

Einführung in die Geometrie und Topologie

Dozent
DANIEL KASPROWSKI

Assistentin
ARUNIMA RAY

Mitschrift
MAXIMILIAN KESSLER

Version
20. Mai 2021 11:10

Zusammenfassung

Bei folgenden Vorlesungsnotizen handelt es sich um (inoffizielle) Mitschriften zur 'Einführung in die Geometrie und Topologie', die im Sommersemester 2021 an der Universität Bonn gehalten wird. Ich garantiere weder für Korrektheit noch Vollständigkeit dieser Notizen, und bin dankbar für jegliche Art von Korrektur, sowohl inhaltlich, als auch Tippfehler. Schreibt hierzu eine [Mail](#), oder nutzt das 'Issues' Feature auf [GitHub](#).

Bemerkungen oder andere Umgebungen, die nicht zum eigentlichen Vorlesungsinhalt gehören, wurden mit einem * gekennzeichnet. Sie werden nach eigenem Ermessen hinzugefügt, um weitere Details oder evtl. mündliche Anmerkungen beizufügen. Insbesondere sind diese wohl besonders fehleranfällig, also verlasst euch nicht auf sie. Im Zweifelsfall ignoriert sie einfach.

Manche Umgebungen sind mit einem [†] versehen. Das ist dann der Fall, wenn ihr Inhalt so, oder zumindest in sehr ähnlicher Form, in der Vorlesung vorkam (unter Umständen auch mündlich), ich aber die Umgebung der Aussage geändert habe. Das ist z.B. dann der Fall, wenn ich aus Aussagen, die einfach erwähnt werden, ein **Lemma**[†] mache, um sie hervorzuheben. Diese Teile der Mitschrift solltet ihr also *nicht* ignorieren, aber es kann

vorkommen, dass ich auch hier Fehler mache.

Weitere Informationen zu diesem Skriptum finden sich bei [GitHub](#) oder auf der [Vorlesungshomepage](#).

Inhaltsverzeichnis

Übersicht der Vorlesungen	4
1 Der Erweiterungssatz von Tietze	6
2 Der Metrisierungssatz von Urysohn	10
Stichwortverzeichnis	13

Übersicht der Vorlesungen

Vorlesung 1 (Di 18 Mai 2021 12:20) **5**

Beweis des Lemmas von Urysohn. Urysohn für beliebige Intervalle.
Satz von Tietze. 'Quetschen' von stetigen Funktionen auf normalen Räumen. Beweis des Satz von Tietze. Metrisierungssatz von Urysohn.

Vorlesung 2 (Do 20 Mai 2021 10:07) **10**

Beweis des Metrisierungssatzes von Urysohn.

Wir erinnern uns daran, dass wir gerade dabei waren, ?? zu beweisen.

Vorlesung 1
Di 18 Mai 2021 12:20

Lemma 0.1. Sei X ein normaler Raum, $A \subseteq X$ abgeschlossen und $U \subseteq X$ offen mit $A \subseteq U$. Dann existiert $V \subseteq X$ offen mit

$$A \subseteq V \subseteq \bar{V} \subseteq U.$$

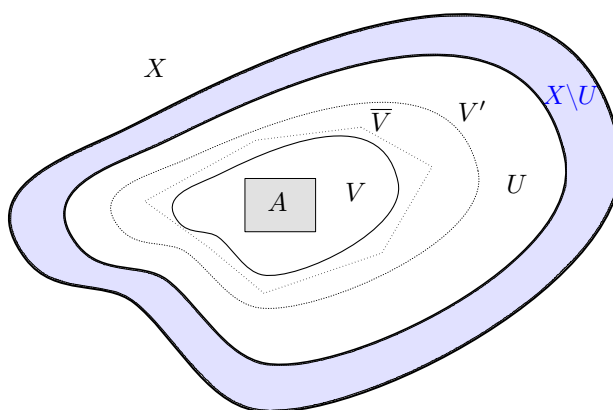


Abbildung 1: Skizze zu Lemma 0.1

Beweis. Wegen U offen ist $X \setminus U$ abgeschlossen. Wegen X normal gibt es V, V' offen mit $A \subseteq V$ und $(X \setminus U) \subseteq V'$ mit $V \cap V' = \emptyset$. Nun ist

