

Analysis II - Bachelorversion

Die Mitarbeiter von <http://mitschriebwiki.nomeata.de/>

10. Januar 2017

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
I. Vorwort	5
I.1. Über dieses Skriptum	5
I.2. Wer	5
I.3. Wo	5
1. Der Raum \mathbb{R}^n	7
2. Konvergenz im \mathbb{R}^n	11
3. Grenzwerte bei Funktionen, Stetigkeit	15
4. Partielle Ableitungen	19
5. Differentiation	23
6. Differenzierbarkeitseigenschaften reellwertiger Funktionen	29
7. Quadratische Formen	35
8. Extremwerte	39
9. Der Umkehrsatz	41
10. Implizit definierte Funktionen	45
11. Extremwerte unter Nebenbedingungen	49
12. Wege im \mathbb{R}^n	53
13. Wegintegrale	59
14. Stammfunktionen	63
15. Vorgriff auf Analysis III	67
16. Folgen, Reihen und Potenzreihen in \mathbb{C}	71
17. Normierte Räume, Banachräume, Fixpunktsatz	77
18. Differentialgleichungen: Grundbegriffe	81
19. Lineare Differentialgleichungen 1. Ordnung	83
20. Differentialgleichungen mit getrennten Veränderlichen	87

21. Systeme von Differentialgleichungen 1. Ordnung	91
22. Lineare Systeme	97
23. Homogene lineare Systeme mit konstanten Koeffizienten	103
24. Lineare Differentialgleichungen n-ter Ordnung	107
25. Lineare Differentialgleichungen n-ter Ordnung mit konstanten Koeffizienten	111
A. Satz um Satz (hüpft der Has)	115
Stichwortverzeichnis	117
B. Credits für Analysis II	123

Kapitel I.

Vorwort

I.1. Über dieses Skriptum

Dies ist ein erweiterter Mitschrieb der Vorlesung „Analysis II“ von Herrn Schmoeger im Sommersemester 2005 (bis einschließlich §14) und im Sommersemester 2010 (ab §15) an der Universität Karlsruhe (KIT). Die Mitschriften der Vorlesung werden mit ausdrücklicher Genehmigung von Herrn Schmoeger hier veröffentlicht, Herr Schmoeger ist für den Inhalt nicht verantwortlich.

I.2. Wer

Gestartet wurde das Projekt von Joachim Breitner. Beteiligt am Mitschrieb (von 2005) sind außer Joachim noch Pascal Maillard, Wenzel Jakob und andere. Beteiligt am Mitschrieb (von 2010) sind Rebecca Schwerdt, Philipp Ost und Manuel Kaiser.

I.3. Wo

Alle Kapitel inklusive \LaTeX -Quellen können unter <http://mitschriebwiki.nomeata.de> abgerufen werden. Dort ist ein *Wiki* eingerichtet und von Joachim Breitner um die \LaTeX -Funktionen erweitert. Das heißt, jeder kann Fehler nachbessern und sich an der Entwicklung beteiligen. Auf Wunsch ist auch ein Zugang über *Subversion* möglich.

§ 1.

Der Raum \mathbb{R}^n

Sei $n \in \mathbb{N}$. $\mathbb{R}^n = \{(x_1, \dots, x_n) : x_1, \dots, x_n \in \mathbb{R}\}$ ist mit der üblichen Addition und Skalarmultiplikation ein reeller Vektorraum.

$e_1 := (1, 0, \dots, 0)$, $e_2 := (0, 1, 0, \dots, 0)$, ..., $e_n := (0, \dots, 0, 1) \in \mathbb{R}^n$.

Definition

Seien $x = (x_1, \dots, x_n)$, $y = (y_1, \dots, y_n) \in \mathbb{R}^n$

- (1) $x \cdot y := xy := x_1y_1 + \dots + x_ny_n$ heißt das **Skalar-** oder **Innenprodukt** von x und y .
- (2) $\|x\| = (x \cdot x)^{\frac{1}{2}} = (x_1^2 + \dots + x_n^2)^{\frac{1}{2}}$ heißt die **Norm** oder **Länge** von x .
- (3) $\|x - y\|$ heißt der **Abstand** von x und y .

Beispiele:

- (1) $\|e_j\| = 1$ ($j = 1, \dots, n$)
- (2) $n = 3 : \|(1, 2, 3)\| = (1 + 4 + 9)^{\frac{1}{2}} = \sqrt{14}$

Beachte:

- (1) $x \cdot y \in \mathbb{R}$
- (2) $\|x\|^2 = x \cdot x$

Satz 1.1 (Rechenregeln zur Norm)

Seien $x, y, z \in \mathbb{R}^n$, $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$, $x = (x_1, \dots, x_n)$, $y = (y_1, \dots, y_n)$

- (1) $(\alpha x + \beta y) \cdot z = \alpha(x \cdot z) + \beta(y \cdot z)$, $x(\alpha y + \beta z) = \alpha(xy) + \beta(xz)$
- (2) $\|x\| \geq 0$; $\|x\| = 0 \iff x = 0$
- (3) $\|\alpha x\| = |\alpha| \|x\|$
- (4) $|x \cdot y| \leq \|x\| \|y\|$ **Cauchy-Schwarzsche Ungleichung (CSU)**
- (5) $\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$
- (6) $|\|x\| - \|y\|| \leq \|x - y\|$
- (7) $|x_j| \leq \|x\| \leq |x_1| + |x_2| + \dots + |x_n|$ ($j = 1, \dots, n$)

Beweis

(1), (2), (3) nachrechnen.

(6) Übung.

(4) O.B.d.A: $y \neq 0$ also $\|y\| > 0$. $a := x \cdot x = \|x\|^2$, $b := xy$, $c := \|y\|^2 = y \cdot y$, $\alpha := \frac{b}{c}$. $0 \leq \sum_{j=1}^n (x_j - \alpha y_j)^2 = \sum_{j=1}^n (x_j^2 - 2\alpha x_j y_j + \alpha^2 y_j^2) = a - 2\alpha b + \alpha^2 c = a - 2\frac{b}{c}b + \frac{b^2}{c^2}c = a - \frac{b^2}{c} \implies 0 \leq ac - b^2 \implies b^2 \leq ac \implies (xy)^2 \leq \|x\|^2 \|y\|^2$.

(5) $\|x+y\|^2 = (x+y)(x+y) \stackrel{(1)}{=} x \cdot x + 2xy + y \cdot y = \|x\|^2 + 2xy + \|y\|^2 \leq \|x\|^2 + 2|xy| + \|y\|^2 \stackrel{(4)}{\leq} \|x\|^2 + 2\|x\|\|y\| + \|y\|^2 = (\|x\| + \|y\|)^2$.

(7) $|x_j|^2 = x_j^2 \leq x_1^2 + \dots + x_n^2 = \|x\|^2 \implies 1. \text{ Ungleichung; } x = x_1 e_1 + \dots + x_n e_n \implies \|x\| = \|x_1 e_1 + \dots + x_n e_n\| \stackrel{(5)}{\leq} \|x_1 e_1\| + \dots + \|x_n e_n\| = |x_1| + \dots + |x_n|$ ■

Seien $p, q, l \in \mathbb{N}$. Es sei A eine reelle $p \times q$ -Matrix.

$$A = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \dots & \alpha_{1q} \\ \vdots & & \vdots \\ \alpha_{p1} & \dots & \alpha_{pq} \end{pmatrix} \quad \|A\| := \left(\sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^q \alpha_{jk}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Norm von } A$$

Sei B eine reelle $q \times l$ -Matrix ($\implies AB$ existiert). **Übung:** $\|AB\| \leq \|A\| \|B\|$

Sei $x = (x_1, \dots, x_q) \in \mathbb{R}^q$. $Ax := A \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_q \end{pmatrix}$ (**Matrix-Vektorprodukt**).

Es folgt:

$$\|Ax\| \leq \|A\| \|x\|$$

Definition

Sei $x_0 \in \mathbb{R}^n$, $\delta > 0$, $A, U \subseteq \mathbb{R}^n$.

(1) $U_\delta(x_0) := \{x \in \mathbb{R}^n : \|x - x_0\| < \delta\}$ heißt δ -Umgebung von x_0 oder **offene Kugel** um x_0 mit Radius δ .

(2) U ist eine **Umgebung** von $x_0 : \iff \exists \delta > 0 : U_\delta(x_0) \subseteq U$.

(3) A heißt **beschränkt** : $\iff \exists c \geq 0 : \|a\| \leq c \forall a \in A$.

(4) $x_0 \in A$ heißt ein **innerer Punkt** von $A : \iff \exists \delta > 0 : U_\delta(x_0) \subseteq A$.
 $A^\circ := \{x \in A : x \text{ ist innerer Punkt von } A\}$ heißt das **Innere** von A . Klar: $A^\circ \subseteq A$.

(5) A heißt **offen** : $\iff A = A^\circ$. Zur Übung: A° ist offen.

Beispiele:

(1) offene Kugeln sind offen, \mathbb{R}^n ist offen, \emptyset ist offen.

(2) $A = \{x \in \mathbb{R}^n : \|x - x_0\| \leq \delta\}$, $A^\circ = U_\delta(x_0)$

(3) $n = 2$: $A = \{(x_1, x_2) \in \mathbb{R}^n : x_2 = x_1^2\}$, $A^\circ = \emptyset$

Definition

$A \subseteq \mathbb{R}^n$

- (1) $x_0 \in \mathbb{R}^n$ heißt ein **Häufungspunkt** (HP) von $A : \iff \forall \delta > 0 : (U_\delta(x_0) \setminus \{x_0\}) \cap A \neq \emptyset$.
 $\mathcal{H}(A) := \{x \in \mathbb{R}^n : x \text{ ist Häufungspunkt von } A\}$.
- (2) $x_0 \in \mathbb{R}^n$ heißt ein **Berührungspunkt** (BP) von $A : \iff \forall \delta > 0 : U_\delta(x_0) \cap A \neq \emptyset$.
 $\bar{A} := \{x \in \mathbb{R}^n : x \text{ ist ein Berührungspunkt von } A\}$ heißt der **Abschluss** von A .
 Klar: $A \subseteq \bar{A}$. Zur Übung: $\bar{A} = A \cup \mathcal{H}(A)$.
- (3) A heißt **abgeschlossen** : $\iff A = \bar{A}$. Zur Übung: \bar{A} ist abgeschlossen.
- (4) $x_0 \in \mathbb{R}^n$ heißt ein **Randpunkt** von $A : \iff \forall \delta > 0 : U_\delta(x_0) \cap A \neq \emptyset$ und $U_\delta(x_0) \cap (\mathbb{R}^n \setminus A) \neq \emptyset$. $\partial A := \{x \in \mathbb{R}^n : x \text{ ist ein Randpunkt von } A\}$ heißt der **Rand** von A . Zur Übung: $\partial A = \bar{A} \setminus A^\circ$.

Beispiele:

- (1) \mathbb{R}^n ist abgeschlossen, \emptyset ist abgeschlossen;
 $\bar{A} = \overline{U_\delta(x_0)} = \{x \in \mathbb{R}^n : \|x - x_0\| \leq \delta\}$ (**abgeschlossene Kugel** um x_0 mit Radius δ)
- (2) $\partial U_\delta(x_0) = \{x \in \mathbb{R}^n : \|x - x_0\| = \delta\} = \partial \overline{U_\delta(x_0)}$
- (3) $A = \{(x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2; x_2 = x_1^2\}$. $A = \bar{A} = \partial A$

Satz 1.2 (Offene und abgeschlossene Mengen)

- (1) Sei $A \subseteq \mathbb{R}^n$. A ist abgeschlossen : $\iff \mathbb{R}^n \setminus A$ ist offen.
- (2) Die Vereinigung offener Mengen ist offen.
- (3) Der Durchschnitt abgeschlossener Mengen ist abgeschlossen.
- (4) Sind $A_1, \dots, A_n \subseteq \mathbb{R}^n$ offen $\implies \bigcap_{j=1}^n A_j$ ist offen
- (5) Sind $A_1, \dots, A_n \subseteq \mathbb{R}^n$ abgeschlossen $\implies \bigcup_{j=1}^n A_j$ ist abgeschlossen

Beispiel

($n = 1$). $A_t := (0, 1 + t)$ ($t > 0$). Jedes A_t ist offen. $\bigcap_{t>0} A_t = (0, 1]$ ist nicht offen.

Beweis

- (1) „ \implies “: Sei $x_0 \in \mathbb{R}^n \setminus A$. Annahme: $\forall \delta > 0 : U_\delta(x_0) \not\subseteq \mathbb{R}^n \setminus A \implies \forall \delta > 0 : U_\delta(x_0) \cap A \neq \emptyset \implies x_0 \in \bar{A} \stackrel{\text{Vor.}}{=} A$, Widerspruch
 „ \impliedby “: Annahme: $\subset \bar{A} \implies \exists x_0 \in \bar{A} : x_0 \notin A$; also $x_0 \in \mathbb{R}^n \setminus A$. Voraussetzung $\implies \exists \delta > 0 : U_\delta(x_0) \subseteq \mathbb{R}^n \setminus A \implies U_\delta(x_0) \cap A = \emptyset \implies x_0 \notin \bar{A}$, Widerspruch!
- (2) Sei $(A_\lambda)_{\lambda \in M}$ eine Familie offener Mengen und $V := \bigcup_{\lambda \in M} A_\lambda$. Sei $x_0 \in V \implies \exists \lambda_0 \in M : x_0 \in A_{\lambda_0}$. A_{λ_0} offen $\implies \exists \delta > 0 : U_\delta(x_0) \subseteq A_{\lambda_0} \subseteq V$
- (3) folgt aus (1) und (2) (Komplemente!)
- (4) $D := \bigcap_{j=1}^m A_j$. Sei $x_0 \in D$. $\forall j \in \{1, \dots, m\} : x_0 \in A_j$, also existiert $\delta_j > 0 : U_{\delta_j}(x_0) \subseteq A_j$.
 $\delta := \min\{\delta_1, \dots, \delta_m\} \implies U_\delta(x_0) \subseteq D$
- (5) folgt aus (1) und (4) ■

§ 2.

Konvergenz im \mathbb{R}^n

Sei $(a^{(k)})$ eine Folge in \mathbb{R}^n , also $(a^{(k)}) = (a^{(1)}, a^{(2)}, \dots)$ mit $a^{(k)} = (a_1^{(k)}, \dots, a_n^{(k)}) \in \mathbb{R}^n$. Die Begriffe **Teilfolge** und **Umordnung** definiert man wie in Analysis I. $(a^{(k)})$ heißt beschränkt : $\iff \exists c \geq 0 : \|a^{(k)}\| \leq c \ \forall k \in \mathbb{N}$.

Definition (Grenzwert und Beschränktheit)

$(a^{(k)})$ heißt **konvergent** : $\iff \exists a \in \mathbb{R}^n : \|a^{(k)} - a\| \rightarrow 0 \ (k \rightarrow \infty)$ ($\iff \exists a \in \mathbb{R}^n : \forall \varepsilon > 0 \exists k_0 \in \mathbb{N} : \|a^{(k)} - a\| < \varepsilon \ \forall k \geq k_0$). In diesem Fall heißt a der **Grenzwert** (GW) oder **Limes** von $(a^{(k)})$ und man schreibt: $a = \lim_{k \rightarrow \infty} a^{(k)}$ oder $a^{(k)} \rightarrow a \ (k \rightarrow \infty)$

Beispiel

$(n = 2)$: $a^{(k)} = (\frac{1}{k}, 1 + \frac{1}{k^2})$ (Erinnerung: $\frac{1}{n}$ konvergiert gegen 0); $a := (0, 1)$; $\|a^{(k)} - a\| = \|(\frac{1}{k}, \frac{1}{k^2})\| = (\frac{1}{k^2} + \frac{1}{k^4})^{\frac{1}{2}} \rightarrow 0 \implies a^{(k)} \rightarrow (0, 1)$

Satz 2.1 (Konvergenz)

Sei $(a^{(k)})$ eine Folge in \mathbb{R}^n .

- (1) Sei $a^{(k)} = (a_1^{(k)}, \dots, a_n^{(k)})$ und $a = (a_1, \dots, a_n) \in \mathbb{R}^n$. Dann:

$$a^{(k)} \rightarrow a \ (k \rightarrow \infty) \iff a_1^{(k)} \rightarrow a_1, \dots, a_n^{(k)} \rightarrow a_n \ (k \rightarrow \infty)$$

- (2) Der Grenzwert einer konvergenten Folge ist eindeutig bestimmt.

- (3) Ist $(a^{(k)})$ konvergent $\implies a^{(k)}$ ist beschränkt und jede Teilfolge und jede Umordnung von $(a^{(k)})$ konvergiert gegen $\lim a^{(k)}$.

- (4) Sei $(b^{(k)})$ eine weitere Folge, $a, b \in \mathbb{R}^n$ und $\alpha \in \mathbb{R}$. Es gelte $a^{(k)} \rightarrow a$, $b^{(k)} \rightarrow b$ Dann:

$$\begin{aligned} \|a^{(k)}\| &\rightarrow \|a\| \\ a^{(k)} + b^{(k)} &\rightarrow a + b \\ \alpha a^{(k)} &\rightarrow \alpha a \\ a^{(k)} \cdot b^{(k)} &\rightarrow a \cdot b \end{aligned}$$

- (5) **Bolzano-Weierstraß**: Ist $(a^{(k)})$ beschränkt, so enthält $(a^{(k)})$ eine konvergente Teilfolge.

- (6) **Cauchy-Kriterium**: $(a^{(k)})$ konvergent $\iff \forall \varepsilon > 0 \exists k_0 \in \mathbb{N} : \|a^{(k)} - a^{(l)}\| < \varepsilon \ \forall k, l \geq k_0$

Beweis

(1) 1.1(7) $\implies |a_j^{(k)} - a_j| \leq \|a^{(k)} - a\| \leq \sum_{i=1}^n |a_i^{(k)} - a_i| \implies$ Behauptung.

(2) und

(3) wie in Analysis I.

(4) folgt aus (1)

(5) Sei $(a^{(k)})$ beschränkt. O.B.d.A: $n = 2$. Also $a^{(k)} = (a_1^{(k)}, a_2^{(k)})$ 1.1(7) $\implies |a_1^{(k)}|, |a_2^{(k)}| \leq \|a^{(k)}\| \forall k \in \mathbb{N} \implies (a_1^{(k)}), (a_2^{(k)})$ sind beschränkte Folgen in \mathbb{R} . Analysis 1 $\implies (a_1^{(k)})$ enthält eine konvergente Teilfolge $(a_1^{(k_{j_l})})$. $(a_2^{(k_{j_l})})$ enthält eine konvergente Teilfolge $(a_2^{(k_{j_{l_l})}})$. Analysis 1 $\implies (a_1^{(k_{j_{l_l})}})$ ist konvergent $\xrightarrow{(1)} (a^{(k_{j_{l_l})}})$ konvergiert.

(6) „ \implies “: wie in Analysis 1. „ \longleftarrow “: 1.1(7) $\implies |a_j^{(k)} - a_j^{(l)}| \leq \|a^{(k)} - a^{(l)}\| (j = 1, \dots, n) \implies$ jede Folge $(a_j^{(k)})$ ist eine Cauchyfolge in \mathbb{R} , also konvergent $\xrightarrow{(1)} (a^{(k)})$ konvergiert. ■

Satz 2.2 (Häufungswerte und konvergente Folgen)

Sei $A \subseteq \mathbb{R}^n$

(1) $x_0 \in \mathcal{H}(A) \iff \exists$ Folge $(x^{(k)})$ in $A \setminus \{x_0\}$ mit $x^{(k)} \rightarrow x_0$.

(2) $x_0 \in \bar{A} \iff \exists$ Folge $(x^{(k)})$ in A mit $x^{(k)} \rightarrow x_0$.

(3) A ist abgeschlossen \iff der Grenzwert jeder konvergenten Folge in A gehört zu A .

(4) Die folgenden Aussagen sind äquivalent:

(i) A ist beschränkt und abgeschlossen

(ii) Jede Folge in A enthält eine konvergente Teilfolge, deren Grenzwert zu A gehört.

(iii) A ist kompakt

Beweis

(1) Wie in Analysis 1

(2) Fast wörtlich wie bei (1)

(4) Wörtlich wie in Analysis 1

(3) „ \implies “: Sei $(a^{(k)})$ eine konvergente Folge in A und $x_0 := \lim a^{(k)} \xrightarrow{(2)} x_0 \in \bar{A} \stackrel{\text{Vor.}}{=} A$.
 „ \longleftarrow “: z.z.: $\bar{A} \subseteq A$. Sei $x_0 \in \bar{A} \xrightarrow{(2)} x_0 \in A$. Also: $A = \bar{A}$. ■

Satz 2.3 (Überdeckungen)

$A \subseteq \mathbb{R}^n$ sei abgeschlossen und beschränkt

- (1) Ist $\varepsilon > 0 \implies \exists a^{(1)}, \dots, a^{(m)} \in A : A \subseteq \bigcup_{j=1}^m U_\varepsilon(a^{(j)})$
- (2) \exists abzählbare Teilmenge B von $A : \bar{B} = A$.
- (3) **Überdeckungssatz von Heine-Borel:** Ist $(G_\lambda)_{\lambda \in M}$ eine Familie offener Mengen mit $A \subseteq \bigcup_{\lambda \in M} G_\lambda$, dann existieren $\lambda_1, \dots, \lambda_m \in M : A \subseteq \bigcup_{j=1}^m G_{\lambda_j}$.

Beweis

- (1) Sei $\varepsilon > 0$. Annahme: Die Behauptung ist falsch. Sei $a^{(1)} \in A$. Dann: $A \not\subseteq U_\varepsilon(a^{(1)}) \implies \exists a^{(2)} \in A : a^{(2)} \notin U_\varepsilon(a^{(1)}) \implies \|a^{(2)} - a^{(1)}\| \geq \varepsilon$. $A \not\subseteq U_\varepsilon(a^{(1)}) \cup U_\varepsilon(a^{(2)}) \implies \exists a^{(3)} \in A : \|a^{(3)} - a^{(2)}\| \geq \varepsilon, \|a^{(3)} - a^{(1)}\| \geq \varepsilon$ etc.. Wir erhalten so eine Folge $(a^{(k)})$ in A : $\|a^{(k)} - a^{(l)}\| \geq \varepsilon$ für $k \neq l$. 2.2(4) $\implies (a^{(k)})$ enthält eine konvergente Teilfolge $\xrightarrow{2.1(6)} \exists j_0 \in \mathbb{N} : \|a^{(k_j)} - a^{(k_l)}\| < \varepsilon \forall j, l \geq j_0$, Widerspruch!

- (2) Sei $j \in \mathbb{N}$. $\varepsilon := \frac{1}{j}$. (1) $\implies \exists$ endl. Teilmenge B_j von A mit $(*) A \subseteq \bigcup_{x \in B_j} U_{\frac{1}{j}}(x)$.

$B := \bigcup_{j \in \mathbb{N}} B_j \implies B \subseteq A$ und B ist abzählbar. Dann: $\bar{B} \subseteq \bar{A} \stackrel{\text{Vor.}}{=} A$. Noch zu

zeigen: $A \subseteq \bar{B}$. Sei $x_0 \in A$ und $\delta > 0$: zu zeigen: $U_\delta(x_0) \cap B \neq \emptyset$. Wähle $j \in \mathbb{N}$ so, daß $\frac{1}{j} < \delta$ $(*) \implies \exists x \in B_j \subseteq B : x_0 \in U_{\frac{1}{j}}(x) \implies \|x_0 - x\| < \frac{1}{j} < \delta \implies x \in U_\delta(x_0) \implies x \in U_\delta(x_0) \cap B$.

- (3) Teil 1: Behauptung: $\exists \varepsilon > 0 : \forall a \in A \exists \lambda \in M : U_\varepsilon(a) \subseteq G_\lambda$. Beweis: Annahme: Die Behauptung ist falsch. $\forall k \in \mathbb{N} \exists a^{(k)} \in A : (**) U_{\frac{1}{k}}(a^{(k)}) \not\subseteq G_\lambda \forall \lambda \in M$. 2.2(4) $\implies (a^{(k)})$ enthält eine konvergente Teilfolge $(a^{(k_j)})$ und $x_0 := \lim_{j \rightarrow \infty} a^{(k_j)} \in A \implies \exists \lambda_0 \in M : x_0 \in G_{\lambda_0}$; G_{λ_0} offen $\implies \exists \delta > 0 : U_\delta(x_0) \subseteq G_{\lambda_0}$. $a^{(k_j)} \rightarrow x_0 (j \rightarrow \infty) \implies \exists m_0 \in \mathbb{N} : a^{(m_0)} \in U_{\frac{\delta}{2}}(x_0)$ und $m_0 \geq \frac{2}{\delta}$. Sei $x \in U_{\frac{1}{m_0}}(a^{(m_0)}) \implies \|x - x_0\| = \|x - a^{(m_0)} + a^{(m_0)} - x_0\| \leq \|x - a^{(m_0)}\| + \|a^{(m_0)} - x_0\| \leq \frac{1}{m_0} + \frac{\delta}{2} \leq \frac{\delta}{2} + \frac{\delta}{2} = \delta \implies x \in U_\delta(x_0) \implies x \in G_{\lambda_0}$. Also: $U_{\frac{1}{m_0}}(a^{(m_0)}) \subseteq G_{\lambda_0}$, Widerspruch zu $(**)$!

Teil 2: Sei $\varepsilon > 0$ wie in Teil 1. (1) $\implies \exists a^{(1)}, \dots, a^{(m)} \in A : A \subseteq \bigcup_{j=1}^m U_\varepsilon(a^{(j)})$. Teil 1

$\implies \exists \lambda_j \in M : U_\varepsilon(a^{(j)}) \subseteq G_{\lambda_j} (j = 1, \dots, m) \implies A \subseteq \bigcup_{j=1}^m G_{\lambda_j}$ ■

§ 3.

Grenzwerte bei Funktionen, Stetigkeit

Vereinbarung: Stets in dem Paragraphen: Sei $\emptyset \neq D \subseteq \mathbb{R}^n$ und $f : D \rightarrow \mathbb{R}^m$ eine (**vektorwertige**) Funktion. Für Punkte $(x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2$ schreiben wir auch (x, y) . Für Punkte $(x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3$ schreiben wir auch (x, y, z) . Mit $x = (x_1, \dots, x_n) \in D$ hat f die Form $f(x) = f(x_1, \dots, x_n) = (f_1(x_1, \dots, x_n), \dots, f_m(x_1, \dots, x_n))$, wobei $f_j : D \rightarrow \mathbb{R}$ ($j = 1, \dots, m$). Kurz: $f = (f_1, \dots, f_m)$.

Beispiele:

(1) $n = 2, m = 3$. $f(x, y) = (x + y, xy, xe^y)$; $f_1(x, y) = x + y$, $f_2(x, y) = xy$, $f_3(x, y) = xe^y$.

(2) $n = 3, m = 1$. $f(x, y, z) = 1 + x^2 + y^2 + z^2$

Definition

Sei $x_0 \in \mathcal{H}(D)$.

(1) Sei $y_0 \in \mathbb{R}^m$. $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = y_0 : \iff$ für **jede** Folge $(x^{(k)})$ in $D \setminus \{x_0\}$ mit $x^{(k)} \rightarrow x_0$ gilt: $f(x^{(k)}) \rightarrow y_0$. In diesem Fall schreibt man: $f(x) \rightarrow y_0 (x \rightarrow x_0)$.

(2) $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$ existiert : $\iff \exists y_0 \in \mathbb{R}^m : \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = y_0$.

Beispiele:

(1) $f(x, y) = (x + y, xy, xe^y)$; $\lim_{(x,y) \rightarrow (1,1)} f(x, y) = (2, 1, e)$, denn: ist $((x_k, y_k))$ eine Folge mit

$$(x_k, y_k) \rightarrow (1, 1) \xrightarrow{2.1} x_k \rightarrow 1, y_k \rightarrow 1 \implies x_k + y_k \rightarrow 2, x_k y_k \rightarrow 1, x_k e^{y_k} \rightarrow e \xrightarrow{2.1} (x_k, y_k) \rightarrow (2, 1, e).$$

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

$f(\frac{1}{k}, 0) = 0 \rightarrow 0$ ($k \rightarrow \infty$), $(\frac{1}{k}, 0) \rightarrow (0, 0)$, $f(\frac{1}{k}, \frac{1}{k}) = \frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2}$ ($k \rightarrow \infty$), $(\frac{1}{k}, \frac{1}{k}) \rightarrow (0, 0)$, d.h. $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} f(x, y)$ existiert nicht! **Aber:** $\lim_{x \rightarrow 0} (\lim_{y \rightarrow 0} f(x, y)) = 0 = \lim_{y \rightarrow 0} (\lim_{x \rightarrow 0} f(x, y))$.

Satz 3.1 (Grenzwerte vektorwertiger Funktionen)

(1) Ist $f = (f_1, \dots, f_m)$ und $y_0 = (y_1, \dots, y_m) \in \mathbb{R}^m$, so gilt: $f(x) \rightarrow y_0 (x \rightarrow x_0) \iff f_j(x) \rightarrow y_j (x \rightarrow x_0) (j = 1, \dots, m)$

(2) Die Aussagen des Satzes Ana I, 16.1 und die Aussagen (1) und (2) des Satzes Ana I, 16.2 gelten sinngemäß für Funktionen von mehreren Variablen.

Beweis

(1) folgt aus 2.1

(2) wie in Ana I ■

Definition (Stetigkeit vektorwertiger Funktionen)

(1) Sei $x_0 \in D$. f heißt **stetig** in x_0 gdw. für jede Folge $(x^{(k)})$ in D mit $(x^{(k)}) \rightarrow x_0$ gilt:
 $f(x^{(k)}) \rightarrow f(x_0)$. Wie in Ana I: Ist $x_0 \in D \cap \mathcal{H}(D)$, so gilt: f ist stetig in $x_0 \iff \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$.

(2) f heißt auf D stetig gdw. f in jedem $x \in D$ stetig ist. In diesem Fall schreibt man:
 $f \in C(D, \mathbb{R}^m)$ ($C(D) = C(D, \mathbb{R})$).

(3) f heißt auf D **gleichmäßig** (glm) stetig gdw. gilt:
 $\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 : \|f(x) - f(y)\| < \varepsilon \forall x, y \in D : \|x - y\| < \delta$

(4) f heißt auf D **Lipschitzstetig** gdw. gilt:
 $\exists L \geq 0 : \|f(x) - f(y)\| \leq L\|x - y\| \forall x, y \in D$.

Satz 3.2 (Stetigkeit vektorwertiger Funktionen)

- (1) Sei $x_0 \in D$ und $f = (f_1, \dots, f_m)$. Dann ist f stetig in x_0 gdw. alle f_j stetig in x_0 sind. Entsprechendes gilt für „stetig auf D “, „glm stetig auf D “, „Lipschitzstetig auf D “.
- (2) Die Aussagen des Satzes Ana I, 17.1 gelten sinngemäß für Funktionen von mehreren Variablen.
- (3) Sei $x_0 \in D$. f ist stetig in x_0 gdw. zu jeder Umgebung V von $f(x_0)$ eine Umgebung U von x_0 existiert mit $f(U \cap D) \subseteq V$.
- (4) Sei $\emptyset \neq E \subseteq \mathbb{R}^m$, $f(D) \subseteq E$, $g : E \rightarrow \mathbb{R}^p$ eine Funktion, f stetig in $x_0 \in D$ und g stetig in $f(x_0)$. Dann ist $g \circ f : D \rightarrow \mathbb{R}^p$ stetig in x_0 .

Beweis

(1) folgt aus 2.1

(2) wie in Ana 1

(3) Übung

(4) wie in Ana 1 ■

Beispiele:

$$(1) f(x, y) := \begin{cases} \frac{xy}{x^2+y^2}, & (x, y) \neq (0, 0) \\ 0, & (x, y) = (0, 0) \end{cases} \quad (D = \mathbb{R}^2)$$

$$f\left(\frac{1}{k}, \frac{1}{k}\right) = \frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2} \neq 0 = f(0, 0) \implies f \text{ ist in } (0, 0) \text{ nicht stetig.}$$

$$(2) f(x, y) := \begin{cases} \frac{1}{y} \sin(xy), & y \neq 0 \\ x, & y = 0 \end{cases}$$

Für $y \neq 0$: $|f(x, y) - f(0, 0)| = \frac{1}{|y|} |\sin(xy)| \leq \frac{1}{|y|} |xy| = |x|$.

Also gilt: $|f(x, y) - f(0, 0)| \leq |x| \forall (x, y) \in \mathbb{R}^2 \implies f(x, y) \rightarrow f(0, 0) ((x, y) \rightarrow (0, 0)) \implies f$ ist stetig in $(0, 0)$.

(3) Sei $\Phi \in C^1(\mathbb{R})$, $\Phi(0) = 0$, $\Phi'(0) = 2$ und $a \in \mathbb{R}$.

$$f(x, y) := \begin{cases} \frac{\Phi(a(x^2+y^2))}{x^2+y^2}, & (x, y) \neq (0, 0) \\ \frac{1}{2}, & (x, y) = (0, 0) \end{cases}$$

Für welche $a \in \mathbb{R}$ ist f stetig in $(0, 0)$?

Fall 1: $a = 0$

$f(x, y) = 0 \forall (x, y) \in \mathbb{R}^2 \setminus \{(0, 0)\} \implies f$ ist in $(0, 0)$ nicht stetig.

Fall 2: $a \neq 0$

$r := x^2 + y^2$. $(x, y) \rightarrow (0, 0) \iff \|(x, y)\| \rightarrow 0 \iff r \rightarrow 0$, Sei $(x, y) \neq (0, 0)$. Dann gilt:

$$f(x, y) = \frac{\Phi(ar)}{r} = \frac{\Phi(ar) - \Phi(0)}{r - 0} = a \frac{\Phi(ar) - \Phi(0)}{ar - 0} \xrightarrow{r \rightarrow 0} a\Phi'(0) = 2a. \text{ Das heißt: } f(x, y) \rightarrow 2a ((x, y) \rightarrow (0, 0)).$$

Daher gilt: f ist stetig in $(0, 0) \iff 2a = \frac{1}{2} \iff a = \frac{1}{4}$.

Definition (Beschränktheit einer Funktion)

$f : D \rightarrow \mathbb{R}^m$ heißt **beschränkt** (auf D) gdw. $f(D)$ beschränkt ist ($\iff \exists c \geq 0 : \|f(x)\| \leq c \forall x \in D$).

Satz 3.3 (Funktionen auf beschränkten und abgeschlossenen Intervallen)

D sei beschränkt und abgeschlossen und es sei $f \in C(D, \mathbb{R}^m)$.

- (1) $f(D)$ ist beschränkt und abgeschlossen.
- (2) f ist auf D gleichmäßig stetig.
- (3) Ist f injektiv auf D , so gilt: $f^{-1} \in C(f(D), \mathbb{R}^n)$.
- (4) Ist $m = 1$, so gilt: $\exists a, b \in D : f(a) \leq f(x) \leq f(b) \forall x \in D$.

Beweis

wie in Ana I. ■

Satz 3.4 (Fortsetzungssatz von Tietze)

Sei D abgeschlossen und $f \in C(D, \mathbb{R}^m) \implies \exists F \in C(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m) : F = f$ auf D .

Satz 3.5 (Lineare Funktionen und Untervektorräume von \mathbb{R}^n)

- (1) Ist $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ und *linear*, so gilt: f ist Lipschitzstetig auf \mathbb{R}^n , insbesondere gilt: $f \in C(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m)$.
- (2) Ist U ein Untervektorraum von \mathbb{R}^n , so ist U abgeschlossen.

Beweis

- (1) Aus der Linearen Algebra ist bekannt: Es gibt eine $(m \times n)$ -Matrix A mit $f(x) = Ax$. Für $x, y \in \mathbb{R}^n$ gilt: $\|f(x) - f(y)\| = \|Ax - Ay\| = \|A(x - y)\| \leq \|A\| \cdot \|x - y\|$
- (2) Aus der Linearen Algebra ist bekannt: Es gibt einen UVR V von \mathbb{R}^n mit: $\mathbb{R}^n = U \oplus V$. Definiere $P : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ wie folgt: zu $x \in \mathbb{R}^n$ existieren eindeutig bestimmte $u \in U$, $v \in V$ mit: $x = u + v$; $P(x) := u$.

Nachrechnen: P ist linear.

$P(\mathbb{R}^n) = U$ (Kern $P = V$, $P^2 = P$). Sei $(u^{(k)})$ eine konvergente Folge in U und $x_0 := \lim u^{(k)}$, z.z.: $x_0 \in U$.

Aus (1) folgt: P ist stetig $\implies P(u^{(k)}) \rightarrow P(x_0) \implies x_0 = \lim u^{(k)} = \lim P(u^{(k)}) = P(x_0) \in P(\mathbb{R}^n) = U$. ■

Definition (Abstand eines Vektor zu einer Menge)

Sei $\emptyset \neq A \subseteq \mathbb{R}^n$, $x \in \mathbb{R}^n$. $d(x, A) := \inf\{\|x - a\| : a \in A\}$ heißt der **Abstand** von x und A .

Klar: $d(a, A) = 0 \ \forall a \in A$.

