Universität Regensburg WS 2013/14

Vorlesungsmitschrift (*kein* offizielles Skript)

Funktionalanalysis

Prof. Dr. Harald Garcke

Version vom 17. Oktober 2013

Gesetzt in LaTeX von Johannes Prem

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung: Wovon handelt die Funktionalanalysis?

Zum Beispiel von der *Analysis auf Banachräumen* (vollständigen normierten Vektorräumen)

1.1. Auf $\mathbb{R}^n$ definiere

$$\forall x \in \mathbb{R}^n\colon \quad \|x\|_2 \coloneqq |x| = \Big(\sum_{i=0}^n x_i^2\Big)^{\frac{1}{2}}$$

1.2 (Funktionen auf kompakten Teilmengen des $\mathbb{R}^n$)**.**
Zum Beispiel: $K \subset \mathbb{R}^n$ kompakt, z. B. $K = [0,1]$.

$$C^0(K) \coloneqq \{f \mid f\colon K \to \mathbb{R} \text{ stetig}\}$$

wird Banachraum mit der Norm:

$$\|f\|_\infty \coloneqq \sup_{x\in K} |f(x)| \; < \infty$$

1.3 (Operatoren auf $C^0([0,1])$)**.**
Definiere

$$L\big(C^0([0,1]),\, C^0([0,1])\big) \coloneqq \big\{T\colon C^0([0,1]) \to C^0([0,1]) \;\big|\; T \text{ ist linear und stetig}\big\}$$

Beispiele:

$$(Tf)(x) \coloneqq g(x)\, f(x) \qquad \text{wobei } g \in C^0([0,1])$$

$$(Tf)(x) \coloneqq \sum_{i=0}^n f(x_i)\, L_i(x) \qquad \text{wobei } 0 \le x_0 < x_1 < \cdots < x_n \le 1$$

$$L_i\colon \text{ Lagrange-Basis-Fkt.:} \quad L_i(x) = \prod_{\substack{j=0\\ j\neq i}}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j}$$

$$(Tf)(x) \coloneqq \int_0^1 K(x,y)\, f(y)\, \mathrm{d}y \qquad \text{wobei } K \in C^0\left([0,1]^2\right)$$

Bemerkung: $L\big(C^0([0,1]),\, C^0([0,1])\big)$ wird zu einem Banachraum mit der Operatornorm

$$\|T\|_{L(C^0,C^0)} \coloneqq \sup_{f\neq 0} \frac{\|Tf\|_{C^0}}{\|f\|_{C^0}}$$

1.4. Welche Besonderheiten ergeben sich in unendlich-dimensionalen Räumen?

(1) Problem in ∞-dimensionalen Vektorräumen: Wenig sinnvolle Aussagen ohne Topologie möglich

(2) Für $T\colon \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$ linear gilt:

$$T \text{ surjektiv} \quad\iff\quad T \text{ injektiv}$$

Im ∞-dim. ist dies i. A. falsch.
Beispiel:

$$C_* := \left\{ x = (x_k)_{k\in\mathbb{N}} \;\middle|\; x_k \in \mathbb{R},\ \exists\, \bar{k} \in \mathbb{N}\ \forall\, \ell > \bar{k}\colon\ x_\ell = 0 \right\}$$

C_* modelliert „Folgen, die irgendwann abbrechen". Außerdem enthält C_* den $\mathbb{R}^n$ für $n \in \mathbb{N}$ beliebig groß.

Definiere die sog. *Shift-Abbildung* wie folgt:

$$T(x_1, x_2, x_3, \dots) := (0, x_1, x_2, x_3, \dots)$$

Dann ist T injektiv, aber nicht surjektiv.

