

Analysis II

Prof. Dr. Ekaterina Kostina

SoSe 2020

Inhaltsverzeichnis

1	Folgen und Reihen von Funktionen	3
1.1	Funktionenfolgen und gleichmäßige Konvergenz	3
1.2	Der Funktionenraum $C[a, b]$	5
1.3	Integration und Grenzübergänge	6
1.4	Der Funktionen-Raum $R[a, b]$	8
1.5	Fourier-Entwicklung	13
2	Der n-dimensionale Zahlenraum K^n	24
2.1	Der euklidische Raum K^n	24
2.2	Teilmengen in K^n (Topologische Grundbegriffe)	27
2.3	Geometrie in K^n	33
2.4	Lineare Abbildungen auf dem K^n	38
3	Funktionen mehrerer Variablen	44
3.1	Stetigkeit	44
3.2	Vektor- und Matrixwertige Funktionen	49
3.2.1	Lineare und nichtlineare Gleichungssysteme	50
4	Differenzierbare Funktionen in $\mathbb{R}^n$	53
4.1	Partielle Differenzierbarkeit	53
4.2	Totale Differenzierbarkeit	57

Kapitel 1

Folgen und Reihen von Funktionen

1.1 Funktionenfolgen und gleichmäßige Konvergenz

Definition 1.1. Sei für $n \in \mathbb{N}$, $f_n: D \rightarrow \mathbb{R}$, $D \subset \mathbb{R}$ eine Funktion. Die Folge $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ konvergiert punktweise gegen eine Funktion $f: D \rightarrow \mathbb{R}$ falls $\forall x \in D$ die Folge $(f_n(x))_{n \in \mathbb{N}}$ gegen $f(x)$ konvergiert, d.h.

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists N = N(\varepsilon, x) > 0 \text{ s.d. } |f_n(x) - f(x)| < \varepsilon \quad \forall n \geq N.$$

Beispiel 1.2. (a)

$$f_n(x): [0, 2] \rightarrow \mathbb{R}$$
$$f_n(x) = \begin{cases} n^2 x & 0 \leq x \leq \frac{1}{n} \\ 2n - n^2 x & \frac{1}{n} \leq x \leq \frac{2}{n} \\ 0 & \frac{2}{n} \leq x \leq 2 \end{cases}.$$

$(f_n(x))_{n \in \mathbb{N}}$ konvergiert punktweise gegen $f(x) \equiv 0 \quad \forall x \in [0, 2]$.

$$x = 0: f_n(0) = 0 = f(0)$$

$$0 < x \leq 2: \forall n \geq \frac{2}{x}, f_n(x) = 0 = f(x)$$

(b) $f_n(x) = x^n$, $f_n: [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$.

$$(f_n(x))_{n \in \mathbb{N}} \xrightarrow[\text{punktweise}]{n \rightarrow \infty} f(x) = \begin{cases} 1 & \text{falls } x = 1 \\ 0 & \text{falls } 0 \leq x < 1 \end{cases}.$$

Bemerkung 1.3. Punktweiser Limes stetiger Funktionen muss nicht stetig sein.

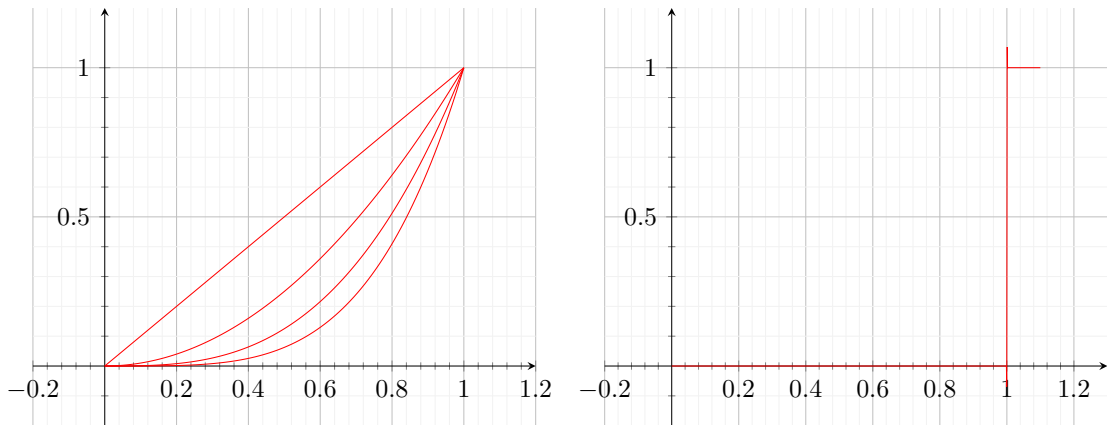
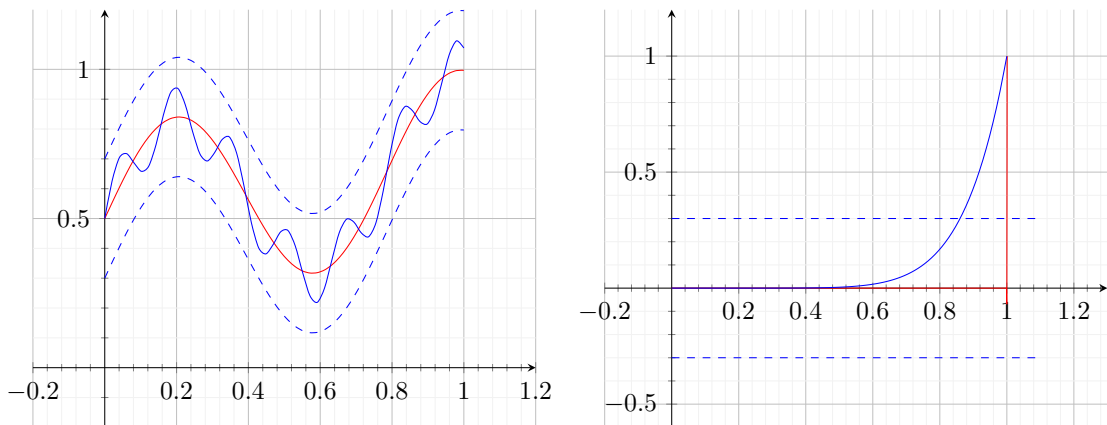
Definition 1.4. Die Folge $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ konvergiert gleichmäßig gegen $f: D \rightarrow \mathbb{R}$ falls gilt

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists N = N(\varepsilon) \text{ s.d. } |f_n(x) - f(x)| < \varepsilon \quad \forall x \in D \text{ und } n \geq N.$$

Bemerkung 1.5. $\forall \varepsilon > 0, \exists N = N(\varepsilon), \forall n \geq N$ gilt

$$\text{graph}(f_n) \subset \varepsilon\text{-Umgebung von Graphen von } f := \{(x, y) \in D \times \mathbb{R} \mid |y - f(x)| < \varepsilon\}.$$

Beispiele 1.2 (a) und (b) nicht gleichmäßig konvergent, zu (a): Für $\varepsilon = \frac{1}{2}$ gilt $|f_n(\frac{1}{n}) - f(\frac{1}{n})| = n > \frac{1}{2}$

Abbildung 1.1: $f_n(x) = x^n$ und ihre GrenzfunktionAbbildung 1.2: Links: „ ε -Schlauch“, Rechts: 1.2 (b) nicht gleichmäßig konvergent

Beispiel 1.6. $f_n: [0, 2] \rightarrow \mathbb{R}$, $f_n(x) := \frac{1}{n} \sin(2\pi n \cdot x)$ konvergiert gleichmäßig gegen $f(x) = 0$.

$$|\sin(2\pi n \cdot x)| \leq 1 \quad \forall x \in \mathbb{R} \implies f_n(x) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \quad \forall x \in [0, 2] \implies \text{punktweise Konvergenz.}$$

Sei nun $\varepsilon > 0$, dann $\exists N \in \mathbb{N}$ mit $\frac{1}{N} < \varepsilon$. Damit folgt

$$\forall n \geq N \quad |f_n(x)| \leq \frac{1}{N} < \varepsilon \quad \forall x \implies \text{gleichmäßige Konvergenz.}$$

Bemerkung 1.7. Konvergiert $f_n: D \rightarrow \mathbb{R}$ gleichmäßig gegen $f: D \rightarrow \mathbb{R}$, dann konvergiert f_n punktweise gegen f . Die Umkehrung gilt nicht, siehe 1.2 (a) und (b).

Satz 1.8 (Gleichmäßiger Limes stetiger Funktionen ist stetig). Es sei $D \subset \mathbb{R}$ und $f_n: D \rightarrow \mathbb{R}$ $\forall n \in \mathbb{N}$ stetig in D . Sei $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ gleichmäßig konvergent gegen $f: D \rightarrow \mathbb{R}$. Dann gilt: f ist stetig in D .

Beweis. Seien $x_0 \in D$ und $\varepsilon > 0$. Zu zeigen: $\exists \delta > 0 \forall x \in D: |x - x_0| < \delta \implies |f(x) - f(x_0)| < \varepsilon$.

$$(f_n)_{n \in \mathbb{N}} \xrightarrow[\text{gleichmäßig}]{n \rightarrow \infty} f \implies \exists N \in \mathbb{N} \text{ s.d. } \forall n \geq N \quad \forall x \in D \text{ gilt } |f_n(x) - f(x)| < \frac{\varepsilon}{3}.$$

$$f_n \text{ stetig in } x_0 \implies \exists \delta \text{ s.d. } \forall x \in D \text{ gilt } |x - x_0| < \delta \implies |f_n(x) - f_n(x_0)| < \frac{\varepsilon}{3}.$$

Zusammen: $\forall x$ mit $|x - x_0| < \delta$ gilt:

$$\begin{aligned} |f(x) - f(x_0)| &= |f(x) - f_n(x) + f_n(x) - f_n(x_0) + f_n(x_0) - f(x_0)| \\ &\leq |f(x) - f_n(x)| + |f_n(x) - f_n(x_0)| + |f_n(x_0) - f(x_0)| \\ &\leq \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} \\ &= \varepsilon. \end{aligned}$$

□

1.2 Der Funktionenraum $C[a, b]$

Definition 1.9 (Maximumnorm $\|\cdot\|_\infty$). Es sei D ein beschränktes, abgeschlossenes Intervall $I = [a, b]$ und $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ (oder $\mathbb{C}$) stetig. Dann

$$\|f\|_\infty := \max\{|f(x)| \mid x \in [a, b]\}.$$

Das Maximum existiert wegen der Stetigkeit des Absolutbetrags und weil $[a, b]$ beschränkt und abgeschlossen ist.

Satz 1.10 ($\|\cdot\|_\infty$ und gleichmäßige Konvergenz). Es sei $D = [a, b]$ und $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ stetig. Dann gilt

- (i) $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ konvergiert gleichmäßig gegen $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R} \iff \|f_n - f\|_\infty \rightarrow 0, n \rightarrow \infty$
- (ii) Cauchy-Kriterium: $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ konvergiert gleichmäßig auf $[a, b] \iff \forall \varepsilon > 0 \exists N_0 \in \mathbb{N}$, s.d. $\forall n, m \geq N_0$ gilt $\|f_n - f_m\|_\infty < \varepsilon$

Beweis. (i) „ $\implies$ “: Sei $\varepsilon > 0$. Dann $\exists N \in \mathbb{N}$ s.d. $|f_n(x) - f(x)| < \frac{\varepsilon}{2} \forall x \in [a, b]$ und $\forall n \geq N$.
Damit folgt:

$$\max_{x \in [a, b]} |f_n(x) - f(x)| = \|f_n - f\|_\infty < \frac{\varepsilon}{2} < \varepsilon \implies \|f_n - f\|_\infty \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0.$$

„ $\impliedby$ “: Sei $\varepsilon > 0$. Wegen $\|f_n - f\|_\infty \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \exists N \in \mathbb{N}$ s.d. $\|f_n - f\|_\infty < \varepsilon \forall n \geq N$. Damit folgt $\forall n \geq N$ und $\forall x \in [a, b]$

$$|f_n(x) - f(x)| \leq \max_{x \in [a, b]} |f_n(x) - f(x)| = \|f_n - f\|_\infty < \varepsilon \implies \text{gleichmäßige Konvergenz.}$$

- (ii) „ $\implies$ “ $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ konvergiert gleichmäßig auf $[a, b]$, d.h. $\exists f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ s.d. $f_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{\text{gleichmäßig}} f$.

Sei $\varepsilon > 0$, dann $\exists N_0 \in \mathbb{N}$ s.d. $|f_n(x) - f(x)| < \frac{\varepsilon}{4} \forall n \geq N_0$ und $\forall x \in [a, b]$.

Damit gilt $\forall n, m \geq N_0$ und $\forall x \in [a, b]$:

$$\begin{aligned} |f_n(x) - f_m(x)| &\leq |f_n(x) - f(x)| + |f(x) - f_m(x)| \leq \frac{\varepsilon}{4} + \frac{\varepsilon}{4} = \frac{\varepsilon}{2} \\ \implies \max_{x \in [a, b]} |f_n(x) - f_m(x)| &= \|f_n - f_m\|_\infty \leq \frac{\varepsilon}{2} < \varepsilon \quad \forall n, m \geq N_0. \end{aligned}$$

„ $\Leftarrow$ “: Sei $\varepsilon > 0$, dann $\exists N_0 \in \mathbb{N}$, s.d.

$$|f_n(x) - f_m(x)| \leq \|f_n - f_m\|_\infty < \frac{\varepsilon}{2} \quad \forall n, m \geq N_0 \quad \forall x \in [a, b].$$

$\implies (f_n(x))_{n \in \mathbb{N}}$ ist eine Cauchy-Folge in $\mathbb{R}$.

$\implies (f_n(x))_{n \in \mathbb{N}}$ konvergiert

$\implies$ Definiere $f(x) := \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$, $x \in [a, b]$.

Dann gilt $\forall n \geq N_0$, $\forall x \in [a, b]$:

$$|f_n(x) - f(x)| = \lim_{m \rightarrow \infty} |f_n(x) - f_m(x)| < \frac{\varepsilon}{2} \implies (f_n)_{n \in \mathbb{N}} \text{ konvergiert gleichm\"a\ss{}ig gegen } f.$$

□

Bemerkung 1.11. $\|\cdot\|_\infty$ erf\"ullt s.g. Normeigenschaften:

(N1) $\|f\|_\infty = 0 \implies f(x) = 0, x \in [a, b]$ (Definitheit)

(N2) $\|\alpha f\|_\infty = |\alpha| \cdot \|f\|_\infty$, $\alpha \in \mathbb{R}$ (Homogenit\"at)

(N3) $\|f + g\|_\infty \leq \|f\|_\infty + \|g\|_\infty$ (Dreiecksungleichung)

folgen direkt aus den Eigenschaften des Absolutbetrags.

Definition 1.12. Der Funktionenraum $C[a, b]$ definiert durch

$$C[a, b] := \{f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R} \mid f \text{ stetig} \},$$

ist mit $\|f\|_\infty$ ein normierter Vektorraum.

Satz 1.13 (Vollst\"andigkeit). Der Raum $C[a, b]$ ist vollst\"andig bez\"uglich gleichm\"a\ss{}iger Konvergenz, d.h. jede Cauchy-Folge von Funktionen aus $C[a, b]$ besitzt einen Limes in $C[a, b]$

Beweis. Rannacher

□

1.3 Integration und Grenzüberg\"ange

Wichtige Frage: Wenn $f_n \rightarrow f$, gilt dann auch $\int_a^b f_n \rightarrow \int_a^b f$?

Satz 1.14. Seien $f_n: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ stetige Riemann-integrierbare Funktionen und $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ mit $\|f_n - f\|_\infty \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$ (gleichm\"a\ss{}ige Konvergenz). Dann gilt f stetig und Riemann-integrierbar und

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_a^b f_n(x) dx = \int_a^b f(x) dx = \int_a^b \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) dx.$$

Beweis. $f_n \xrightarrow[\text{gleichmäßig}]{n \rightarrow \infty} f \implies f \text{ stetig} \implies f \text{ Riemann-integrierbar.}$

Es gilt

$$\begin{aligned} \left| \int_a^b f_n(x) dx - \int_a^b f(x) dx \right| &= \left| \int_a^b (f_n(x) - f(x)) dx \right| \\ &\leq \int_a^b |f_n(x) - f(x)| dx \\ &\leq \max_{x \in [a, b]} |f_n(x) - f(x)| \cdot (b - a) \\ &= \underbrace{\|f_n - f\|_\infty}_{\xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0} \underbrace{(b - a)}_{\text{beschränkt}}. \end{aligned}$$

□

Satz 1.15. Seien $f_n: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ stetige Funktionen ($n \in \mathbb{N}$) und die Reihe $\sum_{n=0}^{\infty} f_n$ konvergiere gleichmäßig auf $[a, b]$, d.h. die Folge der Partialsummen $(\sum_{n=0}^N f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ sei gleichmäßig konvergent. Dann gilt:

$$f(x) := \sum_{n=0}^{\infty} f_n(x) \quad \forall x \in [a, b].$$

ist stetig und Riemann-integrierbar und

$$\begin{aligned} \int_a^b f(x) dx &= \sum_{n=0}^{\infty} \int_a^b f_n(x) dx \\ \int_a^b \sum_{n=0}^{\infty} f_n(x) dx &= \sum_{n=0}^{\infty} \int_a^b f_n(x) dx, \end{aligned}$$

d.h. die Reihe wird gliedweise integriert.

Beweis. f_n sind stetig $\implies \sum_{n=0}^N f_n(x)$ stetig und Riemann-integrierbar.

Die Folge der Partialsummen $(\sum_{n=0}^N f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ konvergiert gleichmäßig, d.h.

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} f_n(x) \text{ stetig} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{n=0}^N f_n(x) \right) \text{ gleichmäßiger Limes.}$$

Es gilt

$$\int_a^b \sum_{n=0}^{\infty} f_n(x) dx = \sum_{n=0}^N \int_a^b f_n(x) dx + \int_a^b \sum_{n=N+1}^{\infty} f_n(x) dx.$$

Die Reihe konvergiert gleichmäßig, d.h. $\forall \varepsilon > 0 \exists N_\varepsilon \in \mathbb{N}$, s.d. $\forall N \geq N_\varepsilon$ gilt

$$\begin{aligned} \left| \int_a^b \sum_{n=N+1}^{\infty} f_n(x) dx \right| &\leq \varepsilon \cdot (b - a) \\ \implies \left| \int_a^b \sum_{n=0}^{\infty} f_n(x) dx - \sum_{n=0}^N \int_a^b f_n(x) dx \right| &\leq \varepsilon \\ \implies \int_a^b \sum_{n=0}^{\infty} f_n(x) dx &= \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^N \int_a^b f_n(x) dx = \sum_{n=0}^{\infty} \int_a^b f_n(x) dx. \end{aligned}$$

□

Korrolar 1.16 (Integration von Potenzreihen). Es sei $\sum_{n=0}^{\infty} a_n(x-x_0)^n$ eine reelle Potenzreihe mit Konvergenzradius $\rho > 0$. Dann konvergiert $\sum_{n=0}^{\infty} a_n(x-x_0)^n$ in jedem Intervall $[x_0 - r, x_0 + r]$ für $0 < r < \rho$ gleichmäßig und für $[a, b] \subset]x_0 - \rho, x_0 + \rho[$ gilt

$$\int_a^b \sum_{n=0}^{\infty} a_n(x-x_0)^n dx = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{a_n}{n+1} (x-x_0)^{n+1} \Big|_a^b.$$

Beweis. Nur die gleichmäßige Konvergenz für $|x - x_0| \leq r$ ist zu beweisen: Für $|x - x_0| \leq r$, $r < \rho$ gilt:

$$\begin{aligned} \left\| \sum_{n=0}^{\infty} a_n(x-x_0)^n - \sum_{n=0}^N a_n(x-x_0)^n \right\|_{\infty} &= \left\| \sum_{n=N+1}^{\infty} a_n(x-x_0)^n \right\|_{\infty} \\ &\leq \sum_{n=N+1}^{\infty} |a_n| \cdot r^n \\ &\stackrel{(*)}{\leq} \sum_{n=N+1}^{\infty} \left(\frac{1}{\rho - \varepsilon} \right)^n \cdot r^n \\ &= \sum_{n=N+1}^{\infty} \underbrace{\left(\frac{r}{\rho - \varepsilon} \right)^n}_{<1} \xrightarrow[N \rightarrow \infty]{\text{geometrische Reihe}} 0. \end{aligned}$$

(*) : $\rho = \frac{1}{\limsup \sqrt[n]{|a_n|}}$, $r < \rho - \varepsilon$ für ein $\varepsilon > 0 \implies \exists N_0 \in \mathbb{N}$, s.d. $\sqrt[n]{|a_n|} < \frac{1}{\rho - \varepsilon} \quad \forall n \geq N_0$ □

Jetzt: Fourier Analysis!

1.4 Der Funktionen-Raum $R[a, b]$

Definition 1.17. Eine $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{C}$, $[a, b] \subset \mathbb{R}$ heißt Riemann-integrierbar auf $[a, b]$, falls $\operatorname{Re}(f)$ und $\operatorname{Im}(f)$ Riemann-integrierbar sind. Man setzt

$$\int_a^b f(x) dx := \int_a^b \operatorname{Re} f(x) dx + i \int_a^b \operatorname{Im} f(x) dx.$$

Bemerkung 1.18. 1. Analog: Definitionen von uneigentlichen Riemann-integralen für komplexwertige Funktionen

2. Die Rechenregeln für das reelle Riemann-integral übertragen sich auf komplexwertige Integrale, insbesondere gilt:

$$\begin{aligned} \int_a^b \overline{f(x)} dx &= \int_a^b (\operatorname{Re} f(x) - i \cdot \operatorname{Im} f(x)) dx \\ &= \int_a^b \operatorname{Re} f(x) dx - i \int_a^b \operatorname{Im} f(x) dx \\ &= \overline{\int_a^b f(x) dx}. \end{aligned}$$

Definition 1.19. Eine Funktion $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{K}$ ($\mathbb{K} = \mathbb{R}$ oder $\mathbb{K} = \mathbb{C}$) heißt stückweise stetig, falls

- 1) f in $[a, b]$ bis auf endlich viele Ausnahmestellen stetig und beschränkt ist.
- 2) in jeder dieser Unstetigkeitsstellen $\xi \in [a, b]$ die links- bzw. rechtsseitigen Grenzwerte

$$f(\xi_{\pm}) := \lim_{h \searrow 0} f(\xi \pm h).$$

existieren. Für $\xi \in (a, b)$ wird

$$f(\xi) := \frac{f(\xi_-) + f(\xi_+)}{2}.$$

gesetzt.

Bemerkung 1.20. Stückweise stetige Funktionen sind Riemann-integrierbar.

Die Menge der in diesem Sinne auf $[a, b]$ stückweise stetigen (Riemann-integrierbaren) Funktionen bilden einen Vektorraum $R[a, b]$.

Definition 1.21. Wir definieren

$$(f, g) := \int_a^b f(x) \overline{g(x)} \, dx \quad (\text{„Sesquilinearform“}).$$

Dies ist wohldefiniert da für $f, g \in R[a, b]$ das Produkt $f(x) \cdot \overline{g(x)} \in R[a, b]$ ist.