$$A \subseteq V \subseteq X \setminus V' \subseteq U.$$

nach Definition des Abschlusses ist nun $A \subseteq V \subseteq \bar{V} \subseteq X \setminus V' \subseteq U$. \square

Beweis von ?? (??).

Ziel. $\forall r \in \mathbb{Q} \cap [0, 1]$ konstruiere $V_r \subseteq X$ offen, sodass

1. $A \subseteq V_0$
2. $B \subseteq X \setminus V_1$
3. $r < r' \Rightarrow \bar{V}_r \subseteq V_{r'}$

Dies genügt, denn dann wissen wir mit ??, dass

$$\begin{aligned} \exists f : X &\rightarrow [0, 1] \text{ stetig} \\ f(x) &= 0 \quad \forall x \in V_0 \supseteq A \\ f(x) &= 1 \quad \forall x \in X \setminus V_1 \supseteq B \end{aligned}$$

Wähle hierzu eine Abzählung p_1, p_2, \dots von $\mathbb{Q} \cap [0, 1]$, sodass $p_1 = 1$ und $p_2 = 0$. Definiere nun $\{V_r\}$ rekursiv, wobei wir auch induktiv die Invariante erhalten wollen, dass $r < r' \Rightarrow \bar{V}_r \subseteq V_{r'}$.

- $p_1 = 1$. Setze $V_1 := X \setminus B$ (offen, weil B abgeschlossen ist)
- $p_2 = 0$. Nach Lemma 0.1 mit $A = A$ und $U = X \setminus B$ finden wir V_0 offen mit

$$A \subseteq V_0 \subseteq \bar{V}_0 \subseteq X \setminus B =: V_1.$$

- Sei $n \geq 3$, dann sind also $V_{p_1}, V_{p_2}, \dots, V_{p_{n-1}}$ schon definiert. Es ist $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ wohlgeordnet, weil es sich um eine endliche Menge handelt, also gibt es unter ihnen einen direkten Vorgänger p_i von p_n , und einen direkten Nachfolger p_j von p_n .

Es könnte z.B. $n = 5$ sein mit

$$\begin{array}{c|c|c|c|c} p_1 & p_2 & p_3 & p_4 & p_5 \\ \hline 1 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{8}{9} & \frac{3}{5} \end{array}$$
 Dann ist die Menge als $\{0, \frac{1}{2}, \frac{3}{5}, \frac{8}{9}, 1\}$ geordnet, und wir sehen $p_i = \frac{1}{2} < \frac{3}{5} < \frac{8}{9} = p_j$.

Verwende nun **Lemma 0.1** mit $A = \overline{V_{p_i}}$ und $U = V_{p_j}$, (hier ist wichtig, dass wegen $p_i < p_j$ bereits $\overline{V_{p_i}} \subseteq V_{p_j}$ gilt, sonst können wir das Lemma nicht anwenden.)

Also finden wir V mit $\overline{V_{p_i}} \subseteq V \subseteq \overline{V} \subseteq V_{p_j}$. Man prüft leicht, dass wir so auch die Invariante der Induktion erhalten haben.

