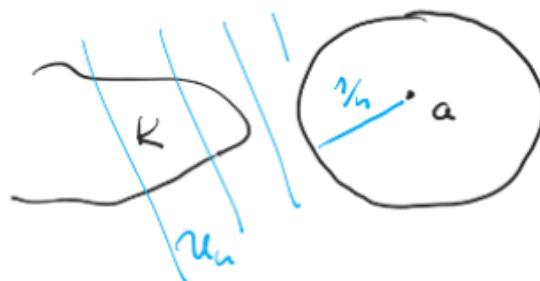
- iv) Sei $(X_i, d_{\text{discrete}})$. Dann sind genau die endlichen Mengen kompakt.

Beweis. Betrachte $\bigcup_{x \in M} \{x\}$. \square

Satz 1.38. Sei (X, d) metrischer Raum, $K \subset X$ kompakt. Dann ist K abgeschlossen und beschränkt.

Beweis. Abgeschlossen: Sei $a \in X \setminus K$. Setze zu $n \geq 1$

$$U_n := \left\{ y \in X \mid d(y, a) > \frac{1}{n} \right\}$$



U_n ist offen (denn $X \setminus U_n = \overline{B_{1/n}(a)}$) und $\bigcup_{n=1}^{\infty} U_n = X \setminus \{a\} \supset K$. K kompakt $\implies \exists U_{n_1}, \dots, U_{n_L}$ s. d. $K \subset U_{n_1} \cup \dots \cup U_{n_L}$. Setze $N := \max\{\{n_1, \dots, n_L\}\}$. Dann ist $B_{\frac{1}{N}}(a) \subset X \setminus K \implies X \setminus K$ ist offen \implies Beh.

Beschränktheit: Sei $a \in X$. Dann ist $X = \bigcup_{n=1}^{\infty} B_n(a)$ und somit $(B_n(a))_n$ eine offene Überdeckung von K .

$$\begin{aligned} &\implies \exists n_1, \dots, n_k \text{ s. d. } K \subset B_{n-1}(a) \cup \dots \cup B_{n_k}(a) \\ &\implies K \subset B_N(a) \text{ für } N = \max\{\{n_1, \dots, n_k\}\} \\ &\implies \text{diam}(K) \leq 2N. \end{aligned} \quad \square$$

Folgerung. Konvergente Folgen sind beschränkt.

Bemerkung. Die Umkehrung von 1.38 gilt im Allgemeinen nicht!

(X, d_{discrete}) , X habe unendlich viele Elemente. Jede Teilmenge ist abgeschlossen (da jede offen ist) und beschränkt (durch 1), aber nur die *endlichen* sind kompakt.

Lemma 1.39. Ist $K \subset X$ kompakt und $A \subset K$ ist abgeschlossen, so ist A kompakt.

Beweis. Sei $(U_j)_j$ offene Überdeckung von A . Es ist

$$\begin{aligned} &(X \setminus A) \cup \underbrace{\bigcup}_{\text{offen (VOR)}} U_j = X \supset K \\ &\implies \exists j_1, \dots, j_L \text{ s. d. } K \subset (X \setminus A) \cup U_{j_1} \cup \dots \cup U_{j_L} \\ &\implies A \subset U_{j_1} \cup \dots \cup U_{j_L}. \end{aligned} \quad \square$$

Satz 1.40. Seien X, Y metrische Räume und $f: X \rightarrow Y$ stetig. Ist $K \subset X$ kompakt, so ist auch $f(K) \subset Y$ kompakt.

Beweis. Sei $(U_j)_j$ offene Überdeckung von $f(K)$. f stetig $\xrightarrow{1.8}$ Die Urbilder $V_j := f^{-1}(U_j)$ sind offen.

Und nach Definition ist $K \subset \bigcup_j V_j$.

$$\begin{aligned} &\xrightarrow{\text{VOR}} \exists j_1, \dots, j_N \text{ s. d. } K \subset V_{j_1} \cup \dots \cup V_{j_N} \\ &\implies f(K) \subset U_{j_1} \cup \dots \cup U_{j_N}. \end{aligned} \quad \square$$

Satz 1.41. Sei \mathfrak{X} kompakter metrischer Raum, $f: \mathfrak{X} \rightarrow \mathbb{R}$ stetig. Dann ist f beschränkt und nimmt ihr Maximum und Minimum an, d. h. $\exists a, b \in \mathfrak{X}$

$$f(a) = \sup\{f(x) \mid x \in \mathfrak{X}\}, \quad f(b) = \inf\{f(x) \mid x \in \mathfrak{X}\}.$$

Beweis. 1.40 $\implies f(\mathfrak{X})$ ist kompakt. Mit 1.38 folgt: $f(\mathfrak{X})$ ist beschränkt (somit ist f beschränkt) und abgeschlossen.

Also sind $\sup(f(\mathfrak{X}))$ und $\inf(f(\mathfrak{X}))$ endlich. Zudem gibt es

$$(y_k)_k \subset f(\mathfrak{X}), \quad y_k \rightarrow \sup(f(\mathfrak{X})) \\ (z_k)_k \subset f(\mathfrak{X}), \quad z_k \rightarrow \inf(f(\mathfrak{X})),$$

somit (Abgeschlossenheit!)

$$\sup(f(\mathfrak{X})) \in f(\mathfrak{X}) \\ \inf(f(\mathfrak{X})) \in f(\mathfrak{X})$$

\implies Beh. □

Beispiel. Sei (\mathfrak{X}, d) metrischer Raum. $M \subset \mathfrak{X}$. Sei $x \in \mathfrak{X}$. Der *Abstand* von x zu M ist definiert als

$$d(x, M) := \inf \{ d(x, y) \mid y \in M \}.$$

Behauptung. $x \mapsto d(x, M)$ ist stetig auf \mathfrak{X} .

Beweis. Sei $\varepsilon > 0$. Dann ist

$$|d(x, M) - d(\tilde{x}, M)| \leq d(x, \tilde{x}) < \varepsilon \quad \text{falls } d(x, \tilde{x}) < \varepsilon,$$

denn

$$d(x, M) \stackrel{\Delta}{\leq} d(x, \tilde{x}) + d(\tilde{x}, M) \quad \forall x, \tilde{x} \in \mathfrak{X}. \quad \square$$

Definiere zu $K \subset \mathfrak{X}$

$$d(K, M) := \inf \{ d(x, M) \mid x \in K \}.$$

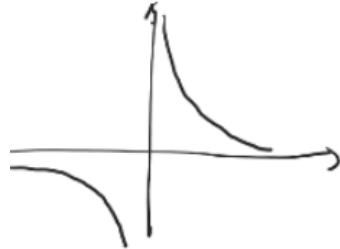
Behauptung. Ist M abgeschlossen, K kompakt und ist $M \cap K = \emptyset$, so gilt $d(M, K) > 0$.

Beweis. $x \mapsto d(x, M)$ ist stetig auf \mathfrak{X} , somit erst recht auf K . K ist kompakt $\stackrel{1.41}{\implies} \exists a \in K$ s. d. $d(a, M) = d(K, M)$. M abgeschlossen $\implies \exists \varepsilon > 0$ s. d. $B_\varepsilon(a) \subset X \setminus M \implies d(a, M) \geq \varepsilon$.

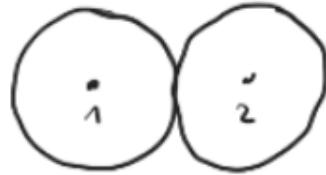
Achtung. i) Betrachte

$$M = \{ (x, y) \mid xy = 0 \} \subset N = \{ (x, y) \mid xy = 1 \} \subset \mathbb{R}^2$$

$$d(M, N) = 0.$$



ii) Betrachte $B_{1/2}(1), B_{1/2}(2) \subset \mathbb{R}^2$, $d_{\text{Euklidisch}}$. Distanz ist 0.



Satz / Definition 1.42. Seien \mathfrak{X}, Y metrische Räume, \mathfrak{X} kompakt. Dann ist jede stetig Abbildung $f: \mathfrak{X} \rightarrow Y$ sogar *gleichmäßig stetig* d. h. im ε - δ -Kriterium kann δ unabhängig von x gewählt werden:

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta > 0 \text{ s. d. } d_Y(f(x), f(\tilde{x})) < \varepsilon \quad \forall x, \tilde{x}, d_{\mathfrak{X}}(x, \tilde{x}) < \delta.$$

Beweis. Sei $\varepsilon > 0$. Dann gibt es zu $a \in \mathfrak{X}$ ein $\delta(a) > 0$ s. d.

$$d_Y(f(a), f(y)) < \varepsilon \quad \forall y \in B_{\delta(a)}(a).$$

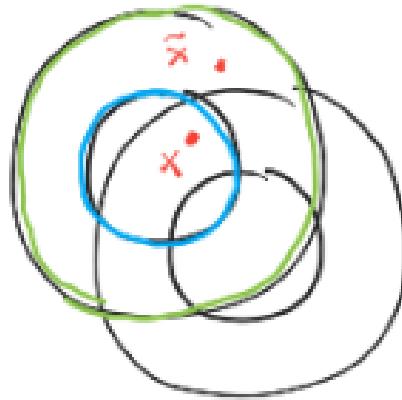
Es gilt $\bigcup_{a \in X} B_{\frac{\delta(a)}{2}}(a) = \mathfrak{X}$.

\mathfrak{X} ist kompakt $\implies \exists a_1, \dots, a_N$ s. d. $X = \bigcup_{j=1}^N B_{\delta(a_j)/2}(a_j)$. Setze

$$\delta := \frac{1}{2} \min\{\{\delta(a_1), \dots, \delta(a_N)\}\}.$$

Seien jetzt x, \tilde{x} beliebig aus \mathfrak{X} mit $d_{\mathfrak{X}}(x, \tilde{x}) < \delta$. Dann gibt es ein $j \in \{1, \dots, N\}$ s.d. $x \in B_{\delta(a_j)/2}$ und somit $\tilde{x} \in B_{\delta(a_j)}(a_j)$

$$\begin{aligned} &\implies d_Y(f(x), f(a_j)) < \varepsilon \quad d_Y(f(\tilde{x}), f(a_j)) < \varepsilon \\ &\implies d_Y(f(x), f(\tilde{x})) < 2\varepsilon \quad \forall x, \tilde{x}, \quad d_{\mathfrak{X}}(x, \tilde{x}) < \delta. \end{aligned} \quad \square$$



Satz 1.43 (Bolzano-Weierstraß). Sei (X, d) metrischer Raum. Sei $K \subset X$ kompakt. Dann besitzt jede Folge $(x_n)_n$ in K eine Teilfolge $(x_{n_k})_k$, die gegen einen Punkt $x \in K$ konvergiert.

Beweis. Angenommen, \nexists Teilfolge, die gegen einen Punkt von K konvergiert. Dann besitzt jedes $x \in K$ eine offene Umgebung U_x , in der nur endlich viele Folgenglieder liegen (sonst könnte man eine gegen x konvergente Teilfolge konstruieren). Es gilt: $\bigcup_{x \in K} U_x \supset K$

$$\implies \exists x_1, \dots, x_N \text{ s.d. } \bigcup_{j=1}^N U_{x_j} \subset K \quad \square$$

Aber dann liegen nur endlich viele x_k in K , \ntriangleleft zur Definition.

Vorlesung 4

Do 30.04. 10:15

1.VI. Äquivalenz von Metriken

Wir haben gesehen, dass die Eigenschaften derselben Menge sehr verschieden sein können, je nachdem mit welcher Topologie man sie versieht.

Beispiel. \mathbb{R} mit der Standardtopologie $|x - y|$:

- $(a, b]$ ist nicht offen, $[a, b]$ ist kompakt.

\mathbb{R} mit der diskreten Metrik d_{disk}

- Alle Teilmengen sind offen.
- Nur endliche Teilmengen sind kompakt.
- Konvergiert $x_n \rightarrow a$ (bezüglich d_{disk}), so muss gelten $\exists N$ s. d. $x_n = a \quad \forall n \geq N$ (denn $\{a\}$ ist Umgebung von a , oder anders gesagt: damit $d(x_n, a) < \varepsilon < 1$ wird, muss gelten $x_n = a$).
- Alle Abbildungen $f: (X, d_{\text{disc}}) \rightarrow (Y, d)$ sind stetig. (Beweis am einfachsten über Folgenstetigkeit).

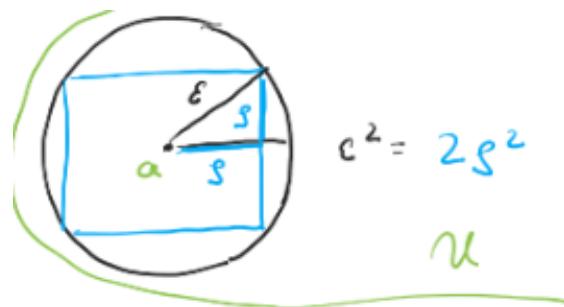
Andererseits gilt:

$U \subset \mathbb{R}^2$ ist offen in $(\mathbb{R}^2, d_{\text{Eucl}}) \iff U$ ist offen in (\mathbb{R}^2, d_{\max}) .

Beweis. „ \implies “ Sei $a \in U \stackrel{\text{VOR}}{\implies} \exists \varepsilon > 0$ s. d.

$$B_\varepsilon^{d_{\text{E}}} (a) := \left\{ x \in \mathbb{R}^2 \mid d_{\text{Eucl}(x, a)} = \sqrt{(x_1 - a_1)^2 + (x_2 - a_2)^2} < \varepsilon \right\} \subset U$$

Da $B_\rho^{d_{\max}}(a) \subset B_\varepsilon^{d_{\text{E}}}(a)$ für $\rho = \frac{\varepsilon}{\sqrt{2}}$, ist U auch offen (\mathbb{R}^2, d_{\max}) .

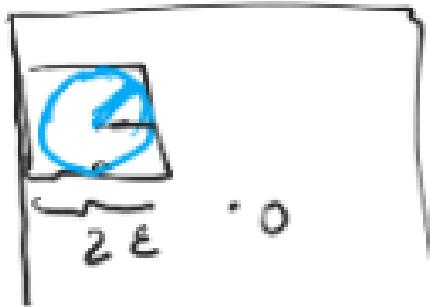


„ \Leftarrow “ Sei $a \in U \xrightarrow{VOR} \exists \varepsilon > 0$ s. d.

$$B_\varepsilon^{d_{\max}}(a) = \{x \mid d_{\max}(x, a) < \varepsilon\} \subset U.$$

□

Es gilt $B_\rho^{d_{\text{E}}}(a) \subset B_\varepsilon^{d_{\max}}(a)$ für $\rho = \varepsilon$, also ist U offen in $(\mathbb{R}^2, d_{\text{Eucl}})$.



Definition 1.44. Sei X eine Menge, seien d und \tilde{d} Metriken auf X . Dann nennt man d *stärker* (feiner) als \tilde{d} , falls jede bezüglich \tilde{d} offene Menge auch offen bezüglich d ist, und *schwächer* (größer), falls \tilde{d} stärker ist als d . Ist d sowohl stärker als auch schwächer als \tilde{d} , so nennt man d und \tilde{d} *äquivalent*.

Beispiel. d_{\max} ist äquivalent zu d_{Eucl} . d_{disk} ist stärker als d_{\max} und nicht schwächer.

Bemerkungen 1.45. Sei d stärker als \tilde{d} . Dann gilt:

- i) Konvergiert eine Folge bezüglich der stärkeren Metrik, so auch bezüglich der schwächeren.

(denn: Konvergiere $x_n \rightarrow a$ (bezüglich d). Sei $\varepsilon > 0$. Betrachte $B_\varepsilon^{\tilde{d}}(a) = U$ offen bezüglich $d \implies U$ Umgebung von a (bezüglich d) $\implies U$ Umgebung von a (bezüglich \tilde{d}) $\implies \exists N$ s. d. $x_n \in U \quad \forall n \geq N$.)

- ii) Ist eine Funktion $f: (X, \tilde{d}) \rightarrow (Y, d_Y)$ stetig, so auch $f: (X, d) \rightarrow (Y, d_Y)$.
- iii) Ist eine Funktion $f: (Y, d_Y) \rightarrow (X, d)$ stetig, so auch $f: (Y, d_Y) \rightarrow (X, \tilde{d})$.

Beweis. f stetig \iff Urbilder offener Mengen sind offen.

1. $U \subset Y \implies f^{-1}(U)$ offen bezüglich $\tilde{d} \implies f^{-1}(U)$ offen bezüglich d .

2. Sei $U \subset X$ offen bezüglich \tilde{d} , also auch offen bezüglich $d \implies f^{-1}(U)$ offen in Y . □

Bemerkung. Sind d und \tilde{d} äquivalent, sind die selben Folgen konvergent, die selben Mengen offen, kompakt, die selben Funktionen stetig etc.

Kapitel 2.

Normierte Vektorräume

Definition 2.1. Sei V ein reeller Vektorraum. Eine *Norm* auf V ist eine Abbildung $\|\cdot\|: V \rightarrow \mathbb{R}$ mit

a)

$$\|x\| = 0 \iff x = 0$$

b)

$$\|\lambda x\| = |\lambda| \|x\| \quad \forall \lambda \in \rho, \quad x \in V$$

c)

$$\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\| \quad \forall x, y \in V$$

Dreiecksungleichung.

Ein *normierter VR* $(V, \|\cdot\|)$ ist ein VR mit einer Norm.

Beispiele. • \mathbb{R}^n mit $\|\cdot\|_E$ Euklidische Norm auf \mathbb{R}^n

$$\|x\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad x = (x_1, \dots, x_n).$$

- \mathbb{R}^n mit $\|\cdot\|_\infty = \|\cdot\|_{\max}$,

$$\|x\|_\infty = \max\{|x_1|, \dots, |x_n|\}.$$

- \mathbb{R}^n mit $\|\cdot\|_p$, „ p -Norm“, $p \geq 1$, $p \in \mathbb{R}$.

$$\|x\|_p = \left(\sum_{i=1}^n |x_i|^p \right)^{1/p} \quad \rightarrow \quad \text{Saalübung.}$$

- $C([a, b])$ mit $\|f\|_{L^1} = \int_a^b |f(t)| dt$.
- $C([a, b])$ mit $\|f\|_\infty = \sup_{t \in [a, b]} |f(t)|$.

Lemma 2.2. Sei $(V, \|\cdot\|)$ normierter VR. Dann wird durch $d(x, y) := \|x - y\|$ eine Metrik auf V definiert („induziert“).

Beweis. 2.1.a) (Norm) \implies 1.11.a) (Metrik). 1.11.b) (Symmetrie der Metrik): folgt aus $\|x - y\| = \|y - x\|$. \square

Notation. Wir schreiben $(V, \|\cdot\|)$ für den *metrischen* Raum, dessen Metrik von $\|\cdot\|$ induziert wird.

Bemerkung. Nicht jede Metrik auf einem Vektorraum wird von einer Norm induziert, denn induzierte Metriken erfüllen $d(\lambda x, \lambda y) = |\lambda|d(x, y)$. Die diskrete Metrik erfüllt das nicht.

Lemma 2.3. Seien d_1 und d_2 auf V von Normen $\|\cdot\|_1$ und $\|\cdot\|_2$ induziert. Dann ist d_2 stärker als d_1 genau dann, wenn es eine positive Zahl $C > 0$ gibt s. d.

$$\|x\|_1 \leq C\|x\|_2 \quad \forall x \in V.$$

Beweis. Bezeichne $B_r^j(0)$, $r > 0$, die offenen Kugeln bezüglich d_j .

„ \implies “ Nach VOR ist insbesondere $B_1^1(0)$ offen bezüglich $d_2 \implies \exists \varepsilon > 0$ s. d. $B_\varepsilon^2(0) \subset B_1^1(0) \implies$ für $x \in X$, $x \neq 0$ gilt

$$\begin{aligned} \left\| \frac{\varepsilon x}{2\|x\|_2} \right\|_2 &= \frac{\varepsilon}{2} < \varepsilon \\ \implies \left\| \frac{\varepsilon x}{2\|x\|_2} \right\|_1 &< 1 \\ \implies \|x\|_1 &< \frac{2}{\varepsilon} \|x\|_2. \end{aligned}$$

„ \Leftarrow “ Existiere C wie oben. $B_r^2(x) \subset B_{cr}^1(x) \quad \forall x \in X, r > 0$. Denn $r > \|x - y\|_2 \geq \frac{1}{c}$. Sei U offen bezüglich d_1

$$\begin{aligned} &\implies \forall x \in U \quad \exists \varepsilon > 0 \text{ s. d. } B_\varepsilon^1(x) \subset U \\ &\implies B_{\frac{\varepsilon}{C}}^2(x) \subset B_\varepsilon^1(x) \subset U. \end{aligned} \quad \square$$

Folgerung. d_2 ist äquivalent zu d_1

$$\iff \exists C, \tilde{C} \text{ s. d. } \tilde{C}\|x_2\| \leq \|x_1\| \leq C\|x_2\|,$$

(„die Normen sind äquivalent“).

Bemerkung. Äquivalenz von Normen ist eine Äquivalenz-Relation (reflexiv, symmetrisch, transitiv).

Bemerkung. Für allgemeine Metriken kann man nicht so eine einfache Abschätzung angeben. Etwa ist $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \ni (x, y) \mapsto \|x - y\|_{\max}$ unbeschränkt, aber $d_{\text{discrete}}(x, y) = 1 \quad \forall x \neq y$. Die Beweisrichtung „ \Leftarrow “ gilt noch (also gibt es ein C wie in 2.3, so ist d_2 stärker als d_1). Die Beweisrichtung „ \Rightarrow “ verwendet die Skalar-Multiplikation des zugrunde liegenden Vektorraums und vor allem die „Betrag-Homogenität“ der Norm

$$\left\| \frac{x}{\|x\|_2} \right\| = \frac{1}{\|x\|_2} \|x\|_1.$$

Satz 2.4. Auf \mathbb{R}^n sind alle Normen äquivalent.

Beweis. Aufgrund der Transitivität genügt es die Äquivalenz einer beliebigen Norm $\|\cdot\|$ zu $\|\cdot\|_\infty$ zu beweisen.

1. $\|\cdot\|_\infty$ ist stärker als $\|\cdot\|$: Denn sei $x = \sum_{j=1}^n x_j e_j \in \mathbb{R}^n$, $e_j = (0, \dots, \underset{j\text{-te}}{1}, \dots, 0)$. Dann ist

$$\|x\| = \left\| \sum x_j e_j \right\| \stackrel{\triangle \text{ und Homog.}}{\leq} \left\| \sum |x_j| \cdot e_j \right\| \leq \|x\|_\infty \underbrace{\sum_{j=1}^n \|e_j\|}_{=C}.$$

2. $\|\cdot\|_\infty$ ist schwächer als $\|\cdot\|$:

Betrachte $M := \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x\|_\infty = 1\}$ (Einheits„sphäre“ bezüglich $\|\cdot\|_\infty$, also Rand des Einheitswürfels .

Behauptung. $f: M \rightarrow \mathbb{R}$, $x \mapsto \|x\|$ ist stetig bezüglich $\|\cdot\|_\infty$.

Beweis.

$$|f(x) - f(y)| = \left| \|x\| - \|y\| \right| \stackrel{(*)}{\leq} \|x - y\| \leq C \|x - y\|_\infty$$

(*) umgekehrte Dreiecksungleichung:

$$\begin{aligned} \|x\| - \|y\| &= \|x + y - y\| - \|y\| \stackrel{\triangle}{\leq} \|x + y\| \\ \|y\| - \|x\| &= \|y + x - x\| - \|x\| \leq \|x + y\|. \end{aligned}$$

□

M ist abgeschlossen bezüglich $\|\cdot\|_\infty$ (denn $\mathbb{R}^n \setminus M =$ Urbild der offenen Menge $\mathbb{R} \setminus \{1\}$ unter der stetigen Abbildung $x \mapsto \|\cdot\|_\infty$). $M \subset$ abgeschlossenen Quader und dieser ist kompakt in $(\mathbb{R}^n, \|\cdot\|_\infty)$ (Lemma 2.5) $\Rightarrow M$ ist kompakt (1.39).

Es folgt: f nimmt sein Minimum b an und (da $f > 0$) somit ist $b > 0$. Nach Definition ist $\|y\| \geq b \quad \forall y \in M$. Für alle $x \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$ gilt $\frac{x}{\|x\|_\infty} \in M$, also ist $\left\|\frac{x}{\|x\|_\infty}\right\| \geq b$, also $\|x\| \geq b\|x\|_\infty$ und für $x = 0$ gilt dies ohnehin. \square

Lemma 2.5. Der Quader $Q = \{x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n \mid a_j \leq x_j \leq b_j\}$ ist kompakt in $\mathbb{R}^n, \|\cdot\|_\infty$ ($a_j \leq b_j$).

Beweis. Sei $(U_j)_j$ eine offene Überdeckung von Q . Angenommen, Q kann nicht durch endlich viele U_j 's überdeckt werden.

Wir konstruieren induktiv eine Folge von abgeschlossenen Teilquadern

$$Q_0 \supset Q_1 \supset Q_2 \supset \dots$$

mit

- a) Q_n kann *nicht* durch endlich viele U_j 's überdeckt werden
- b) $\text{diam } Q_m = 2^{-m} \text{ diam } Q$.

Beachte:

$\text{diam } Q = \text{Länge der längsten Seite bezüglich } \|\cdot\|_\infty$.

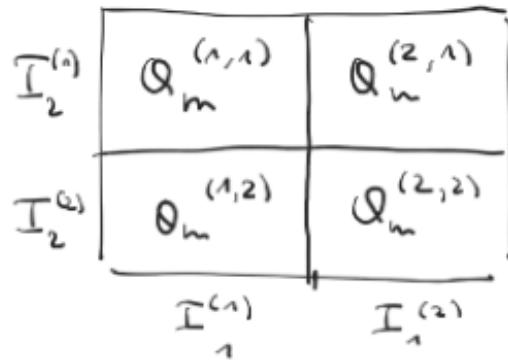


Setze $Q_0 = Q$. Sei Q_m konstruiert. Schreibe $Q_m = I_1 \times \dots \times I_n$, I_j abgeschlossene Intervalle. Zerlege $I_j^{(1)} \cup I_j^{(2)}$ in zwei abgeschlossene Intervalle der halben Länge und setze

$$Q^{(s_1, \dots, s_n)} := I_1^{(s_1)} \times \dots \times I_n^{(s_n)}, \quad s_j \in \{1, 2\}.$$

Das ergibt 2^n Quadern mit

$$\bigcup_{s_j \in \{1, 2\}} Q_m^{(s_1, \dots, s_n)} = Q_m$$



Es gibt mindestens einen Quader $Q_m^{(s_1, \dots, s_n)}$, der nicht durch endlich viele U_j 's überdeckt werden kann. Einen solchen wählen wir als Q_{m+1} . Es gilt per Konstruktion

$$\text{diam}(Q_{m+1}) = \frac{1}{2} \text{diam}(Q_m) = \frac{1}{2^{m+1}} \text{diam}(Q).$$

Nach dem Schachtelungsprinzip $\exists a \in Q_m \forall m$. Da $(U_j)_j Q$ überdeckt $\exists U_{j_0}$ s. d. $a \in U_{j_0}$. U_{j_0} offen $\implies \exists \varepsilon > 0$ s. d. $B_\varepsilon^{\|\cdot\|_\infty}(a) \subset U_{j_0}$. Wähle m so groß, dass $\text{diam}(Q_m) < \varepsilon$. $a \in Q_m \implies Q_m \subset B_\varepsilon^{\|\cdot\|_\infty}(a) \subset U_{j_0}$ $\not\subset$ Widerspruch Konstruktion der Q_m . \square

Bemerkung 2.6. Aus 2.4 folgt: Q ist bezüglich jeder Norm kompakt. Bolzano-Weierstraß (1.43) \implies In $(\mathbb{R}^n, \|\cdot\|)$ hat jede beschränkte Folge eine konvergente Teilfolge.

Bemerkungen 2.7. Wir haben bereits gesehen:

- i) Auf nicht endlich-dimensionalen Vektor-Räumen sind nicht alle Normen äquivalent: $(C([a, b]), \|\cdot\|_\infty)$ ist vollständig, $(C([a, b]), \|\cdot\|_{L^1})$ nicht.
- ii) Auf dem \mathbb{R}^n sind nicht alle Metriken äquivalent: d_{disc} ist stärker als jede Norm (und nicht schwächer).

Satz 2.8 (Heine-Borel). Eine Teilmenge $A \subset \mathbb{R}^n$ ist genau dann kompakt, wenn sie abgeschlossen und beschränkt ist. (\mathbb{R}^n hier und im Folgenden als normierter VR).

Beweis. „ \implies “ Hatten wir letztes Mal (1.38) für Kompakte in metrischen Räumen bewiesen.

„ \Leftarrow “ It A beschränkt so ist A in einem Quader enthalten (denn $\|x - y\|_\infty \leq \|x - y\|$ somit $\text{diam}_{\|\cdot\|_\infty}(A) \leq C \text{diam}_{\|\cdot\|}(A) < \infty$). Q ist kompakt (bezüglich $\|\cdot\|_\infty$ somit bezüglich $\|\cdot\|$). A abgeschlossen $\implies A$ kompakt (1.39). \square

Bemerkung. 2.8 gilt nicht in unendlich-dimensionalen Vektorräumen:

Betrachte in $\ell_1, \|\cdot\|_{\ell_1} = \sum_{k=0}^{\infty} |x_k|$ die Folge $(x^n)_n$ wobei $x^n = (x_k^n)_k$ sei mit $x_k^n = 0$ für $n \neq k$ und $(x^n)_n = 1$. Dann gilt $\|x^n\|_{\ell_1} = 1$ und

$$\|x^n - x^m\|_{\ell_1} = 2 \quad \forall m \in \{0, 1, \dots, n-1\}.$$

\implies Die Folge besitzt keine konvergente Teilfolge, kann also (Bolzano-Weierstrass) nicht kompakt sein, obwohl $\{x^n \mid n \in \mathbb{N}_0\}$ beschränkt und abgeschlossen in $(\ell_1, \|\cdot\|_{\ell_1})$ ist.

Vorlesung 5

Mo 04.05. 10:15

2.I. Stetige Abbildungen in normierten Vektorräumen**2.I.1. Lineare Abbildungen**

Satz 2.9. Seien $(V, \|\cdot\|_V)$ und $(W, \|\cdot\|_W)$ normierte Vektorräume. Sei $A: V \rightarrow W$ linear. Dann sind folgende Aussagen äquivalent:

- a) A ist stetig
- b) A ist stetig in 0
- c) $\|A(x)\|_W \leq C\|x\|_V$.

Beweis. 2.9.a) \implies 2.9.b) ✓

2.9.b) \implies 2.9.c) A stetig in 0 \implies zu $\varepsilon = 1 \exists \delta > 0$ s. d.

$$\|A(y) - A(0)\|_W \stackrel{\text{Lin}}{=} \|A(y)\|_W < 1 \quad \forall y \in V \text{ mit } \|y - 0\|_V = \|y\|_V < \delta.$$

Setze $C := 2/\delta$. Sei $x \in V \setminus \{0\}$ beliebig (für $x = 0$ gilt die Ungleichung 2.9.c) ohnehin). Setze $\lambda := 1/C\|x\|_V$ und $y := \lambda x$.

Dann ist $\|y\|_V = \frac{1}{C\|x\|_V}\|x\|_V = \delta/2 < \delta$, also $\|A(y)\|_W < 1$.

$$A(y) = A(\lambda x) = \frac{1}{C\|x\|_V}A(x) \implies \text{Beh.}$$

2.9.c) \implies 2.9.a) Es gebe $C > 0$ s. d.

$$\|A(x)\|_W \leq C\|x\|_V \quad \forall x \in V.$$

Dann gilt insbesondere für $x = y - a$.

$$\|A(x)\|_W = \|A(y) - A(a)\| \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Linearität}}}{\leq} C\|y - a\|_V.$$

Sei $\varepsilon > 0$. Dann ist also

$$\|A(y) - A(a)\|_W < \varepsilon \quad \forall y, a \text{ mit } \|y - a\|_V < \frac{\varepsilon}{C}$$

und somit ist A sogar gleichmäßig stetig. □

Beispiele. i) $(C([a, b], \mathbb{R}), \|\cdot\|_\infty)$.

$$I: C([a, b]) \rightarrow \mathbb{R}, \quad I(f) := \int_a^b f(t) dt.$$

I ist linear und es gilt

$$\|I(f)\| \leq (b - a)\|f\|_\infty$$

$\implies I$ ist stetig.

ii) $D(\cdot): (C^1([a, b]), \|\cdot\|_\infty) \rightarrow (C([a, b]), \|\cdot\|_\infty), D(\cdot): f \mapsto f'$.

Behauptung. $D(\cdot)$ ist nicht stetig.

Denn: D ist linear ✓, aber die Bedingung aus Satz 2.9 ist verletzt: Betrachte $f_n \in C^1([0, 1]), f_n = x^n$. Dann ist $\|f_n\|_\infty = 1$, aber $\|Df_n\|_\infty = n \implies$ es kann kein $C > 0$ geben s. d.

$$n = \|Df_n\|_\infty \leq C\|f_n\|_\infty = C \quad \forall n.$$

□

Definition. Seien V und W normierte Vektorräume. Sei $A: V \rightarrow W$ lineare stetige Abbildung. Die *Operatornorm* von A ist definiert als

$$\|A\|_{\text{op}} := \sup_{\substack{x \in V \\ x \neq 0}} \frac{\|Ax\|_W}{\|x\|_V}.$$

Auf dem VR der stetigen linearen Funktionen $V \rightarrow W$ ist $\|\cdot\|_{\text{op}}$ eine Norm. $\|A\|_{\text{op}}$ ist die kleinste Konstante für die noch die Abschätzung aus 2.9 gilt und es folgt

Bemerkung 2.10. Ein linearer Operator ist genau dann stetig, wenn gilt $\|A\|_{\text{op}} < \infty$.

Beispiel. Ist $A: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ linear, so gilt

$$A \in \text{Mat}(m \times n, \mathbb{R}) \simeq \mathbb{R}^{m \cdot n}.$$

Daher ist $\|\cdot\|_{\text{op}}$ in diesem Fall äquivalent zu $\|\cdot\|_\infty$, $\|A\|_\infty = \max_{i,j} |A_{ij}| < \infty$, insbesondere also schwächer und somit ist A stetig.

Konkret gilt: Setze $V = (\mathbb{R}^n, \|\cdot\|_V)$, $W = (\mathbb{R}^n, \|\cdot\|_W)$. Sei $y = Ax \implies y_i = \sum_{j=1}^n A_{ij}x_j$ für $i = 1, \dots, m$.

$$\begin{aligned}\|y\|_W &\stackrel{\triangle}{\leq} \sum_{i=1}^m \|y_i e_i\|_W \\ &\stackrel{\triangle}{\leq} \sum_{\text{Hom } i,j} |A_{ij}x_j| \|e_i\|_W \\ &= \sum_{i,j} |A_{ij}| \cdot |x_j| \cdot \|e_i\|_W \\ &\leq \|A\|_\infty \cdot \|x\|_{\ell^1} \cdot \underbrace{\sum_{i=1}^m \|e_i\|_W}_{=c_W} \\ \implies \|A\|_{\text{op}} &= \sup_{x \neq 0} \frac{\|Ax\|_W}{\|x\|_V} \leq \|A\|_\infty \cdot C_W \cdot \underbrace{\sup_{x \neq 0} \frac{\|x\|_{\ell^1}}{\|x\|_V}},\end{aligned}$$

wobei C_V eine Konstante ist mit

$$\|x\|_{\ell^1} \leq C_V \cdot \|x\|_V \quad \forall x \in V = \mathbb{R}^n.$$

Bemerkung. Unsere Beschränkung auf den \mathbb{R}^n (statt beliebige endlich-dimensionale Vektorräume zuzulassen), bedeutet also keine Einschränkung, da ein Basiswechsel nach der Überlegung oben stetig ist.

Beispiele 2.11. $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$.

a) Kurven $\gamma: I \rightarrow \mathbb{R}^n$, I Intervall, stetig.

Beispiele.

$\gamma: [0, 2\pi] \rightarrow \mathbb{R}^2$, $t \mapsto (r \cos t, r \sin t)$, $r > 0$. Stetigkeit: Wir versehen \mathbb{R}^2 mit $\|\cdot\|_\infty$. Dann folgt die Stetigkeit von γ aus der Stetigkeit der Komponentenfunktionen $I \rightarrow \mathbb{R}$.

$\gamma: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^2$, $t \mapsto (t^2 - 1, t^3 - 1)$ genauso. Spur von $\gamma = \{ \gamma(t) \mid t \in \mathbb{R} \}$



b) Gebrochen rationale Funktionen:

Beispiele.

$$f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}.$$

$$f(x, y) = \begin{cases} \frac{x^2 y}{x^2 + y^2} & (x, y) \neq (0, 0) \\ 0 & (x, y) = (0, 0). \end{cases}$$

f ist stetig: auf $\mathbb{R}^2 \setminus \{0\}$ sicherlich als Verknüpfung und Produkt stetiger Funktionen:

$$f = \text{Inv} \circ p_1 \cdot p_2 \quad \text{Inv}(t) = \frac{1}{t}, \quad p_1(x, y) = x^2 + y^2, \quad p_2(x, y) = x^2 y.$$

Stetigkeit in 0: Es gilt $(x - y)^2 \geq 0$

$$\begin{aligned} &\implies 2|xy| \leq x^2 + y^2 \\ &\implies \left| \frac{x^2 y}{x^2 + y^2} \right| < \frac{|x|}{2} \end{aligned}$$

für $((x_n, y_n))_n$, $(x_n, y_n) \rightarrow (0, 0)$ (bezüglich irgendeiner Norm) gilt insbesondere $x_n \rightarrow 0$

$$\implies |f(x_n, y_n) - 0| = \left| \frac{x_n^2 y_n}{x_n^2 + y_n^2} \right| < \frac{|x_n|}{2} \rightarrow 0 \text{ in } \mathbb{R}.$$

$$f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R},$$

$$f(x, y) = \begin{cases} \frac{x^2 y}{x^4 + y^2} & (x, y) \neq (0, 0) \\ 0 & (x, y) = (0, 0). \end{cases}$$

f ist stetig auf $\mathbb{R}^2 \setminus \{0\}$ (siehe oben). f ist nicht stetig in 0: Betrachte etwa $(x_n, y_n) = \left(\frac{1}{n}, \frac{1}{n^2}\right)$, $n \geq 1$. Dann gilt

$$f(x_n, y_n) = \frac{1}{n^2 n^2} \left(\frac{n^4}{2} \right) = \frac{1}{2} \not\rightarrow 0.$$

Achtung:

Es gibt durchaus Folgen $(x_n, y_n) \rightarrow 0$ s. d. $f(x_n, y_n) \rightarrow 0$ (für $n \rightarrow \infty$), z. B. $(x_n, y_n) = \left(0, \frac{1}{n}\right)$, wo $f\left(0, \frac{1}{n}\right) = 0 \quad \forall n$ oder $(x_n, y_n) = (1/n, 1/n)$ wo

$$f(x_n, y_n) = \frac{1}{n^2} \left(\frac{n^2}{1 + 1/n^2} \right) \rightarrow 0.$$

Daher muss man, wenn man Stetigkeit zeigen will, ein Argument finden, dass für *alle* Folgen funktioniert.

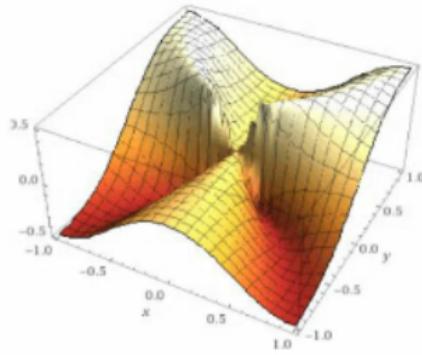
Plot3d[x^2 *y/(x^4+y^2),(x,-1,1),(y,-1,1)]

Extended Keyboard Upload

Input interpretation:

plot	$x^2 \times \frac{y}{x^4 + y^2}$	$x = -1 \text{ to } 1$
		$y = -1 \text{ to } 1$

3D plot:



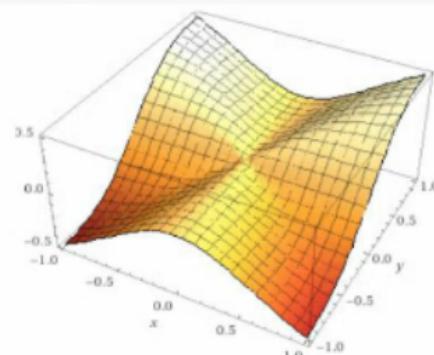
Plot3d[x^2*y/(x^2+y^2),(x,-1,1),(y,-1,1)]

Extended Keyboard Upload

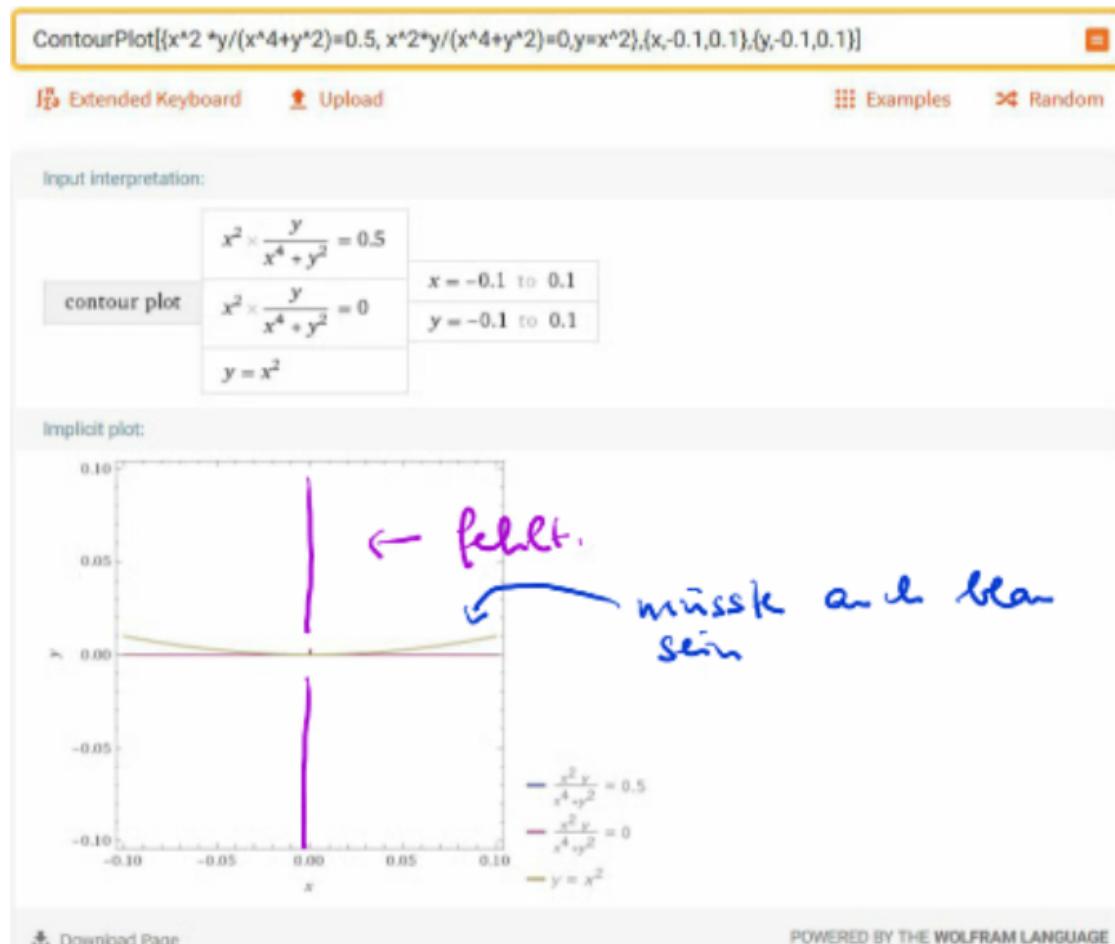
Input interpretation:

plot	$x^2 \times \frac{y}{x^2 + y^2}$	$x = -1 \text{ to } 1$
		$y = -1 \text{ to } 1$

3D plot:



Contour-Plot: Eingezeichnet werden alle (x, y) , die die gegebene Gleichung erfüllen. Von Wolfram Alpha.



2.II. Vektorräume mit Skalarprodukt

Eine spezielle Klasse von Normen sind solche, die von einem sogenannten Skalarprodukt induziert werden.

Definition 2.12. Sei V ein Vektorraum über \mathbb{R} . Ein *Skalarprodukt* auf V ist eine Abbildung $\langle \cdot, \cdot \rangle: V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ mit

a) Linear:

$$\langle \lambda x + \mu y, z \rangle = \lambda \langle x, z \rangle + \mu \langle y, z \rangle \quad \forall x, y, z \in V, \lambda, \mu \in \mathbb{R}$$

b) Symmetrisch:

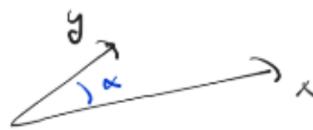
$$\langle x, y \rangle = \langle y, x \rangle \forall x, y \in V$$

c) Positiv definit:

$$\langle x, x \rangle \geq 0 \text{ und } \langle x, x \rangle = 0 \iff x = 0.$$

Bemerkung. Mit 2.12.b) folgt auch die Linearität im zweiten Argument.

Beispiele. • \mathbb{R}^n , $\langle x, y \rangle = \sum_{i=1}^n x_i y_i$: Euklidisches Skalarprodukt.



interpretation

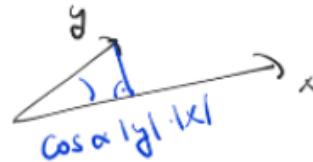
y geht durch Drehstreckung aus $x \neq 0$ hervor:

$$y = \|y\|_E \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \frac{x}{\|x\|_E}.$$

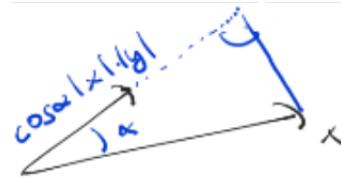
Dann gilt:

$$\begin{aligned} \langle x, y \rangle &= \frac{\|y\|_E}{\|x\|_E} \langle x, \begin{pmatrix} \cos \alpha x_1 - \sin \alpha x_2 \\ \sin \alpha x_1 + \cos \alpha x_2 \end{pmatrix} \rangle \\ &= \frac{\|y\|_E}{\|x\|_E} (x_1^2 \cos \alpha - x_1 x_2 \sin \alpha + x_1 x_2 \sin \alpha + x_2^2 \cos \alpha) \\ &= \|y\|_E \cdot \|x\|_E \cdot \cos \alpha. \end{aligned}$$

Das Skalarprodukt misst die Projektion von y auf x



und umgekehrt



- \mathbb{R}^n mit $\langle x, y \rangle_W = \sum_{i=1}^n w_i x_i y_i$, $w = (w_1, \dots, w_n)$ Gewichtsvektor, $w_i > 0$.
- \mathbb{R}^2 mit $\langle x, y \rangle := 2x_1 y_1 - x_1 y_2 - x_2 y_1 + 2x_2 y_2$ (zu überprüfen ist die Positive Definitheit).
- Kein Skalarprodukt ist das Minkowski-Produkt: \mathbb{R}^{n+1} mit $((x, y)) := x_0 y_0 - \sum_{i=1}^n x_i y_i$.
Denn $((x, x)) = 0 \iff x_0 = \pm \|x\|_E$, $x = (x_1, \dots, x_n)$.
- $C([a, b])$ mit $\langle f, g \rangle = \int_a^b f(t)g(t) dt$.

Lemma 2.13. Sei V VR mit Skalarprodukt $\langle \cdot, \cdot \rangle$. Dann ist durch $\|x\| := \sqrt{\langle x, x \rangle}$ eine Norm auf V definiert.

Beweis. 2.1.a) $\|x = 0\| \implies \langle x, x \rangle = 0 \stackrel{2.12.c)}{\implies} \|0\| = 0 \checkmark$.

2.1.b) $\|\lambda x\| = \sqrt{\lambda^2 \langle x, x \rangle} = |\lambda| \sqrt{\langle x, x \rangle} \forall \lambda \in \mathbb{R}, x \in V$.

2.1.c)

$$\begin{aligned}
 \|x + y\|^2 &= \langle x + y, x + y \rangle \\
 &= \|x\|^2 + 2\langle x, y \rangle + \|y\|^2 \\
 &\leq \|x\|^2 + 2|\langle x, y \rangle| + \|y\|^2 \\
 &\leq (\|x\| + \|y\|)^2 \implies \Delta,
 \end{aligned}$$

siehe (*) unten

denn die Wurzel ist monoton wachsend.

Es gilt die *Cauchy-Schwarzsche* Ungleichung:

$$|\langle x, y \rangle| \leq \|x\| \cdot \|y\|. \quad (*)$$

Beweis.

$$0 \leq \langle x - \lambda y, x - \lambda y \rangle = \|x\|^2 - 2\lambda \langle x, y \rangle + \lambda^2 \|y\|^2 \quad \forall x, y \in V \quad \lambda \in \mathbb{R},$$

also speziell für $y \neq 0$ (für $y = 0$ gilt die Ungleichung sowieso) und $\lambda = \frac{\langle x, y \rangle}{\|y\|^2}$:

$$0 \leq \|x\|^2 - \frac{\langle x, y \rangle^2}{\|y\|^2}.$$

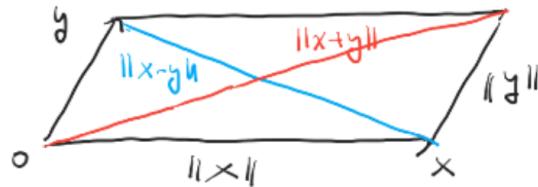
□

Einen Vektorraum mit Skalarprodukt betrachten wir immer als mit der von Skalarprodukt induzierten Norm, also Metrik, also Topologie.

Nicht jede Norm wird von einem Skalarprodukt induziert. Es gilt

Lemma 2.14. Sei $(V, \|\cdot\|)$ normierter VR Dann wird $\|\cdot\|$ von einem Skalarprodukt induziert genau dann, wenn die Parallelogramm-Gleichung gilt:

$$\|x + y\|^2 - \|x - y\|^2 = 2(\|x\|^2 + \|y\|^2) \quad \forall x, y \in V.$$



Erklärung für den Namen. \mathbb{R}^2 , $\|\cdot\| = \|\cdot\|_E$.

Beweis. „ \implies “ Sei $\|x\| = \sqrt{\langle x, x \rangle}$. Dann gilt

$$\begin{aligned} \|x + y\|^2 + \|x - y\|^2 &= \langle x + y, x + y \rangle + \langle x - y, x - y \rangle \\ &= 2\|x\|^2 + 0 + 2\|y\|^2. \end{aligned}$$

„ \impliedby “ Erfüllt $\|\cdot\|$ die Parallelogramm-Gleichung.

Behauptung. Durch „Polarisation“, also

$$\langle x, y \rangle := \frac{1}{4}(\|x + y\|^2 - \|x - y\|^2)$$

ist ein Skalarprodukt definiert mit $\|x\| = \sqrt{\langle x, x \rangle}$.

Beweis. 2. Beh.: $\langle x, x \rangle = \frac{1}{4} \|2x\|^2 \checkmark$.

1. Beh.: • Aus der 2. Beh. folgt die positive Definitheit aus der Nichtausgeartetheit und Positivität der Norm.
- Die Symmetrie folgt sofort aus der Definition.
- Linearität. Wir zeigen zunächst Additivität:

$$1) \quad \langle x + u, y \rangle + \langle x - u, y \rangle = \langle x, y \rangle$$

denn::

$$\begin{aligned} \text{linke Seite} &= \frac{1}{4} (\|x + u + y\|^2 - \|x + u - y\|^2 \\ &\quad + \|x - u + y\|^2 - \|x - u - y\|^2) && \square \\ &= \frac{1}{2} (\|x + y\|^2 + \|u\|^2 - \|x - y\|^2 - \|u\|^2) \\ &\quad \uparrow \text{Parallelogramm-Gleichung} \\ &= \frac{1}{2} (\langle x + y, x + y \rangle - \langle x - y, x - y \rangle) \\ &= 2\langle x, y \rangle. \end{aligned}$$

Damit auch gleich gezeigt:

- 2) $\langle 2x, y \rangle = 2\langle x, y \rangle$ (setze $u = x$) und mit $x = u + v, y = u - v$ folgt
- 3) Additivität:

$$\begin{aligned} \langle x, y \rangle + \langle y, z \rangle &= \langle u + v, z \rangle + \langle u - v, z \rangle \\ &= 2\langle u, z \rangle \\ &\stackrel{2)}{=} \langle 2u, z \rangle \\ &= \langle x + y, z \rangle \end{aligned}$$

- 4) per Induktion $\langle nx, y \rangle = n\langle x, y \rangle \forall n \in \mathbb{N}$, denn

$$\begin{aligned} \langle (n+1)x, y \rangle &= \langle nx + x, y \rangle \\ &\stackrel{3)}{=} \langle nx, y \rangle + \langle x, y \rangle \\ &\stackrel{\text{IV}}{=} n\langle x, y \rangle + \langle x, y \rangle \\ &= (n+1)\langle x, y \rangle. \end{aligned}$$

5) Für $\lambda \in -\mathbb{N}_0$ gilt

$$\begin{aligned}\lambda \langle x, y \rangle - \langle \lambda x, y \rangle &= \lambda \langle x, y \rangle - \langle |\lambda|(-x), y \rangle \\ &= \lambda \langle x, y \rangle - |\lambda| \langle -x, y \rangle \\ &= \lambda(\langle x, y \rangle + \langle -x, y \rangle) \\ &= 0\end{aligned}$$

6) Für $\lambda \in \mathbb{Q}$, $\lambda = m/n$, $m, n \in \mathbb{Z}$:

$$n \left\langle \frac{m}{n} x, y \right\rangle \stackrel{4),5)}{=} \langle mx, y \rangle = m \langle x, y \rangle.$$

7) Für $\lambda \in \mathbb{R}$ existiert $(\lambda_n)_n \subset \mathbb{Q}$, $\lambda_n \rightarrow \lambda$. Da $\|\cdot\|$ stetig ist, so auch $\langle \cdot, \cdot \rangle$

$$\begin{aligned}\langle \lambda x, y \rangle &= \langle \lim \lambda_n x, y \rangle \\ &= \lim \langle \lambda_n x, y \rangle \\ &= \lim \lambda_n \langle x, y \rangle \\ &= \lambda \langle x, y \rangle.\end{aligned}$$

Symmetrie \implies es genügt, das erste Argument zu untersuchen. \square

Beispiel. $\|\cdot\|_{\max}$ wird nicht von einem Skalarprodukt induziert: Sei $x = e_1$, $y = e_2$. Dann gilt:

$$\|e_1 + e_2\|_{\max}^2 + \|e_1 - e_2\|_{\max}^2 = 1 + 1 = 2,$$

aber

$$2(\|e_1\|_{\max}^2 + \|e_2\|_{\max}^2) = 4.$$

Kapitel 3.

Differenzierbarkeit in \mathbb{R}^n

Vorlesung 6

Do 07.05. 10:15

Erinnerung. Approximation einer Funktion $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, die in $a \in \mathbb{R}$ differenzierbar ist, durch eine (affin) lineare Funktion

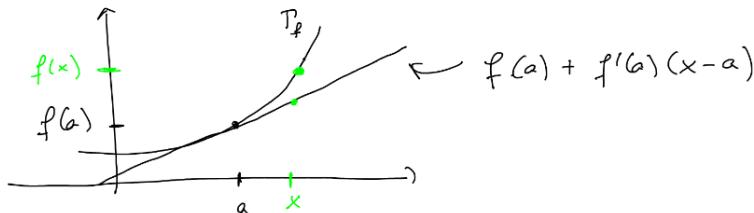
$$f(x) = f(a) + m_a(x - a) + R_a(x)$$

mit $R_a: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ und $\lim_{x \rightarrow a} \frac{R_a(x)}{x - a} = 0$.

Gibt es ein solches R_a , so ist m_a eindeutig festgelegt und es gilt

$$m_a = \lim_{x \rightarrow a} \underbrace{\frac{f(x) - f(a)}{x - a}}_{\text{Differenzenquotient}} .$$

$f'(a) := m_a$ heißt *Ableitung* von f an der Stelle a .



Für Abbildungen $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ kann man analog definieren:

Definition 3.1. Die *Ableitung* einer Funktion $f: U \rightarrow \mathbb{R}^m$, $U \subset \mathbb{R}^n$ offen, an der Stelle $a \in U$, ist, wenn sie existiert, eine Matrix $Df(a) \in \text{Mat}(m \times n)$, die eine lineare Approximation von f ergibt:

$$f(x) = f(a) + Df(a) \cdot \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Matrix-Multiplikation}}}{(x - a)} + R_a(x) \quad (*)$$

Sie existiert genau dann, wenn

$$\lim_{\substack{x \rightarrow a \\ \text{in } \mathbb{R}^n}} \frac{R_a(x)}{\|x - a\|} = 0$$

in \mathbb{R}^m
 \downarrow
 $x \rightarrow a$
 \uparrow
in \mathbb{R}^n
 \uparrow
eine Norm in \mathbb{R}^n

und ist in diesem Fall eindeutig durch (*) bestimmt und man sagt, f ist *differenzierbar*.

Bemerkungen. i) Für $n = m = 1$ stimmt die Definition mit der Üblichen überein, da $\frac{R_a(x)}{x-a} \rightarrow 0 \iff \frac{R_a(x)}{|x-a|} \rightarrow 0$.

ii) Eindeutigkeit: Sei A s. d.

$$\begin{aligned} f(x) &= f(a) + A \cdot (x - a) + \tilde{R}_a(x) \\ &= f(a) + Df(a) \cdot (x - a) + R_a(x) \end{aligned}$$

Dann folgt:

$$\lim_{x \rightarrow a} \underbrace{((A - Df(a)) \cdot (x - a) \cdot 1/\|x - a\|)}_{=\frac{1}{\|x-a\|}(R_a(x)-\tilde{R}_a(x))} = 0.$$

$\implies A - Df(a) = 0$ (Nullmatrix), da wegen der Stetigkeit linearer Abbildungen $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ der Grenzwert gleich $(A - Df(a)) \cdot \lim (x - a)/\|x - a\|$ ist und $\|\lim (x - a)/\|x - a\|\| = 1 \neq 0$.

iii) Wie in der DIFF I ist es oft zweckmäßig f an der Stelle $a + h$ mit f an der Stelle a zu vergleichen ($x = a + h$).

$$f(a + h) = f(a) + Df(a) \cdot h + \underline{R}_h(a)$$

$$\text{mit } \lim_{h \rightarrow 0} (\underline{R}_h(a))/\|h\| = 0.$$

Beispiele. i) $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, $f(x) = A \cdot x + b$, $A \in \text{Mat}(m \times n, \mathbb{R})$, $b \in \mathbb{R}^m$.

$$f(a + h) = f(a) + A \cdot h \implies Df(a) = A.$$

Insbesondere verschwindet die Ableitung einer konstanten Funktion.

ii) $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, $f(x) = \langle x, B \cdot x \rangle$, $\langle \cdot, \cdot \rangle$ euklidisches Skalarprodukt, $B \in \text{Mat}(n \times n, \mathbb{R})$.

$$\begin{aligned} f(a + h) &= \langle a + h, B \cdot (a + h) \rangle \\ &= \langle a, B \cdot a \rangle + \langle h, B \cdot a \rangle + \langle a, B \cdot h \rangle + \langle h, B \cdot h \rangle \\ &= \langle a, B \cdot a \rangle + \langle (B + B^T) \cdot a, h \rangle + \langle h, Bh \rangle. \end{aligned}$$

CHECK!

Wegen (wähle $\|\cdot\| = \|\cdot\|_{\text{E}}$)

$$\frac{\langle a, Bh \rangle}{\|h\|} \underset{\text{C-S}}{\leqslant} \frac{\|h\| \cdot \|Bh\|}{\|h\|} \leqslant \|B\|_{\text{op}} \cdot \|h\| \rightarrow 0 \text{ für } h \rightarrow 0$$

folgt: f ist in allen $a \in \mathbb{R}^n$ differenzierbar und

$$\begin{aligned} Df(a) \cdot h &= \langle (B + B^T) \cdot a, h \rangle = (b_1, \dots, b_n) \begin{pmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_n \end{pmatrix} \\ \implies Df(a) \cdot b &= ((B + B^T) \cdot a)^T \in \text{Mat}(1 \times n, \mathbb{R}) \quad \forall h \in \mathbb{R}^n. \end{aligned}$$

Aus der Definition folgt sofort

Satz 3.2. Sei $f: U \rightarrow \mathbb{R}^m$, $U \subset \mathbb{R}^n$ offen, in $a \in U$ differenzierbar. Dann ist f in a stetig.