Definition 1.22 (Skalarprodukt). Sei V Vektorraum über $\mathbb{K}$. Die Abbildung $\langle \cdot, \cdot \rangle: V \times V \rightarrow \mathbb{K}$ heißt Skalarprodukt auf V , falls $\forall u, v, w \in V$ und $\alpha \in \mathbb{K}$ gilt:

(S1) $\langle v, u \rangle = \overline{\langle u, v \rangle}$ (Symmetrie, hermitesch falls $\mathbb{K} = \mathbb{C}$ symmetrisch falls $\mathbb{K} = \mathbb{R}$)

(S2) $\langle \alpha v, u \rangle = \alpha \langle v, u \rangle$
 $\langle v, \alpha u \rangle = \overline{\alpha} \langle v, u \rangle$
 $\langle v, u + w \rangle = \langle v, u \rangle + \langle v, w \rangle$
 $\langle v + u, w \rangle = \langle v, w \rangle + \langle u, w \rangle$

(S3) Positivdefinitheit: $\langle v, v \rangle \geq 0$
 $\langle v, v \rangle = 0 \iff v = 0$

Bemerkung 1.23. Auf $R[a, b]$ besitzt $(\cdot, \cdot)$ die Eigenschaften eines Skalarprodukts, denn es gilt $\forall \alpha, \beta \in \mathbb{C}, \forall f, g \in R[a, b], f_1, f_2 \in R[a, b], g_1, g_2 \in R[a, b]$:

$$(1) (\alpha f_1 + \beta f_2, g) = (\alpha f_1, g) + (\beta f_2, g) = \alpha (f_1, g) + \beta (f_2, g)$$

$$(2) (f, \alpha g_1 + \beta g_2) = (f, \alpha g_1) + (f, \beta g_2) = \overline{\alpha} (f, g_1) + \overline{\beta} (f, g_2)$$

$$(3) (f, g) = \int_a^b f \cdot \overline{g} \, dx = \int_a^b \overline{\overline{f} g} \, dx = \overline{\int_a^b \overline{f} g \, dx} = \overline{\int_a^b g \overline{f} \, dx} = \overline{(g, f)}$$

$$(4) (f, f) = \int_a^b f \overline{f} \, dx = \int_a^b |f(x)|^2 \, dx \geq 0$$

(5) Aus (4) und der Definition von $R[a, b]$ folgt: $(f, f) = 0 \implies f \equiv 0$ auf $[a, b]$.

$(\cdot, \cdot)$ wird auf $R[a, b]$ L^2 -Skalarprodukt genannt.

Lemma 1.24. Für ein L^2 -Skalarprodukt $(\cdot, \cdot)$ auf $R[a, b]$ gilt die Cauchy-Schwarz Ungleichung:

$$|(f, g)|^2 \leq (f, f) \cdot (g, g).$$

Beweis. 1) Falls $g \equiv 0$ gilt trivialerweise

$$|(f, g)|^2 = 0 = (f, f) \cdot (g, g).$$

2) Falls $g \not\equiv 0$, sei $\alpha \in \mathbb{K}$ beliebig

$$0 \leq (f + \alpha g, f + \alpha g) = (f, f) + \alpha(g, f) + \bar{\alpha}(f, g) + \alpha \cdot \bar{\alpha}(g, g).$$

Setze $\alpha := -\frac{(f, g)}{(g, g)} = -\frac{\overline{(g, f)}}{(g, g)}$. Dann gilt

$$\begin{aligned} 0 &\leq (f, f) - \frac{(f, g) \cdot (g, f)}{(g, g)} - \frac{(g, f) \cdot (f, g)}{(g, g)} + \frac{(f, g)(g, f)(g, g)}{(g, g)(g, g)} \\ &= (f, f) - \frac{(f, g)(g, f)}{(g, g)} \\ &= (f, f) - \frac{\overline{(f, g)}(f, g)}{(g, g)} \\ &= (f, f) - \frac{|(f, g)|^2}{(g, g)} \\ \implies 0 &\leq (f, f)(g, g) - |(f, g)|^2. \end{aligned}$$

□

Definition 1.25 (L^2 -Norm). Das L^2 -Skalarprodukt $(\cdot, \cdot)$ induziert die L^2 -Norm auf $R[a, b]$ mit

$$\|f\| = \|f\|_{L^2} := (f, f)^{\frac{1}{2}} = \left(\int_a^b f \cdot \bar{f} \, dx \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Bemerkung 1.26. Normeigenschaften von L^2 auf $R[a, b]$ sind erfüllt:

(N1) Definitheit: $\|f\| = 0 \implies (f, f) = 0 \implies f = 0$ auf $[a, b]$

(N2) Homogenität: $\|\alpha f\| = (\alpha f, \alpha f)^{\frac{1}{2}} = (|\alpha|^2 (f, f))^{\frac{1}{2}} = |\alpha| \cdot \|f\|$

(N3) Dreiecksungleichung:

$$\begin{aligned} \|f + g\| &= (f + g, f + g)^{\frac{1}{2}} \\ &= (\|f\|^2 + (f, g) + (g, f) + \|g\|^2)^{\frac{1}{2}} \\ &\stackrel{\text{CSU}}{\leq} (\|f\|^2 + 2\|f\|\|g\| + \|g\|^2)^{\frac{1}{2}} \\ &= \|f\| + \|g\|. \end{aligned}$$

Definition 1.27 (Konvergenz im Quadratischen Mittel (L^2 -Konvergenz)). Seien $f_n \in R[a, b], n \in \mathbb{N}, f \in R[a, b]$. f_n konvergiert gegen f im Quadratischen Mittel $f_n \xrightarrow[L^2]{n \rightarrow \infty} f$, wenn gilt

$$\|f_n - f\|_{L^2} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0.$$

Das heißt, dass die quadratische Abweichung zwischen f_n und f gegen Null konvergiert:

$$\int_a^b |f_n(x) - f(x)|^2 dx \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0.$$

Bemerkung 1.28. (1) Es gilt:

$$\|f_n - f\|_{L^2}^2 = \int_a^b |f_n(x) - f(x)|^2 dx \leq \|f_n - f\|_{\infty}^2 (b - a).$$

Damit folgt

$$\|f_n - f\|_{\infty} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \implies \|f_n - f\|_{L^2} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0.$$

Die Umkehrung gilt i.A. nicht! Beispiel: $f_n(x) := x^n, x \in [-1, 1]$

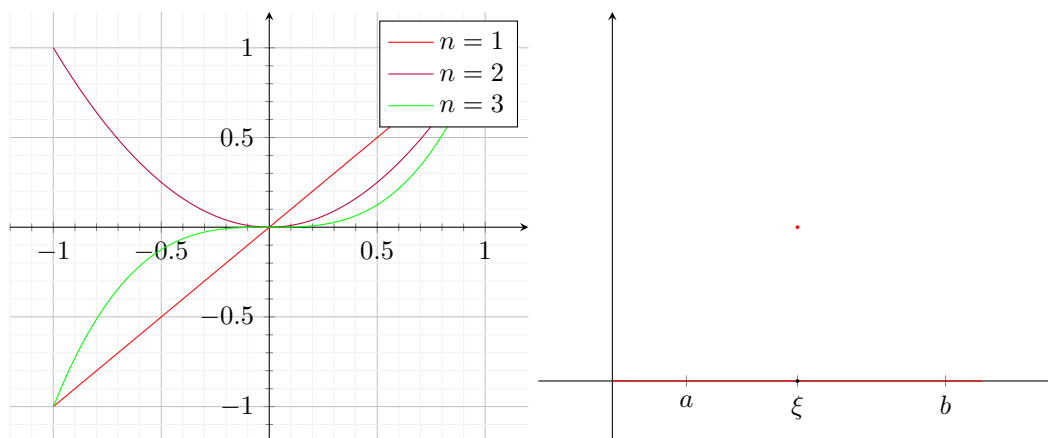


Abbildung 1.3: Links: $f_n(x) = x^n$, Rechts: $f(x) \not\equiv 0$

$$\|f_n\|_{L^2}^2 = \int_{-1}^1 x^{2n} dx = 2 \int_0^1 x^{2n} dx = 2 \frac{x^{2n+1}}{2n+1} \Big|_0^1 = \frac{2}{2n+1} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0.$$

Damit folgt $f_n \xrightarrow[L^2]{n \rightarrow \infty} f \equiv 0$.

Aber wegen $f_n(1) = 1$ für $x = 1, n \in \mathbb{N}$, konvergiert f_n nicht punktweise gegen $f \equiv 0$ und wegen $f_n(-1) = (-1)^n, n \in \mathbb{N}, x = -1$ konvergiert f_n nicht.

- (2) Der Raum $R[a, b]$ mit L^2 -Norm $\|\cdot\|$ ist **nicht vollständig**, d.h. es existieren Cauchy-Folgen in $R[a, b]$, die keinen Grenzwert in $R[a, b]$ haben. Beispiel: siehe Abb. 1.3 (Rechts). Hier ist $f(x) \not\equiv 0, x \in [a, b]$.

$$\int_a^b |f(x)|^2 dx = 0 = \|f\|_{L^2},$$

aber $f(x) \notin R[a, b]$, denn

$$f(\xi) \neq 0 = \frac{\lim_{h \searrow 0} f(\xi + h) - \lim_{h \searrow 0} f(\xi - h)}{2}.$$

Definition 1.29 (Orthogonalität). $f, g \in R[a, b]$ heißen orthogonal, wenn gilt $(f, g) = 0$.

Eine Teilmenge $S \subset R[a, b]$ heißt Orthogonalsystem, wenn alle Elemente aus S paarweise orthogonal sind, d.h.

$$(f_i, f_j) = \begin{cases} \|f_i\|^2 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad \forall f_i, f_j \in S.$$

Satz 1.30. Die trigonometrischen Funktionen, für $k, l \in \mathbb{N}$

$$c_k(x) := \begin{cases} 1 & k = 0 \\ \cos(kx) & \text{sonst} \end{cases}$$

$$s_l(x) := \sin(lx)$$

bilden auf $R[a, b]$ bezüglich des L^2 -Skalarprodukts ein Orthogonalsystem und es gilt

$$\int_0^{2\pi} c_k(x) dx = \int_0^{2\pi} s_l(x) dx = \int_0^{2\pi} c_k(x) s_l(x) dx = 0$$

$$\int_0^{2\pi} c_k(x) c_l(x) dx = \pi \delta_{kl}$$

$$\int_0^{2\pi} s_k(x) s_l(x) dx = \pi \delta_{kl}$$

Hier sei

$$\delta_{kl} := \begin{cases} 1 & k = l \\ 0 & k \neq l \end{cases} \quad \text{Kroneckersymbol.}$$

Beweis.

$$\int_0^{2\pi} c_k(x) dx = \int_0^{2\pi} \cos(kx) dx = \frac{1}{k} \sin(kx) \Big|_0^{2\pi} = 0$$

$$\int_0^{2\pi} s_k(x) dx = \int_0^{2\pi} \sin(kx) dx = -\frac{1}{k} \cos(kx) \Big|_0^{2\pi} = \frac{1}{k} (1 - 1) = 0$$

Damit folgt

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} c_k(x) s_l(x) dx &= \int_0^{2\pi} \underbrace{\cos(kx)}_{u'} \cdot \underbrace{\sin(lx)}_v dx \\ &\stackrel{\text{part. Int.}}{=} \underbrace{\frac{1}{k} \sin(kx)}_u \cdot \underbrace{\sin(lx)}_v \Big|_0^{2\pi} - \int_0^{2\pi} \underbrace{\frac{1}{k} \sin(kx)}_u \underbrace{l \cos(lx)}_{v'} dx \\ &\stackrel{=0}{=} \\ &= -\frac{l}{k} \int_0^{2\pi} s_k(x) c_l(x) dx \end{aligned}$$

Für $l = k$ gilt

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} c_k(x) s_k(x) dx &= - \int_0^{2\pi} c_k(x) s_k(x) dx \\ \implies 2 \int_0^{2\pi} c_k(x) s_k(x) dx &= 0 \\ \implies \int_0^{2\pi} c_k(x) s_k(x) dx &= 0 \end{aligned}$$

Analog folgt mit partieller Integration

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} c_k(x) c_l(x) dx &= \frac{l}{k} \int_0^{2\pi} s_k(x) s_l(x) dx \\ &\stackrel{l=k}{=} \int_0^{2\pi} c_k^2(x) dx = \int_0^{2\pi} s_k^2(x) dx = \int_0^{2\pi} (1 - c_k^2(x)) dx = 2\pi - \int_0^{2\pi} c_k^2(x) dx \\ \implies \int_0^{2\pi} c_k^2(x) dx &= \pi = \int_0^{2\pi} s_k^2(x) dx \end{aligned}$$

Wenn $k \neq l$, dann folgt

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} c_k(x) c_l(x) dx &= \frac{l}{k} \int_0^{2\pi} s_k(x) s_l(x) dx \\ &\stackrel{\text{part. Int.}}{=} \frac{l^2}{k^2} \int_0^{2\pi} c_k(x) c_l(x) dx \\ \implies \int_0^{2\pi} c_k(x) c_l(x) dx &= 0 \end{aligned}$$

Analog

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} s_k(x) s_l(x) dx &= 0 \\ \int_0^{2\pi} c_k(x) s_l(x) dx &= 0. \end{aligned}$$

□

1.5 Fourier-Entwicklung

Definition 1.31 (Periodische Funktionen). $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{K}$ heißt L -periodisch ($L > 0$) falls $f(x + L) = f(x)$, $\forall x \in \mathbb{R}$ ($\implies f(x + kL) = f(x)$, $\forall k \in \mathbb{Z}$). Sei f periodisch und $p > 0$. Für $\tilde{f}(x) := f\left(\underbrace{\frac{L}{p}x}_{\text{Variablentransformation}}\right)$ gilt dann $\tilde{f} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{K}$ ist p -periodisch

Beispiel 1.32. $p = 2\pi$

$$\begin{aligned} \tilde{f}(x) &:= f\left(\frac{L}{2\pi}x\right) \implies f(x) = \tilde{f}\left(\frac{2\pi}{L}x\right) \\ \tilde{f}(x + 2\pi) &= f\left(\frac{L}{2\pi}(x + 2\pi)\right) = f\left(\frac{L}{2\pi}x + L\right) \stackrel{f \text{ } L\text{-per}}{=} f\left(\frac{L}{2\pi}x\right) = \tilde{f} \end{aligned}$$

Hier betrachten wir deshalb nur 2π -periodische Funktionen $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{K}$. Weiterhin betrachten wir Funktionen $f : [0, 2\pi] \rightarrow \mathbb{K}$, $f \in R[0, 2\pi]$, 2π -periodisch.

Beispiel 1.33 (Trigonometrische Polynome). Für $a_k, b_k \in \mathbb{C}$ betrachte

$$\begin{aligned} f_n(x) &:= \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (a_k \cos(kx) + b_k \sin(kx)) \\ &\stackrel{(*)}{=} \frac{1}{2} \left(a_0 + \sum_{k=1}^n (a_k - ib_k) e^{ikx} + (a_k + ib_k) e^{-ikx} \right) \\ &= \sum_{k=-n}^n c_k e^{ikx} \text{ mit } c_k = \begin{cases} \frac{1}{2}(a_k - ib_k), & k \geq 0 \\ \frac{a_0}{2}, & k = 0 \\ \frac{1}{2}(a_{-k} + ib_{-k}), & k < 0 \end{cases} \\ (*) : \cos(x) &= \frac{1}{2}(e^{ix} + e^{-ix}), \quad \sin(x) = \frac{1}{2i}(e^{ix} - e^{-ix}) \end{aligned}$$

Für $a_k, b_k, k > 0$ ergibt sich $a_k = c_k + c_{-k}$, $b_k = i(c_k - c_{-k})$.

Bemerkung 1.34. Ist f ein trigonometrisches Polynom, so kann man die Koeffizienten a_k, b_k, c_k durch Integration ausrechnen, d.h. a_k, b_k, c_k sind eindeutig.

$$\begin{aligned} a_k &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(kx) \, dx, \quad k \geq 0 \\ b_k &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(kx) \, dx, \quad k > 0 \\ c_k &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) e^{-ikx} \, dx, \quad k \in \mathbb{Z} \\ &= \frac{1}{2\pi} (f, e^{ikx}), \quad L_2\text{-Skalarprodukt} \end{aligned}$$

Beweis. Sei zuerst $0 \neq \lambda \in \mathbb{R}$.

$$\begin{aligned} \int_a^b e^{i\lambda x} \, dx &= \int_a^b \cos(\lambda x) \, dx + i \int_a^b \sin(\lambda x) \, dx \\ &= \frac{1}{\lambda} \sin(\lambda x) \Big|_a^b - \frac{1}{\lambda} i \cos(\lambda x) \Big|_a^b \\ &\stackrel{\frac{1}{i} = -i}{=} \frac{1}{\lambda i} (\cos(\lambda x) + i \sin(\lambda x)) \Big|_a^b \\ &= \frac{1}{\lambda i} e^{i\lambda x} \Big|_a^b \\ \implies \int_0^{2\pi} e^{ikx} \, dx &= 0 \quad \forall k \in \mathbb{Z} \setminus \{0\} \end{aligned}$$

Dann ist

$$\int_0^{2\pi} e^{ik_1 x} e^{-ik_2 x} \, dx = \int_0^{2\pi} e^{i(k_1 - k_2)x} \, dx = \begin{cases} 0, & \text{falls } k_1 \neq k_2 \\ 2\pi, & \text{falls } k_1 = k_2 \quad (\implies k_1 - k_2 = 0) \end{cases}$$

$\implies$ Behauptung für c_k . Für a_k, b_k gilt

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \frac{1}{2} (e^{ikx} + e^{-ikx}) \, dx = c_{-k} + c_k = b_k \cdot i$$

□

Bemerkung 1.35. Obige Formel gilt auch für

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(kx) + b_k \sin(kx)) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{ikx}$$

falls die Reihen gleichmäßig auf $[0, 2\pi]$ konvergieren.

Frage: Hat jede 2π -periodische Funktion die Form $\sum_{k=-n}^n c_k e^{ikx}$ oder kann man sie durch trigonometrische Polynome approximieren? $\implies$ Motivation für Fourier-Reihen.

Definition 1.36 (Fourier-Reihe). Sei $f \in R[a, b]$ 2π -periodisch. Die Fourier-Koeffizienten von f sind gegeben durch

$$c_k := c_k(f) := \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) e^{-ikx} dx = \frac{1}{2\pi} (f, e^{ikx})$$

Die (formale) Fourier-Reihe von f ist

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{ikx}$$

mit der n -ten Partialsumme

$$s_n(x) = s_n(f, x) := \sum_{k=-n}^n c_k e^{ikx}.$$

Die Fourier-Reihe läßt sich in der Form schreiben

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(kx) + b_k \sin(kx))$$

wobei

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(kx) dx$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(kx) dx$$

Satz 1.37. Sei $f \in R[a, b]$ eine 2π -periodische Funktion mit den Fourier-Koeffizienten c_k , $k \in \mathbb{Z}$ und $s_n = \sum_{k=-n}^n c_k e^{ikx}$. Dann gilt für alle $n \in \mathbb{N}$

$$\|f - s_n\|^2 = \|f\|^2 - 2\pi \sum_{k=-n}^n |c_k|^2$$

Beweis. Notation $e_k(x) := e^{ikx}$

$$\begin{aligned}
 (e_k, e_l) &= \int_0^{2\pi} e^{ikx} e^{-ilx} dx = \int_0^{2\pi} e^{i(k-l)x} dx = \begin{cases} 2\pi, & k = l \\ 0, & k \neq l \end{cases} \\
 c_k &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) e^{-ikx} dx = \frac{1}{2\pi} (f, e_k) \implies (f, e_k) = 2\pi c_k \\
 (f, s_n) &= \sum_{k=-n}^n (f, c_k e_k) = \sum_{k=-n}^n \overline{c_k} (f, e_k) = \sum_{k=-n}^n \overline{c_k} 2\pi c_k = 2\pi \sum_{k=-n}^n |c_k|^2 \\
 (s_n, s_n) &= \sum_{k=-n}^n \sum_{l=-n}^n \underbrace{c_k \overline{c_l}}_{|c_k|^2} \cdot \underbrace{(e_k, e_l)}_{= \begin{cases} 0, & k \neq l \\ 2\pi, & k = l \end{cases}}
 \end{aligned}$$

Dann

$$\begin{aligned}
 \|f - s_n\|^2 &= (f - s_n, f - s_n) \\
 &= (f, f) - (f, s_n) - (s_n, f) + (s_n, s_n) \\
 &= \|f\|^2 - 2\pi \sum_{k=-n}^n |c_k|^2 - 2\pi \sum_{k=-n}^n |c_k|^2 + 2\pi \sum_{k=-n}^n |c_k|^2 \\
 &= \|f\|^2 - 2\pi \sum_{k=-n}^n |c_k|^2
 \end{aligned}$$

□

Satz 1.38 (Besselsche Umgebung). Sei $f \in R[0, 2\pi]$ eine 2π -periodische Funktion mit Fourier-Koeffizienten c_k , $k \in \mathbb{Z}$. Dann

$$\exists \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=-n}^n |c_k|^2$$

und

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} |c_k|^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=-n}^n |c_k|^2 \leq \frac{\|f\|^2}{2\pi}$$

Beweis. Aus Satz 1.37

$$2\pi \sum_{k=-n}^n |c_k|^2 = \|f\|^2 - \underbrace{\|f - s_n\|^2}_{\geq 0} \leq \|f\|^2$$

Die Konvergenz folgt unter Beachtung der Monotonie und Beschränktheit der Folge

$$\sum_{k=-n}^n |c_k|^2$$

□

Bemerkung 1.39. Sei $f \in R[0, 2\pi]$ 2π -periodisch und $\|f - s_n\|^2 \xrightarrow{L^2} 0$, $n \rightarrow \infty$, d.h. die Fourier-Reihe konvergiert gegen f in L^2 . Das ist nach Satz 1.37 äquivalent zu

$$\|f\|^2 = 2\pi \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=-n}^n |c_k|^2 \Leftrightarrow \|f\|^2 = 2\pi \sum_{k=-\infty}^{\infty} |c_k|^2$$

Frage: Unter welchen Bedingungen für f gilt die Parsevalsche Gleichung

$$\|f\|^2 = 2\pi \sum_{k=-\infty}^{\infty} |c_k|^2$$

mit den Fourier-Koeffizienten c_k .

Ziel: Zeige die Parsevalsche Gleichung für die Fourier-Koeffizienten c_k , $\{e_k = e^{ikx}, k \in \mathbb{Z}\}$, $f \in R[a, b] \implies$ Konvergenz der Fourier-Reihe in L^2 .

Lemma 1.40. $\forall t \in \mathbb{R} \setminus \{2\pi k | k \in \mathbb{Z}\}$ gilt

$$\sum_{k=1}^n \cos(kt) = \frac{\sin\left((n + \frac{1}{2})t\right)}{2 \sin\left(\frac{1}{2}t\right)} - \frac{1}{2}$$

Beweis. $\cos(kt) = \frac{1}{2} (e^{ikt} + e^{-ikt})$

$$\begin{aligned} \implies \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^n \cos(kt) &= \frac{1}{2} \sum_{k=-n}^n e^{ikt} \\ &= \frac{1}{2} e^{-int} \underbrace{\sum_{k=0}^{2n} e^{ikt}}_{\text{geometrische Summenformel}} \\ &= \frac{1}{2} e^{-int} \frac{1 - e^{(2n+1)it}}{1 - e^{it}} \\ &= \frac{1}{2} \frac{e^{-int} - e^{(n+1)it}}{1 - e^{it}} \\ &\stackrel{\text{Erweitern}}{=} \frac{1}{2} \frac{e^{i(n+\frac{1}{2})t} - e^{-i(n+\frac{1}{2})t}}{e^{i\frac{1}{2}t} - e^{-i\frac{1}{2}t}} \\ &= \frac{1}{2} \frac{\sin\left((n + \frac{1}{2})t\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}t\right)} \end{aligned}$$

□

Lemma 1.41. Sei $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ eine stetig differenzierbare Funktion. Es gilt für $x \in [a, b]$ und $s \in \mathbb{R}$

$$F_s(x) := \int_a^x f(y) \sin(sy) \, dy$$

konvergiert gleichmäßig gegen 0 für $|s| \rightarrow \infty$ und $x \in [a, b]$.

Beweis. Sei $s \neq 0$.

$$F_s(x) = \int_a^x f(y) \sin(sy) \, dy \stackrel{\text{part. Integr.}}{=} -f(y) \frac{1}{s} \cos(sy) \Big|_a^x + \int_a^x \frac{1}{s} \cos(sy) f'(y) \, dy.$$

f, f' stetig auf $[a, b] \implies \exists M > 0$, s.d. $|f(y)| \leq M, |f'(y)| \leq M$ mit $y \in [a, b]$. Dann gilt $|F_s(x)| \leq \frac{2M}{|s|} + \frac{M}{|s|} \cdot (b-a), \forall x \in [a, b]$. Also konvergiert $|F_s(x)|$ gleichmäßig gegen 0 für $|s| \rightarrow \infty$ und $x \in [a, b]$. □

Lemma 1.42. Es gilt $\frac{\pi-x}{2} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(kx)}{k}$ für $0 < x < 2\pi$ mit gleichmäßiger Konvergenz auf allen Intervallen $[\delta, 2\pi - \delta]$ für $\delta > 0$.

