

Analysis II - Vorlesungs-Script

Prof. Dr. Camillo De Lellis

Basisjahr 11 Semester I

Mitschrift:

Simon Hafner

Inhaltsverzeichnis

1	Metrik und Topologie des euklidischen Raumes	1
1.1	Konvergenz	4
1.2	Ein bisschen mehr Topologie	5
1.3	Stetigkeit	7
1.4	Lineare Abbildungen	8
1.5	Mehr über stetige Funktionen	11
1.6	Kompakte Menge	13
2	Differenzierbare Funktionen	17
2.1	Zusammenfassung	20
2.1.1	Das Differenzial	20
2.1.2	Richtungsableitung	20
2.1.3	Partielle Ableitung	20
2.2	Das Hauptkriterium der Differenzierbarkeit	20
2.3	Die geometrische Bedeutung des Gradients	22
2.4	Rechenregeln	22
2.5	Kettenregel	23
2.6	Mittelwertsatz und Schrankensatz	25
2.7	Höhere partielle Ableitungen	26
3	Das Taylorpolynom	29
3.1	Das Taylorpolynom zweiter Ordnung	30
3.2	Konvexität	34
4	Differentiation parameterabhängiger Integrale	34
5	Differenzierbare Abbildungen	39
5.1	Differentiationregeln	40
5.2	Kettenregel	41
5.3	Schrankensatz	44
5.4	Satz der lokalen Umkehrbarkeit	50
5.4.1	Allgemeine Form des Fixpunktsatzes von Banach	50
5.5	Lösungen von Gleichungen	55
5.6	Satz über implizite Funktionen	56
5.7	Untermannigfaltigkeiten	58
5.8	Die Multiplikationsregel von Lagrange	59
6	Integration in \mathbb{R}^n	62
7	Divergenz, Rotation, Gauss-Theorem, Stokes	69
7.1	Satz von Gauss in 2d	73
7.2	Gauss-Green in 3d	75

1 Metrik und Topologie des euklidischen Raumes

$\mathbb{R}^n = \{(x_1, \dots, x_n), x \in \mathbb{R}\}$. Wir führen verschiedene neue Begriffe in \mathbb{R}^n ein:

- die Euklidische Norm
- der Euklidische Abstand
- die entsprechende Topologie.

Wir betrachten gleichzeitig die entsprechenden Verallgemeinerungen, d.h. die "Abstrakte Theorien" der

- Normierten Vektorräume
- Metrischen Räume
- Topologischen Räume.

Definition 1.1. Sei $x \in \mathbb{R}^n$ ($x = (x_1, \dots, x_n)$, $x_i \in \mathbb{R}$). Die Euklidische Norm von x ist

$$\|x\|_e = \sqrt{x_1^2 + \dots + x_n^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}$$

(wir schreiben oft $\|x\|$ anstatt $\|x\|_e$).

Intuitiv: $\|x\|$ = "der Abstand zwischen x und 0". In der Tat, wenn $n = 2$, das Pythagoras Theorem zeigt dass $\|x\|_e$ die Länge des Segments mit Extrema x and 0 ist.

Lemma 1.2. $\|\cdot\|$ erfüllt die Regeln

1. $\|x\| \geq 0$ und $\|x\| = 0 \iff x = 0$
2. $\|\lambda x\| = |\lambda| \|x\| \quad \forall \lambda \in \mathbb{R}, \forall x \in \mathbb{R}$
3. $\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\| \quad \forall x, y \in \mathbb{R}$

Beweis. 1. ≥ 0 trivial

$$x = 0 \implies \sum x_i^2 = 0 \implies \|x\| = 0$$

$$x = 0 \iff x_i = 0 \quad \forall i \iff \sum x_i^2 = 0 \iff \|x\| = 0$$

2.

$$\|\lambda x\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\lambda x_i)^2} = \sqrt{\lambda^2 \sum x_i^2} = |\lambda| \sqrt{\sum x_i^2} = |\lambda| \|x\|$$

3. Diese Aussage ist äquivalent zu

$$\iff \underbrace{\|x + y\|^2}_{\text{Skalarprodukt}} \leq \|x\|^2 + \|y\|^2 + 2 \|x\| \|y\|$$

Wir rechnen

$$\sum_{i=1}^n (x_i + y_i)^2 = \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2 + 2x_i y_i) = \|x\|^2 + \|y\|^2 + \overbrace{2 \sum_{i=1}^n x_i y_i}^{\text{Skalarprodukt}}$$

Wir definieren

$$\langle x, y \rangle := \sum_{i=1}^n x_i y_i$$

Wir brauchen dann die berühmte Cauchy-Schwartz Ungleichung, d.h.

$$\langle x, y \rangle \leq \|x\| \|y\|.$$

Diese Ungleichung ist der Inhalt des nächsten Satzes.

□

Satz 1.3. *Cauchy-Schwartzsche Ungleichung*

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i \leq \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}$$

Beweis. OBdA $y \neq 0$ ($y = 0$ trivial)

$$\begin{aligned} t \rightarrow g(t) &= \sum_{i=1}^n (x_i + t y_i)^2 = \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) + 2t \sum_{i=1}^n x_i y_i + t^2 \sum_{i=1}^n y_i^2 \\ &= \|x\|^2 + 2t \langle x, y \rangle + \|y\|^2 t^2 \end{aligned}$$

Sei $t_0 = \frac{\langle x, y \rangle}{\|y\|^2}$, dann

$$\begin{aligned} 0 \leq g(t_0) &= \|x\|^2 - 2 \frac{\langle x, y \rangle^2}{\|y\|^2} + \|y\|^2 \frac{\langle x, y \rangle^2}{\|y\|^4} = \|x\|^2 - \frac{\langle x, y \rangle^2}{\|y\|^2} \\ \implies \langle x, y \rangle^2 &\leq \|x\|^2 \|y\|^2 \implies |\langle x, y \rangle| \leq \|x\| \|y\| \end{aligned}$$

□

Definition 1.4. Ein normierter Vektorraum ist ein reeller Vektorraum V mit einer Abbildung $\|\cdot\| : V \rightarrow \mathbb{R}$ so dass:

1. $\|x\| \geq 0$ und $\|x\| = 0 \iff x = 0$ (Nullvektor)
2. $\|\lambda x\| = |\lambda| \|x\| \quad \forall \lambda \in \mathbb{R}, \forall x \in V$
3. $\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\| \quad \forall x, y \in V$

Beispiel 1.5. $V = \mathbb{R}^n$

$$\|x\|_p = \left(\sum |x_i|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad p \geq 1.$$

$\|\cdot\|_2$ ist die Euklidische Norm.

Definition 1.6. Seien $x, y \in \mathbb{R}^n$. Die Euklidische Metrik ist $d(x, y) := \|x - y\|$.

Lemma 1.7. 1. $d(x, y) \geq 0$ und $d(x, y) = 0 \iff x = y$

$$2. \quad d(x, y) = d(y, x)$$

$$3. \quad d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z) \quad (\text{Dreiecksungleichung})$$

Beweis. Die erste Zwei Aussagen sind trivial. Um die letzte zu beweisen:

$$\|x - z\| \leq \underbrace{\|x - y\|}_{=:v} + \underbrace{\|y - z\|}_{=:w}.$$

Aber $x - z = v + w$. Wir wenden die dritte Aussage von Lemma 1.2 an:

$$d(x, z) = \|v + w\| \leq \|v\| + \|w\| = d(x, y) + d(y, z).$$

□

Definition 1.8. Ein metrischer Raum ist eine Menge X mit einer Abbildung

$$d : X \times X \rightarrow \mathbb{R} \quad (x, y) \mapsto d(x, y) \in \mathbb{R}$$

so dass

1. $d(x, y) \geq 0$ und $d(x, y) = 0 \iff x = y \quad \forall x, y \in X$
2. $d(x, y) = d(y, x) \quad \forall x, y \in X$
3. $d(x, y) + d(y, z) \geq d(x, z) \quad \forall x, y, z \in X$

Lemma 1.9. Sei $(V, \|\cdot\|)$ ein normierter Vektorraum. Dann sind V und $d(x, y) = \|x - y\|$ ein metrischer Raum.

Beweis. Wir nutzen das gleiche Argument vom Lemma 1.7. \square

Definition 1.10. Die offene Kugel mit Radius $r > 0$ und Mittelpunkt $x \in \mathbb{R}^n$ ist die Menge

$$K_r(x) = \{y \in \mathbb{R}^n, d(x, y) < r\}$$

(Wir werden auch oft $B_r(x)$ statt $K_r(x)$ nutzen.)

Definition 1.11. Eine Menge heisst "Umgebung" von x , wenn V eine offene Kugel mit Mittelpunkt x enthält.

Definition 1.12. Eine Menge $U \subset \mathbb{R}^n$ heisst offen falls $\forall x \in U$ ist U eine Umgebung von x , d.h.

$$\forall x \in U \exists \text{ eine Kugel } K_r(x) \subset U$$

Bemerkung 1.13. Die Dreiecksungleichung impliziert dass jede offene Kugel eine offene Menge ist. In der Tat, sei $y \in K_r(x)$. Dann $\rho := d(x, y) < r$. Sei $\tau := r - \rho > 0$. Falls $z \in K_\tau(y)$, dann $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z) = \rho + d(y, z) < \rho + \tau = r$. D.h., $K_\tau(y) \subset K_r(x)$. Das beweist dass $K_r(x)$ eine Umgebung ihrer ganzen Elementen ist, d.h. $K_r(x)$ ist offen.

Satz 1.14. 1. \emptyset und \mathbb{R}^n sind offen

2. Der Schnitt endlich vieler offener Mengen ist auch offen.

3. Die Vereinigung einer beliebigen Familie offener Mengen ist auch offen.

Beweis. 1. \mathbb{R}^n trivialerweise offen, auch \emptyset

2. Sei $x \in U \cap \dots \cap U_N$

$$\forall i \in \{1, \dots, N\} \quad \exists r_i > 0 \text{ so dass } K_{r_i}(x) \subset U_i$$

$$\text{Sei } r = \min \{r_1, \dots, r_N\} > 0;$$

$$\implies K_r(x) \subset U_i \quad \forall i \implies K_r(x) \subset U_1 \cap \dots \cap U_N$$

3. $\{U_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$. Sei $U = \bigcup_{\lambda \in \Lambda} U_\lambda$

$$x \in U \implies x \in U_\lambda \text{ für ein } \lambda \in \Lambda$$

$$\implies \exists K_r(x) \subset U_\lambda \subset U.$$

\square

Definition 1.15. Ein topologischer Raum ist eine Menge X und eine Menge O von Teilmengen von X so dass:

1. $\emptyset, X \in O$

2. $U_1 \cap \dots \cap U_N \in O$ falls $U_i \in O$

3. $\bigcap_{\lambda \in \Lambda} U_\lambda \in O$ falls $U_i \in O$

O heisst die *Topologie*.

Satz 1.16. Sei (X, d) ein metrischer Raum. Wir definieren die entsprechende offene Kugel mit Mittelpunkt $x \in X$ und Radius $r > 0$:

$$K_r(x) = \{y \in X : d(x, y) < r\}$$

Umgebungen und offene Mengen sind wie im Euklidischen Fall definiert. $O = \{\text{offene Menge}\}$ definiert eine Topologie.

1.1 Konvergenz

Sei $\{x_k\}_{k \in \mathbb{N}} \ x_k \in \mathbb{R} \ x_k = (x_{k1}, \dots, x_{kn})$

Definition 1.17. Die Folge $\{x_k\}$ konvergiert gegen $x_\infty \in \mathbb{R}^n$ falls

$$\lim_{k \rightarrow \infty} d(x_k, x_\infty) = 0$$

$$\left(\lim_{k \rightarrow \infty} \|x_k, x_\infty\| = 0 \right)$$

Dann schreiben wir

$$x_\infty = \lim_{k \rightarrow \infty} x_k$$

Satz 1.18.

$$x_k \rightarrow x_\infty \iff x_{ki} \rightarrow x_{\infty_i} \ \forall i \in \{1, \dots, n\}$$

Beweis.

$$\|x_k - x_\infty\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ki} - x_{\infty_i})^2} \geq |x_{ki} - x_{\infty_i}| \geq 0$$

$$\implies 0 \leq \lim_{k \rightarrow \infty} |x_{ki} - x_{\infty_i}| \leq \lim_{k \rightarrow \infty} \|x_k - x_\infty\| = 0$$

$$\|x_k - x_\infty\| = \underbrace{\sqrt{\sum_{i=1}^n \underbrace{(x_{ki} - x_{\infty_i})^2}_{\rightarrow 0}}}_{\rightarrow 0} \leq \sum_{i=1}^n |x_{ki} - x_{\infty_i}|$$

$$\implies \|x_k - x_\infty\| \rightarrow 0$$

Eine alternative Formulierung: $\lim_{k \rightarrow \infty} x_k = \left(\lim_{k \rightarrow \infty} x_{k1}, \dots, \lim_{k \rightarrow \infty} x_{kn} \right)$ □

Bemerkung 1.19. Die Folge $\{x_k\}$ konvergiert gegen x_∞ genau, dann wenn

$$\forall \varepsilon > 0 \ \exists N : \|x_k - x_\infty\| < \varepsilon \text{ falls } k \geq N. \quad (1)$$

Eine äquivalente Formulierung von (1) ist

$$\text{für jede Umgebung } U \text{ von } x_\infty \text{ fast alle } x_k \in U. \quad (2)$$

Definition 1.20. Eine Folge $\{x_k\} \subset \mathbb{R}^n$ heisst Cauchy falls:

$$\forall \varepsilon > 0 \ \exists N : m, k \geq N \implies \|x_k - x_m\| < \varepsilon$$

Lemma 1.21. $\{x_k\} \subset \mathbb{R}^n$ konvergiert genau dann, wenn $\{x_k\}$ Cauchy ist.

$$\text{Beweis. } \{x_k\} \text{ ist Cauchy} \implies \left\{ x_k \underbrace{i}_{\{\text{fixiert}\}} \right\} \text{ Cauchy!}$$

$$|x_{ki} - x_{mi}| \leq \|x_k - x_m\|$$

$\implies \{x_k\}$ ist eine Cauchyfolge $\xrightarrow{\text{Erstes Semester}} x_{ki}$ konvergiert $\xrightarrow{\text{Lemma 2}} x_k$ konvergiert. x_k konvergiert \implies Cauchyfolge

$$x_\infty = \lim_{k \rightarrow \infty} x_k \ \forall \varepsilon > 0 \ \exists N : \|x_k - x_\infty\| < \frac{\varepsilon}{2} \ \forall k \geq N$$

$$\begin{aligned} k, m \geq N \quad \|x_k - x_m\| &\leq \|x_k - x_\infty\| + \|x_\infty - x_m\| \leq d(x_k, x_\infty) + (x_\infty, x_m) \\ &< \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon \end{aligned}$$

□

Bemerkung 1.22. In einem metrischen Raum, $\text{Cauchy} \Leftarrow \text{Konvergenz}$. Aber allgemein: die Cauchy Bedingung impliziert nicht die Konvergenz. Falls $\text{Cauchy} \Rightarrow \text{Konvergenz}$, dann ist der metrische Raum *vollständig*.

Definition 1.23. Eine Folge $\{x_k\} \subset \mathbb{R}^n$ heisst beschränkt falls die Folge reeller Zahlen $\{\|x_k\|\}$ beschränkt ist.

Satz 1.24. 1. Eine konvergente Folge ist beschränkt

2. (Bolzano-Weierstrass) $\{x_k\}$ beschränkt $\Rightarrow \exists \{x_{k_j}\}$ die konvergiert.

Beweis. Die erste Aussage ist eine Triviale Folgerung der Dreiecksungleichung. In der Tat, wenn x_k gegen x_∞ konvergiert, dann ist $\|x_k - x_\infty\|$ eine Nullfolge. Deswegen ist $\|x_k - x_\infty\|$ eine beschränkte Folge. Aber $0 \leq \|x_k\| \leq \|x_\infty\| + \|x_k - x_\infty\|$.

Wir beweisen nun die zweite Aussage.

$$\begin{aligned} \{x_k\} \text{ beschränkt} &\Rightarrow \{x_{k_1}\}_{k \in \mathbb{N}} \text{ beschränkt} \\ &\Rightarrow \exists x_{k_j} : x_{k_{j1}} \rightarrow x_1 \end{aligned}$$

Wir definieren $y_j := x_{k_j}$ $y_{j1} \rightarrow x_1$

$$y_j \text{ beschränkt} \Rightarrow \exists j_l : y_{j_l2} \rightarrow x_2$$

$$z_l := y_{j_l} \text{ und } z_{l1} \rightarrow x_1, \quad z_{l2} \rightarrow x_2$$

Nach $\dots (n-2)$ Schritte finden wir eine Teilfolge w_r von x_k mit $w_{ri} \rightarrow x_i$. Deswegen

$$w_r \rightarrow (x_1, \dots, x_n)$$

□

1.2 Ein bisschen mehr Topologie

Definition 1.25. Eine Menge $G \subset \mathbb{R}^n$ heisst geschlossen falls $G^c (:= \mathbb{R}^n \setminus G)$ eine offene Menge ist.

Bemerkung 1.26.

$$\begin{aligned} (A \cup B)^c &= A^c \cap B^c \\ (A \cap B)^c &= A^c \cup B^c \end{aligned}$$

Satz 1.27. 1. \emptyset, \mathbb{R}^n sind abgeschlossen

2. G_1, \dots, G_N abgeschlossen $\Rightarrow G_1 \cup G_2 \cup \dots \cup G_N$ abgeschlossen

3. $\{G_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$ abgeschlossen $\Rightarrow \bigcap_{\lambda \in \Lambda} G_\lambda$ abgeschlossen.

Beweis. Diese Eigenschaften sind Folgerungen der entsprechenden Eigenschaften der offenen Mengen. □

Satz 1.28. Sei $G \subset \mathbb{R}^n$. Dann G ist abgeschlossen genau dann, wenn

$$\text{für jede konvergente } \{x_k\} \subset G \text{ gehört der Grenzwert zu } G. \quad (3)$$

Bemerkung 1.29. Es ist leicht zu sehen dass der folgende Beweis auch für metrische Räume gilt.

Beweis. \Leftarrow Wir nehmen an dass (3) gilt. Ziel: G^c ist offen. Sei $x \in G^c$: das Ziel ist eine Kugel $K_r(x) \in G^c$ zu finden. Widerspruchsbeweis: $K_{\frac{1}{j}}(x) \not\subset G^c$, $j \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$

$$\Rightarrow \exists x_j \in K_{\frac{1}{j}}(x) \cap G \Rightarrow \{x_j\} \subset G \text{ und } x_j \rightarrow x$$

$$\{x_j\} \subset G \quad x_j \rightarrow x \quad x \notin G$$

Aber diese letzte Aussage widerspricht (3). Wir schliessen deswegen dass G^c offen ist.

Wir beweisen nun die andere Aussage. Widerspruchsbeweis: G^c ist offen, aber $\exists \{x_k\} \subset G$ mit Grenzwert $x \notin G$, d.h. $x \in G^c$. Da G^c offen ist,

$$\exists K_r(x) \subset G^c \implies K_r(x) \cap G = \emptyset$$

Aber die Konvergenz gegen x impliziert die Existenz von N s.d. $\|x_k - x\| < r$ für $k \geq N$. Deswegen

$$\|x_N - x\| < r \implies x_N \in K_r(x) \cap G \implies K_r(x) \cap G \neq \emptyset \implies \text{Widerspruch.}$$

□

Beispiel 1.30. Eine offene Kugel ist nicht geschlossen.

$$K_r(x) = \{y : \|y - x\| < r\}$$

Sei $\{y_k\} \in K_r(x)$, (d.h. $\|y_k - x\| < r$) mit $y_k \rightarrow y$ und $\|y - x\| = r$.

Definition 1.31. Sei $\overline{K_r(x)} := \{y \in \mathbb{R}^n : \|y - x\| \leq r\}$ die *geschlossene* Kugel.

Übung 1.32. $\overline{K_r(x)}$ ist abgeschlossen.

Definition 1.33. $x \in \mathbb{R}^n$ ist ein Randpunkt von M falls

$$\forall K_r(x) \exists y \in K_r(x) \cap M \text{ und } \exists z \in K_r(x) \cap M^c$$

Definition 1.34. Sei M eine Menge in \mathbb{R}^n , dann ist der Rand von M

$$\partial M = \{x \in \mathbb{R}^n, \text{ Randpunkt von } M\}$$

Satz 1.35. Sei $M \subset \mathbb{R}^n$. Dann $\partial M^c = \partial M$. Ausserdem,

1. $M \setminus \partial M$ ist die grösste offene Menge die in M enthalten ist;
2. $M \cup \partial M$ ist die kleinste geschlossene Menge die M enthält.

Beweis. Die Aussage $\partial M = \partial M^c$ ist offen

Beweis von 1. Zuerst zeigen wir dass $M \setminus \partial M$ offen ist.

$$\begin{aligned} x \in M \setminus \partial M &\implies x \in M \text{ und } \exists K_r(x) \text{ mit } K_r(x) \cap M^c = \emptyset \\ &\implies K_r(x) \subset M \end{aligned}$$

Sei $y \in K_r(x)$

$$\begin{aligned} &\implies |y - x| = \rho < r \\ &\implies K_{r-\rho}(y) \subset K_r(x) \subset M \implies y \in M, y \notin \partial M \\ &K_r(x) \subset M \setminus \partial M \end{aligned}$$

x ist beliebig $\implies M \setminus \partial M$ ist offen.

Sei nun $A \subset M$ eine offene Menge. Das Ziel ist $A \subset M \setminus \partial M$. Sei $x \in A$. Ziel: $(x \in M \setminus \partial M) \implies x \notin \partial M$.

$$A \text{ offen} \implies \exists K_r(x) \subset A \subset M \implies x \notin \partial M \implies A \subset M \setminus \partial M$$

Beweis von 2. Aus 1. folgt dass $M^c \setminus \partial M^c$ die grösste offene Teilmenge von M^c ist. Deswegen, $(M^c \setminus \partial M^c)^c$ die kleinste geschlossene Menge ist, die M enthält. Aber $(M^c \setminus \partial M^c)^c = (M^c)^c \setminus \partial M^c = M \setminus \partial M^c = M \setminus \partial M$.

□

1.3 Stetigkeit

Definition 1.36. Sei $f : \Omega_{\mathbb{C}\mathbb{R}^n} \rightarrow \mathbb{R}^k$. f ist stetig an der Stelle $x \in \Omega$ falls $\forall \{x_k\} \subset \Omega$ mit $x_k \rightarrow x$.

$$\lim_{k \rightarrow \infty} f(x_k) = f(x)$$

Falls $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^k$, $x \in \Omega$ und $y \in \mathbb{R}^k$ erfüllen die Bedingung

$$f(x_k) \rightarrow y \quad \forall \text{ Folge } \{x_k\} \subset \Omega \setminus \{x\} \text{ mit } x_k \rightarrow x,$$

dann schreiben wir

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

Deswegen,

$$f \text{ stetig in } x \iff \lim_{z \rightarrow x} f(z) = f(x).$$

Lemma 1.37. Eine äquivalente Definition der Stetigkeit an der Stelle x :

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 : f(K_\delta(x) \cap \Omega) \subset K_\varepsilon(f(x))$$

Bemerkung 1.38. Aus diesem Lemma folgt:

$$y = \lim_{z \rightarrow x} f(z) \iff (\forall \varepsilon > 0 \exists \delta : 0 < \|z - x\| < \delta \implies \|f(z) - y\| < \varepsilon).$$

Beweis. ε - $\delta \implies$ **Folgendefinition.** Sei $x_k \rightarrow x$. Das Ziel ist $f(x_k) \rightarrow f(x)$ zu zeigen. D.h., $\forall \varepsilon > 0$ eine N zu finden s.d.

$$\underbrace{\|f(x_k) - f(x)\|}_{d(f(x_k), f(x))} < \varepsilon \quad \forall k \geq N$$

Sei $\varepsilon > 0$ gegeben. Dann

$$\exists \delta > 0 \quad \text{mit} \quad f(K_\delta(x)) \subset K_\varepsilon(f(x))$$

Aber, da $x_k \rightarrow x$, $\exists N$ s.d.

$$\|x_k - x\| < \delta \quad \forall k \geq N.$$

Für $k \geq N$ gilt

$$x_k \in K_\delta(x) \implies f(x_k) \in K_\varepsilon(f(x))$$

Folgendefinition \implies (ε - δ)-Defintion. Widerspruchsannahme:

$$\exists \varepsilon > 0 : f(K_\delta(x) \cap \Omega) \not\subset K_\varepsilon(f(x)) \quad \forall \delta > 0$$

$$\implies \forall \delta > 0 \exists y_\delta \in K_\delta(x) \text{ und } \|f(y_\delta) - f(x)\| \geq \varepsilon$$

Nehmen wir $\delta = \frac{1}{j}$ und $x_j = y_{\frac{1}{j}}$

$$\|x_j - x\| < \frac{1}{j} \quad (\text{weil } x_j \in K_{\frac{1}{j}}(x))$$

$$\|f(x_j) - f(x)\| = \|f(y_{\frac{1}{j}}) - f(x)\| \geq \varepsilon$$

$x_j \rightarrow x$ aber $f(x_j) \not\rightarrow f(x)$ □

Definition 1.39. Die allgemeine Defintion der Stetigkeit für metrische Räume: Seien (X, d) und (Y, \bar{d}) zwei metrische Räume. Sei $f : X \rightarrow Y$. f ist stetig an der Stelle x falls:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 \text{ mit } d(y, x) < \delta \implies d(f(y), f(x)) < \varepsilon$$

$$\text{d.h. } f(K_\delta(x)) \subset K_\varepsilon(f(x)).$$

Definition 1.40. Eine $f : X \rightarrow Y$ heisst stetig falls f stetig an jeder Stelle $x \in X$ ist.

Satz 1.41. Sei $f : X \rightarrow Y$ $((X, d), (Y, \bar{d}))$ metrische Räume) Dann:

1. Die Stetigkeit in $x \iff \forall$ Umgebung U von $f(x)$ ist $f^{-1}(U)$ eine Umgebung von x .
2. Stetigkeit von $f \iff f^{-1}(U)$ ist offen $\forall U$ offen.

Beweis. 1. • **Stetigkeit \implies Umgebung.** Sei U eine Umgebung von $f(x) \implies \exists \delta > 0$ mit $K_\delta(f(x)) \subset U$

$$\implies \exists \varepsilon > 0 : f(K_\varepsilon(x)) \subset K_\delta(f(x))$$

$$\implies f^{-1}(U) \supset f^{-1}(K_\delta(f(x))) \supset K_\varepsilon(x) \implies f^{-1}(U) \text{ Umgebung von } x$$

• **Umgebung \implies Stetigkeit.** Sei $\delta > 0$ und $U := K_\delta(f(x))$. U ist eine Umgebung von $f(x)$. $f^{-1}(U)$ ist eine Umgebung von x .

$$\implies \exists \varepsilon > 0 : K_\varepsilon(x) \subset f^{-1}(U)$$

$$\implies f(K_\varepsilon(x)) \subset U = K_\delta(f(x))$$

2. • **Stetigkeit \implies offen.** Sei U offen $\iff \forall y \in U$ ist U eine Umgebung von y

$$f^{-1}(U) \ni x \implies f(x) \in U \xrightarrow{\text{Stetigkeit in } x} f^{-1}(U) \text{ ist eine Umgebung von } x \\ \implies f^{-1}(U) \text{ ist offen}$$

• **offen \implies Stetigkeit.** Sei $x \in X$, und $\delta > 0$. $K_\delta(f(x))$ ist eine offene Menge.

$$f^{-1}(K_\delta(f(x))) \text{ ist offen}$$

Aber x gehört zu $f^{-1}(K_\delta(f(x)))$

$$\implies \exists \varepsilon > 0 : K_\varepsilon(x) \subset f^{-1}(K_\delta(f(x)))$$

$$\implies f(K_\varepsilon(x)) \subset K_\delta(f(x)).$$

□

1.4 Lineare Abbildungen

Definition 1.42. Eine Abbildung $L : V \rightarrow W$ (V, W Vektorräume) heisst linear, falls

$$L(\lambda_1 v_1 + \lambda_2 v_2) = \lambda_1 L(v_1) + \lambda_2 L(v_2) \quad \forall v_1, v_2 \in V, \quad \forall \lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}$$

Falls $L, L' : V \rightarrow W$ zwei lineare Abbildungen sind und $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$, dann ist die Abbildung $v \mapsto \lambda L(v) + \mu L'(v)$ auch linear. Der Raum $\mathcal{L}(V, W) := \{L : V \rightarrow W \text{ linear}\}$ ist ein Vektorraum. Falls $V = \mathbb{R}^m$ und $W = \mathbb{R}^k$, dann \exists eine Matrix (L_{ij}) mit

$$L(x) = \left(\sum_{j=1}^n L_{1j} x_j, \sum_{j=1}^n L_{2j} x_j, \dots, \sum_{j=1}^n L_{kj} x_j \right)$$

(L_{ij}) ist die *Matrixdarstellung* der linearen Abbildung L .

Definition 1.43. Sei L_{ij} eine Matrix die die lineare Abbildung $L : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^k$ darstellt. Die Hilbert-Schmidt Norm von L ist

$$\|L\|_{\text{HS}} = \sqrt{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n L_{ij}^2}$$

Bemerkung 1.44. $\mathcal{L}(V, W) \sim \{L : (L_{ij}) \text{ } n \times k \text{ Matrizen}\} \sim \mathbb{R}^{nk}$. D.h., der Raum der $n \times k$ Matrizen ist ein Vektorraum. $\|\cdot\|_{\text{HS}}$ ist die Euklidische Norm.

Bemerkung 1.45. Sei $L : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^k$ eine lineare Abbildung und $x \in \mathbb{R}^n$. Dann die Ungleichung

$$\|L(x)\|_e \leq \|x\|_e \|L\|_{\text{HS}} \quad (4)$$

ist eine einfache Folgerung der Cauchy-Schwartz Ungleichung.

Beweis. Beweis von (4): $L(x) = y$

$$\begin{aligned} \|L(x)\|^2 &= \sum_{i=1}^k y_i^2 \\ &= \sum_{i=1}^k \left(\sum_{j=1}^n L_{ij} x_j \right)^2 \stackrel{\text{Cauchy-Schwartz}}{\leq} \sum_{i=1}^k \left(\sum_{j=1}^n L_{ij}^2 \right) \left(\sum_{j=1}^n x_j^2 \right) \\ &= \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n L_{ij}^2 \|x\|^2 = \|x\|^2 \left(\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n L_{ij}^2 \right) = \|x\|^2 \|L\|_{\text{HS}}^2. \end{aligned}$$

□

Korollar 1.46. Sei L wie oben, dann ist L stetig.

Beweis. Sei $x_k \rightarrow x$. Ziel $L(x_k) \rightarrow L(x)$

$$\begin{aligned} \|L(x_k) - L(x)\| &= \|L(x_k - x)\| \leq \|x_k - x\| \|L\|_{\text{HS}} \rightarrow 0 \\ \implies \|L(x_k) - L(x)\| &\rightarrow 0. \end{aligned}$$

□

Definition 1.47. Sei $L : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung wobei $(V, \|\cdot\|_V)$ und $(W, \|\cdot\|_W)$ zwei endlich-dimensionierte normierte Vektorräume sind. Die Operatornorm von L ist:

$$\|L\|_{L(V,W)} := \sup_{\|v\|_V \leq 1} \|L(v)\|_W$$

Satz 1.48. $\|\cdot\|_{L(V,W)}$ ist eine Norm und

$$\|L(v)\|_W \leq \|L\|_{L(V,W)} \|v\|_V$$

Deswegen: jede lineare Abbildung $L : V \rightarrow W$ ist stetig.

