

Einführung in die Geometrie und Topologie

Dozent
DR. DANIEL KASPROWSKI

Mitschrift
MAXIMILIAN KESSLER

Version
5. Mai 2021 21:32

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.

Bemerkungen, die nicht zum eigentlichen Vorlesungsinhalte gehören, wurden mit einem * gekennzeichnet. Sie werden nach eigenem Ermessen hinzugefügt, um weitere Details oder evtl. mündliche Anmerkungen beizufügen.

Weitere Informationen finden sich bei [GitHub](#) oder auf der [Vorlesungs-homepage](#).

Inhaltsverzeichnis

Übersicht der Vorlesungen	3
0 Motivation und Überblick	4
1 Metrische Räume	4
2 Topologische Räume	7
3 Quotientenräume	13
4 Trennungsaxiome	18
5 Kompaktheit	21
6 Basen und Subbasen	31
7 Produkte	34
Stichwortverzeichnis	50

Übersicht der Vorlesungen

Vorlesung 1 (Di 13 Apr 2021 12:16)	4
Metrische Räume. Umgebungen, offene Mengen, Stetigkeit. Topologische Räume. Metrisierbarkeit.	
Vorlesung 2 (Do 15 Apr 2021 10:14)	9
Äquivalente Metriken. Abgeschlossene Mengen. Teilraumtopologie. Homöomorphismen. Quotientenräume und -topologie.	
Vorlesung 3 (Di 20 Apr 2021 12:16)	15
Torus, Kleinsche Flasche, Reeller Projektiver Raum. Trennungsaxiome: Hausdorff, normale und reguläre Räume. Kompaktheit.	
Vorlesung 4 (Do 22 Apr 2021 10:15)	22
Eigenschaften kompakter Hausdorffräume. Gerade mit zwei Ursprüngen. Heine-Borel. Homöomorphismen.	
Vorlesung 5 (Di 27 Apr 2021 12:16)	29
Weiteres zum reellen projektiven Raum und zu kompakten Hausdorffräumen. Basen, Subbasen. Erzeugte Topologie. Satz von Alexander.	
Vorlesung 6 (Do 29 Apr 2021 10:01)	33
Endliche Produkte. Projektionen auf Komponenten. Universelle Eigenschaft des Produkts. Produkte von kompakten und von Hausdorff-Räumen. Diagonaleigenschaft. Unendliche Produkte.	
Vorlesung 7 (Di 04 Mai 2021 12:12)	41
Universelle Eigenschaft unendlicher Produkte. Satz von Tychonoff. Abschluss, Dichtheit. Einbettungen. Kompaktifizierung. Vollständige Regularität. Universelle Eigenschaft der Stone-Čech-Kompaktifizierung. Fortsetzung stetiger Funktionen.	

Organisatorisches

- Die Vorlesung wird aufgezeichnet.
- Wir duzen uns.
- Für die Übungen muss man sich auf eCampus anmelden, ab Do, 20:00 Uhr (Do 15 Apr 2021 20:00 Uhr)
- Die Übungsblätter werden Donnerstag zur Verfügung gestellt und werden nach 10 Tagen am Montag, 10 Uhr abgegeben.
- Es wird eine Fragestunde um Donnerstag, 16 Uhr geben.
- Es wird kein Skript geben, allerdings werden die geschriebenen Notizen auf eCampus zur Verfügung gestellt.
- Die Vorlesung orientiert sich an der vom letzten Jahr.
- Für Literatur siehe die 3 Vorschläge auf der Homepage

0 Motivation und Überblick

In der Topologie studieren wir topologische Räume. Diese verallgemeinern metrische Räume. Wir wollen zwei metrische Räume X, Y als 'gleich' ansehen, wenn es stetige, zueinander inverse Abbildungen $X \rightarrow Y, Y \rightarrow X$ gibt.

Beispiel. Betrachte ein Quadrat und einen Kreis, wir können sie durch Streckung aufeinander abbilden. Gleiches gilt für eine Tasse und einen Donut.

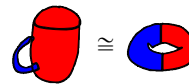
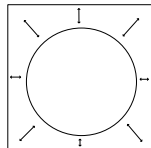


Abbildung 1: Beispiele 'gleicher' metrischer Räume (homöomorph)

Idee. Räume sind gewissermaßen aus 'Knete'.

Ziel. Wann sind zwei Räume gleich?

Dazu werden wir algebraische Invarianten verwenden.

Beispiel. \mathbb{R}^n und \mathbb{R}^m sind nicht 'gleich' für $n \neq m$.

Der Aufbau ist wie folgt:

1. Teil Grundlagen
2. Teil erste Invarianten: Fundamentalgruppe (dazu Überlagerungen)

1 Metrische Räume

Definition 1.1 (Metrik). Eine **Metrik** auf einer Menge X ist eine Funktion $d : X \times X \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ mit folgenden Eigenschaften:

- (i) $d(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$
- (ii) $d(x, y) = d(y, x) \quad \forall x, y \in X$
- (iii) (Dreiecksungleichung) $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$.

Ein **Metrischer Raum** ist ein Paar (X, d) aus einer Menge X und einer Metrik d auf X .

Definition 1.2 (Stetigkeit). Seien (X, d) und (X', d') zwei metrische Räume. Dann ist eine Funktion $f : X \rightarrow Y$ **stetig in $x \in X$** , falls

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall x' : d(x, x') < \delta \Rightarrow d'(f(x), f(x')) < \varepsilon.$$

Eine Funktion f heißt **stetig**, wenn sie in jedem Punkt $x \in X$ stetig



Abbildung 2: Definition von Stetigkeit in metrischen Räumen

Beispiel. • Sei V ein reeller Vektorraum mit Norm $\|\cdot\|$. Dann definiert

$$d(v, w) := \|v - w\|.$$

eine Metrik auf V . Insbesondere ist \mathbb{R}^n mit euklidischer Norm

$$\|(x_1, \dots, x_n)\|_2 = \sqrt{x_1^2 + \dots + x_n^2}.$$

dadurch ein metrischer Raum.

- Ist (X, d) ein metrischer Raum und $Y \subseteq X$ eine Teilmenge, dann ist $(Y, d|_{Y \times Y})$ ein metrischer Raum.
- Sei X eine Menge. Dann ist

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

eine Metrik auf X , genannt die **diskrete Metrik**.

Notation. Sei X ein metrischer Raum. Für $x \in X$ und $\varepsilon > 0$ setzen wir

$$U(x, \varepsilon) := \{y \in X \mid d(x, y) < \varepsilon\}.$$

und nennen dies den **offenen ε -Ball um x**

Beobachte. Sei $f : (X, d_X) \rightarrow (Y, d_Y)$ eine Funktion, $x \in X$ sowie $\varepsilon, \delta > 0$. Dann sind äquivalent:

- 1) $\forall x' \in X$ mit $d_X(x', x) < \delta$ gilt $d_Y(f(x'), f(x)) < \varepsilon$

2) Es ist $f(U(x, \delta)) \subseteq U(f(x), \varepsilon)$

Definition 1.3 (Umgebung). Sei X ein metrischer Raum, $U \subseteq X$ und $x \in X$. Dann heißt U **Umgebung von x** , falls ein $\varepsilon > 0$ existiert, sodass $U(x, \varepsilon) \subseteq U$.

Satz 1.4 (Urbilder von Umgebungen). Sei $f : X \rightarrow Y$ eine Abbildung zwischen metrischen Räumen und sei $x \in X$. Dann ist f stetig in x genau dann, wenn für alle Umgebungen V um $f(x)$ in Y das Urbild $f^{-1}(V)$ eine Umgebung von x ist.

Beweis. '⇒' Sei V eine Umgebung von $f(x)$. Dann $\exists \varepsilon > 0$ mit $U(f(x), \varepsilon) \subseteq V$. Da f stetig ist, $\exists \delta > 0$, sodass $f(U(x, \delta)) \subseteq U(f(x), \varepsilon) \subseteq V$. Also ist $U(x, \delta) \subseteq f^{-1}(V)$ und somit ist $f^{-1}(V)$ eine Umgebung von x .

'⇐' Sei $\varepsilon > 0$. Dann ist $U(f(x), \varepsilon)$ eine Umgebung von $f(x)$. Also ist $f^{-1}(U(f(x), \varepsilon))$ eine Umgebung von x , also $\exists \delta > 0$ mit $U(x, \delta) \subseteq f^{-1}(U(f(x), \varepsilon))$. Also wie gewünscht $f(U(x, \delta)) \subseteq U(f(x), \varepsilon)$. \square

Definition 1.5 (Offene Mengen). Sei X ein metrischer Raum. Eine Teilmenge $U \subseteq X$ heißt **offen**, falls sie Umgebung all ihrer Punkte ist, d.h. $\forall x \in U \exists \varepsilon > 0$ mit $U(x, \varepsilon) \subseteq U$.

Bemerkung. $U(x, \varepsilon)$ ist offen.

Beweis. Für alle $y \in U(x, \varepsilon)$ ist

$$U(y, \underbrace{\varepsilon - d(x, y)}_{>0}) \subseteq U(x, \varepsilon).$$

nach der Dreiecksungleichung. \square

Satz 1.6 (Urbilder offener Mengen sind offen). Eine Abbildung $f : X \rightarrow Y$ zwischen metrischen Räumen ist stetig genau dann, wenn $\forall U \subseteq Y$ offen auch das Urbild $f^{-1}(U)$ offen in X ist.

Beweis. '⇒' Sei $U \subseteq Y$ eine offene Teilmenge und $x \in f^{-1}(U)$ beliebig. Dann ist $f(x) \in U$ und somit ist U eine Umgebung von $f(x)$. Da f stetig ist, ist $f^{-1}(U)$ eine Umgebung von x nach **Satz 1.4**. Also ist $f^{-1}(U)$ offen, da x beliebig war.

'⇐' Sei $x \in X$, V eine Umgebung von $f(x)$. Dann $\exists \varepsilon > 0$ mit $U(f(x), \varepsilon) \subseteq V$. Nach Annahme ist $f^{-1}(U(f(x), \varepsilon))$ offen. Also gibt es ein $\delta > 0$ mit $U(x, \delta) \subseteq f^{-1}(U(f(x), \varepsilon)) \subseteq f^{-1}(V)$. Also ist $f^{-1}(V)$ eine Umgebung von x .

Damit ist f stetig nach **Satz 1.4** \square

Satz 1.7 (Offene Mengen in metrischen Räumen). Sei X ein metrischer Raum. Dann gilt:

- 1) Die leere Menge \emptyset und X sind offen

- 2) $\forall U_1, \dots, U_n \subseteq X$ offen ist auch $\bigcap_{i=1}^n U_i$ offen.
 3) Für jede Familie $\{U_i\}_{i \in I}$ von offenen Mengen ist auch $\bigcup_{i \in I} U_i$ offen.

Warnung. Eigenschaft 2) gilt nicht für unendliche Schnitte. Es ist $(-\frac{1}{n}, \frac{1}{n}) \subseteq \mathbb{R}$ offen für alle $n \in \mathbb{N}_{>0}$, allerdings ist dann

$$\bigcap_{n \in \mathbb{N}_{>0}} \left(-\frac{1}{n}, \frac{1}{n}\right) = \{0\}.$$

nicht offen.

Beweis von Satz 1.7. 1) klar

- 2) Sei $x \in \bigcap_{i=1}^n U_i$. $\forall i = 1, \dots, n$ gibt es nun ε_i mit $U(x, \varepsilon_i) \subseteq U_i$. Setze $\varepsilon := \min \{\varepsilon_i \mid i = 1, \dots, n\}$. Dann ist

$$U(x, \varepsilon) \subseteq U(x, \varepsilon_i) \subseteq U_i.$$

für alle $i = 1, \dots, n$ und somit wie gewünscht $U(x, \varepsilon) \subseteq \bigcap_{i=1}^n U_i$

- 3) Sei $x \in \bigcup_{i \in I} U_i$ beliebig. Dann $\exists i \in I$ mit $x \in U_i$. Da U_i offen ist, $\exists \varepsilon > 0$ mit $U(x, \varepsilon) \subseteq U_i$. Also ist $U(x, \varepsilon) \subseteq \bigcup_{i \in I} U_i$ und somit ist die Vereinigung offen. \square

2 Topologische Räume

Definition 2.1 (Topologie). Eine **Topologie** auf einer Menge X ist eine Menge \mathcal{O} von Teilmengen von X , so dass gilt:

- 1) $\emptyset, X \in \mathcal{O}$
- 2) Für $U_1, \dots, U_n \in \mathcal{O}$ ist auch $\bigcap_{i=1}^n U_i \in \mathcal{O}$
- 3) Für jede Familie $\{U_i\}_{i \in I}$ mit $U_i \in \mathcal{O}$ ist auch $\bigcup_{i \in I} U_i \in \mathcal{O}$

Die Mengen in \mathcal{O} heißen **offene Mengen**.

Ein **topologischer Raum** ist ein Paar (X, \mathcal{O}) aus einer Menge X und einer Topologie \mathcal{O} auf X .

Definition 2.2 (Stetigkeit). Seien X, Y topologische Räume. Eine Abbildung $f : X \rightarrow Y$ heißt **stetig**, falls für jede offene Teilmenge $U \subseteq Y$ das Urbild $f^{-1}(U) \subseteq X$ offen ist.

Beispiel. Sei (X, d) ein metrischer Raum. Dann ist

$$(X, \mathcal{O} := \{U \subseteq X \mid U \text{ ist offen bezüglich } d\}).$$

ein topologischer Raum. \mathcal{O} ist die von der Metrik d **induzierte Topologie**.

Definition 2.3 (Metrisierbarkeit). Ein topologischer Raum heißt **metrisierbar**, falls die Topologie von einer Metrik induziert ist.

Beispiel. Sei X eine Menge. Die **diskrete Topologie** auf X ist die Menge aller Teilmengen, d.h. $\mathcal{O} := \mathcal{P}(X)$. Diese ist von der diskreten Metrik

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

induziert.

Beweis. Ist $x \in X$, dann ist

$$\{x\} = U\left(x, \frac{1}{2}\right).$$

offen. Ist $U \subseteq X$ eine Teilmenge, dann ist

$$U = \bigcup_{x \in U} \{x\}.$$

offen als Vereinigung offener Mengen. \square

Satz 2.4. Sei X ein endlicher (endlich als Menge), metrisierbarer topologischer Raum. Dann ist X diskret (d.h. X trägt die diskrete Topologie).

Beweis. Es reicht zu zeigen, dass $\{x\}$ offen ist $\forall x \in X$. Sei d eine Metrik, die die Topologie induziert, dann wähle

$$\varepsilon := \min \{d(x, y) \mid x, y \in X, x \neq y\} > 0.$$

Beachte, dass dies existiert, da $d(x, y) > 0$ für $x \neq y$ und die Menge nach Voraussetzung endlich ist. Nun ist:

$$\{x\} = U(x, \varepsilon).$$

offen und wir sind fertig. \square

Beispiel. 1) Wähle $X = \{a, b\}$ und setze

$$\mathcal{O} = \{\emptyset, X, \{a\}\}.$$

Dies ist ein topologischer Raum (leicht prüfen), er ist jedoch nicht metrisierbar, da endlich und nicht diskret. Dieser Raum heißt **Sierpinski-Raum**.

2) Sei X eine Menge. Die **indiskrete Topologie** auf X enthält nur \emptyset, X . Man prüft leicht, dass dies eine Topologie ist.

- Hat X mindestens 2 Elemente, so ist X nicht metrisierbar.

Beweis. Nimm $|X| > 2$ an und wähle $x, y \in X$ mit $x \neq y$. Sei d eine Metrik, die die Topologie auf X induziert und setze $\varepsilon := d(x, y)$. Dann ist

$$x \in U(x, \varepsilon) \quad y \notin U(x, \varepsilon).$$

also ist $U(x, \varepsilon) \neq \emptyset, X$, Widerspruch. \square

- Sei Y ein topologischer Raum. Dann ist $f : Y \rightarrow X$ stetig für beliebige Abbildungen f .

