

MITSCHRIEB

Analysis II

Sommersemester 2025

Emma Bach

Vorlesung gehalten von
Prof. Dr. Michael RŮŽIČKA

July 16, 2025

Inhalt

1	Der Euklidische Raum	2
1.1	Abbildungen und Koordinatenfunktionen auf \mathbb{R}^n	4
1.2	Mehrdimensionale Ableitungen	6
1.3	Differenzierbarkeit	7
2	Gewöhnliche Differentialgleichungen	22
2.1	Existenztheorie	22
2.2	Lineare Gleichungen	26
3	Systeme Linearer Differentialgleichungen	28
3.1	Systeme mit konstanten A	31

Chapter 1

Der Euklidische Raum

Lemma 1.1. Sei $(V, \langle -, - \rangle)$ ein euklidischer Vektorraum. Dann wird durch

$$\|u\| = \sqrt{\langle u, u \rangle}$$

auf V eine Norm erklärt. Diese bezeichnet man als die durch das Skalarprodukt induzierte Norm.

Definition 1.2. Sei $(V, \langle -, - \rangle)$ ein euklidischer Vektorraum. Die Vektoren $u, v \in V$ heißen **orthogonal**, wenn

$$\langle u, v \rangle = 0$$

ist. Für $u, v \in V \setminus \{0\}$ wird die reelle Zahl

$$\phi = \arccos \frac{\langle u, v \rangle}{\|u\| \|v\|}$$

als der Winkel zwischen u und v bezeichnet.

Anmerkung 1.3. Es gilt

$$\frac{|\langle u, v \rangle|}{\|u\| \|v\|} \leq 1$$

Lemma 1.4. Für $X = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ sei

$$\|X\|_{\max} := \max\{|x_1|, \dots, |x_n|\}$$

Dann ist $\|\cdot\|_{\max}$ eine Norm auf \mathbb{R}^n und es gilt

$$\|X\|_{\max} \leq \|X\| \leq \sqrt{n} \|X\|_{\max}$$

Satz 1.5. Die Menge \mathbb{Q}^n der Punkte mit rational Koordinaten ist dicht in \mathbb{R}^n .

Beweis. Sei $X \in \mathbb{R}^n$ und $\varepsilon \in \mathbb{R}^+$. Da \mathbb{Q} dicht in \mathbb{R} ist gilt

$$\forall i \in \{1, \dots, n\} : \exists y_i \in \mathbb{Q} : |x_i - y_i| \leq \frac{\varepsilon}{\sqrt{n}}$$

Durch Lemma 1.4 folgt:

$$\|x - y\| \leq \sqrt{n} \|X - Y\| < \varepsilon$$

□

Satz 1.6. Sei $(X_k)_{k \in \mathbb{N}}$ eine Folge aus \mathbb{R}^n . Sei $X_k = (x_1^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$. Dann gilt:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} X_k = X \Leftrightarrow \forall i : \lim_{k \rightarrow \infty} x_i^{(k)} = x_i$$

Insbesondere ist X_k eine Cauchyfolge, wenn die Komponenten Cauchyfolgen sind.

Beweis. $X_k \rightarrow X$, $i \in \{1, \dots, n\}$, $\varepsilon \in \mathbb{R}^+$. Dann gilt

$$\exists k_0 \in \mathbb{N} : \forall k \geq k_0 : \|X_k - X\| \leq \varepsilon \implies \forall i : \left| x_i^{(k)} - x_i \right| < \varepsilon \implies \lim_{k \rightarrow \infty} x_i^{(k)} = x_i$$

Und umgekehrt:

$$\forall i : x_i^{(k)} \rightarrow x_i, \varepsilon \in \mathbb{R}^+ \implies \exists k_0^i \in \mathbb{N} : \forall k \geq k_0^i \left| x_i^{(k)} - x_i \right| \leq \frac{\varepsilon}{\sqrt{n}}$$

$$k_0 := \max\{k_0^1, \dots, k_0^n\} \implies \forall k \geq k_0 : \left| x_i^{(k)} - x_i \right| < \frac{\varepsilon}{\sqrt{n}} \implies \|X_k - X\| \leq \sqrt{n} \|X_k - X\| < \varepsilon$$

□

Satz 1.7. Für konvergente Folgen $(X_k), (Y_k) \in \mathbb{R}^n$, $(\lambda_k) \in \mathbb{R}$ gilt:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} (X_k + Y_k) = \lim_{k \rightarrow \infty} X_k + \lim_{k \rightarrow \infty} Y_k \quad (1.1)$$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \lambda_k X_k = \left(\lim_{k \rightarrow \infty} \lambda_k \right) \left(\lim_{k \rightarrow \infty} X_k \right) \quad (1.2)$$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \langle X_k, Y_k \rangle = \left\langle \lim_{k \rightarrow \infty} X_k, \lim_{k \rightarrow \infty} Y_k \right\rangle \quad (1.3)$$

Satz 1.8. \mathbb{R}^n ist vollständig.

Beweis. Ist X_k eine Cauchyfolge in \mathbb{R}^n , so sind nach Satz 1.6 alle Teilfolgen Cauchy in \mathbb{R} . Also:

$$\exists x_i \in \mathbb{R} : x_i^{(k)} \rightarrow x_i \implies \exists X \in \mathbb{R}^n : X_k \rightarrow X$$

□

Satz 1.9. (Bolzano-Weierstrass:) Jede beschränkte Folge in \mathbb{R}^n besitzt eine konvergente Teilfolge.

Beweis. Sei (X_k) eine beschränkte Folge in \mathbb{R}^n . Nach 1.4 müssen die Komponentenfolgen ebenfalls beschränkt sein. Nach dem eindimensionalen Fall des Satzes von Bolzano-Weierstrass existieren also konvergente Teilfolgen der Koordinatenfolgen. Angenommen, die konvergente Teilfolge der ersten Komponente ist gegeben durch $x_1^{(k_n)} \rightarrow x_1$. So ist $x_2^{(k_n)}$ ebenfalls eine beschränkte Teilfolge, also existiert eine Teilfolge $x_2^{(k_{n_m})}$ welche in den ersten beiden Komponenten konvergiert. Führt man dieses Verfahren induktiv fort, erhält man eine konvergente Teilfolge von (X_k) . □

Satz 1.10. Sei $(A_i)_{i \in \mathbb{N}}$ eine Folge abgeschlossener beschränkter nichtleerer Teilmengen des \mathbb{R}^n , sodass $A_1 \supseteq A_2 \supseteq \dots$. Dann ist $\bigcap_{i \in \mathbb{N}} A_i \neq \emptyset$

Beweis. $A_i \neq \emptyset \implies \exists X_i \in A_i$ s.d. $(X_i)_{i \in \mathbb{N}}$ eine Folge ist. Da A_i beschränkt ist ist $(X_i)_{i \in \mathbb{N}}$ beschränkt, also hat X_i eine konvergente Teilfolge X_{i_k} mit Limes X . Es gilt $X_{i_k} \in A_{i_k} \subseteq A_i$, also ist X ein Berührungspunkt von A_i , also $X \in A_i$. □

Satz 1.11. Jede abgeschlossene beschränkte Teilmenge des \mathbb{R}^n ist kompakt.

Beweis. Analog zur eindimensionalen Version, wobei statt Intervallen $[a_i, b_i]$ Hyperwürfel $[a_i^{(1)}, b_i^{(1)}] \times \dots \times [a_i^{(n)}, b_i^{(n)}]$ genutzt werden müssen. □

Satz 1.12. Seien $\|\cdot\|_1$ und $\|\cdot\|_2$ Normen auf \mathbb{R}^n . So existieren $k, K \in \mathbb{R}^+$ mit

$$\forall X \in \mathbb{R}^n : k \|X\|_1 \leq \|X\|_2 \leq K \|X\|_1$$

Beweis. Diese Normenäquivalenz bildet eine Äquivalenzrelation. Es reicht also, zu zeigen, dass jede Norm $\|\cdot\|_2$ äquivalent zu einer spezifischen Norm $\|\cdot\|_1$ ist. Wir wählen $\|\cdot\|_{\max}$.

Sei (E_i) die Standardbasis des \mathbb{R}^n . Wir definieren:

$$K := \|E_1\|_2 + \dots + \|E_n\|_2$$

Dann gilt:

$$\begin{aligned} \|X\|_2 &= \|x_1 E_1 + \dots + x_n E_n\| \\ &\leq |x_1| \|E_1\|_2 + \dots + |x_n| \|E_n\|_2 \\ &\leq \|X\|_{\max} K \quad [\text{citation needed}] \end{aligned}$$

Es bleibt die Rückrichtung zu zeigen.

Lemma 1.13. $f(X) := \|X\|_2$ ist stetig.