Beweis. Der Kern ist die folgende Eigenschaft:

$$\|L\|_{L(V,W)} < +\infty \quad (5)$$

Das nehmen wir an ohne Beweis (für einen Beweis brauchen wir die Kompaktheit der geschlossenen Kugel, siehe Übungen). Wenn (5) gilt:

1.

$$\underbrace{\|L\|_{L(V,W)}}_{\text{Kern}} \text{ und } \|L\|_{L(V,W)} = 0 \iff L = 0$$

\Leftarrow einfach. Sei $\|L\|_{L(V,W)} = 0$. Dann sei $v \in V$.

$$v = 0 \implies L(v) = 0$$

$$v \neq 0 \quad z = \frac{v}{\|v\|_V} \implies \|z\|_V = 1$$

$$\|L(z)\|_W \leq \sup_{\|y\|_V \leq 1} \|L(y)\|_W = 0$$

$$\implies L(z) = 0 \implies L(v) = L(\|v\|_V z) = \|v\|_V L(z) = 0$$

2.

$$\begin{aligned}
\|\lambda L\|_{L(V,W)} &= |\lambda| \|L\|_{L(V,W)} \\
\|\lambda L\|_{L(V,W)} &= \sup_{\|y\|_V \leq 1} \|\lambda L(y)\|_W \\
&= \sup_{\|y\|_V \leq 1} |\lambda| \|L(y)\|_W \\
&= |\lambda| \sup_{\|y\|_V \leq 1} \|L(y)\|_W \\
&= |\lambda| \|L\|_{L(V,W)}
\end{aligned}$$

3.

$$\begin{aligned}
&\|L + L'\|_{L(V,W)} \\
&= \sup_{\|y\|_V \leq 1} \|(L + L')(y)\|_{L(V,W)} \\
&= \sup_{\|y\|_V \leq 1} \|L(y) + L'(y)\|_{L(V,W)} \\
&\leq \sup_{\|y\|_V \leq 1} (\|L(y)\|_W + \|L'(y)\|_W) \\
&\leq \sup_{\|y\|_V \leq 1} \|L(y)\|_W + \sup_{\|y\|_V \leq 1} \|L'(y)\|_W \\
&= \|L\|_{L(V,W)} + \|L'\|_{L(V,W)}
\end{aligned}$$

□

Bemerkung 1.49. Aus der Definition von $\|\cdot\|_{L(V,W)}$ folgt

$$\|L(v)\|_W \leq \|L\|_{L(V,W)} \|v\|_V \quad \forall v \in V. \quad (6)$$

Falls $\|v\|_V = 1$, dann

$$\|L(v)\| \leq \sup_{\|v\|_V \leq 1} \|L(v)\|_W = \|L\|_{L(V,W)}$$

Für $v = 0$ ist $L(v) = 0$ und deswegen ist die Ungleichung (6) trivial. Falls $\|v\|_V > 0$,

$$\begin{aligned}
\tilde{v} := \frac{v}{\|v\|_V} &\implies \|\tilde{v}\|_V = \frac{\|v\|_V}{\|v\|_V} = 1 \implies \|L(\tilde{v})\|_W \leq \|L\|_{L(V,W)} \\
&\implies \left\| \frac{1}{\|v\|_V} L(v) \right\|_W = \frac{1}{\|v\|_V} \|L(v)\|_W \\
&\implies \frac{\|L(v)\|_W}{\|v\|_V} \leq \|L\|_{L(V,W)}
\end{aligned}$$

In der Tat, $\|L\|_{L(V,W)}$ ist die *optimale Konstante* in (6). D.h., für jede $C < \|L\|_{L(V,W)}$ $\exists v \in V$ mit $\|L(v)\|_W > C\|v\|_V$.

Korollar 1.50. Seien V und W zwei endlichdimensionierte Vektorräume und $L : V \rightarrow W$ eine lineare Abbildung. Dann L ist stetig.

Beweis. $\varepsilon - \delta$ Stetigkeit. $v, \varepsilon > 0$. Suche $\delta > 0$ mit

$$\|v' - v\|_V < \delta \implies \|L(v') - L(v)\|_W < \varepsilon$$

Linearität von L

$$\implies \|L(v') - L(v)\|_W = \|L(v' - v)\|_W$$

und aus (6)

$$\begin{aligned}
\|L(v' - v)\| &\leq \underbrace{\|L\|_{L(V,W)}}_{< \varepsilon} \overbrace{\|v' - v\|_V}^{< \delta} \\
&\implies \delta = \frac{\varepsilon}{\|L\|_{L(V,W)}}
\end{aligned}$$

\implies Ungleichung erfüllt.

□

Bemerkung 1.51. Seien $V = \mathbb{R}^n$ und $\|\cdot\|_V$ die euklidische Norm, $W = \mathbb{R}^k$ und $\|\cdot\|_W$ die euklidische Norm. Dann (4) ist einfach die folgende Aussage:

$$\|L\|_{L(V,W)} \leq \|L\|_{\text{HS}}$$

In Matrixdarstellung:

$$\|L\|_{\text{HS}} = \sqrt{\sum_{i,j} L_{ij}^2}$$

$$\|L\|_{L(V,W)} := \sup_{\sum_{i=1}^n v_i^2 \leq 1} \sqrt{\sum_{j=1}^k \left(\sum_{i=1}^n L_{ji} v_i \right)^2}.$$

In diesem Fall wir nutzen die Notation $\|\cdot\|_O$ für die Operatornorm.

1.5 Mehr über stetige Funktionen

Regeln für stetige Funktionen

Regel 1 Seien $f : X \rightarrow Y$, $g : X \rightarrow Z$ zwei stetige Funktionen (X , Y und Z topologische Räume). Dann

- falls $Y = Z$ ein normierter Vektorraum ist, $f + g$ ist auch stetig;
- falls Y ein normierter Vektorraum und $Z = \mathbb{R}$, gf ist auch stetig;
- falls $Y = Z = \mathbb{R}^n$ auch

$$x \mapsto f(x) \cdot g(x) = \sum_{i=1}^n f_i(x) g_i(x)$$

ist stetig.

Beweis. Wir geben den Beweis für den Fall $X \subset \mathbb{R}^m$. Der allgemeine Fall lassen wir als eine Übung. In diesem Fall können wir die Folgendefinition der Stetigkeit anwenden.

$$\underbrace{\{x^k\}}_{\subset X} x^k \rightarrow x \in X$$

Stetigkeit von f und g : $g(x^k) \rightarrow g(x)$, $f(x^k) \rightarrow f(x)$.

$$g(x^k) = (g_1(x^k), \dots, g_m(x^k))$$

$$g(x) = (g_1(x), \dots, g_m(x))$$

$$f(x^k) = (f_1(x^k), \dots, f_m(x^k))$$

$$f(x) = (f_1(x), \dots, f_m(x))$$

$$(g + f)(x^k) = (g_1(x^k) + f_1(x^k), \dots, g_m(x^k) + f_m(x^k))$$

$$\rightarrow (g_1(x) + f_1(x), \dots, g_m(x) + f_m(x)) = (g + f)(x).$$

D.h.

$$x^k \rightarrow x \in X \implies (f + g)(x^k) \rightarrow (f + g)(x).$$

Die anderen Regeln folgen aus ähnlichen Argumente. □

Regel 2 Seien X, Y, Z topologische Räume. Seien $f : X \rightarrow Y$ und $g : Y \rightarrow Z$ stetig. Dann

$$g \circ f : \underbrace{X \rightarrow Z}_{x \mapsto g(f(x))}$$

ist stetig.

Beweis. Sei U eine offene Menge in Z .

$$(g \circ f)^{-1}(U) = f^{-1}(\underbrace{g^{-1}(U)}_{\text{offen}})$$

offen

□

Definition 1.52. Sei $f : X \rightarrow \mathbb{R}$.

$$\|f\| = \sup_{x \in X} \|f(x)\|$$

$f : X \rightarrow V$, $V, \|\cdot\|_V$ normierter Vektorraum

$$\|f\| = \sup_{x \in X} \|f(x)\|_V$$

Bemerkung 1.53. X Menge, $V, \|\cdot\|$ ein normierter Vektorraum.

$$F := \{f : X \rightarrow V\} \quad \text{mit} \quad \|f\|$$

Dann ist $F, \|\cdot\|$ ist ein normierter Vektorraum.

Definition 1.54. Eine Folge von Funktionen

$$f^k : X \rightarrow V$$

konvergiert gleichmässig gegen f falls

$$\|f^k - f\| \rightarrow 0$$

Bemerkung 1.55. $x \in X$

$$\|f^k(x) - f(x)\|_V \leq \|f^k - f\|$$

Folgerung f^k konvergiert gleichmässig

$$\implies f^k(x) \rightarrow f(x) \quad \forall x$$

Satz 1.56. Sei X ein metrischer Raum und $f^k : X \rightarrow V$ eine Folge die gleichmässig gegen f konvergiert. Dann ist f stetig.

Beweis. Seien $x \in X$ und $\varepsilon > 0$. Wir suchen $\delta > 0$ so dass

$$d(x, y) < \delta \implies \|f(x) - f(y)\| < \varepsilon. \quad (7)$$

Aus der gleichmässigen Konvergenz folgt die Existenz von N so dass

$$\|f - f^k\| < \frac{\varepsilon}{3} \quad \text{falls} \quad k \geq N$$

f^N ist stetig: $\exists \delta > 0$:

$$d(x, y) < \delta \implies \|f^N(x) - f^N(y)\| < \frac{\varepsilon}{3}$$

Seien nun x, y s.d. $d(x, y) < \delta$. Dann

$$\begin{aligned} \|f(x) - f(y)\| &= \|(f(x) - f^N(x)) + (f^N(x) - f^N(y)) + (f^N(y) - f(y))\|_V \\ &\leq \|f(x) - f^N(x)\|_V + \|f^N(x) - f^N(y)\|_V + \|f^N(y) - f(y)\|_V \\ &< \|f^N - f\| + \frac{\varepsilon}{3} + \|f^N - f\| \\ &< \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} = \varepsilon \end{aligned}$$

□

1.6 Kompakte Menge

Definition 1.57. Eine Menge $K \subset \mathbb{R}^n$ heisst kompakt falls K abgeschlossen und beschränkt ($\iff \exists B_R(0) : K \subset B_R(0)$) ist.

Satz 1.58. Sei $K \subset \mathbb{R}^n$.

$$K \text{ kompakt} \iff \forall \{x^j\} \subset K \exists \text{ Teilfolge } x^{j_i} \text{ die gegen } x \in K \text{ konvergiert.} \quad (8)$$

Die Eigenschaft in der rechten Seite von (8) heisst *Folgenkompaktheit*. Der Satz 1.58 ist also die folgende Behauptung:

$$\text{falls } K \subset \mathbb{R}^n \text{ dann } K \text{ kompakt} \iff K \text{ folgenkompakt.}$$

Beweis. Kompaktheit \implies Folgenkompaktheit. Sei K kompakt und $\{x^j\} \subset K$ eine Folge.

$$x^j \in K \subset B_R(0) \implies \|x^j\| < R$$

Aus der Bolzano-Weierstrass Eigenschaft $\exists x^{j_i} \rightarrow x \in \mathbb{R}^n$. Die Abgeschlossenheit von $K \implies x \in K$.

Folgenkompaktheit \implies Abgeschlossenheit und Beschränktheit.

$$K \text{ nicht abgeschlossen} \implies \exists x^j \subset K \text{ mit } x^j \rightarrow x \notin K$$

$$\text{Folgenkompaktheit} \implies \exists x^{j_i} \rightarrow y \in K$$

Widerspruch (weil $x = y$!).

Sei K nicht beschränkt.

$$\forall j \in \mathbb{N} \quad B_j(0) \not\supset K$$

$$\exists x^j \in K \setminus B_j(0) \implies \|x^j\| \geq j$$

Wenn $x^{j_i} \rightarrow x$. Aber das impliziert dass $\{\|x^{j_i}\|\}$ eine beschränkte Folge ist. (Wir widerlegen das Argument):

$$\|x^{j_i}\| \leq \|x\| + \|x^{j_i} - x\|$$

$$\|x\| \leq \|x^{j_i}\| + \|x - x^{j_i}\|$$

$$\|\|x\| - \|x^{j_i}\|\| \leq \|x - x^{j_i}\|$$

$$\implies \|x^{j_i}\| \rightarrow \|x\|$$

Aber $\|x^{j_i}\| = j_i \rightarrow +\infty \implies$ Widerspruch. \square

Wir geben noch eine zweite Charakterisierung der kompakten Teilmenge von \mathbb{R}^n .

Definition 1.59. (Überdeckungseigenschaft) Eine Familie $\{U_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$ von Teilmengen von \mathbb{R}^n ist eine Überdeckung einer Menge E falls

$$\bigcup_{\lambda \in \Lambda} U_\lambda \supset E$$

Eine Teilüberdeckung ist eine Teilfamilie von $\{U_\lambda\}$ die noch eine Überdeckung von E ist.

Eine Teilmenge $E \subset \mathbb{R}^n$ besitzt die Überdeckungseigenschaft falls:

- \forall Überdeckung $\{U_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$ von E mit offenen Mengen \exists endliche Teilüberdeckung.

Beispiel 1.60. Eine offene Kugel hat diese Eigenschaft nicht.

$$\forall x \in K_r(0) \text{ sei } K_{\frac{r-\|x\|}{2}}(x) = U_x$$

1. $\{U_x\}_{x \in K_r(0)}$ ist eine Überdeckung von $K_r(0)$. Einfach weil $x \in U_x$!
2. Keine endliche Teilfamilie von $\{U_x\}$ ist eine Überdeckung von $K_r(0)$. In der Tat, sei $\{U_{x_1}, \dots, U_{x_N}\}$ eine beliebige endliche Teilfamilie. Sei

$$\rho := \max_{i \in \{1, \dots, N\}} \|x_i\| < r$$

\implies falls $\|y\| \geq \frac{\|x_i\| + r}{2}$ dann $y \notin U_{x_i}$. So, wenn $\|y\| \geq \frac{\rho + r}{2}$ dann

$$y \notin U_{x_1} \cup \dots \cup U_{x_N}.$$

Aber $\frac{\rho + r}{2} < r$. So, wenn $\|y\| = \frac{\rho + r}{2}$, dann $y \in K_r(0)$.

Jede geschlossene Kugel hat die Überdeckungseigenschaft: das ist eine Konsequenz des nächsten Satzes.

Satz 1.61. Sei $E \subset \mathbb{R}^n$

$$E \text{ kompakt} \iff E \text{ hat die Überdeckungseigenschaft}$$

Bemerkung 1.62. Satz 1.61 kann auch so formuliert werden:

$$(E \text{ beschränkt und abgeschlossen}) \iff E \text{ hat die Überdeckungseigenschaft.}$$

Das Beispiel 1.60 erklärt wie so die Abgeschlossenheit nötig ist. Sei nun $E = \mathbb{R}^n$ und $U_n = K_{n+1}(0)$.

$$E \subset \bigcup_{n \in \mathbb{N}} U_n$$

Aber $\forall N \in \mathbb{N}$

$$\mathbb{R}^n = E \not\subset \bigcup_{n=0}^N U_n.$$

Dieses Beispiel zeigt wie so die Beschränktheit nötig ist.

Beweis. [Beweis des Satzes 1.61] **E ist nicht kompakt \implies Überdeckungseigenschaft gilt nicht.** Da E nicht kompakt ist, $\exists \{x_i\} \subset E$ ohne konvergente Teilfolge in E . \implies Zwei Möglichkeiten:

1. \exists eine beschränkte Teilfolge von $\{x_i\}$. Bolzano-Weierstrass $\implies \exists$ Teilfolge $\{y_i\} \subset \{x_i\} \subset E$ die gegen $y \in \mathbb{R}^n$ konvergiert. $y \notin E$.
2. $\{x_k\}$ besitzt beschränkte Teilfolge $\implies \|x_i\| \rightarrow \infty$.

Beim ersten ist die folgende Menge offen:

$$U_0 := \mathbb{R}^n \setminus \underbrace{(\{y_i\} \cup \{y\})}_{E \text{ ist abgeschlossen}}$$

Beim zweiten gilt:

$$U_0 = \mathbb{R}^n \setminus \underbrace{\{x_i\}}_F \text{ ist offen}$$

$$U_n = U_0 \cup \{y_1, \dots, y_{n-1}\} \quad n \geq 0$$

U_n ist auch offen.

$$\bigcup_{n=0}^{\infty} U_n = \begin{cases} \mathbb{R}^n \setminus \{y\} & \text{im Fall 1} \\ \mathbb{R}^n & \text{im Fall 2} \end{cases}$$

Aber jede endliche Familie

$$U_0 \cup U_1 \cup \dots \cup U_n \not\supset E$$

in beiden Fällen lassen wir unendlich viele Punkte weg.

E kompakt $\implies E$ besitzt die Überdeckungseigenschaft. E ist beschränkt und abgeschlossen und sei $\{U_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$ eine Familie von offenen Mengen mit $E \subset \{U_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$. Wir decken die Menge U mit Würfeln. Jeder Würfel hat die Form

$$[k_1, k_1 + 1] \times [k_2, k_2 + 1] \times \cdots \times [k_n, k_n + 1] \quad (9)$$

wobei $k_1, \dots, k_n \in \mathbb{Z}$. Nun, da E beschränkt ist, $\exists N \in \mathbb{N}$ so dass $[-N, N]^n \supset E$. Aber $[-N, N]^n$ können wir mit $M = (2N)^n$ Würfeln der Form (9) überdecken:

$$E \subset W_1 \cup \cdots \cup W_M$$

Falls jedes $E \cap W_i$ mit einer endlichen Familie von $\{U_\lambda\}$ überdeckt wird, dann finde ich eine endliche Überdeckung von E wenn ich die Vereinigung der entsprechenden endlichen Teilüberdeckungen von $E \cap W_i$ nehme. So, angenommen dass die Überdeckungseigenschaft nicht gilt, $\exists E_1 := E \cap W_i$ s.d.

1. $\{U_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$ eine Überdeckung von E_1
2. keine endliche Teilfamilie deckt E_1 .

Teilen wir W_i in 2^n Würfeln mit Seite $\frac{1}{2}$

$$\tilde{W}_1, \dots, \tilde{W}_{2^n}.$$

Mit dem obigen Argument finden wir

$$E_2 := E \cap \tilde{W}_i : \text{ die Eigenschaften 1. und 2. mit } E_2 \text{ statt } E_1 \text{ noch gelten}$$

Induktiv

$$E \supset E_1 \supset E_2 \supset \cdots$$

jede $E_i \subset W^i$ Würfeln mit Seite 2^{-i+1} und die beiden Eigenschaften 1. und 2. gelten mit E_i statt E_1 .

Ausserdem, E_i ist nicht leer. Für jede i wählen wir $x_i \in E_i$. Dann $\{x_k\} \subset E$. Aber $\{x_k\}$ ist eine Cauchy-Folge: falls $j, k > i$, $x_k, x_j \subset E_i$ und E_i ist in einem Würfel mit Seite 2^{-i+1} enthalten. Deswegen $\|x_j - x_k\| \leq \sqrt{n} 2^{-i+1}$. Die Volleständigkeit von \mathbb{R}^n garantiert die Existenz von $x \in \mathbb{R}^n$ s.d. $x_k \rightarrow x$. Da E abgeschlossen ist, $x \in E$. Deswegen $\exists U_\mu \in \{U_\lambda\}_\lambda$ s.d. $x \in U_\mu$. Da U_μ offen ist,

$$\exists K_r(x) \supset U$$

Aber, $x \in E_i$ für jedes i (weil $\{x_k\}_{k \geq i} \subset E_i$ und E_i ist abgeschlossen!). Sei nun $k \in \mathbb{N}$ s.d. $\sqrt{n} 2^{-k+1} < r$. Falls $y \in E_k$, dann $\|y - x\| \leq \sqrt{n} 2^{-k+1} < r$. Deswegen $E_k \subset K_r(x) \subset U_\mu$. So, die Familie $\{U_\mu\}$ ist endlich (enthält sogar einen einzigen Element!) und überdeckt E_k . Widerspruch! \square

Bemerkung 1.63. f stetig $\implies f^{-1}(U)$ offen falls U offen: diese mächtige Charakterisierung der Stetigkeit werden wir nun nutzen!

Korollar 1.64. Sei $E \subset \mathbb{R}^n$ kompakt und $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^k$ stetig. Dann $f(E)$ ist kompakt.

Beweis. Sei $\{U_\lambda\}$ eine Überdeckung (mit offenen Mengen) von $f(E)$, dann ist $\{f^{-1}(U_\lambda)\}$ eine Überdeckung von E .

$$\exists f^{-1}(U_{\lambda_1}), \dots, f^{-1}(U_{\lambda_N}) \text{ Teilüberdeckung von } E$$

$U_{\lambda_1}, \dots, U_{\lambda_N}$ ist eine Überdeckung von $f(E) \implies f(E)$ ist kompakt \square

Korollar 1.65. Wenn $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ stetig ist und $E \subset \mathbb{R}^n$ kompakt ist, besitzt f ein Maximum und ein Minimum auf E .

Beweis. $f(E) \subset \mathbb{R}$ ist kompakt.

$$s = \sup f(E) < +\infty$$

$$\begin{aligned} \exists \{x_k\} \subset f(E) \text{ mit } x_k \rightarrow s \xrightarrow{\text{abgeschlossen}} s \in f(E) \\ \left(s - \frac{1}{k} \implies \exists x_k \in f(E) \text{ mit } x_k > s - \frac{1}{k}, x_k \leq s \right) \end{aligned}$$

$\implies s$ ist ein Maximum. \square

Ohne Beweis:

Lemma 1.66. [Lemma von Tietze] Sei $E \subset \mathbb{R}^m$ kompakt und $f : E \rightarrow \mathbb{R}$ stetig. Dann $\exists g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ stetig s.d. $g|_E = f$.

Wenn wir Lemma 1.66 und Korollar 1.65 kombinieren, erhalten wir den folgenden Satz:

Satz 1.67. Wenn $E \subset \mathbb{R}^n$ kompakt ist und $f : E \rightarrow \mathbb{R}$ stetig ist, besitzt f ein Maximum und ein Minimum.

Wir geben auch einen alternativen Beweis, unabhängig von Tietzes Lemma

Beweis. Sei $s = \sup\{f(x) : x \in E\}$ (es kann sein dass $s = \infty$). Dann $\exists \{x_k\} \subset E$ s.d. $f(x_k) \rightarrow s$. Die Kompaktheit von E impliziert die Existenz einer Teilfolge $\{x_{k_i}\}$ die gegen einen Element $x \in E$ konvergiert. Deswegen

$$s = \lim_{i \rightarrow \infty} f(x_{k_i}) = f(x).$$

Ein ähnliches Argument beweist die Existenz einer Minimumstelle. \square

Zur Erinnerung: das Intervallschachtelungsprinzip in \mathbb{R} .

Sei I_j eine Intervallschachtelung d.h.:

1.

$$I_j = [a_j, b_j]$$

2.

$$I_0 \supset I_1 \supset \dots \supset I_j \supset I_{j+1}$$

3.

$$b_j - a_j \rightarrow 0$$

Dann

$$\bigcap_{j=0}^{\infty} I_j \neq \emptyset$$

Ein Verallgemeinerung dieses Prinzips ist der Folgende

Satz 1.68. Sei E_j eine Folge von kompakten Mengen mit $E_j \supset E_{j+1} \forall j$ ($E_0 \subset \mathbb{R}^n$). Dann

$$\bigcap_{j=1}^{\infty} E_j \neq \emptyset \text{ falls } E_j \neq \emptyset \forall j$$

Beweis. Sei E_j wie im Satz mit $E_j \neq \emptyset$, aber $\bigcap_{j=0}^{\infty} E_j = \emptyset$. Sei $U_j := \mathbb{R}^n \setminus E_j \implies U_j$ ist offen. $\bigcup_{j=1}^{\infty} U_j = \mathbb{R}^n$ und deswegen ist $\{U_j\}$ eine Überdeckung von E_0 . Aber $U_1 \cup \dots \cup U_N = U_N$ (weil $U_{j+1} \supset U_j$)

$$U_N \not\supset E_N \neq \emptyset \quad E_N \subset E_0$$

Keine endliche Teilfamilie von $\{U_j\}$ ist eine Überdeckung von E_0 . Widerspruch wegen der Kompaktheit von E_0 . \square

Wir geben endlich eine Zusammenfassung der Eigenschaften der stetigen Funktionen $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^k$:

- $E \subset \mathbb{R}^k$ offen $\implies f^{-1}(E)$ offen;
- $E \subset \mathbb{R}^k$ geschlossen $\implies f^{-1}(E)$ geschlossen;
- $E \subset \mathbb{R}^n$ kompakt $\implies f(E)$ kompakt.

Aber *Vorsicht!*

- $E \subset \mathbb{R}^n$ offen impliziert **nicht** $f(E)$ offen;
- $E \subset \mathbb{R}^n$ geschlossen impliziert **nicht** $f(E)$ geschlossen;
- $E \subset \mathbb{R}^k$ kompakt impliziert **nicht** $f^{-1}(E)$ kompakt.

2 Differenzierbare Funktionen

Erinnerung $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ heisst differenzierbar in $a \in \mathbb{R}$ falls

$$f'(a) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a+h) - f(a)}{h}$$

existiert. Was geschieht mit Funktionen von mehreren Variablen? Die “Tangentensteigung” hängt auch von der Richtung ab. D.h. Es gibt eine lineare Abbildung $L : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$

Definition 2.1. $f : U \rightarrow \mathbb{R}$, $U \subset \mathbb{R}^n$ offen, heisst differenzierbar in $a \in U$, falls es eine lineare Abbildung $L : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ gibt so dass

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a+h) - f(a) - L(h)}{\|h\|} = 0. \quad (10)$$

Bemerkung 2.2. $n = 1$: die Funktion ist differenzierbar genau dann, wenn die Ableitung existiert. In diesem Fall gilt $L(h) = f'(a)h$.

Bemerkung 2.3. Die lineare Abbildung L in (10) ist eindeutig definiert. In der Tat seien L' und L zwei lineare Abbildungen die (10) erfüllen. Sei $v \in \mathbb{R}^n$ mit $\|v\| = 1$. Es gilt:

$$(L - L')(v) \stackrel{\text{linear und } \|v\|=1}{=} \lim_{t \downarrow 0} \frac{(L - L')(tv)}{\|tv\|} \stackrel{(10) \text{ mit } h=tv}{=} 0.$$

Deswegen $L = L'$.

Bemerkung 2.4. Wir können (10) auch anders beschreiben:

$$f(a+h) - f(a) = Lh + \underbrace{R(h)}_{\text{Restglied}}$$

Dann gilt

$$(10) \iff \lim_{h \rightarrow 0} \frac{R(h)}{\|h\|} = 0 \quad (11)$$

Definition 2.5. L heisst Differential von f in a . Man schreibt $df|_a$. Sei nun $\{e_1, \dots, e_n\}$ die Standardbasis \mathbb{R}^n , $h = (h_1, \dots, h_n) \in \mathbb{R}^n$

$$\implies df|_a(h) = df|_a\left(\sum_{i=1}^n h_i e_i\right) = \sum_{i=1}^n h_i df|_a(e_i)$$

Definition 2.6.

$$\nabla f(a) = (df|_a(e_1), \dots, df|_a(e_n))$$

heisst Gradient von f .

Die Affine Abbildung

$$Tf(x, a) = f(a) + \nabla df|_a(x - a)$$

ist die beste lineare Approximation der Funktion f an der Stelle a . Der Graph von Tf ist eine (hyper)Ebene von \mathbb{R}^{n+1} : die heisst die tangentielle Ebene.

Satz 2.7. f differenzierbar in $a \implies f$ ist stetig in a

Beweis.

$$|f(a+b) - f(a)| = |df|_a(b) + R(b)| \leq \|df|_a\|_O \|h\| + \underbrace{|R(h)|}_{\rightarrow 0}$$

□

Beispiel 2.8. $f(x) = Ax + b$, $A \in M_a(1, n, \mathbb{R})$, $b \in \mathbb{R}$. Dann f ist differenzierbar und $df|_a(h) = a \cdot h$. In der Tat die Abbildung $L(h) := a \cdot h$ ist linear und

$$f(a+h) - f(a) - L(h) = 0 =: R(h).$$

$\frac{R(h)}{\|h\|} \rightarrow 0$ trivialerweise!

Beispiel 2.9. $f(x) := x^T \cdot A \cdot x$, $A = (a_{ij}) \in \text{Sym}(n, \mathbb{R})$

$$f(a+h) - f(a) = \underbrace{2a^T Ah}_{d|_a(h)} + \underbrace{h^T Ah}_{R(h)}.$$

$L(h) := 2a^T Ah$ ist linear (in h), $R(h) = h^T \cdot A \cdot h (= \sum h_i a_{ik} h_l)$. Wir haben $\|A \cdot h\| \leq \|A\|_O \|h\|$ und

$$|h^T \cdot A \cdot h| = \left| \underbrace{h^T \cdot (A \cdot h)}_{\text{Skalarprodukt von } h \text{ und } A \cdot h} \right| \stackrel{\text{Cauchy-Schwartz}}{\leq} \|h\| \|A \cdot h\| \leq \|A\|_O \|h\|^2.$$

Deswegen

$$\frac{|Rh|}{\|h\|} \leq \|A\|_O \|h\| \rightarrow 0.$$

Ziel Wir wollen $df_a(h)$ berechnen. Sei $t \in \mathbb{R}$. Dann

$$\begin{aligned} f(a+th) &= f(a) + df|_a(th) + R(th) \\ \implies df|_a(h) &= \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(a+th) - f(a)}{t} \end{aligned} \quad (12)$$

Definition 2.10. $f : U \rightarrow \mathbb{R}$, $a \in U$. Die Richtungsableitung von f in Richtung $h \in \mathbb{R}^n$ ist der Grenzwert (falls er existiert)

$$\partial_h f(a) := \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(a+th) - f(a)}{t}$$

Die Ableitungen in Richtung e_1, \dots, e_n heissen partielle Ableitungen in a . Wir schreiben

$$\partial_{e_i} f(a) = \partial_i f(a) = \frac{\partial f}{\partial x_i}(a) = f_{x_i}(a)$$

Bemerkung 2.11. Wir haben nicht vorausgesetzt, dass f differenzierbar ist in a !

Satz 2.12. Sei f in a differenzierbar. Dann existieren die Richtungsableitungen in jede Richtung. Insbesondere existieren die partiellen Ableitungen. Es gelten:

$$df|_a(h) = \nabla f(a) \cdot h = \partial_n f(a) = \sum_{i=1}^n \partial_i f(a) h_i \quad (13)$$

und

$$\nabla f(a) = (\partial_1 f(a), \dots, \partial_n f(a))$$

Beweis. Die Existenz der Richtungsableitung ist die Herleitung von 12. (13) ist eine triviale Konsequenz der Linearität von $df|_a$. □

Frage Wie berechnet man die partielle Ableitung effizient? Es gilt:

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}(a) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(a + t e_i) - f(a)}{t}, \quad a = (a_1, \dots, a_n).$$

Wenn wir definieren

$$g_i(y) := f(a_1, \dots, a_{i-1}, y, a_{i+1}, \dots, a_n)$$

dann gilt

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}(a) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{g_i(a_i + t) - f(a_i)}{t} = g'_i(a_i)$$

Beispiel 2.13.

$$f(x, y) := \sin(2x)e^{3y}$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} f(x, y) = 2e^{3y} \cos(2x)$$

$$\frac{\partial f}{\partial y} f(x, y) = \sin(2x)e^{3y} 3$$

Frage Wann folgt aus der Existenz der partiellen Ableitung (Richtungsableitung) die Differenzierbarkeit?

Beispiel 2.14.

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

Es gilt: $f(tx, ty) = tf(x, y)$, d.h. der Graph von f besteht aus Geraden durch 0, für $h = (h_1, h_2) \in \mathbb{R}^2$

$$\implies \partial_h f(0, 0) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(th_1, th_2) - f(0, 0)}{t} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{t}{t} f(h_1, h_2) = f(h_1, h_2)$$

$$\implies \partial f(0, 0) = f(h_1, h_2)$$

$$\partial_{e_1} f(0, 0) = f(1, 0) = 0$$

$$\partial_{e_2} f(0, 0) = f(0, 1) = 0$$

Annahme f ist in $(0, 0)$ differenzierbar

$$\xrightarrow{\text{aus 13}} \underbrace{\partial_n f(0, 0)}_{=d f(a)h=0} = \underbrace{\partial_1 f(a)}_0(h_1) + \underbrace{\partial_2 f(a)}_0(h_2) = 0$$

$$\implies d f(a) = 0$$

Test $L = 0$

$$\frac{f(h_1, h_1) - \overbrace{f(a_0) - L(h_1, h_1)}}{\|(h_1, h_1)\|_\infty} = \frac{h_1^3}{2h_1^2 |h_1|} \rightarrow \pm \frac{1}{2}$$

$\implies f$ ist in $(0, 0)$ NICHT DIFFERENZIERBAR.

D.h. es kann sein dass die ganzen Richtungsableitungen existieren und die Funktion ist trotzdem nicht differenzierbar!

2.1 Zusammenfassung

2.1.1 Das Differenzial

$f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$, $\Omega \subset \mathbb{R}^n$, Umgebung von x .

f diff in $x \iff \exists L : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ linear s.d.

$$\lim_{h \downarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x) - L(h)}{\|h\|} = 0 \quad (14)$$

(Zur Erinnerung:

$$\lim_{h \downarrow 0} G(h) = 0 \iff (\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 : 0 < \|h\| < \delta \implies |G(h)| < \varepsilon)$$

$$\iff (\forall \text{ Folgen } \{h_k\} \text{ die } \neq 0 \text{ aber } \rightarrow 0, \text{ es gilt } G(h_k) \rightarrow 0) \quad)$$

Wenn f differenzierbar ist und (14) erfüllt, heisst L das Differential von f an der Stelle x :

$$L = df|_x.$$

2.1.2 Richtungsableitung

$x \in \Omega$, $h \in \mathbb{R}^m$, $g(t) = f(x + th)$ (wohldefiniert für $|t|$ klein)

$$\partial_h f(x) = g'(0) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x + th) - f(x)}{t}$$

2.1.3 Partielle Ableitung

(x_1, \dots, x_n) Koordinaten in \mathbb{R}^n . $y \in \Omega$ so dass Ω eine Umgebung von y ist. Dann

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}(y) (= \partial_{x_i} f(y)) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(y_1, \dots, y_i + t, \dots, y_n) - f(y)}{t}$$

Falls $e_i = (0, \dots, 0, \underbrace{1}_{i \text{ Stelle}}, 0, \dots, 0)$

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}(y) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(y + te_i) - f(y)}{t} = \partial_{e_i} f(y)$$

2.2 Das Hauptkriterium der Differenzierbarkeit

Die Existenz der Richtungsableitungen genügt nicht für die Differenzierbarkeit von f . Deswegen die Existenz der partiellen Ableitungen (d.h. von *manchen* Richtungsableitungen) impliziert **nicht** die Differenzierbarkeit.