Also haben wir wie gewünscht die V_i gefunden, und somit unsere Funktion. \square

Korollar 0.2 (Urysohn mit beliebigem Intervall). Sei X ein normaler Raum und seien $A, B \subseteq X$ disjunkt und abgeschlossen, sowie $a \leq b \in \mathbb{R}$ beliebig. Dann

$$\begin{aligned} \exists f : X &\rightarrow [a, b] \\ f(A) &= \{a\} \\ f(B) &= \{b\} \end{aligned}$$

Beweis. Zunächst verwenden wir Urysohn, um eine stetige Funktion $g : X \rightarrow [0, 1]$ zu erhalten mit $f(A) = \{0\}$ und $f(B) = \{1\}$, dann verknüpfen wir mit der stetigen Abbildung

$$h : \begin{array}{ccc} [0, 1] & \longrightarrow & [a, b] \\ t & \longmapsto & (1-t)a + tb \end{array}$$

und wir erhalten sofort die gewünschten Eigenschaften, indem wir $f = h \circ g$ setzen. \square

1 Der Erweiterungssatz von Tietze

Wir sehen jetzt das ?? in Action:

Satz 1.1 (Erweiterungssatz von Tietze). Sei X ein normaler Raum und $A \subseteq X$ abgeschlossen. Jede stetige Funktion $f : A \rightarrow [-1, 1]$ lässt sich fortsetzen zu einer stetigen Funktion $\bar{f} : X \rightarrow [-1, 1]$, d.h. $\bar{f}|_A \equiv f$.

Bemerkung. Das Urysohn'sche Lemma ist ein Spezialfall des **Erweiterungssatz von Tietze**:

Sei X normal und $B, C \subseteq X$ abgeschlossen, disjunkt. Dann betrachte

die Funktion

$$f : \begin{cases} B \cup C & \longrightarrow & [-1, 1] \\ B & \longmapsto & -1 \\ C & \longmapsto & 1 \end{cases}$$

Frage. Gibt es eine Fortsetzung $\bar{f} : X \rightarrow [-1, 1]$?

Für jede solche Fortsetzung muss auch $\bar{f}|_B = f$, also $\bar{f}(B) = -1$ und $\bar{f}(C) = 1$ gelten, also genau das, was wir von Urysohn fordern. Allerdings sagt uns der **Erweiterungssatz von Tietze** genau, dass wir solche eine Fortsetzung finden.

Beweis von Satz 1.1 (Erweiterungssatz von Tietze).

Beweisstrategie. Wir konstruieren eine Folge stetiger Funktionen

$\{s_n : X \rightarrow [-1, 1]\}_{n \geq 1}$, sodass

- (i) $\{s_n\}$ konvergiert **gleichmäßig** gegen eine Funktion $s : X \rightarrow [-1, 1]$,
d.h. für jedes $\varepsilon > 0$ existiert $N \in \mathbb{N}$, sodass

$$\forall x \in X, n \geq N : \quad d(s_n(x), s(x)) < \varepsilon.$$

Weil $\{s_n\}$ gleichmäßig konvergiert, ist s stetig (Übungsblatt 5, Aufgabe 3 (iv)).

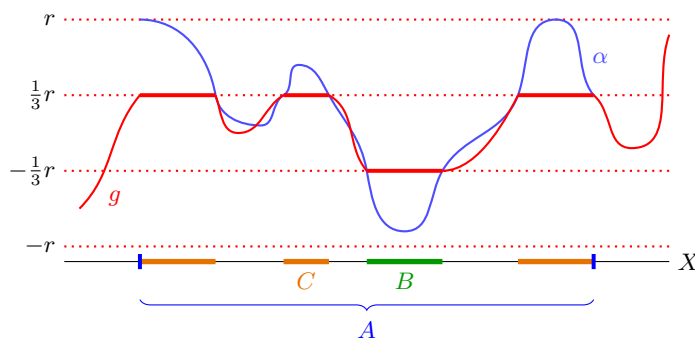
- (ii) $s|_A = f$

Dazu benötigen wir erstmal einige Lemmata, die wir im folgenden erarbeiten. \square

Lemma 1.2. Sei X normal und $A \subseteq X$ abgeschlossen. Sei $\alpha : A \rightarrow [-r, r]$ für $r \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ stetig. Dann existiert $g : X \rightarrow [-\frac{1}{3}r, \frac{1}{3}r]$ stetig mit $|\alpha(a) - g(a)| \leq \frac{2}{3}r$ für $a \in A$.

