

# Geometrie und Topologie



Siehe [tinyurl.com/GeoTopo](http://tinyurl.com/GeoTopo)

20. Januar 2014

# 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](http://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 Lösungen zu benutzen.

## Was ist Topologie?

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  $T^2$ . Für den  $\mathbb{R}^2$  müsste man die Oberfläche unendlich ausdehnen und für einen Torus müsste man ein Loch machen.



Abbildung 0.1: Beispiele für verschiedene Formen

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Topologische Grundbegriffe</b>	<b>2</b>
1.1 Topologische Räume . . . . .	2
1.2 Metrische Räume . . . . .	5
1.3 Stetigkeit . . . . .	8
1.4 Zusammenhang . . . . .	11
1.5 Kompaktheit . . . . .	13
1.6 Wege und Knoten . . . . .	16
Übungsaufgaben . . . . .	20
<b>2 Mannigfaltigkeiten und Simplicialkomplexe</b>	<b>21</b>
2.1 Topologische Mannigfaltigkeiten . . . . .	21
2.2 Differenzierbare Mannigfaltigkeiten . . . . .	25
2.3 Simplicialkomplex . . . . .	30
Übungsaufgaben . . . . .	37
<b>3 Fundamentalgruppe und Überlagerungen</b>	<b>38</b>
3.1 Homotopie von Wegen . . . . .	38
3.2 Fundamentalgruppe . . . . .	41
3.3 Überlagerungen . . . . .	44
3.4 Gruppenoperationen . . . . .	53
<b>4 Euklidische und nichteuklidische Geometrie</b>	<b>56</b>
4.1 Axiome für die euklidische Ebene . . . . .	56
<b>Lösungen der Übungsaufgaben</b>	<b>65</b>
<b>Bildquellen</b>	<b>69</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>70</b>
<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>71</b>

# 1 Topologische Grundbegriffe

## 1.1 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.

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

Also:  $\mathfrak{T} = \{M \subseteq X \mid M \text{ ist offene Kugel}\}$ . Diese Topologie wird auch „Standardtopologie des  $\mathbb{R}^n$ “ genannt.

- 2) Jeder metrische Raum  $(X, d)$  ist auch ein topologischer Raum.
- 3) Für eine Menge  $X$  heißt  $\mathfrak{T} = \mathcal{P}(X)$  „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:
  - $U \in \mathfrak{T}_Z \Leftrightarrow \exists f \in \mathbb{R}[X], \text{ sodass } \mathbb{R} \setminus U = V(f) = \{x \in \mathbb{R} \mid f(x) = 0\}$
  - 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 „Sierpiński Raum“.  $\emptyset, \{ 0, 1 \}, \{ 0 \}$  sind dort alle abgeschlossenen Mengen.

### Definition 2

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

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 und  $M \subseteq X$  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  $M$ .

- 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) Sei  $X = \mathbb{R}$  mit euklidischer Topologie und  $M = \mathbb{Q}$ . Dann gilt:  $\overline{M} = \mathbb{R}$  und  $M^\circ = \emptyset$
- 2) Sei  $X = \mathbb{R}$  und  $M = (a, b)$ . Dann gilt:  $\overline{M} = [a, b]$
- 3) Sei  $X = \mathbb{R}$ ,  $\mathfrak{T} = \mathfrak{T}_Z$  und  $M = (a, b)$ . Dann gilt:  $\overline{M} = \mathbb{R}$

### 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 und  $Y \subseteq X$ .

$\mathfrak{T}_Y := \{ U \cap Y \mid U \in \mathfrak{T} \}$  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 1.1: 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.
- 2)  $X_1 = X_2 = \mathbb{R}$  mit Zariski-Topologie.  $\mathfrak{T}$  Produkttopologie auf  $\mathbb{R}^2$ :  $U_1 \times U_2$   
(Siehe Abbildung 1.2)



Abbildung 1.2: Zariski-Topologie auf  $\mathbb{R}^2$

**Definition 7**

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

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

$(\overline{X}, \mathfrak{T}_{\overline{X}})$  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

$$\text{Sei } X = \mathbb{R}^2 \text{ und } (x_1, y_1) \sim (x_2, y_2) \Leftrightarrow x_1 - x_2 \in \mathbb{Z} \text{ und } y_1 - y_2 \in \mathbb{Z}.$$

$X/\sim$  ist ein Torus.

### Beispiel 7

$$X = \mathbb{R}^{n-1} \setminus \{0\}, \quad x \sim y \Leftrightarrow \exists \lambda \in \mathbb{R}^\times \text{ mit } y = \lambda x$$

$\Leftrightarrow x$  und  $y$  liegen auf der gleichen Ursprungsgerade

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

Also für  $n = 1$ :



## 1.2 Metrische Räume

### Definition 8

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

- (i) Definitheit:  $d(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y \quad \forall x, y \in X$
- (ii) Symmetrie:  $d(x, y) = d(y, x) \quad \forall x, y \in X$

(iii) Dreiecksungleichung:  $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z) \quad \forall x, y, z \in X$

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 hermitischer 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.

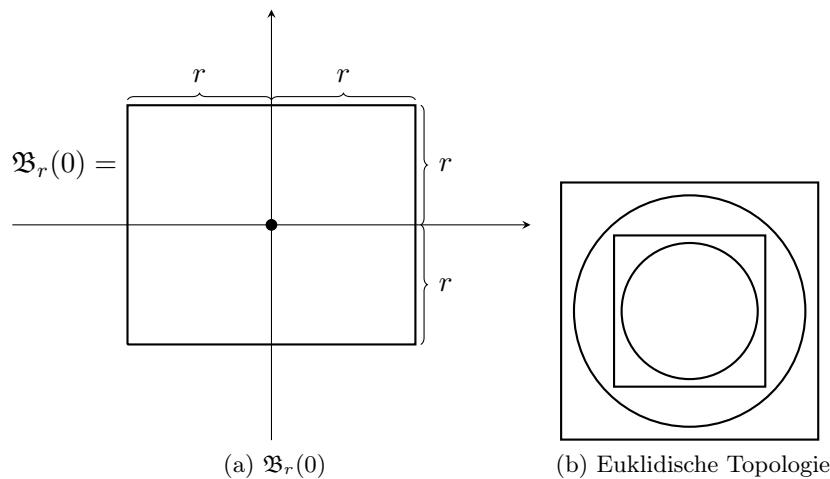


Abbildung 1.3: Veranschaulichungen zur Metrik  $d$

### Beispiel 11 (SNCF-Metrik<sup>1</sup>)

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

**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

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

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.



Abbildung 1.4: Wenn  $X_1, X_2$  hausdorffsch sind, dann auch  $X_1 \times X_2$

**Definition 10**

Sei  $X$  ein topologischer Raum und  $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$  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  $n \geq n_0$ .

**Korollar 1.2**

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

**Beweis:** Sei  $(x_n)$  eine konvergierende Folge und  $x$  und  $y$  Grenzwerte der Folge.

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

## 1.3 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  $f$  stetig ist und 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<sup>2</sup>

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  $Y$ .

$$\begin{aligned} &\stackrel{11.a}{\implies} f^{-1}(U) \text{ ist offen in } X. \text{ Dann ist } x \in f^{-1}(U). \\ &\Rightarrow \exists \delta > 0, \text{ sodass } \mathfrak{B}_\delta(x) \subseteq f^{-1}(U) \\ &\Rightarrow f(\mathfrak{B}_\delta(x)) \subseteq U \\ &\Rightarrow \{y \in X \mid d_X(x, y) < \delta\} \Rightarrow \text{Beh.} \end{aligned}$$

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

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

$$\begin{aligned} &\stackrel{\text{Vor}}{\implies} \text{Es gibt } \delta > 0, \text{ sodass } f(\mathfrak{B}_\delta(x)) \subseteq \mathfrak{B}_\varepsilon(f(x)) \\ &\Rightarrow \mathfrak{B}_\delta(x) \subseteq f^{-1}(\mathfrak{B}_\varepsilon(f(x))) \subseteq f^{-1}(U) \end{aligned} \quad \blacksquare$$

### 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.

### 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  $f(t) = e^{2\pi i t}$ . Die Umkehrabbildung  $g$  ist nicht stetig, da  $g^{-1}(U)$  nicht offen ist (vgl. [Abbildung 1.5](#)).

### Korollar 1.4 (Verkettungen stetiger Abbildungen sind stetig)

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

---

<sup>2</sup>Im Grunde wird die Äquivalenz von Stetigkeit im Sinne der Analysis und Topologie auf metrischen Räumen gezeigt.



Abbildung 1.5: Beispiel einer stetigen Funktion  $f$ , deren Umkehrabbildung  $g$  nicht stetig ist.

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

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{f} & Y \\ & \searrow g \circ f & \swarrow g \\ & Z & \end{array}$$

**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)  $\text{Iso}(X) := \{ f : X \rightarrow X \mid f \text{ ist Isometrie} \}$  ist eine 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

$$\pi_X : (x, y) \mapsto x \text{ und } \pi_Y : (x, y) \mapsto y$$

Wird  $X \times Y$  mit der Produkttopologie versehen, so sind  $\pi_X$  und  $\pi_Y$  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 Bahnenraum versehen mit der Quotiententopologie,  $\pi : X \rightarrow \overline{X}$ ,  $x \mapsto [x]_\sim$ .

Dann ist  $\pi$  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  $\pi$  stetig wird.

### Beispiel 13 (Stereographische Projektion)

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

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

O. B. d. A. sei  $N = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}$ . Die Gerade durch  $N$  und  $P$  schneidet die Ebene  $H$  in genau einem Punkt  $\hat{P}$ .  $P$  wird auf  $\hat{P}$  abgebildet.

$$f : S^n \setminus \{ N \} \rightarrow \mathbb{R}^n$$

genau ein Punkt

$$P \mapsto \overbrace{L_P \cap H}$$

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.

