

Einführung in die Geometrie und Topologie - Mitschrieb -

Übung im Wintersemester 2011/2012

Sarah Lutteropp

9. November 2011



Inhaltsverzeichnis

1	24.10.2011	2
1.1	Induzierte Topologie	2
1.2	Offen und abgeschlossen	2
1.3	Basis der von der Standardmetrik auf dem \mathbb{R}^n definierten Topologie	3
1.4	Teilraumtopologie	3
1.5	Homotopieäquivalenz	3
2	31.10.2011	5
2.1	Universelle Eigenschaft der Teilraumtopologie	5
2.2	Homöomorphismen	6
2.3	Die Peano-Kurve	6
3	07.11.2011	8
3.1	Nachträge und Wiederholungen zur Vorlesung	8

Vorwort

Dies ist ein Mitschrieb der Übung “Einführung in die Geometrie und Topologie” vom Wintersemester 2011/2012 am Karlsruher Institut für Technologie, die von Frau Dipl.-Math. Sandra Lenz gehalten wird.

Kapitel 1

24.10.2011

1.1 Induzierte Topologie

Definition 1.1 (Induzierte Topologie). Sei X eine Menge. Sei $d: X \times X \rightarrow \mathbb{R}$ eine Metrik. Diese Metrik d definiert durch folgende Bedingung eine Topologie \mathcal{O} auf X :

$O \subseteq X$ ist genau dann offen (d.h. $O \in \mathcal{O}_d$), wenn für alle $x \in O$ ein $\epsilon > 0$ existiert mit

$$B_\epsilon(x) := \{y \in X \mid d(x, y) < \epsilon\} \subseteq O.$$

(B_ϵ nennt man offenen ϵ -Ball.)

1.2 Offen und abgeschlossen

Sei X eine Menge.

- Mengen können sowohl offen als auch abgeschlossen (zugleich) sein.

Beispiel 1.1. Betrachte \emptyset und X in der trivialen Topologie $\mathcal{O} = \{X, \emptyset\}$.

Es gilt: $X \in \mathcal{O}, \emptyset \in \mathcal{O}$ nach Definition, d.h. X und \emptyset sind offen.

Außerdem gilt: $X^c = \emptyset \in \mathcal{O}$, ebenso: $\emptyset^c = X \in \mathcal{O}$, d.h. die Komplemente von X und \emptyset sind offen und somit X und \emptyset abgeschlossen.

- Mengen können weder offen noch abgeschlossen sein.

Beispiel 1.2. Betrachte \mathbb{R} mit der von der Standardmetrik induzierten Topologie. Es ist $[0, 1[$ nicht offen in dieser Topologie, denn für den Punkt 0 finden wir kein $\epsilon > 0$, so dass $B_\epsilon(0)$ in $[0, 1[$ liegt. Die Menge $[0, 1[$ ist aber auch nicht abgeschlossen, da ihr Komplement $\mathbb{R} \setminus [0, 1[=] - \infty, 0] \cup [1, \infty[$ nicht offen ist.

- Bilder offener Mengen unter stetigen Abbildungen müssen nicht notwendigerweise offen sein.

Beispiel 1.3. Betrachte \mathbb{R} mit der von der Standardmetrik induzierten Topologie.

Definiere $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto x^2$.

Es gilt für die in \mathbb{R} offene Menge $] - 1, 1[$:

$f(] - 1, 1[) = [0, 1[$ und $[0, 1[$ ist nicht offen in \mathbb{R} .

1.3 Basis der von der Standardmetrik auf dem \mathbb{R}^n definierten Topologie

$$\mathcal{B} = \{B_{\frac{1}{m}}(x) \mid x \in \mathbb{Q}^n, m \in \mathbb{N}\}$$

Diese Basis ist abzählbar.

1.4 Teilraumtopologie

Es sei (X, \mathcal{O}) ein topologischer Raum, $A \subseteq X$.

Die Teilraumtopologie (oder Spurtopologie) ist definiert durch

$$\mathcal{O}|_A := \{U \cap A \mid U \in \mathcal{O}\}$$

Satz 1.1. In der Tat definiert $\mathcal{O}|_A$ eine Topologie auf A .

