

an12: Konvergenz und Kompaktheit

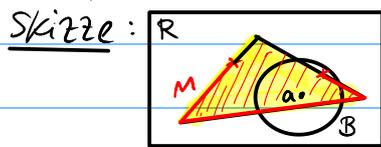
Stichworte: Vollständigkeit, allg. Banach-Fixpunktsatz, Kompaktheit, Heine-Borel

Literatur: [Forster], Kapitel 3

12.1. Einleitung: \mathbb{R}^n ist als metrischer Raum vollständig. Wir zeigen, dass abgeschlossene Teilmengen eines vollständigen metrischen Raums wieder vollständig sind, was einen neuen Blick auf den Banachschen Fixpunktsatz wirft. Weiter werden wir zum Kompaktheitsbegriff geführt, und wir zeigen den Satz von Heine-Borel, welcher besagt, dass die (Überdeckungs-)Kompakten Teilmengen im metrischen Raum \mathbb{R}^n genau die sind, die beschränkt und abgeschlossen sind.

12.2. Motivation: Sei $\emptyset \neq M \subseteq (\mathbb{R}, \delta)$, dann ist $(M, \delta_{M \times M})$ auch metrischer Raum. Für $a \in M$ ist dann eine Kugel in M um a :

$$B_{a,M}^\varepsilon := \{x \in \mathbb{R}; \delta(x,a) < \varepsilon\} \cap M = B_{a,\mathbb{R}}^\varepsilon \cap M.$$



Beobachtung: $B_{a,M}^\varepsilon$ offen in M ,
i. a. aber nicht in \mathbb{R} .

12.3. Bezeichnungen: in M relativ offen \Leftrightarrow offen in M
in M relativ abgeschlossen \Leftrightarrow abg. in M

12.4. Es gilt: $M \ni U$ offen in M $\Leftrightarrow \exists O \in \mathcal{O}(\mathbb{R}) : U = O \cap M$,
 $M \ni U$ abg. in M $\Leftrightarrow \exists A \in \mathcal{A}(\mathbb{R}) : U = A \cap M$.

12.5. Bem.: Sei $a \in M \subseteq \mathbb{R}$.

(1) $a \in \dot{M} \Leftrightarrow \forall k \in \mathbb{N} \exists x_k \in M \setminus \{a\}: x_k \rightarrow a$,

(2) $a \in \bar{M} \Leftrightarrow \forall k \in \mathbb{N} \exists x_k \in M: x_k \rightarrow a$.

Bew.: zu (1): " \Rightarrow ": $a \in \dot{M} \Rightarrow \exists x_k \in (U_a^{1/k} \setminus \{a\}) \cap M \Rightarrow x_k \rightarrow a$.

" \Leftarrow ": vgl. Def. HP in 11.14: In jeder Umg. von x_k liegen ∞ viele Folgenglieder $\Rightarrow a$ ist HP.

zu (2): $\bar{M} = M \cup \dot{M}$ aus (1). □

12.6. Satz: (\mathbb{R}, δ) vollständig, $M \subseteq \mathbb{R}$.

Beh.: M vollständig $\Leftrightarrow M$ abgeschlossen.

Bew.: " \Rightarrow ": Zeige $M = \bar{M}$ oder: $a \in \bar{M} \stackrel{12.5(2)}{\Rightarrow} \exists (x_n) \in M, x_n \rightarrow a \Rightarrow (x_n)$ ist CF
 $\Rightarrow a = \lim x_n \in M$, da M vollständig nach Vor.

" \Leftarrow ": (x_n) CF in $M \Rightarrow (x_n)$ CF in $\mathbb{R} \Rightarrow \exists a \in \mathbb{R}: x_n \rightarrow a \Rightarrow a \in \bar{M} \stackrel{\uparrow \text{Mabg.}}{=} M$. □

Wir erhalten weiter die allgemeine Version des Banachschen Fixpunktsatzes in vollständigen metrischen Räumen wie folgt.