Satz 2.15. (*Hauptkriterium der Differenzierbarkeit*) Sei $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ und U eine Umgebung von y . Falls $\frac{\partial f}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n}$ in U existieren und stetig in y sind, dann ist f in y differenzierbar.

Bemerkung 2.16. Aber *Vorsicht*: die Differenzierbarkeit von f impliziert **nicht** die Stetigkeit der partiellen Ableitungen!

Beweis. $h = (h_1, \dots, h_n) \in \mathbb{R}^n$. Wir setzen

$$L(h) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i}(y) h_i.$$

Ziel L ist das Differential von f , d.h.

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x) - L(h)}{\|h\|} = 0 \quad (15)$$

Wir schreiben

$$\begin{aligned} f(x+h) - f(x) &= f(x + (h_1, \dots, h_n)) - f(y + (h_1, \dots, h_{n-1}, 0)) \\ &\quad + f(y + (h_1, \dots, h_{n-1}, 0)) - f(y + (h_1, \dots, h_{n-2}, 0, 0)) \\ &\quad + \dots \\ &\quad + f(y + (h_1, \dots, h_i, 0, \dots, 0)) - f(y + (h_1, \dots, h_{i-1}, 0, 0, \dots, 0)) \quad (\text{ite Zeile}) \\ &\quad + \dots \\ &\quad + f(y + (h_1, 0, \dots, 0)) - f(y) \end{aligned} \quad (16)$$

Sei nun $g_i(t) = f(y + (h_1, \dots, h_{i-1}, th_i, 0, \dots, 0))$. Die i te Zeile in (16) ist dann $g_i(1) - g_i(0)$. Aber

$$\begin{aligned} g_i'(t) &= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{g_i(t+\varepsilon) - g_i(t)}{\varepsilon} \\ &= h_i \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{f(y_1 + h_1, \dots, y_{i-1} + h_{i-1}, y_i + (t+\varepsilon)h_i, y_{i+1}, \dots, y_n) - f(y_1 + h_1, \dots, y_i + th_i, \dots, y_n)}{\varepsilon h_i} \\ &= h_i \frac{\partial f}{\partial x_i}(y_1 + h_1, \dots, y_i + th_i, y_{i+1}, \dots, y_n). \end{aligned}$$

Deswegen die Existenz der Richtungsableitungen in einer Umgebung von y garantieren die Differenzierbarkeit der Funktion g_i falls $\|h\|$ klein genug ist. Ausserdem

$$\exists \xi_i \in [0, 1] : \quad i\text{te Zeile von (16)} = g_i'(\xi_i)$$

und so

$$i\text{te Zeile} = h_i \frac{\partial f}{\partial x_i}(y_1 + h_1, \dots, y_{i-1} + h_{i-1}, y_i + \xi_i h_i, y_{i+1}, \dots, y_n) = h_i \frac{\partial f}{\partial x_i}(y + \zeta_i). \quad (17)$$

wobei $\zeta_i = (h_1, \dots, h_{i-1}, \xi_i h_i, 0, \dots, 0)$ Wir setzten (17) in (16):

$$f(y+h) - f(y) = \sum_{i=1}^n h_i \frac{\partial f}{\partial x_i}(y + \zeta_i)$$

und deswegen

$$f(x+h) - f(x) - L(h) = \sum_{i=1}^n h_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}(y + \zeta_i) - \frac{\partial f}{\partial x_i}(y) \right). \quad (18)$$

Also,

$$\frac{|f(x+h) - f(x) - L(h)|}{\|h\|} \stackrel{(18)}{\leq} \sum_{i=1}^n \frac{|h_i| \left| \frac{\partial f}{\partial x_i}(y + \zeta_i) - \frac{\partial f}{\partial x_i}(y) \right|}{\|h\|} \quad (19)$$

Wenn $\|h\| \rightarrow 0$, $\|\zeta_i\| \rightarrow 0$. Die Stetigkeit von $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ in y impliziert

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}(y + \zeta_i) \rightarrow \frac{\partial f}{\partial x_i}(y)$$

Die rechte Seite von (19) $\rightarrow 0$ wenn $h \rightarrow 0 \implies (15)$. □

2.3 Die geometrische Bedeutung des Gradients

Wir haben

$$df|_{x_0}(h) = \partial_h f(x_0) = \sum_{i=1}^n h_i \frac{\partial f}{\partial x_i}(x_0) = \nabla f(x_0) \cdot h$$

(manchmal wir schreiben auch $\langle \nabla f(x_0), h \rangle$). Deswegen,

$$|\partial_h f(x_0)| \stackrel{\text{Cauchy-Schwartz}}{\leq} \|\nabla f(x_0)\| \|h\|$$

Falls $\|h\| = 1$, dann

$$|\partial_h f(x_0)| \leq \|\nabla f(x_0)\|$$

Fall $\|\nabla f(x_0)\| \neq 0$, wir definieren

$$K = \frac{\nabla f(x_0)}{\|\nabla f(x_0)\|}.$$

Dann $\|K\| = 1$ und

$$\partial_K f(x_0) = \|\nabla f(x_0)\|$$

Deswegen:

$$K = \frac{\nabla f(x_0)}{\|\nabla f(x_0)\|}$$

ist die Richtung der maximalen Steigung und

$$\|\nabla f(x_0)\|$$

ist die maximale Steigung.

2.4 Rechenregeln

Satz 2.17.] Sei U eine Umgebung von $x \in \mathbb{R}^n$ und $f, g : U \rightarrow \mathbb{R}$ in x differenzierbar. Dann sind $f + g$ und fg auch differenzierbar in x und

$$d(f + g)|_x = d f|_x + d g|_x \quad (20)$$

$$d(fg) = f(x) d g|_x + g(x) d f|_x. \quad (21)$$

Falls $f(x) \neq 0$ ist auch $\frac{1}{f}$ in x differenzierbar

$$d\left(\frac{1}{f}\right)|_x = -\frac{1}{(f(x))^2} d f|_x. \quad (22)$$

Korollar 2.18. $g(x) \neq 0$, dann

$$\begin{aligned} d\left(\frac{f}{g}\right)|_x &= \frac{1}{g(x)} d f|_x - \frac{f(x)}{g(x)^2} d g|_x \\ &= \frac{g(x) d f|_x - f(x) d g|_x}{g(x)^2} \end{aligned}$$

Beweis. [Beweis vom Satz 2.17] Die Regel (20) ist sehr einfach zu beweisen. Für die Regel (21) schreiben wir

$$f(x+h)g(x+h) = (f(x+h) - f(x))g(x+h) + f(x)(g(x+h) - g(x))$$

und wir nutzen das gleiche Argument für den Fall einer reellen Variabel.

Wir beweisen nun (22). Da f stetig in x ist, $f(x+h) \neq 0$ falls $\|h\|$ klein genug ist. Deswegen ist $1/f$ wohldefiniert in einer Umgebung von x . Das Ziel ist eine lineare Abbildung L zu finden so dass

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\frac{1}{f(x+h)} - \frac{1}{f(x)} - L(h)}{\|h\|}$$

wobei

$$L = -\frac{1}{f(x)^2} \mathrm{d}f|_x.$$

Wir schreiben

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\overbrace{\frac{1}{f(x+h)} - \frac{1}{f(x)} - \frac{1}{f(x)^2}(h) \mathrm{d}f|_x(h)}^A}{\|h\|}$$

und rechnen

$$\frac{1}{f(x+h)} - \frac{1}{f(x)} = \frac{f(x) - f(x+h)}{f(x)f(x+h)}.$$

Also,

$$A = \underbrace{\frac{-(-f(x) + f(x+h)) - \mathrm{d}f|_x(h)}{f(x)f(x+h)}}_C + \underbrace{\frac{-\mathrm{d}f|_x(h)}{f(x)f(x+h)} + \frac{\mathrm{d}f|_x(h)}{f(x)^2}}_B$$

Aber

$$\frac{B}{\|h\|} = -\underbrace{\frac{1}{f(x)f(x+h)}}_{\rightarrow f(x)^2 \neq 0} \underbrace{\frac{f(x+h) - f(x) - \mathrm{d}f|_x(h)}{\|h\|}}_{\rightarrow 0 \text{ weil } f \text{ diff. in } x}$$

und deswegen

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{B}{\|h\|} = 0$$

Ausserdem

$$\frac{C}{\|h\|} = \underbrace{\frac{\mathrm{d}f|_x(h)}{\|h\|}}_D \frac{1}{f(x)} \underbrace{\left(\frac{1}{f(x)} - \frac{1}{f(x+h)} \right)}_{\rightarrow 0}$$

Sei $L = \mathrm{d}f|_x$ und $\|L\|_O$ ihre Operatornorm

$$\begin{aligned} |\mathrm{d}f|_x(h)| &= |L(h)| \leq \|L\|_O \|h\| \\ \implies D &= \frac{|\mathrm{d}f|_x(h)|}{\|h\|} \leq \|L\|. \end{aligned}$$

Deswegen ist D beschränkt und

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{C}{\|h\|} = 0.$$

□

2.5 Kettenregel

Definition 2.19. Eine Kurve ist eine Abbildung $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$.

Diese Definition bedeutet dass $\gamma(t) \in \mathbb{R}^n \forall t$. Seien nun $\gamma_i(t)$ die Koordinaten des Vektors $\gamma(t)$:

$$\gamma(t) = (\gamma_1(t), \dots, \gamma_n(t)).$$

Jede $t \rightarrow \gamma_i(t) \in \mathbb{R}$ ist eine reellwertige Funktion einer Variabel.

Definition 2.20. Die Kurve γ heisst differenzierbar wenn jede γ_i differenzierbar ist. In diesem Fall definieren wir

$$\dot{\gamma}(t) := (\gamma'_1(t), \dots, \gamma'_n(t))$$

Satz 2.21. (Kettenregel 1. Version) Sei $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ mit U Umgebung von x_0 und f differenzierbar in x_0 . Sei $\gamma : [a, b] \rightarrow U$ eine differenzierbare Kurve mit $\gamma(t_0) = x_0$. Sei $g = f \circ \gamma$ (i.e. $g(t) = f(\gamma(t))$). Dann ist g in t_0 differenzierbar und

$$g'(t_0) = \mathrm{d}f|_{\gamma(t_0)}(\dot{\gamma}(t_0)) = \langle \nabla f(\gamma(t_0)), \dot{\gamma}(t_0) \rangle.$$

Beweis. Das Ziel:

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{g(t_0 + h) - g(t_0) - h [\mathrm{d}f|_{\gamma(t_0)}(\dot{\gamma}(t_0))]}{h} = 0.$$

Wir definieren

$$R(h) = g(t_0 + h) - g(t_0) - h [\mathrm{d}f|_{\gamma(t_0)}(\dot{\gamma}(t_0))]. \quad (23)$$

Dann wollen wir die folgende Behauptung zeigen:

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{R(h)}{|h|} = 0 \quad (24)$$

Wir führen eine neue Notation ein: wir sagen dass $R(h) = o(|h|)$ falls (23) gilt.

Aus der Differenzierbarkeit von f

$$\lim_{k \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + k) - f(x_0) - \mathrm{d}f|_{x_0}(k)}{\|k\|} \left(=: \frac{r(k)}{\|k\|} \right) = 0,$$

d.h.

$$r(k) = o(\|k\|)$$

Die Differenzierbarkeit von γ impliziert

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\gamma(t_0 + h) - \gamma(t_0) - \dot{\gamma}(t_0)h}{h} \left(=: \frac{p(h)}{h} \right) = 0,$$

d.h.

$$p(h) = o(|h|)$$

Wir setzen

$$k = \gamma(t_0 + h) - \gamma(t_0)$$

und schreiben

$$\begin{aligned} g(t_0 + h) - g(t_0) &= f(\gamma(t_0 + h)) - \overbrace{f(\gamma(t_0))}^{x_0} = f(\gamma(t_0) + k) - f(\gamma(t_0)) \\ &= \mathrm{d}f|_{\gamma(t_0)}(k) + r(k) \\ &= \mathrm{d}f|_{\gamma(t_0)}(\gamma(t_0 + h) - \gamma(t_0)) + r(k) \\ &= \mathrm{d}f|_{\gamma(t_0)}(h\dot{\gamma}(t_0) + p(h)) + r(k) \\ &\stackrel{\text{Linearität von } \mathrm{d}f}{=} h \mathrm{d}f|_{\gamma(t_0)}(\dot{\gamma}(t_0)) + \mathrm{d}f|_{\gamma(t_0)}(p(h)) + r(k). \end{aligned}$$

Deswegen

$$R(h) = g(t_0 + h) - g(t_0) - h \mathrm{d}f|_{\gamma(t_0)}(\dot{\gamma}(t_0)) = \mathrm{d}f|_{\gamma(t_0)}(p(h)) + r(\gamma(t_0 + h) - \gamma(t_0)).$$

$$\begin{aligned} |R(h)| &\leq \underbrace{|\mathrm{d}f|_{\gamma(t_0)}(p(h))|}_L + |r(\gamma(t_0 + h) - \gamma(t_0))| \\ &\leq \|L\|_O \|p(h)\| + \frac{r(\gamma(t_0 + h) - \gamma(t_0))}{\|h\|} \end{aligned}$$

Aber $p(h) = o(|h|) \implies \|L\|_O \|p(h)\| = o(|h|)$. Nun beweisen wir auch

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{r(\gamma(t_0 + h) - \gamma(t_0))}{|h|} = 0$$

Wir unterscheiden zwei Fälle. Falls

$$\gamma(t_0 + h) - \gamma(t_0) = 0,$$

dann $r(\gamma(t_0 + h) - \gamma(t_0)) = r(0) = 0$. Wenn

$$\gamma(t_0 + h) - \gamma(t_0) \neq 0$$

dan schreiben wir

$$\frac{r(\gamma(t_0 + h) - \gamma(t_0))}{|h|} = \frac{r(\gamma(t_0 + h) - \gamma(t_0))}{\|\gamma(t_0 + h) - \gamma(t_0)\|} \frac{\|\gamma(t_0 + h) - \gamma(t_0)\|}{|h|}$$

Nun

$$\frac{r(\gamma(t_0 + h) - \gamma(t_0))}{\|\gamma(t_0 + h) - \gamma(t_0)\|} = \frac{r(k)}{\|k\|} \rightarrow 0$$

(weil $k = \gamma(t_0 + h) - \gamma(t_0) \rightarrow 0$ wenn $h \rightarrow 0$). Ausserdem

$$\frac{\gamma(t_0 + h) - \gamma(t_0)}{h} = \underbrace{\dot{\gamma}(t_0)}_{\text{konstant}} + \underbrace{\frac{p(h)}{h}}_{\rightarrow 0}$$

Deswegen

$$\begin{aligned} \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\|\gamma(t_0 + h) - \gamma(t_0)\|}{|h|} &= \|\dot{\gamma}(t_0)\| \\ \implies \frac{|R(h)|}{\|h\|} &\rightarrow 0 \end{aligned}$$

\implies Differenzierbarkeit und Kettenregel! \square

Bemerkung 2.22. Als Korollar der Kettenregel erhalten wir das folgende geometrische Korollar: der Gradient ist orthogonal zur Niveaumenge der Funktion (Höhenlinien, wenn der Definitionsbereich der Funktion 2-dimensional ist). In der Tat, sei $\gamma : [a, b] \rightarrow U$ eine differenzierbare Kurve, U offen. Sei $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ differenzierbar. Wenn $f(\gamma(t)) = c_0$ (c_0 hängt nicht von t ab), dann

$$\nabla f(\gamma(t)) \perp \dot{\gamma}(t)$$

d.h.

$$\langle \nabla f(\gamma(t)), \dot{\gamma}(t) \rangle = 0,$$

weil

$$0 = g'(t) = (f(\gamma(t)))' \stackrel{\text{Kettenregel}}{=} \langle \nabla f(\gamma(t)), \dot{\gamma}(t) \rangle$$

2.6 Mittelwertsatz und Schrankensatz

Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ eine differenzierbare Funktion. Dann $\exists \xi \in]a, b[$ s.d.

$$f(b) - f(a) = f'(\xi)(b - a)$$

Sei nun:

$$f : U \mapsto \mathbb{R} \text{ differenzierbar auf } U$$

$$x, y \in U \text{ so dass das Segment } [x, y] \subset U$$

Das Segment $[x, y]$ ist die Menge

$$[[x, y]] = \{x + t(y - x) | t \in [0, 1]\}.$$

Wir definieren

$$\gamma(t) := x + t(y - x) \quad \text{und} \quad g = f \circ \gamma \quad (\text{d.h. } g(t) = f(\gamma(t))).$$

Dann

$$f(y) - f(x) = g(1) - g(0).$$

Ausserdem, γ ist differenzierbar und

$$\dot{\gamma}(\tau) = (\gamma'_1(\tau), \dots, \gamma'_n(\tau)) = (y_1 - x_1, \dots, y_n - x_n) = y - x$$

Aus dem Mittelwertsatz für reelwertige Funktionen einer Variabel $\exists \tau \in]0, 1[$ s.d.

$$f(y) - f(x) = g(1) - g(0) = g'(\tau) \stackrel{\text{Kettenregel}}{=} df|_{\gamma(\tau)}(\dot{\gamma}(\tau)) = df|_{\gamma(\tau)}(y - x)$$

D.h. $\exists \xi \in [x, y]$ s.d.

$$f(y) - f(x) = df|_{\xi}(y - x) = \partial_{y-x} f(\xi) \quad (25)$$

Satz 2.23. (Mittelwertsatz) U offen, $[x, y] \subset U$ und $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ differenzierbar. Dann $\exists \xi \in]x, y[$ so das (25) gilt.

Definition 2.24. Sei $U \subset \mathbb{R}^n$ eine Menge. U heisst sternförmig mit Zentrum $x_0 \in U$: wenn $[x_0, x] \subset U \forall x \in U$

Satz 2.25. (Schränkensatz) Sei U eine offene Menge, die sternförmig ist und $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ eine differenzierbare Funktion mit

$$\sup_{x \in U} \|df|_x\|_O = S < \infty \left(= \sup_{x \in U} \|\nabla f(x)\| \right)$$

Dann

$$|f(x) - f(0)| \leq S \|x\|$$

Wenn U konvex ist, d.h. das Segment $[x, y] \subset U \forall x, y \in U$, dann

$$|f(x) - f(y)| \leq S \|y - x\|$$

Definition 2.26. $f : \underbrace{K}_{\in \mathbb{R}^n} \rightarrow \mathbb{R}$ heisst Lipschitz wenn $\exists L \in [0, +\infty[$ so dass

$$|f(y) - f(x)| \leq L \|y - x\| \quad \forall x, y \in K$$

Sei (X, d) ein metrischer Raum. $f : (X, d) \rightarrow \mathbb{R}$ heisst Lipschitz falls $\exists L < \infty$ so dass

$$|f(y) - f(x)| \leq L d(y, x) \quad \forall x, y \in K$$

Korollar 2.27. Sei U offen und konvex und $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ eine differenzierbare Funktion mit beschränkten partiellen Ableitungen. Dann ist f Lipschitz.

2.7 Höhere partielle Ableitungen

Sei

$$f : \mathbb{R}^n \supset \Omega \rightarrow \mathbb{R}$$

Die partiellen Ableitungen von f :

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}(x) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{f(x + \varepsilon e_i) - f(x)}{\varepsilon} \quad \text{wobei } e_i = (0, \dots, 1, \dots, 0)$$

Falls die partielle Ableitung $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ überall existiert dann bekommen wir eine neue Funktion

$$\Omega \ni x \mapsto \frac{\partial f}{\partial x_i} \in \mathbb{R}.$$

Wir können diese neue Funktion noch ableiten. Wir definieren

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}(x) := \frac{\partial \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)}{\partial x_j}(x) = \lim_{\varepsilon \downarrow 0} \frac{\frac{\partial f}{\partial x_i}(x + \varepsilon e_j) - \frac{\partial f}{\partial x_i}(x)}{\varepsilon}.$$

Wenn auch diese überall existiert, können wir noch ableiten:

$$\frac{\partial^3 f}{\partial x_k \partial x_j \partial x_i}(x) := \lim_{\varepsilon \downarrow 0} \frac{\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}(x + \varepsilon e_k) - \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}(x)}{\varepsilon}.$$

Und so weiter. Die Anzahl Ableitungen die wir nehmen ist die *Ordnung* der höheren Partiellen Ableitung. D.h.

$$\frac{\partial^k f}{\partial x_{i_1} \dots \partial x_{i_k}}$$

ist eine partielle Ableitung mit Ordnung k .

Ausserdem wir nutzen die Notation

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_i} \quad \frac{\partial^3 f}{\partial x_i^3} = \frac{\partial^3 f}{\partial x_i \partial x_i \partial x_i}$$

und so weiter.

Satz 2.28 (Lemma von Schwarz). Sei $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion die in einer Umgebung von $p \in \Omega$ die partielle Ableitungen $\frac{\partial f}{\partial x_i}$, $\frac{\partial f}{\partial x_j}$ und $\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}$ besitzt. Falls $\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}$ stetig in p ist, dann existiert $\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}(p)$ und

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}(p) = \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}(p).$$

Beispiel 2.29. Wir kontrollieren die Plausibilität dieses Satzes mit einer ziemlich grossen Famile von Funktionen: Die Polynome. Sei

$$f(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} a_{ij} x_1^i x_2^j$$

Dann wir können explizit die folgenden partiellen Ableitungen rechnen:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x_1} &= \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} i a_{ij} x_1^{i-1} x_2^j \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} &= \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} i j a_{ij} x_1^{i-1} x_2^{j-1} \\ \frac{\partial f}{\partial x_2} &= \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} j a_{ij} x_1^i x_2^{j-1} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} &= \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} i j a_{ij} x_1^{i-1} x_2^{j-1}. \end{aligned}$$

Beispiel 2.30. Aber, ohne gewisse Annahmen, ist der Satz falsch. Sei zum Beispiel $V : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion die nicht differenzierbar ist und definieren wir

$$v : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R} \quad v(x_1, x_2) = V(x_2)$$

Dann,

$$\frac{\partial f}{\partial x_1} = 0 \quad \text{und} \quad \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} = 0.$$

Aber $\frac{\partial f}{\partial x_2}$ existiert nicht und deswegen auch $\frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2}$ nicht existiert.

Beweis. [Beweis des Lemmas von Schwarz] Die Idee ist ein Ärt von Mittelwertsatz zu benutzen.

Schritt 1 Von Dimension $n \rightarrow 2$

$$f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_j, \dots, x_n)$$

$$p = (p_1, \dots, p_i, \dots, p_j, \dots, p_n)$$

Wir definieren $g : \mathbb{R}^2 \supset U \rightarrow \mathbb{R}$ als

$$g(y, z) = g(p_1, \dots, p_{i-1}, y, p_{i+1}, \dots, p_{j-1}, z, p_{j+1}, \dots, p_n).$$

Dann,

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x_i}(p) &= \frac{\partial g}{\partial y}(p_i, p_j) & \frac{\partial f}{\partial x_j}(p) &= \frac{\partial g}{\partial z}(p_i, p_j) \\ \frac{\partial f}{\partial x_j \partial x_i} &= \frac{\partial^2 g}{\partial z \partial y}(p_i, p_j) & \frac{\partial f}{\partial x_i \partial x_j}(p) &= \frac{\partial^2 g}{\partial y \partial z}(p_i, p_j) \end{aligned}$$

(Wir rechnen zum Beispiel

$$\begin{aligned}\frac{\partial f}{\partial x_i}(p) &= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{f(p_1, \dots, p_i + \varepsilon, \dots, p_j, \dots, p_n) - f(p)}{\varepsilon} \\ &= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{g(p_1 + \varepsilon, p_2) - g(p_1, p_2)}{\varepsilon} = \frac{\partial g}{\partial y}(p_i, p_j). \end{aligned}$$

Deswegen, oBdA beweisen wir nun den Fall $n = 2$ des Satzes.

Schritt 2 Sei $f : \mathbb{R}^2 \supset \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ und $(a, b) \in \Omega$. Wir wissen dass $\frac{\partial f}{\partial x_1}$, $\frac{\partial f}{\partial x_2}$ und $\frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1}$ in einer Umgebung von $p = (a, b)$ existieren und $\frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1}$ stetig auf p ist. Zu beweisen: $\frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1}(p)$ existiert und

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1}(p) = \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2}(p).$$

Für jede $h, k \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$ wir definieren den Rechteck Q mit Ecken (a, b) , $(a+h, b)$, $(a, b+k)$, $(a+h, b+k)$. D.h. $Q = [a, a+h] \times [b, b+k]$. Wir definieren

$$D_Q f := f(a+h, b+k) - f(a+h, b) - f(a, b+k) + f(a, b)$$

und bemerken dass

$$\begin{aligned}\lim_{k \rightarrow 0} \lim_{h \rightarrow 0} \frac{D_Q f}{hk} &= \lim_{k \rightarrow 0} \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a+h, b+k) - f(a, b+k)}{hk} - \frac{f(a+h, b) - f(a, b)}{hk} \\ &= \lim_{k \rightarrow 0} \frac{\frac{\partial f}{\partial x_1}(a, b+k) - \frac{\partial f}{\partial x_1}(a, b)}{k} = \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1}(a, b) \end{aligned} \quad (26)$$

und

$$\lim_{h \rightarrow 0} \left(\lim_{k \rightarrow 0} \frac{D_Q f}{hk} \right) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\frac{\partial f}{\partial x_2}(a+h, b) - \frac{\partial f}{\partial x_2}(a, b)}{h}. \quad (27)$$

Die Existenz des Grenzwerts in (27) impliziert die Existenz der partiellen Ableitung $\frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2}(a, b)$. In diesem Fall ist es auch

$$\lim_{h \rightarrow 0} \lim_{k \rightarrow 0} \frac{D_Q f}{hk} = \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2}(a, b)$$

Wir werden nun die Existenz dieses zweiten Grenzwerts beweisen. Gleichzeitig erhalten wir dass die Grenzwerte in (26) und (27) gleich sind (i.e. wir können “ h und k im Grenzwert vertauschen”).

Wir behaupten ($\forall h, k$ klein genug) die Existenz von einer Stelle $(\xi, \zeta) \in Q$ so dass

$$\frac{D_Q f}{hk} = \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1}(\xi, \zeta) \quad (28)$$

Das folgt wenn wir zwei Mal den Mittelwertsatz anwenden. OBdA nehmen wir $h, k > 0$ an. Dann

$$\begin{aligned}\frac{D_Q f}{hk} &= \frac{1}{h} \left\{ \frac{f(a+h, b+k) - f(a, b+k)}{k} - \frac{f(a, b+k) - f(a, b)}{k} \right\} \\ &= \frac{1}{h} \{g(a+h) - g(a)\} \stackrel{\text{Mittelwertsatz}}{=} g'(\xi)\end{aligned}$$

wobei

$$g(z) := \frac{f(z, b+k) - f(z, b)}{k}$$

und ξ eine Stelle in $]X, X+h[$ ist. g ist in der Tat differenzierbar und

$$g'(z) = \frac{1}{k} \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}(z, b+k) - \frac{\partial f}{\partial x_1}(z, b) \right).$$

Deswegen, wenn wir einen zweiten Mal den Mittelwertsatz anwenden,

$$\begin{aligned}\frac{D_Q f}{hk} &= \frac{1}{k} \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}(\xi, b+k) - \frac{\partial f}{\partial x_1}(\xi, b) \right) \\ &= \frac{\partial f}{\partial x_2} \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \right) (\xi, \zeta) = \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1}(\xi, \zeta).\end{aligned}$$

Nun nutzen wir die Stetigkeit der Funktion $\frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1}$:

$$\begin{aligned}\lim_{k \rightarrow 0} \left(\lim_{h \rightarrow 0} \frac{D_Q f}{hk} \right) &= \lim_{\zeta \rightarrow b} \left(\lim_{\xi \rightarrow a} \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1}(\xi, \zeta) \right) \\ &= \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1}(a, b) = \lim_{\xi \rightarrow a} \left(\lim_{\zeta \rightarrow b} \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1}(\xi, \zeta) \right) \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \left(\lim_{k \rightarrow 0} \frac{D_Q f}{hk} \right)\end{aligned}$$

□

3 Das Taylorpolynom

Definition 3.1. Sei nun $a \in \Omega \subset \mathbb{R}^n$, $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ und $w \in \mathbb{R}^n$. Falls die ganzen Ableitungen mit Ordnung k in a existieren, dann definieren wir

$$:= \sum_{i_1=1}^n \cdots \sum_{i_k=1}^n \frac{\partial^k f(a)}{\partial x_{i_1} \cdots \partial x_{i_k}} w_{i_1} \cdots w_{i_k}$$

und das Taylor Polynom

$$T_x^k f(z) = f(x) + \mathrm{d} f|_x(z-x) + \cdots + \frac{1}{k!} \mathrm{d} f^{(k)}|_x(z-x)^k$$

Definition 3.2. Eine Funktion $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ heisst C^k falls die ganzen partiellen Ableitungen mit Ordnung $\leq k$ überall existieren und stetig sind.

Satz 3.3 (Verallgemeinerte Lagrange Fehlerabschätzung). Sei $f \in C^{k+1}$ und $K_r(a) \in \Omega$. Dann, $\forall x \in K_r(a) \exists \xi \in [x, k]$ s.d.

$$R_a^k f(x) := f(x) - T_x^k f(x) = \frac{1}{(k+1)!} \mathrm{d} f^{(k+1)}|_\xi (x-a)^{k+1}. \quad (29)$$

Falls $f \in C^k$, dann $f(x) - T_x^k f(x) = o(\|x\|^k)$.

Beweis. Teil 1: Beweis von (29) Sei $g(t) := f(tx + (1-t)a)$. Wir wenden die Kettenregel $k+1$ Mal und rechnen:

$$\begin{aligned}g'(t) &= \mathrm{d} f|_{tx+(1-t)a}(x-a) \\ g''(t) &= \mathrm{d}^2 f|_{tx+(1-t)a}(x-a)^2 \\ &\vdots \\ g^{(k+1)}(t) &= \mathrm{d}^{(k+1)} f|_{tx+(1-t)a}(x-a)^{k+1}\end{aligned} \quad (30)$$

Die Lagrange Fehlerabschätzung für Funktionen einer Variable gibt die existenz einer Stelle $\tau \in]0, 1[$ s.d.

$$g(1) = \sum_{i=0}^k \frac{1}{i!} g^{(i)}(0) + \frac{1}{(k+1)!} g^{(k+1)}(\tau). \quad (31)$$

(Zur Erinnerung: wir nutzen die Konvention $g^{(0)}(0) = g(0)$ und deswegen

$$\frac{1}{0!} \mathrm{d} f^{(0)}|_x(z-x)^0 = f(x).$$

Die Stelle $\xi := \tau x + (1 - \tau)a$ liegt auf dem Segment $[a, x]$. Mit den Formeln (30) schreiben wir (31) als

$$\begin{aligned} f(x) &= g(1) = \sum_{i=0}^k \frac{1}{i!} df^{(i)}|_a (x-a)^i + \frac{1}{(k+1)!} df^{(k+1)}|_\xi (a-x)^{k+1} \\ &= T_a^k f(x) + \frac{1}{(k+1)!} df^{(k+1)}|_\xi (a-x)^{k+1} \end{aligned}$$

Teil 2 Sei nun $f \in C^k$. Wir nutzen (29) und (für $x \in K_r(a)$) schreiben

$$f(x) = T_a^k f(x) + \frac{1}{k!} df^{(k)}|_\xi (a-x)^k. \quad (32)$$

Deswegen

$$\begin{aligned} |f(x) - T_a^k f(x)| &= \left| \frac{1}{k!} df^{(k)}|_a (a-x)^k - \frac{1}{k!} df^{(k)}|_\xi (a-x)^k \right| \\ &= \frac{1}{k!} \left| \sum_{i_1=1}^n \dots \sum_{i_k=1}^n \left(\frac{\partial^k f}{\partial x_{i_1} \dots \partial x_{i_k}}(a) - \frac{\partial^k f}{\partial x_{i_1} \dots \partial x_{i_k}}(\xi) \right) (x_{i_1} - a_{i_1}) \dots (x_{i_k} - a_{i_k}) \right| \\ &\leq \frac{\|x-a\|^k}{k!} \sum_{i_1=1}^n \dots \sum_{i_k=1}^n \left| \frac{\partial^k f}{\partial x_{i_1} \dots \partial x_{i_k}}(a) - \frac{\partial^k f}{\partial x_{i_1} \dots \partial x_{i_k}}(\xi) \right|. \end{aligned} \quad (33)$$

Die Stetigkeit der partiellen Ableitungen impliziert

$$\lim_{\xi \rightarrow 0} \left(\frac{\partial^k f}{\partial x_{i_1} \dots \partial x_{i_k}}(a) - \frac{\partial^k f}{\partial x_{i_1} \dots \partial x_{i_k}}(\xi) \right) = 0.$$

$x \rightarrow a$ impliziert $\xi \rightarrow 0$ und aus (33) schliessen wir

$$\lim_{x \rightarrow a} \frac{|f(x) - T_a^k f(x)|}{\|x-a\|^k} = 0.$$

□

Falls f beliebig mal differenzierbar ist (in diesem Fall schreiben wir $f \in C^\infty(\Omega)$; d.h. die ganzen partiellen Ableitungen existieren und sind stetig), können wir die Taylorreihe schreiben:

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} df^{(k)}|_x (z-x)^k$$

Definition 3.4. Eine Funktion $f \in C^\infty(\Omega)$ heisst analytisch wenn $\forall x \in \Omega$ $\exists B_r(x) \subset \Omega$ mit der Eigenschaft dass:

$$T_x(z) = f(z) \quad \forall z \in B_r(x).$$

In diesem Fall schreiben wir $f \in C^\omega(\Omega)$.