Beweis. • z.z.: Für jede Indexmenge I gilt: $\forall i \in I: O_i \in \mathcal{O}|_A \Rightarrow \bigcup_{i \in I} O_i \in \mathcal{O}|_A$.

Sei I beliebige Indexmenge. Für alle $i \in I$ mit $O_i \in \mathcal{O}|_A$ gilt: Es existieren $\mathcal{U}_i \in \mathcal{O}$ mit $O_i = \mathcal{U}_i \cap A$. Es gilt:

$$\bigcup_{i \in I} O_i = \bigcup_{i \in I} (\mathcal{U}_i \cap A) = \left(\bigcup_{i \in I} \mathcal{U}_i \right) \cap A \in \mathcal{O}|_A$$

(da $\bigcup_{i \in I} \mathcal{U}_i \in \mathcal{O}$).

• z.z.: $\forall O_1, O_2 \in \mathcal{O}|_A: O_1 \cap O_2 \in \mathcal{O}|_A$.

Seien $O_1, O_2 \in \mathcal{O}|_A$. Dann ex. $\mathcal{U}_1, \mathcal{U}_2 \in \mathcal{O}$ mit $O_i = \mathcal{U}_i \cap A, i \in \{1, 2\}$. Es gilt: $O_1 \cap O_2 = (\mathcal{U}_1 \cap A) \cap (\mathcal{U}_2 \cap A) = (\mathcal{U}_1 \cap \mathcal{U}_2) \cap A \in \mathcal{O}|_A$, da $\mathcal{U}_1 \cap \mathcal{U}_2 \in \mathcal{O}$.

• z.z.: $A, \emptyset \in \mathcal{O}|_A$.

Es gilt: $A = X \cap A \in \mathcal{O}|_A$, da $X \in \mathcal{O}$ nach Definition von \mathcal{O} .

Es gilt: $\emptyset = \emptyset \cap A \in \mathcal{O}|_A$, da $\emptyset \in \mathcal{O}$ nach Definition von \mathcal{O} . □

1.5 Homotopieäquivalenz

Definition 1.2. Seien X, Y topologische Räume. X heißt homotopieäquivalent zu Y , falls es stetige Abbildungen $f: X \rightarrow Y$ und $g: Y \rightarrow X$ gibt, so dass $f \circ g \simeq id_Y$ und $g \circ f \simeq id_X$.

Satz 1.2. $\mathbb{R}^n \setminus \{0\}$ ist homotopieäquivalent zur Sphäre S^{n-1} .

Beweis. Sei $f: S^{n-1} \hookrightarrow \mathbb{R}^n \setminus \{0\}, x \mapsto x$ (Inklusionsabbildung). Dann ist f stetig.

Sei weiter $g: \mathbb{R}^n \setminus \{0\} \rightarrow S^{n-1}, x \mapsto \frac{x}{\|x\|}$. Dann ist auch g stetig und es gilt: $g \circ f = id_{S^{n-1}}$, also insbesondere $g \circ f \simeq id_{S^{n-1}}$.

Für $f \circ g$ betrachte folgende Abbildung:

$$H: \mathbb{R}^n \setminus \{0\} \times [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^n \setminus \{0\}, (x, t) \mapsto (1-t) \frac{x}{\|x\|} + t \cdot x$$

Dann ist H stetig und es gilt für alle $x \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$:

$$H(x, 1) = x = id_{\mathbb{R}^n \setminus \{0\}}(x)$$

$$H(x, 0) = \frac{x}{\|x\|} = (f \circ g)(x)$$

Dann ist H Homotopie von $f \circ g$ nach $id_{\mathbb{R}^n \setminus \{0\}}$ (in Zeichen: $f \circ g \simeq id_{\mathbb{R}^n \setminus \{0\}}$).

□

Kapitel 2

31.10.2011

2.1 Universelle Eigenschaft der Teilraumtopologie

Es sei (X, \mathcal{O}_X) ein topologischer Raum und $A \subseteq X$ versehen mit der Teilraumtopologie $\mathcal{O}_A = \{O \cap A \mid O \in \mathcal{O}_X\}$. Weiter sei $\iota: A \hookrightarrow X$ die Inklusionsabbildung und (Y, \mathcal{O}_Y) ein weiterer topologischer Raum.