Beweis.

$$|\|X\|_2 - \|Y\|_2| \leq \|X - Y\|_2 \leq K\|X - Y\|_{\max} \leq K\|X - Y\|$$

Also ist $\|\cdot\|_2$ stetig bezüglich der euklidischen Norm $\|\cdot\|$. □

Wir definieren nun:

$$A := \{X \in \mathbb{R}^n \mid \|X\|_{\max} = 1\}$$

Diese Menge ist beschränkt. Wir wollen zeigen, dass sie außerdem abgeschlossen ist. Sei $X_i \rightarrow X$, $X_i \in A$. Es gilt:

$$|\|X_i\|_{\max} - \|X\|_{\max}| \leq \|X_i - X\|_{\max} \leq \|X_i - X\|$$

Also konvergiert jede Menge, also ist A kompakt, also auch abgeschlossen. Dementsprechend muss f auf A ein Minimum k annehmen. Wir wissen $f \geq 0$, also ist $k \geq 0$. Es gilt sogar $k > 0$, da keiner der Vektoren in A der Nullvektor ist. Nun gilt also $\forall X \in A : \|X\|_2 \geq k$. Wir definieren:

$$\lambda := \frac{1}{\|X\|_{\max}}$$

$$\|\lambda X\|_{\max} = |\lambda| \|X\|_{\max} = 1$$

$$|\lambda| \|X\|_2 = \|\lambda X\|_2 \geq k \implies \|X\|_2 \geq k \|X\|_{\max}$$

□

Anmerkung 1.14. Im unendlichdimensionalen Fall gilt Satz 1.12 nicht.

1.1 Abbildungen und Koordinatenfunktionen auf \mathbb{R}^n

In diesem Abschnitt betrachten wir Funktionen $F : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^k$. Betrachten wir zuerst den Spezialfall Linearer Funktionen, also $\forall X, Y \in \mathbb{R}^n : \forall \lambda, \mu \in \mathbb{R} : F(\lambda X + \mu Y) = \lambda F(X) + \mu F(Y)$.

Sei (E_i) die Standardbasis des \mathbb{R}^n und sei (E'_i) die Standardbasis des \mathbb{R}^k . Nun gilt:

$$F(E_j) = \sum_{i=1}^k a_{ij} E'_i$$

Daraus erhalten wir Koeffizienten a_{ij} , welche eine Matrix bilden. Umgekehrt können wir aus den Koeffizienten die Abbildung F rekonstruieren, indem wir definieren:

$$\begin{aligned} F(X) &= F\left(\sum_{j=1}^n x_j E_j\right) \\ &= \sum_{j=1}^n x_j F(E_j) \\ &= \sum_{j=1}^n x_j \sum_{i=1}^k a_{ij} E'_i \\ &= \sum_{i=1}^k \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j\right) E'_i \end{aligned}$$

[missing stuff here]

Definition 1.15. Wir bezeichnen als $p_i : M \rightarrow k$ die Projektion eines Vektors auf die i -te Komponente.

Satz 1.16. Sei M ein metrischer Raum, $F : M \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine Abbildung und $x \in M$. Dann ist F stetig in x genau dann, wenn $p_i \circ F$ stetig für alle i ist.

Beweis. 1. p_i ist stetig. Ist also F stetig folgt direkt, dass auch $p_i \circ F$ stetig ist.

2. Angenommen, $p_i \circ F$ ist stetig $\forall i, \varepsilon \in \mathbb{R}^+$. Da $p_i \circ F$ stetig ist existiert eine Umgebung U_i von x , sodass $|f_i(x) - f_i(y)| < \frac{\varepsilon}{\sqrt{n}} \forall y \in U_i$. Ebenso für die anderen Komponenten. Nun gilt:

$$\|F(y) - F(x)\| \leq \sqrt{n} \|F(x) - F(y)\|_{\max} \leq \varepsilon$$

□

Analog gilt das Selbe für Stetigkeit auf M , gleichmäßige Stetigkeit, etc.

Definition 1.17. Sei $M \subseteq \mathbb{R}^n$, $F : M \rightarrow \mathbb{R}^k$ eine Abbildung, x_0 ein Häufungspunkt, $y \in \mathbb{R}^k$. Dann definieren wir:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} F(x) = y \Leftrightarrow \forall \varepsilon \in \mathbb{R}^+ : \exists \delta \in \mathbb{R}^+ : \forall x \in M \setminus \{x_0\} : \|x - x_0\| \leq \delta \implies \|F(x) - y\| < \varepsilon$$

F ist stetig in x_0 genau dann, wenn $\lim_{x \rightarrow x_0} F(x) = F(x_0)$.

Satz 1.18. Sei $M \subseteq \mathbb{R}^n$, $F : M \rightarrow \mathbb{R}^k$ eine Abbildung, $X_0 \in M$ ein Häufungspunkt, $Y \in \mathbb{R}^k$ und $f_i = p_i \circ F$. Dann gilt:

$$\lim_{X \rightarrow X_0} F(X) = Y \Leftrightarrow \forall i : \lim_{X \rightarrow X_0} f_i(X) = y_i$$

Beweis. Analog zu Beweis 1.16.

□

Korollar 1.19.

$$F(X) \rightarrow Y, G(X) \rightarrow Z \implies F(X) + G(X) \rightarrow Y + Z$$

1.2 Mehrdimensionale Ableitungen

Beispiel 1.20. Sei $f : M \rightarrow \mathbb{R}$ definiert auf einer offenen Menge $M \subseteq \mathbb{R}^n$.

$$f(X) = f(x_1, \dots, x_n) \text{ bzgl. der Standardbasis}$$

Wir können aber auch $X = \sum x'_i E'_i$ bezüglich einer beliebigen anderen Basis darstellen. Also:

$$f(X) = f(x_1, \dots, x_n) = g(x'_1, \dots, x'_n)$$

Da f in der Regel nicht linear ist, ist ein solcher Basiswechsel sehr viel komplizierter als in der Linearen Algebra! Wo möglich ist es also besser, über $f(X)$ zu reden.

Definition 1.21. Sei $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, $\bar{X} \in M$. Betrachte die Abbildung

$$t \rightarrow f(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_{i-1}, t, \bar{x}_{i+1}, \dots, \bar{x}_n),$$

welche eine Mehrdimensionale Funktion $f(x_1, \dots, x_n)$ auf eine eindimensionale Funktion $f(t)$ abbildet.
Achtung: Wir nehmen hier implizit eine Darstellung bezüglich der Standardbasis an!

Beispiel 1.22. Betrachte folgende Funktion:

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

f ist an $(0, 0)$ partiell differenzierbar, die Partiellen Ableitungen sind 0. Allerdings gilt

$$\forall x : f(x, x) = \frac{1}{2}$$

Also ist f an 0 nicht stetig! Es existieren also Funktionen, die an einem Punkt partiell Differenzierbar sind, an dem sie nicht stetig sind.

Idee: Fordere partielle Differenzierbarkeit bezüglich jeder möglichen Basis, also partielle Differenzierbarkeit in jedem Vektor.

Beispiel 1.23.

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

Wir betrachten die “Linearisierung” $t \rightarrow f(t, \alpha t)$. Einsetzen liefert:

$$f(t, \alpha t) = \frac{\alpha t}{t^2 + \alpha^2}$$

Diese Funktion ist differenzierbar, also ist f differenzierbar bezüglich beliebiger Basen. Das reicht jedoch immer noch nicht:

$$f(a, a^2) = \frac{a^2 a^2}{a^4 + a^4} = \frac{1}{2}$$

Also ist f immer noch nicht stetig - es ist stetig für Folgen, welche den Nullpunkt durch Geraden erreichen, aber nicht, wenn wir durch kompliziertere Pfade gegen den Nullpunkt gehen.

Wir wollen die Begriffe aus der Analysis I über Stetigkeit und Ableitbarkeit retten, also brauchen wir einen komplizierteren Ableitungsbegriff.

1.3 Differenzierbarkeit

Sei f eine beliebige Funktion $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Die Ableitung gibt uns die Tangente der Funktion an einem beliebigen Punkt, also die beste affine Approximation der Funktion an diesem Punkt.

Definition 1.24. Eine Funktion $F : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^k$ heißt **affin**, wenn es eine Lineare Funktion $L : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^k$ und eine Konstante $Z \in \mathbb{R}^k$ gibt, sodass:

$$F(X) = L(X) + Z$$

Sei $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ affin, also $g(x) = cx + t$ für $c, t \in \mathbb{R}$. Sei $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Wir wollen eine beliebige Funktion f an der Stelle x_0 approximieren. Für eine gute Approximation wollen wir $f(x_0) = g(x_0)$, also erhalten wir:

$$g(x) = c(x - x_0) + f(x_0).$$

Schreibe $x = x_0 + h$ und lasse h gegen 0 gehen.

$$h \rightarrow f(x_0 + h) - g(x_0 + h) = f(x_0 + h) - f(x_0) - ch$$

Wir sagen, die Approximation ist gut, wenn $f(x_0 + h) - f(x_0) - ch$ schneller gegen 0 geht als h selbst, also:

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0) - ch}{h} = 0 \quad (1.4)$$

Was äquivalent ist zu:

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

Wir sagen also, f ist in x_0 differenzierbar, genau dann, wenn eine lineare Abbildung L existiert, sodass:

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

Diese geometrische Intuition, nach der die Ableitung die beste affine Approximation der Funktion an einem gegebenen Punkt ist, können wir auf den \mathbb{R}^n übertragen. Analog zu der Interpretation affiner Funktionen als Geraden in \mathbb{R} , also der Ableitung als das Finden einer Tangentengeraden auf dem Funktionengraph, sucht man beim Ableiten einer Mehrdimensionalen Funktion eine Tangenten(hyper-)ebene auf dem Funktionengraph.