Beweis. Es sind $f^{-1}(\emptyset) = \emptyset$ sowie $f^{-1}(X) = Y$ beide offen. \square

Bemerkung. Ist Y diskret und X beliebig, so ist jede Abbildung $f : X \rightarrow Y$ stetig.

Vorlesung 2
Do 15 Apr 2021 10:14

Definition 2.5 (Äquivalente Metriken). Zwei Metriken d_1, d_2 auf X heißen **äquivalent**, falls Konstanten c_1, c_2 existieren, sodass

$$\forall x, y \in X: \quad c_1 \cdot d_1(x, y) \leq d_2(x, y) \leq c_2 \cdot d_1(x, y).$$

Satz 2.6. Äquivalenz (von Metriken) ist eine Äquivalenzrelation.

Beweis. **Reflexivität:** Klar mit $c_1 = c_2 = 1$

Symmetrie: Seien c_1, c_2 wie in der Definition. Dann gilt mit entsprechender Division, dass

$$\forall x, y \in X: \quad \frac{1}{c_2} \cdot d_2(x, y) \leq d_1(x, y) \leq \frac{1}{c_1} d_2(x, y).$$

Transitivität: . Seien c_1, c_2, c'_1, c'_2 gewählt, sodass $\forall x \forall y: c_1 d_1(x, y) \leq d_2(x, y) \leq c_2 d_1(x, y)$ sowie $c'_1 d_2(x, y) \leq d_3(x, y) \leq c'_2 d_2(x, y)$ (Also $d_1 \sim d_2$ und $d_2 \sim d_3$). Dann ist auch

$$\forall x \forall y: \quad c_1 c'_1 d_1(x, y) \leq c'_1 d_2(x, y) \leq d_3(x, y) \leq c'_2 d_2(x, y) \leq c_2 d_1(x, y).$$

\square

Satz 2.7. Äquivalente Metriken induzieren dieselbe Topologie.

Beweis. Wegen der Symmetrie genügt es zu zeigen, dass Mengen, die offen bezüglich d_2 sind, auch offen bezüglich d_1 sind.

Sei nun $U \subseteq X$ offen bezüglich d_2 und $x \in U$. Dann existiert ein $\varepsilon > 0$ mit $U_{d_2}(x, \varepsilon) \subseteq U$. Ist nun $d_1(x, y) < \frac{\varepsilon}{c_2}$, dann ist

$$d_2(x, y) \leq c_2 d_1(x, y) < \varepsilon.$$

und damit ist

$$U_{d_1}\left(x, \frac{\varepsilon}{c_2}\right) \subseteq U_{d_2}(x, \varepsilon) \subseteq U.$$

und somit ist U auch offen bezüglich d_1 . \square

Bemerkung. Es gibt auch nicht-äquivalente Metriken, die die gleiche Topologie induzieren. Siehe hierzu Übungsblatt 1, Aufgabe 2.

Bemerkung. Je zwei Normen auf \mathbb{R}^n sind äquivalent, induzieren also dieselbe Topologie, das beweisen wir jedoch hier nicht.

Definition 2.8 (Umgebung). Sei X ein topologischer Raum und $U \subseteq X$ sowie $x \in X$. Dann heißt U **Umgebung von x** , falls es eine offene Teilmenge $O \subseteq X$ gibt, mit $x \in O \subseteq U$.

Bemerkung. Für metrische Räume stimmt dies mit der vorherigen Definition überein.

Satz 2.9. Sei X ein topologischer Raum und $U \subseteq X$. Dann sind äquivalent:
 1) U ist offen.
 2) U ist Umgebung aller ihrer Punkte.

Beweis. '1) \Rightarrow 2)' ist klar, wähle einfach $O = U$.

'2) \Rightarrow 1)'. Für jedes $x \in U$ existiert also U_x mit $x \in U_x \subseteq U$. Dann ist aber

$$U = \bigcup_{x \in U} U_x.$$

offen als Vereinigung offener Mengen. \square

Definition (Abgeschlossene Mengen). Sei X ein topologischer Raum. Eine Teilmenge $A \subseteq X$ heißt **abgeschlossen**, falls ihr Komplement $X \setminus A = \{x \in X \mid x \notin A\}$ offen ist.

Bemerkung. Für metrische Räume stimmt das mit dem Begriff aus der Analysis überein.

Satz 2.10 (Dualität). Ein topologischer Raum lässt sich auch über seine abgeschlossenen Mengen charakterisieren. Diese müssen erfüllen:
 i) \emptyset, X sind abgeschlossen
 ii) Für A_1, \dots, A_n abgeschlossen ist auch $A_1 \cup \dots \cup A_n$ abgeschlossen.
 iii) Für eine Familie $\{A_i\}_{i \in I}$ abgeschlossener Mengen ist auch

$$\bigcap_{i \in I} A_i.$$

abgeschlossen.

Wenn wir von einer Familie von Mengen $\{A_i\}_{i \in I}$ sprechen, meinen wir, dass I eine Menge ist, und für jedes $i \in I$ ist A_i eine Teilmenge von X . Formal können wir dies als eine Funktion $I \rightarrow \mathcal{P}(X)$ darstellen.

Beweis. i) $X \setminus \emptyset = X$, $X \setminus X = \emptyset$ sind abgeschlossen.

ii)

$$\underbrace{\bigcap_{i=1}^n (X \setminus A_i)}_{\text{offen}} = X \setminus \bigcup_{i=1}^n A_i \Rightarrow \bigcup_{i=1}^n A_i \text{ abgeschlossen.}$$

iii)

$$\underbrace{\bigcup_{i \in I} \underbrace{(X \setminus A_i)}_{\text{offen}}}_{\text{offen}} = X \setminus \bigcap_{i \in I} A_i \Rightarrow \bigcap_{i \in I} A_i \text{ abgeschlossen.}$$

□

Satz 2.11 (Stetigkeit mit abgeschlossenen Mengen). Sei $f : X \rightarrow Y$ eine Funktion zwischen topologischen Räumen. Dann sind äquivalent:

- 1) f ist stetig
- 2) $\forall U \subseteq Y$ offen ist $f^{-1}(U) \subseteq X$ offen
- 3) $\forall A \subseteq Y$ abgeschlossen ist $f^{-1}(A)$ abgeschlossen

Beweis.

$$\begin{aligned} f \text{ stetig} &\Leftrightarrow \forall U \subseteq Y \text{ offen ist } f^{-1}(U) \text{ offen} \\ &\Leftrightarrow \forall A \subseteq Y \text{ abgeschlossen ist } f^{-1}(Y \setminus A) \text{ offen} \\ &\Leftrightarrow \forall A \subseteq Y \text{ abgeschlossen ist } X \setminus f^{-1}(A) \text{ offen} \\ &\Leftrightarrow \forall A \subseteq Y \text{ abgeschlossen ist } f^{-1}(A) \text{ abgeschlossen} \end{aligned}$$

□

Wir erinnern uns: Ist (X, d) ein metrischer Raum, so auch $(Y, d_{Y \times Y}) \quad \forall Y \subseteq X$. Wie ist dies für topologische Räume?

Warnung. $(Y, \mathcal{S}_X \cap \mathcal{P}(Y))$ ist im allgemeinen **kein** topologischer Raum. (wenn Y nicht offen ist, denn dann ist $Y \notin \mathcal{S}_X \cap \mathcal{P}(X)$)

Satz und Definition 2.12 (Teilraumtopologie). Sei X ein topologischer Raum, $Y \subseteq X$. Dann ist

$$\mathcal{S}_Y := \{U \cap Y \mid U \subseteq X \text{ offen}\}.$$

eine Topologie auf Y , die **Teilraumtopologie** oder auch **Unterraumtopologie** genannt wird.

Beispiel. Betrachte $\mathbb{R}^1 \subseteq \mathbb{R}^2$ als Unterraum. Schneiden wir eine offene Menge in \mathbb{R}^2 mit \mathbb{R}^1 , so erhalten wir ein offenes Intervall:



Abbildung 3: \mathbb{R}^1 als Unterraum von \mathbb{R}^2

Beweis. • Es sind $\emptyset = \emptyset \cap Y$ und $Y = X \cap Y$ offen.

• Es ist

$$\bigcap_{i=1}^n (U_i \cap Y) = \left(\bigcap_{i=1}^n U_i \right) \cap Y.$$

• Es ist

$$\bigcup_{i \in I} (U_i \cap Y) = \left(\bigcup_{i \in I} U_i \right) \cap Y.$$

□

Warnung. Für $Z \subseteq Y \subseteq X$ muss man zwischen 'offen in Y ' und 'offen in X ' unterscheiden, falls Y nicht offen ist.

Bemerkung*. Ist $Y \subseteq X$ offen, so stimmen die beiden vorherigen Konzepte tatsächlich überein, d.h. eine Menge $Z \subseteq Y$ ist offen in Y , genau dann, wenn sie offen in X ist.

Bemerkung. Sei (X, d) ein metrischer Raum und $Y \subseteq X$ eine Teilmenge. Die Unterraumtopologie auf Y bzgl. der Topologie auf X ist gleich der Topologie induziert von der eingeschränkten Metrik.

Beweis. Für $y \in Y$ ist

$$U_{d|_{Y \times Y}}(y, \varepsilon) = U_d(y, \varepsilon) \cap Y.$$

, deswegen werden von beiden Metriken die gleichen offenen Mengen induziert. □

Beispiel. Der **Einheitskreis** als Unterraum von \mathbb{R}^2 :

$$\{x \in \mathbb{R}^2 \mid \|x\|_2 = 1\} =: S^1 \subseteq \mathbb{R}^2.$$

Genauso gibt es die **n -Sphäre** definiert durch

$$\{x \in \mathbb{R}^{n+1} \mid \|x\|_2 = 1\} =: S^n \subseteq \mathbb{R}^{n+1}.$$

Definition 2.13 (Homöomorphie). Eine Abbildung $f : X \rightarrow Y$ zwischen topologischen Räumen heißt **Homöomorphismus**, falls f stetig und bijektiv ist und auch $f^{-1} : Y \rightarrow X$ stetig ist. Existiert solch ein f , so heißen X, Y **homöomorph**.

Beispiel. Die Räume $(\mathbb{R}^2, \|\cdot\|_2)$ und $(\mathbb{C}, |\cdot|)$ sind homöomorph mittels der Abbildung

$$\begin{aligned} \mathbb{R}^2 &\longrightarrow \mathbb{C} \\ (x, y) &\longmapsto x + iy \end{aligned}$$

Warnung. Nicht jede stetige Bijektion ist ein Homöomorphismus.

Beispiel. Betrachte für eine Menge X die Identitätsabbildung $(X, \mathcal{P}(X)) \xrightarrow{\text{id}_X} (X, \{\emptyset, X\})$ von der diskreten in die indiskrete Topologie. Diese ist stetig, aber die Umkehrabbildung nicht (falls $|X| \geq 2$).

3 Quotientenräume

Sei \sim eine Äquivalenzrelation auf X . Für $x \in X$ definieren wir die **Äquivalenzklasse** $[x]$ von x durch:

$$[x] := \{x' \in X \mid x \sim x'\}.$$

Wir setzen

$$X/\sim := \{[x] \mid x \in X\}.$$

als die **Menge der Äquivalenzklassen** von X bezüglich \sim . Definiere nun

$$q : \begin{array}{ccc} X & \longrightarrow & X/\sim \\ x & \longmapsto & [x] \end{array}$$

als die **kanonische Projektion** von X auf seine Äquivalenzklassen. Wir stellen fest, dass q surjektiv ist.

Für eine Surjektion $f : X \rightarrow Y$ ist $x \sim y \Leftrightarrow f(x) = f(y)$ eine Äquivalenzrelation auf X und

$$\begin{aligned} X/\sim &\longrightarrow Y \\ [x] &\longmapsto f(x) \end{aligned}$$

ist eine Bijektion, wir erhalten also eine Korrespondenz zwischen Äquivalenzrelationen und surjektiven Abbildungen aus X .

Satz und Definition 3.1 (Quotiententopologie). Sei X ein topologischer Raum und \sim eine Äquivalenzrelation auf X . Sei $q : X \rightarrow X/\sim$ die kanonische Projektion. Dann definiert

$$\mathcal{S}_{X/\sim} := \{U \subseteq X/\sim \mid q^{-1}(U) \subseteq X \text{ offen}\}.$$

eine Topologie auf X/\sim , genannt die **Quotiententopologie**.

Beweis. Wir prüfen die Axiome einer Topologie:

- Es ist $q^{-1}(\emptyset) = \emptyset$ und $q^{-1}(X/\sim) = X$, also sind beide Mengen offen.
- Sind $U_1, \dots, U_n \subseteq X/\sim$ offen, so ist

$$q^{-1}(U_1 \cap \dots \cap U_n) = q^{-1}(U_1) \cap \dots \cap q^{-1}(U_n).$$

offen in X , also ist $U_1 \cap \dots \cap U_n$ offen in X/\sim nach Definition.

- Ist $\{U_i\}_{i \in I}$ eine Familie offener Teilmengen von X/\sim , dann ist

$$q^{-1}\left(\bigcup_{i \in I} U_i\right) = \bigcup_{i \in I} q^{-1}(U_i).$$

offen in X , also ist $\bigcup_{i \in I} U_i$ offen in X/\sim nach Definition. \square

Bemerkung. Die Projektion $q : X \rightarrow X/\sim$ ist stetig und die Quotiententopologie ist maximal (bezüglich Inklusion, lies: 'am feinsten') unter allen Topologien auf X/\sim , für die q stetig ist.

Satz 3.2 (Universelle Eigenschaft der Quotiententopologie). Sei $f : X \rightarrow Y$ stetig und $q : X \rightarrow X/\sim$ die kanonische Projektion. Angenommen, es existiert $g : X/\sim \rightarrow Y$ mit $f = g \circ q$. Dann ist g stetig und in diesem Fall ist g eindeutig.

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{f} & Y \\ q \downarrow & \searrow g & \uparrow i \\ X/\sim & & \end{array}$$

Bemerkung. g existiert genau dann, wenn $x \sim x' \Rightarrow f(x) = f(x')$

Bemerkung* (Kategorientheorie). Das ist eine universelle Eigenschaft im Sinne der Kategorientheorie, d.h. für einen Raum X und eine Äquivalenzrelation existiert bis auf eindeutigen Isomorphismus stets genau ein topologischer Raum $(X/\sim, \mathcal{S})$ zusammen mit einer stetigen Abbildung $q : X \rightarrow X/\sim$, sodass $x \sim x' \Rightarrow q(x) = q(x')$, sodass das Tripel $(X, X/\sim, q)$ obige Eigenschaft hat. Wir können also obige Eigenschaft auch als Definition der Quotiententopologie verwenden, und aus dieser folgt auch die Eindeutigkeit. Existenz haben wir mit unserer vorherigen Definition gezeigt.

Beweis. Sei $U \subseteq Y$ offen. Dann ist

$$q^{-1}(g^{-1}(U)) \stackrel{f=g \circ q}{=} f^{-1}(U).$$

offen, weil f stetig ist. Also ist $g^{-1}(U)$ offen per Definition ($g^{-1}(U)$ ist nach Definition genau dann offen in X/\sim , wenn $q^{-1}(g^{-1}(U))$ offen in X ist) und somit ist g stetig. \square

Beispiel. Sei $X = [0, 1] \subseteq \mathbb{R}$ das **Einheitsintervall** (mit der Unterraumtopologie bezüglich \mathbb{R}) mit der Äquivalenzrelation erzeugt von $0 \sim 1$. Wir 'identifizieren' also die Punkte $\{0\}, \{1\}$ miteinander.

Satz 3.3 (Kreishomöomorphie). Der Quotientenraum $[0, 1]/(0 \sim 1)$ ist homöomorph zu S^1 .