Satz 2.1. *Behauptung Eine Abbildung $\phi: Y \rightarrow A$ ist genau dann stetig, wenn die Komposition $\iota \circ \phi: Y \rightarrow X$ stetig ist.*

Beweis. ‘ \Rightarrow ’: Es sei $\phi: Y \rightarrow A$ stetig. [z.z.: $\iota \circ \phi$ ist stetig, d.h. $\forall O \in \mathcal{O}_X: (\iota \circ \phi)^{-1}(O) \in \mathcal{O}_Y$]

Sei $O \in \mathcal{O}_X$. Dann gilt $(\iota \circ \phi)^{-1}(O) = \phi^{-1}(\iota^{-1}(O))$ und es ist $\iota^{-1}(O) \in \mathcal{O}_A$, da ι stetig ist.

Es gilt somit $\phi^{-1}(\iota^{-1}(O)) \in \mathcal{O}_Y$, da ϕ stetig ist (nach Voraussetzung).

‘ \Leftarrow ’: Es sei $\phi: Y \rightarrow A$ eine Abbildung, so dass $\iota \circ \phi: Y \rightarrow X$ stetig ist. [z.z.: ϕ ist stetig, d.h. $\forall O \in \mathcal{O}_A: \phi^{-1}(O) \in \mathcal{O}_Y$.]

Sei also $O \in \mathcal{O}_A$. Dann existiert $O' \in \mathcal{O}_X$, so dass $O = O' \cap A$. Es gilt: $\iota^{-1}(O') = O' \cap A = O$.

$\phi^{-1}(O) = \phi^{-1}(O' \cap A) = \phi^{-1}(\iota^{-1}(O')) = (\iota \circ \phi)^{-1}(O') \in \mathcal{O}_Y$, da $\iota \circ \phi$ stetig (nach Voraussetzung). \square

Bemerkung 2.1. (Bemerkung in der Vorlesung)

Die Teilraumtopologie ist die grösste Topologie, bezüglich der die Inklusionsabbildung $\iota: A \hookrightarrow X$ stetig ist.

Beweis. Stetigkeit der Inklusionsabbildung: [z.z.: $\forall O \in \mathcal{O}_X: \iota^{-1}(O) \in \mathcal{O}_A$]

Sei $O \in \mathcal{O}_X$. Dann gilt $\iota^{-1}(O) = O \cap A \in \mathcal{O}_A$. \square

Beweis. Nichtstetigkeit in grösseren Topologien: [z.z.: $\mathcal{O}_A \not\subseteq \tilde{\mathcal{O}} \Rightarrow \exists O' \in \mathcal{O}_X: \iota^{-1}(O') \notin \tilde{\mathcal{O}}$]

Sei $\mathcal{O}_A \not\subseteq \tilde{\mathcal{O}} \Rightarrow \exists O \in \mathcal{O}_A: O \notin \tilde{\mathcal{O}}$. Dann $\exists O' \in \mathcal{O}_X: O = O' \cap A$. Damit ist aber $\iota^{-1}(O') = O' \cap A = O \notin \tilde{\mathcal{O}} \Rightarrow \iota: (A, \tilde{\mathcal{O}}) \rightarrow (X, \mathcal{O}_X)$ ist nicht stetig. \square

2.2 Homöomorphismen

Zeigen Sie, dass für $a, b \in \mathbb{R}$ mit $a < b$ das Intervall (a, b) homöomorph zum Intervall $(0, 1)$ ist, sowie dass $(0, 1)$ homöomorph ist zu \mathbb{R} .

Definiere $f: (a, b) \rightarrow (0, 1), x \mapsto \frac{a-x}{a-b}$, und $g: (0, 1) \rightarrow (a, b), x \mapsto (1-x) \cdot a + x \cdot b$.