Definition 1.25. Sei $M \subset \mathbb{R}^n$ offen, $F : M \rightarrow \mathbb{R}^k$ eine Abbildung, sei $X_0 \in M$. Die Abbildung F heißt **differenzierbar** am Punkt X_0 , wenn es eine Lineare Abbildung $L : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^k$ gibt, sodass:

$$\lim_{H \rightarrow 0} \frac{F(X_0 + H) - F(X_0) - L(H)}{\|H\|} = 0.$$

Wir nennen sie das **Differenzial von F im Punkt X_0** und notieren sie als DF_{X_0} . F heißt differenzierbar, wenn sie differenzierbar an jedem Punkt $X \in M$ ist.

Anmerkung 1.26. Differenzierbarkeit kann analog über die Eigenschaften des Restglieds $R(X, X_0)$ definiert werden: Sei

$$f(X) = f(X_0) + Df_{X_0}(X - X_0) + R(X, X_0).$$

Dann ist f genau dann differenzierbar, wenn:

$$\lim_{X \rightarrow X_0} \frac{R(X, X_0)}{\|X - X_0\|} = 0$$

Satz 1.27. *Gibt es ein Differential, ist es eindeutig bestimmt.*

Beweis. Seien L_1, L_2 Differentiale. Es folgt:

$$\lim_{H \rightarrow 0} \frac{L_1(H) - L_2(H)}{\|H\|} = 0$$

Sei $X \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$. Dann gilt:

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{L_1(tX) - L_2(tX)}{\|tX\|} = 0$$

$$\implies \frac{L_1(X) - L_2(X)}{\|X\|} = 0$$

$$\implies L_1(X) - L_2(X) = 0$$

also sind die beiden Differentiale identisch. □

Anmerkung 1.28. Unserer Differenzierbarkeitsbegriff wird insbesondere in der älteren Literatur oft als **totale Differenzierbarkeit** bezeichnet.

Satz 1.29. *Ist $F : M \rightarrow \mathbb{R}^k$ an einem Punkt X_0 differenzierbar, so ist F an diesem Punkt stetig.*

Beweis. Sei F differenzierbar. Da die Differenzierbarkeit über den Limes des Differentialquotienten definiert ist folgt direkt:

$$\begin{aligned} \forall \varepsilon \in \mathbb{R}^+ : \exists \delta_1 \in \mathbb{R}^+ : \forall H \in M : (X_0 + H \in M) \wedge (0 \leq \|H\| \leq \delta_1) \\ \implies \frac{\|F(X_0 + H) - F(X_0) - DF_{X_0}(H)\|}{\|H\|} \leq \frac{\varepsilon}{2} \\ \implies \|F(X_0 + H) - F(X_0) - DF_{X_0}(H)\| \leq \frac{\varepsilon}{2} \|H\| \end{aligned}$$

Da DF_{X_0} eine lineare Abbildung ist ist DF_{X_0} gleichmäßig stetig, also gilt:

$$\exists \delta_2 \in \mathbb{R}^+ : \|H\| < \delta_2 \implies \|DF_{X_0}(H)\| \leq \frac{\varepsilon}{2}$$

Also gilt für $\|H\| \leq \delta := \min\{\delta_1, \delta_2, 1\}$

$$\begin{aligned} & \|F(X_0 + H) - F(X_0)\| \\ &= \|F(X_0 + H) - F(X_0) - DF_{X_0}(H) + DF_{X_0}(H)\| \\ &\leq \|F(X_0 + H) - F(X_0) - DF_{X_0}(H)\| + \|DF_{X_0}(H)\| \\ &\leq \frac{\varepsilon}{2} \|H\| + \frac{\varepsilon}{2} \\ &\leq \varepsilon \end{aligned}$$

□

Satz 1.30. Sind F und G differenzierbar, so auch $F + G$, und es gilt

$$D(F + G)_{X_0} = DF_{X_0} + DG_{X_0}$$

Beweis.

$$\begin{aligned} & \lim_{H \rightarrow 0} \frac{(F + G)(X_0 + H) - (F + G)(X_0) - (DF_{X_0} + DG_{X_0})H}{\|H\|} \\ &= \lim_{H \rightarrow 0} \frac{F(X_0 + H) - F(X_0) - DF_{X_0}H}{\|H\|} + \lim_{H \rightarrow 0} \frac{G(X_0 + H) - G(X_0) - DG_{X_0}H}{\|H\|} \\ &= 0 \end{aligned}$$

□

Satz 1.31. Kettenregel: Seien $M \subseteq \mathbb{R}^n$, $N \subseteq \mathbb{R}^m$ offen, seien $F : M \rightarrow N$, $G : N \rightarrow \mathbb{R}^m$ Abbildungen, sei X_0

Beweis. Sei $F(X_0) = Y_0$, $F(X_0 + H) - F(X_0) = Z$, $H \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$, $X_0 + H \in M$.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\|H\|} ((G \circ F)(X_0 + H) - (G \circ F)(X_0) - DG_{F(X_0)} \circ DF_{X_0}(H)) \\ &= \frac{1}{\|H\|} (G(Y_0 + Z_H) - G(Y_0) - DG_{Y_0}(Z_H)) \\ &= \frac{1}{\|H\|} (DG_{Y_0}(F(X_0 + H) - F(X_0)) - DG_{Y_0}(DF_{X_0}(H))) \\ &= \frac{1}{\|H\|} DG_{Y_0}((F(X_0 + H) - F(X_0)) - DF_{X_0}(H)) \end{aligned}$$

$$\lim_{H \rightarrow 0} \frac{1}{\|H\|} DG_{Y_0}((F(X_0 + H) - F(X_0)) - DF_{X_0}(H)) = DG_{Y_0}(0) = 0$$

$$\frac{1}{\|H\|} (G(Y_0 + Z_H) - G(Y_0) - DG_{Y_0}(Z_H)) = \begin{cases} 0 & Z_H = 0 \\ \frac{1}{\|H\|} (G(Y_0 + Z_H) - G(Y_0) - DG_{Y_0}(Z_H)) & Z_H \neq 0 \end{cases}$$

Der Term zweite Term in $Z_H \neq 0$ geht gegen 0 für $H \rightarrow 0 \implies Z_H = F(X_0 + H) - F(X_0) \rightarrow 0$

$$\begin{aligned} \frac{\|Z_H\|}{\|H\|} &= \frac{\|F(X_0 + H) - F(X_0)\|}{\|H\|} \\ &= \frac{\|DF_{X_0}(H) - R(X_0, H)\|}{\|H\|} \\ &\leq \frac{\|DF_{X_0}(H)\|}{\|H\|} + \frac{\|R(X_0, H)\|}{\|H\|} \\ &\leq \frac{\|DF_{X_0}(H)\|}{\|H\|} + \frac{\|R(X_0, H)\|}{\|H\|} \\ &\stackrel{???}{\leq} \frac{\|DF_{X_0}\| \|H\|}{\|H\|} + \frac{\|R(X_0, H)\|}{\|H\|} \\ &= \|DF_{X_0}\| + \frac{\|R(X_0, H)\|}{\|H\|} \\ &\leq c \end{aligned}$$

□

Satz 1.32. Seien $I \subseteq \mathbb{R}$, $N \subseteq \mathbb{R}^k$ offen, seien $F : I \rightarrow N$, $G : N \rightarrow \mathbb{R}^n$ Abbildungen.

Ist F differenzierbar in $t_0 \in I$ und G differenzierbar in $F(t_0)$, so gilt:

$$(G \circ F)'(t_0) = DG_{F(t_0)}(F'(t_0))$$

Beweis. Gemäß Kettenregel gilt $D(G \circ F) = DG_{F(t_0)} \circ DF_{t_0}$. Nun gilt:

$$\begin{aligned} h(G \circ F)'(t_0) &= hD(G \circ F)_{t_0}(1) \\ &= D(G \circ F)_{t_0}(h) \\ &= DG_{F(t_0)}(DF_{t_0}(h)) \\ &= hDG_{F(t_0)}(F'(t_0)) \end{aligned}$$

□

Mittelwertsatz: $f : [x, y] \rightarrow \mathbb{R}$, dann $\exists y : f(y) - f(x) = f'(z)(y - x)$. Im Allgemeinen ist dieser im Mehrdimensionalen Fall leider falsch.

Betrachte allerdings die folgende Ungleichung, welche die Wichtigste Konsequenz des Mittelwertsatzes ist: $|f(y) - f(x)| \leq |f'(z)||y - x| \leq c|y - x|$. Diese kann im Allgemeinen erhalten werden.

$F : M \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^k$, $X, Y \in M$. Sei $[X, Y] = \{(1 - \lambda)X + \lambda Y\}$ die Verbindungslinie zwischen den beiden Vektoren.