(3) Grundproblem der linearen Algebra: Finde Normalformen für lineare Abbildungen.
Ziel: Verallgemeinerung auf ∞-dim. Räume.

$$\left.\begin{array}{l}\text{Diagonalisierbarkeit}\\ \text{symmetrischer Matrizen}\end{array}\right\} \rightsquigarrow \left\{\begin{array}{l}\text{Spektralsatz für}\\ \text{kompakte, normale Operatoren}\end{array}\right.$$

$$\left.\begin{array}{l}\text{Jordansche}\\ \text{Normalform}\end{array}\right\} \rightsquigarrow \left\{\begin{array}{l}\text{Spektralsatz für}\\ \text{kompakte Operatoren}\end{array}\right.$$

(4) Kompaktheit
In ∞-dim. Banachräumen ist die abgeschlossene Einheitskugel *nicht* kompakt.
Beispiel C_*: Nutze die Norm

$$\|x\|_{C_*} := \max_{n\in\mathbb{N}} |x_n|$$

und die Einheitsvektoren $e_i = (\delta_{ij})_{j\in\mathbb{N}} = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots)$ (wobei die 1 an der i-ten Stelle steht). Dann gilt:

$$\|e_i\|_{C_*} = 1 \qquad \text{und} \qquad \|e_i - e_k\|_{C_*} = 1 \text{ für } i \neq k$$

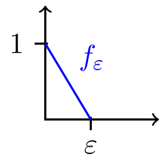
Also hat $(e_n)_{n\in\mathbb{N}}$ *keine* konvergente Teilfolge, woraus folgt, dass die Einheitskugel nicht kompakt ist.

(5) Nicht alle Normen sind zueinander äquivalent.
Beispiel: Betrachte auf $C^0([0,1])$ die Normen

$$\|f\|_\infty = \sup_{x\in[0,1]} |f(x)|$$

$$\|f\|_{L^2} := \sqrt{\int_0^1 \big(f(x)\big)^2 \,\mathrm{d}x}$$

Es gilt $\|f\|_{L^2} \leq \|f\|_\infty$. Aber: Es gibt keine Konstante $c \in \mathbb{R}_{>0}$, so dass für alle $f \in C^0([0,1])$ gilt: $\|f\|_\infty \leq c\,\|f\|_{L^2}$. Betrachte dazu:



Es gilt: $\|f_\varepsilon\|_\infty = 1,\ \|f_\varepsilon\|_{L^2} \leq \sqrt{\varepsilon}$.

Außerdem gilt:

$$\big(C^0([0,1]),\ \|\cdot\|_\infty\big) \text{ ist Banachraum}$$
$$\big(C^0([0,1]),\ \|\cdot\|_{L^2}\big) \text{ ist normierter Vektorraum (aber nicht vollständig)}$$

Funktionalanalysis lässt sich sinnvoll nur in vollständigen Räumen entwickeln. Deshalb werden wir nicht vollständige Räume vervollständigen.

2 Grundlstrukturen der Funktionalanalysis

2.1 (Topologie)**.** Sei X eine Menge, $\mathcal{T}$ ein System von Teilmengen. Dann heißt $\mathcal{T}$ *Topologie (auf X)*, falls gilt:

(T1) $\emptyset \in \mathcal{T},\ X \in \mathcal{T}$

(T2) $\mathcal{T}' \subset \mathcal{T} \implies \bigcup \mathcal{T}' \in \mathcal{T}$

(T3) $T_1, T_2 \in \mathcal{T} \implies T_1 \cap T_2 \in \mathcal{T}$

Ein topologischer Raum $(X, \mathcal{T})$ heißt *Hausdorff-Raum*, falls er zusätzlich das Hausdorffsche Trennungsaxiom erfüllt:

(T4) $\forall\, x_1, x_2 \in X, x_1 \neq x_2\ \ \exists\, U_1, U_2 \in \mathcal{T}\colon\ U_1 \cap U_2 = \emptyset \wedge x_i \in U_i$

Mengen in $\mathcal{T}$ heißen *offene Mengen*. Komplemente offener Mengen heißen *abgeschlossene Mengen*.

Eine Menge $W \subset X$ mit $x \in W$ für die eine offene Menge U mit $x \in U$ und $U \subset W$ existiert, heißt *Umgebung von x*.