Beweis.

$$\begin{aligned} \lim_{h \rightarrow 0} f(a + h) &= \lim_{h \rightarrow 0} (f(a) + Df(a) + \underline{R}_a(h)) \quad \square \\ &= f(a) + 0 + 0 \\ &\quad \uparrow \quad \uparrow \\ &\quad \left| \begin{array}{l} \text{Es gilt sogar } \underline{R}_a(h)/\|h\| \rightarrow 0 \\ \|Df(a) \cdot h\| \leq \|Df(a)\|_{\text{op}} \cdot \|h\| \end{array} \right. \\ &\quad \uparrow \quad \uparrow \\ &\quad \text{Norm in } \mathbb{R}^m \quad \text{Norm in } \mathbb{R}^n \end{aligned}$$

Satz 3.3 (Kettenregel). Seien $U \subset \mathbb{R}^n$, $V \subset \mathbb{R}^m$ offen, $g: U \rightarrow \mathbb{R}^m$, $f: V \rightarrow \mathbb{R}^k$, $g(U) \subset V$. Ist g in $a \in U$ differenzierbar und f in $b = g(a)$, so ist die Verkettung $f \circ g: U \rightarrow \mathbb{R}^k$ in a differenzierbar und es gilt

$$D(f \circ g)(a) = \underbrace{Df(g(a))}_{\in \text{Mat}(k \times m, \mathbb{R})} \underbrace{Dg(a)}_{\in \text{Mat}(m \times n, \mathbb{R})}.$$

Beweis.

$$g(a + u) = g(a) + A \cdot u + \underline{R}_a^g(u) \quad A = Dg(a) \quad (1)$$

$$f(b + v) = f(b) + B \cdot v + \underline{R}_b^f(v) \quad B = Df(b) \quad (2)$$

Setze speziell $v := g(a+u) - g(a) \stackrel{(1)}{=} A \cdot u + \underline{R}_a^g(u)$.

$$\begin{aligned} \implies f \circ g(a+u) &= f(g(a+u)) = f(g(a)+v) && \text{Def } v \\ &\stackrel{(2)}{=} f(g(a)) + B \cdot v + \underline{R}_b^f(v) && b = g(a) \\ &= f(g(a)) + B \cdot A \cdot u + \underbrace{B \cdot \underline{R}_a^g(u) + \underline{R}_b^f(A \cdot u + \underline{R}_a^g(u))}_{\substack{\uparrow \\ \text{Def } v \text{ und (1)}}}. && \text{zu zeigen: } \frac{\cdot}{\|u\|} \xrightarrow{u \rightarrow 0} 0 \text{ für } u \rightarrow 0 \end{aligned}$$

- $\frac{\underline{R}_a^g(u)}{\|u\|} \rightarrow 0 \implies \exists C > 0 \text{ s. d. } \|\underline{R}_a^g(u)\| \leq C \|u\|$.
- $\frac{\underline{R}_b^f(v)}{\|v\|} \rightarrow 0 \implies \exists r_b^f \text{ s. d. } \underline{R}_b^f(v) = \|v\| r_b^f(v) \text{ mit } r_b^f(v) \rightarrow 0 \text{ (} v \rightarrow 0 \text{)}$.

$$\begin{aligned} \implies \underline{R}_b^f(A \cdot u + \underline{R}_a^g(u)) &\leq \overbrace{A \cdot u + \underline{R}_a^g(u)}^{\substack{\uparrow \\ \text{Norm in } \mathbb{R}^k}} \cdot \overbrace{\|r_b^f(Au + \underline{R}_a^g(u))\|}^{\substack{\uparrow \\ \text{Norm in } \mathbb{R}^k}} && \xrightarrow{u \rightarrow 0 \text{ für } u \rightarrow 0} \\ &\implies \frac{\underline{R}_b^f(A \cdot u + \underline{R}_a^g(u))}{\|u\|} \rightarrow 0 \quad (u \rightarrow 0). && \square \end{aligned}$$

Satz 3.4 (Produktregel, Quotientenregel). Seien $f, g: U \rightarrow \mathbb{R}$, $U \subset \mathbb{R}^n$ offen, differenzierbar in $a \in U$. Dann gilt

i) $f \cdot g$ ist differenzierbar in a und es gilt

$$D(f \cdot g)(a) = Df(a) \cdot g(a) + f(a) \cdot Dg(a).$$

ii) Ist $g(a) \neq 0$ so gilt: f/g ist auf einer Umgebung von a definiert und differenzierbar in a und es gilt

$$D(f/g)(a) = Df(a) \cdot \frac{1}{g(a)} - f(a) \cdot \frac{1}{g(a)^2} \cdot Dg(a).$$

Beweis. 3.4.i)

$$\begin{aligned} f(a+h) &= f(a) + Df(a) \cdot h + \underline{R}_a^f(h) \\ g(a+h) &= g(a) + Dg(a) \cdot h + \underline{R}_a^g(h) \\ f \cdot g(a+h) &= (f(a) + Df(a) \cdot h + \underline{R}_a^f(h))(g(a) + Dg(a) \cdot h + \underline{R}_a^g(h)) \\ &= f(a) \cdot g(a) + (\underbrace{Df(a) \cdot g(a)}_{\in \text{Mat}(1 \times n, \mathbb{R})}) \cdot h + (\underbrace{f(a) \cdot Dg(a)}_{\in \text{Mat}(1 \times n, \mathbb{R})}) \cdot h \\ &\quad + \underbrace{(Df(a) \cdot h + \underline{R}_a^f(h))(Dg(a) \cdot h + \underline{R}_a^g(h))}_{\frac{\cdot}{\|h\|} \xrightarrow{h \rightarrow 0} 0 \text{ für } h \rightarrow 0}. \end{aligned}$$

3.4.ii) g ist in a stetig $\implies \exists$ Umgebung von a s. d. $g(x) \neq 0 \forall x \in U$ (wie in der DIFF I: Sei o.B.d.A. $g(a) > 0$. Sei $\varepsilon := g(a)/2$. Sei $\|\cdot\|$ irgendeine Norm auf \mathbb{R}^n . Dann gibt es ein $\delta > 0$ s. d.

$$\begin{aligned} |g(x) - g(a)| &< \varepsilon \quad \forall x \in B_\delta^{\|\cdot\|}(a) \\ \implies -\frac{g(a)}{2} &< g(x) - g(a) < \frac{g(a)}{2} \quad \forall x \in B_\delta^{\|\cdot\|}(a), \end{aligned}$$

also $0 < \frac{g(a)}{2} < g(x) < \frac{3}{2}\frac{g(a)}{2}$.) \implies Auf U ist f/g wohldefiniert. Die Berechnung der Ableitung ist analog zu 3.4.i), nachdem man sich überlegt hat, dass

$$\frac{1}{g} = \text{Inv} \circ g, \quad \text{Inv}(t) = \frac{1}{t}$$

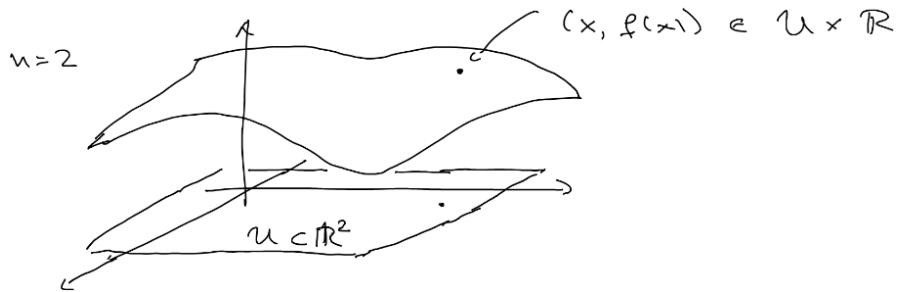
und somit nach der Kettenregel

$$D\left(\frac{1}{g}\right)(a) = D\text{Inv}(g(a)) \cdot Dg(a)$$

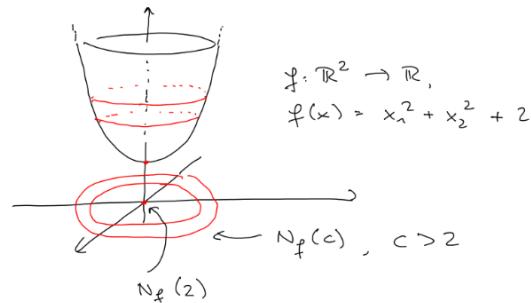
und $D\text{Inv}(t) = -\frac{1}{t^2}$ (DIFF I). \square

3.I. Geometrische Anschauung, partielle Ableitung

DIFF I: Ableitung beschreibt Rate der Veränderung. Höher-dimensional: Sei $f: U \rightarrow \mathbb{R}$, $U \subset \mathbb{R}^n$. Betrachte den Graph $\Gamma_f = \{(x, f(x)) \mid x \in U\}$ (vgl. die Diskussion bei 2.11.b))



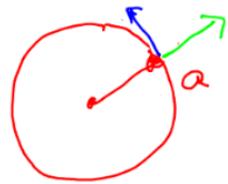
Definition (Niveau-Mengen). Zu $c \in \mathbb{R}$ setze $N_f(c) := \{x \in U \mid f(x) = c\}$.



Es gilt $N_f(c) = \emptyset$ für $c < 2$.

Beispiel. Entlang der Niveaumengen ist f konstant. Wie wird das in der Ableitung sichtbar?

Im Beispiel oben ist $Df(a) = (2a_1, 2a_2)$ (check!). Sei $a = (r \cos \phi, r \sin \phi)$, $r > 0$. Betrachte $f(a + h) = f(a) + Df(a) \cdot h + R_a(h)$. Ist $h = (-\varepsilon \sin \phi, \varepsilon \cos \phi)$, $\varepsilon > 0$ (in „Richtung“ der Niveaumenge), so ist $Df(a) \cdot h = 0$.

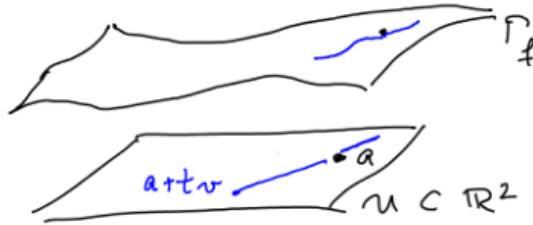


Ist dagegen $h = (\varepsilon \cos \phi, \varepsilon \sin \phi)$ (von der Niveaumenge weg), so ist $Df(a) \cdot h = 2r\varepsilon > 0$. Das wollen wir im Folgenden systematisch studieren.

Definition. Sei $f: U \rightarrow \mathbb{R}^m$, $U \subset \mathbb{R}^n$ offen, gegeben. Für $a \in U$ und $v \in \mathbb{R}^n$ heißt der Grenzwert (falls er existiert)

$$\partial_v f(a) := \lim_{\substack{t \rightarrow 0 \\ \text{in } \mathbb{R}^m}} \frac{f(a + tv) - f(a)}{t}$$

die *Richtungsableitung von f in a in Richtung v*.



Bemerkungen / Beispiele 3.5. i) $\partial_v f(a) = \frac{d}{dt} \Big|_{t=0} g_{a,v}(t) = g'_{a,v}(0)$, $g_{a,v}(t) = f(a + tv)$.

ii) $f = (f_1, \dots, f_m)^T$, so gilt

$$\partial_v f(a) = (\partial_v f_1(a), \dots, \partial_v f_m(a))^T$$

iii) $f: (x_1, x_2) \mapsto x_1^2 + x_2^2 + 2$. Sei $a = (r \cos \phi, r \sin \phi)$. Ist $v = (\varepsilon \cos \phi, \varepsilon \sin \phi)$, so ist
iv)

$$g_{a,v}(t) = ((r + \varepsilon t) \cos \phi)^2 + ((r + \varepsilon t) \sin \phi)^2 + 2$$

und somit $\partial_v f(a) = g'_{a,v}(0) = 2(r + \varepsilon \cdot 0)\varepsilon = 2r\varepsilon$.

Ist $v = (-\varepsilon \sin \phi, \varepsilon \cos \phi)$, so ist

$$g_{a,v}(t) = (r \cos \phi - \varepsilon t \sin \phi)^2 + (r \sin \phi + \varepsilon t \cos \phi)^2$$

und somit

$$\partial_v f(a) = g'_{a,v}(0) = 2(r \cos \phi - 0)(-\varepsilon \sin \phi) + 2(r \sin \phi + 0)(\varepsilon \cos \phi) = 0.$$

Das ist kein Zufall, denn es gilt

Satz 3.6. Sei $f: U \rightarrow \mathbb{R}^m$, $U \subset \mathbb{R}^n$ offen, in $a \in U$ differenzierbar. Dann besitzt f die Richtungsableitungen

$$\partial_v f(a) = Df(a) \cdot v \quad \forall v \in \mathbb{R}^n$$

und $Df(a)$ hat bezüglich der Standardbasis e_1, \dots, e_n die Matrix Darstellung

$$\begin{pmatrix} \partial_1 f_1(a) & \dots & \partial_n f_1(a) \\ \partial_1 f_2(a) & \dots & \partial_n f_2(a) \\ \vdots & & \vdots \\ \partial_1 f_m(a) & \dots & \partial_n f_m(a) \end{pmatrix} \in \text{Mat}(m \times n, \mathbb{R}),$$

„Jacobi-Matrix“, wobei $\partial_j f(a) = \partial_{e_j} f(a) = Df(a) \cdot e_j = j\text{-te Spalte}$.

Beweis. Für $v = 0$ sind beide Seiten 0 ✓.

Für $v \neq 0$ betrachte

$$\begin{aligned} & \| (f(a + tv) - f(a))/t - Df(a) \cdot v \|_{\sim} \text{ (Norm auf } \mathbb{R}^m) \\ &= \frac{1}{|t|} \| f(a + tv) - (f(a) + Df(a) \cdot (tv)) \|_{\sim} \\ &= \frac{1}{\|t \cdot v\|} \| f(a + tv) - (f(a) + Df(a) \cdot (tv)) \|_{\sim} \cdot \|v\|. \end{aligned}$$

↑
Homogenität
Norm auf \mathbb{R}^n

Differenzierbarkeit \implies strebt gegen 0 für $tv \rightarrow 0$, also für $t \rightarrow 0 \implies$ Die Richtungsableitungen existieren und

$$\partial_v f(a) = Df(a) \cdot v$$

und bezüglich der kanonischen Basen gilt

$$\begin{aligned} \partial_j f(a) &= Df(a) \cdot e_k = j\text{-te Spalte von } Df(a). & \square \\ & \left(\begin{array}{c} \partial_j f_1(a) \\ \vdots \\ \partial_j f_m(a) \end{array} \right) \end{aligned}$$

Achtung. Umgekehrt genügt die Existenz der Richtungsableitungen $\partial_1 f, \dots, \partial_n f$ nicht, um Differenzierbarkeit zu garantieren!

Beispiel.

$$f(x, y) = \begin{cases} \frac{xy}{x^2+y^2} & (x, y) \neq (0, 0) \\ 0 & (x, y) = (0, 0) \end{cases}$$

$\partial_1 f(x, y) = \frac{d}{dt} \Big|_{t=0} f(x + t, y), \partial_2 f(x, y) = \frac{d}{dt} \Big|_{t=0} f(x, y + t)$. Wegen $f(x, 0) = 0 \quad \forall x, f(0, y) = 0 \quad \forall y$, ist $\partial_1 f(0, 0) = 0 = \partial_2 f(0, 0)$. Aber f ist in 0 nicht stetig (betrachte etwa $(1/n, 1/n)$), also nicht differenzierbar.

Vorlesung 7

Mo 11.05. 10:15

3.II. Beispiele und Erläuterungen

Wir hatten letztes Mal gesehen, dass, wenn $f: U \rightarrow \mathbb{R}^m$, $U \subset \mathbb{R}^n$ offen, in $a \in U$ differenzierbar ist, dass dann die Ableitung mit Hilfe der *partiellen Ableitungen*, also der Richtungsableitungen in Richtung der kanonischen Basis geschrieben werden kann,

$$Df(a) = \begin{pmatrix} \partial_1 f_1 & \dots & \partial_n f_1 \\ \vdots & & \vdots \\ \partial_1 f_m & \dots & \partial_n f_m \end{pmatrix},$$

dass aber die Existenz der partiellen Ableitungen nicht unbedingt Differenzierbarkeit garantiert.

Konkret kann man also so vorgehen: Man bestimmt die partiellen Ableitungen und überprüft dann, ob Differenzierbarkeit vorliegt.

Bemerkung 3.7. Berechnung von partiellen Ableitungen. Es gilt $\partial_j f(a) = g'_{a_0 e_j}(0)$, wobei

$$\begin{aligned} g_{a_i e_j}(t) &= f(a + te_j) = f(a_1, \dots, a_j + t, \dots, a_n) \quad t \in (-\nu, \varepsilon) \\ &\text{s. d. } a + te_j \text{ noch im Definitionsbereich von } f \text{ liegt.} \end{aligned}$$

⇒ Um $\partial_j f(a)$ zu berechnen, kann man die gewöhnlichen Ableitungen bezüglich der j -ten Koordinate bestimmen (und stellt sich die Übrigen als Konstanten vor).

Beispiele 3.8. i) $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, $f(x) = x_1^2 + x_2^2 + 2$.

$$\partial_1 f(a) = 2a_1 \quad \partial_2 f(a) = 2a_2$$

f ist in der Tat differenzierbar in allen $a \in \mathbb{R}^2$, denn

$$\begin{aligned} f(a + h) &= (a_1 + h_1)^2 + (a_2 + h_2)^2 + 2 \\ &= f(a) + A \cdot h + \underbrace{\|h\|_E^2}_{R_a(h)}. \end{aligned}$$

mit $A = \begin{pmatrix} 2a_1 & 2a_2 \end{pmatrix}$ und

$$\frac{R_a(h)}{\|h\|} \leq C \|h\| \rightarrow 0.$$

ii) $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, $n \geq 2$, $f(x) = \|x\|_{\text{E}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}$.

$a \neq 0$ Mittels Kettenregel aus DIFF I:

$$\partial_j f(a) = \frac{1}{2} \frac{1}{\|x\|_{\text{E}}} \cdot 2x_j \Big|_{x=a} = \frac{a_j}{\|a\|_{\text{E}}}$$

$$a = 0$$

$$\partial_j f(0) = \frac{d}{dt} f(0, \dots, \underset{j-\text{te}}{t}, \dots, 0) = \frac{d}{dt} \Big|_{t=0} |t|.$$

\Rightarrow Die partiellen Ableitungen in $a = 0$ existieren nicht (DIFF I: Für $h \in \mathbb{R}$ ist $|h| - 0/h = \pm 1 \not\rightarrow 0$ für $h \searrow 0$ bzw. $h \nearrow 0$). \Rightarrow f ist *nicht* differenzierbar in $a = 0$.

Für $a \neq 0$ gilt jedoch: $\sqrt{\cdot}: \mathbb{R}_{>0} \rightarrow \mathbb{R}$ ist differenzierbar (DIFF I) und ebenso die polynomiale Funktion $x \mapsto \sum_{i=1}^n x_i^2 \Rightarrow f$ ist differenzierbar auf $\mathbb{R}^n \setminus \{0\}$.

Wir hätten $Df(a)$, $a \neq 0$ auch mit der höherdimensionalen Kettenregel bestimmen können:

$$Df(a) = Dw(p(a)) \cdot Dp(a) = \frac{1}{2\sqrt{p(a)}} \cdot (2a_1 \dots 2a_n)$$

$$w: \mathbb{R}_{>0} \rightarrow \mathbb{R}, \quad w(t) = \sqrt{t}, \quad p(a) = \sum_{i=1}^n a_i^2.$$

iii) Eine weitere Anwendung der Kettenregel. Betrachte die „Polarkoordinaten“

$$g: \mathbb{R}_{>0} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^2$$

$$g(r, \phi) = (r \cos \phi, r \sin \phi)^T$$



und $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$.

$$D(f \circ g)(r, \phi) = Df(g(r, \phi)) \cdot Dg(r, \phi)$$

$$Dg(r, \phi) = \begin{pmatrix} \partial_1 g(r, \phi) & \partial_2 g(r, \phi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & -r \sin \phi \\ \sin \phi & r \cos \phi \end{pmatrix}.$$

Somit

$$\begin{aligned} D(f \circ g)(r, \phi) &= \begin{pmatrix} \partial_1 f(g(r, \phi)) & \partial_2 f(g(r, \phi)) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \phi & -r \sin \phi \\ \sin \phi & r \cos \phi \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \partial_1 f(g(r, \phi)) \cdot \cos \phi + \partial_2 f(g(r, \phi)) \cdot \sin \phi \\ -\partial_1 f(g(r, \phi)) \cdot r \sin \phi + \partial_2 f(g(r, \phi)) \cdot r \cos \phi \end{pmatrix}^T. \end{aligned}$$

Man schreibt dafür manchmal

$$\begin{aligned} \partial_r &= \cos \phi \partial_x + \sin \phi \partial_y \\ \partial_\phi &= -r \sin \phi \partial_x + r \cos \phi \partial_y. \end{aligned}$$

Aber oft ist es *viel* übersichtlicher, die partiellen Ableitungen *nicht* nach den Namen der Variablen zu benennen, sondern durchzunummerieren!

Beispiel. $f(x, y) = \frac{xy}{x^2+y^2}$ auf $U = \mathbb{R}^2 \setminus \{0\}$.

$$\begin{aligned} Df(x, y) &= \begin{pmatrix} \frac{y(y^2-x^2)}{(x^2+y^2)^2} & \frac{x(x^2-y^2)}{(x^2+y^2)^2} \end{pmatrix} \\ D(f \circ g)(r, \phi) &= \frac{1}{r} (\cos^2 \phi - \sin^2 \phi) \begin{pmatrix} \overbrace{-\sin \phi \cos \phi + \cos \phi \sin \phi}^{=0} \\ \overbrace{r \sin^2 \phi + r \cos^2 \phi}^{=r} \end{pmatrix}^T \\ &= (0, \cos^2 \phi - \sin^2 \phi). \end{aligned}$$

In diesem Fall rechnet man allerdings schneller direkt:

$$D(f \circ g)(r, \phi) = D(\tilde{f})(r, \phi), \quad \tilde{f}(r, \phi) = \cos \phi \cdot \sin \phi.$$

Bemerkung / Definition 3.9. Wir hatten allgemeiner gesehen:

Ist $f: U \rightarrow \mathbb{R}^m$, $U \subset \mathbb{R}^n$ offen, differenzierbar in a , so gilt

$$\partial_v f(a) = Df(a) \cdot v \quad \forall v \in \mathbb{R}^n.$$

Ist speziell $m = 1$, so definiert man

$$\text{grad } f(a) := Df(a)^T = \begin{pmatrix} \partial_1 f(a) \\ \vdots \\ \partial_n f(a) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n$$

„Gradient von f in a “, und schreibt $\partial_v f(a) = \langle \text{grad } f(a), v \rangle$.

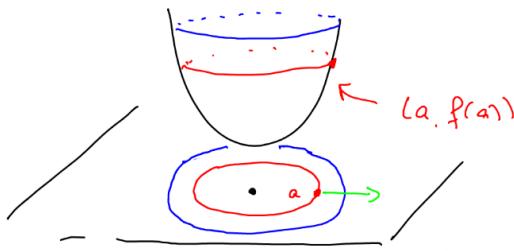
Ist $\text{grad } f(a) \neq 0$ und $\|v\|_E = 1$, so ist

$$\langle \text{grad } f(a), v \rangle = \|\text{grad } f(a)\|_E \cdot \cos \alpha,$$

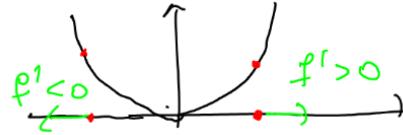
wobei α der zwischen $\text{grad } f(a)$ und v in \mathbb{R}^n eingeschlossene Winkel ist (in der durch die beiden Vektoren aufgespannten Ebene).

Es folgt: $\partial_v f(a)$ ist dann am größten, wenn v in die selbe Richtung zeigt wie $\text{grad } f(a)$
 \Rightarrow der Gradient gibt die Richtung stärksten Anstiegs von f in a an.

Beispiel. $f(x) = x_1^2 + x_2^2 + 2$.



Beispiel. $f(x) = x^2$.



Ist f lediglich *partiell differenzierbar*, d. h. die partiellen Ableitungen existieren auf U , so definiert man dennoch

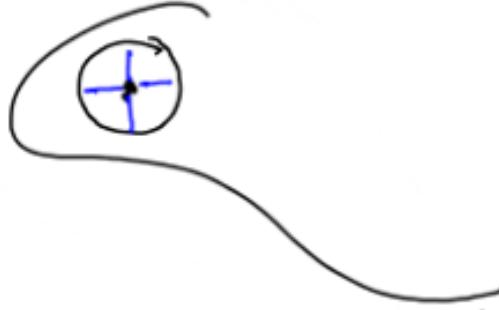
$$\text{grad } f(x) = (\partial_1 f(x), \dots, \partial_n f(x))^T$$

als den Vektor der partiellen Ableitungen bei x .

Satz 3.10. Sei $f: U \rightarrow \mathbb{R}$, $U \subset \mathbb{R}^n$ offen, partiell differenzierbar auf U . Sei $a \in U$ ein lokales Maximum (oder Minimum) von f , d. h. \exists Umgebung V von a s. d. $f(x) \leq f(a)$ (oder $f(x) \geq f(a)$ für alle $x \in V$). Dann gilt

$$\boxed{\text{grad } f(a) = 0}.$$

Beweis. Betrachte $g_i(t) := f(a + te_i)$, $i = 1, \dots, n$, mit $t \in (-\varepsilon, \varepsilon)$ s. d. $B_\varepsilon^{\|\cdot\|}(a) \subset U$.



Ist a lokales Extremum (also lokales Maximum oder Minimum) von f , so ist $t = 0$ lokales Extremum von g_i . Die g_i sind in $t = 0$ differenzierbar, denn

$$g'_i(0) = \partial_i f(a) \quad (\text{Definition Richtungsableitung})$$

DIFF I $\implies g'_i(0) = 0 \implies$ Beh. □

Beispiele. i) $f(x) = x_1^2 + x_2^2 + 2$. Außer in $a = 0$ kann kein Extremum vorliegen.

$$\text{ii) } f(x, y) = \begin{cases} \frac{xy}{x^2+y^2} & (x, y) \neq (0, 0) \\ 0 & (x, y) = (0, 0). \end{cases}$$

$\partial_1 f(0) = 0 = \partial_2 f(0)$, also könnte 0 ein Extremum sein. Ist es aber nicht, da für $x = y = \varepsilon > 0$ gilt $f(\varepsilon, \varepsilon) = \frac{1}{2} > 0$ und für $-x = y = \varepsilon > 0$. $f(-\varepsilon, \varepsilon) = -\frac{1}{2} < 0$.

Bemerkung. Hinreichende Kriterien für das Vorliegen lokaler Extremstellen werden wir erst später kennen lernen. Wie in der DIFF I benötigen wir dafür die 2. Ableitung.

Satz 3.11. Sei $f: U \rightarrow \mathbb{R}$, $U \subset \mathbb{R}^n$ offen. Existieren alle partiellen Ableitungen $\partial_j f(x)$ für alle $x \in U$, und sind sie stetig in $a \in U$, so ist f in a differenzierbar.

Beweis. Wir wählen ein Norm $\|\cdot\|$ auf \mathbb{R}^n . U offen $\implies \exists \delta > 0$ s. d. $B_\delta^{\|\cdot\|}(a) \subset U$. Sei $h \in B_\delta^{\|\cdot\|}(0)$, also $a + h \in B_\delta^{\|\cdot\|}(a)$. Setze

$$x^{(j)} := a + \sum_{i=1}^j h_i e_i \in \mathbb{R}^n \quad j = 0, \dots, n,$$

also $x^{(0)} = a$, $x^{(1)} = (a_1 + h_1, a_2, \dots, a_n), \dots, x^{(n)} = a + h$. Es ist $x^{(j)} - x^{(j-1)} = (0, \dots, 0, h_j, 0, \dots, 0) \implies (\text{MWS, DIFF I}) \exists \eta_j \in [0, 1] \text{ s. d.}$

$$\begin{aligned} f(x) &= \partial_j f(\underbrace{x_1^{(j-1)}, \dots, x_{j-1}^{(j-1)}, x_j^{(j-1)} + \eta_j h_j, a_{j+1}, \dots, a_n}_{x^{j-1} + \eta_j h_j e_j =: y^{(j)}}) \cdot h_j \\ \implies f(a+h) - f(a) &= \sum_{j=1}^n (f(x^{(j)}) - f(x^{(j-1)})) \\ &= \sum_{j=1}^n \partial_j f(y^{(j)}) h_j \\ &\stackrel{!}{=} \left(\partial_1 f(a) \dots \partial_n f(a) \right) \begin{pmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_n \end{pmatrix} + \underline{R}_a(h) \end{aligned}$$

also ist

$$\begin{aligned} \underline{R}_a(h) &= \sum_{j=1}^n (\partial_j f(y^{(j)}) - A_j) h_j \quad A = \partial_j f(a) \\ \stackrel{\text{CS}}{\implies} \frac{|\underline{R}_a(h)|}{\|h\|} &\leq C \|(\partial_1 f(y^{(1)}) - A_1, \dots, \partial_n f(y^{(n)}) - A_n)\|_{\mathbb{E}} \rightarrow 0 \quad h \rightarrow 0, \end{aligned}$$

denn $\lim_{h \rightarrow 0} y^{(j)} = \lim_{h \rightarrow 0} x^{(j-1)} + \eta_j h_j e_j = a$ (in \mathbb{R}^n) und die $\partial_j f$ sind in a stetig nach Voraussetzung, s. d.

$$\lim_{h \rightarrow 0} \partial_j f(y^{(j)}) = (\partial_j f)(\lim y^{(j)}) = \partial_j f(a). \quad \square$$

Bemerkungen 3.12. i) Man sieht: Sind die ∂_j auf U stetig, so ist auch die Ableitung $x \mapsto Df(x)$ eine stetige Abbildung $U \rightarrow \text{Mat}(m \times n, \mathbb{R})$. Man sagt in dem Fall: f ist *stetig differenzierbar*.

ii) Die Einschränkung auf reellwertige Funktionen ist keine, denn: $f: U \rightarrow \mathbb{R}^m$ ist genau dann in $a \in U \subset \mathbb{R}^n$ differenzierbar, wenn alle Komponentenfunktionen $f_j: U \rightarrow \mathbb{R}$ differenzierbar sind ($j = 1, \dots, m$)-

Beweis. 3.12.ii) $f(a+h) = f(a) + A \cdot h + \underline{R}(h)$, $A_{ji} = \partial_j f_j(a)$

$$\iff f_j(a+h) = f_j(a) + (\partial_1 f_j(a) \dots \partial_n f_j(a)) \cdot h + \underline{R}_j(h) \quad \forall j = 1, \dots, m$$

und

$$\frac{\underline{R}(h)}{\|h\|} \rightarrow 0 \text{ in } \mathbb{R}^m \iff \frac{\|\underline{R}(h)\|_{\max}}{\|h\|} \rightarrow 0 \iff \frac{|R|_j(h)}{\|h\|} \rightarrow 0 \quad j = 1, \dots, m.$$

3.12.i) Dito: $U \rightarrow \text{Mat}(m \times n, \mathbb{R})$ ist stetig \iff alle Komponentenfunktionen $A_{ij}: U \rightarrow \mathbb{R}$ sind stetig. \square

Bemerkung. Stetig differenzierbar \implies differenzierbar \implies partiell differenzierbar.

Die Umkehrungen sind im Allgemeinen falsch.

Bemerkung (Erinnerung (DIFF I) MWS). $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ differenzierbar, I Intervall, $\exists \eta \in [0, 1]$ s. d.

$$f(a + h) - f(a) = f'(a + \eta h) \cdot h.$$

Ist f stetig differenzierbar, folgt aus dem Hauptsatz der Differenzial- und Integralrechnung eine andere Variante:

$$f(a + h) - f(a) = \int_a^{a+h} f'(u) du = \int_0^1 f'(a + th) dt \cdot h.$$

Eine analoge Aussage wollen wir nun im \mathbb{R}^n beweisen.

Definition. Sei $A: I \rightarrow \mathbb{R}^k, I \subset \mathbb{R}$ Intervall, stetig. Dann ist das *Integral von A* über $[a, b] \in I$ definiert als

$$\int_a^b A(t) dt = \begin{pmatrix} \int_a^b A_1(t) dt \\ \vdots \\ \int_a^b A_k(t) dt \end{pmatrix}.$$

Insbesondere ist das Integral einer matrixwertigen, stetigen Funktion $A: I \rightarrow \text{Mat}(m \times n, \mathbb{R})$ die Matrix, deren Einträge gleich den Integralen der Komponenten von $A(t)$ ist, also

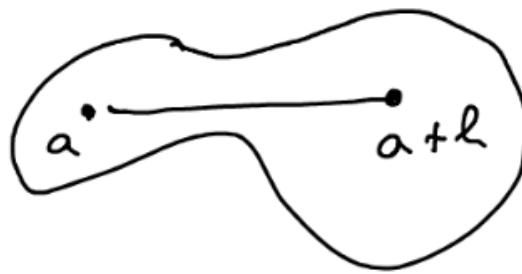
$$\int_a^b A(t) dt = \left(\int_a^b A_{ij}(t) dt \right)_{\substack{1 \leq i \leq m \\ 1 \leq j \leq n}}.$$

Satz 3.13. Sei $f: U \rightarrow \mathbb{R}^m, U \subset \mathbb{R}^n$, stetig differenzierbar. Sei $a \in U$ und $h \in \mathbb{R}^n$ s. d. die Verbindungsstrecke

$$\{ a + th \mid t \in [0, 1] \} \subset U.$$

Dann gilt:

$$f(a + h) - f(a) = \left(\int_0^1 Df(a + th) dt \right) \cdot h.$$



Beweis. Wir arbeiten zeilenweise, betrachten also die Komponentenfunktionen. Setze $g_i(t) := f_i(a + th)$. Dann ist g_i stetig differenzierbar, denn mit der Kettenregel gilt $g'_i(t) = Df_i(a + th) \cdot h$.

$$\begin{aligned}
 f_i(a + h) - f_i(a) &= g_i(1) - g_i(0) \\
 &= \int_0^1 g'_i(t) dt \\
 &= \int_0^1 Df_i(a + th) \cdot h dt \\
 &= \underbrace{\left(\int_0^1 Df_i(a + th) dt \right)}_{\int \text{ linear}} \cdot h \quad 1 \leq i \leq m.
 \end{aligned}$$

Dies sind die Zeilen der Matrix $\int_0^1 Df(a + th) dt$. □

Folgerung 3.14. Unter den Voraussetzungen von 3.13 gilt $\|f(x + h) - f(x)\|_E \leq C\|h\|$ mit

$$C = \sup_{t \in [0,1]} \|Df(x + th)\|_{\text{op.}}$$

Der Beweis benötigt noch ein Lemma:

Lemma 3.15. Sei $v: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^m$ stetig. Dann gilt

$$\left\| \int_a^b v(t) dt \right\|_E \leq \int_a^b \|v(t)\|_E dt.$$

Beweis. Sei $\mathbb{R}^m \ni u = \int_a^b v(t) dt$. Dann gilt

$$\begin{aligned}
\|u\|_E^2 &= \langle u, u \rangle \\
&= \left\langle \int_a^b v(t) dt, u \right\rangle \\
&= \int_a^b \langle v(t), u \rangle dt \\
&\quad \uparrow \text{Linearität} \\
&\leq \int_a^b \|v(t)\|_E \|u\|_E dt \\
&\quad \uparrow \text{Monotonie und C-S} \\
&= \|u\|_E \int_a^b \|v(t)\|_E dt.
\end{aligned}$$

□

Bemerkungen. i) Wegen der Äquivalenz aller Normen auf \mathbb{R}^n gilt diese Abschätzung ebenso wie Folgerung 3.14 auch für beliebige Normen auf \mathbb{R}^n :

$$\begin{aligned}
\left\| \int v(t) dt \right\| &\leq C_1 \left\| \int v(t) dt \right\|_E \\
&\leq C_1 \int \|v(t)\|_E dt \\
&\leq C_1 C_2 \int \|v(t)\| dt.
\end{aligned}$$

ii) Es folgt, dass für

$$X = (C([a, b], \mathbb{R}^k), \|\cdot\|_\infty),$$

$\sup\|v(t)\| < \infty$, da $[a, b]$ kompakt und v stetig.

$\int_a^b : X \rightarrow \mathbb{R}^k$ stetig ist, denn \int_a^b ist linear und

$$\begin{aligned}
\left\| \int_a^b \right\|_{\text{op}} &= \sup_{0 \neq v \in C} \left\| \int_a^b v(t) dt \right\| / \|v\|_\infty \\
&\leq C \sup_{v \neq 0} \left\| \int_a^b v(t) dt \right\|_E / \|v\|_\infty \\
&\leq C \sup_{v \neq 0} \int_a^b \|v(t)\|_E dt / \|v\|_\infty \\
&\leq \tilde{C}(b - a),
\end{aligned}$$

denn $\|v(t)\|_E \leq \sup_t \|v(t)\|_E \leq C_0 \sup_t \|v(t)\| = C_0 \|v\|_\infty$.

Beweis von Folgerung 3.14.

$$\begin{aligned}\|f(x+h) - f(x)\|_{\mathbb{E}} &\leq \int_0^1 \|Df(x+th) \cdot h\|_{\mathbb{E}} dt \\ &\leq \int_0^1 \|Df(x+th)\|_{\text{op}} \cdot \|h\|_{\mathbb{E}} dt.\end{aligned}$$

Das Supremum wird angenommen, da $t \mapsto \|Df(x+th)\|_{\text{op}}$ stetig ist und $[0, 1]$ kompakt. \square

3.III. Implizite Funktionen

Eine Anwendung der Kettenregel

Manchmal ist es einfacher, eine 1-dimensionale Ableitung über eine Ableitung einer höherdimensionalen Funktion zu berechnen. Betrachte etwa zwei differenzierbare Funktionen $f: U \rightarrow \mathbb{R}$, $U \subset \mathbb{R}^2$ offen, und $g: I \rightarrow \mathbb{R}$. Sei $\Gamma_g \subset U$ und es gelte

$$\underbrace{f(t, g(t))}_{\in \Gamma_g} = 0 \quad \forall t \in I.$$

Dann gilt (Kettenregel!) (mit $\text{Id}(t) = t$):

$$\begin{aligned}0 &= D(f \circ \begin{pmatrix} \text{Id} \\ g \end{pmatrix})(t) \\ &= Df((t, g(t))) \cdot D \begin{pmatrix} \text{Id} \\ g \end{pmatrix}(t) \\ &= (\partial_1 f(t, g(t)) \quad \partial_2 f(t, g(t))) \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ g'(t) \end{pmatrix}\end{aligned}$$

\implies Ist $\partial_2 f(t, g(t)) \neq 0$, so gilt

$$g'(t) = -\frac{\partial_1 f(t, g(t))}{\partial_2 f(t, g(t))}.$$

Beispiel. $g: (0, 1) \rightarrow \mathbb{R}$, $g(t) = \arcsin \sqrt{1-t^3}$, also $\sin g(t) = \sqrt{1-t^3}$, also $(\sin g(t))^2 =$

$1 - t^3$. Also gilt $f(t, g(t)) = 0$ für

$$\begin{aligned}
 f(x, y) &= (\sin y)^2 - 1 + x^3 \\
 Df(x, y) &= (3x^2, 2\sin y \cos y) \\
 \implies g'(t) &= -\frac{3t^2}{2\underbrace{\sin(g(t))}_{>0}\underbrace{\cos(g(t))}_{>0}} \\
 \text{da } t \in (0, 1) \text{ und } \sqrt{1-t^3} &\in (0, 1), \text{ somit } g(t) \in (0, \pi/2) \implies \cos g(t) = +\sqrt{1-\underbrace{\sin^2 g(t)}_{1-t^3}} = \\
 &\sqrt{t^3} \\
 &= -\frac{3t^2}{2\sqrt{1-t^3}\sqrt{t^3}}.
 \end{aligned}$$

Vorlesung 8

Do 14.05. 10:15

Satz 3.16. Sei $f: B_{r_1}^{\|\cdot\|}(a) \times B_{r_2}^{\|\cdot\|}(b) \rightarrow \mathbb{R}^m$ eine Abbildung mit $f(a, b) = 0$, die in (a, b) differenzierbar sei. Sei zudem $D_2 f(a, b)$, definiert über

$$Df(a, b) = (\underbrace{\partial_1 f(a, b) \cdots \partial_k f(a, b)}_{=: D_1 f(a, b) \in \text{Mat}(m \times k)} \underbrace{\partial_{k+1} f(a, b) \cdots \partial_{k+m} f(a, b)}_{=: D_2 f(a, b) \in \text{Mat}(m \times m)}),$$

invertierbar. Sei zudem $g: B_{r_1}(a) \rightarrow \mathbb{R}^m$ stetig und gelte $g(B_{r_1}(a)) \subset B_{r_2}(b)$ und $g(a) = b$ und $f(x, g(x)) = 0 \forall x \in B_{r_1}(a)$. Dann ist g in a differenzierbar und es gilt

$$Dg(a) = -(D_2 f(a, b))^{-1} D_1 f(a, b) \in \text{Mat}(m \times k, \mathbb{R}).$$

Beweis. Es gilt für $h = (h_1, h_2) \in B_{r_1}(0) \times B_{r_2}(0)$

$$f(\underbrace{(a, b) + h}_{=(a+h_1, b+h_2)}) = 0 + D_1 f(a, b) \cdot h_1 + D_2 f(a, b) \cdot h_2 + \underline{R}_{(a,b)}(h)$$

mit $\frac{\underline{R}_{(a,b)}(h)}{\|h\|} \rightarrow 0 \forall x \in B_{r_1}(a)$ folgt

$$\begin{aligned} 0 &= f(\underbrace{a + h_1}_{\in B_{r_1}(a)}, g(a + h_1)) = D_1 f(a, b) \cdot h_1 \\ &\quad + D_2 f(a, b) \cdot (g(a + h_1) - b) \\ &\quad + \underline{R}_{(a,b)}(h_1, g(a + h_1) - b) \quad \forall h_1 \in B_{r_1}(0). \end{aligned}$$

Also

$$\begin{aligned} g(a + h_1) &= g(a) - D_2 f(a, b)^{-1} \cdot D_1 f(a, b) \cdot h_1 \\ &\quad - \underbrace{D_2 f(a, b)^{-1} \cdot \underline{R}_{(a,b)}(h_1, g(a + h_1) - b)}_{=: \tilde{R}_{a,b}^g(h_1)} \quad \forall h_1 \in B_{r_1}(0). \end{aligned}$$

Wir sind fertig, wenn wir zeigen können, dass

$$\frac{\tilde{R}_{a,b}^g(h_1)}{\|h_1\|} \rightarrow 0 \text{ für } h_1 \rightarrow 0.$$

Wegen der Differenzierbarkeit von f in (a, b) $\exists \tilde{C}$ und $\delta_1, \delta_2 > 0$, $\delta_i < r_i$, s. d.

$$\|\underline{R}_{(a,b)}(h_1, h_2)\| \leq \tilde{C}(\|h_1\| + \|h_2\|) \quad \forall h_1 \in B_{\delta_1}(0), h_2 \in B_{\delta_2}(0),$$

also

$$\|\underline{R}_{(a,b)}(h_1, g(a+h_1) - b)\| \leq \tilde{C}(\|h_1\| + \|g(a+h_1) - b\|)$$

für alle h_1 s. d. $\|h_1\| < \delta_1$ und $\|g(a+h_1) - b\| < \delta_2$. Wegen der Stetigkeit von g in a gibt es $\delta > 0, \delta < \delta_1$, $\|g(a+h_1) - \underbrace{g(a)}_{=b}\| < \delta_2$ für alle $h_1 \in B_\delta(0)$. \square

- Bemerkungen.**
- i) Ist f, g wie in Satz 3.16 und f überall *stetig* differenzierbar. Ist dann $D_2f(a, b)$ invertierbar. So gibt es eine Umgebung $V_1 \times V_2$ von (a, b) s. d. $D_2f(x, y)$ invertierbar ist für alle $(x, y) \in V_1 \times V_2$ (denn $(x, y) \mapsto \det D_2f(x, y)$ ist stetig, da es ein Polynom stetiger Funktionen ist und $\det D_2f(a, b) \neq 0$).
 - ii) Das Beispiel vom letzten Mal ist genau von diesem Typ.

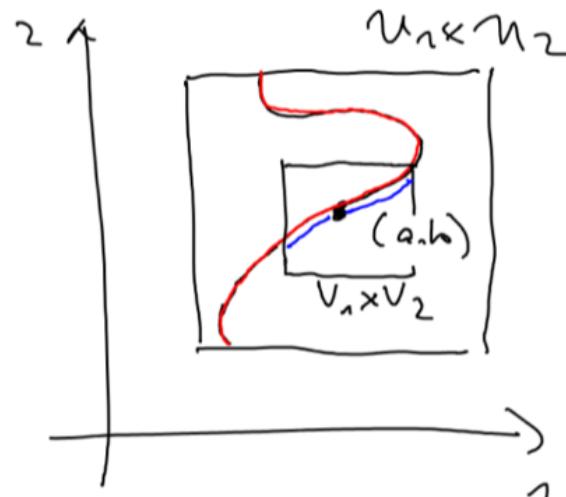
Umgekehrt kann man eine Funktion g wie oben durch „Auflösen der Gleichung $f(x, g(x)) = 0$ “ bestimmen (unter gewissen Voraussetzungen):

Satz 3.17 (Satz von der impliziten Funktion). Seien $U_1 \subset \mathbb{R}^k$, $U_2 \subset \mathbb{R}^m$ offen und $f: U_1 \times U_2 \rightarrow \mathbb{R}^m$ stetig differenzierbar. Sei $(a, b) \in U_1 \times U_2$ s. d. $f(a, b) = 0$ und $D_2f(a, b) \in \text{Mat}(m \times m, \mathbb{R})$ invertierbar. Dann gibt es offene Umgebungen $V_1 \subset U_1$, $V_2 \subset U_2$ von a bzw. b und eine stetige Funktion $g: V_1 \rightarrow \mathbb{R}^m$, $g(V_1) \subset V_2$, s. d. $f(x, g(x)) = 0 \forall x \in V_1$. Ist $(x, y) \in V_1 \times V_2$ s. d. $f(x, y) = 0$, so ist $y = g(x)$.

- Bemerkungen.**
- i) Aus 3.16 und der folgenden Bemerkung folgt, dass g in einer eventuell verkleinerten Umgebung $\tilde{V}_1 \subset V_1$ von a sogar stetig differenzierbar ist und gilt

$$Dg(x) = -D_2f(x, g(x))^{-1} \cdot D_1f(x, g(x)) \quad \forall x \in \tilde{V}_1$$

- ii) Für den Satz ist wichtig, dass $U_1 \times U_2$ gegebenenfalls verkleinert wird:

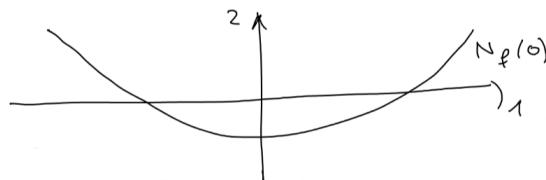


$$\Gamma_g = \{ (x, g(x)) \mid x \in V_1 \}$$

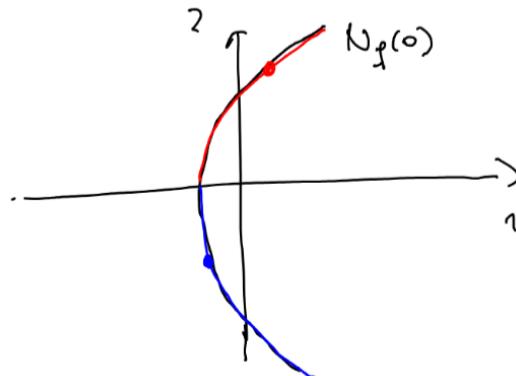
Betrachtete man auch den oberen Teil der Kurve, könnte man x nicht ein eindeutiges y zuordnen.

- iii) Die Einschränkung auf Definitionsbeiche der Form $U_1 \times U_2$ ist keine, sie vereinfacht nur die Notation. Ist f auf $U \subset \mathbb{R}^{k+m}$ offen, findet man stets $U_1 \subset \mathbb{R}^k$, $U_2 \subset \mathbb{R}^m$ s. d. $U_1 \times U_2 \subset U$.
- iv) Die Einschränkung auf $N_f(0)$ ist keine: Will man etwa die Gleichung $f(x, y) = c$ auflösen, wendet man des Satz auf $\tilde{f}(x, y) = f(x, y) - c$ an.
- v) Durch Umnummerierung kann man auch andere $m \times m$ -Untermatrizen von Df betrachten als die letzten m .
- vi) Unter den Voraussetzungen von 3.17 sagt man: g ist durch $f(x, y) = 0$ implizit gegeben und man löst $f(x, y) = 0$ nach y auf.

Beispiele. i) $f(x, y) = 3y - x^2 + 1$ auf \mathbb{R}^2 . $Df(a, b) = \begin{pmatrix} -2a & 3 \end{pmatrix}$, $3 \neq 0$ ist invertierbar, 3.17 $\implies \exists g: I \rightarrow \mathbb{R}$ s. d. $f(x, g(x)) = 0 \forall x \in I$. In diesem Fall sogar $I = \mathbb{R}$: $g(x) = \frac{1}{3}(x^2 - 1)$.



ii) $f(x, y) = 3x - y^2 + 1$ auf \mathbb{R}^2 . $Df(a, b) = \begin{pmatrix} 3 & -2b \end{pmatrix}$. 3.17 \Rightarrow Zu $b \neq 0$ gibt es $g: I \rightarrow \mathbb{R}$. $b > 0$: $g(x) = +\sqrt{3x+1}$, $x > -\frac{1}{3}$. $b < 0$: $g(x) = -\sqrt{3x+1}$.



$$f(x, g(x)) = 0$$

Beweis von Satz 3.17. Setze $B := D_2 f(a, b)$ und definiere eine Abbildung $h: U_1 \times U_2 \rightarrow \mathbb{R}^m$ vermöge

$$h(x, y) = y - b - B^{-1} f(x, y).$$

Dann gilt

$$D_2 h(x, y) = \mathbb{1} - B^{-1} D_2 f(x, y).$$

$\Rightarrow D_2 h(a, b) = 0 \Rightarrow$ (da alle Ableitungen stetig sind) $\exists W_1 \subset U_1$, $W_2 \subset U_2$ offene Umgebungen von a bzw. b s. d.

$$\|D_2 h(x, y)\| \leq \frac{1}{2} \quad \forall x \in W_1, \quad y \in W_2. \quad (*)$$

Wähle $r > 0$ s. d. $V_2 := B_r^{\|\cdot\|}(b) \subset W_2$. Es ist $h(a, b) = 0 \Rightarrow$ (da h differenzierbar ist und somit auch stetig) \exists offene Umgebung $V_1 \subset W_1$ von a s. d.

$$\varepsilon := \sup_{x \in V_1} \|h(x, b)\| < \frac{r}{2} \quad (**)$$

(auf einem Kompaktum $\subset W_1$ um a ist $x \mapsto h(x, b)$ beschränkt und wird auf einem hinreichend kleinen Kompaktum beliebig klein. Um V_1 offen zu erhalten, nehmen wir das Innere eines solchen Kompaktums).

Wir zeigen jetzt: Zu jedem $x \in V_1$ gibt es höchstens ein $y \in V_2$ s. d. $f(x, y) = 0$ also s. d. $h(x, y) = y - b$.

Sei also $x \in V_1$ und seien y_1 und y_2 s. d. $h(x, y_1) = y_1 - b$ und $h(x, y_2) = y_2 - b$.

$$\begin{aligned}
&\implies y_1 - y_2 = h(x, y_1) - h(x, y_2) \\
&\stackrel{\text{MWS und } (*)}{\implies} \|y_1 - y_2\| = \|h(x, y_1) - h(x, y_2)\| \\
&\quad = \|D_2 h(x, \zeta)\| \cdot \|y_1 - y_2\| \\
&\quad \zeta \text{ auf der Verbindungsstrecke zw. } y_1 \text{ und } y_2 \text{ (liegt in } V_2 = B_r(b)) \\
&\quad \leq \frac{1}{2} \|y_1 - y_2\| \\
&\implies \|y_1 - y_2\| = 0 \implies y_1 = y_2.
\end{aligned}$$

1) 2) Wir zeigen nun die Existenz einer Funktion g wie im Satz behauptet. Setze dazu $g_0(x) = b$ und definiere rekursiv für $x \in V_1$:

$$g_{j+1}(x) := b + h(x, g_j(x)).$$

a) Es gilt

$$\|g_{j+1} - g_j\|_{\infty, V_1} \leq 2^{-j} \varepsilon.$$

↑
aus (**)

Induktionsanfang:

$$\|g_1 - g_0\|_{\infty, V_1} = \|h(x, b)\|_{\infty, V_1} = \varepsilon.$$

Induktionsschritt: Sei die Behauptung für $i \leq n$ bewiesen.

$$\begin{aligned}
&g_{n+2}(x) - g_{n+1}(x) = h(x, g_{n+1}(x)) - h(x, g_n(x)) \\
&\stackrel{\text{MWS und } (*)}{\implies} \|g_{n+2} - g_{n+1}\|_{\infty, V_1} \leq \frac{1}{2} \|g_{n+1} - g_n\|_{\infty, V_1}.
\end{aligned}$$

Bemerkung. Der MWS darf tatsächlich angewendet werden. $g_{n+1}(x), g_n(x)$ und somit auch die Verbindungsstrecke zwischen ihnen liegen in V_2 , denn nach Induktionsvoraussetzung gilt für alle $j \leq n$

$$\|g_{j+1} - b\|_{\infty, V_1} \leq \sum_{i=0}^j \|g_{i+1} - g_i\| \leq 2\varepsilon < r$$

(da $g_{j+1} - b = \sum_{i=0}^j (g_{i+1} - g_i)$ ist). Somit darf der MWS auf

$$h(x, g_{n+1}(x)) - h(x, g_n(x))$$

angewendet werden.

b) Es folgt $\|g_n - b\|_{\infty, V_1} < r$ und somit $g_n(V_1) \subset V_2$. Denn

$$g_n = \sum_{j=0}^{n-1} (g_{j+1} - g_j) + b \quad (\text{Teleskopsumme}) \implies \|g_n - b\|_{\infty, V_1} \leq \sum_{j=0}^{n-1} 2^{-j} \varepsilon \stackrel{\substack{\uparrow \\ \text{geom. Reihe}}}{\leq} 2\varepsilon < r.$$

c) Zudem gilt: $\|\sum_{j=0}^{\infty} (g_{j+1} - g_j)\|_{\infty, V_1}$ hat die Majorante $\sum_{j=0}^{\infty} 2^{-j} \varepsilon$. \implies Die Reihe konvergiert gleichmäßig auf $V_1 \implies$ (DIFF I)

$$g := \lim_{n \rightarrow \infty} g_n = \sum_{j=0}^{\infty} (g_{j+1} - g_j) + b$$

ist stetig auf V_1 und

$$\|g - b\|_{\infty, V_1} \leq 2\varepsilon < r,$$

also $g(V_1) \subset V_2$.

Aus der Definition folgt durch Grenzübergang auf beiden Seiten (h ist stetig)

$$g(x) = b + h(x, g(x)) \quad \forall x \in V_1,$$

also $g(x) = g(x) - B^{-1}f(x, g(x))$, also

$$f(x, g(x)) = 0 \quad \forall x \in V_1. \quad \square$$

Folgerung 3.18. Sei $f: U \rightarrow \mathbb{R}$, $U \subset \mathbb{R}^2$ offen, stetig differenzierbar und sei $(a, b) \in U$, $f(a, b) = c$ und $\text{grad } f(a, b) \neq 0$. Dann kann man ein Stück der Höhenlinie $N_f(c)$ als Graph einer Funktion beschreiben. Denn sei $\partial_2 f(a, b) \neq 0$, Satz 3.17, angewandt auf $\tilde{f}(x, y) = f(x, y) - c$, impliziert:

\exists Intervalle I_1, I_2 , $a \in I_1$, $b \in I_2$, $I_1 \times I_2 \subset U$ und eine stetig differenzierbare Funktion (Bemerkung 3.17.i)) $g: I_1 \rightarrow \mathbb{R}$, mit $g(I_1) \subset I_2$ und

$$N_f(c) \cap I_1 \times I_2 = \left\{ (x, y) \in I_1 \times I_2 \mid \tilde{f}(x, y) = 0 \right\} = \{ (x, g(x)) \mid x \in I_1 \} = \Gamma_g.$$

Dito für den Fall, dass $\partial_1 f(a, b) \neq 0$ ist (mit vertauschten Rollen für x, y), also

$$N_f(c) \cap I_1 \times I_2 = \{ (g(x), x) \mid x \in I_2 \}.$$

Vorlesung 9

Mo 17.05. 10:15

Beispiele (Weitere zum Satz über implizite Funktionen). i) $f: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2, f(x, y, z) = \begin{pmatrix} x^2 - y^2 + 1 \\ x^2 - z^2 - 2 \end{pmatrix}$ ist stetig differenzierbar.

$$Df(x, y, z) = \begin{pmatrix} 2x & -2y & 0 \\ 2x & 0 & -2z \end{pmatrix}.$$

Ist $y_0 \cdot z_0 \neq 0$ (also beide $\neq 0$), so ist $-2 \begin{pmatrix} y_0 & 0 \\ 0 & z_0 \end{pmatrix}$ invertierbar.

Es gibt also ein offenes Intervall I , $x_0 \in I$ und eine offene Umgebung V_2 von $\begin{pmatrix} y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2 \setminus \text{Achsen}$ und eine stetig differenzierbare Funktion $g: I \rightarrow \mathbb{R}$ mit $g(I) \subset V_2$ s. d.

$$f(x, y, z) = C = f(x_0, y_0, z_0) \iff \begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix} = g(x)$$

und es gilt

$$g'(x) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \frac{1}{y} & 0 \\ 0 & \frac{1}{z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2x \\ 2x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x/g_1(x) & 0 \\ 0 & x/g_2(x) \end{pmatrix},$$

also $g'_1(x)g_1(x) = x$ und $g'_2(x)g_2(x) = x$. Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung

$$\begin{aligned} &\implies \int_{x_0}^x g'_j(t)g_j(t) dt = \frac{x^2}{2} - \frac{x_0^2}{2} \quad j = 1, 2 \\ &\quad \text{(Substitution)} \quad \int_{g_j(x_0)}^{g_j(x)} u du = \frac{1}{2}(g_j^2(x) - g_j^2(x_0)) \\ &\implies x^2 > x_0^2 - y_0^2: g_1(x) = \operatorname{sgn}(y_0) \sqrt{x^2 - x_0^2 + y_0^2} \\ &\quad x^2 > x_0^2 - z_0^2: g_2(x) = \operatorname{sgn}(z_0) \sqrt{x^2 - x_0^2 + z_0^2}. \end{aligned}$$

Beispiel. Für $(x_0, y_0, z_0) = (3, 2, -1)$

$$g: (2\sqrt{2}, \infty) \rightarrow \mathbb{R}^2 \quad g(x) = \begin{pmatrix} \sqrt{x^2 - 5} \\ -\sqrt{x^2 - 8} \end{pmatrix}$$



- ii) $f: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, $f(x, t) = t^n + \sum_{j=1}^n x_j t^{n-j}$, $f(x, t) = 0 \implies t$ Nullstelle des Polynoms $p_x(t) = f(x, t)$.

Sei t_0 eine einfache Nullstelle. Dann ist $D_2 f(x, t_0) \neq 0$, da $p_x(t) = (t - t_0) q_x(t)$ und $q_x(t_0) \neq 0$ und somit $D_2 f(x, t_0) = q_x(t_0) + \cancel{(t_0 - t_0)} q'_x(t_0)$.

$\implies \exists$ Umgebung U von $x_0 \in \mathbb{R}^n$ und ein stetig differenzierbare Funktion $g: U \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(x, g(x)) = 0$ und $g(x_0) = t_0 \implies$ Die einfachen Nullstellen eines Polynoms hängen in stetig differenzierbarer Art von den Koeffizienten ab, d. h. insbesondere hängen sie stetig davon ab, d. h. zu $\varepsilon > 0$, $\exists \delta > 0$ s. d. $|t - t_0| = |g(x) - g(x_0)| < \varepsilon$ für $x \in B_\phi(x_0) \subset U$.

Beispiel. $3t^2 - t$ Einfache Nullstelle $t_0 = \frac{1}{3}$.

$\frac{10}{3}t^2 - t$ Einfache Nullstelle $t_0 = \frac{3}{10}$.

- iii) Die Bedingung im Satz über implizite Funktionen ist *nicht* notwendig. $f(x, y) = y^2$ erfüllt in $(1, 0)$ die Bedingung $D_2 f(1, 0)$ invertierbar *nicht*, $f(x, y) = 0$ besitzt aber die Auflösung $g(x) = 0 \quad \forall 0$.

3.IV. Der Satz von der Umkehrabbildung

Sei $f: U \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig differenzierbar, $U \subset \mathbb{R}^n$. Gibt es einfach zu prüfende Kriterien, die garantieren, dass f umkehrbar ist mit stetig differenzierbarer Umkehrfunktion $g: f(U) \rightarrow \mathbb{R}^n$?

Notwendiges Kriterium ist, dass $Df(x)$ invertierbar ist, da mit der Kettenregel aus $g \circ f = \text{Id}_u$ folgt $Dg(f(x)) \cdot Df(x) = \mathbf{1}$. Tatsächlich ist sogar folgendes hinreichend:

Satz 3.19. Sei $U \subset \mathbb{R}^n$ offen, $f: U \rightarrow \mathbb{R}^n$, stetig differenzierbar. Sei $a \in U$ s. d. $Df(a)$ invertierbar ist. Dann gibt es eine offene Umgebung $V \subset U$ von a und eine offene

Umgebung $W \in \mathbb{R}^n$ von $b := f(a)$, s. d. $f: V \rightarrow \mathbb{R}^n$, V bijektiv auf W abbildet und die Umkehrabbildung $g: W \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig differenzierbar ist. Es gilt dann

$$Dg(f(x)) = Df(x)^{-1} \quad \forall x \in V.$$

Bemerkung. Die letzte Identität, die wir oben schon bewiesen hatten, leuchtet unmittelbar ein, wenn man sich überlegt, dass die Ableitung eine differenzierbare Funktion linear approximiert, und dass die Umkehrabbildung einer invertierbaren linearen Abbildung die inverse Matrix ist.

Beweis von 3.19. Betrachte $F: \mathbb{R}^n \times U \rightarrow \mathbb{R}^n$, $F(z, x) = z - f(x)$. Dann ist

$$DF(z, x) = \begin{pmatrix} \underbrace{\mathbf{1}_{n \times n}}_{D_1 F(z, x)} & \underbrace{-Df(x)}_{D_2 F(z, x)} \end{pmatrix}.$$

Wegen $F(b, a) = 0$ und $D_2 F(b, a) = -Df(a)$ invertierbar können wir den Satz von der impliziten Funktion 3.17 auf F anwenden und F nach x auflösen. Es gibt also offene Umgebungen $V_1 \subset \mathbb{R}^n$ von b und $V_2 \subset U$ von a und eine stetig differenzierbare Funktion (vgl. Bemerkung 3.17.i) nach 3.17) $g: V_1 \rightarrow \mathbb{R}^n$ mit $g(V_1) \subset V_2$ und $F(z, g(z)) = 0 \quad \forall z \in V_1$, also $z - f(g(z)) = 0 \quad \forall z \in V_1$ und für all $(z, x) \in V_1 \times V_2$ mit $F(z, x) = 0$ gilt $x = g(z)$.

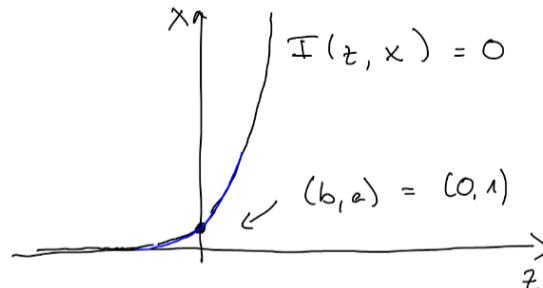
Setze nun

$$\begin{aligned} V &:= V_2 \cap f^{-1}(V_1) \\ &\quad \uparrow \text{Urbild von } V_1 \\ &= \{x \in V_2 \mid f(x) \in V_1\}. \end{aligned}$$

V ist offen (da f stetig und V_1, V_2 offen) und f bildet V bijektiv auf $W := V_1$ ab und die Umkehrabbildung ist g . \square

Man sagt, wenn f wie oben ist: „ f ist bei a lokal umkehrbar.“

Beispiele 3.20. i) $f(x) = \ln x$, $x > 0$, $a = 1$, $b = 0$, $f'(1) = 1$.

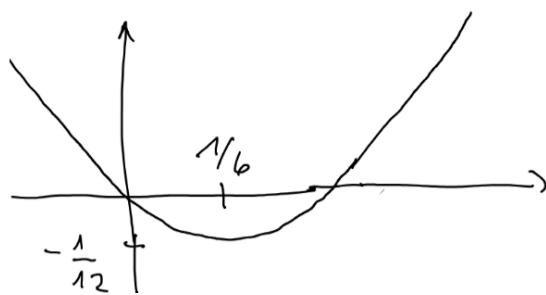


$$\Gamma_g = \{(z, g(z)) \mid z \in V\}$$

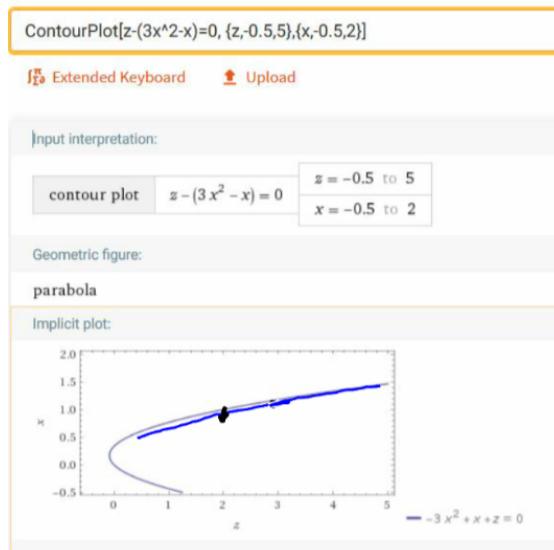
$$\begin{aligned}
 g'(\ln x) &= \left(\frac{1}{x}\right)^{-1} = x \\
 g'(z) &= g(z) \\
 \xrightarrow{\text{(DIFF I)}} g(z) &= C \exp(z),
 \end{aligned}$$

und wegen $g(0) = 1$ folgt $C = 1$.