3.1 Das Taylorpolynom zweiter Ordnung

Wir schreiben noch ein Mal die Approximation mit dem Taylorpolynom zweiter Ordnung für eine C^2 Funktion:

$$\begin{aligned} f(z) &= f(x) + \underbrace{\sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i}(x)(z_i - x_i)}_{\langle \nabla f(x), z-x \rangle} \\ &\quad + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}(x)(z_i - x_i)(z_j - x_j) + R(z). \end{aligned} \quad (34)$$

Aus dem Satz 3.3 wissen wir dass $R(z) = o(\|z - x\|^2)$. Falls $f \in C^3$ dann wissen wir noch mehr: $R(z) = O(\|z - x\|^3)$ (wir führen hier eine neue Notation ein: wenn g eine nichtnegative Funktion ist, die Schreibung $R(z) = O(g(z))$ bedeutet die Existenz einer Umgebung U von x und einer Konstant C s.d. $|R(z)| \leq Cg(z) \forall z \in U$).

Wir definieren die Hesse Matrix

$$Hf(x) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_i \partial x_j}(x) \right)$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_3} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_3} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_3 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_3 \partial x_2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_3^2} \end{pmatrix}$$

Bemerkung 3.5. Schwarz $\implies Hf(x)$ ist symmetrisch wenn alle Ableitungen zweiter Ordnung stetig sind.

Wir rechnen

$$\underbrace{\sum_i \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_j}(x)(z_i - x_i), \dots, \sum_i \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_i}(x)(z_i - x_i)}_{=Hf(x)(z-x)}$$

und deswegen

$$\sum_{j=1}^n (z_j - x_j) \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}(x)(z_j - x_j)$$

$$= \langle z - x, Hf(x)(z - x) \rangle = (z - x)^T Hf(x)(z - x)$$

Wenn A eine $n \times n$ Matrix, die Abbildung

$$w \mapsto w^T A w \quad (= \langle w, A w \rangle)$$

ist eine “quadratische Form” auf \mathbb{R}^n . $w^T A w$ ist das Matrix Produkt der: $1 \times n$ Matrix w^T (“eine Zeile”), $n \times n$ Matrix A und $n \times 1$ Matrix w (“eine Spalte”).

Das Taylorpolynom zweiter Ordnung ist dann

$$T_x^2 f(z) = f(x) + \langle \nabla f(x), z - x \rangle + \frac{1}{2} (z - x)^T Hf(x)(z - x)$$

Korollar 3.6. Falls $f \in C^3(\Omega)$ und $B_r(x) \subset \Omega$

$$f(z) = T_x^2 + O(\|x - z\|^3)$$

d.h.

$$|f(z) - T_x^2 f(z)| \leq C \|z - x\|^3$$

Korollar 3.7. Falls $f \in C^2(\Omega)$ und $B_r(x) \subset \Omega$, dann

$$f(z) = T_x^2 f(z) + o(\|z - x\|^2)$$

d.h.

$$\lim_{z \rightarrow x} \frac{f(z) - T_x^2 f(z)}{\|z - x\|^2} = 0$$

Beweis. Die Taylorapproximation mit Ordnung 1:

$$f(z) = T_x^1 f(z) + \frac{1}{2} (z - x)^T Hf(\zeta)(z - x)$$

Dann,

$$f(z) - T_x^2 f(z) = \frac{1}{2} (z - x)^T Hf(\zeta)(z - x) - \frac{1}{2} (z - x)^T Hf(x)(z - x)$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{2}(z-x)^T(Hf(\zeta) - Hf(x))(z-x) \\
&\leq \frac{1}{2}\|z-x\| \|Hf(\zeta) - Hf(x)\| \|z-x\| \\
&\leq \frac{1}{2}\|z-x\| \|Hf(\zeta) - Hf(x)\|_O \|z-x\| \\
&= \frac{1}{2}\|z-x\|^2 \|Hf(\zeta) - Hf(x)\|_O \\
\frac{|f(z-x) - T_x^2 f(z)|}{\|z-x\|^2} &\leq \frac{1}{2} \|Hf(\zeta) - Hf(x)\|_O \\
\|\zeta - x\| &\leq \|z-x\|^x
\end{aligned}$$

Stetigkeit der Ableitungen 2. Ordnung

$$\implies \lim_{\zeta \rightarrow x} \|Hf(\zeta) - Hf(x)\|_O = 0$$

□

Definition 3.8. $X \subset \mathbb{R}^n$, $f : X \rightarrow \mathbb{R}$. f hat in $a \in X$ ein lokales Minimum/Maximum

$$\iff \exists \text{ eine Umgebung } V \text{ von } a \text{ s.d. } f(a) \leq f(x) \text{ (bzw. } \geq f(x)) \quad \forall x \in V$$

Man sagt das Minimum/Maximum ist strikt (oder isoliert)

$$\iff f(a) < f(x) \text{ (bzw. } > f(x)) \quad \forall x \in V \setminus \{a\}$$

Satz 3.9. (Notwendiges Kriterium für lokale Extrema). Sei $U \subset \mathbb{R}^n$ offen und $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ eine partiell differentierbare Funktion die ein Extremum in $a \in U$ hat. Dann gilt

$$\partial_1 f(a) = \dots = \partial_n f(a) = 0$$

D.h. wenn f differenzierbar ist, dann gilt $df|_a = 0$

Beweis. $F(t) = f(a + te_i)$ (für t sehr klein, so dass $a + te_i \in U$). F hat ein lokales Extremum in 0, d.h. $F'(0) = \partial_i f(a) = 0$. □

Definition 3.10. Sei f differenzierbar. Eine Stelle a mit $df|_a = 0$ heisst kritischer Punkt. Man sagt auch f ist stationär in a .

Bemerkung 3.11. Lokale Extremum $\implies \not\equiv$ kritischer Punkt.

Satz 3.12. (Hinreichendes Kriterium für lokale Extrema) $U \subset \mathbb{R}^n$ offen, $f \in C^2(U, \mathbb{R})$ mit $df|_a = 0$. Dann

$$Hf(a) > 0 \implies a \text{ lokales Minimum}$$

$$Hf(a) < 0 \implies a \text{ lokales Maximum}$$

$$Hf(a) \text{ indefinit} \implies a \text{ kein Extremum}$$

Im indefiniten Fall gilt: \exists Geraden G_1, G_2 durch a so dass $f|_{G_1 \cap U}$ in a ein lokales Minimum und $f|_{G_2 \cap U}$ in a ein lokales Maximum hat, d.h. a ist ein Sattelpunkt.

Bemerkung 3.13. • $Hf(a) > 0$ bedeutet $H_f(a)$ positiv definit, d.h.

$$v^T Hf(a) v > 0 \quad \forall v \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$$

• $Hf(a)$ indefinit, $\exists v, w \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$ mit

$$v^t Hf(a) v > 0$$

$$w^t Hf(a) w < 0$$

Beweis.

$$H_f(a) > 0$$

$$df|_a = 0 \xrightarrow{\text{Taylor}} f(a+h) = f(a) + \frac{1}{2} h^T H_f(a) h + R(h)$$

mit

$$\frac{R(h)}{\|h\|^2} \rightarrow 0 \quad \text{wenn } \|h\| \rightarrow 0.$$

$$f \in C^2$$

- $\implies h \mapsto h^T H_f(a) h$ ist stetig
- $\implies h \mapsto h^T H_f(a) h$ hat ein Minimum m auf $\{\|h\| = 1\}$ (kompakt) und $m > 0$ (da $H_f(a) > 0$).
- $\implies h^T H_f(a) h \geq m \|h\|^2$ (da $h = \|h\| \frac{h}{\|h\|}$, $h \neq 0$)

Wähle $\varepsilon > 0$ so klein, dass $B_\varepsilon(a) \subset U$ und

$$|R(h)| \leq \frac{m}{4} \|h\|^2 \quad \forall h \in B_\varepsilon(a)$$

$$\implies f(a+h) \geq f(a) + \frac{m}{4} \|h\|^2 > f(a) \quad \forall h \in B_\varepsilon(a)$$

d.h. f hat in a ein lokales Minimum

$H_f(a) < 0$ Betrachte $-f$ wie oben.

$$H_f(a) < 0$$

$$\exists v, w : v^T H_f(a) v > 0, w^T H_f(a) w < 0$$

$$F_v(t) := f(a+tv), F_w(t) = f(a+tw)$$

$$\implies F_v''(0) > 0 \implies \text{lokales Maximum}$$

$$\implies F_w''(0) < 0 \implies \text{lokales Minimum}$$

\implies Beh

□

Bemerkung 3.14. Mit diesem Satz lässt sich keine Aussage machen, falls $H_f(a)$ semidefinitiv ist, d.h. $H_f(a) \geq 0$, $H_f(a) \leq 0$.

Beispiel 3.15. $f(x, y) = y^2(x-1) + x^2(x+1)$

$$df|_{(x,y)} = (y^2 + 3x^2 + 2x, 2(x-1)y)$$

$$\implies df|_{(x,y)} = (0, 0) \implies \text{kritische Punkte:}$$

$$P_1 = (0, 0), P_2 = \left(-\frac{2}{3}, 0\right)$$

$$\implies H_f(x, y) = \begin{pmatrix} 6x+2 & 2y \\ 2y & 2(x-1) \end{pmatrix}$$

d.h.

$$\implies H_f(P_1) = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & -2 \end{pmatrix}$$

indefinit, d.h. Sattelpunkt.

$$\implies H_f(P_2) = \begin{pmatrix} -2 & 0 \\ 0 & -\frac{10}{3} \end{pmatrix} < 0$$

d.h. lokales Maximum

Beispiel 3.16. $f(x, y) = x^2 + y^3$, $g(x, y) = x^2 + y^4$ Beim Punkt 0 ist die Hesse-Matrix in beiden Fällen $\begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$. Daraus kann man nichts schliessen (siehe Graphen (Freiwilliger gesucht))

3.2 Konvexität

Definition 3.17. $U \subset \mathbb{R}^n$ heisst konvex

$$\iff \forall x, y \in U : [x, y] \subset U$$

Definition 3.18. $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ heisst konvex

$$\iff \forall x, y \in U : f(tx + (1-t)y) \leq tf(x) + (1-t)f(y)$$

- Falls $\forall x, y \in U \forall t \in (0, 1)$ “<”, heisst die Funktion strikt konvex.
- f heisst (streng) konkav, falls $-f$ (streng) konvex

Bemerkung 3.19. f ist konvex

$$\iff \forall x \neq y \in U : F_{x,y}(t) = f(x + t(y-x)) \text{ konvex (auf } [x, y])$$

Satz 3.20. (Konvexitätskriterium) Sei $f : U \rightarrow \mathbb{R}, C^2$ $U \subset \mathbb{R}^n$ offen, konvex. Es gilt:

1. f konvex $\iff Hf(x) \geq 0 \forall x \in U$
2. $Hf(x) > 0 \forall x \in U \implies f$ streng konvex

Bemerkung 3.21. Umkehrung von 1 gilt nicht, z.B. $f(x, y) = x^4 + y^4$

Beweis. 1. f konvex: $\forall x \in U$ wähle $r > 0: B_r(x) \subset U$

$$\implies F_{x,x+h}(t) \text{ konvex } \forall h \in B_r(0)$$

$$\implies h^T H_f(x) h = F''_{x,x+h}(0) \underbrace{\geq}_{\text{Konvexität in 1-Dim}} 0 \quad \forall h \in B_r(0)$$

$$\xrightarrow{\text{homogenität}} h^T H_f(x) h \geq 0 \quad \forall h \in \mathbb{R}^n, \text{ d.h. } H_f(x) \text{ positiv semidefinit}$$

$$H_f(x) \geq 0 \quad \forall x \in U:$$

$$a, b \in U \implies F''_{a,b}(t) = (b-a)^T H_f(a + t(b-a))(b-a) \geq 0$$

$$\implies F_{a,b} \text{ konvex } \forall a, b \in U \implies \text{Behauptung}$$

2. Analog wie die zweite Richtung im Ersten.

□

4 Differentiation parameterabhängiger Integrale

Sei $f : \underbrace{U}_{\subset \mathbb{R}^n} \times [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ stetig (U offen) $\forall x \in U$ sei

$$F(x) = \int_a^b f(x, t) dt$$

Satz 4.1. (Differentiationssatz) Falls

1. $\forall t \in [a, b]$ ist $x \mapsto f(x, t)$ nach x_i partiell differenzierbar

$$\exists \frac{\partial f}{\partial x_i}(x, t) \quad \forall (x, t) \in U \times [a, b]$$

2. und $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ ist stetig

dann \exists auch $\frac{\partial F}{\partial x_i}(x)$ und

$$\frac{\partial F}{\partial x_i}(x) = \int_a^b \frac{\partial f}{\partial x_i}(x, t) dt$$

Der Satz bedeutet also dass, mit den obigen Annahmen, dürfen wir die Ableitung und das Integral vertauschen:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \int_a^b f(x, t) \, dt = \int_a^b \frac{\partial}{\partial x_i} f(x, t) \, dt$$

Beweis. Sei $x \in U$ und $e_i = (0, \dots, \underbrace{1}_{\text{ite Stelle}}, \dots, 0)$. Wir rechnen

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial x_i}(x) &= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{F(x + \varepsilon e_i) - F(x)}{\varepsilon} \\ &= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{\varepsilon} \left\{ \int_a^b f(x + \varepsilon e_i, t) \, dt - \int_a^b f(x, t) \, dt \right\} \\ &= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_a^b \frac{f(x + \varepsilon e_i, t) - f(x, t)}{\varepsilon} \, dt \end{aligned}$$

Deswegen

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial x_i}(x, t) &= \int_a^b \frac{\partial f}{\partial x_i}(x, t) \, dt \iff \\ \iff \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left\{ \int_a^b \frac{f(x + \varepsilon e_i, t) - f(x, t)}{\varepsilon} \, dt - \int_a^b \frac{\partial f}{\partial x_i}(x, t) \, dt \right\} &= 0 \\ \iff \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left\{ \int_a^b \left[\frac{f(x + \varepsilon e_i, t) - f(x, t)}{\varepsilon} - \frac{\partial f}{\partial x_i}(x, t) \right] \, dt \right\} &= 0 \end{aligned}$$

Wir behaupten mehr, d.h.

$$A(\varepsilon) := \int_a^b \left| \underbrace{\frac{f(x + \varepsilon e_i, t) - f(x, t)}{\varepsilon}}_{\substack{\text{(Mittelwertsatz)} = \frac{\partial f}{\partial x_i}(\xi_\varepsilon(t), t)}} - \frac{\partial f}{\partial x_i}(x, t) \right| \, dt \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0} 0$$

wobei $\xi_\varepsilon(t) \in [x, x + \varepsilon e_i]$. Also,

$$A(\varepsilon) = \int_a^b \left| \frac{\partial f}{\partial x_i}(\xi_\varepsilon(t), t) - \frac{\partial f}{\partial x_i}(x, t) \right| \, dt.$$

Wir bemerken dass

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \xi_\varepsilon(t) = x$$

und, wegen der Stetigkeit von $\frac{\partial f}{\partial x_i}$,

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}(\xi_\varepsilon(t), t) \rightarrow \frac{\partial f}{\partial x_i}(x, t).$$

In der Tat ist diese Konvergenz gleichmässig, d.h.

Behauptung 4.2. $\forall \delta > 0 \exists \varepsilon_0 > 0$ so dass

$$|\varepsilon| \leq \varepsilon_0 \implies \sup_{t \in [a, b]} \left| \frac{\partial f}{\partial x_i}(\xi_\varepsilon(t), t) - \frac{\partial f}{\partial x_i}(x, t) \right| < \delta$$

\implies

$$\limsup_{\varepsilon \rightarrow 0} A(\varepsilon) \leq \sup_{|\varepsilon| < \varepsilon_0} A(\varepsilon) \leq \int_a^b \delta \, dt = \delta(b - a)$$

δ ist beliebig

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} A(\varepsilon) = 0$$

Die Behauptung 4.2 folgt aus dem nächsten Lemma. □

Lemma 4.3. Sei $g : U \times [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ stetig (wobei $U \subset \mathbb{R}^n$ offen ist). Sei $x \in U$. Dann $\forall \delta > 0 \exists \varepsilon > 0$ mit

$$\sup_{y \in B_\varepsilon(x)} |g(y, t) - g(x, t)| < \delta \quad \forall t \in [a, b]$$

Betrachte x als "Parameter" $\forall y$ sei $t \mapsto g(y, t) = g_y(t)$. Dann $g_y \rightarrow g_x$ gleichmässig für $y \rightarrow x$.

Bemerkung 4.4. Das Lemma nutzt nur die Kompaktheit von $[a, b]$ (in der Behauptung können wir $[a, b]$ durch eine beliebige kompakte Menge $K \subset \mathbb{R}$ ersetzen)

Beweis. Sei $\varepsilon > 0$ gegeben $\forall (x, t) \exists \delta(x, t) > 0$ so dass

$$|g(\xi, \tau) - g(x, t)| < \frac{\varepsilon}{10} \quad \forall (\xi, \tau)$$

mit

$$\left\| \underbrace{(\xi, \tau)}_{\in \mathbb{R}^{n+1}} - \underbrace{(x, t)}_{\in \mathbb{R}^{n+1}} \right\| < \delta(x, t)$$

$$\|(\xi, \tau) - (x, t)\| = \sqrt{\|\xi - x\|^2 + (t - \tau)^2}$$

$\forall (x, t)$ Sei

$$U_{x,t} = \underbrace{B_{\frac{\sqrt{2}}{2}\delta(x,t)}(x)}_{\subset \mathbb{R}^n} \times \left[t - \frac{\sqrt{2}}{2}\delta(x,t), t + \frac{\sqrt{2}}{2}\delta(x,t) \right]$$

$$(y, \tau) \in U_{x,t} \implies \|y - x\| \leq \frac{\sqrt{2}}{2}\delta(x,t) \quad \text{und} \quad |t - \tau| < \frac{\sqrt{2}}{2}\delta(x,t)$$

$$\|(y, \tau) - (x, t)\| < \sqrt{\frac{1}{2}\delta^2(x,t) + \frac{1}{2}\delta^2(x,t)} = \delta(x,t)$$

$$\implies (y, \tau) \in B_{\delta(x,t)}(x, t)$$

Deswegen $U_{x,t} \subset B_{\delta(x,t)}(x, t)$. Wir bemerken dass K kompakt istm, weil

$$\mathbb{R} \ni t \mapsto (x, t)$$

eine stetige Funktion ist und K das Bild von $[a, b]$ durch diese Abbildung ist. $\{U_{x,t} : t \in [a, b]\}$ ist eine offene Überdeckung von K . Kompaktheit $\implies \exists \{U_{x_i, t_i} : i \in \{1, \dots, N\}\}$ Überdeckung von K . Sei

$$\delta = \min \left\{ \frac{\sqrt{2}}{2}\delta(x_i, t_i) : i \in \{1, \dots, N\} \right\} > 0$$

Sei $t \in [a, b]$, $(x, t) \in U_{x_i, t_i}$ für mindestens ein $i \in \{1, \dots, N\}$. Sei y so dass $y - x < \delta$

$$(x, t), (y, t) \in U_{x_i, t_i} \subset B_{\delta(x_i, t_i)}(x_i, t_i)$$

$$\implies |g(y, t) - g(x_i, t_i)| < \frac{\varepsilon}{10}$$

und

$$\implies |g(x, t) - g(x_i, t_i)| < \frac{\varepsilon}{10}$$

$$\implies |g(x, t) - g(y, t)| < \frac{\varepsilon}{5}$$

$$\implies \sup_{y \in B_\delta(x)} |g(x, t) - g(y, t)| \leq \frac{\varepsilon}{5} < \varepsilon \quad \forall t \in [a, b]$$

□

Korollar 4.5. Sei $g : U \times [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ stetig. Dann

$$F(x) = \int_a^b g(x, t) \, dt$$

ist eine stetige Funktion

Beweis. Seien $x \in U$ und $\varepsilon > 0$. Das letzte Lemma $\implies \exists \delta > 0$ so dass

$$|g(x, t) - g(y, t)| \leq \frac{\varepsilon}{b-a}$$

$\forall t$ und $\forall y$ mit $\|y - x\| < \delta$. Deswegen für $\|y - x\| < \delta$

$$\begin{aligned} |F(y) - F(x)| &= \left| \int_a^b (g(x, t) - g(y, t)) \, dt \right| \leq \int_a^b |g(x, t) - g(y, t)| \, dt \\ &< \int_a^b \frac{\varepsilon}{b-a} \, dt = \varepsilon. \end{aligned}$$

□

Bemerkung 4.6. Im Differentiationssatz ist $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ eine stetige Funktion. Da

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}(x) = \int_a^b \frac{\partial f}{\partial x_i}(x, t) \, dt$$

ist $\frac{\partial F}{\partial x_i}$ stetig.

Der folgende Satz ist eine sehr wichtige Konsequenz der Differentiationssatz.

Satz 4.7. Sei $f : \mathbb{R}^2 \supset U \rightarrow \mathbb{R}$ eine stetige Funktion. Sei $R = [a, b] \times [c, d] \subset U$. Dann:

$$\int_a^b \int_c^d f(s, t) \, dt \, ds = \int_c^d \int_a^b f(s, t) \, ds \, dt$$

Beweis. Wir definieren

$$\Phi(x, y) = \int_a^x \int_c^y f(s, t) \, dt \, ds$$

$$\Psi(x, y) = \int_c^y \int_a^x f(s, t) \, ds \, dt$$

Konvention: $\int_\alpha^\beta = -\int_\beta^\alpha$ falls $\beta < \alpha$ und $\int_\alpha^\alpha = 0$

Schritt 1 Φ und Ψ sind stetig differenzierbar und $\nabla \Phi = \nabla \Psi$

(Kein Problem mit Definition. Die Funktionen sind wohldefiniert für $(x, y) \in]a - \varepsilon, b + \varepsilon[\times]c - \varepsilon, d + \varepsilon[$ wobei $\varepsilon > 0$ klein genug ist). Sei y fixiert. wir setzen

$$\phi(x) = \int_c^y f(x, t) \, dt$$

ϕ ist stetig weil f stetig ist. Der Fundamentalsatz der Integralrechnung gibt

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x}(x, y) = \phi(x) = \int_c^y f(x, t) \, dt$$

$\frac{\partial \Phi}{\partial x}$ ist eine stetige Funktion in der Variabel x . Wir beweisen nun dass $\frac{\partial \Phi}{\partial x}$ eine stetige Funktion von zwei Variablen ist. Sei (x_0, y_0) , $\varepsilon > 0$. Dann $\exists \delta$

$$\left| \frac{\partial \Psi}{\partial x}(x, y_0) - \frac{\partial \Psi}{\partial x}(x_0, y_0) \right| < \frac{\varepsilon}{2}$$

Sei x fixiert:

$$\begin{aligned} \left| \frac{\partial \Psi}{\partial x}(x, y_0) - \frac{\partial \Psi}{\partial x}(x, y) \right| &= \left| \int_c^y f(x, t) \, dt - \int_c^{y_0} f(x, t) \, dt \right| \\ &= \left| \int_{y_0}^y f(x, t) \, dt \right| \leq \int_{y_0}^y |f(x, t)| \, dt \\ &\leq M |y - y_0| \end{aligned}$$

wobei M das Maximum von f ist.

Deswegen, für $\bar{\delta} \leq \frac{\varepsilon}{2M}$

$$\begin{aligned} |y - y_0| &< \bar{\delta} \\ \implies \left| \frac{\partial \Psi}{\partial x}(x, y_0) - \frac{\partial \Psi}{\partial x}(x, y) \right| &< \frac{\varepsilon}{2} \end{aligned}$$

Wenn

$$\begin{aligned} \|(x, y) - (x_0, y_0)\| &< \min\{\delta, \bar{\delta}\} \\ \implies |x - x_0| &< \delta \text{ und } |y - y_0| < \bar{\delta} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\left| \frac{\partial \Phi}{\partial x}(x, y) - \frac{\partial \Phi}{\partial x}(x_0, y_0) \right| \\ &\leq \left| \frac{\partial \Phi}{\partial x}(x, y) - \frac{\partial \Phi}{\partial x}(x, y_0) \right| + \left| \frac{\partial \Phi}{\partial x}(x, y_0) - \frac{\partial \Phi}{\partial x}(x_0, y_0) \right| < \frac{\varepsilon}{2} \end{aligned}$$

Das gleiche Argument: $\frac{\partial \Psi}{\partial y}$ existiert und ist stetig. Sei nun

$$\begin{aligned} \psi(x, y) &:= \int_a^x f(s, y) \, ds \\ \frac{\partial \Psi}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \int_c^y \psi(x, t) \, dt \stackrel{?}{=} \int_c^y \frac{\partial \psi}{\partial x}(x, t) \, dt \end{aligned}$$

Wir brauchen hier die Stetigkeit von ψ . Das haben wir mit dem letzten Argument!

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi}{\partial x}(x, t) &= \frac{\partial}{\partial x} \int_a^x f(s, t) \, ds \stackrel{\text{Fundamentalsatz}}{=} f(x, t) \\ \frac{\partial \Psi}{\partial x} &= \int_c^y f(x, t) \, dt \stackrel{!}{=} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \end{aligned} \tag{35}$$

Das gleiche Argument impliziert auch $\frac{\partial \Psi}{\partial x} = \frac{\partial \Phi}{\partial x}$.

Schritt 2. $\Phi = \Psi$ Sei $\alpha := \Phi - \Psi$. Aus dem Schritt 1 wissen wir dass α differenzierbar ist und $d\alpha = 0$. Seien

$$(x_0, y_0), (x_1, y_1) \in [a - \varepsilon, b + \varepsilon] \times [c - \varepsilon, d + \varepsilon]$$

Da $[(x_0, y_0)(x_1, y_1)]$ im Definitionsbereich ist, wir können den Schrankensatz anwenden:

$$|\alpha(x_0, y_0) - \alpha(x_1, y_1)| \leq \|(x_1, y_1) - (x_0, y_0)\| \max \|\nabla \alpha\| = 0$$

Deswegen

$$\Phi - \Psi = \alpha = \text{konstant} = \Phi(a, c) - \Psi(a, c) = 0 - 0 = 0$$

$$\implies \Phi(x, y) = \Psi(x, y) \quad \forall (x, y) \in [a - \varepsilon, b + \varepsilon] \times [c - \varepsilon, d + \varepsilon]$$

$y = d, x = b \implies$ den Satz. □

5 Differenzierbare Abbildungen

$$f : \mathbb{R}^n \supset \Omega \rightarrow \mathbb{R}^m$$

Definition 5.1. f ist in x_0 differenzierbar falls $\exists L : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ lineare Abbildung mit

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

d.h. wenn

$$R(h) := f(x_0 + h) - f(x_0) - L(h)$$

dann

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\|R(h)\|}{\|h\|} = 0$$

(In $\varepsilon - \delta$ Form:

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta > 0 \text{ so dass } 0 < \|h\| < \delta \implies \frac{\|R(h)\|}{\|h\|} < \varepsilon.$$

D.h. " $\|R(h)\| \rightarrow 0$ schneller als $\|h\|$ ": $R(h) = o(\|h\|)$ in kleines-o-Notation. Deswegen

$$f \text{ diff in } x_0 \iff \exists L \text{ mit } f(x_0 + h) = f(x_0) + L(h) + o(\|h\|). \quad (36)$$

Bemerkung 5.2. f differenzierbar in $x_0 \implies$ stetig in x_0

f differenzierbar in $x_0 \implies \exists!$ lineare Abbildung die (36) erfüllt. Wir nennen L das Differential von f und bezeichnen es mit $df|_{x_0}$

$$f : U \rightarrow \mathbb{R}^m$$

$$f(x) = \underbrace{(f_1(x), \dots, f_m(x))}_{m \text{ Funktionen}}$$

$\forall i$ gibt es n verschiedene partielle Ableitungen: $\frac{\partial f_i}{\partial x_j}$ n . Die Matrixdarstellung einer linearen Abbildung $L : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ besteht aus $m \times n$ Koeffizienten:

$$L = \begin{pmatrix} L_{11} & \cdots & L_{1n} \\ L_{21} & \cdots & L_{2n} \\ \vdots & & \vdots \\ L_{m1} & \cdots & L_{mn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_m \end{pmatrix}$$

$$L(x) = \begin{pmatrix} L_{11}x_1 + L_{12}x_2 + \cdots + L_{1n}x_n \\ L_{21}x_1 + \cdots + L_{2n}x_n \\ \vdots \\ L_{m1}x_1 + \cdots + L_{mn}x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_1 \cdot x \\ L_2 \cdot x \\ \vdots \\ L_m \cdot x \end{pmatrix}$$

Wir definieren m lineare Abbildungen $\mathbb{L}_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ als $\mathbb{L}_i(x) = L_i \cdot x = \langle L_i, x \rangle$. Dann

$$L(x) = \begin{pmatrix} \mathbb{L}_1(x) \\ \mathbb{L}_2(x) \\ \vdots \\ \mathbb{L}_m(x) \end{pmatrix}$$

Sei $f : U \rightarrow \mathbb{R}^m$ differenzierbar in x_0 und sei $L = df|_{x_0}$. Dann:

$$\frac{\overbrace{f(x_0 + h) - f(x_0) - L(h)}^A}{\|h\|} \rightarrow 0 \quad (37)$$

$$A := \begin{pmatrix} f_1(x_0 + h) \\ \vdots \\ f_m(x_0 + h) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} f_1(x_0) \\ \vdots \\ f_m(x_0) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \mathbb{L}_1(h) \\ \vdots \\ \mathbb{L}_m(h) \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
&= \begin{pmatrix} f_1(x_0 + h) - f_1(x_0) - \mathbb{L}_1(h) \\ \vdots \\ f_m(x_0 + h) - f_m(x_0) - \mathbb{L}_m(h) \end{pmatrix} \\
\frac{A}{\|h\|} &= \begin{pmatrix} \frac{f_1(x_0 + h) - f_1(x_0) - \mathbb{L}_1(h)}{\|h\|} \\ \vdots \\ \frac{f_m(x_0 + h) - f_m(x_0) - \mathbb{L}_m(h)}{\|h\|} \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

Deswegen

$$(37) \iff \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f_i(x_0 + h) - f_i(x_0) - \mathbb{L}_i(h)}{\|h\|} = 0 \quad \forall i \in \{1, \dots, m\}$$

$\iff f_i$ ist differenzierbar in x_0 und $\mathbb{L}_i = d f_i|_{x_0}$

Im naechsten Satz fassen wir zusammen die Konsequenzen dieses Arguments.

Satz 5.3. Sei $f : \underbrace{U}_{\subset \mathbb{R}^n} \rightarrow \mathbb{R}^m$ mit U offen und $f = (f_1, \dots, f_m)$

1. f ist differenzierbar in $x_0 \iff f_i$ differenzierbar in $x_0 \quad \forall i \in \{1, \dots, m\}$

2.

$$d f|_{x_0}(h) = \begin{pmatrix} d f_1|_{x_0}(h) \\ \vdots \\ d f_m|_{x_0}(h) \end{pmatrix}$$

3.

$$d f|_{x_0}(h) = \begin{pmatrix} \nabla f_1(x_0) \cdot h \\ \vdots \\ \nabla f_m(x_0) \cdot h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(x_0) & \frac{\partial f_1}{\partial x_2}(x_0) & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n}(x_0) \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(x_0) & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1}(x_0) & \dots & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n}(x_0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_n \end{pmatrix}$$

Das ist die Jacobi Matrix.

5.1 Differentiationsregeln

Die erste Differentiationregel ist eine einfache Folgerung vom Satz 5.3.