Seien $(X, \mathcal{T}_X)$ und $(Y, \mathcal{T}_Y)$ topologische Räume, so heißt $f\colon X \to Y$ *stetig*, falls die Urbilder offener Mengen stets offen sind. (Formal: $\forall\, U' \in \mathcal{T}_Y\colon\ f^{-1}(U') \in \mathcal{T}_X$)

Eine Abbildung $f\colon X \to Y$ heißt *stetig in $x \in X$*, falls

$$f(x) \in V \in \mathcal{T}_Y \quad \implies \quad \exists\, U \in \mathcal{T}_X\colon\ x \in U \subset f^{-1}(V)$$

(d. h. $f^{-1}(V)$ ist Umgebung von x).

2.2. Ist X ein $\mathbb{K}$-Vektorraum mit $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ oder $\mathbb{K} = \mathbb{C}$, so heißt $(X, \mathcal{T})$ *topologischer Vektorraum*, falls $(X, \mathcal{T})$ ein topologischer Raum ist und die Abbildungen

$$\begin{aligned} X \times X \to X, &\quad (x, y) \mapsto x + y \\ \mathbb{K} \times X \to X, &\quad (\alpha, x) \mapsto \alpha\, x \end{aligned}$$

stetig sind. („Algebraische und topologische Struktur sind verträglich")

2.3 (Metrik)**.** Ein Tupel (X, d) heißt *metrischer Raum*, falls X eine Menge ist und $d\colon X \times X \to \mathbb{R}$ folgende Bedingungen für alle $x, y, z \in X$ erfüllt:

(M1) $d(x, y) \geq 0$ und $d(x, y) = 0 \iff x = y$

(M2) $d(x,y) = d(y,x)$

(M3) $d(x,z) \leq d(x,y) + d(y,z)$

Konvergenz:
$(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ heißt Cauchy-Folge, falls:

$$d(x_k, x_\ell) \to 0 \quad \text{für } k, \ell \to \infty$$

x heißt Grenzwert von $(x_n)_{n\in\mathbb{N}}$ (Notation: $x = \lim_{n\to\infty} x_n$ oder: $x_n \to x$ für $n \to \infty$), falls:

$$d(x_n, x) \to 0 \quad \text{für } n \to \infty$$

(X,d) heißt *vollständig*, falls jede Cauchy-Folge einen Grenzwert in X besitzt.

Abstand von Mengen $A, B \subset X$:

$$\operatorname{dist}(A,B) := \inf\{d(a,b) \mid a \in A,\ b \in B\}$$

Für $A \subset X$ und $x \in X$ definieren wir: $\operatorname{dist}(x,A) := \operatorname{dist}(\{x\},A)$.

Für $r \in \mathbb{R}_{>0}$ sowie $A \subset X,\ x \in X$ definieren wir:

$$\begin{aligned} B_r(A) &:= \{x \in X \mid \operatorname{dist}(x,A) < r\} \\ B_r(x) &:= B_r(\{x\}) \\ \operatorname{diam}(A) &:= \sup\{d(a_1,a_2) \mid a_1, a_2 \in A\} \end{aligned}$$

Wir sagen A ist *beschränkt*, falls $\operatorname{diam}(A) < \infty$.

2.4 (Topologie von Metriken). Sei (X,d) ein metrischer Raum und $A \subset X$.

$$A^\circ := \{x \in X \mid \exists\, r \in \mathbb{R}_{>0}\colon\ B_r(x) \subset A\} \quad \text{ist das } \textit{Innere von } A.$$

$$\overline{A} := \{x \in X \mid \forall\, r \in \mathbb{R}_{>0}\colon\ B_r(x) \cap A \neq \emptyset\} \quad \text{ist der } \textit{Abschluss von } A.$$

$$\partial A := \overline{A} \setminus A^\circ \quad \text{ist der } \textit{Rand von } A.$$

Wir sagen, dass A offen ist, falls $A^\circ = A$ gilt, und dass A abgeschlossen ist, falls $\overline{A} = A$ gilt.

Durch die Definition $\mathcal{T} := \{A \subset X \mid A \text{ offen}\}$ wird $(X, \mathcal{T})$ zu einem hausdorffschen topologischen Raum.