- ii) $f(x) = 3x^2 - x$, $f(1) = 2$, $Df(1) = 5 \neq 0$.



$$F(z, x) = z - f(x) \quad N_f(0) = \{ (f(x), x) \mid x \in U \}$$



$N_F(0)$, $\Gamma_g = \{(z, g(z)) \mid z \in W\}$, von Wolfram Alpha.
 $= (f(x), x)$

Die Rekursionsformel $g_0(z) = a$, $g_{j+1}(z) = a + h(z, g_j(z))$,

$$h(z, x) = x - D_2 F(b, a)^{-1} \cdot F(z, x)$$

ist meist nicht sehr nützlich zur Bestimmung von g . Aber die Ableitung von g können wir sofort bestimmen: $Dg(z) = Df(g(z))^{-1}$ oder $Dg(f(x)) = Df(x)^{-1}$.

Im Beispiel: $g'(z) = \frac{1}{6g(z)-1}$ für $g(z) \neq 1/6$. \Rightarrow Ansatz $g(z) = \alpha + \sqrt{\beta + \gamma z}$

$$\begin{aligned} z &= f(g(z)) = 3(\alpha^2 + \beta + \gamma z + 2a\sqrt{\beta + \gamma z}) - \alpha - \sqrt{\beta + \gamma z} \\ 6\alpha &= 1 \\ \Rightarrow 3\alpha^2 + 3\beta - \alpha &= 0 \Rightarrow g(z) = \frac{1}{6} + \frac{1}{6}\sqrt{1 + 12z} \\ 3\gamma &= 1 \end{aligned}$$

auf $(-\frac{1}{12}, \infty)$ definiert \Rightarrow es muss $f > -\frac{1}{12}$ sein, also ist das maximale $V = (\frac{1}{12}, z)$.

iii) $f: \mathbb{R}_{>0} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^2$, $(r, \phi) \mapsto (r \cos \phi, r \sin \phi)^T$.

$$\begin{aligned} \det Df(r, \phi) &= \begin{pmatrix} \cos \phi & -r \sin \phi \\ \sin \phi & r \cos \phi \end{pmatrix} \\ \det Df(r, \phi) &= r > 0 \quad \forall (r, \phi). \end{aligned}$$

\implies Bei allen r, ϕ ist f lokal invertierbar. Es gilt

$$Df(r, \phi)^{-1} = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\frac{\sin \phi}{r} & \frac{\cos \phi}{r} \end{pmatrix}.$$

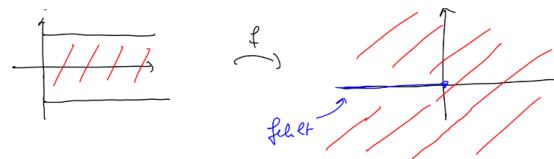
Setze $f(r, \phi) = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \implies r = \sqrt{x^2 + y^2}, \frac{x}{r} = \cos \phi, \frac{y}{r} = \sin \phi$.

$$\implies Df(r, \phi)^{-1} = Df(f(r, \phi)) = \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}} & \frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}} \\ \frac{-y}{x^2+y^2} & \frac{x}{x^2+y^2} \end{pmatrix}}_{=\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

mit g eine lokale Umkehrung.

Beachte. $f(\mathbb{R}_{>0} \times \mathbb{R}) = \mathbb{R}^2 \setminus \{0\}$, aber es gibt *keine* globale Umkehrfunktion $g: \mathbb{R}^2 \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{R}^2$, denn $f(r, \phi + k2\pi) = f(r, \phi) \quad \forall k \in \mathbb{Z}$, also f nicht injektiv. Man kann maximal Intervalle der Länge 2π (in ϕ) betrachten.

Betrachte etwa $U = \mathbb{R}_{>0} \times (-\pi, \pi)$. Das wird unter f bijektiv auf $W = \mathbb{R}^2 \setminus \{(x, 0) \mid x \leq 0\}$ abgebildet.



„geschlitzte Ebene“

Wie kommt man darauf, dass f V auf W abbildet? ϕ ist entweder $\neq 0$, dann ist $r \sin \phi \in (-r, 0) \cup (0, r)$, oder $\phi = 0$, dann ist $r \cos \phi = r > 0$.

$f|_U$ ist injektiv:

Ist $r \cos \phi = r' \cos \phi'$ und $r \sin \phi = r' \sin \phi'$, so ist $r^2 = r'^2 \implies$ (da, $r, r' > 0$) $r = r'$ und aus $\cos \phi = \cos \phi'$ folgt zunächst $\phi = \pm \phi'$, aber aus $\sin \phi = \sin \phi' = \pm \sin \phi$ folgt $\phi = +\phi'$.

$f|_U$ bildet surjektiv auf W ab:

Sei $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \in W$, d. h. es ist $y \neq 0$ oder $x > 0 \implies r = \{\sqrt{x^2 + y^2}\} > 0 \implies (\frac{x}{r})^2 + (\frac{y}{r})^2 = 1 \implies |x/r| \leq 1$. Es ist $x/r \neq -1$, denn sonst wäre $y/r = 0$, aber $(-1, 0) \notin W$. Somit ist $y = 0 \iff x/r = 1$ und wir legen einen Winkel ϕ fest mit $\cos \phi = x/r$. $\phi \in (-\pi, 0)$, falls $y < 0$, oder $(0, \pi)$, falls $y > 0$, oder $\phi = 0$, falls $y = 0$.

Behauptung. Für diesen Winkel gilt $\sin \phi = y/r$.

Beweis.

$$\sin \phi = \operatorname{sgn}(\sin \phi) \sqrt{\sin^2 \phi} = \operatorname{sgn}(y) \sqrt{1 - \cos^2 \phi} = \operatorname{sgn}(y) \sqrt{1 - x^2/r^2} = \operatorname{sgn}(y) |y|/r = y/r. \quad \square$$

Ist man nicht an einer maximalen Umgebung von (r_0, ϕ_0) interessiert, kann man so schneller zum Ziel:

Ist beispielsweise $-\pi/2 < \phi_0 < \pi/2$ betrachte $\phi \in (-\pi/2, \pi/2)$, woraus $x > 0$ folgt, so dass man recht schnell rät, dass $f|_V : \mathbb{R}_{>0} \times (-\pi/2, \pi/2) \rightarrow W = \mathbb{R}_{>0} \times \mathbb{R}$ bijektiv auf $W = \mathbb{R}_{>0} \times \mathbb{R}$ abbildet, indem man sich überlegt, dass die Umkehrfunktion g durch $g(x, y) = (\sqrt{x^2 + y^2}, \arctan y/x)^T$ gegeben ist (wohldefiniert für $x > 0$), da

$$g(r \cos \phi, r \sin \phi) = \underbrace{(r, \arctan \frac{\sin \phi}{\cos \phi})}_{\phi = \phi}$$

und es ist klar, dass $g|_W$ bijektiv auf V abbildet, da $\arctan : \mathbb{R} \rightarrow (-\pi/2, \pi/2)$ bijektiv ist, s. d. wenn $\arctan x/y = \arctan \tilde{x}/\tilde{y}$ gilt $y = \tilde{y}x$ und dann

$$\sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{x^2 + \frac{\tilde{y}^2 x^2}{\tilde{x}^2}} = \frac{x}{\tilde{x}} \sqrt{\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2}$$

nutzt gleich $\sqrt{\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2}$, wenn $x = \tilde{x}$ (und somit $y = \tilde{y}$) und $\mathbb{R}_{>0} \times \mathbb{R} \ni (x, y) \mapsto \sqrt{x^2 + y^2}$ bildet surjektiv auf $\mathbb{R}_{>0}$ ab (da streng monoton wachsend).

Es folgen einige etwas tiefsinnigere Folgen aus dem Umkehrsatz.

Satz 3.21. Sei $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig differenzierbar, $U \subset \mathbb{R}^n$ offen. Sei $V \subset U$ offen. Ist $Df(x)$ invertierbar für alle $x \in V$, so ist $f|_V$ eine offene Abbildung, d. h. offene Teilmengen $\subset V$ auf offene Mengen abgebildet.

Anti-Beispiel. $f: (0, 1) \rightarrow \mathbb{R}$, $f(x) = 1 \quad \forall x$. $f'(x) = 0$ nicht invertierbar. $\{1\}$ nicht offen in \mathbb{R} .

Beweis von 3.21. Sei $\tilde{V} \subset U$ offen, dann ist \tilde{V} auch offen U . Sei $b \in f(\tilde{V})$. Wähle ein $a \in \tilde{V}$ s. d. $b = f(a)$. Wende den Satz von der lokalen Umkehrfunktion auf $f|_{\tilde{V}}$ an
 $\Rightarrow \exists$ offene Umgebungen $V_1 \subset \tilde{V}$ und $W \subset \mathbb{R}^n$ von a beziehungsweise b s. d. $f|_{V_1}$ umkehrbar ist mit $g: W \rightarrow \mathbb{R}^n$ und insbesondere $f|_{V_1}$ bijektiv auf W abbildet. Somit gilt $W = f(V_1) \subset f(\tilde{V})$ und ist Umgebung von $b \Rightarrow f(\tilde{V})$ ist offen. \square

Satz 3.22 (Minimum- / Maximum-Prinzip). Sei $f: U \rightarrow \mathbb{R}^n$, $U \subset \mathbb{R}^n$, stetig differenzierbar. Sei $V \subset U$ offen und sei $Df(x)$ invertierbar für alle $x \in V$. Dann gilt für die Funktion

$$V \ni x \mapsto \|f(x)\|$$

- i) Sie besitzt kein Maximum.
- ii) Ist $f(x) \neq 0 \quad \forall x \in V$ besitzt sie kein Minimum.

Beachte. Man kann den Beweis dieses Satzes auf 3.10 zurückführen, obwohl $\|\cdot\|$ nur auf $\mathbb{R}^n \setminus \{0\}$ partiell differenzierbar ist. Wir wollen hier dennoch anders vorgehen:

Beweis. 3.22.i) Angenommen a ist Maximalstelle von $\|f\|$. Dann ist $f(a) \neq 0$, da sonst $\|f(x)\| = 0 \quad \forall x \in V$ und somit $f|_V = 0$ und $Df(x) = 0 \quad \forall x \in V$. 3.21 $\Rightarrow \exists \varepsilon > 0$ s. d. $B_\varepsilon(f(a)) \subset f(V)$. Setze $b := f(a) + \rho f(a)$ mit $\rho = \varepsilon / 2\|f(a)\|$

$$\begin{aligned} &\Rightarrow \|b - f(a)\| = \rho\|f(a)\| = \varepsilon/2 < \varepsilon \\ &\Rightarrow b \in B_\varepsilon \Rightarrow \exists x_0 \in V \text{ s. d. } b = f(x_0) \\ &\Rightarrow \|f(x_0)\| = \|b\| = (1 + \rho)\|f(a)\| > \|f(a)\|. \end{aligned}$$

3.22.ii) Analog mit $b = f(a) - \rho f(a)$. \square

Vorlesung 10

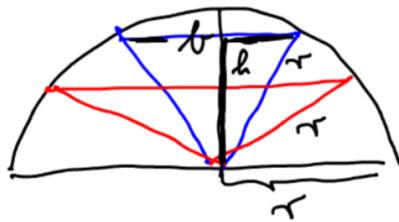
Do 21.05. 10:15

3.V. Lokale Extrema unter Nebenbedingungen

Wir betrachten folgende Situation:

Wir suchen Extremstellen einer Funktion f unter gewissen Nebenbedingungen z. B.

- a) (Mikro-Ökonomie) Es soll das Maximum einer Nutzenfunktion $f(x, y) = \sqrt{xy}$, $x > 0, y > 0$, unter der Budgetbedingung $64 = 2x + 8y$ bestimmt werden.
- b) (Geometrie) Welches Dreieck kopfüber im Halbkreis hat den größten Flächeninhalt? Also $f(b, h) = \frac{1}{2}bh$ unter der Nebenbedingung $\frac{1}{4}b^2 + h^2 = r^2$ (Pythagoras).



- c) Berücksichtige, dass eine Bewegung eingeschränkt ist, z. B. auf dem Innenrand einer Kugelschale (Nebenbedingung: $x^2 + y^2 + z^2 = r^2$).

Mathematisch geht es um folgendes Problem:

Definition 3.23. Sei $U \subset \mathbb{R}^n$ offen, $f: U \rightarrow \mathbb{R}$, sei $h: U \rightarrow \mathbb{R}^m$. Dann sagen wir f hat in $a \in U$ ein *lokales Maximum bzw. Minimum* (Extremum) unter der Nebenbedingung $h(x) = 0$, wenn: $a \in N_h(0)$ und es eine Umgebung U_0 von a gibt s. d. $f(a) \geq f(x)$ bzw. $f(a) \leq f(x) \forall x \in U_0 \cap N_h(0)$.

In einfachen Fällen kann man die Nebenbedingung direkt auflösen und die (3.18) Funktion einsetzen, z. B. in a)

$$y = 8 - \frac{1}{4}x \quad f(x, 8 - 1/4x) = \sqrt{x(8 - x/4)}.$$

Allgemeiner: Sei f, h wie in 3.23 und zudem f differenzierbar und $h: U \rightarrow \mathbb{R}^m$, $U \subset \mathbb{R}^{n-m} \times \mathbb{R}^m$, erfülle in $a = (a_1, a_2) \in N_h(0)$ die Bedingungen des Satzes über implizite Funktionen. Also gibt es Umgebungen V_1 von a_1 und V_2 von a_2 und eine stetig differenzierbare Funktion $g: V_1 \rightarrow V_2$ s. d. $N_h(0) \cap V_1 \times V_2 = \{(u, g(u)) \mid u \in V_1\}$. Also besitzt

in diesem Fall f eine lokales Extremum in a unter der Nebenbedingung $h = 0$ genau dann, wenn $u \mapsto f(u, g(u))$ ein lokales Extremum in a_1 besitzt.

Dies führt zur sogenannten

Satz 3.24 (Lagrange-Multiplikator-Regel). Sei $f: U \rightarrow \mathbb{R}$, $U \subset \mathbb{R}^n$ offen, in $a \in U$ differenzierbar. Sei $h: U \rightarrow \mathbb{R}^m$ stetig differenzierbar, $m < n$. Es sei $\text{rang } Dh(a) = m$.

Es besitze f in a unter der Nebenbedingung $h(x) = 0$ ein lokales Extremum. Dann gibt es $\lambda_1, \dots, \lambda_m \in \mathbb{R}$ (*Lagrange-Multiplikatoren*), s. d.

$$\text{grad } f(a) = \lambda_1 \text{grad } h_1(a) + \dots + \lambda_m \text{grad } h_m(a).$$

Beweis. Sei o.B.d.A. $U = U_1 \times U_2$ mit $U_1 \subset \mathbb{R}^{n-m}$, $U_2 \subset \mathbb{R}^m$, $a = (a_1, a_2) \in U_1 \times U_2$, (Notation $(x, y) \in U_1 \times U_2$) und $Dh(x, y) = (D_1h(x, y) \quad \underbrace{D_2h(x, y)}_{\in \text{Mat}(m \times m, \mathbb{R})})$ mit $D_2h(a_1, a_2)$

invertierbar.

Satz 3.17 $\implies \exists V_1$ offene Umgebung von a_1 , V_2 offene Umgebung von a_2 , $g: V_1 \rightarrow \mathbb{R}^m$ stetig differenzierbar, $g(V_1) \subset V_2$, $Dg(x) = -D_2h(x, g(x))^{-1} \cdot D_1h(x, g(x))$ und

$$N_h(0) \cap V_1 \times V_2 = \{(x, g(x)) \mid x \in V_1\}.$$

a ist lokale Extremstelle von f unter der Nebenbedingung $h(x) = 0 \implies a_1$ ist lokale Extremstelle von

$$V_1 \ni u \mapsto f(u, g(u)) = f \circ \begin{pmatrix} \text{Id} \\ g \end{pmatrix}(u)$$

\implies (Kettenregel und 3.10)

$$\begin{aligned} 0 &= Df \circ \begin{pmatrix} \text{Id} \\ g \end{pmatrix}(a_1) \\ &= Df(a_1, g(a_1)) \cdot \begin{pmatrix} \mathbb{1}_{n-m} \\ Dg \end{pmatrix}(a_1) \\ &= D_1f(a_1, a_2) - \underbrace{D_2f(a_1, a_2) \cdot D_2h(a_1, a_2)^{-1}}_{(1 \times m) \text{ mal } (m \times m) = (1 \times m) =: (\lambda_1, \dots, \lambda_m)} \cdot D_1h(a_1, a_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\implies D_1 f(a) &= (\lambda_1, \dots, \lambda_m) \cdot D_1 h(a) \\
&= (\lambda_1, \dots, \lambda_m) \cdot \begin{pmatrix} \partial_1 h_1 & \dots & \partial_{n-m} h_1 \\ \vdots & & \vdots \\ \partial_1 h_m & \dots & \partial_{n-m} h_m \end{pmatrix}(a) \\
&= \left(\sum_{j=1}^m \lambda_j \partial_1 h_j, \sum_{j=1}^m \lambda_j \partial_2 h_j, \dots, \sum_{j=1}^{m-m} \lambda_j \partial_{n-m} h_j \right) \\
&= \sum_{j=1}^m \lambda_j D_1 h_j(a).
\end{aligned}$$

Gleichzeitig gilt (Definition der λ_j)

$$D_2 f(a_1, a_2) \cdot D_j h(a_1, a_2)^{-1} =: (\lambda_1, \dots, \lambda_m), \quad (3.1)$$

also (wie oben)

$$\begin{aligned}
D_2 f(a_1, a_2) &= (\lambda_1, \dots, \lambda_m) \cdot D_2 h(a) = \sum_{j=1}^m \lambda_j D_2 h_j(a) \\
\implies (D_1 f(a) &\quad D_2 f(a)) = \sum_{j=1}^m \lambda_j (D_1 h_j(a) \quad D_2 h_j(a)). \quad \square
\end{aligned}$$

Wir nutzt man diesen Satz zur Lösung von Problemen wie oben?

Bemerkung 3.25. Unter Voraussetzungen an f und h wie oben betrachte das Gleichungssystem

$$\left. \begin{array}{l} \partial_1 f(a) + \lambda_1 \partial_1 h_1(a) + \dots + \lambda_m \partial_1 h_m(a) = 0 \\ \partial_2 f(a) + \lambda_1 \partial_2 h_1(a) + \dots + \lambda_m \partial_2 h_m(a) = 0 \\ \vdots \\ \partial_n f(a) + \lambda_1 \partial_n h_1(a) + \dots + \lambda_m \partial_n h_m(a) = 0 \\ h_1(a) = 0 \\ \vdots \\ h_m(a) = 0 \end{array} \right\} \quad (*)$$

(*) ist gleichbedeutend mit

$$Df(a) = 0, \quad (**)$$

wenn $F(a, \lambda) = f(a) + \sum_{j=1}^m \lambda_j h_j(a)$, denn $D_1 F = 0$ liefert die ersten n Zeilen von (*), $D_2 F = 0$ liefert die letzten m Zeilen von (*).

Man versucht dann (*) oder (**) zu lösen.

Beispiele. i) Zunächst b) von oben. $f: \mathbb{R}_{>0} \times \mathbb{R}_{>0} \rightarrow \mathbb{R}$, $f(b, h) = \frac{1}{2}bh$, $H(b, h) = \frac{1}{4}b^2 + h^2 - r^2$. $a = (b, h)$. $Df(a) = \left(\frac{1}{2}h, \frac{1}{2}b\right)$, $DH(a) = \left(\frac{1}{2}b, 2h\right)$. $h > 0 \implies$ die Voraussetzungen des Satzes sind erfüllt.

$$\begin{aligned} \partial_1 f(a) + \lambda \partial_1 H(a) &= \frac{1}{2}h + \frac{1}{2}b \stackrel{!}{=} 0 \\ \partial_2 f(a) + \lambda \partial_2 H(a) &= \frac{1}{2}b + \lambda 2h \stackrel{!}{=} 0 \\ H(a) &= \frac{1}{4}b^2 + h^2 - r^2 = 0 \end{aligned} \quad (*)$$

$$\implies \lambda = -b/4h \quad h = b^2/4h \implies 4h^2 = b^2$$

$$\stackrel{3. \text{ Zeile}}{\implies} \frac{1}{2}b^2 = r^2 \implies b = \sqrt{2r} \quad h = \frac{1}{\sqrt{2r}}.$$



Der Flächeninhalt wird maximal $1/2r^2$, denn für $b \rightarrow 0$ (spitzerwerdendes Dreieck), strebt $f \rightarrow 0$, ebenso für $h \rightarrow 0$ (breiterwerdendes Dreieck).

- ii) Sei $A \in \text{Mat}(n \times n, \mathbb{R})$ symmetrisch. Sei $f(x) := \langle x, Ax \rangle$ die zugehörige quadratische Form. Gesucht: Extrema von f unter der Nebenbedingung $h(x) = \|x\|_E^2 - 1 = 0$. $Dh(x) = 2x \neq 0 \forall x \in N_h(0)$. Wir können also unseren Satz anwenden

$$\begin{aligned} Df(a) &= 2A \cdot a \\ 2A \cdot a + \lambda 2a &\stackrel{!}{=} 0 \end{aligned} \quad (*)$$

und $\|a\|_E = 1$. Das heißt notwendig für das Vorliegen einer Extremstelle ist, dass a Eigenvektor ist. Da A symmetrisch, ist A diagonalisierbar $\implies \exists$ Eigenvektoren v_1, \dots, v_n . Wegen $f(v_j) = \langle v_j, Av_j \rangle = \lambda_j$ Eigenwert folgt: f wird maximiert von normierten Eigenvektoren zum größten Eigenwert und minimiert von denen zum kleinsten Eigenwert.

- iii) Gesucht ist der Punkt in der Ebene

$$E = \left\{ (x_1, x_2, x_3)^T \in \mathbb{R}^3 \mid x_1 + x_2 - x_3 = 0 \right\},$$

der von Punkt $(1, 0, 0)^T$ den kleinsten Abstand hat. Da $\{(1, 0, 0)^T\}$ kompakt ist und E abgeschlossen, gibt es einen solchen (vgl. unser Beispiel nach Satz 1.41).

Wir wollen also $f(x) = \|x - e_1\|_E^2$ minimieren unter der Neben-Bedingung $h(x) = x_1 + x_2 - x_2 = 0$.

$Dh(a) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \end{pmatrix}$ hat maximalen Rang (1) d. h. jeder gesuchte Punkt a muss erfüllen

$$\begin{aligned} 2(a_1 - 1) + \lambda &= 0 \\ 2a_2 + \lambda &= 0 \\ 2a_3 - \lambda &= 0 \\ a_1 + a_2 - a_3 &= 0, \end{aligned}$$

also ist $a = \begin{pmatrix} 2/3 & -1/3 & 1/3 \end{pmatrix}$ der einzige Kandidat für ein Extremum. Da es ein Minimum gibt, muss a dieses sein.

3.VI. Höhere Ableitungen, Taylorformel

Ist $f: U \rightarrow \mathbb{R}^m$, $U \subset \mathbb{R}^n$ offen, stetig differenzierbar, kann man sich fragen, ob auch die Ableitung $U \ni x \mapsto Df(x)$ als Funktion $Df: U \rightarrow \text{Mat}(m \times n, \mathbb{R})$ wieder differenzierbar ist (in a , auf ganz U , auf $V \subset U \dots$), also ob es eine *lineare* Abbildung $A: \mathbb{R}^n \rightarrow \text{Mat}(m \times n, \mathbb{R})$ gibt, s. d.

$$Df(a + h) = Df(a) + A(h) * \underline{R}_a^{Df}(h)$$

mit $\frac{\underline{R}_a^{Df}(h)}{\|h\|} \rightarrow 0$ wenn $h \rightarrow 0$. Hier ist $\underline{R}_a^{Df}: B_\delta(0) \rightarrow \text{Mat}(m \times n, \mathbb{R})$.

Benennt man $Df =: g$ sieht man schnell, dass alle Sätze über differenzierbare Abbildungen natürlich auf für g gelten, insbesondere die Eindeutigkeit der Abbildung, wenn sie existiert, Kettenregel etc. Nur kann man, wenn man nicht den Raum $\text{Mat}(m \times n, \mathbb{R})$ mit $\mathbb{R}^{m \times n}$, die Ausdrücke im Allgemeinen nicht mehr so leicht hinschreiben, etwa $A(h)$ als Produkt einer Matrix mit dem Vektor h .

Ist $m = 1$ oder betrachtet man nur die Komponentenfunktionen einer \mathbb{R}^m -wertigen Funktion, sieht man jedoch:

$$g := Df: U \rightarrow \text{Mat}(1 \times n, \mathbb{R})$$

nimmt Werte in den $1 \times n$ -Matrizen an, identifiziert man nun $\text{Mat}(1 \times n, \mathbb{R}) \simeq \mathbb{R}^n$ (Spaltenvektor), hat man es mit einer Funktion $g: U \rightarrow \mathbb{R}^n$ zu tun.

Einen *Kandidaten* für $Dg(a)$ findet man wieder über die partiellen Ableitungen

$$\left(\partial_1 g(a) \dots \dots \partial_n g(a) \right) \in \text{Mat}(n \times n, \mathbb{R}) \quad (3.2)$$

und

$$g(x) = \begin{pmatrix} \partial_1 f(x) \\ \vdots \\ \partial_n f(x) \end{pmatrix}$$

(wenn sie existieren). Insgesamt also

$$\begin{pmatrix} \partial_1^2 f(a) & \partial_2 \partial_1(a) \dots \dots \partial_n \partial_1 f(a) \\ \partial_1 \partial_2 f(a) & \partial_2^2(a) \dots \dots \partial_n \partial_2 f(a) \\ \vdots & \vdots \\ \partial_1 \partial_n f(a) & \partial_2 \partial_n f(a) \dots \dots \partial_n^2 f(a) \end{pmatrix} =: A$$

mit der Notation $\partial_j \partial_i f(a) = \partial_j g_i(a) = \partial_j(\partial_i f)(a)$ und $\partial_j^2 = \partial_j \partial_j$.

Dann berechnet man den Rest wie üblich:

$$g(a + h) = g(a) + A \cdot h + R_a^g(h)$$

und überprüft, ob $\frac{R_a^g(h)}{\|h\|} \rightarrow 0$ für $h \rightarrow 0$.

Oder man überprüft, ob die partiellen Ableitungen stetig sind. Wenn ja, folgt die Differenzierbarkeit von Df aus Satz 3.11.

Wenn nein, muss man prüfen, ob R_a^g das richtige Verhalten bei 0 hat. Wir werden allerdings bei den sogenannten höheren Ableitungen (wie der 2. Ableitung oben) meist stetig differenzierbare Funktionen betrachten.

Definition 3.26. $f: U \rightarrow \mathbb{R}$, $U \subset \mathbb{R}^n$ offen, heißt in a k -fach partiell differenzierbar, wenn alle partiellen Ableitungen

$$\partial_{j_1} f(a), \partial_{j_1} \partial_{j_2} f(a), \dots, \partial_{j_1} \partial_{j_2} \dots \partial_{j_k} f(a)$$

(Notation wie oben) $j_i \in \{1, \dots, n\}$ existieren.

Achtung. Beachte, dass man zur Berechnung einer partiellen Ableitung die Funktion in einer Umgebung des Punktes kennen muss. Um also etwa eine k -te partielle Ableitung von f in a zu berechnen, muss man die $(k-1)$ -te partielle Ableitung in einer Umgebung von a kennen.

Ist f auf U k -fach partiell differenzierbar und sind alle partiellen Ableitungen der Ordnung $\leq k$ stetig, so heißt f k -fach stetig partiell differenzierbar.

Beispiel. $f(x_1, \dots, x_4) = x_1^3 + x_2^2 x_3 - 3x_4 x_2$. $\partial_1^2 f(x) = 6x_1$, $\partial_2^2 \partial_4 f(x) = \partial_2^2(-3x_2) = 0$,

$$\partial_2 \partial_4 \partial_3 f(x) = \partial_2 \partial_4(2x_2 x_3 - 3x_4) = \partial_2(-3x_4) = 0.$$

Dass die beiden letzt genannten Ableitungen gleich sind, ist kein Zufall:

Satz 3.27 (Satz von Schwarz). Sei $f: U \rightarrow \mathbb{R}$, $U \subset \mathbb{R}^n$, zweimal stetig partiell differenzierbar. Dann gilt für alle $a \in U$ und alle $i, j \in \{1, \dots, n\}$

$$\partial_j \partial_i f(a) = \partial_i \partial_j f(a).$$

Beweis. Sei o.B.d.A. $n = 2$, $a = (a_1, a_2)$. $\exists \delta > 0$ s. d. $B_\delta(a_1) \times B_\delta(a_2) \subset U$. Setze zu
 $y \in B_\delta(a_2)$ ↑
Intervall!

$$F_y: B_\delta(a_1) \rightarrow \mathbb{R} \quad F_y(x) = f(x, y) - f(x, a_2).$$

MWS $\implies \exists \zeta \in B_\delta(a_1) = (a_1 - \delta, a_1 + \delta)$ und zwar zwischen a_1 und x s. d.

$$F_y(x) - F_y(a_1) = F'_y(\zeta)(x - a_1).$$

Es ist $F'_y(\zeta) = \partial_1 f(\zeta, y) - \partial_1 f(\zeta, a_2)$. Betrachte die Funktion $B_\delta(a_2) \ni y \mapsto \partial_1 f(\zeta, y)$.
MWS $\implies \exists \eta \in B_\delta(a_2) = (a_2 - \delta, a_2 + \delta)$ und zwar zwischen a_2 und y s. d.

$$\partial_1 f(\zeta, y) - \partial_1 f(\zeta, a_2) = \partial_2(\partial_1 f)(\zeta, \eta)(y - a_2).$$

Insgesamt folgt:

$$f(x, y) - f(x, a_2) - f(a_1, y) + f(a_1, a_2) = \partial_2 \partial_1 f(\zeta, \eta)(y - a_2) \cdot (x - a_1). \quad (*)$$

Dieselbe Konstruktion nehmen wir nun zu festen $x \in B_\delta(a_1)$ für $G_x(y) = f(x, y) - f(x, a_1)$ vor.

MWS:

$\exists \tilde{\eta} \in (a_2 - \delta, a_2 + \delta)$ zwischen a_2 und y s. d. $G_x(y) - G_x(a_2) = G'_x(\tilde{\eta})(y - a_2)$. Es ist $G'_x(\tilde{\eta}) = \partial_2 f(x, \tilde{\eta}) - \partial_2 f(x, a_2)$.

MWS:

$\exists \tilde{\zeta} \in (a_1 - \delta, a_1 + \delta)$ zwischen a_1 und x s. d. $\partial_2 f(x, \tilde{\eta}) - \partial_2 f(a_1, \tilde{\eta}) = \partial_1(\partial_2 f)(\tilde{\zeta}, \tilde{\eta})(x - a_1)$.

$$f(x, y) - f(x, a_1) - f(x, a_2) + f(a_1, a_2) = \partial_1 \partial_2 f(\tilde{\zeta}, \tilde{\eta})(y - a_2) \cdot (x - a_1). \quad (**)$$

Aus (*) und (**) folgt für $x \neq a_1, y \neq a_2$

$$\partial_2 \partial_1 f(\tilde{\zeta}, \tilde{\eta}) = \partial_1 \partial_2 f(\zeta, \eta),$$

mit $\zeta, \tilde{\zeta}$ zwischen a_1 und x und $\eta, \tilde{\eta}$ zwischen a_2 und y .

Grenzübergang $x \rightarrow a_1$ und $y \rightarrow a_2$ liefert wegen der Stetigkeit von $\partial_2 \partial_1 f$ und $\partial_1 \partial_2 f$ die Beh. \square

Anti-Beispiel.

$$f(x, y) = \begin{cases} xy \frac{x^2 - y^2}{x^2 + y^2} & (x, y) \neq (0, 0) \\ 0 & (x, y) = (0, 0) \end{cases}$$

Es gilt $\partial_2 \partial_1 f(0, 0) \neq \partial_1 \partial_2 f(0, 0)$. Denn partielle Ableitung in 0:

$$\partial_1 f(0, 0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(h, 0) - f(0, 0)}{h} = 0 = \partial_2 f(0, 0).$$

Um die zweiten Ableitungen zu bestimmen, müssen wir aber $\partial_1 f$ auch in der Nähe der 0 kennen. Daher bestimmen wir für $(x, y) \neq (0, 0)$

$$\begin{aligned} \partial_1 f(x, y) &= \frac{x^4 y + 4x^4 y^3 - y^5}{(x^2 + y^2)^2} \\ \partial_2 f(x, y) &= \frac{x^5 - x y^4 - 4x^3 y^4}{(x^2 + y^2)^2} \\ \implies \partial_2 \partial_1 f(0, 0) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} (\partial_1 f(0, h) - \partial_1 f(0, 0)) \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} (-h^5/h^4) = -1 \\ \partial_1 \partial_2 f(0, 0) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} (\partial_2 f(h, 0) - \partial_2 f(0, 0)) \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} (h^5/h^4) = +1. \end{aligned}$$

3.VII. Der Laplace-Operator

Sei $f: U \rightarrow \mathbb{R}$, $U \subset \mathbb{R}^n$ offen, zweimal partiell stetig differenzierbar. Man setzt

$$\Delta f(x) := \partial_1^2 f(x) + \partial_2^2 f(x) + \cdots + \partial_n^2 f(x)$$

und nennt $\Delta = \partial_1^2 + \cdots + \partial_n^2$ den *Laplace-Operator*.

Beispiele. i) $h: \mathbb{R}^n \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$, $h(x) = f(\|x\|_E)$ mit einer auf $\mathbb{R} \setminus \{0\}$ zweimal stetig partiell differenzierbaren Funktion f .

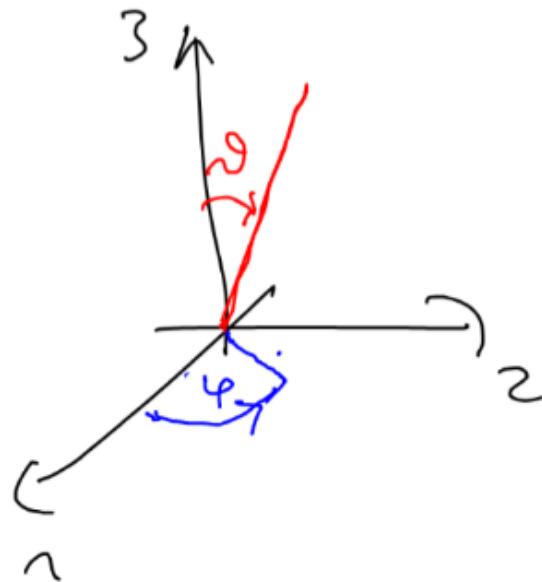
$$\text{grad } f(\|x\|_E) = f'(\|x\|_E) \frac{1}{\|x\|_E} x$$

und

$$\begin{aligned} \partial_i \left(f'(\|x\|_E) \frac{1}{\|x\|_E} x_i \right) &= f''(\|x\|_E) \frac{x_i}{\|x\|_E} \cdot \frac{x_i}{\|x\|_E} + f'(\|x\|_E) \left(-\frac{1}{2} \frac{2x_i}{\sqrt{\sum x_j^2}} \cdot x_i + \frac{1}{\|x\|_E} \right) \\ \implies \Delta h(x) &= f''(\|x\|_E) + f'(\|x\|_E) \frac{1}{\|x\|_E} (n - 1) \end{aligned}$$

ii) In Kugelkoordinaten: Sei $g: \mathbb{R}_{>0} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^3$

$$g(r, \theta, \phi) = \begin{pmatrix} r \cos \phi \sin \theta \\ r \sin \phi \sin \theta \\ r \cos \theta \end{pmatrix}.$$



g ist zweimal stetig partiell differenzierbar.

Sei f zweimal stetig differenzierbar auf $\mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$. Δf in Kugelkoordinaten bestimmen, also wenn wir $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = g(r, \theta, \phi)$ schreiben. Zunächst überlegen wir, was es heißt, f in Kugelkoordinaten zu schreiben.

Beispiel. $f(x, y, z) = xyz$.

$$f \circ g(r, \theta, \phi) = f(r \cos \phi \sin \theta, r \sin \phi \sin \theta, r \cos \theta) = r^3 \sin^2 \theta \cos \theta \cos \phi \sin \phi =: F(r, \theta, \phi).$$

Sodann:

$$Dg(r, \theta, \phi) = \begin{pmatrix} \cos \phi \sin \theta & r \cos \phi \cos \theta & -r \sin \phi \sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta & r \sin \phi \cos \theta & r \cos \phi \sin \theta \\ \cos \theta & -r \sin \theta & 0 \end{pmatrix}$$

$\det Dg(r, \theta, \phi) = r^2 \sin \theta \implies$ Ist $\theta \neq k\pi$, $k \in \mathbb{Z}$, so ist g lokal umkehrbar mit stetig differenzierbarer Umkehrfunktion $h: W \rightarrow V$ und in $(x, y, z) \in W$ gilt

$$\begin{aligned}
 f(\underbrace{x, y, z}_{=g(r, \theta, \phi)}) &= f \circ g \circ h(x, y, z) =: F \circ h(x, y, z) \\
 \implies Df(x, y, z) &= 1 \times 3\text{-Matrix} \cdot \underbrace{Dh(x, y, z)}_{\substack{\uparrow \\ DF(r, \theta, \phi)}} =: \tilde{F}(r, \theta, \phi) = \tilde{F} \circ h(x, y, z) \\
 \implies (\partial_1^2 + \partial_2^2 + \partial_3^2) f(x, y, z) &= \partial_1(\tilde{F} \circ h)_1(\underbrace{x, y, z}_{=:x}) + \partial_2(\tilde{F} \circ h)_2(x, y, z) + \partial_3(\tilde{F} \circ h)_3(x, y, z) \\
 &= \sum_{j=1}^3 (\partial_j \cdot \tilde{F}_j)(\underbrace{h(x)}_{=(r, \theta, \phi)}) \cdot \underbrace{\partial_j h_j(x)}_{=\frac{1}{\partial_j g_j(r, \theta, \phi)}} \quad (\text{Umkehrsatz}) \\
 &= \sum_{j=1}^3 \partial_j \tilde{F}_j(r, \theta, \phi) \cdot \frac{1}{\partial_j g_j(r, \theta, \phi)}.
 \end{aligned}$$

Eine etwas längere Rechnung, bei der man u. a. $Dg(r, \theta, \phi)$ invertieren muss, liefert die explizite Formel für die \tilde{F}_j , etwa

$$\tilde{F}_1 = \begin{pmatrix} \partial_1 F & \partial_2 F & \partial_3 F \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \phi \sin \theta \\ \frac{1}{r} \cos \phi \sin \theta \\ -\frac{1}{r} \sin \phi \end{pmatrix}.$$

↑
1. Spalte von $Dg(r, \theta, \phi)^{-1}$

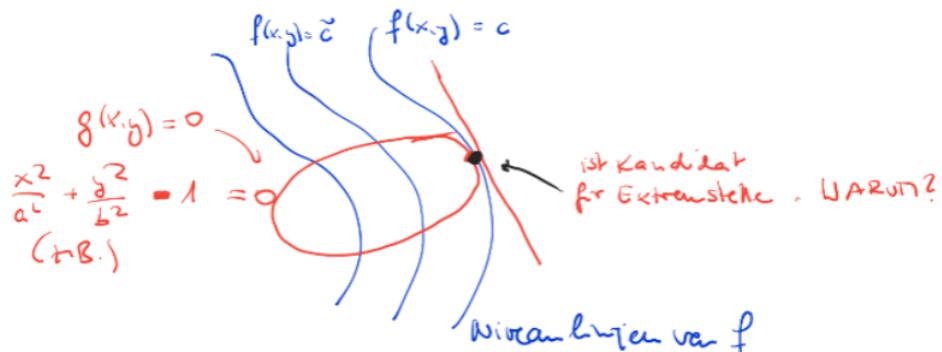
Von diesen berechnet man die jeweilige partielle Ableitung $\partial_j \tilde{F}_j$ und multipliziert mit $\frac{1}{\partial_j g_j}$.

z. B.

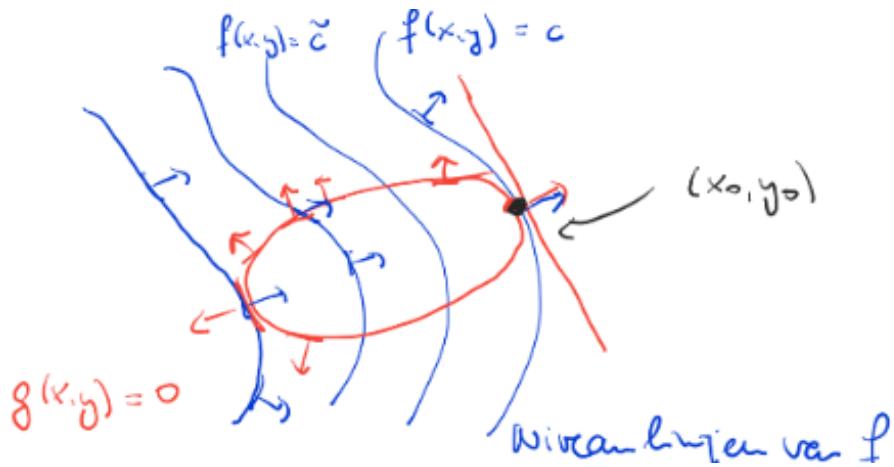
$$\begin{aligned}
 \partial_1 \tilde{F}_1 &= \partial_1^2 F \cdot \cos \phi \in \theta + \partial_1 \partial_2 \cdot \frac{1}{r} \cos \phi \cos \theta - \partial_2 F \cdot \frac{1}{r^2} \cos \phi \cos \theta - \partial_1 \partial_3 \cdot \frac{1}{r \sin \theta} \sin \phi + \partial_3 F \frac{1}{r^2} \frac{\sin \phi}{\sin \theta} \\
 1/\partial_1 g_1 &= \frac{1}{\cos \phi \sin \theta}.
 \end{aligned}$$

Das Ergebnis ist

$$\frac{1}{r^2} \partial_r (r^2 \partial_r F) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \partial_\theta (\sin \theta \partial_\theta F) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \partial_\phi^2 F.$$



Ergänzung. Tatsache: $\text{grad } h(x, y)$ steht senkrecht auf $h(x, y) = c$. (Der Gradient zeigt in die Richtung des stärksten Anstiegs der Funktion).



Tatsache 2: Liegt in $(x_0, y_0) \in \{(x, y) \mid g(x, y) = 0\}$ ein Extremum von f , so $\exists \lambda \in \mathbb{R}$ s. d. $\boxed{\text{grad } f(x_0, y_0) \lambda \text{grad } g(x_0, y_0)}$. Tatsache 1 + 2 gleichbedeutend $f(x, y) = c$ schmiegt sich in (x_0, y_0) tangential an $\{g(x, y) = 0\}$ an.

Das heißt, wenn wir das Gleichungssystem

$$\left. \begin{array}{l} \text{grad } f(x, y) - \lambda \text{grad } g(x, y) = 0 \\ g(x, y) = 0 \end{array} \right\} \quad (*)$$

lösen, haben wir Kandidaten für Extremstellen gefunden.

$$\begin{aligned} (*) \therefore \partial_x L &= 0 \\ \partial_y L &= 0 \\ \partial_\lambda L &= 0, \end{aligned}$$

L Lagrange-Funktion.

Vorlesung 11

Mo 25.05. 10:15

3.VIII. Taylor-Formel, lokale Extrema

Notation 3.28 (Multi-Index-Schreibweise). Sei $\alpha := (\alpha_1, \dots, \alpha_n) \in \mathbb{N}_0^n$. Dann definiert man

$$|\alpha| := \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n$$

$$\alpha! := \alpha_1! \alpha_2! \dots \alpha_n!.$$

Ist $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in \mathbb{R}^n$, so setzt man

$$x^\alpha := x_1^{\alpha_1} x_2^{\alpha_2} \dots x_n^{\alpha_n}.$$

Ist f eine $|\alpha|$ -mal stetig differenzierbare Funktion, so ist

$$\partial^\alpha f := \partial_1^{\alpha_1} \partial_2^{\alpha_2} \dots \partial_n^{\alpha_n} f$$

Lemma 3.29. Sei $f: U \rightarrow \mathbb{R}$, $U \subset \mathbb{R}^n$ offen, eine k -fach stetig differenzierbare Funktion. Sei $a \in U$ und sei $h \in \mathbb{R}^n$ so, dass $\{a + th \mid t \in [0, 1]\}$ ganz in U liegt.



Dann ist die Funktion $g: [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$, $g(t) = f(a + th)$ k -mal stetig differenzierbar und es gilt

$$g^{(k)}(t) = \sum_{|\alpha|=k} \frac{k!}{\alpha!} \partial^\alpha f(a + th) h^\alpha.$$

↑
Summe über alle $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n) \in \mathbb{N}_0^h$ mit $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n = k$

Beweis. 1. Wir zeigen per Induktion über k , dass gilt

$$g^{(k)}(t) = \sum_{i_1, \dots, i_k \in \{1, \dots, n\}} \partial_{i_1} \dots \partial_{i_k} f(a + th) h_{i_1} \dots h_{i_k}.$$

Induktionsanfang: $k = 1$

$$g'(t) = Df(a + th) \cdot h$$

Kettenregel

$$\sum_{i=1}^n \partial_i f(a + th) h_i.$$

$k - 1 \rightarrow k$

$$\frac{d}{dt} \left(\sum_{i_1, \dots, i_{k-1} \in \{1, \dots, n\}} \partial_{i_1} \cdots \partial_{i_{k-1}} f(a + th) h_{i_1} \cdots h_{i_{k-1}} \right) = \sum_{i_1, \dots, i_{k-1} \in \{1, \dots, n\}} \sum_{i=1}^n \partial_i \partial_{i_1} \cdots \partial_{i_{k-1}} f(a + th) h_{i_1} \cdots h_{i_k}$$

2. Kommt unter den Indizes (i_1, \dots, i_k) der Index 1 α_1 -mal vor, der Index 2 α_2 -mal, ..., der Index n α_n -mal, so ist

$$\partial_{i_1} \cdots \partial_{i_k} f(a + th) = \partial_1^{\alpha_1} \cdots \partial_n^{\alpha_n} f(a + th).$$

Es gibt

$$\frac{k!}{\alpha_1! \cdots \alpha_n!}$$

k -Tupel (i_1, \dots, i_k) von Zahlen $1 \leq i_j \leq n$, in denen 1 genau α_1 -mal, 2 genau α_2 -mal, ..., n genau α_n -mal vorkommt (ohne Beweis). \Rightarrow Beh. \square

Satz 3.30 (Taylorsche Formel). Sei $f: U \rightarrow \mathbb{R}$, $U \subset \mathbb{R}^n$ offen, $(k+1)$ -mal stetig differenzierbar. Sei $a \in U$ und $h \in \mathbb{R}^n$ s. d. $\{a + th \mid t \in [0, 1]\} \subset U$. Dann existiert $\theta \in [0, 1]$ s. d.

$$f(a + h) = \sum_{\substack{|\alpha| \leq k \\ \alpha \in \mathbb{N}_0^n}} \frac{1}{\alpha!} \partial^\alpha f(a) h^\alpha + \sum_{\substack{|\alpha|=k+1 \\ \alpha \in \mathbb{N}_0^n}} \frac{1}{\alpha!} \partial^\alpha f(a + \theta h) h^\alpha.$$

Beweis. Setze $g: [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$, $g(t) := f(a + th)$. Taylorsche Formel aus der DIFF I $\Rightarrow \exists \theta \in [0, 1]$ s. d.

$$g(1) = \underbrace{\sum_{j=0}^k \frac{1}{j!} g^{(j)}(0)}_{\text{(3.29)}} + \underbrace{\frac{1}{(k+1)!} g^{(k+1)}(\theta)}_{\sum_{|\alpha|=k+1} \frac{1}{\alpha!} \partial^\alpha f(a + \theta h) h^\alpha} \quad \square$$

Folgerung 3.31. Sei $f: U \rightarrow \mathbb{R}$, $U \subset \mathbb{R}^n$ offen, k -mal stetig differenzierbar. Sei $a \in U$ und $\delta > 0$ s. d. $B_\delta(a) \subset U$. Dann gilt für alle $h \in B_\delta(0)$:

$$f(a + h) = \sum_{\alpha \leq k} \frac{1}{\alpha!} \partial^\alpha f(a) h^\alpha + R_{k,a}(h)$$

mit $\frac{R_{k,a}(h)}{\|h\|^k} \rightarrow 0$ für $h \rightarrow 0$.

Äquivalent:

$$f(x) = \sum_{\alpha \leq k} \frac{1}{\alpha!} \partial^\alpha f(a) (x - a)^\alpha + R_{k,a}(x - a)$$

für $x \in B_\delta(a)$. „Taylor-Entwicklung bis zur Ordnung k mit Entwicklungspunkt a “.

Beweis. $\exists \theta = \alpha_{a,h} \in [0, 1]$ s. d.

$$\begin{aligned} f(a+h) &= \sum_{|\alpha| \leq k-1} \frac{1}{\alpha!} f(a) h^\alpha + \sum_{|\alpha|=k} \partial^\alpha f(a+\theta h) h^\alpha \\ &= \sum_{|\alpha| \leq k} \frac{1}{\alpha!} \partial^\alpha f(a) h^\alpha + \sum_{|\alpha|=k} \frac{1}{\alpha!} (\underbrace{\partial^\alpha f(a+\theta h) - \partial^\alpha f(a)}_{:= r_{\alpha,a}(h)}) h^\alpha. \end{aligned}$$

$\partial^\alpha f$ ist stetig $\implies r_{\alpha,a}(h) \rightarrow r_{\alpha,a}(0) = 0$ für $h \rightarrow 0$ für $h \rightarrow 0$. Setze

$$R_{k,a}(h) := \sum_{|\alpha|=k} \frac{1}{\alpha!} r_{\alpha,a}(h) h^\alpha,$$

dann gilt $\frac{R_{k,a}(h)}{\|h\|^k} \rightarrow 0$, denn

$$\frac{|h^\alpha|}{\|h\|_{\max}^k} = \frac{|h_1|^{\alpha_1} \cdots |h_n|^{\alpha_n}}{(\|h\|_{\max})^k} \leq 1$$

□

für $|\alpha| = \alpha_1 + \cdots + \alpha_n = k$.

Notation.

$$P_m(h) := P_{m,a}(h) = \sum_{|\alpha|=m} \frac{1}{\alpha!} \partial^\alpha f(a) h^\alpha$$

ist ein homogenes Polynom von Grad m (in h), das sogenannte *Taylorpolynom* zu f zum Entwicklungspunkt a . Es gilt

$$f(a+h) = \sum_{m=0}^k P_{m,a}(h) + R_{k,a}(h).$$

$m=0$ $P_0(h) = f(a)$ konstant.

$m=1$ Die Summe läuft über alle

$$(\alpha_1, \dots, \alpha_n) \in \{(1, 0, \dots, 0), (0, 1, 0, \dots), \dots, (0, \dots, 0, 1)\}.$$

Also gilt

$$P_1(h) = \sum_{j=1}^a \partial_j f(a) h_j = (\partial_1 f(a) \dots \partial_n f(a)) \cdot h.$$

Die Formel aus der Folgerung entspricht also genau der linearen Approximation von f , die durch Ableitung gegeben ist.

$m = 2$ Die Summe läuft über alle

$$\begin{aligned} (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \in & \{(1, 1, 0, \dots, 0), (1, 0, 1, 0, \dots, 0), \dots \\ & , (0, 1, 1, 0, \dots, 0), (0, 1, 0, 1, 0, \dots, 0), \dots \\ & , \dots \\ & , (2, 0, \dots, 0), (0, 2, 0, \dots, 0), \dots, (0, \dots, 0, 2)\}. \end{aligned}$$

Also ist

$$\begin{aligned} P_2(h) &= \sum_{j=1}^n \underbrace{\sum_{i=j+1}^n \partial_i \partial_j f(a) h_i h_j}_{\substack{=\sum_{j < i} \partial_i \partial_j f(a) h_i h_j \\ \uparrow \text{Schwarz}}} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} \partial_j^2 f(a) h_j^2 = \frac{1}{2} \sum_{i,j} \partial_j \partial_i f(a) h_i h_j. \end{aligned}$$

Man definiert daher die sogenannte *Hesse-Matrix*

$$H_f(a) := ((\partial_i \partial_j f(a)))_{\substack{i \in \{1, \dots, n\} \\ j \in \{1, \dots, n\}}}$$

und schreibt

$$f(a+h) = f(a) + \langle \text{grad } f(a), h \rangle + \frac{1}{2} \langle h, H_f(a)h \rangle + R_{z,a}(h)$$

für $f: U \rightarrow \mathbb{R}$ zweimal stetig differenzierbar und $h \in B_\delta(0)$, $\delta > 0$ s. d. $B_\delta(a) \subset U$.

3.IX. Lokale Extrema

Wir hatten in 3.10 bereits gesehen: Ist $a \in U$ lokale Extremstelle von $f: U \rightarrow \mathbb{R}$, $U \subset \mathbb{R}^n$ offen, differenzierbar, so ist $\text{grad } f(a) = 0$.

Satz 3.32. Sei $f: U \rightarrow \mathbb{R}$ zweimal stetig differenzierbar, $U \subset \mathbb{R}^n$ offen. Sei $a \in U$ s. d. $\text{grad } f(a) = 0$. Dann gilt:

- a) Ist $H_f(a)$ positiv definit (d. h. $\langle h, H_f(a)h \rangle > 0 \forall h \in \mathbb{R}^n, h \neq 0$), so hat f in a ein lokales (isoliertes) Minimum.
- b) Ist $H_f(a)$ negativ definit (d. h. $\langle h, H_f(a)h \rangle < 0 \forall h \neq 0$), so hat f in a ein lokales (isoliertes) Maximum.
- c) Ist $H_f(a)$ indefinit (d. h. $\exists h$ s. d. $\langle h, H_f(a)h \rangle > 0$ und $\exists \tilde{h}$ s. d. $\langle \tilde{h}, H_f(a)\tilde{h} \rangle < 0$), so hat f in a kein lokales Extremum.

Bemerkung. Ist $H_f(a)$ positiv oder negativ semidefinit s. d. $\forall h \neq 0$ ist $\langle h, H_f(a)h \rangle \geq 0$ (bzw. ≤ 0), so ist keine allgemeine Aussage möglich.

Beispiel. $f_1(x, y) = x^2 + y^4$, $f_2(x, y) = x^2$, $f_3(x, y) = x^2 + y^3$, $H_{f_j}(0) = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ $\forall j$ ist positiv semidefinit ($\langle h, H_{f_j}(0)h \rangle = 2h_1^2 \geq 0$, $= 0$ für $h_1 = 0$).

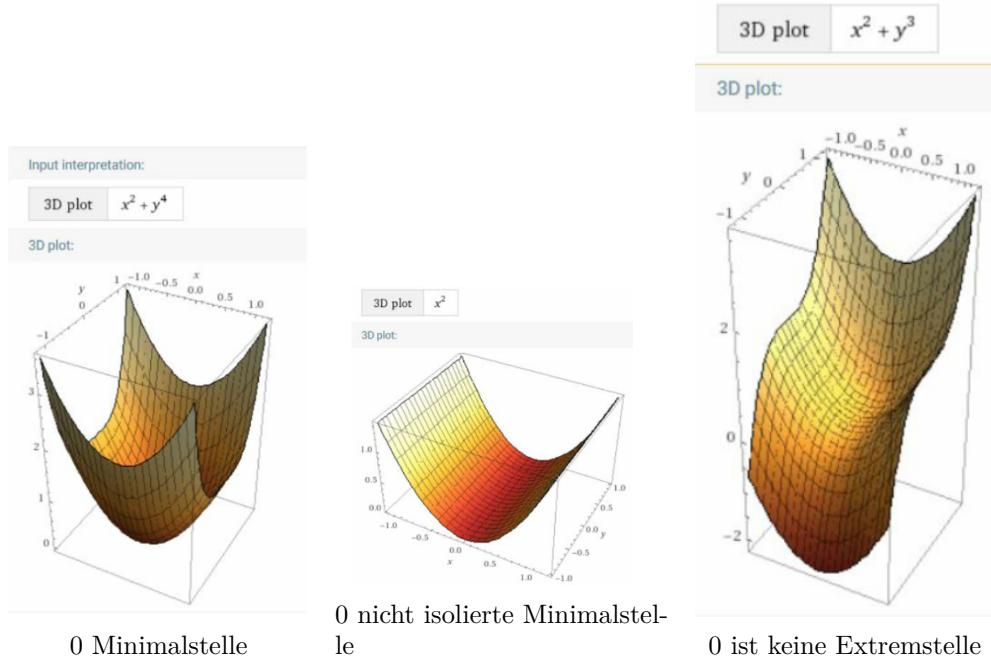


Abbildung 3.1.: Wolfram Alpha

Beweis von 3.32. Setze $A := H_f(a)$. $\exists \delta > 0$ s. d. $B_\delta(a) \subset U$. Und somit

$$f(a+h) = f(a) + \underbrace{\langle \text{grad } f(a), h \rangle}_{=0} + \frac{1}{2} \langle h, Ah \rangle + R_2(h) \quad \forall h \in B_\delta(0)$$

mit $\frac{R_2(h)}{\|h\|^2} \rightarrow 0$ ($h \rightarrow 0$).

$$\implies \forall \varepsilon > 0 \quad \exists \tilde{\delta} > 0 \quad (\tilde{\delta} < \delta) \text{ s. d. } |R_2(h)| \leq \varepsilon \|h\|^2 \quad \forall h \in B_{\tilde{\delta}}(0)$$

3.32.a) Sei A positiv definit. Betrachte $S = \{ h \in \mathbb{R}^n \mid \|h\|_E = 1 \}$. S ist abgeschlossen und beschränkt $\subset \mathbb{R}^n \implies S$ ist kompakt $\implies S \ni h \mapsto \langle h, Ah \rangle$ nimmt Maximum und Minimum an (da stetig).

$$\alpha := \inf_{\substack{h \in S \\ > 0}} \underbrace{\langle h, Ah \rangle}_{(\text{VOR}) \quad (h \neq 0 \text{ wenn } h \in S)} > 0.$$

Behauptung.

$$\langle h, Ah \rangle \geq \alpha \|h\|_E^2 \quad \forall h \in \mathbb{R}^n.$$

Beweis. $h = 0$: ✓. Sei also $h \neq 0$. Setze $\tilde{h} := \frac{1}{\|h\|_E} h$.

$$\implies \tilde{h} \in S \implies \langle \tilde{h}, A\tilde{h} \rangle \geq \alpha.$$

Die Behauptung folgt wegen

$$\langle \tilde{h}, A\tilde{h} \rangle = \frac{1}{\|h\|_E^2} \langle h, Ah \rangle. \quad \square$$

Wähle nun $\tilde{\delta} > 0$ s. d. $|R_2(h)| \leq \frac{\alpha}{4} \|h\|_E^2$ für $\|h\| < \tilde{\delta}$.

$$\implies f(a+h) \geq f(a) + \underbrace{\frac{1}{2} \langle h, Ah \rangle}_{\geq \alpha \|h\|_E^2} - |R_2(h)| \geq f(a) + \underbrace{\frac{1}{4} \alpha \|h\|_E^2}_{\geq 0} > f(a) \quad \forall \|h\| < \tilde{\delta}, \quad h \neq 0.$$

3.32.b) Ist A negativ definit, betrachte $-f$ und wende 3.32.a) an.

3.32.c) Ist A indefinit, gibt es in jeder Umgebung V von a Punkte $x, x' \in V$ s. d.

$$f(x) < f(a) < f'(x).$$

Es gilt $v \in \mathbb{R}^n$, s. d. $\langle v, Av \rangle =: \alpha > 0$.

$$\implies f(a+tv) = f(a) + \frac{1}{2} t^2 a + R_2(tv)$$

für $|t|$ klein genug (s. d. $tv \in B_\delta(0)$). Wähle $|t| > 0$ so klein, dass zudem $R_2(tv) \leq \frac{\alpha}{2} t^2$

$$\implies f(a+sv) \geq f(a) + \frac{1}{2} s^2 \alpha - |R_2(sv)| > f(a)$$

für $0 < s < t$ (o.B.d.A. $t > 0$).

Genauso: Es gibt $v \in \mathbb{R}^n$, s. d. $\langle v, Av \rangle =: \alpha < 0$

$$\implies f(a+tv) = f(a) - \frac{1}{2} t^2 |\alpha| + R_2(tv)$$

für $|t|$ klein genug (s. d. $tv \in B_\delta(0)$). Wähle $|t| > 0$ so klein, dass zudem $|R_2(tv)| \leq \frac{\alpha}{4} t^2$

$$\implies f(a+sv) \leq f(a) - \frac{1}{2} s^2 |\alpha| + |R_2(sv)| < f(a) \quad \forall 0 < s < t \quad (\text{o.B.d.A. } t > 0). \quad \square$$

Beispiele. i) $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, $f(x) = x_1^2 + x_2^2 + 2$, $\text{grad } f(a) = (2a_1, 2a_2) = 0$ nur für $a = 0$.

$$H_f(0) = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$$

positiv definit \implies isoliertes Minimum in 0.

ii) $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, $f(x) = 2 - x_1^2 - x_2^2$, $\text{grad } f(a) = -2a = 0$ nur für $a = 0$.

$$H_f(0) = \begin{pmatrix} -2 & 0 \\ 0 & -2 \end{pmatrix}$$

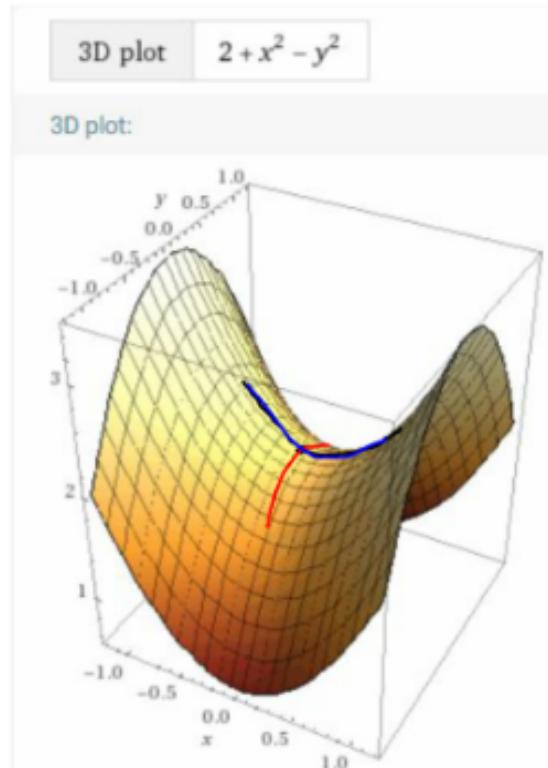
negativ definit \implies isoliertes Maximum in 0.

iii) $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, $f(x) = 2 + x_1^2 - x_2^2$, $\text{grad } f(a) = 2a_1 - 2a_2 = 0$ nur für $a = 0$.

$$H_f(0) = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & -2 \end{pmatrix}$$

indefinit:

$$\begin{aligned} \langle e_1, H_f(0)e_1 \rangle &= 2 = -\langle e_2, H_f(0)e_2 \rangle \\ f(0 + te_1) &> f(0) \quad \forall t \neq 0 \\ f(0 + te_2) &< f(0) \quad \forall t \neq 0. \end{aligned}$$



Sattelfläche

Bemerkung. Wie untersucht man in komplizierten Fällen $H_f(a)$ auf Definitheit? Kennt man die Eigenwerte (\exists wegen Symmetrie!) ist klar: Sind all positiv (negativ), so ist $H_f(a)$ positiv (negativ) definit, gibt es positive und negative Eigenwerte, so ist sie indefinit. Aber Eigenwerte großer Matrizen sind schwer zu bestimmen. Besser geeignet ist

Lemma 3.33 (aus der AGLA: Kriterium von Hurwitz). Sei $A \in \text{Mat}(n \times n, \mathbb{R})$ symmetrisch. Dann ist A genau dann positiv definit, wenn

$$\det \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{k1} & \cdots & a_{kk} \end{pmatrix} > 0 \quad \forall k \in \{1, \dots, n\}$$

↑
Haupt-Minoren von A

und genau dann negativ definit, wenn

$$\det(a_{11}) = a_{11} < 0$$

$$\det \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} > 0$$

und dann immer abwechselnd.