Vorlesung 3
Di 20 Apr 2021 12:16

Beweis. Betrachte die stetige Abbildung

$$f' : \begin{array}{ccc} [0, 1] & \longrightarrow & S^1 \subseteq \mathbb{C} \\ t & \longmapsto & e^{2\pi i t} \end{array}$$

Wir sehen $f'(0) = f'(1) = 1$, also existiert nach der universellen Eigenschaft ein f , sodass folgendes kommutiert:

$$\begin{array}{ccc} [0, 1] & \xrightarrow{f'} & S^1 \\ \downarrow & \searrow f & \\ [0, 1]/(0 \sim 1) & & \end{array} \quad \text{und } f \text{ stetig ist. Zudem ist } f \text{ bijektiv. Es}$$

bleibt zu zeigen, dass f^{-1} stetig ist, das zeigen wir jedoch nicht jetzt (ginge mit viel rechnen), sondern später, wenn wir mehr Technik haben. Anschaulich ist das jedoch klar: \square



Abbildung 4: $[0, 1]/(0 \sim 1)$ und S^1 sind homöomorph

Bemerkung. Die Abbildung

$$\begin{array}{ccc} [0, 1) & \longrightarrow & S^1 \\ t & \longmapsto & e^{2\pi i t} \end{array}$$

ist stetig und bijektiv, allerdings kein Homöomorphismus, denn $[0, \frac{1}{2}] \subseteq [0, 1)$ ist offen, aber $f([0, \frac{1}{2}]) = (f^{-1})^{-1}([0, \frac{1}{2}])$ ist nicht offen im Kreis.

Beispiel. 1) Sei $X = [0, 1]^2 \subseteq \mathbb{R}$. Identifiziere nun $(t, 0) \sim (t, 1)$ sowie $(0, s) \sim (1, s)$ für $s, t \in [0, 1]$. Dann ist X/\sim der Torus.



Abbildung 5: Entstehung des Torus als Quotientenraum von $[0, 1]^2$.

Quelle: [http://3.bp.blogspot.com/_swm7VcF-Vqc/TCpcMmi8qII/AAAAAAAAAHw/3QtMkZsikapY/s1600/part1\(6\).png](http://3.bp.blogspot.com/_swm7VcF-Vqc/TCpcMmi8qII/AAAAAAAAAHw/3QtMkZsikapY/s1600/part1(6).png)

- 2) Sei $X = [0, 1]^2 \subseteq \mathbb{R}^2$. Identifizieren wir $(t, 0) \sim (t, 1)$ sowie $(0, s) \sim (1, 1 - s)$, so erhalten wir die **Kleinsche Flasche**.



Abbildung 6: Entstehung der Kleinschen Flasche als Quotientenraum von $[0, 1]^2$.

Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Klein_Bottle_Folding_1.svg

- 3) Betrachte auf dem $\mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\}$ die Relation $x \sim \lambda x$ für $\lambda > 0 \in \mathbb{R}$. Dann ist $\mathbb{R}^{n+1} / \sim \cong S^n$. Zunächst ist nämlich die Abbildung

$$f : \begin{array}{ccc} \mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\} & \longrightarrow & S^n \\ x & \longmapsto & \frac{x}{\|x\|_2} \end{array}$$

stetig und die induzierte Abbildung $\mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\} / \sim \rightarrow S^n$ ist bijektiv. Das rechnen wir nach: Seien $x \neq y$ mit $d(x, y) < \delta$, so ist:

$$\begin{aligned} d\left(\frac{x}{\|x\|}, \frac{y}{\|y\|}\right) &\leq d\left(\frac{x}{\|x\|}, \frac{y}{\|x\|}\right) + d\left(\frac{y}{\|x\|}, \frac{y}{\|y\|}\right) \\ &= \frac{1}{\|x\|} d(x, y) + \sqrt{\sum \left(\frac{y_i}{\|x\|} - \frac{y_i}{\|y\|}\right)^2} \\ &= \frac{1}{\|x\|} d(x, y) + \sqrt{\frac{(\|x\| - \|y\|)^2}{\|x\|\|y\|}} \|y\| \\ &< \frac{1}{\|x\|} \cdot \delta + \frac{\delta}{\|x\|^2 + \delta\|x\|} (\|x\| + \delta) \rightarrow 0 \end{aligned} \quad (1)$$

also ist f stetig. Mit der Inklusion $\iota : S^n \rightarrow \mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\}$ erhalten wir

$$f \circ \iota = \text{id}_{S^n}.$$

Übung: Daraus folgt bereits, dass S^n die Quotiententopologie trägt.

- 4) Setzen wir erneut $X = \mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\}$, aber diesmal $x \sim \lambda x$ für $\lambda \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$, so heißt der Quotient

$$X / \sim =: \mathbb{R}P^n.$$

der **reelle projektive Raum**. Es ist

$$\mathbb{R}P^n \cong S^n / (x \sim -x).$$

Dies sehen wir mittels folgendem Diagramm:

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\} & \xrightleftharpoons[\iota]{f} & S^n \\ \downarrow & & \downarrow \\ \mathbb{R}P^n & \xrightleftharpoons[\bar{\iota}]{\bar{f}} & S^n / (x \sim -x) \end{array} \quad (2)$$

Die Abbildungen $\bar{\iota}$ und \bar{f} sind stetig nach der universellen Eigenschaft und invers zueinander.



Abbildung 7: Konstruktion des reellen projektiven Raums für den Fall $n = 1$. Wir identifizieren die roten Strahlen miteinander, nicht jedoch den gesamten blauen, da $\lambda > 0$.

- 5) Sei X ein topologischer Raum und $A \subseteq X$ eine Teilmenge. Definiere die Relation \sim durch $a \sim a'$ für $a, a' \in A$ (bzw. erzeuge eine dadurch). Dann setzen wir

$$X/A := X/\sim.$$

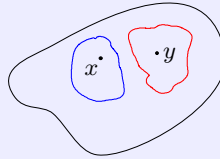
Es ergibt sich

- $[0, 1]/\{0, 1\} \cong S^1$
- $[0, 1]/[0, 1]$ hat zwei Punkte $[0, 1)$ und $\{1\}$. Es ist $[0, 1) \subseteq [0, 1]$ offen, aber $\{1\}$ nicht, also handelt es sich um den Sierpinski-Raum.

Bemerkung. Quotientenräume von metrischen Räumen sind im Allgemeinen nicht metrisierbar.

4 Trennungsaxiome

Definition 4.1 (Hausdorff'sch). Ein topologischer Raum heißt **Hausdorff** (oder **Hausdorffsch**), wenn $\forall x, y \in X$ mit $x \neq y$ offene Mengen $U_x, U_y \subseteq X$ existieren mit $x \in U_x$ und $y \in U_y$, sodass $U_x \cap U_y = \emptyset$. Diese Eigenschaft heißt auch Trennungsaxiom T_2 .



Satz 4.2. Ist X metrisierbar, so ist X Hausdorffsch.

Beweis. Sei d eine Metrik auf X , die die Topologie induziert. Seien $x, y \in X$ mit $x \neq y$. Setze

$$U_x := U\left(x, \frac{d(x, y)}{2}\right) \quad U_y = U\left(y, \frac{d(x, y)}{2}\right).$$

Dann ist $U_x \cap U_y = \emptyset$, denn für alle $z \in U_x \cap U_y$ ist

$$d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y) < \frac{d(x, y)}{2} + \frac{d(x, y)}{2} = d(x, y).$$

, was nicht sein kann. □

Beispiel. \mathbb{R}^n ist Hausdorffsch.

Satz 4.3. Ist X Hausdorffsch und $x \in X$, dann ist $\{x\} \subseteq X$ abgeschlossen.

Beweis. Für $y \neq x$ existiert U_y offen mit $x \notin U_y$ und $y \in U_y$. Dann ist

$$X \setminus \{x\} = \bigcup_{y \neq x} U_y.$$

offen. □



Abbildung 8: Skizze zum Beweis von **Satz 4.3**

Bemerkung. Ein topologischer Raum, für den alle $\{x\}$ abgeschlossen sind, heißt **T_1 -Raum**.

Bemerkung*. Man findet in der Literatur auch folgende Definition: Ein topologischer Raum heißt T_1 -Raum, wenn es für je zwei verschiedenen Punkte $x \neq y$ Umgebungen U_x, U_y gibt mit $x \in U_x, y \in U_y$ und $x \notin U_y, y \notin U_x$.

Im Gegensatz zum Hausdorff-Raum trennen wir zwei Punkte also durch 2 nicht notwendigerweise offene Umgebungen. Mit dem gleichen Beweis wie in **Satz 4.3** zeigen wir dann, dass jeder Punkt abgeschlossen ist. Ist umgekehrt X ein Raum, in dem alle Punkte abgeschlossen sind, so können wir x, y stets durch die offenen Umgebungen $y \in X \setminus \{x\}$ sowie $x \in X \setminus \{y\}$ trennen. Die beiden Definitionen sind also äquivalent.



Abbildung 9: Ein T_1 -Raum

Lemma 4.4. Sei X Hausdorffsch und $A \subseteq X$ ein Teilraum. Dann ist auch A Hausdorffsch.

Beweis. Sei $x \neq y \in A$. Dann existieren $U_x, U_y \subseteq X$ offen mit $x \in U_x$ und $y \in U_y$ sowie $U_x \cap U_y = \emptyset$. Dann sind

$$U_x \cap A \quad U_y \cap A \subseteq A.$$

offen in A und erfüllen die Bedingungen. \square

Bemerkung. Jeder diskrete Raum ist Hausdorffsch. Ist X endlich und Hausdorffsch, so ist X diskret.

Beweis. Für jedes $y \neq x$ existiert ein U_x^y offen mit $x \in U_x^y$ und $y \notin U_x^y$. Dann ist aber

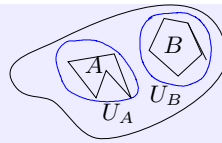
$$\{x\} = \bigcap_{y \neq x} U_x^y.$$

offen (da X endlich), also ist X diskret. Die Umkehrung ist offensichtlich. \square

Beispiel. $S^n \subseteq \mathbb{R}^{n+1}$ ist Hausdorffsch.

Definition 4.5 (Normal). Ein topologischer Raum heißt **normal**, falls

- X ist Hausdorffsch
- $\forall A, B \subseteq X$ abgeschlossen mit $A \cap B = \emptyset$ existieren $U_A, U_B \subseteq X$ offen mit $A \subseteq U_A$, $B \subseteq U_B$ und $U_A \cap U_B = \emptyset$. Diese Eigenschaft heißt auch Trennungsaxiom T_4 .

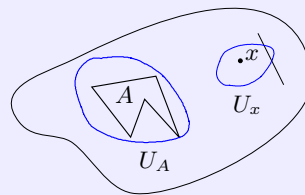


Bemerkung. Manchmal gibt es diese Definition auch ohne Hausdorff'sch.

Satz 4.6. Ist X metrisierbar, dann ist X normal.

Beweis. Übung. □

Definition 4.7 (Regulär). Ein topologischer Raum X heißt **regulär**, falls X Hausdorff ist und $\forall A \subseteq X$ abgeschlossen und $x \in X \setminus A$ existieren U_A, U_x offen mit $A \subseteq U_A, x \in U_x$ und $U_A \cap U_x = \emptyset$. (Auch Trennungsaxiom T_3 genannt).



Bemerkung. Klarerweise gilt $T_4 \Rightarrow T_3$, d.h. jeder normale Raum ist auch regulär. Hierzu benötigen wir nur, dass Punkte in T_4 -Räumen abgeschlossen sind, aber das folgt mit **Satz 4.3**, bzw. damit, dass wir bereits $T_4 \Rightarrow T_2 \Rightarrow T_1$ wissen.

5 Kompaktheit

Aus der Analysis ist (vielleicht) folgender Satz bekannt.

Satz 5.1 (Heine-Borel). Für $X \subseteq \mathbb{R}^n$ sind äquivalent:

- 1) X ist abgeschlossen und beschränkt.
- 2) Jede offene Überdeckung von X hat eine endliche Teilüberdeckung

‘Jede offene Überdeckung besitzt eine endliche Teilüberdeckung’ bedeutet:
Für jede Familie $\{U_i\}_{i \in I}$ mit $U_i \subseteq X$ offen und $X \subseteq \bigcup_{i \in I} U_i$ existiert eine endliche Teilmenge $J \subseteq I$ mit $X \subseteq \bigcup_{j \in J} U_j$

Beweis. später. \square

Definition 5.2 (Kompaktheit). Ein topologischer Raum X heißt **kompakt**, falls jede offene Überdeckung eine endliche Teilüberdeckung besitzt.

Bemerkung. Manchmal heißt obige Definition auch quasi-kompakt, und kompakt bedeutet dann quasi-kompakt + Hausdorff.

Beispiel. Die Räume

$$[0, 1] \subseteq \mathbb{R} \quad S^n \subseteq \mathbb{R}^{n+1}.$$

sind beide kompakt (nach 5.1)

Vorlesung 4
Do 22 Apr 2021 10:15

Beispiel. Zur Frage von letzter Woche (wenn wir einen Hausdorff-Raum haben und eine Äquivalenzrelation, deren Klassen abgeschlossen sind, ist dann der Quotient wieder Hausdorff?): Wähle auf $[0, 1]$ die Relation erzeugt von

$$\frac{1}{n} \sim 1 - \frac{1}{n}.$$

für alle $n \in \mathbb{N}_{>0}$. Betrachte dann die Abbildung:

$$[0, 1] \twoheadrightarrow [0, 1] / \sim.$$

Punkturbilder sind endlich, also abgeschlossen. Aber der Raum $[0, 1] / \sim$ ist nicht hausdorffsch, denn wir können die Punkte 0, 1 nicht trennen.

Satz 5.3. Sei X ein kompakter Raum und $Y \subseteq X$ abgeschlossen. Dann ist Y kompakt.

Beweis. Sei $\{U_i\}_{i \in I}$ eine offene Überdeckung von Y . Dann existieren $U'_i \subseteq X$ offen mit $U_i = U'_i \cap Y$. Die Familie

$$\{U'_i\}_{i \in I} \cup \left\{ \underbrace{X \setminus Y}_{\text{offen}} \right\}.$$

ist nun eine offene Überdeckung von X . Dann existiert $J \subseteq I$ endlich, so dass

$$\{U'_j\}_{j \in J} \cup \{X \setminus Y\}.$$

die Menge X überdeckt. Also ist

$$\left\{ \underbrace{U'_j \cap Y}_{U_j} \right\}_{j \in J} \cup \left\{ \underbrace{X \setminus Y \cap Y}_{=\emptyset} \right\}$$

eine endliche Überdeckung für Y . \square

Satz 5.4. Sei X ein Hausdorff-Raum und $Y \subseteq X$ kompakt. Dann ist Y abgeschlossen.

Korollar. Ist X kompakt und Hausdorffsch, dann sind äquivalent:

- 1) $Y \subseteq X$ ist abgeschlossen
- 2) Y ist kompakt.

Beweis. Unmittelbare Konsequenz aus Satz 5.3 und Satz 5.4. \square

Lemma 5.5. Sei X ein Hausdorff Raum und $Y \subseteq X$ kompakt. Dann existiert $\forall x \in X \setminus Y$ offene Teilmengen $U_{x,Y}$ und $V_{x,Y}$ von X so dass: $x \in U_{x,Y}$ und $Y \subseteq V_{x,Y}$ und $U_{x,Y} \cap V_{x,Y} = \emptyset$.

Beweis. Sei $x \in X \setminus Y$. $\forall y \in Y$ existieren $U_{x,y}$ und $V_{x,y}$ offen mit $x \in U_{x,y}$ und $y \in V_{x,y}$, weil X Hausdorffsch.