2.5 (Fréchet-Metrik). Sei X ein Vektorraum. Eine Abbildung $d\colon X \to \mathbb{R}$ heißt *Fréchet-Metrik*, falls für alle $x, y \in X$ gilt:

(F1) $d(x) \geq 0$ und $d(x) = 0 \iff x = 0$

(F2) $d(-x) = d(x)$

(F3) $d(x+y) \leq d(x) + d(y)$

Dann ist $(x, y) \mapsto d(x - y)$ eine Metrik auf X.

Beispiel: Fréchet-Metriken auf $\mathbb{R}$:

$$x \mapsto |x|^\alpha \quad \text{mit } 0 < \alpha \leq 1$$
$$x \mapsto \frac{|x|}{1 + |x|}$$

2.6 (Norm)**.** X sei ein $\mathbb{K}$-Vektorraum (mit $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ oder $\mathbb{K} = \mathbb{C}$).
Eine Abbildung $\|\cdot\|: X \to \mathbb{R}$ heißt *Norm*, falls folgende Bedingungen für alle $x, y \in X, \alpha \in \mathbb{K}$ erfüllt sind:

(N1) $\|x\| \geq 0 \quad \text{und} \quad \|x\| = 0 \iff x = 0$

(N2) $\|\alpha\, x\| = |\alpha|\, \|x\|$

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

Dann ist $x \mapsto \|x\|$ eine Fréchet-Metrik. Wir nennen X *Banachraum*, falls X mit einer gegebenen Metrik vollständig ist.

X ist eine *Banachalgebra*, falls X eine Algebra ist (d. h. es gibt ein Produkt auf X, das dem Assoziativgesetz und Distributivgestz genügt) und $\|x \cdot y\| \leq \|x\| \cdot \|y\|$ für alle $x, y \in X$ gilt.

2.7 (Skalarprodukt)**.** Sei X ein $\mathbb{K}$-Vektorraum.

a) $\langle\,\cdot\,,\,\cdot\,\rangle: X \times X \to \mathbb{K}$ heißt *Hermitische Form* ($\mathbb{K} = \mathbb{R}$ symmetrische Biliniearform, $\mathbb{K} = \mathbb{C}$ symmetrische Sesquilinearform), falls für alle $x, x_1, x_2, y \in X, \alpha \in \mathbb{K}$ gilt:

   (S1) $\langle x, y\rangle = \overline{\langle y, x\rangle}$

   (S2) $\langle \alpha\, x, y\rangle = \alpha\, \langle x, y\rangle$

   (S3) $\langle x_1 + x_2, y\rangle = \langle x_1, y\rangle + \langle x_2, y\rangle$

   (Es folgt: für alle $x \in X$ gilt $\langle x, x\rangle \in \mathbb{R}$.)

b) $\langle\,\cdot\,,\,\cdot\,\rangle$ heißt *positiv-semidefinit*, falls

   (S4') $\langle x, x\rangle \geq 0$

   und *positiv definit*, falls

   (S4) $\langle x, x\rangle \geq 0 \quad \text{und} \quad \langle x, x\rangle = 0 \iff x = 0$

   gilt.

c) $\langle\,\cdot\,,\,\cdot\,\rangle$ heißt *Skalarprodukt*, falls (S1)–(S4) erfüllt sind. Dann ist $\|x\| := \sqrt{\langle x, x\rangle}$ eine Norm auf X und wir nennen X dann einen *Prä-Hilbertraum*. Falls X zusätzlich vollständig ist, so heißt X *Hilbertraum*

Beispiele:

i) $\mathbb{R}^n$ mit $\langle x,y\rangle = \sum_{i=1}^n x_i\, y_i$, $\|x\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}$

ii) $X = C^0(K,\mathbb{R})$ für $K \subset \mathbb{R}^n$ kompakt.

$$\langle f,g\rangle \coloneqq \int_K f(x)\, g(x)\, \mathrm{d}x$$

Dann ist $\big(C^0(K), \langle\cdot,\cdot\rangle\big)$ ein Prä-Hilbertraum (aber kein Hilbertraum!)

