

Geometrie und Topologie



Siehe [GitHub](#)

5. November 2013

Vorwort

Dieses Skript wird/wurde im Wintersemester 2013/2014 geschrieben. Es beinhaltet Vorlesungsnotizen von Studenten zur Vorlesung von Prof. Dr. Herrlich.

Es darf jeder gerne Verbesserungen einbringen!

Die Kurz-URL des Projekts lautet tinyurl.com/GeoTopo.

An dieser Stelle möchte ich noch Herrn Prof. Dr. Herrlich für einige Korrekturvorschläge und einen gut strukturierten Tafelanschrieb danken, der als Vorlage für dieses Skript diente. Vielen Dank auch an Frau Lenz, die es mir erlaubt hat, ihre Übungsaufgaben und meine Lösungen zu benutzen.

Inhaltsverzeichnis

1	Topologische Grundbegriffe	2
1.1	Vorgeplänkel	2
1.2	Topologische Räume	2
1.3	Metrische Räume	6
1.4	Stetigkeit	8
1.5	Zusammenhang	10
1.6	Kompaktheit	13
	Übungsaufgaben	14
	Lösungen der Übungsaufgaben	15
	Symbolverzeichnis	16
	Stichwortverzeichnis	17

1 Topologische Grundbegriffe

1.1 Vorgeplänkel

Die Kugeloberfläche S^2 lässt sich durch strecken, stauchen und umformen zur Würfeloberfläche oder der Oberfläche einer Pyramide verformen, aber nicht zum \mathbb{R}^2 oder zu einem Torus. Für den \mathbb{R}^2 müsste man die Oberfläche unendlich ausdehnen und für einen Torus müsste man ein Loch machen.

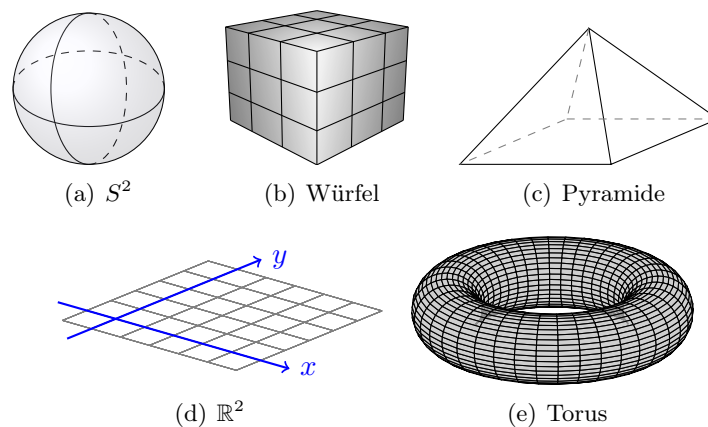


Abbildung 1.1: Beispiele für verschiedene Formen

1.2 Topologische Räume

Definition 1

Ein **topologischer Raum** ist ein Paar (X, \mathfrak{T}) bestehend aus einer Menge X und $\mathfrak{T} \subseteq \mathcal{P}(X)$ mit folgenden Eigenschaften

- (i) $\emptyset, X \in \mathfrak{T}$
- (ii) Sind $U_1, U_2 \in \mathfrak{T}$, so ist $U_1 \cap U_2 \in \mathfrak{T}$
- (iii) Ist I eine Menge und $U_i \in \mathfrak{T}$ für jedes $i \in I$, so ist $\bigcup_{i \in I} U_i \in \mathfrak{T}$

Die Elemente von \mathfrak{T} heißen **offene Teilmengen** von X .

$A \subseteq X$ heißt **abgeschlossen**, wenn $X \setminus A$ offen ist.

Es gibt auch Mengen, die weder abgeschlossen, noch offen sind wie z. B. $[0, 1)$. Auch gibt es Mengen, die sowohl abgeschlossen als auch offen sind.

Korollar 1.1 (Mengen, die offen und abgeschlossen sind, existieren)

Betrachte \emptyset und X mit der „trivialen Topologie“ $\mathfrak{T}_{\text{triv}} = \{ \emptyset, X \}$.

Es gilt: $X \in \mathfrak{T}$ und $\emptyset \in \mathfrak{T}$, d. h. X und \emptyset sind offen. Außerdem $X^C = X \setminus X = \emptyset \in \mathfrak{T}$ und $X \setminus \emptyset = X \in \mathfrak{T}$, d. h. X und \emptyset sind als Komplement offener Mengen abgeschlossen. ■

Beispiel 1

- 1) $X = \mathbb{R}^n$ mit der euklidischen Metrik.

$$U \subseteq \mathbb{R}^n \text{ offen} \Leftrightarrow \text{für jedes } x \in U \text{ gibt es } r > 0, \\ \text{sodass } \mathfrak{B}_r(x) = \{ y \in \mathbb{R}^n \mid d(x, y) < r \} \subseteq U$$

Also: $\mathfrak{T} = \{ M \subseteq X \mid M \text{ ist offene Kugel} \}$

- 2) Allgemeiner: (X, d) metrischer Raum

- 3) X Menge, $\mathfrak{T} = \mathcal{P}(X)$ heißt „diskrete Topologie“

- 4) $X := \mathbb{R}$, $\mathfrak{T}_Z := \{ U \subseteq \mathbb{R} \mid \mathbb{R} \setminus U \text{ endlich} \} \cup \{ \emptyset \}$ heißt „Zariski-Topologie“

Beobachtungen:

- $U \in \mathfrak{T}_Z \Leftrightarrow \exists f \in \mathbb{R}[X]$, sodass $\mathbb{R} \setminus U = V(f) = \{ x \in \mathbb{R} \mid f(x) = 0 \}$
- Es gibt keine disjunkten offenen Mengen in \mathfrak{T}_Z

- 5) $X := \mathbb{R}^n$, $\mathfrak{T}_Z = \{ U \subseteq \mathbb{R}^n \mid \text{Es gibt Polynome } f_1, \dots, f_r \in \mathbb{R}[X_1, \dots, X_n] \text{ sodass } \mathbb{R}^n \setminus U = V(f_1, \dots, f_r) \}$

- 6) $X := \{ 0, 1 \}$, $\mathfrak{T} = \{ \emptyset, \{ 0, 1 \}, \{ 0 \} \}$ heißt „Sierpińskiraum“.
abgeschlossene Mengen: $\emptyset, \{ 0, 1 \}, \{ 1 \}$

Definition 2

Sei (X, \mathfrak{T}) ein topologischer Raum, $x \in X$.

Eine Teilmenge $U \subseteq X$ heißt **Umgebung** von x , wenn es ein $U_0 \in \mathfrak{T}$ gibt mit $x \in U_0$ und $U_0 \subseteq U$.

Definition 3

Sei (X, \mathfrak{T}) ein topologischer Raum, $M \subseteq X$ eine Teilmenge.

- a) $M^\circ := \{ x \in M \mid M \text{ ist Umgebung von } x \} = \bigcup_{\substack{U \subseteq M \\ U \in \mathfrak{T}}} U$ heißt **Inneres** oder **offener Kern** von M .

Kern von M .

- b) $\overline{M} := \bigcap_{\substack{M \subseteq A \\ A \text{ abgeschlossen}}} A$ heißt **abgeschlossene Hülle** oder **Abschluss** von M .

- c) $\partial M := \overline{M} \setminus M^\circ$ heißt **Rand** von M .

- d) M heißt **dicht** in X , wenn $\overline{M} = X$ ist.

Beispiel 2

- 1) $X = \mathbb{R}$ mit euklidischer Topologie

$$M = \mathbb{Q} \Rightarrow \overline{M} = \mathbb{R}, \quad M^\circ = \emptyset$$

- 2) $X = \mathbb{R}$, $M = (a, b) \Rightarrow \overline{M} = [a, b]$

$$\begin{aligned} 3) \quad X &= \mathbb{R}, \mathfrak{T} = \mathfrak{T}_Z \\ M &= (a, b) \Rightarrow \overline{M} = \mathbb{R} \end{aligned}$$

Definition 4

Sei (X, \mathfrak{T}) ein topologischer Raum.

- a) $\mathfrak{B} \subseteq \mathfrak{T}$ heißt **Basis** der Topologie \mathfrak{T} , wenn jedes $U \in \mathfrak{T}$ Vereinigung von Elementen aus \mathfrak{B} ist.
- b) $\mathfrak{B} \subseteq \mathfrak{T}$ heißt **Subbasis**, wenn jedes $U \in \mathfrak{T}$ Vereinigung von endlich vielen Durchschnitten von Elementen aus \mathfrak{B} ist.

Beispiel 3

Gegeben sei $X = \mathbb{R}^n$ mit euklidischer Topologie \mathfrak{T} . Dann ist

$$\mathfrak{B} = \{ B_r(x) \mid r \in \mathbb{Q}_{>0}, x \in \mathbb{Q}^n \}$$

ist eine abzählbare Basis von \mathfrak{T} .

Bemerkung 1

Sei X eine Menge und $\mathfrak{B} \subseteq \mathcal{P}(X)$. Dann gibt es genau eine Topologie \mathfrak{T} auf X , für die \mathfrak{B} Subbasis ist.

Definition 5

Sei (X, \mathfrak{T}) ein topologischer Raum, $Y \subseteq X$.

$\mathfrak{T}_Y := \{ U \cap Y \mid U \in \mathfrak{T} \}$ ist eine Topologie auf Y .

\mathfrak{T}_Y heißt **Spurtopologie** und (Y, \mathfrak{T}_Y) heißt ein **Teilraum** von (X, \mathfrak{T})

Definition 6

Seien X_1, X_2 topologische Räume.

$U \subseteq X_1 \times X_2$ sei offen, wenn es zu jedem $x = (x_1, x_2) \in U$ Umgebungen U_i um x_i mit $i = 1, 2$ gibt, sodass $U_1 \times U_2 \subseteq U$ gilt.

$\mathfrak{T} = \{ U \subseteq X_1 \times X_2 \mid U \text{ offen} \}$ ist eine Topologie auf $X_1 \times X_2$. Sie heißt **Produkttopologie**.

$\mathfrak{B} = \{ U_1 \times U_2 \mid U_i \text{ offen in } X_i, i = 1, 2 \}$ ist eine Basis von \mathfrak{T} .

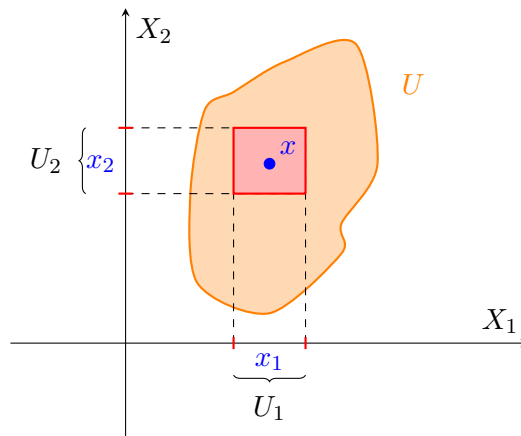


Abbildung 1.2: Zu $x = (x_1, x_2)$ gibt es Umgebungen U_1, U_2 mit $U_1 \times U_2 \subseteq U$

Beispiel 4

- 1) $X_1 = X_2 = \mathbb{R}$ mit euklidischer Topologie.
 \Rightarrow Die Produkttopologie auf $\mathbb{R} \times \mathbb{R} = \mathbb{R}^2$ stimmt mit der euklidischen Topologie auf \mathbb{R}^2 überein.