12.7. Banachscher Fixpunktsatz (allg. Version):

Vor.: (\mathbb{R}, δ) vollständiger metrischer Raum, $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ Kontraktion mit Kontraktionsfaktor $p \in [0, 1[$.

Beh.: a) $\exists!$ Fixpunkt a von f .

b) Setze $x_0 \in \mathbb{R}$ beliebig, und $x_{k+1} := f(x_k)$ für alle $k \geq 0$.

Dann: $\delta(x_n, a) \leq \frac{p^n}{1-p} \delta(x_1, x_0)$, d.h. insb. $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$.

Bew.: Wie in 8.6 zeigt man, dass (x_n) eine CF ist.

Da \mathbb{R} vollständig, ex. $a = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n \in \mathbb{R}$. Wie dort zeigt man $f(a) = a$. □

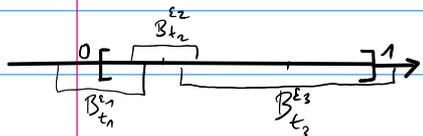
12.8. Bem.: Da der frühere Fixpunktsatz für Kontraktionen auf $U \subseteq \mathbb{R}^m$ formuliert ist, wo U abg. und beschr. ist (~~also kompakt nach 12.11~~), und somit vollständig nach 12.6, und (\mathbb{R}^m) B1.2A2.2 (\mathbb{R}^m ist vollständig), folgt die alte Version 8.6 auch aus 12.7.

Für bestimmte Anwendungen (z.B. Existenz von Extrema auf bestimmten Teilmengen des \mathbb{R}^n) reicht die Abgeschlossenheit oft nicht aus, wir benötigen dafür einen stärkeren Begriff wie folgt.

12.9. Def.: $M \subseteq \mathbb{R}$ heißt Kompakt (auch: "überdeckungskompakt"), falls gilt: Jede offene Überdeckung von M hat eine endliche Teilüberdeckung, \otimes
d.h. $M \subseteq \bigcup_{i \in I} O_i$ mit $O_i \in \mathcal{O}(\mathbb{R}) \Rightarrow \exists$ endlich viele O_{i_1}, \dots, O_{i_k} , die $i_1, \dots, i_k \in I$:
$$M \subseteq \bigcup_{j=1}^k O_{i_j} = O_{i_1} \cup \dots \cup O_{i_k}.$$

12.10. Bem.: Die Aussage \otimes wird manchmal missverstanden in der Form "Nur endlich viele Überdeckungs Mengen O_i überdecken M nur zum Teil" o.ä. Gemeint ist aber, dass stets bereits endlich viele Überdeckungs Mengen zur kompletten Überdeckung der Menge M ausreichen ("Teil" bezieht sich auf die Indexmenge I).

12.11. Bsp.: $M = [0, 1] \subseteq \mathbb{R}^1$, für $t \in [0, 1]$ bilden mit bel. $\varepsilon_t > 0$ die "Kugeln" $B_t^{\varepsilon_t} =]t - \varepsilon_t, t + \varepsilon_t[$ bereits eine Überdeckung von $[0, 1]$, denn $[0, 1] \subseteq \bigcup_{t \in [0, 1]} B_t^{\varepsilon_t}$.



Nun ist $[0, 1]$ Kompakt laut 12.11, also

$$\exists t_1, \dots, t_m \in [0, 1] \exists \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_m > 0: [0, 1] \subseteq \bigcup_{j=1}^m B_{t_j}^{\varepsilon_j} \quad [\text{anschaulichklar}]$$

Eine auf M stetige Funktion $f: M \rightarrow \mathbb{R}$ nimmt ihr

Minimum und Maximum an, vgl. Satz vom Minimum/Maximum An 9.30.

Als Anwendung des Zwischenwertsatzes erhält man, dass $f(M) \subseteq \mathbb{R}$ ein abg. I.V. ist.

12.12. Bsp.: $M =]0, 1[\subseteq \mathbb{R}^1$ ist nicht Kompakt, denn in der Überdeckung $]0, 1[\subseteq \bigcup_{n \in \mathbb{N}} B_{1/n}^{1/2n}$ kann keine endliche Teilüberdeckung ausgewählt werden, die zur Überdeckung von $]0, 1[$ bereits ausreichen würde.