Dann ist $\{V_{x,y} \cap Y\}_{y \in Y}$ eine offene Überdeckung von Y . Also existiert endliche Teilüberdeckung (da Y kompakt) induziert durch Punkte y_1, \dots, y_n . Also:

$$Y \subseteq \bigcup_{i=1}^n V_{x,y_i}.$$

Sei

$$V_{x,Y} := \bigcup_{i=1}^n V_{x,y_i} \quad U_{x,Y} := \bigcap_{i=1}^n U_{x,y_i}.$$

Es ist auch $x \in U_{x,Y}$, weil $x \in U_{x,y_i}$ für jedes i . Wir müssen also noch Disjunktheit prüfen, es ist:

$$U_{x,Y} \cap V_{x,Y} \subseteq U_{x,y_i} \cap V_{x,y_i} = \emptyset.$$

Also auch

$$\emptyset = U_{x,Y} \cap \bigcup_{i=1}^n V_{x,y_i} = U_{x,Y} \cap V_{x,Y}.$$

\square

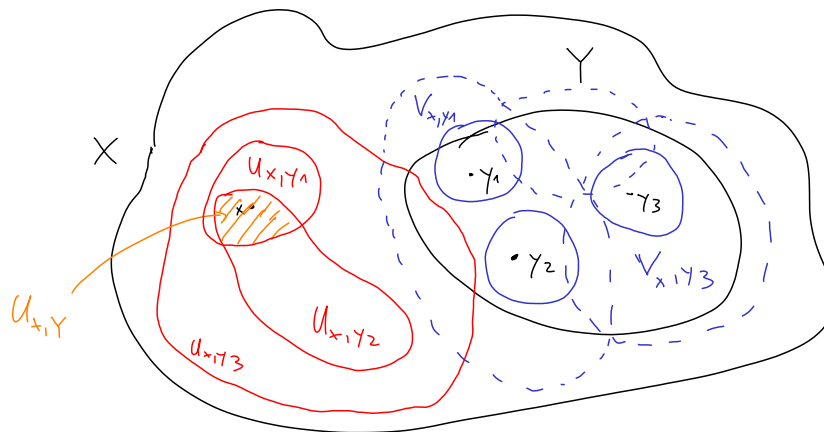


Abbildung 10: Skizze zum Beweis von Lemma 5.5

Beweis von Satz 5.4. Nach Lemma 5.5 existieren $\forall x \in X \setminus Y$ ein $U_{x,Y}$ mit $x \in U_{x,Y}$ und $U_{x,Y} \cap Y = \emptyset$. Also ist

$$X \setminus Y = \bigcup_{x \in X \setminus Y} U_{x,Y}.$$

offen und somit ist Y abgeschlossen. \square

Beispiel ('Gegenbeispiel' zu Satz 5.4). Sei G die **Gerade mit zwei Ursprüngen**:

Betrachte $G := \mathbb{R} \cup \{0'\}$ als Menge, und charakterisiere die Umgebungen folgendermaßen:

- Für einen Punkt $a \in \mathbb{R}$, d.h. $a \neq 0'$ ist U eine Umgebung von a genau dann, wenn $\exists \varepsilon > 0$, sodass $(a - \varepsilon, a + \varepsilon) \subseteq U$. (das Intervall $(a - \varepsilon, a + \varepsilon)$ ist hier als Teilmenge von \mathbb{R} zu verstehen)
- Für den Punkt $0' \notin \mathbb{R}$ ist U eine Umgebung von a genau dann, wenn $\exists \varepsilon > 0$ mit $(-\varepsilon, 0) \cup (0, \varepsilon) \subseteq U$.

Da offene Mengen genau diejenigen Mengen sind, die Umgebung all ihrer Punkte sind, haben wir damit die offenen Mengen von G charakterisiert.

Wir können uns G vorstellen als \mathbb{R} , in dem der Ursprung durch zwei gleichberechtigte Ursprünge ersetzt worden ist, die beide (bis auf sich selbst) die gleichen Umgebungen besitzen, die aber nicht zwingend gegenseitig in ihren Umgebungen liegen, d.h. nicht 'nah' beieinander sind.

Dann ist $[-1, 1] \subseteq \mathbb{R} \subseteq G$ kompakt (Übungsblatt 2, Aufgabe 3), wir behaupten, dass $[-1, 1]$ jedoch nicht abgeschlossen ist in G . Sonst wäre in der Tat $G \setminus [-1, 1]$ offen, und es ist $0' \in G \setminus [-1, 1]$, aber es handelt sich nicht um eine Umgebung von $0'$, weil für kein ε die Intervalle $(-\varepsilon, 0)$ und $(0, \varepsilon)$ in $G \setminus [-1, 1]$ liegen.

Bemerkung*. Das Beispiel zeigt also, dass wir die Hausdorff-Bedingung in Satz 5.4 nicht fallen lassen können, d.h. es gibt nicht abgeschlossene, kompakte Mengen.

Bemerkung* (Mehr zur Gerade mit 2 Ursprüngen). Wir geben zwei weitere (äquivalente) Definitionen der Gerade mit 2 Ursprüngen, um so hoffentlich eine bessere Vorstellung zu ermöglichen:

- i) Setze $G := \mathbb{R} \setminus \{0\} \cup \{a, b\}$ als Mengen. Als Basis wählen wir
 - Alle offenen Bälle aus \mathbb{R} , die nicht die 0 enthalten.
 - Für jedes $\varepsilon > 0$ die Menge $(-\varepsilon, 0) \cup \{a\} \cup (0, \varepsilon)$
 - Für jedes $\varepsilon > 0$ die Menge $(-\varepsilon, 0) \cup \{b\} \cup (0, \varepsilon)$

In diesem Fall können wir Homöomorphismen zu obiger Definition bauen, indem wir $0 \mapsto a$ und $0' \mapsto b$ wählen, und alle andere Punkte kanonisch 'auf sich selbst' schicken.

- ii) Wir können G auch als Quotientenraum einer Teilmenge von \mathbb{R} auffassen. Betrachte hierzu $\mathbb{R} \times \{0, 1\} \subseteq \mathbb{R}^2$ mit der Produkttopologie bzw. mit der Teilraumtopologie von \mathbb{R}^2 (diese beiden sind äquivalent, wie man sich leicht überlegt). Es handelt sich also um zwei parallele, voneinander getrennte Geraden. Nun identifizieren wir korrespondierende Punkte beider Geraden miteinander, allerdings nicht deren Ursprüngen. Wir erzeugen also die Äquivalenzrelation \sim generiert durch $(x, 0) \sim (x, 1)$ für $x \neq 0$ und bilden bezüglich dieser Relation den Quotientenraum. Was wir erhalten, ist genau G . Indem wir mit G definiert wie in der Vorlesung die Abbildung von $\mathbb{R} \times \{0, 1\}$ nach G definieren durch

$$(a, b) \mapsto \begin{cases} a & \text{falls } a \neq 0 \\ 0 & \text{falls } (a, b) = (0, 0) \\ 0' & \text{falls } (a, b) = (0, 1) \end{cases}.$$

sehen wir schnell, dass diese über den Quotientenraum $\mathbb{R} \times \{0, 1\} / \sim$ faktorisiert (universelle Eigenschaft!) und die entstehende Abbildung bijektiv und stetig ist. Dass es sich um einen Homöomorphismus handelt, sei hier nicht nachgerechnet sondern nur angemerkt.

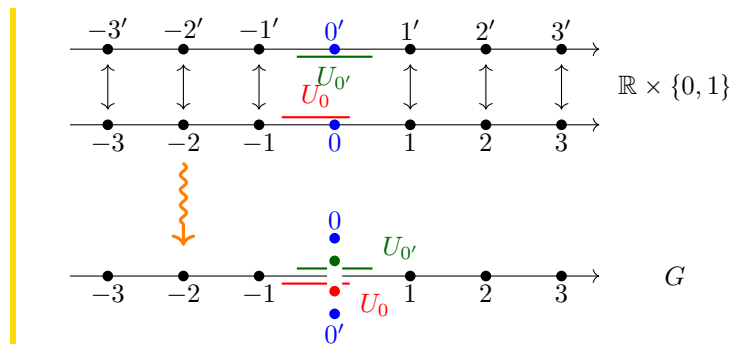


Abbildung 11: Gerade mit 2 Ursprüngen als Quotientenraum von $\mathbb{R} \times \{0, 1\} \subseteq \mathbb{R}^2$

Nun sind wir gewappnet für den

Beweis von Satz 5.1 (Heine-Borel). '2) \Rightarrow 1)'. Sei $X \subseteq \mathbb{R}^n$ kompakt. Dann ist sie abgeschlossen nach 5.4. Zudem ist $X \subseteq \bigcup_{x \in X} U(x, 1)$ eine offene Überdeckung. Da X kompakt finden wir endlich viele $x_1, \dots, x_n \in X$ mit

$$X \subseteq \bigcup_{i=1}^n U(x_i, 1).$$

Also ist

$$\text{diam}(X) \leq \max \{d(x_i, x_j)\} + 2 < \infty.$$

und somit ist X auch beschränkt.

'1) \Rightarrow 2)'. Da X beschränkt ist, $\exists m > 0$ mit $X \subseteq [-m, m]^n \subseteq \mathbb{R}^n$. Da X abgeschlossen ist, genügt es nach Satz 5.3 zu zeigen, dass $[-m, m]^n$ kompakt ist.

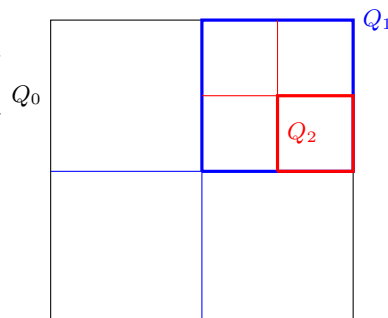
Wir führen einen Widerspruchsbeweis, nimm also an, dass $[-m, m]^n$ nicht kompakt ist. Dann existiert eine offene Überdeckung $\{U_i\}_{i \in I}$ ohne endliche Teilüberdeckung.

Unterteile $[-m, m]^n$ in 2^n gleich große Unterwürfel (halbiere jede Seite). Mindestens ein Unterwürfel hat keine endliche Teilüberdeckung. Unterteile diesen Würfel weiter und wähle wieder einen Unterwürfel, der keine endliche Teilüberdeckung hat.

Wir erhalten eine Folge von Würfeln

$$[-m, m]^n = Q_0 \supseteq Q_1 \supseteq Q_2 \supseteq Q_3 \supseteq \dots$$

die jeweils keine endliche Teilüberdeckung durch U_i 's besitzen.



Sei $x_i \in Q_i$ beliebig. Dann ist x_i eine Cauchy-Folge, also existiert $x = \lim_{i \rightarrow \infty} x_i$, und $x \in Q_0$, da Q_0 abgeschlossen.

Somit gibt es ein U_j mit $x \in U_j$, da die $\{U_i\}_{i \in I}$ eine Überdeckung von Q_0 waren. Damit ist auch $U(x, \varepsilon) \subseteq U_j$ für ein $\varepsilon > 0$. Wähle einen Würfel $x \in Q_k$ mit Kantenlänge $< \frac{\varepsilon}{\sqrt{n}}$, dann ist auch $Q_k \subseteq U(x, \varepsilon) \subseteq U_j$. Das ist aber ein Widerspruch dazu, dass Q_k keine endliche Teilüberdeckung hat, \nexists .

Also ist Q_0 kompakt. □

Satz 5.6 (Bilder kompakter Räume). Sei $f : X \rightarrow Y$ stetig und surjektiv und X kompakt. Dann ist auch Y kompakt.

Beweis. Sei $\{U_i\}_{i \in I}$ offene Überdeckung von Y . Dann ist

$$\{f^{-1}(U_i)\}_{i \in I}.$$

offene Überdeckung von X . Da X kompakt ist, gibt es $J \subseteq I$ endlich mit $X = \bigcup_{j \in J} f^{-1}(U_j)$. Dann ist

$$Y = f(X) = \bigcup_{j \in J} f(f^{-1}(U_j)) = \bigcup_{j \in J} U_j.$$

Also existiert eine endliche Teilüberdeckung von Y . \square

Korollar 5.7. Sei $f : X \rightarrow Y$ stetig, X kompakt und Y Hausdorff. Dann ist f abgeschlossen, d.h. $\forall A \subseteq X$ abgeschlossen ist $f(A) \subseteq Y$ abgeschlossen.

Beweis. Sei $A \subseteq X$ abgeschlossen. Dann ist A kompakt nach Satz 5.4, also ist $f(A)$ kompakt nach Satz 5.6 (weil $f : X \rightarrow f(A) \subseteq Y$ surjektiv ist). Damit ist dann $f(A)$ abgeschlossen nach Satz 5.4.

Also sind Bilder abgeschlossener Mengen abgeschlossen. \square

Korollar 5.8 (Homöomorphismen). Ist $f : X \rightarrow Y$ stetig und bijektiv, X kompakt und Y Hausdorff, dann ist f ein Homöomorphismus.

Beweis. Wir müssen zeigen, dass die Umkehrabbildung stetig ist. Dafür reicht es zu zeigen, dass $\forall A \subseteq X$ abgeschlossen auch $f(A) = (f^{-1})^{-1}(A)$ abgeschlossen ist. Das gilt aber genau nach vorherigem Korollar 5.7 \square

Korollar 5.9. Sei $f : X \rightarrow Y$ stetig und surjektiv, X kompakt und Y Hausdorffsch. Dann trägt Y die Quotiententopologie, d.h. $U \subseteq Y$ offen genau dann, wenn $f^{-1}(U) \subseteq X$ offen.

Beweis. ' \Rightarrow ' folgt wegen Stetigkeit.

' \Leftarrow ' Ist $f^{-1}(U) \subseteq X$ offen, dann ist $f^{-1}(Y \setminus U) = X \setminus f^{-1}(U)$ abgeschlossen in X , also folgt aus dem Korollar 5.7

$$Y \setminus U \stackrel{\text{surj.}}{=} f \left(\underbrace{f^{-1}(Y \setminus U)}_{\text{abgeschlossen}} \right).$$

abgeschlossen ist, also ist $U \subseteq Y$ offen. \square

Kommen wir nun zum

Beweis von Satz 3.3. Schon gezeigt:

$$\begin{array}{ccc} [0, 1] & \longrightarrow & S^1 \\ t & \longmapsto & 2^{2\pi i t} \end{array}$$

ist stetig und surjektiv und faktorisiert über

$$[0, 1] / \{0, 1\} \rightarrow S^1.$$

mit f stetig und bijektiv. Wir wissen nun: S^1 ist Hausdorffsch und $[0, 1]$ ist kompakt. Nach Satz 5.6 ist auch $[0, 1] / \{0, 1\}$ kompakt, also ist f ein Homöomorphismus nach Korollar 5.8 \square

Satz 5.10. Jeder kompakte Hausdorff-Raum ist normal.

Beweis. Seien $A, B \subseteq X$ abgeschlossen und disjunkt. Da X kompakt ist, sind A, B kompakt. Nach Lemma 5.5 existieren $\forall a \in A$ offene Mengen U_a, V_a mit $a \in U_a, B \subseteq V_a$ und $U_a \cap V_a = \emptyset$. Dann ist

$$A \subseteq \bigcup_{a \in A} U_a.$$

Also existieren $a_1, \dots, a_n \in A$ mit

$$A \subseteq \bigcup_{i=1}^n U_{a_i}.$$

wegen A kompakt. Setze nun

$$U_A := \bigcup_{i=1}^n U_{a_i} \supseteq A \quad U_B := \bigcap_{i=1}^n V_{a_i} \supseteq B.$$

$\forall i$ ist

$$U_{a_i} \cap U_B \subseteq U_{a_i} \cap V_{a_i} = \emptyset.$$

und daraus folgt, dass

$$U_A \cap U_B = \emptyset.$$

□

Satz 5.11 (Quotientenräume von Hausdorffräumen). Sei X kompakt und Hausdorffsch, $q : X \rightarrow Z$ surjektiv, wobei Z die Quotiententopologie trage. Dann sind äquivalent:

- 1) Z ist Hausdorffsch
- 2) q ist abgeschlossen

Beweis. Die Richtung '1) \Rightarrow 2)' ist genau **Korollar 5.7**

'2) \Rightarrow 1)': Jedes $z \in Z$ hat ein Urbild $x \in X$ unter q . Es ist $\{x\} \subseteq X$ abgeschlossen, da X hausdorffsch. Wegen q abgeschlossen folgt nun, dass auch

$$\{z\} = q(\{x\}).$$

abgeschlossen ist.