Satz 5.4. Seien $f, g : U \rightarrow \mathbb{R}^m$ beide differenzierbar in x_0 , dann

$$f + g \left(= \begin{pmatrix} f_1 + g_1 \\ \vdots \\ f_m + g_m \end{pmatrix} \right)$$

ist differenzierbar in x_0 und $d f|_{x_0} + d g|_{x_0}$

Seien nun $f : U \rightarrow \mathbb{R}^m$ und $g : U \rightarrow \mathbb{R}^m$ differenzierbar in x_0 und

$$(gf)(x) = g(x)f(x) = \begin{pmatrix} g(x)f_1(x) \\ \vdots \\ g(x)f_m(x) \end{pmatrix}$$

Jede gf_i ist differenzierbar: die Funktion f ist dann auch differenzierbar. Wir wollen $d(gf)$ rechnen:

$$d(gf) = d \begin{pmatrix} gf_1 \\ \vdots \\ gf_m \end{pmatrix} \Big|_{x_0} (h) = \begin{pmatrix} d(gf_1)|_{x_0}(h) \\ \vdots \\ d(gf_m)|_{x_0}(h) \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} dg|_{x_0}(h)f_1(x_0) + g(x_0)df_1|_{x_0}(h) \\ \vdots \\ dg|_{x_0}(h)f_m(x_0) + g(x_0)df_m|_{x_0}(h) \end{pmatrix}$$

Jacobi-Matrix

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} \frac{\partial g}{\partial x_1}(x_0)f_1(x_0) + g(x_0)\frac{\partial f_1}{\partial x_1}(x_0) & \cdots & \frac{\partial g}{\partial x_n}(x_0)f_1(x_0) + g(x_0)\frac{\partial f_1}{\partial x_n}(x_0) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g}{\partial x_1}(x_0)f_m(x_0) + g(x_0)\frac{\partial f_m}{\partial x_1}(x_0) & \cdots & \frac{\partial g}{\partial x_n}(x_0)f_m(x_0) + g(x_0)\frac{\partial f_m}{\partial x_n}(x_0) \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{\partial g}{\partial x_1}(x_0)f_1(x_0) & \cdots & \frac{\partial g}{\partial x_n}(x_0)f_1(x_0) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g}{\partial x_1}(x_0)f_m(x_0) & \cdots & \frac{\partial g}{\partial x_n}(x_0)f_m(x_0) \end{pmatrix} \\ &+ \begin{pmatrix} g(x_0)\frac{\partial f_1}{\partial x_1}(x_0) & \cdots & g(x_0)\frac{\partial f_1}{\partial x_n}(x_0) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g(x_0)\frac{\partial f_m}{\partial x_1}(x_0) & \cdots & g(x_0)\frac{\partial f_m}{\partial x_n}(x_0) \end{pmatrix} \\ &= \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{\partial g}{\partial x_j}(x_0)f_i(x_0) \end{pmatrix}}_{=f(x_0) \otimes \nabla g(x_0)} + \overbrace{\begin{pmatrix} \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(x_0) \end{pmatrix}}^A \\ &\quad \text{lineare Abbildung mit Rang 1} \\ dg(f)|_{x_0} &= \underbrace{g(x_0)df|_{x_0}}_A + \overbrace{f(x_0) \otimes dg|_{x_0}}^{\text{lineare Abbildung mit Rang 1}} \\ dg(f)|_{x_0}(h) &= g(x_0)[df|_{x_0}(h)] + [f(x_0)]dg|_{x_0}(h) \end{aligned}$$

5.2 Kettenregel

Satz 5.5. Seien

$$f : \underbrace{U}_{\subset \mathbb{R}^n} \rightarrow \underbrace{V}_{\subset \mathbb{R}^n} \quad \text{und} \quad g : V \rightarrow \mathbb{R}^k.$$

Falls f in a differenzierbar ist und g in $b = f(a)$ differenzierbar ist, dann ist $g \circ f$ in a differenzierbar und

$$d(g \circ f)|_a = dg|_b \circ df|_a \quad (38)$$

Beweis. Die Differenzierbarkeit von f in a bedeutet

$$f(a+h) = f(a) + df|_a(h) + \overbrace{R(h)}^{o(\|h\|)}$$

Die Differential von g in b bedeutet

$$g(b+k) = g(b) + dg|_b(k) + \underbrace{\bar{R}(k)}_{o(\|k\|)}$$

$$g(f(a+h)) = g(\underbrace{f(a)}_b + k) = g(b) + dg|_b(k) + \bar{R}(k)$$

$$= g(b) + dg|_b(df|_a(h) + R(h)) + \bar{R}(k)$$

Linearität von $dg|_b$

$$= \underbrace{g(b)}_{g \circ f(a)} + \underbrace{dg|_b(df|_a(h))}_{\text{ist linear in } h} + \underbrace{dg|_b(R(h)) + \bar{R}(k)}_{:=\rho(h)}$$

Wir werden zeigen dass

$$\rho(h) = o(\|h\|).$$

Schritt 1. Linearität von $h \mapsto dg|_b(df|_a(h))$.

$$\begin{aligned} dg|_b \circ df|_a(\lambda_1 h_1 + \lambda_2 h_2) \quad & \lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}, h_1, h_2 \in \mathbb{R}^n \\ &= dg|_b(df|_a(\lambda_1 h_1 + \lambda_2 h_2)) \\ &= dg|_b\left(\lambda_1 \overbrace{df|_a(h_1)}^{\in \mathbb{R}^m} + \lambda_2 \overbrace{df|_a(h_2)}^{\in \mathbb{R}^m}\right) \\ &= \lambda_1 dg|_b(df|_a(h_1)) + \lambda_2 dg|_b(df|_a(h_2)) \\ &= \lambda_1 dg|_b \circ df|_a(h_1) + \lambda_2 dg|_b \circ df|_a(h_2) \end{aligned}$$

Schritt 2: $\rho(h) = o(\|h\|)$.

$$\begin{aligned} \frac{\rho(h)}{\|h\|} &\leq \frac{|dg|_b(R(h))|}{\|h\|} + \frac{|\bar{R}(k)|}{\|h\|} \\ &\leq \frac{\|dg|_b\|_0 \|R(h)\|}{\|h\|} + \frac{\|\bar{R}(k)\|}{\|h\|} \end{aligned} \quad (39)$$

Wir wissen dass

$$\frac{\|R(h)\|}{\|h\|} \rightarrow 0$$

und deswegen konvergiert der erste Teil von (39) zu null. Ausserdem

$$\begin{aligned} \frac{\|\bar{R}(k)\|}{\|h\|} &= \begin{cases} 0 & \text{falls } k = 0 \\ \frac{\|\bar{R}(k)\|}{\|k\|} \frac{\|k\|}{\|h\|} & \text{sonst} \end{cases} \\ \|k\| &= \|df|_a(h) + R(h)\| \leq \|df|_a(h)\| + \|R(h)\| \\ &\leq \|df|_a\|_0 \|h\| + \|R(h)\| \end{aligned} \quad (40)$$

Da

$$\frac{\|R(h)\|}{\|h\|} \rightarrow 0$$

$\exists \delta > 0$ so dass

$$\|h\| < \delta \implies \frac{\|R(h)\|}{\|h\|}$$

Falls $\|h\| < \delta$

$$\|k\| \leq (\|df|_a\|_0 + 1) \|h\|$$

Deswegen: wenn $\|h\| \rightarrow 0$, dann $\|k\| \rightarrow 0$ und für $\|h\| < \delta$

$$\frac{\|\bar{R}(k)\|}{\|h\|} \leq \underbrace{\frac{\|\bar{R}(k)\|}{\|k\|}}_{\rightarrow 0 \text{ für } \|h\| \rightarrow 0} (\|df|_a\|_0 + 1)$$

Deswegen:

$$\begin{aligned} 0 &\leq \limsup_{\|h\| \rightarrow 0} \frac{\|\rho(h)\|}{\|h\|} \\ &\leq \lim_{\|h\| \rightarrow 0} \frac{\|\bar{R}(k)\|}{\|h\|} + \lim_{\|h\| \rightarrow 0} \frac{\|dg|_b(R(h))\|}{\|h\|} = 0 + 0 = 0 \\ &\implies \lim_{\|h\| \rightarrow 0} \frac{\|\rho(h)\|}{\|h\|} = 0 \end{aligned}$$

□

Bemerkung 5.6. Sei $n = m = k = 1$. $b = f(a)$

$$\begin{aligned} df|_a(h) &= f'(a)h \\ dg|_b(k) &= g'(b)k \\ dg|_b \circ df|_a(h) &= dg|_b(df|_a(h)) = dg|_b(f'(a)h) \\ &= g'(b)f'(a)h = g'(f(a))f'(a)h \end{aligned} \quad (41)$$

$\phi = g \circ f$

$$d\phi|_a(h) = \phi'(a)h = (g \circ f)'(a)h$$

(38) (d.h. die allgemeine Kettenregel) impliziert

$$\begin{aligned} d\phi|_a(h) &= d(g \circ f)|_a(h) = dg|_b \circ df|_a(h) \\ &\stackrel{(41)}{=} g'(f(a))f'(a)h \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \implies (g \circ f)'(a)h &= g'(f(a))f'(a)h \\ \implies \underbrace{(g \circ f)'(a)}_{\text{alte Kettenregel}} &= g'(f(a))f'(a) \end{aligned}$$

Bemerkung 5.7. Kettenregel für die Jacobi-Matrizen. Sei M die Jacobi-Matrix für $dg|_{b=f(a)}$ und N die für $df|_a$. Die Jacobi für $d(g \circ f)|_a$ ist MN

$\implies g = (g_1, \dots, g_k) \quad f = (f_1, \dots, f_m)$ Es gibt eine Formel für $\frac{\partial(g \circ f)_i}{\partial x_j}$

$$dg_b \circ df|_a(w) = dg|_b(\underbrace{df|_a(w)}_v)$$

$$\begin{aligned} dg|_b \circ df|_a(w) &= dg|_b(v) \\ &= \left(\sum_{i=1}^m M_{1i}v_i, \sum_{i=1}^m M_{2i}v_i, \dots, \sum_{i=1}^m M_{ki}v_i \right) \\ &= \left(\sum_{i=1}^m M_{1i} \sum_{j=1}^n N_{ij}w_j, \dots, \sum_{i=1}^m M_{ki} \sum_{j=1}^n N_{ij}w_j \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v = df|_a(w) &= \left(\sum_{j=1}^n N_{1j}w_j, \dots, \sum_{j=1}^n N_{mj}w_j \right) \\ \iff v_i &= \sum_{j=1}^n N_{ij}w_j \end{aligned}$$

$$dg|_b \circ df|_a(w) = \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n M_{1i}N_{ij}w_j, \dots, \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n M_{ki}N_{ij}w_j \right)$$

(Sei A die Matrix

$$\begin{aligned} A_{lj} &= \sum_{i=1}^m M_{li}N_{ij} \iff A = M \cdot N \\ &= \left(\sum_{j=1}^n A_{1j}w_j, \dots, \sum_{j=1}^n A_{kj}w_j \right) \end{aligned}$$

Deswegen ist A die Matrixdarstellung von

$$dg|_b \circ df|_a = d(g \circ f)|_a$$

$\iff A$ ist die Jacobi-Matrix für $d(g \circ f)|_a$

Bemerkung 5.8. $f : U \rightarrow V \subset \mathbb{R}^m$ $f = (f_1, \dots, f_m)$, $f_i(x) = f(x_1, \dots, x_n)$
 $g : V \rightarrow \mathbb{R}^k$ $g = (g_1, \dots, g_k)$, $g_j(x) = g(y_1, \dots, y_m)$

$$g \circ f(x) = (g_1(f(x)), \dots, g_k(f(x)))$$

$$g_j(x) = g_j(f_1(x), \dots, f_m(x))$$

$$g_j(y) = g_j(f(x_1, \dots, x_n), \dots, f_m(x_1, \dots, x_n))$$

$$A_{lj} = \frac{\partial}{\partial x_j}(g_l \circ f)(a)$$

$$M_{li} = \frac{\partial g_l}{\partial y_i}(b) = \frac{\partial g_l}{\partial y_i}(f(a))$$

$$N_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j}(g_l \circ f)(a) &= A_{lj} = \sum_{i=1}^m M_{li} N_{ij} \\ &= \sum_{i=1}^m \frac{\partial g_l}{\partial y_i}(f(a)) \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(a) \end{aligned}$$

Korollar 5.9. Sei $f : U \rightarrow V \subset \mathbb{R}^m$ und $\phi : V \rightarrow \mathbb{R}$ mit:

- $a \in U$ und U offen
- $b \in V$, V offen und $b = f(a)$
- f differenzierbar in a und ϕ differenzierbar in b

Dann ist $\phi \circ f$ differenzierbar in a und

$$\frac{\partial(\phi \circ f)}{\partial x_j}(a) = \sum_{i=1}^m \frac{\partial \phi}{\partial y_i}(f(a)) \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(a)$$

Das ist die "konkrete" allgemeine Kettenregel.

5.3 Schrankensatz

Definition 5.10. sei $f : U \rightarrow \mathbb{R}^m$ eine Abbildung. Wir schreiben $f \in C^k(U, \mathbb{R}^m)$ falls die partielle Ableitungen jeder f_i mit Ordnung $\leq k$ existieren und stetig sind ($f = (f_1, \dots, f_m)$).

Satz 5.11. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ eine offene Menge, $f \in C^1(\Omega, \mathbb{R}^k)$ und $\gamma[a, b] \rightarrow \Omega$ eine \mathbb{C}^1 Kurve. Dann:

$$\|f(\gamma(b)) - f(\gamma(a))\| \leq \left[\sup_{t \in [a, b]} \|df|_{\gamma(t)}\|_O \right] \underbrace{\int_a^b \|\dot{\gamma}(t)\| dt}_{\text{Länge der Kurve}}$$

Zur Erinnerung: $\gamma : [a, b] \rightarrow \Omega \subset \mathbb{R}^n$, $\gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_n)$, $\dot{\gamma} = (\gamma'_1, \dots, \gamma'_n)$.

Beweis. Sei $\phi : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^k$ die Funktion

$$\phi(t) := f(\gamma(t)) = f \circ \gamma$$

Kettenregel

$$d\phi|_t = df|_{\gamma(t)} d\gamma|_t \quad (42)$$

$$\phi : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^k$$

$d\phi|_t : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^k$ lineare Abbildung

$$\phi = (\phi_1, \dots, \phi_k)$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \phi_1}{\partial t} \\ \vdots \\ \frac{\partial \phi_k}{\partial t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi'_1 \\ \vdots \\ \phi'_k \end{pmatrix} = \dot{\phi}$$

Sei $A(x)$ die Jacobi-Matrix für $df|_x$ (d.h. $A_{ij}(x) = \frac{\partial f}{\partial x_i}(x)$). Kettenregel:

$$\underbrace{\dot{\phi}(t) = A(\gamma(t)) \cdot \dot{\gamma}(t)}_{\text{Matrix-Darstellung von (42)}}$$

$$f(\gamma(b)) - f(\gamma(a)) = \phi(b) - \phi(a) = \begin{pmatrix} \phi_1(b) - \phi_1(a) \\ \vdots \\ \phi_k(b) - \phi_k(a) \end{pmatrix}$$

ϕ'_i ist eine stetige Funktion:

$$\phi'_i(t) = \sum_{j=1}^n A_{ij}(\gamma(t)) \gamma'_j(t) = \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(\gamma(t)) \gamma'_j(t)$$

Nun

$$\phi(b) - \phi(a) = \begin{pmatrix} \int_a^b \phi'_1(t) dt \\ \vdots \\ \int_a^b \phi'_k(t) dt \end{pmatrix}$$

und

$$\|f(\gamma(b)) - f(\gamma(a))\| = \|\phi(b) - \phi(a)\|^2 = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\int_a^b \phi'_i(t) dt \right)^2}$$

Wir brauchen nun die folgende "Dreiecksungleichung":

$$\sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\int_a^b \phi'_i(t) dt \right)^2} \leq \int_a^b \|\dot{\phi}(t)\| dt. \quad (43)$$

Diese Ungleichung folgt aus dem Lemma 5.13 unten. Mit der schreiben wir

$$\begin{aligned} \|f(\gamma(b)) - f(\gamma(a))\| &\leq \int_a^b \|\dot{\phi}(t)\| dt = \int_a^b \|A(\gamma(t)) \cdot \dot{\gamma}(t)\| dt \\ &\leq \int_a^b \|A(\gamma(t))\|_O \|\dot{\gamma}(t)\| dt = \int_a^b \|df|_{\gamma(t)}\|_O \|\dot{\gamma}(t)\| dt \\ &\leq \sup_{t \in [a,b]} \|df|_{\gamma(t)}\|_O \end{aligned}$$

□

Bemerkung 5.12. In der Tat $\sup_{t \in [a,b]} \|df|_{\gamma(t)}\|_O$ ist ein Maximum wegen der Stetigkeit der Abbildung $t \mapsto \|df|_{\gamma(t)}\|_O$.

Lemma 5.13. Sei $g : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^k$ eine stetige Funktion. Dann

$$\sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\int_a^b g_i \right)^2} \leq \int_a^b \|g\|.$$

Dreiecksungleichung

Beweis. Sei $\varepsilon > 0$ und Treppenfunktion α_i so dass $g_i - \varepsilon \leq \alpha_i \leq g_i + \varepsilon$, $\alpha_i - \varepsilon \leq g_i \leq \alpha_i + \varepsilon$. Dann

$$\int_a^b \alpha_i - (b-a)\varepsilon \leq \int_a^b g_i \leq \int_a^b \alpha_i + (b-a)\varepsilon$$

d.h.

$$\left| \int_a^b g_i - \int_a^b \alpha_i \right| \leq (b-a)\varepsilon$$

Deswegen

$$\left| \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\int_a^b g_i \right)^2} - \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\int_a^b \alpha_i \right)^2} \right| \leq \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\int_a^b g_i - \int_a^b \alpha_i \right)^2} \leq \sqrt{k}(b-a)\varepsilon \quad (44)$$

Sei nun $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$. Dann

$$\left| \int_a^b \|g\| - \int_a^b \|\alpha\| \right| \leq \int_a^b \left| \|g\| - \|\alpha\| \right| \leq \int_a^b \|g - \alpha\| \leq \int_a^b \sqrt{k}\varepsilon = \sqrt{k}(b-a)\varepsilon. \quad (45)$$

Wir werden beweisen dass

$$\sqrt{\sum \left(\int_a^b \alpha_i \right)^2} \leq \int_a^b \|\alpha\| \quad (46)$$

(44), (45) und (46) implizieren

$$\begin{aligned} \sqrt{\sum \left(\int_a^b g_i \right)^2} &\leq \sqrt{\sum \left(\int_a^b \alpha_i \right)^2} + (b-a)\sqrt{k}\varepsilon \\ &\leq \int_a^b \|\alpha\| + (b-a)\sqrt{k}\varepsilon \leq \int_a^b \|g\| + 2(b-a)\sqrt{k}\varepsilon \end{aligned}$$

Wenn $\varepsilon \downarrow 0$:

$$\sqrt{\sum \left(\int_a^b g_i \right)^2} \leq \int_a^b \|g\|$$

Beweis von (46). Ohne Beschränkung der Allgemeinheit: \exists eine Zerteilung von $[a, b]$

$$a = c_0 < c_1 < \dots < c_N = b$$

so dass jedes α_i ist konstant auf $[c_{j-1}, c_j] = I_j$. Die Konstante ist $a_{i,j}$.

$$\alpha = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_k \end{pmatrix}$$

ist konstant auf I_j mit Wert

$$a_j = \begin{pmatrix} a_{1,j} \\ \vdots \\ a_{k,j} \end{pmatrix}$$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\int_a^b \alpha_i \right)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\sum_{j=1}^N |I_j| \alpha_{i,j} \right)^2} = \|a\|$$

wobei

$$a := \sum_{j=1}^N |I_j| a_j = \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^N |I_j| \alpha_{1,j} \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^N |I_j| \alpha_{k,j} \end{pmatrix}.$$

Deswegen

$$\begin{aligned}\|a\| &= \left\| \sum_{j=1}^N |I_j| a_j \right\| \stackrel{\text{Dreiecksungleichung}}{\leq} \sum_{j=1}^N \| |I_j| a_j \| \\ &= \sum_{j=1}^N |I_j| \|a_j\| = \int_a^b \|\alpha\|\end{aligned}$$

□

Korollar 5.14. $f \in C^1(\Omega, \mathbb{R}^k)$ und $[p, q] \subset \Omega$. Dann:

$$\|f(p) - f(q)\| \leq \max_{z \in [p, q]} \|\mathrm{d}f|_z\|_O \|p - q\|$$

Beweis. Wenden den Schrankensatz an f und $\gamma : [0, 1] \rightarrow \Omega$ ist $\gamma(a) = (1 - s)p + sq$. Da $\dot{\gamma} = q - p$,

$$\|f(p) - f(q)\| \leq \max_{s \in [0, 1]} \|\mathrm{d}f|_{\gamma(s)}\|_O \underbrace{\int_0^1 \|\dot{\gamma}(s)\| \mathrm{d}s}_{\|p - q\|} = \max_{z \in [p, q]} \|\mathrm{d}f|_z\|_O \|p - q\|.$$

□

Beweis. Sei $\gamma : [0, 1] \rightarrow U$ (U konvex)

$$\begin{aligned}\gamma(t) &= (1 - t)p + tq \\ \gamma &: [0, 1] \rightarrow U \\ \gamma_i(t) &= (1 - t)p_i + tq_i \\ \gamma'_i(t) &= q_i - p_i \\ &\implies \gamma \in \mathcal{C}^1 \\ \dot{\gamma}(t) &= \begin{pmatrix} \gamma'_1(t) \\ \vdots \\ \gamma'_k(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_1 - p_1 \\ \vdots \\ q_k - p_k \end{pmatrix} = q - p \\ \|f(p) - f(q)\| &= \|f(\gamma(0)) - f(\gamma(1))\| \\ &\leq \underbrace{\max_{t \in [0, 1]} \|\mathrm{d}f|_{\gamma(t)}\|_O}_A \underbrace{\int_0^1 \|\dot{\gamma}(t)\| \mathrm{d}t}_{\int_0^1 \|q - p\| \mathrm{d}t} \\ &\leq \underbrace{\sup_U \|\mathrm{d}f\|_O}_A \|q - p\|\end{aligned}$$

□

Bemerkung 5.15. für $k = 1$ haben wir eine stärkere Aussage (Mittelwertsatz)

Beispiel 5.16. Sei $f : \underbrace{U}_{\subset \mathbb{R}^2} \rightarrow \mathbb{R}$ $\frac{\partial f}{\partial y}(0, 0) \neq 0$, $f(0, 0) = 0$, $f \in \mathcal{C}$ Implizites

Funktionentheorem garantiert eine Lösung der Gleichung $f(x_0, \cdot) = 0$

Bemerkung 5.17. $f : \underbrace{U}_{\subset \mathbb{R}^n} \rightarrow f(U) \subset \mathbb{R}^n$

$$f \text{ umkehrbar} \iff f \text{ injektiv}$$

Bemerkung 5.18. aus der LinAlg: Seien V und W zwei Vektorräume mit $\dim m$ und n und sei $A : V \rightarrow W$ linear und bijektiv

$$\implies m = \dim V = \dim W = n$$

Sei $V = \mathbb{R}^m$, $W = \mathbb{R}^n$. Sei (a_{ij}) die Matrixdarstellung für A .

$$v \in V, v = (v_1, \dots, v_m) \quad w \in W, w = (w_1, \dots, w_n)$$

$$w = Av \iff w_i = \sum_{j=1}^m a_{ij}v_j \quad w = av \quad \forall i \in \overline{1, n}$$

Die Umkehrbarkeit von A bedeutet Surjektivität und Injektivität

$$\text{sur} \iff \forall w \in W \quad \exists v : Av = w$$

$$\text{inj} \iff V \text{ oben ist eindeutig}$$

Bemerkung 5.19. 1. A ist bijektiv $\iff m = n$ und $a \in \mathbb{R}^{n \times n}$ eine invertierbare Matrix ($\iff \det a \neq 0$)

2. A bijektiv \implies die Umkehrabbildung von A (das heisst A^{-1}) ist auch eine lineare Abbildung und die Matirxdarstellung von A^{-1} ist die Inverse von a (a^{-1}) wobei a^{-1} die einzige Matrix ist, so dass $a^{-1}a = E_n$ (die Einheitsmatrix)

$$((a^{-1})_{ij})^T = \frac{\det M^{ij}}{\det a} (-1)^{i+j}$$

wobei M a ohne die i -te Zeile und die j -te Spalte ist

$$\implies (a^{-1})_{ij} = \frac{\det M^{ij}}{\det a} (-1)^{i+j}$$

$$a \in \mathbb{R}, A : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$$

$$a = \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix} \quad \det a = \alpha\delta - \beta\gamma \neq 0$$

d.h. a umkehrbar \implies

$$(a^{-1})^T = \frac{1}{\det a} \begin{pmatrix} \delta & -\gamma \\ -\beta & \alpha \end{pmatrix}$$

$$a^{-1}a = \frac{1}{\det a} \begin{pmatrix} \delta & -\gamma \\ -\beta & \alpha \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix}$$

$$\implies a^{-1}a = \frac{1}{\det a} \begin{pmatrix} \alpha & -\gamma \\ -\beta & \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix} = \frac{1}{\det a} \begin{pmatrix} \alpha\delta - \beta\gamma & 0 \\ 0 & \alpha\delta - \beta\gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

a^T bedeutet $(a^T)_{ij} = a_{ji}$

Definition 5.20. $\Phi \in \mathcal{C}^1$ mit Umkehrabbildung $\Psi \in \mathcal{C}^1$ nennt man einen Diffeomorphismus

Lemma 5.21. Sei $\Phi : \underbrace{U}_{\mathbb{R}^m} \rightarrow \underbrace{U}_{\mathbb{R}^n} \mathcal{C}^1$, bijektiv mit Umkehrfunktion $\Psi : V \rightarrow U$ auch \mathcal{C}^1 , oder Φ ein Diffeomorphismus. Dann:

1. $m = n$
2. $d\Phi|_p$ ist eine umkehrbare lineare Funktion $\forall p \in U$
3. $d\Psi|_q = (d\Phi|_{\Psi(q)})^{-1}$ (Jacobi-Matrix von Ψ ind $q =$ die Inverse der Jacobimatrix von Φ in $\Psi(q)$)

Im Fall $m = n = 1$ bedeutet die letzte Formel

$$\Psi'(q) = \frac{1}{\Phi'(\Psi(q))}$$

Beweis.

$$\Phi(\Psi(q)) = q = \text{Id}$$

$$V \ni q \mapsto q \in V \quad d\text{Id}|_q = \text{Id}$$

Kettenregel:

$$\underbrace{d\Phi|_{\Psi(q)}}_{\text{lineare Abbildung } A} \circ \underbrace{d\Psi|_q}_{\text{lineare Abbildung } B} = \text{Id}_q \iff A(B(v)) = v \quad \forall v \in \mathbb{R}^n$$

$\iff A$ ist umkehrbar und linear, B ist die Umkehrfunktion

1. folgt aus der linearen Algebra
2. ist die Aussage “ A ist umkehrbar an der Stelle $\Psi(q)$ ” (Ψ ist die Umkehrfunktion von $\Psi \implies \forall p \in U \exists q \in V$ mit $\Psi(q) = p$)
- 3.

$$\begin{aligned} (\mathrm{d}\Phi|_{\Psi(q)})^{-1} \circ (\mathrm{d}\Phi|_{\Psi(q)}) \circ \mathrm{d}\Psi|_q &= (\mathrm{d}\Phi|_{\Psi(q)})^{-1} \circ \mathrm{Id} \\ \implies \mathrm{d}\Psi|_q &= (\mathrm{d}\Phi|_{\Psi(q)})^{-1} \end{aligned}$$

□

Beispiel 5.22.

$$\begin{aligned} \Phi : \underbrace{U}_{\mathbb{R}^2} &\rightarrow \underbrace{V}_{\mathbb{R}^2} & \Phi(x_1, x_2) &= (f_1(x_1, x_2), f_2(x_1, x_2)) \\ \Psi : V &\rightarrow U & \Phi(y_1, y_2) &= (g_1(y_1, y_2), g_2(y_1, y_2)) \\ \Phi \circ \Psi : V &\rightarrow V & \Phi \circ \Psi(y_1, y_2) &= (y_1, y_2) \end{aligned}$$

$$\Phi \circ \Psi = (f_1(g_1(y_1, y_2), g_2(y_1, y_2)), f_2(g_1(y_1, y_2), g_2(y_1, y_2)))$$

$$\mathrm{d}\Phi|_{(p_1, p_2)} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(p) & \frac{\partial f_1}{\partial x_2}(p) \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1}(p) & \frac{\partial f_2}{\partial x_2}(p) \end{pmatrix}$$

$$\mathrm{d}\Psi|_{(p_1, p_2)} = \begin{pmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1}(p) & \frac{\partial g_1}{\partial x_2}(p) \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_1}(p) & \frac{\partial g_2}{\partial x_2}(p) \end{pmatrix}$$

$$\mathrm{d}\Phi|_{(p_1, p_2)} = \frac{1}{\Delta(p)} \begin{pmatrix} \frac{\partial f_2}{\partial x_2}(p) & -\frac{\partial f_1}{\partial x_2}(p) \\ -\frac{\partial f_2}{\partial x_1}(p) & \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(p) \end{pmatrix}$$

$$\Delta(p) = \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1} \frac{\partial f_2}{\partial x_2} - \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right)(p)$$

$$\mathrm{d}\Phi|_q = (\mathrm{d}\Phi|_{\Psi(q)})^{-1} = \frac{1}{\Delta(\Psi(q))} \begin{pmatrix} \frac{\partial f_2}{\partial x_2}(\Psi(p)) & -\frac{\partial f_1}{\partial x_2}(\Psi(p)) \\ -\frac{\partial f_2}{\partial x_1}(\Psi(p)) & \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(\Psi(p)) \end{pmatrix}$$

d.h. z.B.

$$\begin{aligned} \frac{\partial g_1}{\partial y_1}(q_1, q_2) &= \frac{\frac{\partial f_2}{\partial x_2}(\Psi(q))}{\Delta(\Psi(q))} \\ &= \frac{\frac{\partial f_2}{\partial x_2}(g_1(q_1, q_2), g_2(q_1, q_2))}{\left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1} \frac{\partial f_2}{\partial x_2} - \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right)(g_1(q_1, q_2), g_2(q_1, q_2))} \end{aligned}$$

Bemerkung 5.23. Falls $\Phi : U \rightarrow V \in \mathcal{C}^1$ ist und umkehrbar und $\Psi = \Phi^{-1}$ stetig und diffbar $\implies \Psi$ ist \mathcal{C}^1 Eigentlich können wir auch die Kettenregel anwenden ($\Phi(\Psi(q)) = q$) und deswegen die Formel:

$$\mathrm{d}\Psi|_q = (\mathrm{d}\Phi|_{\Psi(q)})^{-1}$$

schliessen \implies die entsprechende Formel für die partiellen Ableitungen der Komponenten von Ψ garantieren ihre Stetigkeit $\implies \Psi \in \mathcal{C}^1$

5.4 Satz der lokalen Umkehrbarkeit

Satz 5.24. Sei $\Phi : \underbrace{U}_{\subset \mathbb{R}^n} \rightarrow \mathbb{R}^n$ (U offene Menge) eine \mathbb{C}^1 -Abbildung und sei $a \in U$ so dass $d\Phi|_a$ umkehrbar ist. Dann $\exists U_0$ offene Umgebung von a so dass $V := \Phi(U_0)$ eine offene Umgebung von $\Phi(a)$ und die Einschränkung

$$\Phi : U_0 \rightarrow V$$

ein Diffeomorphismus ist.

Lemma 5.25. (Banachscher Fixpunktsatz) Sei $C \subset \mathbb{R}^n$ eine abgeschlossene Menge und sei $\phi : C \rightarrow C$ eine Abbildung mit folgender Eigenschaft:

$$\|\phi(x) - \phi(y)\| \leq \lambda \|x - y\| \quad \forall x, y \in C$$

wobei $0 \leq \lambda < 1$ (unabhängig von x, y).

Dann $\exists x \in C$ so dass $\phi(x) = x$ (d.h. x ein Fixpunkt von ϕ ist).

Definition 5.26. Eine Abbildung

$$\phi : X \rightarrow X \quad (\text{mit } X \text{ metrischer Raum})$$

heisst Kontraktion falls $\exists \lambda < 1$ so dass

$$d(\phi(x), \phi(y)) \leq \lambda d(x, y) \quad \forall x, y \in X$$

5.4.1 Allgemeine Form des Fixpunktsatzes von Banach

Satz 5.27. Jede Kontraktion auf einem vollständigen metrischen Raum besitzt einen Fixpunkt.