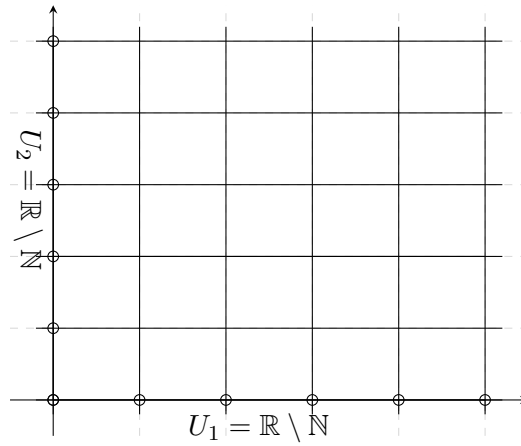


Abbildung 1.3: Zariski-Topologie auf \mathbb{R}^2

- 2) $X_1 = X_2 = \mathbb{R}$ mit Zariski-Topologie. \mathfrak{T} Produkttopologie auf \mathbb{R}^2 : $U_1 \times U_2$
(Siehe Abb. 1.3)

Definition 7

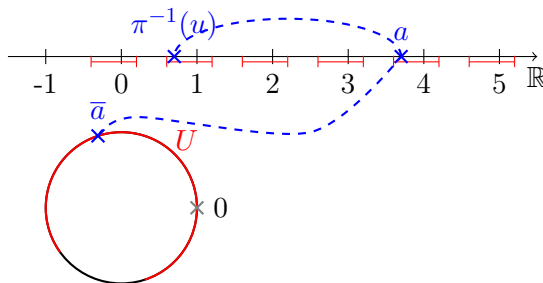
Sei X topologischer Raum, \sim eine Äquivalenzrelation auf X , $\overline{X} = X/\sim$ sei die Menge der Äquivalenzklassen, $\pi : x \rightarrow \overline{x}$, $x \mapsto [x]_\sim$.

$$\mathfrak{T}_{\overline{X}} := \{ U \subseteq \overline{X} \mid \pi^{-1}(U) \in \mathfrak{T}_X \}$$

$(\overline{X}, \mathfrak{T}_{\overline{X}})$ heißt **Quotiententopologie**.

Beispiel 5

$$X = \mathbb{R}, a \sim b : \Leftrightarrow a - b \in \mathbb{Z}$$



$$0 \sim 1, \text{ d. h. } [0] = [1]$$

Beispiel 6

$$X = \mathbb{R}^2, (x_1, y_1) \sim (x_2, y_2) \Leftrightarrow \begin{aligned} x_1 - x_2 &\in \mathbb{Z} \\ y_1 - y_2 &\in \mathbb{Z} \end{aligned}$$

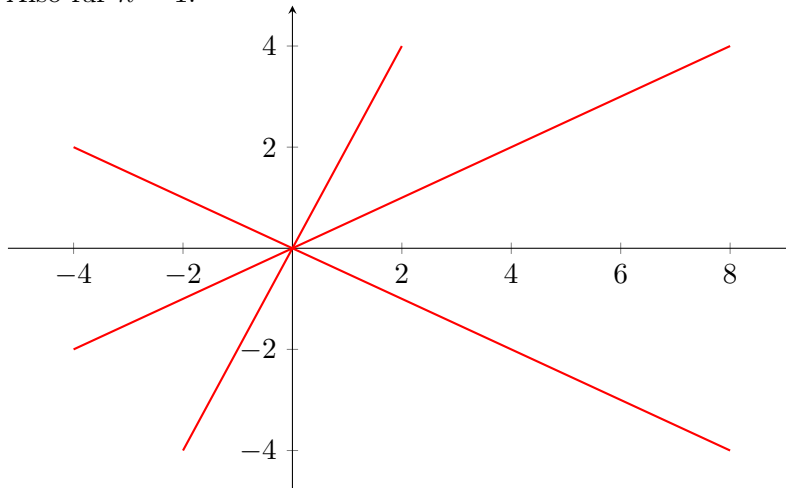
X/\sim ist ein Torus.

Beispiel 7

$$\begin{aligned} X &= \mathbb{R}^{n-1} \setminus \{0\}, x \sim y \Leftrightarrow \exists \lambda \in \mathbb{R}^\times \text{ mit } y = \lambda x \\ &\Leftrightarrow x \text{ und } y \text{ liegen auf der gleichen Ursprungsgerade} \end{aligned}$$

$$\overline{X} = \mathbb{P}^n(\mathbb{R})$$

Also für $n = 1$:



1.3 Metrische Räume

Definition 8

Sei X eine Menge. Eine Abbildung $d : X \times X \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ heißt **Metrik**, wenn gilt:

- (i) Definitheit: $d(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$
- (ii) Symmetrie: $d(x, y) = d(y, x)$
- (iii) Dreiecksungleichung: $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$

Das Paar (X, d) heißt ein **metrischer Raum**.

Bemerkung 2

Sei (X, d) ein metrischer Raum und

$$\mathfrak{B}_r(x) := \{ y \in X \mid d(x, y) < r \} \text{ für } x \in X, r \in \mathbb{R}^+$$

\mathfrak{B} ist Basis einer Topologie auf X .