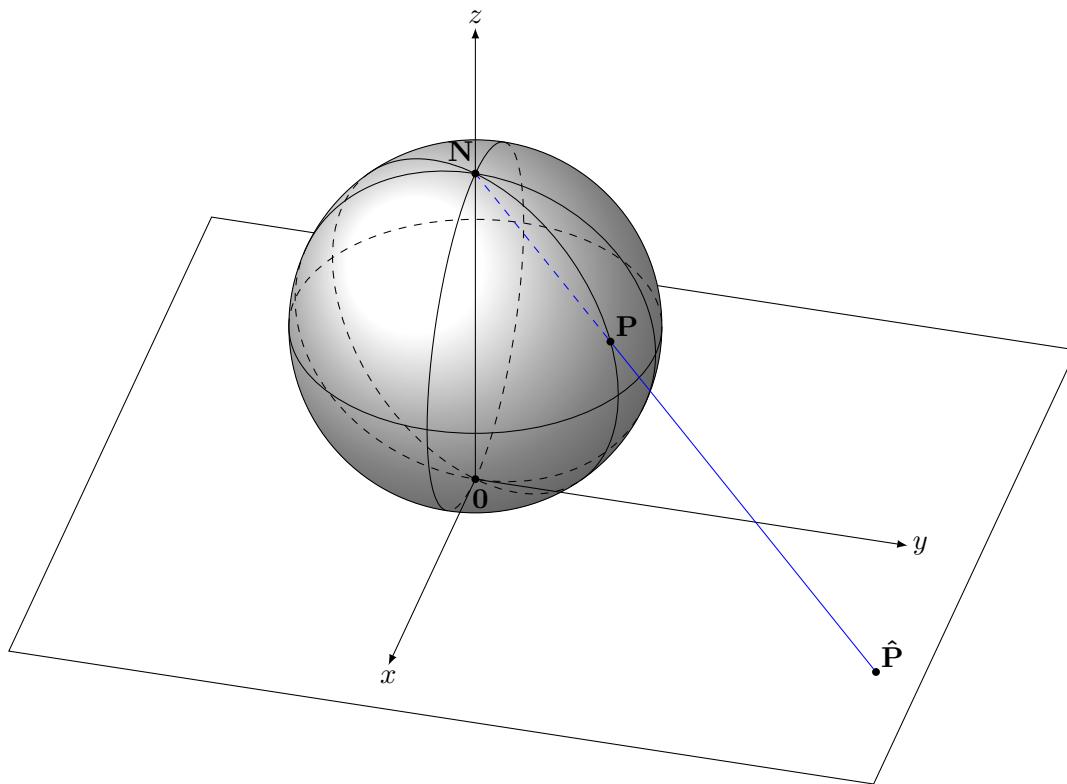


Abbildung 1.6: Visualisierung der stereographischen Projektion

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.

## 1.4 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 abgeschlossenen, nichtleeren 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 (Zusammenhang von Räumen)

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

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

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.

2)  $\mathbb{R} \setminus \{0\}$  ist nicht zusammenhängend, denn  $\mathbb{R} \setminus \{0\} = \mathbb{R}_{<0} \cup \mathbb{R}_{>0}$

3)  $\mathbb{R}^2 \setminus \{0\}$  ist zusammenhängend.

4)  $\mathbb{Q} \subsetneq \mathbb{R}$  ist nicht zusammenhängend, da  $(\mathbb{Q} \cap \mathbb{R}_{<\sqrt{2}}) \cup (\mathbb{Q} \cap \mathbb{R}_{>\sqrt{2}}) = \mathbb{Q}$

5)  $\{x\}$  ist zusammenhängend für jedes  $x \in X$ , wobei  $X$  ein topologischer Raum ist.

6)  $\mathbb{R}$  mit Zariski-Topologie ist zusammenhängend

### Korollar 1.7

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

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

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

Wäre  $A \cap A_1 = \emptyset$

$$\Rightarrow A \subseteq A_2$$

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

$$\Rightarrow A_1 = \emptyset$$

$\Rightarrow$  Widerspruch zu  $A_1 \neq \emptyset$

$\Rightarrow A \cap A_1 \neq \emptyset$  und analog  $A \cap A_2 \neq \emptyset$

$\Rightarrow$  Widerspruch zu  $A$  ist zusammenhängend

■

### Korollar 1.8

Sei  $X$  ein topologischer Raum und  $A, B \subseteq X$  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

$$\begin{aligned} &\xrightarrow{\text{o. B. d. A.}} A = (A \cap U_1) \cup (A \cap U_2) \text{ offen, disjunkt} \\ &\xrightarrow{A \text{ zhgd.}} A \cap U_1 = \emptyset \\ &\xrightarrow{A \cap B \neq \emptyset} U_1 \subseteq B \\ &B = \underbrace{(B \cap U_1)}_{=U_1} \cup \underbrace{(B \cap U_2)}_{=\emptyset} \text{ ist unerlaubte Zerlegung} \end{aligned}$$

■

### 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.

O. B. d. A. 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  $Z(y) \cap Z(x) \neq \emptyset \xrightarrow{1.8} Z(y) \cup Z(x)$  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.

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

■

## 1.5 Kompaktheit

### Definition 14

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

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

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

### Definition 15

Ein topologischer Raum  $X$  heißt **kompakt**, wenn jede offene Überdeckung  $\mathfrak{U}$  von  $X$  eine endliche Teilüberdeckung besitzt.

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

### Korollar 1.11

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

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

z. Z.: Es gibt ein  $\delta > 0$ , sodass jedes Teilintervall der Länge  $\delta$  von  $I$  in einem der  $U_i$  enthalten ist.

Angenommen, es gibt kein solches  $\delta$ . Dann gibt es für jedes  $n \in \mathbb{N}$  ein Intervall  $I_n \subseteq [0, 1]$  der Länge  $1/n$  sodass  $I_n \not\subseteq U_i$  für alle  $i \in I$ .

Sei  $x_n$  der Mittelpunkt von  $I_n$ . Die Folge  $(x_n)$  hat einen Häufungspunkt  $x \in [0, 1]$ . Dann gibt es  $i \in I$  mit  $x \in U_i$ . Da  $U_i$  offen ist, gibt es ein  $\varepsilon > 0$ , sodass  $(x - \varepsilon, x + \varepsilon) \subseteq U_i$ . Dann gibt es  $n$  mit  $1/n < \varepsilon/2$  und  $|x - x_n| < \varepsilon/2$ , also  $I_n \subseteq (x - \varepsilon, x + \varepsilon) \subseteq U_i$

⇒ Widerspruch

Dann überdecke  $[0, 1]$  mit endlich vielen Intervallen  $I_1, \dots, I_d$  der Länge  $\delta$ . Jedes  $I_j$  ist in  $U_{ij}$  enthalten.

⇒  $U_{j_1}, \dots, U_{j_d}$  ist endliche Teilüberdeckung von  $U$  ■

### Beispiel 15

1)  $\mathbb{R}$  ist nicht kompakt.

2)  $(0, 1)$  ist nicht kompakt.

$$U_n = (1/n, 1 - 1/n) \Rightarrow \bigcup_{n \in \mathbb{N}} U_n = (0, 1)$$

3)  $\mathbb{R}$  mit der Zariski-Topologie ist kompakt und jede Teilmenge von  $\mathbb{R}$  ist es auch.

### Korollar 1.12

Sei  $X$  kompakter Raum,  $A \subseteq X$  abgeschlossen. Dann ist  $A$  kompakt.

**Beweis:** Sei  $(V_i)_{i \in I}$  offene Überdeckung von  $A$ .

Der  
Be-  
weis  
ist ko-  
misch.  
Das  
würde  
ich  
gerne  
mit  
je-  
man-  
den  
durch-  
spre-  
chen.

Dann gibt es für jedes  $i \in I$  eine offene Teilmenge  $U_i \subseteq X$  mit  $V_i = U_i \cap A$ .

$$\begin{aligned}
 &\Rightarrow A \subseteq \bigcup_{i \in I} U_i \\
 &\Rightarrow \mathfrak{U} = \{U_i \mid i \in I\} \cup \{X \setminus A\} \text{ ist offene Überdeckung von } X \\
 &\xrightarrow{X \text{ kompakt}} \text{es gibt } i_1, \dots, i_n \in I, \text{ sodass } \bigcup_{j=1}^n U_{i_j} \cup (X \setminus A) = X \\
 &\Rightarrow \left( \bigcup_{j=1}^n U_{i_j} \cup (X \setminus A) \right) \cap A = A \\
 &\Rightarrow \bigcup_{j=1}^n \underbrace{(U_{i_j} \cap A)}_{=V_{i_j}} \cup \underbrace{((X \setminus A) \cap A)}_{=\emptyset} = A \\
 &\Rightarrow V_{i_1}, \dots, V_{i_n} \text{ überdecken } A
 \end{aligned}$$

■

### Korollar 1.13

Seien  $X, Y$  kompakte topologische Räume. Dann ist  $X \times Y$  mit der Produkttopologie kompakt.

**Beweis:** Sei  $(W_i)_{i \in I}$  eine offene Überdeckung von  $X \times Y$ . Für jedes  $(x, y) \in X \times Y$  gibt es offene Teilmengen  $U_{x,y}$  von  $X$  und  $V_{x,y}$  von  $Y$  sowie ein  $i \in I$ , sodass  $U_{x,y} \times V_{x,y} \subseteq W_i$ .