Es gilt für alle $x \in (a, b)$:

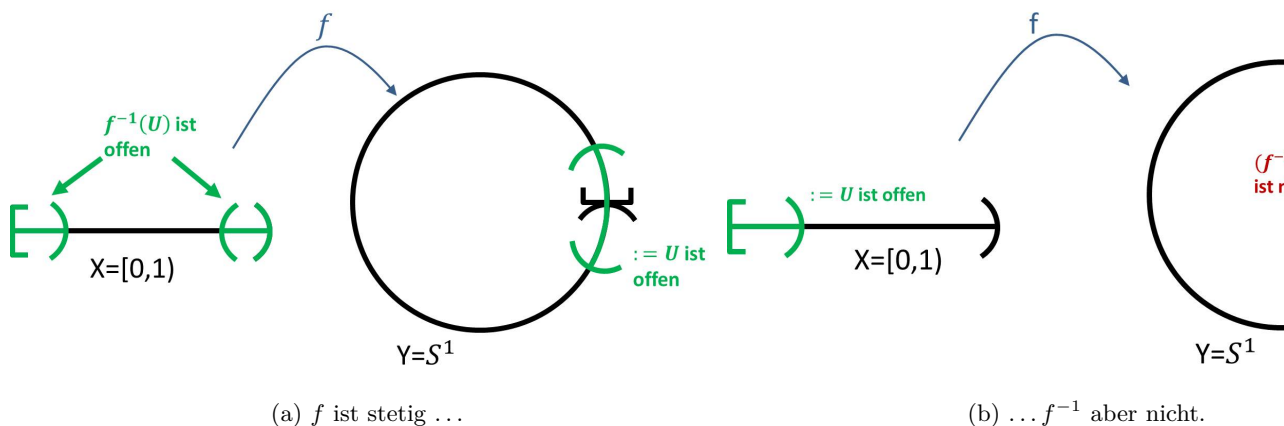
$$(g \circ f)(x) = g\left(\frac{a-x}{a-b}\right) = \left(1 - \frac{a-x}{a-b}\right)a + \frac{a-x}{a-b}b = \left(\frac{a-b-a+x}{a-b}\right)a + \frac{a-x}{a-b}b = \frac{x-b}{a-b}a + \frac{a-x}{a-b}b = \frac{ax-ab+ab-bx}{a-b} = x.$$

Es gilt für alle $x \in (0, 1)$:

$(f \circ g)(x) = f((1-x) \cdot a + x \cdot b) = \frac{a-((1-x)a+bx)}{a-b} = \frac{a-a+ax-bx}{a-b} = x$. Somit ist f bijektiv. Da f und $g = f^{-1}$ stetig sind, gilt damit: f ist ein Homöomorphismus, d.h. $(a, b) \equiv (0, 1)$.

Definiere $h: (0, 1) \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \tan\left((x - \frac{1}{2})\pi\right)$.

$f: [0, 1] \rightarrow S^1, t \mapsto e^{2\pi it} (= (\cos 2\pi t, \sin 2\pi t))$ ist kein Homöomorphismus (da die Umkehrabbildung nicht stetig ist).



2.3 Die Peano-Kurve

(Guiseppe Peano, ~ 1890)

Satz 2.2. Es gibt eine surjektive, stetige Abbildung $I = [0, 1] \rightarrow I \times I$.

Verallgemeinerung

- Es gibt eine surjektive, stetige Abbildung $I \rightarrow I^n = I \times I \times \dots \times I$ ($n \in \mathbb{N}$).
- Es gibt eine surjektive, stetige Abbildung $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$.