Beweis. Aus Hilfslemma 1.40 folgt für $0 < x < 2\pi$ und $n \in \mathbb{N}$

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n \frac{\sin(kx)}{k} &= \sum_{k=1}^n \int_{\pi}^x \cos(ky) \, dy \\ &= \int_{\pi}^x \left(\sum_{k=1}^n \cos(ky) \right) \, dy \\ &\stackrel{\text{Lemma 1.40}}{=} \int_{\pi}^x \left(\frac{\sin((n + \frac{1}{2})y)}{2 \sin(\frac{1}{2}y)} - \frac{1}{2} \right) \, dy \\ &= \underbrace{\int_{\pi}^x \frac{\sin((n + \frac{1}{2})y)}{2 \sin(\frac{1}{2}y)} \, dy}_{=: F_n(x)} - \frac{1}{2}(x - \pi) \end{aligned}$$

Z.Z.: $F_n(x)$ konvergiert gleichmäßig gegen 0 für $n \rightarrow \infty$. Die Funktion $f(y) = \frac{1}{2 \sin(\frac{y}{2})}$ ist auf dem Intervall $[\delta, 2\pi - \delta]$ stetig differenzierbar, weil $\frac{y}{2} \neq 0$ auf $[\delta, 2\pi - \delta]$, sodass aus Hilfslemma 1.41 folgt

$$F_n(x) = \int_{\pi}^x \frac{1}{2 \sin(\frac{y}{2})} \cdot \sin\left(\left(n + \frac{1}{2}\right)y\right) \, dy \xrightarrow{\text{glm.}} 0$$

für $n \rightarrow \infty$ und $x \in [\delta, 2\pi - \delta]$. □

Lemma 1.43. Die Reihe

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(kx)}{k^2} = \frac{(x - \pi)^2}{4} - \frac{\pi^2}{12}$$

konvergiert gleichmäßig $\forall x, 0 \leq x \leq 2\pi$. Insbesondere gilt für $x = 0$

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} = \frac{\pi^2}{6}$$

Beweis. Lemma 1.42 $\implies \forall x, y \in (0, 2\pi)$

$$\begin{aligned} \frac{(x - \pi)^2}{4} - \frac{(y - \pi)^2}{4} &= \int_y^x \frac{t - \pi}{2} \, dt \\ &\stackrel{1.42}{=} - \int_y^x \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(kt)}{k} \, dt \\ &\stackrel{\text{glm. Konv. Satz 1.15}}{=} - \sum_{k=1}^{\infty} \int_y^x \frac{\sin(kt)}{k} \, dt \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(kx)}{k^2} - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(ky)}{k^2} \end{aligned}$$

$$\xrightarrow{y \text{ fest}} \frac{(x - \pi)^2}{4} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(kx)}{k^2} + C \quad \forall x \in (0, 2\pi), C \text{ konst}$$

Die Reihe $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(kx)}{k^2}$ konvergiert gleichmäßig auf $[0, 2\pi]$ mit Majorante $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2}$. Bestimme die Konstante C :

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} \frac{(x-\pi)^2}{4} dx &= \int_0^{2\pi} \left(\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(kx)}{k^2} + C \right) dx \\ \frac{\pi^3}{6} &= \sum_{k=1}^{\infty} \underbrace{\int_0^{2\pi} \frac{\cos(kx)}{k^2} dx}_{=0} + \int_0^{2\pi} C dx \\ \frac{\pi^3}{6} &= C \cdot 2\pi \\ C &= \frac{\pi^2}{12} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(kx)}{k^2} = \frac{(x-\pi)^2}{4} - \frac{\pi^2}{12}, \quad x \in (0, 2\pi)$$

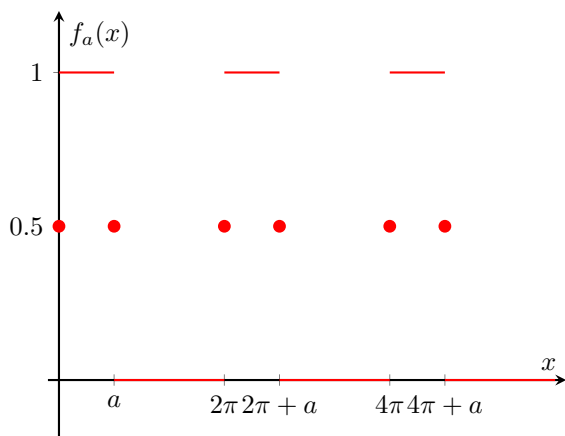
Für $x = 0$ oder $x = 2\pi$ folgt die Behauptung durch Grenzübergang, da beide Seiten stetig sind auf $[0, 2\pi]$ $\square$

Lemma 1.44. Sei f Treppenfunktion, $f \in R[0, 2\pi]$, 2π periodisch. Dann $s_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} f$ in $L^2[0, 2\pi]$, d.h. Fourier-Reihe von f konvergiert im quadratischen Mittel gegen f .

Beweis. Zunächst Spezialfall

$$f_a(x) := \begin{cases} 1, & 0 < x < a \\ 0.5, & x \in \{0, a\} \\ 0, & 0 < x < 2\pi \end{cases}$$

Es gilt $\|f_a\|_{L^2}^2 = \int_0^{2\pi} |f_a|^2 dx = \int_0^a 1 dx = a$.



Fourier-Koeffizienten:

$$\begin{aligned}
 c_0 &= \frac{a}{2\pi} \\
 c_k &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f_a(x) e^{-ikx} dx \\
 &= \frac{1}{2\pi} \left(\frac{-1}{ik} \right) e^{-ikx} \Big|_0^a \\
 &= \frac{1}{2\pi} \left(-\frac{i}{ik} \right) (e^{-ika} - 1) \\
 &\stackrel{k \neq 0}{=} \frac{i}{2\pi k} (e^{-ika} - 1)
 \end{aligned}$$

Für $k \neq 0$ gilt

$$\begin{aligned}
 |c_k|^2 &= \frac{1}{4\pi^2 k^2} \underbrace{(e^{-ika} - 1)(e^{ika} - 1)}_{=1 - e^{ika} - e^{-ika} + 1} \\
 &= \frac{1}{2\pi^2 k^2} \left(1 - \frac{e^{ika} + e^{-ika}}{2} \right) \\
 &= \frac{1}{2\pi^2 k^2} (1 - \cos(ka)) \\
 \sum_{k=-\infty}^{\infty} |c_k|^2 &= \underbrace{\frac{a^2}{4\pi^2}}_{a_0^2} + \sum_{k=1}^{\infty} (|c_{-k}|^2 + |c_k|^2) \\
 &\stackrel{\cos(-ka)=\cos(ka)}{=} \frac{a^2}{4\pi^2} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2}{2\pi^2 k^2} (1 - \cos(ka)) \\
 &= \frac{a}{4\pi^2} + \frac{1}{\pi^2} \underbrace{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2}}_{=\frac{\pi^2}{6}} - \frac{1}{\pi^2} \underbrace{\sum_{k=1}^{\infty} \cos(ka)}_{=\frac{(a-\pi)^2}{4} - \frac{\pi^2}{12}} \\
 &= \frac{a^2}{4\pi^2} + \frac{1}{6} - \frac{(a-\pi)^2}{4\pi^2} + \frac{1}{12} \\
 &= \frac{a}{2\pi} \\
 \implies 2\pi \sum_{k=-\infty}^{\infty} |c_k|^2 &= a = \|f_a\|_{L^2}
 \end{aligned}$$

$$\xrightarrow{\text{Satz 1.37}} \|f_a - s_n(f_a)\|_{L^2}^2 = \|f_a\|^2 - 2\pi \sum_{k=-n}^n |c_k|^2 \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

Sei $f \in R[0, 2\pi]$ eine beliebige 2π -periodische Treppenfunktion mit Sprungstellen

$$a_j \in (0, 2\pi) \quad j = 1, \dots, l$$

Jede Treppenfunktion f lässt sich schreiben als

$$f(x) = \sum_{j=1}^l d_j \underbrace{f_{a_j}(x)}_{\text{Spezialfunktion (als } f_a(x))}, x \in [0, 2\pi]$$

f_{a_j} Spezielle Treppenfunktion mit Sprungstelle $a = a_j$ und $f_{a_j}(x) \in \{0, 1\} \forall j, x \neq a_j$. Dann $\|f_{a_j} - s_n(f_{a_j})\| \xrightarrow{L^2} 0, n \rightarrow \infty$. Betrachte

$$s_n(f) = \sum_{j=1}^l d_j s_n(f_{a_j})$$

und

$$\|f - s_n(f)\| = \left\| \sum_{j=1}^l d_j (f_{a_j} - s_n(f_{a_j})) \right\| \leq \sum_{j=1}^l |d_j| \underbrace{\|f_{a_j} - s_n(f_{a_j})\|}_{\xrightarrow{L^2} 0} \xrightarrow{L^2} 0, n \rightarrow \infty$$

□

Satz 1.45. Sei $f \in R[0, 2\pi]$ eine 2π -periodische Funktion. Dann konvergiert die Fourier-Reihe von f im quadratischen Mittel gegen f und es gilt die Parsevalsche Gleichung (sog. Vollständigkeitsrelation)

$$\frac{1}{2\pi} \underbrace{\int_0^{2\pi} |f(x)|^2 dx}_{=\|f\|^2} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |c_k|^2$$

Beweis. O.B.d.A. sei f reellwertig (sonst werden Real- und Imaginärteil getrennt behandelt) und $|f(x)| \leq 1 \forall x \in [0, 2\pi]$ (sonst betrachte $\bar{f}(x) := \frac{f(x)}{M}$, $M = \sup_{x \in [0, 2\pi]} |f(x)|$). Sei $\varepsilon > 0$. Dann gibt es zu ε 2π -periodische Treppenfunktionen $\varphi_\varepsilon, \psi_\varepsilon : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit Eigenschaften

$$-1 \leq \varphi_\varepsilon \leq f \leq \psi_\varepsilon \leq 1$$

und

$$\max_{x \in [0, 2\pi]} |\psi_\varepsilon(x) - \varphi_\varepsilon(x)| \leq \frac{1}{16\pi} \varepsilon^2$$

Konstruktion von $\varphi_\varepsilon, \psi_\varepsilon$ siehe Rannacher. Dann,

$$|f - \varphi_\varepsilon|^2 \leq |\psi_\varepsilon - \varphi_\varepsilon|^2 \leq (|\psi_\varepsilon| + |\varphi_\varepsilon|)(\psi_\varepsilon - \varphi_\varepsilon) \underset{\substack{|\psi_\varepsilon| < 1 \\ |\varphi_\varepsilon| < 1}}{\leq} 2(\psi_\varepsilon - \varphi_\varepsilon)$$

und

$$\|f - \varphi_\varepsilon\|^2 = \int_0^{2\pi} |f - \varphi_\varepsilon|^2 dx \leq 2 \int_0^{2\pi} (\psi_\varepsilon - \varphi_\varepsilon) dx \leq 2 \frac{\varepsilon^2}{16\pi} \cdot 2\pi = \frac{\varepsilon^2}{4}.$$

Weiter gilt: φ_ε Treppenfunktion $\xrightarrow{1.44}$ Fourier-Reihe von φ_ε konvergiert gegen φ_ε in L^2 , d.h.

$$\forall \varepsilon > 0 \exists n_\varepsilon : \forall n \geq n_\varepsilon : \|s_n(\varphi_\varepsilon) - \varphi_\varepsilon\| \leq \frac{\varepsilon}{2}$$

Aus Satz 1.38 folgt

$$\|(f - \varphi_\varepsilon) - s_n(f - \varphi_\varepsilon)\|^2 \leq \|f - \varphi_\varepsilon\|^2 \leq \frac{\varepsilon^2}{4}$$

Dann gilt $\forall n \geq n_\varepsilon$

$$\begin{aligned} \|f - s_n(f)\| &= \|f - s_n(f - \varphi_\varepsilon) - s_n(\varphi_\varepsilon) - \varphi_\varepsilon + \varphi_\varepsilon\| \\ &\leq \|(f - \varphi_\varepsilon) - s_n(f - \varphi_\varepsilon)\| + \|\varphi_\varepsilon - s_n(\varphi_\varepsilon)\| \\ &\leq \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} \\ &= \varepsilon \end{aligned}$$

$$\implies s_n(f) \xrightarrow{L^2} f, n \rightarrow \infty$$

□

Bemerkung 1.46. Konvergenz in L^2 ist „sehr schwach“. Für „glattere“ Funktionen konvergiert die Fourier-Reihe gleichmäßig.

Satz 1.47. Sei $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ 2π -periodisch, stetig und stückweise stetig differenzierbar, d.h. $\exists$ Unterteilung von $[0, 2\pi]$

$$0 = t_0 < t_1 < \dots < t_m = 2\pi$$

mit $f|_{[t_{j-1}, t_j]}$ stetig differenzierbar für $j = 1, \dots, m$. Dann konvergiert die Fourier-Reihe von f gleichmäßig gegen f .

Beweis. f stetig $\implies f \in R[0, 2\pi] \implies$ Fourier-Reihe von f konvergiert gegen f in L^2 , d.h. $\|s_n(f) - f\| \xrightarrow{L^2} 0, n \rightarrow \infty$. Betrachte $\phi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}, \phi(x) = \phi_j(x), x \in (t_{j-1}, t_j), \phi_j : [t_{j-1}, t_j] \rightarrow \mathbb{C}$ stetige Ableitung von $f|_{[t_{j-1}, t_j]}$. Definiere ϕ in t_j entsprechend (möglich, da ϕ eine stückweise stetige Funktion ist). Definition von $R[0, 2\pi] \implies \phi \in R[0, 2\pi] \implies$ Für die Fourier-Koeffizienten von ϕ gilt: $\gamma_k := \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \phi(x) e^{-ikx} dx$ und $\sum_{k \in \mathbb{Z}} |\gamma_k|^2 = \frac{1}{2\pi} \|\phi\|^2 < \infty$. Berechne Fourier-Koeffizienten c_k von f

$$\begin{aligned} c_k &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) e^{-ikx} dx \\ &\stackrel{\text{part. Integr.}}{=} \underbrace{\frac{1}{2\pi} f(x) \frac{i}{k} e^{-ikx} \Big|_0^{2\pi}}_{=0} - \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \underbrace{f'(x)}_{\phi(x)} \frac{i}{k} e^{-ikx} dx \\ &= \frac{-i}{2\pi k} \int_0^{2\pi} \phi(x) e^{-ikx} dx \\ &= \frac{-i}{k} \gamma_k \\ &\implies |c_k| = \frac{1}{k} |\gamma_k| \end{aligned}$$

Es gilt $|\alpha \cdot \beta| \leq \frac{1}{2} |\alpha|^2 + \frac{1}{2} |\beta|^2$, da Quadrate größer 0 sind

$$\begin{aligned} &\leq \frac{1}{2} \frac{1}{k^2} + \frac{|\gamma_k|^2}{2} \\ &\implies \sum_{k=-\infty}^{\infty} |c_k| \leq \frac{1}{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{1}{k^2} + \frac{1}{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} |\gamma_k|^2 < \infty \\ &\implies \sum_{k=-\infty}^{\infty} |c_k| \text{ absolut konvergent} \\ &\implies \underbrace{\sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{ikx}}_{\text{Fourier-Reihe von } f} \end{aligned}$$

konvergiert gleichmäßig gegen eine Funktion g , die stetig ist. Also $s_n(f) \xrightarrow{\text{glm.}} g, n \rightarrow \infty, \implies$

$s_n(f) \xrightarrow{L^2} g, n \rightarrow \infty$. Andererseits $s_n(f) \xrightarrow{L^2} f, n \rightarrow \infty$

$$\implies \|f - g\|_{L^2} = 0$$

$$\implies f \equiv g, \text{ weil } f \text{ und } g \text{ stetig sind}$$

$$\implies s_n(f) \xrightarrow{\text{glm.}} f, n \rightarrow \infty$$

□

Kapitel 2

Der n -dimensionale Zahlenraum K^n

2.1 Der euklidische Raum K^n

Bemerkung 2.1. K^n bezeichnet den Vektorraum der n -Tupel $x = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$, $x_i \in \mathbb{K}$, $i = 1, \dots, n$, $n \in \mathbb{N}$ mit Addition $x + y := \begin{pmatrix} x_1 + y_1 \\ \vdots \\ x_n + y_n \end{pmatrix}$ und skalarer Multiplikation $\alpha \cdot x = \begin{pmatrix} \alpha x_1 \\ \vdots \\ \alpha x_n \end{pmatrix}$, $\forall \alpha \in \mathbb{K}$.

Definition 2.2. Sei X irgendeine Menge.

Eine Metrik auf X ist eine Abbildung $d : X \times X \rightarrow \mathbb{R}$, $(x, y) \mapsto d(x, y)$ mit folgenden Eigenschaften:

M1 (Definitheit) $d(x, y) \geq 0$, $d(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$

M2 (Symmetrie) $\forall x, y \in X$ gilt $d(x, y) = d(y, x)$.

M3 (Dreiecksungleichung) $\forall x, y, z \in X$ gilt $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$.

Ein metrischer Raum (X, d) besteht aus einer Menge X mit einer Metrik d . Man nennt $d(x, y)$ auch den Abstand oder die Distanz von x und y .

Beispiel 2.3. (1) $X = \mathbb{R}$ oder $\mathbb{C}$ mit $d(x, y) := |x - y|$ ist ein metrischer Raum, denn:

M1 folgt aus $|x| = 0 \Leftrightarrow x = 0$, $|x| \geq 0$,

M2 folgt aus $|x - y| = |-(y - x)| = |y - x|$,

M3 folgt aus $d(x, y) = |x - y| = |x - z + z - y| \leq |x - z| + |z - y| = d(x, z) + d(z, y)$.

(2) (induzierte Metrik) Sei (X, d) metrischer Raum und $A \subseteq X$. Die induzierte Metrik d_A auf A ist definiert durch $d_A : A \times A \rightarrow \mathbb{R}$, $d_A(x, y) := d(x, y)$, $\forall x, y \in A$. Dann wird (A, d_A) zu einem metrischen Raum.

(3) (triviale Metrik) Sei X eine Menge. Die Triviale Metrik wird definiert durch:

$$d(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{für } x = y \\ 1, & \text{für } x \neq y \end{cases}.$$

(4) Weiteres wichtiges Beispiel: metrische Räume entstehen aus normierten Vektorräumen.

Definition 2.4. (normierter Raum) Sei V irgendein Vektorraum über $\mathbb{K}$ ($\mathbb{K} = \mathbb{R}$ oder $\mathbb{K} = \mathbb{C}$). Eine Abbildung $\|\cdot\| : V \rightarrow \mathbb{R}$ heißt Norm (auf V), wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

N1 (Definitheit) $\|x\| \geq 0$, $\|x\| = 0 \Leftrightarrow x = 0$.

N2 (Homogenität) $\|\alpha x\| = |\alpha| \cdot \|x\|$, $\alpha \in \mathbb{K}$.

N3 (Dreiecksungleichung) $\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$.

Das Paar $(V, \|\cdot\|)$ heißt normierter Raum.

Bemerkung 2.5. (Norm $\leadsto$ Metrik) Sei $(V, \|\cdot\|)$ ein normierter Raum. Dann ist $d(x, y) := \|x - y\|$, $\forall x, y \in V$ eine Metrik auf V .

Beispiel 2.6. Normen in $\mathbb{R}^n$.

(1) Euklidische Norm $\|x\|_2 := \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}$.

(2) Maximumsnorm oder ℓ^∞ -Norm: $\|x\|_\infty := \max_{i=1, \dots, n} |x_i|$.

(3) ℓ^1 -Norm: $\|x\|_1 := \sum_{i=1}^n |x_i|$.

(4) ℓ^p -Norm: $\|x\|_p := \sqrt[p]{\sum_{i=1}^n |x_i|^p}$.

Definition 2.7. Eine Folge $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}}$, $x^{(k)} \in \mathbb{K}^n$, heißt

i) beschränkt, falls $\forall k \in \mathbb{N} : x^{(k)} \in K_R(0)$, $K_R(0)$ eine Kugelumgebung von 0 mit Radius R .

$$K_r(a) := \{x \in \mathbb{K}^n \mid \|x - a\|_\infty < r\}.$$

ii) Cauchy-Folge, wenn $\forall \varepsilon > 0, \exists N_\varepsilon \in \mathbb{N}$ sodass $\forall k, l \geq N_\varepsilon$ gilt: $\|x^{(k)} - x^{(l)}\|_\infty < \varepsilon$.

iii) konvergent gegen ein $x \in \mathbb{K}^n$, wenn $\|x^{(k)} - x\|_\infty \rightarrow 0$ für $k \rightarrow \infty$.
geometrisch: jede Kugelumgebung $K_\varepsilon(x)$ enthält fast alle Folgeelemente $x^{(k)}$ (d.h. alle bis auf endlich viele).

Bemerkung 2.8. Offenbar:

$$\begin{aligned} \|x^{(k)} - x\|_\infty \rightarrow 0, k \rightarrow \infty & \Leftrightarrow \\ |x_i^{(k)} - x_i| \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0, i = 1, \dots, n. \end{aligned}$$

Das heißt $\lim_{n \rightarrow \infty} x_i^{(k)} = x_i$ (komponentenweise Konvergenz in $\mathbb{R}$ oder $\mathbb{C}$)

Satz 2.9 (Satz von Cauchy und Satz von Bolzano-Weierstraß).

- 1) Jede Cauchy-Folge in K^n konvergiert, d.h. der normierte Raum $(K^n, \|\cdot\|_\infty)$ ist vollständig. Ein vollständiger normierter Raum wird Banach-Raum genannt.
- 2) Jede beschränkte Folge in K^n besitzt eine konvergente Teilfolge.

Beweis. 1) Sei $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}}$ eine Cauchy-Folge, d.h. $\forall \varepsilon > 0, \exists N_\varepsilon, \forall k, l \geq N_\varepsilon : \|x^{(k)} - x^{(l)}\|_\infty < \varepsilon$. Betrachte Komponentenfolge $(x_i^{(k)})_{k \in \mathbb{N}}, i = 1, \dots, n$. Die Komponentenfolgen sind Cauchy-Folgen, weil

$$\left| x_i^{(k)} - x_i^{(l)} \right| \leq \|x^{(k)} - x^{(l)}\|_\infty < \varepsilon, \forall k, l \geq N_\varepsilon, \forall i = 1, \dots, n.$$

$$\implies \lim_{k \rightarrow \infty} x_i^{(k)} =: x_i \implies x^{(k)} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} x = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \text{ in } \ell_\infty \text{ Norm.}$$

2) Sei $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}}$ beschränkt $\implies (x_i^{(k)})_{k \in \mathbb{N}}, \forall i = 1, \dots, n$ auch beschränkt
 Bo.-We. in $\mathbb{K}$ es existiert eine konvergente Teilfolge $(x_1^{(k_{1,j})})_{j \in \mathbb{N}}$ von $(x_1^{(k)})_{k \in \mathbb{N}}$ mit $x_1^{(k_{1,j})} \xrightarrow{j \rightarrow \infty} x_1$,
 nach n Schritten haben wir Teilfolgen $(x_n^{(k_{n,j})})_{j \in \mathbb{N}}$ von $(x_n^{(k)})_{k \in \mathbb{N}}$ für die alle Komponentenfolgen konvergieren $(x_i^{(k_{i,j})})_{j \in \mathbb{N}} \xrightarrow{j \rightarrow \infty} x_i, \forall i = 1, \dots, n$. Daraus folgt $(x^{(k_{n,j})}) \xrightarrow{j \rightarrow \infty} x$.