Kapitel 4.

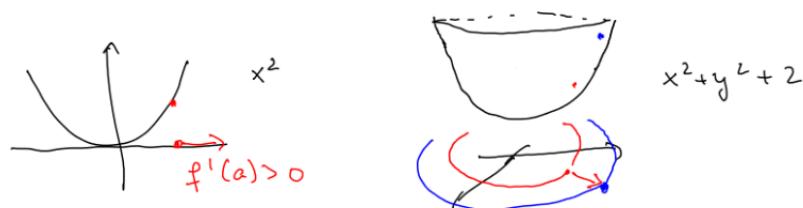
Untermannigfaltigkeiten des \mathbb{R}^n

Vorlesung 12

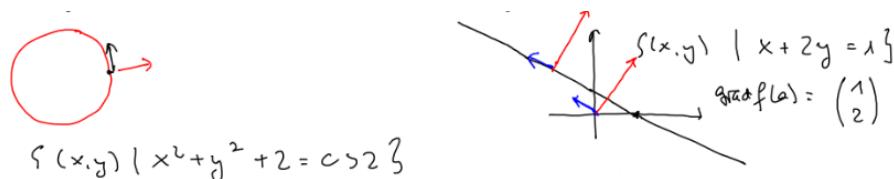
Do 28.05. 10:15

Ziel (u. a.) Geometrische Interpretation der Ableitung.

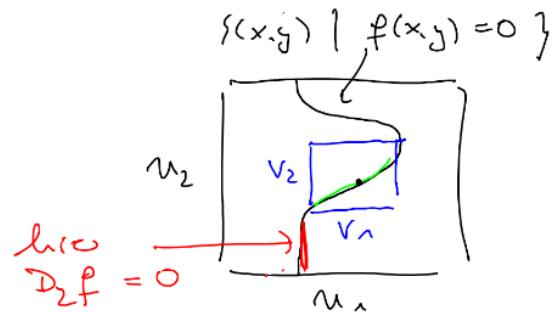
Erinnerung. Der Gradient zeigt in die Richtung des stärksten Anstiegs.



In einem Beispiel hatten wir gesehen: Richtungsableitung in Richtung einer Niveaumenge steht \perp auf $\text{grad } f$.

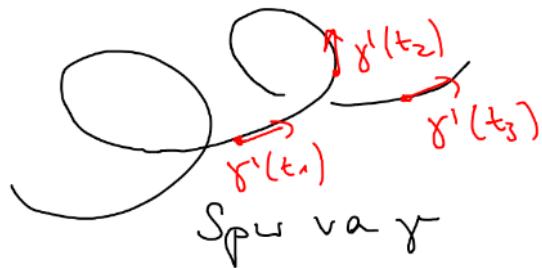


Satz über implizite Funktion:



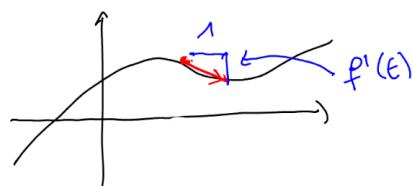
$f: U_1 \times U_2 \rightarrow \mathbb{R}$. Niveaumenge kann lokal als Graph geschrieben werden, wenn $D_2 f(a, b)$ invertierbar ist. Weitere Erklärungen → Audio.

Aufwärm-Übung. Sei $\gamma: I \rightarrow \mathbb{R}^3$ differenzierbare Kurve.



Dann ist $\gamma'(t)$ der *Geschwindigkeitsvektor*, der sich im Punkt $\gamma(t)$ auf die Kurve schmiegt.

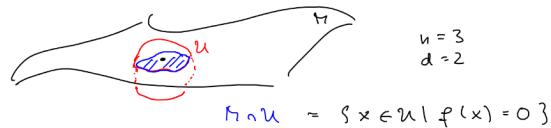
Beispiel. $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ differenzierbare Funktion. Betrachte $\gamma(t) := (t, f(t))$. Also Spur von $\gamma = \Gamma_f$. $\gamma'(t) = (1, f'(t))$.



Definition 4.1. Eine Teilmenge $M \subset \mathbb{R}^n$ heißt d -dimensionale differenzierbare *Untermannigfaltigkeit* (oder reguläre Fläche) des \mathbb{R}^n , falls es für jedes $a \in M$ eine Umgebung $U \subset \mathbb{R}^n$ von a gibt und eine stetig differenzierbare Abbildung $f: U \rightarrow \mathbb{R}^{n-d}$ s. d.

- a) $M \cap U = \{x \in U \mid f(x) = 0\}$ und
- b) $\text{rang } Df(a) = n - d$ (maximal).

Das heißt M lässt sich lokal als Nullstellengebilde von $n - d$ \mathbb{R} -wertigen C^1 Funktionen f_j schreiben, deren Gradienten linear unabhängig sind.



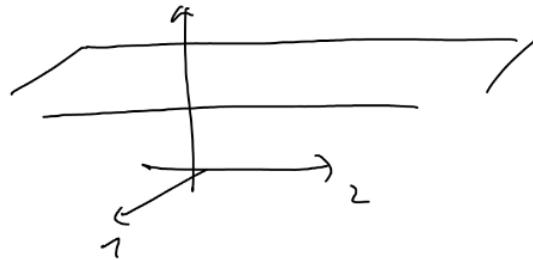
Beispiele. i) Die n -dimensionalen Untermannigfaltigkeiten des \mathbb{R}^n sind die offenen Teilmengen. Hier ist

$$M \cap U = U = \{x \in U\}.$$

ii) Ebene

$$E = \{p + (s, t, 0, 0) \mid s, t \in \mathbb{R}\} \subset \mathbb{R}^4,$$

$$p \in \mathbb{R}^4.$$

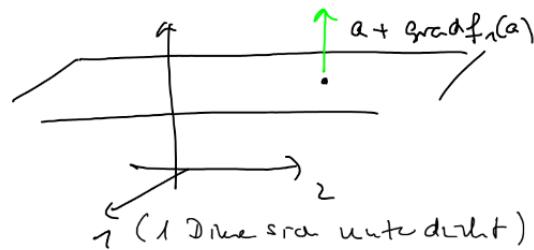


Eine Dimension im Bild unterdrückt.

Zu $a \in E$ wähle $U = \mathbb{R}^4$ und setze

$$\begin{aligned} f_1: U &\rightarrow \mathbb{R} & f_1(x) &= \langle x - p, e_3 \rangle = x_3 - p_3 \\ f_2: U &\rightarrow \mathbb{R} & f_2(x) &= \langle x - p, e_4 \rangle = x_4 - p_4. \end{aligned}$$

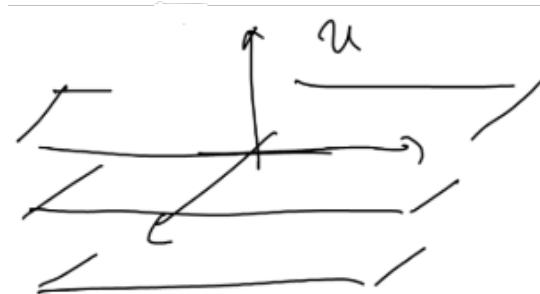
Es gilt $x \in E \iff f(x) = \begin{pmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \end{pmatrix} = 0$ und $Df(a) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, rang = 2.



$$\text{grad } f_1(a) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{grad } f_2(a) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Niveau-Mengen von f :

$$N_f(c) = \{ x \in \mathbb{R}^n \mid x_3 - p_3 = c, x_4 - p_4 = c \}.$$



$$N_f(0) = E, \text{ Gradient steht senkrecht.}$$

- iii) $\mathbb{S}^{n-1} := \{ x \in \mathbb{R}^n \mid \|x\|_{\text{E}} = 1 \}$. Einheits-Sphäre. Zu $a \in \mathbb{S}^{n-1}$ wähle $U = \mathbb{R}^n$ und $f(x) = \|x\|_{\text{E}}^2 - 1$.

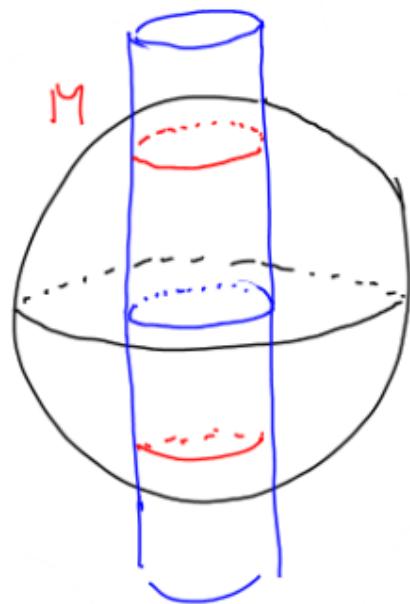
$$Df(a) = (2a_1, \dots, 2a_n) \neq 0,$$

also $\text{rang} = 1 \forall a \in \mathbb{S}^{n-1}$.

- iv) Eine 1-dimensionale differenzierbare Untermannigfaltigkeit wird auch unparametrisierte differenzierbare Kurve genannt.

Beispiel. $f: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$.

$$f(x, y, z) = \begin{pmatrix} x^2 + y^2 + z^2 - R^2 \\ x^2 + y^2 - r^2 \end{pmatrix} \quad R > r > 0.$$



$$M = \{ (x, y, z) \mid f(x, y, z) = 0 \} = N_f(0)$$

$$Df(x, y, z) = \begin{pmatrix} 2x & 2y & 2z \\ 2x & 2y & 0 \end{pmatrix}$$

hat maximalen Rang 2 für $z \neq 0$ und $(x, y) \neq 0$.

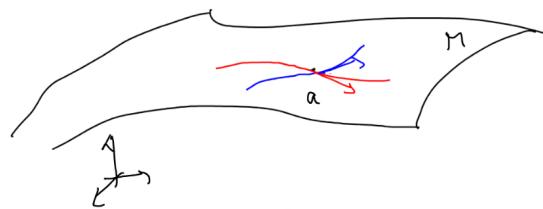
Letzteres ist für alle $a \in M$ gewährleistet, weil $(x^2 + y^2 = r^2 > 0)$ gilt und somit ist auch ersteres gewährleistet, da $z^2 = -r^2 + R^2 > 0$.

Man sieht auch direkt: Die Funktion, die M lokal als Nullstellenmenge beschreibt, ist nicht eindeutig: z. B.

$$\tilde{f}(x, y, z) = \begin{pmatrix} z^2 + r^2 - R^2 \\ x^2 + y^2 - r^2 \end{pmatrix}$$

beschreibt im Beispiel oben das selbe M .

Definition 4.2. Ein Vektor $v \in \mathbb{R}^n$ heißt *Tangentialvektor* der Untermannigfaltigkeit $M \subset \mathbb{R}^n$ im Punkt a , falls \exists differenzierbare Kurve $\gamma, \gamma: (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow M$, s. d. $\gamma(0) = a$ und $v = \gamma'(0)$. Die Menge der Tangentialvektoren im Punkt a bezeichnet man mit $T_a M$.



Man zeichnet Tangentialvektoren an den Punkt a an. Aber eigentlich sind es *keine* affinen Vektoren.

Beispiele. i) Ebene

$$E = \{ p + (s, t, 0, 0) \mid s, t \in \mathbb{R} \} \subset \mathbb{R}^4,$$

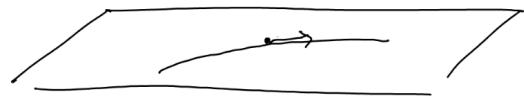
$$p \in \mathbb{R}^4, a \in E.$$

$$T_a M = \left\{ v \in \mathbb{R}^4 \mid v = v_1 e_2 + v_2 e_2 \right\},$$

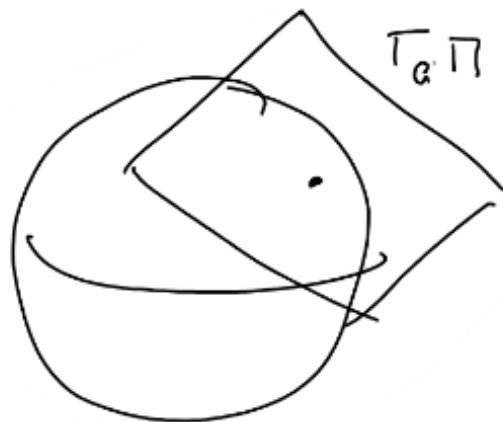
denn jedes $\gamma: (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow M$ mit $\gamma(0)$ ist von der Form

$$\gamma(t) = a + (\tilde{\gamma}_1(t), \tilde{\gamma}_2(t), 0, 0).$$

Man zeichnet den Tangentialraum an der Stelle a ein, also



ii) $M = \mathbf{S}^{n-1}$. Behauptung:



Das erklärt den Namen: Die Tangentialvektoren sind tangential (angeschmiegt) an M im Punkt a .

Zum Beweis der Behauptung beweisen wir allgemeiner:

24 min

Satz 4.3. Sei M d -dimensionale differenzierbare Untermannigfaltigkeit des \mathbb{R}^n . Ist

$$a \in M \cap U = \{x \in U \mid f(x) = 0\}$$

für eine Funktion $f: U \rightarrow \mathbb{R}^{n-d}$ wie in Definition 4.1, also $Df(a)$ von maximalem Rang ($n-d$). Dann ist $T_a M = \ker -Df(a)$. Insbesondere ist $T_a M$ Untervektorraum von \mathbb{R}^n .

Beweis. „ \subset “ Sei $\gamma: (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow M \cap U$ mit $\gamma(0) = a$, $\gamma'(0) = v$. Dann ist

$$0 = \frac{d}{dt} f \circ \gamma(t) \Big|_{t=0} = Df(\gamma(0)) \cdot \gamma'(0) = Df(a) \cdot v \implies v \in \ker -Df(a).$$

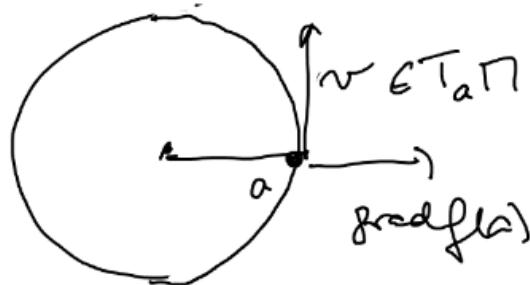
„ \supset “ Beweisen wir später mit Hilfe des folgenden Satzes 4.4. \square

Interpretation (für $n-d=1$). Der Gradient zeigt in die Richtung des stärksten Anstiegs von f . Eine Kurve γ wie in 4.2 (und 4.3) verläuft in einer Niveaumenge von f (und zwar hier zu $c=0$). In Richtung $v = \gamma'(0)$ ändert sich f also nicht und die Richtungsableitung in Richtung v ist 0:

$$\partial_v f(a) = \langle v, \text{grad } f(a) \rangle = Df(a) \cdot v = 0 \quad (\text{Satz 4.3}),$$

also $v \perp \text{grad } f(a)$. „Der Gradient steht auf Niveaumengen senkrecht“.

Beispiel. $f(x, y) = x^2 + y^2 - 2$. $M = \text{Niveaumenge } N_f(0) = \{x^2 + y^2 = 2\}$. $\text{grad } f(a) = 2(a_1, a_2)$.



Eine Kurve, die in M verläuft und für die gilt

$$\gamma(0) = a = \begin{pmatrix} \sqrt{2} \\ 0 \end{pmatrix}$$

ist

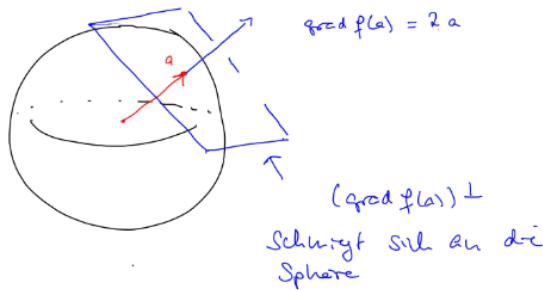
$$\gamma(t) = \begin{pmatrix} \cos t \\ \sin t \end{pmatrix} \cdot \sqrt{2}.$$

Es ist dann

$$\gamma'(0) = \sqrt{2} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \perp \text{grad } f \begin{pmatrix} \sqrt{2} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2\sqrt{2} \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Höher-dimensionale Sphären:

$N_f(0)$, $f(x) = \|x\|_{\mathbb{E}}^2 - 1$. $Df(a) = 2(a_1, \dots, a_n)$. $\ker -Df(a) =$ Ebene senkrecht zu a .



Um die Rückrichtung von Satz 4.3 beweisen zu können, benötigen wir eine weitere (äquivalente) Charakterisierung differenzierbarer Untermannigfaltigkeiten.

Satz 4.4. Eine Teilmenge $M \subset \mathbb{R}^n$ ist genau dann d -dimensionale differenzierbare Untermannigfaltigkeit des \mathbb{R}^n , wenn es zu jedem Punkt $a \in M$ (nach eventueller Umnummerierung) Umgebungen $V_1 \subset \mathbb{R}^d$ von $a' = (a_1, \dots, a_d)$ und $V_2 \subset \mathbb{R}^{n-d}$ von $a'' = (a_{d+1}, \dots, a_n)$ und eine stetig differenzierbare Abbildung $g: V_1 \rightarrow \mathbb{R}^{n-d}$, $g(V_1) \subset V_2$ gibt, s. d.

$$M \cap (V_1 \times V_2) = \Gamma_g = \{ (x', g(x')) \mid x' \in V_1 \}.$$

Beweis. „ \implies “ Sei $a \in M$, U , f wie in Definition 4.1, insbesondere $\text{rang } Df(a) = n-d$ (maximal) \implies nach eventueller Umnummerierung ist $Df(x', x'')$ für $x = (x', x'') \in U \subset \mathbb{R}^d \times \mathbb{R}^{n-d}$

$$\begin{pmatrix} \partial_1 f_1(x', x'') & \dots & \partial_d f_1(x', x'') & \partial_{d+1} f_1(x', x'') & \dots & \partial_n f_1(x', x'') & \dots \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \partial_1 f_{n-d}(x', x'') & \dots & \partial_d f_{n-d}(x', x'') & \partial_{d+1} f_{n-d}(x', x'') & \dots & \partial_n f_{n-d}(x', x'') & \dots \\ & & & & & & \ddots \\ & & & & & & & D_2 f(x', x'') \end{pmatrix},$$

s. d. $D_2 f(a', a'')$ invertierbar ist.

Zudem ist $f(a) = 0$. Der Satz über implizite Funktion liefert also eine lokale Auflösung von $N_f(0)$ \implies Beh.

„ \Leftarrow “ Sei

$$M \cap V_1 \times V_2 = \{ (x', g(x')) \mid x' \in V_1 \},$$

$V_1 \subset \mathbb{R}^d$, $V_2 \subset \mathbb{R}^{n-d}$. Setze

$$\begin{aligned} f: V_1 \times V_2 &\rightarrow \mathbb{R}^{n-d} \\ f_j(x', x'') &= g_j(x') - x''_j. \end{aligned}$$

Dann ist

$$M \cap V_1 \times V_2 = \{ x \in V_1 \times V_2 \mid f(x) = 0 \}$$

und

$$Df(x) = \left(\begin{array}{ccc|c} \partial_1 g_1(x) & \dots & \partial_d g_1(x) & -1 \\ \vdots & & \vdots & \dots & 0 \\ \partial_1 g_{n-d}(x) & \dots & \partial_d g_{n-d}(x) & 0 & \dots & -1 \end{array} \right)$$

hat maximalen Rang $(n - d)$. \square

Bemerkung. Man kann also eine d -dimensionale differenzierbare Untermannigfaltigkeit lokal stets als Graphen einer C^1 -Funktion schreiben.

Für die Beispiele oben gilt

4.1.i) $U \subset \mathbb{R}^n$ offen, $V_2 = \emptyset$, $V_1 = U$.

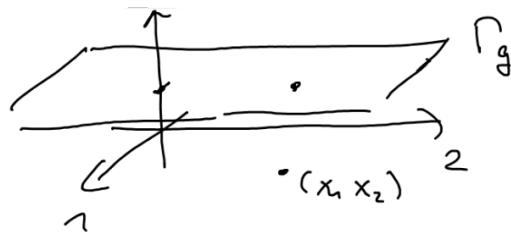
4.1.ii) Ebene

$$E = \{ p + se_1 + te_2 \mid s, t \in \mathbb{R} \} \subset \mathbb{R}^4,$$

$$p \in \mathbb{R}^4.$$

$$g: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2 \quad g(x_1, x_2) = \begin{pmatrix} p_3 \\ p_4 \end{pmatrix}$$

konstant.



4.1.iii) \mathbf{S}^{n-1} : Sei $a \in \mathbf{S}^{n-1}$ mit $a_n > 0$. Sei

$$V_1 = \left\{ x' \in \mathbb{R}^{n-1} \mid \|x'\|_{\mathbb{E}} < 1 \right\}$$

$$g: V_1 \rightarrow \mathbb{R}, \quad g(x_1, \dots, x_{n-1}) = \sqrt{1 - x_1^2 - \dots - x_{n-1}^2}.$$

Dann ist

$$\mathbf{S}^{n-1} \cap V_1 \times (0, \infty) = \Gamma_g.$$



40 min

Fortsetzung Beweis Satz 4.3. Wir beweisen nun die zweite Inklusion von Satz 4.3, also $T_a M \supset \ker -Df(a)$. Sei $g: V_1 \rightarrow \mathbb{R}^{n-d}$ stetig differenzierbar s.d. $g(V_1) \subset V_2$ und $a \in V_1 \times V_2 \subset \mathbb{R}^d \times \mathbb{R}^{n-d}$ und

$$M \cap (V_1 \times V_2) = \Gamma_g = \{ (x, g(x)) \mid x \in V_1 \}.$$

Sei $x_0 \in V_1$ s.d. $(x_0, g(x_0)) = a$. Betrachte $\varphi: V_1 \rightarrow \mathbb{R}^n$, $\varphi(x) = (x, g(x))$. Dann ist

$$D\varphi(x_0) \cdot v = \frac{d}{dt} \varphi(x_0 + tv) \Big|_{t=0} \quad \forall v \in \mathbb{R}^d.$$

↑
Kettenregel

$\implies a = \varphi(x - 0)$ und

$$w := \frac{d}{dt} \varphi(x_0 + tv) \Big|_{t=0} \in T_a M,$$

also $\text{Im}(D\varphi(x_0)) \subset T_a M$. Zudem wissen wir schon: $T_a M \subset \ker -Df(a)$. Es ist $D\varphi(x_0): \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}^n$, $D\varphi(x_0) = \begin{pmatrix} \mathbb{1}_{d \times d} \\ Dg(x_0) \end{pmatrix}$, also injektiv \implies (Dimensionsformel)

$$\dim \text{Im}(D\varphi(x_0)) = d = n - \underbrace{\text{rang } Df(a)}_{=n-d} = \dim \ker -Df(a)$$

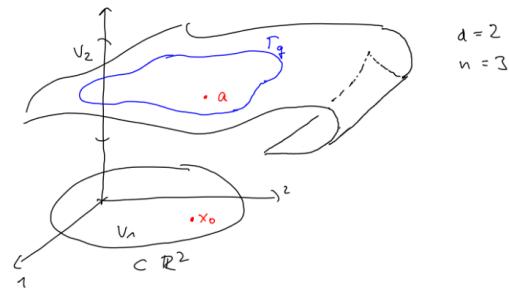
$\implies T_a M = \ker -Df(a)$. \square

Wir haben im Beweis auch gesehen:

$$\mathrm{T}_a M = \mathrm{Im} \, D\varphi(x_0),$$

wo $\phi(x) = (x, g(x))^T$ die Graphenabbildung einer lokalen Auflösung g ist it $a = (x_0, g(x_0))^T = \phi(x_0)$.

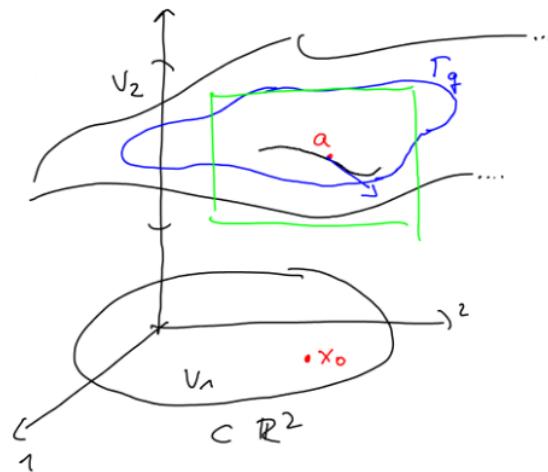
Die geometrische Interpretation ist:



$$D\phi(x_0) = \begin{pmatrix} \mathbb{1}_2 \\ Dg(x_0) \end{pmatrix}.$$

\uparrow
 $\partial_1 g(x_0) \quad \partial_2 g(x_0)$

Die Spalten von $D\phi(x_0)$



Ebene parallel zur 2-3-Ebene durch $a = \{x_1 = x_{0,1} \text{ konstant}\}$.

$\curvearrowright = \{(x_{0,1}, x_{0,2} + t, g(x_{0,1}, x_{0,2} + t)) \mid t \in I \subset \mathbb{R}\}$ ist Kurve in M .

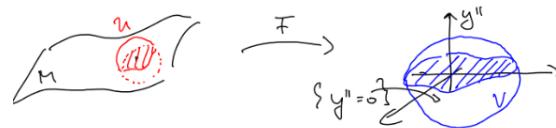
Ableitung

$$\frac{d}{dt} \phi(x_{0,1}, x_{0,2} + t) = (0, 1, \partial_2 g(x_{0,1}, x_{0,2} + t)).$$

Es gilt $\phi(x_{0,1}, x_{0,2} + t)|_t$ und $(0, 1, \partial_2 g(x_0))$ ist **Tangentialvektor** bei a . Genauso für die Ebene $\{x_2 = x_{0,2}\}$ und die erste Spalte von $D\phi(x_0)$. Jede d -dimensionale Untermannigfaltigkeit lässt sich lokal zu einer Teilmenge einer d -dimensionalen Ebene im \mathbb{R}^n „plätzen“,

Satz 4.5. $M \subset \mathbb{R}^n$ ist genau dann d -dimensionale Untermannigfaltigkeit, wenn es zu jedem Punkt $a \in M$ offene Umgebungen U von $a \subset \mathbb{R}^n$ und V von $0 \subset \mathbb{R}^n$ und einen **Diffeomorphismus** von U nach V , also eine stetig differenzierbare invertierbare Funktion $F: U \rightarrow \mathbb{R}^n$ mit stetig differenzierbarer Umkehrfunktion $G: V \rightarrow \mathbb{R}^n$ s. d.

$$F(M \cap U) = \{(y', y'') \in \mathbb{R}^d \times \mathbb{R}^{n-d} \mid y'' = 0\} \cap V.$$



Beweis. „ \Rightarrow “ Sei M in einer Umgebung von a als Graph dargestellt (\exists nach Satz 4.4),

$$M \cap (V_1 \times V_2) = \{(x', g(x')) \mid x' \in V_1\}$$

Setze $U := V_1 \times V_2$ und $F(x, x'') = (x', x'' - g(x'))$. F ist stetig differenzierbar und die Umkehrfunktion

$$F^{-1}(y', y'') = (y', y'' + g(y'))$$

ist ebenfalls stetig differenzierbar, $F^{-1}: F(U) \rightarrow \mathbb{R}^n$. $F(U)$ ist offen nach Satz 3.21 weil

$$DF(x'.x'') = \begin{pmatrix} \mathbb{1}_{d \times d} & -Dg(x') \\ 0 & \mathbb{1}_{(n-d) \times (n-d)} \end{pmatrix}$$

invertierbar ist für alle $(x', x'') \in U$. Es ist $F(M \cap U) = \{(x', 0) \mid x' \in V_1\}$.

Es ist

$$F(M \cap U) = \{(x', 0) \mid x' \in V_1\}.$$

„ \Leftarrow “ Sei $F: U \rightarrow \mathbb{R}^n$ Diffeomorphismus, $F(U) = V$, mit

$$F(M \cap U) = \{y \in V \mid y_{d+1} = \dots = y_n = 0\}.$$

Dann ist

$$\begin{aligned} M \cap U &= F^{-1}(\{y \in V \mid y_{d+1} = \dots = y_n = 0\}) \\ &= \{x \in U \mid F_{d+1}(x) = \dots = F_n(x) = 0\}. \end{aligned}$$

Der Ran von

$$\begin{pmatrix} \partial_1 F_{d+1}(a) & \dots & \partial_n F_{d+1}(a) \\ \vdots & & \vdots \\ \partial_1 F_N(a) & \dots & \partial_n F_{d+1}(a) \end{pmatrix}$$

ist maximal (also gleich $n - d$), weil die Ableitungsmatrix $DF(a) \in \text{Mat}(n \times n, \mathbb{R})$ invertierbar ist $\implies M$ ist d -dimensionale Untermannigfaltigkeit. \square

Beispiel. \mathbb{S}^{n-1} , $a \in \mathbb{S}^{n-1}$, $a_n > 0$. $g: D \rightarrow \mathbb{R}$ mit $D = \{x \in \mathbb{R}^{n-1} \mid \|x\|_E < 1\}$,

$$g(x_1, \dots, x_{n-1}) = \sqrt{1 - \sum_{i=1}^{n-1} x_i^2}.$$

$F: D \times (0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}^n$,

$$F(x, t) = \left(x, t - \sqrt{1 - \sum_{i=1}^{m_1} x_i^2} \right).$$

$\mathbb{S}^{n-1} \cap D \times (0, \infty) = \text{---} \circlearrowleft$ (ohne den Rand $\text{---} \circlearrowright$) und

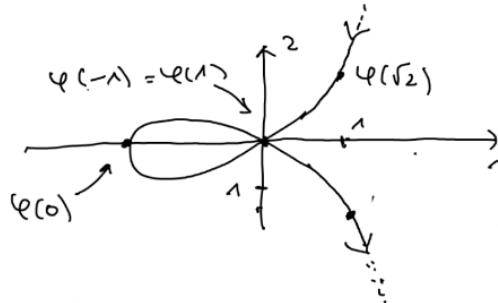
$$F(M \cap D \times (0, \infty)) = \text{---} \circlearrowright = D.$$

Letztes Mal: Untermannigfaltigkeiten *lokal* als Nullstellengebilde (Definition), als Graph und als diffeomorph zu Teilmengen des $\mathbb{R}^d \times \{0\}$.

Eine weitere äquivalente lokale Beschreibung mit Hilfe einer Parametrisierung:

Definition 4.6. Eine Abbildung $\varphi: V \rightarrow \mathbb{R}^n$, $V \subset \mathbb{R}^d$ offen, $d \leq n$, heißt *Immersion*, falls sie stetig differenzierbar ist und der Rang von $D\varphi(t)$ für alle $t \in V$ maximal, also gleich d ist. Man nennt $\varphi(V)$ die *Spur* von φ . Ist $\varphi: V \rightarrow \varphi(V)$ ein Homöomorphismus (also stetig, bijektiv, mit stetigem Inversen), so heißt φ *Einbettung*.

Beispiele. i) $V = \mathbb{R}$, $\varphi(t) = (t^2 - 1, t(t^2 - 1))$.



$$\varphi(1) = (0, 0) = \phi(-1) \quad \text{also keine Einbettung}$$

$$\varphi(0) = (-1, 0)$$

$$\varphi(\sqrt{2}) = (1, \sqrt{2})$$

$$\varphi(-t) = (\phi_1(t), -\phi_2(t))$$

$$\varphi'(t) = (2t, \underbrace{3t^2 - 1}_{\neq 0 \text{ f\"ur } t \neq \pm \frac{1}{\sqrt{3}}}) \neq 0 \implies \text{maximaler Rang.}$$

Eine Immersion $\varphi: I \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ heißt auch *reguläre (parametrisierte) Kurve*.

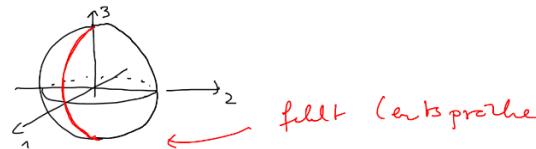
Bemerkung. 1-dimensional $\rightarrow I$ kann auch nicht offen gewählt werden, wenn man nur an Differenzierbarkeit interessiert ist. Hier *nicht*.

$$\text{ii)} \quad V = \{ t \in \mathbb{R}^2 \mid \|t\|_{\mathbb{E}} < 1 \}, \quad \varphi(t_1, t_2) = (t_1, t_2, \sqrt{1 - t_1^2 - t_2^2})^T,$$

$$D\varphi(t_1, t_2) = \begin{pmatrix} \mathbb{1}_{2 \times 2} \\ \frac{-t_1}{\sqrt{\dots}} & \frac{-t_2}{\sqrt{\dots}} \end{pmatrix} \quad \text{rang} = 2 \quad \forall t \in V.$$

Spur von φ .iii) $V = (0, \pi) \times (0, 2\pi)$,

$$\varphi(\beta, \alpha) = (\cos \alpha \sin \beta, \sin \alpha \sin \beta, \cos \beta).$$

Spur von φ

$V = \mathbb{R}^2$, φ wie oben: φ schneidet sich ∞ oft, da $\varphi(\beta + 2\pi\mathbb{Z}, \alpha + 2\pi\mathbb{Z}) = \phi(\beta, \alpha)$ gilt. $\varphi(\mathbb{R}^2) = \mathbb{S}^2$.

Satz 4.7. Sei $\varphi: V \rightarrow \mathbb{R}^n$, $V \subset \mathbb{R}^d$, eine Immersion. Dann gibt es zu jede, $t_0 \in V$ eine offene Umgebung $V_0 \subset V$ s.d. $\varphi|_{V_0}$ eine Einbettung des \mathbb{R}^n ist und $\varphi(V_0)$ eine d -dimensionale Untermannigfaltigkeit des \mathbb{R}^n .

Beweis. Nach eventueller Umnummerierung der Komponenten von φ . Sei

$$\begin{pmatrix} \partial_1 \varphi_1 & \dots & \partial_d \varphi_1(t_0) \\ \vdots & & \vdots \\ \partial_1 \varphi_d(t_0) & \dots & \partial_d \varphi_d(t_0) \end{pmatrix}$$

invertierbar.

Dann gibt es nach dem Satz über die Umkehrfunktion Satz 3.19 offene Umgebungen

$V_0 \subset \mathbb{R}^d$ von t_0 und $W \subset \mathbb{R}^d$ von $\begin{pmatrix} \varphi_1(t_0) \\ \vdots \\ \varphi_d(t_0) \end{pmatrix}$ s. d.

$$\tilde{\varphi} = \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \vdots \\ \varphi_d \end{pmatrix}: V_0 \rightarrow W$$

Diffeomorphismus ist (also stetig differenzierbar mit stetig differenzierbarem Inversen). Wir zeigen, dass $\varphi(V_0)$ diffeomorph ist zu $V_0 \times \{0\}$. Dann folgt aus Satz 4.5, dass $\varphi(V_0)$ d -dimensionale Untermannigfaltigkeit des \mathbb{R}^n ist.

Beweis. Setze dazu $G: V_0 \times \mathbb{R}^{n-d} \rightarrow W \times \mathbb{R}^{n-d}$.

$$G(\underbrace{t', t''}_t) := \begin{pmatrix} \varphi_1(t') \\ \vdots \\ \varphi_d(t') \\ \varphi_{d+1}(t') + t_{d+1} \\ \vdots \\ \varphi_{d+1}(t') + t_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi_1(t') \\ \vdots \\ \tilde{\varphi}(t') + t'' \end{pmatrix} \quad \tilde{\varphi} = \begin{pmatrix} \varphi_{d+1} \\ \vdots \\ \varphi_n \end{pmatrix}.$$

Dann ist $G(V_0 \times \mathbb{R}^{n-d}) = W \times \mathbb{R}^{n-d}$, denn

„ \subset “ ist klar, da $\tilde{\varphi}: V_0 \rightarrow W$ Diffeomorphismus ist.

„ \supset “ Sei $(y, y'') \in W \times \mathbb{R}^{n-d}$. Setze $t' = \tilde{\varphi}^{-1}(y')$ ($\tilde{\varphi}: V_0 \rightarrow W$ Diffeomorphismus), $t'' = y'' - \tilde{\varphi}(t')$. Dann gilt $G(t', t'') = \begin{pmatrix} y' \\ y'' \end{pmatrix}$.

Man sieht: $G: V_0 \times \mathbb{R}^{n-d} \rightarrow W \times \mathbb{R}^{n-d}$ ist bijektiv. Man sieht auch sofort: G ist Diffeomorphismus, da $\tilde{\varphi}$ Diffeomorphismus ist und $\tilde{\varphi}$ stetig differenzierbar und somit auch die Umkehrfunktion

$$F(y', y'') = \begin{pmatrix} \tilde{\varphi}^{-1}(y') \\ y'' - \tilde{\varphi}(\tilde{\varphi}^{-1}(y')) \end{pmatrix}$$

stetig differenzierbar ist. Wegen $G(V_0 \times \{0\}) = \varphi(V_0)$ d -dimensionale Untermannigfaltigkeiten. \square

Es folgt auch, dass $\varphi|_{V_0}$ Einbettung ist:

Denn $\tilde{\varphi}|_{V_0}$ ist Diffeomorphismus (auf W) und somit ist $\varphi|_{V_0}$ injektiv. Wegen $\varphi(t) = G(t, 0)$ ist die Umkehrfunktion $\varphi^{-1}: \varphi(V_0) \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig. \square

Beispiel (Beispiel i)). Wegen $\phi(1) = \varphi(-1)$ ist φ keine Einbettung. Es ist auch kein Untermannigfaltigkeit, was man hier leichter als in Aufgabe 2 auf Blatt 7 sieht: Es gibt 2 linear unabhängige Tangentialvektoren an $(0, 0)$, z. B. $\varphi'(1) = (2, 2)$, $\varphi'(-1) = (-2, 2)$.

9:15

Wählt man aber etwa $I_0 = \left(-\frac{1}{2}, \infty\right)$, so erhält man



ohne Doppelpunkt.

Tatsächlich gilt:

Satz 4.8. Eine Teilmenge $M \subset \mathbb{R}^n$ ist genau dann eine d -dimensionale Untermannigfaltigkeit des \mathbb{R}^n , wenn es zu jedem Punkt $a \in M$ eine offene Umgebung $U \subset \mathbb{R}^n$ von a gibt und eine offene Teilmenge $V \subset \mathbb{R}^d$ und eine Einbettung $\varphi: V \rightarrow \mathbb{R}^n$ mit $\varphi(V) = M \cap U$.

Beweis. „ \Leftarrow “ Sei also $a \in M$ und $U, \varphi: V \rightarrow \mathbb{R}^n$ wie oben, $a > \varphi(t_0)$. Dann gibt es (Satz 4.7) eine offene Umgebung V_0 von t_0 s. d. $\varphi(V_0)$ eine d -dimensionale Untermannigfaltigkeit ist. Es ist $\varphi(V_0) \subset M \cap U$ offen, (nach dem Satz von der offenen Abbildung) \Rightarrow Es gibt eine offene Umgebung U_0 von $\varphi(t_0) = a$ s. d. $\varphi(V_0) = M \cap U_0 \Rightarrow M \cap U_0$ ist d -dimensionale Untermannigfaltigkeit. Da man dies für jeden Punkt $a \in M$ machen kann, folgt: M ist d -dimensionale Untermannigfaltigkeit.

„ \Rightarrow “ Wir schreiben M lokal als Graphen: $a \in U = U_1 \times U_2 \subset \mathbb{R}^d \times \mathbb{R}^{n-d}$,

$$M \cap U = \{ (x', g(x')) \mid x' \in U_1 \}.$$

Setze $V := U_1$ und $\varphi: V \rightarrow \mathbb{R}^n$, $\varphi(t) = (t, g(t))^T$. Dann ist φ eine Immersion (denn $D\varphi(t) = \begin{pmatrix} \mathbb{1}_{d \times d} \\ Dg(t) \end{pmatrix}$ hat maximalen Rang) mit $\varphi(V) = M \cap U$ (da $g(V) = U_2$). φ ist injektiv und die Umkehrfunktion

$$\varphi^{-1}: \varphi(V) \rightarrow \mathbb{R}^d, \quad \underset{U_1 \times U_2}{\parallel} (y', y'') \mapsto y'$$

ist stetig. \square

Bemerkungen.

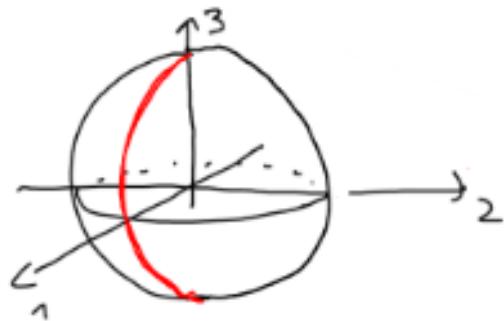
Man nennt φ wie oben eine *lokale Parametrisierung* von M bei a . V heißt *Parameterbereich* und $M \cap U$ *Koordinatenumgebung von a* .

Globale Parametrisierung $\varphi: V \rightarrow \mathbb{R}^n$ mit $\varphi: V \rightarrow M$. Homöomorphismus existieren i. A. nicht.

Beispiel. $M = \mathbb{S}^{n-1} \subset \mathbb{R}^n$. Es kann keine stetige Abbildung $\varphi^{-1}: \mathbb{S}^{n-1} \rightarrow V$ geben, da $\varphi^{-1}(\mathbb{S}^{n-1})$ kompakt wäre, aber V ist offen.

Im Beispiel iii) oben, erreicht man daher nicht die ganze \mathbb{S}^n . $V = (0, \pi) \times (0, 2\pi)$,

$$\varphi(\beta, \alpha) = (\cos \alpha \sin \beta, \sin \alpha \sin \beta, \cos \beta).$$



Spur von φ

oder ($V = \mathbb{R}^2$) es liegt kein Homöomorphismus vor.

Für $a \in \{(\sin \beta, 0, \cos \beta) \mid \beta \in (0, \pi)\}$ wählt man als lokale Parametrisierung einfach $V = (0, \pi) \times (-\pi, \pi)$ (dann fehlt ein anderer Halbkreis).

Oder man wählt $D \ni (y, z) \mapsto (\sqrt{1 - y^2 - z^2}, y, z)$ mit

$$D = \left\{ (y, z) \in \mathbb{R}^2 \mid \|(y, z)\|_E < 1 \right\}.$$

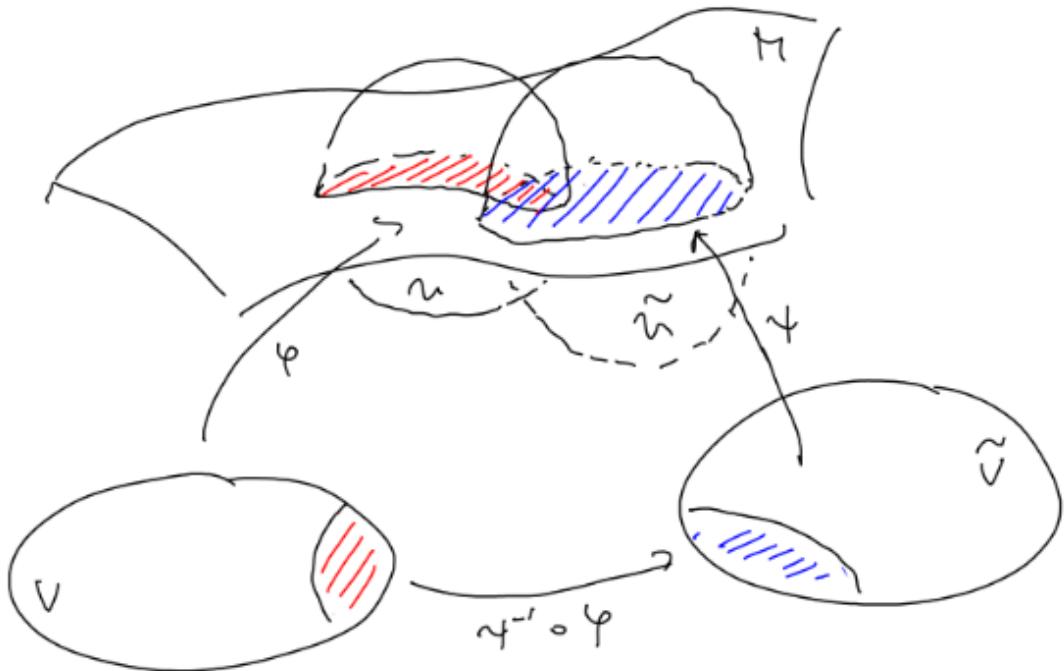
29 min

Satz 4.9 (Parameterwechsel). Sei $M \subset \mathbb{R}^n$ eine d -dimensionale Untermannigfaltigkeit. Seien $\varphi: V \rightarrow M \cap U$ und $\psi: \tilde{V} \rightarrow M \cap \tilde{U}$ zwei lokale Parametrisierungen mit $M \cap U \cap \tilde{U} \neq \emptyset$. Dann ist der *Parameterwechsel*

$$\psi^{-1} \circ \varphi: \varphi^{-1}(M \cap U \cap \tilde{U}) \rightarrow \psi^{-1}(M \cap U \cap \tilde{U})$$

ein Diffeomorphismus.

Bemerkungen. $\varphi^{-1}(M \cap U \cap \tilde{U})$ und $\psi^{-1}(M \cap U \cap \tilde{U})$ sind offen.



Beweis. Da φ und ψ stetig sind, und $M \cap U$ und $M \cap \tilde{U}$ offen, sind $\varphi^{-1}(M \cap U \cap \tilde{U})$ und $\psi^{-1}(M \cap U \cap \tilde{U})$ offen.

$\psi^{-1} \circ \varphi$ ist als Komposition von Homöomorphismen Homöomorphismus.

Sei $a \in M \cap U \cap \tilde{U}$, $t_0 := \varphi^{-1}(a)$, $\tilde{t}_0 := \psi^{-1}(a)$. M ist lokal diffeomorph zu einem Ebenenstück $\implies \exists$ offene Umgebung $U(a)$ von a und eine offene Teilmenge $W \subset \mathbb{R}^n$ s. d. und ein Diffeomorphismus $F: U(a) \rightarrow W$ s. d.

$$F(M \cap U(a)) = \{ y \in W \mid y_{d+1} = \dots = y_n = 0 \}.$$

Ohne Einschränkung nehmen wir an, dass

$$U(a) \subseteq U \cap \tilde{U}$$

gilt. Dann gilt auf $\varphi^{-1}(M \cap U \cap \tilde{U})$

$$F \circ \varphi = (h_1, \dots, h_d, 0, \dots, 0)$$

und auf $\psi^{-1}(M \cap U \cap \tilde{U})$

$$F \circ \psi = (f_1, \dots, f_d, 0, \dots, 0)$$

und $D(F \circ \varphi)$ und $D(F \circ \psi)$ haben Rang d , da DF Rang n hat und $D\varphi$ und $D\psi$ Rang d .

$$\implies (h, 0): \varphi^{-1}(M \cap U \cap \tilde{U}) \rightarrow \{ y \in W \mid y_j = 0 \quad j \geq d+1 \}$$

und

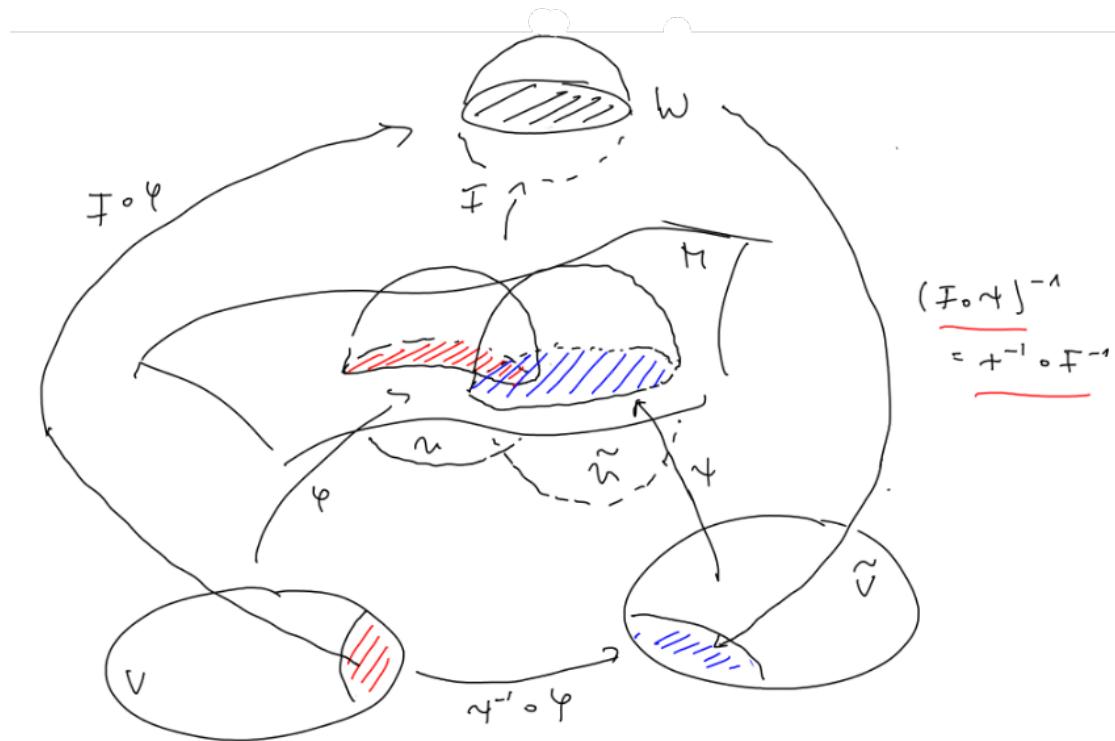
$$(f, 0): \psi^{-1}(M \cap U \cap \tilde{U}) \rightarrow \{ y \in W \mid y_j = 0 \quad j \geq d+1 \}$$

sind Diffeomorphismen. Auf $\varphi^{-1}(M \cap U \cap \tilde{U})$ gilt

$$\psi^{-1} \circ \varphi = (F \circ \psi)^{-1} \circ (F \circ \varphi) = (f, 0)^{-1} \circ (h, 0),$$

□

also ist $\psi^{-1} \circ \varphi$ Diffeomorphismus.



Vorlesung 14

Mo 08.06. 10:15

4.I. Tangential- und Normalraum

Erinnerung. $T_a M = \text{Kern } Df(a)$, wo f eine lokale Beschreibung von M bei a als Nullstellengebilde ist.

$$T_a M = \text{Bild}(D\varphi(x_0)) = \text{Span} \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \partial_1 g(x_0) \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \partial_d g(x_0) \end{pmatrix} \right\},$$

wo $\varphi(x) = (x, g(x))$ die zu einer lokalen Beschreibung von M bei a als Graph gehörige Graphenabbildung ist und $a = (x_0, g(x_0))$.

Es gilt allgemeiner

Satz 4.10. Sei M d -dimensionale Untermannigfaltigkeit des \mathbb{R}^n . Sei $a \in M$, $U \subset \mathbb{R}^n$ offene Umgebung von a und $\varphi: V \rightarrow M \cap U$ eine lokale Parametrisierung von M bei a , also $\varphi: V \rightarrow \mathbb{R}^n$, $V \subset \mathbb{R}^d$ offen, ist C^1 , $D\varphi(t)$ von maximalem Rang d für alle $t \in V$, $\varphi: V \rightarrow M \cap U$ Homöomorphismus. Sei $t_0 \in V$ s. d. $\varphi(t_0) = a$. Dann ist $T_a M = \text{Bild } D\varphi(t_0)$, also

$$T_a M = \text{Span} \underbrace{\{\partial_1 \varphi(t_0), \dots, \partial_d \varphi(t_0)\}}_{\text{Basis von } T_a M}. \quad (4.1)$$

Beweis.

$$\text{rang } D\varphi(t_0) = d \implies \dim \text{Bild } D\varphi(t_0) = d \quad \checkmark.$$

$T_a M \subset \text{Bild } D\varphi(t_0)$ Sei $v = v_1 \partial_1 \varphi(t_0) + \dots + v_d \partial_d \varphi(t_0)$, $v_j \in \mathbb{R}$. Betrachte

$$\begin{aligned} \gamma: (-\varepsilon, \varepsilon) &\rightarrow M \cap U \\ \gamma(s) &:= \varphi(t_0 + s\underline{v}) \end{aligned}$$

mit $\underline{v} = (v_1, \dots, v_d)^T \in \mathbb{R}^n$ und mit ε so klein gewählt, dass $t_0 + s\underline{v} \in V$ für alle $s \in (-\varepsilon, \varepsilon)$. Dann gilt: $\gamma(0) = \varphi(t_0) = a$ und γ ist stetig differenzierbar und

$$\begin{aligned} \gamma'(0) &= D\varphi(t_0) \cdot \underline{v} \\ &= \partial_1 \varphi(t_0) \cdot v_1 + \dots + \partial_d \varphi(t_0) \cdot v_d \\ &= v. \end{aligned}$$

$T_a M \supset \text{Bild } D\varphi(t_0)$. Sei also $v \in T_a M$, $\gamma: (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow M \cap U$ stetig differenzierbar mit $\gamma(0) = a$, $\gamma'(0) = v$. Dann ist $c = \varphi^{-1} \circ \gamma: (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow V$ stetig differenzierbar (das folgt wie im Beweis von 4.9 aus der Verknüpfung mit einem Diffeomorphismus $F: \tilde{U} \rightarrow W$ mit

$$F(M \cap \tilde{U}) = \{a \in W \mid y_j = 0 \quad j \geq d+1\}.$$

O.B.d.A. $U = \tilde{U}$, somit ist

$$\varphi^{-1} \circ \gamma = (\underbrace{F \circ \varphi}_{=(f,0) \text{ Diffeo}})^{-1} \circ (F \circ \gamma)$$

C^1 .) Es gilt (Kettenregel!)

$$\begin{aligned} v &= \gamma'(0) \\ &= (\varphi \circ c)'(0) \\ &= D\varphi(\underbrace{c(0)}_{=\varphi^{-1}(a)=t_0} \cdot c'(0)) \\ &= \partial_1 \varphi(t_0) \cdot \underbrace{c'_1(0)}_{\in \mathbb{R}} + \cdots + \partial_d \varphi(t_0) \cdot \underbrace{c'_d(0)}_{\in \mathbb{R}}, \end{aligned}$$

also $v \in \text{Span} \{ \partial_1 \varphi(t_0), \dots, \partial_d \varphi(t_0) \}$. □



$$T_{\gamma(t)} M = \{ \lambda \gamma'(t) \mid \lambda \in \mathbb{R} \}.$$

Beispiel. $\mathbb{S}^2 \subset \mathbb{R}^3$, $a = (0, 0, 1)^T$.

a)

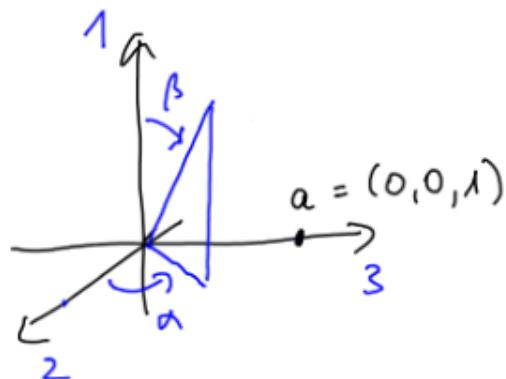
$$\begin{aligned} f(x) &= 1 - x_1^2 - x_2^2 - x_3^2 \\ Df(x) &= -2(x_1, x_2, x_3) \\ T_a M &= \text{Kern } D(a) = \text{Kern}(-2e_3^T) \\ &= \{ e_3 \}^\perp = \text{Span} \{ e_1, e_2 \}. \end{aligned}$$

b) $\varphi: D = \{x \in \mathbb{R}^2 \mid \|x\|_E < 1\} \rightarrow \mathbb{R}^3$, $\varphi(x) = (x, \sqrt{1 - x_1^2 - x_2^2})^T$,

$$\begin{aligned}\partial_1 \varphi(x) &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \frac{-x_1}{\sqrt{\dots}} \end{pmatrix} \\ \partial_2 \varphi(x) &= \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ \frac{-x_2}{\sqrt{\dots}} \end{pmatrix} \\ a &= \varphi(0) \\ \implies T_a M &= \text{Span} \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\}.\end{aligned}$$

c) $\varphi: (0, \pi) \times (0, 2\pi) \rightarrow \mathbb{R}^3$, $\varphi(\beta, \alpha) = (\cos \beta, \cos \alpha \sin \beta, \sin \alpha \sin \beta)^T$.

15 min



$$\partial_1 \varphi(\beta, \alpha) = (-\sin \beta, \cos \alpha \cos \beta, \sin \alpha \cos \beta)^T$$

$$\partial_2 \varphi(\beta, \alpha) = (0, -\sin \alpha \sin \beta, \cos \alpha \sin \beta)^T$$

$$\varphi\left(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right) = (0, 0, 1)^T = a$$

$$\implies T_a M = \text{Span} \left\{ \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\} = \text{Span} \{ e_1, e_2 \}.$$

Definition. Sei $M \subset \mathbb{R}^n$ d -dimensionale Untermannigfaltigkeit. $\nu \in \mathbb{R}^n$ heißt *Normalenvektor* ab M im Punkt $a \in M$, falls $\langle \nu, v \rangle = 0 \forall v \in T_a M$, also $\nu \in (T_a M)^\perp =: N_a M$ „*Normalen-Raum*“.

Bemerkungen 4.11. i) Da $T_a M$ ein Vektorraum ist, so ist auch $N_a M$ ein Vektorraum.

ii) $\dim N_a M = n - d$, denn $T_a M \oplus T_a M^\perp = \mathbb{R}^n$.

iii) $T_a M = \text{Kern } Df(a)$, wenn f M lokal bei a als Nullstellengebilde beschreibt (also $\exists U \subset \mathbb{R}^n$ offen, $a \in U$, s. d. $M \cap U = \{x \in U \mid f(x) = 0\}$, $f: U \rightarrow \mathbb{R}^{n-d}$ ist C^1 und $Df(x)$ hat maximalen Rang $n - d$ für alle $x \in U$.) Anders gesagt:

$$T_a M = \{v \in \mathbb{R}^n \mid \langle v, \text{grad } f_j(a)\rangle = 0 \quad j = 1, \dots, n - d\}.$$

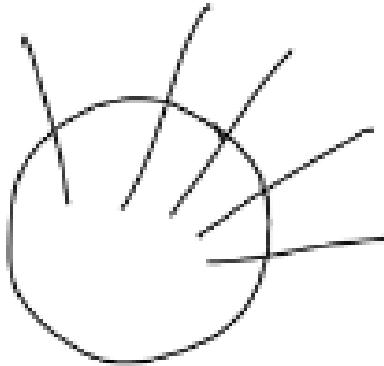
Wegen der linearen Unabhängigkeit der Gradienten folgt hieraus:

$$N_a M = \text{Span}\{\text{grad } f_1(a), \dots, \text{grad } f_{n-d}(a)\}.$$

iv) $T_a M = \text{Bild } D\varphi(t_0)$ wenn φ lokal bei a M parametrisiert (vgl. 4.10) und $\varphi(t_0) = a$. Die Spalten von $D\varphi(t_0)$ bilden eine Basis von $T_a M$

$$\implies N_a M = \{\nu \in \mathbb{R}^n \mid \langle \nu, \partial_j \varphi(t_0)\rangle = 0 \quad j = 1, \dots, d\}.$$

Beispiel. $M = \mathbb{S}^2 \subset \mathbb{R}^3$.



a) $N_a M = \{\lambda a \mid \lambda \in \mathbb{R}\}.$

b) $a \in \mathbb{S}^2$, $a_3 > 0$.

$$\begin{aligned} N_a M &= \left\{ \nu \mid \nu_1 = \frac{a_1}{\sqrt{1-a_1^2-a_2^2}} \nu_3, \nu_2 = \frac{a_2}{\sqrt{1-a_1^2-a_2^2}} \nu_3 \right\} \\ &= \left\{ \lambda \frac{1}{\sqrt{1-a_1^2-a_2^2}} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \sqrt{\dots} \end{pmatrix} \mid \lambda \in \mathbb{R} \right\} = \{ \lambda a \mid \lambda \in \mathbb{R} \}. \end{aligned}$$

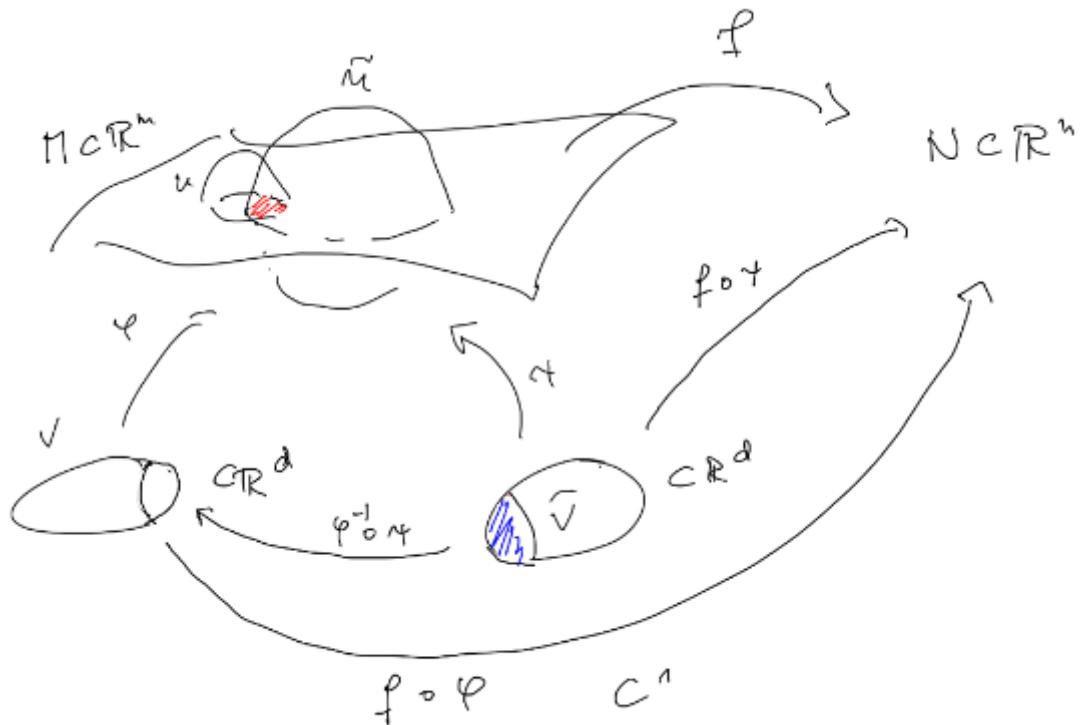
c) Für allgemeinere Punkte als den Nordpol wäre dies mit Rechenaufwand verbunden.