Satz 3.6 (Eigenschaften des Abstands zwischen Vektor und Menge)

- (1) $|d(x, A) - d(y, A)| \leq \|x - y\| \ \forall x, y \in \mathbb{R}^n$.
- (2) $d(x, A) = 0 \iff x \in \overline{A}$.

Beweis

- (1) Seien $x, y \in \mathbb{R}^n$. Sei $a \in A$. $d(x, A) \leq \|x - a\| = \|x - y + y - a\| \leq \|x - y\| + \|y - a\|$
 $\implies d(x, A) - \|x - y\| \leq \|y - a\| \ \forall a \in A$
 $\implies d(x, A) - \|x - y\| \leq d(y, A)$
 $\implies d(x, A) - d(y, A) \leq \|x - y\|$

Genauso: $d(y, A) - d(x, A) \leq \|y - x\| = \|x - y\| \implies \text{Beh.}$

- (2) Der Beweis erfolgt durch Implikation in beiden Richtungen:

„ \Leftarrow “: Sei $x \in \overline{A} \xrightarrow{2.2} \exists \text{ Folge } (a^{(k)}) \text{ in } A : a^{(k)} \rightarrow x \xrightarrow{(1)} d(a^{(k)}, A) \rightarrow d(x, A) \implies d(x, A) = 0$.

„ \Rightarrow “: Sei $d(x, A) = 0$. $\forall k \in \mathbb{N} \exists a^{(k)} \in A : \|a^{(k)} - x\| < \frac{1}{k} \implies a^{(k)} \rightarrow x \xrightarrow{2.2} x \in \overline{A}$. ■

§ 4.

Partielle Ableitungen

Stets in diesem Paragraphen: $\emptyset \neq D \subseteq \mathbb{R}^n$, D sei offen und $f : D \rightarrow \mathbb{R}$ eine reellwertige Funktion. $x_0 = (x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \in D$. Sei $j \in \{1, \dots, n\}$ (fest).

Die Gerade durch x_0 mit der Richtung e_j ist gegeben durch folgende Menge: $\{x_0 + te_j : t \in \mathbb{R}\}$. D offen $\implies \exists \delta > 0 : U_\delta(x_0) \subseteq D$. $\|x_0 + te_j - x_0\| = \|te_j\| = |t| \implies x_0 + te_j \in D$ für $t \in (-\delta, \delta)$. $g(t) := f(x_0 + te_j)$ ($t \in (-\delta, \delta)$) Es ist $g(t) = f(x_1^{(0)}, \dots, x_{j-1}^{(0)}, x_j^{(0)} + t, x_{j+1}^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$

Definition

f heißt in x_0 **partiell differenzierbar** nach $x_j : \iff$ es existiert der Grenzwert

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + te_j) - f(x_0)}{t}$$

und ist $\in \mathbb{R}$. In diesem Fall heißt obiger Grenzwert die **partielle Ableitung von f in x_0 nach x_j** und man schreibt für diesen Grenzwert:

$$f_{x_j}(x_0) \text{ oder } \frac{\partial f}{\partial x_j}(x_0)$$

Im Falle $n = 2$ oder $n = 3$ schreibt man f_x, f_y, f_z bzw. $\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z}$

Beispiele:

$$(1) \quad f(x, y, z) = xy + z^2 + e^{x+y}; \quad f_x(x, y, z) = y + e^{x+y} = \frac{\partial f}{\partial x}(x, y, z). \quad f_x(1, 1, 2) = 1 + e^2.$$

$$f_y(x, y, z) = x + e^{x+y}. \quad f_z(x, y, z) = 2z = \frac{\partial f}{\partial z}(x, y, z).$$

$$(2) \quad f(x) = f(x_1, \dots, x_n) = \|x\| = \sqrt{x_1^2 + \dots + x_n^2}.$$

$$\text{Sei } x \neq 0: f_{x_j}(x) = \frac{1}{2\sqrt{x_1^2 + \dots + x_n^2}} 2x_j = \frac{x_j}{\|x\|}$$

Sei $x = 0$: $\frac{f(t, 0, \dots, 0) - f(0, 0, \dots, 0)}{t} = \frac{|t|}{t} = \begin{cases} 1, & t > 0 \\ -1, & t < 0 \end{cases} \implies f$ ist in $(0, \dots, 0)$ nicht partiell differenzierbar nach x_1 . Analog: f ist in $(0, \dots, 0)$ nicht partiell differenzierbar nach x_2, \dots, x_n

$$(3) \quad f(x, y) = \begin{cases} \frac{xy}{x^2 + y^2}, & (x, y) \neq (0, 0) \\ 0, & (x, y) = (0, 0) \end{cases}$$

$\frac{f(t, 0) - f(0, 0)}{t} = 0 \rightarrow 0 \quad (t \rightarrow 0) \implies f$ ist in $(0, 0)$ partiell differenzierbar nach x und $f_x(0, 0) = 0$. Analog: f ist in $(0, 0)$ partiell differenzierbar nach y und $f_y(0, 0) = 0$. Aber: f ist in $(0, 0)$ nicht stetig.

Definition

- (1) f heißt in x_0 **partiell differenzierbar** : $\iff f$ ist in x_0 partiell differenzierbar nach allen Variablen x_1, \dots, x_n . In diesem Fall heißt $\text{grad } f(x_0) := \nabla f(x_0) := (f_{x_1}(x_0), \dots, f_{x_n}(x_0))$ der **Gradient** von f in x_0 .
- (2) f ist auf D **partiell differenzierbar** nach x_j oder f_{x_j} ist auf D vorhanden : $\iff f$ ist in jedem $x \in D$ partiell differenzierbar nach x_j . In diesem Fall wird durch $x \mapsto f_{x_j}(x)$ eine Funktion $f_{x_j} : D \rightarrow \mathbb{R}$ definiert die **partielle Ableitung** von f auf D nach x_j .
- (3) f heißt **partiell differenzierbar** auf D : $\iff f_{x_1}, \dots, f_{x_n}$ sind auf D vorhanden.
- (4) f heißt auf D **stetig partiell differenzierbar** : $\iff f$ ist auf D partiell differenzierbar und f_{x_1}, \dots, f_{x_n} sind auf D stetig. In diesem Fall schreibt man $f \in C^1(D, \mathbb{R})$.

Beispiele:

- (1) Sei f wie in obigem Beispiel (3). f ist in $(0, 0)$ partiell differenzierbar und $\text{grad } f(0, 0) = (0, 0)$
- (2) Sei f wie in obigem Beispiel (2). f ist auf $\mathbb{R}^n \setminus \{0\}$ partiell differenzierbar und $\text{grad } f(x) = (\frac{x_1}{\|x\|}, \dots, \frac{x_n}{\|x\|}) = \frac{1}{\|x\|} x$ ($x \neq 0$)

Definition

Seien $j, k \in \{1, \dots, n\}$ und f_{x_j} sei auf D vorhanden. Ist f_{x_j} in $x_0 \in D$ partiell differenzierbar nach x_k , so heißt

$$f_{x_j x_k}(x_0) := \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_k}(x_0) := (f_{x_j})_{x_k}(x_0)$$

die **partielle Ableitung zweiter Ordnung** von f in x_0 nach x_j und x_k . Ist $k = j$, so schreibt man:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_j^2}(x_0) = \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_j}(x_0)$$

Entsprechend definiert man partielle Ableitungen höherer Ordnung (soweit vorhanden).

Schreibweisen: $f_{xxyz} = \frac{\partial^5 f}{\partial x^2 \partial y \partial z^2}$, vergleiche: $\frac{\partial^{180} f}{\partial x^{179} \partial y}$

Beispiele:

- (1) $f(x, y) = xy + y^2$, $f_x(x, y) = y$, $f_{xx} = 0$, $f_y = x + 2y$, $f_{yy} = 2$, $f_{xy} = 1$, $f_{yx} = 1$.
- (2) $f(x, y, z) = xy + z^2 e^x$, $f_x = y + z^2 e^x$, $f_{xy} = 1$, $f_{xyz} = 0$. $f_z = 2z e^x$, $f_{zy} = 0$, $f_{zyx} = 0$.
- (3) $f(x, y) = \begin{cases} \frac{xy(x^2 - y^2)}{x^2 + y^2}, & (x, y) \neq (0, 0) \\ 0, & (x, y) = (0, 0) \end{cases}$

Übungsblatt: $f_{xy}(0, 0)$, $f_{yx}(0, 0)$ existieren, aber $f_{xy}(0, 0) \neq f_{yx}(0, 0)$

Definition

Sei $m \in \mathbb{N}$. f heißt auf D **m -mal stetig partiell differenzierbar** : \iff alle partiellen Ableitungen von f der Ordnung $\leq m$ sind auf D vorhanden und auf D stetig. In diesem Fall schreibt man: $f \in C^m(D, \mathbb{R})$

$$C^0(D, \mathbb{R}) := C(D, \mathbb{R}), \quad C^\infty(D, \mathbb{R}) := \bigcap_{k \in \mathbb{N}_0} C^k(D, \mathbb{R})$$

Satz 4.1 (Satz von Schwarz)

Es sei $f \in C^2(D, \mathbb{R})$, $x_0 \in D$ und $j, k \in \{1, \dots, n\}$. Dann: $f_{x_j x_k}(x_0) = f_{x_k x_j}(x_0)$

Satz 4.2 (Folgerung)

Ist $f \in C^m(D, \mathbb{R})$, so sind die partiellen Ableitungen von f der Ordnung $\leq m$ unabhängig von der Reihenfolge der Differentiation.

Beweis

O.B.d.A: $n = 2$ und $x_0 = (0, 0)$. Zu zeigen: $f_{xy}(0, 0) = f_{yx}(0, 0)$. D offen $\implies \exists \delta > 0 : U_\delta(0, 0) \subseteq D$. Sei $(x, y) \in U_\delta(0, 0)$ und $x \neq 0 \neq y$.

$$\nabla := f(x, y) - f(x, 0) - (f(0, y) - f(0, 0)), \quad \varphi(t) := f(t, y) - f(t, 0)$$

für t zwischen 0 und x . φ ist differenzierbar und $\varphi'(t) = f_x(t, y) - f_x(t, 0)$. $\varphi(x) - \varphi(0) = \nabla$. MWS, Analysis 1 $\implies \exists \xi = \xi(x, y)$ zwischen 0 und x : $\nabla = x\varphi'(\xi) = x(f_x(\xi, y) - f_x(\xi, 0))$. $g(s) := f_x(\xi, s)$ für s zwischen 0 und y ; g ist differenzierbar und $g'(s) = f_{xy}(\xi, s)$. Es ist $\nabla = x(g(y) - g(0)) \stackrel{\text{MWS}}{=} xyg'(\eta)$, $\eta = \eta(x, y)$ zwischen 0 und y . $\implies \nabla = xyf_{xy}(\xi, \eta)$. (1)
 $\psi(t) := f(x, t) - f(0, t)$, t zwischen 0 und y . $\psi'(t) = f_y(x, t) - f_y(0, t)$. $\nabla = \psi(y) - \psi(0)$. Analog: $\exists \bar{\eta} = \bar{\eta}(x, y)$ und $\bar{\xi} = \bar{\xi}(x, y)$, $\bar{\eta}$ zwischen 0 und y , $\bar{\xi}$ zwischen 0 und x . $\nabla = xyf_{yx}(\bar{\xi}, \bar{\eta})$. (2)

Aus (1), (2) und $xy \neq 0$ folgt $f_{xy}(\xi, \eta) = f_{yx}(\bar{\xi}, \bar{\eta})$. $(x, y) \rightarrow (0, 0) \implies \xi, \bar{\xi}, \eta, \bar{\eta} \rightarrow 0 \xrightarrow{f \in C^2} f_{xy}(0, 0) = f_{yx}(0, 0)$ ■

§ 5.

Differentiation

Vereinbarung: Stets in dem Paragraphen: $\emptyset \neq D \subseteq \mathbb{R}^n$, D offen und $f : D \rightarrow \mathbb{R}^m$ eine Funktion, also $f = (f_1, \dots, f_m)$

Definition

- (1) Sei $k \in \mathbb{N}$. $f \in C^k(D, \mathbb{R}^m) : \iff f_j \in C^k(D, \mathbb{R})$ ($j = 1, \dots, m$)
- (2) Sei $x_0 \in D$. f heißt **partiell differenzierbar** in $x_0 : \iff$ jedes f_j ist in x_0 partiell differenzierbar. In diesem Fall heißt

$$\frac{\partial f}{\partial x}(x_0) := \frac{\partial(f_1, \dots, f_m)}{\partial(x_1, \dots, x_n)} := J_f(x_0) := \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(x_0) & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n}(x_0) \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1}(x_0) & \cdots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n}(x_0) \end{pmatrix}$$

die **Jacobi-** oder **Funktionalmatrix** von f in x_0 .

Beachte:

- (1) $J_f(x_0)$ ist eine $(m \times n)$ -Matrix.
- (2) Ist $m = 1$ folgt $J_f(x_0) = \text{grad } f(x_0)$.

Erinnerung: Sei $I \subseteq \mathbb{R}$ ein Intervall, $\varphi : I \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion, $x_0 \in I$. φ ist in x_0 differenzierbar

$$\begin{aligned} & \stackrel{\text{ANA}^1}{\iff} \exists a \in \mathbb{R} : \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\varphi(x_0 + h) - \varphi(x_0)}{h} = a \\ & \iff \exists a \in \mathbb{R} : \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\varphi(x_0 + h) - \varphi(x_0) - ah}{h} = 0 \\ & \iff \exists a \in \mathbb{R} : \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\varphi(x_0 + h) - \varphi(x_0) - ah}{|h|} = 0 \end{aligned}$$

Definition

- (1) Sei $x_0 \in D$. f heißt **differenzierbar** (db) in $x_0 : \iff \exists (m \times n)$ -Matrix A , sodass gilt:

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0) - Ah}{\|h\|} = 0 \quad (*)$$

- (2) f heißt differenzierbar auf $D : \iff f$ ist in jedem $x \in D$ differenzierbar.

Bemerkungen:

- (1) f ist differenzierbar in $x_0 \iff \exists (m \times n)$ -Matrix A :

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0) - A(x - x_0)}{\|x - x_0\|} = 0$$

(2) Ist $m = 1$, so gilt: f ist differenzierbar in x_0

$$\iff \exists a \in \mathbb{R}^n : \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0) - ah}{\|h\|} = 0 \quad (**)$$

(3) Aus 2.1 folgt: f ist differenzierbar in $x_0 \iff$ jedes f_j ist differenzierbar in x_0 .

Satz 5.1 (Differenzierbarkeit und Stetigkeit)

f sei in $x_0 \in D$ differenzierbar

(1) f ist in x_0 stetig

(2) f ist in x_0 partiell differenzierbar und die Matrix A in (*) ist eindeutig bestimmt:
 $A = J_f(x_0)$. $f'(x_0) := A = J_f(x_0)$ (**Ableitung** von f in x_0).

Beweis

Sei A wie in (*), $A = (a_{jk})$, $\varrho(h) := \frac{f(x_0+h) - f(x_0) - Ah}{\|h\|}$, also: $\varrho(h) \rightarrow 0$ ($h \rightarrow 0$). Sei $\varrho = (\varrho_1, \dots, \varrho_m)$. 2.1 $\implies \varrho_j(h) \rightarrow 0$ ($h \rightarrow 0$) ($j = 1, \dots, m$)

$$(1) \quad f(x_0 + h) = f(x_0) + \underbrace{Ah}_{\xrightarrow{3.5} 0} + \underbrace{\|h\|\varrho(h)}_{\rightarrow 0 \text{ (} h \rightarrow 0 \text{)}} \rightarrow f(x_0) \quad (h \rightarrow 0)$$

(2) Sei $j \in \{1, \dots, m\}$ und $k \in \{1, \dots, n\}$. Zu zeigen: f_j ist partiell differenzierbar und $\frac{\partial f_j}{\partial x_k}(x_0) = a_{jk}$. $\varrho_j(h) = \frac{1}{\|h\|}(f_j(x_0 + h) - f_j(x_0) - (a_{j1}, \dots, a_{jn}) \cdot h) \rightarrow 0$ ($h \rightarrow 0$). Für $t \in \mathbb{R}$ sei $h = te_k \implies \varrho_j(h) = \frac{1}{|t|}(f_j(x_0 + te_k) - a_{jk}t) \rightarrow 0$ ($t \rightarrow 0$) $\implies \left| \frac{f_j(x_0 + te_k) - f_j(x_0)}{t} - a_{jk} \right| \rightarrow 0$ ($t \rightarrow 0$) $\implies f_j$ ist in x_0 partiell differenzierbar und $\frac{\partial f_j}{\partial x_k}(x_0) = a_{jk}$. ■

Beispiele:

(1)

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

Bekannt: f ist in $(0, 0)$ **nicht** stetig, aber partiell differenzierbar und $\text{grad } f(0, 0) = (0, 0)$
 5.1 $\implies f$ ist in $(0, 0)$ **nicht** differenzierbar.

(2)

$$f(x, y) = \begin{cases} (x^2 + y^2) \sin \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} & , \text{ falls } (x, y) \neq (0, 0) \\ 0 & , \text{ falls } (x, y) = (0, 0) \end{cases}$$

Für $(x, y) \neq (0, 0)$: $|f(x, y)| = (x^2 + y^2) \left| \sin \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right| \leq x^2 + y^2 \xrightarrow{(x,y) \rightarrow (0,0)} 0 \implies f$
 ist in $(0, 0)$ stetig. $\frac{f(t, 0) - f(0, 0)}{t} = \frac{1}{t} t^2 \sin \frac{1}{|t|} = t \sin \frac{1}{|t|} \rightarrow 0$ ($t \rightarrow 0$) $\implies f$ ist in $(0, 0)$
 partiell differenzierbar nach x und $f_x(0, 0) = 0$. Analog: f ist in $(0, 0)$ partiell differen-
 zierbar nach y und $f_y(0, 0) = 0$. $\varrho(h) = \frac{1}{\|h\|} f(h) \stackrel{h=(h_1, h_2)}{=} \frac{1}{\sqrt{h_1^2 + h_2^2}} (h_1^2 + h_2^2) \sin \frac{1}{\sqrt{h_1^2 + h_2^2}} =$

$$\sqrt{h_1^2 + h_2^2} \sin \underbrace{\frac{1}{\sqrt{h_1^2 + h_2^2}}}_{\text{beschränkt}} \rightarrow 0 \quad (h \rightarrow 0) \implies f \text{ ist differenzierbar in } (0,0) \text{ und } f'(0,0) = \text{grad } f(0,0) = (0,0)$$

(3)

$$f(x, y) := \begin{cases} \frac{x^3}{x^2 + y^2} & , \text{ falls } (x, y) \neq (0, 0) \\ 0 & , \text{ falls } (x, y) = (0, 0) \end{cases}$$

Übung: f ist in $(0,0)$ stetig.

$$\frac{f(t,0)-f(0,0)}{t} = \frac{1}{t} \frac{t^3}{t^2} = 1 \rightarrow 1 \quad (t \rightarrow 0). \quad \frac{f(0,t)-f(0,0)}{t} = 0 \rightarrow 0 \quad (t \rightarrow 0).$$

$\implies f$ ist in $(0,0)$ partiell db und $\text{grad } f(0,0) = (1,0)$.

$$\text{Für } h = (h_1, h_2) \neq (0,0) : \rho(h) = \frac{1}{\|h\|} (f(h) - f(0,0) - \text{grad } f(0,0) \cdot h) = \frac{1}{\|h\|} \left(\frac{h_1^3}{h_1^2 + h_2^2} - h_1 \right) = \frac{1}{\|h\|} \frac{-h_1 h_2^2}{h_1^2 + h_2^2} = \frac{-h_1 h_2^2}{(h_1^2 + h_2^2)^{3/2}}.$$

Für $h_2 = h_1 > 0 : \rho(h) = \frac{-h_1^3}{(\sqrt{2})^3 h_1^3} = -\frac{1}{(\sqrt{2})^3} \implies \rho(h) \not\rightarrow 0 \quad (h \rightarrow 0) \implies f$ ist in $(0,0)$ nicht db.

Satz 5.2 (Stetigkeit aller partiellen Ableitungen)

Sei $x_0 \in D$ und alle partiellen Ableitungen $\frac{\partial f_j}{\partial x_k}$ seien auf D vorhanden und in x_0 stetig ($j = 1, \dots, m, k = 1, \dots, n$). Dann ist f in x_0 db.

Beweis

O.B.d.A: $m = 1$ und $x_0 = 0$. Der Übersicht wegen sei $n = 2$.

Für $h = (h_1, h_2) \neq (0,0) :$

$$\rho(h) := \frac{1}{\|h\|} (f(h) - f(0,0) - \underbrace{(h_1 f_x(0,0) + h_2 f_y(0,0))}_{=\text{grad } f(0,0) \cdot h})$$

$$f(h) - f(0) = f(h_1, h_2) - f(0,0) = \underbrace{f(h_1, h_2) - f(0, h_2)}_{=: \Delta_1} + \underbrace{f(0, h_2) - f(0,0)}_{=: \Delta_2}$$

$$\varphi(t) := f(t, h_2), \quad t \text{ zwischen } 0 \text{ und } h_1 \implies \Delta_1 = \varphi(h_1) - \varphi(0), \quad \varphi'(t) = f_x(t, h_2)$$

Aus dem Mittelwertsatz aus Analysis I folgt: $\exists \xi = \xi(h)$ zw. 0 und $h_1 : \Delta_1 = h_1 \varphi'(\xi) = h_1 f_x(\xi, h_2)$
 $\exists \eta = \eta(h)$ zw. 0 und $h_2 : \Delta_2 = h_2 \varphi'(\eta) = h_2 f_y(\eta, h_2)$

$$\implies \rho(h) := \frac{1}{\|h\|} (h_1 f_x(\xi, h_2) + h_2 f_y(\eta, h_2) - (h_1 f_x(0,0) + h_2 f_y(0,0))) \\ = \frac{1}{\|h\|} h \underbrace{(f_x(\xi, h_2) - f_x(0,0), f_y(\eta, h_2) - f_y(0,0))}_{=: v(h)} = \frac{1}{\|h\|} h \cdot v(h)$$

$$\implies |\rho(h)| = \frac{1}{\|h\|} |h \cdot v(h)| \stackrel{\text{CSU}}{\leq} \frac{1}{\|h\|} \|h\| \|v(h)\| = \|v(h)\|$$

f_x, f_y sind stetig in $(0,0) \implies v(h) \rightarrow 0 \ (h \rightarrow 0) \implies \rho(h) \rightarrow 0 \ (h \rightarrow 0)$ ■

Folgerung 5.3

Ist $f \in C^1(D, \mathbb{R}^m) \implies f$ ist auf D db.

Definition

Sei $k \in \mathbb{N}$ und $f \in C^k(D, \mathbb{R}^m)$. Dann heißt f **auf D k -mal stetig db.**

Beispiele:

$$(1) \ f(x, y, z) = (x^2 + y, xyz). \ J_f(x, y, z) = \begin{pmatrix} 2x & 1 & 0 \\ yz & xz & xy \end{pmatrix} \implies f \in C^1(\mathbb{R}^3, \mathbb{R}^2)$$

$$\xrightarrow{5.3} \ f \text{ ist auf } \mathbb{R}^3 \text{ db und } f'(x, y, z) = J_f(x, y, z) \ \forall (x, y, z) \in \mathbb{R}^3.$$

$$(2) \ \text{Sei } f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m \text{ linear, es ex. also eine } (m \times n)\text{-Matrix } A: f(x) = Ax \ (x \in \mathbb{R}^n).$$

Für $x_0 \in \mathbb{R}^n$ und $h \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$ gilt:

$$\rho(h) = \frac{1}{\|h\|} (f(x_0 + h) - f(x_0) - Ah) = \frac{1}{\|h\|} (f(x_0) + f(h) - f(x_0) - f(h)) = 0.$$

Also: f ist auf \mathbb{R}^n db und $f'(x) = A \ \forall x \in \mathbb{R}^n$. Insbesondere ist $f \in C^1(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m)$.

$$(2.1) \ n = m \text{ und } f(x) = x = Ix \ (I = (m \times n)\text{-Einheitsmatrix}). \text{ Dann: } f'(x) = I \ \forall x \in \mathbb{R}^n.$$

$$(2.2) \ m = 1: \exists a \in \mathbb{R}: f(x) = ax \ (x \in \mathbb{R}^n) \text{ (Linearform)}. \ f'(x) = a \ \forall x \in \mathbb{R}^n.$$

(3)

$$f(x, y) = \begin{cases} (x^2 + y^2) \sin \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} & , \text{ falls } (x, y) \neq (0, 0) \\ 0 & , \text{ falls } (x, y) = (0, 0) \end{cases}$$

Bekannt: f ist in $(0,0)$ db. Übungsblatt: f_x, f_y sind in $(0,0)$ *nicht* stetig.

$$(4) \ \text{Sei } I \subseteq \mathbb{R} \text{ ein Intervall und } g = (g_1, \dots, g_m): I \rightarrow \mathbb{R}^m; \ g_1, \dots, g_m: I \rightarrow \mathbb{R}.$$

g ist in $t_0 \in I$ db $\iff g_1, \dots, g_m$ sind in $t_0 \in I$ db. In diesem Fall gilt: $g'(t_0) = (g'_1(t_0), \dots, g'_m(t_0))$.

$$(4.1) \ m = 2: g(t) = (\cos t, \sin t), \ t \in [0, 2\pi]. \ g'(t) = (-\sin t, \cos t).$$

$$(4.2) \ \text{Seien } a, b \in \mathbb{R}, \ g(t) = a + t(b - a), \ t \in [0, 1], \ g'(t) = b - a.$$

Satz 5.4 (Kettenregel)

f sei in $x_0 \in D$ db, $\emptyset \neq E \subseteq \mathbb{R}^m$, E sei offen, $f(D) \subseteq E$ und $g: E \rightarrow \mathbb{R}^p$ sei db in $y_0 := f(x_0)$. Dann ist $g \circ f: D \rightarrow \mathbb{R}^p$ db in x_0 und

$$(g \circ f)'(x_0) = g'(f(x_0)) \cdot f'(x_0) \text{ (Matrizenprodukt)}$$

Beweis

$A := f'(x_0)$, $B := g'(y_0) = g'(f(x_0))$, $h := g \circ f$.

$$\tilde{g}(y) = \begin{cases} \frac{g(y) - g(y_0) - B(y - y_0)}{\|y - y_0\|} & , \text{ falls } y \in E \setminus \{y_0\} \\ 0 & , \text{ falls } y = y_0 \end{cases}$$

g ist db in $y_0 \implies \tilde{g}(y) \rightarrow 0 \ (y \rightarrow y_0)$. Aus Satz 5.1 folgt, dass f stetig ist in $x_0 \implies f(x) \rightarrow f(x_0) = y_0 \ (x \rightarrow x_0) \implies \tilde{g}(f(x)) \rightarrow 0 \ (x \rightarrow x_0)$

Es ist $g(y) - g(y_0) = \|y - y_0\| \tilde{g}(y) = B(y - y_0) \ \forall y \in E$.

$$\begin{aligned} \frac{h(x) - h(x_0) - BA(x - x_0)}{\|x - x_0\|} &= \frac{1}{\|x - x_0\|} (g(f(x)) - g(f(x_0)) - BA(x - x_0)) \\ &= \frac{1}{\|x - x_0\|} (\|f(x) - f(x_0)\| \tilde{g}(f(x)) + B(f(x) - f(x_0)) - BA(x - x_0)) \\ &= \underbrace{\frac{\|f(x) - f(x_0)\|}{\|x - x_0\|}}_{=: D(x)} \underbrace{\tilde{g}(f(x))}_{\rightarrow 0} + B \underbrace{\left(\frac{f(x) - f(x_0) - A(x - x_0)}{\|x - x_0\|} \right)}_{\substack{f \xrightarrow{\text{db}} 0 \ (x \rightarrow x_0) \\ \xrightarrow{3.5} 0 \ (x \rightarrow x_0)}} \end{aligned}$$

Noch zu zeigen: $D(x)$ bleibt in der „Nähe“ von x_0 beschränkt.

$$\begin{aligned} 0 \leq D(x) &= \frac{\|f(x) - f(x_0) - A(x - x_0) + A(x - x_0)\|}{\|x - x_0\|} \\ &= \underbrace{\frac{\|f(x) - f(x_0) - A(x - x_0)\|}{\|x - x_0\|}}_{\rightarrow 0 \ (x \rightarrow x_0)} + \underbrace{\frac{\|A(x - x_0)\|}{\|x - x_0\|}}_{\leq \|A\|}. \end{aligned}$$

■

Wichtigster Fall $g = g(x_1, \dots, x_m)$ reellwertig,

$$\begin{aligned} h(x) &= h(x_1, \dots, x_n) \\ &= g(f_1(x_1, \dots, x_n), f_2(x_1, \dots, x_n), \dots, f_m(x_1, \dots, x_n)) \\ &= (g \circ f)(x) \end{aligned}$$

$$h_{x_j}(x) = g_{x_1}(f(x)) \frac{\partial f_1}{\partial x_j}(x) + g_{x_2}(f(x)) \frac{\partial f_2}{\partial x_j}(x) + \dots + g_{x_m}(f(x)) \frac{\partial f_m}{\partial x_j}(x)$$

Beispiel

$$g = g(x, y, z), \ h(x, y) = g(xy, x^2 + y, x \sin y) = g(f(x, y)).$$

$$h_x(x, y) = g_x(f(x, y))y + g_y(f(x, y))2x + g_z(f(x, y)) \sin y.$$

$$h_y(x, y) = g_x(f(x, y))x + g_y(f(x, y))1 + g_z(f(x, y))x \cos y.$$

Hilfssatz

Es sei A eine $(m \times n)$ -Matrix (reell), es sei B eine $(n \times m)$ -Matrix (reell) und es gelte

(i) $BA = I (= (n \times n)\text{-Einheitsmatrix})$ und

(ii) $AB = \tilde{I} (= (m \times m)\text{-Einheitsmatrix})$

Dann: $m = n$.

Beweis

$\Phi(x) := Ax \ (x \in \mathbb{R}^n)$. Lin. Alg. $\implies \Phi$ ist linear, $\Phi : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$. $\xrightarrow{(i)} \Phi$ ist injektiv, also $\text{Kern} \Phi = 0$. (ii) Sei $z \in \mathbb{R}^m, x := Bz \xrightarrow{(ii)} z = ABz = Ax = \Phi(x) \implies \Phi$ ist surjektiv. Dann: $n = \dim \mathbb{R}^n \stackrel{\text{LA}}{=} \dim \text{Kern} \Phi + \dim \Phi(\mathbb{R}^n) = m$. ■

Satz 5.5 (Injektivität und Dimensionsgleichheit)

$f : D \rightarrow \mathbb{R}^m$ sei db auf D , es sei $f(D)$ offen, f injektiv auf D und $f^{-1} : f(D) \rightarrow \mathbb{R}^n$ sei db auf $f(D)$. Dann:

- (1) $m = n$
- (2) $\forall x \in D : f'(x)$ ist eine invertierbare Matrix und $f'(x)^{-1} = (f^{-1})'(f(x))$

Beachte:

- (1) Ist D offen und $f : D \rightarrow \mathbb{R}^m$ db, so muss i. A. $f(D)$ nicht offen sein. Z.B.: $f(x) = \sin x, D = \mathbb{R}, f(D) = [-1, 1]$
- (2) Ist D offen, $f : D \rightarrow \mathbb{R}^m$ db und injektiv, so muss i.A. f^{-1} nicht db sein. Z.B.: $f(x) = x^3, D = \mathbb{R}, f^{-1}$ ist in 0 nicht db.

Beweis

von 5.5: $g := f^{-1}; x_0 \in D, z_0 := f(x_0) (\implies x_0 = g(z_0))$ Es gilt: $g(f(x)) = x \forall x \in D, f(g(z)) = z \forall z \in f(D) \xrightarrow{5.4} g'(f(x)) \cdot f'(x) = I \forall x \in D; f'(g(z)) \cdot g'(z) = \tilde{I} \forall z \in f(D) \implies \underbrace{g'(z_0)}_{=:B} \cdot \underbrace{f'(x_0)}_{=:A} = I, f'(x_0) \cdot g'(z_0) = \tilde{I} \xrightarrow{5.5} m = n$ und $f'(x_0)^{-1} = g'(z_0) = (f^{-1})'(f(x_0)).$ ■

§ 6.

Differenzierbarkeitseigenschaften reellwertiger Funktionen

Definition

- (1) Seien $a, b \in \mathbb{R}^n$; $S[a, b] := \{a + t(b - a) : t \in [0, 1]\}$ heißt **Verbindungsstrecke** von a und b
- (2) $M \subseteq \mathbb{R}^n$ heißt **konvex** : \iff aus $a, b \in M$ folgt stets: $S[a, b] \subseteq M$
- (3) Sei $k \in \mathbb{N}$ und $x^{(0)}, \dots, x^{(k)} \in \mathbb{R}^n$. $S[x^{(0)}, \dots, x^{(k)}] := \bigcup_{j=1}^k S[x^{(j-1)}, x^{(j)}]$ heißt **Strecken-**
zug durch $x^{(0)}, \dots, x^{(k)}$ (in dieser Reihenfolge!)
- (4) Sei $G \subseteq \mathbb{R}^n$. G heißt **Gebiet**: \iff G ist offen und aus $a, b \in G$ folgt: $\exists x^{(0)}, \dots, x^{(k)} \in G : x^{(0)} = a, x^{(k)} = b$ und $S[x^{(0)}, \dots, x^{(k)}] \subseteq G$.

Vereinbarung: Ab jetzt in diesem Paragraphen: $\emptyset \neq D \subseteq \mathbb{R}^n$, D offen und $f : D \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion.

Satz 6.1 (Der Mittelwertsatz)

$f : D \rightarrow \mathbb{R}$ sei differenzierbar auf D , es seien $a, b \in D$ und $S[a, b] \subseteq D$. Dann:

$$\exists \xi \in S[a, b] : f(b) - f(a) = f'(\xi) \cdot (b - a)$$

Beweis

Sei $g(t) := a + t \cdot (b - a)$ für $t \in [0, 1]$. $g([0, 1]) = S[a, b] \subseteq D$. $\Phi(t) := f(g(t))$ ($t \in [0, 1]$) 5.4
 $\implies \Phi$ ist differenzierbar auf $[0, 1]$ und $\Phi'(t) = f'(g(t)) \cdot g'(t) = f'(a + t(b - a)) \cdot (b - a)$.
 $f(b) - f(a) = \Phi(1) - \Phi(0) \xrightarrow{\text{MWS, AI}} \Phi'(\eta) = \underbrace{f'(a + \eta(b - a))}_{=: \xi \in S} \cdot (b - a), \eta \in [0, 1] \quad \blacksquare$

Folgerungen 6.2

Sei D ein **Gebiet** und $f, g : D \rightarrow \mathbb{R}$ seien differenzierbar auf D .

- (1) Ist $f'(x) = 0 \ \forall x \in D \implies f$ ist auf D konstant.
- (2) Ist $f'(x) = g'(x) \ \forall x \in D \implies \exists c \in \mathbb{R} : f = g + c$ auf D .

Beweis

(2) folgt aus (1). (1) Seien $a, b \in D$. Z.z.: $f(a) = f(b)$. $\exists x^{(0)}, \dots, x^{(k)} \in D, x^{(0)} = a, x^{(k)} = b : S[x^{(0)}, \dots, x^{(k)}] \subseteq D \forall j \in \{1, \dots, k\}$ ex. nach 6.1 ein $\xi_j \in S[x^{(j-1)}, x^{(j)}] : f(x^{(j)}) - f(x^{(j-1)}) = \underbrace{f'(\xi_j)}_0 \cdot (x^{(j)} - x^{(j-1)}) = 0 \implies f(x^{(j)}) = f(x^{(j-1)}) \implies f(a) = f(x^{(0)}) = f(x^{(1)}) = f(x^{(2)}) = \dots = f(x^{(k)}) = f(b)$. ■

Satz 6.3 (Bedingung für Lipschitzstetigkeit)

D sei konvex und $f : D \rightarrow \mathbb{R}$ sei differenzierbar auf D . Weiter sei f' auf D beschränkt. Dann ist f auf D Lipschitzstetig.

Beweis

$\exists L \geq 0 : \|f'(x)\| \leq L \forall x \in D$. Seien $u, v \in D$. D konvex $\implies S[u, v] \subseteq D$. 6.1 $\implies \exists \xi \in S[u, v] : f(u) - f(v) = f'(\xi) \cdot (u - v) \implies |f(u) - f(v)| = |f'(\xi) \cdot (u - v)| \stackrel{CSU}{\leq} \|f'(\xi)\| \|u - v\| \leq L \|u - v\|$. ■

Satz 6.4 (Linearität)

Sei $\Phi : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ eine Funktion.

Φ ist linear $\iff \Phi \in C^1(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m)$ und $\Phi(\alpha x) = \alpha \Phi(x) \forall x \in \mathbb{R}^n \forall \alpha \in \mathbb{R}$.