□

Satz 2.10 (Äquivalenz von Normen). Sei $\mathbb{K}^n$ ein endlichdimensionaler Vektorraum. Dann sind alle Normen äquivalent zur Maximumsnorm (ℓ_∞) , d.h. zu jeder Norm $\|\cdot\|, \exists m, M > 0$ sodass

$$m \|x\|_\infty \leq \|x\| \leq M \|x\|_\infty, \quad x \in \mathbb{K}^n.$$

Beweis. Sei $\|\cdot\|$ irgendeine Norm. $\forall x \in \mathbb{K}^n, x = \sum_{k=1}^n x_k e^{(k)}$, wobei $e^{(k)}, k = 1, \dots, n$ die sogenannte euklidische Basis ist: $e^{(k)} = \begin{pmatrix} \delta_{k,1} \\ \vdots \\ \delta_{k,n} \end{pmatrix}$.

Dann:

$$\begin{aligned} \|x\| &\leq \sum_{k=1}^n |x_k| \cdot \|e^{(k)}\| \\ &\leq \sum_{k=1}^n \max_{i=1 \dots n} |x_i| \cdot \|e^{(k)}\| \leq M \cdot \|x\|_\infty. \end{aligned}$$

Wobei $M := \sum_{k=1}^n \|e^{(k)}\|$.

Setze

$$S_1 := \{x \in \mathbb{K}^n \mid \|x\|_\infty = 1\}, \quad m := \inf\{\|x\| \mid x \in S_1\} \geq 0.$$

Es gzz.: $m > 0$. Annahme $m = 0$. Dann existiert eine Folge $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}}, x^{(k)} \in S_1$, sodass $\|x^{(k)}\| \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$. Aus $x^{(k)} \in S_1$ folgt $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}}$ ist beschränkt in der ℓ_∞ -Norm. Dann impliziert der Satz von Bolzano-Weierstraß: es existiert eine konvergente Teilfolge, o.B.d.A. $(x^{(k)}) \xrightarrow{k \rightarrow \infty} x$ in der ℓ_∞ -Norm, dann:

$$\underbrace{\left| \underbrace{\|x^{(k)}\|_\infty}_{=1} - \|x\|_\infty \right|}_{=|1 - \|x\|_\infty|} \leq \underbrace{\|x^{(k)} - x\|_\infty}_{\xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0} \implies |1 - \|x\|_\infty| \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0 \implies \|x\|_\infty = 1 \implies x \in S_1.$$

Andererseits:

$$\begin{aligned} \|x\| &\leq \|x - x^{(k)}\| + \|x^{(k)}\| \leq M \cdot \|x - x^{(k)}\|_\infty + \|x^{(k)}\| \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0 \\ \implies \|x\| &= 0 \implies x = 0. \end{aligned}$$

Widerspruch zu $x \in S_1$, also $m > 0$. Dann für $x \neq 0$ ist Vektor $\frac{x}{\|x\|_\infty} \in S_1$ und $m \leq \frac{\|x\|}{\|x\|_\infty}$ (nach Definition von m) und $0 < m \cdot \|x\|_\infty \leq \|x\|$, $x \in \mathbb{K}^n$. $\square$

Korollar 2.11. Auf K^n sind alle Konvergenzen in irgendeiner Norm äquivalent zur Konvergenz in der ℓ_∞ -Norm. (= komponentenweiser Konvergenz)

Bemerkung 2.12. Obiger Satz gilt nicht für unendlich dimensionale Räume (wie z.B. $C[a, b]$ oder $R[a, b]$). Die endliche Dimension von K^n ist entscheidend.

2.2 Teilmengen in K^n (Topologische Grundbegriffe)

Bezeichnung: $\|\cdot\|$ irgendeine Norm.

Definition 2.13 (ε -Kugel, ε -Umgebung). Sei $a \in \mathbb{K}^n, r > 0$.

- (1) Dann heißt $K_r(a) := \{x \in \mathbb{K}^n \mid \|a - x\| < r\}$ die offene Kugel um a mit Radius r bzgl. $\|\cdot\|$.
- (2) $U \subset K^n$ heißt Umgebung von $a \in \mathbb{K}^n$, falls $\exists \varepsilon > 0$ mit $K_\varepsilon(a) \subseteq U$. Insbesondere ist $K_\varepsilon(a)$ selbst eine Umgebung von a , eine sogenannte ε -Umgebung von a .

Definition 2.14 (offene Menge). Eine Menge $O \in \mathbb{K}^n$ heißt offen, falls O eine Umgebung jedes Punktes aus O ($x \in O$) ist, das heißt $\forall x \in O, \exists \varepsilon > 0$ mit $K_\varepsilon(x) \subseteq O$.

Beispiel 2.15. (1) $]a, b[\subseteq \mathbb{R}$ ist offen ($a < b, a, b \in \mathbb{R}$), weil: sei $x \in]a, b[$, definiere $\varepsilon := \min\{|a - x|, |b - x|\}$, $\varepsilon > 0$, da $a < x < b$ ist $K_\varepsilon(x) \subseteq]a, b[$

(2) $\emptyset$ leere Menge ist immer offen, $\mathbb{K}^n$ ist immer offen

(3) Die Kugel $K_r(a)$ ist immer offen: sei $x \in K_r(a)$, setze $\varepsilon := r - \|x - a\|$, dann $K_\varepsilon(x) \subseteq K_r(a)$, weil: sei $y \in K_\varepsilon(x)$. Dann gilt

$$\|y - a\| \leq \underbrace{\|y - x\|}_{< \varepsilon = r - \|x - a\|} + \|x - a\| < r - \|x - a\| + \|x - a\| = r.$$

Satz 2.16 (Eigenschaften offener Mengen). Es gilt:

- (1) Sind U und $V (\subseteq \mathbb{K}^n)$ offen, dann ist $U \cap V$ offen.
- (2) Sei $U_i \subset \mathbb{K}^n, i \in I$ eine Familie offener Teilmengen. Dann ist auch $\bigcup_{i \in I} U_i$ offen.

Beweis. (1) Sei $x \in U \cap V$. Dann $\exists \varepsilon_1, \varepsilon_2 > 0$ mit $K_{\varepsilon_1}(x) \subseteq U, K_{\varepsilon_2}(x) \subseteq V$. Damit gilt für $\varepsilon := \min\{\varepsilon_1, \varepsilon_2\}$, $K_\varepsilon(x) \subseteq U \cap V$. (Beachte: $\emptyset$ ist immer offen.)

(2) Sei $x \in \bigcup_{i \in I} U_i$, dann $\exists j \in I$ mit $x \in U_j$.

$$U_j \text{ offen} \implies \exists \varepsilon > 0 \text{ mit } K_\varepsilon(x) \subseteq U_j \implies K_\varepsilon(x) \subseteq \bigcup_{i \in I} U_i.$$

$\square$

Korollar 2.17. 1) Endliche Schnitte und beliebige Vereinigung von offenen Mengen sind wieder offen.

2) (Beobachtung) Durchschnitt von unendlich vielen offenen Mengen braucht nicht offen zu sein. Z.B.

$$\bigcap_{n=1}^{\infty} \left] -\frac{1}{n}, 1 + \frac{1}{n} \right[= [0, 1]$$

ist nicht offen, da $K_{\varepsilon}(0) \not\subset [0, 1], \forall \varepsilon > 0$.

Definition 2.18 (Abgeschlossene Menge). Eine Teilmenge $A \subset \mathbb{K}^n$ heißt abgeschlossen, wenn ihr Komplement $A^c := \mathbb{K}^n \setminus A$ offen ist.

Beispiel 2.19. (1) Für $a, b \in \mathbb{R}, a \leq b$ ist $[a, b]$ abgeschlossen, denn $] -\infty, a[\cup]b, \infty[= \mathbb{R} \setminus [a, b]$ ist offen, denn:

$$] -\infty, a[= \bigcup_{n \in \mathbb{N}}]a - n, a[\text{ ist offen} \quad]b, \infty[= \bigcup_{n \in \mathbb{N}}]b, b + n[\text{ ist offen.}$$

Satz 2.20 (Eigenschaften abgeschlossener Mengen).

- (1) Sind V, U ($V, U \subset \mathbb{K}^n$) abgeschlossen, dann ist $U \cup V \subset \mathbb{K}^n$ auch abgeschlossen.
 (2) Sind $U_i, (i \in I)$ abgeschlossene Mengen in $\mathbb{K}^n$. Dann ist $\bigcap_{i \in I} U_i$ auch abgeschlossen.

Beweis. (1) $(U \cup V)^c = \underbrace{U^c}_{\text{offen}} \cap \underbrace{V^c}_{\text{offen}}$ offen.

(2) $\left(\bigcap_{i \in I} U_i \right)^c = \bigcup_{i \in I} \underbrace{U_i^c}_{\text{offen}}$ offen.

□

Beispiel 2.21. (1) Beliebige Vereinigung abgeschlossener Mengen muss nicht abgeschlossen sein. Z.B. $]0, 1[= \bigcup_{n \in \mathbb{N}} \underbrace{\left[\frac{1}{n}, 1 - \frac{1}{n} \right]}_{\text{abgeschlossen}}$ ist offen.

(2) $\emptyset$ und K^n sind abgeschlossen.

(3) $A_1 \subset \mathbb{R}^{n_1}$ und $A_2 \subset \mathbb{R}^{n_2}$ abgeschlossen, dann ist auch $A_1 \times A_2 \subset \mathbb{R}^{n_1} \times \mathbb{R}^{n_2} = \mathbb{R}^{n_1+n_2}$ abgeschlossen.

(4) Für $a < b \in \mathbb{R}$ ist $[a, b[$ weder offen noch abgeschlossen.

Satz 2.22 (Charakterisierung abgeschlossener Mengen). Sei $A \subset \mathbb{K}^n$. Dann gilt

A abgeschlossen $\iff$ Ist $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}}$ konvergente Folge in A mit $\lim_{k \rightarrow \infty} x^{(k)} = a$, dann $a \in A$.

Beweis. • „ $\implies$ “: Sei A abgeschlossen und $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}}$ konvergente Folge in A mit

$$\lim_{k \rightarrow \infty} x^{(k)} = x.$$

Ang.: $x \notin A$, d.h. $x \in A^C$. Da A^C offen, folgt, es ex. ein $\varepsilon > 0$, s.d. $K_\varepsilon(x) \subset A^C$. Mit $x = \lim_{k \rightarrow \infty} x^{(k)}$ folgt, dass fast alle Folgeelemente $x^{(k)}$ in $K_\varepsilon(x) \subset A^C$ liegen.

Widerspruch zu: $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}} \subset A$. Damit folgt $x \in A$.

- „ $\Leftarrow$ “: Sei $A \subset \mathbb{K}^n$ s.d. alle konvergenten Folgen in A einen Grenzwert in A haben.

Zu zeigen: A^C offen. Sei $x \in A^C$ beliebig. Dann g.z.z.: $\exists \varepsilon > 0$ s.d. $K_\varepsilon(x) \subset A^C$.

Ang.: A^C nicht offen. Dann ex. $\forall k \in \mathbb{N}$ ein Punkt $x^{(k)}$ mit $x^{(k)} \in A \cap K_{\frac{1}{k}}(x)$. Dann ist $x^{(k)} \in A \forall k \in \mathbb{N}$ und $\|x - x^{(k)}\| \leq \frac{1}{k}$. Damit folgt

$$x^{(k)} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} x \xrightarrow{\text{Vorr.}} x \in A \quad \nRightarrow \quad A^C \text{ offen} \quad \Rightarrow \quad A \text{ abgeschlossen.}$$

□

Definition 2.23 (Randpunkt). Sei $M \subset \mathbb{K}^n$ eine Teilmenge. Ein Punkt $a \in \mathbb{K}^n$ heißt Randpunkt von M , falls in jeder Umgebung von a sowohl ein Punkt von M , als auch ein Punkt von $M^C = \mathbb{K}^n \setminus M$ liegt.

Die Menge aller Randpunkte von M heißt der Rand von M , bezeichnet mit ∂M .

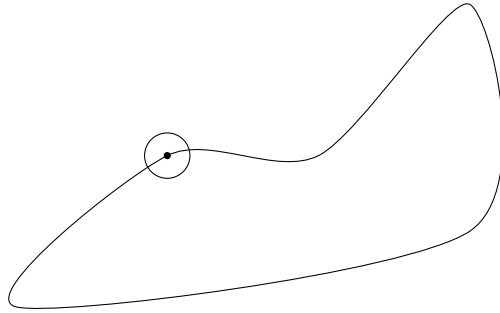


Abbildung 2.1: Randpunkt einer Menge $M \subset \mathbb{K}^n$

Beispiel 2.24. (1) Für $I \in \{[a, b[, [a, b],]a, b],]a, b[\}$ gilt $\partial I = \{a, b\}$.

$$\begin{aligned} \partial[a, \infty[&= \{a\} \\ \partial]a, \infty[&= \{a\} \end{aligned}$$

(2) Für $K_1(0)$ gilt

$$\begin{aligned} \partial K_1(0) &= \partial\{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x\| < 1\} \\ &= \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x\| = 1\} \\ &\quad \text{„Einheitssphäre,,.} \end{aligned}$$

(3) $\mathbb{Q} \subset \mathbb{R}$, $\partial\mathbb{Q} = \mathbb{R}$, weil in jeder Umgebung eines Punktes in $\mathbb{Q}$, gibt es rationale und irrationale Zahlen. Der Rand von $\mathbb{R}$ ist leer.

Definition 2.25 (Inneres, Abschluss). Sei $M \subset \mathbb{K}^n$

- Die Menge $M^\circ := M \setminus \partial M$ heißt das Innere von M .
- Die Menge $\overline{M} := M \cup \partial M$ heißt der Abschluss von M .

Satz 2.26 (Inneres ist Offen, Abschluss ist abgeschlossen). Sei $M \subset \mathbb{K}^n$.

- (i) Die Menge $M^\circ = M \setminus \partial M$ ist offen. M° ist die größte offene Menge in M .
- (ii) Die Menge $\overline{M} = M \cup \partial M$ ist abgeschlossen. $\overline{M}$ ist die kleinste abgeschlossene Menge, die M umfasst.
- (iii) Der Rand ∂M ist abgeschlossen.

Beweis. (i) Z.z.: $M \setminus \partial M$ offen.

Sei $x \in M \setminus \partial M$ beliebig, dann ex. $\varepsilon > 0$, s.d. $K_\varepsilon(x) \subset M$ ($\implies K_\varepsilon(x) \cap M^C = \emptyset$), sonst wäre $x \in \partial M$.

Für dieses ε gilt auch $K_\varepsilon(x) \cap \partial M = \emptyset$, denn falls $z \in K_\varepsilon(x) \cap \partial M$ existiert, dann ist $K_\varepsilon(x)$ Umgebung von z und folglich $K_\varepsilon(x) \cap M^C \neq \emptyset$.

Damit folgt:

$$K_\varepsilon(x) \subset M \setminus \partial M \implies M \setminus \partial M \text{ offen.}$$

Sei $U \subset M$ offen, dann ist analog $U \cap \partial M = \emptyset$. Damit gilt $U \subset M \setminus \partial M$. Da U beliebig, folgt damit $M \setminus \partial M =: M^\circ$ ist größte offene Teilmenge von M .

(ii) Z.z.: $M \cup \partial M$ abgeschlossen.

Betrachte $M^C = \mathbb{K}^n \setminus M$. Nach Definition des Rands gilt $\partial M^C = \partial M$. Damit folgt mit (i), dass $M^C \setminus \underbrace{\partial M}_{=\partial M^C}$ offen ist. Dann

$$(M^C \setminus \partial M)^C = \mathbb{K}^n \setminus (M^C \setminus \partial M) = \underbrace{(\mathbb{K}^n \setminus M^C)}_{=M} \cup \partial M = M \cup \partial M.$$

D.h. $M \cup \partial M$ ist abgeschlossen.

Sei $V \in K^n$ abgeschlossen mit $M \subset V$. Dann gilt V^C ist offen und $V^C \subset M^C$. Damit folgt mit (i):

$$\underbrace{V^C}_{\text{offen}} \subset M^C \setminus \underbrace{\partial M^C}_{=\partial M} = M^C \setminus \partial M \implies \mathbb{K}^n \setminus (M^C \setminus \partial M) = (M \cup \partial M) \subset V.$$

Da V beliebig, folgt damit $M \cup \partial M$ ist kleinste abgeschlossene Menge, die M umfasst.

(iii) Mit $\partial M = (M \cup \partial M) \setminus (M \setminus \partial M)$ folgt

$$\mathbb{K}^n \setminus \partial M = \underbrace{(\mathbb{K}^n \setminus (M \cup \partial M))}_{\text{offen}} \cup \underbrace{(M \setminus \partial M)}_{\text{offen}}.$$

Damit ist $\mathbb{K}^n \setminus \partial M$ offen, also ∂M abgeschlossen.

□

Definition 2.27 (Kompaktheit). Eine Menge $M \subset \mathbb{K}^n$ heißt kompakt (folgenkompakt), wenn jede Folge aus M eine konvergente Teilfolge mit Grenzwert in M besitzt.

Beispiel 2.28. (i) Sei

$$\left(x^{(k)}\right)_{k \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{K}^n, x^{(k)} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} x.$$

Dann ist $A := \{x^{(k)} \mid k \in \mathbb{N}\} \cup x$ kompakt.

(ii) $]0, 1[$ ist nicht kompakt, denn $(\frac{1}{2k})_{k \in \mathbb{N}} \subset]0, 1[, \frac{1}{2k} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$.

Auch: $(1 - \frac{2}{k})_{k \in \mathbb{N}} \subset]0, 1[, 1 - \frac{2}{k} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 1$

Definition 2.29 (Überdeckung). Eine Familie $(U_i)_{i \in I}$ von Teilmengen $U_i \subset \mathbb{K}^n$ heißt Überdeckung von M , falls gilt

$$M \subset \bigcup_{i \in I} U_i.$$

Eine Überdeckung heißt offen bzw. abgeschlossen, wenn alle U_i offen bzw. abgeschlossen sind.

Satz 2.30 (Charakterisierung von Kompaktheit). Sei $M \subset \mathbb{K}^n$ eine Teilmenge. Dann sind die folgenden Aussagen äquivalent:

- (i) M ist folgenkompakt
- (ii) M ist beschränkt und abgeschlossen
- (iii) Jede offene Überdeckung $(U_i)_{i \in I}$ von M enthält eine endliche Überdeckung von M , d.h. es existieren endlich viele Indizes $i_1, \dots, i_k \in I$, s.d. $M \subset (U_{i_1} \cup \dots \cup U_{i_k})$ (sogenannte Überdeckungseigenschaft von Heine und Borel).

Beweis. • (i) $\implies$ (ii): Sei $M \subset \mathbb{K}^n$ folgenkompakt. Dann existieren für alle konvergenten Folgen $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}} \subset M$ eine konvergente Teilfolge mit Grenzwert in M . Damit liegt auch der Grenzwert von $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}}$ in M . Also ist M abgeschlossen.

Ang.: M ist nicht beschränkt. Dann ex. eine Folge $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}}$ mit $\|x^{(k)}\| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \infty$. Damit hat $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}}$ keine konvergente Teilfolge. Widerspruch zur Kompaktheit von M . Also ist M beschränkt.

- (ii) $\implies$ (i): Sei $M \subset \mathbb{K}^n$ beschränkt und abgeschlossen. Dann folgt mit 2.9, dass alle Folgen $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}} \subset M$ beschränkt sind und eine konvergente Teilfolge $(x^{(k_j)})_{j \in \mathbb{N}} \xrightarrow{j \rightarrow \infty} x$ besitzen. Da M abgeschlossen ist, folgt $x \in M$.

Also ist M folgenkompakt.

- (iii) $\implies$ (i): Sei $M \subset \mathbb{K}^n$ und M besitze die Überdeckungseigenschaft. Sei weiter $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}} \subset M$ beliebig.

Z.z.: Es ex. eine konvergente Teilfolge $(x^{(k_j)})_{j \in \mathbb{N}}$ mit $x^{(k_j)} \xrightarrow{j \rightarrow \infty} x \in M$.

Ang.: Solche Teilfolge existiert nicht. Dann gilt: $\forall x \in M$ existiert eine offene Umgebung U_x von x , die nur endlich viele Folgelemente von $(x^{(k)})$ enthält (wären in jeder Umgebung von x unendlich viele Folgelemente, dann existiert eine konvergente Teilfolge).

Damit ist $M = \bigcup_{x \in M} U_x$ eine offene Überdeckung, d.h. es existiert nach Vorr. eine endliche Überdeckung von M , d.h. eine endliche Menge I mit

$$\{x_i \mid x_i \in M, i \in I\} =: M_i \text{ s.d. } M \subset \bigcup_{x_i \in M_i} U_{x_i}.$$

Da $\forall i \in I$ U_{x_i} nur endlich viele Folgelemente enthält, enthält M endlich viele Folgelemente von $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}}$, d.h. $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}} \not\subset M \nabla$.

Also existiert eine Teilfolge $(x^{(k_j)})_{j \in \mathbb{N}}$ mit $x^{(k_j)} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} x \in M$

- (ii) $\implies$ (iii): Sei M beschränkt und abgeschlossen und sei $\{U_i, i \in I\}$ eine offene Überdeckung von M .

Zu zeigen: Es existiert eine endliche Überdeckung von M .

Ang.: Eine solche Überdeckung existiert nicht. Konstruiere induktiv eine Folge von beschränkten, abgeschlossenen Würfeln in $\mathbb{K}^n$:

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

mit

- (1) $M \cap Q_i$ wird nicht durch endlich viele U_{i_k} überdeckt.
- (2) Kantenlänge von $Q_m = 2^{-m}$ Kantenlänge von Q_0 .

Sei Q beschränkter abgeschlossener Würfel in $\mathbb{K}^n$ mit Kantenlänge L , s.d. $M \subset Q$. Setze

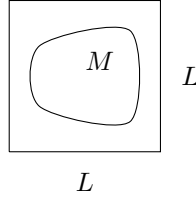


Abbildung 2.2: Abgeschlossener Würfel $Q \subset K^n$ mit Kantenlänge L und $M \subset Q$

$Q_0 = Q$, Kantenlänge von $Q_0 = L$. Sei Q_m bereits konstruiert. Sei

$$Q_m = I_1 \times I_2 \times \dots \times I_n.$$

Länge $(I_k) = \text{Kantenlänge}(Q_m) \forall k = 2^{-m}L$

Wir zerlegen jedes I_i in 2 abgeschlossene Intervalle mit halber Länge $I_i^{(1)}$ und $I_i^{(2)}$ und setzen für $(s_1, \dots, s_n) \in \{1, 2\}^n$

$$Q_m^{s_1, \dots, s_n} := I_1^{(s_1)} \times \dots \times I_n^{(s_n)}.$$

Wir erhalten 2^n Würfel mit

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

Da $M \cap Q_m$ nicht von endlich vielen U_{i_k} überdeckt wird, gilt dies auch für einen Würfel

$$Q_{m+1} := Q_m^{(s_1, \dots, s_n)}.$$

Es gilt für die Kantenlänge $(Q_{m+1}) = \frac{1}{2}$ Kantenlänge $(Q_m) = 2^{-(m+1)}L$.

Für $k \in \mathbb{N}$ wähle $x^{(k)} \in Q_k \cap M$. Damit ist $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}}$ eine Cauchy-Folge in $\mathbb{K}^n$, da nach Konstruktion von $Q_1, Q_2, \dots$

$$\|x^{(l)} - x^{(k)}\| \leq 2^{-n_0}L, \quad \forall l, k \geq n_0.$$

Damit folgt $x^{(k)} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} x \in M$ und $x \in \bigcup_{i \in I} U_i$, weil $M \subset \bigcup_{i \in I} U_i$. Also existiert ein i_k , s.d. $x \in U_{i_k}$ liegt. Damit liegen fast alle Q_m in U_{i_k} . Das heißt fast alle $M \cap Q_m$ liegen in U_{i_k} . Widerspruch zur Annahme, dass eine endliche Überdeckung nicht existiert.

Also existiert eine endliche Überdeckung von M .