Beispiel 8

Sei V ein euklidischer oder hermitescher Vektorraum mit Skalarprodukt $\langle \cdot, \cdot \rangle$. Dann wird V durch $d(x, y) := \sqrt{\langle x - y, x - y \rangle}$ zum metrischen Raum.

Beispiel 9 (diskrete Metrik)

Sei X eine Menge. Dann heißt

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

die **diskrete Metrik**. Die Metrik d induziert die **diskrete Topologie**.

Beispiel 10

$X = \mathbb{R}^2$ und $d((x_1, y_1), (x_2, y_2)) := \max(\|x_1 - x_2\|, \|y_1 - y_2\|)$ ist Metrik.

Beobachtung: d erzeugt die euklidische Topologie.

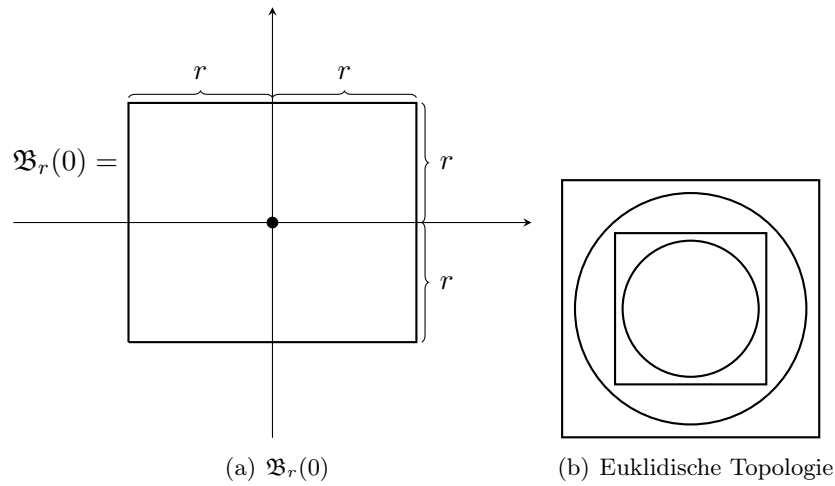
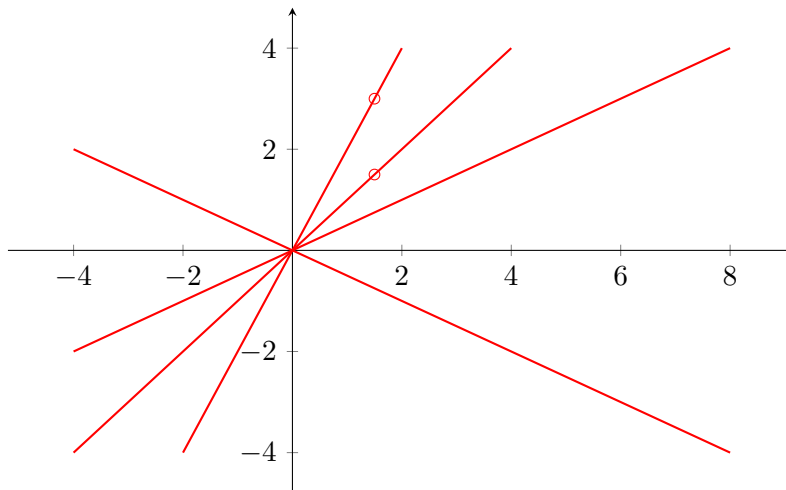


Abbildung 1.4: Veranschaulichungen zur Metrik d

Beispiel 11 (SNCF-Metrik¹)

$$X = \mathbb{R}^2$$



Definition 9

Ein topologischer Raum X heißt **hausdorffsch**, wenn es für je zwei Punkte $x \neq y$ in X Umgebungen U_x um x und U_y um y gibt, sodass $U_x \cap U_y = \emptyset$.

Bemerkung 3 (Trennungseigenschaft)

Metrische Räume sind hausdorffsch, da

$$d(x, y) > 0 \Rightarrow \exists \varepsilon : \mathfrak{B}_\varepsilon(x) \cap \mathfrak{B}_\varepsilon(y) = \emptyset$$

Ein Beispiel für einen topologischen Raum, der nicht hausdorffsch ist, ist $(\mathbb{R}, \mathfrak{T}_Z)$.

Bemerkung 4

Seien X, X_1, X_2 Hausdorff-Räume.

- a) Jeder Teilraum um X ist Hausdorffsch.
- b) $X_1 \times X_2$ ist Hausdorffsch.

Definition 10

Sei X ein topologischer Raum und $(x)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge in X . $x \in X$ heißt **Grenzwert** oder **Limes** von (x_n) , wenn es für jede Umgebung U von x ein n_0 gibt, sodass $x_n \in U$ für alle $n \geq n_0$.

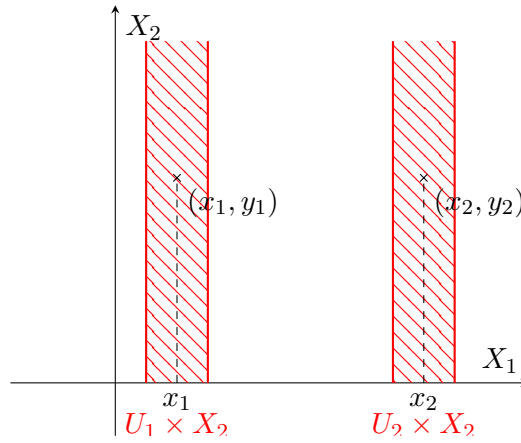


Abbildung 1.5: Wenn X_1, X_2 hausdorffsch sind, dann auch $X_1 \times X_2$

Korollar 1.2

Ist X hausdorffsch, so hat jede Folge in X höchstens einen Grenzwert.