Abbildung 1.7: Die blaue Umgebung ist Schnitt vieler Umgebungen

Die offenen Mengen  $U_{x_0, y} \times V_{x_0, y}$  für festes  $x_0$  und alle  $y \in Y$  überdecken  $\{x_0\} \times Y$ . Da  $Y$  kompakt ist, ist auch  $\{x_0\} \times Y$  kompakt. Also gibt es  $y_1, \dots, y_{m(x_0)}$  mit  $\bigcup_{i=1}^{m(x_0)} U_{x_0, y_i} \times V_{x_0, y_i} \supseteq \{x_0\} \times Y$ .

$$\begin{aligned}
 &\text{Sei } \underline{U}_{x_0} := \bigcap_{i=1}^{m(x_0)} U_{x_0, y_i}. \text{ Da } X \text{ kompakt ist, gibt es } x_1, \dots, x_n \in X \text{ mit } \bigcup_{j=1}^n U_{x_j} = X \\
 &\Rightarrow \bigcup_{j=1}^k \bigcup_{i=1}^{m(x_j)} \underbrace{(U_{x_j, y_i} \times V_{x_j, y_i})}_{\text{Ein grün-orangefarbenes Kästchen}} \supseteq X \times Y \\
 &\Rightarrow \bigcup_j \bigcup_i W_i(x_j, y_i) = X \times Y
 \end{aligned}$$

■

### Korollar 1.14

Sei  $X$  ein Hausdorffraum und  $K \subseteq X$  kompakt. Dann ist  $K$  abgeschlossen.

**Beweis:** z. Z.: Komplement ist offen

Ist  $X = K$ , so ist  $K$  abgeschlossen in  $X$ . Andernfalls sei  $y \in X \setminus K$ . Für jedes  $x \in K$  seien  $U_x$  bzw.  $V_y$  Umgebungen von  $x$  bzw. von  $y$ , sodass  $U_x \cap V_y = \emptyset$ .



Da  $K$  kompakt ist, gibt es endlich viele  $x_1, \dots, x_n \in K$ , sodass  $\bigcup_{i=1}^n U_{x_i} \supseteq K$ .

$$\begin{aligned}
 &\text{Sei } V := \bigcap_{i=1}^n V_{x_i} \\
 &\Rightarrow V \cap \left( \bigcup_{i=1}^n U_{x_i} \right) = \emptyset \\
 &\Rightarrow V \cap K = \emptyset \\
 &\Rightarrow V \text{ ist Überdeckung von } y, \text{ die ganz in } X \setminus K \text{ enthalten ist.} \\
 &\Rightarrow X \setminus K \text{ ist offen}
 \end{aligned}$$

Damit ist  $K$  abgeschlossen. ■

### Korollar 1.15

Seien  $X, Y$  topologische Räume,  $f : X \rightarrow Y$  stetig. Ist  $K \subseteq X$  kompakt, so ist  $f(K) \subseteq Y$  kompakt.

**Beweis:** Sei  $(V_i)_{i \in I}$  offene Überdeckung von  $f(K)$

$$\begin{aligned}
 &\xrightarrow{f \text{ stetig}} (f^{-1}(V_i))_{i \in I} \text{ ist offene Überdeckung von } K \\
 &\xrightarrow{\text{Kompakt}} \text{es gibt } i_1, \dots, i_n, \text{ sodass } f^{-1}(V_{i_1}), \dots, f^{-1}(V_{i_n}) \text{ Überdeckung von } K \text{ ist.} \\
 &\Rightarrow f(f^{-1}(V_{i_1})), \dots, f(f^{-1}(V_{i_n})) \text{ überdecken } f(K).
 \end{aligned}$$

Es gilt:  $f(f^{-1}(V)) = V \cap f(X)$  ■

### Satz 1.16 (Heine-Borel)

Eine Teilmenge von  $\mathbb{R}^n$  oder  $\mathbb{C}^n$  ist genau dann kompakt, wenn sie beschränkt und abgeschlossen ist.

**Beweis:** „ $\Rightarrow$ “: Sei  $K \subseteq \mathbb{R}^n$  (oder  $\mathbb{C}^n$ ) kompakt.

Da  $\mathbb{R}^n$  und  $\mathbb{C}^n$  hausdorffsch sind, ist  $K$  nach Korollar 1.14 abgeschlossen. Nach Voraussetzung kann  $K$  mit endlich vielen offenen Kugeln von Radien 1 überdeckt werden  $\Rightarrow K$  ist beschränkt.

, $\Leftarrow$ “ Sei  $A \subseteq \mathbb{R}^n$  (oder  $\mathbb{C}^n$ ) beschränkt und abgeschlossen.

Dann gibt es einen Würfel  $W = \underbrace{[-N, N] \times \cdots \times [-N, N]}_{n \text{ mal}}$  mit  $A \subseteq W$  bzw. „Polyzyylinder“  
 $Z = \{ (z_1, \dots, z_n) \in \mathbb{C}^n \mid z_i \leq N \text{ für } i = 1, \dots, n \}$

Nach Korollar 1.13 und Korollar 1.11 ist  $W$  kompakt, also ist  $A$  nach Korollar 1.12 auch kompakt. Genauso ist  $Z$  kompakt, weil

$$\{ z \in \mathbb{C} \mid |z| \leq 1 \}$$

homöomorph zu

$$\{ (x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid \|(x, y)\| \leq 1 \}$$

ist. ■

## 1.6 Wege und Knoten

### Definition 16

Sei  $X$  ein topologischer Raum.

- a) Ein **Weg** in  $X$  ist eine stetige Abbildung  $\gamma : [0, 1] \rightarrow X$ .
- b)  $\gamma$  heißt **geschlossen**, wenn  $\gamma(1) = \gamma(0)$  gilt.
- c)  $\gamma$  heißt **einfach**, wenn  $\gamma|_{[0,1]}$  injektiv ist.

### Beispiel 16

Ist  $X$  diskret, so ist jeder Weg konstant, d. h. von der Form

$$\forall x \in [0, 1] : \gamma(x) = c, \quad c \in X$$

Denn  $\gamma([0, 1])$  ist zusammenhängend für jeden Weg  $\gamma$ .

### Definition 17

Ein topologischer Raum  $X$  heißt **wegzusammenhängend**, wenn es zu je zwei Punkten  $x, y \in X$  einen Weg  $\gamma : [0, 1] \rightarrow X$  gibt mit  $\gamma(0) = x$  und  $\gamma(1) = y$ .

### Korollar 1.17

Sei  $X$  ein topologischer Raum.

- (i)  $X$  ist wegzusammenhängend  $\Rightarrow X$  ist zusammenhängend
- (ii)  $X$  ist wegzusammenhängend  $\not\Leftarrow X$  ist zusammenhängend

### Beweis:

- (i) Sei  $X$  ein wegzusammenhängender topologischer Raum,  $A_1, A_2$  nichtleere, disjunkte, abgeschlossene Teilmengen von  $X$  mit  $A_1 \cup A_2 = X$ . Sei  $x \in A_1, y \in A_2, \gamma : [0, 1] \rightarrow X$  ein Weg von  $x$  nach  $y$ .

Dann ist  $C := \gamma([0, 1]) \subseteq X$  zusammenhängend, weil  $\gamma$  stetig ist.

$$C = \underbrace{(C \cap A_1)}_{\exists x} \cup \underbrace{(C \cap A_2)}_{\exists y}$$

ist Zerlegung in nichtleere, disjunkte, abgeschlossene Teilmengen  $\Rightarrow$  Widerspruch

- (ii) Sei  $X = \left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x^2 + y^2 = 1 \vee y = 1 + 2 \cdot e^{-\frac{1}{10}x} \right\}$ .

Abbildung 1.8a veranschaulicht diesen Raum.

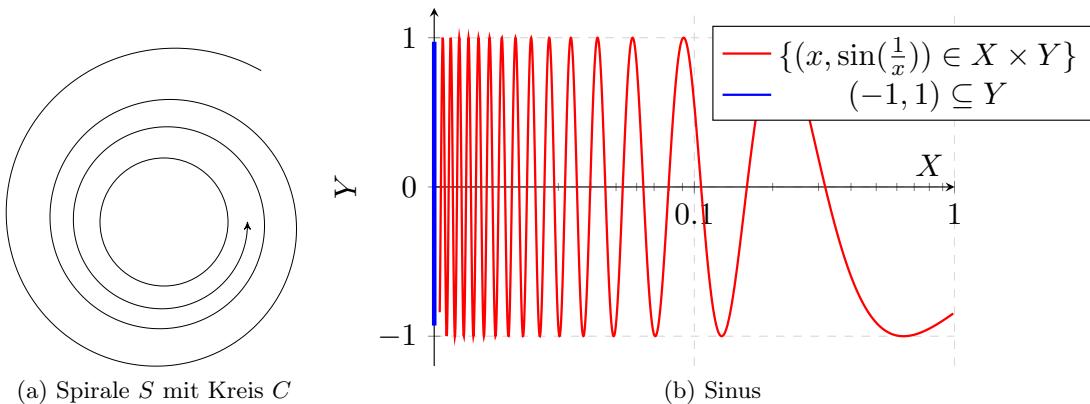


Abbildung 1.8: Beispiele für Räume, die zusammenhängend, aber nicht wegzusammenhängend sind.

Sei  $U_1 \cup U_2 = X, U_1 \neq U_2 = \emptyset, U_i$  offen.  $X = C \cup S$ . Dann ist  $C \subseteq U_1$  oder  $C \subseteq U_2$ , weil  $C$  und  $S$  zusammenhängend sind.

Also ist  $C = U_1$  und  $S = U_2$  (oder umgekehrt).