□

Bemerkung 2.31. Wichtige Voraussetzung für die Überdeckungseigenschaft von Heine und Borel ist, dass $\mathbb{K}^n$ endlich-dimensional ist.

In unendlich dimensionalen Banach-Räumen wie z.B.: $C[a, b]$ ist dies nicht möglich.

Korollar 2.32. Jede abgeschlossene Teilmenge einer kompakten Menge in $\mathbb{K}^n$ ist ebenfalls kompakt.

Beweis. Sei $M \subset \mathbb{K}^n$ kompakt und $A \subset M$ abgeschlossen. Wegen 2.30 ist M beschränkt. Damit ist auch $A \subset M$ beschränkt und somit nach 2.30 kompakt. $\square$

2.3 Geometrie in K^n

Definition 2.33 (Skalarprodukt). Sei V irgendein Raum über dem Körper $\mathbb{K}$. Eine Abbildung $(\cdot, \cdot) : V \times V \rightarrow \mathbb{K}$ heißt Skalarprodukt, wenn folgende Eigenschaften erfüllt sind

S1 (Definitheit) $(x, x) \in \mathbb{R}$ und $(x, x) \geq 0$, $(x, x) = 0 \iff x = 0$

S2 (Symmetrie) $(x, y) = \overline{(y, x)}$

S3 (Linearität im ersten Argument) $(\alpha x_1 + \beta x_2, y) = \alpha(x_1, y) + \beta(x_2, y) \quad \forall x_1, x_2, y \in V, \forall \alpha, \beta \in \mathbb{K}$

Bemerkung 2.34. (1) Falls nur $(x, x) \in \mathbb{R}, (x, x) \geq 0$ gilt (es ist möglich, dass $(x, x) = 0$ und $x \neq 0$), dann ist $(\cdot, \cdot)$ ein „semi-skalarprodukt“.

(2) Aus S2 und S3 folgt die Linearität im zweiten Argument und damit sog. Bilinearität des Skalarprodukts als eine Sesquilinearform in $\mathbb{C}$ bzw. eine Bilinearform in $\mathbb{R}$

(3) S3 $\implies \begin{cases} \text{Additivität} & (x_1 + x_2, y) = (x_1, y) + (x_2, y) \\ \text{Homogenität} & (\alpha x, y) = \alpha(x, y), \alpha \in \mathbb{K} \end{cases}$

Lemma 2.35 (Schwarz-Ungleichung). Für ein Skalarprodukt $(\cdot, \cdot)$ auf V über $\mathbb{K}$ gilt die Schwarz-Ungleichung

$$|(x, y)^2| \leq (x, x) \cdot (y, y), \quad x, y \in V$$

Beweis. $y = 0 \implies$ trivial. Sei $y \neq 0$, und sei $\alpha \in \mathbb{K}$ beliebig.

$$0 \stackrel{S1}{\leq} (x + \alpha y, x + \alpha y) \stackrel{S2, S3}{=} (x, x) + \alpha(y, x) + \overline{\alpha}(x, y) + \alpha\overline{\alpha}(y, y)$$

Setze $\alpha = -\frac{(x, y)}{(y, y)}$

$$\begin{aligned} 0 &\leq (x, x) - \frac{(x, y)(y, x)}{(y, y)} - \frac{\overline{(x, y)}(x, y)}{(y, y)} + \frac{(x, y)}{(y, y)} \cdot \frac{\overline{(x, y)}}{(y, y)} \cdot (y, y) \\ &= (x, x) - \frac{|(x, y)|^2}{(y, y)} \\ &\implies 0 \leq (x, x) \cdot (y, y) - |(x, y)|^2 \end{aligned}$$

$\square$

Korollar 2.36. a) Ein Skalarprodukt $(\cdot, \cdot)$ auf V über $\mathbb{K}$ erzeugt eine Norm durch $\|x\| := \sqrt{(x, x)}$, $x \in V$. Falls ein normierter Raum $(V, (\cdot, \cdot))$ vollständig ist, so heißt das Paar $(V, (\cdot, \cdot))$ Hilbert-Raum.

b) Das euklidische Skalarprodukt $(\cdot, \cdot)_2$ auf $\mathbb{K}^n$

$$(x, y)_2 := \sum_{i=1}^n x_i \overline{y_i}$$

erzeugt die euklidische Norm

$$\|x\|_2 := \sqrt{(x, x)_2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i|^2}.$$

$(\mathbb{K}^n, (\cdot, \cdot)_2)$ ist ein Hilbert-Raum.

Beweis. Normeigenschaften Definitheit und Homogenität folgen aus S1-S3. Die Dreiecksungleichung folgt aus der Schwarz-Ungleichung.

$$\begin{aligned} \|x + y\|^2 &= (x + y, x + y) = (x, x) + (x, y) + (y, x) + (y, y) \\ &\leq \|x\|^2 + 2|(x, y)| + \|y\|^2 \\ &\stackrel{\text{Schwarz}}{\leq} \|x\|^2 + 2\|x\| \cdot \|y\| + \|y\|^2 \\ &= (\|x\| + \|y\|)^2 \\ \implies \|x + y\| &\leq \|x\| + \|y\| \end{aligned}$$

□

Wichtige Ungleichungen

Lemma 2.37 (Ungleichung von Young). Seien $p, q \in \mathbb{R}, p > 1, q < \infty, \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$. Dann gilt

$$|x \cdot y| \leq \frac{|x|^p}{p} + \frac{|y|^q}{q} \quad x, y \in \mathbb{R}$$

Beweis. Übung

□

Lemma 2.38 (Ungleichung von Hölder). Seien $p, q \in \mathbb{R}, p > 1, q < \infty, \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$. Dann gilt

$$\underbrace{|(x, y)_2|}_{\text{euklidisches Skalarprodukt}} \leq \underbrace{\|x\|_p}_{\ell_p\text{-Norm von } x} \cdot \underbrace{\|y\|_q}_{\ell_q\text{-Norm von } y}$$

Beweis. Falls $x = 0$ oder $y = 0 \implies$ klar. Sei $\|x\|_p \neq 0$, $\|y\|_q \neq 0$

$$\begin{aligned}
 \frac{|(x, y)_2|}{\|x\|_p \cdot \|y\|_q} &\stackrel{\text{Def.}}{=} \frac{1}{\|x\|_p \cdot \|y\|_q} \left| \sum_{i=1}^n x_i \overline{y_i} \right| \\
 &\leq \sum_{i=1}^n \frac{|x_i \overline{y_i}|}{\|x\|_p \cdot \|y\|_q} \\
 &\stackrel{\text{Young-Ungl.}}{\leq} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|x_i|^p}{p \cdot \|x\|_p^p} + \frac{|y_i|^q}{q \cdot \|y\|_q^q} \right) \\
 &= \frac{1}{p \cdot \|x\|_p^p} \underbrace{\sum_{i=1}^n |x_i|^p}_{=\|x\|_p^p} + \frac{1}{q \cdot \|y\|_q^q} \underbrace{\sum_{i=1}^n |y_i|^q}_{=\|y\|_q^q} \\
 &= \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1 \\
 \implies |(x, y)_2| &\leq \|x\|_p \cdot \|y\|_q
 \end{aligned}$$

□

Lemma 2.39 (Ungleichung von Minkowski). Sei $p \in \mathbb{R}$, $1 \leq p < \infty$ oder $p = \infty$. Dann gilt

$$\|x + y\|_p \leq \|x\|_p + \|y\|_p$$

$\leadsto$ Dreiecksungleichung für die ℓ_p -Norm.

Beweis. Für $p = 1$

$$\|x + y\|_1 \stackrel{\text{Def. } \ell_1}{=} \sum_{i=1}^n |x_i + y_i| \stackrel{\Delta\text{-UG}}{\leq} \sum_{i=1}^n |x_i| + \sum_{i=1}^n |y_i| \stackrel{\text{Def. } \ell_1}{=} \|x\|_1 + \|y\|_1$$

Für $p = \infty$

$$\|x + y\|_\infty \stackrel{\text{Def. } \ell_\infty}{=} \max_{i=1, \dots, n} |x_i + y_i| \stackrel{\Delta\text{-UG}}{\leq} \max_{i=1, \dots, n} |x_i| + \max_{i=1, \dots, n} |y_i| \stackrel{\text{Def. } \ell_\infty}{=} \|x\|_\infty + \|y\|_\infty$$

Sei $1 < p < \infty$. Definiere $q := \frac{p}{p-1}$ ($\implies \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{p} + \frac{p-1}{p} = 1$) und setze $\xi_i = |x_i + y_i|^{p-1}$, $i = 1, \dots, n$ und $\xi := \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \vdots \\ \xi_n \end{pmatrix}$. Es gilt

$$\|\xi\|_q^q = \sum_{i=1}^n |\xi_i|^q = \sum_{i=1}^n \underbrace{(|x_i + y_i|^{p-1})^q}_{\xi_i} = \sum_{i=1}^n |x_i + y_i|^p = \|x + y\|_p^p$$

Dann

$$\begin{aligned}
\|x + y\|_p^p &\stackrel{\text{Def.}}{=} \sum_{i=1}^n \underbrace{|x_i + y_i|^p}_{= \underbrace{|x_i + y_i|^{p-1}}_{\xi_i} \cdot |x_i + y_i|} \\
&= \sum_{i=1}^n |x_i + y_i| \cdot \xi_i \\
&\leq \underbrace{\sum_{i=1}^n |x_i| \cdot \xi_i}_{|(x, \xi)_2|} + \underbrace{\sum_{i=1}^n |y_i| \cdot \xi_i}_{|(y, \xi)_2|} \\
&\stackrel{\text{Hölder-Ungl.}}{\leq} \|x\|_p \cdot \|\xi\|_q + \|y\|_p \cdot \|\xi\|_q \\
&= (\|x\|_p + \|y\|_q) \cdot \|\xi\|_q \\
&\stackrel{\text{Def. } \xi}{=} (\|x\|_p + \|y\|_q) \cdot \|x + y\|_p^{\frac{p}{q}} \\
&\stackrel{\text{Def. } q}{=} (\|x\|_p + \|y\|_q) \cdot \|x + y\|_p^{p-1} \\
&\implies \|x + y\|_p \leq \|x\|_p + \|y\|_p
\end{aligned}$$

□

Definition 2.40 (Orthogonalität). $x, y \in \mathbb{K}^n$ heißen orthogonal ($x \perp y$), falls $(x, y)_2 = 0$.

Definition 2.41 (Orthogonalsystem/Orthogonalbasis). Ein Satz von Vektoren $\{a^{(1)}, \dots, a^{(m)}\}$, $a^{(i)} \neq 0$, $a^{(i)} \in \mathbb{K}^n$, $i = 1, \dots, m$ und $\underbrace{(a^{(k)}, a^{(l)})_2 = 0}_{\text{paarweise orthogonal}}$ für $k \neq l$ heißt

Orthogonalsystem bzw. falls $m = n$ Orthogonalbasis.

Falls $(a^{(k)}, a^{(k)})_2 = 1$, dann heißen die Vektoren $\{a^{(1)}, \dots, a^{(m)}\}$ ein Orthonormalsystem bzw. Orthonormalbasis.

Bemerkung 2.42. Die orthogonalen Vektoren (wie in Def.) sind linear unabhängig:

$$\text{Sei } \sum_{k=1}^m c_k a^{(k)} = 0 \iff \sum_{k=1}^m c_k (a^{(k)}, a^{(l)}) \stackrel{\substack{a^{(i)} \\ \text{paarweise} \\ \text{orthog.}}}{=} c_l \underbrace{(a^{(l)}, a^{(l)})}_{\substack{\neq 0 \\ \text{für } a^{(l)} \neq 0}} = 0 \iff c_l = 0, \quad l = 1, \dots, m$$

Beispiel 2.43. $e^{(1)}, \dots, e^{(n)}$ ist eine Orthogonalbasis in $\mathbb{R}^n$.

Lemma 2.44. Sei $\{a^{(k)}, k = 1, \dots, n\}$ eine Orthonormalbasis des $\mathbb{K}^n$. Dann gibt es $\forall x \in \mathbb{K}^n$ eine Darstellung

$$x = \sum_{k=1}^n (x, a^{(k)})_2 \cdot a^{(k)}, \quad x \in \mathbb{K}^n.$$

$$\left(\begin{array}{l} \sim \text{Fourierentwicklung} \\ a^{(k)} \sim e^{ixk} \\ x \sim f(x) \\ c_k \sim (f, e^{ixk})_{L^2} \end{array} \quad f(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} c_k \cdot e^{ixk} \right)$$

und es gilt die Vollständigkeitsrelation (Gleichung von Parseval)

$$\|x\|_2^2 = \sum_{k=1}^n |(x, a^{(k)})_2|^2$$

$$(\sim \|f\|_{L^2}^2 = \sum_{k \in \mathbb{Z}} |c_k^2| \cdot 2\pi)$$

Beweis. $\exists \alpha_j$, sodass $x = \sum_{j=1}^n \alpha_j a^{(j)}$

$$\Rightarrow (x, a^{(k)})_2 = \sum_{j=1}^n \alpha_j \underbrace{(a^{(j)}, a^{(k)})_2}_{\delta_{jk}} = \alpha_k, \quad k = 1, \dots, n$$

$\Rightarrow$ Darstellung von x

Außerdem gilt

$$\|x\|_2^2 = (x, x)_2 = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n (x, a^{(k)})_2 \cdot \overline{(x, a^{(j)})_2} \cdot \underbrace{(a^{(k)}, a^{(j)})_2}_{\delta_{jk}} = \sum_{k=1}^n |(x, a^{(k)})_2|^2$$

$\Rightarrow$ Gleichung von Parseval

□

Bemerkung 2.45. Lemma 2.44 gilt in unendlichdimensionalen Skalarprodukträumen mit vollständigem Orthonormalsystem. Beispiel: Fourier-Reihen in $R[0, 2\pi]$, trigonometrische Funktionen e^{ikx} als vollständiges Orthonormalsystem.

Satz 2.46 (Gram-Schmidt-Verfahren). Sei $\{a^{(1)}, \dots, a^{(n)}\}$ eine Basis des $\mathbb{K}^n$. Dann ist $\{b^{(1)}, \dots, b^{(n)}\}$ konstruiert durch das Orthogonalisierungsverfahren von Gram und Schmidt eine Orthonormalbasis.

$$b^{(1)} := \frac{a^{(1)}}{\|a^{(1)}\|_2}$$

$$\tilde{b}^{(k)} := a^{(k)} - \sum_{j=1}^{k-1} (a^{(k)}, b^{(j)})_2 \cdot b^{(j)}$$

$$b^{(k)} := \frac{\tilde{b}^{(k)}}{\|\tilde{b}^{(k)}\|_2}, \quad k = 2, \dots, n$$

Beweis. Rannacher

□

2.4 Lineare Abbildungen auf dem K^n

Definition 2.47 (Lineare Abbildung). Eine lineare Abbildung $\varphi : K^n \rightarrow K^m$ heißt linear, falls $\forall \alpha, \beta \in K$ gilt

$$\varphi(\alpha x + \beta y) = \alpha \varphi(x) + \beta \varphi(y) \quad \forall x, y \in K^n$$

Bemerkung 2.48. Eine lineare Abbildung lässt sich als Matrix darstellen. Betrachte $x \in K^n$ und euklidische/kartesische Basis $e^{(i)}$, $i = 1, \dots, n$. Dann $\exists!$ Darstellung von x bezüglich der Basis

$$x = \sum_{i=1}^n x_i \cdot e^{(i)}.$$

Die Koeffizienten $x_i, i = 1, \dots, n$ sind Koordinaten. Wir definieren Koordinatenvektor $\hat{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$.

Dann ist

$$\varphi(x) = \varphi\left(\sum_{i=1}^n x_i \cdot e^{(i)}\right) = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \varphi(e^{(i)}).$$

$\varphi(x)$ hat auch eine (eindeutige) Darstellung bzgl. Basis in K^m .

$$\varphi(x) = \sum_{j=1}^m \underbrace{\varphi_j(x)}_* \cdot e^{(j)} = \sum_{j=1}^m \underbrace{\left(\sum_{i=1}^n x_i \overbrace{\varphi_j(e^{(i)})}^{a_{ji}}\right)}_{=\varphi_j(x)} \cdot e^{(j)}$$

(*) Koordinaten von $\varphi_j(x)$ bzgl. Basis $e^{(j)}, j = 1, \dots, m$

Dabei sind die $\varphi_j(x)$ Koordinaten und der Koordinatenvektor ist $\hat{\varphi}(x) = \begin{pmatrix} \varphi_1(x) \\ \dots \\ \varphi_m(x) \end{pmatrix}$. Dann erhalten wir eine Matrix

$$\begin{pmatrix} \varphi_1(e^{(1)}) & \dots & \varphi_1(e^{(n)}) \\ \vdots & & \vdots \\ \varphi_m(e^{(1)}) & \dots & \varphi_m(e^{(n)}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} = A \in K^{m \times n}$$

Für einen Koordinatenvektor bezüglich Basis $e^{(j)}$ gilt

$$\varphi(x) = (A\hat{x})_j = \sum_{i=1}^n a_{ij}x_i, \quad j = 1, \dots, m$$

Die lineare Abbildung $\varphi : K^n \rightarrow K^m$ lässt sich bezüglich festgelegter Basen von K^n und K^m eindeutig durch die Matrix $A \in K^{m \times n}$ beschreiben.

$$\hat{\varphi}(x) = A\hat{x}, \quad x \in K^n$$

Im folgenden wird der Punkt x mit seiner speziellen kartesischen Darstellung $\hat{x}$ identifiziert. Konvention: $A \in K^{m \times n}$

- Anzahl an Zeilen m = Dimension des Bildraums K^m

- Anzahl an Spalten n = Dimension des Urbildraums $\mathbb{K}^n$

Falls $m = n$ definiert $A \in K^{n \times n}$ eine lineare Abbildung in $\mathbb{K}^n$.

Lemma 2.49 (Lineare Abbildungen in $\mathbb{K}^n$). Sei $A = (a_{ij})_{i,j=1}^n \in \mathbb{K}^{n \times n}$. Dann sind die folgenden Aussagen äquivalent.

1. A ist regulär
2. $Ax = b$ ist eindeutig lösbar $\forall b \in \mathbb{K}^n$ (Bijektivität der linearen Abbildung)
3. $Ax = 0$ hat nur eine Lösung $x = 0$ (Injektivität)
4. $Ax = b$ ist $\forall b \in \mathbb{K}^n$ lösbar (Surjektivität)
5. $\text{Rang}(A) = n$
6. $\det(A) \neq 0$
7. Alle Eigenwerte $\lambda \in \mathbb{C}$ von A sind ungleich Null
8. Die (komplex) transponierte Matrix $\bar{A}^T$ ist regulär.

Weitere Begriffe und Eigenschaften

- $A, A' \in \mathbb{K}^{n \times n}$ sind **identisch** ($a_{ij} = a'_{ij} \forall i, j$) $\Leftrightarrow Ax = A'x \forall x \in \mathbb{K}^n$
- $A, A' \in \mathbb{K}^{n \times n}$ sind **ähnlich**, wenn $\exists T \in \mathbb{K}^{n \times n}$ regulär, sodass

$$A' = T^{-1}AT$$

Übergang $A \rightarrow A'$ heißt Ähnlichkeitstransformation und es gilt für $z \in \mathbb{C}$

$$\begin{aligned} \underbrace{\det(A' - z\mathbb{I})}_{\substack{\text{Charakt. Polynom für } A' \\ \text{Nullstellen} = \text{EW von } A'}} &= \det \left(T^{-1}AT - z \underbrace{T^{-1}T}_{=\mathbb{I}} \right) \\ &= \det(T^{-1}(A - z\mathbb{I})T) \\ &\stackrel{\det(AB)=\det(A)\det(B)}{=} \det(T^{-1}) \det(A - z\mathbb{I}) \det(T) \\ &\stackrel{\det(T^{-1})\det(T)=1=\det(\mathbb{I})}{=} \underbrace{\det(A - z\mathbb{I})}_{\substack{\text{char. Pol. von } A}} \end{aligned}$$

Ähnliche Matrizen haben also die gleichen Eigenwerte, aber im Allgemeinen unterschiedliche Eigenvektoren.

- $n \times n$ Matrizen $A \in \mathbb{K}^{m \times n}$ bilden einen Vektorraum.
- **Konvergenz** von Folgen von Matrizen ist komponentenweise Konvergenz

$$A^{(k)} \rightarrow A, k \rightarrow \infty \Leftrightarrow a_{ij}^{(k)} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} a_{ij} \forall i = 1, \dots, m, \forall j = 1, \dots, n$$

- Sei $\|\cdot\|$ eine beliebige Norm auf $\mathbb{K}^n$. Dann

$$\|A\| := \sup_{x \in \mathbb{K}^n \setminus \{0\}} \frac{\|Ax\|}{\|x\|} = \sup_{x \in \mathbb{K}^n} \|Ax\| \text{ für } \|x\| = 1$$

ist die von $\|\cdot\|$ in $\mathbb{K}^n$ erzeugte natürliche **Matrixnorm**

- Für natürliche Matrixnorm gilt notwendig $\|\mathbb{I}\| = 1$
- Natürliche Matrixnorm ist verträglich mit $\|\cdot\|$, d.h. für $A \in K^{n \times n}$ ist $\|Ax\| \leq \|A\| \cdot \|x\|$, $x \in K^n$
- und submultiplikativ, d.h. $\|AB\| \leq \|A\| \|B\|$ für $A, B \in K^{n \times n}$

Beispiel 2.50. $\|A\|_F = \left(\sum_{j,k=1}^n |a_{jk}|^2\right)^{\frac{1}{2}}$ heißt **Frobenius-Norm**. Sie ist verträglich mit $\|\cdot\|_2$ in K^n und submultiplikativ, aber keine natürliche Matrixnorm, weil $\|\mathbb{I}\|_F = \sqrt{n} \neq 1$ für $n \geq 2$.

Lemma 2.51 (Natürliche Matrixnormen). Die natürlichen Matrixnormen zu $\|\cdot\|_\infty$ (ℓ_∞ / Maximumnorm) und $\|\cdot\|_1$ (ℓ_1 -Norm) in K^n sind

$$\|A\|_\infty := \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n |a_{ij}| \quad \text{Maximale Zeilen-Summen-Norm}$$

$$\|A\|_\infty := \max_{1 \leq j \leq n} \sum_{i=1}^n |a_{ij}| \quad \text{Maximale Spalten-Summen-Norm}$$

Beweis. 1. Matrixnorm $\|\cdot\|_\infty$ ist eine Norm (d.h. erfüllt Normeigenschaften (N1), (N2) und (N3))

2. Z.Z. Verträglichkeit

$$\|Ax\|_\infty = \max_{1 \leq i \leq n} \left| \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \right| \leq \max_{1 \leq i \leq n} \left(\sum_{j=1}^n |a_{ij}| \cdot |x_j| \right) \leq \|x\|_\infty \cdot \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n |a_{ij}| = \|x\|_\infty \cdot \|A\|_\infty$$

$\implies$ Verträglichkeit mit $\|\cdot\|_\infty$

3. Z.Z. $\|A\|_\infty = \sup_{\|x\|_\infty=1} \|Ax\|_\infty$

$$\|Ax\|_\infty = 0 \implies A = 0 \implies \|A\|_\infty = 0 = \sup_{\|x\|_\infty=1} \|Ax\|_\infty$$

Sei $A \neq 0$, dann $\|A\|_\infty > 0$ (Definitheit von Normen). Sei

$$\|A\|_\infty = \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n |a_{ij}| = \sum_{j=1}^n |a_{mj}| \text{ für ein } m \in \{1, \dots, n\}.$$

Setze $z_j = \frac{|a_{mj}|}{a_{mj}}$, falls $a_{mj} \neq 0$ und sonst $z_j = 0$. ($z_j = \text{sign}(a_{mj})$). Für $z = \begin{pmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_n \end{pmatrix}$ gilt

dann $\|z\|_\infty = 1$ und

$$(Az)_m = \sum_{j=1}^n a_{mj} z_j = \sum_{j=1}^n |a_{mj}| = \|A\|_\infty.$$

Es folgt

$$\begin{aligned} \|A\|_\infty &= (Az)_m \leq \|Az\|_\infty \leq \sup_{\|y\|_\infty=1} \|Ay\|_\infty \leq \sup_{\|y\|_\infty=1} \|A\|_\infty \cdot \underbrace{\|y\|_\infty}_{=1} = \|A\|_\infty \\ &\implies \|A\|_\infty = \sup_{\|y\|_\infty=1} \|Ay\|_\infty \end{aligned}$$

Beweis für ℓ_1 analog. □

Definition 2.52. 1. Eigenwerte $\lambda \in \mathbb{K}$ einer Matrix $A \in \mathbb{K}^{n \times n}$ = Nullstellen des charakteristischen Polynoms

$$p(\lambda) = \det(A - \lambda \mathbb{I})$$

2. $\sigma(A) = \{\lambda \mid \lambda \text{ Eigenwert von } A\}$ heißt **Spektrum** von A .