Satz 1.33. Sei $M \subseteq \mathbb{R}^n$ offen, $X, Y \in M$ mit $[X, Y] \subseteq M$. Die Abbildung $F : M \rightarrow \mathbb{R}^k$ sei stetig in M und differenzierbar in den Punkten $(1 - \lambda)X + \lambda Y$ mit $\lambda \in (0, 1)$. Gilt

$$\forall \lambda \in (0, 1) : \forall (1 - \lambda)X + \lambda Y : \|DF_Z\| \leq c$$

so gilt auch

$$\|F(Y) - F(X)\| \leq c\|Y - X\|$$

Beweis. Angenommen $G : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^k$ ist stetig auf $[0, 1]$ und differenzierbar auf $(0, 1)$. So gilt

$$\forall t \in (0, 1) : \|G'(t)\| \leq c$$

Sei $\varepsilon \in \mathbb{R}^+$ und

$$A := \{t \in [0, 1] \mid \|G(t) - G(0)\| \leq (c + \varepsilon)t + \varepsilon\}$$

Da G stetig in 0 ist gilt $[0, \tau] \subseteq A$.

Sei $s = \sup A$. Es gilt $0 < s \leq 1$, also ist G stetig in s .

Da $t \in A \implies t \leq s$

$$\|G(t) - G(0)\| \leq (c + \varepsilon)t + \varepsilon \rightarrow s \implies \|G(s) - G(0)\| \leq (c + \varepsilon)s + \varepsilon$$

also $s \in A$. Angenommen, $s < 1$. Dann gilt $\exists h > 0 : s + h < 1$.

$$\left\| \frac{G(s + h) - G(s)}{h} - G'(s) \right\| \leq \varepsilon$$

$$\implies \left\| \frac{G(s + h) - G(s)}{h} \right\| \leq \varepsilon + G'(s) \leq c + \varepsilon$$

$$\begin{aligned}
\|G(s+h) - G(0)\| &\leq \|G(s+h) - G(s)\| + \|G(s) - G(0)\| \\
&\leq (c + \varepsilon)h + (c + \varepsilon)s + \varepsilon \\
&\leq (c + \varepsilon)(s+h) + \varepsilon
\end{aligned}$$

Daraus folgt $s+h \in A$. Da s das Supremum ist ist dies ein Widerspruch. Also gilt $h = 1$.

$$\begin{aligned}
\forall \varepsilon \in \mathbb{R}^+ : \|G(1) - G(0)\| &\leq c + \varepsilon + \varepsilon = c + 2\varepsilon \\
&\implies \|G(1) - G(0)\| \leq c
\end{aligned}$$

Sei F wie im Satz. Sei $K : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^n : t \rightarrow (1-t)X + tY$. Diese Abbildung ist affin, also differenzierbar. Es gilt $K'(t) = Y - X$. $F \circ K$ ist diffbar in $(0, 1)$

$$D(F \circ K)_t = DF_{K(t)} \circ DK_t$$

$$(F \circ K)'(t) = DF_{K(t)}(K'(t)) = DF_{K(t)}(Y - X)$$

$$\|(F \circ K)'(t)\| = \|DF_{K(t)}(Y - X)\| \leq \|DF_{K(t)}\| \|Y - X\| \leq c \|Y - X\|$$

Mit $G := F \circ K$ und $c := c \|Y - X\|$

$$\|F(Y) - F(X)\| \leq c \|Y - X\|$$

□

[missing stuff - gradients]

Definition 1.34. Eine Funktion f heißt **partiell differenzierbar**, wenn für jede Koordinatenachse i die Partielle Ableitung $\forall i \in \{0, \dots, n\} : \partial_i f : M \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} : X \rightarrow \partial_i f(X)$ existiert.

Satz 1.35. Ist $f : M \rightarrow \mathbb{R}$ in einer Umgebung von X_0 partiell differenzierbar und sind die partiellen Ableitungen in X_0 stetig, so ist f in X_0 differenzierbar.

Beweis. Sei U ein offener Ball um X_0 , welcher vollständig in M enthalten ist. Sei $H \in \mathbb{R}^n$, sodass $X_0 + H \in U$. Nun gilt:

$$\begin{aligned}
f(X_0 + H) - f(X_0) &= \sum_{i=1}^n (f(x_1, \dots, x_{i-1}, \dots, x_i + h_i, x_{i+1} + h_{i+1}, \dots, x_n + h_n)) \\
&\quad - \sum_{i=1}^n (f(x_1, \dots, x_{i-1}, \dots, x_i, x_{i+1} + h_{i+1}, \dots, x_n + h_n))
\end{aligned}$$

Die Summenglieder sind partielle Ableitung. Nach Mittelwertsatz erhalten wir:

$$\sum_{i=1}^n h_i \partial_i f(x_1, \dots, x_{i-1}, x_i + c_i h_i, x_{i+1} + h_{i+1}, \dots, x_n) \quad c_i \in (0, 1)$$

Nun gilt:

$$\begin{aligned}
&\frac{1}{\|H\|} |f(X_0 + H) - f(X_0) - \langle \nabla f(X_0), H \rangle| \\
&= \frac{1}{\|H\|} \left| \sum_{i=1}^n h_i \partial_i f(x_1, \dots, x_{i-1}, x_i + c_i h_i, x_{i+1} + h_{i+1}, \dots, x_n + h_n) - \partial_i f(x_0, \dots, x_n) \right| \\
&\leq \left| \sum_{i=1}^n \partial_i f(x_1, \dots, x_{i-1}, x_i + c_i h_i, x_{i+1} + h_{i+1}, \dots, x_n + h_n) - \partial_i f(x_0, \dots, x_n) \right| \rightarrow 0
\end{aligned}$$

□

Sei $M \subseteq \mathbb{R}^n$ offen, $X_0 \in M$, $F : M \rightarrow \mathbb{R}^k$. Seien $\forall i \in \{1, \dots, n\} f_i : M \rightarrow \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ Koordinatenfunktionen.

$$F(X) = (f_1(X), \dots, f_k(X)) = \sum_{i=1}^k f_i(X) E'_i$$

$$Y = F(X) \Leftrightarrow \forall i : y_i = f_i(x_1, \dots, x_n) \quad (1.5)$$

Satz 1.36. Die Abbildung F ist genau dann differenzierbar in X_0 , wenn alle Koordinatenfunktionen f_i in X_0 differenzierbar sind. Ist das der Fall, gilt:

$$DF_{X_0}(H) = \sum_{i=1}^k (Df_i)_{X_0}(H) E'_i \quad \forall H \in \mathbb{R}^n$$

Beweis. $L : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ linear. Dann

$$\lim_{H \rightarrow 0} \frac{F(X_0 + H) - F(X_0) - L(H)}{\|H\|} = 0 \Leftrightarrow \lim_{H \rightarrow 0} \frac{f_i(X_0 + H) - f_i(X_0) - (D_i \circ L)(H)}{\|H\|} = 0$$

□

Wir wollen nun das Differential bezüglich der Standardbasis übersichtlich darstellen. Es gilt:

$$L(E_j) = \sum_{i=1}^k a_{ij} E'_i$$

$$DF_{X_0} = \sum_{i=1}^k \partial_j f_i(X_0) E'_i$$

Die Koeffizienten der Darstellenden Matrix sind also identisch mit den Partiellen Ableitungen.

Satz 1.37. Sei $F : M \rightarrow \mathbb{R}^k$ differenzierbar in $X_0 \in M$. Dann wird das Differential DF_{X_0} bezüglich der Standardbasis in \mathbb{R}^n und \mathbb{R}^k beschrieben als die $k \times n$ -Matrix

$$JF(X_0) = (\delta_j f_i(X_0))_{1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq k}$$

Sie heißt die Funktionalmatrix oder Jacobimatrix von F in X_0 . Falls $k = n$ wird die Determinante dieser Matrix als Funktionaldeterminante oder Jacobideterminante von F in X_0 bezeichnet.