Sei  $\gamma \in C = U_1, \varepsilon > 0$  und  $\mathfrak{B}_\varepsilon(y) \subseteq U_1$  eine Umgebung von  $y$ , die in  $U_1$  enthalten ist.

Aber:  $\mathfrak{B}_\varepsilon(y) \cap S \neq \emptyset \Rightarrow$  Widerspruch ■

**Achtung:** Es gibt stetige, surjektive Abbildungen  $[0, 1] \rightarrow [0, 1] \times [0, 1]$ . Ein Beispiel ist die in Abbildung 1.9 dargestellte Hilbert-Kurve.

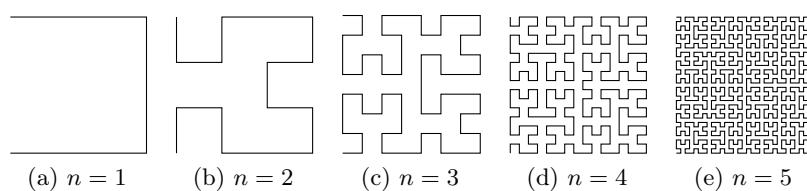


Abbildung 1.9: Hilbert-Kurve

### Definition 18

Sei  $X$  ein topologischer Raum. Eine (geschlossene) **Jordankurve** in  $X$  ist ein Homöomorphismus  $\gamma : [0, 1] \rightarrow C \subseteq X$  ( $\gamma : S^1 \rightarrow C \subseteq X$ )

**Satz 1.18 (Jordanscher Kurvensatz)**

Ist  $C = \gamma([0, 1])$  eine geschlossene Jordankurve in  $\mathbb{R}^2$ , so hat  $\mathbb{R}^2 \setminus C$  genau zwei Zusammenhangskomponenten, von denen eine beschränkt ist und eine unbeschränkt.

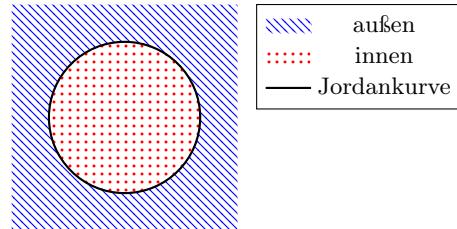


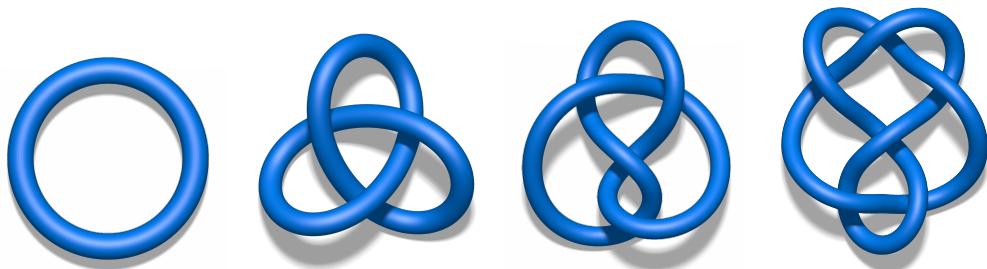
Abbildung 1.10: Die unbeschränkte Zusammenhangskomponente wird häufig inneres, die beschränkte äußeres genannt.

**Beweis:** ist technisch mühsam und wird daher hier nicht geführt. Er kann in „Algebraische Topologie: Eine Einführung“ von R. Stöcker und H. Zieschang auf S. 301f (ISBN 978-3519122265) nachgelesen werden.

Idee: Ersetze Weg  $C$  durch Polygonzug.

**Definition 19**

Eine geschlossene Jordankurve in  $\mathbb{R}^3$  heißt **Knoten**.

**Beispiel 17**

(a) Trivialer Knoten    (b) Kleeblattknoten    (c) Achterknoten    (d) 6<sub>2</sub>-Knoten

Abbildung 1.11: Beispiele für verschiedene Knoten

**Definition 20**

Zwei Knoten  $\gamma_1, \gamma_2 : S^1 \rightarrow \mathbb{R}^3$  heißen **äquivalent**, wenn es eine stetige Abbildung  $H : S^1 \times [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^3$  gibt mit  $H(z, 0) = \gamma_1(z), H(z, 1) = \gamma_2(z)$  und für jedes feste  $t \in [0, 1]$  ist  $H_z : S^1 \rightarrow \mathbb{R}^2, z \mapsto H(z, t)$  ein Knoten. Die Abbildung  $H$  heißt **Isotopie** zwischen  $\gamma_1$  und  $\gamma_2$ .

**Definition 21**

Ein **Knotendiagramm** eines Knotens  $\gamma$  ist eine Projektion  $\pi : \mathbb{R}^3 \rightarrow E$  auf eine Ebene  $E$ , sodass  $|(\pi|C)^{-1}(x)| \leq 2$  für jedes  $x \in D$ .

Ist  $(\pi|C)^{-1}(x) = \{y_1, y_2\}$ , so liegt  $y_1$  über  $y_2$ , wenn  $(y_1 - x) = \lambda(y_2 - x)$  für ein  $\lambda > 1$  ist.

**Satz 1.19 (Reidemeister)**

Zwei endliche Knotendiagramme gehören genau dann zu äquivalenten Knoten, wenn sie durch endlich viele „Reidemeister-Züge“ in einander überführt werden können.



Abbildung 1.12: Reidemeister-Züge

**Beweis:** Durch sorgfältige Fallunterscheidung.<sup>3</sup>

**Definition 22**

Ein Knotendiagramm heißt **3-färbbar**, wenn jeder Bogen von  $D$  so mit einer Farbe gefärbt werden kann, dass an jeder Kreuzung eine oder 3 Farben auftreten und alle 3 Farben auftreten.

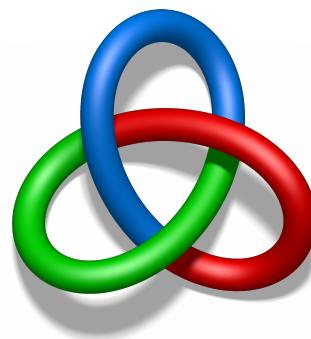


Abbildung 1.13: Ein 3-gefärbter Kleeblattknoten

---

<sup>3</sup>Siehe „Knot Theory and Its Applications“ von Kunio Murasugi. ISBN 978-0817638177.

## 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)  $\{ -1, 1 \}$  ist nicht offen.
- (c) Es gibt unendlich viele Primzahlen.

### Aufgabe 3 (Cantorsches Diskontinuum)

Für jedes  $i \in \mathbb{N}$  sei  $P_i := \{ 0, 1 \}$  mit der diskreten Topologie. Weiter Sei  $P := \prod_{i \in \mathbb{N}} P_i$ .

- (a) Wie sehen die offenen Mengen von  $P$  aus?
- (b) Was können Sie über den Zusammenhang von  $P$  sagen?

### Aufgabe 4 (Kompaktheit)

- (a) Ist  $\mathrm{GL}_n(\mathbb{R}) = \{ A \in \mathbb{R}^{n \times n} \mid \det(A) \neq 0 \}$  kompakt?
- (b) Ist  $\mathrm{SL}_n(\mathbb{R}) = \{ A \in \mathbb{R}^{n \times n} \mid \det(A) = 1 \}$  kompakt?
- (c) Ist  $\mathcal{P}(\mathbb{R})$  kompakt?

## 2 Mannigfaltigkeiten und Simplizialkomplexe

### 2.1 Topologische Mannigfaltigkeiten

#### Definition 23

Sei  $X$  ein topologischer Raum und  $n \in \mathbb{N}$ .

- a) Eine  $n$ -dimensionale **Karte** auf  $X$  ist ein Paar  $(U, \varphi)$ , wobei  $U \subseteq X$  offen und  $\varphi : U \rightarrow V$  Homöomorphismus von  $U$  auf eine offene Teilmenge  $V \subseteq \mathbb{R}^n$ .
- b) Ein  $n$ -dimensionaler **Atlas**  $\mathcal{A}$  auf  $X$  ist eine Familie  $(U_i, \varphi_i)_{i \in I}$  von Karten auf  $X$ , sodass  $\bigcup_{i \in I} U_i = X$ .
- c)  $X$  heißt (topologische)  $n$ -dimensionale **Mannigfaltigkeit**, wenn  $X$  hausdorffsch ist, eine abzählbare Basis der Topologie hat und ein  $n$ -dimensionalen Atlas besitzt.

#### Bemerkung 9

- (a) Es gibt surjektive, stetige Abbildungen  $[0, 1] \rightarrow [0, 1] \times [0, 1]$
- (b) Für  $n \neq m$  sind  $\mathbb{R}^n$  und  $\mathbb{R}^m$  nicht homöomorph. Zum Beweis benutzt man den „Satz von der Gebietstreue“ (Brouwer):

Ist  $U \subseteq \mathbb{R}^n$  offen und  $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$  stetig und injektiv, so ist  $f(U)$  offen.