Wir nennen Teilmenge $W \subseteq X$ heißt **saturiert**, falls $W = q^{-1}(q(W))$ (insbesondere sind alle Urbilder saturiert, und $\Leftrightarrow \forall x \in X \setminus W : q(x) \in Z \setminus q(W)$).

Bemerkung. Sei $U \subseteq X$ offen und saturiert, dann ist $q(U)$ offen. Hierzu schreibe

$$U = q^{-1}(q(U)) \Rightarrow q(U) \text{ offen.}$$

Seien $y \neq z \in Z$. Dann sind $\{y\}, \{z\}$ abgeschlossen und disjunkt. Dann sind auch

$$A = q^{-1}(y) \quad B = q^{-1}(z).$$

abgeschlossen und disjunkt (in X). Nach Annahme ist X kompakt und Hausdorff, also normal nach Satz 5.10. Also existieren $U_1, U_2 \subseteq X$ offen mit $A \subseteq U_1, B \subseteq U_2$ und $U_1 \cap U_2 = \emptyset$. Setze

$$V_1 := X \setminus q^{-1}(q(X \setminus U_1)) \quad V_2 := X \setminus q^{-1}(q(X \setminus U_2)).$$

Behauptung 1. Es sind V_1, V_2 offen, disjunkt und saturiert und $A \subseteq V_1$ sowie $B \subseteq V_2$.

Unterbeweis. Nächstes Mal. ■

Es folgt, dass $q(V_1), q(V_2)$ offen in Z sind. Weiter ist $y \in q(A) \subseteq q(V_1)$ und $z \in q(B) \subseteq q(V_2)$. Da V_1, V_2 disjunkt und saturiert, sind auch $q(V_1), q(V_2)$ disjunkt und wir sind fertig. □

Beweis der Behauptung. Es ist klar, dass V_1, V_2 offen sind. Für Disjunktheit sehen wir mit

$$X \setminus U_i \subseteq q^{-1}(q(X \setminus U_i)).$$

dass $U_i \supseteq X \setminus q^{-1}(q(X \setminus U_i)) = V_i$ Für Saturiertheit genügt es zu sehen, dass $q^{-1}(C)$ saturiert ist für alle $C \subseteq Z$, da

$$q^{-1}(q(q^{-1}(C))) = q^{-1}(C).$$

weil q surjektiv ist. Wegen

$$\begin{aligned} A \subseteq U_1 &\Rightarrow X \setminus A \supseteq X \setminus U_1 \\ &\Rightarrow q(X \setminus A) \supseteq q(X \setminus U_1) \\ &\Rightarrow \underbrace{q^{-1}(q(X \setminus A))}_{=X \setminus A} \supseteq q^{-1}q(X \setminus U_1) \end{aligned}$$

liefert nun Komplementbildung unser gewünschtes Ergebnis, dass

$$A \subseteq X \setminus q^{-1}(q(X \setminus U_1)) = V_1.$$

□

Beispiel. \mathbb{RP}^n ist Hausdorffsch.

Beweis. Es ist $\mathbb{RP}^n \cong S^n / x \sim -x$. Sei

$$q : S^n \rightarrow S^n / x \sim -x.$$

□

die Projektion. Da S^n kompakt und Hausdorffsch ist, ist \mathbb{RP}^n Hausdorffsch genau dann, wenn q abgeschlossen ist. Ist $A \subseteq S^n$, so ist $q^{-1}(q(A)) = A \cup -A$.

Da $- : S^n \rightarrow S^n$ ein Homöomorphismus ist, ist $-A$ abgeschlossen, wenn A abgeschlossen ist. Dann ist auch $A \cup -A$ abgeschlossen.

Korollar (Projektiver Raum). Sei \sim auf $D^n = \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x\| \leq 1\}$ erzeugt durch $x \sim -x$ für alle $x \in S^{n-1} \subseteq D^n$. Dann ist

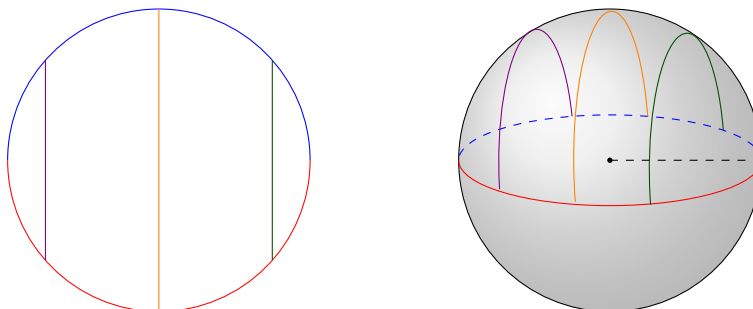
$$D^n / \sim \cong \mathbb{RP}^n.$$

Insbesondere ist

$$\mathbb{RP}^1 \cong D^1 / \{-1, 1\} \cong [0, 1] / \{0, 1\} \cong S^1$$

Beweis. Betrachte die stetige Abbildung

$$f : \begin{cases} D^n & \longrightarrow & S^n \\ x & \longmapsto & (x, \sqrt{1 - \|x\|^2}) \end{cases}$$



Wir erhalten das Diagramm:

$$\begin{array}{ccc} D^n & \xrightarrow{\quad} & S^n \\ \downarrow & & \downarrow \\ D^n / \sim & \xrightarrow[\bar{f}]{} & S^n / (x \sim -x) \cong \mathbb{RP}^n \end{array}$$

Wir sehen leicht, dass \bar{f} bijektiv ist. Da D^n kompakt, ist auch D^n / \sim kompakt, und \mathbb{RP}^n ist Hausdorffsch, also handelt es sich um einen Homöomorphismus (mit **Korollar 5.8**) \square

Korollar 5.12. Sei X kompakt und Hausdorffsch und $A \subseteq X$. Dann sind äquivalent

- 1) X/A ist Hausdorffsch
- 2) A ist abgeschlossen.

Beweis. '1) \Rightarrow 2)'. Ist X/A Hausdorffsch, so ist die einpunktige Menge $\{[A]\}$ abgeschlossen (nach **Satz 4.3**). Also ist $q^{-1}(A) = A$ abgeschlossen nach Definition der Quotiententopologie.

'2) \Rightarrow 1)' Nach **Satz 5.11** genügt es zu zeigen, dass $q : X \rightarrow X/A$ abgeschlossen ist. Für $B \subseteq X$ abgeschlossen ist, müssen wir also zeigen, dass $q(B)$ abgeschlossen ist, nach Definition also, dass $q^{-1}(q(B)) \subseteq X$ abgeschlossen ist. Nun ist

$$q^{-1}(q(B)) = \begin{cases} B & \text{falls } B \cap A = \emptyset \\ B \cup A & \text{falls } B \cap A \neq \emptyset \end{cases}.$$

abgeschlossen, weil A abgeschlossen ist. \square

Beispiel. a) Es ist D^n/S^{n-1} Hausdorffsch. Alternativ können wir auch sehen, dass $D^n/S^{n-1} \cong S^n$ ist. Hierzu betrachte die Projektion:

$$\begin{aligned} D^n &\longrightarrow S^n \\ x &\longmapsto \begin{cases} (2x, \sqrt{1 - \|2x\|^2}) & 0 \leq \|x\| \leq \frac{1}{2} \\ \left(\frac{2-2\|x\|}{\|x\|} \cdot x, -\sqrt{1 - (2-2\|x\|)^2} \right) & \frac{1}{2} \leq \|x\| \leq 1 \end{cases} \end{aligned}$$

Diese ist stetig, denn falls $\|x\| = \frac{1}{2}$ ist

$$\frac{2-2\|x\|}{\|x\|} = \frac{2-1}{\frac{1}{2}} = 2.$$

und

$$\sqrt{1 - \|2x\|^2} = \sqrt{1 - 1} = 0 = -\sqrt{0} = -\sqrt{1 - (2 - 2\|x\|)^2}.$$

Ist $\|x\| = 1$, so ist

$$\frac{2 - 2\|x\|}{\|x\|} = 0.$$

und somit ist $f(x) = (0, -1) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}$. Also faktorisiert f über $\bar{f} : D^n/S^{n-1} \rightarrow S^n$. Wir sehen wieder leicht, dass \bar{f} stetige Bijektion ist. Da D^n/S^{n-1} kompakt und S^n Hausdorffsch, folgt wieder, dass \bar{f} ein Homöomorphismus ist.

b) Wir erhalten nun eine Abbildung:

$$S^n \xrightarrow{q} S^n/(x \sim -x) \cong \mathbb{RP}^n \cong D^n/(x \sim -x) \longrightarrow D^n/S^{n-1} \cong S^n$$

und diese ist im Allgemeinen kein Homöomorphismus, denn jeder Punkt hat 2 Urbilder.

Abbildung
skizzieren

6 Basen und Subbasen

Definition 6.1 (Basis). Sei (X, \mathcal{O}) ein topologischer Raum. Sei $\mathcal{S} \subseteq \mathcal{O}$ eine Menge offener Mengen. Dann heißt \mathcal{S}

Basis, falls $\forall U \in \mathcal{O}$ existiert $S_i \in \mathcal{S}$ mit $U = \bigcup_{i \in I} S_i$

Subbasis, falls $\forall U \in \mathcal{O}$ existieren I, K_i endlich sowie $S_k \in \mathcal{S}$ mit

$$U = \bigcup_{i \in I} \bigcap_{k \in K_i} S_k.$$

Bemerkung. Ist \mathcal{S} eine Basis, so ist \mathcal{S} eine Subbasis.

Beispiel. Ist (X, d) ein metrischer Raum, so ist

$$\mathcal{S} = \{U(x, \varepsilon) \mid x \in X, \varepsilon > 0\}.$$

eine Basis der Topologie.

Satz 6.2 (Erzeugte Topologie). Sei X eine Menge, $\mathcal{S} \subseteq \mathcal{P}(X)$ eine Menge von Teilmengen. Dann existiert genau eine Topologie auf X , für die \mathcal{S} eine Subbasis ist, nämlich:

$$\mathcal{O} = \left\{ U \subseteq X \mid U = \bigcup_{i \in I} \bigcap_{k \in K_i} S_k \text{ mit } |K_i| < \infty, S_k \in \mathcal{S} \right\}.$$

Beweis. Übung.

□

Notation. Wir nennen \mathcal{O} die **von \mathcal{S} erzeugte Topologie**.

Lemma 6.3 (Stetigkeit auf Subbasiselementen). Sei $f : X \rightarrow Y$ eine Abbildung zwischen topologischen Räumen, \mathcal{S} eine Subbasis von Y . Dann sind äquivalent:

- 1) f ist stetig
- 2) $f^{-1}(S)$ ist offen für alle $S \in \mathcal{S}$

Beweis. '1) \Rightarrow 2)' ist klar, da Subbasiselemente offen sind.

'2) \Rightarrow 1)'. Sei $U \subseteq Y$ offen, dann $\exists K_i$ endlich und $S_k \in \mathcal{S}$ mit

$$U = \bigcup_{i \in I} \bigcap_{k \in K_i} S_k.$$

Dann ist aber genau

$$f^{-1}(U) = \bigcup_{i \in I} \bigcap_{k \in K_i} \underbrace{f^{-1}(S_k)}_{\text{offen}}.$$

offen, weil endliche Schnitte und beliebige Vereinigung offener Mengen offen sind. Also ist f stetig. \square

Satz 6.4. Eine Subbasis \mathcal{S} von (X, \mathcal{O}) ist eine Basis genau dann, wenn

$$\forall S_1, S_2 \in \mathcal{S} \exists S_i \in \mathcal{S} : S_1 \cap S_2 = \bigcup_{i \in I} S_i.$$

Beweis. ' \Rightarrow ' Da $S_1, S_2 \in \mathcal{S}$ sind diese offen. Dann ist auch $S_1 \cap S_2$ offen. Ist \mathcal{S} Basis, dann gibt es also $S_i \in \mathcal{S}$ mit

$$S_1 \cap S_2 = \bigcup_{i \in I} S_i.$$

' \Leftarrow ' Angenommen, $U \subseteq X$ ist offen und von der Form

$$U = \bigcup_{i \in I} \left(\bigcap_{k \in K_i} S_k \right).$$

mit K_i endlich und $S_k \in \mathcal{S}$. Nach Annahme ist

$$\bigcap_{k \in K_i} S_k = \bigcup_{j \in J_i} S_j.$$

und damit ist

$$U = \bigcup_{i \in I} \bigcup_{j \in J_i} S_j.$$

\square

Bemerkung*. Nach Annahme ist eigentlich erstmal der Schnitt von 2 Mengen die Vereinigung von S_i . Allerdings kann man dies per Induktion leicht auf n Teilmengen verallgemeinern, wenn wir

$$\bigcap_{k=1}^n S_k = S_1 \cap \bigcap_{k=2}^n S_k = S_1 \cap \bigcup_{i \in I} S_i = \bigcap_{i \in I} (S_1 \cap S_k) = \bigcup_{i \in I} \bigcup_{j \in J_i} S_j.$$

für geeignete $S_i, S_j \in \mathcal{S}$ schreiben.

Satz 6.5 (Satz von Alexander). Sei X ein topologischer Raum und \mathcal{S} eine Subbasis. Dann ist X kompakt genau dann, wenn jede Überdeckung durch Elemente aus \mathcal{S} eine endliche Teilüberdeckung besitzt.

Beweis. ' \Rightarrow ' ist klar.

' \Leftarrow ' Angenommen, X ist nicht kompakt, dann betrachte die Menge

$$\mathcal{C} := \{U \mid U \text{ offene Überdeckung ohne endliche Teilüberdeckung}\} \neq \emptyset.$$

Es ist \mathcal{C} partiell geordnet, indem wir $U \leq U'$ für $U \subseteq U'$ setzen.

Ist $U_1 \subseteq U_2 \subseteq \dots$ eine Kette, so ist $\bigcup_{U_i} \in \mathcal{C}$, denn

- Offenbar ist $\bigcup_{i \in I} U_i$ eine offene Überdeckung.
- Hat $\bigcup_{i \in I} U_i$ eine endliche Teilüberdeckung, so ist diese schon in einem U_i enthalten, und damit enthielte auch dieses U_i bereits eine endliche Teilüberdeckung \nexists

Wir können also das Lemma von Zorn anwenden, und somit existiert ein maximales Element $U \in \mathcal{C}$.