Satz 2.8. Sei $\langle\,\cdot\,,\,\cdot\,\rangle$ ein Skalarprodukt auf einem Vektorraum X. Dann gelten:

(1) Cauchy-Schwarz-Ungleichung (CSU): $\forall\, x,y \in X\colon \quad |\langle x,y\rangle| \le \|x\| \cdot \|y\|$.
Gleichheit gilt nur, falls y ein Vielfaches von x ist.

(2) Dreiecksungleichung: $\forall\, x,y \in X\colon \quad \|x+y\| \le \|x\| + \|y\|$

(3) Parallelogrammidentität: $\forall\, x,y \in X\colon \quad \|x+y\|^2 + \|x-y\|^2 = 2\left(\|x\|^2 + \|y\|^2\right)$

Bemerkung: Im Fall $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ folgt aus der CSU für $x,y \in X \setminus \{0\}$:

$$\left\langle \frac{x}{\|x\|}, \frac{y}{\|y\|} \right\rangle \in [-1,1] \qquad (*)$$

D. h. es gibt genau ein $\theta \in [0,\pi]$, s. d.

$$\left\langle \frac{x}{\|x\|}, \frac{y}{\|y\|} \right\rangle = \cos\theta.$$

Wir interpretieren θ als den Winkel zwischen x und y.

Beweis von Satz 2.8.

(3)

$$\begin{aligned}\|x+y\|^2 &= \langle x+y, x+y\rangle \\ &= \langle x,y\rangle + \langle x,y\rangle + \langle y,x\rangle + \langle y,y\rangle \\ &= \|x\|^2 + 2\,\mathrm{Re}\langle x,y\rangle + \|y\|^2\end{aligned}$$

Ersetze y durch $-y$ und addiere beide Gleichungen.

(1) Ersetze in $(*)$ y durch $-\frac{\langle x,y\rangle}{\|y\|^2}\, y$ (o. E. $y \neq 0$). Dann ergibt sich:

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

Es folgt die CSU. In der ersten Zeile gilt bei $\le$ die Gleichheit genau dann, wenn x ein Vielfaches von y ist.

(3)
$$\|x+y\|^2 = \|x\|^2 + \|y\|^2 + 2\underbrace{\operatorname{Re}\langle x,y\rangle}_{\le |\langle x,y\rangle| \le \|x\|\,\|y\|} \le (\|x\| + \|y\|)^2$$

■

2.9 (Vergleich von Topologien). Seien $\mathcal{T}_1, \mathcal{T}_2$ zwei Topologien auf einer Menge X. Wir sagen $\mathcal{T}_2$ ist *stärker* (oder *feiner*) als $\mathcal{T}_1$ und $\mathcal{T}_1$ ist *schwächer* (oder *gröber*) als $\mathcal{T}_2$, falls $\mathcal{T}_1 \subset \mathcal{T}_2$ gilt.

Sind d_1, d_2 zwei Metriken auf X und $\mathcal{T}_1, \mathcal{T}_2$ die induzierten Topologien (siehe 2.4), so heißt die Metrik d_1 *stärker (bzw. schwächer)* als d_2, falls $\mathcal{T}_1$ stärker (bzw. schwächer) als $\mathcal{T}_2$ ist. Die Metriken heißen äquivalent, falls $\mathcal{T}_1 = \mathcal{T}_2$. Entsprechend heißt eine Norm stärker bzw. schwächer als eine zweite, wenn dies für die induzierten Metriken gilt. Analog für Äquivalenz von Normen.