Ist  $n < m$  und  $\mathbb{R}^m$  homöomorph zu  $\mathbb{R}^n$ , so wäre

$$f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n, \quad (x_1, \dots, x_n) \mapsto (x_1, x_2, \dots, x_n, 0, \dots, 0)$$

eine stetige injektive Abbildung. Also müsste  $f(\mathbb{R}^n)$  offen sein  $\Rightarrow$  Widerspruch

#### Beispiel 18

- 1) Jede offene Teilmenge  $U \subseteq \mathbb{R}^n$  ist eine  $n$ -dimensionale Mannigfaltigkeit mit einem Atlas aus einer Karte.
- 2)  $\mathbb{C}^n$  ist eine  $2n$ -dimensionale Mannigfaltigkeit mit einem Atlas aus einer Karte:

$$(z_1, \dots, z_n) \mapsto (\operatorname{Re} z_1, \operatorname{Im} z_1, \dots, \operatorname{Re} z_n, \operatorname{Im} z_n)$$

- 3)  $\mathcal{P}^n(\mathbb{R}) = (\mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\})/\sim = S^n/\sim$  und  $\mathcal{P}^n(\mathbb{C})$  sind Mannigfaltigkeiten der Dimension  $n$  bzw.  $2n$ , da gilt:

Sei  $U_i := \{(x_0 : \dots : x_n) \in \mathcal{P}^n(\mathbb{R}) \mid x_i \neq 0\} \quad \forall i \in 0, \dots, n$ . Dann ist  $\mathcal{P}^n(\mathbb{R}) = \bigcup_{i=0}^n U_i$  und die Abbildung

$$\begin{aligned} U_i &\rightarrow \mathbb{R}^n \\ (x_0 : \dots : x_n) &\mapsto \left( \frac{x_0}{x_i}, \dots, \frac{x_i}{x_i}, \dots, \frac{x_n}{x_i} \right) \\ (y_1 : \dots : y_{i-1} : 1 : y_i : \dots : y_n) &\leftrightarrow (y_1, \dots, y_n) \end{aligned}$$

ist bijektiv.

Was wird im Folgenden gemacht?

Die  $U_i$  mit  $i = 0, \dots, n$  bilden einen  $n$ -dimensionalen Atlas:

$$\begin{aligned} x &= (1 : 0 : 0) \in U_0 \rightarrow \mathbb{R}^2 & x &\mapsto (0, 0) \\ y &= (0 : 1 : 1) \in U_2 \rightarrow \mathbb{R}^2 & y &\mapsto (0, 1) \end{aligned}$$

Umgebung:  $\mathfrak{B}_1(0, 1) \rightarrow \{(1 : u : v) \mid \|(u, v)\| < 1\} = V_1$

Umgebung:  $\mathfrak{B}_1(0, 1) \rightarrow \{(w : z : 1) \mid w^2 + z^2 < 1\} = V_2$

$V_1 \cap V_2 = \emptyset$ ?

$$\begin{aligned} (a : b : c) &\in V_1 \cap V_2 \\ \Rightarrow a &\neq 0 \text{ und } (\frac{b}{a})^2 + (\frac{c}{a})^2 < 1 \Rightarrow \frac{c}{a} < 1 \\ \Rightarrow c &\neq 0 \text{ und } (\frac{a}{c})^2 + (\frac{b}{c})^2 < 1 \Rightarrow \frac{a}{c} < 1 \\ \Rightarrow &\text{Widerspruch} \end{aligned}$$

- 4)  $S^n = \{x \in \mathbb{R}^{n+1} \mid \|x\| = 1\}$  ist  $n$ -dimensionale Mannigfaltigkeit.

Karten:  $O_i := \{(x_1, \dots, x_{n+1}) \in S^n \mid x_i > 0\} \rightarrow \mathfrak{B}_1(\underbrace{0, \dots, 0}_{\in \mathbb{R}^n})$

$$(x_1, \dots, x_{n+1}) \mapsto (x_1, \dots, x_i, \dots, x_{n+1})$$

$$(x_1, \dots, x_{i-1}, \sqrt{1 - \sum_{k=1}^n x_k^2}, x_i, \dots, x_n) \leftarrow (x_1, \dots, x_n)$$

$$S^n = \bigcup_{i=1}^{n+1} (C_i \cup D_i)$$

- 5)  $[0, 1]$  ist keine Mannigfaltigkeit, denn:

Es gibt keine Umgebung von 0 in  $[0, 1]$ , die homöomorph zu einem offenen Intervall ist.

- 6)  $V_1 = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x \cdot y = 0\}$  ist keine Mannigfaltigkeit.

Das Problem ist  $(0, 0)$ . Wenn man diesen Punkt entfernt, zerfällt der Raum in 4 Zusammenhangskomponenten. Jeder  $\mathbb{R}^n$  zerfällt jedoch in höchstens zwei Zusammenhangskomponenten, wenn man einen Punkt entfernt.

- 7)  $V_2 = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x^3 = y^2\}$  ist eine Mannigfaltigkeit.

- 8)  $X = (\mathbb{R} \setminus \{0\}) \cup (0_1, 0_2)$

$$U \subseteq X \text{ offen} \Leftrightarrow \begin{cases} U \text{ offen in } \mathbb{R} \setminus \{0\}, & \text{falls } 0_1 \notin U, 0_2 \in U \\ \exists \varepsilon > 0 \text{ mit } (-\varepsilon, \varepsilon) \subseteq U & \text{falls } 0_1 \in U, 0_2 \in U \end{cases}$$

Insbesondere sind  $(\mathbb{R} \setminus \{0\}) \cup \{0_1\}$  und  $(\mathbb{R} \setminus \{0\}) \cup \{0_2\}$  offen und homöomorph zu  $\mathbb{R}$ .

Aber:  $X$  ist nicht hausdorffsch! Denn es gibt keine disjunkten Umgebungen von  $0_1$  und  $0_2$ .

- 9)  $\mathrm{GL}_n(\mathbb{R})$  ist eine Mannigfaltigkeit der Dimension  $n^2$ , weil offene Teilmengen von  $\mathbb{R}^{n^2}$  eine Mannigfaltigkeit bilden.



Abbildung 2.1: Zweifachtorus

**Definition 24**

Seien  $X, Y$   $n$ -dimensionale Mannigfaltigkeiten,  $U \subseteq X$  und  $V \subseteq Y$  offen,  $\Phi : U \rightarrow V$  ein Homöomorphismus  $Z = (X \dot{\cup} Y)/\sim$  mit der von  $u \sim \Phi(u) \forall u \in U$  erzeugten Äquivalenzrelation und der von  $\sim$  induzierten Quotiententopologie.

$Z$  heißt **Verklebung** von  $X$  und  $Y$  längs  $U$  und  $V$ .  $Z$  besitzt einen Atlas aus  $n$ -dimensionalen Karten. Falls  $Z$  hausdorffsch ist, ist  $Z$  eine  $n$ -dimensionale Mannigfaltigkeit.

**Korollar 2.1**

Sind  $X, Y$  Mannigfaltigkeiten der Dimension  $n$  bzw.  $m$ , so ist  $X \times Y$  eine Mannigfaltigkeit der Dimension  $n + m$ .

**Beweis:** Produkte von Karten sind Karten. ■

**Beispiel 19**

Mannigfaltigkeiten mit Dimension 1:

- 1) Offene Intervalle,  $\mathbb{R}$ ,  $(0, 1)$  sind alle homöomorph
- 2)  $S^1$

Mannigfaltigkeiten mit Dimension 2:

- 1)  $\mathbb{R}^2$
- 2)  $S^2$  (0 Henkel)
- 3)  $T^2$  (1 Henkel)
- 4) oder mehr Henkel, wie z.B. der Zweifachtorus in [Abbildung 2.1](#)

**Korollar 2.2**

Sei  $n \in \mathbb{N}, F : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  stetig differenzierbar und  $X = V(F) := \{x \in \mathbb{R}^n \mid F(x) = 0\}$  das „vanishing set“.

Dann gilt:

- a)  $X$  ist abgeschlossen in  $\mathbb{R}^n$
- b) Ist  $\text{grad}(F)(X) \neq 0 \quad \forall x \in X$ , so ist  $X$  eine Mannigfaltigkeit der Dimension  $n - 1$ .

**Beweis:**

- a) Sei  $y \in \mathbb{R}^n \setminus V(F)$ . Weil  $F$  stetig ist, gibt es  $\delta > 0$ , sodass  $F(\mathfrak{B}_\delta(y)) \subseteq \mathfrak{B}_\varepsilon(F(y))$  mit  $\varepsilon = \frac{1}{2}\|F(y)\|$ . Folgt  $\mathfrak{B}_\delta(y) \cap V(F) = \emptyset \Rightarrow \mathbb{R}^n \setminus V(F)$  ist offen.
- b) Sei  $x \in X$  mit  $\text{grad}(F)(x) \neq 0$ , also o. B. d. A.  $\frac{\partial F}{\partial x_1}(x) \neq 0$ ,  $x = (x_1, \dots, x_n)$ ,  $x' := (x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^{n-1}$ . Der Satz von der impliziten Funktion liefert nun: Es

gibt Umgebungen  $U$  von  $x'$  und differenzierbare Funktionen  $g : U \rightarrow \mathbb{R}$ , sodass  $G : U \rightarrow \mathbb{R}^n$ ,  $u \mapsto (g(u), u)$  eine stetige Abbildung auf eine offene Umgebung  $V$  von  $x$  in  $X$  ist.

■

### Beispiel 20

- a)  $F : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $(x, y, z) \mapsto x^2 + y^2 + z^2 - 1$ ,  $V(F) = S^2$ ,  $\text{grad}(F) = (2x, 2y, 2z) \xrightarrow{\text{24.b}} S^n$   
ist  $n$ -dimensionale Mannigfaltigkeit in  $\mathbb{R}^{n+1}$
- b)  $F : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $(x, y) \mapsto y^2 - x^3$  Es gilt:  $\text{grad}(F) = (-3x^2, 2y)$ . Also:  $\text{grad}(0, 0) = (0, 0)$ .



Abbildung 2.2: Rechts ist die Neilsche Parabel für verschiedene Parameter  $a$ .

Daher ist Korollar 24.b nicht anwendbar, aber  $V(F)$  ist trotzdem eine 1-dimensionale topologische Mannigfaltigkeit.