3. $\forall \lambda \in \sigma(A) \exists$ Eigenvektor $w \in \mathbb{K}^n \setminus \{0\}$:

$$Aw = \lambda w$$

Die Eigenvektoren zu λ bilden einen Vektorraum, den **Eigenraum** zu λ mit Dimension = **geometrische Vielfachheit** von λ .

4. Abschätzung der Eigenwerte: Sei $\lambda \in \sigma(A)$ und w ein Eigenvektor zu λ mit $\|w\| = 1$.
Dann $|\lambda| = |\lambda| \cdot \|w\| = \|\lambda w\| = \|Aw\| \underset{\text{Verträglichkeit}}{\leq} \|A\| \cdot \|w\| = \|A\| \implies |\lambda| \leq \|A\|$

5. A heißt **hermitesch**, falls gilt

$$A = \bar{A}^T \quad (a_{ij} = \overline{a_{ji}})$$

Reelle hermitesche Matrizen heißen **symmetrisch**. Für das Skalarprodukt gilt

$$A = \bar{A}^T \Leftrightarrow (Ax, y)_2 = (x, Ay)_2 \quad \forall x, y \in \mathbb{K}^n$$

Hermitesche Matrizen sind diagonalisierbar = ähnlich zu einer Diagonalmatrix, alle Eigenwerte einer hermiteschen Matrix sind reell. $\exists$ eine orthonormale Basis aus Eigenvektoren.

6. $A \in \mathbb{K}^{n \times n}$ heißt **positiv definit**, wenn gilt $(Ax, x)_2 \in \mathbb{R}$, $(Ax, x)_2 > 0 \quad \forall x \in \mathbb{K}^n \setminus \{0\}$.
Eine hermitesche Matrix ist positiv definit $\Leftrightarrow$ alle Eigenwerte sind positiv.

7. $\|\cdot\|_2$ (ℓ_2 -Norm) im $\mathbb{K}^n$ erzeugt eine natürliche **Matrixnorm (Spektralnorm)** $\|\cdot\|_2$

Lemma 2.53 (Spektralnorm). Sei $A \in \mathbb{K}^{n \times n}$. Dann ist $\bar{A}^T A \in \mathbb{K}^{n \times n}$ hermitesch und positiv semidefinit. Für die Spektralnorm gilt

$$\|A\|_2 = \max \left\{ \sqrt{|\lambda|}, \lambda \in \sigma(\bar{A}^T A) \right\}$$

Sei A hermitesch, bzw. symmetrisch, dann gilt $\|A\|_2 = \max\{\sqrt{|\lambda|}, \lambda \in \sigma(A)\}$

Beweis. 1) $\bar{A}^T A$ hermitesch, denn

$$\overline{(\bar{A}^T A)^T} = (A^T \bar{A})^T = \bar{A}^T A.$$

$\bar{A}^T A$ positiv semidefinit, denn

$$(\bar{A}^T A x, x)_2 = (A x, A x)_2 = \|A x\|_2^2 \geq 0 \quad \forall x \in \mathbb{K}^n.$$

2) Es ist nach Definition

$$\|A\|_2^2 = \sup_{\|x\|_2=1} \|A x\|_2^2 = \sup_{\|x\|_2=1} (A x, A x)_2 = \sup_{\|x\|_2=1} (x, \bar{A}^T A x)_2.$$

Wegen (1) ist $\bar{A}^T A$ hermitesch und positiv semidefinit, d.h. es ex. $U \in \mathbb{K}^{n \times n}$ mit U unitär und $U^T \bar{A}^T A U = D$, wobei $D = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$, $\lambda \in \sigma(\bar{A}^T A)$ und $\lambda_i \geq 0$ reell.

Sei $y = \bar{U}^T x = U^{-1} x \implies x = Uy$. Damit folgt mit $|\lambda_{\max}| := \max\{|\lambda_i| \mid \lambda_i \in \sigma(\bar{A}^T A)\}$

$$\begin{aligned}
 \|A\|_2^2 &= \sup_{\|x\|_2=1} (x, \bar{A}^T A x)_2 \\
 &= \sup_{\|Uy\|_2=1} \underbrace{(Uy, \bar{A}^T A Uy)}_{=x} \underbrace{\phantom{(Uy, \bar{A}^T A Uy)}}_{=x} \\
 &= \sup_{\|y\|_2=1} (y, \underbrace{\bar{U}^T \bar{A}^T A U}_{=D} y)_2 \\
 &= \sup_{\|y\|_2=1} (y, Dy)_2 \\
 &= \sup_{\|y\|_2=1} \underbrace{(\lambda_1 |y_1|^2 + \dots + \lambda_n |y_n|^2)}_{=\sum_{i=1}^n \lambda_i |y_i|^2} \\
 &\leq \sup_{\|y\|_2=1} \sum_{i=1}^n |\lambda_{\max}| |y_i|^2 \\
 &= |\lambda_{\max}| \sup_{\|y\|_2=1} \|y\|_2^2 \\
 &= |\lambda_{\max}|.
 \end{aligned}$$

Sei y Eigenvektor zu $\lambda_{\max}$ und $\|y\|_2 = 1$. Dann gilt $Dy = \lambda_{\max} y$, also $(y, Dy)_2 = \lambda_{\max} \underbrace{(y, y)_2}_{=1}$. Damit existiert ein y , s.d. $(y, Dy)_2 = \lambda_{\max}$. Also folgt $\sup_{\|y\|_2=1} (y, Dy)_2 = \lambda_{\max}$.

Damit folgt die Behauptung für $A \in \mathbb{K}^{n \times n}$. Behauptung für A hermitesch analog.

□

Definition 2.54 (orthonormale/unitäre Matrizen). Eine Matrix $Q \in \mathbb{K}^{m \times n}$ heißt **orthonormal**, wenn ihre Spaltenvektoren ein Orthonormalsystem im $\mathbb{K}^m$ bilden, d.h.

$$\begin{aligned}
 Q &= (q_1, \dots, q_n) \quad q_j \in \mathbb{K}^m \\
 (q_i, q_j)_2 &= \sum_{k=1}^m q_{ik} \cdot \overline{q_{kj}} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}
 \end{aligned}$$

Falls $m = n$ heißt Q unitär.

Lemma 2.55. Sei $Q \in \mathbb{K}^{n \times n}$ unitär. Dann ist Q regulär, $Q^{-1} = \bar{Q}^T$ und $(Qx, Qy)_2 = (x, y)_2$, $x, y \in \mathbb{K}^n$

$$\|Qx\|_2 = \|x\|_2, \quad x \in \mathbb{K}^n$$

d.h. euklidisches Skalarprodukt und euklidische Norm sind invariant unter unitären Transformationen und folglich $\|Q\|_2 = \|Q^{-1}\|_2 = 1$

Beweis. 1. Z.Z. $Q^{-1} = \bar{Q}^T$

Sei $Q = (q_1, \dots, q_n)$, $\bar{Q}^T = \begin{pmatrix} \bar{q}_1^T \\ \vdots \\ \bar{q}_n^T \end{pmatrix}$. Dann gilt

$$\bar{Q}^T \cdot Q = \begin{pmatrix} \bar{q}_1^T \cdot q_1 & \dots & \bar{q}_1^T \cdot q_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{q}_n^T \cdot q_1 & \dots & \bar{q}_n^T \cdot q_n \end{pmatrix} \stackrel{Q \text{ unitär}}{=} \begin{pmatrix} 1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & 1 \end{pmatrix}$$

2.

$$\begin{aligned}
(Qx, Qy)_2 &= (x, \overline{Q}^T Qy)_2 = (x, y)_2 \\
\|Qx\|_2^2 &= (Qx, Qx)_2 = (x, x)_2 = \|x\|_2^2 \\
\|Q\|_2 &= \sup_{\|x\|_2=1} \|Qx\|_2 = \sup_{\|x\|_2=1} \|x\|_2 = 1 \\
\|Q^{-1}\|_2 &= \sup_{\|x\|_2=1} \|Q^{-1}x\|_2 = \sup_{\|x\|_2=1} \|QQ^{-1}x\|_2 = \sup_{\|x\|_2=1} \|x\|_2 = 1
\end{aligned}$$

□

Lemma 2.56 (Störungssatz). Sei $\|\cdot\|$ beliebige natürliche Matrixnorm auf $\mathbb{K}^{n \times n}$. Die Störungsmatrix $B \in \mathbb{K}^{n \times n}$ hat $\|B\| < 1$. Dann ist die Matrix $\mathbb{I} + B$ regulär und es gilt

$$\|(\mathbb{I} + B)^{-1}\| \leq \frac{1}{1 - \|B\|}.$$

Beweis. Sei $x \in \mathbb{K}^n$. Dann ist

$$\begin{aligned}
\|(\mathbb{I} + B)x\| &= \|x + Bx\| \\
&\stackrel{\text{Dreiecksungl.}}{\geq} \|x\| - \|Bx\| \\
&\stackrel{\|Bx\| \leq \|B\|\|x\|}{\geq} \|x\| - \|B\| \cdot \|x\| \\
&= \underbrace{(1 - \|B\|)}_{>0} \|x\|
\end{aligned}$$

Also hat die Gleichung $(\mathbb{I} + B)x = 0$ nur die Lösung $x = 0$, also ist $(\mathbb{I} + B)$ injektiv und mit 2.49 regulär. Bleibt zu zeigen: $\|(\mathbb{I} + B)^{-1}\| \leq \frac{1}{1 - \|B\|}$. Es gilt

$$\begin{aligned}
1 &= \|\mathbb{I}\| \\
&= \|(\mathbb{I} + B)(\mathbb{I} + B)^{-1}\| \\
&= \|(\mathbb{I} + B)^{-1} + B(\mathbb{I} + B)^{-1}\| \\
&\stackrel{\text{Dreiecksungl.}}{\geq} \|(\mathbb{I} + B)^{-1}\| - \|B(\mathbb{I} + B)^{-1}\| \\
&\geq \|(\mathbb{I} + B)^{-1}\| - \|B\| \cdot \|(\mathbb{I} + B)^{-1}\| \\
&= (1 - \|B\|) \|(\mathbb{I} + B)^{-1}\|.
\end{aligned}$$

Damit folgt die Behauptung. □

Korollar 2.57. Sei $A \in \mathbb{K}^{n \times n}$ regulär und $\tilde{A} \in \mathbb{K}^{n \times n}$ s.d. $\|A - \tilde{A}\| < \frac{1}{\|A^{-1}\|}$. Dann ist $\tilde{A}$ regulär.

Beweis. Es ist $\tilde{A} = \tilde{A} + A - A = (\tilde{A} - A) + A = A(\underbrace{A^{-1}(\tilde{A} - A)}_{=:B} + \mathbb{I})$. Damit folgt $\|B\| = \|A^{-1}(\tilde{A} - A)\| \leq \|A^{-1}\| \cdot \|\tilde{A} - A\| < 1$. Mit 2.56 folgt $\mathbb{I} + A^{-1}(\tilde{A} - A)$ regulär. Da A regulär nach Voraussetzung, folgt $\tilde{A} = A(\mathbb{I} + A^{-1}(\tilde{A} - A))$ regulär. □

Kapitel 3

Funktionen mehrerer Variablen

Wir betrachten im Folgenden Funktionen $f: D \rightarrow \mathbb{K}$, mit $D \subseteq \mathbb{K}^n$, $D \neq \emptyset$ und Bildbereich $B_f \subseteq \mathbb{K}$.

Zur Erinnerung:

- Bild und Urbild. Seien $M \subseteq D$, $N \subseteq f(D)$ Teilmengen. Dann heißt

$$f(M) := \{y \in \mathbb{K} \mid \exists x \in M: y = f(x)\}$$

das Bild. Weiter heißt

$$f^{-1}(N) := \{x \in D \mid \exists y \in N: f(x) = y\}.$$

das Urbild. Dann ist $B_f = f(D)$ und $D = f^{-1}(B_f)$

- Notation. $f^{-1}(\cdot)$ meint das Mengen-Urbild, nicht eine Umkehrfunktion.

Da alle Normen auf $\mathbb{K}^n$ äquivalent sind, sind alle Aussagen unabhängig von der gewählten Norm. Standard ist die euklid. Norm.

3.1 Stetigkeit

Definition 3.1 (Stetigkeit). Eine Funktion $f: D \rightarrow \mathbb{K}$, $D \subseteq \mathbb{K}^n$ heißt stetig in einem Punkt $a \in D$, wenn für alle Folgen $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}} \subseteq D$ mit $x^{(k)} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} a$ gilt

$$f(x^{(k)}) \xrightarrow{k \rightarrow \infty} f(a).$$

Die Funktion f heißt stetig in D , wenn sie für alle $x \in D$ stetig ist.

Bemerkung 3.2. • Falls $f: D \rightarrow \mathbb{K}$ stetig, dann ist auch $f: M \rightarrow \mathbb{K}$, $M \subseteq D$ stetig.

- f stetig $\implies \operatorname{Re} f$, $\operatorname{Im} f$, $|f|$ sind stetig.

Lemma 3.3 (ε - δ -Kriterium der Stetigkeit). $f: D \rightarrow \mathbb{K}$, $D \subseteq \mathbb{K}^n$ ist stetig in $a \in D$, genau dann wenn $\forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0$, s.d. $\forall x \in D$ gilt

$$\|x - a\| < \delta \implies |f(x) - f(a)| < \varepsilon.$$

Beweis. wie für $n = 1$. □

Lemma 3.4. Seien $f, g: D \rightarrow \mathbb{K}$ stetig, dann sind $f + g$, $f \cdot g$ und $\frac{f}{g}$ (falls $g(x) \neq 0 \forall x \in D$) stetig.

Beweis. wie für $n = 1$. □

Satz 3.5. Eine stetige Funktion $f: D \rightarrow \mathbb{K}$, $D \subseteq \mathbb{K}^n$ ist auf jeder kompakten Menge $K \subseteq D$ beschränkt, d.h.

$$\exists M_K \text{ s.d. } |f(x)| \leq M_K \quad \forall x \in K.$$

Beweis. Ang.: $f(x)$ nicht beschränkt auf K . Dann gilt: $\forall k \in \mathbb{N}, \exists x^{(k)} \in K$ mit $|f(x^{(k)})| > k$, d.h. $|f(x^{(k)})| \xrightarrow{k \rightarrow \infty} \infty$.

Die Folge $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}}$ besitzt auf der kompakten Menge K eine konvergente Teilfolge $(x^{(k_j)})_{j \in \mathbb{N}}$ mit $\lim_{j \rightarrow \infty} x^{(k_j)} = x \in K$.

Da f stetig, folgt $|f(x^{(k_j)})| \xrightarrow{j \rightarrow \infty} |f(x)|$. Widerspruch zu $|f(x^{(k)})| \xrightarrow{k \rightarrow \infty} \infty$. □

Satz 3.6 (Extremum). Eine stetige Funktion $f: D \subseteq \mathbb{K}^n \rightarrow \mathbb{K}$ nimmt auf jeder nichtleeren kompakten Menge $K \subseteq D$ ihr Maximum und Minimum an, d.h. es ex. x^{max} und $x^{min} \in K$, s.d.

$$\begin{aligned} f(x^{max}) &= \sup_{x \in K} f(x) =: \max_{x \in K} f(x) \\ f(x^{min}) &= \inf_{x \in K} f(x) =: \min_{x \in K} f(x). \end{aligned}$$

Beweis. f stetig und deshalb beschränkt auf K , d.h. es ex. obere Schranke $M := \sup_{x \in K} f(x)$.

Außerdem existiert eine Folge $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}} \subseteq K$, s.d. $f(x^{(k)}) \xrightarrow{k \rightarrow \infty} M$. Da K kompakt, existiert eine konvergente Teilfolge $(x^{(k_j)})_{j \in \mathbb{N}}$ mit $x^{(k_j)} \xrightarrow{j \rightarrow \infty} a =: x^{max} \in K$. Wegen der Stetigkeit von f , folgt aus $f(x^{(k_j)}) \xrightarrow{j \rightarrow \infty} f(x^{max})$: $f(x^{max}) = M$. □

Bemerkung 3.7 (Anwendung von Satz 3.6). Seien $K_1, K_2 \subseteq \mathbb{K}^n$, $K_1 \neq \emptyset$, $K_2 \neq \emptyset$ kompakt. Dann ist die Menge $K_1 \times K_2$ auch kompakt. Definiere $f(x, y) := \|x - y\|$, $x \in K_1$, $y \in K_2$.

$f(x, y)$ ist stetig, denn

$$|f(x, y) - f(x', y')| = ||\|x - y\| - \|x' - y'\|| \stackrel{\Delta\text{-ungl.}}{\leq} \|x - y - x' + y'\| \leq \|x - x'\| + \|y - y'\|.$$

$\forall x, x' \in K_1$ und $\forall y, y' \in K_2$ mit $\|x - x'\| < \delta = \frac{\varepsilon}{2}$ und $\|y - y'\| < \delta = \frac{\varepsilon}{2}$ gilt

$$|f(x, y) - f(x', y')| < \varepsilon.$$

Also ist $f(x, y)$ stetig auf $K_1 \times K_2$. Mit 3.6 folgt damit: $\exists a \in K_1, b \in K_2$, s.d.

$$\|a - b\| = \inf_{x \in K_1, y \in K_2} \|x - y\| =: d(K_1, K_2) \quad \text{Abstand zwischen Mengen } K_1 \text{ und } K_2.$$

Im Fall $K_1 \cap K_2 = \emptyset$, gilt $d(K_1, K_2) > 0$. Falls $K_1 = \{a\}$, dann heißt $b \in K_2$ die Projektion des Punktes a auf K_2 (diese ist im Allg. nicht eindeutig bestimmt).

Definition 3.8 (Gleichmäßige Stetigkeit). Eine Funktion $f: D \rightarrow \mathbb{K}$, $D \subseteq \mathbb{K}^n$ ist gleichmäßig stetig, wenn $\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0$, s.d.

$$\forall x, y \in D: \|x - y\| < \delta \implies |f(x) - f(y)| < \varepsilon.$$

Satz 3.9. Eine stetige Funktion $f: D \rightarrow \mathbb{K}$, $D \subseteq \mathbb{K}^n$ ist auf einer kompakten Menge $K \subseteq D$ gleichmäßig stetig.

Beweis. Ang. f nicht gleichmäßig stetig. Dann $\exists \varepsilon > 0$, s.d. $\forall k \in \mathbb{N}$, ex. Punkte $x^{(k)}$ und $y^{(k)} \in K$, s.d.

$$\|x^{(k)} - y^{(k)}\| < \frac{1}{k} \quad \text{und} \quad \left| f(x^{(k)}) - f(y^{(k)}) \right| > \varepsilon.$$

Da K kompakt, ex. eine konvergente Teilfolge $(x^{(k_j)})_{j \in \mathbb{N}}$ von $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}}$ mit $\lim_{j \rightarrow \infty} x^{(k_j)} = x \in K$.

Wir haben $\|x^{(k)} - y^{(k)}\| < \frac{1}{k}$, also

$$\|x^{(k_j)} - y^{(k_j)}\| < \frac{1}{k_j} \implies \lim_{j \rightarrow \infty} y^{(k_j)} = x = \lim_{j \rightarrow \infty} x^{(k_j)}.$$

Da f stetig, folgt

$$\left| f(x^{(k_j)}) - f(y^{(k_j)}) \right| \xrightarrow{j \rightarrow \infty} |f(x) - f(x)| = 0.$$

Widerspruch zu $|f(x^{(k)}) - f(y^{(k)})| > \varepsilon$. □

Definition 3.10 (Konvergenz von Funktionenfolgen). Sei $f_k: D \subseteq \mathbb{K}^n \rightarrow \mathbb{K}$, $k \in \mathbb{N}$. $(f_k)_{k \in \mathbb{N}}$ konvergiert

- punktweise gegen eine Funktion $f: D \rightarrow \mathbb{K}$, falls $\forall x \in D$ gilt $f_k(x) \xrightarrow{k \rightarrow \infty} f(x)$.
- gleichmäßig, falls $\sup_{x \in D} |f_k(x) - f(x)| \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$.

Satz 3.11 (Gleichmäßige Konvergenz). Sei $f_k: D \subseteq \mathbb{K}^n \rightarrow \mathbb{K}$ stetig, $f_k \xrightarrow{k \rightarrow \infty} f$ gleichmäßig mit $f: D \rightarrow \mathbb{K}$. Dann ist f stetig.

Beweis. Sei $x \in D$ und $\varepsilon > 0$ beliebig. Da $(f_k)_{k \in \mathbb{N}}$ gleichmäßig gegen f konvergiert, existiert ein $n = n(\varepsilon) \in \mathbb{N}$ s.d. $\sup_{y \in D} |f_n(y) - f(y)| < \frac{\varepsilon}{3}$.

Da f_n stetig, ex. $\delta > 0$, s.d. $\forall y \in D$ gilt: $\|x - y\| < \delta \implies |f_n(x) - f_n(y)| < \frac{\varepsilon}{3}$.

Dann gilt $\forall x, y \in D$ mit $\|x - y\| < \delta$:

$$|f(x) - f(y)| \leq |f(x) - f_n(x)| + |f_n(x) - f_n(y)| + |f_n(y) - f(y)| < \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} = \varepsilon.$$

Also ist f stetig in x . □

Bemerkung 3.12. Analoge Sätze gelten allgemein für Funktionen auf kompakten Mengen in normierten $(V, \|\cdot\|)$ oder metrischen $(X, d(\cdot, \cdot))$ Räumen.

Definition 3.13 (Offene, abgeschlossene Menge bzgl. einer Obermenge aus $\mathbb{K}^n$).

- 1) Eine Teilmenge $M \subset G \subset \mathbb{K}^n$ heißt relativ - offen bzgl. G , falls $\forall a \in M$:

$$\exists \text{ Kugelumgebung } K_r(a) \text{ s.d. } (K_r(a) \cap G) \subset M$$

- 2) $M \subset G \subset \mathbb{K}^n$ heißt relativ-abgeschlossen (bzgl. G), falls $(M^C \cap G) \subset G$ relativ-offen bzgl. G ist.

- 3) Eine Menge $G \subset \mathbb{K}^n$ heißt zusammenhängend, falls *keine* relativ-offene Zerlegung $G = U \cup V$ mit $U, V \neq \emptyset$ und $\overline{U} \cap V = \emptyset$ existiert.

- 4) Eine offene und zusammenhängende Menge $G \subset \mathbb{K}^n$ heißt Gebiet.

Beispiel 3.14. Einheitssphäre $S_1(0) := \{x \in \mathbb{K}^n \mid \|x\|_2 = 1\}$. Als Teilmenge in $\mathbb{K}^n$ ist $S_1(0)$ abgeschlossen.

Sei $M \subset \mathbb{K}^n$ und offen: Dann ist $M \cap S_1(0)$ als Teilmenge von $\mathbb{K}^n$ weder offen noch abgeschlossen; als Teilmenge in $S_1(0)$ ist $M \cap S_1(0)$ relativ-offen bzgl. $S_1(0)$.

Extrembeispiel: $M = S_1(0)$ ist als Teilmenge von $\mathbb{K}^n$ abgeschlossen, aber bzgl. $S_1(0)$ relativ-offen und relativ-abgeschlossen.