Beweis

“ \implies ”: “ \Leftarrow ”: O.B.d.A.: $m = 1$. Z.z.: $\exists a \in \mathbb{R}^n : \Phi(x) = a \cdot x \forall x \in \mathbb{R}^n$. $a := \Phi'(0)\Phi(0) = \Phi(2 \cdot 0) = 2 \cdot \Phi(0) \implies \Phi(0) = 0$. $\forall x \in \mathbb{R}^n \forall \alpha \in \mathbb{R} : \Phi(\alpha x) = \alpha \Phi(x) \stackrel{5.4}{\implies} \alpha \Phi'(x) = \alpha \Phi'(x) \forall x \in \mathbb{R}^n \forall \alpha \in \mathbb{R} \implies \Phi'(x) = \Phi'(\alpha x) \forall x \in \mathbb{R}^n \forall \alpha \neq 0$. $\xrightarrow{\alpha \rightarrow 0, f \in C^1} \Phi'(x) = \Phi'(0) = a \forall x \in \mathbb{R}^n$. $g(x) := (\Phi(x) - ax)^2 (x \in \mathbb{R}^n)$, $g(0) = (\Phi(0) - a \cdot 0)^2 = 0$. 5.4 $\implies g$ ist differenzierbar auf \mathbb{R}^n und $g'(x) = 2(\Phi(x) - ax)(\Phi'(x) - a) = 0 \forall x \in \mathbb{R}^n$. 6.2(1) $\implies g(x) = g(0) = 0 \forall x \in \mathbb{R}^n \implies \Phi(x) = a \cdot x \forall x \in \mathbb{R}^n$. ■

Die Richtungsableitung Sei $\emptyset \neq D \subseteq \mathbb{R}^n$, D offen, $f : D \rightarrow \mathbb{R}$ und $x_0 \in D$. Ist $a \in \mathbb{R}^n$ und $\|a\| = 1$, so heißt a eine **Richtung** (oder ein **Richtungsvektor**).

Sei $a \in \mathbb{R}^n$ eine Richtung. D offen $\implies \exists \delta > 0 : U_\delta(x_0) \subseteq D$. Gerade durch x_0 mit Richtung $a : \{x_0 + ta : t \in \mathbb{R}\}$. $\|x_0 + ta - x_0\| = \|ta\| = |t|$. Also: $x_0 + ta \in D$ für $t \in (-\delta, \delta)$, $g(t) := f(x_0 + ta)$ ($t \in (-\delta, \delta)$).

f heißt **in x_0 in Richtung a db**, gdw. der Grenzwert

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + ta) - f(x_0)}{t}$$

existiert und $\in \mathbb{R}$ ist. In diesem Fall heißt

$$\frac{\partial f}{\partial a}(x_0) := \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + ta) - f(x_0)}{t}$$

die **Richtungsableitung von f in x_0 in Richtung a** .

Beispiele:

- (1) f ist in x_0 partiell db nach $x_j \iff f$ ist in x_0 db in Richtung e_j . In diesem Fall gilt:
 $\frac{\partial f}{\partial x_j}(x_0) = \frac{\partial f}{\partial e_j}(x_0).$

(2)

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

$x_0 = (0, 0)$. Sei $a = (a_1, a_2) \in \mathbb{R}^2$ eine Richtung, also $a_1^2 + a_2^2 = 1$; $\frac{f(ta)-f(0,0)}{t} = \frac{1}{t} \frac{t^2 a_1 a_2}{t^2 a_1^2 + t^2 a_2^2} = \frac{a_1 a_2}{t}$. D.h.: $\frac{\partial f}{\partial a}(0, 0)$ ex. $\iff a_1 a_2 = 0 \iff a \in \{(1, 0), (-1, 0), (0, 1), (0, -1)\}$.

In diesem Fall: $\frac{\partial f}{\partial a}(0, 0) = 0$.

(3)

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

$x_0 = (0, 0)$. Sei $a = (a_1, a_2) \in \mathbb{R}$ eine Richtung. $\frac{f(ta)-f(0,0)}{t} = \frac{1}{t} \frac{t^3 a_1 a_2^2}{t^2 a_1^2 + t^4 a_2^2} = \frac{a_1 a_2^2}{a_1^2 + t^2 a_2^2} \xrightarrow{t \rightarrow 0} \begin{cases} 0 & , \text{ falls } a_1 = 0 \\ \frac{a_2^2}{a_1} & , \text{ falls } a_1 \neq 0 \end{cases}$

D.h. $\frac{\partial f}{\partial a}(0, 0)$ existiert für *jede* Richtung $a \in \mathbb{R}^2$. Z.B.: $a = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, 1) : \frac{\partial f}{\partial a}(0, 0) = \frac{1}{\sqrt{2}}$.

$f(x, \sqrt{x}) = \frac{x^2}{2x^2} = \frac{1}{2} \forall x > 0 \implies f$ ist in $(0, 0)$ *nicht* stetig.

Satz 6.5 (Richtungsableitungen)

Sei $x_0 \in D$, $a \in \mathbb{R}^n$ eine Richtung, $f : D \rightarrow \mathbb{R}$.

- (1) $\frac{\partial f}{\partial a}(x_0)$ existiert $\iff \frac{\partial f}{\partial(-a)}(x_0)$ existiert. In diesem Fall ist:

$$\frac{\partial f}{\partial(-a)}(x_0) = -\frac{\partial f}{\partial a}(x_0)$$

- (2) f sei in x_0 db. Dann:

- (i) $\frac{\partial f}{\partial a}(x_0)$ existiert und

$$\frac{\partial f}{\partial a}(x_0) = a \cdot \text{grad } f(x_0).$$

- (ii) Sei $\text{grad } f(x_0) \neq 0$ und $a_0 := \|\text{grad } f(x_0)\|^{-1} \cdot \text{grad } f(x_0)$. Dann:

$$\frac{\partial f}{\partial(-a_0)}(x_0) \leq \frac{\partial f}{\partial a}(x_0) \leq \frac{\partial f}{\partial a_0}(x_0) = \|\text{grad } f(x_0)\|.$$

Weiter gilt: $\frac{\partial f}{\partial a}(x_0) < \frac{\partial f}{\partial a_0}(x_0)$, falls $a \neq a_0$; $\frac{\partial f}{\partial(-a_0)}(x_0) < \frac{\partial f}{\partial a}(x_0)$, falls $a \neq -a_0$.

Beweis

$$(1) \quad \frac{(f(x_0+t(-a))-f(x_0))}{t} = -\frac{(f(x_0+(-t)a)-f(x_0))}{-t} \implies \text{Beh.}$$

$$(2) \quad (i) \quad g(t) := f(x_0 + ta) \quad (|t| \text{ hinreichend klein}). \text{ Aus Satz 5.4 folgt: } g \text{ ist db in } t = 0 \text{ und } g'(0) = f'(x_0) \cdot a \implies \frac{\partial f}{\partial a}(x_0) \text{ existiert und ist } = g'(0) = \text{grad } f(x_0) \cdot a$$

$$(ii) \quad \left| \frac{\partial f}{\partial a}(x_0) \right| \stackrel{(i)}{=} |a \cdot \text{grad } f(x_0)| \stackrel{\text{CSU}}{\leq} \|a\| \cdot \|\text{grad } f(x_0)\| = \|\text{grad } f(x_0)\| = \frac{1}{\|\text{grad } f(x_0)\|} \text{grad } f(x_0) \cdot \text{grad } f(x_0) = a_0 \cdot \text{grad } f(x_0) \stackrel{(i)}{=} \frac{\partial f}{\partial a_0}(x_0)$$

$$\implies \frac{\partial f}{\partial (-a_0)}(x_0) \stackrel{(1)}{=} -\frac{\partial f}{\partial a_0}(x_0) \leq \frac{\partial f}{\partial a}(x_0) \leq \frac{\partial f}{\partial a_0}(x_0) = \|\text{grad } f(x_0)\|$$

$$\text{Sei } \frac{\partial f}{\partial a}(x_0) = \frac{\partial f}{\partial a_0}(x_0) \stackrel{(i),(ii)}{\implies} a \cdot \text{grad } f(x_0) = \|\text{grad } f(x_0)\| \implies a \cdot a_0 = 1 \implies \|a - a_0\|^2 = (a - a_0)(a - a_0) = a \cdot a - 2a \cdot a_0 + a_0 \cdot a_0 = 1 - 2 + 1 = 0 \implies a = a_0. \blacksquare$$

Der Satz von Taylor Im Folgenden sei $f : D \rightarrow \mathbb{R}$ zunächst „genügend oft partiell db“, $x_0 \in D$ und $h = (h_1, \dots, h_n) \in \mathbb{R}^n$. Wir führen folgenden Formalismus ein.

$$\nabla := \left(\frac{\partial}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_n} \right) \text{ („Nabla“); } \nabla f := \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n} \right) = \text{grad } f; \quad \nabla f(x_0) := \text{grad } f(x_0)$$

$$(h \cdot \nabla) := h_1 \frac{\partial}{\partial x_1} + \dots + h_n \frac{\partial}{\partial x_n}; \quad (h \cdot \nabla) f := h_1 \frac{\partial f}{\partial x_1} + \dots + h_n \frac{\partial f}{\partial x_n} = h \cdot \text{grad } f; \quad (h \cdot \nabla) f(x_0) := h \cdot \text{grad } f(x_0)$$

$$(h \cdot \nabla)^{(0)} f(x_0) := f(x_0). \text{ Für } k \in \mathbb{N} : (h \cdot \nabla)^{(k)} := \left(h_1 \frac{\partial}{\partial x_1} + \dots + h_n \frac{\partial}{\partial x_n} \right)^k$$

$$(h \cdot \nabla)^{(2)} f(x_0) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n h_j h_k \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_k}(x_0)$$

$$(h \cdot \nabla)^{(3)} f(x_0) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n h_j h_k h_l \frac{\partial^3 f}{\partial x_j \partial x_k \partial x_l}(x_0)$$

Beispiel

$$(n = 2) : h = (h_1, h_2).$$

$$(h \cdot \nabla)^{(0)} f(x_0) = f(x_0), \quad (h \cdot \nabla)^{(1)} f(x_0) = h \cdot \text{grad } f(x_0) = h_1 f_x(x_0) + h_2 f_y(x_0).$$

$$(h \cdot \nabla)^{(2)} f(x_0) = \left(h_1 \frac{\partial f}{\partial x} + h_2 \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 (x_0) = h_1^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(x_0) + h_1 h_2 \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}(x_0) + h_2 h_1 \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x}(x_0) + h_2^2 \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}(x_0).$$

Satz 6.6 (Der Satz von Taylor)

Sei $k \in \mathbb{N}$, $f \in C^{k+1}(D, \mathbb{R})$, $x_0 \in D$, $h \in \mathbb{R}^n$ und $S[x_0, x_0 + h] \subseteq D$. Dann:

$$f(x_0 + h) = \sum_{j=0}^k \frac{(h \cdot \nabla)^{(j)} f(x_0)}{j!} + \frac{(h \cdot \nabla)^{(k+1)} f(\xi)}{(k+1)!}$$

wobei $\xi \in S[x_0, x_0 + h]$

Beweis

$\Phi(t) := f(x_0 + th)$ für $t \in [0, 1]$. 5.4 $\implies \Phi \in C^{k+1}[0, 1]$, $\Phi'(t) = f'(x_0 + th) \cdot h = (h \cdot \nabla) f(x_0 + th)$
 Induktiv: $\Phi^{(j)}(t) = (h \cdot \nabla)^{(j)} f(x_0 + th)$ ($j = 0, \dots, k+1, t \in [0, 1]$). $\Phi(0) = f(x_0)$, $\Phi(1) = f(x_0 + h)$; $\Phi^{(j)}(0) = (h \cdot \nabla)^{(j)} f(x_0)$. Analysis 1 (22.2) $\implies \Phi(1) = \sum_{j=0}^k \frac{\Phi^{(j)}(0) f(x_0)}{j!} + \frac{\Phi^{(k+1)}(\eta)}{(k+1)!}$,

wobei $\eta \in [0, 1] \implies f(x_0 + h) = \sum_{j=1}^k \frac{(h \cdot \nabla)^{(j)} f(x_0)}{j!} + \frac{(h \cdot \nabla)^{(k+1)} f(x_0 + \eta h)}{(k+1)!}$, $\xi := x_0 + \eta h$ ■

Spezialfall 6.7 Sei $f \in C^2(D, \mathbb{R})$, $x_0 \in D$, $h \in \mathbb{R}^n$, $S[x_0, x_0 + h] \subseteq D$. Dann:

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + \text{grad } f(x_0) \cdot h + \frac{1}{2} \sum_{j,k=1}^n h_j h_k \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_k}(x_0 + \eta h)$$

§ 7.

Quadratische Formen

Vereinbarung: In diesem Paragraphen sei A stets eine reelle und symmetrische $(n \times n)$ -Matrix, ($A = A^\top$). Also: $A = (a_{jk})$, dann $a_{jk} = a_{kj}$ ($k, j = 1, \dots, n$)

Definition

$Q_A : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ durch $Q_A(x) := x(Ax)$. Q_A heißt die zu A gehörende **quadratische Form**. Für $x = (x_1, \dots, x_n)$:

$$Q_A(x) = \sum_{j,k=1}^n a_{jk} x_j x_k$$

Beispiel

Sei $f \in C^2(D, \mathbb{R})$, $x_0 \in D$, $h \in \mathbb{R}^n$, $S[x_0, x_0 + h] \subseteq D$.

$$H_f(x_0) := \begin{pmatrix} f_{x_1 x_1}(x_0) & \cdots & f_{x_1 x_n}(x_0) \\ f_{x_2 x_1}(x_0) & \cdots & f_{x_2 x_n}(x_0) \\ \vdots & & \vdots \\ f_{x_n x_1}(x_0) & \cdots & f_{x_n x_n}(x_0) \end{pmatrix}$$

heißt die **Hesse-Matrix** von f in x_0 . 4.1 $\implies H_f(x_0)$ ist symmetrisch. Aus 6.7 folgt:

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + \text{grad } f(x_0) \cdot h + \frac{1}{2} Q_B(h) \text{ mit } B = H_f(x_0 + \eta h)$$

Definition

A heißt **positiv definit** (pd) : $\iff Q_A(x) > 0 \ \forall x \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$

A heißt **negativ definit** (nd) : $\iff Q_A(x) < 0 \ \forall x \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$

A heißt **indefinit** (id) : $\iff \exists u, v \in \mathbb{R}^n : Q_A(u) > 0, Q_A(v) < 0$

Beispiele:

(1) ($n = 2$), $A = \begin{pmatrix} a & b \\ b & c \end{pmatrix}$

$Q_A(x, y) := ax^2 + 2bxy + cy^2$ ($(x, y) \in \mathbb{R}^2$). Nachrechnen:

$$aQ_A(x, y) = (ax + by)^2 + (\det A)y^2 \ \forall (x, y) \in \mathbb{R}^2$$

Übung:

A ist positiv definit $\iff a > 0, \det A > 0$

A ist negativ definit $\iff a < 0, \det A > 0$

A ist indefinit $\iff \det A < 0$

(2) ($n = 3$), $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

$Q_A(x, y, z) = (x + z)^2 \ \forall (x, y, z) \in \mathbb{R}^3$. $Q_A(0, 1, 0) = 0$. A ist weder pd, noch id, noch nd.

- (3) ohne Beweis (\rightarrow Lineare Algebra). A symmetrisch \implies alle **Eigenwerte** (EW) von A sind $\in \mathbb{R}$.
- A ist positiv definit \iff Alle Eigenwerte von A sind > 0
- A ist negativ definit \iff Alle Eigenwerte von A sind < 0
- A ist indefinit $\iff \exists$ Eigenwerte λ, μ von A mit $\lambda > 0, \mu < 0$

Satz 7.1 (Regeln zu definiten Matrizen und quadratischen Formen)

- (1) A ist positiv definit $\iff -A$ ist negativ definit
- (2) $Q_A(\alpha x) = \alpha^2 Q_A(x) \quad \forall x \in \mathbb{R}^n \quad \forall \alpha \in \mathbb{R}$
- (3) A ist positiv definit $\iff \exists c > 0 : Q_A(x) \geq c \|x\|^2 \quad \forall x \in \mathbb{R}^n$
- A ist negativ definit $\iff \exists c > 0 : Q_A(x) \leq -c \|x\|^2 \quad \forall x \in \mathbb{R}^n$

Beweis

- (1) Klar
- (2) $Q_A(\alpha x) = (\alpha x)(A(\alpha x)) = \alpha^2 x(Ax) = \alpha^2 Q_A(x)$
- (3) „ \Leftarrow “: Klar. „ \Rightarrow “: $K := \{x \in \mathbb{R}^n : \|x\| = 1\} = \partial U_1(0)$ ist beschränkt und abgeschlossen. Q_A ist stetig auf K . 3.3 $\implies \exists x_0 \in K : Q_A(x_0) \leq Q_A(x) \quad \forall x \in K$. $c := Q_A(x_0)$. A positiv definit, $x_0 \neq 0 \implies Q_A(x_0) = c > 0$. Sei $x \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$; $z := \frac{1}{\|x\|}x \implies z \in K \implies Q_A(z) \geq c \implies c \leq Q_A\left(\frac{1}{\|x\|}x\right) \stackrel{(2)}{=} \frac{1}{\|x\|^2} Q_A(x) \implies Q_A(x) \geq c \|x\|^2$ ■

Satz 7.2 (Störung von definiten Matrizen)

- (1) A sei positiv definit (*negativ definit*). Dann existiert ein $\varepsilon > 0$ mit: Ist $B = (b_{jk})$ eine weitere symmetrische $(n \times n)$ -Matrix und gilt: (*) $|a_{jk} - b_{jk}| \leq \varepsilon \quad (j, k = 1, \dots, n)$, so ist B positiv definit (*negativ definit*).
- (2) A sei indefinit. Dann existieren $u, v \in \mathbb{R}^n$ und $\varepsilon > 0$ mit: ist $B = (b_{jk})$ eine weitere symmetrische $(n \times n)$ -Matrix und gilt: (*) $|a_{jk} - b_{jk}| \leq \varepsilon \quad (j, k = 1, \dots, n)$, so ist $Q_B(u) > 0, Q_B(v) < 0$. Insbesondere: B ist indefinit.

Beweis

- (1) A sei positiv definit $\stackrel{7.1}{\implies} \exists c > 0 : Q_A(x) \geq c \|x\|^2 \quad \forall x \in \mathbb{R}^n$. $\varepsilon := \frac{c}{2n^2}$. Sei $B = (b_{jk})$ eine symmetrische Matrix mit (*). Für $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$: $Q_A(x) - Q_B(x) \leq |Q_A(x) - Q_B(x)| = \left| \sum_{j,k=1}^n (a_{jk} - b_{jk}) x_j x_k \right| \leq \sum_{j,k=1}^n \underbrace{|a_{jk} - b_{jk}|}_{\leq \varepsilon} \underbrace{|x_j|}_{\leq \|x\|} \underbrace{|x_k|}_{\leq \|x\|} \leq \varepsilon \|x\|^2 n^2 = \frac{c}{2n^2} \|x\|^2 n^2 = \frac{c}{2} \|x\|^2$
- (2) A sei indefinit. $\exists u, v \in \mathbb{R}^n : Q_A(u) > 0, Q_A(v) < 0$. $\alpha := \min \left\{ \frac{Q_A(u)}{\|u\|^2}, -\frac{Q_A(v)}{\|v\|^2} \right\} \implies \alpha > 0$. $\varepsilon := \frac{\alpha}{2n^2}$. Sei $B = (b_{jk})$ eine symmetrische Matrix mit (*).

$$\begin{aligned}
Q_A(u) - Q_B(u) &\stackrel{\text{Wie bei (1)}}{\leq} \varepsilon u^2 \|u\|^2 = \frac{\alpha}{2n^2} n^2 \|u\|^2 = \frac{\alpha}{2} \|u\|^2 \leq \frac{1}{2} \frac{Q_A(u)}{\|u\|^2} \|u\|^2 = \frac{1}{2} Q_A(u) \implies \\
Q_B(u) &\geq \frac{1}{2} Q_A(u) > 0. \text{ Analog: } Q_B(v) < 0. \quad \blacksquare
\end{aligned}$$

§ 8.

Extremwerte

Vereinbarung: In diesem Paragraphen sei $\emptyset \neq D \subseteq \mathbb{R}^n$, $f : D \rightarrow \mathbb{R}$ und $x_0 \in D$

Definition

- (1) f hat in x_0 ein **lokales Maximum** : $\iff \exists \delta > 0 : f(x) \leq f(x_0) \ \forall x \in D \cap U_\delta(x_0)$.
 f hat in x_0 ein **lokales Minimum** : $\iff \exists \delta > 0 : f(x) \geq f(x_0) \ \forall x \in D \cap U_\delta(x_0)$.
lokales Extremum = lokales Maximum oder lokales Minimum
- (2) Ist D offen, f in x_0 partiell differenzierbar und $\text{grad } f(x_0) = 0$, so heißt x_0 ein stationärer Punkt.

Satz 8.1 (Nullstelle des Gradienten)

Ist D offen und hat f in x_0 ein lokales Extremum und ist f in x_0 partiell differenzierbar, dann ist $\text{grad } f(x_0) = 0$.

Beweis

f habe in x_0 ein lokales Maximum. Also $\exists \delta > 0 : U_\delta(x_0) \subseteq D$ und $f(x) \leq f(x_0) \ \forall x \in U_\delta(x_0)$. Sei $j \in \{1, \dots, n\}$. Dann: $x_0 + te_j \in U_\delta(x_0)$ für $t \in (-\delta, \delta)$. $g(t) := f(x_0 + te_j)$ ($t \in (-\delta, \delta)$). g ist differenzierbar in $t = 0$ und $g'(0) = f_{x_j}(x_0)$. $g(t) = f(x_0 + te_j) \leq f(x_0) = g(0) \ \forall t \in (-\delta, \delta)$. Analysis 1, 21.5 $\implies g'(0) = 0 \implies f_{x_j}(x_0) = 0$ ■

Satz 8.2 (Definitheit und Extremwerte)

Sei D offen, $f \in C^2(D, \mathbb{R})$ und $\text{grad } f(x_0) = 0$.

- (i) Ist $H_f(x_0)$ positiv definit $\implies f$ hat in x_0 ein lokales Minimum.
- (ii) Ist $H_f(x_0)$ negativ definit $\implies f$ hat in x_0 ein lokales Maximum.
- (iii) Ist $H_f(x_0)$ indefinit $\implies f$ hat in x_0 kein lokales Extremum.

Beweis

- (i), (ii) $A := H_f(x_0)$ sei positiv definit oder negativ definit oder indefinit. Sei $\varepsilon > 0$ wie in 7.2. $f \in C^2(D, \mathbb{R}) \implies \exists \delta > 0 : U_\delta(x_0) \subseteq D$ und (*) $|f_{x_j x_k}(x) - f_{x_j x_k}(x_0)| \leq \varepsilon \ \forall x \in U_\delta(x_0)$ ($j, k = 1, \dots, n$). Sei $x \in U_\delta(x_0) \setminus \{x_0\}$, $h := x - x_0 \implies x = x_0 + h, h \neq 0$ und $S[x_0, x_0 + h] \subseteq U_\delta(x_0)$ 6.7 $\implies \exists \eta \in [0, 1] : f(x) = f(x_0 + h) = f(x_0) +$

$\underbrace{h \cdot \text{grad } f(x_0)}_{=0} + \frac{1}{2}Q_B(h)$, wobei $B = H_f(x_0 + \eta h)$. Also: $(**)$ $f(x) = f(x_0) + \frac{1}{2}Q_B(h)$.

A sei positiv definit (*negativ definit*) $\xrightarrow{7.2}$ B ist positiv definit (*negativ definit*). $\xrightarrow{h \neq 0}$
 $Q_B(h) \stackrel{(<)}{>} 0 \xRightarrow{(**)} f(x) \stackrel{(<)}{>} f(x_0) \implies f$ hat in x_0 ein lokales Minimum (*Maximum*).

- (iii) A sei indefinit und es seien $u, v \in \mathbb{R}^n$ wie in 7.2. Wegen 7.1 OBdA: $\|u\| = \|v\| = 1$. Dann:
 $x_0 + tu, x_0 + tv \in U_\delta(x_0)$ für $t \in (-\delta, \delta)$. Sei $t \in (-\delta, \delta), t \neq 0$. Mit $h := t \overset{(v)}{u}$ folgt aus 7.2
 und $(**)$: $f(x_0 + t \overset{(v)}{u}) = f(x_0) + \frac{1}{2}Q_B(t \overset{(v)}{u}) = f(x_0) + \frac{t^2}{2} \underbrace{Q_B(\overset{(v)}{u})}_{>0/<0 \text{ (7.2)}} \stackrel{(>)}{<} f(x_0) \implies f$ hat
 in x_0 kein lokales Extremum. ■

Beispiele:

- (1) $D = \mathbb{R}^2, f(x, y) = x^2 + y^2 - 2xy - 5$. $f_x = 2x - 2y, f_y = 2y - 2x$; $\text{grad } f(x, y) = (0, 0) \iff x = y$. Stationäre Punkte: (x, x) ($x \in \mathbb{R}$).

$$f_{xx} = 2, f_{xy} = -2 = f_{yx}, f_{yy} = 2 \implies H_f(x, x) = \begin{pmatrix} 2 & -2 \\ -2 & 2 \end{pmatrix}$$

$\det H_f(x, x) = 0 \implies H_f(x, x)$ ist weder pd, noch nd, noch id.

Es ist $f(x, y) = (x - y)^2 - 5 \geq -5 \forall (x, y) \in \mathbb{R}^2$ und $f(x, x) = -5 \forall x \in \mathbb{R}$.

- (2) $D = \mathbb{R}^2, f(x, y) = x^3 - 12xy + 8y^3$.
 $f_x = 3x^2 - 12y = 3(x^2 - 4y), f_y = -12x + 24y^2 = 12(-x + 2y^2)$. $\text{grad } f(x, y) = (0, 0) \iff$
 $x^2 = 4y, x = 2y^2 \implies 4y^4 = 4y \implies y = 0 \text{ oder } y = 1 \implies (x, y) = (0, 0) \text{ oder } (x, y) = (2, 1)$

$$f_{xx} = 6x, f_{xy} = -12 = f_{yx}, f_{yy} = 48y. H_f(0, 0) = \begin{pmatrix} 0 & -12 \\ -12 & 0 \end{pmatrix}$$

$\det H_f(0, 0) = -144 < 0 \implies H_f(0, 0)$ ist indefinit $\implies f$ hat in $(0, 0)$ kein lokales Extremum.

$$H_f(2, 1) = \begin{pmatrix} 12 & -12 \\ -12 & 48 \end{pmatrix}$$

$12 > 0, \det H_f(2, 1) > 0 \implies H_f(2, 1)$ ist positiv definit $\implies f$ hat in $(2, 1)$ ein lokales Minimum.

- (3) $K := \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x, y \geq 0, y \leq -x + 3\}, f(x, y) = 3xy - x^2y - xy^2$. Bestimme $\max f(K), \min f(K)$. $f(x, y) = xy(3 - x - y)$. $K = \partial K \cup K^\circ$. K ist beschränkt und abgeschlossen $\xrightarrow{3.3} \exists (x_1, y_1), (x_2, y_2) \in K : \max f(K) = f(x_1, y_1), \min f(K) = f(x_2, y_2)$.
 $f \geq 0$ auf K , $f = 0$ auf ∂K , also $\min f(K) = 0$. f ist nicht konstant $\implies f(x_2, y_2) > 0 \implies (x_2, y_2) \in K^\circ \xrightarrow{8.1} \text{grad } f(x_1, x_2) = 0$. Nachrechnen: $(x_2, y_2) = (1, 1); f(1, 1) = 1 = \max f(K)$.

§ 9.

Der Umkehrsatz

Erinnerung: Sei $x_0 \in \mathbb{R}^n$ und $U \subseteq \mathbb{R}^n$. U ist eine Umgebung von $x_0 \iff \exists \delta > 0 : U_\delta(x_0) \subseteq U$

Hilfssatz 9.1 (Offenheit des Bildes)

Sei $\delta > 0$, $f : U_\delta(0) \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig, $f(0) = 0$ und V sei eine offene Umgebung von $f(0) (= 0)$.
 $U := \{x \in U_\delta(0) : f(x) \in V\}$. Dann ist U eine offene Umgebung von 0.

Beweis

Übung ■

Erinnerung: Cramersche Regel: Sei A eine reelle $(n \times n)$ -Matrix, $\det A \neq 0$, und $b \in \mathbb{R}^n$. Das lineare Gleichungssystem $Ax = b$ hat genau eine Lösung: $x = (x_1, \dots, x_n) = A^{-1}b$. Ersetze in A die j -te Spalte durch b^\top . Es entsteht eine Matrix A_j . Dann: $x_j = \frac{\det A_j}{\det A}$.

Satz 9.2 (Stetigkeit der Umkehrfunktion)

Sei $\emptyset \neq D \subseteq \mathbb{R}^n$, D offen, $f \in C^1(D, \mathbb{R}^n)$. f sei auf D injektiv und es sei $f(D)$ offen. Weiter sei $\det f'(x) \neq 0 \forall x \in D$ und f^{-1} sei auf $f(D)$ differenzierbar. Dann: $f^{-1} \in C^1(f(D), \mathbb{R}^n)$.

Beweis

Sei $f^{-1} = g = (g_1, \dots, g_n)$, $g = g(y)$. Zu zeigen: $\frac{\partial g_j}{\partial y_k}$ sind stetig auf $f(D)$. 5.6 $\implies g'(y) \cdot f'(x) = I$ ($n \times n$ -Einheitsmatrix), wobei $y = f(x) \in f(D) \implies$

$$\begin{pmatrix} g'_1(y) \\ \vdots \\ g'_n(y) \end{pmatrix} \cdot f'(x) = \begin{pmatrix} 1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & 1 \end{pmatrix}$$

$\implies \text{grad } g_j(y) \cdot f'(x) = e_j \implies f'(x)^\top \cdot \text{grad } g_j(y)^\top = e_j^\top$. Ersetze in $f'(x)^\top$ die k -te Spalte durch e_j^\top . Es entsteht die Matrix $A_k(x) = A_k(f^{-1}(y))$. Cramersche Regel $\implies \frac{\partial g_j}{\partial y_k}(y) = \frac{\det A_k(f^{-1}(y))}{\det f'(x)} = \frac{\det A_k(f^{-1}(y))}{\det f'(f^{-1}(y))}$. $f \in C^1(D, \mathbb{R})$, f^{-1} stetig \implies obige Definitionen hängen stetig von y ab $\implies \frac{\partial g_j}{\partial y_k} \in C(f(D), \mathbb{R})$. ■

Satz 9.3 (Der Umkehrsatz)

Sei $\emptyset \neq D \subseteq \mathbb{R}^n$, D sei offen, $f \in C^1(D, \mathbb{R}^n)$, $x_0 \in D$ und $\det f'(x_0) \neq 0$. Dann existiert eine offene Umgebung U von x_0 und eine offene Umgebung V von $f(x_0)$ mit:

- (a) f ist auf U injektiv, $f(U) = V$ und $\det f'(x) \neq 0 \forall x \in U$
- (b) Für $f^{-1} : V \rightarrow U$ gilt: f^{-1} ist stetig differenzierbar auf V und
- $$(f^{-1})'(f(x)) = (f'(x))^{-1} \forall x \in U$$

Folgerung 9.4 (Satz von der offenen Abbildung)

D und f seien wie in 9.3 und es gelte: $\det f'(x) \neq 0 \forall x \in D$. Dann ist $f(D)$ offen.

Beweis

O.B.d.A: $x_0 = 0$, $f(x_0) = f(0) = 0$ und $f'(0) = I$ ($= (n \times n)$ -Einheitsmatrix)

Die Abbildungen $x \mapsto \det f'(x)$ und $x \mapsto \|f'(x) - I\|$ sind auf D stetig, $\det f'(0) \neq 0$, $\|f'(0) - I\| = 0$. Dann existiert ein $\delta > 0$: $K := U_\delta(0) \subseteq D$, $\bar{K} = \overline{U_\delta(0)} \subseteq D$ und

- (1) $\det f'(x) \neq 0 \forall x \in \bar{K}$ und
- (2) $\|f'(x) - I\| \leq \frac{1}{2n} \forall x \in \bar{K}$
- (3) **Behauptung:** $\frac{1}{2}\|u - v\| \leq \|f(u) - f(v)\| \forall u, v \in \bar{K}$, insbesondere ist f injektiv auf \bar{K}
- (4) f^{-1} ist stetig auf $f(\bar{K})$: Seien $\xi, \eta \in f(\bar{K})$, $u := f^{-1}(\xi)$, $v := f^{-1}(\eta) \implies u, v \in \bar{K}$ und
- $$\|f^{-1}(\xi) - f^{-1}(\eta)\| = \|u - v\| \stackrel{(3)}{\leq} 2\|f(u) - f(v)\| = 2\|\xi - \eta\| \quad \blacksquare$$

Beweis zu (3): $h(x) := f(x) - x$ ($x \in D$) $\implies h \in C^1(D, \mathbb{R}^n)$ und $h'(x) = f'(x) - I$. Sei $h = (h_1, \dots, h_n)$. Also: $h' = \begin{pmatrix} h'_1 \\ \vdots \\ h'_n \end{pmatrix}$. Seien $u, v \in \bar{K}$ und $j \in \{1, \dots, n\}$.

$$\begin{aligned} |h_j(u) - h_j(v)| &\stackrel{6.1}{=} |h'_j(\xi) \cdot (u - v)| \stackrel{\text{CSU}}{\leq} \|h'_j(\xi)\| \|u - v\| \leq \|h'(\xi)\| \|u - v\|, \xi \in S[u, v] \in \bar{K}. \quad (2) \\ &\implies \leq \frac{1}{2n} \|u - v\| \\ \implies \|h(u) - h(v)\| &= \left(\sum_{j=1}^n (h_j(u) - h_j(v))^2 \right)^{\frac{1}{2}} \leq \left(\sum_{j=1}^n \frac{1}{4n^2} \|u - v\|^2 \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2n} \|u - v\| \sqrt{n} \leq \\ &\frac{1}{2} \|u - v\| \implies \|u - v\| - \|f(u) - f(v)\| \leq \|f(u) - f(v) - (u - v)\| = \|h(u) - h(v)\| \leq \frac{1}{2} \|u - v\| \implies \\ &(3) \end{aligned}$$

$V := U_{\frac{\delta}{4}}(0)$ ist eine offene Umgebung von $f(0)$ ($= 0$). $U := \{x \in K : f(x) \in V\}$ Klar: $U \subseteq K \subseteq \bar{K}$, $0 \in U$, 9.1 $\implies U$ ist eine offene Umgebung von 0. (3) $\implies f$ ist auf U injektiv. (1) $\implies \det f'(x) \neq 0 \forall x \in U$. (4) $\implies f^{-1}$ ist stetig auf $f(U)$. Klar: $f(U) \subseteq V$. Für (a) ist noch zu zeigen: $V \subseteq f(U)$.

Sei $y \in V$. $w(x) := \|f(x) - y\|^2 = (f(x) - y) \cdot (f(x) - y) \implies w \in C^1(D, \mathbb{R})$ und (nachzurechnen) $w'(x) = 2(f(x) - y) \cdot f'(x)$. \bar{K} ist beschränkt und abgeschlossen $\stackrel{3.3}{\implies} \exists x_1 \in \bar{K} : (5) w(x_1) \leq w(x) \forall x \in \bar{K}$.

Behauptung: $x_1 \in K$.

Annahme: $x_1 \notin K \implies x_1 \in \partial K \implies \|x_1\| = \delta$. $2\sqrt{w(0)} = 2\|f(0) - y\| = 2\|y\| \leq 2\frac{\delta}{4} = \frac{\delta}{2} = \frac{\|x_1\|}{2} = \frac{1}{2}\|x_1 - 0\| \stackrel{(3)}{\leq} \|f(x_1) - f(0)\| = \|f(x_1) - y + y - f(0)\| \leq \|f(x_1) - y\| - \|f(0) - y\| =$

$\sqrt{w(x_1)} + \sqrt{w(0)} \implies \sqrt{w(0)} < \sqrt{w(x_1)} \implies w(0) < w(x_1) \stackrel{(5)}{\leq} w(0)$, Widerspruch. Also: $x_1 \in K$

(5) $\implies w(x_1) \leq w(x) \forall x \in K$. 8.1 $\implies w'(x_1) = 0 \implies (f(x_1) - y) \cdot f'(x_1) = 0$; (1) $\implies f'(x_1)$ ist invertierbar $\implies y = f(x_1) \implies x_1 \in U \implies y = f(x_1) \in f(U)$. Also: $f(U) = V$. Damit ist (a) gezeigt.

(b): Wegen 5.5 und 9.2 ist nur zu zeigen: f^{-1} ist differenzierbar auf V . Sei $y_1 \in V$, $y \in V \setminus \{y_1\}$, $x_1 := f^{-1}(y_1)$, $x := f^{-1}(y)$; $L(y) := \frac{f^{-1}(y) - f^{-1}(y_1) - f'(x_1)^{-1}(y - y_1)}{\|y - y_1\|}$. zu zeigen: $L(y) \rightarrow 0$ ($y \rightarrow y_1$).
 $\varrho(x) := f(x) - f(x_1) - f'(x_1)(x - x_1)$. f ist differenzierbar in $x_1 \implies \frac{\varrho(x)}{\|x - x_1\|} \rightarrow 0$ ($x \rightarrow x_1$).

$$\begin{aligned} f'(x_1)^{-1} \varrho(x) &= f'(x_1)^{-1}(y - y_1) - (f^{-1}(y) - f^{-1}(y_1)) = -\|y - y_1\| L(y) \\ \implies L(y) &= -f'(x_1)^{-1} \frac{\varrho(x)}{\|y - y_1\|} = -f'(x_1)^{-1} \underbrace{\frac{\varrho(x)}{\|x - x_1\|}}_{\rightarrow 0 \text{ (} x \rightarrow x_1 \text{)}} \cdot \underbrace{\frac{\|x - x_1\|}{\|f(x) - f(x_1)\|}}_{\leq 2, \text{ nach (3)}} \end{aligned}$$

Für $y \rightarrow y_1$, gilt (wegen (4)) $x \rightarrow x_1 \implies L(y) \rightarrow 0$.