Beweis. Setze $B := \alpha^{-1}([-\frac{1}{3}r, \frac{1}{3}r])$ und $C := \alpha^{-1}([\frac{1}{3}r, r])$. Wegen α stetig sind B, C abgeschlossen, und sie sind auch disjunkt, weil die Intervalle disjunkt sind. Nach **Urysohn mit beliebigem Intervall** finden wir also eine stetige Funktion

$$\begin{aligned} g : X &\rightarrow \left[-\frac{1}{3}r, \frac{1}{3}r\right] \\ g(B) &= \left\{-\frac{1}{3}r\right\} \\ g(C) &= \left\{\frac{1}{3}r\right\} \end{aligned}$$



Behauptung 1. g erfüllt die Bedingungen unseres Lemmas, d.h.

$$|\alpha(a) - g(a)| \leq \frac{2}{3}r \quad \forall a \in A.$$

- Unterbeweis.*
- Sei $a \in B$, Dann ist $\alpha(a) \in [-r, -\frac{1}{3}r]$ und $g(a) = -\frac{1}{3}r$, also gilt die Ungleichung.
 - Sei $a \in C$. Dann ist $\alpha(a) \in [\frac{1}{3}r, r]$ und $g(a) = \frac{1}{3}r$, also, also gilt die Ungleichung.
 - Sei $a \in A \setminus (B \cup C)$. Dann ist $\alpha(a), g(a) \in [-\frac{1}{3}r, \frac{1}{3}r]$, und damit ist der Abstand auch höchstens $\frac{2}{3}r$.

■

□

Bemerkung*. In der Vorlesung kam die Frage auf, ob wir manche der gerade bewiesenen Resultate auch auf die Analysis übertragen können, indem wir z.B. den Fixpunktsatz von Banach anwenden.

Fortsetzung des Beweises des **Erweiterungssatz von Tietze**. Definiere die Folgen s_n induktiv. Dazu

Schritt 1: Verwende **Lemma 1.2** mit $\alpha = f$ und $r = 1$, also erhalten wir

$$g_1 : X \rightarrow \left[-\frac{1}{3}r, \frac{1}{3}r \right].$$

setzt mit $|f(a) - g(a)| \leq \frac{2}{3}$ für jedes $a \in A$. Setze $s_1 = g_1$.

Induktionsschritt Angenommen, wir haben schon stetige Funktion g_1, \dots, g_n auf X mit

$$g_i : X \rightarrow \left[-\left(\frac{2}{3}\right)^{i-1} \cdot \frac{1}{3}, \left(\frac{2}{3}\right)^{i-1} \cdot \frac{1}{3} \right].$$

und

$$\left| f(a) - \sum_{i=1}^n g_i(a) \right| \leq \left(\frac{2}{3}\right)^n \quad \forall a \in A.$$

Verwende nun wieder **Lemma 1.2** mit $\alpha = f - \sum_{i=1}^n g_i|_A$ und $r = \left(\frac{2}{3}\right)^n$.

Es gibt also

$$g_{n+1} : X \rightarrow \left[-\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^n, \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^n \right].$$

Wir erhalten nun

$$\begin{aligned} \left| f(a) - \sum_{i=1}^n g_i(a) - g_{n+1}(a) \right| &= \left| f(a) - \sum_{i=1}^{n+1} g_i(a) \right| \\ &\leq \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^n = \left(\frac{2}{3}\right)^{n+1} \end{aligned}$$

Nun definiere

$$s_{n+1} := \sum_{i=1}^{n+1} g_i : X \rightarrow \mathbb{R}.$$

Behauptung 1. s_n hat Bild in $[-1, 1]$ für jedes $n \in \mathbb{N}$.

darüber
nachden-
ken

Unterbeweis.