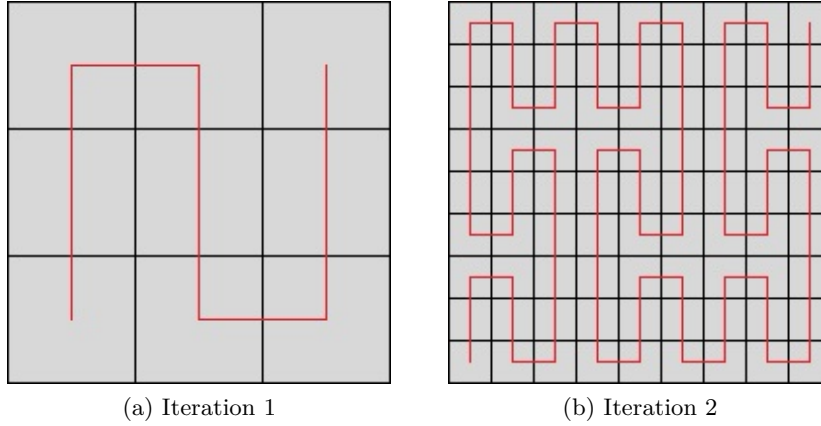


Abbildung 2.1: Prinzip der Peano-Kurve

2.3.1 Zugang mit Hilfe der Cantor-Menge \mathcal{C}

Definiere $f: \mathcal{C} \rightarrow I, f\left(\sum_{i=1}^{\infty} \frac{a_i}{3}\right) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{a_i}{2^i}$ für $a_i \in \{0, 2\}$.

Dann ist f surjektiv und stetig.

Definiere $g: \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{C} \times \mathcal{C}, g\left(\sum_{i=1}^{\infty} \frac{a_i}{3}\right) = \left(\sum_{i=1}^{\infty} \frac{a_{2i}}{3^i}, \sum_{i=1}^{\infty} \frac{a_{2i+1}}{3^i}\right) =: (g_1, g_2)$ für $a_i \in \{0, 2\}$.

Dann ist g surjektiv und stetig.

Es ist auch $h: \mathcal{C} \rightarrow I \times I, x \mapsto (f(g_1(x)), f(g_2(x)))$ surjektiv und stetig.

Setze die Abbildung h durch lineare Fortsetzungen stetig auf I fort.

Kapitel 3

07.11.2011

3.1 Nachträge und Wiederholungen zur Vorlesung

3.1.1 Überdeckung, Teilüberdeckung und Kompaktheit

Sei X ein topologischer Raum.

Definition 3.1. • Eine Familie $\{\mathcal{U}_\alpha \mid \alpha \in A\}$ von Teilmengen von X heißt Überdeckung von X , falls gilt: $X = \bigcup_{\alpha \in A} \mathcal{U}_\alpha$.

- Eine Überdeckung heißt offen (bzw. abgeschlossen), falls alle \mathcal{U}_α ($\alpha \in A$) offen (bzw. abgeschlossen) sind.
- Es heißt X kompakt, falls jede offene Überdeckung $\mathcal{U} = \{\mathcal{U}_\alpha, \alpha \in A\}$ eine endliche Teilüberdeckung \mathcal{U}' besitzt, d.h. es existiert $A' \subset A$ endlich, so dass $\mathcal{U}' = \{\mathcal{U}_\alpha \mid \alpha \in A'\}$ eine offene Überdeckung von X ist.

Beispiel 3.1. • Endliche Räume und mit der trivialen Topologie versehene Räume sind kompakt.

- Diskrete Räume sind genau dann kompakt, wenn sie aus endlich vielen Elementen bestehen.
- \mathbb{R} (versehen mit der Standardtopologie) ist nicht kompakt, $\mathbb{R}_{\mathcal{T}_1}$ schon. ($\mathcal{T}_1 = \{\mathbb{R} \setminus E \mid E \text{ endliche Teilmenge von } \mathbb{R}\} \cup \{\emptyset\}$)

Definition 3.2. Eine kompakte Menge ist eine Teilmenge eines vom Kontext her klaren topologischen Raumes, die bezüglich der Teilraumtopologie kompakt ist.

Beispiel 3.2. $[0, 1) (\subseteq \mathbb{R})$ ist nicht kompakt, denn: Die Überdeckung $\{(-1, 1 - \frac{1}{n}) \mid n \in \mathbb{N}\}$ von $[0, 1)$ enthält keine endliche Teilüberdeckung.

Bemerkung 3.1. • Satz von Heine-Borel: Teilmengen euklidischer, endlich dimensionaler Räume sind genau dann kompakt, wenn sie abgeschlossen und beschränkt sind.