Beispiel

$$f(x, y) = (x \cos y, x \sin y)$$

$$f'(x, y) = \begin{pmatrix} \cos y & -x \sin y \\ \sin y & x \cos y \end{pmatrix}, \det f'(x, y) = x \cos^2 y + x \sin^2 y = x$$

$D := \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x \neq 0\}$. Sei $(\xi, \eta) \in D$ 9.3 $\implies \exists$ Umgebung U von (ξ, η) mit: f ist auf U injektiv (*). z.B. $(\xi, \eta) = (1, \frac{\pi}{2}) \implies f(1, \frac{\pi}{2}) = (0, 1)$. $f'(1, \frac{\pi}{2}) = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$, $(f^{-1})(0, 1) = f'(1, \frac{\pi}{2})^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$.

Beachte: f ist auf D „lokal“ injektiv (im Sinne von (*)), aber f ist auf D *nicht* injektiv, da $f(x, y) = f(x, y + 2k\pi) \forall x, y \in \mathbb{R} \forall k \in \mathbb{Z}$.

§ 10.

Implizit definierte Funktionen

Beispiele:

$$(1) f(x, y) = x^2 + y^2 - 1. f(x, y) = 0 \iff y^2 = 1 - x^2 \iff y = \pm \sqrt{1 - x^2}.$$

Sei $(x_0, y_0) \in \mathbb{R}^2$ mit $f(x_0, y_0) = 0$ und $y_0 \stackrel{(<)}{>} 0$. Dann existiert eine Umgebung U von x_0 und genau eine Funktion $g : U \rightarrow \mathbb{R}$ mit $g(x_0) = y_0$ und $f(x, g(x)) = 0 \forall x \in U$, nämlich $g(x) = \sqrt{1 - x^2}$ ($-\sqrt{\dots}$)

Sprechweisen: „ g ist implizit durch die Gleichung $f(x, y) = 0$ definiert“ oder „die Gleichung $f(x, y) = 0$ kann in der Form $y = g(x)$ aufgelöst werden“

$$(2) f(x, y, z) = y + z + \log(x + z). \text{ Wir werden sehen: } \exists \text{ Umgebung } U \subseteq \mathbb{R}^2 \text{ von } (0, 1) \text{ und genau eine Funktion } g : U \rightarrow \mathbb{R} \text{ mit } g(0, -1) = 1 \text{ und } f(x, y, g(x, y)) = 0 \forall (x, y) \in U.$$

Der allgemeine Fall: Es seien $p, n \in \mathbb{N}$, $\emptyset \neq D \subseteq \mathbb{R}^{n+p}$, D offen, $f = (f_1, \dots, f_p) \in C^1(D, \mathbb{R}^p)$. Punkte in D (bzw. \mathbb{R}^{n+p}) bezeichnen wir mit (x, y) , wobei $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ und $y = (y_1, \dots, y_p) \in \mathbb{R}^p$, also $(x, y) = (x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_p)$. Damit:

$$f' = \left(\underbrace{\begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_p}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_p}{\partial x_n} \end{pmatrix}}_{=: \frac{\partial f}{\partial x}} \mid \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial y_p} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_p}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial f_p}{\partial y_p} \end{pmatrix}}_{=: \frac{\partial f}{\partial y} \text{ (} p \times p \text{)-Matrix}} \right); \text{ also } f'(x, y) = \left(\frac{\partial f}{\partial x}(x, y), \frac{\partial f}{\partial y}(x, y) \right)$$

Satz 10.1 (Satz über implizit definierte Funktionen)

Sei $(x_0, y_0) \in D$, $f(x_0, y_0) = 0$ und $\det \frac{\partial f}{\partial y}(x_0, y_0) \neq 0$. Dann existiert eine offene Umgebung $U \subseteq \mathbb{R}^n$ von x_0 und genau eine Funktion $g : U \rightarrow \mathbb{R}^p$ mit:

- (1) $(x, g(x)) \in D \forall x \in U$
- (2) $g(x_0) = y_0$
- (3) $f(x, g(x)) = 0 \forall x \in U$
- (4) $g \in C^1(U, \mathbb{R}^p)$
- (5) $\det \frac{\partial f}{\partial y}(x, g(x)) \neq 0 \forall x \in U$
- (6) $g'(x) = - \left(\frac{\partial f}{\partial y}(x, g(x))^{-1} \right) \cdot \frac{\partial f}{\partial x}(x, g(x)) \forall x \in U$

Beweis

Definition: $F : D \rightarrow \mathbb{R}^{n+p}$ durch $F(x, y) := (x, f(x, y))$. Dann: $F \in C^1(D, \mathbb{R}^{n+p})$ und

$$F'(x, y) = \left(\begin{array}{cc|ccc} 1 & & & 0 & \cdots & 0 \\ & \ddots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \hline & \frac{\partial f}{\partial x}(x, y) & & \frac{\partial f}{\partial y}(x, y) & & \end{array} \right)$$

Dann:

(I) $\det F'(x, y) \stackrel{\text{LA}}{=} \det \frac{\partial f}{\partial y}(x, y) \ ((x, y) \in D)$, insbesondere: $\det F'(x_0, y_0) \neq 0$. Es ist $F(x_0, y_0) = (x_0, 0)$. 9.3 $\implies \exists$ eine offene Umgebung \mathbb{U} von (x_0, y_0) mit: $\mathbb{U} \subseteq D, f(\mathbb{U}) = \vartheta$. F ist auf \mathbb{U} injektiv, $F^{-1} : \vartheta \rightarrow \mathbb{U}$ ist stetig differenzierbar und

(II) $\det F'(x, y) \stackrel{\text{I}}{=} \det \frac{\partial f}{\partial y}(x, y) \neq 0 \ \forall (x, y) \in \mathbb{U}$

Bezeichnungen: Sei $(s, t) \in \vartheta$ ($s \in \mathbb{R}^n, t \in \mathbb{R}^p$), $F^{-1}(s, t) =: (u(s, t), v(s, t))$, also $u : \vartheta \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig differenzierbar, $v : \vartheta \rightarrow \mathbb{R}^p$ stetig differenzierbar. Dann: $(s, t) = F(F^{-1}(s, t)) = (u(s, t), f(u(s, t), v(s, t))) \implies u(s, t) = s \implies F^{-1}(s, t) = (s, v(s, t))$. Für $(x, y) \in \mathbb{U}$: $f(x, y) = 0 \iff F(x, y) = (x, 0) \iff (x, y) = F^{-1}(x, 0) = (x, v(x, 0)) \iff y = v(x, 0)$, insbesondere: $y_0 = v(x_0, 0)$. $U := \{x \in \mathbb{R}^n : (x, 0) \in \vartheta\}$. Es gilt: $x_0 \in U$. Übung: U ist eine offene Umgebung von x_0 .

Definition: $g : U \rightarrow \mathbb{R}^p$ durch $g(x) := v(x, 0)$, für $x \in U$ gilt: $(x, 0) \in \vartheta \implies F^{-1}(x, 0) = (x, v(x, 0)) = (x, g(x)) \in \mathbb{U}$. Dann gelten: (1), (2), (3) und (4). (5) folgt aus (II).

Zu (6): Definition für $x \in U$: $\psi(x) := (x, g(x)), \psi \in C^1(U, \mathbb{R}^{n+p})$,

$$\psi'(x) = \left(\begin{array}{cc|ccc} 1 & & & 0 & \cdots & 0 \\ & \ddots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \hline & & & g'(x) & & \end{array} \right)$$

(3) $\implies 0 = f(\psi(x)) \ \forall x \in U$. 5.4 $\implies 0 = f'(\psi(x)) \cdot \psi'(x) = \left(\frac{\partial f}{\partial x}(x, g(x)) \mid \frac{\partial f}{\partial y}(x, g(x)) \right) \cdot \psi'(x) \stackrel{\text{LA}}{=} \frac{\partial f}{\partial x}(x, g(x)) + \frac{\partial f}{\partial y}(x, g(x)) \cdot g'(x) \ \forall x \in U$. (5) $\implies \frac{\partial f}{\partial y}(x, g(x))$ invertierbar, Multiplikation von links mit $\frac{\partial f}{\partial y}(x, g(x))^{-1}$ liefert (6). ■

Beispiel

$f(x, y, z) = y + z + \log(x + z)$. Zeige: \exists offene Umgebung U von $(0, 1)$ und genau eine stetig differenzierbare Funktion $g : U \rightarrow \mathbb{R}$ mit $g(0, -1) = 1$ und $f(x, y, g(x, y)) = 0 \ \forall (x, y) \in U$. Berechne g' an der Stelle $(0, -1)$.

$f(0, -1, 1) = 0, f_z = 1 + \frac{1}{x+z}; f_z(0, -1, 1) = 2 \neq 0$. Die Behauptung folgt aus dem Satz über implizit definierte Funktionen. Also: $0 = y + g(x, y) + \log(x + g(x, y)) \ \forall (x, y) \in U$.

Differentiation nach x : $0 = g_x(x, y) + \frac{1}{x+g(x, y)}(1+g_x(x, y)) \ \forall (x, y) \in U \xrightarrow{(x, y) = (0, -1)} 0 = g_x(0, -1) +$

$$\frac{1}{1}(g_x(0, -1) + 1) \implies g_x(0, -1) = -\frac{1}{2}.$$

$$\text{Differentiation nach } y: 0 = 1 + g_y(x, y) + \frac{1}{x + g(x, y)} g_y(x, y) \quad \forall (x, y) \in U \xrightarrow{(x, y) = (0, -1)} g_y(0, -1) = -\frac{1}{2}.$$

$$\text{Also: } g'(0, -1) = \left(-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\right).$$

§ 11.

Extremwerte unter Nebenbedingungen

Definition

Seien M, N Mengen $\neq \emptyset$, $f : M \rightarrow N$ eine Funktion und $\emptyset \neq T \subseteq M$. Die Funktion $f|_T : T \rightarrow N$, $f|_T(x) := f(x) \forall x \in T$ heißt die **Einschränkung** von f auf T .

In diesem Paragraphen gelte stets: $\emptyset \neq D \subseteq \mathbb{R}^n$, D offen, $f \in C^1(D, \mathbb{R})$, $p \in \mathbb{N}$, $p < n$ und $\varphi = (\varphi_1, \dots, \varphi_p) \in C^1(D, \mathbb{R}^p)$. Es sei $T := \{x \in D : \varphi(x) = 0\} \neq \emptyset$.

Definition

f hat in $x_0 \in D$ ein **lokales Extremum unter der Nebenbedingung** $\varphi = 0 : \iff x_0 \in T$ und $f|_T$ hat in x_0 ein lokales Extremum.

Wir führen folgende Hilfsfunktion ein: Für $x = (x_1, \dots, x_n) \in D$ und $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_p) \in \mathbb{R}^p$ gilt:

$$H(x, \lambda) := f(x) + \lambda \cdot \varphi(x) = f(x) + \lambda_1 \varphi_1(x) + \dots + \lambda_p \varphi_p(x)$$

Es ist

$$H_{x_j} = f_{x_j} + \lambda_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_j} + \dots + \lambda_p \frac{\partial \varphi_p}{\partial x_j} \quad (j = 1, \dots, n), \quad H_{\lambda_j} = \varphi_j$$

Für $x_0 \in D$ und $\lambda_0 \in \mathbb{R}^p$ gilt:

$$\begin{aligned} H'(x_0, \lambda_0) = 0 &\iff f'(x_0) + \lambda_0 \varphi'(x_0) = 0 \text{ und } \varphi(x_0) = 0 \\ &\iff f'(x_0) + \lambda_0 \varphi'(x_0) = 0 \text{ und } x_0 \in T \quad (\text{I}) \end{aligned}$$

Satz 11.1 (Multiplikationsregel von Lagrange)

f habe in $x_0 \in D$ ein lokales Extremum unter der Nebenbedingung $\varphi = 0$ und es sei $\text{Rang } \varphi'(x_0) = p$. Dann existiert ein $\lambda_0 \in \mathbb{R}^p$ mit: $H'(x_0, \lambda_0) = 0$ (λ_0 heißt **Multiplikator**).

Folgerung 11.2

T sei beschränkt und abgeschlossen. Wegen 3.3 gilt: $\exists a, b \in T : f(a) = \max f(T)$, $f(b) = \min f(T)$. Ist $\text{Rang } \varphi'(a) = p \implies \exists \lambda_0 \in \mathbb{R}^p : H'(a, \lambda_0) = 0$.

Beweis

Es ist $x_0 \in T$ und

$$\varphi'(x_0) = \left(\underbrace{\begin{pmatrix} \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_1}(x_0) & \cdots & \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_p}(x_0) \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial \varphi_p}{\partial x_1}(x_0) & \cdots & \frac{\partial \varphi_p}{\partial x_p}(x_0) \end{pmatrix}}_{=:A} \mid \cdots \mid \begin{pmatrix} \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_n}(x_0) \\ \vdots \\ \frac{\partial \varphi_p}{\partial x_n}(x_0) \end{pmatrix} \right)$$

Rang $\varphi'(x_0) = p \implies$ o.B.d.A.: $\det A \neq 0$.

Für $x = (x_1, \dots, x_n) \in D$ schreiben wir $x = (y, z)$, wobei $y = (x_1, \dots, x_p)$, $z = (x_{p+1}, \dots, x_n)$. Insbesondere ist $x_0 = (y_0, z_0)$. Damit gilt: $\varphi(y_0, z_0) = 0$ und $\det \frac{\partial \varphi}{\partial y}(y_0, z_0) \neq 0$.

Aus 10.1 folgt: \exists offene Umgebung $U \subseteq \mathbb{R}^{n-p}$ von z_0 , \exists offene Umgebung $V \subseteq \mathbb{R}^p$ von y_0 und es existiert $g \in C^1(U, \mathbb{R}^p)$ mit:

$$(II) \quad g(z_0) = y_0$$

$$(III) \quad \varphi(g(z), z) = 0 \quad \forall z \in U$$

$$(IV) \quad g'(z_0) = - \left(\underbrace{\frac{\partial \varphi}{\partial y}(g(z_0), z_0)}_{=x_0} \right)^{-1} \underbrace{\frac{\partial \varphi}{\partial z}(g(z_0), z_0)}_{=x_0} \quad \blacksquare$$

(III) $\implies (g(z), z) \in T \quad \forall z \in U$. Wir definieren $h(z)$ durch

$$h(z) := f(g(z), z) \quad (z \in U)$$

Dann hat h in z_0 ein lokales Extremum (*ohne* Nebenbedingung). Damit gilt nach 8.1:

$$0 = h'(z_0) \stackrel{5.4}{=} f'(g(z_0), z_0) \cdot \begin{pmatrix} g'(z_0) \\ I \end{pmatrix} = \left(\frac{\partial f}{\partial y}(x_0) \mid \frac{\partial f}{\partial z}(x_0) \right) \cdot \begin{pmatrix} g'(z_0) \\ I \end{pmatrix} = \frac{\partial f}{\partial y}(x_0) g'(z_0) + \frac{\partial f}{\partial z}(x_0)$$

$$\stackrel{(IV)}{=} \underbrace{\frac{\partial f}{\partial y}(x_0) \left(-\frac{\partial \varphi}{\partial y}(x_0) \right)^{-1}}_{=: \lambda_0 \in \mathbb{R}^p} \frac{\partial \varphi}{\partial z}(x_0) + \frac{\partial f}{\partial z}(x_0) \implies \frac{\partial f}{\partial z}(x_0) + \lambda_0 \frac{\partial \varphi}{\partial z}(x_0) = 0 \quad (V)$$

$$\lambda_0 = \frac{\partial f}{\partial y}(x_0) \left(-\frac{\partial \varphi}{\partial y}(x_0) \right)^{-1} \implies \frac{\partial f}{\partial y}(x_0) + \lambda_0 \frac{\partial \varphi}{\partial y}(x_0) = 0 \quad (VI)$$

Aus (V), (VI) folgt: $f'(x_0) + \lambda_0 \varphi'(x_0) = 0 \stackrel{(I)}{\implies} H'(x_0, \lambda_0) = 0$.

Beispiel

($n=3, p=2$) $f(x, y, z) = x + y + z$, $T := \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : x^2 + y^2 = 2, x + z = 1\}$, $\varphi(x, y, z) = (x^2 + y^2 - 2, x + z - 1)$.

Bestimme $\max f(T)$, $\min f(T)$. Übung: T ist beschränkt und abgeschlossen $\stackrel{3.3}{\implies} \exists a, b \in T : f(a) = \max f(T)$, $f(b) = \min f(T)$.

$$\varphi'(x, y, z) = \begin{pmatrix} 2x & 2y & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{Rang } \varphi'(x, y, z) = 1 < p = 2 \iff x = y = 0. \quad a, b \in T \implies \text{Rang } \varphi'(a) = \text{Rang } \varphi'(b) = 2$$

$$H(x, y, z, \lambda_1, \lambda_2) = x + y + z + \lambda_1(x^2 + y^2 - 2) + \lambda_2(x + z - 1)$$

$$H_x = 1 + 2\lambda_1 x + \lambda_2 \stackrel{!}{=} 0 \quad (1)$$

$$H_y = 1 + 2\lambda_1 y \stackrel{!}{=} 0 \quad (2)$$

$$H_z = 1 + \lambda_2 \stackrel{!}{=} 0 \quad (3)$$

$$H_{\lambda_1} = x^2 + y^2 - 2 \stackrel{!}{=} 0 \quad (4)$$

$$H_{\lambda_2} = x + z - 1 \stackrel{!}{=} 0 \quad (5)$$

$$(3) \implies \lambda_2 = -1 \xrightarrow{(1)} 2\lambda_1 x = 0; \quad (2) \implies \lambda_1 \neq 0 \implies x = 0 \xrightarrow{(5)} z = 1; \quad (4) \implies y = \pm\sqrt{2}$$

$$11.2 \implies a, b \in \{(0, \sqrt{2}, 1), (0, -\sqrt{2}, 1)\}$$

$$f(0, \sqrt{2}, 1) = 1 + \sqrt{2} = \max f(T); \quad f(0, -\sqrt{2}, 1) = 1 - \sqrt{2} = \min f(T)$$

Anwendung Sei A eine reelle, *symmetrische* $(n \times n)$ -Matrix. Beh: A besitzt einen reellen EW.

Beweis

$f(x) := x \cdot (Ax) = Q_A(x)$ ($x \in \mathbb{R}^n$), $T := \{x \in \mathbb{R}^n : \|x\| = 1\} = \partial U_1(0)$ ist beschränkt und abgeschlossen.

$$\varphi(x) := \|x\|^2 - 1 = x \cdot x - 1; \quad \varphi'(x) = 2x, \quad f'(x) = 2Ax.$$

$$3.3 \implies \exists x_0 \in T : f(x_0) = \max f(T); \quad \varphi'(x) = 2(x_1, \dots, x_n); \quad x_0 \in T \implies \text{Rang } \varphi'(x_0) = 1 (= p)$$

$$11.2 \implies \exists \lambda_0 \in \mathbb{R} : H'(x_0, \lambda_0) = 0; \quad h(x, \lambda) = f(x) + \lambda \varphi(x); \quad H'(x, \lambda) = 2Ax + 2\lambda x$$

$$\implies 0 = 2(Ax_0 + \lambda_0 x_0) \implies Ax_0 = (-\lambda_0)x_0, \quad x_0 \neq 0 \implies -\lambda_0 \text{ ist ein EW von } A. \quad \blacksquare$$

§ 12.

Wege im \mathbb{R}^n

Definition

- (1) Sei $[a, b] \subseteq \mathbb{R}$ und $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ sei stetig. Dann heißt γ ein **Weg** im \mathbb{R}^n .
- (2) Sei $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ ein Weg. $\Gamma_\gamma := \gamma([a, b])$ heißt der zu γ gehörende **Bogen**, $\Gamma_\gamma \subseteq \mathbb{R}^n$.
 3.3 $\implies \Gamma_\gamma$ ist beschränkt und abgeschlossen. $\gamma(a)$ heißt der **Anfangspunkt** von γ , $\gamma(b)$ heißt der **Endpunkt** von γ . $[a, b]$ heißt **Parameterintervall** von γ .
 γ heißt **geschlossen** : $\iff \gamma(a) = \gamma(b)$.
- (3) $\gamma^- : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$, definiert durch $\gamma^-(t) := \gamma(b + a - t)$ heißt der zu γ **inverse Weg**.
 Beachte: $\gamma^- \neq \gamma$, aber $\Gamma_\gamma = \Gamma_{\gamma^-}$.

Beispiele:

- (1) Sei $x_0, y_0 \in \mathbb{R}^n$, $\gamma(t) := x_0 + t(y_0 - x_0)$, $t \in [0, 1]$. $\Gamma_\gamma = S[x_0, y_0]$
- (2) Sei $r > 0$ und $\gamma(t) := (r \cos t, r \sin t)$, $t \in [0, 2\pi]$
 $\Gamma_\gamma = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x^2 + y^2 = r^2\} = \partial U_r(0)$
 $\tilde{\gamma}(t) := (r \cos t, r \sin t)$, $t \in [0, 4\pi]$. $\tilde{\gamma} \neq \gamma$, aber $\Gamma_{\tilde{\gamma}} = \Gamma_\gamma$.
- (3) Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ stetig und $\gamma(t) := (t, f(t))$ ($t \in [a, b]$). Dann: $\Gamma_\gamma = \text{Graph von } f$.

Erinnerung: \mathfrak{Z} ist die Menge aller Zerlegungen von $[a, b]$

Definition

Sei $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ ein Weg. Sei $Z = \{t_0, \dots, t_m\} \in \mathfrak{Z}$.

$$L(\gamma, Z) := \sum_{j=1}^m \|\gamma(t_j) - \gamma(t_{j-1})\|$$

Übung: Sind $Z_1, Z_2 \in \mathfrak{Z}$ und gilt $Z_1 \subseteq Z_2 \implies L(\gamma, Z_1) \leq L(\gamma, Z_2)$

γ heißt **rektifizierbar** (rb) : $\iff \exists M \geq 0 : L(\gamma, Z) \leq M \ \forall Z \in \mathfrak{Z}$. In diesem Fall heißt $L(\gamma) := \sup\{L(\gamma, Z) : Z \in \mathfrak{Z}\}$ die **Länge** von γ .

Ist $n = 1$, so gilt: γ ist rektifizierbar $\iff \gamma \in \text{BV}[a, b]$. In diesem Fall: $L(\gamma) = V_\gamma([a, b])$.

Satz 12.1 (Rektifizierbarkeit und Beschränkte Variation)

Sei $\gamma = (\eta_1, \dots, \eta_n) : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ ein Weg. γ ist rektifizierbar $\iff \eta_1, \dots, \eta_n \in \text{BV}[a, b]$.

Beweis

Sei $Z = \{t_0, \dots, t_n\} \in \mathfrak{Z}$ und $J = \{1, \dots, n\}$.

$$|\eta_j(t_k) - \eta_j(t_{k-1})| \stackrel{1.7}{\leq} \|\gamma(t_k) - \gamma(t_{k-1})\| \stackrel{1.7}{\leq} \sum_{\nu=1}^n |\eta_\nu(t_k) - \eta_\nu(t_{k-1})|. \text{ Summation über } k \implies \\ V_{\eta_j} \leq L(\gamma, Z) \leq \sum_{k=1}^m \sum_{\nu=1}^n |\eta_\nu(t_k) - \eta_\nu(t_{k-1})| = \sum_{\nu=1}^n V_{\eta_\nu}(Z) \implies \text{Behauptung} \quad \blacksquare$$

Übung: γ ist rektifizierbar $\iff \gamma^-$ ist rektifizierbar. In diesem Fall: $L(\gamma) = L(\gamma^-)$

Summe von Wegen: Gegeben: $a_0, a_1, \dots, a_l \in \mathbb{R}$, $a_0 < a_1 < a_2 < \dots < a_l$ und Wege $\gamma_k : [a_{k-1}, a_k] \rightarrow \mathbb{R}^n$ ($k = 1, \dots, l$) mit $\gamma_k(a_k) = \gamma_{k+1}(a_k)$ ($k = 1, \dots, l-1$). Definiere $\gamma : [a_0, a_l] \rightarrow \mathbb{R}^n$ durch $\gamma(t) := \gamma_k(t)$, falls $t \in [a_{k-1}, a_k]$. γ ist ein Weg im \mathbb{R}^n , $\Gamma_\gamma = \Gamma_{\gamma_1} \cup \Gamma_{\gamma_2} \cup \dots \cup \Gamma_{\gamma_l}$. γ heißt die Summe der Wege $\gamma_1, \dots, \gamma_l$ und wird mit $\gamma = \gamma_1 \oplus \gamma_2 \oplus \dots \oplus \gamma_l$ bezeichnet.

Bemerkung: Ist $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ ein Weg und $Z = \{t_0, \dots, t_m\} \in \mathfrak{Z}$ und $\gamma_k := \gamma|_{[t_{k-1}, t_k]}$ ($k = 1, \dots, m$) $\implies \gamma = \gamma_1 \oplus \dots \oplus \gamma_m$. Aus Analysis I, 25.1(7) und 12.1 folgt:

Satz 12.2 (Summe von Wegen)

Ist $\gamma = \gamma_1 \oplus \dots \oplus \gamma_m$, so gilt: γ ist rektifizierbar $\iff \gamma_1, \dots, \gamma_m$ sind rektifizierbar. In diesem Fall: $L(\gamma) = L(\gamma_1) + \dots + L(\gamma_m)$

Definition

Sei $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ ein rektifizierbarer Weg. Sei $t \in (a, b]$. Dann: $\gamma|_{[a, t]}$ ist rektifizierbar (12.2).

$$s(t) := \begin{cases} L(\gamma|_{[a, t]}), & \text{falls } t \in (a, b] \\ 0, & \text{falls } t = a \end{cases}$$

heißt die zu γ gehörende **Weglängenfunktion**.

Satz 12.3 (Eigenschaften der Weglängenfunktion)

Sei $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ ein rektifizierbarer Weg. Dann:

- (1) $s \in C[a, b]$
- (2) s ist wachsend.

Beweis

(1) **In der großen Übung**

(2) Sei $t_1, t_2 \in [a, b]$ und $t_1 < t_2$. $\gamma_1 := \gamma|_{[a, t_1]}$, $\gamma_2 := \gamma|_{[t_1, t_2]}$, $\gamma_3 := \gamma|_{[a, t_2]}$. Dann $\gamma_3 = \gamma_1 \oplus \gamma_2$.
 12.2 $\implies \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ sind rektifizierbar und $\underbrace{L(\gamma_3)}_{=s(t_2)} = \underbrace{L(\gamma_1)}_{s(t_1)} + \underbrace{L(\gamma_2)}_{\geq 0} \implies s(t_2) \geq s(t_1)$. \blacksquare

Satz 12.4 (Rechenregeln für Wegintegrale)

Sei $f = (f_1, \dots, f_n) : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ und $f_1, \dots, f_n \in R[a, b]$.

$$\int_a^b f(t) dt := \left(\int_a^b f_1(t) dt, \int_a^b f_2(t) dt, \dots, \int_a^b f_n(t) dt \right) \quad (\in \mathbb{R}^n)$$

Dann:

(1)

$$x \cdot \int_a^b f(t) dt = \int_a^b (x \cdot f(t)) dt \quad \forall x \in \mathbb{R}^n$$

(2)

$$\left\| \int_a^b f(t) dt \right\| \leq \int_a^b \|f(t)\| dt$$

Beweis

(1) Sei $x = (x_1, \dots, x_n) \implies$

$$x \cdot \int_a^b f(t) dt = \sum_{j=1}^n x_j \int_a^b f_j(t) dt = \int_a^b \left(\sum_{j=1}^n x_j f_j(t) \right) dt = \int_a^b (x \cdot f(t)) dt$$

(2) $y := \int_a^b f(t) dt$. O.B.d.A: $y \neq 0$. $x := \frac{1}{\|y\|} y \implies \|x\| = 1, y = \|y\| x. \|y\|^2 = y \cdot$

$$y = \|y\| (x \cdot y) = \|y\| \left(x \cdot \int_a^b f(t) dt \right) = \|y\| \int_a^b (x \cdot f(t)) dt \leq \|y\| \int_a^b \underbrace{|x \cdot f(t)|}_{\leq \|x\| \|f(t)\| = \|f(t)\|} dt \leq$$

$$\|y\| \int_a^b \|f(t)\| dt$$

■

Satz 12.5 (Eigenschaften stetig differenzierbarer Wege)

$\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ sei ein stetig differenzierbarer Weg. Dann:

(1) γ ist rektifizierbar

(2) Ist s die zu γ gehörende Weglängenfunktion, so ist $s \in C^1[a, b]$ und $s'(t) = \|\gamma'(t)\| \quad \forall t \in [a, b]$

(3) $L(\gamma) = \int_a^b \|\gamma'(t)\| dt$

Beweis

(1) $\gamma = (\eta_1, \dots, \eta_n), \eta_j \in C^1[a, b] \xrightarrow{A1,25.1} \eta_j \in BV[a, b] \xrightarrow{12.1} \gamma$ ist rektifizierbar.

(2) Sei $t_0 \in [a, b]$. Wir zeigen:

$$\frac{s(t) - s(t_0)}{t - t_0} \rightarrow \|\gamma'(t_0)\| \quad (t \rightarrow t_0+0). \quad (\text{analog zeigt man: } \frac{s(t) - s(t_0)}{t - t_0} \rightarrow \|\gamma'(t_0)\| \quad (t \rightarrow t_0-0)).$$

Sei $t \in (t_0, b]$; $\gamma_1 := \gamma|_{[a, t_0]}$, $\gamma_2 := \gamma|_{[t_0, t]}$, $\gamma_3 := \gamma|_{[a, t]}$. Dann: $\gamma_3 = \gamma_1 \oplus \gamma_2$ und $\underbrace{L(\gamma_3)}_{=s(t)} =$

$$\underbrace{L(\gamma_1)}_{=s(t_0)} + L(\gamma_2) \implies s(t) - s(t_0) = L(\gamma_2) \quad (I).$$

$$\tilde{Z} := \{t_0, t\} \text{ ist eine Zerlegung von } [t_0, t] \implies \|\gamma(t) - \gamma(t_0)\| = L(\gamma_2, \tilde{Z}) \leq L(\gamma_2)$$

Definition: $F : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ durch $F(t) = \int_a^t \|\gamma'(\tau)\| d\tau$. 2.Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung $\implies F$ ist differenzierbar und $F'(t) = \|\gamma'(t)\| \forall t \in [a, b]$. Sei $Z = \{\tau_0, \dots, \tau_m\}$ eine beliebige Zerlegung von $[t_0, t]$.

$$\int_{\tau_{j-1}}^{\tau_j} \gamma'(\tau) d\tau = \left(\dots, \int_{\tau_{j-1}}^{\tau_j} \eta'_k(\tau) d\tau, \dots \right) \stackrel{A1}{=} (\dots, \eta_k(\tau_j) - \eta_k(\tau_{j-1}), \dots) = \gamma(\tau_j) - \gamma(\tau_{j-1})$$

$$\implies \|\gamma(\tau_j) - \gamma(\tau_{j-1})\| \stackrel{12.4}{\leq} \int_{\tau_{j-1}}^{\tau_j} \|\gamma'(\tau)\| d\tau. \text{ Summation } \implies L(\gamma_2, Z) \leq \int_{t_0}^t \|\gamma'(\tau)\| d\tau = F(t) - F(t_0) \implies L(\gamma_2) \leq F(t) - F(t_0) \quad (III).$$

$$(I), (II), (III) \implies \|\gamma(t) - \gamma(t_0)\| \stackrel{(II)}{\leq} L(\gamma_2) \stackrel{(I)}{=} s(t) - s(t_0) \stackrel{(III)}{\leq} F(t) - F(t_0)$$

$$\implies \underbrace{\frac{\|\gamma(t) - \gamma(t_0)\|}{t - t_0}}_{\xrightarrow{t \rightarrow t_0} \|\gamma'(t_0)\|} \leq \frac{s(t) - s(t_0)}{t - t_0} \leq \underbrace{\frac{F(t) - F(t_0)}{t - t_0}}_{\xrightarrow{t \rightarrow t_0} F'(t_0) = \|\gamma'(t_0)\|}$$

$$(3) L(\gamma) = s(b) = s(b) - s(a) \stackrel{AI}{=} \int_a^b s'(t) dt \stackrel{(2)}{=} \int_a^b \|\gamma'(t)\| dt \quad \blacksquare$$

Beispiele:

$$(1) x_0, y_0 \in \mathbb{R}^n, \gamma(t) := x_0 + t(y_0 - x_0) \quad (t \in [0, 1]). \quad \gamma'(t) = y_0 - x_0 \implies L(\gamma) = \int_0^1 \|y_0 - x_0\| dt = \|y_0 - x_0\|.$$

$$(2) \text{ Sei } f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R} \text{ stetig und } \gamma(t) := (t, f(t)), t \in [a, b]. \quad \gamma \text{ ist ein Weg im } \mathbb{R}^2. \quad \gamma \text{ ist rektifizierbar} \iff f \in \text{BV}[a, b]. \quad \Gamma_\gamma = \text{Graph von } f. \quad \text{Jetzt sei } f \in C^1[a, b] \xrightarrow{12.5} L(\gamma) = \int_a^b \|\gamma'(t)\| dt = \int_a^b (1 + f'(t)^2)^{\frac{1}{2}} dt.$$

$$(3) \gamma(t) := (\cos t, \sin t) \quad (t \in [0, 2\pi]). \quad \gamma'(t) = (-\sin t, \cos t). \quad \|\gamma'(t)\| = 1 \quad \forall t \in [0, 2\pi] \xrightarrow{12.5} s'(t) = 1 \quad \forall t \in [0, 2\pi] \implies s(t) = t \quad \forall t \in [0, 2\pi] \quad (\text{Bogenmaß}). \quad \text{Winkelmaß: } \varphi := \frac{180}{\pi} t. \quad L(\gamma) = 2\pi.$$

Definition

$\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ sei ein Weg.

$$(1) \gamma \text{ heißt } \mathbf{st\ddot{u}ckweise stetig differenzierbar} : \iff \exists z = \{t_0, \dots, t_m\} \in \mathfrak{Z} \text{ mit: } \gamma|_{[t_{k-1}, t_k]} \text{ sind stetig differenzierbar } (k = 1, \dots, m) \iff \exists \text{ stetig differenzierbare Wege } \gamma_1, \dots, \gamma_l : \gamma = \gamma_1 \oplus \dots \oplus \gamma_l.$$

$$(2) \gamma \text{ heißt } \mathbf{glatt} : \iff \gamma \text{ ist stetig differenzierbar und } \|\gamma'(t)\| > 0 \quad \forall t \in [a, b].$$

$$(3) \gamma \text{ heißt } \mathbf{st\ddot{u}ckweise glatt} : \iff \exists \text{ glatte Wege } \gamma = \gamma_1 \oplus \dots \oplus \gamma_l$$

Aus 12.2 und 12.5 folgt:

Satz 12.6 (Rektifizierbarkeit von Wegsummen)

Ist $\gamma = \gamma_1 \oplus \dots \oplus \gamma_l$ stückweise stetig differenzierbar, mit stetig differenzierbaren Wegen $\gamma_1, \dots, \gamma_l \implies \gamma$ ist rektifizierbar und $L(\gamma) = L(\gamma_1) + \dots + L(\gamma_l)$.

Definition

Sei $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ ein Weg. γ heißt eine **Parameterdarstellung** von Γ_γ .

Beispiele:

- (1) $x_0, y_0 \in \mathbb{R}^n, \gamma_1(t) := x_0 + t(y_0 - x_0) \ t \in [0, 1], \gamma_2(t) := \gamma_1^-(t) \ t \in [0, 1], \gamma_3(t) := x_0 + 7t(y_0 - x_0) \ t \in [0, \frac{1}{7}]$. $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ sind Parameterdarstellungen von $S[x_0, y_0]$.
- (2) $\gamma_1(t) = (\cos t, \sin t), (t \in [0, 2\pi]), \gamma_2(t) := (\cos t, \sin t), (t \in [0, 4\pi])$. γ_1, γ_2 sind Parameterdarstellungen von $K = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x^2 + y^2 = 1\}$.

Definition

$\gamma_1 : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ und $\gamma_2 : [\alpha, \beta] \rightarrow \mathbb{R}^n$ seien Wege.