Beweis: Annahme: x und y mit $x \neq y$ sind Grenzwerte der Folge (x_n) .

Nach Voraussetzung gibt es Umgebungen U_x von x und U_y von y mit $U_x \cap U_y = \emptyset$. Nach Annahme gibt es n_0 mit $x_n \in U_x \cap U_y$ für alle $n \geq n_0 \Rightarrow$ Widerspruch ■

1.4 Stetigkeit

Definition 11

Seien X, Y topologische Räume und $f : X \rightarrow Y$ eine Abbildung.

- a) f heißt **stetig**, wenn für jedes offene $U \subseteq Y$ auch $f^{-1}(U) \subseteq X$ offen ist.
- b) f heißt **Homöomorphismus**, wenn es eine stetige Abbildung $g : Y \rightarrow X$ gibt, sodass $g \circ f = \text{id}_X$ und $f \circ g = \text{id}_Y$.

Korollar 1.3

Seien X, Y metrische Räume und $f : X \rightarrow Y$ eine Abbildung.

Dann gilt: f ist stetig \Leftrightarrow zu jedem $x \in X$ und jedem $\varepsilon > 0$ gibt es $\delta(x, \varepsilon) > 0$, sodass für alle $y \in X$ mit $d(x, y) < \delta$ gilt $d_Y(f(x), f(y)) < \varepsilon$.

Beweis: „ \Rightarrow “: Sei $x \in X, \varepsilon > 0$ gegeben und $U := \mathfrak{B}_\varepsilon(f(x))$.

Dann ist U offen in Y .

$\stackrel{11.a}{\Rightarrow} f^{-1}(U)$ ist offen in X . Dann ist $x \in f^{-1}(U)$.

$\Rightarrow \exists \delta > 0$, sodass $\mathfrak{B}_\delta(x) \subseteq f^{-1}(U)$

$\Rightarrow f(\mathfrak{B}_\delta(x)) \subseteq U$

$\Rightarrow \{y \in X \mid d_X(x, y) < \delta\} \Rightarrow \text{Beh.}$

„ \Leftarrow “: Sei $U \subseteq Y$ offen, $x \in f^{-1}(U)$.

Dann gibt es $\varepsilon > 0$, sodass $\mathfrak{B}_\varepsilon(f(x)) \subseteq U$

$\stackrel{\text{Vor.}}{\Rightarrow}$ Es gibt $\delta > 0$, sodass $f(\mathfrak{B}_\delta(x)) \subseteq \mathfrak{B}_\varepsilon(f(x))$

$\Rightarrow \mathfrak{B}_\delta(x) \subseteq f^{-1}(\mathfrak{B}_\varepsilon(f(x))) \subseteq f^{-1}(U)$ ■

Bemerkung 5

Eine Ableitung $f : X \rightarrow Y$ von topologischen Räumen ist genau dann stetig, wenn für jede abgeschlossene Teilmenge $A \subseteq Y$ gilt: $f^{-1}(A) \subseteq X$ ist abgeschlossen.

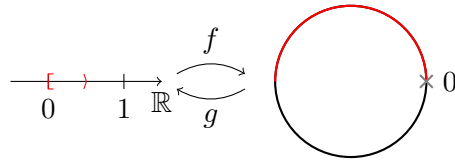


Abbildung 1.6: Beispiel einer stetigen Funktion f , deren Umkehrabbildung g nicht stetig ist.

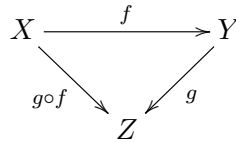
Beispiel 12

- 1) Für jeden topologischen Raum X gilt: $\text{Id}_X : X \rightarrow X$ ist Homöomorphismus.
- 2) Ist Y trivialer topologischer Raum, d.h. $\mathfrak{T} = \mathfrak{T}_{\text{triv}}$, so ist jede Abbildung $f : X \rightarrow Y$ stetig.
- 3) Ist X diskreter topologischer Raum, so ist $f : X \rightarrow Y$ stetig für jeden topologischen Raum Y und jede Abbildung f .
- 4) Sei $X = [0, 1)$, $Y = S^1 = \{ z \in \mathbb{C} \mid \|z\| = 1 \}$ und $f(t) = e^{2\pi it}$. Die Umkehrabbildung g ist nicht stetig, da $g^{-1}(U)$ nicht offen ist (vgl. Abb. 1.6)

Korollar 1.4

Seien X, Y, Z topologische Räume, $f : X \rightarrow Y$ und $g : Y \rightarrow Z$ stetige Abbildungen.

Dann ist $g \circ f : X \rightarrow Z$ stetig.



Beweis: Sei $U \subseteq Z$ offen $\Rightarrow (g \circ f)^{-1}(U) = f^{-1}(g^{-1}(U))$. $g^{-1}(U)$ ist offen in Y weil g stetig ist, $f^{-1}(g^{-1}(U))$ ist offen in X , weil f stetig ist. ■

Bemerkung 6

- a) Für jeden topologischen Raum ist $\text{Homöo}(X) := \{ f : X \rightarrow X \mid f \text{ ist Homöomorphismus} \}$ eine Gruppe.
- b) Jede Isometrie $f : X \rightarrow Y$ zwischen metrischen Räumen ist ein Homöomorphismus.
- c) $\text{Isom}(X) := \{ f : X \rightarrow X \mid f \text{ ist Isometrie} \}$ ist Untergruppe von $\text{Homöo}(X)$ für jeden metrischen Raum X .