### Definition 25

Sei  $X$  ein Hausdorffraum mit abzählbarer Basis der Topologie.  $X$  heißt  $n$ -dimensionale **Mannigfaltigkeit mit Rand**, wenn es einen Atlas  $(U_i, \varphi_i)$  gibt, wobei  $U_i \subseteq X_i$  offen und  $\varphi_i$  ein Homöomorphismus auf eine offene Teilmenge von

$$R_{+,0}^n := \{ (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n \mid x_m \geq 0 \}$$

ist.  $R_{+,0}^n$  ist ein „Halbraum“.

### Definition 26

Sei  $X$  eine  $n$ -dimensionale Mannigfaltigkeit mit Rand und Atlas  $(U_i, \varphi_i)$ . Dann heißt

$$\partial X := \bigcup_{i \in I} \{ x \in U_i \mid \varphi_i(x)_n = 0 \}$$

**Rand** von  $X$ .

$\partial X$  ist eine Mannigfaltigkeit der Dimension  $n - 1$ .



Abbildung 2.3: Beispiele für Mannigfaltigkeiten mit Rand

**Definition 27**

Sei  $X$  eine  $n$ -dimensionale Mannigfaltigkeit mit Atlas  $(U_i, \varphi_i)_{i \in I}$

Für  $i, j \in I$  mit  $U_i, U_j \neq \emptyset$  heißt

$$\begin{aligned}\varphi_{ij} &:= \varphi_j \circ \varphi_i^{-1} \\ \varphi_i(U_i \cap U_j) &\rightarrow \varphi_j(U_i \cap U_j)\end{aligned}$$

**Kartenwechsel** oder **Übergangsfunktion**.



Abbildung 2.4: Kartenwechsel

## 2.2 Differenzierbare Mannigfaltigkeiten

**Definition 28**

Sei  $X$  eine  $n$ -dimensionale Mannigfaltigkeit mit Atlas  $(U_i, \varphi_i)_{i \in I}$ .

- a)  $X$  heißt **differenzierbare Mannigfaltigkeit der Klasse  $C^k$** , wenn jede Kartenwechselabbildung  $\varphi_{ij}$ ,  $i, j \in I$   $k$ -mal stetig differenzierbar ist.
- b)  $X$  heißt **differenzierbare Mannigfaltigkeit**, wenn  $X$  eine differenzierbare Mannigfaltigkeit der Klasse  $C^\infty$  ist.

**Definition 29**

Sei  $X$  eine differenzierbare Mannigfaltigkeit der Klasse  $C^k$  ( $k \in \mathbb{N} \cup \{\infty\}$ ) mit Atlas  $(U_i, \varphi_i)_{i \in I}$ .

- a) Eine Karte  $(U, \varphi)$  auf  $X$  heißt **verträglich** mit  $\mathcal{A}$ , wenn alle Kartenwechsel  $\varphi \circ \varphi_i^{-1}$  und  $\varphi_i \circ \varphi^{-1}$  ( $i \in I$  mit  $U_i \cap U \neq \emptyset$ ) differenzierbar von Klasse  $C^k$  sind.
- b) Die Menge aller mit  $\mathcal{A}$  verträglichen Karten auf  $X$  bildet einen maximalen Atlas von Klasse  $C^k$ . Er heißt  **$C^k$ -Struktur** auf  $X$ .

Eine  $C^\infty$ -Struktur heißt auch **differenzierbare Struktur** auf  $X$ .

**Bemerkung 10**

Für  $n \geq 4$  gibt es auf  $S^n$  mehrere verschiedene differenzierbare Strukturen, die sog. „exotische Sphären“.

**Definition 30**

Seien  $X, Y$  differenzierbare Mannigfaltigkeiten der Dimension  $n$  bzw.  $m$ ,  $x \in X$ .

- a) Eine stetige Abbildung  $f : X \rightarrow Y$  heißt **differenzierbar** in  $x$  (von Klasse  $C^k$ ), wenn es Karten  $(U, \varphi)$  von  $X$  mit  $x \in U$  und  $(V, \psi)$  von  $Y$  mit  $f(U) \subseteq V$  gibt, sodass  $\psi \circ f \circ \varphi^{-1}$  stetig differenzierbar von Klasse  $C^k$  in  $\varphi(x)$  ist.
- b)  $f$  heißt **differenzierbar** (von Klasse  $C^k$ ), wenn  $f$  in jedem  $x \in X$  differenzierbar ist.
- c)  $f$  heißt **Diffeomorphismus**, wenn  $f$  differenzierbar von Klasse  $C^\infty$  ist und es eine differenzierbare Abbildung  $g : Y \rightarrow X$  von Klasse  $C^\infty$  gibt mit  $g \circ f = \text{id}_X$  und  $f \circ g = \text{id}_Y$ .

**Korollar 2.3**

Die Bedingung in Definition 30.a hängt nicht von den gewählten Karten ab.

**Beweis:** Seien  $(U', \varphi')$  und  $(V', \psi')$  Karten von  $X$  bzw.  $Y$  um  $x$  bzw.  $f(x)$  mit  $f(U') \subseteq V'$ .

$$\begin{aligned} &\Rightarrow \psi' \circ f \circ (\varphi')^{-1} \\ &= \psi' \circ (\psi^{-1} \circ \varphi) \circ f \circ (\varphi^{-1} \circ \varphi) \circ (\varphi')^{-1} \end{aligned}$$

ist genau dann differenzierbar, wenn  $\psi \circ f \circ \varphi^{-1}$  differenzierbar ist.

**Beispiel 21**

$f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $x \mapsto x^3$  ist kein Diffeomorphismus, aber Homöomorphismus, da mit  $g(x) := \sqrt[3]{x}$  gilt:  $f \circ g = \text{id}_{\mathbb{R}}$ ,  $g \circ f = \text{id}_{\mathbb{R}}$

**Bemerkung 11**

Sei  $X$  eine glatte Mannigfaltigkeit. Dann ist

$$\text{Diffeo}(X) := \{f : X \rightarrow X \mid f \text{ ist Diffeomorphismus}\}$$

eine Untergruppe von  $\text{Hom}\ddot{o}(X)$ .

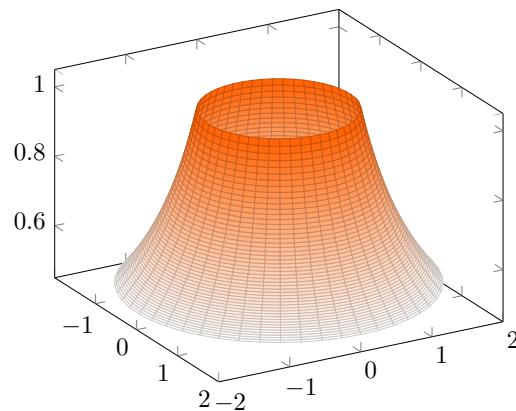
**Definition 31**

$S \subseteq \mathbb{R}^3$  heißt **reguläre Fläche** : $\Leftrightarrow \forall s \in S \exists$  Umgebung  $V(s) \subseteq \mathbb{R}^3 \exists U \subseteq \mathbb{R}^2$  offen:  $\exists$  differenzierbare Abbildung  $F : U \rightarrow V \cap S$ :  $\text{Rg}(J_F(u)) = 2 \quad \forall u \in U$ .

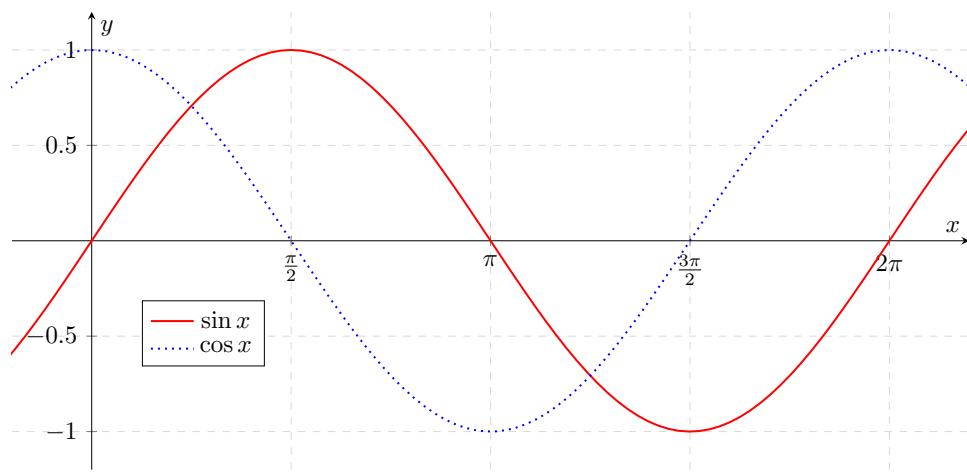
$F$  heißt (lokale) reguläre Parametrisierung von  $S$ .



(a) Kugelkoordinaten



(b) Rotationskörper



(c) Sinus und Kosinus haben keine gemeinsame Nullstelle

$$F(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v))$$

$$J_F(u, v) = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial u}(p) & \frac{\partial x}{\partial v}(p) \\ \frac{\partial y}{\partial u}(p) & \frac{\partial y}{\partial v}(p) \\ \frac{\partial z}{\partial u}(p) & \frac{\partial z}{\partial v}(p) \end{pmatrix}$$

**Beispiel 22**

- 1) Rotationsflächen: Sei  $r : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_{>0}$  eine differenzierbare Funktion.

$$F : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3 \quad (u, v) \mapsto (r(u) \cos(v), r(v) \sin(u), v)$$

$$J_F(u, v) = \begin{pmatrix} -r(v) \sin u & r'(v) \cos u \\ r(v) \cos u & r'(v) \sin u \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

hat Rang 2 für alle  $(u, v) \in \mathbb{R}^2$ .