[missing stuff]

Satz 1.38. Ist $r \geq 2$ und $f \in C^r(M)$, so sind die partiellen Ableitungen von f bis zur Ordnung r unabhängig von der Reihenfolgen es gilt also:

$$\partial_1 \dots \partial_r f = \partial_{\sigma(1)} \dots \partial_{\sigma(r)} f$$

Satz 1.39. Taylor-Formel: Sei $g : [-\varepsilon, h] \rightarrow \mathbb{R}$ $\varepsilon, h > 0$. Sei g $(k+1)$ -mal differenzierbar. Dann gilt:

$$\exists c \in (0, h) : g(h) = \sum_{j=0}^k \frac{1}{j!} g^{(j)}(0) h^j + \frac{1}{(k+1)!} g^{(k+1)}(c) h^{k+1}$$

Sei $f : M \rightarrow \mathbb{R}$ $M \subseteq \mathbb{R}^n$ offen, $x_0 \in M$. Sei $k \in \mathbb{N}$, $f \in C^k(M)$ mit partielle differenzierbaren partiellen Ableitungen k -ter Ordnung, $H \in \mathbb{R}^n : [x_0, x_0 + H] \subseteq M$. Sei $g(t) := f(x_0 + tH)$. Dann gilt für $r \in \{1, \dots, k+1\}$:

$$g^{(r)}(t) = \sum_{i_1, \dots, i_r} \delta_{i_1} \dots \delta_{i_r} f(X_0 + tH) h_{i_1} \dots h_{i_r}$$

$$g(1) = \sum_{r=0}^k \frac{1}{r!} g^{(r)}(0) + \frac{1}{(k+1)!} g^{(k+1)}(c)$$

Satz 1.40. Mehrdimensionale Taylorformel: Sei $M \subseteq \mathbb{R}^n$ offen, $X_0 \in M$, $H \in \mathbb{R}^n$ mit $[X_0, X_0 + h] \subseteq M$, $k \in \mathbb{N}$, $f \in C^k(M)$, sodass die partiellen Ableitungen der Ordnung k in M differenzierbar sind. Dann $\exists c \in (0, 1)$, sodass:

$$f(X_0 + h) = f(X_0) + \sum_{r=1}^k \frac{1}{r!} \sum_{i_1, \dots, i_r=1}^n \delta_{i_1} \dots \delta_{i_r} f(X_0 + tH) h_{i_1} \dots h_{i_r} + \frac{1}{(k+1)!} \sum_{i_1, \dots, i_{k+1}=1}^n \delta_{i_1} \dots \delta_{i_{k+1}} f(X_0 + cH) h_{i_1} \dots h_{i_{k+1}}$$

Kompakter für $k = 2$:

$$f(X_0 + H) = f(X_0) + \langle \nabla f(X_0), H \rangle + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \partial_i \partial_j f(X_0) h_i h_j + R(X_0, h)$$

$$R(X_0, H) = \frac{1}{6} \sum_{i,j,k=1}^n \delta_i \delta_j \delta_k f(Y) h_i h_j h_k \quad Y \in [X_0, X_0 + H]$$

Falls die dritten Ableitungen auf der Verbindungslinie beschränkt sind gilt:

$$\lim_{H \rightarrow 0} \frac{R(X_0; H)}{\|H\|^3} = 0$$

Satz 1.41. Sei $f : M \rightarrow \mathbb{R}$ zweimal partiell differenzierbar in X_0 . Dann heißt die durch

$$Q(f, X_0; H) := \sum_{i,j=1}^n \delta_i \delta_j f(X_0) h_i h_j$$

definierte Funktion $Q(f, X_0; H)$ die **Hesse-Form** von f im Punkt X_0 und die dadurch definierte Matrix

$$\text{Hess}(f, X_0)_{ij} = (\partial_i \partial_j f(X_0))$$

heißt die **Hesse-Matrix** von f in X_0 .

[...]

Lemma 1.42. Sei $M \subseteq \mathbb{R}^n$ offen, $F : M \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine C^1 -Abbildung, sei $L : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine lineare Abbildung, sei $X, Y \in M$ mit $[X, Y] \subseteq M$. Dann gilt:

$$\|F(X) - F(Y) - L(X - Y)\| \leq \|X - Y\| \cdot \max_{Z \in [X, Y]} \|DF_Z - L\|$$

Beweis.

$$G(X) := F(X) - L(X) \quad X \in M$$

$$DG_Z = DF_Z - L$$

Dann muss für $F \in C^1$ folgende Funktion stetig sein:

$$Z \rightarrow \|DF_Z - L\|$$

Zusätzlich ist $[X, Y]$ kompakt, also existiert das Maximum

$$\max_{Z \in [X, Y]} \|DF_Z - L\| := c$$

Gemäß Mittelwertsatz ist nun

$$\|F(X) - F(Y) - L(X - Y)\| \leq c\|X - Y\|$$

□

Satz 1.43. Sei $M \subseteq \mathbb{R}^n$ offen. Sei $\vec{x}_0 \in M$. Sei $F : M \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine C^r -Abbildung ($r \in \mathbb{N}_1$). Sei das Differential $DF_{\vec{x}_0}$ regulär, also $\det JF(\vec{x}_0) \neq 0$. Dann existiert eine offene Umgebung $U \subseteq M$ von \vec{x}_0 , sodass folgendes gilt:

1. die Einschränkung $F|_U$ ist injektiv
2. die Bildmenge $F(U) := V$ ist offen
3. die Umkehrabbildung $(F|_U)^{-1} : V \rightarrow U$ ist C^r .

Beweis. Sei I die Identitätsabbildung des \mathbb{R}^n . Sei $U(0, \alpha) := \{\vec{x} \in \mathbb{R}^n \mid \|\vec{x}\| < \alpha\}$.

Annahmen: $\vec{x}_0 = 0$, $F(0) = 0$ (Erfüllbar durch Verschieben), $DF_0 = I$ (Erfüllbar durch invertierbare Lineare Abbildung der Funktion?)

$\vec{x} \rightarrow \|DF_{\vec{x}} - I\|$ ist stetig mit $\|DF_0 - I\| = 0$. Also gilt

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists \alpha > 0 : \forall \vec{x} \in U_\alpha : \|DF_{\vec{x}} - I\| \leq \varepsilon$$

Nach 4.3 folgt:

$$\forall \vec{x}, \vec{y} \in U_\alpha : \|F(\vec{x}) - F(\vec{y}) - (\vec{x} - \vec{y})\| \leq \varepsilon \|\vec{x} - \vec{y}\|$$

$$\begin{aligned} \|\vec{x} - \vec{y}\| &\leq \|\vec{x} - \vec{y} - (F(\vec{x}) - F(\vec{y}))\| + \|F(\vec{x}) - F(\vec{y})\| \\ &\leq \varepsilon \|\vec{x} - \vec{y}\| + \|F(\vec{x}) - F(\vec{y})\| \end{aligned}$$

also:

$$(1 - \varepsilon) \|\vec{x} - \vec{y}\| \leq \|F(\vec{x}) - F(\vec{y})\|$$

Also ist $\|F(\vec{x}) - F(\vec{y})\| = 0$ gdw. $\vec{x} = \vec{y}$, also folgt Injektivität.

Lemma 1.44. $U_{(1-\varepsilon)\alpha} \subseteq F(U_\alpha)$

Beweis. Sei $\vec{y} \in U_{(1-\varepsilon)\alpha}$. Wir suchen $\vec{x} \in U_\alpha : \vec{y} = F(\vec{x})$. Wir wollen den Banachschen Fixpunktsatz anwenden. Dafür definieren wir $\phi : \overline{U_\alpha} \rightarrow \mathbb{R}^n$ als:

$$\phi(\vec{x}) := \vec{y} - F(\vec{x}) + \vec{x}$$

Sei nun $X \in \overline{U_\alpha}$. Dann gilt:

$$\begin{aligned} \|\phi(\vec{x})\| &\leq \|\vec{y}\| + \|F(\vec{x}) - \vec{x}\| \\ &\leq \|\vec{y}\| + \varepsilon\|\vec{x}\| \\ &< (1 - \varepsilon)\alpha + \varepsilon\alpha \\ &= \alpha \end{aligned}$$

Sei $X, Z \in \overline{U_\alpha}$. Nun gilt:

$$\begin{aligned} \|\phi(\vec{x}) - \phi(\vec{z})\| &= \|F(\vec{x}) - \vec{x} - (F(\vec{z}) - \vec{z})\| \\ &\leq \varepsilon\|\vec{x} - \vec{z}\| \end{aligned}$$

Gemäß Banachschem Fixpunktsatz existiert also genau ein $X \in \overline{U_\alpha}$, sodass $\phi(\vec{x}) = \vec{x}$, also $F(\vec{x}) = \vec{y}$. Da $\phi(\vec{x}) < \alpha$ gilt auch $\vec{x} \in U_\alpha$. \square

Sei nun $V : U_{(1-\varepsilon)\alpha}$ und $U := F^{-1}(V)$. Gemäß Lemma ist U eine Obermenge von V , also ist U eine offene Umgebung von 0. Wir wissen bereits, dass $F|_U$ injektiv ist. Sei also nun $G : V \rightarrow U$ die Umkehrabbildung von $F|_U$.

Lemma 1.45. *G ist in 0 differenzierbar.*

Beweis. Sei $\varepsilon' \in \mathbb{R}^+$. So existiert ein $\alpha' \in \mathbb{R}^+$, sodass $U_{\alpha'} \in M$ und

$$\|F(\vec{x}) - \vec{x}\| \leq \frac{\varepsilon'}{1 + \varepsilon'} \|\vec{x}\| \quad \forall \vec{x} \in U_{\alpha'}$$

$$\begin{aligned} \|\vec{x}\| &\leq \|\vec{x} - F(\vec{x})\| + \|F(\vec{x})\| \\ &\leq \frac{\varepsilon'}{1 + \varepsilon'} \|\vec{x}\| + \|F(\vec{x})\| \end{aligned}$$

also:

$$\|\vec{x}\| \leq (1 + \varepsilon') \|F(\vec{x})\| \quad \forall \vec{x} \in U_{\alpha'}$$

Sei nun $\vec{h} \in V$ mit $\|\vec{h}\| < \alpha'(1 - \varepsilon)$. Sei $\vec{x} := G(\vec{h})$. Gemäß Lemma ist $V \subseteq F(U_\alpha)$, also $G(V) \subseteq G(F(U_\alpha))$, also $U \subseteq U_\alpha$, also $\vec{x} \in U$ (?)