Korollar 1.5

Seien X, Y topologische Räume. $\pi_X : X \times Y \rightarrow X$ und $\pi_Y : X \times Y \rightarrow Y$ die Projektionen

$$(x, y) \mapsto x \quad (x, y) \mapsto y$$

Wird $X \times Y$ mit der Produkttopologie versehen, so sind π_X und π_Y stetig.

Beweis: Sei $U \subseteq X$ offen $\Rightarrow \pi_X^{-1}(U) = U \times Y$ ist offen in $X \times Y$. ■

Korollar 1.6

Sei X ein topologischer Raum, \sim eine Äquivalenzrelation auf X , $\overline{X} = X/\sim$ der Bahnraum versehen mit der Quotiententopologie, $\pi : X \rightarrow \overline{X}$, $x \mapsto [x]_\sim$.

Dann ist π stetig.

Beweis: Nach Definition ist $U \subseteq \overline{X}$ offen $\Leftrightarrow \pi^{-1}(U) \subseteq X$ offen. ■

Beobachtung: Die Quotiententopologie ist die feinste Topologie, sodass π stetig wird.

Beispiel 13 (Stereographische Projektion)

\mathbb{R}^n und $S^n \setminus \{N\}$ sind homöomorph für beliebiges $N \in S^n$

$$\begin{aligned} S^n &= \{x \in \mathbb{R}^{n+1} \mid \|x\| = 1\} \\ &= \left\{x \in \mathbb{R}^{n+1} \mid \sum_{i=1}^{n+1} x_i^2 = 1\right\} \end{aligned}$$

Es sei $N = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}$.

$$\begin{aligned} f: S^n \setminus \{N\} &\rightarrow \mathbb{R}^n \\ P &\mapsto \overbrace{L_P \cap H}^{\text{genau ein Punkt}} \end{aligned}$$

wobei $\mathbb{R}^n = H = \left\{ \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_{n+1} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n+1} \mid x_{n+1} = 0 \right\}$ und L_P die Gerade in \mathbb{R}^{n+1} durch N und P ist.

Sei $P = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_{n+1} \end{pmatrix}$, so ist $x_{n+1} < 1$, also ist L_P nicht parallel zu H . Also schneiden sich L_P und H in genau einem Punkt \hat{P} .

Es gilt: f ist bijektiv und die Umkehrabbildung ist ebenfalls stetig.

1.5 Zusammenhang

Definition 12

Ein Raum X heißt **zusammenhängend**, wenn es keine offenen nichtleeren Teilmengen U_1, U_2 von X gibt mit $U_1 \cap U_2 = \emptyset$ und $U_1 \cup U_2 = X$.

Bemerkung 7

X ist zusammenhängend \Leftrightarrow Es gibt keine nichtleeren abgeschlossenen Teilmengen A_1, A_2 mit $A_1 \cap A_2 = \emptyset$ und $A_1 \cup A_2 = X$.

Bemerkung 8

Eine Teilmenge $Y \subseteq X$ heißt zusammenhängend, wenn Y als topologischer Raum mit der Teilraumtopologie zusammenhängend ist.

Beispiel 14

\mathbb{R}^n ist mit der euklidischen Topologie zusammenhängend, denn:

Angenommen, $\mathbb{R}^n = U_1 \cup U_2$ mit U_i offen, $U_i \neq \emptyset$ und $U_1 \cap U_2 = \emptyset$ existiert.