$$\begin{aligned}
 |s_n(x)| &= \left| \sum_{i=1}^n g_i(x) \right| \leq \sum_{i=1}^n |g_i(x)| \\
 &\leq \sum_{i=1}^n \left(\frac{2}{3}\right)^{i-1} \cdot \frac{1}{3} \\
 &\leq \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{2}{3}\right)^{i-1} \cdot \frac{1}{3} \\
 &= \frac{\frac{1}{3}}{1 - \frac{2}{3}} = 1
 \end{aligned}$$

Die andere Schranke zeigt man völlig analog. ■

Behauptung 2. Die Folge $\{s_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ konvergiert gleichmäßig gegen s .

Unterbeweis. Für $k > n$ ist

$$\begin{aligned}
 |s_k(x) - s_n(x)| &= \left| \sum_{i=n+1}^k g_i(x) \right| \\
 &\leq \sum_{i=n+1}^{n+1} \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^{i-1} \\
 &= \sum_{i=n+1}^{\infty} \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^{i-1} \\
 &= \frac{1}{3} \cdot \frac{\left(\frac{2}{3}\right)^n}{1 - \frac{2}{3}} \\
 &= \left(\frac{2}{3}\right)^n
 \end{aligned}$$

- (i) Für jedes $x \in X$ ist $\{s_n(x)\}_{n \geq 1}$ eine Cauchy-Folge, also konvergiert sie zu einem Punkt $s(x) \in [-1, 1]$.
- (ii) Intuitiv reicht es für gleichmäßige Stetigkeit schon zu sehen, dass in obiger Abschätzung kein x vorkommt. Genauer:
Sei $\varepsilon > 0$, so $\exists N \in \mathbb{N}$ mit $\forall n > N \Rightarrow \left(\frac{2}{3}\right)^n < \varepsilon$. Dann ist

$$\begin{aligned}
 |s(x) - s_n(x)| &= \left| \lim_{k \rightarrow \infty} s_k(x) - s_n(x) \right| \\
 &= \lim_{k \rightarrow \infty} |s_k(x) - s_n(x)| \\
 &\leq \left(\frac{2}{3}\right)^n \\
 &< \varepsilon
 \end{aligned}$$

also ist die Konvergenz gleichmäßig, und s ist stetig. ■

Setze nun $\bar{f} := s$, dann überprüfen wir

Behauptung 3. \bar{f} ist eine Fortsetzung von f , d.h. $\bar{f}|_A = f$.

Unterbeweis. Es ist

$$|f(a) - s_n(a)| = \left| f(a) - \sum_{i=1}^n g_i(a) \right| \leq \left(\frac{2}{3}\right)^n$$

also

$$\lim_{n \rightarrow \infty} |f(a) - s_n(a)| \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{2}{3}\right)^n = 0$$

Also ist

$$s(a) := \lim_{n \rightarrow \infty} s_n(a) = f(a).$$

für jedes $a \in A$. ■

Wir haben also eine Fortsetzung gefunden, und sind damit fertig. □

Korollar 1.3 (Version des Satzes von Tietze). Sei X ein normaler Raum und $A \subseteq X$ abgeschlossen. Dann gilt folgendes:

1. Jede stetige Funktion $f : A \rightarrow [a, b]$ lässt sich zu einer Funktion $\bar{f} : X \rightarrow [a, b]$ fortsetzen.
2. Jede stetige Funktion $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ lässt sich fortsetzen zu einer Funktion $\bar{f} : X \rightarrow \mathbb{R}$.

Beweis. Übung. □

2 Der Metrisierungssatz von Urysohn

Satz 2.1 (Metrisierungssatz von Urysohn). Jeder normale Raum mit abzählbarer Basis der Topologie ist metrisierbar.

Beweis.

Beweisstrategie. Schritt 1: Betrachte $\prod_{\mathbb{N}} [0, 1]$ in der Produkttopologie und zeige, dass der Raum metrisierbar ist. Dieser Raum heißt **Hilbert-Würfel**.