γ_1 und γ_2 heißen **äquivalent**, in Zeichen $\gamma_1 \sim \gamma_2 : \iff \exists h : [a, b] \rightarrow [\alpha, \beta]$ stetig und streng wachsend, $h(a) = \alpha, h(b) = \beta$ und $\gamma_1(t) = \gamma_2(h(t)) \ \forall t \in [a, b]$ (also $\gamma_1 = \gamma_2 \circ h$). h heißt eine **Parametertransformation** (PTF). Analysis 1 $\implies h([a, b]) = [\alpha, \beta] \implies \Gamma_{\gamma_1} = \Gamma_{\gamma_2}$. Es gilt: $\gamma_2 = \gamma_1 \circ h^{-1} \implies \gamma_2 \sim \gamma_1$. „ \sim “ ist eine Äquivalenzrelation.

Beispiele:

- (1) $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ seien wie in obigem Beispiel (1). $\gamma_1 \sim \gamma_3, \gamma_1 \sim \gamma_2$.
- (2) γ_1, γ_2 seien wie in obigem Beispiel (2). $\gamma_1 \not\sim \gamma_2$, denn $L(\gamma_1) = 2\pi \neq 4\pi = L(\gamma_2)$

Satz 12.7 (Eigenschaften der Parametertransformation)

$\gamma_1 : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ und $\gamma_2 : [\alpha, \beta] \rightarrow \mathbb{R}^n$ seien äquivalente Wege und $h : [a, b] \rightarrow [\alpha, \beta]$ eine Parametertransformation.

- (1) γ_1 ist rektifizierbar $\iff \gamma_2$ ist rektifizierbar. In diesem Falle: $L(\gamma_1) = L(\gamma_2)$
- (2) Sind γ_1 und γ_2 glatt $\implies h \in C^1[a, b]$ und $h' > 0$.

Beweis

(2) **In den großen Übungen.**

- (1) Es genügt zu zeigen: Aus γ_2 rektifizierbar folgt: γ_1 ist rektifizierbar und $L(\gamma_1) \leq L(\gamma_2)$. Sei $Z = \{t_0, \dots, t_m\} \in \mathfrak{Z} \implies \tilde{Z} := \{h(t_0), \dots, h(t_m)\}$ ist eine Zerlegung von $[\alpha, \beta]$.

$$L(\gamma_1, Z) = \sum_{j=1}^m \|\gamma_1(t_j) - \gamma_1(t_{j-1})\| = \sum_{j=1}^m \|\gamma_2(h(t_j)) - \gamma_2(h(t_{j-1}))\| = L(\gamma_2, \tilde{Z}) \leq L(\gamma_2)$$

$\implies \gamma_1$ ist rektifizierbar und $L(\gamma_1) \leq L(\gamma_2)$. ■

Weglänge als Parameter Es sei $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ ein *glatter* Weg. 12.5 $\implies \gamma$ ist rb. $L := L(\gamma)$. 12.5 $\implies s \in C^1[a, b]$ und $s'(t) = \|\gamma'(t)\| > 0 \forall t \in [a, b]$. s ist also *streng wachsend*. Dann gilt: $s([a, b]) = [0, L]$, $s^{-1} : [0, L] \rightarrow [a, b]$ ist streng wachsend und stetig db. $(s^{-1})'(\sigma) = \frac{1}{s'(t)}$ für $\sigma \in [0, L]$, $s(t) = \sigma$.

Definition

$\tilde{\gamma} : [0, L] \rightarrow \mathbb{R}^n$ durch $\tilde{\gamma}(\sigma) := \gamma(s^{-1}(\sigma))$, also $\tilde{\gamma} = \gamma \circ s^{-1}$; $\tilde{\gamma}$ ist ein Weg im \mathbb{R}^n und $\tilde{\gamma} \sim \gamma$; $\Gamma_\gamma = \Gamma_{\tilde{\gamma}}$.

12.7 $\implies \tilde{\gamma}$ ist rb, $L(\tilde{\gamma}) = L(\gamma) = L$, $\tilde{\gamma}$ ist stetig db. $\tilde{\gamma}$ heißt Parameterdarstellung von Γ_γ mit der Weglänge als Parameter. Warum?

Darum: Sei \tilde{s} die zu $\tilde{\gamma}$ gehörende Weglängenfunktion. $\forall \sigma \in [0, L] : \tilde{\gamma}(\sigma) = \gamma(s^{-1}(\sigma))$. Sei $\sigma \in [0, L]$, $t := s^{-1}(\sigma) \in [a, b]$, $s(t) = \sigma$.

$$\tilde{\gamma}(\sigma) = (s^{-1})'(\sigma) \cdot \gamma'(s^{-1}(\sigma)) = \frac{1}{s'(t)} \gamma'(t) \stackrel{12.5}{=} \frac{1}{\|\gamma'(t)\|} \gamma'(t) \implies \|\gamma'(\sigma)\| = 1 \quad (\implies \tilde{\gamma} \text{ ist glatt}).$$

$$\tilde{s}'(\gamma) \stackrel{12.5}{=} \|\gamma'(\sigma)\| = 1 \stackrel{\tilde{s}(0)=0}{\implies} \tilde{s}(\sigma) = \sigma.$$

Also: $\|\tilde{\gamma}'(\sigma)\| = 1$, $\tilde{s}(\sigma) = \sigma \forall \sigma \in [0, L]$.

Beispiel

$\gamma(t) = \frac{e^t}{\sqrt{2}}(\cos t, \sin t)$, $t \in [0, 1]$; γ ist stetig db; Nachrechnen: $\|\gamma'(t)\| = e^t \forall t \in [0, 1] \implies \gamma$ ist glatt.

$$s'(t) \stackrel{12.5}{=} \|\gamma'(t)\| = e^t \implies s(t) = e^t + c \implies 0 = s(0) = 1 + c \implies c = -1, \quad s(t) = e^t - 1 \quad (t \in [0, 1]) \implies L = L(\gamma) = s(1) = e - 1. \quad e^t = 1 + s(t), \quad t = \log(1 + s(t)).$$

$$\tilde{\gamma}(\sigma) = \gamma(s^{-1}(\sigma)) = \gamma(\log(1 + \sigma)) = \frac{1+\sigma}{\sqrt{2}}(\cos(\log(1 + \sigma)), \sin(\log(1 + \sigma))), \quad \sigma \in [0, e - 1].$$

§ 13.

Wegintegrale

In diesem Paragraphen seien alle vorkommenden Wege stets stückweise stetig differenzierbar.

Definition

Sei $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ ein Weg, $\gamma = (\eta_1, \dots, \eta_n)$, $\Gamma := \Gamma_\gamma$. $g : \Gamma \rightarrow \mathbb{R}$ stetig und $f = (f_1, \dots, f_n) : \Gamma \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig.

$$(1) \text{ Für } j \in \{1, \dots, n\} : \int_\gamma g(x) \, dx_j := \int_a^b g(\gamma(t)) \cdot \eta'_j(t) \, dt$$

(2)

$$\begin{aligned} \int_\gamma f(x) \cdot dx &:= \int_\gamma f_1(x) \, dx_1 + \dots + f_n(x) \, dx_n \\ &:= \sum_{j=1}^n \int_\gamma f_j(x) \, dx_j \end{aligned}$$

Es ist $\int_\gamma f(x) \cdot dx = \int_a^b f(\gamma(t)) \cdot \gamma'(t) \, dt$ und heißt das **Wegintegral von f längs γ** .

Beispiel

$f(x, y, z) := (z, y, x)$, $\gamma(t) = (t, t^2, 3t)$, $t \in [0, 1]$. $f(\gamma(t)) = (3t, t^2, t)$, $\gamma'(t) = (1, 2t, 3)$, $f(\gamma(t)) \cdot \gamma'(t) = 3t + 2t^3 + 3t = 6t + 2t^3$.

$$\int_\gamma f(x, y, z) \cdot d(x, y, z) = \int_0^1 (6t + 2t^3) dt = \frac{7}{2}.$$

Satz 13.1 (Rechnen mit Wegintegralen)

γ, Γ, f seien wie oben, $g : \Gamma \rightarrow \mathbb{R}^n$ sei stetig, $\hat{\gamma} = (\hat{\gamma}_1, \dots, \hat{\gamma}_n) : [\alpha, \beta] \rightarrow \mathbb{R}^n$ sei rektifizierbar und $\xi, \eta \in \mathbb{R}$.

$$(1) \int_\gamma (\xi f(x) + \eta g(x)) \cdot dx = \xi \int_\gamma f(x) \cdot dx + \eta \int_\gamma g(x) \cdot dx$$

$$(2) \text{ Ist } \gamma = \gamma^{(1)} \oplus \gamma^{(2)} \implies \int_\gamma f(x) \cdot dx = \int_{\gamma^{(1)}} f(x) \cdot dx + \int_{\gamma^{(2)}} f(x) \cdot dx$$

$$(3) \int_{\gamma^-} f(x) \cdot dx = - \int_\gamma f(x) \cdot dx$$

$$(4) \left| \int_\gamma f(x) \cdot dx \right| \leq L(\gamma) \cdot \max\{\|f(x)\| : x \in \Gamma\}$$

$$(5) \text{ Ist } \hat{\gamma} \sim \gamma \implies \int_{\gamma} f(x) \cdot dx = \int_{\hat{\gamma}} f(x) \cdot dx.$$

Beweis

(1) klar

(2) Ana I, 26.1(3)

(3) nur für γ stetig differenzierbar. $\gamma^-(t) = \gamma(b + a - t)$, $t \in [a, b]$.

$$\begin{aligned} \int_{\gamma^-} f(x) \cdot dx &= \int_a^b f(\gamma(b + a - t)) \cdot \gamma'(b + a - t)(-1)dt = (\text{subst. } \tau = b + a - t, d\tau = -dt) \\ &= \int_b^a f(\gamma(\tau)) \cdot \gamma'(\tau)d\tau = - \int_a^b f(\gamma(\tau)) \cdot \gamma'(\tau)d\tau = - \int_{\gamma} f(x) \cdot dx. \end{aligned}$$

(4) Übung

(5) Sei $\hat{\gamma} = \gamma \circ h$, $h : [\alpha, \beta] \rightarrow [a, b]$ stetig und streng wachsend. $h(\alpha) = a$, $h(\beta) = b$. Nur für γ und h stetig db. Dann ist $\hat{\gamma}$ stetig db.

$$\begin{aligned} \int_{\hat{\gamma}} f(x) \cdot dx &= \int_{\alpha}^{\beta} f(\gamma(h(t))) \cdot \gamma'(h(t)) \cdot h'(t)dt = (\text{subst. } \tau = h(t), d\tau = h'(t)dt) = \\ &= \int_a^b f(\gamma(\tau)) \cdot \gamma'(\tau)d\tau = \int_{\gamma} f(x) \cdot dx. \quad \blacksquare \end{aligned}$$

Definition

γ, Γ seien wie immer in diesem Paragraphen. s sei die zu γ gehörende Weglängenfunktion und $g : \Gamma \rightarrow \mathbb{R}$ stetig. 12.4 $\implies s$ ist wachsend $\xrightarrow{\text{Ana I}} s \in BV[a, b]$; $g \circ \gamma$ stetig $\xrightarrow{\text{Ana I, 26.6}} g \circ \gamma \in R_s[a, b]$.

$$\int_{\gamma} g(x)ds := \int_a^b g(\gamma(t))ds(t)$$

Integral bzgl. der Weglänge.**Satz 13.2 (Rechnen mit Integralen bzgl. der Weglänge)**Seien γ, g wie oben.

$$(1) \int_{\gamma^-} g(x)ds = \int_{\gamma} g(x)ds$$

$$(2) \text{ Ist } \gamma = \gamma^{(1)} \oplus \gamma^{(2)} \implies \int_{\gamma} g(x)ds = \int_{\gamma^{(1)}} g(x)ds + \int_{\gamma^{(2)}} g(x)ds.$$

$$(3) \text{ Ist } \gamma \text{ stetig db} \implies \int_{\gamma} g(x)ds = \int_a^b g(\gamma(t))\|\gamma'(t)\|dt.$$

Beispiel

$$g(x, y) = (1 + x^2 + 3y)^{1/2}, \quad \gamma(t) = (t, t^2), \quad t \in [0, 1].$$

$$g(\gamma(t)) = (1 + t^2 + 3t^2)^{1/2} = (1 + 4t^2)^{1/2}, \quad \gamma'(t) = (1, 2t), \quad \|\gamma'(t)\| = (1 + 4t^2)^{1/2} \implies \int_{\gamma} g(x, y) ds = \int_0^1 (1 + 4t^2) dt = \frac{7}{3}$$

Gegeben: $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m$ rektifizierbare Wege, $\gamma_k : [a_k, b_k] \rightarrow \mathbb{R}^n$ mit $\gamma_1(b_1) = \gamma_2(a_2), \gamma_2(b_2) = \gamma_3(a_3), \dots, \gamma_{m-1}(b_{m-1}) = \gamma_m(a_m)$. $\Gamma := \Gamma_{\gamma_1} \cup \dots \cup \Gamma_{\gamma_m}$.

$\text{AH}(\gamma_1, \dots, \gamma_m) := \{\gamma : \gamma \text{ ist ein rektifizierbarer Weg im } \mathbb{R}^n \text{ mit: } \Gamma_{\gamma} = \Gamma, L(\gamma) = L(\gamma_1) + \dots + L(\gamma_m) \text{ und } \int_{\gamma} f(x) \cdot dx = \int_{\gamma_1} f(x) \cdot dx + \dots + \int_{\gamma_m} f(x) \cdot dx \text{ f\"ur jedes stetige } f : \Gamma \rightarrow \mathbb{R}^n\}$.

Ist $\gamma \in \text{AH}(\gamma_1, \dots, \gamma_m)$, so sagt man γ entsteht durch **Aneinanderhängen** der Wege $\gamma_1, \dots, \gamma_m$.

Satz 13.3 (Stetige Differenzierbarkeit der Aneinanderhängung)

$\gamma_1, \dots, \gamma_m$ seien wie oben. Dann: $\text{AH}(\gamma_1, \dots, \gamma_m) \neq \emptyset$.

Sind $\gamma_1, \dots, \gamma_m$ stetig differenzierbar, so existiert ein stückweise stetig differenzierbarer Weg $\gamma \in \text{AH}(\gamma_1, \dots, \gamma_m)$.

Beweis

O.B.d.A: $m = 2$.

Def. $h : [b_1, c] \rightarrow [a_2, b_2]$ linear wie folgt: $h(x) = px + q$, $h(b_1) = a_2$, $h(c) = b_2$. $\hat{\gamma}_2 := \gamma_2 \circ h$.
Dann: $\gamma_2 \sim \hat{\gamma}_2$. $\gamma := \gamma_1 \oplus \hat{\gamma}_2$. 12.2, 12.7, 13.2 $\implies \gamma \in \text{AH}(\gamma_1, \gamma_2)$. ■

Beispiel

In allen Beispielen sei $f(x, y) = (y, x - y)$ und $t \in [0, 1]$.

(1) $\gamma_1(t) = (t, 0)$, $\gamma_2(t) = (1, t)$.

Sei $\gamma \in \text{AH}(\gamma_1, \gamma_2)$. Anfangspunkt von γ ist (0,0), Endpunkt von γ ist (1,1). Nachrechnen:
 $\int_{\gamma_1} f(x, y) \cdot d(x, y) = 0$, $\int_{\gamma_2} f(x, y) \cdot d(x, y) = \frac{1}{2}$. Also: $\int_{\gamma} f(x, y) \cdot d(x, y) = \frac{1}{2}$

(2) $\gamma_1(t) = (0, t)$, $\gamma_2(t) = (t, 1)$.

Sei $\gamma \in \text{AH}(\gamma_1, \gamma_2)$, Anfangspunkt von γ ist (0,0), Endpunkt von γ ist (1,1). Nachrechnen:
 $\int_{\gamma} f(x, y) \cdot d(x, y) = \frac{1}{2}$

(3) $\gamma(t) = (t, t^3)$. Anfangspunkt von γ ist (0,0), Endpunkt von γ ist (1,1). Nachrechnen:
 $\int_{\gamma} f(x, y) \cdot d(x, y) = \frac{1}{2}$

§ 14.

Stammfunktionen

In diesem Paragraphen sei stets: $\emptyset \neq G \subseteq \mathbb{R}^n$, G ein *Gebiet* und $f = (f_1, \dots, f_n) : G \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig.

Definition

Eine Funktion $\varphi : G \rightarrow \mathbb{R}$ heißt eine **Stammfunktion (SF) von f auf G** : $\iff \varphi$ ist auf G partiell differenzierbar und $\text{grad } \varphi = f$ auf G . Also: $\varphi_{x_j} = f_j$ auf G ($j = 1, \dots, n$).

Bemerkung:

- (1) Ist φ eine Stammfunktion von f auf $G \implies \text{grad } \varphi = f \implies \varphi \in C^1(G, \mathbb{R}) \xrightarrow{5.3} \varphi$ ist auf G differenzierbar und $\varphi' = f$ auf G .
- (2) Sind φ_1, φ_2 Stammfunktionen von f auf $G \xrightarrow{(1)} \varphi'_1 = \varphi'_2$ auf $G \xrightarrow{6.2} \exists c \in \mathbb{R} : \varphi_1 = \varphi_2 + c$ auf G
- (3) Ist $n = 1 \implies G$ ist ein offenes Intervall. AI, 23.14 \implies jedes stetige $f : G \rightarrow \mathbb{R}$ besitzt auf G eine Stammfunktion! Im Falle $n \geq 2$ ist dies *nicht* so.

Beispiele:

- (1) $G = \mathbb{R}^2$, $f(x, y) = (y, -x)$.

Annahme: f besitzt auf \mathbb{R}^2 die Stammfunktion φ . Dann: $\varphi_x = y$, $\varphi_y = -x$ auf $G \implies \varphi \in C^2(\mathbb{R}^2, \mathbb{R})$ und $\varphi_{xy} = 1 \neq -1 = \varphi_{yx}$. Widerspruch zu 4.1. Also: f besitzt auf \mathbb{R}^2 *keine* Stammfunktion.

- (2) $G = \mathbb{R}^2$, $f(x, y) = (y, x - y)$.

Ansatz für eine Stammfunktion φ von f : $\varphi_x = y \implies \varphi = xy + c(y)$, c differenzierbar, $\implies \varphi_y \stackrel{!}{=} x + c'(y) = x - y \implies c'(y) = -y$, etwa $c(y) = -\frac{1}{2}y^2$. Also: $\varphi(x, y) = xy - \frac{1}{2}y^2$. Probe: $\varphi_x = y$, $\varphi_y = x - y$, also: $\text{grad } \varphi = f$. φ ist also eine Stammfunktion von f auf \mathbb{R}^2 .

Satz 14.1 (Hauptsatz der mehrdimensionalen Integralrechnung)

f besitzt auf G die Stammfunktion φ ; $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ ein ein stückweise stetig differenzierbarer Weg mit $\Gamma_\gamma \subseteq G$. Dann:

$$\int_\gamma f(x) \cdot dx = \varphi(\gamma(b)) - \varphi(\gamma(a))$$

Das heißt: $\int_\gamma f(x) \cdot dx$ hängt nur vom Anfangs- und Endpunkt von γ ab.

Ist γ geschlossen, das heißt $\gamma(a) = \gamma(b)$, dann gilt $\int_{\gamma} f(x) \cdot dx = 0$.

Beweis

O.B.d.A.: γ ist stetig differenzierbar. $\Phi(t) := \varphi(\gamma(t))$, $t \in [a, b]$. Φ ist stetig differenzierbar und $\Phi'(t) = \varphi'(\gamma(t)) \cdot \gamma'(t) = f(\gamma(t)) \cdot \gamma'(t)$. Dann: $\int_{\gamma} f(x) \cdot dx \stackrel{13.1}{=} \int_a^b f(\gamma(t)) \cdot \gamma'(t) dt = \int_a^b \Phi'(t) dt \stackrel{AI}{=} \Phi(b) - \Phi(a) = \varphi(\gamma(b)) - \varphi(\gamma(a))$. ■

Hilfssatz 14.2

Es seien $x_0, y_0 \in G$. Dann existiert ein stückweise stetig differenzierbarer Weg γ mit: $\Gamma_{\gamma} \subseteq G$ und Anfangspunkt von $\gamma = x_0$ und Endpunkt von $\gamma = y_0$.

Beweis

G Gebiet $\implies \exists z_0, z_1, \dots, z_m \in G : S[z_0, \dots, z_m] \subseteq G, z_0 = x_0, z_m = y_0$.

$\gamma_j(t) := z_{j-1} + t(z_j - z_{j-1})$, ($t \in [0, 1]$), ($j = 1, \dots, m$). Dann: $\Gamma_{\gamma_j} = S[z_{j-1}, z_j] \implies \Gamma_{\gamma_1} \cup \dots \cup \Gamma_{\gamma_m} = S[z_0, \dots, z_m] \subseteq G$. 13.4 $\implies \exists \gamma \in \text{AH}(\gamma_1, \dots, \gamma_m)$ stückweise stetig differenzierbar $\implies \Gamma_{\gamma} = S[z_0, \dots, z_m] \subseteq G$. ■

Definition

$\int f(x) \cdot dx$ heißt **in G wegunabhängig** (wu) : \iff für je zwei Punkte $x_0, y_0 \in G$ gilt: für jeden stückweise stetig differenzierbaren Weg $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ mit $\Gamma_{\gamma} \subseteq G$, $\gamma(a) = x_0$ und $\gamma(b) = y_0$ hat das Integral $\int_{\gamma} f(x) \cdot dx$ stets denselben Wert. In diesem Fall: $\int_{x_0}^{y_0} f(x) \cdot dx := \int_{\gamma} f(x) \cdot dx$.

14.1 lautet dann: besitzt f auf G die Stammfunktion $\varphi \implies \int f(x) \cdot dx$ ist in G wegunabhängig und $\int_{x_0}^{y_0} = \varphi(y_0) - \varphi(x_0)$ (Verallgemeinerung von Analysis 1, 23.5).

Satz 14.3 (Wegunabhängigkeit, Existenz von Stammfunktionen)

f besitzt auf G eine Stammfunktion $\iff \int f(x) \cdot dx$ ist in G wegunabhängig.

In diesem Fall: ist $x_0 \in G$ und $\varphi : G \rightarrow \mathbb{R}$ definiert durch:

$$\varphi(z) = \int_{x_0}^z f(x) \cdot dx \quad (z \in G) \quad (*)$$

Dann ist φ eine Stammfunktion von f auf G .

Beweis

„ \implies “: 14.1 „ \Leftarrow “: Sei $x_0 \in G$ und φ wie in (*). Zu zeigen: φ ist auf G differenzierbar und $\varphi' = f$ auf G . Sei $z_0 \in G, h \in \mathbb{R}^n, h \neq 0$ und $\|h\|$ so klein, dass $z_0 + th \in G \forall t \in [0, 1]$. $\gamma(t) := z_0 + th$ ($t \in [0, 1]$), $\Gamma_{\gamma} = S[z_0, z_0 + h] \subseteq G$. $\rho(h) := \frac{1}{\|h\|}(\varphi(z_0 + h) - \varphi(z_0) - f(z_0) \cdot h)$. Zu zeigen: $\rho(h) \rightarrow 0$ ($h \rightarrow 0$). 14.2 \implies es existieren stückweise stetig differenzierbare Wege γ_1, γ_2 mit: $\Gamma_{\gamma_1}, \Gamma_{\gamma_2} \subseteq G$. Anfangspunkt von $\gamma_1 = x_0$ = Anfangspunkt von γ_2 . Endpunkt von $\gamma_1 = z_0$, Endpunkt von $\gamma_2 = z_0 + h$. Sei $\gamma_3 \in \text{AH}(\gamma_1, \gamma_2)$ stückweise stetig differenzierbar (13.4!). Dann:

$$\underbrace{\int_{\gamma_3} f(x) \cdot dx}_{=\varphi(z_0+h)} = \underbrace{\int_{\gamma_1} f(x) \cdot dx}_{=\varphi(z_0)} + \int_{\gamma_2} f(x) \cdot dx$$

$\int f(x) \cdot dx$ ist wegunabhängig in $G \implies$

$$\int_{\gamma_3} f(x) \cdot dx = \int_{\gamma_2} f(x) \cdot dx = \varphi(z_0 + h) \implies \varphi(z_0 + h) - \varphi(z_0) = \int_{\gamma} f(x) \cdot dx$$

Es ist:

$$\begin{aligned} \int_{\gamma} f(z_0) \cdot dx &= \int_0^1 f(z_0) \cdot \underbrace{\gamma'(t)}_{=h} dt = f(z_0) \cdot h \\ \implies \rho(h) &= \frac{1}{\|h\|} \int_{\gamma} (f(x) - f(z_0)) dx \\ \implies |\rho(h)| &= \frac{1}{\|h\|} \left| \int_{\gamma} f(x) - f(z_0) dx \right| \\ &\leq \frac{1}{\|h\|} \underbrace{L(\gamma)}_{=\|h\|} \underbrace{\max\{\|f(x) - f(z_0)\| : x \in \Gamma_{\gamma}\}}_{=\|f(x_n) - f(z_0)\|} \end{aligned}$$

wobei $x_n \in \Gamma_{\gamma} = S[z_0, z_0 + h] \implies |\rho(h)| \leq \|f(x_n) - f(z_0)\|$. Für $h \rightarrow 0 : x_n \rightarrow z_0 \xrightarrow{\text{f stetig}} \|f(x_n) - f(z_0)\| \rightarrow 0 \implies \rho(h) \rightarrow 0$. ■

Satz 14.4 (Integrabilitätsbedingungen)

Sei $f = (f_1, \dots, f_n) \in C^1(G, \mathbb{R}^n)$. Besitzt f auf G die Stammfunktion $\varphi \implies$

$$\frac{\partial f_j}{\partial x_k} = \frac{\partial f_k}{\partial x_j} \text{ auf } G \quad (j, k = 1, \dots, n)$$

(Integrabilitätsbedingungen (IB)). Warnung: Die Umkehrung von 14.4 gilt im Allgemeinen **nicht** (\rightarrow Übungen!).

Beweis

Sei φ eine Stammfunktion von f auf $G \implies \varphi$ ist differenzierbar auf G und $\varphi_{x_j} = f_j$ auf G ($j = 1, \dots, n$). $f \in C^1(G, \mathbb{R}^n) \implies \varphi \in C^2(G, \mathbb{R})$

$$\implies \frac{\partial f_j}{\partial x_k} = \varphi_{x_j x_k} \stackrel{4.7}{=} \varphi_{x_k x_j} = \frac{\partial f_k}{\partial x_j} \text{ auf } G.$$

■

Definition

Sei $\emptyset \neq M \subseteq \mathbb{R}^n$. M heißt **sternförmig** : $\iff \exists x_0 \in M : S[x_0, x] \subseteq M \quad \forall x \in M$.

Beachte:

- (1) Ist M konvex $\implies M$ ist sternförmig
- (2) Ist M offen und sternförmig $\implies M$ ist ein Gebiet

Satz 14.5 (Kriterium zur Existenz von Stammfunktionen)

Sei G sternförmig und $f \in C^1(G, \mathbb{R}^n)$. Dann: f besitzt auf G eine Stammfunktion : $\iff f$ erfüllt auf G die Integrabilitätsbedingungen

Beweis

„ \implies “: 14.1 „ \Leftarrow “: G sternförmig $\implies \exists x_0 \in G : S[x_0, x] \subseteq G \forall x \in G$. OBdA: $x_0 = 0$.

Für $x = (x_1, \dots, x_n) \in G$ sei $\gamma_x(t) = tx, t \in [0, 1]$.

$$\begin{aligned}\varphi(x) &:= \int_{\gamma_x} f(z) \cdot dz \quad (x \in G) \\ &= \int_0^1 f(tx) \cdot x dt \\ &= \int_0^1 (f_1(tx) \cdot x_1 + f_2(tx) \cdot x_2 + \dots + f_n(tx) \cdot x_n) dt\end{aligned}$$

Zu zeigen: φ ist auf G partiell differenzierbar nach x_j und $\varphi_{x_j} = f_j$ ($j = 1, \dots, n$). OBdA: $j = 1$.

Später (in 21.3) zeigen wir: φ ist partiell differenzierbar nach x_1 und:

$$\varphi_{x_1}(x) = \int_0^1 \frac{\partial}{\partial x_1} (f_1(tx)x_1 + \dots + f_n(tx) \cdot x_n) dt$$

Für $k = 1, \dots, n$: $g_k(x) = f_k(tx) \cdot x_k$.

$$k = 1 : g_1(x) = f_1(tx)x_1 \implies \frac{\partial g_1}{\partial x_1}(x) = f_1(tx) + t \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(tx)x_1$$

$$k \geq 2 : g_k(x) = f_k(tx)x_k \implies \frac{\partial g_k}{\partial x_1}(x) = t \frac{\partial f_k}{\partial x_1}(tx)x_k \implies$$

$$\begin{aligned}\varphi_{x_1}(x) &= \int_0^1 (f_1(tx) + t(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}(tx)x_1 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_1}(tx)x_n)) dt \\ &\stackrel{\text{IB}}{=} \int_0^1 (f_1(tx) + t(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}(tx)x_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_2}(tx)x_2 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n}(tx)x_n)) dt \\ &= \int_0^1 (f_1(tx) + t f_1'(tx) \cdot x) dt\end{aligned}$$

Sei $x \in G$ (fest), $h(t) := t \cdot f_1(tx)$ ($t \in [0, 1]$). h ist stetig differenzierbar und $h'(t) = f_1(tx) + t f_1'(tx) \cdot x \implies \varphi_{x_1}(x) = \int_0^1 h'(t) dt \stackrel{\text{A1}}{=} h(1) - h(0) = f_1(x)$. ■

§ 15.

Vorgriff auf Analysis III

In Analysis III werden wir für gewisse Mengen $A \subseteq \mathbb{R}^n$ und gewisse Funktionen $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ folgendes Integral definieren:

$$\int_A f(x) dx = \int_A f(x_1, \dots, x_n) d(x_1, \dots, x_n)$$

In diesem Paragraphen geben wir „Kochrezepte“ an, wie man solche Integrale für spezielle Mengen $A \subset \mathbb{R}^2$ (bzw. $A \subset \mathbb{R}^3$) und stetige Funktionen $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ berechnen kann.

I Der Fall $n = 2$:

Definition

Es sei $[a, b] \subset \mathbb{R}$, $h_1, h_2 \in C[a, b]$ und $h_1 \leq h_2$ auf $[a, b]$.

$$A := \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x \in [a, b], h_1(x) \leq y \leq h_2(x)\}$$

$$(A := \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid y \in [a, b], h_1(y) \leq x \leq h_2(y)\})$$

heißt **Normalbereich** bezüglich der x -Achse (y -Achse).

Übung: A ist kompakt.

Satz 15.1 (Integral über Normalbereiche im \mathbb{R}^2)

Sei A wie oben und $f : A \rightarrow \mathbb{R}$, dann gilt:

$$\begin{aligned} \int_A f(x, y) d(x, y) &= \int_a^b \left(\int_{h_1(x)}^{h_2(x)} f(x, y) dy \right) dx \\ \left(\int_A f(x, y) d(x, y) &= \int_a^b \left(\int_{h_1(y)}^{h_2(y)} f(x, y) dx \right) dy \right) \end{aligned}$$

Achtung: $\int_A f(x) dx$ nicht mit dem Wegintegral $\int_\gamma f(x) \cdot dx$ verwechseln!

Definition

Sei A ein Normalbereich bzgl. der x - oder y -Achse, so heißt:

$$|A| := \int_A 1 d(x, y)$$

der **Flächeninhalt** von A .

Beispiele:

- (1) Sei A ein Normalbereich bzgl. der x -Achse und seien h_1, h_2 wie oben. Dann gilt:

$$\begin{aligned} |A| &= \int_A 1 \, d(x, y) \\ &\stackrel{15.1}{=} \int_a^b \left(\int_{h_1(x)}^{h_2(x)} 1 \, dy \right) dx \\ &= \int_a^b (h_2(x) - h_1(x)) \, dx \end{aligned}$$

Ist z.B. $h_1 = 0$, so folgt:

$$|A| = \int_a^b h_2(x) \, dx$$

- (2) Sei $A = [a, b] \times [c, d]$, dann ist A Normalbereich bezüglich der x - **und** der y -Achse. Sei $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ stetig. Es folgt aus 15.1.:

$$\begin{aligned} \int_A f(x, y) d(x, y) &= \int_a^b \left(\int_c^d f(x, y) \, dy \right) dx \\ &= \int_c^d \left(\int_a^b f(x, y) \, dx \right) dy \end{aligned}$$

- (3) Sei $r > 0$ und $A := \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x^2 + y^2 \leq r^2\}$. Dann ist A ein Normalbereich der x -Achse mit $h_1(x) := \sqrt{r^2 - x^2}$ und $h_2(x) := -\sqrt{r^2 - x^2}$ (mit $x \in [-r, r]$), und es gilt:

$$\begin{aligned} |A| &= \int_{-r}^r h_2(x) - h_1(x) \, dx \\ &= \int_{-r}^r 2\sqrt{r^2 - x^2} \, dx \\ &= \pi r^2 \end{aligned}$$

- (4) Sei $A := \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x \in [0, 1], x \leq y \leq \sqrt{x}\}$ und $f(x, y) = xy$. Dann gilt für $h_1(x) = x$ und $h_2(x) = \sqrt{x}$:

$$\begin{aligned} \int_A xy \, d(x, y) &= \int_0^1 \left(\int_x^{\sqrt{x}} xy \, dy \right) dx \\ &= \int_0^1 \left(\left[\frac{1}{2} xy^2 \right]_x^{\sqrt{x}} \right) dx \\ &= \int_0^1 \frac{1}{2} x^2 - \frac{1}{2} x^3 \, dx \\ &= \frac{1}{2} \left[\frac{1}{3} x^3 - \frac{1}{4} x^4 \right]_0^1 = \frac{1}{24} \end{aligned}$$

Da $A = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid y \in [0, 1], y^2 \leq x \leq y\}$ außerdem Normalbereich bzgl. der

y -Achse ist, gilt:

$$\begin{aligned}\int_A f(x, y) \, dy &= \int_0^1 \left(\int_{y^2}^y xy \, dx \right) dy \\ &= \int_0^1 \left[\frac{1}{2} x^2 y \right]_{y^2}^y dy \\ &= \int_0^1 \frac{1}{2} y^3 - \frac{1}{2} y^5 \, dy \\ &= \frac{1}{2} \left[\frac{1}{4} y^4 - \frac{1}{6} y^6 \right]_0^1 = \frac{1}{24}\end{aligned}$$

II Der Fall $n = 3$:

Definition

Sei $A \subseteq \mathbb{R}^2$ ein Normalbereich bzgl. der x - oder der y -Achse, es seien $g_1, g_2 : A \rightarrow \mathbb{R}$ stetig und $g_1 \leq g_2$ auf A .

$$B := \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid (x, y) \in A, g_1(x, y) \leq z \leq g_2(x, y)\}$$

heißt ein **Normalbereich** bezüglich der x - y -Ebene. Normalbereiche bzgl. der x - z - und y - z -Ebene werden analog definiert.

Satz 15.2 (Integral über Normalbereiche im \mathbb{R}^3)

Sei B wie oben und $f : B \rightarrow \mathbb{R}$ stetig, dann gilt:

$$\int_B f(x, y, z) \, d(x, y, z) = \int_A \left(\int_{g_1(x, y)}^{g_2(x, y)} f(x, y, z) \, dz \right) d(x, y)$$

Definition

B sei wie in 15.2.

$$\begin{aligned}|B| &:= \int_B 1 \, d(x, y, z) \\ &= \int_A (g_2(x, y) - g_1(x, y)) \, d(x, y)\end{aligned}$$

heißt **Volumen** von B .

Beispiele:

(1) Sei $B := [a, b] \times [c, d] \times [\alpha, \beta]$, dann gilt:

$$\begin{aligned}\int_B f(x, y, z) \, d(x, y, z) &= \int_A \left(\int_{\alpha}^{\beta} f(x, y, z) \, dz \right) d(x, y) \\ &= \int_a^b \left(\int_c^d \left(\int_{\alpha}^{\beta} f(x, y, z) \, dz \right) dy \right) dx\end{aligned}$$

Dabei darf die Integrationsreihenfolge beliebig vertauscht werden.

- (2) Sei $B := \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x^2 + y^2 \leq 1, 0 \leq z \leq h\}$ für ein $h > 0$. Dann setze $A := \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x^2 + y^2 \leq 1\}$, $g_1 = 0, g_2 = h$. Es gilt:

$$\begin{aligned} |B| &= \int_A h \, d(x, y) \\ &= h \int_A 1 \, d(x, y) \\ &= h \cdot |A| = h\pi \end{aligned}$$

Satz 15.3 (Eigenschaften von Integralen über Normalbereiche)

Sei $B \subseteq \mathbb{R}^2$ oder $B \subseteq \mathbb{R}^3$ und $f, g : B \rightarrow \mathbb{R}$ stetig. Je nach Definition von B sei $X = (x, y)$ oder $X = (x, y, z)$.

- (1) Für alle $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ gilt:

$$\int_B \alpha f(X) + \beta g(X) \, dX = \alpha \int_B f(X) \, dX + \beta \int_B g(X) \, dX$$

- (2) Es gilt die bekannte Dreiecksungleichung:

$$\left| \int_B f(X) \, dX \right| \leq \int_B |f(X)| \, dX \leq |B| \cdot \max\{|f(X)| : X \in B\}$$

- (3) Ist $f \leq g$ auf B , so gilt:

$$\int_B f(X) \, dX \leq \int_B g(X) \, dX$$

§ 16.