Hier gibt es eine auf M stetige Funktion $f: M \rightarrow \mathbb{R}$, die kein

Maximum annimmt, z.B. $f: M \rightarrow \mathbb{R}, f(x) = \frac{1}{x}$.

12.13. Bsp.: Die Menge $M = [0, \infty[\subseteq \mathbb{R}^1$ ist nicht Kompakt, wie die Überdeckung $[0, \infty[\subseteq \bigcup_{m \in \mathbb{N}} B_m^{1 \cdot 1}$ zeigt. Die Funktion $f: M \rightarrow \mathbb{R}, f(x) = x$, nimmt kein Maximum an.

Im \mathbb{R}^n lässt sich Kompaktheit einfach topologisch beschreiben wie folgt.

12.14. Satz (von Heine - Borel):

Sei $M \subseteq \mathbb{R}^n$ und \mathbb{R}^n mit einer Metrik versehen, die assoziiert von einer Norm ist (OE also $\|\cdot\| = \|\cdot\|_\infty$).

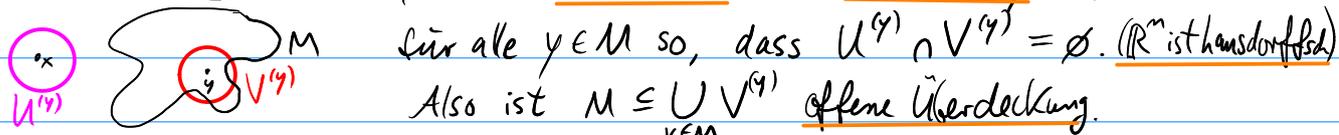
- Dann sind äquivalent:
- a) M ist kompakt,
 - b) M ist folgenkompakt,
 - d.h. jede Folge in M hat eine (in M) konvergente Teilfolge,
 - c) M ist beschränkt und abgeschlossen.

Bew. (Reinabschluss $a) \Rightarrow c) \Rightarrow b) \Rightarrow a)$:

Zu $a) \Rightarrow c)$: Sei M kompakt. (i): Mit $M \subseteq \mathbb{R}^n = \bigcup_{m \in \mathbb{N}} B_0^m$ folgt dann:

$\exists m_0 \in \mathbb{N} : M \subseteq \bigcup_{m \leq m_0} B_0^m = B_0^{m_0} \Rightarrow \|M\|_\infty \leq m_0$, also ist M beschränkt.

(ii): Sei $x \in \mathbb{R}^n \setminus M$ fest, wähle $U^{(y)} \in \mathcal{U}_x$ und $V^{(y)} \in \mathcal{U}_y$ offen



Da M kompakt ist, ex. $V^{(y_1)}, \dots, V^{(y_m)}$ mit $M \subseteq \bigcup_{j=1}^m V^{(y_j)}$.

Setze $\mathcal{U}_x \ni U := \bigcap_{j=1}^m U^{(y_j)}$, dies ist eine offene Umgebung von x.

Damit ist dann $U \cap M = \emptyset$, d.h. $U \subseteq \mathbb{R}^n \setminus M \Rightarrow \mathbb{R}^n \setminus M$ offen $\Rightarrow M$ abgeschlossen.

Zu $c) \Rightarrow b)$: Sei $(x_n) \in M$ Folge in M, da M beschr. ist die Folge beschränkt.

Laut Bolzano-Weierstraß 10.8 hat diese eine konvergente Teilfolge in \mathbb{R}^n ,

also $x_{n_k} \rightarrow a \in \mathbb{R}^n$, $a \in \bar{M} = M$ (da M abg.) $\Rightarrow (x_n)$ kgt. in M.

Zu $b) \Rightarrow a)$: (i): z.z.: M abg., also nach 12.6 vollständig.

Denn: $z \in \bar{M} \Rightarrow \exists x_n \rightarrow z$ (kgt.), $(x_n) \subseteq M$, und (x_n) hat nach b) eine in M konvergente Teilfolge (mit demselben GW) $\Rightarrow x_n \rightarrow z \in M$.