Schritt 2: Sei X normal mit abzählbarer Basis, wir zeigen, dass wir eine Einbettung $F : X \rightarrow \prod_{\mathbb{N}} [0, 1]$ finden. Dann sind wir fertig, da

$$X \cong F(X) \subseteq \prod_{\mathbb{N}} [0, 1].$$

ein Unterraum eines metrischen Raumes ist. □

Vorlesung 2
Do 20 Mai 2021 10:07

Lemma 2.2 (Hilbert-Raum ist metrisierbar). Der Raum $\prod_{i=1}^{\infty} [0, 1]$ ist metrisierbar (in der Produkttopologie).

Beweis. Übung. Die Metrik ist hierbei gegeben durch:

$$D((x_n)_{n \in \mathbb{N}}, (y_n)_{n \in \mathbb{N}}) = \sup \left\{ \frac{|x_n - y_n|}{n} \mid n \in \mathbb{N} \right\}.$$

□

Lemma 2.3. Sei X ein normaler Raum mit abzählbarer Basis

$$\mathcal{B} = \{B_1, B_2, \dots\}.$$

Dann gibt es eine abzählbare Familie

$$\{f_i : X \rightarrow [0, 1] \mid f_i \text{ stetig}\}.$$

sodass für jedes $x \in X$ und jede offene Umgebung U von x ein $i \in \mathbb{N}$

existiert, sodass $f_i(x) = 1$ und $f_i(y) = 0$ für $y \notin U$.

Bemerkung. Wir wissen schon, dass X normal $\Rightarrow X$ vollständig regulär, dass wir also solche Funktionen finden, ist bereits klar. Das wichtige am Beweis ist, dass wir abzählbar viele Funktionen finden können, die das schon für alle (!) Punkte tun.

Beweis von Lemma 2.3. Für jedes n, m mit $|B_n| \subseteq B_m$ wenden wir das ?? an, also gibt es Funktionen

$$\begin{aligned} g_{n,m} &: X \rightarrow [0, 1] \\ g_{n,m}(\overline{B_n}) &= \{1\} \\ g_{n,m}(X \setminus B_m) &= \{0\} \end{aligned}$$

Wir stellen zudem fest, dass diese Familie von Funktionen abzählbar ist, wegen $\mathbb{N} \times \mathbb{N} \cong \mathbb{N}$.

Behauptung 1. Die $(g_{n,m})_{n,m \in \mathbb{N}}$ erfüllen bereits die gewünschte Bedingung.

Unterbeweis. Sei $x \in X$ mit einer Umgebung $x \in U$ gegeben. Da \mathcal{B} eine Basis ist, finden wir $m \in \mathbb{N}$ mit $x \in B_m \subseteq U$, da U offen ist. Da X normal ist, finden wir zudem eine offene Menge V mit $x \in V \subseteq \overline{V} \subseteq B_m$ (Lemma 0.1, wir erinnern uns, dass Punkte in normalen Räumen abgeschlossen sind nach ??). Analog finden wir nun $B_n \in \mathcal{B}$ mit $x \in B_n \subseteq V$, erneut, weil \mathcal{B} eine Basis ist.

Dann ist $\overline{B_n} \subseteq \overline{V} \subseteq B_m$, und $g_{n,m}(x) = 1$ wegen $x \in B_n \subseteq \overline{B_n}$ und $g_{n,m}(y) = 0$ für $y \notin U$, da dann $y \notin B_m$. ■

□

Bemerkung*. Für den Beweis von Satz 2.1 brauchen wir nicht wirklich, dass wir eine abzählbare Basis finden, sondern es genügt die Eigenschaft ebigen Lemmas. Die abzählbare ist jedoch die einfachste Eigenschaft das zu garantieren.