25 min

Definition 4.12. Sei M d -dimensionale Untermannigfaltigkeit des \mathbb{R}^m , sei N d' -dimensionale Untermannigfaltigkeit des $\mathbb{R}^{n'}$. Eine Abbildung $f: M \rightarrow N$ heißt *stetig differenzierbar*, falls für alle $a \in M$ gilt: Wenn $\varphi: M \cap U$ eine lokale Parametrisierung bei a ist, so ist $f \circ \varphi: \mathbb{R}^d \supset V \rightarrow \mathbb{R}^{d'}$ stetig differenzierbar.

Bemerkungen. Ist $X \circ \varphi$ für eine lokale Parametrisierung C^1 und $\psi: \tilde{V} \rightarrow M \cap \tilde{U}$ weitere Parametrisierung bei a , so ist auch $X \circ \psi|_{\psi^{-1}(M \cap U \cap \tilde{U})} C^1$, denn

$$X \circ \psi|_{\psi^{-1}(M \cap U \cap \tilde{U})} = X \circ \varphi \circ \underbrace{\varphi^{-1} \circ \psi}_{\text{Diffeo (4.10)}} \Big|_{\psi^{-1}(M \cap U \cap \tilde{U})}.$$



$$f \circ \psi|_{\textcolor{blue}{U}} = f \circ \varphi \circ \underbrace{\varphi^{-1} \circ \psi}_{\text{Diffeo}}|_{\textcolor{blue}{U}}, \quad \textcolor{blue}{U} = \psi^{-1}(M \cap U \cap \tilde{U}).$$

Definition 4.13. Sei M d -dimensionale Untermannigfaltigkeit des \mathbb{R}^n . Ein *Vektorfeld* auf M ist eine stetig differenzierbare Abbildung

$$X: M \rightarrow \mathbb{R}^n \text{ s.d. } X(a) \in T_a M \quad \forall a \in M.$$

. Ein *Normalenfeld* ist eine stetig differenzierbare Abbildung

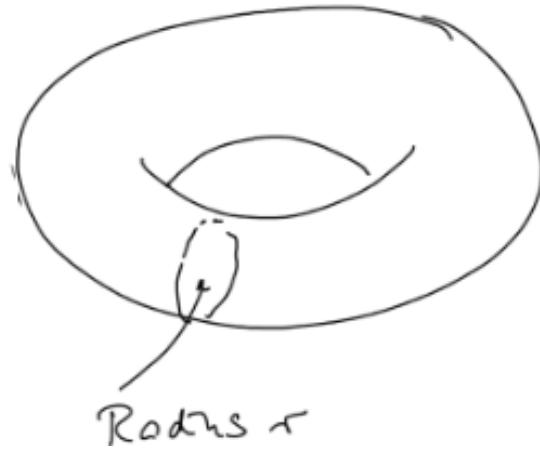
$$\mathcal{N}: M \rightarrow \mathbb{R}^n \text{ s.d. } \mathcal{N}(a) \in N_a M \quad \forall a \in M.$$

Beispiele. i) $M = \mathbb{S}^5$, $\mathcal{N}(a) = a$ offensichtlich stetig differenzierbar.

ii) $M = \text{Torus } \Pi^2 \subset \mathbb{R}^3$, $r < R$.

$$f(x, y, z) = (x^2 + y^2 + z^2 + R^2 - r^2)^2 - 4R^2(x^2 + y^2).$$

$f = 0$ definiert eine Untermannigfaltigkeit:



$$\text{grad } f(a) = \begin{pmatrix} 4a_1(a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 - R^2 - r^2) \\ 4a_2(a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 - R^2 - r^2) \\ 4a_3(a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + R^2 - r^2) \end{pmatrix} \neq 0$$

für $a \in \Pi^2 \implies Df(a)$ hat maximalen Rang (1).

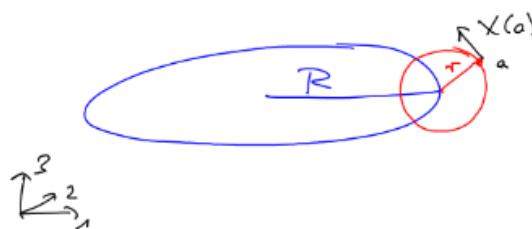
$$\mathcal{N}(a) = \frac{\text{grad } f(a)}{\|\text{grad } f(a)\|_{\text{E}}}$$

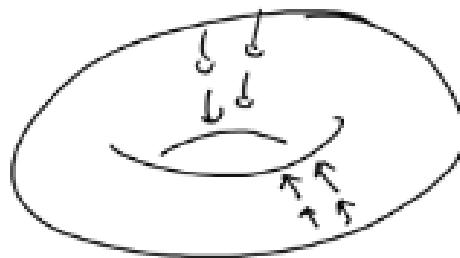
ist stetig differenzierbar. Tangentialraum $T_a M$ = Ebene senkrecht $\nu_a = \text{grad } f(a)$. Parametrisierung bei $a \in \pi^2$: Mit geeigneten Intervallen für die Winkel gilt:

$$a = \varphi(\alpha, \beta) = R \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \\ 0 \end{pmatrix} + r \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \beta \\ \sin \beta \end{pmatrix}$$

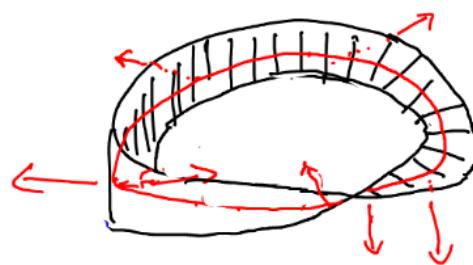
$$X(\varphi(\alpha, \beta)) = \partial_2 \varphi(\alpha, \beta) = \begin{pmatrix} -r \cos \alpha \sin \beta \\ -r \sin \alpha \sin \beta \\ \cos \beta \end{pmatrix}$$

offensichtlich C^1 .





iii) Möbius-Band.



Langer Streifen Papier, einmal verdrehen, zusammenkleben. Mittellinie einzeichnen. Normalenvektor auf einem Punkt der Mittellinie bestimmen, auf 1 normieren ($\|\nu\|_E = 1$). Führt man diesen stetig entlang der Mittellinie und verändert dabei seine Länge nicht, sieht man, dass es kein stetiges normiertes Normalenfeld auf dem Möbius-Band geben kann. Eine solche Fläche nennt man nicht orientierbar.

Definition 4.14. Sei $X: M \rightarrow \mathbb{R}^n$ ein Vektorfeld (M d -dimensionale Untermannigfaltigkeit). Eine *Integralkurve* von X ist eine stetig differenzierbare Kurve $\gamma: I \rightarrow M$ s. d.

$$\gamma'(t) = X(\gamma(t))$$

Im nächsten Kapitel (Differentialgleichungen) wird es um Existenz und Eindeutigkeit solcher Kurven gehen (aber nur im \mathbb{R}^n).

Definition 4.15. $M \subset \mathbb{R}^n$ ist eine d -dimensionale *Untermannigfaltigkeit mit Rand* falls es zu jedem $a \in M$ eine lokale Parametrisierung gibt $\varphi: V \rightarrow \varphi(V) \subset M$ mit $V \subset \mathbb{R}_+^d$, $\mathbb{R}_+^d = \{x \in \mathbb{R}^d \mid x_1 \leq 0\}$ (V offen in \mathbb{R}^d , falls $\exists U$ offen in \mathbb{R}^d s. d. $V = \mathbb{R}_+^d \cap U$

(Teilraumtopologie), also z. B. ist $(\infty, 0) \times (0, 1)^{d-1}$ offen in \mathbb{R}_-^d). p heißt *Randpunkt von M* , falls $p = \varphi(t)$ mit $t \in V \cap \partial\mathbb{R}_-^d$, wobei

$$\partial\mathbb{R}_-^d = \left\{ (0, x_2, \dots, x_d) \in \mathbb{R}_-^d \right\}.$$

Die Menge aller Randpunkte wird mit ∂M bezeichnet.

Bemerkung. Man kann auch $\mathbb{R}_+^d = \left\{ x \in \mathbb{R}^d \mid x_1 \geq 0 \right\}$ oder auch $\left\{ x \in \mathbb{R}^d \mid x_d \geq c \right\}$ bzw. $\left\{ x \in \mathbb{R}^d \mid x_d \leq c \right\}$ betrachten.

Beispiel. $\bar{\mathbb{D}} = \{x \in \mathbb{R}^2 \mid \|x\|_{\text{E}} \leq 1\}$. $\overline{\partial\mathbb{D}} = \mathbb{S}^1$. Wähle zu $a \in \bar{\mathbb{D}}$, $a \neq (1, 0)^T$. Sei $V = [0, 1) \times (0, 2\pi)$. Dann ist V offen in $\{x \in \mathbb{R}^2 \mid x_1 \leq 1\}$ und $V \cap \{x \mid x_1 = 1\} = \mathbb{S}^1 \setminus \{(1, 0)\}$.

$$\varphi: \underbrace{[0, 1) \times (0, 2\pi)}_{=V} \rightarrow \mathbb{R}^2 \quad \varphi(r, \alpha) = r(\cos \alpha, \sin \alpha)^T.$$

Analog zu $a = (1, 0)^T$.

$$\varphi: [0, 1) \times (-\pi, \pi) \rightarrow \mathbb{R}^2 \quad \varphi(r, a) = r(\cos a, \sin a)^T.$$

Ende Audio
Teil 1

4.II. Flächenbemessung auf Untermannigfaltigkeiten

Definition.

$$\begin{aligned} I_a &:= \langle \cdot, \cdot \rangle_a: T_a M \times T_a M \rightarrow \mathbb{R} \\ I_a(v, w) &= \langle v, w \rangle_a = \langle v, w \rangle_{\text{E}} \quad \forall v, w \in T_a M \end{aligned}$$

heißt *erste Fundamentalnorm*.

Bemerkung. $T_a M = \text{Span}\{\partial_1\varphi(t_0), \dots, \partial_d\varphi(t_0)\}$, $\varphi: V \rightarrow M \cap U$ Parametrisierung bei a , $\varphi(t_0) = a$. Es gilt für $v = \sum v_i \partial_i\varphi(t_0)$, $w = \sum w_i \partial_i\varphi(t_0)$

$$\begin{aligned} \langle v, w \rangle_a &= \left\langle \sum v_i \partial_i\varphi(t_0), w_j \partial_j\varphi(t_0) \right\rangle_a \\ &= \sum_i \sum_j v_i w_j \underbrace{\langle \partial_i\varphi(t_0), \partial_j\varphi(t_0) \rangle_{\text{E}}}_{=: g_{ij}(t_0)}. \end{aligned}$$

$g := (g_{ij})_{\substack{i=1, \dots, d \\ j=1, \dots, d}}: V \rightarrow \mathbb{R}$ heißt *metrischer Tensor* (oder Gramsche Matrix).

Lemma 4.16. Unter Parameterwechsel (vgl. 4.9) verhält sich der metrische Tensor wie folgt:

$$= D\Phi(s)^T g_\varphi(\Phi(s)) D\Phi(s)$$

bezgl. $\psi: \tilde{V} \rightarrow M \cap \tilde{U}$ berechnet
bezgl. $\varphi: V \rightarrow M \cap U$ berechnet

mit

$$\Phi = \varphi^{-1} \circ \psi: \varphi^{-1}(M \cap U \cap \tilde{U}) \rightarrow \varphi^{-1}(M \cap U \cap \tilde{U}).$$

Beweis. Betrachte $\psi = \varphi \circ \Phi$. Kettenregel liefert

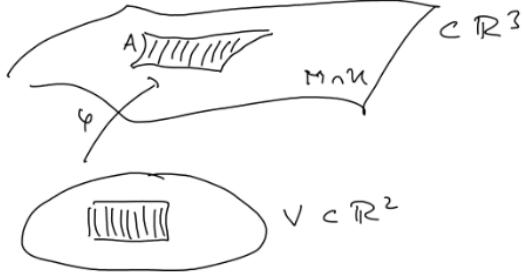
$$\langle \partial_k \psi, \partial_l \psi \rangle = \sum_{i,j} \langle \partial_i \varphi, \partial_j \varphi \rangle \partial_k \Phi_i \partial_l \Phi_j. \quad \square$$

Frage 4.17. Was hat g mit Flächenmessung zu tun?

- a) Wir betrachten eine Hyperfläche ($M = (n - 1)$ -dimensional, also hier $d = 2$) $M \subset \mathbb{R}^3$. Sei $M \cap U \subset \mathbb{R}^3$ parametrisiert von $\varphi: V \rightarrow M \cap U$. Dann ist

$$\varphi(t_0 + h) = \varphi(t_0) + D\varphi(t_0) \cdot h + R_{t_0}(h).$$

Wir wollen dies nutzen, um die Fläche von A abzuschätzen.



- b) Zunächst: Sei $\mathcal{R} = [a_0, a_0 + l_1] \times [b_0, b_0 + l_2] \subset V$. Dann ist, wenn man die Restterme vernachlässigt $\varphi(\mathcal{R})$ ungefähr $(t_0 = (a_0, b_0)^T)$

$$\varphi(t_0) + D\varphi(t_0) \cdot \begin{pmatrix} a_0 \\ b_0 \end{pmatrix} + P(l_1 \partial_1 \varphi(t_0), l_2 \partial_2 \varphi(t_0)),$$

wobei $P(v, w)$ das Parallelotop ist, dass von $v, w \in \mathbb{R}^3$ aufgespannt wird,

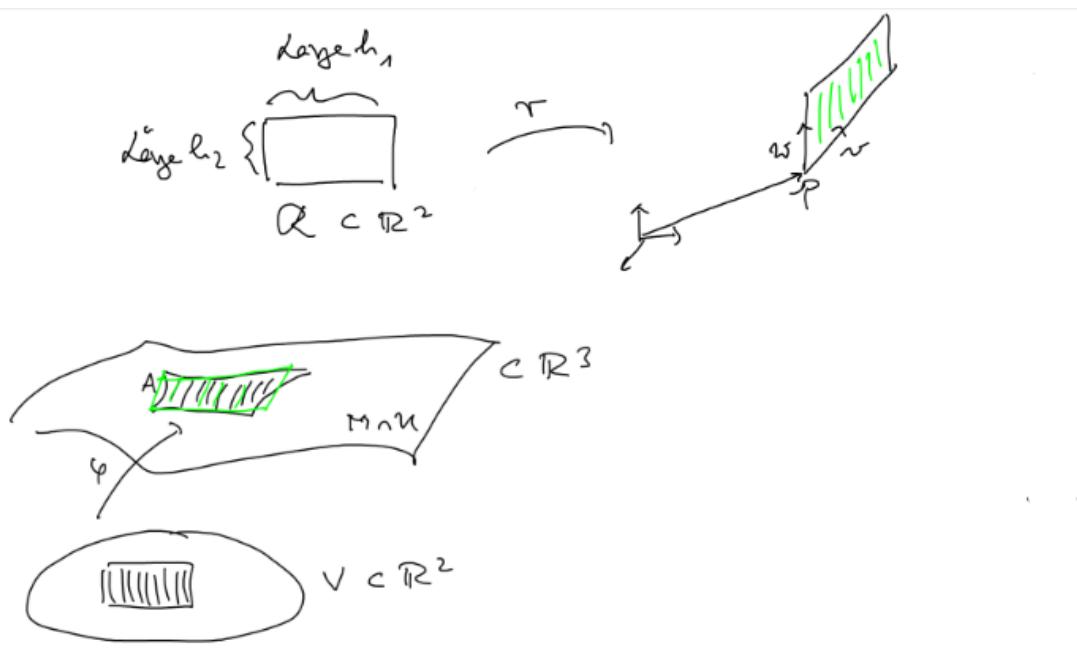
$$P(v, w) = \{ s_1 v + s_2 w \mid 0 \leq s_j \leq 1 \}.$$

Denn für $h \in \mathbb{R}^2$ gilt

$$D\varphi(t_0) \cdot h = h_1 \partial_1 \varphi(t_0) + h_2 \partial_2 \varphi(t_0) \in \mathbb{R}^3$$

und allgemein gilt für $v, w \in \mathbb{R}^3$ und

$$\begin{aligned} r_{v,w} = r: \mathcal{R} &\rightarrow \mathbb{R}^3 & r\begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} &= h_1 v + h_2 w \\ r(\mathcal{R}) &= \underbrace{r(t_0)}_{=p} + P(l_1 v, l_2 w). \end{aligned}$$



Zur ungefähren Berechnung des Flächeninhaltes von $\varphi(\mathcal{R})$ berechnen wir also den des Parallelotops $P(\partial_1 \varphi(t_0) l_1, \partial_2 \varphi(t_0) l_2)$.

- c) Seien $v, w \in \mathbb{R}^3$. Dann ist $\|v \times w\|, v \times w = \begin{pmatrix} v_2 w_3 - v_3 w_2 \\ v_3 w_1 - v_1 w_3 \\ v_1 w_2 - v_2 w_1 \end{pmatrix}$, „Kreuzprodukt“ der

Flächeninhalt des Parallelotops $P(v, w)$. Den:

$$\begin{aligned} A &= \|v\| \cdot \|w\| \cdot \sin \beta \\ &= \sqrt{\|v\|^2 \|w\|^2 (1 - \cos(\beta)^2)} \\ &= \sqrt{\|c\|^2 \|w\|^2 - \langle v, w \rangle^2} \\ &= \sqrt{\|v \times w\|^2} = \|v \times w\| \end{aligned}$$

mit \times wie oben.

d) Es gilt

$$\|\partial_1 \varphi(t_0) \times \partial_2 \varphi(t_0)\|_{\mathbb{E}} = \sqrt{\det g_\varphi(t_0)} \quad (*)$$

mit $\det g_\varphi$ = Determinante der Gramschen Matrix. Also ist die Fläche von $\varphi(R)$ etwa

$$\sqrt{g_\varphi(t_0)} l_1 l_2 = \sqrt{g_\varphi(t_0)} \text{Fläche}(\mathcal{R}).$$

Die Determinante gibt also an, wie sehr die Fläche von \mathcal{R} gestaucht oder gestreckt wird.

Wir werden uns später überlegen, wie man ausgehend von den hier skizzierten Ideen zu einer Definition des Flächeninhalts kommt, der nicht von der gewählten Parametrisierung abhängt.

Es ist noch (*) zu zeigen.

Lemma 4.18. Sei $\varphi: V \rightarrow M \cap U$ Parametrisierung bei a , $V \subset \mathbb{R}^d$, $M \subset \mathbb{R}^n$. Die Determinante von g_{ij} berechnet sich wie folgt:

$$\det g(t_0) = \sum_{i_1 < \dots < i_d} \left(\det D \begin{pmatrix} \varphi_{i_1} \\ \vdots \\ \varphi_{i_d} \end{pmatrix}(t_0) \right)^2$$

Beweis.

$$g(t_0) = (D\varphi)(t_0)^T \cdot D\varphi(t_0)$$

□

und lineare Algebra (Satz von Cauchy-Binet)

Bemerkung. Für $d = 2, n = 3$ gilt nun

$$\begin{aligned}\det g_\varphi &= \sum_{i < j} \left(\det D \begin{pmatrix} \phi_i \\ \phi_j \end{pmatrix} \right)^2 \\ &= \det D \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{pmatrix}^2 + \det D \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_3 \end{pmatrix}^2 + \det D \begin{pmatrix} \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{pmatrix}^2 \\ &= \underbrace{\langle \partial_1 \varphi \times \partial_2 \varphi, \partial_1 \varphi \times \partial_2 \varphi \rangle}_{\text{Rechnung}} \implies \text{Beh. } (*).\end{aligned}$$

Kapitel 5.

Differentialgleichungen

Vorlesung 15

Do 11.06. 10:15

Definition 5.1. $V \subset \mathbb{R}^{n+1}$, $F: V \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig. Dann nennt man

$$x' = F(t, x) \quad (*)$$

eine *Differentialgleichung (DGL)*

1. *Ordnung* ($n = 1$) oder *System von DGL'n 1. Ordnung* ($n \geq 2$). Eine *Lösung* von $(*)$ ist eine differenzierbare Funktion $u: I \rightarrow \mathbb{R}^n$, $I \subset \mathbb{R}$ Intervall, mit $u'(t) = F(t, u(t))$, also insbesondere $(t, u(t)) \in V$, also

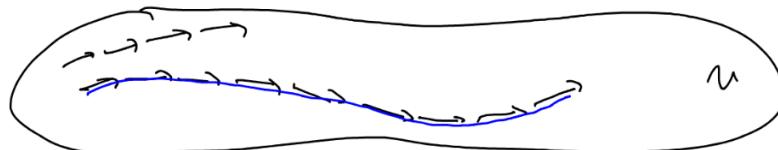
$$\Gamma_u = \{ (t, u(t)) \mid t \in I \} \subset V.$$

5.I. Geometrische Interpretation

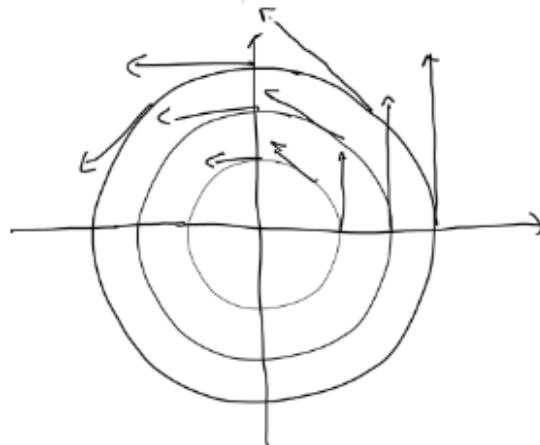
Sei zunächst F nicht von t abhängig, $F: \mathbb{R} * U \rightarrow \mathbb{R}^n$, $U \subset \mathbb{R}^n$ offen, $T(t, x) = G(x)$, also

$$x' = G(x). \quad (**)$$

Dann kann man G als Vektorfeld auf U ansehen (denn $T_a U = \text{Span} \{ e_1, \dots, d_n \}$), in diesem Fall ein *stetiges Vektorfeld*, also eine stetige Abbildung $G: U \rightarrow T_a U = \mathbb{R}^n$. Eine Lösung der DGL $(**)$ ist dann eine differenzierbare Integralkurve (nicht unbedingt stetig differenzierbar).



Beispiel. $G: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$, $G(x_1, x_2) = \begin{pmatrix} -x_2 \\ x_1 \end{pmatrix}$.



Hier raten wir:

$$u(t) = \begin{pmatrix} \cos t \\ \sin t \end{pmatrix} \cdot r \quad r > 0.$$

Tatsächlich

$$\begin{aligned} u'(t) &= \begin{pmatrix} -\sin t \\ \cos t \end{pmatrix} \cdot r \quad r > 0 \\ &= G(u(r)). \end{aligned}$$

Man kann sich vorstellen, während Zeit t vergeht, wandert ein Punkt entlang von u und erfüllt zu jedem Zeitpunkt t , dass seine Geschwindigkeit in Richtung und Größe durch G vorgegeben ist (und wie wir sehen werden unter gewissen Umständen u selbst dadurch eindeutig festgelegt wird).

Dieses Bild trägt auch noch, wenn F explizit von t abhängt:

In diesem Fall verändert sich das Vektorfeld selbst, während Zeit verstreicht, und der Tangentialvektor, dem $u'(t)$ zum Zeitpunkt t gleich sein soll, ist nicht nur von der Position $\gamma(t)$ abhängig, sondern auch um Zeitpunkt t .

Beispiele. i) Aus dem Satz über implizite Funktionen berechnete Ableitung der Auflösungsfunktion g , etwa in Vorlesung 9 (1. Beispiel vor Satz 3.19)

$$y' = \begin{pmatrix} \frac{t}{y} & \frac{t}{y} \end{pmatrix}.$$

ii) Wachstumsmodelle:

a) Wachstum proportional zur Populationszahl

$$x' = \alpha x, \quad u(t) = ce^{\alpha t}.$$

b) Logistisches Wachstum (Grenzen des Wachstums wegen Ressourcen-Knappheit).

Wachstum ist proportional zur Populationszahl y und zum verbleibenden Platz $\mu(1 - y)$.

$$x' = \alpha x(1 - x).$$

c) Räuber-Beute-Modelle

iii) Jede Menge Modelle in Physik, Chemie, Biologie, Wirtschaft etc., z. B. freier Fall (2. Ableitung)

$$x'' = -g.$$

Die DGL'n, die wir hier betrachte, werden explizit lösbar sein, d. h. es gibt Lösungen u , die man explizit angeben kann. Für Räuber-Beute-Modell etwa gibt es solche aber i. A. nicht.

5.II. Existenz- und Eindeutigkeitssatz

Sei $x' = F(t, x)$ eine DGL wie in Definition 5.1,

$$F: V \rightarrow \mathbb{R}^n, V \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n.$$

Legt man zusätzlich fest, dass eine Lösung

$$u: I \rightarrow \mathbb{R}^n$$

erfüllen soll, dass $u(t_0) = u_0$ gelten soll für ein $(t_0, u_0) \in V$, so spricht man von einem *Anfangswertproblem* (AWP) und notiert

$$\begin{aligned} x' &= F(t, x) \\ x(t_0) &= u_0 \end{aligned} \tag{*}$$

Beispiel. $x' = \alpha x$, $u(t) = ce^{\alpha t}$ löst die DGL. $u(t) = u_0 e^{\alpha t}$ löst das AWP $x' = \alpha x$, $x(0) = u_0$.

Existenz und Eindeutigkeit der Lösung:

Formuliere das Problem als Fixpunkt-Problem und verwende den Banachschen Fixpunktsatz.

Denn u ist eine Lösung der DGL $x' = F(t, x)$

$$\iff u(t) = u(t_0) + \int_{t_0}^t u'(s) ds = u(t_0) + \int_{t_0}^t F(s, u(s)) ds$$

und löst u das AWP (*), so ist $u(t_0) = u_0$. u ist also Lösung des AWP $\iff u$ = Fixpunkt der Abbildung

$$u \mapsto Tu, \quad Tu(t) = u_0 + \int_{t_0}^t F(s, u(s)) ds.$$

Definition 5.2. Sei $V \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$ und $F: V \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine Funktion. Man sagt

- F erfüllt auf V eine *Lipschitz-Bedingung* mit Lipschitz-Konstante L , falls es $L \geq 0$ gibt s. d.
- $$\|F(t, x) - F(t, \tilde{x})\| \leq L \|x - \tilde{x}\| \quad \forall (t, x), (t, \tilde{x}) \in V.$$
- F erfüllt *lokal eine Lipschitz-Bedingung*, falls es zu jedem Punkt $(t_0, x_0) \in V$ eine offene Umgebung \tilde{V} und eine Konstante $L = L_{\tilde{V}} \geq 0$ gibt s. d. F auf $V \cap \tilde{V}$ eine Lipschitz-Bedingung mit Konstante L erfüllt.

Lemma 5.3. Ist $V \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$ offen und ist $F: V \rightarrow \mathbb{R}^n$ bezüglich der hinteren n Variablen stetig differenzierbar, so erfüllt f lokal in V eine Lipschitz-Bedingung.

Beweis. Sei $(t_0, x_0) \in V$. Dann $\exists r > 0$ s. d.

$$K := \{ (t, x) \in V \mid |t - t_0| \leq r \text{ und } \|x - x_0\| \leq r \}.$$

K ist kompakt nach dem Satz von Heine + Borel.

$$\implies L := \sup_{(t,x) \in K} \|D_2 F\| < \infty \quad DF = \begin{pmatrix} \partial_1 f & D_2 F \end{pmatrix}. \quad (5.1) \quad \square$$

MWS $\implies \|F(t, x) - F(t, \tilde{x})\| \leq L \|x - \tilde{x}\|$.

Bemerkung. Stetige Differenzierbarkeit bezüglich der hinteren n Variablen bedeutet, dass $D_2 F$ auch bezüglich der ersten Variablen stetig ist.

Satz 5.4 (Picard-Lindelöf). Sei $V \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$. Sei $mF: V \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig und erfülle lokal auf V eine Lipschitz-Bedingung. Dann hat das Anfangswertproblem

$$\begin{aligned} x' &= F(t, x) \\ x(t_0) &= u_0 \quad (t_0, u_0) \in V. \end{aligned}$$

ine eindeutige Lösung $u: I \rightarrow \mathbb{R}^n$ mit $t_0 \in I$ und $u(t_0) = u_0$.

Beweis. Da F lokal einer Lipschitz-Bedingung genügt, gibt es $L \geq 0$ und eine Umgebung \tilde{V} von (t_0, x_0) s.d.

$$\|F(t, x) - F(t, \tilde{x})\| < L\|x - \tilde{x}\| \quad \forall (t, x), (t, \tilde{x}) \in \tilde{V} \cap V.$$

Sei $J \times K \subset \tilde{V} \cap V$ mit J kompaktes Intervall $t_0 \in J$, $K \subset \mathbb{R}^n$ kompakt, $x_0 \in K$, o.B.d.A. $K = \overline{B_r(x_0)}$, $r > 0$.

Wähle $\delta > 0$ s.d.

$$L\delta < 1 \text{ und } \delta\|F\|_{\infty, J \times K} \leq r.$$

Betrachte $T: \mathcal{F} \rightarrow C(I, \mathbb{R}^n)$,

$$\mathcal{F} = \{u \in C(I, \mathbb{R}^n) \mid u(I) \subset K\}$$

mit $I = J \cap [t_0 - \delta, t_0 + \delta]$ (kompakt).

$$(Tu)(t) = u_0 + \int_{t_0}^t F(s, u(s)) ds.$$

Es ist tatsächlich $Tu \in C(I, \mathbb{R}^n)$. Sei $u \in I$ und $t \in I$. Dann gilt

$$\begin{aligned} \|Tu - u_0\|_\infty &= \left\| \int_{t_0}^t F(s, u(s)) ds \right\|_\infty \\ &\leq \delta\|F\|_\infty \leq r, \end{aligned}$$

somit ist $Tu \in \mathcal{F} \quad \forall u \in \mathcal{F}$. Zudem ist

$$\begin{aligned} \|Tu - Tv\|_\infty &= \left\| \int_{t_0}^t (F(s, u(s)) - F(s, v(s))) ds \right\|_\infty \\ &\leq |t - t_0|L\|u - v\|_\infty \\ &\leq \underbrace{L \cdot |I| \cdot \|u - v\|_\infty}_{\leq L \cdot \delta < 1}. \end{aligned} \quad \square$$

$\Rightarrow T: \mathcal{F} \rightarrow \mathcal{F}$ ist Kontraktion. Zudem ist $\mathcal{F} \subset C(I, \mathbb{R}^n)$ abgeschlossen (bezüglich $\|\cdot\|_\infty$) \Rightarrow Beh. (Banachscher Fixpunktsatz).

Bemerkung. Der Beweis ist konstruktiv, d. h. beginnend mit $u_0(t) = u_0$ (z. B.) erhält man die Lösung als gleichmäßigen Limes der Iteration

$$u_{n+1}(t) = u_0 + \int_{t_0}^t F(s, u_n(s)) ds$$

Beispiele. i) $x' = \begin{pmatrix} -x_2 \\ x_1 \end{pmatrix}$, $x(0) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$.

$$\begin{aligned} u_0(t) &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ u_1(t) &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\int_0^t 0 ds \\ \int_0^t 1 ds \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ t \end{pmatrix} \\ u_2(t) &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\int_0^t s ds \\ \int_0^t 1 ds \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{t^2}{2} \\ t \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Behauptung.

$$\begin{aligned} u_{2u}(t) &= \begin{pmatrix} 1 - \frac{t^2}{2} + \cdots + (-1)^n \frac{t^{2n}}{(2n)!} \\ t - \cdots - (-1)^n \frac{t^{2n-1}}{(2n-1)!} \end{pmatrix} \\ u_{2n+1}(t) &= \begin{pmatrix} 1 - \frac{t^2}{2} + \cdots + (-1)^n \frac{t^{2n}}{(2n)!} \\ t - \cdots + (-1)^n \frac{t^{2n+1}}{(2n+1)!} \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Beweis. per Induktion □

$$\implies x(t) = \begin{pmatrix} \cos t \\ \sin t \end{pmatrix}$$

ii) $F(t, x) = 2tx$, $F: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, $x' = 2tx$, $x(0) = x_0$.

$$\begin{aligned} u_{k+1}(t) &= x_0 + 2 \int_0^t s u_k(s) ds \\ u_0(t) = x_0 \implies u_1(t) &= x_0 + x_0 t^2 \\ u_2(t) &= x_0 + 2 \int_0^t s(x_0 + x_0 s^2) ds \\ &= x_0 \left(1 + t^2 + \frac{t^4}{2} \right). \end{aligned}$$

Per Induktion beweist man

$$\begin{aligned} u_k(t) &= x_0 \left(1 + t^2 + \frac{t^4}{2} + \frac{t^6}{3!} + \cdots + \frac{t^{2k}}{k!} \right) \\ \implies u(t) &= x_0 e^{t^2}. \end{aligned}$$

Definition. Sei $V \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^{k \cdot n}$, $F: V \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig. Dann nennt man

$$x^{(k)} = F(t, x, x', x'', \dots, x^{(k-1)}) \quad (*)$$

eine *Differentialgleichung (DGL)* k -ter *Ordnung* ($n = 1$) oder *System von DGL*'n k -ter *Ordnung* ($n \geq 2$).

Beispiel. $x'' = -(x')^2 + xt$ ($k = 2$) (also $F(t, x_0, x_1) = -x_1^2 + x_0 t$).

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

$$\varphi^{(k)}(t) = F(t, \varphi(t), \varphi'(t), \varphi''(t), \dots, \varphi^{(k-1)}(t)).$$

Damit dies wohldefiniert ist, muss gelten

$$(t, \varphi(t), \varphi'(t), \varphi''(t), \dots, \varphi^{(k-1)}(t)) \in V \quad \forall t \in I.$$

Bemerkung. Wir können in Beweisen o.B.d.A. $k = 1$ setzen und alle Sätze, die wir für diesen Fall beweisen, auf den Fall $k \geq 2$ übertragen. Es gilt nämlich:

Satz 5.5 (Reduktion der Ordnung). Sei

$$x^{(k)} = F(t, x, x', \dots, x^{(k-1)}) \quad (*)$$

DGL (-System) k -ter Ordnung. Betrachte

$$F: V \rightarrow \mathbb{R}^{n \cdot k}$$

$$\tilde{F}(t, x_0, x_1, \dots, x_{k-1}) = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{k-1} \\ F(t, x_0, x_1, \dots, x_{k-1}) \end{pmatrix}$$

und das DGL-System 1. Ordnung

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_{k-1} \end{pmatrix}' = \tilde{F}(t, x_0, \dots, x_{k-1}) = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{k-1} \\ F(t, x_0, x_1, \dots, x_{k-1}) \end{pmatrix} \quad (**)$$

Sei $u: I \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine Lösung von (*), gelte also

$$u^{(k)}(t) = F(t, u(t), u'(t), u''(t), \dots, u^{(k-1)}(t)) \quad \forall t \in I,$$

so ist

$$\underline{U} := \begin{pmatrix} u \\ u' \\ \vdots \\ u^{(k-1)} \end{pmatrix}: I \rightarrow \mathbb{R}^{k \cdot n}$$

eine Lösung von (**). Umgekehrt: Sei

$$\underline{U} := \begin{pmatrix} u_0 \\ u_1 \\ \vdots \\ u_{k-1} \end{pmatrix}: I \rightarrow \mathbb{R}^{k \cdot n}$$

Lösung von (**), so ist $u := u_0: I \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine Lösung von (*).

Beispiel.

$$x'' + x = 0 \tag{*}$$

Lösungen: cos, sin. $F(t, x, x') = -x$. Reduktion der Ordnung:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \end{pmatrix}' &= \begin{pmatrix} x_1 \\ F(t, x_0, x_1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ -x_0 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \sin \\ \cos \end{pmatrix}'(t) &= \begin{pmatrix} \cos t \\ -\sin t \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \cos \\ -\sin \end{pmatrix}'(t) = \begin{pmatrix} -\sin t \\ -\cos t \end{pmatrix} \end{aligned} \tag{**}$$

\Rightarrow sin und cos sind Lösungen von (**).

Bemerkung. Wie man an der Formulierung des Satzes und des Beispiels sieht, ist es zum Lösen einer DGL k -ter Ordnung in der Regel nicht opportun, die Ordnung zu reduzieren.

Beweis von Satz 5.5. Sei $u: I \rightarrow \mathbb{R}$ Lösung on (*), d.h.

$$u^{(k)}(t) = F(t, u(t), u'(t), u''(t), \dots, u^{(k-1)}(t)).$$

Dann ist

$$\underline{U}: I \rightarrow \mathbb{R}^{k \cdot n}, \quad \underline{U}(t) := \begin{pmatrix} u(t) \\ u'(t) \\ \vdots \\ u^{(k-1)}(t) \end{pmatrix}$$

eine Lösung von (**), denn

$$\underline{U}'(t) = \begin{pmatrix} u'(t) \\ u''(t) \\ \vdots \\ u^{(k)}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u'(t) \\ \vdots \\ u^{(k-1)}(t) \\ F(t, u(t), u'(t), u''(t), \dots, u^{(k-1)}(t)) \end{pmatrix}.$$

Sei umgekehrt $\underline{U}: I \rightarrow \mathbb{R}^k$, $\underline{U}(t) = \begin{pmatrix} u_0(t) \\ \vdots \\ u_{k-1}(t) \end{pmatrix}$ eine Lösung von (**), gelte also

$$\underline{U}'(t) = \begin{pmatrix} u'_0(t) \\ \vdots \\ u'_{k-1}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1(t) \\ \vdots \\ u_{k-1}(t) \\ F(t, u(t), u'(t), u''(t), \dots, u^{(k-1)}(t)) \end{pmatrix},$$

dann ist $u := u_0$ eine Lösung von (*), denn

$$\begin{aligned} u'_0(t) &= u_1(t) \\ u'_1(t) &= u_2(t) \text{ und } u'_1(t) = u''_0(t) \\ &\vdots u'_{k-2}(t) && = u_{k-1}(t) \text{ und } u'_{k-2}(t) = \\ u_{k-1}(t) &= F(t, u(t), \dots, u^{(k-1)}(t)) \text{ und } u'_{k-1} = u_0^{(k)}(t). && \square \end{aligned}$$

Bemerkung (Ergänzend (wie in der „Vorlesung“ vom 11.06. und weitere Bemerkungen (→näheres))
Man sieht aus dem Beweis, dass

$$\underline{U}(t) := \begin{pmatrix} u(t) \\ u'(t) \\ \vdots \\ u^{(k-1)}(t) \end{pmatrix}$$

mit u Lösung von (*) genau dann Lösung mit Anfangswert $\underline{U}(t_0) = \begin{pmatrix} v_0 \\ v_1 \\ \vdots \\ v_{k-1} \end{pmatrix}$ ist, wenn

$$\begin{aligned} u(t_0) &= v_0 \\ u'(t_0) &= v_1 \\ &\vdots \\ u^{(k-1)}(t_0) &= v_{k-1}, \end{aligned}$$

also wenn bei der Lösung von (*) alle Ableitungen bis zur $(k - 1)$ -sten fest liegen.

Bemerkung. Erfüllt F lokal eine Lipschitz-Bedingung, so auch \tilde{F} , denn

$$\begin{aligned}\|\tilde{F}(t, x_0, \dots) - F(t, \tilde{x}, \dots)\|_{\mathbb{E}} &:= C \sum_{j=0}^{k-1} \|x_j - \tilde{x}_j\|_{\mathbb{E}} + C \|\tilde{F}(\dots) - F(\dots)\|_{\mathbb{E}} \\ &\leq C \|\tilde{F}(\dots) - F(\dots)\|_{\mathbb{E}}.\end{aligned}$$

Es folgt: Erfüllt F lokal eine Lipschitz-Bedingung, so hat das AWP

$$\begin{aligned}x^{(k)} &= F(t, x, x', \dots, x^{(k-1)}) \\ x(t_0) &= v_0, x'(t_0) = v_1, \dots, x^{(k-1)} = v_k\end{aligned}$$

mit $(t_0, v_0, v_1, \dots, v_k) \in V \subset \mathbb{R}^{nk+1}$ eine eindeutige Lösung.

Vorlesung 16

Mo 15.06. 10:15

Letztes Mal: Existenz- und Eindeutigkeitssatz.

Die Forderung an F , lokal einer Lipschitz-Bedingung zu genügen, ist wichtig, wie folgendes Beispiel zeigt:

Beispiel. $x' = x^{\frac{2}{3}}$, $x(t_0) = 0$. Dieses AWP hat Lösungen

$$\begin{aligned} u(t) &= 0 \quad \forall t \\ u(t) &= \frac{1}{27}(t - t_0)^3 \quad \forall t \\ u(t) &= \begin{cases} \frac{1}{27}(t - a)^3 & t \leq a \\ 0 & a \leq t \leq b \\ \frac{1}{27}(t - b)^3 & t \geq b \end{cases} \end{aligned}$$

für beliebige $a < t_0 < b$.

$F(t, x) = x^{2/3}$ erfüllt zwar lokal bei (t_0, x_0) , $x_0 \neq 0$, eine Lipschitzbedingung ($\partial_2 f(t, x) = \frac{2}{3}x^{-\frac{1}{3}}$ ist für $x \neq 0$ stetig) aber nicht bei $(t_0, 0)$ (für kein t_0).

Der Beweis des Satzes von Picard + Lindelof war konstruktiv, d. h. man kann ihn (wenn lokal eine Lipschitz-Bedingung erfüllt ist) verwenden, um Lösungen zu finden (siehe letzte Mal).

In diese Vorlesung lernen wir Verfahren kennen, die auch in anderen Fällen Lösungen liefern.

Lemma 5.6. Seien $G: \tilde{J} \rightarrow \mathbb{R}$, $H: J \rightarrow \mathbb{R}$, stetig, J, \tilde{J} Intervalle. Sei $G(x) \neq 0 \quad \forall x \in \tilde{J}$. Betrachte

$$\begin{aligned} \tilde{H}(t) &= \int_{t_0}^t H(s) ds \\ \tilde{G}(x) &= \int_{u_0}^x \frac{1}{G(y)} dy. \end{aligned}$$

Ist $t_0 \in I$ mit $I \subset J$ und $\boxed{\tilde{H}(I) \subset \tilde{G}(\tilde{J})}$. Dann hat die Differentialgleichung

$$x' = F(t, x), \quad F: J \times \tilde{J} \rightarrow \mathbb{R}, \quad F(t, x) = H(t) \cdot G(x)$$

(„Differentialgleichung mit *getrennten Variablen*“) mit der Anfangsbedingung

$$x(t_0) = u_0, \quad (t_0, u_0) \in I \times \tilde{J}$$

eine eindeutige Lösung $u: I \rightarrow \mathbb{R}$, $I \subset J$.

Beweis. • Ist $u: I \rightarrow \mathbb{R}$ Lösung des AWP, so gilt

$$\tilde{G}(u(t)) = \tilde{H}(t) \quad \forall t \in I.$$

Denn: Aus $u'(s) = H(s)G(u(s))$ folgt

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^t \frac{u'(s)}{G(u(s))} ds &= \int_{t_0}^t H(s) ds. \\ (\text{Substitutionsregel}) \quad &\int_{u_0}^{u(t)} \frac{1}{G(u)} du \end{aligned}$$

Insbesondere ist also I derart, dass $\tilde{H}(I) \subset \tilde{G}(\tilde{J})$.

- $\tilde{G}'(x) = \frac{1}{G(x)} \neq 0 \implies \tilde{G}$ ist streng monoton $\implies \tilde{G}$ besitzt C^1 Umkehrfunktion $\tilde{G}^{-1}: \tilde{G}(I) \rightarrow \mathbb{R} \implies$ mit dem eben bewiesenen

$$u(t) = \tilde{G}^{-1}(\tilde{H}(t)) \tag{*}$$

\implies Wenn sie existiert, ist die Lösung eindeutig.

- Existenz: Wir nehmen (*) als Definition und zeigen, dass u dann das AWP löst. u ist C^1 ✓, und wegen (*) gilt

$$u(t_0) = \tilde{G}^{-1}(\tilde{H}(t_0)) = \tilde{G}^{-1}(0) = u_0,$$

sowie $(\tilde{G}(u(t)) = \tilde{H}(t))$

$$\tilde{G}(u(t)) \cdot u'(t) = \frac{1}{G(u(t))} \cdot u'(t) = \tilde{H}'(t) = H(t)$$

\implies Beh. □

Merkregel 5.7.

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= H(t)G(x) \\ \frac{dx}{G(x)} &= H(t) dt. \\ \int \frac{1}{G(x)} dx &= \int H(t) dt. \end{aligned}$$

Dem kann man tatsächlich einen Sinn geben — Stichwort Differenzialformen.

Bemerkung. Wir haben im Beweis gesehen: Jede Lösung einer DGL mit getrennten Variablen erfüllt

$$\tilde{G}(u(t)) = \tilde{H}(t) \quad \forall t \in I.$$

Das kann man nutzen, um die Lösung zu bestimmen.

Beispiel. $x' = x^2$, $x(0) = c$, $c \in \mathbb{R}$. Eindeutige Lösung nach Lemma 5.6 mit I wie dort oder wegen der lokal erfüllten Lipschitz-Bedingung.

$$c = 0 \quad u(t) = 0 \quad \forall t \in \mathbb{R}.$$

$c > 0$ Sei $u: I \rightarrow \mathbb{R}$ eine Lösung mit $u(0) = c > 0$. Dann ist $u(t) > 0 \quad \forall t \in I$ (denn gäbe es t_* s.d. $u(t_*) = 0$, wäre wegen der Eindeutigkeit $u(t) = 0 \quad \forall t$ (auch für $t = t_0$)). Betrachte also $F: \mathbb{R} \times \mathbb{R}_{>0} \rightarrow \mathbb{R}$, $F(t, x) = x^2$. Berechne

$$\begin{aligned}\tilde{H}(t) &= \int_0^t ds = t \\ \tilde{G}(x) &= \int_c^x \frac{1}{y^2} dy = \frac{1}{c} - \frac{1}{x}.\end{aligned}$$

$\tilde{G}(\mathbb{R}_{>0}) = (-\infty, \frac{1}{c})$. Setze also $I = (-\infty, \frac{1}{c})$ (s.d. $\tilde{H}(I) = I \subset \tilde{G}(\mathbb{R}_{>0})$). Für eine Lösung der AWP gilt nach Lemma 5.6

$$\frac{1}{c} - \frac{1}{u(t)} = t \quad \forall t \in I.$$

$$\implies u(t) = \frac{c}{1-ct} \text{ und } t < \frac{1}{c}.$$

$c < 0$ Genauso:

$$u(t) = \frac{c}{1-ct}$$

$$\text{und } t > \frac{1}{c}.$$

Beispiel. Logistisches Wachstum $x' = \alpha x(1-x)$, $\alpha > 0$ auf $\mathbb{R} \times (0, 1)$ ($G(x) = x(1-x) \neq 0 \quad \forall x \in (0, 1)$). Separation der Variablen:

$$\begin{aligned}\int_{x_0}^{u(t)} \frac{1}{y(1-y)} dy &\stackrel{!}{=} \int_{t_0}^t \alpha ds = \alpha(t - t_0). \\ \ln \left| \frac{y}{y-1} \right| \Big|_{x_0}^{u(t)} &\quad (\text{Partialbruchzerlegung: } \frac{1}{y(1-y)} = \frac{1}{y} - \frac{1}{y-1})\end{aligned}$$

Also $\frac{u(t)}{u(t)-1} = \pm e^{\alpha t + C}$, C Konstante.

$$\implies u(t) = \frac{e^{\alpha t}}{\tilde{C} + e^{\alpha t}} \quad (\tilde{C} = \mp e^C).$$

Anfangsbedingung $u(0) = x_0$, $x_0 \in (0, 1)$. $x_0 \frac{1}{\tilde{C}+1}$, also $\tilde{C} = \frac{1-x_0}{x_0} > 0$. Also ist u auf ganz \mathbb{R} definiert.

Lemma 5.8. Sei $f: I \rightarrow \mathbb{R}$, ($I \subset \mathbb{R}$ Intervall) und sei

$$V = \left\{ (t, x) \in \mathbb{R}^* \times \mathbb{R} \mid \begin{array}{l} \uparrow \\ t \in J \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} x \\ \mathbb{R} \setminus \{0\} \end{array} \right\}. \quad (5.2)$$

Betrachte das DGL

$$x' = f\left(\frac{x}{t}\right) \quad (*)$$

auf V . Dann gilt $u: I \rightarrow \mathbb{R}$, $I \subset \mathbb{R}^*$ Intervall, ist genau dann Lösung von $(*)$ zur Anfangsbedingung $x(t_0) = x_0$, $t_0 \in I$, $(t_0, x_0) \in V$, wenn $v(t) := \frac{u(t)}{t}$ Lösung des AWP

$$\begin{aligned} y' &= \frac{1}{t}(f(y) - y) \\ y(t_0) &= \frac{x_0}{t_0} \end{aligned}$$

ist.

Bemerkung. Man sagt, die zweite DGL gehe durch Substitution aus der ersten hervor. Merkregel:

$$y = \frac{x}{t}, \quad y' = \frac{x'}{t} - \frac{1}{t^2}x = \frac{1}{t}\left(f\left(\frac{x}{t}\right) - \frac{x}{t}\right).$$

Die 2. DGL ist lösbar wie in Lemma 5.6.

Beweis von 5.8. „ \implies “ Sei u Lösung der 1. Gleichung und $u(t_0) = x_0$. Dann ist

$$\begin{aligned} v'(t) &= \frac{u'(t)}{t} - \frac{u(t)}{t^2} \\ &= \frac{1}{t}f\left(\frac{u(t)}{t}\right) - \frac{u(t)}{t^2} \end{aligned}$$

und $v(t_0) = \frac{x_0}{t_0}$.

„ \impliedby “ Sei v Lösung der 2. Gleichung und $v(t_0) = \frac{x_0}{t_0}$. Dann ist

$$\begin{aligned} u'(t) &= (tv(t))' = v(t) + tv'(t) \\ &= v(t) + (f(v(t)) - v(t)) \\ &= f(u(t)/t) \end{aligned}$$

und $u(t_0) = x_0$. □

Beispiel. $x' = 1 + \frac{x}{t} + \left(\frac{x}{t}\right)^2$ auf $\mathbb{R}_{>0} \times \mathbb{R}$. Substitution

$$\rightsquigarrow y' = \frac{1}{t}(1 + y^2).$$

Trennung der Variablen:

$$\begin{aligned} \int_{y_0}^{v(t)} \frac{1}{1+z^2} dz &= \int_{t_0}^t \frac{1}{s} ds \\ \implies \arctan v(t) - \arctan y_0 &= \ln \frac{t}{t_0}, \end{aligned}$$

also $u(t) = t \cdot \tan\left(\ln \frac{t}{t_0} + a\right)$ löst die ursprüngliche Gleichung und ist auf einem Intervall I , das t_0 enthält, definiert.

Bemerkung. Typische DGL aus der klassischen Mechanik (Physik)

$$x'' = f(x), \quad (*)$$

$f: I \rightarrow \mathbb{R}$, $I \subset \mathbb{R}$ Intervall, stetig („Kraft“). Definiere $\underline{U}(x) = - \int_a^x f(s) ds$, $\underline{U}: I \rightarrow \mathbb{R}$ („potentielle Energie“). Damit schreibt sich $(*)$ wie folgt:

$$x'' = -\underline{U}'(x).$$

Ist $w: J \rightarrow \mathbb{R}$ Lösung, so gilt

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{2}w'(t)\right)^2 &= w'(t) \cdot w''(t) \\ &= w'(t) \cdot (-\underline{U}'(w(t))) \\ &= -\frac{d}{dt}(\underline{U} \circ w)(t), \end{aligned}$$

also

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}w'(t)^2 + \underline{U}(w(t))\right) = 0$$

(Konstante der Bewegung). $\implies \exists$ Konstante E („Gesamtenergie“) s. d.

$$\frac{1}{2}v(t)^2 + \underline{U}(w(t)) = E \quad \forall t \quad (5.3)$$

$(v(t) = w'(t)$ „Geschwindigkeit“) \implies Lösungen müssen derart sein, dass $\underline{U}(x(t)) \leq E$ und es gilt dann

$$w'(t) = \pm \sqrt{2(E - \underline{U}(w(t)))}$$

(je nachdem, ob $w' \geq 0$ oder ≤ 0).

Wir betrachten also die DGL mit getrennten Variablen

$$x' = \pm \sqrt{2(E - \underline{U}(x))}.$$

Oft sind DGL'n auch *implizit* gegeben, also von der Form

$$f(t, x) + h(t, x)x' = 0.$$

Satz 5.9 (Exakte Differentialgleichungen). Sei $f(t, x) + h(t, x)x' = 0$ gegeben, f und $h: V \rightarrow \mathbb{R}$ C^1 , $V = J_1 \times J_2$ mit J_1, J_2 Intervalle. Es gelte $\partial_1 h = \partial_2 f$ auf V . Dann gibt es eine zweimal stetig differenzierbare Funktion $F: V \rightarrow \mathbb{R}$ mit $h = \partial_2 F$ und $f = \partial_1 F$.

Ist $u: I \rightarrow \mathbb{R}$ mit $\Gamma_u \subset V$ eine Lösung der DGL, so gilt $F(t, u(t)) = C$ (C durch Anfangsbedingung festgelegt).

Umgekehrt: Ist $h(t_0, x_0) \neq 0$, so ist $F(t, x) = C$ lokal bei (t_0, x_0) auflösbar nach x und die Auflösungsfunktion $u: I \rightarrow \mathbb{R}$ löst die Differentialgleichung mit $u(t_0) = x_0$.

Beweis. Dass $\partial_1 h = \partial_2 f$ notwendig ist für die Existenz von F ist klar. Dass sie auch hinreichend ist, werden wir im letzten Teil der Vorlesung beweisen.

Satz über implizite Funktionen: Betrachte $F(t, x) - C = 0$. Ist $\partial_2 F(t_0, x_0) \neq 0$, so gibt es lokal bei (t_0, x_0) eine Auflösungsfunktion $u: I \rightarrow \mathbb{R}$, $u(t_0) = x_0$ mit

$$u'(t) = -(\partial_2 F(t, u(t)))^{-1} \partial_1 F(t, u(t)) \quad \forall t \in I,$$

also

$$f(t, u(t)) + h(t, u(t)) \cdot u'(t) = 0 \quad \forall t \in I.$$

Ist umgekehrt $u: I \rightarrow \mathbb{R}$ Lösung der DGL, so gilt (mit $\varphi(t) := (t, u(t))$)

$$\begin{aligned} (F \circ \varphi)'(t) &= \begin{pmatrix} \partial_1 F(\varphi(t)) & \partial_2 F(\varphi(t)) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ u'(t) \end{pmatrix} \\ &= f(t, u(t)) + h(t, u(t))u'(t) = 0. \end{aligned} \quad \square$$

Beispiel.

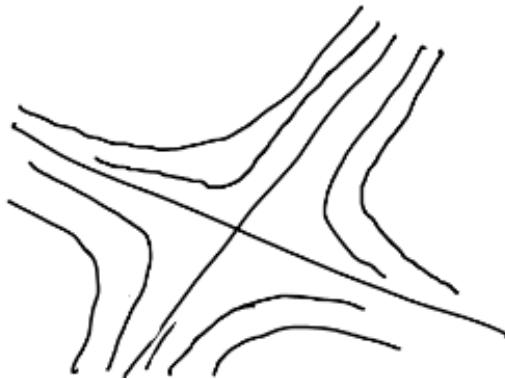
$$\begin{aligned} 7t + 7x + (6t - 2x)x' &= 0 \\ \partial_t(6t - 2x) &= 6 = \partial_x(7t + 6x) \\ \partial_2 F = h &\implies \int h(t, x) dx = F(t, x) + \tilde{C}(t) \\ &\implies F(t, x) = 6tx - x^2 + C(t) \\ \partial_1 F = f &\implies 7t + 6x \stackrel{!}{=} 6x + C'(t) \\ &\implies C(t) = \frac{7}{2}t^2 + C_0. \end{aligned}$$

Allgemeine Lösung gegeben durch

$$F(t, x) = \frac{7}{2}t^2 + 6tx - x^2 = C,$$

also $u(t) = 3t \pm \sqrt{-C + 25\frac{t^2}{2}}$, falls $c > 0$, $t > \frac{\sqrt{2c}}{5}$.

Hyperbeln mit Hauptachsenrichtungen $\begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}$ und $\begin{pmatrix} -1 \\ 2 \end{pmatrix}$.



Bemerkung. Ist eine DGL der Form

$$f(t, x) + h(t, x)x' = 0$$

nicht exakt, kann man nach einer Funktion M suchen, s. d.

$$M(t, x)f(t, x) + M(t, x)h(t, x)x' = 0$$

exakt ist. Diese DGL hat dieselbe Lösungsmenge wie die ursprüngliche DGL. Eine solche Funktion M heißt *Eulerscher Multiplikator*.

Er muss erfüllen:

$$\partial_2 M \cdot f + M \partial_2 f = \partial_1 M \cdot h + M \partial_1 h,$$

also

$$\partial_2 M \cdot f - \partial_1 M \cdot h + (\partial_2 f - \partial_1 h)M = 0.$$

Beispiele. • Wenn $\frac{\partial_2 f - \partial_1 h}{h} = \rho(t)$ (unabhängig von x), kann man $M(t) = C e^{\int_{t_0}^t \rho(s) ds}$ wählen.

• Analog wenn $\frac{\partial_1 h - \partial_2 f}{f} = \rho(x)$, kann man $M(x) = C e^{\int_{x_0}^x \rho(y) dy}$ wählen.

5.III. Lineare Differentialgleichungen

Definition 5.10. Sei $I \subset \mathbb{R}$ ein Intervall und

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}: I \rightarrow \text{Mat}(n \times n, \mathbb{R})$$

stetig (wir haben gesehen, ist dies gleichbedeutend mit der Stetigkeit aller a_{ij}). Dann heißt

$$x' = A(t)x$$

homogenes (nicht im Sinne von 5.8) lineares Differentialgleichungssystem (oder homogene lineare DGL) 1. Ordnung. Sei $b = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}: I \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig (also alle b_i stetig). Dann heißt

$$x' = A(t)x + b(t)$$

inhomogenes lineares Differentialgleichungssystem (oder inhomogene lineare DGL) 1. Ordnung. Eine Lösung ist eine differenzierbare Funktion

$$u: J \rightarrow \mathbb{R}^n \text{ s. d. } u'(t) = A(t) \cdot \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Matrix-Vektor-Multiplikation}}}{u(t)}$$

bzw. $u'(t) = A(t) \cdot u(t) + b(t)$.

Bemerkung. Es gibt zum AWP

$$x' = A(t)x + b(t), \quad x(t_0) = x_0$$

stets eine eindeutige Lösung

$$u: J \rightarrow \mathbb{R}^n, \quad u(t_0) = x_0.$$

Denn: Für $F(t, x) = A(t) \cdot x + b(t)$ gilt

$$\|F(t, x) - F(t, \tilde{x})\| = \|A(t) \cdot (x - \tilde{x})\| \leq C \|A(t)\|_{\text{op}} \cdot \|x - \tilde{x}\|$$

$$\sup_{v \neq 0} \frac{\|A(t)v\|}{\|v\|}$$

und $\sup_{t \in [-\varepsilon + t_0, t_0 + \varepsilon]} \|A(t)\|_{\text{op}} < \infty$, da $[-\varepsilon + t_0, t_0 + \varepsilon]$ kompakt ist und $t \mapsto \|A(t)\|_{\text{op}}$ stetig.

Wir werden sehen, dass eine lineare DGL immer eine Lösung besitzt mit $J = I$.

Bemerkung. Es ist zweckmäßig, auch komplexe lineare DGL'n zuzulassen, also $A: I \rightarrow \text{Mat}(n \times n, \mathbb{C})$, $b: I \rightarrow \mathbb{C}^n$. Um Stetigkeit von A un b in diesem Fall zu definieren, identifiziert man $\mathbb{C} = \mathbb{R}^2$, betrachtet also A als Abbildung mit Werten in $\mathbb{R}^{(2n)^2}$, b als Abbildung mit Werten in \mathbb{R}^{2n} . Dito für die Differenzierbarkeit von u .

Bevor wir den allgemeinen Fall studieren, betrachten wir $n = 1$.

Beispiel 5.11. $a: I \rightarrow \mathbb{R}$ stetig, $x' = a(t)x$, $x(t_0) = u_0$. Das AWP hat die (eindeutige) Lösung

$$u: I \rightarrow \mathbb{R}, \quad u(t) = u_0 \exp\left(\int_{t_0}^t a(s) ds\right).$$

$u(t)$ löst die Gleichung

$$u'(t) = u_0 \cdot a(t) \cdot \exp\left(\int_{t_0}^t a(s) ds\right) \quad \checkmark.$$

Lemma 5.12 („Variation der Konstanten“). Betrachte $x' = a(t)x + b(t)$, $a, b: I \rightarrow \mathbb{R}$ stetig, $x(t_0) = x_0$. Sei $v: I \rightarrow \mathbb{R}$ Lösung der zugehörigen homogenen Gleichung $x' = a(t)x$. Sei $v(t_0) \neq 0$. Dann ist $v(t) \neq 0 \quad \forall t$ und wir erhalten die eindeutige Lösung u in der inhomogenen Gleichung vermöge

$$u(t) := v(t) \cdot w(t)$$

mit

$$w(t) = \int_{t_0}^t v(s)^{-1} b(s) ds + C,$$

wobei C so angepasst wird, dass $u(t_0) = x_0$ gilt.

Beweis. Wir machen den Ansatz $u = v \cdot w$ und bestimmen w . Es ist

$$\begin{aligned} u'(t) &= v'(t)w(t) + v(t)w'(t) \\ &= a(t)v(t)w(t) + v(t)w'(t) \\ &= a(t)v(t)w(t) + b(t) \\ \implies a(t)w'(t) &\stackrel{!}{=} b(t) \implies \text{Beh.} \end{aligned}$$

Denn $v(t) \neq 0 \quad \forall t$ wegen $v(t_0) \neq 0$ (denn wäre $v(t_0) = 0$ für ein t_* so wäre $r(t) = 0 \quad \forall t$). \square

Vorlesung 17

Do 18.06. 10:15

Satz 5.13. Sei $I \subset \mathbb{R}$ Intervall und $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ oder \mathbb{C} . Sei $A: I \rightarrow \text{Mat}(n \times n, K)$ stetig. Berechne $\mathcal{L}_H(A)$, die Menge aller Lösungen von $x' = A(t) \cdot x$. Es gilt: \mathcal{L}_H ist n -dimensionaler Unterraum über \mathbb{K} .

Für $u_1, \dots, u_k \in \mathcal{L}_H(A)$ sind äquivalent

- a) u_1, \dots, u_k sind linear unabhängig über \mathbb{K} .
- b) $\exists t_0 \in I$ s. d. $u_1(t_0), \dots, u_k(t_0) \in \mathbb{K}^n$ linear unabhängig über \mathbb{K} sind.
- c) $u_1(t), \dots, u_k(t) \in \mathbb{K}^n$ sind linear unabhängig über \mathbb{K} für alle $t \in I$.

Beweis. • $\mathcal{L}_H(A)$ ist Vektorraum $\subset \text{VR}$ aller Abbildungen: $I \rightarrow \mathbb{K}^n$.