- $M \cap G$ ($M \subset \mathbb{K}^n$, offen), $G \subset \mathbb{K}^n$, ist immer relativ-offen bzgl. G .
- $M \cap G$ ($M \subset \mathbb{K}^n$, abgeschlossen), $G \subset \mathbb{K}^n$, ist immer relativ-abgeschlossen bzgl. G .

Lemma 3.15. Sei $f: \overline{D} \subset \mathbb{K}^n \rightarrow \mathbb{K}$ stetig. Dann gilt:

- 1) Das Urbild $f^{-1}(O)$, wobei $O \subset f(D)$ relativ-offen, ist relativ-offen in D .
- 2) Das Urbild $f^{-1}(A)$, wobei $A \subset f(\overline{D})$ abgeschlossen, ist abgeschlossen.
- 3) Das Bild $f(K)$, wobei $K \subset D$ kompakt, ist kompakt.
- 4) Das Bild $f(G)$, wobei $G \subset D$ zusammenhängend, ist zusammenhängend.

Beweis.

- 1) Sei $O \subset f(D)$ eine relativ-offene Menge. Für O gilt: $\forall f(a) \in O \exists$ relative Kugelumgebung in O :

$$(K_\varepsilon(f(a)) \cap f(D)) \subset O \text{ für ein } \varepsilon > 0.$$

f stetig in $a \implies$ für dieses $\varepsilon \exists \delta > 0$ s.d. für $K_\delta(a) \cap D$ gilt $f(K_\delta(a) \cap D) \subset (K_\varepsilon(f(a)) \cap f(D)) \subset O \implies \forall a \in D$ (mit $f(a) \in O$) gilt

$$(K_\delta(a) \cap D) \subset f^{-1}(O) \implies f^{-1}(O)$$

relativ-offen.

- 2) Sei $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}}$ eine konvergente Folge in $f^{-1}(A)$ und $\lim_{k \rightarrow \infty} x^{(k)} = x \in \overline{D}$. Aufgrund der Stetigkeit von f konvergiert die Bildfolge $(f(x^{(k)}))_{k \in \mathbb{N}}$ und $\lim_{k \rightarrow \infty} \underbrace{f(x^{(k)})}_{\in A} = f(x)$. Da A abgeschlossen ist, gilt wegen der Charakterisierung über Folgenkonvergenz auch $f(x) \in A \implies x \in f^{-1}(A) \implies f^{-1}(A)$ abgeschlossen.
- 3) **Z.Z** $f(K) \subset \mathbb{K}$ beschränkt und abgeschlossen ($\implies$ kompakt).

- Die Beschränktheit folgt aus der Beschränktheit von stetigen Funktionen auf kompakten Mengen.
- Abgeschlossenheit: Sei $(y^{(k)})_{k \in \mathbb{N}} \subset f(K)$ eine beliebige Folge mit $\lim_{k \rightarrow \infty} y^{(k)} = y \in \mathbb{K}$.

Die Urbildfolge $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}} \left(= \underbrace{f^{-1}(y^{(k)})}_{\text{Urbild von } y^{(k)}} \right)$ in K hat aufgrund der Kompaktheit von K eine konvergente Teilfolge $(x^{(k_j)})_{j \in \mathbb{N}}$ mit $\lim_{j \rightarrow \infty} x^{(k_j)} = x \in K$. Wegen der Stetigkeit von f ist $f(x) = \lim_{j \rightarrow \infty} \underbrace{f(x^{(k_j)})}_{=y^{k_j}} = y \implies y \in f(K) \implies f(K)$ abgeschlossen.

- 4) Ann: $f(G)$ nicht zusammenhängend. Nach Definition existieren dann $U, V \in \mathbb{K}^n$, $U \neq \emptyset, V \neq \emptyset$, $U \cap V = \emptyset$, relativ offen, s.d. $f(G) = U \cup V$. Für die Urbildmengen gilt also

$$U' = \{x \in G \mid f(x) \in U\}, \quad V' = \{x \in G \mid f(x) \in V\}, \quad U' \cap V' = \emptyset, U' \neq \emptyset, V' \neq \emptyset,$$

nach 1) sind U' und V' relativ offen und $G = U' \cup V'$

$$\begin{aligned} &\implies G \text{ nicht zusammenhängend } \nlessdot \\ &\implies f(G) \text{ zusammenhängend.} \end{aligned}$$

□

Satz 3.16 (Zwischenwertsatz). Sei $f : D \subset \mathbb{K}^n \rightarrow \mathbb{R}$ stetig und D zusammenhängend. Dann nimmt f für alle $a, b \in D$ jeden Wert zwischen $f(a)$ und $f(b)$ an. Insbesondere hat f eine Nullstelle in D , falls $f(a) \cdot f(b) < 0$.

Beweis. Wegen Lemma 3.15 ist der Bildbereich $f(D) \subset \mathbb{R}$ zusammenhängend.

Z.Z. $f(D)$ ist ein (zusammenhängendes) Intervall.

Annahme: $f(D)$ ist kein Intervall $\implies \exists f(x), f(y) \in f(D)$ und $z \notin f(D)$ zwischen $f(x)$ und $f(y)$. Dann sind die Mengen

$$U := f(D) \cap (-\infty, z), \quad V := f(D) \cap (z, \infty)$$

disjunkt, $U \cap V = \emptyset$, $U \neq \emptyset$, $V \neq \emptyset$, U, V sind relativ-offen bzgl. $f(D)$ und $U \cup V = f(D)$

$$\implies f(D) \text{ nicht zusammenhängend } \nlessdot$$

□

3.2 Vektor- und Matrixwertige Funktionen

$$\begin{aligned} f : D \subset \mathbb{K}^n &\rightarrow \mathbb{K}^m \\ f : D \subset \mathbb{K}^n &\rightarrow \mathbb{K}^{r \times s} \\ f : D \subset \mathbb{K}^{m \times n} &\rightarrow \mathbb{K}^{r \times s} \end{aligned}$$

- Mit Hilfe von Normen in $\mathbb{K}^n$ und $\mathbb{K}^{m \times n}$ sind die Definitionen von Stetigkeit etc. übertragbar auf Vektor- und Matrixwertige Funktionen. $\implies$ solche stetigen Abbildungen auf kompakten Mengen sind gleichmäßig stetig und beschränkt.
- $f : D \subset \mathbb{K}^n \rightarrow \mathbb{K}^m$ stetig $\Leftrightarrow$ alle Komponenten $f_i : D \subset \mathbb{K}^n \rightarrow \mathbb{K}$, $i = 1, \dots, m$ sind stetig (genauso für $f : D \subset \mathbb{K}^{n \times m} \rightarrow \mathbb{K}^{r \times s}$ etc.)

Lemma 3.17. Seien $g : D \subset \mathbb{K}^n \rightarrow B \subset \mathbb{K}^m$ und $f : B \rightarrow \mathbb{K}^r$ stetig. Dann ist die Komposition $f \circ g : D \subset \mathbb{K}^n \rightarrow \mathbb{K}^r$ stetig.

Beweis. Sei $x \in D$, $x^{(k)} \in D$ s.d. $\lim_{k \rightarrow \infty} x^{(k)} = x$. Es gilt

$$\begin{aligned} g \text{ stetig} &\implies y^{(k)} = g(x^{(k)}) \xrightarrow[k \rightarrow \infty]{} g(x) =: y \\ f \text{ stetig} &\implies (f \circ g)(x^{(k)}) = f(g(x^{(k)})) = f(y^{(k)}) \xrightarrow[k \rightarrow \infty]{} f(y) \end{aligned}$$

Also ist $(f \circ g)$ stetig. □

Lemma 3.18. Sei $D \subset \mathbb{K}^n$ kompakt und $f : D \rightarrow B \subset \mathbb{K}^m$ injektiv und stetig. Dann ist die Umkehrfunktion $f^{-1} : B \rightarrow D$ stetig.

Beweis. Sei $(y^{(k)})_{k \in \mathbb{N}}$ eine Folge in B mit $\lim_{k \rightarrow \infty} y^{(k)} = y \in B$.

$$\textbf{Z.Z.} \quad \underbrace{f^{-1}(y^{(k)})}_{=: x^{(k)}} \xrightarrow[k \rightarrow \infty]{} \underbrace{f^{-1}(y)}_{=: x} (\implies f^{-1} \text{ stetig}), \text{ d.h. } x^{(k)} \xrightarrow[k \rightarrow \infty]{} x.$$

Die Folge $(x^{(k)}) \subset D$ ist aufgrund der Beschränktheit von D auch beschränkt, also existiert eine konvergente Teilfolge $(x^{(k_j)})_{j \in \mathbb{N}}$ mit $\lim_{j \rightarrow \infty} x^{(k_j)} = \xi \in D$. Wegen der Stetigkeit von f ist $f(x^{(k_j)}) \xrightarrow[j \rightarrow \infty]{} f(\xi)$. Außerdem gilt

$$f(x^{(k_j)}) = y^{(k_j)} \xrightarrow[j \rightarrow \infty]{} y \implies y = f(\xi) \xrightarrow[f \text{ injektiv}]{y=f(x)} x = \xi.$$

Also konvergieren alle konvergenten Teilfolgen von $(x^{(k)})$ gegen $x \implies x^{(k)} \xrightarrow[k \rightarrow \infty]{} x$. □

3.2.1 Lineare und nichtlineare Gleichungssysteme

Motivation: Es sei ein quadratisches Gleichungssystem der Form

$$\begin{aligned} f_1(x_1, \dots, x_n) &= b_1 \\ &\vdots \\ f_n(x_1, \dots, x_n) &= b_n, \end{aligned}$$

eine Vektorform $f(x) = b$ und ein $b \in \mathbb{K}^n$ gegeben, s.d.

$$f = \begin{pmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_n \end{pmatrix} : D \subseteq \mathbb{K}^n \rightarrow \mathbb{K}^n.$$

Ziel: $x = f^{-1}(b)$ finden als Grenzwert einer Folge $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}}$.

Ansatz: Definiere $g(x) := x - \sigma(f(x) - b)$ für ein $\sigma \in \mathbb{K} \setminus \{0\}$ und suche Fixpunkt von $g: D \rightarrow \mathbb{K}^n$ ($x = g(x)$).

Fixpunktiteration: Startwert $x^{(0)}$. Iterationsschritt

$$x^{(k)} = g(x^{(k-1)}), \quad k \in \mathbb{N}.$$

Falls f stetig, dann ist auch g stetig. Damit folgt, falls $x^{(k)} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} x$, dann $g(x^{(k-1)}) \xrightarrow{k \rightarrow \infty} g(x)$.
Damit folgt

$$\underbrace{x^{(k)}}_{\xrightarrow{k \rightarrow \infty} x} = \underbrace{g(x^{(k-1)})}_{\xrightarrow{k \rightarrow \infty} g(x)}.$$

Für $k \rightarrow \infty$, folgt also $x = g(x)$, also ist x Fixpunkt. Damit folgt $x = g(x) = x - \sigma(f(x) - b) \implies f(x) = b$.

Frage: Unter welchen Bedingungen konvergiert die Fixpunktiteration?

Definition 3.19 (Lipschitz-Stetigkeit). Eine Funktion $g: D \subseteq \mathbb{K}^n \rightarrow \mathbb{K}^n$ heißt Lipschitz-stetig, wenn eine Konstante $L < \infty$ existiert, s.d.

$$\|g(x) - g(y)\| \leq L\|x - y\|, \quad \forall x, y \in D.$$

Falls $L < 1$ heißt g Kontraktion (bezügl. Norm $\|\cdot\|$).

Satz 3.20 (Banachscher Fixpunktsatz). Sei $g: D \subseteq \mathbb{K}^n \rightarrow \mathbb{K}^n$ eine Funktion mit den Eigenschaften

- 1) $g(M) = M$ für ein $M \subseteq D$, M abgeschlossen
- 2) g ist Kontraktion auf M , d.h. $\exists L < 1$, s.d. $\|g(x) - g(y)\| \leq L\|x - y\|$, $\forall x, y \in M$.

Dann gilt

- (i) Es existiert genau ein Fixpunkt $x^* \in M$ von g .
- (ii) $\forall x^{(0)} \in M$ ist die Iterationsfolge $x^{(k)} = g(x^{(k-1)})$ wohldefiniert ($x^{(k)} \in M$) und $x^{(k)} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} x^*$.

(iii) Es gilt die Abschätzung:

$$\|x^{(k)} - x^*\| \leq \frac{L^k}{1-L} \|x^{(1)} - x^{(0)}\|.$$

Beweis. (i) Seien $x, x' \in M$ zwei Fixpunkte. Dann

$$\|x - x'\| = \|g(x) - g(x')\| \leq L\|x - x'\|.$$

Damit folgt

$$\underbrace{(1-L)}_{>0} \underbrace{\|x - x'\|}_{\geq 0} \leq 0 \implies \|x - x'\| = 0 \implies x = x'.$$

(ii) $g(M) = M \implies x^{(k)} = g(x^{(k-1)})$, $k \in \mathbb{N}$ ist wohldefiniert, d.h. $x^{(k)} \in M$, $\forall k \in \mathbb{N}$, falls $x^{(0)} \in M$.

Z.z.: $x^{(k)}$ konvergiert mit $\lim_{k \rightarrow \infty} x^{(k)} \in M$, also g.z.z.: $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}}$ ist Cauchy-Folge.

$$\begin{aligned} \|x^{(k+1)} - x^{(k)}\| &= \|g(x^{(k)}) - g(x^{(k-1)})\| \\ &\leq L\|x^{(k)} - x^{(k-1)}\| \\ &= L\|g(x^{(k-1)}) - g(x^{(k-2)})\| \\ &\leq L \cdot L \cdot \|x^{(k-1)} - x^{(k-2)}\| \\ &\leq \underbrace{L \cdot \dots \cdot L}_k \|x^{(1)} - x^{(0)}\| \\ &= L^k \|x^{(1)} - x^{(0)}\| \end{aligned}$$

Seien k, m beliebig. Dann gilt $\forall \varepsilon > 0$

$$\begin{aligned} \|x^{(k+m)} - x^{(k)}\| &= \|x^{(k+m)} - x^{(k+m-1)} + x^{(k+m-1)} - \dots - x^{(k+1)} + x^{(k+1)} - x^{(k)}\| \\ &\leq \|x^{(k+m)} - x^{(k+m-1)}\| + \dots + \|x^{(k+1)} - x^{(k)}\| \\ &= L^{m-1}\|x^{(k+1)} - x^{(k)}\| + L^{m-2}\|x^{(k+1)} - x^{(k)}\| + \dots + \|x^{(k+1)} - x^{(k)}\| \\ &= (L^{m-1} + L^{m-2} + \dots + 1) \|x^{(k+1)} - x^{(k)}\| \\ &= \frac{1-L^m}{1-L} \|x^{(k+1)} - x^{(k)}\| \\ &\leq \frac{1-L^m}{1-L} L^k \|x^{(1)} - x^{(0)}\| \\ &\leq \frac{L^k}{1-L} \|x^{(1)} - x^{(0)}\| \\ &\stackrel{L < 1}{<} \varepsilon \quad \text{für } k \text{ groß genug.} \end{aligned}$$

Also ist $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}}$ eine Cauchy-Folge in M und es existiert ein $x^* \in M$, s.d. $(x^{(k)})_{k \in \mathbb{N}}$ gegen x^* konvergiert. x^* ist ein Fixpunkt von g , weil

$$x^* = \lim_{k \rightarrow \infty} x^{(k)} = \lim_{k \rightarrow \infty} g(x^{(k-1)}) \stackrel{g \text{ stetig}}{=} g\left(\lim_{k \rightarrow \infty} x^{(k-1)}\right) = g(x^*).$$

(iii) Für festes $k \in \mathbb{N}$ gilt

$$\| \underbrace{x^{(k+m)}}_{\xrightarrow{m \rightarrow \infty} x^*} - x^{(k)} \| \leq \frac{L^k}{1-L} \|x^{(1)} - x^{(0)}\| \implies \|x^* - x^{(k)}\| \leq \frac{L^k}{1-L} \|x^{(1)} - x^{(0)}\|.$$

□

Bemerkung 3.21. Für den Beweis ist wichtig, dass der grundlegende Raum vollständig ist, d.h. dass alle Cauchy-Folgen in diesem Raum konvergieren.

Bemerkung 3.22 (Anwendung: Lineare Gleichungssysteme). $A = (a_{ij})_{i,j=1}^n \in \mathbb{K}^{n \times n}$ regulär und $b = (b_i)_{i=1}^n \in \mathbb{K}^n$. Da A regulär, hat das LGS $Ax = b$ genau eine Lösung $x^* = A^{-1}b$. Sei $g(x) := x - \sigma(Ax - b)$ mit $\sigma \in \mathbb{K} \setminus \{0\}$.

Fixpunktiteration $x^{(k)} = x^{(k-1)} - \sigma(Ax^{(k-1)} - b)$, $k \in \mathbb{N}$ konvergiert, wenn g kontraktiv ist. Zum Beispiel in ℓ_2 :

$$\begin{aligned} \|g(x) - g(y)\|_2 &= \|x - \sigma(Ax - b) - y + \sigma(Ay - b)\|_2 \\ &= \|x - y - \sigma A(x - y)\|_2 \\ &= \|(\mathbb{I} - \sigma A)(x - y)\|_2 \\ &\leq \|\mathbb{I} - \sigma A\|_2 \|x - y\|_2, \end{aligned}$$

d.h. g kontraktiv, falls $\|\mathbb{I} - \sigma A\|_2 < 1$.

Frage: Wahl von σ ? Wähle $\sigma = \|A\|_\infty^{-1} = \frac{1}{\|A\|_\infty}$, falls A hermitesch und positiv definit (= „Richardson Iteration“). Zu überprüfen $\left\| \mathbb{I} - \frac{A}{\|A\|_\infty} \right\|_2 < 1$. Da A positiv definit und hermitesch, sind alle Eigenwerte $\lambda > 0$. Es gilt $\forall$ EW: $0 < \lambda \leq \|A\|_\infty$. Für EW von $\mathbb{I} - \frac{A}{\|A\|_\infty}$ gilt $\mu = 1 - \frac{\lambda}{\|A\|_\infty}$, λ Eigenwert von A . Also $0 \leq \underbrace{1 - \frac{\lambda}{\|A\|_\infty}}_{=\mu} < 1$, mit 2.53 folgt $\left\| \underbrace{\mathbb{I} - \frac{A}{\|A\|_\infty}}_{\text{hermitesch}} \right\|_2 < 1$. Falls A hermitesch

und positiv definit, ist also die Richardson Iteration konvergent.

Definition 3.23 (Starke Monotonie). Eine Funktion $f: D \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ heißt stark monoton, wenn eine Konstante $m > 0$ existiert, s.d. $\forall x, y \in D$ gilt

$$(f(x) - f(y), x - y)_2 \geq m \|x - y\|_2^2.$$

Bemerkung 3.24 (Anwendung: Nichtlineare Gleichungssysteme). Sei $f: D \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ Lipschitz stetig mit L und stark monoton mit $m > 0$. Betrachte $f(x) = b$, $g(x) := x - \theta(f(x) - b)$.

Frage: Wahl von θ , s.d. $\forall x^{(0)} \in D$ die Fixpunktiteration konvergiert? Es ist

$$\begin{aligned} \|g(x) - g(y)\|_2^2 &= \|x - \theta(f(x) - b) - y + \theta(f(y) - b)\|_2^2 \\ &= \|x - y - \theta(f(x) - f(y))\|_2^2 \\ &= \|x - y\|_2^2 - 2\theta(x - y, f(x) - f(y))_2 + \theta^2 \|f(x) - f(y)\|_2^2 \\ &\leq \|x - y\|_2^2 - 2\theta m \|x - y\|_2^2 + \theta^2 L^2 \|x - y\|_2^2 \\ &= (1 - 2\theta m + \theta^2 L^2) \|x - y\|_2^2. \end{aligned}$$

Die Fixpunktiteration konvergiert, falls $1 - 2\theta m + \theta^2 L^2 < 1$, d.h. für $\theta \in (0, \frac{2m}{L^2})$. Dann existiert ein $x^* = \lim_{k \rightarrow \infty} x^{(k)}$ mit $g(x^*) = x^*$. Ist x^* eindeutig? Seien x, x' zwei Lösungen. Dann ist

$$\begin{aligned} 0 &= \underbrace{(f(x) - b + b - f(x'), x - x')_2}_{=0} \\ &= (f(x) - f(x'), x - x')_2 \\ &\stackrel{f \text{ stark monoton}}{\geq} m \|x - x'\|_2^2 \\ &\geq 0. \end{aligned}$$

Also $x = x'$, damit ist x^* eindeutig.

Kapitel 4

Differenzierbare Funktionen in $\mathbb{R}^n$

Betrachte die Abbildung $f: D \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$. Die Stetigkeitsdefinition von f entspricht der Stetigkeit von f in $\mathbb{R}$. Aber: Differenzierbarkeit einer Funktion $g: I \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$,

$$g'(x_0) := \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h}.$$

Für $h \in \mathbb{R}^n$ nicht sinnvoll.

4.1 Partielle Differenzierbarkeit

Definition 4.1 (Partielle Ableitung). Sei $D \subseteq \mathbb{R}^n$ offen und $f: D \rightarrow \mathbb{R}$.

- f heißt im Punkt $x \in D$ partiell differenzierbar nach i -ter Koordinatenrichtung, falls der Grenzwert

$$\partial_i f(x) := \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x + h \cdot e^{(i)}) - f(x)}{h}.$$

existiert mit $e^{(i)} := i$ -te Spalte der $n \times n$ Einheitsmatrix. Schreibweise auch $\frac{\partial f}{\partial x_i}(x)$ oder $\frac{\partial f(x)}{\partial x_i}$.

- f heißt partiell differenzierbar in $x \in D$, falls $\partial_i f(x)$ für alle $1 \leq i \leq n$ existieren.
- Sind $\partial_i f(x) \forall i$ stetig, dann heißt f stetig partiell differenzierbar.
- Falls $f: D \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, dann heißt f (stetig) partiell differenzierbar, falls alle Komponentenfunktionen f_j ($1 \leq j \leq m$) (stetig) partiell differenzierbar in $x \in D$ sind, d.h. wenn $\partial_i f_j(x) \forall i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m$ existieren.

Bemerkung 4.2 (Interpretation als gewöhnliche Ableitung). Sei $f(x) = f(x_1, \dots, x_n)$. Definiere $\tilde{f}(\xi) = f(x_1, \dots, x_{i-1}, \xi, x_{i+1}, \dots, x_n)$, d.h. $x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n$ fest. Dann ist

$$\partial_i f(x) = \frac{d\tilde{f}(\xi)}{d\xi}.$$

D.h. für partielle Ableitungen gelten analoge Regeln, wie für die gewöhnliche Ableitung, insbesondere Produktregel, Quotientenregel und auch Kettenregel.

Beispiel 4.3. Die Funktion

$$r(x) := \|x\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}.$$

ist in $D = \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$ stetig partiell differenzierbar mit den partiellen Ableitungen

$$\partial_i r(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) \stackrel{\text{gew. Kettenregel}}{=} \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}} 2x_i = \frac{x_i}{\|x\|_2}.$$

Sei $F: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}$ beliebige differenzierbare Funktion. Dann ist $f(x) = F(r(x))$ auf $\mathbb{R}^n \setminus \{0\}$ definiert und partiell differenzierbar.

$$\partial_i f(x) = \frac{dF(r(x))}{dy} \partial_i r(x) = F'(r(x)) \frac{x_i}{\|x\|_2} = F'(r(x)) \frac{x_i}{r(x)}.$$

Bemerkung 4.4. Für $n = 1$ gilt: f differenzierbar $\implies f$ stetig. Für $n > 1$ und f partiell differenzierbar, folgt i.A. nicht, dass f stetig ist.

Satz 4.5. Sei $D \subseteq \mathbb{R}^n$ offen und $f: D \rightarrow \mathbb{R}$. Für $x \in D$ gelte: $\exists K_r(x) \subseteq D$, s.d. die partiellen Ableitungen $\partial_i f(y)$, $i = 1, \dots, n$ beschränkt sind $\forall y \in K_r(x)$, d.h.

$$\sup_{y \in K_r(x)} |\partial_i f(y)| \leq M, \quad i = 1, \dots, n.$$

Dann gilt f stetig in Punkt x .