2.10 (Vergleich von Normen). Seien $\|\cdot\|_1$ und $\|\cdot\|_2$ zwei Normen auf einem $\mathbb{K}$-Vektorraum X. Dann gilt:

(1) $\|\cdot\|_2$ ist stärker als $\|\cdot\|_1$ genau dann, wenn es ein $c \in \mathbb{R}_{>0}$ gibt mit:
$$\forall\, x \in X: \quad \|x\|_1 \le c\,\|x\|_2$$

(2) Die beiden Normen sind genau dann äquivalent, wenn es $c, C \in \mathbb{R}_{>0}$ gibt mit:
$$\forall\, x \in X: \quad c\,\|x\|_2 \le \|x\|_1 \le C\,\|x\|_2$$

Beweis. (1) Es sei $B^i_r(x) = \{x' \in X \mid \|x - x'\|_i < r\}$ und $\mathcal{T}_i$ sei die von $\|\cdot\|_i$ induzierte Topologie.
Sei $\mathcal{T}_1 \subset \mathcal{T}_2$. Da $B^1_1(0) \in \mathcal{T}_1$ gilt, ist $B^1_1(0)$ offen bezüglich $\mathcal{T}_1$ und bezüglich $\mathcal{T}_2$. Es liegt 0 im Inneren (bezüglich $\|\cdot\|_2$) von $B^1_1(0)$. Somit gilt $B^2_\varepsilon(0) \subset B^1_1(0)$ für ein $\varepsilon \in \mathbb{R}_{>0}$. Daher gilt für $x \in X \setminus \{0\}$:
$$\left\| \frac{\varepsilon\, x}{2\|x\|_2} \right\|_2 = \frac{\varepsilon}{2} < \varepsilon$$
$$\implies \quad \left\| \frac{\varepsilon\, x}{2\,\|x\|_2} \right\|_1 < 1 \qquad \implies \quad \|x\|_1 < \frac{2}{\varepsilon}\,\|x\|_2$$

Gilt umgekehrt die Ungleichung in (1) so ist für alle $x \in X$ und $r \in \mathbb{R}_{>0}$
$$B^2_r(x) \subset B^1_{cr}(x)$$
Sei nun $A \in \mathcal{T}_1$. Dann ist $A = A^\circ$ bezüglich $\mathcal{T}_1$. D. h. zu $x \in A$ existiert ein $\varepsilon \in \mathbb{R}_{>0}$, so dass $B^1_\varepsilon(x) \subset A$. Also gilt:
$$B^2_{\varepsilon/c}(x) \subset A$$
Dies zeigt $A \in \mathcal{T}_2$.

(2) Wende den ersten Teil zweimal an.

∎

Satz 2.11. Auf einem endlich-dimensionalen Vektorraum sind alle Normen äquivalent. Endlich-dimensionale Vektorräume sind Banachräume. Endlich-dimensionale Unterräume normierter Räume sind abgeschlossen.

Beweis. Sei X ein endlich-dimensionaler $\mathbb{K}$-Vektorraum und $\|\cdot\|$ eine Norm. Sei $e_1, \ldots, e_n$ eine Basis von $(X, \|\cdot\|)$. Jedem $x \in X$ mit $x = \sum_{i=1}^n \alpha_i \, e_i$ ordnen wir den Vektor $\alpha = (\alpha_1, \ldots, \alpha_n)^{\mathsf{t}} \in \mathbb{K}^n$ zu.

Die Abbildungen

$$\begin{aligned} \mathbb{K}^n &\to X \to \mathbb{R} \\ \alpha &\mapsto x \ \mapsto \|x\| \end{aligned}$$

sind stetig.

Daher nimmt $\|x\|$ auf der kompakten Menge

$$S := \{\alpha \mid \|\alpha\|_2 = 1\}$$

ein Maximum M und ein Minimum m an. (Dabei gilt $m > 0$, da $\|x\| > 0$ für alle $x \in S$.) Damit gilt für x mit $\|\alpha(x)\|_2 = 1$

$$m \leq \|x\| \leq M.$$

Für allgemeine $x \neq 0$ gilt

$$\left\| \alpha \left(\frac{x}{\|\alpha(x)\|_2} \right) \right\|_2 = 1 \quad \text{und somit} \quad m \leq \left\| \frac{x}{\|\alpha(x)\|_2} \right\| \leq M$$

Dies zeigt die Äquivalenz einer beliebigen Norm zur Norm $x \mapsto \|\alpha(x)\|_2$. Damit sind zwei beliebige Normen äquivalent.

∎