Behauptung 1. Ist $V \subseteq X$ offen und $V \notin U$, so hat $U \cup \{V\}$ eine endliche Teilüberdeckung

Unterbeweis. Sonst wäre $U \cup \{V\} \in \mathcal{C}$ und somit wäre U nicht maximal \blacksquare

Behauptung 2. $U \cap \mathcal{S}$ ist keine Überdeckung

Unterbeweis. Sonst hätte U eine endliche Teilüberdeckung nach Annahme. \blacksquare

Wegen Behauptung 2 existiert $x \in X$, der nicht von $U \cap \mathcal{S}$ überdeckt wird. Sei $W \in U$ mit $x \in W$. Da W offen ist, folgt

$$W = \bigcup_{i \in I} \bigcap_{k \in K_i} S_k.$$

mit K_i endlich und $S_k \in \mathcal{S}$. Dann existieren also S_1, \dots, S_n mit

$$x \in \bigcap_{i=1}^n S_i \subseteq W.$$

Da x nicht von $U \cap \mathcal{S}$ überdeckt wird, ist $S_i \notin U$. Aus der ersten Behauptung wissen wir nun aber, dass es $U_1^i, \dots, U_{n_i}^i \in U$ mit

$$\left\{U_j^i\right\}_{j=1}^n \cup \{S_i\} \quad \text{ist Überdeckung von } X.$$

Sei nun

$$\hat{U} := \left\{U_j^i \mid 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n_i\right\} \subseteq U.$$

Für alle i gilt also

$$X \subseteq \bigcup_{V \in \hat{U}} V \cup S_i.$$

Also folgt

$$X \setminus \bigcup_{V \in \hat{U}} V \subseteq S_i.$$

und damit ist auch

$$X \setminus \bigcup_{V \in \hat{U}} V \subseteq S_1 \cap \dots \cap S_n \subseteq W \in U.$$

Also ist $\hat{U} \cup \{W\}$ eine endliche Teilüberdeckung von U , \nexists . \square

7 Produkte

Definition 7.1 (Produkttopologie). Seien X_1, X_2 topologische Räume. Die **Produkttopologie** auf $X_1 \times X_2$ ist die Topologie erzeugt von

$$\mathcal{B} = \{U_1 \times U_2 \mid U_1 \subseteq X_1 \text{ offen}, U_2 \subseteq X_2 \text{ offen}\}.$$

Beispiel. Seien (X_1, d_1) und (X_2, d_2) metrische Räume. Auf $X_1 \times X_2$ haben wir die Metriken definiert durch

$$d_{\max}((x_1, x_2), (y_1, y_2)) := \max\{d_1(x_1, y_1), d_2(x_2, y_2)\}$$

$$\tilde{d}_1((x_1, x_2), (y_1, y_2)) := d_1(x_1, y_1) + d_2(x_2, y_2).$$

$$\tilde{d}_2((x_1, x_2), (y_1, y_2)) := \sqrt{d_1(x_1, y_1)^2 + d_2(x_2, y_2)^2}$$

Dies Metriken sind paarweise äquivalent (leicht zu prüfen). Zudem sind ε -Bälle in d_{\max} gegeben durch

$$U_{d_{\max}}((x_1, x_2), \varepsilon) = U_{d_1}(x_1, \varepsilon) \times U_{d_2}(x_2, \varepsilon).$$

D.h. die von d_{\max} induzierte Topologie ist die Produkttopologie.

Beispiel. Es ist $\mathbb{R}^2 \cong \mathbb{R} \times \mathbb{R}$, wobei wir auf der linken Seite die Standardtopologie und auf der rechten Seite die Produkttopologie meinen.

Bemerkung. \mathcal{B} ist per Definition eine Subbasis der Produkttopologie, in der Tat handelt es sich jedoch sogar um eine Basis:

Beweis. Seien $U_1 \times U_2$ sowie $V_1 \times V_2 \in \mathcal{B}$ Basiselemente. Wir stellen fest, dass

$$(U_1 \times U_2) \cap (V_1 \times V_2) = (U_1 \cap V_1) \times (U_2 \cap V_2).$$

das Produkt zweier Basiselemente ist, und somit sind wir fertig. \square

Satz 7.2 (Projektion auf Komponenten). Die Projektionen

$$p_X : \begin{array}{ccc} X \times Y & \longrightarrow & X \\ (x, y) & \longmapsto & x \end{array} \quad p_Y : \begin{array}{ccc} X \times Y & \longrightarrow & Y \\ (x, y) & \longmapsto & y \end{array}$$

sind stetig und offen

Beweis. Sei $U \subseteq X$ offen. Dann ist $p_X^{-1}(U) = U \times Y \in \mathcal{B}$, also offen. Analoges gilt für p_Y .

Sei $U \subseteq X \times Y$ offen. Dann können wir U schreiben als

$$U = \bigcup_{i \in I} U_i \times V_i.$$

OBdA können wir $V_i \neq \emptyset$ annehmen. Dann ist aber

$$P_X(U) = \bigcup_{i \in I} p_X(U_i \times V_i) = \bigcup_{i \in I} U_i \subseteq X.$$

offen, also ist p_X offen. \square

Bemerkung. Die Projektion p_X ist i.A. nicht abgeschlossen.

Beweis. Betrachte $A = \left\{ \left(\frac{1}{n}, n \right) \in \mathbb{R}^2 \mid n \in \mathbb{N}_{>0} \right\} \subseteq \mathbb{R}^2$ abgeschlossen. Dann ist aber $p_1(A) = \left\{ \frac{1}{n} \mid n \in \mathbb{N}_{>0} \right\} \subseteq \mathbb{R}$ nicht abgeschlossen. \square

Satz 7.3. Ist Y kompakt, so ist p_X abgeschlossen.

Beweis. Sei $A \subseteq X \times Y$ abgeschlossen. Wir müssen zeigen, dass $X \setminus p_X(A)$ offen ist, also wähle $x \in X \setminus p_X(A)$. Für alle $y \in Y$ ist $(x, y) \notin A$ (sonst wäre $x \in p_X(A)$), also gibt es

$$x \in U_y \subseteq X \quad y \in V_y \subseteq Y \text{ offen: } (U_y \times V_y) \cap A = \emptyset.$$

Damit sind die $\{V_y\}_{y \in Y}$ eine offene Überdeckung von Y und wir finden mit Y kompakt eine endliche Teilüberdeckung V_{y_1}, \dots, V_{y_n} von Y . Setzen wir nun

$$U := \bigcap_{i=1}^n U_{y_i}.$$

so ist $U \subseteq X$ offen als endlicher Schnitt und wir stellen mit

$$U \times V_{y_i} \subseteq U_{y_i} \times V_{y_i} \subseteq (X \times Y) \setminus A.$$

fest, dass bereits $U \times Y \subseteq (X \times Y) \setminus A$ (weil die V_{y_i} bereits Y überdecken). Nun muss aber bereits

$$U \subseteq X \setminus p_X(A).$$

gelten, und damit ist dieses U eine offene Umgebung von $x \in X \setminus p_X(A)$. \square

Lemma 7.4 (Subbasis der Produkttopologie). Seien X, Y topologische Räume. Die Menge

$$\mathcal{S} = \{U \times Y, X \times V \mid U \subseteq X \text{ offen}, V \subseteq Y \text{ offen}\}.$$

ist eine Subbasis der Produkttopologie.

Beweis. Sei $W \subseteq X \times Y$ offen. Dann gibt es nach der Definition der Produkttopologie $U_i \subseteq X, V_i \subseteq Y$ offen mit

$$W = \bigcup_{i \in I} (U_i \times V_i).$$

Also ist bereits

$$W = \bigcup_{i \in I} ((U_i \times Y) \cap (X \times V_i)).$$

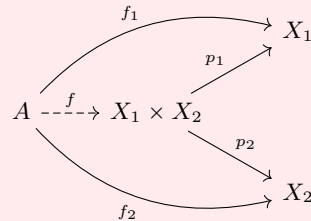
eine Vereinigung endlicher Schnitt von unseren Subbasiselementen.

Umgekehrt ist klar, dass alle Elemente aus \mathcal{S} auch offene Mengen in der Produkttopologie sind, da $\mathcal{S} \subseteq \mathcal{B}$. \square

Satz 7.5 (Universelle Eigenschaft des Produkts). Seien A, X_1, X_2 topologische Räume sowie $f_i : A \rightarrow X_i$. Dann ist die Abbildung

$$(f_1 \times f_2) =: f \mid \begin{array}{ccc} A & \longrightarrow & X_1 \times X_2 \\ a & \longmapsto & (f_1(a), f_2(a)) \end{array}$$

stetig genau dann, wenn f_1, f_2 stetig sind.



Beweis. Es ist $f_i = p_i \circ f$. Ist f stetig, so ist f_i stetig als Verknüpfung stetiger Funktionen.

Angenommen, es sind f_1, f_2 stetig. Wir müssen zeigen, dass für alle $U_1 \times U_2 \subseteq X_1 \times X_2$ mit $U_i \subseteq X_i$ offen auch $f^{-1}(U_1 \times U_2)$ offen ist. Hierzu stellen wir aber fest, dass

$$f^{-1}(U_1 \times U_2) = f_1^{-1}(U_1) \cap f_2^{-1}(U_2).$$

offen ist. □

Beispiel. a) Wir behaupten, dass

$$\mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\} \cong S^n \times (0, \infty) \cong S^n \times \mathbb{R}.$$

ist. Betrachte hierzu

$$\varphi : \begin{array}{ccc} \mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\} & \longrightarrow & S^n \times (0, \infty) \\ x & \longmapsto & \left(\frac{x}{\|x\|_2}, \|x\|_2 \right) \end{array}$$

Wir sehen nun mit der universellen Eigenschaft sofort, dass es sich um eine stetige Abbildung handelt. Zudem haben wir die Umkehrfunktion

$$\begin{array}{ccc} S^n \times (0, \infty) & \longrightarrow & \mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\} \\ (y, t) & \longmapsto & t \cdot y \end{array}$$

Wir müssen noch prüfen, dass diese stetig ist (Übung), dann haben wir einen Homöomorphismus.

b) $S^1 \times S^1$ ist ein Torus. Betrachte hierzu

$$\varphi : \begin{array}{ccc} [0, 1]^2 & \longrightarrow & S^1 \times S^1 \\ (s, t) & \longmapsto & (e^{2\pi i s}, e^{2\pi i t}) \end{array}$$

φ ist stetig und erfüllt $\varphi(s, 0) = \varphi(s, 1)$ sowie $\varphi(0, t) = \varphi(1, t)$.

Also faktorisiert φ wie gewünscht als

$$\begin{array}{ccc} [0, 1]^2 & \xrightarrow{\varphi} & S^1 \times S^1 \\ \downarrow & \nearrow \varphi' & \\ [0, 1]^2 / \sim & & \end{array}$$

wobei \sim die Relation ist, die wir für die Konstruktion des Torus verwendet hatten. φ' ist stetig und surjektiv nach der Universalen Eigenschaft, und wir sehen leicht, dass φ' injektiv ist. Also ist φ' stetig und bijektiv. Nun ist aber $[0, 1]^2$ kompakt und $S^1 \times S^1$ Hausdorff (z.B. als metrisierbare Teilmenge von $\mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^2$), und somit ist φ' ein Homöomorphismus nach **Korollar 5.8**.

Korollar 7.6 (Komponente eines Produkts). Seien X, Y topologische Räume sowie $y \in Y$. Dann ist $X \cong X \times \{y\} \subseteq X \times Y$ mittels $x \mapsto (x, y)$.

Beweis. Nenne diese Abbildung f , also

$$f : \begin{array}{ccc} X & \longrightarrow & X \times Y \\ x & \longmapsto & (x, y) \end{array}$$

f ist stetig, da sowohl id_X als auch

$$c_Y : \begin{array}{ccc} X & \longrightarrow & Y \\ x & \longmapsto & y \end{array}$$

stetig sind (mit universeller Eigenschaft). f faktorisiert nun über $X \times \{y\} \subseteq X \times Y$ und $f : X \rightarrow X \times \{y\}$ ist offensichtlich bijektiv. Wir müssen also noch zeigen, dass f offen ist.

Sei $U \subseteq X$ offen, dann ist $U \times Y \subseteq X \times Y$ offen. Es ist zudem

$$f(U) = U \times \{y\} = U \times Y \cap X \times \{y\} \subseteq X \times \{y\}.$$

in $X \times \{y\}$ offen. □

Satz 7.7 (Produkteigenschaften). Seien X, Y topologische Räume.

- 1) Sind X und Y Hausdorffsch, so auch $X \times Y$
- 2) Sind X und Y kompakt, so auch $X \times Y$.

Beweis. 1) Seien $(x, y) \neq (x', y') \in X \times Y$. Dann ist $x \neq x'$ oder $y \neq y'$. OBdA sei $x \neq x'$. Dann existieren $U, U' \subseteq X$ offen mit $x \in U, x' \in U'$ und $U \cap U' = \emptyset$, weil X Hausdorffsch. Dann sind

$$(x, y) \in U \times Y \quad (x', y') \in U' \times Y.$$

jeweils offen, und ihr Schnitt ist

$$(U \times Y) \cap (U' \times Y) = (U \cap U') \times Y = \emptyset.$$

Also ist $X \times Y$ Hausdorffsch.

- 2) Wir wollen den **Satz von Alexander** (6.5) verwenden. Sei \mathcal{U} eine offene Überdeckung von $X \times Y$ mit Elementen der Form $U \times Y$ oder $X \times V$. Sei

$$W = \bigcup_{U \times Y \in \mathcal{U}} U \subseteq X \quad W' = \bigcup_{X \times V \in \mathcal{U}} V \subseteq Y.$$

Ist $W = X$, so existiert eine endliche Teilüberdeckung von $\{U \mid U \times Y \in \mathcal{U}\}$ durch U_1, \dots, U_n . Dann ist bereits

$$\{U_i \times Y \mid i = 1, \dots, n\}.$$

eine endliche Teilüberdeckung von $X \times Y$. Für $W' = Y$ verfahren wir genauso. Ist $W \neq X$ und $W' \neq Y$, so existiert $x \in X \setminus W, y \in Y \setminus W'$. Dann ist (x, y) aber nicht von \mathcal{U} überdeckt, weil er von keinem $U \times Y$ und von keinem $X \times V$ überdeckt wird, \nexists . Also finden wir in beiden Fällen eine endliche Teilüberdeckung. \square

Bemerkung. Der Beweis geht auch ohne den **Satz von Alexander**. Viel leichter: Es genügt, offene Überdeckungen bezüglich einer Basis zu betrachten (Spezialfall von Alexander, leicht zu zeigen), dann verfahren wir wie folgt:
Sei \mathcal{U} eine Überdeckung von $X \times Y$ mit Elementen aus \mathcal{B} . Dann gibt es eine endliche Teilüberdeckung von $X \times \{y\}$. Sei diese $\{U_i^y \times V_i^y\}_{i=1}^{n_y}$. Setze

$$V_y := \bigcap_{i=1}^{n_y} V_i^y.$$

Dann ist dies eine Überdeckung von $X \times Y$. Die V_y bilden nun eine offene Überdeckung von Y , also finden wir wieder eine endliche Teilüberdeckung durch V_{y_1}, \dots, V_{y_n} . Da wir aber die $X \times V_{y_i}$ jeweils endlich überdeckt haben, können wir nun auch $X \times Y$ endlich überdecken.

Definition* (Produkt endlich vieler Mengen). Seien X_1, \dots, X_n topologische Räume. Dann definieren wir ihr Produkt rekursiv durch

$$X_1 \times \dots \times X_n := (X_1 \times \dots \times X_{n-1}) \times X_n.$$

Lemma 7.8 (Basis des Produktes). Seien X, Y topologische Räume mit Basen $\mathcal{B}_X, \mathcal{B}_Y$. Dann ist

$$\mathcal{B}_{X \times Y} := \{U \times V \mid U \in \mathcal{B}_X, V \in \mathcal{B}_Y\}.$$

eine Basis der Topologie auf $X \times Y$.

Korollar (Basis endlicher Produkte). Die Mengen $U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$ mit $U_i \subseteq X_i$ offen sind eine Basis der Topologie auf $X_1 \times \dots \times X_n$. Insbesondere ist die Topologie unabhängig von der Klammerung.