(ii) z.z.: M ist total beschränkt, d.h. $\forall \varepsilon > 0 \exists M_\varepsilon \subseteq M, M_\varepsilon$ endl.: $M \subseteq \bigcup_{a \in M_\varepsilon} B_a^\varepsilon$.

Ann: M wäre nicht " , d.h. $\exists \varepsilon > 0 \forall M_\varepsilon \subseteq M, M_\varepsilon$ endl. $\exists x \in M \setminus \bigcup_{a \in M_\varepsilon} B_a^\varepsilon$.

Wähle $x_1 \in M$ und x_k induktiv für $k \geq 2 : x_k \in M \setminus \bigcup_{j=1}^{k-1} B_{x_j}^\varepsilon$.

Dann gilt: $(x_n) \subseteq M$ mit $\delta(x_i, x_j) \geq \varepsilon$ für alle $i, j \in \mathbb{N}$, d.h. ist keine CF und auch keine Teilfolge, d.h. (x_n) hat keine konvergente Teilfolge im \mathbb{R}^n zu b) \perp

Benötigen (i) und (ii) für Schritt (iii) des (eigentlichen) Beweises:

(iii) z.z.: M ist kompakt (indirekt):

Für ein $K \subseteq \mathbb{R}$ nicht kompakt gilt: $\exists O_1 \subseteq O : K \subseteq \bigcup_{O \in O_1} O \Rightarrow \forall O_2 \subseteq O_1 \text{ endl.} : K \not\subseteq \bigcup_{O \in O_2} O$.

Sei dies so für M , dann O_1 geg. mit $M \subseteq \bigcup_{O \in O_1} O$.

• Zu $\varepsilon = 2^{-1}$ gilt nach (ii): $\exists M_1 \subseteq M \text{ endl.} : M \subseteq \bigcup_{a \in M_1} B_a^{2^{-1}} \rightarrow \forall O_2 \subseteq O_1 \text{ endl.} : M \not\subseteq \bigcup_{O \in O_2} O$

$\Rightarrow \exists x_1 \in M_1 \forall O_2 \subseteq O_1 \text{ endl.} : M \cap B_{x_1}^{2^{-1}} \not\subseteq \bigcup_{O \in O_2} O$, d.h. $M \cap B_{x_1}^{2^{-1}}$ nicht kp.

↳ Somit: $\forall a \in M_1 : B_a^{2^{-1}} \cap M \subseteq \bigcup_{O \in O_1} O$ für ein $O_1 \subseteq O$ endl. \rightarrow endl. viele $O \in O_1$ würden $M = \bigcup_{a \in M_1} B_a^{2^{-1}} \cap M$ überdecken \downarrow

• Zu $\varepsilon = 2^{-2}$ gilt nach (ii): $\exists M_2 \subseteq M \text{ endl.} : M \subseteq \bigcup_{a \in M_2} B_a^{2^{-2}}$, d.h. $M \cap B_{x_1}^{2^{-1}} \subseteq \bigcup_{a \in M_2} B_a^{2^{-2}}$

\Rightarrow ebenso $\exists x_2 \in M_2 \forall O_2 \subseteq O_1 \text{ endl.} : M \cap B_{x_1}^{2^{-1}} \cap B_{x_2}^{2^{-2}} \not\subseteq \bigcup_{O \in O_2} O$, d.h. $M \cap B_{x_1}^{2^{-1}} \cap B_{x_2}^{2^{-2}}$ nicht kp.