Gemäß vorheriger Überlegungen haben wir

$$\|X\| \leq \frac{1}{1 - \varepsilon} \|F(\vec{x})\| = \frac{1}{1 - \varepsilon} \|\vec{h}\| < \alpha'$$

Wir betrachten nun endlich den Differentialquotienten:

$$\begin{aligned} \|G(\vec{h}) - \vec{h}\| &= \|\vec{x} - F(\vec{x})\| \\ &\stackrel{(*)}{\leq} \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon'} \|\vec{x}\| \\ &\leq \varepsilon' \|F(\vec{x})\| \\ &\leq \varepsilon' \|\vec{h}\| \end{aligned}$$

also:

$$\frac{\|G(\vec{h}) - \vec{h}\|}{\|\vec{h}\|} \leq \varepsilon'$$

für alle $0 < \|\vec{h}\| < \min\{\alpha(1 - \varepsilon), \alpha'(1 - \varepsilon)\}$, also ist G in 0 differenzierbar mit $DG_0 = I$. \square

Was ist nun, wenn die Voraussetzungen $\vec{x} = 0$, $F(0) = 0$, $DF_0 = I$ nicht gelten?

Wir definieren lineare Translationsabbildungen $T_{\vec{z}}: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ $\vec{x} \rightarrow \vec{x} + \vec{z}$. Sei nun:

- $L : DF_{\vec{x}_0}$,
- $M' := (L \circ T_{-\vec{x}_0})(M)$,
- $F'(\vec{x}) := T_{-F(\vec{x}_0)} \circ F \circ T_{\vec{x}_0} \circ L^{-1}(\vec{x})$

Die Differentiale sind $DL = L$ und $DT_Z = I$. Nun gilt:

$$DF'_0 = I \circ DF_{\vec{x}_0} \circ I \circ (DF_{\vec{x}_0})^{-1} = I$$

Also $F'(0) = 0$, $0 \in M'$. F' ist also umkehrbar und die Umkehrabbildung ist differenzierbar in 0. Für die ursprüngliche Abbildung gilt $F = T_{T_{\vec{x}_0}} \circ F' \circ L \circ T_{-\vec{x}_0}$. \square

Definition 1.46. Sei $F : M \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine C^r -Funktion mit regulären Differentialen. Eine solche Abbildung nennt man einen C^r -Diffeomorphismus.

[...]

Satz 1.47. (Implizite Funktion): Sei $k < n$, $M \subseteq \mathbb{R}^n$ offen, $F \in C^r : M \rightarrow \mathbb{R}^k$, sei $N = \{\vec{x} \in M \mid F(\vec{x}) = 0\}$. Sei $\vec{x}_0 \in N$ und $DF_{\vec{x}_0}$ vom Rang k . Dann gibt es nach passender Identifizierung von \mathbb{R}^n mit $\mathbb{R}^{n-k} \times \mathbb{R}^k$ eine offene Umgebung $U \subseteq M$ von \vec{x}_0 , eine offene Menge $V \subseteq \mathbb{R}^{n-k}$ und eine Abbildung $G \in C^r : V \rightarrow \mathbb{R}^k$, sodass $N \cap U$ der Graph von G ist.

Beweis. $DF_{\vec{x}_0}$ hat Rang k . Es gilt also k linear unabhängige Spalten. OBDA seien dies die letzten k Spalten. Die ersten $(n - k)$ Basisvektoren bilden eine Basis des \mathbb{R}^{n-k} , ebenso bilden die letzten k Vektoren eine Basis des \mathbb{R}^k . Wir haben somit eine Identifikation $\mathbb{R}^n \simeq \mathbb{R}^{n-k} \times \mathbb{R}^k$ erhalten, sodass wir $\vec{x} \in \mathbb{R}^n$ abbilden auf $\vec{x} = (\vec{x}', \vec{x}'')$. Wir definieren folgende Funktion:

$$\begin{aligned} \phi : M \times \mathbb{R}^k &\rightarrow \mathbb{R}^{n-k} \times \mathbb{R}^k \\ (\vec{x}', \vec{x}'') &\rightarrow (\vec{x}', F(\vec{x}', \vec{x}'')) \end{aligned}$$

Da $F, \times \in C^r$ ist ϕ ebenfalls in C^r . Für die Jakobimatrix gilt:

$$J\phi = \begin{pmatrix} 1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \end{pmatrix}$$

[WIP]

Nach dem Satz der Inversen Funktion existiert eine Umgebung U_0 von \vec{x}_0 , sodass auf dieser Umgebung eine Umkehrabbildung ψ existiert. Und so weiter :) \square

Anmerkung 1.48. Seien A, B Mengen. Es existieren folgende Funktionen:

- Das Produkt $A \times B$
- Die Projektion $\pi_1 : A \times B \rightarrow A$ auf die erste Komponente
- Die Projektion $\pi_2 : A \times B \rightarrow B$ auf die zweite Komponente
- Die kanonische Injektion $i : A \rightarrow A \times B : a \rightarrow (a, 0)$

Satz 1.49. Über lokal surjektive Abbildungen: Sei $k < n$. Sei $M \subseteq \mathbb{R}^n$ offen, $F : M \rightarrow \mathbb{R}^k$ eine Abbildung der Klasse C^r , $r \in \mathbb{N}_1$. Sei $X_0 \in M$ und F in X_0 vom Rang k , also DF_{X_0} surjektiv. Dann gibt es eine offene Umgebung U von X_0 in M , eine offene Menge V in \mathbb{R}^{n-k} , und einen C^r -Diffeomorphismus $h : U \rightarrow V \times F(u)$, sodass das folgende Diagramm kommutiert:

$$\begin{array}{ccc} U & \xrightarrow{h} & V \times F(u) \\ & \searrow F & \downarrow \pi_2 \\ & & F(u) \end{array}$$

Beweis. Nach Voraussetzung hat $JF(X_0)$ k unabhängige Spalten. Seien dies OBdA die letzten Spalten. Wir interpretieren $\mathbb{R}^n = \mathbb{R}^k \times \mathbb{R}^{n-k}$ und definieren $\pi_1 : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n-k}$ und $\pi_2 : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^k$ als die dazugehörigen kanonischen Projektionen. Sei φ folgende Funktion:

$$\begin{aligned} \varphi : M &\rightarrow \mathbb{R}^{n-k} \times \mathbb{R}^k \\ X &\rightarrow (\pi_1(X), F(X)) \end{aligned}$$

Es gilt $F \in C^r$ und $\pi_1 \in C^r$, also auch $\varphi \in C^r$. Gemäß des Satzes der inversen Funktion existiert also eine Umgebung $\varphi \in C^r$, auf der φ ein C^r Diffeomorphismus (also C^r und invertierbar).

Da φ^{-1} stetig ist, ist das Urbild $(\varphi^{-1})^{-1}(U') = \varphi(U')$ offen. Es enthält also eine offene Umgebung von $\varphi(X_0) = (\pi_1(X_0), F(X_0))$ der Form $V \times X$, also ist V offen in \mathbb{R}^{n-k} . Wir setzen $U := \varphi^{-1}(V \times W)$ und $h = \varphi|_U$. Dann ist $F(U) = W$, und für $X \in U$ gilt $h(X) = (\pi_1(X), F(X))$, also $\pi_2 \circ h = F$. \square

Im Fall $k > n$ erhalten wir lokale Injektivität statt lokaler Surjektivität:

Satz 1.50. Über lokal injektive Abbildungen: Sei $k > n$. Sei $M \subseteq \mathbb{R}^n$ offen, sei $F : M \rightarrow \mathbb{R}^k$ eine C^r -Abbildung. Sei $X_0 \in M$ und F in X_0 vom Rang n (und damit das Differential DF_{X_0} injektiv). Sei i die kanonische Injektion.

Dann gibt es eine offene Umgebung U von X_0 in M , eine offene Umgebung V von 0 in \mathbb{R}^{k-n} , eine offene Umgebung W von $F(X_0)$ in \mathbb{R}^k , und einen C^r -Diffeomorphismus $h : U \times V \rightarrow W$, sodass das folgende Diagramm kommutiert:

$$\begin{array}{ccc} U & \xrightarrow{i} & V \times F(u) \\ & \searrow F & \downarrow h \\ & & F(u) \end{array}$$

Beweis. hi :D

□

[...]

Chapter 2

Gewöhnliche Differentialgleichungen

Gewöhnliche Differentialgleichungen, auf englisch *ordinary differential equations* (ODEs) beschreiben zeitabhängige Prozesse. Sie sind nützlich für die modellierung zahlreicher Prozesse in verschiedenen Gebieten der Wissenschaft.

2.1 Existenztheorie

Definition 2.1. Für $f : \mathbb{R}^{n+1} \rightarrow \mathbb{R}$ nennen wir eine Gleichung der Form

$$y^{(n)}(t) = f(t, y(t), y'(t), \dots, y^{(n-1)}(t))$$

eine *explizite Differentialgleichung n-ter Ordnung*. Ist zusätzlich

$$y^{(i)}(t_0) = y_{i-1}$$

für $(t_0, y_0, y_1, \dots, y_{n-1}) \in \mathbb{R}^{n+1}$ gegeben, spricht man von einem *Anfangswertproblem*.