Beweis. Sei $n = 2$ und $y = (y_1, y_2) \in K_r(x)$. Es ist

$$f(y_1, y_2) - f(x_1, x_2) = f(y_1, y_2) - f(x_1, y_2) + f(x_1, y_2) - f(x_1, x_2)$$

Mit y_2 fest, folgt mit dem Mittelwertsatz der Differentialrechnung: $\exists \xi = \xi(y_2)$ zwischen y_1 und x_1 , also

$$f(y_1, y_2) - f(x_1, y_2) \stackrel{\text{MWS}}{=} \partial_1 f(\xi, y_2)(y_1 - x_1)$$

Analog für x_1 fest und $\eta(x_1)$ zwischen y_2 und x_2

$$f(x_1, y_2) - f(x_1, x_2) \stackrel{\text{MWS}}{=} \partial_2 f(x_1, \eta)(y_2 - x_2)$$

Dann folgt

$$\begin{aligned} |f(y) - f(x)| &\leq \underbrace{|\partial_1 f(\xi, y_2)|}_{\leq M} |y_1 - x_1| + \underbrace{|\partial_2 f(x_1, \eta)|}_{\leq M} |y_2 - x_2| \\ &\leq M(|y_1 - x_1| + |y_2 - x_2|) \\ &= M\|y - x\|_1. \end{aligned}$$

Sei $\varepsilon \in (0, r]$ beliebig, dann gilt für $\delta := \frac{\varepsilon}{M}$

$$\|y - x\|_1 \leq \delta \implies |f(y) - f(x)| \leq \varepsilon.$$

Also f stetig in x und wegen $|f(y) - f(x)| \leq M\|y - x\|_1$ sogar Lipschitz-stetig. Für $n > 2$ analog. $\square$

Definition 4.6. Sei $f: D \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ partiell differenzierbar mit $\partial_i f: D \rightarrow \mathbb{R}$.

- Falls $\partial_i f$ partiell differenzierbar sind, dann heißt f zweimal partiell differenzierbar mit den partiellen Ableitungen zweiter Ordnung

$$\partial_i \partial_j f(x) := \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_i \partial x_j} := \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial f(x)}{\partial x_j} \right).$$

- f heißt k -mal stetig partiell differenzierbar, falls alle partiellen Ableitungen k -ter Ordnung von f existieren und stetig sind.

Bemerkung 4.7. Im Allgemeinen ist $\partial_i \partial_j f(x) \neq \partial_j \partial_i f(x)$!

Satz 4.8 (Vertauschbarkeit der Differentiationsreihenfolge). Sei $D \subseteq \mathbb{R}^n$ offen und $f: D \rightarrow \mathbb{R}$ zweimal stetig differenzierbar in einer Umgebung $K_r(x) \subseteq D$ eines Punktes $x \in D$. Dann gilt

$$\partial_i \partial_j f(x) = \partial_j \partial_i f(x), \quad \forall i, j = 1, \dots, n.$$

Allgemein: Für eine k -mal stetig partiell differenzierbare Funktion ist die Reihenfolge der partiellen Ableitungen vertauschbar.

Beweis. 1) Sei $n = 2$ und

$$A := \underbrace{f(x_1 + h_1, x_2 + h_2) - f(x_1 + h_1, x_2)}_{=\varphi(x_1 + h_1)} - \underbrace{f(x_1, x_2 + h_2) + f(x_1, x_2)}_{=\varphi(x_1)}.$$

Definiere $\varphi(x) := f(x, x_2 + h_2) - f(x, x_2)$. Dann ist $A = \varphi(x_1 + h_1) - \varphi(x_1)$. Mit dem MWS bezügl. x_1 folgt

$$\varphi(x_1 + h_1) - \varphi(x_1) = \varphi'(x_1 + \theta_1) \cdot h_1, \quad \theta_1 \in (0, h_1)$$

Für φ' gilt

$$\begin{aligned} \varphi'(x_1) &= \partial_1 f(x_1, x_2 + h_2) - \partial_1 f(x_1, x_2) \\ &\stackrel{\text{MWS bezügl. } x_2}{=} \partial_2(\partial_1 f(x_1, x_2 + \theta'_1)) \cdot h_2, \quad \theta'_1 \in (0, h_2) \end{aligned}$$

Dann folgt

$$\varphi'(x_1 + \theta_1) = \partial_2(\partial_1 f(x_1 + \theta_1, x_2 + \theta'_1)) h_2.$$

Und damit ist

$$A = \varphi'(x_1 + \theta_1) h_1 = \partial_2(\partial_1 f(x_1 + \theta_1, x_2 + \theta'_1)) \cdot h_1 \cdot h_2$$

Analog definiere $\psi(x) := f(x_1 + h_1, x) - f(x_1, x)$, dann

$$\begin{aligned} A &= \psi(x_2 + h_2) - \psi(x_2) \\ &\stackrel{\text{wie oben}}{=} h_2 \psi'(x_2 + \theta_2) \\ &= h_1 \cdot h_2 \partial_1(\partial_2 f(x_1 + \theta_2, x_2 + \theta'_2)), \quad \theta_2 \in (0, h_1), \theta'_2 \in (0, h_2). \end{aligned}$$

Also folgt

$$\partial_2 \partial_1 f(x_1 + \theta_1, x_2 + \theta'_1) = \frac{A}{h_1 \cdot h_2} = \partial_1 \partial_2 f(x_1 + \theta_2, x_2 + \theta'_2).$$

Die partiellen Ableitungen $\partial_2 \partial_1 f$ und $\partial_1 \partial_2 f$ sind stetig in $K_r(x)$, also gilt für $h_1, h_2 \rightarrow 0$, d.h. $x_1 + \theta_1 \rightarrow x_1, x_2 + \theta'_1 \rightarrow x_2, \dots$

$$\begin{aligned}\partial_2 \partial_1 f(x_1 + \theta_1, x_2 + \theta'_1) &\xrightarrow{h_1, h_2 \rightarrow 0} \partial_2 \partial_1 f(x) \\ \partial_1 \partial_2 f(x_1 + \theta_2, x_2 + \theta'_2) &\xrightarrow{h_1, h_2 \rightarrow 0} \partial_1 \partial_2 f(x).\end{aligned}$$

Also $\partial_1 \partial_2 f(x) = \partial_2 \partial_1 f(x)$. Für $n > 2$ analog.

2) Sei f k -mal stetig differenzierbar. Dann folgt durch Induktion nach k

$$\partial_1 \dots \partial_k f(x) = \partial_{i_1} \dots \partial_{i_k} f(x).$$

für jede Permutation $(i_1, \dots, i_k)$ von $(1 \dots k)$.

□

Definition 4.9 (Begriffe der Vektoranalysis).

- Gradient: Sei $D \subseteq \mathbb{R}^n$ offen und $f: D \rightarrow \mathbb{R}$ eine partiell differenzierbare Funktion. Der Vektor

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

heißt der Gradient von f in $x \in D$.

- Hesse-Matrix: Sei $D \subseteq \mathbb{R}^n$ offen, $f: D \rightarrow \mathbb{R}$ eine zweimal partiell differenzierbare Funktion. Die Matrix

$$H_f(x) := \nabla^2 f(x) := (\partial_i \partial_j f(x))_{i,j=1}^n \in \mathbb{R}^{n \times n}$$

heißt Hesse-Matrix von f im Punkt $x \in D$.

- Jacobi-Matrix: Sei $D \subseteq \mathbb{R}^n$ offen, $f: D \rightarrow \mathbb{R}^m$ eine partiell differenzierbare Vektorfunktion. Die Matrix

$$J_f(x) := \begin{pmatrix} \partial_1 f_1 & \cdots & \partial_n f_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \partial_1 f_m & \cdots & \partial_n f_m \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{m \times n}.$$

heißt Funktionalmatrix oder auch Jacobimatrix von f in $x \in D$.

Schreibweise: $J_f(x) = f'(x) = (\nabla f(x))^T$.

Beispiel 4.10. $r(x) = \|x\|_2$.

$$\nabla r(x) = \begin{pmatrix} \vdots \\ \partial_i r(x) \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vdots \\ \frac{x_i}{r(x)} \\ \vdots \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n.$$

Für die Hesse-Matrix $\nabla^2 r(x) = \left(\partial_j \frac{x_i}{r(x)} \right)_{i,j=1}^n$ folgt

$$\partial_j \left(\frac{x_i}{r(x)} \right) = \begin{cases} \frac{r(x) - x_i \frac{x_i}{r(x)}}{r(x)^2} = \frac{1}{r(x)} - \frac{x_i^2}{r(x)^3} & i = j \\ -\frac{x_i \frac{x_j}{r(x)}}{r(x)^2} = -\frac{x_i x_j}{r(x)^3} & i \neq j \end{cases}.$$

Diese Hesse-Matrix ist die Jacobi-Matrix der Vektorfunktion $v(x) = \frac{x}{r(x)} = \begin{pmatrix} \vdots \\ \frac{x_i}{r(x)} \\ \vdots \end{pmatrix}$.

4.2 Totale Differenzierbarkeit

Erinnerung (Analysis 1) $f: D \rightarrow \mathbb{R}$, $D \subset \mathbb{R}$, ist genau dann in $x \in D$ differenzierbar, falls f in x „gut“ linear approximierbar ist, d.h. $\exists a \in \mathbb{R}$ mit $f(x+h) = f(x) + a \cdot h + w(h)$ wobei $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{w(h)}{|h|} = 0$ ($f'(x) = a$).

Definition 4.11 (total differenzierbar). Es sei $D \subset \mathbb{R}^n$ offen und $f: D \rightarrow \mathbb{R}^m$ eine Abbildung. f heißt im Punkt $x \in D$ (total) differenzierbar, falls es eine lineare Abbildung $A: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ gibt, sodass

$$\lim_{\substack{h \rightarrow 0 \\ h \neq 0}} \frac{f(x+h) - f(x) - A \cdot h}{\|h\|} = 0 \quad (4.1)$$

Oft wird (4.1) durch eine Bedingung an den Rest $\omega(h)$, $\omega: D \rightarrow \mathbb{R}^m$ definiert:

$$f(x+h) = f(x) + A \cdot h + \omega(h),$$

wobei $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\|\omega(h)\|}{\|h\|} = 0$ ($\Leftrightarrow$ (4.1), $\Leftrightarrow \omega(h) = o(\|h\|)$). Da alle Normen auf $\mathbb{R}^m$ äquivalent sind, ist es gleichgültig, welche Norm man in (4.1) verwendet.

A heißt das Differential von f im Punkt x . Schreibweise:

$$df(x), df \Big|_x, df_x, Df(x), Df \Big|_x, Df_x, df(x) \Big|_{x=x_0}, Df(x_0).$$

Bemerkung 4.12. Für $n = m = 1$ ist die Definition der totalen Ableitung äquivalent zur Definition der Ableitung von Funktionen einer Variablen.

Satz 4.13 (Differenzierbarkeit). Sei $D \subset \mathbb{R}^n$ offen. Für Funktionen $f: D \rightarrow \mathbb{R}^m$ gilt:

- 1) Sei f in $x \in D$ differenzierbar, dann ist f partiell differenzierbar und $Df(x) = J_f(x)$, $J_f(x)$ Jacobi-Matrix
- 2) Sei f partiell differenzierbar in einer Umgebung von $x \in D$ und die partiellen Ableitungen stetig in x , dann ist f differenzierbar in x .

Beweis. $n = 2$ und $m = 1$.

- 1) Sei f differenzierbar. Dann gilt

$$\begin{aligned} \lim_{h_i \rightarrow 0} \frac{f(x + h_i \cdot e^{(i)}) - f(x)}{h_i} &= \lim_{h_i \rightarrow 0} \left(Df(x) \cdot e^{(i)} + \frac{\omega(h_i)}{h_i} \right) \\ &= Df(x) \cdot e^{(i)} + \underbrace{\lim_{h_i \rightarrow 0} \frac{\omega(h_i)}{h_i}}_{\rightarrow 0} \\ &= Df(x) \cdot e^{(i)} \end{aligned}$$

$$\implies f \text{ partiell differenzierbar und } Df(x)e^{(i)} = \begin{pmatrix} \partial_i f_1 \\ \vdots \\ \partial_i f_m \end{pmatrix} \implies Df(x) = J_f(x).$$

2) Sei f stetig partiell differenzierbar und $h = \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix}$. Dann gilt

$$\begin{aligned} f(x+h) - f(x) &= f(x_1+h_1, x_2+h_2) - f(x_1+h_1, x_2) + f(x_1+h_1, x_2) - f(x_1, x_2) \\ \exists \theta_1, \theta_2 \in (0,1) \text{ mit} \\ f(x+h) - f(x) &\stackrel{\text{MWS}}{=} h_2 \partial_2 f(x_1+h_1, x_2+\theta_2 \cdot h_2) + h_1 \partial_1 f(x_1+\theta_1 \cdot h_1, x_2) \\ &= h_2(\partial_2 f(x_1, x_2) + \omega_2(h_1, h_2)) + h_1(\partial_1 f(x_1, x_2) + \omega_1(h_1, h_2)), \end{aligned}$$

wobei

$$\omega_1(h_1, h_2) = \partial_1 f(x_1 + \theta_1 h_1, x_2) - \partial_1 f(x_1, x_2)$$

und

$$\omega_2(h_1, h_2) = \partial_2 f(x_1 + h_1, x_2 + \theta_2 h_2) - \partial_2 f(x_1, x_2).$$

$\partial_1 f(x), \partial_2 f(x)$ stetig $\implies \lim_{h \rightarrow 0} \omega_1(h_1, h_2) = 0, \lim_{h \rightarrow 0} \omega_2(h_1, h_2) = 0$. Daher gilt

$$\begin{aligned} f(x+h) - f(x) &= h_1 \partial_1 f(x) + h_2 \partial_2 f(x) + h_1 \omega_1(h) + h_2 \omega_2(h) \\ &= (\partial f_1(x), \partial f_2(x)) \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} + (\omega_1(h), \omega_2(h)) \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} \\ &= Df(x) \cdot h + \tilde{\omega}(h) \end{aligned}$$

mit $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\|\tilde{\omega}(h)\|}{\|h\|} = 0$. Also ist f differenzierbar und $Df(x) = \nabla^T f(x)$.

□

Korrolar 4.14. stetig partiell differenzierbar $\implies$ (total) differenzierbar $\implies$ partiell differenzierbar. Die umgekehrten Implikationen gelten im Allgemeinen nicht.

Lemma 4.15 (Richtungsableitung). Sei $D \in \mathbb{R}^n$ offen, $f: D \rightarrow \mathbb{R}$ im Punkt $x \in D$ differenzierbar. Dann gilt $\forall v \in \mathbb{R}^n$ mit $\|v\|_2 = 1$ existiert die Ableitung in Richtung v (sog. Richtungsableitung)

$$\frac{\partial f}{\partial v}(x) := \lim_{t \searrow 0} \frac{f(x+tv) - f(x)}{t}$$

und

$$\frac{\partial f}{\partial v}(x) = (\nabla f(x), v)_2$$

Beweis. Sei $x \in D$ und definiere die Funktion $\xi(t) := x + tv$. $\xi(t) \in D$ für $t \in [0, \varepsilon)$ für genügend kleine $\varepsilon > 0$. Betrachte die Komposition $h := f \circ \xi: [0, \varepsilon) \rightarrow \mathbb{R}$. Dann gilt

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial v}(x) &\stackrel{\text{Def. Richtungsabl.}}{=} \lim_{t \searrow 0} \frac{f(x+tv) - f(x)}{t} \\ &\stackrel{\text{Def. Abl.}}{=} \left. \frac{d}{dt} f(x+tv) \right|_{t=0} \\ &\stackrel{f(x+tv) = (f \circ \xi)(t)}{=} \left. \frac{dh}{dt} \right|_{t=0} \\ &= h'(0) \end{aligned}$$

Kettenregel:

$$\begin{aligned}
 h'(t) &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i}(\xi(t)) \cdot \xi'_i(t) \\
 \Rightarrow h'(0) &\stackrel{\xi(0)=x+0 \cdot v}{=} \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i}(x) \cdot v_i \\
 &\stackrel{\xi'_i(t)=v_i}{=} (\nabla f(x), v)_2
 \end{aligned}$$

□

Korollar 4.16. Sei $\nabla f(x) \neq 0$. Dann ist der Winkel θ zwischen zwei Vektoren $v \in \mathbb{R}^n$ und $\nabla f(x) \in \mathbb{R}^n$ definiert durch

$$\cos(\theta) = \frac{(\nabla f(x), v)_2}{\|\nabla f(x)\|_2 \cdot \|v\|_2}.$$

Damit gilt für $\|v\|_2 = 1$

$$\frac{\partial f}{\partial v}(x) \stackrel{\text{Lemma 4.15}}{=} (\nabla f, v)_2 = \|\nabla f(x)\|_2 \cdot \|v\|_2 \cdot \cos(\theta) \stackrel{\|v\|_2=1}{=} \|\nabla f(x)\|_2 \cdot \cos(\theta)$$

$\frac{\partial f}{\partial v}(x)$ wird maximal, wenn $\cos(\theta) = 1$, also wenn v und $\nabla f(x)$ die gleiche Richtung haben: d.h. der Vektor $\nabla f(x)$ ist die Richtung des stärksten Anstiegs von f im Punkt x .

Bemerkung 4.17. 1. Es gibt Funktionen, für welche alle Richtungsableitungen existieren, die aber dennoch nicht (total) differenzierbar sind.

2. Es gibt Funktionen, die stetig und partiell differenzierbar, aber nicht (total) differenzierbar sind.

Satz 4.18 (Kettenregel). Seien $D_f \subset \mathbb{R}^n$ und $D_g \subset \mathbb{R}^m$ offen, $g: D_g \rightarrow \mathbb{R}^n, f: D_f \rightarrow \mathbb{R}^r$ Abbildungen. Falls g im Punkt $x \in D_g$ und f im Punkt $y = g(x) \in D_f$ differenzierbar sind, gilt: Die Komposition $h = f \circ g$ ist im Punkt x differenzierbar und

$$\underbrace{D_x h(x)}_{\in \mathbb{R}^{r \times m}} = \underbrace{D_y f(g(x))}_{\in \mathbb{R}^{r \times n}} \underbrace{D_x g(x)}_{\in \mathbb{R}^{n \times m}}$$

Beweis. Seien $x \in D_g$ und $y = g(x) \in D_f$. Dann gilt nach Voraussetzungen

$$\begin{aligned}
 g(x + \xi) &= \underbrace{g(x)}_{=: y} + \underbrace{D_x g(x)\xi + \omega_g(\xi)}_{=: \eta} & \text{mit } \lim_{\substack{x+\xi \in D_g \\ \|\xi\| \rightarrow 0}} \frac{\|\omega_g(\xi)\|}{\|\xi\|} &= 0 \\
 f(y + \eta) &= f(y) + D_y f(y)\eta + \omega_f(\eta) & \text{mit } \lim_{\substack{x+\eta \in D_f \\ \|\eta\| \rightarrow 0}} \frac{\|\omega_f(\eta)\|}{\|\eta\|} &= 0
 \end{aligned}$$

Dann erhalten wir

$$\begin{aligned}
(f \circ g)(x + \xi) &= f(g(x + \xi)) \\
&\stackrel{g(x+\xi)=g(x)+\eta=y+\eta}{=} f(y + \eta) \\
&= f(y) + D_y f(y) \cdot \eta + \omega_f(\eta) \\
&= f(y) + D_y f(y)(D_x g(x)\xi + \omega_g(\xi)) + \omega_f(\eta) \\
&= f(y) + D_y f(y)D_x g(x) \cdot \xi + D_y f(y)\omega_g(\xi) + \omega_f(\eta) \\
&= (f \circ g)(x) + \underbrace{D_y f(y)D_x g(x)}_{D_x(f \circ g)} \cdot \xi + \omega_{f \circ g}(\xi),
\end{aligned}$$

wobei hier $\omega_{f \circ g}(\xi) = D_y f(y)\omega_g(\xi) + \omega_f(\eta)$. Es genügt also zu zeigen, dass

$$\lim_{\|\xi\| \rightarrow 0} \frac{\|\omega_{f \circ g}(\xi)\|}{\|\xi\|} = 0.$$

Aus $\lim_{\|\xi\| \rightarrow 0} \frac{\|\omega_g(\xi)\|}{\|\xi\|} = 0$ folgt sofort $\lim_{\|\xi\| \rightarrow 0} \frac{\|D_y f(y)\omega_g(\xi)\|}{\|\xi\|} = 0$. Wir schließen aber auch, dass es eine Konstante $c > 0$ geben muss, sodass $\|\omega_g(\xi)\| \leq c \|\xi\|$. Wegen $\lim_{\|\eta\| \rightarrow 0} \frac{\|\omega_f(\eta)\|}{\|\eta\|} = 0$ muss es ein $\tilde{\omega}_f(\eta)$ mit $\lim_{\eta \rightarrow 0} \tilde{\omega}_f(\eta) = 0$ geben, sodass $\omega_f(\eta) = \|\eta\| \cdot \tilde{\omega}_f(\eta)$. Mit diesen Aussagen gilt:

$$\begin{aligned}
\|\omega_f(\eta)\| &= \|D_x g(x)\xi + \omega_g(\xi)\| \|\tilde{\omega}_f(\eta)\| \\
&\leq (\|D_x g(x)\| \|\xi\| + \|\omega_g(\xi)\|) \cdot \|\tilde{\omega}_f(\eta)\| \\
&\leq (\|D_x g(x)\| + c) \|\xi\| \cdot \|\tilde{\omega}_f(\eta)\| \\
\Rightarrow \frac{\|\omega_f(\eta)\|}{\|\xi\|} &\leq (\|D_x g(x)\| + c) \cdot \|\tilde{\omega}_f(\eta)\|
\end{aligned}$$

Wegen $\lim_{\xi \rightarrow 0} \eta = \lim_{\xi \rightarrow 0} D_x g(x)\xi + \omega_g(\xi) = 0$ folgt $\lim_{\xi \rightarrow 0} \tilde{\omega}_f(\eta) = 0$ und damit

$$0 \leq \lim_{\xi \rightarrow 0} \frac{\|\omega_f(\eta)\|}{\|\xi\|} \leq \lim_{\xi \rightarrow 0} (\|D_x g(x)\| + c) \cdot \|\tilde{\omega}_f(\eta)\| = (\|D_x g(x)\| + c) \cdot \left\| \lim_{\xi \rightarrow 0} \tilde{\omega}_f(\eta) \right\| = 0$$

Insgesamt erhalten wir

$$\lim_{\|\xi\| \rightarrow 0} \frac{\|\omega_{f \circ g}(\xi)\|}{\|\xi\|} \leq \lim_{\|\xi\| \rightarrow 0} \frac{\|D_y f(y)\omega_g(\xi)\|}{\|\xi\|} + \lim_{\xi \rightarrow 0} \frac{\|\omega_f(\eta)\|}{\|\xi\|} = 0$$

□

Bemerkung 4.19 (Komponentenweise für $i = 1, \dots, m$ und $j = 1, \dots, r$).

$$D_x h(x) = D_y f(y) D_x g(x) \Leftrightarrow \underbrace{\frac{\partial h_j}{\partial x_i}(x)}_{\partial_i(f \circ g)_j} = \sum_{k=1}^n \frac{\partial f_j}{\partial y_k}(g_1(x), \dots, g_n(x)) \cdot \frac{\partial g_k}{\partial x_i}(x_1, \dots, x_m)$$

Spezialfall: $m = r = 1$ ($g: D_g \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$, $f: D_f \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$)

$$h'(x) = \frac{d}{dx} h(x) = \frac{d}{dx} f(g(x)) = \sum_{k=1}^n \frac{\partial f}{\partial y_k}(g_1(x), \dots, g_n(x)) \cdot \frac{d}{dx} g_k(x) = (\nabla_y f(g(x)), g'(x))_2$$