- i) $0 \in \mathcal{L}_H(A) \checkmark$
- ii) $u, v \in \mathcal{L}_H(A), \lambda \in \mathbb{K}$

$$\begin{aligned} &\implies (u + \lambda v)' = u' + (\lambda v)' = Au + \lambda \cdot Av \\ &= A(u + \lambda v) \\ &\implies u + \lambda v \in \mathcal{L}_H(A). \end{aligned}$$

- 5.13.c) \implies 5.13.b) \implies 5.13.a).

5.13.a) \implies 5.13.c)

Seien u_1, \dots, u_k linear unabhängig. Angenommen, $\exists t_0$ s. d. $u_1(t_0), \dots, u_k(t_0) \in \mathbb{K}^n$ linear abhängig sind, d. h. $\exists \lambda_1, \dots, \lambda_k \in \mathbb{K}$ s. d.

$$\lambda_1 u_1(t_0) + \dots + \lambda_k u_k(t_0) = 0.$$

Aber

$$u := \lambda_1 u_1 + \dots + \lambda_k u_k \in \mathcal{L}_H(A)$$

und

$$u(t_0) = 0 \implies u(t) = 0 \quad \forall t$$

$\not\downarrow$ VOR.

- $\dim \mathcal{L}_H(A) = n$:

Sei (e_1, \dots, e_n) die kanonische Einheitsbasis von \mathbb{K}^n . $\exists u_1, \dots, u_n \in \mathcal{L}_H(A)$ mit $u_j(t_0) = e_j$. Wegen 5.13.b) \implies 5.13.a) sind sie linear unabhängig $\implies \dim \mathcal{L}_H(A) \geq n$. Es kann aber höchstens n linear unabhängige Vektoren in $\mathcal{L}_H(A)$ geben: Denn seien v_1, \dots, v_k linear unabhängig, dann ist (wegen 5.13.a) \implies 5.13.c)) $v_1(t_0), \dots, v_k(t_0)$ für ein $t_0 \in I$ linear unabhängig in $\mathbb{K}^n \implies k \leq n$. \square

Definition. Eine Basis von $\mathcal{L}_H(A)$ nennt man auch (*Lösungs-*) *Fundamentalsystem* (für $x' = Ax$).

Bemerkung. Aus Satz 5.13 folgt: Eine Teilmenge $\{ u_1, \dots, u_n \} \subset \mathcal{L}_H(A)$ ist genau dann Fundamentalsystem für $x' = Ax$, wenn

$$\det \Phi(t_0) \neq 0 \quad \text{für ein } t_0 \in I,$$

wobei

$$\Phi = \begin{pmatrix} u_{11} & \cdots & u_{n1} \\ \vdots & & \vdots \\ u_{1n} & \cdots & u_{nn} \end{pmatrix}$$

($u_{ij} = j$ -te Komponentenfunktion der i -ten Funktion).

Beispiel. $A: \mathbb{R} \rightarrow \text{Mat}(2 \times 2, \mathbb{R})$. $A(t) = \begin{pmatrix} 0 & -\alpha \\ \alpha & 0 \end{pmatrix} = \Delta$, $\alpha \in \mathbb{R}$, $x' = A \cdot x$.

$$u_1(t) = \begin{pmatrix} \cos \alpha t \\ \sin \alpha t \end{pmatrix} \quad u_2(t) = \begin{pmatrix} -\sin \alpha t \\ -\cos \alpha t \end{pmatrix}$$

sind Lösungen. Sie bilden ein Fundamentalsystem, denn

$$\det \begin{pmatrix} u_1(t) & u_2(t) \end{pmatrix} = 1 \neq 0 \quad \forall t.$$

Dies bedeutet: *Jede* Lösung der DGL ist eine Linearkombination von u_1 und u_2 .

Beispiel. Anfangsbedingung $x(0) = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$.

$$\begin{aligned} u(t) &= a_1 u_1(t) + a_2 u_2(t) \\ u(0) &= \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \stackrel{!}{=} \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} \\ \implies u(t) &= \begin{pmatrix} \cos \alpha t - 2 \sin(\alpha t) \\ \sin \alpha t + 2 \cos \alpha t \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Satz 5.14. Sei I Intervall $\subset \mathbb{R}$, $\mathbb{K} = \mathbb{C}$ oder \mathbb{R} . $A: I \rightarrow \text{Mat}(n \times n, \mathbb{K})$ und $b: I \rightarrow \mathbb{K}^n$ stetig. Bezeichne $\mathcal{L}_I(A, b)$ die Lösungsmenge des inhomogenen Systems $x' = A(t) \cdot x + b(t)$. Ist dann $v_0: I \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine Lösung des inhomogenen Systems, so gilt

$$\mathcal{L}_I(A, b) = v_0 + \mathcal{L}_H(A).$$

Bemerkung. Man erhält also *alle* Lösungen als eine Linearkombination von Lösungen der homogenen Gleichung und Addition irgendeiner Lösung der inhomogenen („spezielle Lösung“).

Beweis. $\mathcal{L}_I(A, b) \subset v_0 + \mathcal{L}_H(A)$ Sei also $v \in \mathcal{L}_I(A, b)$. Dann gilt

$$(v - v_0)' = v' - v_0' = (Av + b) - (Av_0 + b).$$

Also ist

$$v - v_0 \in \mathcal{L}_H(A) \implies v = v_0 + (v - v_0) \in v_0 + \mathcal{L}_H(A).$$

$\mathcal{L}_I(A, b) \supset v_0 + \mathcal{L}_H(A)$ Sei also $v = v_0 + u$ mit $u \in \mathcal{L}_H(A)$

$$\implies v' = v_0' + u' = Av_0 + b + Au = Av + b.$$

□

Lemma 5.15 (Variation der Konstanten). Sei eine inhomogene Gleichung wie in Satz 5.14 gegeben. Es sei $\Phi = (u_1, \dots, u_n)$ eine Fundamentalsystem für $\mathcal{L}_H(A)$.

Dann ist $t \mapsto v(t) = \Phi(t) \cdot w_b(t)$ mit

$$w_b(t) = \int_{t_0}^t \Phi(s)^{-1} \cdot b(s) ds + C$$

eine Lösung der inhomogenen Gleichung. Hier ist . Matrixmultiplikation und $\Phi^{-1}(s)$ ist die inverse Matrix.

Beweis. Ansatz $v = \Phi \cdot w$.

$$\begin{aligned} v' &= \Phi' \cdot w + \Phi \cdot w' \\ &= (u'_1, \dots, u'_n) \cdot w + \Phi \cdot w' \\ &= (\underbrace{\Phi}_{Au_1, \dots, Au_n} \cdot A) \cdot w + \Phi \cdot w' \\ &\stackrel{!}{=} A \cdot \Phi \cdot w + b \end{aligned}$$

□

$$\implies \text{Beh. } (w = w_b).$$

Beispiel. $x' = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}x + \begin{pmatrix} 0 \\ t \end{pmatrix}$.

$$\begin{aligned}\Phi(t) &= \begin{pmatrix} \cos t & -\sin t \\ \sin t & \cos t \end{pmatrix} & \Phi(t)^{-1} &= \begin{pmatrix} \cos t & \sin t \\ -\sin t & \cos t \end{pmatrix} \\ \implies \Phi(s)^{-1} \cdot b(s) &= \begin{pmatrix} s \sin s \\ s \cos s \end{pmatrix} \\ \implies w_b(t) &= \int_0^t \begin{pmatrix} s \sin s \\ s \cos s \end{pmatrix} ds + C \\ &= \begin{pmatrix} \sin t - t \cos t \\ \cos t + t \sin t \end{pmatrix} + C \\ \implies v(t) &= \Phi(t) \cdot w_b(t) = \begin{pmatrix} -t \\ 1 \end{pmatrix}\end{aligned}$$

ist eine Lösung der inhomogenen DGL (wähle $C = 0$). Anfangsbedingung z.B. $v(0) = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}$. Äquivalente Vorgehensweise: $v(t)$ wie oben $+ \lambda_1 u_1 + \lambda_2 u_2$ oder $w_b(t) = \begin{pmatrix} \sin t & \cdots \\ \dots & \dots \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix}$. Dann ist $v(t) = \begin{pmatrix} -t \\ 1 \end{pmatrix} + \underbrace{\Phi \cdot \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix}}_{C_1 u_1 + C_2 u_2}$.

$$v(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + C_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + C_2 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \implies C_1 = -1.$$

Notation. Man satz $\begin{pmatrix} -t \\ 1 \end{pmatrix}$ ist eine *spezielle Lösung* des inhomogenen Systems und

$$\begin{pmatrix} -t \\ 1 \end{pmatrix} + C_1 \begin{pmatrix} \cos t \\ \sin t \end{pmatrix} + C_2 \begin{pmatrix} -\sin t \\ \cos t \end{pmatrix}$$

ist die *allgemeine Lösung*.

Mit Hilfe des Satzes von der Reduktion der Ordnung übertragen wir nun das eben bewiesene auf Differentialgleichungen höherer Ordnung.

Sei $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ oder \mathbb{C} . Eine homogene lineare DGL k -ter Ordnung ist eine Gleichung der Form

$$x^{(k)} + A_{k-1}(t) \cdot x^{(k-1)} + \cdots + A_1(t) \cdot x' + A_0(t) \cdot x = 0 \quad (*)$$

mit $A_j: I \rightarrow \text{Mat}(n \times n, \mathbb{K})$ stetig. Eine inhomogene lineare DGL ist von der Form

$$x^{(k)} + A_{k-1}(t) \cdot x^{(k-1)} + \cdots + A_1(t) \cdot x' + A_0(t) \cdot x = b(t) \quad (**)$$

mit A_j wie oben und $b: I \rightarrow \mathbb{K}^n$ stetig.

Eine Lösung ist eine k -fach differenzierbare Funktion $u: I \rightarrow \mathbb{K}^n$ mit

$$u^{(k)} + A_{k-1}(t) \cdot u^{(k-1)} + \cdots + A_1(t) \cdot u' + A_0(t) \cdot u = 0 \text{ bzw. } b(t) \quad \forall t \in I.$$

Satz 5.16. i) Die Menge aller Lösungen eines homogenen linearen Systems wie in (*), $\mathcal{L}_{\text{I},k}(A_0, \dots, A_{k-1}, b)$, ist ein $n \cdot k$ -dimensionaler Vektorraum.

ii) Für die Menge aller Lösungen eines homogenen linearen Systems wie in (*),

$$\mathcal{L}_{\text{I},k}(A_0, \dots, A_{k-1}, b),$$

gilt: $\mathcal{L}_{\text{I},k} = v_0 + \mathcal{L}_{\text{H},k}$ für eine beliebige Lösung v_0 des inhomogenen Systems.

iii) Ein k -Tupel $u_1, \dots, u_k \in \mathcal{L}_{\text{H},k}$ ist genau dann linear unabhängig, wenn für ein $t_0 \in I$ (somit für alle $t \in I$) die *Wronski-Determinante*

$$W(t_0) = \det \begin{pmatrix} u_1(t_0) & u_2(t_0) & \cdots & u_k(t_0) \\ u'_1(t_0) & \vdots & & u'_k(t_0) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_1^{(k-1)}(t_0) & \vdots & & u_k^{(k-1)}(t_0) \end{pmatrix}$$

nicht 0 ist.

Beweis. Das System

$$\begin{aligned} x'_0 &= x_1 \\ x'_1 &= x_2 \\ &\vdots \\ x'_{k-2} &= x_{k-1} \\ x'_{k-1} &= -A_0(t)x_0 - \cdots - A_{k-1}(t)x_{n-1} + b(t) \end{aligned}$$

ist nach Satz 5.5 äquivalent zu (*) bzw. für $b(t) = 0$ (*). Jeder Lösung $u: I \rightarrow \mathbb{K}^n$ von (*) bzw. (**) entspricht einer Lösung des obigen Systems (mit $b = \underline{0}$ bzw. $b \neq \underline{0}$)

↑
Nullfunktion

$$\begin{pmatrix} u \\ u' \\ \vdots \\ u^{(k-1)} \end{pmatrix}$$

und umgekehrt ist u_0 Lösung von $(*)$ bzw. $(**)$, wenn

$$\begin{pmatrix} u \\ u' \\ \vdots \\ u^{(k-1)} \end{pmatrix}$$

Lösung des obigen Systems ist (mit $b = \underline{0}$ bzw. $b \neq \underline{0}$). Somit folgt die Behauptung aus 5.13 und 5.14. \square

Bemerkung. Auch 5.15 (Variation der Konstanten) überträgt sich direkt auf $(**)$.

Notation. Eine Basis von $\mathcal{L}_{H,k}(A_0, \dots, A_{k-1})$ heißt wieder *Fundamentalsystem*.

Beispiel. $x'' - \frac{1}{2t}x' + \frac{1}{2t^2}x = 0$ auf $I = \mathbb{R}_{>0}$. Wir raten 2 Lösungen $u_1(t) = t$ und $u_2(t) = \sqrt{t}$. Probe:

$$\begin{aligned} 0 - \frac{1}{2t}1 + \frac{1}{2t^2}t &= 0 \quad \checkmark \\ \frac{1}{2}\left(-\frac{1}{2t\sqrt{t}}\right) - \frac{1}{2t}\frac{1}{2\sqrt{t}} + \frac{1}{2t^2}\sqrt{t} &= 0 \quad \checkmark. \end{aligned}$$

$$W(t) = \det \begin{pmatrix} u_1(t) & U_2(t) \\ u'_1(t) & u'_2(t) \end{pmatrix} = \det \begin{pmatrix} t & \sqrt{t} \\ 1 & \frac{1}{2\sqrt{t}} \end{pmatrix} = \frac{-\sqrt{t}}{2} \neq 0 \quad \forall t > 0.$$

\implies Die allgemeine Lösung der DGL ist

$$u(t) = c_1 t + c_2 \sqrt{t}$$

mit $c_j \in \mathbb{R}$ (oder \mathbb{C}).

Was tut man, wenn man nur eine Lösung raten kann? Im Fall $k = 2$ und $n = 1$ führt folgendes Verfahren auf eine zweite Lösung:

Lemma 5.17. Sei I Intervall, $a_0, a_1: I \rightarrow \mathbb{K}$ ($\mathbb{K} = \mathbb{R}$ oder \mathbb{C}) stetig. Sei $u: I \rightarrow \mathbb{K}$ eine Lösung von

$$x'' + a_1(t)x' + a_0(t)x = 0. \tag{*}$$

Auf $J \subset I$ gelte $u(t) \neq 0$. Dann ist $v: J \rightarrow \mathbb{K}$, $v = u \cdot w$ Lösung von $(*)$, wenn für w gilt

$$w''(t) + \left(2\frac{u'(t)}{u(t)} + a_1(t)\right)w'(t) = 0. \tag{**}$$

Ist w auf J nicht konstant, sind v und u linear unabhängig.

Bemerkung. w' löst also die DGL 1. Ordnung

$$y' + \left(2 \frac{u'(t)}{u(t)} + a_1(t) \right) y = 0,$$

also ist

$$\begin{aligned} w'(t) &= C_0 \exp \left(- \int_{t_0}^t 2 \frac{u'(s)}{u(s)} + a_1(s) ds \right) \\ &= C \frac{1}{u(t)^2} \exp \left(- \int_{t_0}^t a_1(s) ds \right), \end{aligned}$$

woraus man ein w bestimmen kann, dass $(**)$ löst.

Beweis von 5.17.

$$\begin{aligned} v' &= u'w + uw' \\ v'' &= u''w + 2u'w' + uw'' \\ &\quad = -a_1u'w - a_0uw + 2u'w' + uw'' \\ \implies v'' + a'_1 + a_0v &= 2u'w' + a_1uw' + uw'' = 0, \end{aligned}$$

wenn w $(**)$ erfüllt.

Die 2. Behauptung ist klar. \square

Beispiel. Nochmal

$$x'' - \frac{1}{2t}x' + \frac{1}{2t^2}x = 0$$

auf $I = \mathbb{R}_{>0}$. $u(t) = t$ und bestimmen v wie oben:

$$\begin{aligned} w'(t) &= \frac{1}{u(t)^2} \exp \left(- \int_{t_0}^t a_1(s) ds \right) \\ &= \tilde{C} \frac{1}{t^2} \sqrt{t} = \tilde{C} \frac{1}{t^{\frac{3}{2}}} \\ w(t) &= \tilde{C} \frac{1}{\sqrt{t}} + C' \implies v = \sqrt{t}. \end{aligned}$$

(Man lässt hier oft die Konstanten einfach weg).

5.18 Besondere DGL'n mit $k = 2, n = 1$. (Achtung: andere Notation als bisher!)

Zu $n \in \mathbb{N}_0$ betrachten wir die

Legendresche DGL für $-1 < x < 1$

$$(1 - x^2)y'' - 2xy' + n(n+1)y = 0.$$

Hermitesche DGL für $x \in \mathbb{R}$

$$y'' - 2xy' + 2ny = 0.$$

Laguerresche DGL für $x > 0$

$$xy'' + (1-x)y' + ny = 0.$$

Lemma 5.19. Zu $n \in \mathbb{N}_0$ definiert man

$$\begin{aligned} P_n(x) &= \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} (x^2 - 1)^n && \text{Legendre-Polynom der Ordnung } n \\ H_n(x) &= (-1)^n e^{x^2} \frac{d^n}{dx^n} e^{-x^2} && \text{Hermite-Polynom der Ordnung } n \\ L_n(x) &= e^x \frac{d^n}{dx^n} x^n e^{-x} && \text{Laguerre-Polynom der Ordnung } n \end{aligned}$$

Bei den angegebene Funktionen handelt es sich tatsächlich um Polynome der Ordnung n . Sie lösen die zugehörigen DGL'n.

Beweis. 1. Beh. $P_n: \frac{d^n}{dx^n} (\text{Polynom der Ordnung } 2n) = \text{Polynom von Ordnung } \leq n$.

$$\frac{d^n}{dx^n} ((x-1)^n (x+1)^n) = \sum_{l=0}^n \underbrace{\frac{d^l}{dx^l} (x-1)^n}_{\text{Ordnung}=n-l} \underbrace{\frac{d^{n-l}}{dx^{n-l}} (x+1)^n x}_{\text{Ordnung}=l}$$

H_n :

$$\frac{d^n}{dx^n} e^{-x^2} = \frac{d^{n-1}}{dx^{n-1}} (-2xe^{-x^2}) = \frac{d^{n-2}}{dx^{n-2}} \left((-2x)^2 e^{-x^2} + \frac{d}{dx} (-2x) e^{-x^2} \right)$$

\implies wenn alle n Ableitungen auf e^{-x^2} wirken, erhält man $(-2x)^n e^{-x^2}$. Die anderen Beiträge sind kleineren Grads multipliziert mit e^{-x^2} .

L_n : genauso.

2. Beh. Nur für die Hermite-Polynome: Setze $y(x) = e^{x^2} \frac{d^n}{dx^n} e^{-x^2}$. Es gilt $e^{-x^2} y(x) = \frac{d^n}{dx^n} e^{-x^2}$.

$$\implies \frac{d^2}{dx^2} (e^{-x^2} y(x)) \frac{d^{n+2}}{dx^{n+2}} e^{-x^2} = \frac{d^{n+1}}{dx^{n+1}} (-2xe^{-x^2}).$$

Induktion:

$$(xe^{-x^2})^{(n+1)} = x(e^{-x^2})^{(n+1)} + (n+1)(e^{-x^2})^{(n)}.$$

Beweis. IA: $\frac{d}{dx}(xe^{-x^2}) = e^{-x^2} + x(e^{-x^2})'$. $n \rightarrow n+1$:

$$\begin{aligned} (xe^{-x^2})^{(n+1)} &= \left((xe^{-x^2})^{(n)} \right)' \\ &\stackrel{\text{IV}}{=} \left(x(e^{-x^2})^{(n)} + n(e^{-x^2})^{(n+1)} \right)' \\ &= \left(e^{-x^2} \right)^{(n)} + x \left(e^{-x^2} \right)^{(n+1)} + n(e^{-x^2})^{(n)}. \end{aligned} \quad \square$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow (e^{-x^2}y(x))^{(2)} &= -2x \left(e^{-x^2} \right)^{(n+1)} - 2(n+1) \left(e^{-x^2} \right)^{(n)} \\ &= -2x \frac{d}{dx} \left(e^{-x^2}y(x) \right) - 2(n+1)e^{-x^2}y(x) \\ &= e^{-x^2}(4x^2y(x) - 2y'(x) - 2(n+1)y(x)). \end{aligned}$$

Andererseits:

$$\begin{aligned} (e^{-x^2}y(x))^{(2)} &= e^{-x^2}y''(x) + 2(e^{-x^2})'y'(x) + (e^{-x^2})^{(2)}y(x) \\ &= e^{-x^2}(y''(x) - 4xy'(x) + (4x^2 - 2)y(x)) \\ \Rightarrow y''(x) - 2xy'(x) + 2ny(x) &= 0 - \end{aligned}$$

L_n, P_n ähnlich. \square

Ein Fundamentalsystem für diese Gleichungen (zu gegebenen n) findet man z. B. wieder mit Lemma 5.17.

Beispiel. Für $n = 1$ und die Legendre-Gleichung

$$\begin{aligned} w'(x) &= \exp \left(- \int \frac{2}{s} ds + \int \frac{2s}{1-s^2} ds \right) \\ &= \frac{1}{x^2} \frac{1}{(1-x^2)} \\ \Rightarrow w(x) &= -\frac{1}{x} + \frac{1}{2} \ln \frac{1+x}{1-x}. \end{aligned}$$

Vorlesung 18

Mo 15.06. 10:15

Letztes Mal: Legendre, Hermite und Laguerre DGL'n. Lösungen waren explizite Funktionen (Polynome, ln, ...). Das nicht immer so:

Besselsche DGL:

$\nu \in \mathbb{R}$.

$$y'' + \frac{1}{x}y' + \left(1 - \frac{\nu^2}{x^2}\right)y = 0 \quad \text{auf } \mathbb{R}_{>0}.$$

Lösungen heißen *Zylinder-Funktionen* der Ordnung ν . Wir machen folgenden Ansatz (absolute Konvergenz voraussetzend)

$$u(x) = x^\rho \sum_{k=0}^{\infty} a_k x^k.$$

Dann ist

$$\begin{aligned} u'(x) &= \rho x^{\rho-1} \sum_{k=0}^{\infty} a_k x^k + x^{\rho-1} \sum_{k=0}^{\infty} x k a_k x^{k-1} \\ &= x^{\rho-1} \sum_{k=0}^{\infty} (k + \rho) a_k x^k \\ u''(x) &= x^{\rho-2} \sum_{k=0}^{\infty} (k + \rho)(k + \rho - 1) a_k x^k. \end{aligned}$$

Einsetzen (und mal $x^{-\rho+2}$ nehmen) liefert für x^m (unter Verwendung von $1 - \frac{\nu^2}{x^2} = \frac{x^2 - \nu^2}{x^2}$)

$$\begin{aligned} (\rho + m - 1)(\rho + m)a_m + (\rho + m)a_m + a_m(-\nu^2) + a_{m-2} &= 0 \\ a_m((\rho + m)^2 - \nu^2) + a_{m-2} &= 0. \end{aligned}$$

Rekursion!

$a_0(\rho^2 - \nu^2) = 0$. Wähle $\rho = \nu$, und setze $a_0 = 1$.

$a_1 = (2\nu + 1) = 0$. Setze $a_1 = 0$.

Es muss gelten

$$a_m(2\nu m + m^2) + a_{m-2} = 0.$$

Sei $m = 2n + 1$, dann ist $a_m = 0$, denn $a_1 = 0$ und

$$a_{2n+1} \left(\underbrace{2\nu(2n+1)}_{\text{Ist } \nu \in \mathbb{Z}: \text{ gerade}} \underbrace{(2n+1)^2}_{\text{ungerade}} \right) \stackrel{!}{=} 0.$$

Wähle also $a_{2n+1} = 0$.

Ist $m = 2n$, so ist (per Induktion beweisen!) (Γ ist die Gammafunktion).

$$a_{2n} = \frac{(-1)^n}{4^n n! \underbrace{(\nu + n) \cdots (v + 1)}_{=\frac{\Gamma(v+n+1)}{\Gamma(v+1)}}}$$

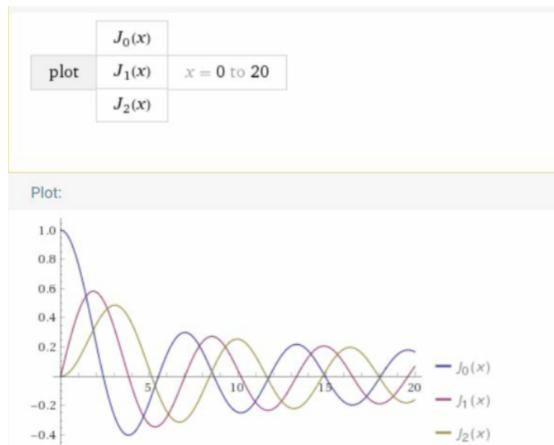
\Rightarrow Lösung:

$$J_\nu(x) = \left(\frac{x}{2}\right)^\nu \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n! \Gamma(\nu + n + 1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2n}$$

„Besselfunktion 1. Art der Ordnung ν “.

Reihe konvergiert absolut, unsere Manipulationen sind also a posteriori gerechtfertigt!

Ist $\nu \notin \mathbb{Z}$, so bilden J_ν und J_ν ein Fundamentalsystem. Ist $\gamma \in \mathbb{Z}$, kann man z. B. die Besselfunktion 2. Art hinzuziehen, die wir hier aber nicht betrachten.



Zum Abschluss:

5.IV. Lineare DGL-Systeme mit konstanten Koeffizienten

Lemma 5.20. Sei $A \in \text{Mat}(n \times n, \mathbb{C})$ und sei $v \in \mathbb{C}^n$ ein Eigenvektor von A zum Eigenwert $\lambda \in \mathbb{C}$. Dann ist

$$u: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}^n \quad u(t) = v e^{\lambda t}$$

eine Lösung von $x' = Ax$.

Beweis.

$$u'(t) = v\lambda e^{\lambda t} = \lambda v e^{\lambda t} = A v e^{\lambda t}.$$

□

Folgerung. Ist die Matrix A diagonalisierbar, besitzt also \mathbb{C}^n eine Basis aus Eigenvektoren v_1, \dots, v_n von A , so bilden die Funktionen $\{v_1 e^{\lambda_1 t}, \dots, v_n e^{\lambda_n t}\}$ ein Fundamentalsystem (wobei $Av_j = \lambda_j v_j$ $j = 1, \dots, n$). Lineare Unabhängigkeit: $u_j(0) = v_j$ sind linear unabhängig.

Beispiel. $A = \begin{pmatrix} 0 & -\alpha \\ \alpha & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \lambda = \pm i\alpha$. Fundamentalsystem $\left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} e^{i\alpha t}, \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} e^{-i\alpha t} \right\}$.

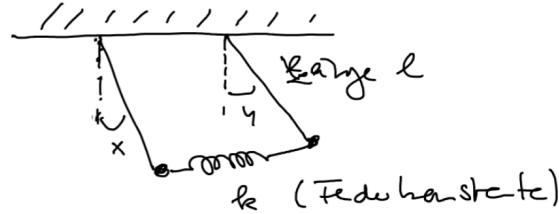
Bemerkung 5.21. Ist $A \in \text{Mat}(n \times n, \mathbb{R})$, so ist mit $\lambda \in \mathbb{C}$ Eigenwert auch $\bar{\lambda}$ Eigenwert und es gilt

$$Av = \lambda v \iff A\bar{v} = \bar{\lambda}\bar{v}.$$

Für $\lambda \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{R}$. Man kann in diesem Fall also immer ein *reelles* Fundamentalsystem finden $(v + \bar{v}, v - \bar{v} \in \mathbb{R}^n)$.

Beispiel. Gekoppelte Pendel

$$\begin{aligned} mx'' &= -\frac{mg}{h}x - k(x - y) \\ my'' &= -\frac{mg}{y}y - k(y - x) \quad k, m, g, h > 0 \end{aligned}$$



Reduktion der Ordnung:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ p \\ q \end{pmatrix}' = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -(w_0^2 + k_0) & k_0 & 0 & 0 \\ k_0 & -(w_0^2 + k_0) & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ p \\ q \end{pmatrix}.$$

$w_0 = \sqrt{\frac{q}{l}}$, $k_0 = \frac{k}{m}$. Eigenwerte $\pm iw_0$, $\pm i\sqrt{w_0^2 + 2k_0} =: \pm iw$. Eigenvektoren

$$v_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ iw_0 \\ iw_0 \end{pmatrix} \quad \bar{v}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -iw_0 \\ iw_0 \end{pmatrix} \quad v_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ iw \\ -iw \end{pmatrix} \quad \bar{v}_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ -iw \\ iw \end{pmatrix}.$$

Reelles Fundamentalsystem

$$\begin{aligned} & e^{+iw_0 t} v_1 + e^{-iw_0 t} \bar{v}_1 \\ & -i(e^{+iw_0 t} v_1 - e^{-iw_0 t} \bar{v}_1) \\ & e^{+iwt} v_1 + e^{-iwt} \bar{v}_1 \\ & -i(e^{+iwt} v_1 - e^{-iwt} \bar{v}_1). \end{aligned}$$

Spezialfall 5.22. Sei A diagonalisierbar. Entstehe A aus DGL n -ter Ordnung: $x^{(n)} + a_{n-1}x^{(n-1)} + \dots + a_1x' + a_0x = 0$

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_{n-2} \\ x_{n-1} \end{pmatrix}' = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 1 & & & & \\ & 0 & \ddots & & & \\ & & \ddots & \ddots & & \\ & & & \ddots & \ddots & \\ & & & & 0 & \ddots \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \dots & \dots & -a_{n-2} & -a_{n-1} \end{pmatrix}}_{=A \in \text{Mat}(n \times n, \mathbb{K})} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_{n-2} \\ x_{n-1} \end{pmatrix}$$

Dann ist $\{x_j e^{\lambda_j t} \mid j = 1, \dots, n\}$ it (v_1, \dots, v_n) Basis von \mathbb{K}^n und $Av_j = \lambda_j v_j$ ein Fundamentalsystem. Die Null-Komponenten $v_{j,0} e^{\lambda_j t}$ sind dann zwar Lösungen der DGL n -ter Ordnung, aber nicht unbedingt linear unabhängig: zwar ist $v_{j,0} \neq 0$ (sonst wäre $v_j = 0$), aber wenn ein Eigenwert mit höherer Multiplizität als 1 vorkommt, wären die Funktionen linear abhängig.

Es gilt jedoch:

Folgerung 5.23. Sei eine DGL

$$x^{(n)} + a_{n-1}x^{(n-1)} + \dots + a_1x' + a_0x = 0 \tag{5.4}$$

$a_j \in \mathbb{C}$, gegeben. Das Polynom

$$T^n + a_{n-1}T^{n-1} + \dots + a_1T + a_0 = 0$$

habe n paarweise verschiedene Nullstellen $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{C}$. Dann ist $\Phi = (e^{\lambda_1 t}, \dots, e^{\lambda_n t})$ ein Fundamentalsystem für die DGL.

Beweis. Das charakteristische Polynom der gegebenen Matrix ist

$$\lambda_n + a_{n-1}\lambda^{n-1} + \cdots + a_1\lambda + a_0.$$

□

Beispiel. $x^{(4)} - 6x^{(3)} + 11x^{(2)} - 6x = 0$.

$$T^4 - 6T^3 + 11T^2 - 6T = T(T-1)(T-2)(T-3)$$

$\Rightarrow (1, e^t, e^{2t}, e^{3t})$ ist ein Fundamentalsystem.

Mehrfache Nullstellen → allgemeiner in Zusammenhang mit triangulierbaren Matrizen.

Lemma 5.24. Sei $A \in \text{Mat}(n \times n, \mathbb{C})$, $S \in \text{GL}_n(\mathbb{C})$. Dann gilt: $u: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}^n$ ist genau dann Lösung der DGL $x' = Ax$, wenn $\tilde{u} := S^{-1}u: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}^n$ Lösung von $y' := \underbrace{S^{-1}AS}_{B}y$.

B

Beweis.

$$\begin{aligned} u'(t) &= Au(t) \\ \Leftrightarrow S^{-1} \cdot u'(t) &= S^{-1} \cdot Au(t) = (S^{-1}AS)S^{-1}u(t). \quad \square \\ &\parallel \\ (S^{-1}u)'(t) & \end{aligned}$$

Bemerkung. Sei $A \in \text{Mat}(n \times n, \mathbb{C})$. Dann gibt es $S \in \text{GL}_n(\mathbb{C})$, s.d. $S^{-1}AS$ Jordan-Form besitzt, also von der Form

$$\left(\begin{array}{ccccc} \square & & & & \\ & \square & & & \\ & & \square & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & \square \end{array} \right)$$

ist, wobei jedes Kästchen \square von der Form

$$\boxed{\begin{matrix} \lambda & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ & & \ddots & & & \\ 0 & & & \ddots & \lambda & 1 \\ & & & & \lambda & \end{matrix}}$$

ist.

Satz 5.25. Sei $A \in \text{Mat}(n \times n, \mathbb{C})$. Sei $B = S^{-1}AS$ die Jordan-Form von A . Seien J_1, \dots, J_k die Jordan-Kästchen von B zum Eigenwert $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ und seien sie der Größe $n_1 \times n_1, \dots, n_k \times n_k$. Dann bildet

$$\begin{aligned}
& e^{\lambda_1 t} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \quad e^{\lambda_1 t} \begin{pmatrix} \frac{t}{1!} \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \quad e^{\lambda_1} \begin{pmatrix} \frac{t^2}{2!} \\ \frac{t}{1!} \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \dots, \quad e^{\lambda_1 t} \begin{pmatrix} \frac{t^{n_1-1}}{(n_1-1)!} \\ \vdots \\ t \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \\
& e^{\lambda_2 t} \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ u \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}, \quad e^{\lambda_2 t} \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ u \\ 0 \\ t \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \dots \\
& \dots, \quad e^{\lambda_k} \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \frac{t^{n_k-1}}{n_k-1!} \\ \vdots \\ z \\ \vdots \\ t \\ 1 \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

ein Fundamentalsystem $\tilde{\Phi}$ von $y' = By$ und somit ist $\Phi = S\tilde{\Phi}$ ein Fundamentalsystem von $x' = Ax$.

18:00

Beweis. Für ein Jordan-Kästchen J von B . Wir betrachten also $z' = Jz$,

$$J = \begin{pmatrix} \lambda & 1 & & & & \\ & \lambda & 1 & & & \\ & & \ddots & \ddots & & \\ & & & \ddots & \ddots & \\ & & & & \ddots & 1 \\ & & & & & \lambda \end{pmatrix} \quad m \times m$$

$$z'_1 = \lambda z_1 + z_2$$

$$\begin{aligned}
z'_2 &= \lambda z_2 + z_3 \\
&\vdots \\
z'_{m-1} &= \lambda z_{m-1} + z_m \\
z'_m &= \lambda z_m \\
\implies v_m(t) &= e^{\lambda t} \\
\implies z'_{m-1} - \lambda z_{m-1} &= e^{\lambda t}
\end{aligned}$$

Mit 5.15 lösen.

$$\begin{aligned}
v_{n-1}(t) &= e^{\lambda t} \int \frac{1}{e^{\lambda t}} e^{\lambda t} dt = e^{\lambda t} \cdot t \\
\implies z'_{m-2} - \lambda z_{m-2} &= te^{\lambda t}.
\end{aligned}$$

Mit 5.15:

$$v_{m-2}(t) = e^{\lambda t} \int t dt = e^{\lambda t} \frac{t^2}{2}$$

\implies Beh. (per Induktion):

$$v_{m-k}(t) = e^{\lambda t} \int \frac{t^{k-1}}{(k-1)!} dt = e^{\lambda t} \frac{t^k}{k!}, \quad \square$$

denn die lineare Unabhängigkeit ist offensichtlich, und $S\tilde{\Phi}$ ist auch linear unabhängig ($S \in \text{GL}_n(\mathbb{C})$).

Bemerkung. Insbesondere folgt Lemma 5.20 und 5.22:

Ist $B = S^{-1}AS$ diagonal, so ist $\{e^{\lambda j}e_j \mid j = 1, \dots, n\}$ Fundamentalsystem und $Se_j = j$ -te Spalte von S = Eigenvektor zu λ_j .

Die Jordanzerlegung zu berechnen, ist aufwendig (für große n). Liegt eine obere Dreiecksmatrix vor, kann man auch vorgehen wie folgt:

Bemerkung 5.26. Habe $B \in \text{Mat}(n \times n, \mathbb{C})$ obere Dreiecksgestalt. Betrachte die DGL $y' = By$ also

$$\begin{aligned}
y'_1 &= B_{11}y_1 + B_{12}y_2 + \cdots + B_{1,n-1}y_{n-1} + B_{1,n}y_n \\
y'_2 &= \qquad \qquad B_{22}y_2 + \cdots + B_{2,n-1}y_{n-1} + B_{2,n}y_n \\
&\vdots \\
y'_{n-1} &= \qquad \qquad \qquad B_{n-1,n-1}y_{n-1} + B_{n-1,n}y_n \\
y'_n &= \qquad \qquad \qquad B_{n,n}y_n.
\end{aligned}$$

mit Anfangsbedingung

$$y(t_0) = y_0 = \begin{pmatrix} y_{0,1} \\ \vdots \\ y_{0,n} \end{pmatrix}.$$

Dann erhält man sukzessive eine Lösung $v: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}^n$ von $y' = By$:

- 1) $y'_n = B_{nn}y_n \implies v_n(t) = C_n e^{B_{nn}t}$ ($C_n e^{B_{nn}t_0} = y_{0,n}$)
- 2) $y'_{n-1} - B_{n-1,n-1}v_{n-1} = B_{n-1,n}C_n e^{B_{nn}t}$ inhomogene Gleichung. Mit Lemma 5.15 bestimme ein Fundamentalsystem und eine spezielle Lösung. Passe wieder die Konstanten an...
- k) $v_n, v_{n-1}, \dots, v_{k+1}$ sind schon bestimmt. Für v_k ergibt sich

$$y'_k - B_{kk}v_k = \sum_{j=k+1}^n B_{kj}v_j(t)$$

usf.

23:10

Auch Gleichungen wie in 5.22, die mit Reduktion der Ordnung aus einer Gleichung n -ter Ordnung hervorgingen, lassen sich durch den Umweg über die Jordan-Form (5.25) lösen. Wir gehen direkter vor:

Lemma 5.27. Betrachte $n^{(x)} + a_{n-1}x^{(n-1)} + \dots + a_0x = 0$. Es gelte

$$p(T) := T^n + a_{n-1}T^{n-1} + \dots + a_1T + a_0 = (T - \lambda_1)^{k_1} \cdots (T - \lambda_r)^{k_r}$$

mit λ_j paarweise verschieden, so bildet

$$u_{j,i}(t) = t^i e^{\lambda_j t} \quad i \in \{0, \dots, k_j - 1\} \quad j \in \{1, \dots, r\}$$

ein Fundamentalsystem.

Beweis. $u_{j,i}(t)$ ist Lösung:

$$(T - \lambda_1)^{k_1} \cdots (T - \lambda_r)^{k_r} = \prod_{s \neq j} (T - \lambda_s)^{k_s} \cdot (T - \lambda_j)^{k_j}.$$

Setze $\frac{d}{dt}$ für T ein und wende den Ausdruck auf $u_{j,i}$ an. D.h., wir prüfen, ob $u_{j,i}$ die DGL erfüllt. Zunächst eine Hilfs-Aussage: Es gilt

$$\left(\frac{d}{dt} - \lambda \right)^k (f(t)e^{\lambda t}) = f^{(k)}(t)e^{\lambda t} \quad f \in C^k$$

per Induktion. $k = 0 \checkmark$

$k \rightarrow k + 1$

$$\left(\frac{d}{dt} - \lambda \right) \left(\frac{d}{dt} - \lambda \right)^k (f(t)e^{\lambda t}) = \left(\frac{d}{dt} - \lambda \right) (f^{(k)}(t)e^{\lambda t}) = f^{(k+1)}(t)e^{\lambda t} + f^{(k)}(t)(\lambda e^{\lambda t} - \lambda e^{\lambda t}).$$

□

Also ist

$$\begin{aligned} p\left(\frac{d}{dt}\right) u_{j,i}(t) &= \prod_{j \neq i} \left(\frac{d}{dt} - \lambda_k \right)^{k_l} \cdot \left(\frac{d}{dt} - \lambda_j \right)^{k_j} (t^i e^{\lambda_j t}) \\ &= \prod_{j \neq i} \left(\frac{d}{dt} - \lambda_l \right)^{k_l} \underbrace{\frac{d^{k_j}(t^i)}{dt^{k_j}}} _{=0, \text{ da } i < k_j} \cdot e^{\lambda_j t}. \end{aligned}$$

Lineare Unabhängigkeit

$$W(0) = \det \begin{pmatrix} & & k_1\text{-te} & & (k_1 + k_2)\text{-te} \\ & 1 & 0 & \dots & 0 \\ & \lambda_1 & 1 & & \vdots \\ & \vdots & \lambda_1 & & \vdots \\ & \vdots & \vdots & 1 & \vdots \\ & \vdots & & \lambda_1 & \vdots \\ & \vdots & & & \vdots \\ & \lambda_1^{n-1} & \lambda_1^{n-2} & \dots & \lambda_1^{n-k_1} & \lambda_2^{n-1} & \dots & \lambda_1^{n-k_2} & \dots \end{pmatrix},$$

denn

$$\underbrace{\frac{d(t^i e^{\lambda t})}{dt^l}}_{\sum_{r=0}^l (t^i)^{(r)} \lambda^r e^{\lambda t}} \Big|_{t=0} = \begin{cases} 0 & l < i \\ 1 & l = i \\ \lambda^{l-i} & l > i. \end{cases}$$

Also

$$W(0) = \det \left(\begin{array}{ccc|c} & & & k_1 \\ & \lambda_1 & \dots & \lambda_1 \\ & \vdots & & \vdots \\ & \lambda_1 & \dots & \lambda_1 \\ \hline & & & k_2 \\ & \lambda_2 & \dots & \lambda_2 \\ & \vdots & & \vdots \\ & \lambda_2 & \dots & \lambda_2 \end{array} \right)_{k_1, \dots, k_2}.$$

Da die λ_j paarweise verschieden sind, sind die Spalten linear unabhängig $\implies W(0) \neq 0$. \square

Beispiel.

$$\begin{aligned} x^{(4)} + 8x^{(2)} + 1 &= 0 \\ T^4 + 8T^2 + 16 &= (T^2 + 4)^2 \\ &= (T - 2i)^2(T + 2i)^2 \\ \lambda_1 &= 2i \quad \lambda_2 = -2i \\ u_{1,0}(t) &= e^{2it}, \quad u_{2,0}(t) = e^{-2it} \\ u_{1,1}(t) &= te^{2it}, \quad u_{2,1}(t) = te^{-2it}. \end{aligned}$$

34:05

Bemerkung. Inhomogene Gleichungen löst man über das zugehörige System 1. Ordnung und Variation der Konstanten. In speziellen Fällen kann man auch anders vorgehen:

Lemma 5.28. Sei $b(t) = f(t)e^{\alpha t}$ mit α Nullstelle k -ter Ordnung ($k \geq 0$) des Polynoms

$$p(T) = T^n + a_{n-1}T^{n-1} + \cdots + a_1T + a_0$$

und wo f ein Polynom der Ordnung m ist. Dann besitzt die DGL

$$p\left(\frac{d}{dt}\right)x = b(t)$$

eine spezielle Lösung $v: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ der Gestalt

$$v(t) = h(t)e^{\alpha t},$$

wobei h ein Polynom von Grad $m + k$ ist.

Beweis. $p(t) = q(T)(T - \alpha)^k$, $q(\alpha) \neq 0$. Induktion:

$$m = 0$$

$$p\left(\frac{d}{dt}\right)x = ce^{\alpha t}$$

Behauptung. $v(t) = \frac{c}{k!q(a)}t^k e^{\alpha t}$ ist Lösung.

Beweis.

$$\begin{aligned} p\left(\frac{d}{dt}\right)v &= \frac{c}{k!q(a)}q\left(\frac{d}{dt}\right) \cdot \underset{\text{wie im Beweis von 5.27}}{\overset{\uparrow}{(t^k)^{(k)}}} \cdot e^{\alpha t} \\ &= \frac{c}{k!q(\alpha)}e^{\alpha t} \\ &= \frac{c}{k!q(\alpha)}k!q(\alpha)e^{\alpha t}. \end{aligned}$$

\square

$m - 1 \rightarrow m$ Es gilt

$$\begin{aligned} p\left(\frac{d}{dt}\right)(t^{m+k}e^{\alpha t}) &= q\left(\frac{d}{dt}\right)\left(\frac{d}{dt} - \alpha\right)^k(t^{m+k}e^{\alpha t}) \\ &= q\left(\frac{d}{dt}\right)\left(\frac{(m+k)!}{m!}t^m e^{\alpha t}\right) = \underbrace{g(t)}_{\text{Polynom von Grad } m} e^{\alpha t}. \end{aligned}$$

Für geeignetes $c \neq 0$ ist daher $f_1 := f - cg$ ein Polynom von Grad $m - 1$. Nach Induktionsvoraussetzung gibt es ein Polynom h_1 von Grad $m - 1 + k$ s.d.

$$p\left(\frac{dd}{dt}\right)(h_1(t)e^{\alpha t}) = f_1(t)e^{\alpha t}.$$

Dann ist

$$h(t) := h_1(t) + ct^{m+k}$$

Polynom von Grad $m + k$ und es gilt

$$p\left(\frac{d}{dt}\right)(h(t)e^{\alpha t}) = f_1(t)e^{\alpha t} + \underbrace{p\left(\frac{d}{dt}\right)(ct^{m+k}e^{\alpha t})}_{cg(t)e^{\alpha t}}. \quad \square$$

Beispiel. $x^{(3)} + 2x^{(2)} + x' = t + 2e^{-t}$. Homogene Gleichung:

$$p(T) = T^3 + 2T^2 + T = T(T+1)^2.$$

$\Rightarrow \lambda_1 = -1$ (Vielfachheit 2), $\lambda_2 = 0$. \Rightarrow Fundamentalsystem $(e^{-t}, te^{-t}, 1)$. Inhomogene Gleichung: Wir zerlegen die rechte Seite und lösen

$$p\left(\frac{d}{dt}\right)x = t \tag{1}$$

und

$$p\left(\frac{d}{dt}\right)x = 2e^{-t}. \tag{2}$$

Addition der Lösungen liefert die gesuchte Lösung:

(1) Ansatz: $v_1(t) = C_1t + C_2t^2$ (C_0 unnötig, da Lösung der homogenen Gleichung) Einsetzen in (1) $\Rightarrow c_1 = \frac{1}{2}, c_2 = -2$.

(2) $v_2(t) = ct^2e^{-t}$ (te^{-t} und 1 sind Lösung der homogenen). Einsetzen in (2) $\Rightarrow C = -1$. Eine spezielle Lösung ist also

$$v(t) = -2t + \frac{1}{2}t^2 - t^2e^{-t}.$$

Kapitel 6.

Lebesgue-Integration

Vorlesung 19

Do 25.10. 10:15

Integralbegriff, s. d. $\int f_n dx \rightarrow \int f dx$, wenn $f_n \rightarrow f$ punktweise \rightsquigarrow Lebesgue-Integral.
Unterschiedliche Zugänge. Hier: Riesz (Vilmos Komornik, arXiv: 1805.07289) vgl. auch
Otto Forster, Analysis 3, Springer Vieweg, vor 2010.

Definition 6.1. Eine Teilmenge $N \subset \mathbb{R}^n$ heißt *Nullmenge*, wenn es zu jedem $\varepsilon > 0$ eine abzählbare Überdeckung von N durch offene Quadrate gibt mit Gesamtvolumen $< \varepsilon$ ($\text{vol}(I_1 \times \dots \times I_n) = |I_1| \cdots |I_n|$). Man sagt eine Eigenschaft träge *fast überall* (f.ü.) zu, wenn sie außerhalb einer Nullmenge zutrifft.

Beispiele. • $N = \bigcup_{i=1}^{\infty} \{x_i\}$ ist Nullmenge $\subset \mathbb{R}$.

• \mathbb{Q} ist Nullmenge $\subset \mathbb{R}$.

• $f(x) = 1, g(x) = \begin{cases} 1 & c \neq 0 \\ 0 & x = 0 \end{cases}, f = g \text{ f.ü.}$

Im Folgenden wollen wir Funktionen, die f.ü. gleich sind, miteinander identifizieren. Wir bilde also Äquivalenzklassen

$$\bar{f} = \{g \mid f = g \text{ f.ü.}\}.$$

Notation. Wir schreiben dennoch f (nicht \bar{f}) und $f = g, \subset eqg, f_n \rightarrow f, \dots$, wenn dies nur f.ü. gilt.

Definition 6.2. Eine Stufenfunktion ist eine Funktion der Form

$$\varphi = \sum_{j=1}^n c_j \chi_Q,$$

$Q_j = I_{j,1} \times \cdots \times I_{j,n}$, $I_{j,i}$ beschränkte Intervalle.

$$\chi_Q(x) = \begin{cases} 1 & x \in Q \\ 0 & x \notin Q \end{cases}$$

„charakteristische Funktion“. *Integral* von φ

$$\int \varphi dx := \sum_{j=1}^m c_j \operatorname{vol}(Q_j)$$

Lemma 6.3. \mathcal{R}_0 = Menge aller Stufenfunktionen (bzw. Äquivalenzklassen).

- i) \mathcal{R}_0 ist Vektorraum.
- ii) $\int \varphi dx$ hängt nicht von der Wahl des Repräsentanten φ ab.
- iii) $\int : \mathcal{R}_0 \rightarrow \mathbb{R}$, $\varphi \mapsto \int \varphi dx$ ist linear und $\int \varphi dx \geq 0$, wenn $\varphi \geq 0$.

Beweis. vgl. DIFF I (für $Q = I$, hier genauso!), aber Achtung: Hier geht es um Äquivalenzklassen.

6.3.ii) folgt aus dem Satz von Borel (siehe unten): nicht-ausgeartete Intervalle ($\neq \emptyset$, $\neq \{x\}$) sind keine Nullmenge in \mathbb{R} . Also sind nicht-ausgeartete Quader (also solche, die keine ausgearteten Intervalle enthalten) keine Nullmenge in \mathbb{R}^n . Nur nicht-ausgeartete Quader liefern einen Beitrag zum Integral.

Beweis. O.B.d.A. $I = [0, 1]$ (den $\{0, 1\}$ ist Nullmenge). Angenommen, $\exists I_j$ offen s. d. $I \subset \bigcup I_j$ und $\sum_{j=1}^{\infty} |I_j| < \varepsilon$ mit $0 < \varepsilon < 1$. $[0, 1]$ ist kompakt $\implies \exists i_1, \dots, i_k$ s. d.

$$[0, 1] \subset \bigcup_{j=1}^k I_{i_j} \implies 1 = \int_0^1 dx \leq \int \sum_{j=1}^k \chi_{I_{i_j}}(x) dx = \sum_{j=1}^k \int \chi_{I_{i_j}}(x) dx < \varepsilon \not\downarrow. \quad \square$$

$\sum_{j=1}^k \chi_{I_{i_j}}(x) \geq 1$ (DIFF I) DIFF I

Notation. $f_k(x) \nearrow f(x)$ oder $f_k \nearrow f$ wenn $f_k \rightarrow f$ punktweise (f.ü.) und $f_k \leq f_{k+1}$ (f.ü.). $f_k(x) \searrow f(x)$ oder $f_k \searrow f$ wenn $f_k \rightarrow f$ punktweise (f.ü.) und $f_k \geq f_{k+1}$ (f.ü.).

Lemma 6.4. i) $(\varphi_k)_k \subset \mathcal{R}_0$, $\varphi_k(x) \searrow 0$. Dann gilt $\int \varphi_k dx \searrow 0$.

ii) $(\varphi_k)_k \subset \mathcal{R}_0$, $\varphi_k(x) \nearrow f(x)$ und $\sup \int \varphi_k dx < \infty \implies f$ ist f.ü. endlich.

Beweis. 6.4.i) $\exists [a, b]^n$ und $\exists M \geq 0$ s. d. $\varphi_1|_{[a,b]}$ und somit alle φ_k durch M beschränkt sind und setzen φ_1 , somit alle φ_k außerhalb $[a, b]^n$ gleich 0. Wähle nun Repräsentanten. $\forall \varepsilon > 0 \exists$ abzählbar viele offene Quadern mit $\sum_j \text{vol}(Q_j) < \varepsilon$ s. d. alle $\varphi_k|_{[a,b] \setminus \bigcup_j Q_j}$ stetig sind

$$\implies \|\varphi_k\|_{\infty, [a,b]^n \setminus \bigcup_j Q_j} \rightarrow 0 \implies 0 \leq \int \varphi_k dx \leq M\varepsilon + \varepsilon(b-a)^n$$

für k groß genug.

6.4.ii) Ersetze φ_k durch $\tilde{\varphi}_k = \varphi_k - \varphi_1 \implies \tilde{\varphi}_k \geq 0$. Wähle $A > 0$ s. d. $A \geq \sup \int \tilde{\varphi}_k dx$. Setze zu $\varepsilon > 0$

$$\mathcal{U}_\varepsilon := \left\{ x \in \mathbb{R}^n \mid f(x) > \frac{A}{\varepsilon} \right\}.$$

Wir sind fertig, wenn wir zeigen, dass \mathcal{U}_ε Nullmenge ist. Setze

$$\mathcal{U}_{\varepsilon,k} := \left\{ x \mid \tilde{\varphi}_k(x) > \frac{A}{\varepsilon} \geq \tilde{\varphi}_{k-1} \right\} \quad (\tilde{\varphi}_0 = 0).$$

$\implies \mathcal{U}_{\varepsilon,\parallel} \cap \mathcal{U}_{\varepsilon,j}$ (wegen Monotonie) und $U_\varepsilon = \bigcup_k \mathcal{U}_{\varepsilon,k}$ (wobei $\mathcal{U}_{\varepsilon,k}$ eine endliche Vereinigung von Quadern ist). Nur noch zu zeigen:

$$\sum_{j=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{l_k} \text{vol}(Q_{k,j}) \leq \varepsilon.$$

Dies gilt dann

$$\frac{A}{\varepsilon} \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^{l_k} \text{vol}(Q_{k,j}) \leq \underbrace{\int_{\mathcal{U}_{\varepsilon,k}} \varphi_k dx}_{\substack{\uparrow \\ \text{Def. } \mathcal{U}_{\varepsilon,k}}} \leq \int \varphi_m dx \leq A. \quad \square$$

Definition 6.5.

$$\mathcal{R}_1 := \left\{ f: \mathbb{R}^n \rightarrow \overline{\mathbb{R}} = \mathbb{R} \cup \{ \pm\infty \} \mid \exists (\varphi_k)_k \subset \mathcal{R}_0, \quad \varphi_k(x) \nearrow f(x) \right\}$$

zu $f_1 \in \mathcal{R}_1$ setzte $\int f dx := \lim_{k \rightarrow \infty} \int \varphi_k dx \in \overline{\mathbb{R}}$.

- Satz 6.6.**
- i) $\int f$ wie in 6.5 ist unabhängig von der gewählten Folge $(\varphi_k)_k \subset \mathcal{R}_0$.
 - ii) Für $f \in \mathcal{R}_0$ stimmt der Integralbegriff mit dem aus 6.2 überein.
 - iii) Sind $f, g \in \mathcal{R}_1$ mit $f \leq g$ so ist $\int f \leq \int g$.
 - iv) Sind $g, f \in \mathcal{R}_1$, $c \geq 0$ so ist $cf, f+g \in \mathcal{R}_1$ und $\int cf dx = c \int f dx$, $\int f+g dx = \int f dx + \int g dx$.

Für den Beweis benötigen wir ein Lemma.

Lemma 6.7. $(\varphi_k)_k, (\psi_k)_k \subset \mathcal{R}_0$, $\varphi_k \nearrow f$, $\psi_k \nearrow g$. Ist $f \leq g$, so gilt

$$\lim_k \int \varphi_k dx \leq \lim_k \int \psi_k dx.$$

Beweis. Es genügt zu zeigen: Für jedes m gilt

$$\int \varphi_m dx \leq \lim \int \psi_k dx.$$

Das ist äquivalent zu

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \int \varphi_m - \psi_k dx \leq 0.$$

Definiere

$$(\varphi_m - \psi_k)^+ := \max\{\varphi_m - \psi_k, 0\} \searrow 0 \quad (k \rightarrow \infty)$$

punktweise. 6.4.i) $\implies \lim_{k \rightarrow \infty} \int (\varphi_m - \psi_k)^+ dx \searrow 0 \implies$ Beh. □

33 min

Beweis von 6.6. 6.6.i) folgt aus 6.7 mit $f = g$.

6.6.iii) folgt aus 6.7.

6.6.ii) Wähle $\varphi_n = f \in \mathcal{R}_0 \quad \forall n$.

6.6.iv) $\varphi_k \nearrow f$, $\psi_k \nearrow g \implies c\varphi_k \nearrow cf$, $\varphi_k + \psi_k \nearrow f + g$. Der Rest folgt aus der Linearität der Integrals auf \mathcal{R}_0 . □

Bemerkung. Achtung! Da wir $\int f = \infty$ zulassen, kann man nicht einfach Linearität zeigen.

Beispiel. $\int f = \infty$, $\int g = \infty$, $\int (f - g) \neq 0$ i. A.

Konvention. $0 \cdot (\infty) = 0$, $a + \infty = \infty$, $a \cdot (\infty) = \infty$ ($a > 0$), $a \cdot (\infty) = -\infty$ ($a < 0$). Konsistent mit 6.6.iv).

Bemerkung. Sind $f, g \in \mathcal{R}_1$, so auch $\min(f, g)$ und $\max(f, g)$.

Beweis.

$$\begin{aligned} \min(f, g) &= \frac{1}{2}(f + g - |f - g|) \\ \max(f, g) &= f + g - \frac{1}{2}|f - g|. \end{aligned}$$
□

Lemma 6.8. $(f_k) \subset \mathcal{R}_1$, $f_k \nearrow f$. Dann ist $f \in \mathcal{R}_1$ und

$$\int f_k dx \nearrow \int f dx.$$

Beweis. Zu k wähle $(\varphi_{k,j})_j \subset \mathcal{R}_0$ mit $\varphi_{k,j} \nearrow_j f_k$. Dann ist für $\varphi_i := \sup_{k,j \leq i} \varphi_{k,j}$

$$\varphi_{i+1} \geq \varphi_i$$

und für jedes feste k gilt

$$\begin{aligned} \varphi_{k,j} &\leq \varphi_j \leq f \quad \forall j \geq k \\ \implies f_k &= \lim_{j \rightarrow \infty} \varphi_{k,j} \leq \lim_{j \rightarrow \infty} \varphi_j \leq f \end{aligned}$$

\implies (Sandwich-Lemma) $\varphi_j \nearrow f \implies f \in \mathcal{R}_1$ und $\int \varphi_j dx \rightarrow \int f dx$. Wegen $\varphi_k \leq f_k \leq f$ (nach Definition) folgt Beh. \square

42:15

Bemerkung / Definition 6.9. Wir erweitern den Integralbegriff noch weiter: Ist $f \in \mathcal{R}_1$, definiert man $\int -f dx := -\int f dx$.

Allgemein: Sind $f_1, f_2 \in \mathcal{R}_1$ und $\int f_1 dx - \int f_2 dx$ ist definiert (d. h. mindestens eines der Integrale ist endlich), dann ist $f := f_1 - f_2$ wohldefiniert (denn nach 6.4.ii) ist dann eine der Funktionen f.ü. endlich). Die Menge all dieser Funktionen f nennen wir \mathcal{R}_2 und setzen für $f = f_1 - f_2 \in \mathcal{R}_2$, $f_i \in \mathcal{R}_1$:

$$\int f dx := \int f_1 dx - \int f_2 dx.$$

Bemerkung. Ohne Einschränkung können wir annehmen, dass $f_1, f_2 \geq 0$ (sonst wähle $\varphi, \psi \in \mathcal{R}_0$ mit $\varphi \leq f_1$ und $\psi \leq f_2$ und betrachte $f_1 - \min\{\varphi, \psi\}$ und $f_2 - \min\{\varphi, \psi\}$).



$$f = f_1 - \min\{\varphi, \psi\} - (f_2 - \min\{\varphi, \psi\}) = f_1 - f_2.$$

Satz 6.10. $f \in \mathcal{R}_2$

- i) $\int f dx$ ist unabhängig von der Wahl von f_1, f_2
- ii) Ist $f \in \mathcal{R}_1 \subset \mathcal{R}_2$, stimmt $\int f dx$ mit dem Integral auf \mathcal{R}_1 (6.5) überein.
- iii) Monotonie: Sind $f, g \in \mathcal{R}_2$, $f \leq g$ so ist $\int f dx \leq \int g dx$.
- iv) Sind $f, g \in \mathcal{R}_2$ und $\int f dx + \int g dx$ ist definiert, so ist $f + g \in \mathcal{R}_2$ und $\int f + g dx = \int f dx + \int g dx$.
- v) Ist $f \in \mathcal{R}_2$, $c \in \mathbb{R}$, so ist $cf \in \mathcal{R}_2$ und $\int cf dx = c \int f dx$.

Beweis. 6.10.i) und 6.10.iii) Wir zeigen: Wenn $f = f_1 - f_2$ und $g = g_1 - g_2$ und $f \leq g$, dann gilt:

$$\int f_1 dx - \int f_2 dx \leq \int g_1 dx - \int g_2 dx \quad (*)$$

(daraus folgt 6.10.i) mit $f = g$). Fallunterscheidungen:

- a) Ist $\int f_2 dx = \infty$ so gilt (*).
- b) Ist $\int f_2 dx < \infty$ und $\int g_1 dx < \infty$, so sind f_2 und g_2 endlich f.ü. (6.4.ii)) $\Rightarrow f_1 + g_2 \leq g_1 + f_2$ (wegen $f_1 - f_2 \leq g_1 - g_2$) $\Rightarrow \int f_1 + \int g_2 \leq \int g_1 + \int f_2$ (6.6.iv)) $\Rightarrow (*)$.
- c) Ist $\int f_2 dx < \infty$ und $\int g_2 dx = \infty$, wähle $(\varphi_k)_k \subset \mathcal{R}_0$ mit $\varphi_k \nearrow g_2$. Dann ist $f_1 - f_2 \leq g_1 - \varphi_k \quad \forall k$. Wende b) auf f_1, f_2, g_1, φ_k an $\Rightarrow \int f_1 - \int f_2 \leq \int g_1 - \int \varphi_k \Rightarrow (*) (k \rightarrow \infty)$.

6.10.ii) Folgt aus 6.10.i) mit $f_1 := f$, $f_2 := 0$.

6.10.v) Folgt aus der Definition in wie in 6.6.iv)

6.10.iv) Schreibe $f = f_1 - f_2$, $g = g_1 - g_2$ mit $f_1, f_2, g_1, g_2 \in \mathcal{R}_1$.