- 2) Kugelkoordinaten:  $F : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3, \quad (u, v) \mapsto (R \cos v \cos u, R \cos v \sin u, R \sin v)$

$F(u, v) \in S_R^2$ , denn

$$\begin{aligned} & R^2 \cos^2(v) \cos^2(u) + R^2 \cos^2(v) \sin^2(u) + R^2 \sin^2(v) \\ & = R^2 (\cos^2(v) \cos^2(u) + \cos^2(v) \sin^2(u) + \sin^2(v)) \\ & = R^2 (\cos^2(v)(\cos^2(u) + \sin^2(u)) + \sin^2(v)) \\ & = R^2 (\cos^2(v) + \sin^2(v)) \\ & = R^2 \end{aligned}$$

Die Jacobi-Matrix

$$J_F(u, v) = \begin{pmatrix} -R \cos v \sin u & -R \sin v \cos u \\ R \cos v \cos u & -R \sin v \sin u \\ 0 & R \cos v \end{pmatrix}$$

hat Rang 2 für  $\cos v \neq 0$ . In  $N$  und  $S$  ist  $\cos v = 0$ .

### Korollar 2.4

Jede reguläre Fläche  $S \subseteq \mathbb{R}^3$  ist eine 2-dimensionale, differenzierbare Mannigfaltigkeit.

**Beweis:** z.Z.:  $F_j^{-1} \circ F_i$  ist Diffeomorphismus



Hier muss ich nochmals drüber lesen.

Abbildung 2.5: Reguläre Fläche  $S$  zum Beweis von Korollar 2.4

Idee: Finde differenzierbare Funktion  $\widetilde{F_j^{-1}}$  in Umgebung  $W$  von  $s$ , sodass  $\widetilde{F_j^{-1}}|_{S \cap W} = F_j^{-1}$ .

Ausführung: Sei  $u_0 \in U_i$  mit  $F_i(u_0) = s = F_j(v_0), v_0 \in U_j$ .

Da  $\text{rg } J_{F_j}(v_0) = 2$  ist, ist o. B. d. A.

$$\det \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} \\ \frac{\partial z}{\partial u} & \frac{\partial z}{\partial v} \end{pmatrix} (v_0) \neq 0$$

und  $F_j(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v))$ .

Definiere  $\widetilde{F_j} : U_j \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^3$  durch

$$\widetilde{F_j}(u, v, t) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v) + t)$$

Offensichtlich:  $\widetilde{F_j}|_{U_j \times \{0\}} = F_j$

$$J_{\widetilde{F_j}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} & 0 \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} & 0 \\ \frac{\partial z}{\partial u} & \frac{\partial z}{\partial v} & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow \det J_{\widetilde{F_j}}(v_0, 0) \neq 0$$

$\xrightarrow{\text{Analysis II}}$  Es gibt Umgebungen  $W$  von  $F_j$  von  $\widetilde{F}_j(v_0, 0) = F_j(v_0) = s$ , sodass  $\widetilde{F}_j$  auf  $W$  eine differenzierbar Inverse  $F_j^{-1}$  hat.

Weiter ist  $\widetilde{F}_j^{-1}|_{W \cap S} = F_j^{-1}|_{W \cap S} \Rightarrow F_j^{-1} \circ F_i|_{F_i^{-1}(W \cap S)} = F_j^{-1} \circ F_i|_{F_i^{-1}(W \cap S)}$  ist differenzierbar.

### Definition 32

Sei  $G$  eine Mannigfaltigkeit,  $\circ : G \times G \rightarrow G$  eine Abbildung,  $(g, h) \mapsto g \cdot h$ , sodass  $(G, \circ)$  eine Gruppe ist.

- (a)  $G$  heißt **topologische Gruppe**, wenn die Abbildungen  $\circ : G \times G \rightarrow G$  und  $\iota : G \rightarrow G$ .

$$(g, h) \mapsto g \cdot h \quad g \mapsto g^{-1}$$

stetig sind.

- (b) Ist  $G$  eine differenzierbare Mannigfaltigkeit, so heißt  $G$  **Lie-Gruppe**, wenn  $(G, \circ)$  und  $(G, \iota)$  differenzierbar sind.

### Beispiel 23

- 1) Alle endlichen Gruppen sind 0-dimensionale Lie-Gruppen.
- 2)  $\mathrm{GL}_n(\mathbb{R})$
- 3)  $(\mathbb{R}^\times, \cdot)$
- 4)  $(\mathbb{R}_{>0}, \cdot)$
- 5)  $(\mathbb{R}^n, +)$ , denn  $A \cdot B(i, j) = \sum_{k=1}^n a_{ik} b_{kj}$  ist nach allen Variablen differenzierbar

$$(A^{-1})(i, j) = \frac{\det(A_{ij})}{\det A}$$

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} a_{i1} & \dots & a_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{(n-1) \times (n-1)}$$

ist differenzierbar.

$\det A_{ij}$  kann 0 werden, da:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$$

6)  $\mathrm{SL}_n(\mathbb{R}) = \{ A \in \mathrm{GL}_n(\mathbb{R}) \mid \det(A) = 1 \}$

$\mathrm{grad}(\det -1)(A) = 0?$

$$\frac{\partial}{\partial a_{11}}(\det -1) = 1 \cdot \det A_{11}$$

Es gibt  $i \in \{1, \dots, n\}$  mit  $\frac{\partial}{\partial a_{1i}}(\det -1)A \neq 0$

Besser  
struk-  
turie-  
ren

### Bemerkung 12

Ist  $G$  eine Lie-Gruppe,  $g \in G$ , so ist die Abbildung

$$\begin{aligned} l_g : G &\rightarrow G \\ h &\mapsto g \cdot h \end{aligned}$$

ein Diffeomorphismus.

## 2.3 Simplizialkomplex

### Definition 33

Seien  $v_0, \dots, v_k \in \mathbb{R}^n$  Punkte.

- a)  $v_0, \dots, v_k$  sind in **allgemeiner Lage**  $\Leftrightarrow$  es gibt keinen  $(k-1)$ -dimensionalen affinen Untervektorraum, der  $v_0, \dots, v_k$  enthält  $\Leftrightarrow v_1 - v_0, \dots, v_k - v_0$  sind linear abhängig.
- b)  $\text{conv}(v_0, \dots, v_k) = \left\{ \sum_{i=0}^k \lambda_i v_i \mid \lambda_i \geq 0, \sum_{i=0}^k \lambda_i = 1 \right\}$

### Definition 34

- a) Sei  $\Delta^k = \text{conv}(e_0, \dots, e_k) \subseteq \mathbb{R}^{n+1}$  die konvexe Hülle der Standard-Basisvektoren  $e_0, \dots, e_k$ .

Dann heißt  $\Delta^k$  **Standard-Simplex** und  $k$  die Dimension des Simplex.

- b) Für Punkte  $v_0, \dots, v_k$  im  $\mathbb{R}^n$  in allgemeiner Lage heißt  $\delta(v_0, \dots, v_k) = \text{conv}(v_0, \dots, v_k)$  ein  **$k$ -Simplex** in  $\mathbb{R}^n$ .
- c) Ist  $\Delta(v_0, \dots, v_k)$  ein  $k$ -Simplex und  $I = \{i_0, \dots, i_r\} \subseteq \{0, \dots, k\}$ , so heißt  $s_{i_0, \dots, i_r} := \text{conv}(v_{i_0}, \dots, v_{i_r})$  **Teilsimplex** oder **Seite** von  $\Delta$ .  
 $s_{i_0, \dots, i_r}$  ist  $r$ -Simplex.

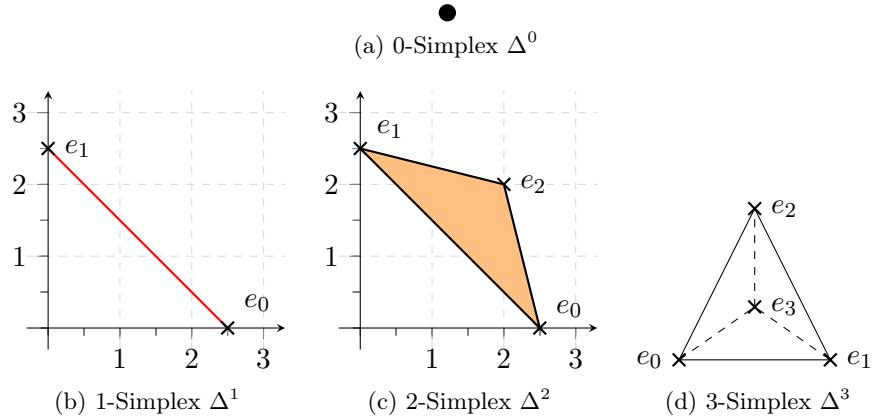


Abbildung 2.6: Beispiele für  $k$ -Simpexe

### Definition 35

- a) Eine endliche Menge  $K$  von Simplices im  $\mathbb{R}^n$  heißt (endlicher) **Simplizialkomplex**, wenn gilt:
  - (i) Für  $\Delta \in K$  und  $S \subseteq \Delta$  Teilsimplex ist  $S \in K$
  - (ii) Für  $\Delta_1, \Delta_2 \in K$  ist  $\Delta_1 \cap \Delta_2$  leer oder ein Teilsimplex von  $\Delta_1$  und von  $\Delta_2$
- b)  $|K| := \bigcup_{\Delta \in K} \Delta$  (mit Spurtopologie) heißt **geometrische Realisierung** von  $K$ .
- c) Ist  $d = \max \{k \mid K \text{ enthält } k-\text{Simplex}\}$ , so heißt  $d$  **Dimension** von  $K$ .