Beweis. Setze $\mathcal{B}_{X_i} = \mathcal{O}_{X_i}$. \square

Beweis von Lemma 7.8. Seien $W \in X, W' \subseteq Y$ offen. Dann existieren $U_i \in \mathcal{B}_X$ sowie $V_j \in \mathcal{B}_Y$ mit

$$W = \bigcup_{i \in I} U_i \quad W' = \bigcup_{j \in J} V_j.$$

Dann ist bereits:

$$W \times W' = \bigcup_{\substack{i \in I \\ j \in J}} U_i \times V_j.$$

Ist nun $A \subseteq X \times Y$ beliebig offen, so gilt

$$A = \bigcup W_i \times W'_i = \bigcup_{i \in I} \bigcup_{j \in J} U_i \times V_j.$$

Umgekehrt ist klar, dass die $U_i \times V_j$ offen in der Produkttopologie sind. \square

Bemerkung*. Im Beweis wurden - der Einfachheit halber - manche Indexmengen

Bemerkung*. Eigentlich haben wir im Beweis des Korollars die Aussage von **Lemma 7.8** für beliebig viele Räumen (endlich viele) benutzt. Man verallgemeinert das Lemma jedoch induktiv leicht auf endlich viele Räume:

Beweis von Lemma 7.8.* Den Fall $n = 2$ verwenden wir als Induktionsanfang, er wurde bereits gezeigt. Seien nun X_1, \dots, X_n mit Basen \mathcal{B}_i gegeben, dann wissen wir per Induktionsannahme bereits, dass

$$\mathcal{B}_{X_1 \times \dots \times X_{n-1}} := \{U_1 \times \dots \times U_{n-1} \mid U_i \in \mathcal{B}_i\}.$$

eine Basis von $X_1 \times \dots \times X_{n-1}$ ist. Zudem ist \mathcal{B}_n eine Basis von X_n und somit ist

$$\begin{aligned} \mathcal{B}_{(X_1 \times \dots \times X_{n-1}) \times X_n} &:= \{(U_1 \times \dots \times U_{n-1}) \times U_n \mid U_i \in \mathcal{B}_i\} \\ &= \{U_1 \times \dots \times U_n \mid U_i \in \mathcal{B}_i\} \\ &=: \mathcal{B}_{X_1 \times \dots \times X_n} \end{aligned}$$

eine Basis von $(X_1 \times \dots \times X_{n-1}) \times X_n = X_1 \times \dots \times X_n$ und der Induktionsschritt ist erbracht. \square

Satz 7.9 (Diagonaleigenschaft). Sei X ein topologischer Raum. Dann ist X Hausdorffsch, genau dann, wenn

$$\Delta_X := \{(x, x) \mid x \in X\} \subseteq X \times X.$$

abgeschlossen ist.

Notation. Wir nennen $\Delta_X \subseteq X^2$ die **Diagonale von X** .

Beweis. '⇒' Nimm an, dass X Hausdorffsch ist und sei $(x, y) \in X \times X \setminus \Delta_X$, d.h. $x \neq y$. Dann existieren U_x, U_y offen (in X), sodass $U_x \cap U_y = \emptyset$. Also ist

$$(x, y) \in U_x \times U_y \subseteq X \times X \setminus \Delta_X.$$

, denn wenn $(a, b) \in U_x \times U_y$, dann ist $a \neq b$. Also ist $X \times X \setminus \Delta_X$ offen nach Definition.

'⇐' Nimm nun an, dass die Diagonale abgeschlossen ist. Seien $x, y \in X$ mit $x \neq y$ beliebig. Dann ist

$$(x, y) \in X \times X \setminus \Delta_X = \bigcup_{i \in I} U_i \times V_i.$$

Also ist $(x, y) \in U \times V \subseteq X \times X \setminus \Delta_X$ für eine Wahl von U, V . Dann ist aber $x \in U, y \in V$ sowie $U \cap V = \emptyset$, denn wenn $a \in U \times V$, so $(a, a) \in U \times V \cap \Delta_X = \emptyset$, \nexists . \square

Definition 7.10 (Produkte beliebiger Mengen). Sei $\{X_i\}_{i \in I}$ eine Familie topologischer Räume. Die Produkttopologie auf

$$\prod_{i \in I} X_i := \{(x_i)_{i \in I} \mid x_i \in X_i\}.$$

ist die Topologie erzeugt von der Subbasis

$$\mathcal{S} := \left\{ U_j \times \prod_{i \neq j} X_i \mid j \in I, U_j \subseteq X_j \text{ offen} \right\}.$$

Bemerkung. • \mathcal{S} ist wirklich nur eine Subbasis. Eine Basis ist gegeben durch

$$\mathcal{B} := \left\{ \prod_{j \in J} U_j \times \prod_{i \in I \setminus J} X_i \mid J \subseteq I \text{ endlich}, U_j \subseteq X_j \text{ offen} \right\}.$$

d.h. wir dürfen bei endlich vielen Faktoren eine endliche Teilmenge wählen, und wählen in den restlichen Faktoren den ganzen Raum

- Ist I endlich, so stimmt dies mit der vorherigen Definition überein, weil wir für die Basis jeweils $J = I$ wählen können.
- ⚠ Ist I unendlich, so ist im Allgemeinen

$$\prod_{i \in I} U_i.$$

mit $U_i \subseteq X_i$ offen nicht offen.

Bemerkung* (Mengentheorie-Spam). • Wir benötigen das Auswahlaxiom, um einzusehen, dass obiges Produkt überhaupt nichtleer ist, sofern keiner der Faktoren leer ist. Formal ist das Produkt der X_i nämlich definiert als

$$\prod_{i \in I} X_i := \left\{ f : I \rightarrow \bigcup_{i \in I} X_i \mid \forall i: f(i) \in X_i \right\}.$$

und das Auswahlaxiom besagt genau, dass es für jede solche Familie nichtleerer Mengen (mindestens) eine solche Funktion gibt (es ist also äquivalent dazu, dass die Produkte nichtleer sind).

- Im Gegensatz zu dem, was in der Vorlesung genannt wurde, ist es kein Problem, wenn $I = \emptyset$, also die Familie leer ist. Dann

ist nämlich

$$\prod_{i \in I} X_i = \{f : \emptyset \rightarrow \emptyset \mid \forall i: f(i) \in \emptyset\} = \{\emptyset\}.$$

nicht leer. (Hierzu sollte man sich klarmachen, dass eine Funktion $f : A \rightarrow B$ eine Teilmenge von $A \times B$ war, sodass $\forall a \in A \exists! b \in B: (a, b) \in f$, und somit suchen wir eine Teilmenge $f \subseteq \emptyset \times \emptyset = \emptyset$).

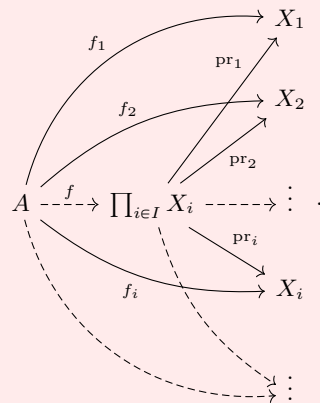
Auch die Topologie ist in diesem Fall wohldefiniert, weil die Subbasis wieder die leere Menge ist (nämlich eine Teilmenge von $\prod X_i = \{\emptyset\}$, und zwar $\{\emptyset\}$ selbst), und diese ist auch eine vollständige Topologie, weil unser topologischer Raum nur einen Punkt enthält (nämlich \emptyset). Wir erhalten also den einpunktigen topologischen Raum.

Vorlesung 7
Di 04 Mai 2021 12:12

Satz 7.11 (Universelle Eigenschaft des Produkts). Seien $(X_i)_{i \in I}$ topologische Räume, A ein topologischer Raum und seien $f_i : A \rightarrow X_i$ Funktionen. Sei

$$f : \begin{array}{c} A \longrightarrow \prod_{i \in I} X_i \\ a \longmapsto (f_i(a))_{i \in I} \end{array}$$

Dann ist f stetig genau dann, wenn alle f_i stetig sind.



Bemerkung*. Die Universelle Eigenschaft ist genau genommen die Folgende:

Seien $(X_i)_{i \in I}$ topologische Räume. Ein topologischer Raum X zusammen mit Abbildung $\text{pr}_i : X \rightarrow X_i$ wird Produkt der X_i genannt, wenn es für jedes A und stetige Abbildungen $f_i : A \rightarrow X_i$ genau eine induzierte Abbildung $f : A \rightarrow X$ gibt.

Diese Eigenschaft ist nun universell im Sinne der Kategorientheorie, d.h. bis auf eindeutig bestimmten Isomorphismus gibt es nur ein Paar $(X, (\text{pr}_i)_{i \in I})$, das die oben genannten Eigenschaften bestimmt.

Wir haben zwar oben nicht die Eindeutigkeit des Produkts gezeigt, aber dessen Existenz (was aus der Kategorientheorie nicht ohne weiteres folgt), indem wir ein explizites solches Objekt konstruiert haben.

Bemerkung*. Insbesondere sollte man sich merken, dass die kanonischen Projektionen pr_i wichtiger Teil der Information eines Produktes sind. Bei unsere expliziten Konstruktion 'kanonisch', denkbar ist jedoch auch, eine völlig andere Trägermenge des Produkts zu wählen, dann ist die Angabe der Projektionen essentiell.

Beweis. '⇒' Sei $j \in I$, setze

$$\text{pr}_j : \begin{array}{ccc} \prod_{i \in I} & \longrightarrow & X_j \\ (x_i)_{i \in I} & \longmapsto & x_j \end{array}$$

als Projektion auf die j -te Komponente.

Behauptung 1. pr_j ist stetig

Unterbeweis. Ist $U \subseteq X_j$ offen, dann ist $\text{pr}_j^{-1}(U) = U \times \prod_{i \neq j} X_i \in \mathcal{S}$ ein Element der Subbasis der Produkttopologie, also offen. Also ist pr_j stetig. ■

Nun ist $f_j = \text{pr}_j \circ f$ stetig als Verknüpfung stetiger Funktionen.

Verknüpfungen stetiger Funktionen sind stetig:

Seien $f : X \rightarrow Y$ und $g : Y \rightarrow Z$ stetig, dann ist $g \circ f : X \rightarrow Z$ stetig.

Beweis. Ist $U \subseteq Z$ offen, so ist

$$(g \circ f)^{-1}(U) = f^{-1}(g^{-1}(U)) \subseteq X.$$

offen, indem wir zunächst g stetig und dann f stetig verwenden. □

'⇐' Es genügt zu zeigen, dass $f^{-1}(Y) \subseteq A$ offen ist für alle $Y \in \mathcal{S}$. Sei also solch ein $Y \in \mathcal{S}$ beliebig, dann ist dieses von der Form

$$Y = U \times \prod_{i \neq j} X_i.$$

Dann ist $f^{-1}(Y) = f_j^{-1}(U) \subseteq A$ offen, da f_j stetig ist. □

Satz 7.12 (Satz von Tychonoff). Sei $(X_i)_{i \in I}$ eine Familie kompakter Räume. Dann ist $\prod_{i \in I} X_i$ kompakt.

Beweis. Wir verwenden wieder den **Satz von Alexander** (Satz 6.5). Sei \mathcal{U} eine Überdeckung durch Elemente aus \mathcal{S} . Sei $\mathcal{U}_j \subseteq \mathcal{U}$ gegeben durch die Elemente V von \mathcal{U} der Form

$$V = W \times \prod_{i \neq j} X_i \quad \text{mit } W \subseteq X_j \text{ offen.}$$

Dann ist

$$\mathcal{U} = \bigsqcup_{i \in I} \mathcal{U}_j.$$

Ist nun

$$\text{pr}_i(\mathcal{U}_i) = \{\text{pr}_i(V) \mid V \in \mathcal{U}_i\}.$$

eine offene Überdeckung von X_i , so existiert - weil X_i kompakt - eine endliche Teilüberdeckung $\text{pr}_i(V_1) \cup \dots \cup \text{pr}_i(V_k)$ von X_i mit $V_j \in \mathcal{U}_i$. Dann ist V_1, \dots, V_k eine endliche Teilüberdeckung von $\prod_{i \in I} X_i$.

Wir sind also fertig, außer im Fall

A: $\text{pr}_i(\mathcal{U}_i)$ ist keine Überdeckung von X_i für alle $i \in I$.

Dann finden wir $x_i \in X_i \setminus \bigcup_{V \in \mathcal{U}_i} \text{pr}_i(V)$ für jedes $i \in I$. Dann ist aber der Punkt

$$(x_i)_{i \in I} \in \prod_{i \in I} X_i.$$

nicht von \mathcal{U} überdeckt: Ist $(x_i)_{i \in I} \in V \in \mathcal{U}$, dann gibt es $i \in I$ mit $V \in \mathcal{U}_i$, und daraus folgt bereits $x_i \in \text{pr}_i(V)$, \nexists . \square

Bemerkung. Eigentlich haben wir die Notation pr_j für die Projektion $\prod_{i \in I} X_i \rightarrow X_j$ eingeführt, manchmal schreiben wir aber auch einfach nur p_j .

Beispiel. a) Seien X_1, \dots, X_n diskrete Räume. Dann ist auch $\prod_{i \in I} X_i$ diskret.

Beweis. Es ist

$$\{(x_1, \dots, x_n)\} = \{x_1\} \times \dots \times \{x_n\}.$$

Element der Produkttopologie, weil die $\{x_i\} \subseteq X_i$ offen sind. Also sind alle Punkte offen. \square

b) Betrachte $\{0, 2\}$ mit der diskreten Topologie. Dann ist

$$\prod_{\mathbb{N}} \{0, 2\} =: \{0, 2\}^{\mathbb{N}}.$$

kompakt nach dem **Satz von Tychonoff**. Dann ist $\prod_{\mathbb{N}} \{0, 2\}$ aber nicht diskret, weil wir sonst die offene Überdeckung

$$\prod_{\mathbb{N}} \{0, 2\} = \bigcup_{x \in \{0, 2\}^{\mathbb{N}}} \{x\}.$$

hätten, die keine endliche Teilüberdeckung besitzt.

Bemerkung*. Das Beispiel zeigt die wichtige Eigenschaft, dass nicht (notwendigerweise) alle Mengen der Form $\prod_{i \in I} U_i$ für $U_i \subseteq X_i$ offen auch im Produkt $\prod_{i \in I} X_i$ offen sind.

Satz 7.13. Ist $\{X_i\}_{i \in I}$ eine Familie von Hausdorffräumen, so ist auch $\prod_{i \in I} X_i$ Hausdorffsch.

Beweis. Ist $(x_i)_{i \in I} \neq (y_i)_{i \in I} \in \prod_{i \in I} X_i$, dann gibt es $i \in I$ mit $x_i \neq y_i$. Da X_i Hausdorffsch ist, existieren $U_i, V_i \subseteq X_i$ offen mit $x_i \in U_i, y_i \in V_i$ und $U_i \cap V_i = \emptyset$. Dann sind aber beretis

$$U_i \times \prod_{i \neq j} X_j \quad V_i \times \prod_{i \neq j} X_j.$$

zwei disjunkte, offene Umgebungen von $(x_i)_{i \in I}$ und $(y_i)_{i \in I}$. \square

Ziel*. Wir wollen uns im Folgenden Fragen, wann wir Räume in 'schöne' Räume einbetten können, wobei 'schön' für uns Kompakt + Hausdorff heißen soll.

Definition 7.14 (Abschluss, Dichtheit). Sei X ein topologischer Raum und $Y \subseteq X$ eine Teilmenge.

- 1) Der **Abschluss** \bar{Y} ist definiert als

$$\bar{Y} := \bigcap_{\substack{Y \subseteq A \\ A \subseteq X \text{ abg.}}} A.$$

Als Schnitt abgeschlossener Mengen ist \bar{Y} selbst abgeschlossen (wie der Name suggeriert).

- 2) Y ist **dicht** in X , falls $\bar{Y} = X$.

Definition 7.15 (Einbettung). Sei $f : X \rightarrow Y$ stetig. Dann ist f eine **Einbettung**, falls $f : X \rightarrow f(X)$ ein Homöomorphismus ist.

Definition 7.16 (Kompaktifizierung). Sei $\iota : Y \hookrightarrow X$ eine Einbettung. Dann ist X eine **Kompaktifizierung** von Y , falls

- 1) X ist kompakt und Hausdorffsch.
- 2) $\iota(Y) \subseteq X$ ist dicht (in X).

Definition 7.17 (Vollständige Regularität). Ein topologischer Raum X ist **vollständig regulär**, falls

- 1) X ist Hausdorffsch
- 2) $\forall A \subseteq X$ abgeschlossen und $x \in X \setminus A$ existiert eine stetige Abbildung $f : X \rightarrow [0, 1]$, sodass $f(x) = 1$ und $f|_A \equiv 0$

Bemerkung. Jeder vollständig reguläre Raum ist regulär. Hierzu betrachte $f^{-1}((\frac{1}{2}, 1])$ sowie $f^{-1}([0, \frac{1}{2}))$. Diese sind offenbar disjunkt, offen, und Umgebungen von x bzw. A .

Lemma 7.18. Ist X vollständig regulär und $Y \subseteq X$, dann ist auch Y vollständig regulär.