- a) Ist $\int f_2 dx < \infty$, $\int g_2 dx < \infty \Rightarrow f_1 + g_2, f_2 + g_2 \in \mathcal{R}_1$ (6.6.iv)) und $\int f_2 + g_2 dx = \int f_2 + g_2 dx < \infty$

$$\Rightarrow f + g = (f_1 + g_2) - (f_2 + g_2) \in \mathcal{R}_2$$

und

$$\begin{aligned} \int f + g dx &= \int f_1 + g_2 dx - \int f_2 + g_2 dx \\ &= \int f_1 + \int g_1 - \int f_2 - \int g_2 \\ &= \int f + \int g. \end{aligned}$$

- b) Ist $\int f_2 = \infty$ oder $\int g_2 = \infty$, so sind *beide Integrale* $\int f_1, \int g_1$ *endlich*. Denn $f, g \in \mathcal{R}_2$ und wir hatten vorausgesetzt, dass $\int f dx + \int g dx$ definiert ist. Wir können also Beweis a) wiederholen. ($\int f_2 = \infty \implies \int f_1 < \infty$ und $\int g < \infty$). \square

Satz 6.11 (Verallgemeinerter Satz von Beppo-Levi). Sei $(f_k)_k \subset \mathcal{R}_2$, $f_k \nearrow f$. Ist $\int f_k dx > -\infty$ für ein k , so ist $f \in \mathcal{R}_2$ und

$$\int f_k dx \nearrow \int f dx. \quad (*)$$

Bemerkung. Die Voraussetzung ist wichtig:

Betrachte $f_k = -\chi_{(-\infty, 0)} + \chi_{(0, k)}$. Dann ist $f = \text{sgn} \notin \mathcal{R}_2$, $\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0. \end{cases}$

Betrachte $f_k = -\chi_{(k, \infty)}$. Dann ist $f = 0 \in \mathcal{R}_2$ aber (*) trifft nicht zu.

Beweis von 6.11. Für $k \geq k_0$ gilt $\int f_k > -\infty$ (wegen der Monotonie). Sei $k \geq k_0$. Schreibe $f_k = g_k - h_k$, $g_k, h_k \in \mathcal{R}_1$. Dann ist $\int h_k < \infty \implies \exists \varphi_k \in \mathcal{R}_0$ s. d. $\varphi_k \leq h_k$ und $\int h_k - \varphi_k dx < 2^{-k}$

$$\implies f_k = (\underbrace{g_k - \varphi_k}_{=\tilde{g}_k}) - (\underbrace{h_k - \varphi_k}_{\tilde{h}_k})$$

und es gilt $\tilde{h}_k \geq 0$ und $\int \tilde{h}_k < 2^{-k}$, $\tilde{h}_k, \tilde{g}_k \in \mathcal{R}_1$. Schreibe nun

$$f_k = (\tilde{h}_1 + \dots + \tilde{h}_{k-1} + \tilde{g}_k) - (\tilde{h}_1 + \dots + \tilde{h}_{k-1} + \tilde{h}_k) = G_k - H_k$$

mit $H_k, G_k \in \mathcal{R}_1$, $\int H_k \leq 1$. Lemma 6.8 $\implies G_k \nearrow G$, $H_k \nearrow H$ mit $G, H \in \mathcal{R}_1$ und $\int H \leq 1$

$$\implies f = G - H \in \mathcal{R}_2$$

und

$$\int f_k dx = \int G_k dx - \int H_k dx \rightarrow \int G dx - \int H dx = \int f dx. \quad \square$$

Folgerung 6.12. $f, g \in \mathcal{R}_2 \implies \max(f, g), \min(f, g) \in \mathcal{R}_2$.

Beweis (nur für max). Seien $f = f_1 - f_2$, $g = g_1 - g_2$.

- a) $f_1, g_1 \in \mathcal{R}_0 \implies \int f_1 + g_1 dx < \infty$ und

$$\begin{aligned} \max(f_1 - f_2, g_1 - g_2) &= (f_1 + g_1) + \max(-g_1 - f_2, -f_1 - g_2) \\ &= (\underbrace{f_1 + g_1}_{\in \mathcal{R}_1}) - \underbrace{\min g_1 + f_2, f_1 + g_2}_{\in \mathcal{R}_1}. \end{aligned}$$

b) $\int f_1 + g_1 < \infty \implies \max(f_1 - f_2, g_1 - g_2) \in \mathcal{R}_2$. $f_1, g_1 \notin \mathcal{R}_0$, wähle $\varphi_k \nearrow f_1$,
 $\leq_k \nearrow g_1$. 6.12.a) $\implies \max(\varphi_k - f_2, \psi_k - g_2) \in \mathcal{R}_2$ und

$$\begin{aligned} \max(\varphi_k - f_2, \psi_k - g_2) &\nearrow \max(f_1 - f_2, g_1 - g_2) \\ \int \max(\varphi_k - f_2, \psi_k - g_2) dx &> -\infty \quad \forall k, \end{aligned}$$

weil $\int f_2 dx < \infty$ oder $\int g_2 dx < \infty \implies$ Beh. aus Beppo-Levis Satz.

□

Vorlesung 20

Mo 29.06. 10:15

6.I. Etwas Maßtheorie

4:30

Definition 6.13. Sei X eine Menge, Σ eine Familie von Teilmengen $E \subset X$ mit
 \uparrow
 „Sigma“

$$\begin{aligned} X &\in \Sigma \\ E \in \Sigma &\implies X \setminus E \in \Sigma \\ E_k \in \Sigma, \quad k \in I \text{ abzählbar} &\implies \bigcup_{k \in I} E_k \in \Sigma. \end{aligned}$$

Σ heißt dann σ -Algebra („Sigma-Algebra“) über X und (X, Σ) Borel-Raum oder messbarer Raum und $E \in \Sigma$ nennt man *messbar*.

Gegeben zwei messbare Räume $(X, \Sigma_X), (Y, \Sigma_Y)$ nennt man $f: X \rightarrow Y$, wenn gilt: Ist $E \subset Y$ messbar (also $E \in \Sigma_Y$), so ist $f^{-1}(E)$ messbar in X (also $f^{-1}(E) \in \Sigma_X$). Ein Maß auf einer σ -Algebra über X ist eine Funktion $\mu: \Sigma \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0} \cup \{+\infty\}$, für die gilt $\mu(\emptyset) = 0$ und die σ -additiv (sigma-additiv) ist, für die also gilt

$$\mu\left(\bigcup_{k=1}^{\infty} E_k\right) = \sum_{k=1}^{\infty} \mu(E_k),$$

wenn $E_k \cap E_l = \emptyset$ für $k + l$. (X, Σ, μ) heißt *Maßraum*.

Beispiel. (X, Σ, δ_x) ,

$$\delta_x(E) = \begin{cases} 1 & x \in E \\ 0 & x \notin E \end{cases}, E \in \Sigma,$$

$$\text{„Dirac-Maß“. } f: E \rightarrow \mathbb{R}, \text{ „}\int f d\delta_x\text{“} = \begin{cases} f(x) & x \in E \\ 0 & x \notin E. \end{cases}$$

Ein Maß heißt σ -endlich, wenn es zu jedem $E \in \Sigma$ eine abzählbare Überdeckung $E \subset \bigcup_{k=1}^{\infty} E_k$, $E_k \in \Sigma$, gibt s. d. alle E_k endliches Maß haben, also $\mu(E_k) < \infty$ gilt für alle k .

Ein Maß heißt vollständig, wenn gilt: Ist $N \in \Sigma$ mit $\mu(N) = 0$ und $M \subset N$, so ist $M \in \Sigma$.

Bemerkung. Aus den Definitionen folgt sofort:

- $\emptyset \in \Sigma$

- Gibt es $E \in \Sigma$ s. d. $\mu(E) > 0$, so ist $\mu(\emptyset) = 0$ automatisch erfüllt.
- Die Komposition zweier messbarer Funktionen ist messbar.

Satz 6.14. Setze $\mathcal{M} := \{ E \subset \mathbb{R}^n \mid \chi_E \in \mathcal{R}_2 \}$ und $\mu(E) := \int \chi_E dx$. Dann ist $(\mathbb{R}^n, \mathcal{M}, \mu)$ ein σ -endlicher, vollständiger Maßraum.

Beweis. Das folgt direkt aus dem verallgemeinerten Satz von Beppo-Levi. Details als Hausaufgabe. \square

Definition.

$$L^1 := \left\{ f \in \mathcal{R}_2 \mid \int f dx < \infty \right\}.$$

↑
eigentlich Äquivalenzklassen $\{ g \mid g=f \text{ f.ü.} \}$

„Lebesgue-intergrierbare Funktionen“. Wohldefiniertheit 6.17.ii) (Unabhängigkeit von Repräsentanten!).

13 min

Proposition 6.15. L^1 ist ein Vektorraum und $\int: L^1 \rightarrow \mathbb{R}$, $f \mapsto \int f dx$ ist lineare und monotone Abbildung.

Beweis. Folgt aus 6.10.iii), 6.10.iv), 6.10.v) (Eigenschaften von \mathcal{R}_2). Unabhängigkeit von Repräsentanten folgt aus 6.3.ii).

Bemerkung. Es gilt: $f, g \in L^1 \implies \min(f, g), \max(f, g) \in L^1$, denn

$$\min(f, g) = \min(f_1 + g_2, g_1 + f_2) - (f_2 + g_1).$$

max analog.

Satz 6.16 (Beppo-Levi, Satz über monotone Konvergenz). Sei $(f_k)_k \subset L^1$, $f_k \nearrow f$, $\sup \int f_k dx < \infty$. Dann ist $f \in L^1$ und

$$\int f_k dx \nearrow \int f dx.$$

Beweis. Folgt aus dem verallgemeinerten Beppo-Levi 6.11. \square

Folgerung 6.17. i) $\|f\|_{L^1} := \int |f| dx$ definiert eine Norm auf L^1 .
ii) $N \subset \mathbb{R}^n$ ist Nullmenge $\iff N \in \mathcal{M}$ und (s. 6.14) $\mu(N) = \int \chi_N dx = 0$.

Beweis. 6.17.i) Δ -Ungleichung, skalarmultiplikation aus Eigenschaften des Betrags und 6.10.iv) und 6.10.v) \checkmark . $f = 0$ (d. h. $f = 0$ f.ü.), also f liegt in der Äquivalenzklasse der Nullfunktion, also der Null im Vektorraum L^1 .

$$\implies \|f\|_{L^1} = 0 \checkmark.$$

Sei umgekehrt $\int |f| dx = 0$. Betachte $f_n := n|f|$. Dann gilt $\int f_n = 0 \quad \forall n$.

$$6.16 \text{ (Beppo-Levi)} \implies \begin{matrix} f_n \\ \nearrow \end{matrix} g \in L^1 \implies g = 0 \text{ f.ü.} \implies |f| = 0 \text{ f.ü.} \implies f = 0 \text{ f.ü..}$$

Wichtig: $f \in L^1 \implies \|f\|_{L^1} < \infty$, denn $f \in L^1 \iff |f| \in L^1$.

„ \Leftarrow “ klar

„ \implies “ $f = f_1 - f_2$ und beide $\int f_1 < \infty$ und $\int f_2 < \infty$.

6.17.ii) Zu zeigen ist: $\chi_N = 0 \iff \int \chi_N dx = 0$.

„ \implies “ \checkmark

„ \Leftarrow “ wegen 6.17.i) \checkmark . □

Weitere Erläuterungen
→22:15

6.II. Weitere Folgerungen

Satz 6.18 (Fatou). Sei $(f_k)_k \subset L^1$, $f_k \rightarrow f$. Ist $f_k \geq 0 \quad \forall k$ und $\liminf_{k \rightarrow \infty} \int f_k dx < \infty$, dann ist $f \in L^1$ und

$$\int f dx \leq \liminf \int f_n dx.$$

\liminf = limes inferior = der kleinste Häufungspunkt einer Folge.

Beweis. Setze $g_m := \inf \{ f_k \mid k \geq m \}$. Dann gilt $g_m \nearrow f$ und (wegen $\liminf \int f_k < \infty$) $\sup \int g_m dx < \infty$. Also folgt $f \in L^1$, wenn gezeigt ist, dass $g_m \in L^1$ (aus 6.16). Setze zu $m \in \mathbb{N}$, $l = m, m+1, \dots$

$$g_{m,l} := \min \{ f_k \mid m \leq k \leq l \} \in L^1$$

(wegen Bemerkung nach 6.15). $g_{m,l} \searrow_l g_m$, $\int g_{m,l} dx < \infty \quad \forall l \implies -g_m \in L^1$. Es folgt mit 6.16 (monotone Konvergenz) und $g_m \leq f_m$

$$\begin{aligned} \int f dx &= \lim_m \int g_m dx \\ &= \lim_m \int \inf_{k \geq m} df_k x \\ &\leq \lim_m \inf_{\substack{k \geq m \\ \uparrow}} \int f_k dx \\ \int \inf_{k \geq m} f_k &\leq \int f_j \quad \forall j \geq m, \text{ also } \int \inf_{k \geq m} f_k \leq \inf_{j \geq m} \int f_j \\ &\leq \liminf_m \int f_m dx. \end{aligned} \quad \square$$

Satz 6.19 (Lebesgue, majorisierte Konvergenz). Sei $(f_k)_k \subset L^1$, $f_k \rightarrow f$. Gibt es $g \in L^1$, s. d. $|f_k| \leq g \quad \forall k$, so ist $f \in L^1$ und $\int f_k dx \rightarrow \int f dx$

Bemerkung. Voraussetzung $|f_k| \leq g$ ist wichtig, wie folgendes Anti-Beispiel zeigt: $f_k = k\chi_{(0, \frac{1}{k})}$, $f_k \rightarrow f = 0$, aber $\int f_k dx = 1 \quad \forall k$.

6.19. Wir wenden Fatou an auf $(g - f_k)_k$ und $(g + f_k)_k \implies g - f, g + f \in L^1$ und

$$\begin{aligned} \int g - f dx &\leq \liminf \int g - f_k dx = \int g dx - \limsup \int f_k dx & (*) \\ \int g + f dx &\leq \liminf \int g + f_k dx = \int g dx + \liminf \int f_k dx & (**) \end{aligned}$$

$$f = \frac{1}{2}(g + f) - \frac{1}{2}(g - f) \in L^1$$

$$\implies \limsup_{(*)} \int f_k dx \leq \int f dx \underset{(**)}{\leq} \liminf \int f_k dx \quad \square$$

Beispiel. Wir berechnen

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_{[0,1]} \left(n \cdot \sin \left(\frac{x}{n} \right) \right)^n dx,$$

also

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int \underbrace{\chi_{[0,1]}(x) \left(n \sin \frac{x}{n} \right)^n}_{f_n(x)} dx.$$

Für $x \in [0, 1]$ ist

$$|f_n(x)| = \left| n \sin \frac{x}{n} \right|^n \underset{\substack{\uparrow \\ \sin y \leq y, \quad 0 \leq y \leq 1}}{\leq} x^n \leq 1 \quad \forall n$$

und

$$\begin{aligned}\lim f_n(x) &= \lim x^n = \begin{cases} 0 & x \in [0, 1) \\ 1 & x = 1 \end{cases} \\ \implies \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{[0,1]} \left(n \cdot \sin\left(\frac{x}{n}\right) \right)^n dx &= 0.\end{aligned}$$

Ein nützliches Kriterium, um zu testen, ob $f \in L^1$:

Lemma 6.20. Sei $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ Funktion. Gibt es $(\varphi_k)_k \subset \mathcal{R}_0$ mit

$$\|f - \varphi_k\|_{L^1} \longrightarrow 0 \quad (k \rightarrow \infty),$$

so gilt

$$\int f dx = \lim_k \int \varphi_k dx < \infty,$$

also $f \in L^1$.

Umgekehrt, ist $f \in L^1$, so gibt es zu $\varepsilon > 0$ ein $\varphi \in \mathcal{R}_0$ s. d. $\|f - \varphi\|_{L^1} < \varepsilon$.

Beweis. 1. Beh.

$$\begin{aligned}\left| \int \varphi_k dx - \int \varphi_l dx \right| &\leq \int |\varphi_k - \varphi_l| dx = \|\varphi_k - \varphi_l\|_{L^1} \\ &\leq \|\varphi_k - f\|_{L^1} + \|f - \varphi_l\|_{L^1}\end{aligned}$$

$\implies (\int \varphi_k dx)_k$ bilden Cauchy-Folge \implies Konvergenz in \mathbb{R} .

$$\left| \int f dx - \int \varphi_k dx \right| \leq \|f - \varphi_k\|_{L^1} \implies \int f dx = \lim \int \varphi_k dx.$$

2. Beh. O.B.d.A. $f > 0$. $\exists (\varphi_k)_k \subset \mathcal{R}_0$, $\varphi x_k > 0$, $\varphi_k \nearrow f$ mit $\int \varphi_k dx \nearrow \int f dx < \infty$.

$$\implies \int f dx - \int \varphi_k dx = \int |f - \varphi_k| dx = \|f - \varphi_k\|_{L^1} < \varepsilon$$

für k groß genug. □

Satz 6.21. $(L^1, \|\cdot\|_{L^1})$ ist vollständig.

Beweis. Sei $(f_k)_k \subset L^1$ Cauchy-Folge bezüglich $\|\cdot\|_{L^1}$. Betrachte eine Teilfolge $(f_{k_j})_j$ mit

$$\implies \|f_{k_{j+1}} - f_{k_j}\|_{L^1} < 2^{-j}$$

und

$$\begin{aligned} f(x) &:= f_{k_1}(x) + \sum_{j=1}^{\infty} (f_{k_{j+1}}(x) - f_{k_j}(x)) \\ g(x) &:= |f_{k_1}|(x) + \sum_{j=1}^{\infty} |f_{k_{j+1}}(x) - f_{k_j}(x)| \end{aligned}$$

sowie die Partialsummen

$$\begin{aligned} S_K^f(x) &:= f_{k_1}(x) + \sum_{j=1}^K (f_{k_{j+1}}(x) - f_{k_j}(x)) \\ S_K^g(x) &:= |f_{k_1}|(x) + \sum_{j=1}^K |f_{k_{j+1}}(x) - f_{k_j}(x)|. \end{aligned}$$

Es gilt

$$\begin{aligned} \|S_K^g(x)\|_{L^1} &\leq \|f_{k_1}\|_{L^1} + \sum_{j=1}^K \|f_{k_{j+1}} - f_{k_j}\|_{L^1} \\ k \rightarrow \infty &\leq \|f_{k_1}\|_{L^1} + \sum_{j=1}^k 2^{-j} \end{aligned}$$

$\implies g \in L^1$ (monotone Konvergenz, 6.16)

\implies auch die Reihe, die f definiert, konvergiert punktweise f.ü.

$\implies f \in L^1$.

Wir zeigen: $f_k \rightarrow f$ (bzgl. $\|\cdot\|_{L^1}$). Es gilt (Teleskopsummen-Argument) $S_{K-1}(x) = f_{k_x}$.

$\implies f_{k_K} \rightarrow f$ punktweise f.ü. ($K \rightarrow \infty$).

Zudem gilt

$$\begin{aligned} |f(x) - S_K(f)(x)| &\stackrel{\triangle}{\leq} |f(x)| + |S_K(f)(x)| \\ &\stackrel{\triangle_2}{\leq} |g(x)| \forall k \end{aligned}$$

\implies (majorante Konvergenz 6.19)

$$\int |f(x) - S_K(f)(x)| dx \rightarrow \int 0 dx = 0$$

also $\|f - f_{k_K}\|_{L^1} \rightarrow 0$ ($k \rightarrow \infty$), also: $\forall \varepsilon > 0 \exists N$ s.d. $\|f - f_{k_K}\|_{L^1} < \varepsilon \forall k_K \geq N$. Schließlich: $(f_k)_k$ ist Cauchy-Folge also $\forall \varepsilon > 0 \exists M$ s.d. $\|f_k - f_l\|_{L^1} < \varepsilon \forall k, l > M$
 $\implies \|f_k - f\|_{L^1} \leq \|f_k - f_{k_K}\|_{L^1} + \|f_{k_K} - f\|_{L^1} < 2\varepsilon$ für $k, k_K \geq \max\{N, M\}$. \square

Mann kann $L^1([a, b], \mathbb{R})$ auch durch Vervollständigung (bzgl. $\|\cdot\|_{L^1}$) von $C([a, b], \mathbb{R})$ konstruieren.

6.III. Messbare Funktionen

Lemma 6.22. $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ ist messbar genau dann wenn $\exists (\varphi_k)_k \subset \mathcal{R}_0$ mit $\varphi_k \rightarrow f$ f.ü.

Beweis. Hausaufgabe. \square

Lemma 6.23. i) Ist $f \in \mathcal{R}_2$ so ist f messbar.

ii) Ist f messbar und $|f| < g$, $g \in L^1$, so ist $f \in L^1$.

iii) Ist f messbar und $f > 0$ so ist $f \in \mathcal{R}_2$.

Beweis.

i) $f = f_1 - f_2$, $f_1, f_2 \in \mathcal{R}_1$. Seien $(\varphi_k)_k, (\psi_k)_k \subset \mathcal{R}_0$ mit $\varphi_k \nearrow f_1, \psi_k \nearrow f_2$. Es gilt $(\varphi_k - \psi_k)_k \subset \mathcal{R}_0$ und $\varphi_k - \psi_k \rightarrow f$.

ii) Sei $(\varphi_k)_k$ mit $\varphi_k \rightarrow f$. Dann sind $f_k := \text{med}(-g, \varphi_k, g)$ mit

$$\text{med}(x, y, z) = \begin{cases} x & y < x < z \text{ oder } z < x < y \\ y & x < y < z \text{ oder } z < y < x \\ z & x < z < y \text{ oder } y < z < x \end{cases}$$

in L^1 (denn ist etwa $x < z$, so ist $\text{med}(x, y, z) = \max\{x, \min\{y, z\}\}$). Wegen $|f_k| < g \forall k$ folgt die Behauptung aus 6.19.

iii) Wähle $A_1 \subset A_2 \subset \dots$, $\mu(A_j) < \infty$, $f|_{\mathbb{R}^n \setminus \bigcup_j A_j} = 0$. $f_k := \min\{f, k\chi_{A_k}\} \in L^1$ (wegen 6.23.ii) $f_k \nearrow f$. Beh. folgt mit 6.16). \square

6.IV. Zum Verhältnis von Lebesgue- / Riemann-Integral

Es gibt Funktionen, die sind Lebesgue-integrierbar, aber nicht Riemann-integrierbar.

Beispiel. $\chi_{\mathbb{Q}}$

Riemann-Integration:

Alle Obersummen sind 1, alle Untersummen 0. Nur Funktionen mit endlich vielen Sprungstellen / Unendlichkeiten sind Riemann-integrierbar.

Lebesgue-Integration:

\mathbb{Q} = Nullmenge in $\mathbb{R} \Rightarrow \int \chi_{\mathbb{Q}} = 0$. Es sind abzählbar unendlich viele Sprung- / Unendlichkeitsstellen erlaubt.

Erinnerung. Bei der Riemann-Integration wurden die Ordinate unterteilt in Partitionen. Lebesgue kümmert sich um das Bild von f (also die Abszisse).

Achtung: Uneigentlich Riemann-integrierbare Funktionen müssen nicht Lebesgue-integrierbar sein.

Denn es gilt: Ist $f \in L^1$ so ist $|f| \in L^1$ (6.17.i) Beweis).

Ein Fall wie $g = \text{Treppenfunktion}$ und $g|_{[n-1,n]} = (-1)^{n+1} \frac{1}{n}$, $n \in \mathbb{N}$

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \int_0^m g(x) dx = \sum (-1)^{n+1} \frac{1}{n} < \infty$$

kann also nicht vorkommen: $g \notin L^1$ denn $\int |g| = \sum \frac{1}{n}$. Allerdings:

Satz 6.24. Ist g Riemann-integrierbar aus $[a, b]$, so gibt es eine messbare Funktion f mit $g = f$ f.ü. und das Riemann-Integral von g ist gleich dem Lebesgue-Integral von f .

(Details: Königsberger Analysis II, Kap. 7, Springer.)

Wir zeigen stattdessen:

Satz 6.25. Eine Regelfunktion f auf $[a, b]$ ist über $[a, b]$ Lebesgue-integrierbar und das Regel-Integral ist gleich dem Lebesgue-Integral.

$$\underbrace{\int_{[a,b]} f dx}_{= \int \chi_{[a,b]} f x} = \int_a^b f(x) dx$$

Beweis. $I = [a, b]$. Für jede Funktion h auf I gilt $|h| < \|h\|_{\infty, I} \cdot \text{Id}_I$

$$\implies \|h_i\|_{L^1} < \|h\|_{\infty, I} \cdot \|\text{Id}_I\|_{L^1} = (b - a)\|h\|_{\infty, I}$$

↑
als Funktion auf \mathbb{R} , $h_I|_{\mathbb{R} \setminus I} = 0$

Sei f Regelfunktion auf I und $(\varphi_k)_k \subset \mathcal{R}_0$ mit $\|f - \varphi_k\|_{\infty, I} \rightarrow 0$ ($k \rightarrow \infty$). Dann folgt

$$\begin{aligned} & \|f_I - \varphi_{k,I}\|_{L^1} \rightarrow 0 \\ & \quad \uparrow \\ & \quad \text{als Funktion auf } \mathbb{R}, \quad f_I|_{\mathbb{R} \setminus I} = 0, \quad \varphi_{k,I}|_{\mathbb{R} \setminus I} = 0 \\ \implies & \int_{6.20} [a, b] dfx = \int f_I dx = \lim_k \int \varphi_{k,I} dx = \lim \int_a^b \varphi_k dx = \int_a^b f dx \quad \square \end{aligned}$$

Vorlesung 21

Do 02.07. 10:15

Bemerkung 6.26 (Nullmengen / fast überall). Letztes Mal hatten wir gesehen

$$\int f dx = 0 \iff f = 0 \text{ f.ü.} \quad (6.17.i))$$

\implies Das Lebesgue-Integral ist auf den Äquivalenzklassen $\{g \mid g = f \text{ f.ü.}\}$, $\int f < \infty$, wohldefiniert, denn

$$\int \underbrace{(f - g)(x)}_{=0 \text{ f.ü.}} dx = 0,$$

also $\int f dx = \int g dx$.

Es folgte auch: N Nullmenge $\iff \int \chi_N = 0$.

Aus der Definition 6.1 folgt sofort:

Teilmengen von Nullmengen sind Nullmengen und abzählbare Vereinigungen von Nullmengen sind Nullmengen.

Eine direkte Charakterisierung einer wichtigen Klasse von Nullmengen bietet folgender Satz:

Lemma 6.27. Sei $U \subset \mathbb{R}^k$, $f: U \rightarrow \mathbb{R}^{n-k}$ stetig. Dann ist Γ_f Nullmenge $\subset \mathbb{R}^n$.

Beweis (für $n = 2$, $k = 1$). Sei also $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ stetig, $I \subset \mathbb{R}$. Betrachte zunächst $g = f|_{[a,b]}$, $[a,b] \subset I$. g ist gleichmäßig stetig $\implies \forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0$ s. d. $|g(x) - g(y)| < \varepsilon \forall x, y \in [a,b]$ mit $|x - y| < \delta$

Sei als $\varepsilon > 0$ und sei δ wie oben und I_1, \dots, I_N eine Partition von $[a, b]$ Intervalle s. d. $|I_j| < \delta \quad \forall j$ (\exists da $[a, b]$ kompakt). Setze $\alpha_j = \inf_{x \in I_j} g(x)$, $\beta_j = \sup_{x \in I_j} g(x)$

$$\implies \Gamma_{g|_{I_j}} \subset A_j = I_j \times [\alpha_j, \beta_j]$$

und

$$\text{vol}(A_j) < |I_j|(\beta_j - \alpha_j) < |I_j|\varepsilon \quad \forall j.$$

$$\implies \Gamma_g \subset \bigcup_{j=1}^N A_j \text{ und}$$

$$\text{vol}\left(\bigcup A_j\right) = \sum_{j=1}^N |I_j| \cdot \varepsilon = (b-a)\varepsilon.$$

$\implies \Gamma_g$ ist Nullmenge. Da es ein beliebiges Intervall I als abzählbare Vereinigung von kompakten Intervallen geschrieben werden kann, folgt die Behauptung. \square

6.V. Produkt-Maße

Seien (X, Σ_X, μ) , (Y, Σ_Y, ν) Maßräume. Dann ist $\Sigma_X \times \Sigma_Y$ eine σ -Algebra in $X \times Y$ und $(\mu \times \nu)(E \times A) := \mu(E) \cdot \mu(A)$ definiert ein Maß auf $X \times Y$.

Wir zeigen nun den sehr wichtigen Satz von Fubini + Tonelli in einer sehr allgemeinen Version.

Satz 6.28 (Fubini). Sei $f \in \mathcal{R}_2(X \times Y)$. Es gilt:

$$\int_{X \times Y} f(x, y) d(x, y) = \int_X \left(\int_Y f(x, y) dy \right) dx.$$

Bemerkung. Tatsächlich gilt der Satz noch allgemeiner, wann immer die linke Seite definiert ist.

Bemerkung. Da die Rollen von X und Y auf der linken Seite vertauscht werden können (Umnummerierung) gilt dann auch

$$\int_{X \times Y} f(x, y) d(x, y) = \int_Y \left(\int_X f(x, y) dx \right) dy.$$

Bemerkung. Beachten sie, dass die Integrale den Wert ∞ annehmen dürfen.

Achtung, die Aussage ist nicht trivial!

Beispiel. $\int_R f(x, y) d(x, y)$, $R = [0, 2] \times [0, 1]$.

$$f(x, y) = \begin{cases} \frac{xy(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^3} & (x, y) \neq (0, 0) \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Sei $x \neq 0$.

$$\begin{aligned} A(x) &:= \int_{[0,1]} f(x, y) dy \\ &= \int_0^1 f(x, y) dy \\ &\quad \uparrow \text{stetig auf } [0,1] \\ &= \int_{x^2}^{x^2+1} \frac{x(2x^2 - u)}{2u^3} du \\ &\quad \uparrow u=x^2+y^2, \frac{du}{dy}=2y \\ &= \left(-\frac{x^3}{2u^2} + \frac{x}{2u} \right) \Big|_{u=x^2}^{u=x^2+1} = \frac{x}{2(x^2 + 1)^2} \\ x = 0 &\implies f(0, y) = 0 \quad \forall y \end{aligned}$$

\implies Die Formel gilt auch für $x = 0$.

$$\int_{[0,2]} A(x) dx = \int_0^2 \frac{x}{2(x^2 + 1^2)} dx \stackrel{u=x^2+1, \frac{du}{dx}=2x}{=} \frac{1}{4} \int_1^5 \frac{1}{u^2} du = \left. \frac{-1}{4u} \right|_1^5 = \frac{1}{5}.$$

Sei nun $y \neq 0$.

$$\begin{aligned} B(y) &:= \int_{[0,2]} f(x, y) dx \\ &= \int_0^2 f(x, y) dx \\ &\stackrel{u=x^2+y^2, \frac{du}{dy}=2y}{=} \frac{-2y}{(4+y^2)^2}. \end{aligned}$$

$y = 0 \implies f(x, 0) = 0 \quad \forall y \implies$ Formel ist auch für $y = 0$ gültig.

$$\int_{[0,1]} B(y) dy = -\frac{1}{20} = \frac{1}{5}.$$

Komisch! Die Funktionen, die wir integriert haben, sind sogar stetig in den einzelnen Variablen und $[0, 1]$ und $[0, 2]$ sind kompakt. Aber offenbar $f \notin \mathcal{R}_2$! Wäre f stetig auf \mathcal{R}_0 , wäre $f \chi_R (\in) \mathcal{R}_2$ (f ist nicht stetig in 0).

Auflösung: $f = f_1 - f_2$, $f_1, f_2 \geq 0$, $\int f_1 \rightarrow \infty$ und $\int f_2 \rightarrow \infty$.

$$\begin{aligned} \int_{[\varepsilon,1]} \left(\int_{[0,2]} \frac{yx^3}{(x^2+y^2)^2} dx \right) dy &= \int_{[\varepsilon,1]} \frac{4}{y(y^2+4)^2} dy \\ &= \frac{1}{8} \left(\frac{4}{y^2+4} - \ln(y^2+4) + 2\ln y \right) \Big|_{y=\varepsilon}^1 \rightarrow \infty \quad (\varepsilon \rightarrow 0). \end{aligned}$$

Berechnung als uneigentliches Regel-Integral: Das geht, da der Integrand ≥ 0 ist.

$$\int_{[0,2]} \left(\int yx^3 d(yx^2 + x^2)^3 \right) dx = \int_{[0,2]} \dots = \frac{1}{8} \left(-\frac{4}{\varepsilon^2+4} - \ln 5 + \ln \left(\frac{4}{\varepsilon^2} + 1 \right) \right) \rightarrow \infty \quad (\varepsilon \rightarrow 0).$$

Für $\frac{xy^3}{(x^2+y^2)^3}$ genauso.

21:37

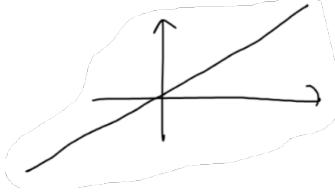
Zum Beweis von 6.28 benötigen wir ein Lemma.

Lemma 6.29. Ist $N \subset X \times Y$ Nullmenge, so sind

$$N_Y(x) := \{ y \in Y \mid (x, y) \in N \}$$

(zu x fest gewählt) Nullmenge in Y für fast alle x (fast alle: gemessen in X).

Beispiel. $N = \{ (x, \frac{x}{2}) \in \mathbb{R}^2 \}$ (siehe 6.27) ist Nullmenge $\subset \mathbb{R}^2$.



$$N_Y(x) := \{ y \in \mathbb{R} \mid (x, y) \in N \} = \left\{ \frac{x}{2} \right\}$$

ist Nullmenge in \mathbb{R} .

Beweis von 6.29. Zu $n \in \mathbb{N}$ wählen wir eine Überdeckung von N der Form $\bigcup_{i \in I_n} Q_i^{(n)} \times P_i^{(n)}$ durch Quader $Q_i^{(i)} \subset X$, $P_i^{(i)} \subset Y$,

$$\text{vol} \left(\bigcup_{i \in I_n} Q_i^{(n)} \times P_i^{(n)} \right) < 2^{-n} \quad (\text{vol} = \mu \times \nu).$$

Dies liefert eine Überdeckung $\bigcup_{k \in I} Q_k \times P_k$, $I = \text{disjunkte Vereinigung aller } I_n$ (wieder abzählbar) mit

$$\text{vol} \left(\bigcup_{k \in I} Q_k \times P_k \right) < \sum_{n \in \mathbb{N}} w^{-n} = \frac{1}{1 - \frac{1}{2}} - 1 < \infty.$$

Jeder Punkt in N wird von dieser abzählbar unendlich oft überdeckt.

Es gilt für $R_k = Q_k \times P_k$

$$\text{vol}(R_k) = \text{vol}(Q_k) \cdot \text{vol}(P_k).$$

Also

$$\begin{aligned} \mu \times \nu(R_k) &= \int \chi_{R_k}(x, y) d(x, y) \\ &= \int_X \left(\int_Y \chi_{R_k}(x, y) dy \right) dx \\ &\Rightarrow \sum_{k=1}^{\infty} \int_X \left(\int_Y \chi_{R_k}(x, y) dy \right) dx < \infty. \end{aligned}$$

Mit Beppo-Levi (6.16), angewendet auf

$$f_n(x) = \sum_{k=1}^n \int_Y \chi_{R_k}(x, y) dy,$$

folgt:

$$\sum_{k=1}^{\infty} \int_Y \chi_{R_k}(x, y) dy \quad (6.1)$$

konvergent für fast alle x . Sei $x_0 \in X$ s. d. $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x_0) < \infty$.

Mit Beppo-Levi, angewendet auf

$$g_n^{x_0} = \sum_{k=1}^n \chi_{R_k}(x_0, y)$$

folgt $\sum_{k=1}^{\infty} \chi_{R_k}(x_0, y)$ konvergiert für fast alle y . Sei $y_0 \in Y$, s. d. $\lim_{n \rightarrow \infty} g_n^{x_0}(y_0) < \infty$
 $\implies (x_0, y_0) \notin N$, also $y_0 \notin N_Y(x_0)$, denn für $(x_0, y_0) \in N$ ist $\sum_{k=1}^{\infty} \chi_{R_k}(x_0, y_0) = \infty$. \square

Beweis des Satzes von Fubini (6.28). Zu zeigen ist:

- a) $f(x, \cdot) \in \mathcal{R}_0(Y)$ für fast alle $x \in X$,
- b) $\int_Y f(\cdot, y) dy \in \mathcal{R}_2(X)$,
- c) $\int f(x, y) d(x, y) = \int_X (\int_Y f(x, y) dy) dx$.

Ist $f = \chi_{P \times Q}$, $P \subset X$, $Q \subset Y$, so gelten 6.29.a), 6.29.b), 6.29.c) wegen $\chi_{P \times Q}(x, y) = \chi_P(x)\chi_Q(y) \implies$ 6.29.a), 6.29.b), 6.29.c) gelten für Stufen-Funktionen $\mathcal{R}_0(X \times Y)$ (6.29.a), 6.29.b) mit \mathcal{R}_0 statt \mathcal{R}_2) (weil diese Linearkombinationen von Funktionen der Form $\chi_{P \times Q}$ und das Integral linear).

Sei nun $f \in \mathcal{R}_1(X \times Y)$. Wähle $(\varphi_k)_k \subset \mathcal{R}_0$ und $N \subset X \times Y$ Nullmenge s. d.

$$\varphi_k(x, y) \nearrow f(x, y) \quad \forall (x, y) \in (X \times Y) \setminus N \implies \int \varphi_k d(x, y) \nearrow \int f d(x, y) \quad (*)$$

Lemma 6.29 $\implies N_y(x_0) = \{y \in Y \mid (x_0, y) \in N\}$ ist Nullmenge für fast alle x_0 . Bezeichne $\tilde{X} \subset X$ die Menge aller solchen x_0 . Dann gilt für jedes fest gewählte $x_0 \in \tilde{X}$ $\varphi_k(x_0, y) \nearrow f(x_0, y)$ fast überall in Y und $(\varphi_k(x_0, \cdot)) \subset \mathcal{R}_0(Y)$ und

$$\int_Y \varphi_k(x_0, y) dy \nearrow \int_Y f(x_0, y) dy \quad \forall x_0 \in \tilde{X}, \text{ also für fast alle } x \in X.$$

Es ist zudem

$$\phi_k(x) := \int_Y \varphi_k(\cdot, y) dy \in \mathcal{R}_0(X)$$

und somit folgt:

$$g := \int_Y f(\cdot, y) dy \in \mathcal{R}_1(X)$$

und

$$\int_X \varphi_k(x) dx \nearrow \int_X g(x) dx, \quad (6.2)$$

also

$$\int_X \left(\int_Y \varphi_k(x, y) dy \right) dx \nearrow \int_X \left(\int_Y f(x, y) dy \right) dx \quad (**)$$

\Rightarrow 6.29.a) und 6.29.b) (mit \mathcal{R}_1 statt \mathcal{R}_2) für $f \in \mathcal{R}_1$. 6.29.c) folgt ebenso: Es gilt 6.29.c) für $\varphi_k \in \mathcal{R}_0$, also folgt die Beh. aus (*), (**).

Sei nun $f \in \mathcal{R}_2(X \times Y)$. Schreibe $f = f_1 - f_2$, $f_0 \in \mathcal{R}_1(X \times Y)$, $f_j \in \mathcal{R}_1(X \times Y)$. Dann gilt 6.29.a) und 6.29.b) (mit \mathcal{R}_1 statt \mathcal{R}_2) für f_1 und f_2 separat und somit 6.29.a) und 6.29.b) für f . Auch 6.29.c) gilt für f_1 und f_2 separat und da $\int_{X \times Y} f_1(x, y) d(x, y)$ oder $\int_{X \times Y} f_2(x, y) d(x, y)$ endlich ist, erfüllt auch f 6.29.c). \square

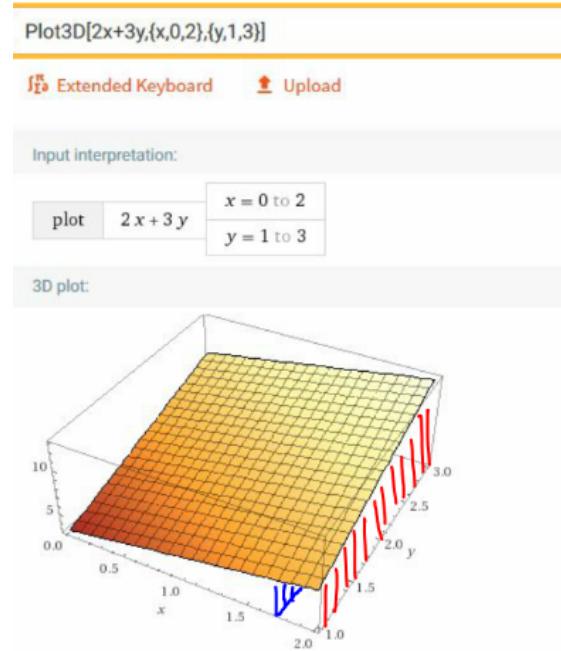
39:15

Beispiel 6.30 (und geometrische Interpretation des Integrals).

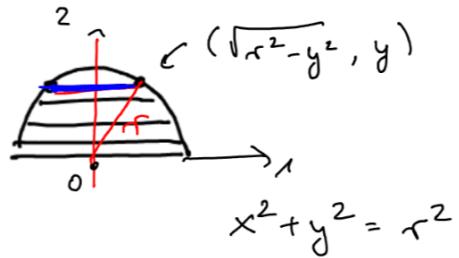
$$\int_{[a,b] \times [c,d]} 2x + 3y d(x, y).$$

$f(x, y) = 2x + 3y$ ist auf $Q = [a, b] \times [c, d]$ stetig \Rightarrow beschränkt $\Rightarrow f \in L^1(Q)$
 \Rightarrow (mit Fubini)

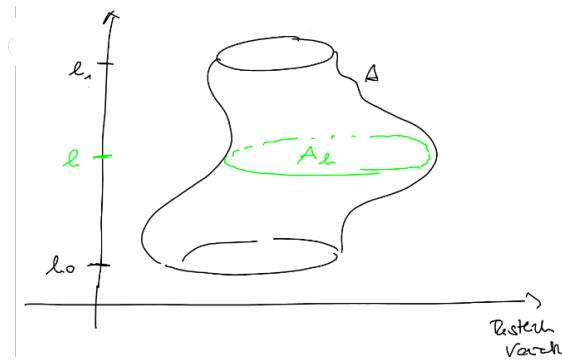
$$\begin{aligned} \int_Q (2x + 3y) d(x, y) &= \int_{[a,b]} \left(\int_{[1,3]} 2x + 3y dy \right) dx \\ &= \int_{[a,b]} \left(-\frac{1}{2} \right) (c-d)(3c+3d+4x) dx \\ &= \frac{1}{2}(b-a)(d-c)(2(a+b)+3(c+d)) \\ &= \text{Volumen unter der Fläche} \end{aligned}$$



Beispiel. $\text{vol}(\mathcal{D})$



$$\begin{aligned}\Rightarrow \text{vol}(\mathcal{D}) &= \int_{\mathcal{D}} 1 d(x,y) \\ &= \int_{[0,r]} \left(\int_{[-\sqrt{r^2-y^2}, \sqrt{r^2-y^2}]} 1 dx \right) dy \\ &= \int_{[0,r]} 2\sqrt{r^2-y^2} dy = \frac{1}{2}\pi r^2.\end{aligned}$$



Bemerkung 6.31 (Prinzip von Cavalieri).

$$\text{vol}(A) = \int_{[h_0, h_1]} \text{vol}(A_h) dh$$

Bemerkung 6.32 (Satz von Tonelli). f messbar, $f \geq 0 \implies f \in \mathcal{R}_2 \implies$ Fubini gilt.

Vorlesung 22

Mo 06.07. 10:15

6.VI. Der Transformationssatz

Ziel. Eine Verallgemeinerung der Substitutionsregel

$$\int_{g(a)}^{g(b)} f(y) dy = \int_a^b f(g(x))g'(x) dx$$

für $f: U \rightarrow \mathbb{R}$, $U \subset \mathbb{R}^n$.

Satz 6.33 (Transformationssatz). Seien $U, V \subset \mathbb{R}^n$ offen und $\Phi: U \rightarrow \mathbb{R}^n$ ein Diffeomorphismus auf $\Phi(U) = V$ (d. h. Φ ist C^1 , invertierbar mit $\Phi^{-1} \in C^1$). Sei $f \in L^1(\mathbb{R}^n)$. Dann gilt

- i) $U \ni x \mapsto (f \circ \Phi)(x)|\det D\Phi(x)| \in L^1(\mathbb{R}^n)$ (fortgesetzt mit 0 auf $\mathbb{R}^n \setminus U$).
- ii) $\int_V f(y) dy = \int_U (f \circ \Phi)(v)|\det D\Phi(x)| dx$.

Beweis (angelehnt an Diendonné, Grundzüge der modernen Analysis). Wir gehen vor wie im Satz von Fubini und beweisen die Aussage erst für $f \in \mathcal{R}_0$, dann $f \in \mathcal{R}_1 \cap L^1$, dann $f \in \mathcal{R}_2 \cap L^1 = L^1$.

Zunächst benötigen wir zwei Lemmata:

Lemma 6.34. Sei $N \subset \mathbb{R}^n$ Nullmenge und $\Phi: N \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine lokal Lipschitz-stetige Funktion, also gelte

$$\limsup_{\substack{y \in N \\ y \rightarrow x}} \frac{\|\Phi(x) - \Phi(y)\|}{\|x - y\|} < \infty \quad \forall x \in N.$$

Dann ist $\Phi(N)$ Nullmenge in \mathbb{R}^n .

Beweis. Wähle $\|\cdot\| = \|\cdot\|_{\max}$. Dann ist $B_r(x)$ der in x zentrierte Würfel der Kantenlänge $2r$. Zu $k, m \in \mathbb{N}$ setze

$$F_{k,n} := \left\{ x \in N \mid \frac{\|\Phi(x) - \Phi(y)\|}{\|x - y\|} \leq k \quad \forall y \in B_{\frac{1}{m}}(x) \cap N \right\}.$$

Sei $\varphi > 0$. Überdecke N mit offenen Kugeln $B_j = U_{r_j}(x_j)$ mit $x_j \in F_{k,m}$ und $r_j < \frac{1}{m}$ und $\sum_j \text{vol}(B_j) < \varepsilon$. Dann ist für $x \in I_{k,m} \cap B_j$.

$$\begin{aligned}
& \|x - x_j\| < r_j < \frac{1}{m} \quad \forall x_j \in I_{k,m} \\
\implies & \|\Phi(x) - \Phi(x_j)\| \leq k\|x - x_j\| < kr_j \\
\implies & \Phi(F_{k,m} \cap B_j) \subset U_{k,r_j}(\Phi(x_j)) \\
\implies & \Phi(I_{k,m}) \subset \bigcup U_{k,r_j}(\Phi(x_j)) \\
\implies & \text{vol } \Phi \left(\bigcup_{k,m} F_{k,m} \right) \leq \sum_j \text{vol}(U_{k,r_j}(\Phi(x_j))) = k^n \sum_j \text{vol}(B_j) < k^n \varepsilon \\
\implies & N = \bigcup_{k,m} F_{k,m} \implies \text{Beh.} \quad \square
\end{aligned}$$

Lemma 6.35. $\Phi: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, $\Phi(x) = Ax + b$ (affin linear). Dann gilt für jede Borelmenge E

$$\text{vol}(\Phi(E)) = |\det A| \text{vol}(E).$$

Beweis. Unabhängigkeit von b : Folgt aus der Definition, denn das Volumen eines Quaders ändert sich nicht durch Verschiebung. O.B.d.A. nehmen wir an, E ist ein Quader Q , dessen eine Ecke im Ursprung liegt. Somit o.B.d.A. $Q = \{x \mid 0 \leq x_j \leq c_j\}$ mit $c_j > 0$.

Jede Seitenfläche von Q ist Nullmenge (kann als Graph einer Funktion geschrieben werden). Nach Lemma 6.34 ist das Bild einer Seitenfläche unter einer linearen Abbildung wieder Nullmenge.

Sind Φ_1 und Φ_2 lineare Abbildungen und gilt die Aussage für Φ_1 und Φ_2 , dann auch für die Verknüpfung.

Jede lineare Abbildung ist Komposition von Abbildungen der folgenden Typen:

a) Permutationsmatrizen,

b) $\text{diag}(\alpha, 1, 1, \dots, 1)$ $\alpha \in \mathbb{R}$,

c)

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & & & \\ 1 & 1 & 0 & & \\ & & 1 & \ddots & \\ 0 & & \ddots & \ddots & 1 \end{pmatrix}.$$

6.35.a) ändert das Volumen nicht. $\det = \pm 1$, also stimmt die Aussage für Permutation.

6.35.b) streckt das Intervall in Eins-Richtung um einen Faktor α . Das neue Volumen unterscheidet sich vom alten durch den Faktor $|\alpha|$. Also stimmt auch hier die Aussage des Satzes.

6.35.c) wegen 6.35.a) und 6.35.b) o.B.d.A. $c_1 = c_2 = \dots = c_n = 1$. Φ vom Typ 6.35.c):

$$\Phi(Q) = \{x \mid x_1 \leq x_2 \leq x_1 + 1 \quad 0 \leq x_j \leq 1 \quad j \neq 2\}.$$

Setze $F_1 := \{x \in \Phi(Q) \mid x_2 \leq 1\}$, $F_2 := \Phi(Q) \setminus F_1$.

$$\begin{aligned} \Rightarrow \text{vol}(\Phi(Q)) &= \text{vol}(F_1) + \text{vol}(F_2) \\ &= \text{vol}(F_1) + \text{vol}(F_2 - e_2) \\ &\quad \uparrow \text{kanonischer Einheitsektor} \\ &= \text{vol}(Q). \\ &\quad \uparrow \\ Q = F_1 \cup (F_2 - e_2) \end{aligned}$$

Wegen $\det \begin{pmatrix} 1 & 0 & & 0 \\ 1 & 1 & & \\ & & 1 & \dots \\ 0 & & \dots & \dots & 1 \end{pmatrix} = 1$ folgt auch hier die Beh. \square

Zurück zum Beweis der Transformationsformel 6.33.

Kürze ab $J(x) = |\det D\Phi(x)|$ (J für Jacobi). Wie im Beweis des Satzes von Fubini (6.28) zeigen wir die Aussage zunächst für Stufenfunktionen, folgern dann, dass es auch für $f \in \mathcal{R}_1$ und auch \mathcal{R}_2 gilt, somit erst recht für $f \in L^1$.

Wir stellen zunächst fest: Ist N Nullmenge, so $\Phi^{-1}(N)$ auch Nullmenge (6.34) und somit ist

$$\int_V \chi_N(y) dy = 0 = \int_Z \underbrace{\chi_{\Phi^{-1}(N)}}_{=\chi_N \circ \Phi} x J(x) dx.$$

Zudem: Die Vorschriften (E Borelmenge)

$$\begin{aligned} E &\mapsto \int_V \chi_E(y) dy \\ E &\mapsto \int_x (\chi_E \circ \Phi)(x) dI(x) = \int_U \chi_{\Phi^{-1}(E)}(x) I(x) dx \end{aligned}$$

definieren Maße.

Wir betrachten nun eine Treppenfunktion $f \in \mathcal{R}_0$. Wegen der Linearität genügt es $\chi_Q \in \mathcal{R}_0$, Q Quader, zu betrachten.

1.) Die Behauptung stimmt für $\Phi(x) = A \cdot x + b$ (affin linear):

$$\begin{aligned} \int_V \chi_Q dy &= \mu(Q \cap) \\ &= E := \Phi(Q \cap V)^{-1} = \mu(A(E) + x_0) \\ &\stackrel{6.35}{=} \int \chi_{\Phi^{-1}(Q \cap V)} |\det A| dx. \end{aligned}$$

$$x \in \Phi^\circ(Q \cap V) \iff \Phi(x) \in Q \cap V \iff \Phi(x) \in Q \text{ und } x \in U.$$

2.) Die Behauptung stimmt, wenn $n = 1$ ist: Dann ist $U = \bigcup_{k=1}^{\infty} I_k$, I_k Intervall, $I_k \cap I_j = \emptyset$, $k \neq j$. Betrachte also o.B.d.A. $U = [a, b]$. $\det D\Phi$ hat auf U konstantes Vorzeichen. O.B.d.A. $\det D\Phi > 0$ (also Φ monoton wachsend). Dann ist für $(c, d) \subset \Phi^{-1}((c, \cdot)) = (\Phi^{-1}(c), \Phi^{-1}(d))$, also

$$\int_V \chi_Q(y) dy = \int_c^d 1 dy = d - c = \int_{\Phi^{-1}(c)}^{\Phi^{-1}(d)} \Phi'(x) dx = \int \underbrace{(\chi_Q \circ \Phi)}_{=\chi_{\Phi^{-1}(Q)}}(x) |\Phi'(x)| dx.$$

3.) Die Behauptung stimmt für Φ von der Form

$$\Phi(x) = (x_1, \dots, x_{n-1}, \phi(x_1, \dots, x_n))^T$$

mit $\varphi \in C^1$ und

$$\det D\Phi(x) = \det \begin{pmatrix} 1 & & & 0 \\ & \ddots & & \vdots \\ & & 1 & \\ & & & 0 \\ \partial_1 \varphi & \dots & \dots & \partial_n \varphi \end{pmatrix} = \partial_n \varphi(x) \neq 0.$$

Ist $\tilde{x} \in \mathbb{R}^{n-1}$, s. d.

$$U_{\tilde{x}} := \{x_n \in \mathbb{R} \mid (\tilde{x}, x_n) \in U\} \neq \emptyset,$$

so ist $\Phi_n: x - n \mapsto \varphi(\tilde{x}, x_n)$ eine Abbildung auf eine offene Teilmenge $\subset \mathbb{R}$.

Mit 2.) folgt daher

$$\int_{\Phi_n(U_{\tilde{x}})} \chi_Q((\tilde{x}, x_n)) dx_n = \int_{U_{\tilde{x}}} (\chi_Q \circ \Phi)(\tilde{x}, x_n) \underbrace{\left| \frac{d}{dx_n} \Phi_n(\tilde{x}, x_n) \right|}_{=|\det D\Phi(\tilde{x}, x_n)|} dx_n.$$

Fubini \implies

$$\begin{aligned} \int_V \chi_Q dx &= \int \left(\int_{\Phi_n(U_{\tilde{x}})} \chi_Q(\tilde{x}, x_n) dx_n \right) d\tilde{x} \\ &= \int \int_{U_{\tilde{x}}} (\chi_Q(\tilde{x}, x_n))(\tilde{x}, x_n) J(\tilde{x}, x_n) dx_n d\tilde{x} \\ &\quad \uparrow |\det D\Phi(\tilde{x}, x_n)| \\ &= \int_U (\chi_Q \circ \Phi)(x) J(x) dx. \end{aligned}$$

- 4.) Die Behauptung ist bewiesen, wenn wir zeigen, dass zu jedem $x_0 \in \exists$ offene Umgebung U_0 , s. d. $\Phi|_{U_0}$ eine Komposition endlich vieler Abbildungen wie in 1.) und 3.) ist. O.B.d.A. $x_0 = 0$ (sonst komponiere Φ mit Translation). Ersetze Φ durch $D\Phi(0)^{-1} \cdot \Phi$ (Matrixmultiplikation bzw. Komposition mit einer konstanten linearen Abbildung).

Dann gilt $D\Phi(0) = \mathbb{1}$. Definiere

$$u_j: U \rightarrow \mathbb{R}^n, \quad u_j(x) = \begin{pmatrix} \Phi_1(x) \\ \vdots \\ \Phi_j(x) \\ x_{j+1} \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}.$$

Satz von der Umkehrabbildung $\implies \exists U_0$ Umgebung von 0, s. d. $u_j|_{U_0}$ Diffeomorphismus auf sein Bild ist.

Es gilt zudem auf U_0

$$\Phi = u_n = (u_n \circ u_{n-1}^{-1}) \circ (u_{n-1} \circ u_{n-2}^{-1}) \circ \cdots \circ (u_2 \circ u_1^{-1}) \circ u_1$$

und

$$u_j \circ u_{j-1}^{-1} = (x_1, \dots, x_{j-1}, \Phi_j(x), x_{j+1}, \dots, x_n). \quad \square$$

Durch Permutation geht diese Abbildung in eine der Form aus 3.) über.

Für $f \in \mathcal{R}_1$ betrachte $(\varphi_k)_k \subset \mathcal{R}_0$, $\varphi_k \nearrow f$. Dann gilt die Identität wegen Beppo-Levi auch für f . Für $f = f_1 - f_2 \in \mathcal{R}_2$ gilt sie getrennt für f_1 und f_2 und somit für f .

Vergleich mit der Substitutionsformel:

Hier tritt der Betrag der Ableitung auf! Warum? Sei z. B. $\Phi(x) = -x$, $U = (a, b)$,

$$\begin{aligned} \int_{\Phi(u)} f(y) dy &= \int_{(-b, -a)} f(y) dy \\ &= \int_{-a}^{-b} f(y) dy \\ &= \int_a^b f(-x) dx \\ &\quad \uparrow \text{\"ubliche Substitutionsregel, } \int f(-x)(-1) dx, a, b \\ &= \int_{(a, b)} f(-x) \cdot 1 dx. \end{aligned}$$

Beispiel (Polarkoordinaten). Sei $f \in \mathcal{R}_2(\mathbb{R}^2)$, sei $R \in \mathbb{R}_{>0} \cup \{+\infty\}$,

$$D_R := \left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x^2 + y^2 < R^2 \right\}.$$

Wir wollen $\int_{D_R} f(x, y) d(x, y)$. Dieses ist gleich dem über $V := D_R \setminus \{(x, 0) \mid x \geq 0\}$ (denn $\{(x, 0) \mid x \geq 0\}$ ist als Graph der stetigen Funktion $\mathbb{R}_{\geq 0} \ni x \mapsto 0$).

$$\Phi: \underbrace{(0, R) \times (0, 2\pi)}_U \rightarrow V, \quad \Phi(r, \alpha) = (r \cos \alpha, r \sin \alpha)$$

ist Diffeomorphismus.

$$\begin{aligned} D\Phi(r, \alpha) &= \begin{pmatrix} \cos \alpha & -r \sin \alpha \\ \sin \alpha & r \cos \alpha \end{pmatrix} \\ \det D\Phi(r, \alpha) &= r > 0 \quad \forall (r, \alpha) \in U \\ \int_{D_R} f(y) dy &= \int_V f(y) dy = \int_0^R \int_0^{2\pi} f(r \cos \alpha, r \sin \alpha) r d\alpha dr. \end{aligned}$$

Beispiel (Kugelkoordinaten). Sei $R \in \mathbb{R}_{>0} \cup \{+\infty\}$, $B_r = U_R(0)$.

$$\begin{aligned} \Phi: (0, R) \times (0, 2\pi) \times \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right) &\rightarrow \mathbb{R}^3 \setminus \left\{ \begin{pmatrix} x \\ 0 \\ t \end{pmatrix} \mid x \geq 0 \right\} \\ \Phi(r, \varphi, \theta) &= \begin{pmatrix} r \cos \varphi \cos \theta \\ r \sin \varphi \cos \theta \\ r \sin \theta \end{pmatrix} \end{aligned}$$

ist Diffeomorphismus.

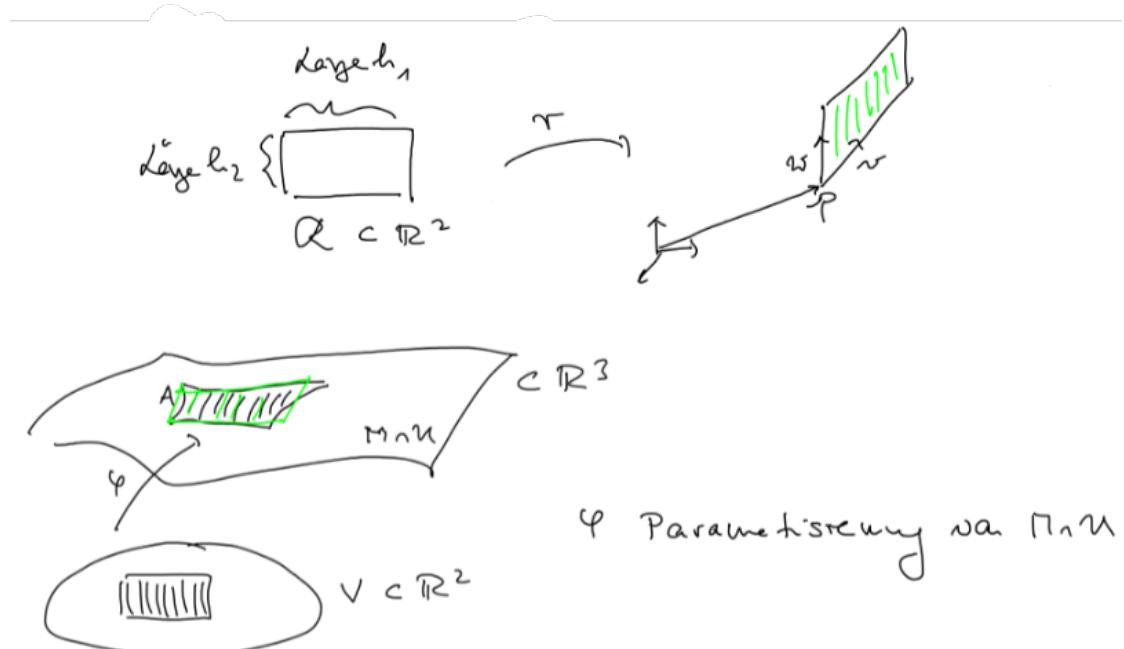
$$\det D\Phi(r, \varphi, \theta) = r^2 \cos \theta > 0$$
$$\int_{B_R} f(x_1, x_2, x_3) dx = \int_0^R \int_0^{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} f(r \cos \varphi \cos \theta, \dots, \dots) r^2 d\theta d\varphi dr.$$

Kapitel 7.

Integration auf Untermannigfaltigkeiten

Vorlesung 23

Do 09.07. 10:15



Erinnerung (14. Vorlesung). Flächeninhalt von $\varphi(\mathcal{R}) \approx \sqrt{\det g_\varphi(t_0)}$ Fläche(\mathcal{R}). ($\det g_\varphi(t_0)$ heißt Gramsche Determinante) mit dem metrischen Tensor g_φ

$$\langle v, v \rangle_a = \sum_i \sum_j v_i w_j \underbrace{\langle \partial_i \varphi(t_0), \partial_j \varphi(t_0) \rangle_E}_{:= (g_\varphi)_{ij}(t_0)}$$

$$\langle v, w \rangle_a = \langle v, w \rangle_E \quad \text{für } a \in M \cap U, \quad v, w \in T_a M.$$

$$\text{Lemma 4.18: } \det g(t_0) = \sum_{i_1 < i_d} \det D \begin{pmatrix} \varphi_{i_1} \\ \vdots \\ \varphi_{i_d} \end{pmatrix}(t_0)^2.$$

Lemma 4.16: Unter Parameterwechsel (vgl. 4.9) verhält sich der metrische Tensor wie folgt

$$g_\psi = (D\Phi(s))^T g_\varphi D\Phi(s)$$

↑
bzgl. $\varphi: V \rightarrow M \cap U$ berechnet
bzgl. $\psi: \tilde{V} \rightarrow M \cap \tilde{U}$ berechnet

mit $\Phi = \varphi^{-1} \circ \psi: \psi^{-1}(M \cap U \cap \tilde{U}) \rightarrow \varphi^{-1}(M \cap U \cap \tilde{U})$.