Definition 2.2. Sei I ein Intervall. Eine Funktion $y : I \rightarrow \mathbb{R}$ heißt *Lösung* von (2.1) im Intervall I , falls y in I n -mal differenzierbar ist und

$$y^{(n)}(t) = f(t, y(t), y'(t), \dots, y^{(n-1)}(t))$$

für alle $t \in I$ erfüllt ist.

Wir erlauben hier jede Art von Intervall, egal ob offen, halboffen, oder geschlossen.

Definition 2.3. Sei $F : \omega \subseteq \mathbb{R}^{n+1} \rightarrow \mathbb{R}^n$. Wir nennen das Gleichungssystem

$$Y'(t) = F(t, Y(t))$$

ein *System von Differentialgleichungen 1. Ordnung*. Für $F = (f_1, \dots, f_n)$ und $Y = (y_1, \dots, y_n)$ lässt sich das System komponentenweise schreiben als:

$$\begin{aligned} y_1'(t) &= f_1(t, y_1(t), \dots, y_n(t)) \\ &\vdots \\ y_n'(t) &= f_n(t, y_1(t), \dots, y_n(t)) \end{aligned}$$

Ergänzt man das System durch die Bedingung $Y(t_0) = Y_0$ erhalten wir komponentenweise:

$$\begin{aligned} y_1(t_0) &= y_1^0 \\ &\vdots \\ y_n(t_0) &= y_n^0 \end{aligned}$$

Für ein $(t_0, y_1^0, \dots, y_n^0) \in \Omega$ und sprechen wieder von einem *Anfangswertproblem*.

Lemma 2.4. *Erfülle F die Voraussetzung (S), sei außerdem $y_i(a, b) \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine Lösung des Gleichungssystems $Y'(t) = F(t, Y(t))$. Weiter existiere der Grenzwert $\lim_{t \rightarrow +b} Y(t) := y_1$ und es gelte $(b, y_1) \in \Omega$. Dann existiert $\delta > 0$, sodass man die Lösung y zu einer Lösung auf dem Intervall $(a, b + \delta]$ fortsetzen kann.*

Definition 2.5. Seien $A, B \in \mathbb{R}^{n+1}$. Wir definieren zwischen den beiden Mengen folgendermaßen eine Abstandsfunktion:

$$\text{dist}(A, B) := \inf_{x \in A, y \in B} \|X - Y\|$$

[big gap here oops]

Lemma 2.6. Seien I, J offene Intervalle, sei $f : J \times I \rightarrow \mathbb{R}$ durch $f(t, y) = h(t)g(y)$ gegeben, wobei $g : I \rightarrow \mathbb{R}$, $g \neq 0$, $h : J \rightarrow \mathbb{R}$ stetig sind. Falls $\varphi : (\alpha, \beta) \subseteq J \rightarrow I$ eine Lösung von (3.1) ist, existiert $c \in \mathbb{R} : \forall t \in (\alpha, \beta)$

$$\varphi(t) = G^{-1}(H(t) + c)$$

Satz 2.7. Erfülle f die Voraussetzung des letzten Lemmas. Dann existiert $\forall (t_0, y_0) \in J \times I$ eine eindeutige maximale Lösung $y : J_0 \rightarrow I$ von (3.1) mit $y(t_0) = y_0$. Diese Lösung ist von der Form

$$y(t) = G^{-1}(H(t)),$$

wobei

$$G(y) = \int_{y_0}^y \frac{1}{g(x)} dx, y \in I,$$

$$H(t) = \int_{t_0}^t h(s) ds, t \in J$$

ist.

Beispiel 2.8. Sei $y'(t) = 2t(1 + y^2)$ mit Anfangsbedingung $y(t_0) = y_0$, wobei $(t_0, y_0 \in \mathbb{R}^2)$. Dann gilt:

$$g(y) = 1 + y^2, \quad h(t) = 2t$$

$$\begin{aligned} G(y) &= \int_{y_0}^y \frac{1}{1+x^2} dx \\ &= \arctan y - \arctan y_0 \\ &:= \arctan y - c_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H(t) &= \int_{t_0}^t 2s \, ds \\ &= t^2 - t_0^2 \end{aligned}$$

$$\text{Bild}(G) = \left(-\frac{\pi}{2} - c_0, \frac{\pi}{2} - c_0\right), \quad c_0 \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$$

$$1. \quad -t_0^2 > -\frac{\pi}{2} - c_0$$

$$\alpha := \sqrt{\frac{\pi}{2} - c_0 + t_0^2}$$

$$H^{-1}(\text{Bild}(G)) = (-\alpha, \alpha)$$

$$y(t) = \tan(t^2 - t_0^2 + \arctan(y_0))$$

$$2. \quad -t_0^2 \leq -\frac{\pi}{2} - c_0$$

$$\alpha = \sqrt{-\frac{\pi}{2} - c_0 + t_0^2}$$

$$\beta := \sqrt{\frac{\pi}{2} - c_0 + t_0^2}$$

$$H^{-1}(\text{Bild}(G)) = (-\beta, -\alpha) \cup (\alpha, \beta)$$

OBdA $t_0 \in (\alpha, \beta)$, dann

$$y(t) = \tan(t^2 - t_0^2 - \arctan(y_0))$$

2.2 Lineare Gleichungen

Angenommen, wir haben eine Funktion $f(t, y)$ der Form

$$f(t, y) = h(t)y + p(t)$$

Es gilt:

$$h, p : I = (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$$

Wobei nach Annahme h, p stetig sind und $f : I \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ die Voraussetzung (S) erfüllt.

Wenn $p(t) = 0$ nennen wir die Differentialgleichung $y' = f(t, y)$ **homogen**, ansonsten nennen wir sie **inhomogen**.

$$y' = h(t)y + p(t) \Leftrightarrow y'(t) - h(t)y(t) = p(t)$$

Wir suchen nun das Urbild von $p \in C^0(I)$ bezüglich

$$L : C^1(I) \rightarrow C^0(I) : y \mapsto y' - hy$$

$$(L(y))(t) := y'(t) - h(t)y(t)$$

Es gilt:

$$L(\alpha y + \beta z) = \alpha L(y) + \beta L(z)$$

Also ist L ein linearer Operator!

[...]

Lemma 2.9. Sei $I = (a, b)$ und für $f : I \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ gelte

$$f(t, y) = h(t)y + p(t)$$

Wobei p, h auf I stetig sind. Seien Lösungen y_1, y_2 der inhomogenen Gleichung und y_0 Lösung der homogenen Gleichung. Dann gilt:

- (i) $y_1 - y_2$ ist Lösung der homogenen Gleichung
- (ii) $y_1 + y_0$ ist Lösung der inhomogenen Gleichung

Lemma 2.10. Sei y_2 eine Lösung der inhomogenen Gleichung und y_0 eine Lösung der homogenen Gleichung. So existiert eine Lösung y_1 der inhomogenen Gleichung, sodass

$$y_2 = y_0 + y_1$$

Variation der Konstanten:

$$\begin{aligned} y(t) &= c(t)e^{H(t)} \\ y'(t) &= c'(t)e^{H(t)} + c(t)e^{H(t)}h(t) \end{aligned}$$

Damit y eine Lösung von (3.1) ist muss gelten:

$$y'(t) = p(t) + h(t)y(t)$$

Also:

$$c'(t) = p(t)e^{-H(t)}$$

Also ist c eine Stammfunktion von pe^{-H} .

Satz 2.11. Sei $I = (a, b)$, für $f : I \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ gelte

$$f(t, y) = h(t)y + p(t)$$

p, h stetig. Dann existiert für alle $(t_0, y_0) \in I \times \mathbb{R}$ eine eindeutige, maximale Lösung

$$y : I \rightarrow \mathbb{R}$$

von (3.1) mit $y(t_0) = y_0$. Diese Lösung hat folgende Form:

$$y(t) = e^{[H(t)]} \left(y_0 + \int_{t_0}^t p(s)e^{-H(s)} ds \right)$$

Wobei

$$H(t) = \int_{t_0}^t h(s) ds$$

Beweis.

$$y(t_0) = e^{H(t_0)}(y_0 + 0) = y_0$$

Rechnungen liefern, dass $y : I \rightarrow \mathbb{R}$ maximal ist. Seien y_1, y_2 eine maximale Lösung mit $y_i(t_0) = y_0$. $\bar{y} := y_1 - y_2$ ist eine Lösung der homogenen Gleichung mit $y(t_0) = 0$, also $\bar{y}(t) = 0$, also $y_1 = y_2$. \square

Chapter 3

Systeme Linearer Differentialgleichungen

Wir suchen nach Lösungen von Gleichungssystemen der Form:

$$Y'(t) = \mathbf{A}(t)Y(t) + \mathbf{B}(t)$$

Wobei \mathbf{A}, \mathbf{B} Matrizen sind.