Beweis. Sei $x_0 \in X$ (bzw. in $C \subset \mathbb{R}^n$)

$$\begin{pmatrix} x_1 = \phi(x_0) \\ x_2 = \phi(x_1) \\ \vdots \\ x_k = \phi(x_{k-1}) \end{pmatrix}$$

Behauptungen:

1. $\{x_k\}$ ist eine Cauchyfolge

$$\xrightarrow{\text{Vollständigkeit von } X} \exists x \lim_{k \rightarrow \infty} x_k$$

2. $\phi(x) = x$

1 \implies 2 weil

$$\phi(x) = \lim_{k \rightarrow \infty} \phi(x_k) = \lim_{x_{k+1} \rightarrow \infty} = x$$

□

Beweis.

$$d(x_0, x_1) = M \geq 0$$

$$\begin{aligned} d(x_{k+1}, x_k) &= d(\phi(x_k), \phi(x_{k-1})) \\ &\leq \lambda d(x_k, x_{k-1}) \leq \dots \leq \lambda^2 d(x_{k-1}, x_{k-2}) \\ &\dots \leq \lambda^k d(x_1, x_0) = \lambda^k M \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &d(x_{k+j}, x_k) \\ &\leq d(x_{k+j}, x_{k+j-1}) + d(x_{k+j-1}, x_{k+j-2}) + \dots + d(x_{k+1}, x_k) \\ &\leq \lambda^{k+j-1} M + \lambda^{k+j-2} M + \dots + M \lambda^k \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
d(x_{k+j}, x_k) &\leq M\lambda^k(1 + \lambda + \cdots + \lambda^{j-1}) \\
&< M\lambda^k \sum_{i=0}^{\infty} \lambda^i \\
&= \frac{M\lambda^k}{1 - \lambda}
\end{aligned}$$

Deswegen $\forall m > n \geq N$ ($\lambda^N \rightarrow$ für $N \rightarrow +\infty$)

$$d(x_m, x_n) \leq \frac{M}{1 - \lambda} \lambda^N$$

$\forall \varepsilon > 0 \exists N$ so dass

$$\frac{M\lambda^N}{1 - \lambda} < \varepsilon$$

$$\implies d(x_m, x_n) < \varepsilon \quad \forall n > m \geq N$$

Das ist die Cauchyeigenschaft $\implies \{x_k\}$ ist eine Cauchyfolge \square

Beweis des Satzes

Schritt 1 Wir suchen eine Umgebung von W von $\Phi(a)$, wo wir immer ein Urbild von $\in W$ finden. D.h.

$$\Phi(x) = y \tag{47}$$

besitzt eine Lösung x .

OBdA nehmen wir an $a = 0$ und $d\Phi|_a = \text{Id}$ (In der Tat, nehmen wir an dass

$$L = d\Phi|_a \neq \text{Id}$$

Sei

$$\Phi' = L^{-1} \circ \Phi$$

und

$$d\Phi'|_x = L^{-1} \circ d\Phi|_x$$

$\implies \Phi'$ ist eine \mathbb{C}^1 -Funktion.

$$d\Phi|_0 = L^{-1} \circ d\Phi|_0 = L^{-1} \circ L = \text{Id}$$

\implies Satz an Φ' anwenden

$$\Psi'(\Phi'(x)) = x \implies \Psi'(L^{-1}(\Phi(x))) = x$$

$$\implies \Psi := \Phi' \circ L^{-1}$$

die gesuchte Umkehrung von Φ ist $V := (V')$ Wir wollen zeigen dass, wenn $\|y - \Phi(0)\| < \delta$, dann die Gleichung 47 lösbar ist.

$$47 \iff \underbrace{y + x - \Phi(x)}_{x \mapsto \phi_y(x)} = x$$

$\phi_y : U \rightarrow \mathbb{R}^n \exists \eta > 0$ so dass

$$\phi_y : \overline{B_\eta}(0) \mapsto \overline{B_\eta}(0)$$

eine Kontraktion ist.

1. ϕ_y bildet $\overline{B_y}(0)$ in $\overline{B_\eta}(0)$
2. $\|\phi_y(z) - \phi_y(w)\| \leq \frac{1}{2} \|z - w\|$

Das zweite:

$$\begin{aligned}
& \|\phi_y(z) - \phi_y(w)\| \\
&= \|y + z - \Phi(z) - y - w + \Phi(w)\| \\
&= \|(\Phi(w) - \Phi(z)) - (w - z)\| \\
&= \left\| \underbrace{\Phi(w) - w}_{\Lambda(w)} - \underbrace{\Phi(z) - z}_{\Lambda(z)} \right\|
\end{aligned}$$

Λ ist \mathbb{C}^1

$$d\Lambda|_0 = d\Phi|_0 - \text{Id} = 0$$

$$\|d|_0\|_{HS} = 0$$

$\implies \exists \eta > 0$ so dass

$$B_{\leq \eta}(0) \ni x \implies \|d\Lambda|_x\|_{HS} \leq \frac{1}{2}$$

$z, w \in \overline{B_\eta}(0)$ und $\in B_\eta(0)$

$$\begin{aligned}
\|\phi_y(z) - \phi_y(w)\| &= \|\Lambda(z) - \Lambda(w)\| \\
&\stackrel{\text{Schränkensatz}}{\leq} \left(\max_{\overline{B_\eta}(0)} \|d\Lambda|_O\| \right) \|z - w\| \\
&\quad \frac{1}{2} \|z - w\|
\end{aligned}$$

$$\phi_y(0) = y - \Phi(0) + 0 = y - \Phi(0)$$

$\delta = \frac{\eta}{2}$, $\|\phi_y(0)\| \leq \frac{1}{2}$. Sei $z \in \overline{B_\eta}(0)$

$$\begin{aligned}
& \|\phi_y(z)\| \|\phi_y(z) - \phi_y(0)\| + \|\phi_y(0)\| \\
& < \|\phi_y(z) - \phi_y(0)\| + \frac{\eta}{2} \\
& \leq \frac{1}{2} \|z - 0\| + \frac{\eta}{2} \\
& \leq \frac{1}{2} \eta + \frac{1}{2} \eta \\
& \quad = \eta \\
& \implies \|\phi_y(z)\| < \eta
\end{aligned}$$

So

$$\phi_y : \overline{B_\eta}(0) \mapsto B_\eta(0)$$

Banach: $\forall y \in B_{\frac{\eta}{2}}(\Phi(0))$, $\exists x \in B_\eta(0)$ und $\in \overline{B_\eta}(0)$ mit

$$\phi_y(x) = x \iff \Phi(x) = y$$

Sei $V := B_\delta(\Phi(0))$ (offen und Umgebung von $\Phi(0)$)

$$\begin{aligned}
& \underbrace{B_\eta(0) \cap \Phi^{-1}(V)}_{\text{ist eine offene Menge}} = U_0 \quad (\text{offen und Umgebung von } 0)
\end{aligned}$$

$$\Phi : U_0 \rightarrow V$$

1. Φ ist surjektiv: $\forall y \in V$, $\exists x \in B_\eta(0)$ mit $\Phi(x) = y$

$$\implies x \in \Phi^{-1}(V) \cap B_\eta(0) = U_0$$

2. Φ ist injektiv

$$\begin{aligned}
\|\Phi(x) - \Phi(z)\| &= \|(x + \Lambda(x)) - (z + \Lambda(z))\| \\
&\implies \|\Phi(x) - \Phi(z)\| \\
&\leq \|x - z\| - \|\Lambda(x) - \Lambda(z)\| \\
&\leq \|x - z\| - \frac{1}{2} \|x - z\| \\
&\leq \frac{1}{2} \|x - z\|
\end{aligned}$$

$\implies \Phi$ ist injektiv. (Alternativerweise wenn ϕ eine Kontraktion ist, der Fixpunkt von ϕ ist eindeutig: $\phi(p) = p$, $\phi(q) = q$

$$\begin{aligned}
d(p, q) &= d(\phi(p), \phi(q)) \\
&\leq \lambda d(p, q) \\
(1 - \lambda) d(p, q) &\leq 0 \\
&\xRightarrow{\lambda < 1} d(p, q) = 0 \\
&\implies p = q
\end{aligned}$$

Schritt 2 Sei $\Phi : V \mapsto U_0$ die Umkehrfunktion von Φ . Ψ ist stetig. Seien $\xi, \zeta \in V$, $x = \Phi(\xi)$, $z = \Phi(\zeta) \implies \Phi(x) = \xi$, $\Phi(z) = \zeta$. Aber:

$$\begin{aligned}
\|\Phi(x) - \Phi(z)\| &\leq \frac{1}{2} \|x - z\| \\
\implies \underbrace{2 \|\xi - \zeta\|}_{\text{Lipschitz-Bedingung für } \Phi: \text{ stetig}} &\geq \|\Psi(\xi) - \Phi(\zeta)\|
\end{aligned}$$

Schritt 3

Bemerkung 5.28. $\Phi : U_0 \rightarrow V$ ist differenzierbar und $d\Phi|_x$ ist umkehrbar $\forall x \in U_0$.

$$\begin{aligned}
\Phi(x) &= x - \Lambda(x) \\
d\Phi|_x &= \text{Id} - d\Lambda|_x
\end{aligned}$$

Wir wissen, dass

$$\|d\Lambda|_x\|_{HS} \leq \frac{1}{2} \quad \forall x \in U_0 \subset B_\eta(0)$$

$$d\Phi|_x(v) = v - d\Lambda|_x(v)$$

$$\begin{aligned}
&\|d\Phi|_x(v)\| \\
&\geq \|v\| - \|d\Lambda|_x(v)\| \\
&\geq \|v\| - \frac{1}{2} \|v\| \\
&\geq \frac{1}{2} \|v\|
\end{aligned}$$

$\implies \text{Ker}(d\Phi|_x) = \{0\} \implies d\Phi|_x$ ist injektiv \implies Surjektivität $\implies d\Phi|_x$ ist umkehrbar

Lemma 5.29. Falls $\Phi : U_0 \rightarrow V$ eine \mathbb{C}^1 umkehrbare Abbildung so dass

- $d\Phi|_x$ umkehrbar $\forall x \in U_0$ ist
- die Umkehrfunktion $\Psi : V \rightarrow U_0$ stetig ist, dann ist auch Ψ eine \mathbb{C}^1 Abbildung.

Lemma 5.30. Sei $\Phi : U \rightarrow V$ eine \mathbb{C}^1 umkehrbare Abbildung ($U, V \subset \mathbb{R}^n$ offene Menge). Sei $\Psi : V \rightarrow U$ die Umkehrfunktion von Φ . Wenn Ψ stetig ist und $d\Phi|_x$ umkehrbar $\forall x$ ist, dann ist auch Ψ eine \mathbb{C}^1 -Abbildung.

Mit dem Lemma schliessen wir den dritten Schritt des Beweises der lokalen Umkehrbarkeit. Es genügt die differenzierbarkeit von Ψ zu zeigen. In diesem Fall:

$$d\Psi|_y = (d\Phi|_{\Psi(y)})^{-1}$$

Falls $M(y)$ die Jacobimatrix von $d\Psi|_y$ und $N(x)$ die Jacobimatrix von $d\Phi|_x$ ist

$$M_{ij}(y) = (N(\Psi(y)))_{ij}^{-1} = \frac{(-1)^{i+j}}{\det N(\Psi(y))} \det C \circ f^{ij}(N(\Psi(y)))$$

$$C \circ f^{ij} = (\dots)$$

$C \circ f^{ij}$ ist die Matrix $\in ((n-1) \times (n-1))$ die wir von N erhalten, wenn wir die i -te ZEile und die j -te Spalte löschen. \implies die Koeffizienten $M_{ij}(y)$ ist eine stetige Funktion.

$$M_{ij}(y) = \frac{\partial \Psi_i}{\partial y_j}$$

Diff von Ψ . Wir fixieren $y \in V$

$$\Psi(y_0) \implies \Phi(x_0) = y_0$$

Wir setzen

$$L := (d\Phi|_{x_0})^{-1}$$

Sei $\Phi' = L \circ \Phi$, $\Phi \in \mathbb{C}^1$

$$d\Phi'|_{x_0} L \circ d\Phi|_{x_0} = \text{Id}$$

$$d\Phi'|_x = \underbrace{L \circ d\Phi|_x}_{\text{umkehrbar}}$$

Dann ist $\Psi' = \Psi \circ L^{-1}$ die Umkehrfunktion von Φ'

Behauptung 5.31. Φ' ist an der Stelle

$$y'_0 = \Phi'(x_0) = L(\Phi(x_0)) = L(y_0)$$

differenzierbar $\implies \Psi = \Psi' \circ L$ ist an der Stelle y_0 differenzierbar

$$d\Psi|_{y_0} = d\Psi'|_{L(y_0)}$$

OBdA können wir zusätzlich annehmen $d\Phi|_{x_0} = \text{Id}$

Bemerkung 5.32. $\exists B_\delta(y_0)$ so dass

$$\|\Psi(z) - \Psi(w)\| \leq 2\|z - w\|$$

Falls δ klein genug ist, $\underbrace{\Psi(z)}_{\zeta}$ und $\underbrace{\Psi(w)}_{\omega}$ in einer Umgebung von x_0

$$\begin{aligned}
\|(\Phi(\zeta) - \Phi(\omega)) - (\zeta - \omega)\| &= \left\| \underbrace{(\Phi(\zeta) - \zeta)}_{\Lambda(\zeta)} - \underbrace{(\Phi(\omega) - \omega)}_{\Lambda(\omega)} \right\| \\
&\quad d\Lambda|_{x_0} = d\Phi|_{x_0} - \text{Id} = 0 \\
&\implies \|d\Lambda|_x\|_O \leq \frac{1}{2} \quad \forall x \in \overline{B_\varepsilon(x_0)} \\
&\leq \max_{x \in \overline{B_\varepsilon(x_0)}} \|d\Lambda|_x\|_O \|\zeta - \omega\| \\
&\implies \|(\Phi(\zeta) - \Phi(\omega)) - (\zeta - \omega)\| \leq \frac{1}{2} \|\zeta - \omega\| \\
&\implies \frac{1}{2} \|\zeta - \omega\| \leq \|\Phi(\zeta) - \Phi(\omega)\| \\
&\implies \frac{1}{2} \|\Psi(z) - \Psi(w)\| \leq \|z - w\| \\
&\quad \|\Psi(z) - \Psi(w)\| \leq 2 \|z - w\| \\
\Phi(x) - \Phi(x_0) &= \underbrace{d\Phi(x_0)}_{\text{Id}}(x - x_0) + \underbrace{R(x)}_{o(\|x - x_0\|)} \\
&\quad y \iff x = \Psi(y) \\
&\quad \underbrace{\Phi(x)}_{\Psi(y)} - \Phi(x_0) = (x - x_0) + R(x) \\
y - x_0 &= \Psi(y) - \Psi(y_0) + R(\Psi(y)) \quad \forall y \in B_\delta(y_0) \\
&\implies (\Psi(y) - \Psi(y_0)) = \text{Id}(y - y_0) - R(\Psi(y))
\end{aligned}$$

Für die differenzierbarkeit brauchen wir $R(\Psi(y)) = o(\|y - y_0\|)$

$$\begin{aligned}
\frac{|R(\Psi(y))|}{\|y - y_0\|} &= \frac{|\Psi(y)|}{\|\Psi(y) - \Psi(y_0)\|} \frac{\|\psi(y) - \Psi(y_0)\|}{\|y - y_0\|} \leq 2 \frac{|R(\Psi(y))|}{\|y - x_0\|} \\
\lim_{y \rightarrow y_0} 2 \frac{|R(\Psi(y))|}{\|y - x_0\|} &= \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{|R(x)|}{\|x - x_0\|} = 0 \\
y \rightarrow y_0 &\implies \Psi(y) \rightarrow \Psi(y_0)
\end{aligned}$$

5.5 Lösungen von Gleichungen

Der Satz über implizite Funktionen

$$x^2 + bx + c = 0 \iff (x, b, c) \in \text{Nullstellen von } f$$

$$f(x, b, c) = x^2 + bx + c$$

Die Gleichung zu lösen \iff Es gibt eine Funktion g so dass $x = g(b, c)$ die Gleichung löst.

$$f(x, a) = 0 \quad x \in \mathbb{R}, a \in \mathbb{R}$$

Sei (x_0, a_0) Nullstelle. Gibt es in einer Umgebung von (x_0, a_0) eine "Formel" $x = g(a)$ für die Lösungen?

Allgemein Sei $f : \underbrace{U}_{\mathbb{R}^n = \mathbb{R}^{k+m}} \rightarrow \mathbb{R}^k$. $z \in \mathbb{R}^{k+m}$ schreiben wir als

$$z = (\underbrace{x_1, \dots, x_n}_x, \underbrace{y_1, \dots, y_m}_y) = (x, y)$$

Das System

$$\begin{cases} f_1(x_1, \dots, x_k, y_1, \dots, y_m) = 0 \\ f_2(x_1, \dots, x_k, y_1, \dots, y_m) = 0 \\ \vdots \\ f_k(x_1, \dots, x_k, y_1, \dots, y_m) = 0 \end{cases} \iff f(x, y) = 0$$

Satz 5.33. Sei $f : U \rightarrow \mathbb{R}^k$ eine \mathbb{C}^1 Abbildung und (\bar{x}, \bar{y}) eine Nullstelle von f . Falls $d_x f|_{(\bar{x}, \bar{y})}$ umkehrbar ist dann $\exists U, V$ Umgebungen von \bar{y} und \bar{x} und eine \mathbb{C}^1 Funktion

$$g : U \rightarrow V \text{ so dass } \{(g(y), y)\} = \{f = 0\} \cap V \times U$$

Bemerkung 5.34. Jacobi Matrix für $d_x f|_{(\bar{x}, \bar{y})}$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_k} & \frac{\partial f_1}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial y_m} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_k} & \frac{\partial f_2}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial y_m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_k}{\partial x_1} & \frac{\partial f_k}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_k}{\partial x_k} & \frac{\partial f_k}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial f_k}{\partial y_m} \end{pmatrix}$$

$$f = f_1, (x_1, y_1)$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}, \frac{\partial f_1}{\partial y_1} \right) \\ d_x f &= \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right) \\ & \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \neq 0 \end{aligned}$$

Bemerkung 5.35. Satz nicht benutzen, wenn der Gradient verschwindet!

Beweis. Sei

$$\begin{aligned} \Phi(x, y) &= (f(x, y), y) \\ \Phi : \underbrace{\tilde{U}}_{\subset \mathbb{R}^{k+m}} &\rightarrow \mathbb{R}^{k+m} \end{aligned}$$

$d\Phi|_{(\bar{x}, \bar{y})}$ Jacobi Matrix

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_k} & \frac{\partial f_1}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial y_m} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_k} & \frac{\partial f_1}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial y_m} \\ 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_x f & d_y f \\ 0 & \text{Id} \end{pmatrix}$$

□

Übung 5.36.

$$\text{Ker } d\Phi|_{(\bar{x}, \bar{y})} = \{0\}$$

sonst $\det \neq 0$

5.6 Satz über implizite Funktionen

Wir nutzen die Koordinaten $(x, y) = (x_1, \dots, x_k, y_1, \dots, y_n) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^k$

Satz 5.37. Sei $f : U \rightarrow \mathbb{R}^k$ eine \mathbb{C}^1 Abbildung (wobei U eine offene Menge in $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^k$ ist). Sei $(a, b) \in U$ mit der Eigenschaft dass $d_y f$ umkehrbar ist und $f(a, b) = 0$. Vom letzten Mal:

$$df = \underbrace{(d_x f)}_{J_{fx}} \underbrace{(d_y f)}_{J_{fy}}$$

Dann: $\exists U', U''$ Umgebungen von a und b und eine \mathbb{C}^1 -Abbildung $g : U' \rightarrow U''$ so dass

$$\{(x, y) \in U' \times U'' \mid f(x, y) = 0\} = \{(x, y(x)) \mid x \in U'\}$$

Beweis. Sei $\Phi : U \rightarrow \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^k$

$$\Phi(x, y) = \left(\underbrace{x}_{\in \mathbb{R}^n}, \underbrace{f(x, y)}_{\in \mathbb{R}^k} \right) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^k$$

$$d\Phi|_{(a,b)} = \begin{pmatrix} 1 & & 0 \\ & \ddots & 1 & 0 \\ 0 & & 1 \\ & d_x f & & d_y f \end{pmatrix}$$

Letztes Mal: $d\Phi|_{(a,b)}$ ist umkehrbar. Deswegen $\exists U_0$ offene Umgebung von (a, b) , $\exists V$ offene Umgebung von $(a, 0) = \Phi(a, b)$ und $\Psi : V \rightarrow U_0$ \mathbb{C}^1 -Abbildung so dass

$$\Psi(\Phi(x, y)) = \Phi(\Psi(x, y)) = (x, y)$$

d.h. $\Psi = (\Phi|_{U_0})^{-1}$

$$\begin{aligned} \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^k \ni \Psi(x, y) &= \left(\underbrace{\xi(x, y)}_{\in \mathbb{R}^n}, \underbrace{\zeta(x, y)}_{\in \mathbb{R}^k} \right) \quad \forall (x, y) \in V \\ (x, y) &= \Phi(\Psi(x, y)) = \Phi(\xi(x, y), \zeta(x, y)) \\ &\implies (x, y) = (\xi(x, y), f(x, \zeta(x, y))) \\ \iff \begin{cases} x = \xi(x, y) \\ y = f(x, \zeta(x, y)) \end{cases} &\implies \Psi(x, y) = (x, \zeta(x, y)) \end{aligned}$$

Aus der zweiten Gleichung $0 = f(x, \underbrace{\zeta(x, 0)}_{y(x)})$. Deswegen enthält V $(0, 0)$. Deswegen $\exists r > 0$ so dass

$$\underbrace{B_r^n(a)}_{\mathbb{R}^n} \times \underbrace{B_r^k(0)}_{\mathbb{R}^k} \subset V$$

Sei $U' = B_r^n(a)$

$$\begin{aligned} \Psi(B_r^n(a) \times B_r^k(0)) &= \text{offene Menge} \\ &\supset B_r^n(a) \times B_p(b) \quad \exists p \end{aligned}$$

weil $\Psi(0, 0) = (a, \underbrace{\zeta(a, 0)}_{\text{soll } b \text{ sein weil } \Psi \text{ die Umkehrung von } \Phi \text{ ist}})$ und $f(a, \zeta(a, 0)) = 0$. g ist eine stetige Funktion

$$\begin{aligned} g(a) &= \zeta(a, 0) = b \\ g^{-1}(B_p(b)) &=: U' \end{aligned}$$

U' ist eine offene Menge und enthält a .

$$g : \underbrace{U'}_{\text{Umgebung von } a} \rightarrow \underbrace{U''}_{\text{Umgebung von } b} \quad B_p(b) = U''$$

$$f(x, g(x)) = 0 \implies \{(x, y) \in U' \times U'' : f(x, y) = 0\} \supset \{(x, g(x)) : x \in U'\}$$

Sei $(x, y) \in U' \times U'' : f(x, y) = 0$. Aber

$$(x, y) \in U_0 \implies \Phi(x, y) = (x, f(x, y)) = (x, 0) \in V \implies \Psi(x, 0) = (x, y)$$

weil Ψ die Umkehrung von Φ ist

$$\begin{aligned} \Psi(x, 0) &= (x, \zeta(x, 0)) = (x, g(x)) \implies y = g(x) \\ \implies \{(x, y) \in U' \times U'' : f(x, y) = 0\} &\subset \{(x, g(x)) : x \in U'\} \end{aligned}$$

□

Bemerkung 5.38. Seien f und g wie im letzten Sat. Dann

$$\underbrace{f}_{\mathbb{C}^1}(x, \underbrace{g(x)}_{\mathbb{C}^1}) = 0 \quad \forall x \in U'$$

$$\begin{aligned} & \implies d(f(x, g(x)))|_{x_0} = 0 \\ & d f|_{(x_0, g(x_0))}(d(x, g(x)))|_{x_0} \\ d f|_{(x_0, g(x_0))} &= \left(\underbrace{d_x f|_{(x_0, g(x_0))}}_{n \times k}, \underbrace{d_y f|_{(x_0, g(x_0))}}_{k \times k} \right) \end{aligned}$$

Darstellung von $d(x, g(x))|_{x_0}$

$$\begin{pmatrix} \text{Id} \\ d g|_{x_0} \end{pmatrix}$$

Matrix-Produkt

$$\begin{aligned} d(f(x, g(x)))|_{x_0} &= d_x f|_{(x_0, g(x_0))} + d_y f|_{(x_0, g(x_0))} d g|_{x_0} \\ d|_{(x_0, g(x_0))} d_x g|_{x_0} &= -d_x f|_{(x_0, g(x_0))} \\ \implies d_x g|_{x_0} &= - (d_y f|_{(x_0, g(x_0))})^{-1} (d_x f|_{(x_0, g(x_0))}) \end{aligned}$$

Beispiel 5.39. $k = n + 1$

$$f(x_1, y_1) = 0$$

$$\frac{\partial f}{\partial y_1}(a, b) \neq 0$$

$$\begin{aligned} & \exists g : U' \rightarrow U'' \text{ mit } f(x, g(x)) = 0 \\ \implies 0 &= \frac{\partial f}{\partial x_1}(x_1, g(x_1)) + \frac{\partial f}{\partial y_1}(x_1, g(x_1))g'(x_1) \\ \implies g'(x_1) &= - \frac{\frac{\partial f}{\partial x_1}(x_1, g(x_1))}{\frac{\partial f}{\partial y_1}(x_1, g(x_1))} \end{aligned}$$

5.7 Untermannigfaltigkeiten

Definition 5.40. Eine Menge $E \subset \mathbb{R}^N$ ist eine \mathbb{C}^1 -Untermannigfaltigkeit mit Dimension k falls $\forall p \in E$ die folgende Eigenschaft gilt: \exists eine Ordnung der Koordinaten $(x_1, \dots, x_{N-k}, y_1, \dots, y_n)$ so dass

- $p = (\underbrace{a}_{\in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^k}, b)$
- $\exists U, V$ von a und b (Umgebungen)
- $\exists f : U \rightarrow V \subset \mathbb{C}^1$ so dass

$$(U \times V) \cap E = \{(x, f(x)) : x \in U\}$$

Definition 5.41. Sei $N \geq k + 1$ $f : \underbrace{U}_{\mathbb{R}^N} \rightarrow \mathbb{R}^k$ eine \mathbb{C}^1 -Abbildung. $c \in \mathbb{R}^k$

heisst ein regulärer Wert falls $\forall x_0 \in U$ so dass $f(x_0) = c$ hat das Differential $d f|_{x_0}$ Rang k (maximaler Rang)

Satz 5.42. Falls c ein regulärer Wert ist, dann

$$f^{-1}(\{c\}) = \{z : f(z) = c\}$$

ist eine Untermannigfaltigkeit mit Dimension $N - k$.

Beweis. Sei p so dass $f(p) = c$

$$df|_p = \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial z_1}, \dots, \frac{\partial f}{\partial z_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial z_N} \\ \underbrace{\left(\frac{\partial f_1}{\partial z_1} \right)} \\ \vdots \\ \underbrace{\left(\frac{\partial f_k}{\partial z_1} \right)} \end{pmatrix}$$

Neue Ordnung der Koorddinaten:

$$df|_p = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_{N-k}}, \frac{\partial f}{\partial y_1}, \dots, \frac{\partial f}{\partial y_k} \right) \\ = (d_x f|_p, d_y f|_p)$$

Rang $k \implies \exists k$ linear unabhängige Spalten. $\xrightarrow{\text{Satz über implizite Funktionen}} \exists$
 $\underbrace{U' \times U''}_U$ Umgebung von $p = (a, b)$ so dass

$$U \cap E = \{q \in U : f(q) - c = 0\} = \{(x, g(x)) : x \in U'\}$$

□

5.8 Die Multiplikationsregel von Lagrange

Satz 5.43. Sei $U \subset \mathbb{R}^n$ und seien (ϕ_1, \dots, ϕ_j) die Nebenbedingungen. D.h. j verschiedene Funktionen $\phi_i : U \rightarrow \mathbb{R}$. Sei $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ eine \mathbb{C}^1 -Funktion und p ein Punkt wo die Funktion f das Maximum (bzw. das Minimum) mit Nebenbedingungen erreicht.

$$(\phi_1(p) = \dots = \phi_j(p) = 0 \text{ und } f(p) \geq f(q) \ \forall \text{ mit } \phi_1(q) = \dots = \phi_j(q) = 0$$

Falls $\nabla \phi_1(p), \dots, \nabla \phi_j(p)$ linear unabhängige Vektoren sind, dann: $\exists \lambda_1, \dots, \lambda_j$ so dass

$$\nabla f(p) = \lambda_1 \nabla \phi_1(p) + \dots + \lambda_j \nabla \phi_j(p)$$

(Multiplikatorregel)

Bemerkung 5.44. (NB) + (MR) ist eine System von Gleichungen mit Unbekannten $\lambda_1, \dots, \lambda_j, p$

Bemerkung 5.45. $\underbrace{\begin{pmatrix} \nabla \phi_1 \\ \vdots \\ \nabla \phi_j \end{pmatrix}}_{j \times n \text{ Matrix}}$ sind die Zeilen von $d\phi$. Lineare Unabhängigkeit

$\implies d\phi|_p$ hat maximaler Rang, d.h. j .

$\xrightarrow{\text{Satz über die impliziten Funktionen}} \text{(NB)} \implies \iff \{\phi = 0\} \iff \{(x, g(x)), x \in U'\}$

in einer Umgebung $U' \times U''$. Sei $(x_0, g(x_0)) = p$. f hat ein Maximum in p unter (NB).

$$\implies x \mapsto f(x, g(x)) = h(x)$$

hat ein Maximum in x_0

$$\implies dh|_{x_0} = 0 \implies \text{(MR)}$$

Satz 5.46.

$$\phi = (\phi_1, \dots, \phi_j) : \underbrace{\mathbb{R}^{j+k}} \rightarrow \mathbb{R}^k$$

ist eine \mathbb{C}^1 -Abbildung.

$$E = \{q : \phi(q) = 0\}$$

Sei $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ ist eine \mathbb{C}^1 -Funktion. Sei $p \in E$ so dass

$$f(p) \geq f(q) \quad \forall q \in E$$

$f(p) = \max_{q \in E} f$. Bzw. $f(p) \leq f(q)$ für Minimum. Falls der Rang $d\phi|_p$ maximal ist (d.h. $= k$), dann $\exists \lambda_1, \dots, \lambda_k \in \mathbb{R}$ so dass

$$\nabla f = \lambda_1 \nabla \phi_1, \dots, \lambda_j \nabla \phi_j$$

$\lambda_1, \dots, \lambda_n$ sind die Multiplikatoren von Lagrange.

Beweis. $d\phi|_p$ eine $j \times n+j$ Matrix. j Zeilen, $n+j$ Spalten \implies die Zeilen sind linear unabhängige Vektoren. $\implies \exists j$ linear unabhängige Spalten. OBdA sind die j -Spalten die letzten (rechts). Seien $(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_j)$ ein System von Koordinaten in \mathbb{R}^{n+j}

$$d\phi|_p = (d_x \phi|_p \quad \underbrace{d_y \phi|_p}_{j \times jj\text{-Matrix}})$$

Die j -Matrix hat Rang $j \implies$ ist umkehrbar. Theorem über die implizite Funktion: $\exists U$ von a und $\exists V$ von b und eine \mathbb{C}^1 Abbildung $g : U \rightarrow V$ so dass

$$E \cap U \times V = \{\phi = 0\} \cap U \times V = \{(x, g(x)) : x \in U\}$$

Betrachte: $h : U \rightarrow \mathbb{R}$ $h(x) = f(x, g(x))$ in U ist a eine Maximumstelle von h

$$\begin{aligned} h(a) &= f(p) \\ h(x) &= f(\underbrace{(x, g(x))}_{q \in E}) \implies h(a) \geq h(x) \\ &\implies d_x h|_a = 0 \end{aligned}$$

Kettenregel:

$$\begin{aligned} d_x h|_a &= d_x f|_{\underbrace{(a, g(a))}_p} + d_y f|_p d_x g|_a \\ &\implies 0 = d_x f|_p + d_y f|_p d_x g|_a \end{aligned}$$

Sei $\Psi(x) = (x, g(x))$

$$\begin{aligned} df &= (d_x f \ d_y f) \\ d\Psi|_a &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & & & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_j}{\partial x_1} & & & \frac{\partial g_j}{\partial x_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Id} \\ d_x g|_a \end{pmatrix} \\ d h|_a &= d f|_{\underbrace{\Psi(a)}_p} d\psi|_a \\ &= d_x f|_p + d_y f|_p d_x g|_a \\ D &= \begin{pmatrix} d_x f|_p & d_y f|_p \\ d_x \phi|_p & d_y \phi|_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \end{pmatrix} \\ d_x f|_a &= -d_y f|_p d_x g|_a \end{aligned}$$

Aber

$$\begin{aligned}
 d_x g|_a &= -(d_y \phi|_p)^{-1} d_x \phi|_p \\
 \phi(x, g(x)) &= 0 \\
 d_x \phi + d_y \phi d_x g &= 0 \\
 \implies d_x g &= -(d_y \phi)^{-1} d_x \phi \\
 \dots d_x f|_a &= -d_y f|_p d_x g|_a = d_y f|_p (d_y \phi|_p)^{-1} d_x \phi
 \end{aligned}$$

so:

$$\begin{aligned}
 A &:= \begin{pmatrix} d_x f \\ d_x \phi \end{pmatrix} \\
 B &:= \begin{pmatrix} d_y f \\ d_y \phi \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d_x f &= d_y f (d_y \phi)^{-1} d_x \phi = d_y f C \\
 d_x \phi &= d_y \phi (d_y \phi)^{-1} d_x \phi = d_y \phi C
 \end{aligned}$$

$\iff A = BC \implies$ jede Spalte von A ist eine lineare Kombination der Spalten von $B \implies \text{Rang } D \leq j$. Allerdings ist $\text{Rang } D = j$. $j+1$ Zeilen in D .