Folgen, Reihen und Potenzreihen in \mathbb{C}

\mathbb{C} und \mathbb{R}^2 sind Vektorräume **über** \mathbb{R} der Dimension zwei. Sie unterscheiden sich als Vektorräume über \mathbb{R} nur dadurch, dass ihre Elemente mit:

$$z = x + iy \in \mathbb{C} \quad \text{bzw.} \quad (x, y) \in \mathbb{R}^2 \quad (x, y \in \mathbb{R})$$

bezeichnet werden. Mit dem **komplexen Betrag** $|z| := \sqrt{x^2 + y^2}$ gilt:

$$|z| = \|(x, y)\|$$

Man sieht, dass alle aus der Addition, der Skalarmultiplikation und der Norm entwickelten Begriffe und Sätze aus §1 und §2 auch in \mathbb{C} gelten.

Beispiel (Konvergente Folgen)

Sei (z_n) eine Folge in \mathbb{C} und $z_0 \in \mathbb{C}$. (z_n) konvergiert genau dann gegen z_0 , wenn gilt:

$$\begin{aligned} |z_n - z_0| &\xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \\ \Leftrightarrow^{2.1} \operatorname{Re}(z_n) &\xrightarrow{n \rightarrow \infty} \operatorname{Re}(z_0) \wedge \operatorname{Im}(z_n) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \operatorname{Im}(z_0) \end{aligned}$$

Außerdem ist (z_n) genau dann eine Cauchyfolge, wenn gilt:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists n_0 \in \mathbb{N} \forall n, m \geq n_0 : |z_n - z_m| < \varepsilon$$

Also nach Cauchy Kriterium genau dann, wenn (z_n) konvergent ist.

Satz 16.1 (Produkte und Quotienten von Folgen)

Seien $(z_n), (w_n)$ Folgen in \mathbb{C} mit $z_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} z_0, w_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} w_0$.

(1) Es gilt:

$$z_n w_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} z_0 w_0$$

(2) Ist $z_0 \neq 0$, so existiert ein $m \in \mathbb{N} : \forall n \geq m : z_n \neq 0$ und:

$$\frac{1}{z_n} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \frac{1}{z_0}$$

Beweis

Wie in Ana I. ■

Definition

Sei (z_n) eine Folge in \mathbb{C} , $s_n := z_1 + \dots + z_n$ ($n \in \mathbb{N}$). (s_n) heißt **unendliche Reihe** und wird mit $\sum_{n=1}^{\infty} z_n$ bezeichnet.

$\sum_{n=1}^{\infty} z_n$ heißt genau dann **konvergent** (**divergent**), wenn (s_n) konvergent (bzw. divergent) ist. Im Konvergenzfall gilt:

$$\sum_{n=1}^{\infty} z_n := \lim_{n \rightarrow \infty} s_n$$

Die Definitionen und Sätze der Paragraphen 11, 12, 13 aus Ana I gelten wörtlich auch in \mathbb{C} , bis auf diejenigen Definitionen und Sätze, in denen die Anordnung auf \mathbb{R} eine Rolle spielt (z.B. das Leibniz- und das Monotoniekriterium).

Beispiele:

(1) Sei $z \in \mathbb{C}$. $\sum_{n=0}^{\infty} z^n$ heißt **geometrische Reihe**.

Fall 1: Ist $|z| < 1$, dann gilt:

$$\begin{aligned} & \sum_{n=0}^{\infty} |z|^n \text{ konvergiert} \\ \implies & \sum_{n=0}^{\infty} z^n \text{ konvergiert absolut} \\ \implies & \sum_{n=0}^{\infty} z^n \text{ konvergiert} \end{aligned}$$

Fall 2: Ist $|z| \geq 1$, dann gilt:

$$\begin{aligned} & |z|^n = |z^n| \not\xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \\ \implies & z^n \not\xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \\ \implies & \sum_{n=0}^{\infty} z^n \text{ divergiert} \end{aligned}$$

Ist $|z| < 1$, so zeigt man wie in \mathbb{R} :

$$\sum_{n=0}^{\infty} z^n = \frac{1}{1-z}$$

(2) Betrachte $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!}$. Für alle $z \in \mathbb{C}$ gilt:

$$\begin{aligned} & \sum_{n=0}^{\infty} \frac{|z|^n}{n!} \text{ konvergiert} \\ \implies & \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!} \text{ konvergiert absolut} \end{aligned}$$

Für alle $z \in \mathbb{C}$ definiere die (komplexe) **Exponentialfunktion** wie folgt:

$$e^z := \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!}$$

- (3) Wie in Beispiel (2) sieht man, dass $\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{z^{2n}}{(2n)!}$ und $\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{z^{2n+1}}{(2n+1)!}$ für alle $z \in \mathbb{C}$ absolut konvergieren.

Dadurch lassen sich auch **Cosinus** und **Sinus** auf ganz \mathbb{C} definieren:

$$\cos z := \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{z^{2n}}{(2n)!}$$

$$\sin z := \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{z^{2n+1}}{(2n+1)!}$$

Satz 16.2 (Eigenschaften von Exponentialfunktion, Cosinus und Sinus)

Seien $z, w \in \mathbb{C}$, $z = x + iy$ mit $x, y \in \mathbb{R}$. Es gilt:

(1) $e^{z+w} = e^z e^w$

(2) $e^{iy} = \cos y + i \sin y$, insbesondere ist: $|e^{iy}| = 1$

(3) $e^z = e^x e^{iy} = e^x (\cos y + i \sin y)$

(4) $\cos(z) = \frac{e^{iz} + e^{-iz}}{2}$, $\sin(z) = \frac{e^{iz} - e^{-iz}}{2i}$

Insbesondere ist für alle $t \in \mathbb{R}$: $\cos(it) = \frac{e^{-t} + e^t}{2}$, $\sin(it) = \frac{e^{-t} - e^t}{2i}$

Also sind Cosinus und Sinus auf \mathbb{C} **nicht** beschränkt.

(5) $\forall k \in \mathbb{Z} : e^{z+2\pi i k} = e^z$

(6) $e^z = 1 \iff \exists k \in \mathbb{Z} : z = 2k\pi i$

(7) $e^{i\pi} + 1 = 0$

Beweis

(1) Wie in Ana I.

(2) Nachrechnen!

(3) Folgt aus (1) und (2).

(4) Nachrechnen!

(5) Es gilt:

$$\begin{aligned} e^{z+2k\pi i} &\stackrel{(1)}{=} e^z e^{2k\pi i} \\ &\stackrel{(2)}{=} e^z (\cos(2k\pi) + i \sin(2k\pi)) \\ &= e^z \end{aligned}$$

(6) Die Äquivalenz folgt aus Implikation in beiden Richtungen:

„ \Leftarrow “ Folgt aus (5) mit $z = 0$.

„ \implies “ Sei $z = x + iy$ mit $x, y \in \mathbb{R}$. Es gilt:

$$1 = e^z = e^x(\cos(y) + i \sin(y)) = e^x \cos(y) + i e^x \sin(y)$$

Daraus folgt:

$$\sin(y) = 0 \implies \exists j \in \mathbb{Z} : y = j\pi$$

Und damit:

$$\begin{aligned} 1 &= e^x \cos(j\pi) = e^x (-1)^j \\ \implies x &= 0 \wedge \exists k \in \mathbb{N} : j = 2k \end{aligned}$$

Also ist $z = i2k\pi$.

(7) Es gilt:

$$e^{i\pi} \stackrel{(2)}{=} \cos(\pi) + i \sin(\pi) = -1$$

■

Beispiel

Im Folgenden wollen wir alle $z \in \mathbb{C}$ bestimmen, für die $\sin(z) = 0$ ist. Es gilt:

$$\begin{aligned} \sin(z) = 0 &\stackrel{16.2(4)}{\iff} e^{iz} = e^{-iz} \\ &\stackrel{16.2(1)}{\iff} e^{2iz} = e^{-iz} e^{iz} = e^0 = 1 \\ &\stackrel{16.2(6)}{\iff} \exists k \in \mathbb{Z} : 2iz = i2k\pi \\ &\iff z = k\pi \end{aligned}$$

Der Sinus hat also nur reelle Nullstellen.

Definition

Sei (a_n) ein Folge in \mathbb{C} und $z_0 \in \mathbb{C}$. $\sum_{n=0}^{\infty} a_n(z - z_0)^n$ heißt eine **Potenzreihe** (PR). Sei nun:

$$\rho := \limsup \sqrt[n]{|a_n|}$$

Dabei ist $\rho = \infty$, falls $\sqrt[n]{|a_n|}$ unbeschränkt ist. Dann heißt

$$r := \begin{cases} 0 & , \text{ falls } \rho = \infty \\ \infty & , \text{ falls } \rho = 0 \\ \frac{1}{\rho} & , \text{ falls } 0 < \rho < \infty \end{cases}$$

der **Konvergenzradius** (KR) der PR.

Satz 16.3 (Konvergenz von Potenzreihen)

$\sum_{n=0}^{\infty} a_n(z - z_0)^n$ und r seien wie oben.

- (1) Ist $r = 0$, so konvergiert die PR **nur** für $z = z_0$.
- (2) Ist $r = \infty$, so konvergiert die PR absolut für alle $z \in \mathbb{C}$.
- (3) Sei $0 < r < \infty$. Es gilt:
 - (i) Ist $z \in \mathbb{C}$ und $|z - z_0| < r$, so konvergiert die PR absolut in z .
 - (ii) Ist $z \in \mathbb{C}$ und $|z - z_0| > r$, so divergiert die PR in z .
 - (iii) Ist $z \in \mathbb{C}$ und $|z - z_0| = r$, so ist keine allgemeine Aussage möglich.

Beweis

Wie in Ana I. ■

Beispiele:

- (1) Die PR $\sum_{n=0}^{\infty} z^n$ hat den KR $r = 1$ und es gilt:

$$\sum_{n=0}^{\infty} z^n \text{ konvergiert} \iff |z| < 1$$

- (2) Die PR $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n^2}$ hat den KR $r = 1$. Für $|z| = 1$ gilt:

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{|z|^n}{n^2} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n^2}$$

Also konvergiert $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n^2}$ absolut. Insgesamt gilt also:

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n^2} \text{ konvergiert} \iff |z| \leq 1$$

- (3) Die PR $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n}$ hat KR $r = 1$, divergiert in $z = 1$ und konvergiert in $z = -1$.

- (4) Die PRe

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!} \qquad \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{z^{2n}}{(2n)!} \qquad \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{z^{2n+1}}{(2n+1)!}$$

haben jeweils KR $r = \infty$ (siehe 16.3).

§ 17.

Normierte Räume, Banachräume, Fixpunktsatz

In diesem Paragraphen sei \mathbb{K} stets gleich \mathbb{R} oder \mathbb{C} und sei X ein Vektorraum (VR) über \mathbb{K} .

Definition

Eine Abbildung $\|\cdot\| : X \rightarrow \mathbb{R}$ heißt genau dann eine **Norm** auf X , wenn folgendes erfüllt ist:

- (1) $\forall x \in X : \|x\| \geq 0$ und $\|x\| = 0 \iff x = 0$
- (2) $\forall x \in X, \alpha \in \mathbb{K} : \|\alpha x\| = |\alpha| \cdot \|x\|$
- (3) $\forall x, y \in X : \|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$

In diesem Fall heißt $(X, \|\cdot\|)$ ein **normierter Raum** (NR).

Beispiele:

- (1) Sei $n \in \mathbb{N}$, $X = \mathbb{K}^n$ und für $x = (x_1, \dots, x_n) \in X$ die **euklidische Norm** gegeben:

$$\|x\|_2 := \sqrt{\sum_{j=1}^n |x_j|^2}$$

Dann ist $(\mathbb{K}^n, \|\cdot\|_2)$ ein normierter Raum (vgl. §1).

- (2) Sei $X = C[a, b]$ und für $f \in X$ seien die folgenden Normen gegeben:

$$\begin{aligned}\|f\|_1 &:= \int_a^b |f(x)| \, dx \\ \|f\|_2 &:= \sqrt{\int_a^b |f(x)|^2 \, dx} \\ \|f\|_\infty &:= \max\{|f(x)| : x \in [a, b]\}\end{aligned}$$

Leichte Übung: $(X, \|\cdot\|_1)$, $(X, \|\cdot\|_2)$ und $(X, \|\cdot\|_\infty)$ sind NRe.

- (3) Sei $K \subseteq \mathbb{R}^n$ kompakt, $X := C(K, \mathbb{R}^m)$ und sei für $f \in X$ die Norm

$$\|f\|_\infty := \max\{\|f(x)\| : x \in K\}$$

Leichte Übung: $(X, \|\cdot\|_\infty)$ ist ein NR.

Für den Rest dieses Paragraphen sei X stets ein NR mit Norm $\|\cdot\|$.

Bemerkung: Wie in §1 zeigt man die umgekehrte Dreiecksungleichung:

$$\forall x, y \in X : |||x|| - ||y||| \leq \|x - y\|$$

Definition

- (1) Sei (x_n) eine Folge in X . (x_n) heißt genau dann **konvergent**, wenn ein $x_0 \in X$ existiert für das gilt:

$$\|x_n - x_0\| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

In diesem Fall ist x_0 eindeutig bestimmt und man schreibt $x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} x_0$ oder $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x_0$. x_0 heißt **Grenzwert** oder **Limes** von (x_n) .

- (2) (x_n) heißt genau dann **divergent**, wenn (x_n) nicht konvergent ist.

- (3) (x_n) heißt genau dann eine **Cauchyfolge** (CF), wenn gilt:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists n_0 = n_0(\varepsilon) \in \mathbb{N} : \|x_n - x_m\| < \varepsilon \quad \forall n, m \geq n_0$$

- (4) Sei $x_0 \in X$ und $\delta > 0$. Definiere:

$$U_\delta(x) := \{x \in X \mid \|x - x_0\| < \delta\}$$

- (5) Sei $A \subseteq X$. A heißt **offen**, genau dann wenn gilt:

$$\forall x \in A \exists \delta = \delta(x) > 0 : U_\delta(x) \subseteq A$$

A heißt **abgeschlossen**, genau dann wenn $X \setminus A$ offen ist.

Satz 17.1 (Eigenschaften von Folgen in normierten Räumen)

Seien $(x_n), (y_n)$ Folgen in X , (α_n) Folge in \mathbb{K} , $x, y \in X$ und $A \subseteq X$.

- (1) Gilt $x_n \rightarrow x, y_n \rightarrow y$ und $\alpha_n \rightarrow \alpha \in \mathbb{K}$, so folgt:

$$x_n + y_n \rightarrow x + y \quad \alpha_n x_n \rightarrow \alpha x \quad \|x_n\| \rightarrow \|x\|$$

D.h. die Addition und Skalarmultiplikation sind stetig.

- (2) Ist (x_n) konvergent, so ist (x_n) **beschränkt**, d.h.:

$$\exists c \geq 0 : \forall n \in \mathbb{N} : \|x_n\| \leq c$$

und (x_n) ist eine CF.

- (3) Genau dann wenn A abgeschlossen ist, gilt für jede konvergente Folge (x_n) in A :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n \in A$$

- (4) Sei $(X, \|\cdot\|_\infty)$ wie in obigem Beispiel (3). Dann gilt für (f_n) in X und $f \in X$, dass (f_n) genau dann auf K **gleichmäßig** gegen f **konvergiert**, wenn gilt:

$$\begin{aligned} & \|f_n - f\|_\infty \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \\ & : \iff \forall \varepsilon > 0 \exists n_0 \in \mathbb{N} : \|f_n(x) - f(x)\| < \varepsilon \quad \forall n \geq n_0 \forall x \in K \end{aligned}$$

Beweis

(1) Wie im \mathbb{R}^n .

(2) Wie im \mathbb{R}^n .

(3) Wie im \mathbb{R}^n .

(4) **In der großen Übung.** ■

Beispiel

Sei $X = C[-1, 1]$ mit $\|f\|_2 := \sqrt{\int_{-1}^1 |f(x)|^2 dx}$. Definiere die Folge (f_n) wie folgt:

$$\forall n \in \mathbb{N} : f_n(x) = \begin{cases} -1 & , -1 \leq x \leq -\frac{1}{n} \\ nx & , -\frac{1}{n} \leq x \leq \frac{1}{n} \\ 1 & , \frac{1}{n} \leq x \leq 1 \end{cases}$$

Dann ist klar, dass $f_n \in X$ für alle $n \in \mathbb{N}$. In den **großen Übungen** wird gezeigt:

(1) (f_n) ist eine CF in X .

(2) Es existiert **kein** $f \in X$ mit $\|f_n - f\|_2 \rightarrow 0$

Definition

X heißt ein **Banachraum** oder **vollständig**, genau dann wenn jede CF in X einen Grenzwert in X hat.

Beispiele:

(1) Sei $X = \mathbb{K}^n$, $\|x\|_2 = \sqrt{\sum_{j=1}^n |x_j|^2}$. Dann folgt aus §2, dass $(X, \|\cdot\|_2)$ ein BR ist.

(2) Sei $X = C[-1, 1]$, $\|f\|_2 = \sqrt{\int_{-1}^1 |f(x)|^2 dx}$. Dann ist $(X, \|\cdot\|_2)$ **kein** BR.

(3) Sei $(X, \|\cdot\|_\infty)$ wie in 17.1(4). In den **großen Übungen** wird gezeigt, dass $(X, \|\cdot\|_\infty)$ ein BR ist.

Satz 17.2 (Banachscher Fixpunktsatz)

Sei $(X, \|\cdot\|)$ ein BR, $\emptyset \neq A \subseteq X$ sei abgeschlossen und es sei $F : A \rightarrow X$ eine Abbildung mit:

(i) $F(A) \subseteq A$

(ii) F ist eine **Kontraktion**, d.h.:

$$\exists L \in [0, 1) : \forall x, y \in A : \|F(x) - F(y)\| \leq L \cdot \|x - y\|$$

Dann existiert genau ein $x^* \in A$ mit $F(x^*) = x^*$.

Ist $x_0 \in A$ beliebig und (x_n) definiert durch $x_{n+1} := F(x_n)$ ($n \geq 0$), so ist $x_n \in A$ für alle $n \in \mathbb{N}$ und es gilt:

$$x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} x^*$$

Weiter gilt für alle $n \in \mathbb{N}$:

$$\|x_n - x^*\| \leq \frac{L^n}{1 - L} \|x_1 - x_0\|$$

Diese Folge heißt Folge der **sukzessiven Approximationen**.

Beweis

Sei $x_0 \in A$ und (x_n) wie oben definiert. Es gilt:

$$\|x_2 - x_1\| = \|F(x_1) - F(x_2)\| \leq L \cdot \|x_1 - x_0\|$$

Induktiv lässt sich zeigen:

$$\forall k \in \mathbb{N}_0 : \|x_{k+1} - x_k\| \leq L^k \cdot \|x_1 - x_0\|$$

Seien nun $m, n \in \mathbb{N}$ und $m > n$, dann gilt:

$$\begin{aligned} \|x_m - x_n\| &= \|(x_m - x_{m-1}) + \dots + (x_{n+1} - x_n)\| \\ &\leq \|x_m - x_{m-1}\| + \dots + \|x_{n+1} - x_n\| \\ &\leq L^{m-1}\|x_1 - x_0\| + \dots + L^n\|x_1 - x_0\| \\ &= (L^{m-1} + \dots + L^n) \cdot \|x_1 - x_0\| \\ &= L^n(1 + \dots + L^{m-n-1}) \cdot \|x_1 - x_0\| \\ &\leq L^n \left(\sum_{j=0}^{\infty} L^j \right) \cdot \|x_1 - x_0\| \\ &= \frac{L^n}{1-L} \|x_1 - x_0\| \end{aligned}$$

Also ist (x_n) eine CF. Da X außerdem BR ist, existiert ein $x^* \in X$ mit $x_n \rightarrow x^*$. Wegen $(x_n) \subseteq A$ und A abgeschlossen ist außerdem $x^* \in A$.

Festes n und $m \rightarrow \infty$ liefert aus obiger Gleichung:

$$\forall n \in \mathbb{N} : \|x_n - x^*\| \leq \frac{L^n}{1-L} \|x_1 - x_0\|$$

Für $F(x^*)$ gilt also:

$$\begin{aligned} \|F(x^*) - x^*\| &= \|F(x^*) - x_{n+1} + x_{n+1} - x^*\| \\ &\leq \|F(x^*) - x_{n+1}\| + \|x_{n+1} - x^*\| \\ &= \|F(x^*) - F(x_n)\| + \|x_{n+1} - x^*\| \\ &\leq L\|x^* - x_n\| + \|x_{n+1} - x^*\| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \end{aligned}$$

Daraus folgt:

$$\|F(x^*) - x^*\| = 0 \iff F(x^*) = x^*$$

Sei nun $z \in A$ und $F(z) = z$. Es gilt:

$$\begin{aligned} \|x^* - z\| &= \|F(x^*) - F(z)\| \leq L\|x^* - z\| \\ \implies (1-L)\|x^* - z\| &\leq 0 \\ \implies x^* &= z \end{aligned}$$

Also ist x^* eindeutig. ■

§ 18.

Differentialgleichungen: Grundbegriffe

In diesem Paragraphen seien I, J, \dots immer Intervalle in \mathbb{R} .

Erinnerung: Seien $p, k \in \mathbb{N}$. Eine Funktion $y = (y_1, \dots, y_p) : I \rightarrow \mathbb{R}^p$ heißt k -mal (stetig) db, genau dann wenn y_1, \dots, y_p k -mal auf I (stetig) db sind.

In diesem Fall ist $y^{(j)} = (y_1^{(j)}, \dots, y_p^{(j)})$ ($j = 1, \dots, k$).

Definition

Seien $n, p \in \mathbb{N}$, sei weiter $D \subseteq \mathbb{R} \times \underbrace{\mathbb{R}^p \times \dots \times \mathbb{R}^p}_{n+1 \text{ Faktoren}}$ und $F : D \rightarrow \mathbb{R}^p$ eine Funktion.

Eine Gleichung der Form:

$$F(x, y, \dots, y^{(n)}) = 0 \quad (\text{i})$$

heißt eine **(gewöhnliche) Differentialgleichung (Dgl) n -ter Ordnung**.

Eine Funktion $y : I \rightarrow \mathbb{R}^p$ heißt eine **Lösung (Lsg)** von (i), genau dann wenn y auf I n -mal db, für alle $x \in I$, $(x, y(x), \dots, y^{(n)}(x)) \in D$ ist und gilt:

$$\forall x \in I : F(x, y(x), \dots, y^{(n)}(x)) = 0$$

Beispiele:

- (1) Sei $n = p = 1$, $F(x, y, z) = z + \frac{y}{x}$ und $D = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x \neq 0\}$, dann ist die zugehörige Dgl:

$$y' + \frac{y}{x} = 0$$

Z.B. ist $y : (0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}, y(x) = \frac{1}{x}$ eine Lösung der Dgl.

Weitere Lösungen sind:

$$y : (0, 1) \rightarrow \mathbb{R}, y(x) := 0$$

$$y : (-\infty, 0) \rightarrow \mathbb{R}, y(x) := \frac{3}{x}$$

- (2) Sei $n = 1, p = 2$ und folgende Dgl gegeben:

$$y' = \begin{pmatrix} y_1' \\ y_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -y_2 \\ y_1 \end{pmatrix}$$

Dann ist $y : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^2, y(x) := (\cos x, \sin x)$ eine Lösung der Dgl.

Definition

Seien $n, p \in \mathbb{N}$, $D \subseteq \mathbb{R} \times \underbrace{\mathbb{R}^p \times \dots \times \mathbb{R}^p}_{n \text{ Faktoren}}$ und $f : D \rightarrow \mathbb{R}^p$.

Eine Gleichung der Form:

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

heißt **explizite Differentialgleichung n -ter Ordnung**.

(hier gilt: $F(x, y, \dots, y^{(n)}) = y^{(n)} - f(x, y, \dots, y^{(n-1)})$)

Definition

Seien p, n, D und f wie oben. Weiter sei $(x_0, y_0, \dots, y_{n-1}) \in D$ fest.

Dann heißt:

$$\begin{cases} y^{(n)} = f(x, y, \dots, y^{(n-1)}) \\ y(x_0) = y_0, \dots, y^{(n-1)}(x_0) = y_{n-1} \end{cases} \quad (\text{iii})$$

ein **Anfangswertproblem** (AwP).

Eine Funktion $y : I \rightarrow \mathbb{R}^p$ heißt eine **Lösung** des AwP (iii), genau dann wenn y eine Lösung von (ii) ist und gilt:

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

Das AwP heißt **eindeutig lösbar**, genau dann wenn (iii) eine Lösung hat und für je zwei Lösungen $y : I \rightarrow \mathbb{R}^p, \tilde{y} : J \rightarrow \mathbb{R}^p$ von (iii) gilt:

$$\forall x \in I \cap J : y(x) = \tilde{y}(x)$$

(Beachte: $x_0 \in I \cap J$)

Beispiele:

(1) Sei $n = p = 1$ und das folgende AwP gegeben:

$$\begin{cases} y' = 2\sqrt{|y|} \\ y(0) = 0 \end{cases}$$

Dann sind:

$$\begin{aligned} y : \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto x^2 \\ y : \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto 0 \end{aligned}$$

Lösungen des AwP.

(2) Sei $n = p = 1$ und das folgende AwP gegeben:

$$\begin{cases} y' = y \\ y(0) = 1 \end{cases}$$

Dann ist:

$$y : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto e^x$$

eine Lösung des AwP. In §19 werden wir sehen, dass dieses AwP eindeutig lösbar ist.

§ 19.

Lineare Differentialgleichungen 1. Ordnung

In diesem Paragraphen sei $I \subseteq \mathbb{R}$ ein Intervall und $a, s : I \rightarrow \mathbb{R}$ **stetig**. Weiter sei $J \subseteq I$ ein Teilintervall von I .

Definition

Die Differentialgleichung

$$y' = a(x)y + s(x) \quad (*)$$

heißt **lineare Differentialgleichung 1. Ordnung**. Sie heißt **homogen**, falls $s \equiv 0$, anderenfalls heißt sie **inhomogen**. s heißt **Störfunktion**.

Wir betrachten zunächst die zu $(*)$ gehörende **homogene Gleichung**:

$$y' = a(x)y \quad (H)$$

Aus Ana I 23.14 folgt, dass a auf I eine Stammfunktion A besitzt.

Satz 19.1 (Lösung einer homogenen linearen Dgl 1. Ordnung)

Sei $y : J \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion. y ist genau dann eine Lsg von (H), wenn ein $c \in \mathbb{R}$ existiert mit:

$$y(x) = c \cdot e^{A(x)}$$

Beweis

„ \Leftarrow “ Es existiere ein $c \in \mathbb{R}$, sodass $y(x) = ce^{A(x)}$ für $x \in J$. Dann gilt:

$$\forall x \in J : y'(x) = c \cdot e^{A(x)} \cdot A'(x) = a(x) \cdot c \cdot e^{A(x)} = a(x)y(x)$$

„ \Rightarrow “ Sei $g(x) := \frac{y(x)}{e^{A(x)}}$. Nachrechnen: $\forall x \in J : g'(x) = 0$

Aus Ana I folgt, dass ein $c \in \mathbb{R}$ existiert, sodass für alle $x \in J$ gilt $g(x) = c$. ■

Satz 19.2 (Eindeutige Lösung eines Anfangswertproblems)

Sei $x_0 \in I, y_0 \in \mathbb{R}$. Dann hat das AwP

$$\begin{cases} y' = a(x)y \\ y(x_0) = y_0 \end{cases}$$

auf I genau eine Lösung.

Beweis

Sei $c \in \mathbb{R}$, $y(x) = c \cdot e^{A(x)}$ für alle $x \in I$. Dann folgt aus 19.1, dass y eine Lösung von (H) ist. Außerdem gilt:

$$\begin{aligned} y_0 &= y(x_0) \\ \iff y_0 &= c \cdot e^{A(x_0)} \\ \iff c &= y_0 \cdot e^{-A(x_0)} \end{aligned}$$

■

Beispiel

Sei das folgende AwP gegeben:

$$\begin{cases} y' = \sin(x)y \\ y(0) = 1 \end{cases}$$

Die allgemeine Lösung der homogenen Gleichung $y' = \sin(x)y$ ist für $c \in \mathbb{R}$:

$$y(x) = c \cdot e^{-\cos(x)}$$

Außerdem gilt:

$$1 = y(0) = c \cdot e^{-\cos(0)} = \frac{c}{e}$$

Also folgt $c = e$ und damit ist die Lösung des AwP $y(x) = e^{1-\cos(x)}$.

Nun betrachten wir die **inhomogene Gleichung**

$$y' = a(x)y + s(x) \tag{IH}$$

Für eine spezielle Lösung y_s von (IH) macht man den Ansatz $y_s(x) = c(x) \cdot e^{A(x)}$ mit einer (unbekannten) db Funktion c . Dies heißt **Variation der Konstanten**.

Mit diesem Ansatz gilt:

$$\begin{aligned} y'_s(x) &= c'(x) \cdot e^{A(x)} + c(x) \cdot e^{A(x)} \cdot a(x) \\ &\stackrel{!}{=} a(x)y_s(x) + s(x) \\ &= a(x)c(x) \cdot e^{A(x)} + s(x) \end{aligned}$$

Dies ist äquivalent dazu, dass gilt:

$$\begin{aligned} c'(x) \cdot e^{A(x)} &= s(x) \\ \iff c'(x) &= s(x) \cdot e^{-A(x)} \\ \iff c(x) &= \int s(x) \cdot e^{-A(x)} \, dx \end{aligned}$$

Ist also c eine Stammfunktion von $s \cdot e^{-A}$, so ist $y_s(x) := c(x) \cdot e^{A(x)}$ eine Lösung von (IH). Insbesondere besitzt (IH) auf I Lösungen.

Beispiel

Sei folgende inhomogene Gleichung gegeben:

$$y' = \sin(x)y + \sin(x) \tag{*}$$

Der Ansatz $y_s(x) = c(x) \cdot e^{-\cos(x)}$ für eine spezielle Lösung von (*) liefert wie oben:

$$c(x) = \int \sin(x) \cdot e^{\cos(x)} \, dx = -e^{\cos(x)}$$

Dann ist $y_s(x) = -e^{\cos(x)} \cdot e^{-\cos(x)} = -1$.

Definition

Definiere die Lösungsmengen:

$$L_H := \{y : I \rightarrow \mathbb{R} \mid y \text{ ist eine Lösung von (H)}\}$$

$$L_{IH} := \{y : I \rightarrow \mathbb{R} \mid y \text{ ist eine Lösung von (IH)}\}$$

$$16.1 \implies L_H = \{c \cdot e^A \mid c \in \mathbb{R}\}. \text{ Bekannt: } L_{IH} \neq \emptyset.$$

Satz 19.3 (Lösungen)

Sei $y_s \in L_{IH}, x_0 \in I, y_0 \in \mathbb{R}$.

$$(1) \quad y \in L_{IH} \iff \exists y_h \in L_H : y = y_h + y_s$$

(2) Das AwP:

$$\begin{cases} y' = a(x)y + s(x) \\ y(x_0) = y_0 \end{cases}$$

hat auf I genau eine Lösung

Beweis

Leichte Übung! ■

Beispiele:

(1) ($I = \mathbb{R}$) Bestimme die allg. Lösung von

$$y' = 2xy + x \tag{*}$$

1. Bestimme die allg. Lösung der Gleichung $y' = 2xy$: $y(x) = ce^{x^2}$ ($c \in \mathbb{R}$).

2. Bestimme eine spezielle Lösung von (*): $y_s(x) = ce^{x^2}$ mit $c(x) = \int xe^{-x^2} = -\frac{1}{2}e^{-x^2}$
Also: $y_s(x) = -\frac{1}{2}$

3. Die Allgemeine Lösung von (*) lautet:

$$y(x) = ce^{x^2} - \frac{1}{2} \quad (c \in \mathbb{R})$$

(2) Löse das AwP:

$$\begin{cases} y' = 2xy + x \\ y(1) = -1 \end{cases}$$

Allg. Lösung der Dgl: $y(x) = ce^{x^2} - \frac{1}{2}$

$$-1 = y(1) = ce - \frac{1}{2} \implies c = -\frac{1}{2e}$$

Lösung des AwPs: $y(x) = -\frac{1}{2e}e^{x^2} - \frac{1}{2}$.

§ 20.

Differentialgleichungen mit getrennten Veränderlichen

In diesem §en seien $I, J \subseteq \mathbb{R}$ Intervalle, $f \in C(I)$, $g \in C(J)$, $x_0 \in I$ und $y_0 \in J$.

Definition

Die Differentialgleichung:

$$y' = f(x)g(y) \quad (\text{i})$$

heißt **Dgl. mit getrennten Veränderlichen**.

Wir betrachten auch noch das AwP:

$$\begin{cases} y' = f(x)g(y) \\ y(x_0) = y_0 \end{cases} \quad (\text{ii})$$

Satz 20.1 (Lösungen)

Sei $y_0 \in J^0$ (also ein innerer Punkt von J) **und** $g(y) \neq 0 \forall y \in J$. Dann existiert ein Intervall I_{x_0} mit $x_0 \in I_{x_0} \subseteq I$ und:

- (1) Das AwP (ii) hat eine Lösung $y : I_{x_0} \rightarrow \mathbb{R}$.
- (2) Die Lösung aus (1) erhält man durch Auflösen der folgenden Gleichung nach $y(x)$.

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

- (3) Sei $U \subseteq I$ ein Intervall und $u : U \rightarrow \mathbb{R}$ eine Lösung des AwPs (ii), so ist $U \subseteq I_{x_0}$ und $u = y$ auf U (wobei y die Lösung aus (1) ist).
Insbesondere ist das AwP (ii) eindeutig lösbar.

Beweis

Definiere $G \in C^1(J)$ und $F \in C^1(I)$ durch:

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

Dann ist $G' = \frac{1}{g}$, $F' = f$ und $F(x_0) = 0 = G(y_0)$.

Da für alle $y \in J$ gilt:

$$G'(y) = \frac{1}{g(y)} \neq 0$$

ist entweder $G' > 0$ auf J oder $G' < 0$ auf J .

Also existiert die Umkehrabbildung $G^{-1} : G(J) \rightarrow J$, $K := G(J)$ ist ein Intervall und es gilt:

$$\begin{aligned} y_0 \in J^0 &\implies 0 = G(y_0) \in K^0 \\ &\implies \exists \varepsilon > 0 : (-\varepsilon, \varepsilon) \subseteq K \end{aligned}$$

Da F stetig in x_0 ist, existiert ein $\delta > 0$ mit:

$$|F(x)| = |F(x) - F(x_0)| < \varepsilon \quad \forall x \in U_\delta(x_0) \cap I =: M_0$$

M_0 ist ein Intervall, $x_0 \in M_0 \subseteq I$ und $F(M_0) \subseteq K$. Sei

$$\mathfrak{M} := \{M \subseteq I \mid M \text{ ist Intervall, } x_0 \in M, F(M) \subseteq K\}$$

Da $M_0 \in \mathfrak{M}$ ist, ist $\mathfrak{M} \neq \emptyset$. Sei

$$I_{x_0} := \bigcup_{M \in \mathfrak{M}} M$$

dann ist $I_{x_0} \in \mathfrak{M}$. Definiere nun $y : I_{x_0} \rightarrow \mathbb{R}$ durch:

$$y(x) := G^{-1}(F(x))$$

so ist y auf I_{x_0} differenzierbar und es gilt:

$$y(x_0) = G^{-1}(F(x_0)) = G^{-1}(0) = y_0$$

Weiter gilt:

$$\forall x \in I : G(y(x)) = F(x) \tag{+}$$

also gilt (*). Differenzierung von (+) liefert:

$$\begin{aligned} \forall x \in I_{x_0} : G'(y(x))y'(x) &= F'(x) \\ \implies \forall x \in I_{x_0} : \frac{1}{g(y(x))}y'(x) &= f(x) \\ \implies \forall x \in I_{x_0} : y'(x) &= f(x)g(y(x)) \end{aligned}$$

(3) Es ist $u'(t) = f(t)g(u(t))$ für alle $t \in U$ **und** $u(U) \subseteq J$. Daraus folgt:

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{u'(t)}{g(u(t))} \\ \implies F(x) &= \int_{x_0}^x f(t) \, dt = \int_{x_0}^x \frac{u'(t)}{g(u(t))} \, dt \\ &\stackrel{\text{Subst.}}{=} \begin{cases} s = u(t) \\ ds = u'(t) \, dt \\ t = x_0 \implies s = u(x_0) = y_0 \end{cases} = \int_{y_0}^{u(x)} \frac{1}{g(s)} \, ds = G(u(x)) \end{aligned}$$

Also: $\forall x \in U : F(x) = G(u(x))$. Somit gilt:

$$F(U) = G(u(U)) \subseteq G(J) = K$$

D.h. $U \in \mathfrak{M}$ und daher ist: $U \subseteq I_{x_0}$.