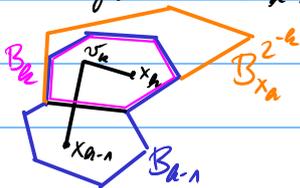
• Zu $\varepsilon = 2^{-k}$ gilt nach (ii): $\exists M_k \subseteq M \text{ endl.} : M \subseteq \bigcup_{a \in M_k} B_a^{2^{-k}}$, d.h. $M \cap B_{x_1}^{2^{-1}} \cap \dots \cap B_{x_{k-1}}^{2^{-(k-1)}} \subseteq \bigcup_{a \in M_k} B_a^{2^{-k}}$

\Rightarrow ebenso $\exists x_k \in M_k \forall O_2 \subseteq O_1 \text{ endl.} : M \cap B_{x_1}^{2^{-1}} \cap \dots \cap B_{x_k}^{2^{-k}} \not\subseteq \bigcup_{O \in O_2} O$,

d.h. $M \cap B_{x_1}^{2^{-1}} \cap \dots \cap B_{x_k}^{2^{-k}} = M \cap B_{x_k}^{2^{-k}}$ nicht kp.

Es ist $B_{x_k} \neq \emptyset$, sonst wäre $\emptyset = M \cap B_{x_k} \not\subseteq \bigcup_{O \in O_2} O$. Somit $\exists v_k \in B_{x_k}$ für $k \geq 2$.

Dann gilt: $\delta(x_{k-1}, x_k) \leq \delta(x_{k-1}, v_k) + \delta(v_k, x_k) \leq \frac{1}{2^{k-1}} + \frac{1}{2^k} < \frac{1}{2^{k-2}}$
 $\Rightarrow (x_k)$ ist eine CF.



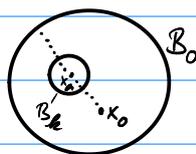
$$B_k = B_{x_{k-1}} \cap B_{x_k}^{2^{-k}}$$

Nach (i) gilt: $x_k \rightarrow x_0 \in M$.

Sei B_0 eine Kugel um x_0 .

Dann gibt es ein k so, dass $B_k \subseteq B_0$.

Wählt man insbesondere $B_0 \subseteq O \in O_1$



↳ dann $x_0 \in M$ wird von einem $O \in O_1$ offen überdeckt und $x_0 \in B_0$, für B_0 klein

so folgt $B_k \subseteq B_0 \subseteq O \in O_1$, also $M \cap B_k \subseteq O \in O_1$.

Setze $O_2 = \{O\} \subseteq O_1$ (ist endlich), also $M \cap B_k \subseteq \bigcup_{O \in O_2} O$, \downarrow gegen obige Konstruktion. \square

12.15. Bem.: Ein metrischer Raum ist genau dann Kompakt, wenn er vollständig und total beschränkt ist.
Der vorige Beweis kann dahingehend angepasst werden.

Die folgende Aussage ist ein "Schachtelungsprinzip" für Kompakte Mengen.

12.16. Satz: Vor.: (R, δ) metrischer Raum, $\emptyset \neq A_k \subseteq R$, $k \in \mathbb{N}$, A_k kompakt,
 $\forall k \in \mathbb{N} : A_k \supseteq A_{k+1}$.

Bih.: $\bigcap_{k=1}^{\infty} A_k \neq \emptyset$.

Bew.: Ann.: $\bigcap_{k=1}^{\infty} A_k = \emptyset \Rightarrow G\left(\bigcap_{k=1}^{\infty} A_k\right) = R$

$$\Rightarrow A_n \subseteq R = \bigcup_{k=1}^{\infty} \underbrace{G A_k}_{\text{offen}} \stackrel{A_n \text{ kp.}}{\Rightarrow} \exists k_0 : A_{k_0} \subseteq A_n \subseteq \bigcup_{k=1}^{k_0} G A_k = G A_{k_0} \Rightarrow A_{k_0} = \emptyset, \text{ \textcircled{u}.}$$

12.17. Bsp.: $\bigcap_{n \in \mathbb{N}} \left[-\frac{1}{n}, \frac{1}{n}\right] = \{0\}$, $\bigcap_{n \in \mathbb{N}} \{x \in \mathbb{R}_{>0} ; |x^2 - 2| \leq \frac{1}{n}\} = \{\sqrt{2}\}$,
aber $\bigcap_{n \in \mathbb{N}} \{x \in \mathbb{Q}_{>0} ; |x^2 - 2| \leq \frac{1}{n}\} = \emptyset$ (u): warum?