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f}{\partial x_n} & \frac{\partial f}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial f}{\partial y_j} \\ \frac{\partial \phi}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial \phi}{\partial x_n} & \frac{\partial \phi}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial \phi}{\partial y_j} \\ \frac{\partial \phi_j}{\partial x_1} & & & & & \frac{\partial \phi_j}{\partial y_j} \end{pmatrix}$$

$\implies \exists \mu_0, \dots, \mu_j$ so dass

$$\mu_0 \nabla f(p) + \frac{\mu_1}{\mu_0} \nabla \phi_1(p) + \dots + \frac{\mu_j}{\mu_0} \nabla \phi_j(p) = 0$$

$\mu_0 \neq 0 \implies$ Sei $\lambda = -\frac{\mu_i}{\mu_0}$

$$\implies \nabla f(p) = \lambda_1 \nabla \phi_1(p) + \dots + \lambda_j \nabla \phi_j(p)$$

$\mu_0 \implies \text{Rang } (d_x \phi \ d_y \phi) \leq j-1$ nicht möglich weil $\text{Rang} = j$ □

Lemma 5.47. Seien A, B und C so dass $A = BC$. Dann sind die Spalten von A Linearkombinationen der Spalten von B .

Beweis. A ist eine $n \times k$ Matrix, B eine $n \times j$ Matrix und C eine $j \times k$ Matrix

$$\begin{aligned}
 A &= (a_{il}) \\
 B &= (b_{\alpha\beta}) \\
 C &= (c_{s\lambda}) \\
 a_{il} &= \sum_{\alpha=1}^j b_{i\alpha} c_{\alpha l}
 \end{aligned}$$

Die λ Spalte von A ist

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} a_{1\lambda} \\ a_{2\lambda} \\ \vdots \\ a_{n\lambda} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} b_{11} \\ \vdots \\ b_{n1} \end{pmatrix} \mu_1 + \begin{pmatrix} b_{12} \\ \vdots \\ b_{n2} \end{pmatrix} \mu_2 + \dots + \begin{pmatrix} b_{1j} \\ \vdots \\ b_{nj} \end{pmatrix} \mu_j \\
 \underbrace{\begin{pmatrix} a_{1\lambda} \\ \vdots \\ a_{n\lambda} \end{pmatrix}}_{\text{Die } \lambda\text{-Spalte von } A} &= \underbrace{\begin{pmatrix} b_{11} \\ \vdots \\ b_{n1} \end{pmatrix}}_{\text{erste Spalte von } B} + \underbrace{\begin{pmatrix} b_{12} \\ \vdots \\ b_{n2} \end{pmatrix}}_{\text{zweite Spalte}} + \dots + \mu_j \begin{pmatrix} b_{1j} \\ \vdots \\ b_{nj} \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

□

Satz 5.48. $\{\phi(x, y, z) = 0\} = E$ x_0, y_0, z_0 eine Extremalstelle von f auf E :

$$\nabla f(x_0, y_0, z_0) = \lambda \nabla \phi(x_0, y_0, z_0)$$

$$\begin{cases} \phi(x_0, y_0, z_0) = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial x}(x_0, y_0, z_0) = \lambda \frac{\partial \phi}{\partial x}(x_0, y_0, z_0) \\ \frac{\partial f}{\partial y}(x_0, y_0, z_0) = \lambda \frac{\partial \phi}{\partial y}(x_0, y_0, z_0) \\ \frac{\partial f}{\partial z}(x_0, y_0, z_0) = \lambda \frac{\partial \phi}{\partial z}(x_0, y_0, z_0) \end{cases}$$

6 Integration in \mathbb{R}^n

Definition 6.1. Wir betrachten halboffene Würfel:

$$W := [a_1, b_1[\times [a_2, b_2[\times \cdots \times [a_n, b_n[$$

Mass (Volumen) von R

$$|R| := \prod_{i=1}^n (b_i - a_i)$$

Definition 6.2. Eine beschränkte Menge $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ist Peano-Jordan messbar falls $\forall \varepsilon > 0 \exists L_1$ und L_2 endliche Familien von disjunkten halboffenen Würfel gibt mit:

1. $\bigcup_{R \in L_1} R \subset \Omega \subset \bigcup_{R \in L_2} R$
2. $\sum_{R \in L_2} |R| - \sum_{R \in L_1} |R| < \varepsilon$

Lemma 6.3. Sei R eine endliche Familie von disjunkten und rechtsoffenen Rechtecken R mit $R \in \Omega$ und S dasselbe mit $\bigcup_{S \in \mathbb{C}} S \supset \Omega$. Falls Ω Peano-Jordan messbar ist, so gilt:

$$\sup \left\{ \sum_{R \in \mathbb{C}^1} |R| \right\} = \inf \left\{ \sum_{S \in \mathbb{C}} |S| \right\}$$

Diese Zahl ist das Mass der Menge Ω . Bezeichnung: $|\Omega|$

Beweis. Definition und

$$\bigcup_{R \in \mathbb{C}_1} R \subset \bigcup_{R \in \mathbb{C}_2} R \implies \sum_{R \in \mathbb{C}_1} |R| \leq \sum_{R \in \mathbb{C}_2} |R|$$

□

Eigenschaften

Satz 6.4. Setze $|\emptyset| := 0$ Seien Ω_1, Ω_2 messbar. Es gelten:

1. $\Omega_1 \cup \Omega_2, \Omega_1 \cap \Omega_2, \Omega_1 \setminus \Omega_2, \Omega_2 \setminus \Omega_1$ messbar und es gilt

$$|\Omega_1 \cup \Omega_2| = |\Omega_1| + |\Omega_2| - |\Omega_1 \cap \Omega_2|$$

2. Insbesondere gilt:

$$|\Omega_1 \cup \Omega_2| = |\Omega_1| + |\Omega_2|$$

falls $\Omega_1 \cap \Omega_2 = \emptyset$

3. Falls $\Omega_2 \subset \Omega_1$

$$|\Omega_1| = |\Omega_2| + |\Omega_1 \setminus \Omega_2|$$

und

$$|\Omega_1| \geq |\Omega_2|$$

Satz 6.5. 1. Sei A messbar mit $|A| = 0$. Dann ist jede Teilmenge von A messbar.

2. Sei Ω messbar, dann ist $\partial\Omega$ messbar und es gilt $|\partial\Omega| = 0$

Korollar 6.6. Sei Ω messbar, dann sind es auch $\overline{\Omega}$ und $\circ\Omega$

$$|\Omega| = |\overline{\Omega}| = |\circ\Omega|$$

Satz 6.7. Sei Ω beschränkt und $\partial\Omega$ \mathbb{C}^1 -Untermannigfaltigkeit. Dann ist Ω messbar.

Mass und Integral

Lemma 6.8. Sei $f[a, 1] \rightarrow \mathbb{R}^+$ stetig. Dann ist

$$\Omega = \{x, y) : 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq f(x)\} \subset \mathbb{R}^2$$

messbar und es gilt:

$$\int_0^1 f(t) dt = |\Omega|$$

Beweis. Unterteile $[0, 1]$ in n rechtsoffene Intervalle der Länge $\frac{1}{n}$ I_1, \dots, I_n . Sei $M_i := (\max_{I_i} f) + \frac{1}{n}$ und $m_i := (\min_{I_i} f)$.

$$\mathbb{C}_1 := \{I_i \times [a, M_i)\}$$

$$\mathbb{C}_2 := \{I_i \times [a, m_i)\}$$

ergibt rechtsoffene Rechtecke, die disjunkt sind.

$$\implies \cup_{R \in \mathbb{C}_1} R \supset \Omega \supset \cup_{R \in \mathbb{C}_2} R$$

Seien

$$A_n := \sum_{R \in \mathbb{C}_1} |R| = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} M_i$$

$$a_n := \sum_{R \in \mathbb{C}_2} |R| = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} m_i$$

d.h. A_n, a_n sind Integrale von Treppenfunktionen F_n, f_n mit $\|F_n - f\| \rightarrow 0, \|f_n - f\| \rightarrow 0$.

$$\implies \lim_{n \rightarrow \infty} A_n = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n \int_0^1 f(t) dt$$

d.h.

$$|\Omega| = \int_0^1 f(t) dt$$

□

Satz 6.9. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ messbar, $f : \overline{\Omega} \rightarrow \mathbb{R}^+$ stetig. Dann ist die Menge

$$\Gamma := \{(x_1, \dots, x_n, x_{n+1}) : (x_1, \dots, x_n) \in \Omega, 0 \leq x_{n+1} \leq f(x_1, \dots, x_n)\}$$

messbar.

Beweis. Eher eine Skizze. Sei $\varepsilon > 0$.

1. Wähle Funktionen $\mathbb{C}_1, \mathbb{C}_2$ disjunkter, rechtsoffener Rechte, so dass

$$\cup_{R \in \mathbb{C}_1} R \subset \Omega \subset \cup_{R \in \mathbb{C}_2} R$$

und

$$\left(\sum_{R \in \mathbb{C}_2} |R| - \sum_{R \in \mathbb{C}_1} |R| \right) < \varepsilon$$

2. Wähle eine Verfeinerung \mathbb{C}'_2 , so dass

$$\{R \cap S : R \in \mathbb{C}_2 \text{ \& } S \in \mathbb{C}_1\} \subset \mathbb{C}'_2$$

und

$$\cup_{R \in \mathbb{C}'_1} R = \cup_{R \in \mathbb{C}'_2}$$

3. Wähle eine weitere Verfeinerung (und bezeichne sie immer noch gleich), indem jedes Rechteck in 2^{Nn} gleichmässige Rechtecke aufgeteilt wird, so dass

$$\text{diam}(R) < \frac{1}{k} \quad \forall R \in \mathbb{C}'_2$$

Sei

$$\mathbb{C}'_1 := \{R \in \mathbb{C}'_2 : R \subset \Omega\}$$

Es gilt

$$\sum_{R \in \mathbb{C}'_2} |R| - \sum_{R \in \mathbb{C}'_1} |R| < \varepsilon$$

4. Nehme an, dass \mathbb{C}'_2 keine Rechtecke R enthält mit $R \cap \bar{\Omega} = \emptyset$ (falls ja, werfe sie (oBdA) weg). Def: für jedes Rechteck $R \in \mathbb{C}'_2$

$$M_R = \max_{\bar{R} \cap \bar{\Omega}} f + \varepsilon, \quad m_R := \min_{\bar{R} \cap \bar{\Omega}} f$$

$\bar{\Omega}$ kompakt $\implies f$ gleichmässig stetig $\implies \exists k$ gross genug:

$$\text{diam } R < \frac{1}{k} \implies M_R - m_R \leq 2\varepsilon$$

5. Def:

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_1 &:= \{R \times [a, m_R) : R \in \mathbb{C}'_1\} \\ \mathcal{S}_2 &:= \{R \times [a, M_R) : R \in \mathbb{C}'_2\} \\ &\implies \cup_{\tilde{R} \in \mathcal{S}_1} \tilde{R} \subset \Gamma \subset \cup_{\tilde{R} \in \mathcal{S}_2} \tilde{R} \end{aligned}$$

Es Gilt

$$\begin{aligned} & \sum_{\tilde{R} \in \mathcal{S}_2} |\tilde{R}| - \sum_{\tilde{R} \in \mathcal{S}_1} |\tilde{R}| \\ &= \sum_{\tilde{R} \in \mathbb{C}'_2 \setminus \mathbb{C}'_1} |\tilde{R}| M_R + \sum_{\tilde{R} \in \mathbb{C}'_1} |\tilde{R}| M_R - \sum_{\tilde{R} \in \mathbb{C}'_1} |\tilde{R}| m_R \\ &\leq (\varepsilon + \max_{\Omega} f) \underbrace{\sum_{\tilde{R} \in \mathbb{C}'_2 \setminus \mathbb{C}'_1} |\tilde{R}|}_{\leq \varepsilon} + \underbrace{(M_R - m_R)}_{\leq 2\varepsilon} \underbrace{\sum_{\tilde{R} \in \mathbb{C}'_1} |\tilde{R}|}_{|\Omega|} \\ &\leq \underbrace{(\varepsilon + \max_{\Omega} f + 2|\Omega| \varepsilon)}_{\leq C} \leq C\varepsilon \end{aligned}$$

d.h. die Behauptung: Ω messbar

□

Definition 6.10. f und Ω wie oben.

$$\int_{\Omega} f(x) \, dx := |\Gamma|$$

Falls $f \leq 0$, dann setze

$$\int_{\Omega} f := - \int_{\Omega} -f$$

Für allgemeines f : $f^+ := \max\{f, 0\}$, $f^- := \min\{f, 0\}$

$$\int_{\Omega} f := \int_{\Omega} f^+ + \int_{\Omega} f^-$$

Berechnung von Integralen

Satz 6.11. (Fubini) Sei $\Omega = [a_1, b_1] \times \cdots \times [a_n, b_n]$, $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^+$ stetig. Dann gilt:

$$\int_{\Omega} f = \int_{a_n}^{b_n} \int_{a_{n-1}}^{b_{n-1}} \cdots \int_{a_1}^{b_1} f(x_1, \dots, x_n) dx_1 \cdots dx_n$$

Beweis. (SKizze) OBdA: $a_1 = \cdots = a_n = b_1 = \cdots = b_n = 1$ Unterteile Ω in $\frac{1}{N^n}$ Würfel C

$$\int_C^{\sim} f := \int_{c_n}^{d_n} \cdots \int_{c_1}^{d_1} f(x_1, \dots, x_n) dx_1 \cdots dx_n$$

Es gilt

$$\int_C^{\sim} f \sum_C \int_C^{\sim} f$$

Setze:

$$M_C := \max_C f$$

$$m_C := \min_C f$$

Definition

$$A_C := \sum_C |C| M_C$$

$$a_C := \sum_C |C| m_C$$

Wie oben erhalten wir

$$\int_{\Omega} f := \lim_{N \rightarrow \infty} A_N = \lim_{N \rightarrow \infty} a_N$$

andererseits:

$$|C| m_C \leq \int_C^{\sim} f \leq |C| M_C$$

d.h.

$$a_N \leq \int_{\Omega}^{\sim} f \leq A_N$$

$$\Rightarrow \int_{\Omega}^{\sim} f = \int_{\Omega} f$$

□

Bemerkung 6.12. In der Tat gilt nicht nur

$$\lim_{N \rightarrow \infty} A_N = \int_{\Omega} f = \lim_{N \rightarrow \infty} a_N$$

Betrachte eine Unterteilung \mathcal{S} von Ω in Rechtecke der “Grösse” $\leq \varepsilon$, d.h. $\text{diam } R \leq \varepsilon$. Für $S \in \mathcal{S}$ wähle $x_S \in S$. Definiere Riemannsche Summe:

$$R(\varepsilon) = \sum_{S \in \mathcal{S}} f(x_S) |S|$$

Dann gilt:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} R(\varepsilon) = \int_{\Omega} f$$

Definition 6.13. (Normaler Bereich) Eine Menge $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ heisst normal, falls es ein Koordinatensystem und zwei Funktionen $f \geq g$ (stetig) und $a_i \leq b_i$ $i \in \{1, \dots, n+1\}$ gibt so dass

$$\Omega = \{(x_1, \dots, x_n, x_{n+1}) : a_+ \leq x_1 \leq b_+, \dots, a_{n-1} \leq x_{n-1} \leq b_{n-1}, g(x_1, \dots, x_{n-1}) \leq x_n \leq f(x_1, \dots, x_{n-1})\}$$

Bemerkung 6.14. Man zeigt: Ist Ω normal, so gilt:

$$\int_{\Omega} F := \int_{a_1}^{b_1} \cdots \int_{a_{n-1}}^{b_{n-1}} \int_{a_n}^{b_n} F(x_1, \dots, x_n)$$

Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen mit $\partial\Omega$ \mathbb{C}^1 -Untermanigfaltigkeit. Dann gilt $\forall x \in \partial\Omega \exists$ Würfel C so dass $C \cap \Omega$ normal ist. Da $\bar{\Omega}$ kompakt ist, lässt sich Ω mit endlich vielen solchen Würfeln überdecken.

Definition 6.15. Eine Teilmenge $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ heisst normal falls \exists (ein System von Koordinaten) und zwei Funktionen

$$g \leq f : \underbrace{\Omega'}_{\subset \mathbb{R}^{n-1}} \rightarrow \mathbb{R}$$

so dass

$$\Omega' = [a_1, b_1] \times [a_2, b_2] \times \cdots \times [a_{n-1}, b_{n-1}]$$

und

$$\Omega = \{x : (x_1, \dots, x_{n-1}) \in \Omega' \text{ und } g(x_1, \dots, x_{n-1}) \leq x_n \leq f(x_1, \dots, x_{n-1})\}$$

Beispiel 6.16. in zwei Dimensionen

Bemerkung 6.17. In diesem Fall

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} F &= \int_{a_1}^{b_1} \left(\int_{a_2}^{b_2} \left(\cdots \int_{a_{n-1}}^{b_{n-1}} \overbrace{\left(\int_{g(x_1, \dots, x_{n-1})}^{f(x_1, \dots, x_{n-1})} F(x_1, \dots, x_{n-1}, x_n) dx_n \right)}^{G(x_1, \dots, x_{n-1})} dx_{n-1} \right) \cdots \right) dx_1 \\ &= \int_{a_1}^{b_1} \cdots \int_{a_{n-1}}^{b_{n-1}} \int_{g(x_1, \dots, x_{n-1})}^{f(x_1, \dots, x_{n-1})} F(x_1, \dots, x_{n-1}, x_n) dx_n \cdots dx_1 \end{aligned}$$

Bemerkung 6.18. Wichtig: die Funktion

$$G(x_1, \dots, x_{n-1}) = \int_{g(x_1, \dots, x_{n-1})}^{f(x_1, \dots, x_{n-1})} F(x_1, \dots, x_{n-1}, x_n) dx_n$$

ist stetig (ohne Beweis)

Bemerkung 6.19. in 2d mit $F = 1$ ist die Formel

$$\text{Inhalt von } \Omega = \int_{a_1}^{b_1} \left(\int_{g(x_1)}^{f(x_1)} 1 dx_2 \right) dx_1 = \int_{a_1}^{b_1} (f(x_1) - g(x_1)) dx_1$$

\forall Intervall I_i

$$m_i = \min_{I_i} f$$

$$M_i = \max_{I_i} f$$

$$\underbrace{\bigcup_{i=1}^N I_i x[0, m_i]}_{\text{Mass} = \sum_{i=1}^N \frac{b-a}{N} m_i} \subset \Omega \subset \underbrace{\bigcup_{i=1}^N I_i \times [0, M_i]}_{\text{Mass} = \sum_{i=1}^N \frac{b-a}{N} M_i}$$

Sei $\varepsilon > 0$ gegeben aus der gleichmässigen Stetigkeit von $f \exists N_0 > 0$ so dass

$$M_i - m_i < \varepsilon \quad \forall \text{ Zerlegung mit } N \geq N_0$$

So Mass Aussen - Mass Innen

$$\begin{aligned} &= \sum_{i=1}^N \frac{b-a}{N} (M_i - m_i) \\ &\leq \varepsilon \sum_{i=1}^N \frac{b-a}{N} \varepsilon (b-a) \end{aligned}$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} (\text{Mass Aussen} - \text{Mass Innen}) = 0$$

$$\begin{aligned}\Omega &= \left\{ (x_1, x_2, x_3) : (x_1, x_2) \in \Omega - \sqrt{1 - (x_1^2 + x_2^2)} \leq x_3 \leq \sqrt{1 - (x_1^2 + x_2^2)} \right\} \\ \Omega' &= \{x_1^2 + x_2^2 \leq 1\} = \left\{ x_1 \in [-1, 1], -\sqrt{1 - x_1^2} \leq x_2 \leq \sqrt{1 - x_1^2} \right\} \\ 1 &= \left(\sqrt{x_1^2 + x_2^2} \right)^2 + f(x_1, x_2)^2 \\ f(x_1, x_2) &= \sqrt{1 - (x_1^2 + x_2^2)}\end{aligned}$$

Definition 6.20. Ultrnormale Bereiche \exists ein System von Koordinaten und $a_1 \leq b_1$

$$\begin{aligned}\Omega_1 &= [a_1, b_1] \\ f_2, g_2 &: \Omega_1 \rightarrow \mathbb{R} \\ \Omega_2 &= \{(x_1, x_2) : x_1 \in \Omega_1, f_2(x_1) \leq x_2 \leq g_2(x_1)\} \\ f_3, g_3 &: \Omega_2 \rightarrow \mathbb{R} \\ \Omega_3 &= \{(x_1, x_2, x_3) : (x_1, x_2) \in \Omega_2, f_3(x_1, x_2) \leq x_3 \leq g_3(x_1, x_2)\} \\ \Omega = \Omega_n &= \{(x_1, \dots, x_{n-1}, x_n) : (x_1, \dots, x_{n-1}) \in \Omega_{n-1}, f_n(x_1, \dots, x_{n-1}) \leq x_n \leq g_n(x_1, \dots, x_{n-1})\}\end{aligned}$$

Bemerkung 6.21. In diesem Fall

$$\int_{\Omega} F = \int_{a_1}^{b_1} \int_{f_2(x_1)}^{g_2(x_1)} \int_{f_3(x_1, x_2)}^{g_3(x_1, x_2)} \dots \int_{f_n(x_1, \dots, x_{n-1})}^{g_n(x_1, \dots, x_{n-1})} F(x_1, \dots, x_{n-1}, x_n) dx_n \dots dx_3 dx_2 dx_1$$

Beispiel 6.22. Inhalt einer 3d Kugel mit Radius 1

$$\begin{aligned}&= \int_{-1}^1 \int_{-\sqrt{1-x_1^2}}^{\sqrt{1-x_1^2}} \int_{-\sqrt{1-(x_1^2+x_2^2)}}^{\sqrt{1-(x_1^2+x_2^2)}} 1 dx_3 dx_2 dx_1 = \\ &\int_{-1}^1 \int_{-\sqrt{1-x_1^2}}^{\sqrt{1-x_1^2}} (\sqrt{1-(x_1^2+x_2^2)} + \sqrt{1-(x_1^2+x_2^2)}) 1 dx_2 dx_1 \\ &= \frac{4\pi}{3}\end{aligned}$$

Satz 6.23. Sei Ω eine Menge, die:

1. beschränkt ist
2. dessen Rand eine \mathbb{C}^1 -Mannigfaltigkeit ist

Dann: Ω ist Peano-Jordan messbar \exists eine Zerlegung von Ω in endlich viele ultrnormale Bereiche. \implies Formel $\int_{\Omega} F$ (wenn F eine stetig Funktion ist)

Ziel den Inhalt $B_1(0) \subset \mathbb{R}^3$ zu berechnen

Beweis. Sei $\Omega = \{x_1^2 + x_2^2 \leq r^2\} \subset \mathbb{R}^2$, $I = [a, b] \subset \mathbb{R}$ $\Omega \times I \subset \mathbb{R}^3$. $\Omega \times I$ ist messbar und Inhalt $= \pi r^2(b-a)$ Ω ist ein normaler Bereich:

$$\begin{aligned}&\left\{ (x_1, x_2) : x_1 \in [-1, 1], -\sqrt{1-x_1^2} \leq x_2 \leq \sqrt{1-x_1^2} \right\} \\ \Omega \times I &= \{(x_1, x_2, x_3) : (x_1, x_2) \in \Omega \text{ und } a \leq x_3 \leq b\}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Inhalt} &= \int_{-1}^1 \int_{-\sqrt{1-x_1^2}}^{\sqrt{1-x_1^2}} \int_a^b 1 dx_3 dx_2 dx_1 \\ &= (b-a) \left(\int_{-1}^1 \int_{-\sqrt{1-x_1^2}}^{\sqrt{1-x_1^2}} 1 dx_2 dx_1 \right) \\ &= (b-a) = \int_{\Omega} 1 = (b-a) \text{Inhalt}(\Omega) = (b-a) \pi r^2\end{aligned}$$

$$I_i = [a_i, b_i] \times [-\sqrt{1-a_i^2}, \sqrt{1-a_i^2}]$$

Rotation: Zylinder

$$[a_i, b_i] \times \left\{ x_2^2 + x_3^2 < \overbrace{1-a_i^2}^{r^2} \right\}$$

$b_i - a_i = \frac{1}{N}$ $2N$ Intervalle:

$$\underbrace{\cup_{i=1}^{2N}}_{\Omega_N} \subset B_i(0) \subset \cup_{i=1}^{2N} c_i^a$$

Zylinder

$$c_i^a = [a_i, b_i] \times \{x_2^2 + x_3^2 = 1 - b_i^2\}$$

Ω_N ist messbar und

$$\begin{aligned} \text{Inhalt } I &= \sum_{i=1}^{2N} (b_i - a_i) \pi \overbrace{(1 - a_i^2)}^{f(a_i)} \\ \text{Inhalt } A &= \sum_{i=1}^{2N} (b_i - a_i) \pi \overbrace{(1 - b_i^2)}^{f(b_i)} \end{aligned}$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \text{Inhalt } I = \int_{-1}^1 \pi(1-x^2) dx = \pi(x - \frac{x^3}{3}) \Big|_{-1}^1 = \pi \left(\frac{2}{3} \left(\frac{2}{3} \right) \right) = \frac{4\pi}{3}$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \text{Inhalt } I = \int_{-1}^1 \pi(1-x^2) dx = \pi = \dots = \frac{4\pi}{3}$$

Wenn die Kugel Radius r hat

$$\int_{-r}^r \pi(r^2 - x^2) dx = \pi \left(xr^2 - \frac{x^3}{3} \right) \Big|_{-r}^r = \frac{4}{3} \pi r^3$$

Der Inhalt von

$$B_1(0) = \overbrace{\sup_{\text{Innere Approximation}} (\text{Inhalt } I)}^S = \overbrace{\inf_{\text{Äussere Approximation}} \text{Inhalt } A}^I$$

$$S \leq \frac{4\pi}{3}$$

der Limes von einer Folge von äusseren Approximation. "Konkrete" innere Approximation:

$$S \geq \lim_{N \rightarrow \infty} \text{Inhalt } I = \frac{4\pi}{3}$$

$S = \frac{4\pi}{3}, I = \frac{4\pi}{3} \implies$ Messbarkeit von $B_1(0)$ und Formel $= \frac{4\pi}{3}$ □

Beweis. "Richtiger" $S = \frac{4\pi}{3}$ Sei nun $\cup_{i=1}^M W_i \subset \cup_{i=1}^{2N} C_i^a$ eine Innere Approximation.

$$\text{Inhalt}(\cup_{i=1}^M W_i) = \sum_{i=1}^M |W_i| \leq \lim_{N \rightarrow \infty} \underbrace{\sum_{j=1}^{2N} \text{Inhalt}(C_j^a)}_{A_N} \leq \frac{4\pi}{3}$$

$$\implies S \leq \frac{4\pi}{3}$$

$$I_N := \sum_{i=1}^{2N} \text{Inhalt}(C_i) = \sup_{\text{Erlaubte innere Approximation von } \cup_{i=1}^{2N} C_i}$$

$\implies \exists$ eine innere Approximation mit Würfel von $\cup_{i=1}^{2N} C_i$ W_1, \dots, W_N so dass

$$\sum_{i=1}^N \text{Inhalt}(W_i) \geq I_N - \frac{1}{N}$$

Deswegen

$$S \geq I_N \frac{1}{N}$$

weil $\cup_{i=1}^{N'} W_i$ eine innere Approximation für $B_1(0)$ ist

$$S \geq \lim_{N \rightarrow \infty} \left(I_N - \frac{1}{N} \right) = \frac{4\pi}{3}$$

□

7 Divergenz, Rotation, Gauss-Theorem, Stokes

Fundamentalsatz der Integralrechnung:

$$\int_a^b f'(t) \, dt = f(b) - f(a)$$

Definition 7.1. Ein Vektorfeld ist eine Abbildung

$$v : \underbrace{\Omega}_{\subset \mathbb{R}^n} \rightarrow \mathbb{R}^n$$

Definition 7.2. Sei $v : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ differenzierbar $v = (v_1, \dots, v_n)$, $(v_i : \Omega \rightarrow \mathbb{R})$, (x_1, \dots, x_n) Koordinaten in \mathbb{R}^n . Die Divergenz von v ist

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = \operatorname{div} v (= \nabla v)$$

Definition 7.3. Sei $v : \underbrace{\Omega}_{\subset \mathbb{R}^3} \rightarrow \mathbb{R}^3$ differenzierbar. Dann ist die Rotation von v

$$\nabla \times v = \left(\frac{\partial v_2}{\partial x_3} - \frac{\partial v_3}{\partial x_2}, \frac{\partial v_3}{\partial x_1} - \frac{\partial v_1}{\partial x_3}, \frac{\partial v_1}{\partial x_2} - \frac{\partial v_2}{\partial x_1} \right)$$

Bemerkung 7.4. Falls $v = \nabla \phi$ und $\phi \in \mathbb{C}^2$, dann

$$\begin{aligned} \nabla \times v &= 0 \\ v &= \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_1}, \frac{\partial \phi}{\partial x_2}, \frac{\partial \phi}{\partial x_3} \right) \\ \nabla \times v &= \left(\underbrace{\frac{\partial}{\partial x_3} \frac{\partial \phi}{\partial x_2} - \frac{\partial}{\partial x_2} \frac{\partial \phi}{\partial x_3}}_{=0}, \underbrace{\dots}_{=0}, \underbrace{\dots}_{=0} \right) \end{aligned}$$

Bemerkung 7.5. Mit einigen Ausnahmen über dem Definitionsbereich gilt auch

$$\nabla \times v = 0 \implies v = \nabla \phi$$

(z.B. gilt das wenn $\Omega = B_\Omega(x)$ und $v \in \mathbb{C}^1$)

Kurvenintegral Sei $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ eine stetige Funktion. Sei $\gamma : [0, 1] \rightarrow \underbrace{\Omega}_{\subset \mathbb{R}^n}$ eine \mathbb{C}^1 -Kurven die auch injektiv ist.

Definition 7.6. Das Kurvenintegral von f auf γ ist:

$$\begin{aligned}\int_{\gamma} f &:= \int_a^b f(\gamma(t)) \|\dot{\gamma}(t)\| dt \\ &= \int_a^b f(\gamma_1(t), \dots, \gamma_n(t)) \sqrt{\gamma_1'(t)^2 + \dots + \gamma_n'(t)^2} dt\end{aligned}$$

Bemerkung 7.7. Die Länge von γ

$$\int_{\gamma} 1 = \int_a^b \|\dot{\gamma}(t)\| dt$$

Die intuitive Erklärung

$$\|\gamma(t) - \gamma(a)\| \sim \|\dot{\gamma}(a)(t_1 - a)\| = \|\dot{\gamma}(a)\| (t_1 - a)$$

$$\sum < \text{Länge} \sim \underbrace{\sum_i \left\| \underbrace{\dot{\gamma}(t_i)}_{g(t_i)} \right\| (t_i - t_{i-1})}_{= \int_a^b g}$$

Definition 7.8. eine \mathbb{C}^1 -Abbildung Φ von einem Gebiet $\underbrace{\Omega}_{\subset \mathbb{R}^2} \rightarrow \mathbb{R}^3$ ist eine Parametrisierung der Fläche $\Phi(\Omega)$ falls

1. Φ injektiv ist
2. $d\Phi|_p$ maximaler Rang hat $\forall p \in \Omega$ (d.h. kein Kern)

Satz 7.9. Sei $f : \Omega' \rightarrow \mathbb{R}$ eine stetige Funktion mit $\overline{\Phi(\Omega)} \subset \Omega'$. Angenommen dass Ω Peano-Jordan messbar ist, dann

$$\int_{\Phi(\Omega)} f := \int_{\Omega} f \circ \Phi J\Phi$$

Wobei

$$J\Phi = \sqrt{\det(d\Phi^T d\Phi)} = \sqrt{\left\| \frac{\partial \Phi}{\partial x_1} \right\|^2 \left\| \frac{\partial \Phi}{\partial x_2} \right\|^2 - \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x_1} \frac{\partial \Phi}{\partial x_2} \right)^2}$$

$$d\Phi = \begin{pmatrix} \frac{\partial \Phi_1}{\partial x_1} & \frac{\partial \Phi_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial \Phi_2}{\partial x_1} & \frac{\partial \Phi_2}{\partial x_2} \\ \frac{\partial \Phi_3}{\partial x_1} & \frac{\partial \Phi_3}{\partial x_2} \end{pmatrix}$$

$$d\Phi^T d\Phi = \frac{\partial \Phi}{\partial x_1} \begin{pmatrix} \frac{\partial \Phi}{\partial x_1} & \frac{\partial \Phi}{\partial x_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left\| \frac{\partial \Phi}{\partial x_1} \right\|^2 & \frac{\partial \Phi}{\partial x_1} \frac{\partial \Phi}{\partial x_2} \\ \frac{\partial \Phi}{\partial x_1} \frac{\partial \Phi}{\partial x_2} & \left\| \frac{\partial \Phi}{\partial x_2} \right\|^2 \end{pmatrix}$$

$$\det(d\Phi^T d\Phi) = \left\| \frac{\partial \Phi}{\partial x_1} \right\|^2 \left\| \frac{\partial \Phi}{\partial x_2} \right\|^2 - \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x_1} \frac{\partial \Phi}{\partial x_2} \right)^2$$

Bemerkung 7.10. Kein Kern und Cauchy-Schwarz $\implies J\Phi > 0 \implies \text{Inhalt}(\Phi(B_\varepsilon(x_0))) > 0$

Beweis. Sei $\Phi : (x_1, x_2) = (x_1, x_2, f(x_1, x_2))$. Wenn $f \in \mathbb{C}^1$, ist auch $\Phi \in \mathbb{C}^1$.