Weiter gilt:

$$\forall x \in U : u(x) = G^{-1}(F(x)) = y(x) \quad \blacksquare$$

Für die Praxis: Trennung der Veränderlichen (TDV):

$$\begin{aligned}y' &= f(x)g(y) \\ \rightarrow \frac{dy}{dx} &= f(x)g(y) \\ \rightarrow \frac{dy}{g(y)} &= f(x) dx \\ \rightarrow \int \frac{dy}{g(y)} &= \int f(x) dx + c\end{aligned}\tag{iii}$$

Die allgemeine Lösung von (i) erhält man durch Auflösen der Gleichung (iii) nach y .
Zur Lösung von (ii) passt man die Konstante c der Anfangsbedingung $y(x_0) = y_0$ an.

Beispiele:

(1) Sei $y' = 2xe^{-y}$. Dann gilt:

$$\begin{aligned}\frac{dy}{dx} &= 2xe^{-y} \\ \rightarrow e^y dy &= 2x dx \\ \rightarrow \int e^y dy &= \int 2x dx + c \\ \rightarrow e^y &= x^2 + c \\ \rightarrow y &= \log(x^2 + c)\end{aligned}$$

Ist z.B. $c = 0$, so ist $y(x) := \log(x^2)$ eine Lösung auf $(0, \infty)$, oder $y(x) = \log(x^2)$ ist eine auf $(-\infty, 0)$.

$c = 2$: $y(x) = \log(x^2 + 2)$ ist eine Lösung auf \mathbb{R} .

$c = -1$: $y(x) = \log(x^2 - 1)$ ist eine Lösung auf $(1, \infty)$.

Löse das AwP:

$$\begin{cases} y' = 2xe^{-y} \\ y(1) = 1 \end{cases}$$

Allg. Lösung der Dgl:

$$\begin{aligned}y(x) &= \log(x^2 + c) \\ \Rightarrow 1 &= y(1) = \log(1 + c) \\ \Rightarrow e &= 1 + c \iff c = e - 1\end{aligned}$$

$y(x) = \log(x^2 + e - 1)$ ist Lösung des AwPs auf \mathbb{R} .

(2) $y' = \frac{x^2}{1-x} \cdot \frac{1+y}{y^2}$. Trennung der Veränderlichen:

$$\begin{aligned}\frac{dy}{dx} &= \frac{x^2}{1-x} \cdot \frac{1+y}{y^2} \\ \rightarrow \frac{y^2}{y+1} dy &= \frac{x^2}{x-1} dx \\ \rightarrow \frac{y^2}{2} - y + \log(1+y) &= \frac{x^2}{2} + x + \log(x-1) + c\end{aligned}$$

(Lösungen in impliziter Form)

§ 21.

Systeme von Differentialgleichungen 1. Ordnung

In diesem Paragraphen sei $D \subseteq \mathbb{R}^{n+1}$ und $f = (f_1, \dots, f_n) : D \rightarrow \mathbb{R}^n$. Für Punkte im \mathbb{R}^{n+1} schreiben wir (x, y) , wobei $x \in \mathbb{R}$ und $y = (y_1, \dots, y_n) \in \mathbb{R}^n$.

Definition

Ein System von Differentialgleichungen 1. Ordnung hat die Form:

$$\begin{cases} y'_1 = f_1(x, y_1, \dots, y_n) \\ y'_2 = f_2(x, y_1, \dots, y_n) \\ \vdots \\ y'_n = f_n(x, y_1, \dots, y_n) \end{cases} \quad \text{oder kurz: } y' = f(x, y) \quad (\text{i})$$

Wir betrachten auch noch das AwP

$$\begin{cases} y' = f(x, y) \\ y(x_0) = y_0 \end{cases} \quad (\text{wobei } (x_0, y_0) \in D) \quad (\text{ii})$$

Satz 21.1 (Integralgleichung zur Lösbarkeit eines Anfangswertproblems)

Sei $I \subseteq \mathbb{R}$ ein Intervall, $D := I \times \mathbb{R}^n$, $x_0 \in I$, $y_0 \in \mathbb{R}^n$ und $f : D \rightarrow \mathbb{R}^n$ sei stetig. Für $y \in C(I, \mathbb{R}^n)$ gilt:

$$y \text{ ist eine Lösung des AwP (ii)} \iff \forall x \in I : y(x) = y_0 + \int_{x_0}^x f(t, y(t)) dt$$

In diesem Fall ist $y \in C^1(I, \mathbb{R}^n)$.

Beweis

„ \implies “ Es gilt: $y'(x) = f(x, y(x)) \forall x \in I$; da y und f stetig sind, folgt: $y' \in C(I, \mathbb{R})$. Weiter:

$$\int_{x_0}^x f(t, y(t)) dt = \int_{x_0}^x y'(t) dt = y(x) - y(x_0) = y(x) - y_0 \quad \forall x \in I.$$

Bringt man y_0 auf die linke Seite, ergibt sich die Behauptung.

„ \impliedby “ Es gelte für alle $x \in I$:

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

Aus dem zweiten Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung folgt: y ist auf I differenzierbar und

$$y'(x) = \frac{d}{dx} \int_{x_0}^x f(t, y(t)) dt = f(x, y(x)) \quad \forall x \in I.$$

Also erfüllt y die Differentialgleichung. Klar: $y(x_0) = y_0$. Also löst y das AwP. ■

Definition

Sei $g : D \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine Funktion.

- (1) g genügt auf D einer **Lipschitz-Bedingung (LB) bezüglich y** , genau dann wenn gilt:

$$\exists L \geq 0 : \forall (x, y), (x, \bar{y}) \in D : \|g(x, y) - g(x, \bar{y})\| \leq L \|y - \bar{y}\|$$

- (2) g genügt auf D einer **lokalen Lipschitz-Bedingung bezüglich y** , genau dann wenn für alle $a \in D$ eine Umgebung U von a existiert, sodass $g|_{D \cap U}$ auf $D \cap U$ einer LB bezüglich y genügt.

Satz 21.2 (Satz über die α -Norm)

Sei $I = [a, b] \subseteq \mathbb{R}$, $x_0 \in I$ und für $y \in C(I, \mathbb{R}^n)$ sei $\|y\|_\infty := \max\{\|y(x)\| : x \in I\}$ wie in §17 (also ist $(C(I, \mathbb{R}^n), \|\cdot\|_\infty)$ ein Banachraum).

Sei $\alpha > 0$ mit $\varphi_\alpha(x) := e^{-\alpha|x-x_0|}$ ($x \in I$).

Für $y \in C(I, \mathbb{R}^n)$ sei $\|y\|_\alpha := \max\{\varphi_\alpha(x) \cdot \|y(x)\| : x \in I\}$.

Dann:

- (1) $\|\cdot\|_\alpha$ ist eine Norm auf $C(I, \mathbb{R}^n)$.
 (2) Seien $c_1 := \min\{\varphi_\alpha(x) : x \in I\}$, $c_2 := \max\{\varphi_\alpha(x) : x \in I\}$. Es gilt:

$$c_1 \|y\|_\infty \leq \|y\|_\alpha \leq c_2 \|y\|_\infty \quad \forall y \in C(I, \mathbb{R}^n)$$

- (3) Sei (g_k) eine Folge in $C(I, \mathbb{R}^n)$ und $g \in C(I, \mathbb{R}^n)$.

(i) Es gilt:

$$\begin{aligned} \|g_k - g\|_\alpha \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0 &\iff \|g_k - g\|_\infty \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0 \\ &\iff (g_k) \text{ konvergiert auf } I \text{ gleichmäßig gegen } g \end{aligned}$$

- (ii) (g_k) ist eine Cauchy-Folge in $(C(I, \mathbb{R}^n), \|\cdot\|_\alpha)$, genau dann wenn (g_k) eine Cauchy-Folge in $(C(I, \mathbb{R}^n), \|\cdot\|_\infty)$ ist.

- (iii) $(C(I, \mathbb{R}^n), \|\cdot\|_\alpha)$ ist ein Banachraum.

Beweis

- (1), (2) Nachrechnen.

- (3) (i) und (ii) folgen aus (2); (iii) folgt aus (i) und (ii). ■

Bezeichnung: EuE = Existenz und Eindeutigkeit.

Satz 21.3 (EuE-Satz von Picard-Lindelöf (Version I))

Sei $I = [a, b]$, $x_0 \in I$, $y_0 \in \mathbb{R}^n$, $D := I \times \mathbb{R}^n$, $f \in C(D, \mathbb{R}^n)$ und f genüge auf D einer LB bezüglich y . Dann ist das AwP

$$\begin{cases} y' = f(x, y) \\ y(x_0) = y_0 \end{cases} \quad (\text{ii})$$

auf I eindeutig lösbar.

Ist $g_0 \in C(I, \mathbb{R}^n)$ und (g_k) definiert durch

$$g_{k+1}(x) := y_0 + \int_{x_0}^x f(t, g_k(t)) dt \quad (x \in I, k \geq 0),$$

dann konvergiert (g_k) auf I gleichmäßig gegen die Lösung des AwPs (ii).

Beweis

Da f auf D einer Lipschitz-Bedingung genügt, gilt:

$$\exists L > 0 : \|f(x, y) - f(x, \bar{y})\| \leq L \|y - \bar{y}\| \quad \forall (x, y), (x, \bar{y}) \in D.$$

Es sei $\alpha := 2L$; φ_α und $\|\cdot\|_\alpha$ seien wie in 21.2, $X := C(I, \mathbb{R}^n)$. Definiere $F : X \rightarrow X$ durch

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

Für $y \in X$ gilt dann:

$$\begin{aligned} F(y) = y &\iff y(x) = y_0 + \int_{x_0}^x f(t, y(t)) dt \quad \forall x \in I \\ &\stackrel{21.1}{\iff} y \text{ löst das AwP (ii)} \end{aligned}$$

Wir zeigen: $\|F(y) - F(z)\| \leq \frac{1}{2} \|y - z\|_\alpha \quad \forall y, z \in X$. **Alle** Behauptungen folgen dann aus 17.2.

Seien $y, z \in X, x \in I$. Dann ist

$$\begin{aligned} \|(F(y))(x) - (F(z))(x)\| &= \left\| \int_{x_0}^x (f(t, y(t)) - f(t, z(t))) dt \right\| \\ &\stackrel{12.4}{\leq} \left| \int_{x_0}^x \|f(t, y(t)) - f(t, z(t))\| dt \right| \\ &\leq \left| \int_{x_0}^x L \|y(t) - z(t)\| dt \right| \\ &= L \left| \int_{x_0}^x \|y(t) - z(t)\| dt \right| \\ &= L \left| \int_{x_0}^x \|y(t) - z(t)\| \varphi_\alpha(t) \cdot \frac{1}{\varphi_\alpha(t)} dt \right| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\leq L \left| \int_{x_0}^x \|y - z\|_\alpha \cdot \frac{1}{\varphi_\alpha(t)} dt \right| \\
&\leq L \|y - z\|_\alpha \left| \int_{x_0}^x \frac{1}{\varphi_\alpha(t)} dt \right| \\
&= \frac{L}{\alpha} \|y - z\|_\alpha \left(\frac{1}{\varphi_\alpha(x)} - 1 \right) \\
&\leq \frac{1}{2} \|y - z\|_\alpha \frac{1}{\varphi_\alpha(x)}
\end{aligned}$$

Also gilt:

$$\begin{aligned}
\|(F(y))(x) - (F(z))(x)\| &\leq \frac{1}{2} \|y - z\|_\alpha \frac{1}{\varphi_\alpha(x)} \quad \forall x \in I \\
\implies \varphi_\alpha(x) \|(F(y))(x) - (F(z))(x)\| &\leq \frac{1}{2} \|y - z\|_\alpha \quad \forall x \in I
\end{aligned}$$

Fazit: $\|F(y) - F(z)\|_\alpha \leq \frac{1}{2} \|y - z\|_\alpha$. ■

Frage: Warum haben wir in obigem Beweis nicht die $\|\cdot\|_\infty$ -Norm benutzt?

$$\begin{aligned}
\|(F(y))(x) - (F(z))(x)\| &\stackrel{\text{wie oben}}{\leq} L \left| \int_{x_0}^x \|y(t) - z(t)\| dt \right| \\
&\leq L \left| \int_{x_0}^x \|y - z\|_\infty dt \right| \\
&\leq L \|y - z\|_\infty \left| \int_{x_0}^x 1 dt \right| \\
&= L \|y - z\|_\infty |x - x_0| \\
&\leq L(b - a) \|y - z\|_\infty \quad \forall x \in I
\end{aligned}$$

Dann: $\|F(y) - F(z)\|_\infty \leq L(b - a) \|y - z\|_\infty$ I.A. wird $L(b - a)$ **nicht** kleiner 1 sein!

Beispiel (zu 21.3)

Zeige, dass das AwP

$$\begin{cases} y' = 2x(1 + y) \\ y(0) = 0 \end{cases}$$

auf \mathbb{R} genau eine Lösung hat.

Sei $a > 0$ und $I := [-a, a]$; $f(x, y) = 2x(1 + y)$. Dann gilt $\forall x \in I, \forall y, \bar{y} \in \mathbb{R}$:

$$\begin{aligned}
|f(x, y) - f(x, \bar{y})| &= |2xy - 2x\bar{y}| \\
&= 2|x||y - \bar{y}| \\
&\leq 2a|y - \bar{y}|.
\end{aligned}$$

Aus 21.3 folgt dann: das Anfangswertproblem hat auf I genau eine Lösung $y : [-a, a] \rightarrow \mathbb{R}$. Setze nun $g_0(x) := 0$ und (g_k) sei definiert wie in 21.3. Induktiv sieht man (Übung!):

$$g_k(x) = x^2 + \frac{x^4}{2!} + \frac{x^6}{3!} + \cdots + \frac{x^{2k}}{k!}$$

Aus 21.3 folgt: (g_k) konvergiert auf I gleichmäßig gegen y .

Aus Analysis I folgt: (g_k) konvergiert auf I gleichmäßig gegen $e^{x^2} - 1$.

Also: Lösung des AwPs auf $[-a, a]$: $y(x) = e^{x^2} - 1$.

Es war $a > 0$ beliebig, also ist $y(x) = e^{x^2} - 1$ **die** Lösung des AwPs **auf** \mathbb{R} .

Ohne Beweis:

Satz 21.4 (EuE-Satz von Picard-Lindelöf (Version II))

Sei $I = [a, b] \subseteq \mathbb{R}, x_0 \in I, y_0 \in \mathbb{R}^n, s > 0$, es sei

$$D := \{(x, y) \in \mathbb{R}^{n+1} : x \in I, \|y - y_0\| \leq s\}$$

und $f \in C(D, \mathbb{R}^n)$. Weiter sei

$$M := \max\{\|f(x, y)\| : (x, y) \in D\} > 0$$

und f genüge auf D einer Lipschitz-Bedingung bezüglich y . Außerdem sei

$$J := I \cap [x_0 - \frac{s}{M}, x_0 + \frac{s}{M}]$$

Dann hat das AwP

$$\begin{cases} y' = f(x, y) \\ y(x_0) = y_0 \end{cases}$$

auf J genau eine Lösung.

Ohne Beweis:

Satz 21.5 (EuE-Satz von Picard-Lindelöf (Version III))

Es sei $D \subseteq \mathbb{R}^{n+1}$ **offen**, $(x_0, y_0) \in D, f \in C(D, \mathbb{R}^n)$ und f genüge auf D einer **lokalen** LB bezüglich y .

Dann hat das AwP

$$\begin{cases} y' = f(x, y) \\ y(x_0) = y_0 \end{cases}$$

genau eine Lösung.

(Nochmals, das heißt: Das AwP (ii) hat eine Lösung $y : J \rightarrow \mathbb{R}^n$ ($J \subseteq \mathbb{R}$ Intervall) und für je zwei Lösungen $\hat{y} : \hat{J} \rightarrow \mathbb{R}, \tilde{y} : \tilde{J} \rightarrow \mathbb{R}$ von (ii) gilt: $\hat{y} = \tilde{y}$ auf $\hat{J} \cap \tilde{J}$ (\hat{J}, \tilde{J} Intervalle in \mathbb{R}))

Definition

Sei $y : J \rightarrow \mathbb{R}^n$ ($J \subseteq \mathbb{R}$ ein Intervall) eine Lösung des AwPs (ii).

y heißt **nicht fortsetzbar**, genau dann wenn aus $\hat{y} : \hat{J} \rightarrow \mathbb{R}^n$ (\hat{J} ein Intervall in \mathbb{R}) ist Lösung von (ii) stets folgt, dass $\hat{J} \subseteq J$ und auf \hat{J} $\hat{y} = y$ ist.

Satz 21.6 (Eindeutigkeit einer nicht fortsetzbaren Lösung)

Es seien $D, (x_0, y_0)$ und f wie in 21.5. Dann besitzt das AwP (ii) eine eindeutig bestimmte, nicht fortsetzbare Lösung.

Beweis

Es sei

$$\mathfrak{M} := \{(y, I_y) : I_y \subseteq \mathbb{R} \text{ Intervall, } x_0 \in I_y, y : I_y \rightarrow \mathbb{R}^n \text{ ist Lösung von (ii)}\}$$

Aus 21.5 folgt, dass $\mathfrak{M} \neq \emptyset$ ist und für $(y_1, I_{y_1}), (y_2, I_{y_2}) \in \mathfrak{M}$ gilt: $y_1 = y_2$ auf $I_{y_1} \cap I_{y_2}$.

$$I := \bigcup_{(y, I_y) \in \mathfrak{M}} I_y$$

ist ein Intervall. Definiere $y : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ wie folgt: zu $x \in I$ existiert ein $(y_1, I_{y_1}) \in \mathfrak{M}$, sodass für $x \in I_{y_1}$ gilt: $y(x) := y_1(x)$.

Übung: $y : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ leistet das Gewünschte. ■

§ 22.

Lineare Systeme

In diesem Paragraphen sei $I \subseteq \mathbb{R}$ ein Intervall, $x_0 \in I, y_0 \in \mathbb{R}^n, D := I \times \mathbb{R}^n, b : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig und $A : I \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}$ ebenfalls stetig (d.h. für $A(x) = (a_{jk}(x))$ sind alle $a_{jk} : I \rightarrow \mathbb{R}$ stetig). Hier ist für alle $x \in I$ und $y = (y_1, \dots, y_n) \in \mathbb{R}^n$:

$$f(x, y) := A(x)y + b(x)$$

Definition

Das System von Differentialgleichungen:

$$y' = A(x)y + b(x) \tag{S}$$

heißt ein **lineares System**. (Fall $n = 1$ siehe §19.)

Ist $b \equiv 0$, so heißt (S) **homogen**, anderenfalls **inhomogen**.

Neben (S) betrachten wir auch noch das zu (S) gehörige **homogene System**

$$y' = A(x)y \tag{H}$$

und das **AwP**

$$\begin{cases} y' = A(x)y + b(x) \\ y(x_0) = y_0 \end{cases} \tag{A}$$

Satz 22.1 (Lösungen)

- (1) (A) hat auf I genau eine Lösung.
- (2) Das System (S) hat Lösungen auf I .
- (3) Ist $J \subseteq I$ ein Intervall und $\hat{y} : J \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine Lösung von (S), so gibt es eine Lösung $y : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ von (S) mit $\hat{y} = y$ auf J .
- (4) Sei $y_s : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine spezielle Lösung von (S), dann ist $y : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ genau dann eine Lösung von (S) auf I , wenn eine Lösung $y_h : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ von (H) existiert mit:

$$y = y_h + y_s$$

Bemerkung 22.2

Wegen 22.1(3) gehen wir immer davon aus, dass Lösungen von (S) auf ganz I definiert sind.

Beweis(1) **Fall 1:** $I = [a, b]$

Es ist $f(x, y) = A(x)y + b(x)$. Sei $L := \max\{\|A(x)\| : x \in I\}$. Für alle $(x, y), (x, \bar{y}) \in D$ gilt:

$$\begin{aligned}\|f(x, y) - f(x, \bar{y})\| &= \|A(x)(y - \bar{y})\| \\ &\stackrel{\S 1}{\leq} \|A(x)\| \cdot \|y - \bar{y}\| \\ &\leq L\|y - \bar{y}\|\end{aligned}$$

Die Behauptung folgt aus 21.3.

Fall 2: I beliebig.

Sei $\mathfrak{M} := \{K \subseteq I \mid K \text{ ist kompaktes Intervall, } x_0 \in K\}$. Dann ist $I = \bigcup_{K \in \mathfrak{M}} K$.

Ist $x \in I$, so existiert ein $K \in \mathfrak{M}$ mit $x \in K$. Nach Fall 1. hat das AwP auf K genau eine Lösung $y_K : K \rightarrow \mathbb{R}^n$. Definiere nun $y : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ wie folgt:

$$y(x) := y_K(x) \quad (*)$$

Sei $\tilde{K} \in \mathfrak{M}$ mit $x \in \tilde{K}$ und sei $y_{\tilde{K}}$ die eindeutig bestimmte Lösung von (A) auf \tilde{K} . Dann ist $y_K = y_{\tilde{K}}$ auf $K \cap \tilde{K}$, also:

$$y_K(x) = y_{\tilde{K}}(x)$$

D.h. y ist durch $(*)$ wohldefiniert.

Leichte Übung: y ist auf I db und löst das AwP auf I .

Sei $\tilde{y} : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine weitere Lösung von (A) auf I und sei $x \in I$. Dann existiert ein $K \in \mathfrak{M}$ mit $x \in K$ und nach Definition gilt $y(x) = y_K(x)$. Da \tilde{y}_K eine Lösung des AwPs (A) auf K ist, gilt nach Fall 1.: $\tilde{y}|_K = y_K$ Dann gilt also:

$$\tilde{y}(x) = \tilde{y}|_K(x) = y_K(x) = y(x)$$

(2) Folgt aus (1).

(3) Sei $\xi \in J, \eta := \hat{y}(\xi)$. Dann ist \hat{y} eine Lösung auf J des AwPs

$$\begin{cases} y' = A(x) + b(x) \\ y(\xi) = \eta \end{cases} \quad (+)$$

Aus (1) folgt, dass das AwP auf I eine eindeutig bestimmte Lösung $y : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ hat. Sei $x \in J$.

Fall $x = \xi$:

In diesem Fall gilt:

$$\hat{y}(x) = \hat{y}(\xi) = \eta = y(\xi) = y(x)$$

Fall $x > \xi$:

Sei $K := [\xi, x]$. Da \hat{y} und y Lösungen des AwPs (+) auf $[\xi, x]$ sind folgt aus (1), dass $y = \hat{y}$ auf K , also:

$$\hat{y}(x) = y(x)$$

Fall $x < \xi$:

Sei $K := [x, \xi]$. Da \hat{y} und y Lösungen des AwPs (+) auf $[x, \xi]$ sind folgt aus (1), dass $y = \hat{y}$ auf K , also:

$$\hat{y}(x) = y(x)$$

Definition

Setze $\mathbb{L} := \{y : I \rightarrow \mathbb{R}^n : y \text{ ist eine Lösung von (H) auf } I\}$
 ($y \equiv 0$ liegt in \mathbb{L})

Satz 22.3 (Lösungsmenge als Vektorraum)

- (1) Sind $y^{(1)}, y^{(2)} \in \mathbb{L}$ und $\alpha \in \mathbb{R}$, so sind $y^{(1)} + y^{(2)} \in \mathbb{L}$ und $\alpha y^{(1)} \in \mathbb{L}$. \mathbb{L} ist also ein reeller Vektorraum.
- (2) Seien $y^{(1)}, \dots, y^{(k)} \in \mathbb{L}$. Dann sind äquivalent:
- (i) $y^{(1)}, \dots, y^{(k)}$ sind in \mathbb{L} linear unabhängig.
 - (ii) $\forall x \in I$ sind $y^{(1)}(x), \dots, y^{(k)}(x)$ linear unabhängig im \mathbb{R}^n .
 - (iii) $\exists \xi \in I : y^{(1)}(\xi), \dots, y^{(k)}(\xi)$ sind linear unabhängig im \mathbb{R}^n .
- (3) $\dim \mathbb{L} = n$.

Beweis

(1) Nachrechnen

(2) Der Beweis erfolgt durch Ringschluss:

(i) \implies (ii) Sei $x_1 \in I$. Seien $\alpha_1, \dots, \alpha_k \in \mathbb{R}$ und

$$0 = \alpha_1 y^{(1)}(x_1) + \dots + \alpha_k y^{(k)}(x_1)$$

$$\tilde{y} := \alpha_1 y^{(1)} + \dots + \alpha_k y^{(k)}$$

Aus (1) folgt: $\tilde{y} \in \mathbb{L}$. Weiter ist \tilde{y} eine Lösung des AwPs

$$\begin{cases} y' = A(x)y \\ y(x_1) = 0 \end{cases}$$

Da $y \equiv 0$ dieses AwP ebenfalls löst und aus 22.1 folgt, dass das AwP eindeutig lösbar ist, muss gelten:

$$0 = \tilde{y} = \alpha_1 y^{(1)} + \dots + \alpha_k y^{(k)}$$

Aus der Voraussetzung folgt dann:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_k = 0$$

Also sind $y^{(1)}(x_1), \dots, y^{(k)}(x_1)$ sind linear unabhängig im \mathbb{R}^n .

(ii) \implies (iii) Klar ✓

(iii) \implies (i) Seien $\alpha_1, \dots, \alpha_k \in \mathbb{R}$ und $0 = \alpha_1 y^{(1)} + \dots + \alpha_k y^{(k)}$, dann folgt:

$$0 = \alpha_1 y^{(1)}(\xi) + \dots + \alpha_k y^{(k)}(\xi)$$

Aus der Voraussetzung folgt dann: $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_k = 0$ Also sind $y^{(1)}, \dots, y^{(k)}$ linear unabhängig in \mathbb{L} .

(3) Aus (2) folgt, dass $\dim \mathbb{L} \leq n$ ist.

Für $j = 1, \dots, n$ sei $y^{(j)}$ die eindeutig bestimmte Lösung des AwPs

$$\begin{cases} y' = A(x)y \\ y(x_0) = e_j \end{cases} \quad (e_j = \text{j-ter Einheitsvektor im } \mathbb{R}^n).$$

Dann sind $y^{(1)}(x_0), \dots, y^{(n)}(x_0)$ linear unabhängig im \mathbb{R}^n . Aus (2) folgt, dass $y^{(1)}, \dots, y^{(n)}$ linear unabhängig in \mathbb{L} sind, also ist $\dim \mathbb{L} \geq n$. ■

Definition

Sei $B : I \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}$, $B(x) = (b_{jk}(x))$ für alle $x \in I$.

B heißt **differenzierbar** auf I , genau dann wenn $b_{jk} : I \rightarrow \mathbb{R}$ auf I differenzierbar sind ($j, k = 1, \dots, n$).

In diesem Fall ist

$$B'(x) := (b'_{jk}(x)) \quad (x \in I)$$

Definition

(1) Seien $y^{(1)}, \dots, y^{(n)} \in \mathbb{L}$. $y^{(1)}, \dots, y^{(n)}$ heißt ein **Lösungssystem** (LS) von (H).

$$Y(x) := (y^{(1)}(x), \dots, y^{(n)}(x))$$

(j-te Spalte von $Y = y^{(j)}$) heißt **Lösungsmatrix** (LM) von (H).

$$W(x) := \det Y(x)$$

heißt **Wronskideterminante**.

(2) Sei $y^{(1)}, \dots, y^{(n)}$ ein Lösungssystem von (H). Sind $y^{(1)}, \dots, y^{(n)}$ linear unabhängig in \mathbb{L} , so heißt $y^{(1)}, \dots, y^{(n)}$ ein **Fundamentalsystem** (FS) und $Y = (y^{(1)}, \dots, y^{(n)})$ eine **Fundamentalmatrix** (FM).

(3) Ist $y^{(1)}, \dots, y^{(n)}$ ein FS von (H), so lautet die allgemeine Lösung von (H):

$$y(x) = c_1 y^{(1)}(x) + \dots + c_n y^{(n)}(x) \quad (c_1, \dots, c_n \in \mathbb{R})$$

Satz 22.4 (Zusammenhang FS, FM und Wronskideterminante)

$y^{(1)}, \dots, y^{(n)}$ sei ein LS von (H). Y und W seien definiert wie oben. Dann:

(1) $Y'(x) = A(x)Y(x) \quad \forall x \in I$.

(2) $y^{(1)}, \dots, y^{(n)}$ ist ein Fundamentalsystem von (H)

$$\iff Y(x) \text{ invertierbar } \forall x \in I$$

$$\iff \exists \xi \in I : Y(\xi) \text{ ist invertierbar}$$

$$\iff \forall x \in I : W(x) \neq 0$$

$$\iff \exists \xi \in I : W(\xi) \neq 0.$$

Beweis

(1) Nachrechnen

(2) folgt aus 22.3. ■

Spezialfall: $n = 2$. $A(x) = \begin{pmatrix} a_1(x) & -a_2(x) \\ a_2(x) & a_1(x) \end{pmatrix}$; $a_1, a_2 : I \rightarrow \mathbb{R}$ stetig. Sei $y^{(1)} = (y_1, y_2)$ eine Lösung von

$$y' = A(x)y \quad (*)$$

auf I und $y^{(1)} \neq 0$. Das heißt:

$$\begin{cases} y_1' = a_1(x)y_1 - a_2(x)y_2 \\ y_2' = a_2(x)y_1 + a_1(x)y_2 \end{cases}.$$

Setze $y^{(2)} := (-y_2, y_1)$. Dann ist:

$$A(x)y^{(2)} = \begin{pmatrix} -a_1(x)y_2 - a_2(x)y_1 \\ -a_2(x)y_2 + a_1(x)y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -y_2' \\ y_1' \end{pmatrix} = (y^{(2)})'$$

Das heißt: $y^{(2)}$ löst ebenfalls (*) auf I , oder: $y^{(1)}, y^{(2)}$ ist ein Lösungssystem von (*).

$$Y(x) = \begin{pmatrix} y_1(x) & -y_2(x) \\ y_2(x) & y_1(x) \end{pmatrix}, W(x) = \det Y(x) = y_1(x)^2 + y_2(x)^2 \neq 0$$

Mit 22.4 folgt: $y^{(1)}, y^{(2)}$ ist ein Fundamentalsystem von (*).

Beispiel

$$(n = 2), A = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix};$$

$$y' = Ay \quad (*)$$

und $y = (y_1, y_2)$. Also: $\begin{pmatrix} y_1' \\ y_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -y_2 \\ y_1 \end{pmatrix}$.

$y^{(1)}(x) := \begin{pmatrix} \cos(x) \\ \sin(x) \end{pmatrix}$ ist eine Lösung von (*) auf \mathbb{R} . $y^{(2)}(x) := \begin{pmatrix} -\sin(x) \\ \cos(x) \end{pmatrix}$ ist eine weitere

Lösung von (*) auf \mathbb{R} . $y^{(1)}, y^{(2)}$ ist ein Fundamentalsystem von (*). Allgemeine Lösung von (*):

$$y(x) = \begin{pmatrix} c_1 \cos(x) - c_2 \sin(x) \\ c_1 \sin(x) + c_2 \cos(x) \end{pmatrix} \quad (c_1, c_2 \in \mathbb{R}).$$

Ohne Beweis:

Satz 22.5 (Spezielle Lösung)

Sei $y^{(1)}, \dots, y^{(n)}$ ein Fundamentalsystem von (H), $Y(x)$ sei definiert wie oben. Setze

$$y_s(x) := Y(x) \int Y(x)^{-1} b(x) dx \quad (x \in I).$$

Dann ist y_s eine spezielle Lösung von (S) auf I .

$$W_k(x) := \det \left(y^{(1)}(x), \dots, y^{(k-1)}(x), b(x), y^{(k+1)}(x), \dots, y^{(n)}(x) \right) \quad (k = 1, \dots, n)$$

Dann gilt: $y_s(x) = \sum_{k=1}^n \left(\int \frac{W_k(x)}{W(x)} dx \right) y^{(k)}(x)$.

Beispiel

Bestimme die allgemeine Lösung von

$$y' = Ay + \begin{pmatrix} -\sin(x) \\ \cos(x) \end{pmatrix}, \quad (+)$$

wobei

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Bekannt: Fundamentalsystem der homogenen Gleichung $y' = Ay$:

$$y^{(1)}(x) = \begin{pmatrix} \cos(x) \\ \sin(x) \end{pmatrix}, y^{(2)}(x) = \begin{pmatrix} -\sin(x) \\ \cos(x) \end{pmatrix}.$$

$$W(x) = \begin{vmatrix} \cos(x) & -\sin(x) \\ \sin(x) & \cos(x) \end{vmatrix} = \cos^2(x) + \sin^2(x) = 1.$$

$$W_1(x) = \begin{vmatrix} -\sin(x) & -\sin(x) \\ \cos(x) & \cos(x) \end{vmatrix} = 0.$$

$$W_2(x) = \begin{vmatrix} \cos(x) & -\sin(x) \\ \sin(x) & \cos(x) \end{vmatrix} = 1.$$

$$y_s(x) := \left(\int 1 dx \right) y^{(2)}(x) = x y^{(2)}(x) = \begin{pmatrix} -x \sin(x) \\ x \cos(x) \end{pmatrix} \text{ ist eine spezielle Lösung von (+).}$$

Allgemeine Lösung von (+):

$$\begin{aligned} y(x) &= \underbrace{c_1 \begin{pmatrix} \cos(x) \\ \sin(x) \end{pmatrix} + c_2 \begin{pmatrix} -\sin(x) \\ \cos(x) \end{pmatrix}}_{\text{allg. Lsg. der hom. Glg.}} + \underbrace{\begin{pmatrix} -x \sin(x) \\ x \cos(x) \end{pmatrix}}_{\text{spez. Lsg.}} \\ &= \begin{pmatrix} c_1 \cos(x) - c_2 \sin(x) - x \sin(x) \\ c_1 \sin(x) + c_2 \cos(x) + x \cos(x) \end{pmatrix} \quad (c_1, c_2 \in \mathbb{R}) \end{aligned}$$

$$\text{Löse das AwP} \begin{cases} y' = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} y + \begin{pmatrix} -\sin(x) \\ \cos(x) \end{pmatrix} \\ y(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \end{cases}.$$

Es gilt:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} = y(0) = \begin{pmatrix} c_1 \cos(0) - c_2 \sin(0) - 0 \cdot \sin(0) \\ c_1 \sin(0) + c_2 \cos(0) + 0 \cdot \cos(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix}.$$

Also: $c_1 = c_2 = 0$, d.h.: **die** Lösung des AwP ist: $y(x) = \begin{pmatrix} -x \sin(x) \\ x \cos(x) \end{pmatrix}.$

§ 23.

Homogene lineare Systeme mit konstanten Koeffizienten

In diesem Paragraphen sei A eine reelle konstante $n \times n$ -Matrix. Wir betrachten das homogene System

$$y' = Ay \quad (\text{H})$$

Ohne Beweise geben wir ein „Kochrezept“ an, wie man zu einem Fundamentalsystem von (H) kommt.

Vorbereitungen:

- (1) Es sei stets $p(\lambda) := \det(A - \lambda I)$ das **charakteristische Polynom** von A (I = Einheitsmatrix).
Sei $\lambda_0 \in \mathbb{C}$ ein Eigenwert (EW) von A , dann ist $p(\lambda_0) = 0$. Die Koeffizienten von p sind reell, also ist $p(\overline{\lambda_0}) = 0$ und damit $\overline{\lambda_0}$ ein Eigenwert von A .
- (2) Für $\lambda_0 \in \mathbb{C}$ gilt:

$$\text{Kern}(A - \lambda_0 I) \subseteq \text{Kern}((A - \lambda_0 I)^2) \subseteq \text{Kern}((A - \lambda_0 I)^3) \subseteq \dots$$

Kochrezept:

- (1) Bestimme die **verschiedenen** Eigenwerte $\lambda_1, \dots, \lambda_r$ ($r \leq n$) von A und deren Vielfachheiten k_1, \dots, k_r , also:

$$p(\lambda) = (-1)^n (\lambda - \lambda_1)^{k_1} (\lambda - \lambda_2)^{k_2} \dots (\lambda - \lambda_r)^{k_r}$$

Ordne diese Eigenwerte wie folgt an: $\lambda_1, \dots, \lambda_m \in \mathbb{R}, \lambda_{m+1}, \dots, \lambda_r \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{R}$.

Aus der Liste $\lambda_{m+1}, \dots, \lambda_r$ entferne jedes λ_j mit $\text{Im}(\lambda_j) < 0$. Es bleibt:

$$M := \{\lambda_1, \dots, \lambda_m\} \cup \{\lambda_j : m+1 \leq j \leq r, \text{Im}(\lambda_j) > 0\}$$

- (2) Zu $\lambda_j \in M$ bestimme eine Basis von $V_j := \text{Kern}((A - \lambda_j I)^{k_j})$ wie folgt: Bestimme eine Basis von $\text{Kern}(A - \lambda_j I)$, ergänze diese Basis zu einer Basis von $\text{Kern}((A - \lambda_j I)^2)$, usw.
- (3) Sei $\lambda_j \in M$ und v ein Basisvektor von V_j .

$$y(x) := e^{\lambda_j x} \left(v + \frac{x}{1!} (A - \lambda_j I)v + \frac{x^2}{2!} (A - \lambda_j I)^2 v + \dots + \frac{x^{k_j-1}}{(k_j-1)!} (A - \lambda_j I)^{k_j-1} v \right)$$

Fall 1: $\lambda_j \in \mathbb{R}$.