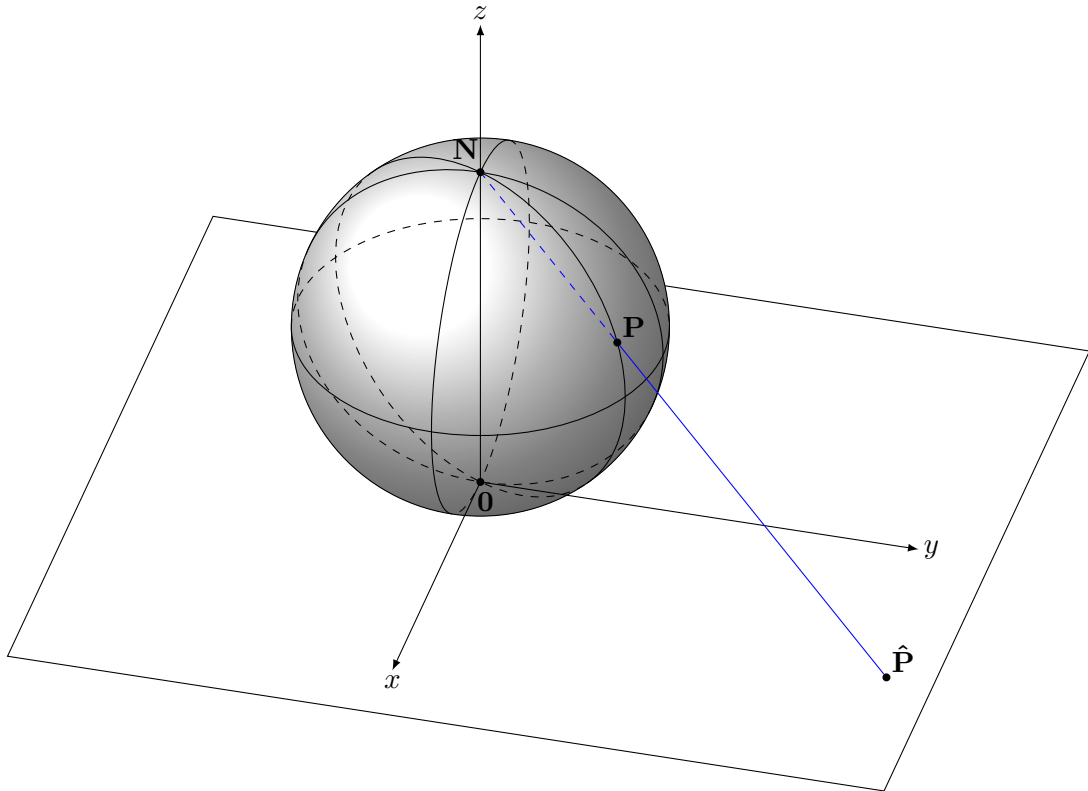


Abbildung 1.7: Visualisierung der sphärischen Projektion

Bildquelle: texample.net/tikz/examples/map-projections

Sei $x \in U_1, y \in U_2$ und $[x, y]$ die Strecke zwischen x und y . Dann ist $U_1 \cap [x, y]$ die Vereinigung von offenen Intervallen. Dann gibt es $z \in [x, y]$ mit $z \in \partial(U_1 \cap [x, y])$, aber $z \notin U_1 \Rightarrow z \in U_2$. In jeder Umgebung von z liegt ein Punkt von $U_1 \Rightarrow$ Widerspruch zu U_2 offen.

Beispiel 15 (Zusammenhang von Räumen)

1. $\mathbb{R} \setminus \{0\}$ ist nicht zusammenhängend, denn $\mathbb{R} \setminus \{0\} = \mathbb{R}_{<0} \cup \mathbb{R}_{>0}$
2. $\mathbb{R}^2 \setminus \{0\}$ ist zusammenhängend.
3. $\mathbb{Q} \subsetneq \mathbb{R}$ ist nicht zusammenhängend, da

$$(\mathbb{Q} \cap \mathbb{R}_{<\sqrt{2}}) \cup (\mathbb{Q} \cap \mathbb{R}_{>\sqrt{2}}) = \mathbb{Q}$$

4. $\{x\}$ ist zusammenhängend für jedes $x \in X$, wobei X ein topologischer Raum ist.
5. \mathbb{R} mit Zariski-Topologie ist zusammenhängend

Korollar 1.7

Sei X ein topologischer Raum, $A \subseteq X$ zusammenhängend. Dann ist auch \overline{A} zusammenhängend.

Beweis: Angenommen $\overline{A} = A_1 \cup A_2, A_i$ abgeschlossen, $\neq \emptyset, A_1 \cap A_2 = \emptyset$

$$\Rightarrow A = \underbrace{(A \cap A_1)}_{\text{abgeschlossen}} \cup \underbrace{(A \cap A_2)}_{\text{abgeschlossen}}_{\text{disjunkt}}$$

Wäre $A \cap A_1 = \emptyset$

$$\Rightarrow A \subseteq A_2$$

$$\Rightarrow \overline{A} \subseteq A_2$$

$$\Rightarrow A_1 = \emptyset$$

\Rightarrow Widerspruch

■

Korollar 1.8

Sei X topologischer Raum, $A, B \subseteq X$ zusammenhängend.

Ist $A \cap B \neq \emptyset$, dann ist $A \cup B$ zusammenhängend.

Beweis: Sei $A \cup B = U_1 \cup U_2, U_i \neq \emptyset$ offen, disjunkt

$$\stackrel{\text{GE}}{\Rightarrow} A = (A \cap U_1) \cup (A \cap U_2) \text{ offen, disjunkt}$$

$$\stackrel{A \text{ zhgd.}}{\Rightarrow} A \cap U_1 = \emptyset$$

$$\stackrel{A \cap B \neq \emptyset}{\Rightarrow} U_1 \subseteq B$$

$$B = \underbrace{(B \cap U_1)}_{=U_1} \cup \underbrace{(B \cap U_2)}_{=\emptyset} \text{ ist unerlaubte Zerlegung}$$

■

Definition 13

Sei X ein topologischer Raum.

Für $x \in X$ sei

$$Z(x) := \bigcup_{\substack{A \subseteq X \text{ zhgd.} \\ x \in A}} A$$

$Z(x)$ heißt **Zusammenhangskomponente**.

Korollar 1.9

Sei X ein topologischer Raum. Dann gilt:

- a) $Z(x)$ ist die größte zusammenhängende Teilmenge von X , die x enthält.
- b) $Z(x)$ ist abgeschlossen.
- c) X ist disjunkte Vereinigung von Zusammenhangskomponenten.

Beweis: a) Sei $Z(x) = A_1 \cup A_2$ mit $A_i \neq \emptyset$ abgeschlossen, disjunkt.

GE sei $x \in A_1$ und $y \in A_2$. y liegt in einer zusammenhängenden Teilmenge A , die auch x enthält. $\Rightarrow A = \underbrace{(A \cap A_1)}_{\ni x} \cup \underbrace{(A \cap A_2)}_{\ni y}$ ist unerlaubte Zerlegung.

b) Nach Korollar 1.7 ist $\overline{Z(x)}$ zusammenhängend $\Rightarrow \overline{Z(x)} \subseteq Z(x) \Rightarrow Z(x) = \overline{Z(x)}$

c) Ist $Z(y) \cap Z(x) \neq \emptyset \stackrel{1.8}{\Rightarrow} Z(y) \cup Z(x)$ ist zusammenhängend.

$$\begin{aligned} \Rightarrow Z(x) \cup Z(y) &\subseteq Z(x) \Rightarrow Z(y) \subseteq Z(x) \\ &\subseteq Z(y) \Rightarrow Z(x) \subseteq Z(y) \end{aligned}$$

■

Korollar 1.10

Sei $f : X \rightarrow Y$ stetig. Ist $A \subseteq X$ zusammenhängend, so ist $f(A) \subseteq Y$ zusammenhängend.