Beweis des Metrisierungssatz von Urysohn. Seien $(f_i : X \rightarrow [0, 1])_{i \in \mathbb{N}}$ wie in Lemma 2.3. Definiere

$$F : \begin{cases} X & \longrightarrow \prod_{i=1}^{\infty} [0, 1] \\ x & \longmapsto (f_i(x))_{i \in \mathbb{N}} \end{cases}$$

Nach der universellen Eigenschaft der Produkttopologie ist f stetig.

Behauptung 1. F ist eine Einbettung (d.h. ein Homöomorphismus mit dem Bild, siehe ??).

Unterbeweis. Wir zeigen, dass F injektiv und $F : X \rightarrow F(X)$ offen ist, dann ist F eine Einbettung.

- Seien $x \neq y \in X$. Da X normal ist, finden wir eine offene Menge $x \in U$, $y \notin U$ (erneut, indem wir uns erinnern, dass normale Räume Hausdorff sind, und dann ?? anwenden). Wegen Lemma 2.3 gibt es also $n \in \mathbb{N}$ mit $f_n(x) \subseteq f_n(U) = 1$ und $f_n(X \setminus U) = 0$, also

$$f_n(x) = 1 \neq f_n(y) \Rightarrow F(x) \neq F(y).$$

Also ist F injektiv.

- Sei $U \subseteq X$ offen. Wir zeigen: $F(U) \subseteq \prod_{\mathbb{N}}$ ist offen. Sei $z \in F(U)$ mit (eindeutigem) Urbild $x \in U$. Wir konstruieren eine Menge $V \subseteq \prod_{\mathbb{N}}[0, 1]$ offen, sodass $z \in V \cap F(X) \subseteq F(U)$, dann ist $F(U)$ offen in $F(X)$.

Erneut nach **Lemma 2.3** erhalten wir ein n mit $f_n(x) = 1$ und $f_n(X \setminus U) = 0$. Setze nun

$$V = [0, 1] \times \dots \times (0, 1] \times [0, 1] \times \dots$$

als offene Teilmenge von $\prod_{\mathbb{N}}[0, 1]$, wobei $(0, 1]$ im n -ten Faktor stehe.

Behauptung 2. $V \cap F(X) \subseteq F(U)$

Unterbeweis. Sei $z' = F(x') \in V \cap F(X)$. Es ist $z' \in V$, also $z'_n := f_n(x') \neq 0$, allerdings wissen wir auch $f_n(X \setminus U) = 0$, d.h. $x' \notin X \setminus U$, also folgt $x' \in U$ und somit $z' = F(x') \in F(U)$. ■

Also ist $F(U)$ offen in $F(X)$ und somit $F: X \rightarrow F(X)$ offen.

Also ist $F: X \rightarrow F(X)$ offen und injektiv, und somit eine Einbettung. ■

Nun stellen wir also fest, dass $X \cong F(X)$ (wegen der Einbettung), aber $F(X) \subseteq \prod_{\mathbb{N}}[0, 1]$ ist metrisierbar als Teilraum eines metrisierbaren Raums, also ist X metrisierbar. □

Noch erwähnen, dass $f_n(x) \in V$ wegen halboffenem Intervall an der Stelle im Beweis .

Bemerkung[†]. Wo haben wir jetzt wirklich benutzt, dass das Produkt abzählbar war? Man überlegt sich, dass wir den exakt gleichen Beweis für jede Kardinalität einer Basis hätten durchführen können, um nach $\prod_{\aleph} [0, 1]$ einzubetten. Das wirkliche Problem ergibt sich dann erst, wenn wir zeigen (in der Übung), dass $\prod_{\mathbb{N}} [0, 1]$ metrisierbar ist. Es stellt sich heraus, dass das nur für $\aleph \leq \omega$, dh. für abzählbare Indexmengen der Fall ist.

test

Stichwortverzeichnis

Hilbert-Würfel, **10**

Konvergenz
gleichmäßige, **7**