Sei $I = (a, b)$ und sei $F(t, Y) := \mathbf{A}(t)Y + \mathbf{B}(t)$. F ist bezüglich Y lokal Lipschitzstetig, also existiert eine eindeutige maximale Lösung mit $Y(t_0) = Y_0$.

Lemma 3.1. Lemma von Gronwall:

Sei J ein Intervall, $t_0 \in J$, $\alpha, \beta \in [0, \infty)$. Ferner sei $x : J \rightarrow [0, \infty)$ stetig und erfülle

$$x(t) \leq \alpha + \beta \left| \int_{t_0}^t x(s) ds \right|$$

Für $t \in J$. Dann gilt

$$x(t) \leq \alpha e^{\beta|t-t_0|}$$

Beweis. Sei $t \geq t_0$, $t \in J$. Sei

$$h(s) := \beta e^{\beta(t_0-s)} \int_{t_0}^s x(\tau) d\tau$$

mit $s \in [t_0, t]$. Sei

$$\begin{aligned} h'(s) &= \beta e^{\beta(t_0-s)} (-1) \beta \int_{t_0}^s x(\tau) d\tau + \beta e^{\beta(t_0-s)} x(s) \\ &= -\beta h(s) + \beta e^{\beta(t_0-s)} x(s) \\ &\leq -\beta h(s) + \beta e^{\beta(t_0-s)} \left(\alpha + \beta \left| \int_{t_0}^s x(\tau) d\tau \right| \right) \\ &= -\beta h(s) + \alpha \beta e^{\beta(t_0-s)} + \beta h(s) \\ &= \alpha \beta e^{\beta(t_0-s)} \end{aligned}$$

$$\int_{t_0}^t h'(s) ds = h(t) - h(t_0) = h(t) = \beta e^{\beta(t_0-t)} \int_{t_0}^t x(\tau) d\tau$$

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^t \frac{d}{ds} (-\alpha e^{\beta(t_0-s)}) ds &= -\alpha e^{\beta(t_0-t)} + \alpha \\ \implies \beta e^{\beta(t_0-s)} \int_{t_0}^t x(\tau) d\tau &\leq \alpha - \alpha e^{\beta(t_0-t)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \beta \int_{t_0}^t x(s) ds \leq \alpha e^{\beta(t-t_0)} - \alpha \\
\implies & \alpha + \beta \int_{t_0}^t x(s) ds \leq \alpha e^{\beta(t-t_0)} \\
\implies & x(t) \leq \alpha e^{\beta(t-t_0)}
\end{aligned}$$

□

Satz 3.2. Seien \mathbf{A}, \mathbf{B} stetig Funktionen auf $I = (a, b)$. Dann ist jede maximale Lösung des dazugehörigen Differentialsystems auf ganz (a, b) definiert.

Beweis. Sei eine maximale Lösung gegeben durch:

$$Y : (\alpha, \beta) \rightarrow \mathbb{R}^n$$

Wobei $Y(t_0) = Y_0, t_0 \in (\alpha, \beta)$. Da Y eine maximale Lösung ist existiert der Limes

$$\lim_{t \rightarrow +\beta} Y(t)$$

nicht. Sei $(\alpha, \beta) \subsetneq (a, b)$, OBdA $\beta < b$. Sei für $n \in \mathbb{N}$:

$$K_n := \{(t, Y) \in \mathbb{R}^{n+1} \mid t \in [t_0, \beta], \|Y\| \leq n\}$$

Da diese Menge kompakt ist und Y eine maximale Lösung ist, ist

$$G^+ = \{(t, z) \in \overline{\text{graph}(Y)} \mid t \geq t_0\}$$

keine kompakte Teilmenge.

$$\begin{aligned}
& \exists \tau_n \in [t_0, \beta) : \|Y(\tau_n)\| = n \\
\implies & \lim_{n \rightarrow \infty} \|Y(\tau_n)\| = \infty
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
n(T) &:= \|Y(t)\| \mid t \in (\alpha, \beta) \\
\delta &:= \max_{t \in [t_0, \beta]} \|\mathbf{A}(t)\|_{\mathbb{R}^n \times m} < \infty \\
\gamma &:= \max_{t \in [t_0, \beta]} \|\mathbf{B}(t)\|_{\mathbb{R}^n} < \infty
\end{aligned}$$

Da Y eine Lösung ist, ist:

$$Y(t) = Y(t_0) + \int_{t_0}^t \mathbf{A}(s)Y(s) + \mathbf{B}(s) ds \in [t_0, \beta)$$

□

[...]

Definition 3.3. Wir nennen die Matrix \mathbf{Y} , welche das System linearer Differentialgleichungen beschreibt, die **Fundamentalmatrix** des Systems.

Lemma 3.4. Es gilt $\mathbf{Y}' = \mathbf{A}\mathbf{Y}$.

Definition 3.5. Wir definieren $\mathbf{Z}(t) = \mathbf{Y}(t)\mathbf{Y}^{-1}(t_0)$.

Definition 3.6. Sei $I = (a, b)$, $\mathbf{A} : I \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}$ stetig. Sei \mathbf{Y} eine Fundamentalmatrix eines homogenen Systems linearer Differentialgleichungen. Wir nennen

$$W(t) := \det\{\mathbf{Y}(t)\}$$

die **Wronski-Determinante**.

Satz 3.7. Sei $I = (a, b)$, $\mathbf{A} : I \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}$ stetig. Sei \mathbf{Y} eine Fundamentalmatrix eines homogenen Systems linearer Differentialgleichungen. Dann gilt

$$W(t) = W(t_0)e^{\int_{t_0}^t \text{tr}(\mathbf{A}(s))ds}$$

für $t \in I$, wobei die Spur $\text{tr}(\mathbf{A})$ einer quadratischen Matrix als die Summe der Diagonaleinträge definiert ist.

Beweis. Es gilt $\text{tr}(\mathbf{A}) \in \mathbb{R}$, $W(t) \in \mathbb{R}$. Wir betrachten also eine skalare Gleichung. Gemäß Satz (3.8?) aus Kapitel 12 gilt diese Formel genau dann, wenn

$$W'(t) = \text{tr}(\mathbf{A}(t))W(t)$$

Wir benötigen also eine Formel für die Ableitung der Determinante. Für $\mathbf{B} = (b_{ij})$ gilt

$$\det \mathbf{B} = \sum_{\sigma \in S_n} \text{sgn}(\sigma) b_{1\sigma(1)} \cdot \dots \cdot b_{n\sigma(n)}$$

Somit gilt:

$$(\det \mathbf{B})' = \sum_{i=1}^n \sum_{\sigma \in S_n} \text{sgn}(\sigma) b_{1\sigma(1)} \cdot \dots \cdot b'_{i\sigma(i)} \cdot \dots \cdot b_{n\sigma(n)}$$

(insert black magic here)

Es folgt:

$$W(t) = \det \mathbf{Y}(t) = \det \mathbf{Z}(t) \det \mathbf{Y}(t_1) = \det \mathbf{Z}(t) W(t_1)$$

und somit:

$$W'(t) = (\det \mathbf{Z}(t))' W(t_1)$$

Mit der Formel der Ableitung der Determinante gilt:

$$\begin{aligned} (\det \mathbf{Z}(t_1))' &= \sum_{i=1}^n \det(Z_1(t_1), \dots, Z'_i(t_1), \dots, Z_n(t_1)) \\ &= \sum_{i=1}^n \det(E_1(t_1), \dots, \mathbf{A}(t_1)E_i, \dots, E_n(t_1)) \\ &= \sum_{i=1}^n a_{ii}(t_1) \\ &= \text{tr} \mathbf{A}(t_1) \end{aligned}$$

Es gilt folglich:

$$W'(t) = \text{tr} \mathbf{A}(t_1) W(t_1)$$

□

Korollar 3.8. Die Wronski-Determinante einer Fundamentalmatrix ist überall ungleich Null.

3.1 Systeme mit konstanten \mathbf{A}

Wir betrachten Systeme der Form:

$$Y'(t) = \mathbf{A}Y(t)$$

Wir betrachten dabei die lineare Abbildung:

$$A : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n : Y \mapsto \mathbf{A}Y$$

Also $\mathbf{A} = M_E^E(A)$. Aus der Linearen Algebra ist bekannt, dass:

$$M_B^B(A) = M_B^E(id)M_E^E(A)M_E^B(id)$$

Wobei $M_E^B(id) := \mathbf{B}$ und $M_B^E := \mathbf{B}^{-1}$. Also:

$$M_B^B(A) = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{B} := \mathbf{D}$$

$$Z(t) := \mathbf{B}^{-1}Y(t) \Leftrightarrow \mathbf{B}Z(t) = Y(t)$$

Falls Y eine Lösung des Systems mit Konstante ist, gilt:

$$Z'(t) = \mathbf{B}^{-1}Y'(t) = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{A}Y(t) = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{B}Z(t) = \mathbf{D}Z(t)$$

Satz 3.9. *Wenn \mathbf{A} symmetrisch ist, können wir die Matrix diagonalisieren und erhalten eine besonders simple Lösung der Form:*

$$\mathbf{Y} = \mathbf{B}\mathbf{Z} = (B_1e^{\lambda_1 t}, \dots, B_ne^{\lambda_n t})$$