- *Abgeschlossene Teilmengen kompakter Räume sind kompakt.*
- *Stetige Bilder kompakter Mengen sind kompakt, d.h. ist X eine kompakte Menge, Y topologischer Raum, $f: X \rightarrow Y$ stetig, dann ist $f(X)$ kompakt.*
- *Ist X kompakt, $f: X \rightarrow \mathbb{R}$ stetig, so ist $f(X)$ kompakt und f nimmt auf X Maximum und Minimum an.*
- *Lebesgue-Lemma: Ist $f: X \rightarrow Y$ stetige Abbildung topologischer Räume und X metrisch und kompakt, so gilt:
Ist \mathcal{U} eine offene Überdeckung von Y , so existiert $\delta \in \mathbb{R}_{>0}$, sodass für alle $A \subseteq X$ mit $\text{diam } A < \delta$ ein $U' \in \mathcal{U}$ mit $f(A) \subseteq U'$ existiert.*

3.1.2 Wegzusammenhang

Definition 3.3. • Ein Weg in X ist eine stetige Abbildung $\gamma: I(=[0, 1]) \rightarrow X$ mit Anfangspunkt $\gamma(0)$ und Endpunkt $\gamma(1)$.

- *Man nennt X wegzusammenhängend, falls für alle $x, y \in X$ ein Weg $\gamma: [0, 1] \rightarrow X$ in X existiert mit $\gamma(0) = x, \gamma(1) = y$.*
- *Eine Wegzusammenhangskomponente von X ist eine wegzusammenhängende Teilmenge von X , die in keiner echt größeren solchen Teilmenge enthalten ist.*

Bemerkung 3.2. • *Jeder Punkt von X liegt in genau einer Wegzusammenhangskomponente von X , und zwei solche Komponenten sind entweder gleich oder disjunkt.*

- *Stetige Bilder wegzusammenhängender Mengen sind wegzusammenhängend.*

Korollar 3.1. *Wegzusammenhang bleibt unter Homöomorphismen erhalten, ebenso die Anzahl der Wegzusammenhangskomponenten.*

Wegzusammenhängende topologische Räume sind zusammenhängend (Übungsaufgabe), die Umkehrung gilt im Allgemeinen nicht.

Beispiel eines Raumes, der zusammenhängend, aber nicht wegzusammenhängend ist (TODO: Bild)

Definiere $A = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x > 0, y = \sin\left(\frac{1}{x}\right)\}$, $X := A \cup \{(0, 0)\}$.

Es gilt:

- Es ist A wegzusammenhängend, denn:
 $A \cong (0, +\infty) \cong \mathbb{R}$, und \mathbb{R} ist wegzusammenhängend.

- Es ist X zusammenhängend, denn:
Es gilt: $\bar{A} = A \cup \{(0, y) \mid y \in [-1, 1]\}$ ist als Abschluss einer zusammenhängenden Menge wieder zusammenhängend (siehe Bemerkung in der Vorlesung).
Außerdem gilt: $A \subseteq X \subseteq \bar{A}$, und X ist als Teilmenge des Abschlusses eines zusammenhängenden Raumes wieder zusammenhängend. (Allgemein: Es sei A zusammenhängend, $A \subseteq B \subseteq \bar{A}$. Dann ist auch B zusammenhängend.)
- Es ist X nicht wegzusammenhängend, denn:
Es lässt sich $(0, 0)$ nicht über einen Weg in X mit einem beliebigen anderen Punkt aus X verbinden¹.

Bemerkung 3.3. *Der Abschluss wegzusammenhängender Räume ist im Allgemeinen nicht wegzusammenhängend!*

Beispiel 3.3 (Beispiel von oben). *Der Abschluss von A in X - nicht in \mathbb{R}^2 - ist X , und X ist (s.o.) nicht wegzusammenhängend.*

Bemerkung 3.4. *Besitzt jeder Punkt eines topologischen Raumes X eine wegzusammenhängende Umgebung, so sind alle Wegzusammenhangskomponenten offen in X , und X ist genau dann wegzusammenhängend, wenn X zusammenhängend ist.*

Beispiel 3.4. *Offene Teilmengen von \mathbb{R}^n sind genau dann wegzusammenhängend, wenn sie zusammenhängend sind, denn: Jeder Punkt $x \in \mathbb{R}^n$ besitzt dann als offene Umgebung einen offenen Ball, und offene Bälle sind wegzusammenhängend.*

¹Formale Begründung: Jeder in $(0, 0)$ startende Weg ist konstant.