Beweis: Sei $f(A) = U_1 \cup U_2, U_i \neq \emptyset$, offen, disjunkt.

$$\Rightarrow f^{-1}(f(A)) = f^{-1}(U_1) \cup f^{-1}(U_2)$$

$$\Rightarrow A = \underbrace{(A \cap f^{-1}(U_1))}_{\neq \emptyset} \cup \underbrace{(A \cap f^{-1}(U_2))}_{\neq \emptyset}$$

■

1.6 Kompaktheit**Definition 14**

Ein topologischer Raum X heißt **kompakt**, wenn jede offene Überdeckung von X eine endliche Teilüberdeckung besitzt.

$$\mathfrak{U} = \{ U_i \}_{i \in I}, \quad U_i \text{ offen in } X, \quad \bigcup_{i \in I} U_i = X$$

Definition 15

Sei X eine Menge und $T \subseteq \mathcal{P}(X)$.

T heißt eine **Überdeckung** von X , wenn gilt:

$$\forall x \in X : \exists M \in T : x \in M$$

Korollar 1.11

$I = [0, 1]$ ist kompakt bezüglich der euklidischen Topologie.

Beweis: Sei $(U_i)_{i \in J}$ eine offene Überdeckung von I .

Es gibt ein $\delta > 0$, sodass jedes Teilintervall von I in einem der U_i enthalten ist. Dann überdecken endlich viele ...

das
haben
wir
nicht
mehr
ge-
schafft

Übungsaufgaben

Aufgabe 1 (Sierpińskiraum)

Es sei $X := \{0, 1\}$ und $\mathfrak{T}_X := \{\emptyset, \{0\}, X\}$. Dies ist der sogenannte Sierpińskiraum.

- (a) Beweisen Sie, dass (X, \mathfrak{T}_X) ein topologischer Raum ist.
- (b) Ist (X, \mathfrak{T}_X) hausdorffsch?
- (c) Ist \mathfrak{T}_X von einer Metrik erzeugt?

Aufgabe 2

Es sei \mathbb{Z} mit der von den Mengen $U_{a,b} := a + b\mathbb{Z}$ ($a \in \mathbb{Z}, b \in \mathbb{Z} \setminus \{0\}$) erzeugten Topologie versehen.

Zeigen Sie:

- (a) Jedes $U_{a,b}$ und jede einelementige Teilmenge von \mathbb{Z} ist abgeschlossen.
- (b) Die $U_{a,b}$ bilden eine Basis der Topologie.
- (c) $\{-1, 1\}$ ist nicht offen.
- (d) Es gibt unendlich viele Primzahlen.

Lösungen der Übungsaufgaben

Lösung zu Aufgabe 1

Lösung schreiben

Lösung zu Aufgabe 2

Lösung schreiben

Symbolverzeichnis

\mathfrak{B} Basis einer Topologie.	$A \times B$ Kreuzprodukt zweier Mengen.
$\mathfrak{B}_\delta(x)$ δ -Kugel um x .	$\mathcal{P}(M)$ Potenzmenge von M .
\mathfrak{T} Topologie.	$A \setminus B$ A ohne B .
\mathbb{N} Natürliche Zahlen.	$A \subseteq B$ Teilmengenbeziehung.
\mathbb{Z} Ganze Zahlen.	$A \subsetneq B$ echte Teilmengenbeziehung.
\mathbb{Q} Rationale Zahlen.	$[x]_\sim$ Äquivalenzklassen von x bzgl. \sim .
\mathbb{R} Reelle Zahlen.	X/\sim X modulo \sim .
\mathbb{R}^\times Multiplikative Einheitengruppe von \mathbb{R} .	$\ x\ $ Norm von x .
\mathbb{R}^+ Echt positive reelle Zahlen.	$ x $ Betrag von x .
\mathbb{C} Komplexe Zahlen.	$\mathbf{\text{OE}}$ Ohne Einschränkung.
\mathbb{P} Projektiver Raum.	π_X Projektion auf X .
\overline{M} Abschluss der Menge M .	$\langle \cdot, \cdot \rangle$ Skalarprodukt.
M° Inneres der Menge M .	S^n Sphäre.
∂M Rand der Menge M .	$f^{-1}(M)$ Urbild von M .

Index

- abgeschlossen, 2
- Abschluss, 3
- Basis, 4
- dicht, 3
- Grenzwert, 7
- Homöomorphismus, 8
- Inneres, 3
- Kern
 - offener, 3
- kompakt, 13
- Limes, 7
- Metrik, 6
 - diskrete, 6
 - SNCF, 7
- offen, 2
- Produkttopologie, 4
- Projektion
 - stereographische, 10
- Quotiententopologie, 5
- Rand, 3
- Raum
 - hausdorffscher, 7
 - metrischer, 6
 - topologischer, 2
- Sierpińskiraum, 3
- Spurtopologie, 4
- stetig, 8
- Subbasis, 4
- Teilraum, 4
- Topologie
 - diskrete, 3, 6
 - euklidische, 3
 - triviale, 3
 - Zariski, 3, 11
- Torus, 2
- Überdeckung, 13
- Umgebung, 3
- zusammenhängend, 10
- Zusammenhang, 10–13
- Zusammenhangskomponente, 12