Dann ist $y(x) \in \mathbb{R}^n \forall x \in \mathbb{R}$ und y ist eine Lösung von (H).

Fall 2: $\lambda_j \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{R}$.

Zerlege y komponentenweise in Real- und Imaginärteil:

$$y(x) := y^{(1)}(x) + iy^{(2)}(x)$$

mit $y^{(1)}(x), y^{(2)}(x) \in \mathbb{R}^n$. Dann sind $y^{(1)}, y^{(2)}$ linear unabhängige Lösungen von (H).

- (4) Führt man (3) für **jedes** $\lambda_j \in M$ und **jeden** Basisvektor von V_j durch, so erhält man ein Fundamentalsystem von (H).

Definition

[...] bezeichne die **lineare Hülle**.

Beispiele:

- (1) Bestimme ein Fundamentalsystem der Gleichung:

$$y' = Ay \tag{*}$$

mit

$$A := \begin{pmatrix} 1 & -4 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Es gilt:

$$p(\lambda) = \det(A - \lambda I) = (\lambda - (1 + 2i))(\lambda - (1 - 2i))$$

$$\lambda_1 = 1 + 2i$$

$$\lambda_2 = 1 - 2i$$

$$k_1 = 1$$

$$k_2 = 1$$

Also ist $M := \{\lambda_1\}$. Aus $\text{Kern}(A - \lambda_1 I) = \left[\begin{pmatrix} 2i \\ 1 \end{pmatrix} \right]$ folgt:

$$\begin{aligned} y(x) &= e^{(1+2i)x} \begin{pmatrix} 2i \\ 1 \end{pmatrix} \\ &= e^x (\cos(2x) + i \sin(2x)) \begin{pmatrix} 2i \\ 1 \end{pmatrix} \\ &= e^x \begin{pmatrix} -2 \sin(2x) \\ \cos(2x) \end{pmatrix} + i e^x \begin{pmatrix} 2 \cos(2x) \\ \sin(2x) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Sei also:

$$y^{(1)}(x) := e^x \begin{pmatrix} -2 \sin(2x) \\ \cos(2x) \end{pmatrix} \quad y^{(2)}(x) := e^x \begin{pmatrix} 2 \cos(2x) \\ \sin(2x) \end{pmatrix}$$

Dann ist $y^{(1)}, y^{(2)}$ ein Fundamentalsystem von (*).

- (2) Bestimme ein Fundamentalsystem der Gleichung:

$$y' = Ay \tag{*}$$

mit

$$A := \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -2 & 3 & -1 \\ -1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Es gilt:

$$p(\lambda) = \det(A - \lambda I) = -(\lambda - 2)(\lambda - 1)^2$$

$$\lambda_1 = 2$$

$$\lambda_2 = 1$$

$$k_1 = 1$$

$$k_2 = 2$$

Also ist $M := \{\lambda_1, \lambda_2\}$.

$$\lambda_1 = 2: \text{ Aus } \text{Kern}(A - 2I) = \left[\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right] \text{ folgt:}$$

$$y^{(1)}(x) := e^{2x} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_2 = 1: \text{ Aus } \text{Kern}(A - I) = \left[\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right] \subseteq \left[\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right] = \text{Kern}((A - I)^2) \text{ folgt:}$$

$$y^{(2)}(x) := e^x \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad y^{(3)}(x) := e^x \left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + x(A - I) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right) = e^x \begin{pmatrix} -x \\ -x \\ 1 \end{pmatrix}$$

$y^{(1)}, y^{(2)}, y^{(3)}$ ist ein Fundamentalsystem von $(*)$.

(3) Sei A wie in Beispiel (2). Löse das AWP

$$\begin{cases} y' = Ay \\ y(0) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \end{cases}$$

Die allgemeine Lösung von $y' = Ay$ lautet:

$$y(x) = c_1 e^{2x} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + c_2 e^x \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + c_3 e^x \begin{pmatrix} -x \\ -x \\ 1 \end{pmatrix} \quad c_1, c_2, c_3 \in \mathbb{R}$$

Es gilt:

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \stackrel{!}{=} y(0) = c_1 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + c_2 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + c_3 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_2 \\ c_1 + c_2 \\ c_1 + c_3 \end{pmatrix}$$

$$\implies c_1 = -1$$

$$c_2 = 1$$

$$c_3 = 2$$

Lösung des AWP:

$$y(x) = -e^{2x} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + e^x \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + 2e^x \begin{pmatrix} -x \\ -x \\ 1 \end{pmatrix}$$

(4) Bestimme die allgemeine Lösung von

$$y' = Ay + \begin{pmatrix} e^x \\ e^x \end{pmatrix} \quad (*)$$

Mit

$$A := \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Bestimme dazu zunächst die allgemeine Lösung von $y' = Ay$. Es gilt:

$$p(\lambda) = \det(A - \lambda I) = (1 - \lambda)(1 + \lambda)$$

$$\begin{array}{ll} \lambda_1 = 1 & \lambda_2 = -1 \\ k_1 = 1 & k_2 = 1 \end{array}$$

Da $\text{Kern}(A - I) = \left[\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right]$ und $\text{Kern}(A + I) = \left[\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right]$ ist, ist

$$y^{(1)}(x) = e^x \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad y^{(2)}(x) = e^{-x} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

ein Fundamentalsystem von $y' = Ay$.

Sei nun $Y(x) := \begin{pmatrix} e^x & 0 \\ 0 & e^{-x} \end{pmatrix}$

Dann ist

$$\begin{aligned} y_s(x) &= Y(x) \int Y(x)^{-1} \begin{pmatrix} e^x \\ e^x \end{pmatrix} dx \\ &= Y(x) \int \begin{pmatrix} e^{-x} & 0 \\ 0 & e^x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^x \\ e^x \end{pmatrix} dx \\ &= Y(x) \int \begin{pmatrix} 1 \\ e^{2x} \end{pmatrix} dx \\ &= \begin{pmatrix} e^x & 0 \\ 0 & e^{-x} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \frac{1}{2}e^{2x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} xe^x \\ \frac{1}{2}e^x \end{pmatrix} \end{aligned}$$

eine spezielle Lösung von (*).

Die allgemeine Lösung von (*) lautet also:

$$y(x) = c_1 e^x \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + c_2 e^{-x} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} xe^x \\ \frac{1}{2}e^x \end{pmatrix} \quad c_1, c_2 \in \mathbb{R}$$

§ 24.

Lineare Differentialgleichungen n-ter Ordnung

In diesem Paragraphen sei $n \in \mathbb{N}$, $I \subseteq \mathbb{R}$ ein Intervall und $a_0, \dots, a_{n-1}, b : I \rightarrow \mathbb{R}$ stetig. Für $y \in C^n(I, \mathbb{R})$ setze $Ly := y^{(n)} + a_{n-1}(x)y^{(n-1)} + \dots + a_0(x)y$. Die Dgl

$$Ly = b \tag{D}$$

heißt eine **lineare Dgl n-ter Ordnung**. Sie heißt **homogen**, falls $b \equiv 0$, anderenfalls **inhomogen**.

Setze $b_0(x) := (0, \dots, 0, b(x))^T (\in \mathbb{R}^n)$ und

$$A(x) := \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1 \\ -a_0(x) & \dots & \dots & \dots & -a_{n-1}(x) \end{pmatrix}$$

Damit erhalten wir das System:

$$z' = A(x)z + b_0(x) \tag{S}$$

Satz 24.1 (Lösungen)

- (1) Ist $y : I \rightarrow \mathbb{R}$ eine Lösung von (D) auf I , so ist $z := (y, y', \dots, y^{(n-1)})$ eine Lösung von (S) auf I .
- (2) Ist $z := (z_1, \dots, z_n)$ eine Lösung von (S) auf I , so ist $y := z_1$ eine Lösung von (D) auf I .

Beweis

Nachrechnen! ■

Wir betrachten auch noch die zu (D) gehörende **homogene** Gleichung

$$Ly = 0 \tag{H}$$

Sind $y_0, \dots, y_{n-1} \in \mathbb{R}$ und $x_0 \in I$, so heißt

$$\begin{cases} Ly = b \\ y(x_0) = y_0, \dots, y^{(n-1)}(x_0) = y_{n-1} \end{cases} \quad (\text{A})$$

ein **Anfangswertproblem** (AwP).

Die folgenden Sätze 24.2 und 24.3 folgen aus 24.1 und den Sätzen aus §21.

Satz 24.2 (Lösungsmenge als Vektorraum)

- (1) Das AwP (A) hat auf I genau eine Lösung.
- (2) (D) hat Lösungen auf I .
- (3) Sei y_s eine spezielle Lösung von (D) auf I . Für $y : I \rightarrow \mathbb{R}$ gilt:
 y ist eine Lsg von (D) auf I , genau dann wenn eine Lösung y_h von (H) existiert:

$$y = y_h + y_s$$

- (4) Ist $J \subseteq I$ ein Intervall, $\hat{y} : J \rightarrow \mathbb{R}$ eine Lsg von (D) auf J , so existiert eine Lsg $y : I \rightarrow \mathbb{R}$ mit $\hat{y} = y|_J$.
- (5) Sei \mathbb{L} die Menge aller Lösungen von (H) auf I . Dann ist \mathbb{L} ein reeller Vektorraum und $\dim \mathbb{L} = n$.
 Für $y_1, \dots, y_k \in \mathbb{L}$ sind äquivalent:
 - (i) y_1, \dots, y_k sind linear unabhängig in \mathbb{L} .
 - (ii) Für alle $x \in I$ sind die Vektoren $(y_j(x), y'_j(x), \dots, y_j^{(n-1)}(x)) (j = 1, \dots, k)$ linear unabhängig im \mathbb{R}^n .
 - (iii) Es existiert ein $\xi \in I$ sodass die Vektoren $(y_j(\xi), \dots, y_j^{(n-1)}(\xi)) (j = 1, \dots, k)$ linear unabhängig sind im \mathbb{R}^n .

Definition

Seien $y_1, \dots, y_n \in \mathbb{L}$.

$$W(x) := \det \begin{pmatrix} y_1(x) & \cdots & y_n(x) \\ \vdots & & \vdots \\ y_1^{(n-1)}(x) & \cdots & y_n^{(n-1)}(x) \end{pmatrix}$$

heißt **Wronskideterminante**. Sind y_1, \dots, y_n linear unabhängig in \mathbb{L} , so heißt y_1, \dots, y_n ein **Fundamentalsystem** (FS) von (H). I.d. Fall lautet die allgemeine Lösung von (H):

$$y = c_1 y_1 + \cdots + c_n y_n \quad (c_1, \dots, c_n \in \mathbb{R})$$

Aus 24.2 folgt für $y_1, \dots, y_n \in \mathbb{L}$:

$y_1, \dots, y_n \in \mathbb{L}$ ist genau dann ein FS von (H), wenn gilt:

$$\forall x \in I : W(x) \neq 0 \iff \exists \xi \in I : W(\xi) \neq 0$$

Satz 24.3 (Spezielle Lösung)

Sei y_1, \dots, y_n ein FS von (H) und W wie oben. Für $k = 1, \dots, n$ sei $W_k(x)$ die Determinante die entsteht, wenn man die k -te Spalte von $W(x)$ ersetzt durch $(0, \dots, 0, b(x))^T$. Setze

$$y_s(x) := \sum_{k=1}^n \left(y_k(x) \cdot \int \frac{W_k(x)}{W(x)} dx \right)$$

Dann ist y_s eine spezielle Lösung von (D).

Beispiel (Spezialfall $n = 2$)

Die homogene Gleichung hat die Form

$$y'' + a_1(x)y' + a_0(x)y = 0 \quad (\text{H})$$

Sei y_1 eine Lsg von (H) mit $y_1 \neq 0 \forall x \in I$. Sei $z \neq 0$ eine Lsg von

$$z' = - \left(a_1(x) + \frac{2y_1'(x)}{y_1(x)} \right) z, \quad \text{so ist}$$

$$y_2(x) := y_1(x) \cdot \int z(x) dx$$

eine weitere Lsg von (H) und y_1, y_2 ist ein FS von (H).

Beweis

Nachrechnen: y_2 ist Lsg von (H).

Aus $y_2' = y_1' \cdot \int z(x) dx + y_1 z(x)$ folgt:

$$\begin{aligned} W(x) &= \det \begin{pmatrix} y_1(x) & y_1(x) \cdot \int z(x) dx \\ y_1'(x) & y_1'(x) \int z(x) dx + y_1 z(x) \end{pmatrix} \\ &= y_1 y_1' \cdot \int z(x) dx + y_1^2 z(x) - y_1 y_1' \cdot \int z(x) dx \\ &= y_1^2 z(x) \end{aligned}$$

Da $z \neq 0$ ist, existiert ein $\xi \in I$ mit $z(\xi) \neq 0$, also $W(\xi) \neq 0$. D.h. y_1, y_2 sind linear unabhängig in \mathbb{L} . ■

Beispiele:

(1) Bestimme die allg. Lösung der Gleichung (mit $I = (1, \infty)$)

$$y'' + \frac{2x}{1-x^2}y' - \frac{2}{1-x^2}y = 0 \quad (*)$$

Offensichtlich ist $y_1(x) = x$ eine Lsg von (*) auf I . Die Gleichung erster Ordnung lautet:

$$z' = - \left(\frac{2x}{1-x^2} + \frac{2}{x} \right) z = \frac{2}{x(x^2-1)} z \quad (**)$$

Es ist $\int \frac{2}{x(x^2-1)} dx = \log(1 - \frac{1}{x^2})$, daraus ergibt sich die allgemeine Lösung von (**):

$$z(x) = ce^{\log(1 - \frac{1}{x^2})} = c(1 - \frac{1}{x^2}) \quad (c \in \mathbb{R})$$

Sei also:

$$y_2(x) := y_1(x) \cdot \int 1 - \frac{1}{x^2} \, dx = 1 + x^2$$

Damit ist y_1, y_2 ein Fundamentalsystem von (*) und die allgemeine Lösung lautet:

$$y(x) = c_1 x + c_2(1 + x^2) \quad (c_1, c_2 \in \mathbb{R})$$

(2) Bestimme die allg. Lösung der Gleichung

$$y'' + \frac{2x}{1-x^2}y' - \frac{2}{1-x^2}y = x^2 - 1 \quad (+)$$

Die allg. Lösung der homogenen Gleichung lautet

$$y(x) = c_1 x + c_2(1 + x^2)$$

Es ist also $y_1(x) = x$ und $y_2(x) = 1 + x^2$. Damit gilt:

$$W(x) = \det \begin{pmatrix} x & 1+x^2 \\ 1 & 2x \end{pmatrix} = 2x^2 - (1+x^2) = x^2 - 1$$

$$W_1(x) = \det \begin{pmatrix} 0 & 1+x^2 \\ x^2-1 & 2x \end{pmatrix} = -(1+x^2)(x^2-1)$$

$$W_2(x) = \det \begin{pmatrix} x & 0 \\ 1 & x^2-1 \end{pmatrix} = x^3 - x$$

Es folgt:

$$\frac{W_1(x)}{W(x)} = -1 - x^2 \qquad \frac{W_2(x)}{W(x)} = x$$

Daraus ergibt sich nun eine spezielle Lösung von (+):

$$y_s(x) = y_1(x) \cdot \int (-1 - x^2) \, dx + y_2(x) \cdot \int x \, dx = \frac{1}{6}x^4 - \frac{1}{2}x^2$$

Die allgemeine Lösung von (+) lautet:

$$y(x) = c_1 x + c_2(1 + x^2) + \frac{1}{6}x^4 - \frac{1}{2}x^2 \quad (c_1, c_2 \in \mathbb{R})$$

(3) Löse das AwP:

$$\begin{cases} y'' + \frac{2x}{1-x^2}y' - \frac{2}{1-x^2}y = x^2 - 1 \\ y(0) = 0, y'(0) = 1 \end{cases}$$

Die allgemeine Lösung der Dgl lautet:

$$y(x) = c_1 x + c_2(1 + x^2) + \frac{1}{6}x^4 - \frac{1}{2}x^2 \quad (c_1, c_2 \in \mathbb{R})$$

Also ist:

$$y'(x) = c_1 + 2c_2 x + \frac{2}{3}x^3 - x$$

Außerdem gilt:

$$0 \stackrel{!}{=} y(0) = c_2 \qquad 1 \stackrel{!}{=} y'(0) = c_1$$

Daraus folgt für die Lösung des AwPs:

$$y(x) = x + \frac{1}{6}x^4 - \frac{1}{2}x^2$$

§ 25.

Lineare Differentialgleichungen n-ter Ordnung mit konstanten Koeffizienten

In diesem Paragraphen sei $n \in \mathbb{N}$, $a_0, \dots, a_{n-1} \in \mathbb{R}$, $I \subseteq \mathbb{R}$ ein Intervall und $b : I \rightarrow \mathbb{R}$ stetig.

Wir betrachten zunächst die **homogene Gleichung**

$$y^{(n)} + a_{n-1}y^{(n-1)} + \dots + a_0y = 0 \quad (\text{H})$$

und geben **ohne** Beweis ein „Kochrezept“ an, wie man zu einem FS von (H) kommt.

$$p(\lambda) := \lambda^n + a_{n-1}\lambda^{n-1} + \dots + a_1\lambda + a_0$$

heißt das **charakteristische Polynom** von (H).

Übung:

Ist

$$A := \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1 \\ -a_0 & \dots & \dots & \dots & -a_{n-1} \end{pmatrix}$$

so ist $\det(\lambda I - A) = p(\lambda)$.

Kochrezept:

- (1) Bestimme die verschiedenen Nullstellen $\lambda_1, \dots, \lambda_r$ ($r \leq n$) von p und deren Vielfachheiten k_1, \dots, k_r , also:

$$p(\lambda) = (\lambda - \lambda_1)^{k_1} \dots (\lambda - \lambda_r)^{k_r}$$

Es seien $\lambda_1, \dots, \lambda_m \in \mathbb{R}$ und $\lambda_{m+1}, \dots, \lambda_r \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{R}$.

$$M := \{\lambda_1, \dots, \lambda_m\} \cup \{\lambda_j \mid m+1 \leq j \leq r, \operatorname{Im}(\lambda_j) > 0\}$$

- (2) Sei $\lambda_j \in M$.

Fall 1: $\lambda_j \in \mathbb{R}$

Dann sind

$$e^{\lambda_j x}, x e^{\lambda_j x}, \dots, x^{k_j-1} e^{\lambda_j x}$$

k_j linear unabhängige Lösungen von (H).

Fall 2: $\lambda_j \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{R}$, etwa $\lambda_j = \alpha + i\beta$ ($\alpha, \beta \in \mathbb{R}, \beta > 0$)

Dann sind

$$\begin{aligned} e^{\alpha x} \cos(\beta x), x e^{\alpha x} \cos(\beta x), \dots, x^{k_j-1} e^{\alpha x} \cos(\beta x) \\ e^{\alpha x} \sin(\beta x), x e^{\alpha x} \sin(\beta x), \dots, x^{k_j-1} e^{\alpha x} \sin(\beta x) \end{aligned}$$

$2k_j$ linear unabhängige Lösungen von (H).

(3) Führt man (2) für jedes $\lambda_j \in M$ durch, so erhält man ein FS von (H).

Beispiele:

(1) Bestimme die allg. Lösung der Gleichung

$$y^{(6)} - 6y^{(5)} + 9y^{(4)} = 0 \quad (*)$$

Es gilt:

$$p(\lambda) = \lambda^6 - 6\lambda^5 + 9\lambda^4 = \lambda^4(\lambda^2 - 6\lambda + 9) = \lambda^4(\lambda - 3)^2$$

Sei also:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &:= 0 & \lambda_2 &:= 3 \\ k_1 &:= 4 & k_2 &:= 2 \end{aligned}$$

Ein FS von (*) lautet: $1, x, x^2, x^3, e^{3x}, xe^{3x}$. Das bedeutet für die allgemeine Lösung von (*):

$$y(x) = c_1 + c_2x + c_3x^2 + c_4x^3 + c_5e^{3x} + c_6xe^{3x} \quad (c_1, \dots, c_6 \in \mathbb{R})$$

(2) Bestimme die allgemeine Lösung der Gleichung:

$$y''' - 2y'' + y' - 2y = 0 \quad (*)$$

Es gilt:

$$p(\lambda) = \lambda^3 - 2\lambda^2 + \lambda - 2 = (\lambda^2 + 1)(\lambda - 2) = (\lambda - 2)(\lambda + i)(\lambda - i)$$

Sei also:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &:= 2 & \lambda_2 &:= i & \lambda_3 &:= -i \\ k_1 &:= 1 & k_2 &:= 1 & k_3 &:= 1 \end{aligned}$$

Dann ist $M := \{2, i\}$ und ein FS von (*) lautet: $e^{2x}, \cos(x), \sin(x)$. Das bedeutet für die allgemeine Lösung von (*):

$$y(x) = c_1e^{2x} + c_2\cos(x) + c_3\sin(x) \quad (c_1, c_2, c_3 \in \mathbb{R})$$

(3) Löse das AwP:

$$\begin{cases} y''' - 2y'' + y' - 2y = 0 \\ y(0) = 0, y'(0) = 1, y''(0) = 0 \end{cases}$$

Die allgemeine Lösung der Dgl lautet:

$$y(x) = c_1e^{2x} + c_2\cos(x) + c_3\sin(x)$$

Es ist:

$$\begin{aligned}y'(x) &= 2c_1 e^{2x} - c_2 \sin(x) + c_3 \cos(x) \\y''(x) &= 4c_1 e^{2x} - c_2 \cos(x) - c_3 \sin(x)\end{aligned}$$

Außerdem gilt:

$$0 \stackrel{!}{=} y(0) = c_1 + c_2 \qquad 1 \stackrel{!}{=} y'(0) = 2c_1 + c_3 \qquad 0 \stackrel{!}{=} 4c_1 - c_2$$

Daraus folgt:

$$c_1 = 0 \qquad c_2 = 0 \qquad c_3 = 1$$

Also lautet die Lösung des AwPs:

$$y(x) = \sin(x)$$

Wir betrachten auch noch die **inhomogene Gleichung**

$$y^{(n)} + a_{n-1}y^{(n-1)} + \dots + a_0y = b(x) \tag{IH}$$

Definition

$\mu \in \mathbb{C}$ heißt eine **nullfache Nullstelle** von p , genau dann wenn $p(\mu) \neq 0$ ist.

Regel (ohne Beweis):

Seien $\alpha, \beta \in \mathbb{R}, m, q \in \mathbb{N}_0$ und b von der Form:

$$\begin{aligned}b(x) &= (b_0 + b_1x + \dots + b_mx^m)e^{\alpha x} \cos(\beta x) \quad , \text{ oder} \\b(x) &= (b_0 + b_1x + \dots + b_mx^m)e^{\alpha x} \sin(\beta x)\end{aligned}$$

Ist $\alpha + \beta i$ eine q -fache Nullstelle von p , so gibt es eine spezielle Lösung y_s von (IH) der Form:

$$y_s(x) = x^q e^{\alpha x} [(A_0 + A_1x + \dots + A_mx^m) \cos(\beta x) + (B_0 + B_1x + \dots + B_mx^m) \sin(\beta x)]$$

Beispiel

Bestimme die allgemeine Lösung der Gleichung

$$y''' - y' = x + 1 \tag{*}$$

(1) Bestimme die allgemeine Lösung der homogenen Gleichung

$$y''' - y' = 0 \tag{**}$$

Es gilt:

$$p(\lambda) = \lambda^3 - \lambda = \lambda(\lambda^2 - 1) = \lambda(\lambda + 1)(\lambda - 1)$$

Also ist ein FS von (**): $1, e^x, e^{-x}$. Damit lautet die allgemeine Lösung der homogenen Gleichung:

$$y_h(x) = c_1 + c_2 e^x + c_3 e^{-x} \quad (c_1, c_2, c_3 \in \mathbb{R})$$

- (2) Bestimme eine allgemeine Lösung der inhomogenen Gleichung (*).

Es ist $m = 1, \alpha = \beta = 0, q = 1$. Ansatz:

$$y_s(x) = x(A_0 + A_1x) = A_0x + A_1x^2$$

$$y'_s(x) = A_0 + 2A_1x$$

$$y''_s(x) = 2A_1$$

$$y'''_s(x) = 0$$

Mit Einsetzen in (*) folgt:

$$0 - (A_1 + 2A_1x) = x + 1$$

Also ist:

$$A_0 = -1 \qquad A_1 = -\frac{1}{2}$$

D.h. eine spezielle Lösung von (IH) lautet:

$$y_s(x) = -x - \frac{1}{2}x^2$$

Damit lautet die allgemeine Lösung von (IH):

$$y(x) = c_1 + c_2e^x + c_3e^{-x} - x - \frac{1}{2}x^2 \quad (c_1, c_2, c_3 \in \mathbb{R})$$

Anhang A.

Satz um Satz (hüpft der Has)

1.1. Rechenregeln zur Norm	7
1.2. Offene und abgeschlossene Mengen	9
2.1. Konvergenz	11
2.2. Häufungswerte und konvergente Folgen	12
2.3. Überdeckungen	12
3.1. Grenzwerte vektorwertiger Funktionen	15
3.2. Stetigkeit vektorwertiger Funktionen	16
3.3. Funktionen auf beschränkten und abgeschlossenen Intervallen	17
3.4. Fortsetzungssatz von Tietze	17
3.5. Lineare Funktionen und Untervektorräume von \mathbb{R}^n	18
3.6. Eigenschaften des Abstands zwischen Vektor und Menge	18
4.1. Satz von Schwarz	21
4.2. Folgerung	21
5.1. Differenzierbarkeit und Stetigkeit	24
5.2. Stetigkeit aller partiellen Ableitungen	25
5.4. Kettenregel	26
5.5. Injektivität und Dimensionsgleichheit	28
6.1. Der Mittelwertsatz	29
6.3. Bedingung für Lipschitzstetigkeit	30
6.4. Linearität	30
6.5. Richtungsableitungen	31
6.6. Der Satz von Taylor	32
7.1. Regeln zu definiten Matrizen und quadratischen Formen	36

7.2. Störung von definiten Matrizen	36
8.1. Nullstelle des Gradienten	39
8.2. Definitheit und Extremwerte	39
9.2. Stetigkeit der Umkehrfunktion	41
9.3. Der Umkehrsatz	41
10.1. Satz über implizit definierte Funktionen	45
11.1. Multiplikationenregel von Lagrange	49
12.1. Rektifizierbarkeit und Beschränkte Variation	53
12.2. Summe von Wegen	54
12.3. Eigenschaften der Weglängenfunktion	54
12.4. Rechenregeln für Wegintegrale	55
12.5. Eigenschaften stetig differenzierbarer Wege	55
12.6. Rektifizierbarkeit von Wegsummen	57
12.7. Eigenschaften der Parametertransformation	57
13.1. Rechnen mit Wegintegralen	59
13.2. Rechnen mit Integralen bezgl. der Weglänge	60
13.3. Stetige Differenzierbarkeit der Aneinanderhängung	61
14.1. Hauptsatz der mehrdimensionalen Integralrechnung	63
14.3. Wegunabhängigkeit, Existenz von Stammfunktionen	64
14.4. Integrabilitätsbedingungen	65
14.5. Kriterium zur Existenz von Stammfunktionen	65
15.1. Integral über Normalbereiche im \mathbb{R}^2	67
15.2. Integral über Normalbereiche im \mathbb{R}^3	69
15.3. Eigenschaften von Integralen über Normalbereiche	70
16.1. Produkte und Quotienten von Folgen	71
16.2. Eigenschaften von Exponentialfunktion, Cosinus und Sinus	73
16.3. Konvergenz von Potenzreihen	74
17.1. Eigenschaften von Folgen in normierten Räumen	78
17.2. Banachscher Fixpunktsatz	79

19.1. Lösung einer homogenen linearen Dgl 1. Ordnung	83
19.2. Eindeutige Lösung eines Anfangswertproblems	83
19.3. Lösungen	85
20.1. Lösungen	87
21.1. Integralgleichung zur Lösbarkeit eines Anfangswertproblems	91
21.2. Satz über die α -Norm	92
21.3. EuE-Satz von Picard-Lindelöf (Version I)	93
21.4. EuE-Satz von Picard-Lindelöf (Version II)	95
21.5. EuE-Satz von Picard-Lindelöf (Version III)	95
21.6. Eindeutigkeit einer nicht fortsetzbaren Lösung	96
22.1. Lösungen	97
22.3. Lösungsmenge als Vektorraum	99
22.4. Zusammenhang FS, FM und Wronskideterminante	100
22.5. Spezielle Lösung	101
24.1. Lösungen	107
24.2. Lösungsmenge als Vektorraum	108
24.3. Spezielle Lösung	109

Stichwortverzeichnis

- Äquivalenz, 57
- Überdeckungssatz von Heine-Borel, 13
- abgeschlossen
 - Kugel, 9
 - Menge, 9
- Abgeschlossenheit, 78
- Ableitung, 24
 - partielle, 20
- Abschluss, 9
- Abstand
 - zwischen Vektor und Menge, 18
 - zwischen zwei Vektoren, 7
- Aneinanderhängung, 61
- Anfangspunkt, 53
- Anfangswertproblem, 82, 91, 97, 107
 - Lösung, 82
- Banachraum, 79
- Berührungspunkt, 9
- Beschränktheit, 78
 - einer Funktion, 17
 - einer Menge, 8
- Betrag
 - komplexer, 71
- Bogen, 53
- Bogenmaß, 56
- Bolzano-Weierstraß, 11
- Cauchy
 - Kriterium, 11
- Cauchy-
 - Folge, 78
 - Schwarzsche Ungleichung, 7
- charakteristisch
 - Polynom, 111
- charakteristisches Polynom, 103
- Cosinus, 72
- Cramersche Regel, 41
- CSU, 7
- Differentialgleichung
 - explizite, 81
 - gewöhnliche, 81
 - homogene, 83, 111
 - homogene (n-ter Ordnung), 107
 - inhomogene, 83, 113
 - inhomogene (n-ter Ordnung), 107
 - Lösung, 81
 - lineare (1.Ordnung), 83
 - lineare (n-ter Ordnung), 107
 - mit getrennten Veränderlichen, 87
 - System von, 91
- Differenzierbarkeit, 23
 - einer $n \times n$ -Matrix, 100
 - partielle, 20
 - stückweise stetige, 56
- Divergenz, 72, 78
- Eigenwerte, 36
- eindeutige Lösung, 82
- Einschränkung einer Funktion, 49
- Endpunkt, 53
- euklidische Norm, 77
- Existenz und Eindeutigkeit, 93
- explizite Differentialgleichung, 81
- Exponentialfunktion, 72
- Flächeninhalt, 67
- Folge der sukzessiven Approximationen, 79
- Fortsetzbarkeit, 96
- Fundamental-
 - Matrix, 100
 - System, 100, 108
- Funktionalmatrix, 23
- Gebiet, 29
- geometrische Reihe, 72
- getrennte Veränderliche
 - Differentialgleichung mit, 87
- gewöhnliche Differentialgleichung, 81
- Glattheit, 56
 - stückweise, 56
- gleichmäßige Konvergenz, 78

- Gradient, 20
- Grenzwert, 11, 78
- Häufungspunkt, 9
- Hülle
 - lineare, 104
- Hesse-Matrix, 35
- homogen
 - Differentialgleichung, 83, 111
 - Differentialgleichung n-ter Ordnung, 107
 - System von Differentialgleichungen, 97
- Indefinitheit, 35
- inhomogen
 - Differentialgleichung, 83, 113
 - Differentialgleichung n-ter Ordnung, 107
 - System von Differentialgleichungen, 97
- Innenprodukt, 7
- innerer Punkt, 8
- Inneres einer Menge, 8
- Integrabilitätsbedingungen, 65
- Inverser Weg, 53
- Jacobi-Matrix, 23
- komplex
 - Betrag, 71
 - Exponentialfunktion, 72
 - Kosinus, 72
 - Sinus, 72
- Kontraktion, 79
- Konvergenz, 11, 72, 78
 - gleichmäßige, 78
- Konvergenzradius, 74
- Konvexität, 29
- Kosinus, 72
- Länge, 7, 53
- Lösung
 - eindeutige, 82
 - einer Differentialgleichung, 81
 - eines Anfangswertproblems, 82
- Lösungs-
 - Matrix, 100
 - System, 100
- Limes, 11, 78
- linear
 - Differentialgleichung (1. Ordnung), 83
 - Differentialgleichung n-ter Ordnung, 107
 - Hülle, 104
 - System von Differentialgleichungen, 97
- Lipschitz-Bedingung, 92
 - lokale, 92
- lokal
 - Extremum, 39
 - Extremum unter einer Nebenbedingung, 49
 - Lipschitz-Bedingung, 92
 - Maximum, 39
 - Minimum, 39
- Matrix-Vektorprodukt, 8
- Multiplikator, 49
- Negativdefinitheit, 35
- Norm, 7, 77
 - euklidische, 77
- Normalbereich, 67, 69
- normierter Raum, 77
- nullfache Nullstelle, 113
- Nullstelle
 - nullfache, 113
- offene Kugel, 8
- Offenheit, 78
- Parameter-
 - Darstellung, 57
 - Intervall, 53
 - Transformation, 57
- partiell
 - Ableitung, 20
 - Differenzierbarkeit, 20
- Polynom
 - charakteristisches, 103, 111
- Positivdefinitheit, 35
- Potenzreihe, 74
- quadratische Form, 35
- Rand, 9
- Randpunkt, 9
- Raum
 - normierter, 77
 - vollständiger, 79
- Reihe
 - geometrische, 72
 - unendliche, 72
- Rektifizierbarkeit, 53
- Richtung, 30
- Richtungs-
 - Ableitung, 30

- Vektor, 30
- Sinus, 72
- Skalarprodukt, 7
- Störfunktion, 83
- stückweise
 - Glattheit, 56
 - stetige Differenzierbarkeit, 56
- Stammfunktion, 63
- stationärer Punkt, 39
- Sternförmigkeit, 65
- Stetigkeit, 16
 - auf einem Intervall, 16
 - gleichmäßige, 16
 - Lipschitz-, 16
- Streckenzug, 29
- sukzessive Approximationen
 - Folge der, 79
- Summe von Wegen, 54
- System von Differentialgleichungen, 91
 - homogenes, 97
 - inhomogenes, 97
 - lineares, 97
- Teilfolge, 11
- Umgebung, 8
- Umordnung, 11
- unendliche Reihe, 72
- Variation der Konstanten, 84
- vektorwertige Funktion, 15
- Verbindungsstrecke, 29
- vollständiger Raum, 79
- Volumen, 69
- Weg-, 53
 - inverser, 53
 - Längenfunktion, 54
 - unabhängig, 64
- Winkelmaß, 56
- Wronskideterminante, 100, 108

Anhang B.

Credits für Analysis II

Abgetippt haben die folgenden Paragraphen:

- § 1: **Der Raum \mathbb{R}^n** : Wenzel Jakob, Joachim Breitner
- § 2: **Konvergenz im \mathbb{R}^n** : Joachim Breitner und Wenzel Jakob
- § 3: **Grenzwerte bei Funktionen, Stetigkeit**: Wenzel Jakob, Pascal Maillard
- § 4: **Partielle Ableitungen**: Joachim Breitner und Wenzel Jakob
- § 5: **Differentiation**: Wenzel Jakob, Pascal Maillard, Jonathan Picht
- § 6: **Differenzierbarkeitseigenschaften reellwertiger Funktionen**: Jonathan Picht, Pascal Maillard, Wenzel Jakob
- § 7: **Quadratische Formen**: Wenzel Jakob
- § 8: **Extremwerte**: Wenzel Jakob
- § 9: **Der Umkehrsatz**: Wenzel Jakob und Joachim Breitner
- § 10: **Implizit definierte Funktionen**: Wenzel Jakob
- § 11: **Extremwerte unter Nebenbedingungen**: Pascal Maillard
- § 12: **Wege im \mathbb{R}^n** : Joachim Breitner, Wenzel Jakob und Pascal Maillard
- § 13: **Wegintegrale**: Pascal Maillard und Joachim Breitner
- § 14: **Stammfunktionen**: Joachim Breitner und Ines Türk
- § 15: **Vorgriff auf Analysis III**: Rebecca Schwerdt
- § 16: **Folgen, Reihen und Potenzreihen in \mathbb{C}** : Rebecca Schwerdt
- § 17: **Normierte Räume, Banachräume, Fixpunktsatz**: Rebecca Schwerdt
- § 18: **Differentialgleichungen: Grundbegriffe**: Rebecca Schwerdt
- § 19: **Lineare Differentialgleichungen 1. Ordnung**: Rebecca Schwerdt
- § 20: **Differentialgleichungen mit getrennten Veränderlichen**: Rebecca Schwerdt
- § 21: **Systeme von Differentialgleichungen 1. Ordnung**: Peter Pan
- § 22: **Lineare Systeme**: Rebecca Schwerdt, Peter Pan
- § 23: **Homogene lineare Systeme mit konstanten Koeffizienten**
- § 24: **Lineare Differentialgleichungen n-ter Ordnung**: Rebecca Schwerdt
- § 25: **Lineare Differentialgleichungen n-ter Ordnung mit konstanten Koeffizienten**:
Rebecca Schwerdt