Definition 7.1. Sei $M \subset \mathbb{R}^n$ eine d -dimensionale Untermannigfaltigkeit. Es sei

- a) $\varphi: V \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine globale Parametrisierung von $M = \varphi(V)$ und $f: M \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion, oder
- b) $\varphi: V \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine lokale Parametrisierung von $M \cap U$ und $f: M \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion mit

$$\text{supp } f = \overline{\{x \in M \mid f(x) \neq 0\}} \subset \varphi(V).$$

Dann heißt f über M integrierbar, falls

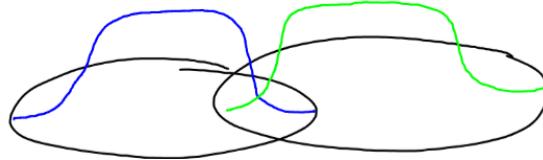
$$t \mapsto f \circ \varphi(t) \sqrt{\det g_\varphi(t)}$$

über V integrierbar ist, und man setzt

$$\int_M f(x) dS(x) := \int_V f \circ \varphi(t) \sqrt{\det g_\varphi(t)} dt.$$

Bemerkung. Mit der Transformationsformel und Lemma 4.16 sieht man schnell, dass die Definition unabhängig von der gewählten Parametrisierung ist.

Folgerung 7.2. Das Integral ist auf einer Untermannigfaltigkeit definiert (ohne die Einschränkungen a) und b) in Definition 7.1).



$$\int_{\varphi^{-1}(A)} f \circ \varphi(t) \sqrt{\det g_\varphi(t)} dt = \int_{\psi^{-1}(A)} f \circ \psi(t) \sqrt{\det g_\psi(t)} dt.$$

Wir schreiben daher $\int_M f dS$, auch wenn a) und b) nicht erfüllt sind.

Berechnung des Integrals:

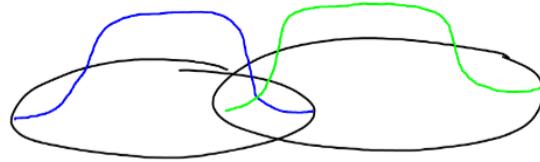
Sei $\{\rho_j\}_j$ eine Zerlegung der Eins, also

$$\sum_{j=1}^{\infty} \rho_j(a) = 1 \quad \forall a \in M, \quad \rho_j \in C^{\infty}, \quad \rho_j \geq 0$$

s. d. für jedes j gilt $\text{supp } \rho_j \subset$ ein Kartengebiet in M . Existenz: Existenz von Abschneidefunktionen ψ in $\mathbb{R} \implies$ Existenz von Abschneidefunktionen in \mathbb{R}^n

$$\Psi(x) := \psi(\|x\|_E), \quad x \in \mathbb{R}^n \quad (7.1)$$

\implies Wenn M durch $(\varphi_i: U_i \rightarrow V_i)_{i \in I}$ beschrieben wird, also $\forall a \in M \exists i \in I$ s. d. $a \in \varphi_i(U_i)$, betrachte Partition der Eins $\{\tilde{\rho}_j\}_{j \in J}$ mit: Zu $j \exists i \in I$ s. d. $\text{supp } \tilde{\rho}_j \subset U_i$ und setze $\rho_j = \tilde{\rho}_j \circ \varphi_i^{-1}$.



Dann ist

$$\int_M f dS = \sum_{j \in J} \int_M \rho_j f(x) dS.$$

12:06–16:30

→weitere
Erklärungen
im Audio

Ergänzung. 1) Sei zunächst $M \subset \mathbb{R}^n$ offen. $\rho_j f$ auf M integrierbar $\iff \rho_j |f|$ auf M integrierbar. Sei also $\rho_j |f|$ auf M integrierbar. Es ist

$$\sum_{j=1}^K \rho_j |f| \nearrow |f|.$$

Ist $\sum_{j=1}^{\infty} \int \rho_j |f| dS < \infty$, können wir mit Beppo-Levi schließen, dass $|f|$ integrierbar ist.

Wegen $\left| \sum_{j=1}^K \rho_j f \right| \leq |f|$ (Δ -Ungleichung) folgt mit Lebesgue, dass $f = \sum_{j=1}^{\infty} \rho_j f$ integrierbar ist und gilt

$$\int_M f dx = \sum_{j=1}^{\infty} \int_M \rho_j f dx.$$

Das zeigt auch gleich die Unabhängigkeit von der Wahl der Teilung der Eins.

- 2) Ist $\varphi: U \rightarrow M$ globale Parametrisierung von M betrachte $F := f \circ \varphi \sqrt{\det g_\varphi}$. Es ist F auf U integrierbar $\iff f$ auf M integrierbar.
- 3) Mithilfe von $\tilde{\rho}_j = \rho_j \circ \phi_{i(j)}$ ziehen wir das oben bewiesene auf die verschiedenen Koordinatenbereiche zurück: $\rho_j f$ auf M integrierbar $\iff \tilde{\rho}_j F$ auf $U_{i(j)}$ integrierbar.

Beispiel (das ohne Zerlegung der Eins auskommt). $M = \text{Scheibe}$, $M = \varphi(D)$, $D = \{x^2 + y^2 < 1\}$, $\varphi(x, y) = (x, y, \sqrt{1 - x^2 - y^2})^T$.

$f(a) = 1 \quad \forall a \in M \implies$ Wir berechnen die Oberfläche.

$$g_\varphi(a) = \begin{pmatrix} 1 - x^2 & xy \\ xy & 1 - y^2 \end{pmatrix} \frac{1}{1 - x^2 - y^2}, \quad \det g_\varphi = \frac{1}{1 - x^2 - y^2},$$

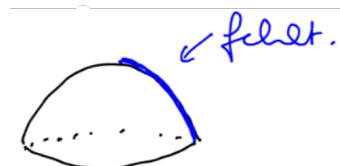
$$\partial_1 \varphi = \left(1, 0, \frac{-x}{\sqrt{1 - x^2 - y^2}} \right), \quad \partial_2 \varphi = \left(0, 1, \frac{-y}{\sqrt{1 - x^2 - y^2}} \right),$$

$$\int_M dS = \int_D \sqrt{\det g_\varphi} d(x, y) = 2\pi = \int_{\substack{\oplus \\ \text{Schules. unten}}} \sqrt{\det g_\varphi} d(x, y) = 2 \int [dbig] \underbrace{\int_{-\sqrt{1-y^2}}^{\sqrt{1-y^2}} \frac{1}{\sqrt{1-x^2-y^2}}}_{\substack{\uparrow \\ \lim_{b \rightarrow \infty} (\arctan b - \arctan -b) = \pi}} dx dy, 0, 1.$$

(als uneigentliches Regelintegral weil Integralgrenzen unbestimmt)



Alternativ: $\varphi: (0, 2\pi) \times (0, \frac{\pi}{2}) \rightarrow \mathbb{R}^3$,



$$\varphi(a, \theta) = \begin{pmatrix} \cos \alpha \sin \alpha \\ \sin \alpha \sin \theta \\ \cos \theta \end{pmatrix}, \quad g_\varphi(\alpha, \theta) = \begin{pmatrix} \sin^2 \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\int_M dS = \int_{\substack{\uparrow \\ M \setminus \text{unten}}} dS = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \theta \, d\theta \, d\alpha = 2\pi.$$

Definition 7.3. Sei $d \in \mathbb{R}_{>0}$. Eine Teilmenge $N \subset \mathbb{R}^n$ heißt *Nullmenge zur Dimension d* (d -Nullmenge), falls $\forall \varepsilon > 0 \exists$ Würfel W_1, W_2, \dots mit Kantenlängen r_1, r_2, \dots , s. d. $N \subset \bigcup W_j$ und $\sum r_j^d < \varepsilon$.

Bemerkungen 7.4. i) Ist $d = n$, liegt eine Nullmenge im Sinne von Definition 6.1 vor.

ii) Eine Teilmenge von $\mathbb{R}^d \times \{0\} \subset \mathbb{R}^n$ ist genau dann d -Nullmenge in \mathbb{R}^n , wenn sie Nullmenge in \mathbb{R}^d ist (im Sinne von Definition 6.1), wobei hier $N = \tilde{N} \times \{0\} \simeq \tilde{N}$, $\mathbb{R}^d \times \{0\} \simeq \mathbb{R}^d$.

Beweis. „ \implies “ Setze $W_j^0 := W_j \cap \mathbb{R}^d \times \{0\}$

„ \Leftarrow “ Fasse einen Würfel $W_j \subset \mathbb{R}^d \times \{0\}$ auf als den Schnitt eines Würfels $\tilde{W}_j \subset \mathbb{R}^n$ mit $\mathbb{R}^d \times \{0\}$. \square

25:45

iii) $M \subset N$, N d -Nullmenge $\implies M$ ist d -Nullmenge.

iv) Abzählbare Vereinigungen von d -Nullmengen sind d -Nullmengen.

v) Eine d -Nullmenge ist auch d' -Nullmenge für $d' \geq d$.

vi) Ist Φ lokal Lipschitz-stetig. $\Phi: N \rightarrow \mathbb{R}^m$, $N \subset \mathbb{R}^n$ d -Nullmenge, so ist $\Phi(N)$ d -Nullmenge.

Beweis. Der Beweis von Lemma 6.34 überträgt sich direkt. \square

vii) **Folgerung.** Jede d -dimensionale Untermannigfaltigkeit ist $(d+1)$ -Nullmenge. denn:
 $\exists \Phi: U \cap M \rightarrow V \times \{0\}^{n-d}$ Diffeomorphismus.

Satz 7.5. Seien $f, g: M \rightarrow \mathbb{R}$, M d -dimensionale Untermannigfaltigkeit $\subset \mathbb{R}^n$. Gelte $f(x) = g(x)$ außer auf einer d -Nullmenge N und sei f über M integrierbar. Dann ist auch g über M integrierbar und es gilt

$$\int_M f \, dS = \int_N g \, dS.$$

Beweis. Betrachte zunächst nur eine Parametrisierung $\varphi: \rightarrow M \cap U$. Dann stimmen die Funktionen $f \circ \varphi \sqrt{\det g_\varphi}$ und $g \circ \varphi \sqrt{\det g_\varphi}$ außerhalb von $\varphi^{-1}(N) \subset V \subset \mathbb{R}^d$ miteinander überein. 7.4.vi) $\Rightarrow \varphi^{-1}(N)$ ist d -Nullmenge (denn φ^{-1} ist wieder C^1 , also lokal Lipschitz-stetig).

Mit Hilfe einer Partition der Eins wie in 7.2 folgt die Behauptung, da auch $\rho_j \cdot f$ außerhalb von N mit $\rho_j \cdot g$ übereinstimmt. \square

Folgerung. Ist N d -Nullmenge $\subset \mathbb{R}^n$ und M d -dimensionale Untermannigfaltigkeit $\subset \mathbb{R}^n$ so ist

$$\int_M f dS = \int_{M \setminus N} f dS.$$

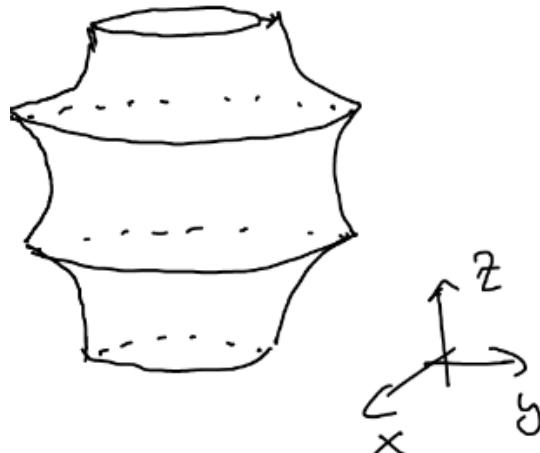
Dies erklärt unsere Ergebnisse aus dem Beispiel unter Folgerung 7.2.

33:00

Beispiel (Rotationsflächen). Sei $r: I \rightarrow [0, \infty)$ stetig, I Intervall. Sei r zudem außerhalb einer endlichen Menge von Punkten in I C^1 , z. B. .

Wir berechnen die Oberfläche (ohne „Deckel“ + „Boden“) von

$$M := \left\{ (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x^2 + y^2 = r^2(z) \right\}.$$



O.B.d.A. betrachte nur glatte Abschnitte (denn die Kreise ) sind 2-Nullmengen.

$$A = \int 1 dS = 2\pi \int_{h_0}^{h_1} r(z) \sqrt{r'(z)^2 + 1} dz,$$

denn:

$$\begin{aligned}\varphi: (0, 2\pi) \times (0, h) &\rightarrow \mathbb{R}^3 \\ \varphi(\alpha, z) &= (r(z) \cos \alpha, r(z) \sin \alpha, z) \\ g_\varphi(a, z) &= \begin{pmatrix} r(z)^2 & 0 \\ 0 & r'(z)^2 + 1 \end{pmatrix} \\ \sqrt{\det g_\varphi} &= r(z) \sqrt{r'(z)^2 + 1}\end{aligned}$$



Beispiel. $r(z) = \sqrt{z^2 + 1}$, $r'(z) = \frac{z}{\sqrt{z^2 + 1}}$

$$A = 2\pi \int_{-h}^h \sqrt{2z^2 + 1} dz = 2\pi \left(\sqrt{2h^2 + 1}h + \frac{1}{\sqrt{2}} \arcsin(\sqrt{2}h) \right).$$

37:10

7.I. Der Integralsatz von Gauß

Integralsätze der Vektoranalysis sind von der Form

$$\int_V \dots = \int_{\partial V} \dots,$$

wobei V z. B. eine Untermannigfaltigkeit und ∂V ihr Rand (mal der topologische mal der geometrische).

Erinnerung. Sei $G \subset \mathbb{R}^n$ wegzusammenhängende, beschränkte n -dimensionale Untermannigfaltigkeit mit Rand. In diesem Fall stimmen der topologische Rand und der geometrische Rand miteinander überein. Sei $h: U \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine lokale Beschreibung von G bei $a \in \partial G$, also

$$G \cap U = \{x \in U \mid h(x) \leq 0\},$$

wobei

$$\partial G \cap U = \{ x \mid h(x) = 0 \},$$

(also ∂G ist $(n-1)$ -dimensionale Untermannigfaltigkeit) (Alternative zu Definition 4.15).

Betrachte den äußeren Einheitsnormalenvektor

$$n_a := \frac{\operatorname{grad} h(a)}{\|\operatorname{grad} h(a)\|}$$

im Punkt a .

Beispiel. $G = \{ x \in \mathbb{R}^n \mid \|x\|_{\text{E}} \leq 1 \}$ Vollkugel. $\partial G = \mathbb{S}^{n-1}$, $h(x) = \|x\|_{\text{E}}^2 - 1$, $n_a = \frac{a}{\|a\|}$.

Verwende eine lokale Beschreibung von ∂G als Graph einer C^1 -Funktion φ

$$\partial G \cap V = \left\{ (x_1, \dots, x_{n-1}, \varphi(x_1, \dots, x_{n-1})) \mid (x_1, \dots, x_{n-1}) \in \tilde{U} \right\}.$$

Dann ist (nach eventueller Umnummerierung)

$$h(x', x_n) = x_n - \varphi(x') \quad x' \in \tilde{U} \subset \mathbb{R}^{n-1}$$

und

$$n_a = \begin{pmatrix} -\operatorname{grad} \varphi(a') \\ 1 \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{1 + \|\operatorname{grad} \varphi(a')\|^2}} \quad a = (a', a_n)$$

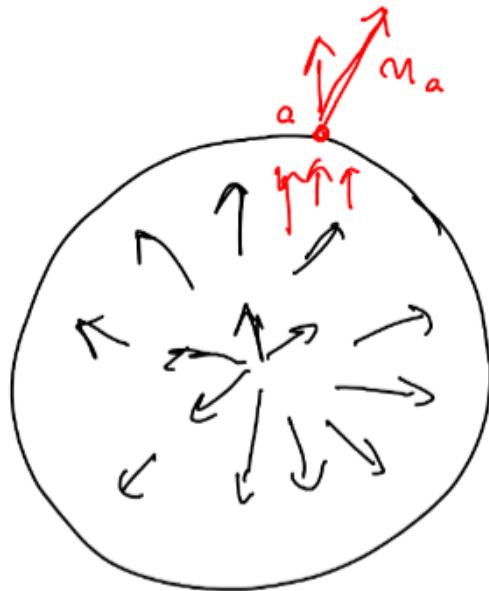
und $\sqrt{\det g_\Phi(x')} = \sqrt{1 + \|\operatorname{grad} \varphi(x')\|^2}$

$$\begin{aligned} \Phi(x') &= (x', \varphi(x')) \quad x' \in \tilde{U} \\ \partial_j \Phi &= e_j + \partial_j \varphi e_n \quad 1 \leq j \leq n-1. \end{aligned}$$

Satz 7.6 (Integralsatz von Gauß). Sei $G \subset \mathbb{R}^n$ wegzusammenhängende, beschränkte n -dimensionale Untermannigfaltigkeit mit Rand. Sei $n: \partial G \rightarrow \mathbb{R}^n$ das äußere Einheitsnormalenvektorfeld (das stetig ist). Sei $U \supset G$ offen. Dann gilt für jedes C^1 -Vektorfeld $X: U \rightarrow \mathbb{R}^n$

$$\int_G \underbrace{\operatorname{div} X(x)}_{=\sum_{j=1}^n \partial_j X_j(x)} dx = \int_{\partial G} \langle X(x), n(x) \rangle dS(x).$$

47:35



$\operatorname{div} X$ misst die *Quellstärke*, denn: DX misst wie sich X verändert. Eigenwerte von $DX(x_0)$:

Eigenwerte positiv → in Richtung des zugehörigen Eigenvektors anwachsend (Quelle)

Eigenwerte negativ → in Richtung des zugehörigen Eigenvektors schrumpfend (Senke)

Summe aller Eigenwerte = Maß für Quellstärke

$$= \operatorname{Spur}(DX(x_0)) = \sum_{i=1}^n \partial_i X_i(x_0).$$

Vorlesung 24

Mo 13.07. 10:15

Letztes Mal: Satz von Gauß

Bemerkungen. 1) Tatsächlich gilt die Gleichung sogar komponentenweise, also für $f \in C^1(G, \mathbb{R})$ gilt

$$\int_G \partial_i f(x) dx = \int_{\partial G} f(x) \nu_i(x) dS(x).$$

- 2) Der Satz gilt immer noch, wenn ∂G höchstens $(n - 2)$ -dimensionale „Kanten“ und „Ecken“ hat, in denen glatte Stücke von $\text{randpunkte}G$ zusammentreffen, also insbesondere auch für Quader.

3) Aus Bemerkung 1) folgt sofort: Ist $\text{supp } X \subset G^\circ$ so ist $\int_G \div X \, dx = 0$.

Physikalische Interpretation → Vorlesung 23: Quellstärke im Inneren = Fluss durch die Oberfläche. Physikalische und mathematische Anwendung:

ii)

$$\begin{aligned} \text{vol}_{n-1}(\mathbb{S}^{n-1}) &= \int_{\mathbb{S}^{n-1}} 1 \, dS(x) \\ &= \int_{\mathbb{S}^{n-1}} \langle X(x), \nu(x) \rangle \, dS(x) \\ \text{für } X(x) = x \text{ (denn } \nu(x) = x \text{ und } \|x\|_E^2 = 1) \\ &= \int_{B_1(0)} \underbrace{\text{div } X(x)}_{=n} \, dx. \end{aligned}$$

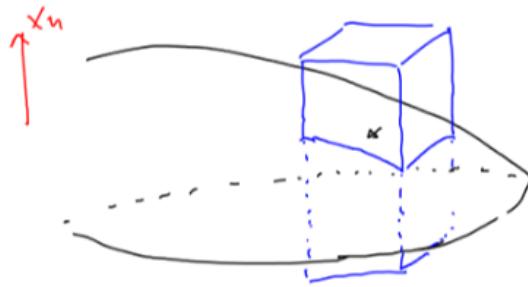
\mathbb{S}^{n-1} ($n - 1$)-dimensionale Einheitssphäre $\subset \mathbb{R}^n$, $B_1(0)$ Vollkugel von Radius 1 $\subset \mathbb{R}^n$.

Beweis des Satzes (vgl. Forster, Analysis 3, Vieweg). Wir beweisen die Behauptung aus Bemerkung 1), aus der der Satz folgt.

Sei $U \subset \mathbb{R}^n$ offen mit G . Wähle zu $x \in G$ eine offene Umgebung $U_x \subset U$. Ist $x \in \partial G$

wähle $U_x = \underbrace{U'_x}_{(n-1)\text{-dimensionaler Quader}} \times \overbrace{U''_x}^{\text{Intervall}}$ s. d. $\exists \varphi: U'_x \rightarrow U''_x C^1$ (als Abbildung nach \mathbb{R}) mit

$$\begin{aligned} G \cap (U'_x \times U''_x) &= \{ y \in U_x \mid y_n < \varphi(y') \} \\ \partial G \cap (U'_x \times U''_x) &= \{ y \in U_x \mid y_n = \varphi(y') \}. \end{aligned}$$



Beispiel (Sphäre).

$$\begin{aligned} \varphi(x, y) &= \sqrt{1 - x^2 - y^2} \\ \{ (x, y) \mid z = \varphi(x, y) \} &= \square \subset D. \end{aligned}$$

Dann gilt: $G \subset \bigcup_{x \in G} U_x$. G ist kompakt, denn nach Voraussetzung beschränkt und zudem abgeschlossen, da der topologische Rand (der hier gleich dem geometrischen Rand ist) in G enthalten ist. $\implies \exists U_1, \dots, U_k$ ($U_j = U_{x_j}$) s. d. $G \subset \bigcup_{j=1}^k U_j$. Seien die U_j so nummeriert, dass

$$\begin{aligned} U_j \cap \partial G &\neq \emptyset \quad 1 \leq L \\ U_j \subset G \quad L+1 &\leq j \leq K. \end{aligned}$$

Wähle eine Partition der Eins $\{ \rho_j \}_{j \in \{1, \dots, K\}}$ mit $\text{supp } \rho_j \subset U_j$, $\sum_{j=1}^K \rho_j(x) = 1 \quad \forall x \in G$.

$$\implies \int_G \partial_i X_i(x) dx = \sum_{j=1}^K \int_{G \cap U_j} \partial_i (\rho_j X_i)(x) dx$$

und

$$\int_{\partial G} X_i(x) v_i(x) dS(x) = \sum_{j=1}^K \int_{\partial G \cap U_j} (\rho_j X_i v_i)(x) dS(x).$$

Wir zeigen also, dass $\forall j, 1 \leq j \leq L$, und $\forall F \in C_C^1(U_j)$ gilt

\uparrow
 C^1 und kompakter Träger

$$\int_{G \cap U_j} \partial_i F \, dx = \int_{\partial G \cap U_j} F \nu_i \, dS(x) \quad (*)$$

und $\forall j, L+1 \leq j \leq K$, und $\forall F \in C_C^1(U_j)$ gilt

$$\int_{G \cap U_j} \partial_i F \, dx = 0 \quad (**)$$

Zu (**): Wähle $A > 0$ so, dass $[-A, A]^n \supset U_j$. $\text{supp } F \subsetneq U_j \Rightarrow$ kann durch 0 stetig differenzierbar zu \bar{F} auf $[-A, A]^n$ fortgesetzt werden.

$$\Rightarrow \int_{G \cap U_j} \partial_i F \, dx = \int_{-A}^A \cdots \left(\underbrace{\int_{-A}^A \partial_i \bar{F}(x) \, dx_1}_{= \bar{F}(x)|_{x_i=-A}^{x_i=A}} \right) dx_1 \cdots \widehat{dx_i} \cdots dx_n = 0$$

Zu (*): Zunächst für $1 \leq i \leq n-1$:

$$\int_{G \cap U_j} \partial_i F \, dx \stackrel{\text{Fubini}}{=} \int_{U'_j} \int_a^{\varphi(x')} \partial_i F(x', x_n) \, dx_n \, dx'$$

mit $a = \inf U''_j$. Es gilt:

$$\int_a^{\varphi(x')} \partial_i F(x', x_n) \, dx_n = \partial_i \int_a^{\varphi(x')} F \, dx_n - F(x', \varphi(x')) \cdot \partial_i \varphi(x')$$

(siehe unten). Weiterhin gilt

$$\begin{aligned} \int_{U'_j} \partial_i \left(\int_a^{\varphi(x')} F \, dx_n \right) \, dx' &= \int_{U_j^1 \times \cdots \times \widehat{U_j^i} \times \cdots \times U_j^{n-1}} \underbrace{\int_{\inf U_j^i}^{\sup U_j^i} \partial_i \int_a^{\varphi(x')} F \, dx_n \, dx_i \, dx_{1 \dots \widehat{i} \dots}}_{=0} \\ &= \int_a^{\varphi(\sup U_j^i)} \underbrace{F(x)|_{x_i=\sup U_j^i}}_{=0} \, dx_n \\ &\quad - \int_a^{\varphi(\inf U_j^i)} \underbrace{F(x)|_{x_i=\inf U_j^i}}_{=0} \, dx_n \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \implies \int_{G \cap U_j} \partial_i F dx &\stackrel{\text{Fubini}}{=} \int_{U'_j} \int_a^{\varphi(x')} \partial_i F(x', x_n) dx_n dx' \\ &= \int_{U'_j} F(x', \varphi(x')) \underbrace{(-\partial_i \varphi(x'))}_{=\nu_i(x', \varphi(x')) \sqrt{1 + \|\text{grad } \varphi(x')\|^2}} dx' \end{aligned}$$

denn (s. letzte Vorlesung)

$$\nu(a) = \frac{1}{\sqrt{1 + \|\text{grad } \varphi(a')\|^2}} \begin{pmatrix} -\text{grad } \varphi(a') \\ 1 \end{pmatrix} \quad a = (a', a_n)$$

Nun für $i = n$: Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung

$$\begin{aligned} \implies \int_{G \cap U_j} \partial_n F dx &= \int_{U'_j} \int_a^{\varphi(x')} \partial_n F(x', x_n) dx_n dx' \\ &= \int_{U'_j} \left(\underbrace{F(x', \varphi(x'))}_{=F \cdot \nu_n(x', \varphi(x'))} - \underbrace{F(x', a)}_{=0} \right) dx' \\ &\quad \cdot \sqrt{1 + \|\text{grad } \varphi(x')\|_E^2} \end{aligned}$$

\implies Beh. □

Bemerkung.

$$\int_a^{\varphi(x')} \partial_i F(x', x_n) dx_n = \partial_i \int_a^{\varphi(x')} F dx_n - F(x', \varphi(x')) \cdot \partial_i \varphi(x')$$

DIFF I: Parameterabhängige Integrale. Seien I, J kompakte Intervalle, $f: I \times J \rightarrow \mathbb{R}$ stetig. $\partial_1 f$ existiere und sei stetig. Dann ist

$$I \ni x \mapsto g(x) := \int_J f(x, y) dy$$

stetig differenzierbar und es gilt:

$$g'(x) = \int_J \partial_1 f(x, y) dy$$

siehe z.B. Forster, Analysis 2, Kap. I, §9. Satz 2 (1982). Hängt die obere Integrationsgrenze von x ab, so gilt für $\underline{g}(x, a) = F_2(x, a)$ (Stammfunktion von f bezüglich der 2. Variable ausgewertet in der Grenze a)

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} (\underline{g}(x, \varphi(x)) - \underline{g}(x, a)) &= D\underline{g}(x, \varphi(x)) \begin{pmatrix} 1 \\ \varphi'(x) \end{pmatrix} - D\underline{g}(x, a) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ &= g'(x) + \partial_2 \underline{g}(x, \varphi(x)) \cdot \varphi'(x) = \underbrace{g'(x)}_{\int_a^{\varphi(x)} \partial_1 f(x, y) dy} + f(x, \varphi(x)) \varphi'(x) \end{aligned}$$

Folgerungen / Notation 7.8. Sei $G \subset \mathbb{R}^2$ 2-dimensionale beschränkte Untermannigfaltigkeit mit Rand. Dann gilt für $f, -g \in C^1(U)$, $U \supset G$:

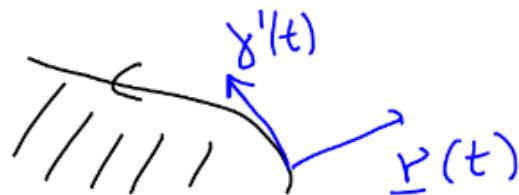
$$\int_G (\partial_1 g - \partial_2 f) dx = \int_{\partial G} f dx_1 + g dx_2$$

„Satz von Gauss“ (einer der vielen)

rechte Seite:

$$\gamma(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix}$$

$$\underline{\nu}(t) = \begin{pmatrix} y'(t) \\ -x'(t) \end{pmatrix}$$



mehr später.

Beispiel 7.9.

$$I = \int_G 2(x+y) dx + (x^2 + y^2) dy$$

$C =$ bestehend aus 2 Teilkurven

$$C_1 : y = -\sqrt{2x - x^2}$$

$$C_2 : y = \frac{1}{2} \sin(\pi x) \quad x \in [0, 2]$$

$$I = \int_0^2 \int_{-\sqrt{2x-x^2}}^{\frac{1}{2} \sin \pi x} (2x - 2) dy dx = \dots = -\frac{2}{\pi}$$

Achtung. Die Voraussetzungen sind wichtig: $G = \overline{D}$ (Einheitskreisscheibe)

$$f = -\frac{y}{x^2 + y^2} \quad g = \frac{x}{x^2 + y^2}$$

$$\int_G \underbrace{(\partial_1 g - \partial_2 f)}_{=0} d(x, y) = 0 \neq \int_{\partial G} f dx + g dy.$$

7.II. Tensorkalkül und Differentialformen

Lineare Algebra: Sei V ein n -dimensionaler Vektorraum. Sei (e_1, \dots, e_n) eine Basis von V . Dann gibt es eine eindeutig bestimmte Basis (e^1, \dots, e^n) von V^* , dem Dualraum, $V^* = L(V, \mathbb{R}) = \{W: V \rightarrow \mathbb{R} \text{ linear}\}$ s. d.

$$e^j(e_i) = \delta_i^j = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

Sie wird „duale Basis“ genannt.

Definition 7.10. Seien V_1, \dots, V_k, W Vektorräume. Eine Abbildung $\alpha: V_1 \times \dots \times V_k \rightarrow W$ heißt *multilinear*, wenn sie in jeder Komponente linear ist. Im Fall $W = \mathbb{R}$ heißt sie *Multilinearform*.

Seien $r, s \in \mathbb{N}_0$ (nicht beide gleich 0). Ein r -fach kovarianter, s -fach kontravarianter *Tensor* ist eine multilineare Abbildung

$$\alpha: \underbrace{V \times \dots \times V}_{r\text{-fach}} \times \underbrace{V^* \times \dots \times V^*}_{s\text{-fach}} \rightarrow \mathbb{R}.$$

$T_r^s(V)$ bezeichnet den Vektorraum der r -fach ko- und s -fach kontravarianten Tensoren.

Definition 7.11. Sei $\alpha \in T_r^s(V)$, $\beta \in T_{\tilde{r}}^{\tilde{s}}(V)$. Dann ist $\alpha \otimes \beta$ erklärt durch $(v_i \in V, w^j \in V^*)$

$$\begin{aligned} \alpha \otimes \beta(v_1, \dots, v_r, v_{r+1}, \dots, v_{r+\tilde{r}}, w^1, \dots, w^s, w^{s+1}, \dots, w^{s+\tilde{s}}) \\ := \alpha(v_1, \dots, v_r, w^1, \dots, w^s) \cdot \beta(v_{r+1}, \dots, v_{r+\tilde{r}}, w^{s+1}, \dots, w^{s+\tilde{s}}) \end{aligned}$$

Beispiel. $\alpha \in V^*$ ist ein 1-fach kovarianter Tensor.

$\langle \cdot, \cdot \rangle: V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ ist ein 2-fach kovarianter Tensor.

$\det: V^n \rightarrow \mathbb{R}$ (als Abbildung auf den Spaltenvektoren, V n -dimensional) ist ein n -fach kovarianter Tensor.

$v \in V$ ist ein 1-fach kontravarianter Tensor: $v \in V \cong V^{**}$ mit $v(\alpha) := \alpha(v)$, $\alpha \in V^*$.

Satz 7.12. Sei $(e_i)_{i \in \{1, \dots, n\}}$ Basis von V , sei $(e^j)_j$ die duale Basis (von V^*). Dann ist

$$\left\{ e^{j_1} \otimes \dots \otimes e^{j_r} \otimes e_{i_1} \otimes \dots \otimes e_{i_s} \mid j_l, i_k \in \{1, \dots, n\} \right\}$$

eine Basis von $T_r^s(V)$. Somit ist $\dim(T_r^s(V)) = n^{r+s}$.

Beweis (wird in der Vorlesung eventuell weggelassen). Wir setzen $s = 0$ (der Beweis für $s > 0$ verläuft analog). Es gilt:

$$(e^{j_1} \otimes e^{j_r})(e_{k_1}, \dots, e_{k_r}) = \delta_{k_1}^{j_1} \cdots \delta_{k_r}^{j_r} = \begin{cases} 1 & (j_1, \dots, j_r) = (k_1, \dots, k_r) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

\implies Falls $\sum_{\substack{c_{j_1 \cdots j_r} \\ \in \mathbb{R}}} c_{j_1 \cdots j_r} e^{j_1} \otimes \cdots \otimes e^{j_r} = 0$

so sind alle $c_{j_1 \dots j_r} = 0$.

ist $\alpha \in T_r(V)$, setze für alle Kombinationen $(k_1, \dots, k_r) \in \{1, \dots, n\}^r$

$$\alpha_{k_1 \dots k_r} := \alpha(e_{k_1}, \dots, e_{k_r}).$$

Dann gilt für $u_1, \dots, u_r \in V$:

$$\begin{aligned}
\alpha(u_1, \dots, u_r) &= \alpha\left(\sum u_1^j e_j, \dots, \sum u_r^j e_j\right) \\
&= \sum_{k_1, \dots, k_r} u_1^{k_1} \cdots u_r^{k_r} \alpha(e_{k_1}, \dots, e_{k_r}) \\
&= \sum_{k_1, \dots, k_r} \alpha_{k_1, \dots, k_r} (e^{k_1} \otimes \cdots \otimes e^{k_r})(u_1, \dots, u_r)
\end{aligned}$$

□

Die Koeffizienten

$$\alpha_{k_1 \dots k_r}^{l_1 \dots l_s} = \alpha(e_{k_1}, \dots, e_{k_r}, e^{l_1}, \dots, e^{l_s})$$

heißen die *Koordinaten* von $\alpha \in T_r^s(V)$ bezüglich der Basis $(e_i)_{i \in \{1, \dots, n\}}$, d.h.

$$\alpha = \sum \alpha_{k_1 \dots k_r}^{l_1 \dots l_s} e^{k_1} \otimes \dots \otimes e^{k_r} \otimes e_{l_1} \otimes \dots \otimes e_{l_s}.$$

Definition 7.13. $\alpha \in T_r(V)$ heißt

symmetrisch von Grad r , falls $\alpha^\pi = \alpha \quad \forall \pi \in S_r$

alternierend von Grad r , falls $\alpha^\pi = \text{sign } \pi \cdot \alpha \quad \forall \pi \in S_r$

wobei $\alpha^\pi(u_1, \dots, u_r) := \alpha(u_{\pi^{-1}(1)}, \dots, u_{\pi^{-1}(r)})$.

Einen alternierenden Tensor vom Grad r nennt man auch r -Form.

Lemma 7.14 Für $\phi \in T_+(V)$ sind äquivalent

a) c ist alternierend

- b) $\alpha(v_1, \dots, v_r) = 0$ falls $v_i = v_j$ für ein paar $i \neq j$
- c) $\alpha(v_1, \dots, v_r) = 0$ falls die v_i linear abhängig sind.

Beweis. Lineare Algebra. □

Bemerkung. Ist $\alpha \in T^r(V)$ so erhält man eine r -Form vermöge

$$\Lambda\alpha := \frac{1}{r!} \sum_{\pi \in S_r} \text{sgn}(\pi) \alpha^\pi.$$

Definition 7.15. Bezeichne $\Lambda^r V^* := \{ r\text{-Formen über } V \}$.

$$\begin{aligned} \wedge: \Lambda^r V^* \times \Lambda^s V^* &\rightarrow \Lambda^{r+s} V^* \\ \wedge: \alpha \times \beta &\mapsto \alpha \wedge \beta := \frac{(r+s)!}{r!s!} \Lambda(\alpha \otimes \beta) \end{aligned}$$

Dach-Produkt (englisch: wedge product)

- Bemerkungen.**
- i) \wedge erfüllt $\alpha \wedge \beta = (-1)^{rs} \beta \wedge \alpha$
 - ii) \wedge ist bilinear und definiert ein assoziatives Produkt auf $\Lambda^r V^*$
 - iii) Ist $\alpha^i \in V^*$, $i \in \{1, \dots, r\}$, so ist

$$\alpha^1 \wedge \dots \wedge \alpha^r(u_1, \dots, u_r) = \det \begin{pmatrix} \alpha^1(u_1) & \dots & \alpha^1(u_r) \\ \vdots & & \vdots \\ \alpha^r(u_1) & \dots & \alpha^r(u_r) \end{pmatrix}$$

- iv) $\Lambda^r V$ ist ein Vektorraum und es gilt: Ist (e_1, \dots, e_n) eine Basis von V , so ist

$$\left\{ e^{j_1} \wedge \dots \wedge e^{j_r}, \quad 1 \leq j_1 < j_2 < \dots < j_r \leq n \right\}$$

eine Basis von $\Lambda^r V$, also $\dim(\Lambda^r V) = \binom{n}{r}$.

Vorlesung 25

Do 16.07. 10:15

Definition 7.16. Sei $U \subset \mathbb{R}^m$ offen (n -dimensionale Untermannigfaltigkeit des \mathbb{R}^m). Ein *Tensorfeld* auf U (s -fach kontravariant, r -fach kovariant) ist eine Abbildung

$$\alpha: U \ni a \mapsto \alpha(a) \in T_r^s(T_a U).$$

Eine *Differentialform* von Grad r ist eine Abbildung

$$\omega: U \ni a \mapsto \omega(a) \in \Lambda^r(T_a U^\star)$$

$\omega_r(U) = \{\omega \text{ Differentialform vom Grad } r\}$. α wird C^k genannt, falls

$$U \ni a \mapsto \alpha(a)(u_1, \dots, u_r, w^1, \dots, w^s) \in \mathbb{R}$$

für jedes fest gewählte Tupel

$$(u_1, \dots, u_r, w^1, \dots, w^s) \in (T_a U)^r \times (T_a U^\star)^s$$

C^k ist.

Speziell ist $\omega \in \Omega(U)$ C^k falls

$$U \ni a \mapsto \omega(a)(u_1, \dots, u_r) \in \mathbb{R}$$

C^k ist für jedes $(u_1, \dots, u_r) \in (T_a U)^r$.

Bemerkung. i) Tensorfelder und Differentialformen vom Grad 0 sind Funktionen
ii) Ein einfache kontravariante Tensorfeld ist ein Vektorfeld: $\alpha(a) \in T_1(T_a U^\star)$

$$\begin{aligned} \alpha(a) &\in (T_a U^\star)^* \approx T_a U, \\ \alpha(a) &= \sum_{i=1}^m \alpha(a)^i e_i \end{aligned}$$

mit (e_1, \dots, e_n) eine Basis von $T_a U$.

Koordinatendarstellung. Sei $\varphi: U \rightarrow \mathbb{R}^m$ die kanonische Parametrisierung von U , $\varphi(x) = x$. Dann ist (vgl. 4.10)

$$T_x U = \text{Span}(e_1, \dots, e_m)$$

\uparrow
kanonische Einheits-Basis

Die dazu duale Basis bezeichnet man mit dx^1, \dots, dx^m . Es gilt für $v = \sum v^i e_i \in T_x U$:

$$dx^j(v) = v^j.$$

Nach Bemerkung iv) nach Definition 7.15 ist

$$\left\{ dx^{j_1} \wedge \cdots \wedge dx^{j_r} \mid j_i \in \{1, \dots, n\}, j_1 < j_2 < \cdots < j_r \right\}$$

eine Basis von $\omega_r(U)$, also

$$\omega \in \omega_r(U) \implies \omega = \sum_{j_1 < \cdots < j_r} \omega_{j_1 \dots j_r} dx^{j_1} \wedge \cdots \wedge dx^{j_r}$$

mit Funktionen $\omega_{j_1 \dots j_r}: U \rightarrow \mathbb{R}$. Beachte: ω ist genau dann C^k wenn $\omega_{j_1 \dots j_r} C^k$ ist.

Beispiel. $m = 2, u, v \in T_a U \cong \mathbb{R}^2$

$$dx^1 \wedge dx^2(u, v) = \det \begin{pmatrix} dx^1(u) & dx^1(v) \\ dx^2(u) & dx^2(v) \end{pmatrix} = \det \begin{pmatrix} u^1 & v^1 \\ u^2 & v^2 \end{pmatrix}$$

Definition 7.17. Sei $\varphi: U \rightarrow \mathbb{R}^n C^1, U \subset \mathbb{R}^m$ offen mit $\varphi(U) = V$ offen. Sei $\omega \in \omega_r(V)$. Dann definiert

$$(\varphi^* \omega)(t)(v_1, \dots, v_r) := \omega(\varphi(t))(D\varphi(t)v_1, \dots, D\varphi(t)v_r) \quad \forall t \in U, \forall v_1, \dots, v_r \in \mathbb{R}^m$$

r -Form auf U , $\varphi^* \omega \in \omega_r(U)$, den sogenannten *pullback* (*Zurückziehung*) von ω unter φ .

In Koordinaten:

$$\omega = \sum_{i_1 < \cdots < i_r} \omega_{i_1 \dots i_r} dx^{i_1} \wedge \cdots \wedge dx^{i_r}.$$

Dann ist $\varphi^* \omega = \sum \omega_{i_1 \dots i_r} \circ \varphi d\varphi^{i_1} \wedge \cdots \wedge d\varphi^{i_r}$ mit

$$d\varphi^i = \sum_{k=1}^m \partial_k \varphi^i dt^k \tag{*}$$

Beweis durch Nachrechnen. $\varphi^* \omega$ ist also tatsächlich in $\omega_r(U)$.

Definition 7.18. *Cartan-Ableitung* (äußere Ableitung) $U \subset \mathbb{R}^n$. $f \in \omega_0(U)$ sei C^k mit $k \geq 1$. Dann setze:

$$df := \sum_{j=1}^m \partial_j f dx^j \quad (\text{Siehe oben (*)})$$

$\omega \in \omega_r(U)$ sei C^k mit $k \geq 1$. Dann setze:

$$d\omega := \sum_{q \leq i_1 < \cdots < i_r \leq n} d(\omega_{i_1 \dots i_r}) \wedge dx^{i_1} \wedge \cdots \wedge dx^{i_r}$$

$$d\omega \in \omega_{r+1}(U)$$

Beispiel. $\omega = p dx + q dy$

$$\begin{aligned} d\omega &= (\partial_1 p dx + \partial_2 p dy) \wedge dx + (\partial_1 q dx + \partial_2 q dy) \wedge dy \\ &= (\partial_1 q - \partial_2 p) dx \wedge dy \end{aligned}$$

$d\omega = 0$ falls $\partial_1 q = \partial_2 p$ Integrabilitätsbedingung bei den *exakten* DGLn

Das ist insbesondere der Fall, wenn $\omega = d(f)$, $f(x, y)$, $\partial_1 f = p$, $\partial_2 f = q$ $f \in C^2$. Beachten Sie die Ähnlichkeit zum Satz von Gauß in 2 Dimensionen \rightsquigarrow später mehr.

. **Bemerkung.** Teilweise längere Rechnungen zeigen: $\omega, \tilde{\omega} \in C^k$, $k \geq 1$.

- $d: \omega_r(U) \rightarrow \omega_{r+1}(U)$ ist linear
- $d(\omega \wedge \tilde{\omega}) = d\omega \wedge \tilde{\omega} + (-1)^r \omega \wedge d\tilde{\omega}$ für $\omega \in \omega_r(U)$
- $d(d\omega) = 0$, $\omega \in C^k$, $k \geq 2$.

Definition. $\omega \in \omega_r(U)$ heißt *geschlossen* falls $d\omega = 0$ und *exakt* falls $\exists \alpha \in \omega_{r-1}(U)$ s. d. $d\alpha = \omega$. α heißt *Potential* für ω . $U \subset \mathbb{R}^m$ Ist $d\omega = 0$, U sternförmig, d. h. \exists Punkt $a \in U$ s. d. die Verbindungslinien von a zu allen Punkten von U in U liegen, so \exists Potential. Die Konstruktion funktioniert im wesentlichen so, wie bei den exakten DGLn (Partielle Integration entlang der Verbindungslinien). *Lemma von Poincaré*

Bemerkung 7.20. Zusammenhang zu Differentialgleichungen:

- i) Exakte DGLn: Schreibe statt $g(x, y)y' + h(x, y) = 0$

$$\omega := g(x, y) dy + h(x, y) dx.$$

Die Integrabilitätsbedingung impliziert $d\omega = 0 \implies$ (auf sternförmigem Gebiet) $\exists f$ s. d. $\omega = df$ (also exakt), $g = \partial_y f$, $h = \partial_x f$, Satz über implizite Funktionen: $\exists x \mapsto y(x)$ s. d. $f(x, y(x)) = 0 \rightarrow$ die Lösung $y(x)$ der DGL.

- ii) Merkregel bei DGLn mit getrennten Variablen. Schreibe statt $y' = f(x)g(y)$

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

7.III. Zusammenhang zu Integration auf Untermannigfaltigkeiten

Definition 7.21. $U \subset \mathbb{R}^m$ offen, $\omega = f dx^1 \wedge \cdots \wedge dx^m$. ω heißt *integrierbar* über $V \subset U$ falls $f|_V$ integrierbar ist. Man setzt dann:

$$\int_V \omega := \int_V f dx^1 \wedge \cdots \wedge dx^m := \int_V f(x) dx$$

Lemma 7.22. $U, V \subset \mathbb{R}^m$ offen, $\varphi: U \rightarrow \mathbb{R}^m$, $\varphi(U) = V$, Diffeomorphismus auf V . Sei $K \subset U$ kompakt. Dann gilt

$$\begin{aligned}\int_{\varphi(K)} \omega &= \int_K \varphi^* \omega \quad \text{falls } \det D\varphi > 0 \\ &= - \int_K \varphi^* \omega \quad \text{falls } \det D\varphi < 0\end{aligned}$$

Beweis. $\omega = f dx^1 \wedge \cdots \wedge dx^m \implies \varphi^* \omega = (f \circ \varphi) \det d\varphi dx^1 \wedge \cdots \wedge dx^m$ (nachrechnen). Die Behauptung folgt mit der Transformationsformel

$$\int_{\varphi(K)} \omega = \int_{\varphi(K)} f dx = \int_K f(\varphi(y)) |\det D\varphi(y)| dy \quad \square$$

Diese Definition können wir auf beliebige *orientierbare Untermannigfaltigkeiten* übertragen. Orientierbar: \exists Beschreibung durch lokale Parametrisierungen

$$\{ \varphi: U_i \rightarrow V_i \mid i \in I \}$$

s. d.

$$\Phi_{ij} := \varphi_i^{-1} \circ \varphi_j: \varphi^{-1}(V_i \cap V_j) \rightarrow \varphi^{-1}(V_i \cap V_j)$$

$\det D\Phi_{ij} > 0$ erfüllt.

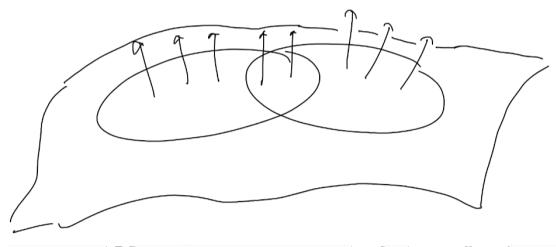
Wählt man eine Basis $(\partial_j \psi)_{j=1,\dots,m}$ von $T_a M$ und ist $a \in \varphi(U) \cap \psi(\tilde{U})$ so ist $((\partial_j \psi)_{j=1,\dots,m})$ gleich orientiert, d. h. der Basiswechsel A hat positive Determinante:

$$D\varphi = (\underbrace{D(\varphi^{-1} \circ \psi)}_{\Phi_{\varphi\psi}})^{-1} \cdot D\psi \quad (\text{Kettenregel})$$

Bemerkung 7.23. Ist M Hyperfläche, also $\dim(M) = n - 1$, $M \subset \mathbb{R}^n$, so ist Orientierbarkeit zur Existenz eines stetigen Einheitsnormalenvektorfeldes:

Beweis. „ \implies “ \exists genau 2 Einheitsnormalenvektoren bei $a = \varphi(t_0) \in M$. Wähle den, für den $(\nu(a), \partial_1 \varphi(t_0), \dots, \partial_{n-1} \varphi(t_0))$ die selbe Orientierung hat wie (e_1, \dots, e_n) (*).

„ \Leftarrow “ Ist $\nu: M \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetiges Einheitsnormalenvektorfeld so ist durch (*) eine Orientierung vorgegeben.



Solche Parametrisierungen gibt es, da man durch Umsortieren der Komponentenfunktionen (*) erreichen kann. \square

Beispiel. ∂G aus dem Satz von Gauß ist also orientierbar, das Möbiusband dagegen nicht (G ist ohnehin orientierbar).

Bemerkung 7.24. Das Übertragen des Integrals über m -Formen auf m -dimensionale orientierbare Untermannigfaltigkeiten funktioniert wie zuvor:

- Zunächst für $m = n$ (siehe oben)
- Dann für $K \subset M \subset \mathbb{R}^m$ ($n \geq m$). K kompakt unter der Annahme, dass

$$\exists \varphi: U \rightarrow \mathbb{R}^n$$

mit $K \subset \varphi(U)$. Mit 7.17 folgt:

$$\int_K \omega := \int_{\varphi^{-1}(K)} \varphi^* \omega$$

ist eine sinnvolle Definition, die von der Wahl von φ nicht abhängt:

$$\varphi = \psi \circ (\underbrace{\psi^{-1} \circ \varphi}_{\det D \cdots > 0})$$

- Dann für $K \subset M$ mit $\{\varphi_i: U_i \rightarrow V_i\}_{i \in I}$ eine Beschreibung von M durch gleich orientierte Parametrisierungen. K kompakt \implies endlich viele U_1, \dots, U_l überdecken $K \implies$ Integralbegriff mit Hilfe einer untergeordneten Teilung der Eins.

Beispiel. $\omega = (\partial_1 g - \partial_2 f) dx \wedge dy$ auf $U \subset \mathbb{R}^2$. Dann gilt für $G \subset U$ wie im Satz von Gauß

$$\int_G \omega = \int_{\partial G} \langle F, \nu \rangle ds(t)$$

$$\text{mit } F = \begin{pmatrix} g \\ -f \end{pmatrix}$$



$$ds(t) = \sqrt{\det D\gamma} dt = \|\gamma'(t)\|_{\mathbb{E}} dt, \quad \nu(\gamma(t)) = \begin{pmatrix} \gamma'_2(t) \\ -\gamma'_1(t) \end{pmatrix} \frac{1}{\|\gamma\|_{\mathbb{E}}}$$

Also

$$\begin{aligned} \int_G \omega &= \int_{\partial G} \langle Fv, d \rangle s(t) \\ &= \int_a^b (F_1(\gamma(t))\gamma'_2(t) - F_2(\gamma(t))\gamma'_1(t)) dt \\ &= \int_{\partial G} F_1 dy - F_2 dx \\ &\quad \uparrow \\ &\quad dx^i = d(\gamma_i(t)) = \gamma'_i dt \\ &= \int_{\partial G} \underbrace{g dy}_{=: \alpha} + \underbrace{f dx}_{=: \alpha} \end{aligned}$$

Notation aus Folgerungen / Notation 7.8. Es ist $\omega = d\alpha = (\partial_1 g - \partial_2 f) dx \wedge dy$. Also schreibt sich der Satz von Gauß hier:

$$\int_G d\alpha = \int_{\partial G} \alpha$$

Das ist kein Zufall! (siehe unten)

Zunächst etwas Vorarbeit:

Satz 7.25. Sei M orientierbare, m -dimensionale Mannigfaltigkeit in \mathbb{R}^n mit Rand. Dann ist auch die $(m-1)$ -dimensionale Untermannigfaltigkeit ∂M orientierbar.

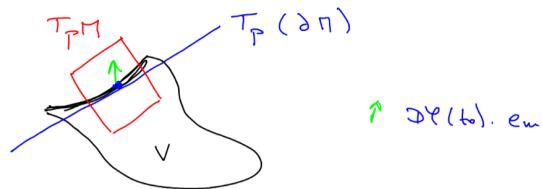
Beweis-Idee. Sei $\varphi: U \rightarrow V$ Parametrisierung ($U \subset \mathbb{R}_{eq0} \times \mathbb{R}^{m-1}$ offen) s. d. $\varphi(U \cap \{0\} \times \mathbb{R}^{m-1}) = V \cap \partial M \neq \emptyset$



und $\{\varphi, \varphi_i\}_j$ sei eine Beschreibung von M durch orientierte Parametrisierung.

Betrachte die letzte Spalte von $d\varphi$, also

$$D\varphi(t_0) \cdot e_m =: v, \quad \varphi(t_0) = p \in \partial M$$

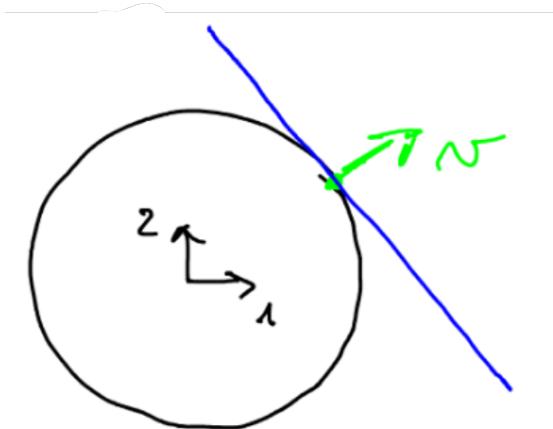


Eine Basis (w_1, \dots, w_{m-1}) von $T_p \partial M$ ist dann so zu wählen, dass die Basis (v, w_1, \dots, w_{m-1}) von $T_p M$ gleich orientiert ist wie die Orientierung von $T_p M$. \square

Bemerkung. Man nennt diese Orientierung als die von der Orientierung von M induzierte.

Beispiel.

\overline{D}



(v, w) orientiert wie \mathbb{R}^2 mit $(e_1, e_2) \Rightarrow w \nwarrow$

\Rightarrow Der Rand wird von den orientierten Parametrisierungen gegen Uhrzeigersinn durchlaufen.

Satz 7.26 (Spezialfall des Satzes von Stokes). Sei $\omega \in \omega_{m-1}(\mathbb{R}^m) C^1$ und mit kompaktem Träger $\text{supp } \omega$ ($\text{supp } \omega = \overline{\{*\}} p \in \mathbb{R}^m | \omega(p) \neq \text{Nullform}$ in Koordinaten: $\omega_{i_1 \dots i_{m-1}}$ hat kompakte Träger). Dann gilt:

$$\int_{\mathbb{R}^m_-} d\omega = \int_{\partial \mathbb{R}^m_-} \omega$$

wobei $\mathbb{R}_-^m = \mathbb{R}_{eq0} \times \mathbb{R}^{m-1}$, $\partial\mathbb{R}_-^m = \{0\} \times \mathbb{R}^{m-1}$.

Beweis.

$$\begin{aligned}\omega &= \sum \omega_{i_1 \dots i_{m-1}} dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_{m-1}} \\ &=: \sum_{j=1}^m (-1)^{j-1} \alpha_j dx^1 \wedge \dots \wedge \widehat{dx^j} \wedge \dots \wedge dx^n\end{aligned}$$

Kompakter Träger $\implies \exists K$ kompakt s.d. $\alpha_j|_{\mathbb{R}^m \setminus K} = 0 \forall j$

$$\begin{aligned}d\omega &= \sum_{j=1}^m (\partial_1 \alpha_j) dx^1 \wedge \dots \wedge dx^m \\ \varphi: \mathbb{R}^{m-1} &\rightarrow \partial\mathbb{R}_-^{m-1}, \quad (t^1 \dots t^{m-1}) \mapsto (0, t^1, \dots, t^{m-1}) \\ \varphi^* \omega &= \sum_{j=1}^m (-1)^{j-1} (\alpha_j \circ \varphi) d\varphi^1 \wedge \dots \wedge \widehat{d\varphi^j} \wedge \dots \wedge d\varphi^m \\ d\varphi^1 &= 0 \quad (\varphi^1(t) = 0 \forall t) \\ d\varphi^j &= dt^{j-1} \quad (\varphi^j(t) = t^{j-1}) \text{ für } j \geq 2 \\ \implies \varphi^* \omega &= (\alpha_1 \circ \varphi) dt^1 \wedge \dots \wedge dt^{m-1} \\ \implies \int_{\partial\mathbb{R}_-^m} \omega &= \int_{\mathbb{R}^{m-1}} d\omega = \int_{\mathbb{R}^{m-1}} \alpha_1(0, t^1, \dots, t^{m-1}) dt\end{aligned}$$

Linke Seite:

$$\begin{aligned}\int_{\mathbb{R}_-^m} d\omega &= \int_{\mathbb{R}_-^m} \left(\sum_{j=1}^m \partial_j \alpha_j \right) dx \\ \int_{\mathbb{R} \leq 0} \partial_1 \alpha_1(x) dx^1 &= \int_{-\infty}^0 \partial_1 \alpha_1(x) dx^1 = \alpha_1(0, x^2, \dots, x^m) \\ \int_{\mathbb{R} \leq 0 \times \mathbb{R}^{m-2}} \underbrace{\left(\int_{-\infty}^{\infty} \partial_j \alpha_j(x) dx_j \right)}_{=0} &dx_1 \dots \widehat{dx_j} \dots dx_m\end{aligned}$$

\implies Beh. □

Satz 7.27 (Integralsatz von Stokes). Sei M orientierte m -dimensionale Untermannigfaltigkeit des \mathbb{R}^n mit Rand ∂M , der die induzierte Orientierung trägt. Sei $\omega \in \omega_{m-1}(M)$ mit kompaktem Träger und C^1 . Dann gilt

$$\int_M d\omega = \int_{\partial M} \omega.$$

Beweisidee. Sei $\varphi: U \rightarrow M$ globale Parametrisierung von $\text{supp } \omega$ (sonst: Zerlegung der Eins). Setze $\varphi^*\omega$ durch 0 fort zu einer Differentialform auf ganz \mathbb{R}^m_- .

- Ist U offen in \mathbb{R}^m ist $\varphi(U) \cap \partial M = \emptyset$. Beide Seiten sind 0.
- Ist U offen in \mathbb{R}^m_- also $\varphi(U) \cap \partial M \neq \emptyset$, gilt

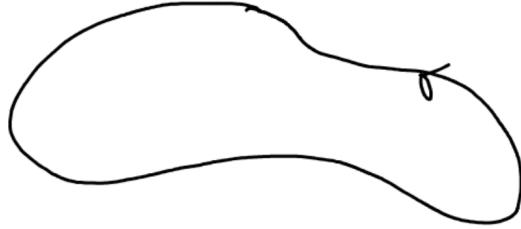
$$\begin{aligned} \int_M d\omega &= \int_U \varphi^*(d\omega) \stackrel{\uparrow}{=} \int_U d(\varphi^*\omega) \\ &= \int_{\mathbb{R}^m_-} d(\varphi^*\omega) \stackrel{7.26}{=} \int_{\partial \mathbb{R}^m_-} \varphi^*\omega \\ &= \int_{\partial U} \varphi^*\omega \stackrel{\uparrow}{=} \int_{\varphi(\partial M)} \omega = \int_{\partial M} \omega \quad \square \end{aligned}$$

Beispiel. Satz von Gauß,....

Beispiel. $n = 3$ $\omega = f_1 dx^1 + f_2 dx^2 + f_3 dx^3$

$$\begin{aligned} d\omega &= (\partial_2 f_3 - \partial_3 f_2) dx^2 \wedge dx^3 \\ &\quad + (\partial_3 f_1 - \partial_1 f_3) dx^3 \wedge dx^1 \\ &\quad + (\partial_1 f_2 - \partial_2 f_1) dx^1 \wedge dx^2 \end{aligned}$$

Koeffizienten heißen auch Rotation von $f = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{pmatrix}$



$$M \text{ 2-dim } \subset \mathbb{R}^3$$

$$\int_M d\omega = \int_{\partial M} \omega \text{ Kurvenintegral vgl. Beispiel nach 7.22}$$

$$\begin{aligned} \int f_1 dx^1 + \cdots + f_3 dx^3 &= \int (f_1(\gamma(t))\gamma'_1(t) + \cdots + f_3(\gamma(t))\gamma'_3(t)) dt \\ &= \int \langle f(\gamma(t), \gamma'(t)) \rangle dt \end{aligned}$$

Definitionen

- R_1 , 184
 R_2 , 186
 σ -Algebra, 190
 ε -Ball, 12
 k -fache partielle Differenzierbarkeit, 93
 d -Nullmenge, 218
 r -Form, 229
Ableitung, 55
alternierender Tensor, 229
Beschränktheit, 21
Borel-Raum, 190
Cartan-Ableitung, 232
Cauchy-Folge, 19
Charakteristische Funktion, 182
Dach-Produkt (englisch: wedge product), 230
Differentialform, 231
Differentialgleichung k -ter Ordnung, 149
Differentialgleichung 1. Ordnung, 143
duale Basis, 228
Erste Fundamentalform, 138
Exakte Differentialgleichungen, 158
Fundamentalsystem, 163
Hermite-Polynom, 169
Hermitesche DGL, 169
Homogenes lineares DGL-System, 160
Immersion, 122
Integral, 69
Integralkurve, 137
Integration auf Untermannigfaltigkeiten, 215
Kompaktheit, 30
Konvergenz, 8
Laguerre-Polynom, 169
Laguerresche DGL, 169
Lebesgue-integrierbare Funktion, 191
Legendre-Polynom, 169
Legendresche DGL, 168
Lipschitz-Bedingung, 146
Lokales Extremum unter Nebenbedingung, 88
Maß, 190
Metrik, 11
Minimum- / Maximum-Prinzip, 87
multilineare Abbildung, 228
Multilinearform, 228
Niveau-Menge, 59
Norm, 38
Normalenvektor, 133
Nullmenge, 182
Offene Überdeckung, 30
Operatornorm, 45
orientierbare Untermannigfaltigkeiten, 234

- Potential, 233
pullback (Zurückziehung), 232
- Randpunkt, 18
Richtungsableitung, 60
- Satz von Gauss, 227
Skalarprodukt, 49
Stetig differenzierbare Abbildung von
Untermannigfaltigkeiten, 134
- Stetigkeit, 8
Stufenfunktion, 182
Stärke von Metriken, 37
- symmetrischer Tensor, 229
- Tangentialvektor, 113
Tensor, 228
Tensorfeld, 231
Topologie, 6
- Umgebung, 7
Untermannigfaltigkeit, 110
Untermannigfaltigkeit mit Rand, 137
- Vektorfeld, 135
Vollständiger metrischer Raum, 20

Wichtige Sätze

- | | |
|--------------------------------------|--|
| Banach'scher Fixpunktsatz, 22 | Satz von der majorisierten Konvergenz
(Lebesgue), 193 |
| Integralsatz von Gauß, 221 | Satz von der Umkehrabbildung, 81 |
| Integralsatz von Stokes, 238 | Satz von Fatou, 192 |
| Kettenregel, 57 | Satz von Picard-lindelöf, 147 |
| Lagrange-Multiplikator-Regel, 89 | Satz von Schwarz, 94 |
| Parameterwechsel, 127 | Satz über monotone Konvergenz
(Beppo Levi), 191 |
| Produktregel, 58 | Schachtelungsprinzip, 21 |
| Quotientenregel, 58 | Spezialfall des Satzes von Stokes, 237 |
| Reduktion der Ordnung, 149 | Taylorsche Formel, 101 |
| Satz von Bolzano-Weierstraß, 35 | Transformationssatz, 207 |
| Satz von der impliziten Funktion, 75 | Verallgemeinerter Satz von Beppo Levi,
188 |