1. stimmt $\Phi(p) \neq \Phi(q)$ falls $p \neq q \in \Omega$

2.

$$d\Phi|_{(a,b)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \frac{\partial f}{\partial x_1}(a,b) & \frac{\partial f}{\partial x_2}(a,b) \end{pmatrix}$$

$$\implies \text{Rand } d\Phi|_{(a,b)} = 2$$

$$\begin{aligned} \text{Inhalt} &= \int_{\Omega} J\phi = \sqrt{\underbrace{\left\| \frac{\partial \Phi}{\partial x_1} \right\|^2}_{\left(1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2\right)} \underbrace{\left\| \frac{\partial \Phi}{\partial x_2} \right\|^2}_{\left(1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2\right)} - \underbrace{\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x_1} \frac{\partial \Phi}{\partial x_2} \right)^2}_{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2}} \\ &= \int_{\Omega} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2} \end{aligned}$$

□

Beispiel 7.11. $f(x_1, x_2) = ax_1$

$$\begin{aligned} &\int_R \sqrt{1 + a^2 + 0^2} \\ &= \int_R \sqrt{1 + a^2} \\ &= \int_0^b \int_{-c}^c \sqrt{1 + a^2} \, dx_2 \, dx_1 \\ &= \int_0^b 2c\sqrt{1 + a^2} \, dx_1 = 2cb\sqrt{1 + a^2} \end{aligned}$$

Von diesem einfachen Fall \implies das Gleiche für allgemeine Abbildungen derart $f(x_1, x_2) = c + ax_1 + bx_2$ (eine affine Funktion)

Bemerkung 7.12. Triangulierung - sehr problematisch.

$$\sum_{\text{Dreiecke } T_i} \sqrt{1 + \frac{\partial f}{\partial x_1}(p_i)^2 + \frac{\partial f}{\partial x_2}(p_i)^2} \text{Inhalt}(T_i) \rightarrow \int_{\Omega} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2}$$

Bemerkung 7.13. Sei $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ \mathcal{C}^1 Abb., $g : \Omega_{\mathbb{C}\mathbb{R}^2} \rightarrow \mathbb{R}$ \mathcal{C}^1 Abb.

$$\begin{aligned} \gamma : I &\rightarrow \mathbb{R}^2 \gamma(t) := (t, f(t)) \\ \Phi : \Omega &\rightarrow \mathbb{R}^3 \Phi(x_1, x_2) = (x_1, x_2, g(x_1, x_2)) \\ \implies \|\dot{\gamma}\| &> 0 (\|\dot{\gamma}\| = \sqrt{1 + f'^2}) \\ J\Phi &= \sqrt{\det d\Phi^T d\Phi} = \sqrt{1 + \frac{\partial f_2}{\partial x_1} + \frac{\partial f_2}{\partial x_2}} \end{aligned}$$

 $\implies d\Phi$ hat maximalen Rang auf jedem Punkt (d.h. Rang = 2).

$$\dot{\gamma}(t) = (1, f'(t))$$

die Tangente

$$(y - f(x_0)) = f'(x_0)(x - x_0)$$

 $(z, w) \in$ Tangente

$$\iff (z, w) = (x_0, f(x_0)) + ((x - x_0), f'(x)(x - x_0))$$

Tangente =

$$\left\{ \underbrace{(x_0, f(x_0)) + (t, f'(x_0)t)}_{(x_0, f(x_0)) + t(1, f'(x_0))}, t \in \mathbb{R} \right\}$$

Für den Graph von g ist die tangente Ebene in p die folgende Menge:

$$\pi_p = \left\{ (a, b, f(a, b)) + s(1, \frac{\partial g}{\partial x_1}(a, b), 0) + t(1, 0, \frac{\partial g}{\partial x_2}(a, b)) \right\}$$

Die beiden Tangenten sind in der oberen Gleichung mit jeweils $t = 0$ bzw. $s = 0$ enthalten und bilden die Tangentialebene π_p .

Definition 7.14. Wenn $\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^2$ eine \mathcal{C}^1 Kurve ist mit

1. γ injektiv
2. $\|\dot{\gamma}\| > 0$

dann ist der Vektor

$$n(t) = \frac{(-\gamma'_2(t), \gamma'_1(t))}{\|\dot{\gamma}(t)\|}$$

ist das Normalvektorfeld auf γ

Bemerkung 7.15.

$$\|n(t)\| = 1$$

Bemerkung 7.16.

$$n(t) \perp \dot{\gamma}(t)$$

Beispiel 7.17.

$$\begin{aligned} \gamma(t) &= (t, f(t)) \\ \dot{\gamma}(t) &= (1, f'(t)) \\ n(t) &= (-f'(t), 1) \end{aligned}$$

Wenn man die Kurve anders parametrisiert:

$$\begin{aligned} \gamma(t) &= (1-t, f(1-t)) \\ \dot{\gamma}(t) &= (-1, -f'(1-t)) \\ n(t) &= (f'(1-t), -1) \end{aligned}$$

Zeigt der Normalenvektor in die gegengesetzte Richtung.

Satz 7.18. Sei Ω eine offene Menge in \mathbb{R}^2 so dass $\partial\Omega$ eine \mathcal{C}^1 -Mannigfaltigkeit ist. D.h. $\partial\Omega$ ist "lokal" ein Graph einer \mathcal{C}^1 Funktion. In diesem Fall ist $\mu(p)$ das externe Vektorfeld $n(p)$ mit der äusseren Parametrisierung wenn die Menge unter dem Graphen der Funktion ist, sonst $n(p)$ mit der inneren.

Definition 7.19. Falls $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ ein normaler Bereich ist

$$\Omega = \{(x_1, x_2); x_1 \in]a, b[, f(x_1) < x_2 < g(x_1)\}$$

Oben wird mit

$$\mu(x_1, g(x_1)) = \frac{(-g'(x_1), 1)}{\sqrt{g'(x_1)^2 + 1}}$$

parametrisiert, unten mit

$$\mu(x_1, f(x_1)) = \frac{(f'(x_1), -1)}{\sqrt{f'(x_1)^2 + 1}}$$

An den Seiten ist $\mu = (1, 0)$, bzw. $\mu = (-1, 0)$

7.1 Satz von Gauss in 2d

Satz 7.20. Sei Ω eine beschränkte offene Menge in \mathbb{R}^2 so dass

1. entweder $\partial\Omega$ eine \mathcal{C}^1 Mannigfaltigkeit ist
2. oder Ω ein normaler Bereich ist

Sei $B : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ ein \mathcal{C}^1 -Vektorfeld.

$$\int_{\Omega} \operatorname{div} B = \int_{\partial\Omega} B\mu$$

Bemerkung 7.21.

$$\int_{\partial\Omega} B\mu = \sum \int_{\gamma_i} B\mu_i = \int_{J_i} B(\gamma(s))\mu(\gamma(s)) \|\dot{\gamma}(s)\| \, ds$$

Bemerkung 7.22. Konvention: Parametrisierung ausserhalb im Uhrzeigersinn, innerhalb gegen den Uhrzeigersinn.

Beweis. Als Übung zu Hause: Quadrat. Wir beweisen ein Dreieck.

$$\int_{T_1} \operatorname{div} B = \int_{\partial T_1} \mu B \qquad \int_{T_2} \operatorname{div} B = \int_{\partial T_2} \mu B$$

$$\int_R \operatorname{div} B = \int_{T_1} V\mu + \int_{T_2} B\mu \stackrel{?}{=} \int_{\partial R} B\mu$$

Plan:

1. Wir beweisen das Theorem für Dreiecke
2. Wir approximieren ein allgemeines Ω mit Dreiecken. (Skizze)

$$\begin{aligned}
& \int_{\Omega} \div B \sim \sum \int_{T_i} \div B \\
& = \sum_{i=1}^N \int_{\partial\Omega} B\mu = \sum_{j=1}^{\overline{N}} \int_{\sigma_j} B\mu = \sum_{\sigma \text{ am Rand}} \int B\mu \\
& \sim \int_{\partial\Omega} B\mu \\
& T = \left\{ (x_1, x_2) : 0 < x_1 < a, 0 < x_2 < \frac{b}{a}x_1 \right\} \\
& B = (b_1, b_2) \\
& \int_T \frac{\partial b_1}{\partial x_1} + \frac{\partial b_2}{\partial x_2} = \int_T \frac{\partial b_1}{\partial x_2} + \int_T \frac{\partial b_2}{\partial x_1} \\
& \int_T \frac{\partial b_2}{\partial x_2} = \int_0^a \left(\int_0^{\frac{b}{a}x_1} \frac{\partial b_2}{\partial x_2}(x_1, x_2) dx_2 \right) dx_1 \\
& = \int_0^a (b_2(x_1, \frac{b}{a}x_1) - b_2(x_1, 0)) dx_1 \\
& \int_T \frac{\partial b_1}{\partial x_1} = \int_0^b \int_{\frac{a}{b}x_2}^a \frac{\partial b_1}{\partial x_1}(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \\
& = \int_0^b (b_1(a, x_2) - b_1(\frac{a}{b}x_2, x_2)) dx_2 \\
& \int_T \div B = \underbrace{\int_0^b b_1(a, x_2)}_{\text{red}} - \underbrace{\int_0^a b_2(x_1, 0)}_{\text{green}} + \int_0^a b_2\left(x_1, \frac{b}{a}x_1\right) dx_1 - \int_0^b b_1\left(\frac{a}{b}x_2, x_2\right) dx_2 \\
& t = \frac{a}{b}x_2 \\
& \int_0^a b_2\left(t, \frac{b}{a}t\right) dt - \int_0^a b_1\left(t, \frac{b}{a}t\right) \frac{b}{a} dt \\
& \int_T B\mu \int_0^b b(a, t) dt + \int -b_2(t, 0) dt + \int \\
& \gamma(t) = (a, t) \\
& \mu = (1, 0) \\
& B\mu = b_1(a, t) \\
& \gamma : [0, b] \rightarrow \mathbb{R}^2 \\
& \|\dot{\gamma}\| = 1 \\
& \dots = \int_0^a \left(b_2\left(t, \frac{b}{a}t\right) - b_1\left(t, \frac{b}{a}t\right) \frac{b}{a} \right) dt \\
& \gamma[0, a] \rightarrow \mathbb{R}^2 \\
& \gamma(t) = \left(t, \frac{b}{a}t \right) \\
& n(t) = \frac{(-\gamma_2'(t), \gamma_1'(t))}{\|\gamma'(t)\|} = \frac{(-\frac{b}{a}, 1)}{\|\gamma'(t)\|} \\
& \int_0^a B(\gamma(t))n(t) \|\dot{\gamma}(t)\| dt \\
& \int_0^a \left(b_1\left(t, \frac{b}{a}t\right), b_2\left(t, \frac{b}{a}t\right) \right) \frac{(-\frac{b}{a}, 1)}{\|\dot{\gamma}(t)\|} \|\dot{\gamma}(t)\| dt \\
& \int_T \frac{\partial b_1}{\partial x_1} = \int_0^b \int_{\frac{a}{b}x_2}^a \frac{\partial b_1}{\partial x_1}(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \\
& = \int_0^b (b_1(a, x_2) - b_1(\frac{a}{b}x_2, x_2)) dx_2
\end{aligned}$$

□

7.2 Gauss-Green in 3d

Bemerkung 7.23. Sei $\underbrace{\Omega}_{\mathbb{R}^2} \rightarrow \mathbb{R}^3$ gute Parametrisierung der Fläche $\Phi(\Omega)$

$$\begin{aligned}\partial_{x_1}\Phi &= \left(\frac{\partial\Phi_1}{\partial x_1}, \frac{\partial\Phi_2}{\partial x_1}, \frac{\partial\Phi_3}{\partial x_1} \right) \\ \partial_{x_2}\Phi &= \left(\frac{\partial\Phi_1}{\partial x_2}, \frac{\partial\Phi_2}{\partial x_2}, \frac{\partial\Phi_3}{\partial x_2} \right)\end{aligned}$$

erzeugen den Tangentialraum T_q . Präziser: T_q , der Tangentialraum an $\Phi(\Omega)$ im Punkt $q = \Phi(p)$, ist gegeben durch

$$T_q = \{\Phi(p) + t\partial_{x_1}\Phi(p) + s\partial_{x_2}\Phi(p), s, t \in \mathbb{R}\}$$

Nun:

$$n_q := \frac{\partial_{x_1}\Phi(p) \times \partial_{x_2}\Phi(p)}{\|\partial_{x_1}\Phi(p) \times \partial_{x_2}\Phi(p)\|}$$

steht senkrecht auf T_q und $\|n_q\| = 1$. Falls Φ gut (regulär) ist, ist $\|\partial_{x_1}\Phi \times \partial_{x_2}\Phi\| > 0$, d.h. n_q ist wohldefiniert. Aber: auch $-n_q$ steht senkrecht auf T_q und hat Norm 1.

Bemerkung 7.24. Φ ist eine (reguläre) Parametrisierung falls

1. $\Phi \in \mathcal{C}^1$
2. Φ injektiv
3. $\text{Rang}(\Phi) = 2$

\implies

1. T_q ist wohldefiniert
2. T_q ist eine 2-dimensionale Ebene

Beispiel 7.25. Sei $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R} \in \mathcal{C}^1$ und betrachte den Graph

$$G := \{(x_1, x_2, f(x_1, x_2)), (x_1, x_2) \in \Omega\}$$

Wir wissen: $\Phi : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^3, (x_1, x_2) \mapsto (x_1, x_2, f(x_1, x_2))$ ist eine gute Parametrisierung. Weiter:

$$\partial_{x_1}\Phi = \left(1, 0, \frac{\partial f}{\partial x_1}\right), \partial_{x_2}\Phi = \left(0, 1, \frac{\partial f}{\partial x_2}\right)$$

Also:

$$n_q = \frac{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, 1\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2}}$$

Definition 7.26. Sei Ω offen mit $\partial\Omega$ ist \mathcal{C}^1 -Untermannigfaltigkeit (2-dim)

$$\implies \forall q \in \partial\Omega \quad B_\rho(q) : B_\rho(q) \cap \partial\Omega$$

ist der Graph einer \mathcal{C}^1 -Funktion $f : \mathbb{R}_{x_{i_1}, x_{i_2}}^2 \rightarrow \mathbb{R}_{x_{i_3}}$ z.B. $x_3 = f(x_1, x_2)$, aber auch $x_1 = f(x_2, x_3), x_2 = f(x_3, x_1)$. Wichtig: Reihenfolge betrachten, d.h. $(1, 2, 3), (3, 1, 2), (2, 3, 1)$. Jetzt: oBdA $i_1 = 1, i_2 = 2, i_3 = 3$. Dann gilt

1. entweder

$$B_\rho(q) \cap \Omega = B_\rho(q) \cap \{x : x_3 < f(x_1, x_2)\}$$

Dann setze:

$$\mu(q) = \frac{\partial_{x_1}\Phi(p) \times \partial_{x_2}\Phi(p)}{\|\partial_{x_1}\Phi(p) \times \partial_{x_2}\Phi(p)\|}$$

wobei Φ wie im Bsp oben

2. oder

$$B_\rho(q) \cap \Omega = B_\rho(q) \cap \{x : x_3 > f(x_1, x_2)\}$$

Dann setze:

$$\mu(q) = -\frac{\partial_{x_1}\Phi(p) \times \partial_{x_2}\Phi(p)}{\|\partial_{x_1}\Phi(p) \times \partial_{x_2}\Phi(p)\|}$$

μ heist äussere Einheitsnormale

Bemerkung 7.27. Nahe der meisten Punkte auf $\partial\Omega$ ist $\partial\Omega$ der Graph einer Funktion bezüglich mehrerer “unabhängiger” Variablen. $\mu(q)$ hängt nicht von dieser Wahl ab!

Bemerkung 7.28. Falls Ω “unter” dem Graphen liegt, “zeigt” μ nach oben. Falls Ω “über” dem Graphen liegt, “zeigt” μ nach unten.

Satz 7.29. Sei Γ beschränkt und offen in \mathbb{R} mit $\partial\Gamma$ \mathcal{C}^1 -Untermannigfaltigkeit. Sei $B\mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^k$ ein \mathcal{C}^1 -Vektorfeld.

$$\implies \int_\Gamma \div B = \int_{\partial\Gamma} B\mu \quad (48)$$

Um die rechte Seite zu berechnen, “schneiden” wir $\partial\Gamma$ in Graphen und summieren wir die Integrale über die Graphen auf. Für das Integral über den Graphen verwenden wir die Parametrisierung wie im Beispiel.

$$\begin{aligned} \int_{\partial\Gamma} B\mu &= \int_\Omega B(\Phi(p))\mu(\Phi(p))J\Phi(p) \, dp \\ &= \int_\Omega B(x_1, x_2, f(x_1, x_2)) \frac{\left(-\frac{\partial f}{\partial x_1}, -\frac{\partial f}{\partial x_2}, 1\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2}} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2} \\ &= \int_\Omega (-B_1(x, f(x))\frac{\partial f}{\partial x_1} - (-B_2(x, f(x))\frac{\partial f}{\partial x_2} + B_3(x, f(x))) \, dx \end{aligned}$$

Bemerkung 7.30. Man müsste wieder zeigen, dass $\int B\mu$ nicht von der Unterteilung in Graphen abhängt.

Definition 7.31. Sei Γ ein normaler Bereich in \mathbb{R}^3 .

$$\Gamma = \{(x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3 : (x_1, x_2) \in \Omega, f(x_1, x_2) < x_3 < g(x_1, x_2)\} \quad (49)$$

Definiere den oberen Teil U von $\partial\Gamma$:

$$\{(x_1, x_2, g(x_1, x_2)) : (x_1, x_2) \in \Omega\}$$

Definiere den unteren Teil U von $\partial\Gamma$:

$$\{(x_1, x_2, f(x_1, x_2)) : (x_1, x_2) \in \Omega\}$$

Die Seitenflächen von $\partial\Gamma$:

$$\{(x_1, x_2, x_3) : (x_1, x_2) \in \partial\Omega, f(x_1, x_2) < x_3 < g(x_1, x_2)\}$$

Beachte:

- Falls $\partial\Omega$ \mathcal{C}^1 -Untermannigfaltigkeit (1-dim), dann ist LS \mathcal{C}^1 -Untermannigfaltigkeit (2-dim)
- Falls $f, g : \mathcal{C}^1$, so sind L, U \mathcal{C}^1 -Untermannigfaltigkeiten

\implies Definieren μ wie in Definition oben für alle Punkte in $U \cup L \cup LS$

Bemerkung 7.32. Einige Punkte werden so ausgelassen (“Kanten”). Vergleiche Satz von Gauss in 2d.

Satz 7.33. Sei Γ ein beschränkter, normaler Bereich, der die Punkte erfüllt. Sei $B : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ ein \mathcal{C}^1 -Vektorfeld.

$$\implies \int_{\Gamma} \div B = \int_{\Gamma} B\mu = \int_U B\mu + \int_L B\mu + \int_{LS} B\mu \quad (50)$$

Beweis. Skizze im Fall 2-d:

1. Beweis für "spezielle" Dreiecke (rechtwinklig)
2. Approximiere allgemeine Ω durch Dreiecke

ähnlich in 3d, leider ein wenig komplizierter: Das einfachste Analogon eines Dreieckes, d.h. 1. Schritt: Sei Γ ein Tetraeder mit Eckpunkten auf der Achse. Achtung: Γ erfüllt die Punkte nicht. Dennoch, das Analogon zu 51 ist:

$$\int_{\Gamma} \div B = \int_{S_{12}} B\mu + \int_{S_{13}} B\mu + \int_{S_{23}} B\mu + \int_D B\mu \quad (51)$$

Schreibe

$$\begin{aligned} \Gamma &= \left\{ (x_1, x_2, x_3) : 0 < x_1 < a, 0 < x_2 < b - \frac{b}{a}x_1, 0 < x_3 < c - \frac{c}{a}x_1 - \frac{c}{b}x_2 \right\} \\ &\implies \int_{\Gamma} \frac{\partial B_3}{\partial x_3} = \int_0^a \int_0^{b-\frac{b}{a}x_1} \int_0^{c-\frac{c}{a}x_1-\frac{c}{b}x_2} \frac{\partial B_3}{\partial x_3} dx_3 dx_2 dx_1 \\ &= \int_0^a \int_0^{b-\frac{b}{a}x_1} B_3(x_1, x_2, c - \frac{c}{a}x_1 - \frac{c}{b}x_2) - B_3(x_1, x_2, 0) dx_1 dx_2 \\ &= \int_0^a \int_0^{b-\frac{b}{a}x_1} B_3(x_1, x_2, 0) dx_2 dx_1 \\ &= \int_{S_{12}} B(x_1, x_2, 0)(0, 0, -1) dx_1 dx_2 \\ &= \int_{S_{12}} B(x_1, x_2, 0)\mu dx_1 dx_2 \end{aligned}$$

Betrachte $\Phi : S_{12} \rightarrow \mathbb{R}^3, (x_1, x_2, f(x_1, x_2)), f(x_1, x_2) = c - \frac{c}{a}x_1 - \frac{c}{b}x_2$

$$\implies \mu = \frac{-\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}, -\frac{\partial f}{\partial x_2}, 1\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2}} = (\mu_1, \mu_2, \mu_3)$$

Also

$$\int_D \mu B_3 = \int_{S_{12}} B_3(x_1, x_2, f(x_1, x_2)) \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2}} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2} dx_2 dx_1$$

$$\implies \int_{\Gamma} \frac{\partial B_3}{\partial x_3} = \int_{S_{12}} B\mu + \int_D B_3\mu_3 \quad (52)$$

$$\int_{\Gamma} \frac{\partial B_1}{\partial x_1} = \int_{S_{23}} B\mu + \int_D B_1\mu_1 \quad (53)$$

$$\int_{\Gamma} \frac{\partial B_2}{\partial x_2} = \int_{S_{13}} B\mu + \int_D B_2\mu_2 \quad (54)$$

$$(55)$$

$$\stackrel{52,53,54}{\implies} \int_{\Gamma} \div B = \int_{S_{12}} B\mu + \int_{S_{23}} B\mu + \int_{S_{13}} B\mu + \underbrace{\int_D B_1\mu_1 + \int_D B_2\mu_2 + \int_D B_3\mu_3}_{\int_D = \int_D B\mu} \quad (56)$$

d.h. ??

□

Wir haben eine w-d parametrisierte Fläche in \mathbb{R}^3 , d.h. $\underbrace{\Omega}_{\mathbb{R}^2} \rightarrow \mathbb{R}^3$, Ω ist offen und $\Phi \in \mathcal{C}^1$ und:

1. Φ ist injektiv
2. $d\Phi|_p$ hat Rang 2 $\forall p \in \Omega$

$$(\Gamma = \Phi(\Omega))$$

Sei Φ auch in einer Umgebung von $\bar{\Omega}$ definiert. Dann definieren wir den Rand von Γ :

$$\partial\Gamma = \Phi\left(\overbrace{\partial\Omega}^{\text{topologischer Rand}}\right)$$

KEIN topologischer Rand

Bemerkung 7.34. Sei $\partial\Omega$ eine \mathcal{C}^1 -Mannigfaltigkeit, d.h.

$$\forall x \in \partial\Omega \exists U \text{ Umgebung s.d. } U \cap \partial\Omega = \text{Graph einer Funktion}$$

das Bild von

$$]a, b[\ni t \mapsto \gamma(t) = (t, f(t))$$

wobei $f :]a, b[\rightarrow \mathbb{R}$ eine \mathcal{C}^1 -Funktion ist.

$$\tilde{\gamma} = \Phi \circ \gamma$$

$$\tilde{\gamma} :]a, b[\rightarrow \mathbb{R}^3$$

Dann

1. Falls γ injektiv ist, ist auch $\tilde{\gamma}$ injektiv.

$$\begin{aligned} \gamma \text{ injektiv} &\implies \gamma(\sigma) \neq \gamma(\tau) \quad \forall \sigma \neq \tau \\ \Phi \text{ injektiv} &\implies \Phi(\gamma(\sigma)) \neq \Phi(\gamma(\tau)) \end{aligned}$$

- 2.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\gamma}}(t) &= d\tilde{\gamma}|_t = d(\Phi \circ \gamma)|_t \\ &= d\Phi|_{\gamma(t)} \circ d\gamma|_t = \underbrace{d\Phi|_{\gamma(t)}}_{\left(\begin{array}{cc} \frac{\partial\Phi_1}{\partial x_1}(\gamma(t)) & \frac{\partial\Phi_1}{\partial x_2}(\gamma(t)) \\ \frac{\partial\Phi_2}{\partial x_1}(\gamma(t)) & \frac{\partial\Phi_2}{\partial x_2}(\gamma(t)) \\ \frac{\partial\Phi_3}{\partial x_1}(\gamma(t)) & \frac{\partial\Phi_3}{\partial x_2}(\gamma(t)) \end{array} \right)} \begin{pmatrix} \gamma'_1(t) \\ \gamma'_2(t) \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \gamma'_1(t) \frac{\partial\Phi_1}{\partial x_1}(\gamma(t)) + \gamma'_2(t) \frac{\partial\Phi_1}{\partial x_2}(\gamma(t)) \\ \gamma'_1(t) \frac{\partial\Phi_2}{\partial x_1}(\gamma(t)) + \gamma'_2(t) \frac{\partial\Phi_2}{\partial x_2}(\gamma(t)) \\ \gamma'_1(t) \frac{\partial\Phi_3}{\partial x_1}(\gamma(t)) + \gamma'_2(t) \frac{\partial\Phi_3}{\partial x_2}(\gamma(t)) \end{pmatrix} = \gamma'_1(t) \frac{\partial\Phi}{\partial x_1}(\gamma(t)) + \gamma'_2(t) \frac{\partial\Phi}{\partial x_2}(\gamma(t)) \\ &\neq 0 \end{aligned}$$

$\frac{\partial\Phi}{\partial x_1}(\gamma(t))$ und $\frac{\partial\Phi}{\partial x_2}(\gamma(t))$ sind linear unabhängig!

$$\begin{aligned} (\dot{\gamma}(t) = (\gamma'_1(t), \gamma'_2(t)) = (1, f'(t))) \\ \implies \dot{\tilde{\gamma}}(t) \neq 0 \end{aligned}$$

Lemma 7.35.

$$\dot{\tilde{\gamma}} = \gamma'_1 \frac{\partial\Phi}{\partial x_1} \circ \gamma + \gamma'_2 \frac{\partial\Phi}{\partial x_2} \circ \gamma \quad (57)$$

Bemerkung 7.36.

$$\int_{\Gamma} g = \int_{\Omega} g \circ \Phi J\Phi$$

$$\int_{\partial\Gamma} g \left(= \sum_{i=1}^N \int_{a_i}^{b_i} g \circ \tilde{\gamma}_i(t) \|\dot{\tilde{\gamma}}_i(t)\| dt \right)$$

Satz 7.37. (von Stokes) $\underbrace{\Omega}_{\mathbb{R}^2}$ ist eine beschränkte Menge und $\partial\Omega$ ist eine \mathcal{C}^1 -Mannigfaltigkeit.

$$\Phi : U \rightarrow \mathbb{R}^3 \quad (U \supset \bar{\Omega} \text{ ist offen})$$

mit $\Phi \in \mathcal{C}^1$, injektiv, mit maximalem Rang (überall)

$$\Gamma := \Phi(\Omega)$$

$$\partial\Gamma := \Phi(\partial\Omega)$$

Sei $v : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ ein \mathcal{C}^1 Vektorfeld. Dann:

$$\int_{\Gamma} (\nabla \times v) \mu_{\Gamma} = \int_{\partial\Gamma} v \tau = \int_{\partial\Omega} B \mu_{\Omega}$$

$$\tilde{\gamma} = \Phi \circ \gamma$$

$$\tau = \frac{\dot{\tilde{\gamma}}}{\|\dot{\tilde{\gamma}}\|}$$

$$\frac{(-\gamma'_2(t), \gamma'_1(t))}{\|\dot{\gamma}(t)\|}$$

ist immer die äussere Normale auf Ω

$$\begin{aligned} \int_{\Gamma} (\nabla \times v) \mu_{\Gamma} &= \int_{\Omega} (\nabla \times v) \underbrace{\mu_{\Gamma}}_{\substack{\frac{\partial\Phi}{\partial x_1} \times \frac{\partial\Phi}{\partial x_2} \\ \left\| \frac{\partial\Phi}{\partial x_1} \times \frac{\partial\Phi}{\partial x_2} \right\|}} (\Phi(x)) \underbrace{J\Phi(x)}_{\left\| \frac{\partial\Phi}{\partial x_1} \times \frac{\partial\Phi}{\partial x_2} \right\|}} \\ &= \int_{\Omega} [(\nabla \times v) \circ \Phi] \frac{\partial\Phi}{\partial x_1} \times \frac{\partial\Phi}{\partial x_2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_{\Gamma} (\nabla \times v) \mu_{\Gamma} &= \int_{\Omega} ([\nabla \times v] \circ \Phi) \left(\frac{\partial\Phi}{\partial x_1} \times \frac{\partial\Phi}{\partial x_2} \right) \\ &= \int_{\partial\Gamma} v \tau \underbrace{\left(\sum \right)}_{\substack{\tilde{\gamma} \\ \left\| \dot{\tilde{\gamma}} \right\|}} \int_a^b v(\Phi(\gamma)) \frac{\dot{\tilde{\gamma}}}{\|\dot{\tilde{\gamma}}\|} \|\dot{\tilde{\gamma}}\| \\ &= \sum \int_a^b v \circ \Phi(\gamma) \left(\frac{\partial\Phi}{\partial x_1} \circ \gamma \gamma'_1 + \frac{\partial\Phi}{\partial x_2} \circ \gamma \gamma'_2 \right) \\ &= \sum \int_a^b \left[\underbrace{\left(v \circ \Phi(\gamma) \frac{\partial\Phi}{\partial x_1}(\gamma) \right)}_{3d} + \underbrace{\left(v \circ \Phi(\gamma) \frac{\partial\Phi}{\partial x_2}(\gamma) \right)}_{3d} \gamma'_2 \right] \\ &\quad B := \left(-v \circ \Phi \frac{\partial\Phi}{\partial x_2}, v \circ \Phi \frac{\partial\Phi}{\partial x_1} \right) \\ &\dots = \sum \int_a^b B(\gamma(t)) \left[\frac{(-\gamma'_2(t), \gamma'_1(t))}{\|\dot{\gamma}(t)\|} \right] \|\dot{\gamma}(t)\| dt \\ &\quad \sum \int_{\partial\Omega} B \mu_{\Omega} \end{aligned}$$

Deswegen ist die Übersetzung des Satzes von Stokes:

$$\int_{\partial\Omega} B\mu_{\Omega} = \int_{\Omega} [(\nabla \times v) \circ \Phi] \left(\frac{\partial\Phi}{\partial x_1} \times \frac{\partial\Phi}{\partial x_2} \right) \quad (58)$$

$$Gauss \implies \int_{\partial\Omega} B\mu_{\Omega} = \int_{\Omega} \div B$$

Deswegen

$$58 \iff \int_{\Omega} \div B = \int_{\Omega} \Omega [(\nabla \times v) \circ \Phi] \left(\frac{\partial\Phi}{\partial x_1} \times \frac{\partial\Phi}{\partial x_2} \right)$$

Dann

$$\div B = [(\nabla \times v) \circ \Phi] \left(\frac{\partial\Phi}{\partial x_1} \times \frac{\partial\Phi}{\partial x_2} \right)$$

$$\Phi \in \mathcal{C}^2$$