Beweis. 1) Da X Hausdorffsch ist, ist auch Y Hausdorffsch.
 2) Sei $A \subseteq Y$ abgeschlossen und $y \in Y \setminus A$. Dann existiert $A' \subseteq X$ abgeschlossen mit $A' \cap Y = A$. Da X vollständig regulär ist, gibt es $f : X \rightarrow [0, 1]$ stetig mit $f|_{A'} \equiv 0$ und $f(y) = 1$. Dann erfüllt $f|_Y : Y \rightarrow [0, 1]$ unsere gewünschten Bedingungen, weil

$$(f|_Y)|_A \equiv 0 \quad f|_Y(y) = 1.$$

□

Satz 7.19. X ist genau dann vollständig regulär, wenn X eine Kompaktifizierung besitzt.

Beweis. Eine Richtung sei hier schon skizziert: Sei Y eine Kompaktifizierung von X . Da Y kompakt und Hausdorffsch, ist Y normal (nach Satz 5.10). Wir zeigen später, dass dann Y auch vollständig regulär ist. Mit Lemma 7.18 ist also auch $X \subseteq Y$ vollständig regulär. \square

Bemerkung*. Hier verwenden wir entscheidend, dass wir nicht nur $X \hookrightarrow Y$ injektiv abgebildet, sondern eingebettet im Sinne von Definition 7.15 haben, damit wir X auch homöomorph mit einem Teilraum $X \subseteq Y$ identifizieren können.

Wir wollen nun zu einem beliebigen Raum eine Kompaktifizierung konstruieren. Sei X ein topologischer Raum. Sei

$$\mathcal{C}(X) := \{f : X \rightarrow [0, 1] \mid f \text{ stetig}\}.$$

Nach dem Satz von Tychonoff ist $\prod_{\mathcal{C}(X)} [0, 1]$ kompakt und nach Satz 7.13 Hausdorffsch. Definiere nun eine Abbildung

$$\iota : X \rightarrow \prod_{\mathcal{C}(X)} [0, 1].$$

durch die Komponenten $\iota_f(x) = f(x)$. (wir benutzen also in der f -ten Komponente einfach die Abbildung f). Da alle $f \in \mathcal{C}(X)$ stetig sind, ist ι stetig (nach Satz 7.11). Setze nun

$$\beta X := \overline{\iota(X)} \subseteq \prod_{\mathcal{C}(X)} [0, 1].$$

$\beta(X)$ ist kompakt und Hausdorffsch als abgeschlossener Teilraum eines kompakten Hausdorffraums.

Satz und Definition* (Stone-Čech-Kompaktifizierung). Für einen topologischen Raum X heißt der eben konstruierte Raum $\beta X = \beta(X)$ **Stone-Čech-Kompaktifizierung** von X . βX ist ein kompakter Hausdorffraum.

Beweis.* Klar nach eben gesagtem, wir verwenden Satz von Tychonoff und Satz 7.13. \square

Warnung. Diese ist jedoch nur eine Kompaktifizierung im Sinne von Definition 7.16 falls X vollständig regulär ist.

Bemerkung*. Wir wissen schon, dass es sich im Allgemeinen nicht um eine Kompaktifizierung nach Definition 7.16 handeln kann, weil wir im Beweis von Satz 7.19 gezeigt haben, dass eine Kompaktifizierung nur für vollständig reguläre Räume existieren kann. Der folgende Satz zeigt nun, dass es sich bei der Stone-Čech-Kompaktifizierung tatsächlich um eine handelt, wenn X vollständig regulär ist:

Satz 7.20. $\iota : X \rightarrow \prod_{C(X)} [0, 1]$ ist eine Einbettung, falls X vollständig regulär ist.

Beweis. Injektivität: Seien $x \neq y \in X$. Dann sind $\{x\}, \{y\} \subseteq X$ abgeschlossen und es existiert $f : X \rightarrow [0, 1]$ mit $f(x) = 0$ und $f(y) = 1$ (hier benutzen wir die vollständige Regularität). Dann ist aber bereits $\iota(x) \neq \iota(y)$ in Komponenten f .

Einbettung: Wir müssen noch zeigen, dass $\forall U \subseteq X$ offen $\iota(U) \subseteq \iota(X)$ offen ist, damit $\iota : X \rightarrow \iota(X)$ ein Homöomorphismus ist.

Sei $U \subseteq X$ offen, setze $A := X \setminus U$ und sei $x \in U$. Dann finden wir (nach vollständiger Regularität von X) eine Funktion $f : X \rightarrow [0, 1]$, sodass $f(x) = 1$ und $f|_A = 0$. Setze

$$V := \left(\frac{1}{2}, 1 \right]_f \times \prod_{C(X) \setminus \{f\}} [0, 1] \subseteq \prod_{C(X)} [0, 1].$$

als offene Teilmenge von $\prod_{C(X)} [0, 1]$. Dann ist

$$\iota(x) \in \underbrace{V \cap \iota(X)}_{\text{offen in } \iota(X)} \subseteq \iota(X \setminus A) = \iota(U).$$

Damit ist $\iota(U) \subseteq X$ Umgebung all seiner Punkte, also selbst offen. \square

Bemerkung. Ist K kompakt und Hausdorffsch, so ist $\iota(K) \subseteq \prod_{C(K)} [0, 1]$ kompakt, also abgeschlossen, da $\prod_{C(K)} [0, 1]$ kompakt, und deswegen ist $\beta(K) = \overline{\iota(K)} = \iota(K) \cong K$.

Bemerkung*. Dass $\iota(K) \cong K$ folgt in vorheriger Bemerkung daraus, dass wir wegen K kompakt und Hausdorffsch nach **Satz 5.10** wissen, dass K normal ist, und dann (mit der noch nicht bewiesenen Implikation $\text{normal} \Rightarrow \text{vollständig regulär}$) den vorherigen **Satz 7.20** anwenden können, weswegen ι eine Einbettung ist und somit einen Homöomorphismus $K \cong \iota(K)$ induziert.

Beweis von Satz 7.19.* Wir haben bereits gesehen, dass ein kompaktifizierbarer Raum notwendigerweise vollständig regulär ist (im ersten Teil des Beweises). Ist X nun vollständig regulär, so ist $\beta(X)$ ein kompakter Hausdorff-Raum, und nach **Satz 7.20** handelt es sich bei $\iota_X : X \rightarrow \beta(X)$ genau um eine Einbettung. \square

Lemma 7.21 (Fortsetzung stetiger Funktionen). Sei $f : X \rightarrow Y$ stetig sowie $U \subseteq X$.

- 1) Dann ist $f(\overline{U}) \subseteq \overline{f(U)}$
- 2) Ist $U \subseteq X$ dicht, $g : X \rightarrow Y$ auch stetig und $f|_U = g|_U$ sowie Y Hausdorffsch, so ist $f = g$

Beweis.* 1) Sei $y \in f(\overline{U})$, also gibt es $x \in \overline{U}$ mit $f(x) = y$. Sei $y \in V \subseteq X$ eine beliebige offene Umgebung von y . Dann ist $f^{-1}(V)$ eine offene Umgebung von x nach Stetigkeit von f . Da $x \in \overline{U}$ ist $f^{-1}(V) \cap U \neq \emptyset$ und wir wählen $x_0 \in f^{-1}(V) \cap U$. Dann ist $f(x_0) \in V \cap f(U)$ und somit $V \cap f(U) \neq \emptyset$. Da V beliebig war, ist nach Definition $y \in \overline{f(U)}$.

- 2) Nimm an, dass $f \neq g$, dann gibt es $x \in X$ mit $f(x) \neq g(x)$. Da Y Hausdorffsch, können wir die beiden Punkte durch offene Mengen trennen, also finden wir $f(x) \in U_f, g(x) \in U_g$ mit $U_f \cap U_g = \emptyset$ und U_f, U_g offen. Dann sind auch $f^{-1}(U_f), g^{-1}(U_g)$ offene Mengen nach Stetigkeit von f, g , also ist auch $f^{-1}(U_f) \cap g^{-1}(U_g)$ offen. Zudem $x \in f^{-1}(U_f) \cap g^{-1}(U_g)$, da $f(x) \in U_f, g(x) \in U_g$ nach Voraussetzung. Da $U \subseteq X$ dicht ist, ist $U \cap (f^{-1}(U_f) \cap g^{-1}(U_g)) \neq \emptyset$ und wir finden $x_0 \in U \cap f^{-1}(U_f) \cap g^{-1}(U_g)$. Dann ist wegen $f|_U \equiv g|_U$ $f(x_0) = g(x_0)$, aber auch $f(x_0) \in U_f, g(x_0) \in U_g$, also $f(x_0) = g(x_0) \in U_f \cap U_g$. Aber nach Voraussetzung ist $U_f \cap U_g = \emptyset$, \nexists . Also $f \equiv g$.

□

Bemerkung*. Der Beweis von Lemma 7.21 war eine Übungsaufgabe auf Blatt 4.

Satz 7.22 (Universelle Eigenschaft von β). Sei $f : X \rightarrow K$ stetig, K kompakt und Hausdorffsch. Dann existiert eine eindeutige Fortsetzung $\hat{f} : \beta(X) \rightarrow K$, so dass

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{\iota} & \beta(X) \\ f \downarrow & \swarrow \hat{f} & \\ K & & \end{array}.$$

kommutiert.

Ist $f(X) \subseteq K$ dicht, so ist \hat{f} surjektiv: Es ist $\hat{f}(\beta(X))$ kompakt, also abgeschlossen und enthält $f(X)$ (weil das Diagramm kommutiert), und daraus folgt $\overline{f(X)} \subseteq \hat{f}(\beta(X))$.

Beweis. Die Eindeutigkeit von \hat{f} folgt direkt aus Lemma 7.21, weil \hat{f} über die Kommutativität des Diagramms auf der dichten Teilmenge $\iota(X) \subseteq \beta(X)$ bereits eindeutig bestimmt ist.

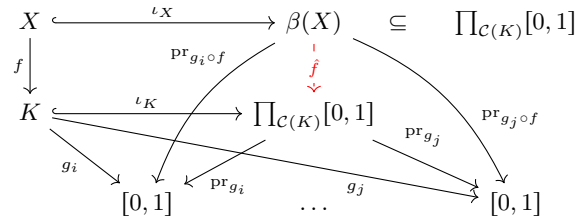
Idee. Ist $K = [0, 1]$, so wähle $\hat{f} = \text{pr}_f|_{\beta(X)}$ als stetige Projektion. Dann kommutiert nämlich

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{\iota} & \prod_{\mathcal{C}(X)} [0, 1] \\ & \searrow f & \downarrow \text{pr}_f \\ & & [0, 1] \end{array}.$$

nach Konstruktion von ι .

Das ganze können wir nun zwar nicht direkt für K machen, allerdings für jedes $g \in \mathcal{C}(K)$. Für jedes $g \in \mathcal{C}(K)$ erhalten wir durch Komposition $g \circ f \in \mathcal{C}(X)$ und damit nach vorheriger Überlegung eine Abbildung $\text{pr}_{g \circ f}|_{\beta(X)} : \beta(X) \rightarrow [0, 1]$. Verwenden wir diese als Komponentenabbildung nach $\prod_{\mathcal{C}(K)} [0, 1]$, so induzieren wir eine Abbildung

$$\hat{f} = \prod \text{pr}_{g \circ f} |_{\beta(X)}:$$



Das linke obere Quadrat kommutiert auch: Hierzu müssen wir überprüfen, dass die Kompositionen mit den Projektionen auf die Komponenten von $\prod_{C(K)} [0, 1]$ jeweils gleich sind, diese sind aber - nach Konstruktion - jeweils $g_i \circ f$.

Wegen $\overline{\iota(X)} = \beta(X)$ ist nun

$$\begin{aligned} \hat{f}(\beta(X)) &= \hat{f}(\overline{\iota(X)}) \\ &\stackrel{\text{Lemma 7.21}}{\subseteq} \overline{(\hat{f} \circ \iota_X)(X)} \\ &\stackrel{\text{kommutiert}}{=} \overline{(\iota_K \circ f)(X)} \\ &\subseteq \overline{\iota_K(K)} \\ &\stackrel{K \text{ kompakt}}{=} \iota_K(K) \\ &\stackrel{\text{Satz 7.20}}{\cong} K \end{aligned}$$

und damit können wir \hat{f} mit ι_K^{-1} verknüpfen um unsere gewünschte Abbildung $\beta(X) \rightarrow K$ zu erhalten. \square

Bemerkung* (Kategorientheorie-Spam). $\beta(X)$ ist sogar ein Funktor von **Top** (Kategorie der topologischen Räume) nach **CHaus** (Kategorie der kompakten Hausdorff-Räume). Das liegt daran, dass wir im Beweis von **Satz 7.22** alle Schritte bis $\hat{f}(\beta(X)) \subseteq \overline{\iota_K(K)} = \beta(K)$ genauso durchführen können, ohne verwenden zu müssen, dass K kompakter Hausdorff-Raum ist, und wir damit für $f : X \rightarrow K$ eine entsprechende Abbildung $\hat{f} : \beta(X) \rightarrow \beta(K)$ induzieren, sodass

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{\iota_X} & \beta(X) \\ f \downarrow & & \downarrow \hat{f} \\ K & \xrightarrow{\iota_K} & \beta(K) \end{array}$$

kommutiert. Alternativ können wir auch **Satz 7.22** auf die Abbildung $\iota_K \circ f : X \rightarrow \beta(K)$ anwenden, da $\beta(K)$ nach Konstruktion kompakt und Hausdorffsch ist.

Bemerkung*. Man sollte nicht zu sehr darüber nachdenken, wie $\beta(X)$ aussieht: Die Konstruktion des Raumes ist äußerst nicht-konstruktiv und benutzt implizit das Auswahlaxiom (damit wir Tychonoff nutzen können. Man kann sich auch überlegen, dass der Satz von Tychonoff äquivalent ist zum Auswahlaxiom, weswegen wir auch nicht ohne es auskommen, das geht hier aber zu weit). Vielmehr

sollte man die bloße eines solchen Raumes als theoretisches Ergebnis im Hinterkopf behalten, die wir benötigt haben, um die Frage nach der Kompaktifizierbarkeit eines Raumes zu beantworten. Auch der Spezialfall, dass $\beta(X) = X$ für kompakte Hausdorff-Räume ist wichtig.

Stichwortverzeichnis

- n -Sphäre, 12
- Basis, 31
- Diagonale von X , 39
- Diskrete Metrik, 5
- Diskrete Topologie, 8
- Einbettung, 44
- Einheitsintervall, 15
- Einheitskreis, 12
- Gerade mit zwei Ursprüngen, 24
- Homöomorphismus, 13
 - homöomorph, 13
- Kleinsche Flasche, 16
- Kompaktifizierung, 44
- Menge
 - abgeschlossen, 10
 - Abschluss, 44
 - dicht, 44
 - offen, 6
 - saturiert, 28
- Metrik, 4
 - äquivalente, 9
- Metrischer Raum, 5
- Metrisierbar, 7
- Offene Menge, 7
- Offener ε -Ball um x , 5
- Projektion
 - kanonische, 13
- Raum
 - reell projektiv, 17
- Sierpinski-Raum, 8
- Stetig, 5, 7
 - in $x \in X$, 5
- Stone-Čech-Kompaktifizierung, 45
- Subbasis, 31
- Topologie, 7
 - indiskrete, 8
 - induzierte, 7
 - Produkt-, 34
 - Quotienten-, 14
 - Teilraum-, 11
 - Unterraum-, 11
 - von \mathcal{S} erzeugte, 32
- Topologischer Raum, 7
 - Hausdorff, 18
 - Hausdorff'sch, 18
 - kompakt, 22
 - normal, 20
 - regulär, 21
 - vollständig regulär, 44
- Trennungsaxiom, 18
 - T_1 , 19
 - T_2 , 18
 - T_3 , 21
 - T_4 , 20
- Umgebung, 6
 - von x , 10
- Äquivalenzklasse, 13
 - Menge der, 13