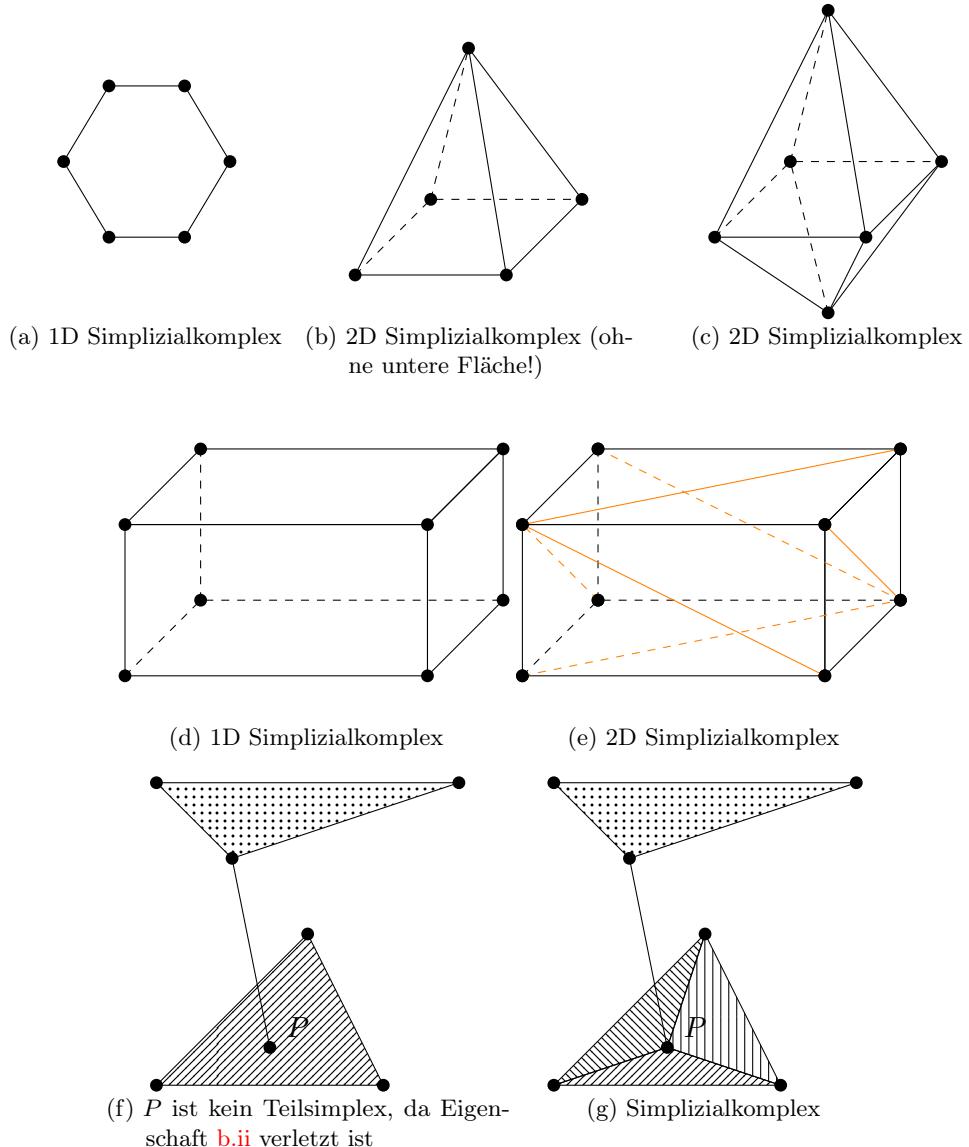


Abbildung 2.7: Beispiele für Simplicialkomplexe

**Definition 36**

Seien  $K, L$  Simplicialkomplexe. Eine stetige Abbildung

$$f : |K| \rightarrow |L|$$

heißt **simplizial**, wenn für jedes  $\Delta \in K$  gilt:

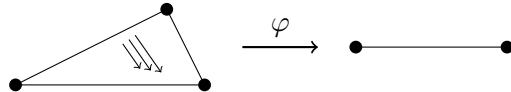
- (i)  $f(\Delta) \in L$
- (ii)  $f|_{\Delta} : \Delta \rightarrow f(\Delta)$  ist eine affine Abbildung.

**Beispiel 24**

- 1)  $\varphi(e_1) := b_1, \varphi(e_2) := b_2$   
 $\varphi$  ist eine eindeutig bestimmte lineare Abbildung



2) Folgende Abbildung  $\Delta^n \rightarrow \Delta^{n-1}$  ist simplizial:



3) Wozu dient das Beispiel?



### Definition 37

Sei  $K$  ein endlicher Simplizialkomplex. Für  $n \geq 0$  sei  $a_n(K)$  die Anzahl der  $n$ -Simplizes in  $K$ .

Dann heißt

$$\chi(K) := \sum_{k=0}^{\dim K} (-1)^k a_k(K)$$

**Eulerzahl** (oder Euler-Charakteristik) von  $K$ .

### Beispiel 25

$$\begin{aligned} 1) \quad & \chi(\Delta^1) = 2 - 1 = 1 \\ & \chi(\Delta^2) = 3 - 3 + 1 = 1 \\ & \chi(\Delta^3) = 4 - 6 + 4 - 1 = 1 \end{aligned}$$

- $$\begin{aligned} 2) \quad & \chi(\text{Oktaeder-Oberfläche}) = 6 - 12 + 8 = 2 \\ & \chi(\text{Rand des Tetraeders}) = 2 \\ & \chi(\text{Ikosaeder}) = 12 - 30 + 20 = 2 \\ 3) \quad & \chi(\text{Würfel}) = 8 - 12 + 6 = 2 \\ & \chi(\text{Würfel, unterteilt in Dreiecksflächen}) = 8 - (12 + 6) + (6 \cdot 2) = 2 \end{aligned}$$

### Korollar 2.5

$$\chi(\Delta^n) = 1 \text{ für jedes } n \in \mathbb{N}_0$$

**Beweis:**  $\Delta^n$  ist die konvexe Hülle von  $(e_0, \dots, e_n)$  in  $\mathbb{R}^{n+1}$ . Jede  $(k+1)$ -elementige Teilmenge von  $\{e_0, \dots, e_n\}$  definiert ein  $k$ -Simplex.

$$\Rightarrow a_k(\Delta^n) = \binom{n+1}{k+1}, \quad k = 0, \dots, n$$

$$\Rightarrow \chi(\Delta^n) = \sum_{k=0}^n (-1)^k \binom{n+1}{k+1}$$

$$\begin{aligned}
 f(x) &= (x+1)^{n+1} \stackrel{\substack{\text{Binomischer} \\ \text{Lehrsatz}}}{=} \sum_{k=0}^{n+1} \binom{n+1}{k} x^k \\
 \Rightarrow 0 &= \sum_{k=0}^{n+1} \binom{n+1}{k} (-1)^k = \chi(\Delta^n) - 1 \\
 \Rightarrow \chi(\Delta^n) &= 1
 \end{aligned}$$

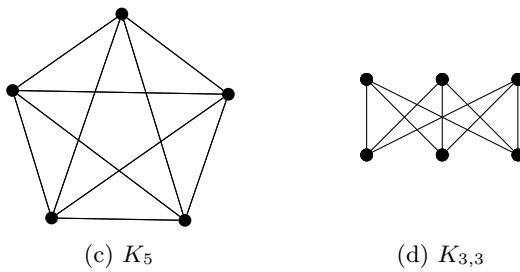
■

**Definition 38**

- a) Ein 1D-Simplizialkomplex heißt **Graph**.
- b) Ein Graph, der homöomorph zu  $S^1$  ist, heißt **Kreis**.
- c) Ein zusammenhängender Graph heißt **Baum**, wenn er keinen Kreis enthält.



(a) Dies wird häufig auch als  
Multigraph bezeichnet. (b) Planare Einbettung des Te-  
traeders



(c)  $K_5$  (d)  $K_{3,3}$

Abbildung 2.8: Beispiele für Graphen

**Korollar 2.6**

Für jeden Baum  $T$  gilt  $\gamma(T) = 1$ .

**Beweis:** Induktion über die Anzahl der Ecken.

**Korollar 2.7**

- a) Jeder zusammenhängende Graph  $\Gamma$  enthält einen Teilbaum  $T$ , der alle Ecken von  $\Gamma$  enthält.<sup>1</sup>

- b) Ist  $n = a_1(\Gamma) = a_1(T)$ , so ist  $\chi(\Gamma) = 1 - n$ .

**Beweis:**

- a) Siehe „Algorithmus von Kruskal“.
- b) 
$$\begin{aligned}
 \chi(\Gamma) &= a_0(\Gamma) - a_1(\Gamma) \\
 &= a_0(\Gamma) - (n + a_1(T)) \\
 &= a_0(T) - a_1(T) - n \\
 &= \chi(T) - n \\
 &= 1 - n
 \end{aligned}$$

---

<sup>1</sup> $T$  wird „Spannbaum“ genannt.

**Korollar 2.8**

Sei  $\Delta$  ein  $n$ -Simplex und  $x \in \Delta^\circ \subseteq \mathbb{R}^n$ . Sei  $K$  der Simplizialkomplex, der aus  $\Delta$  durch „Unterteilung“ in  $x$  entsteht. Dann ist  $\chi(K) = \chi(\Delta) = 1$ .



Abbildung 2.9: Beispiel für Korollar 2.8.

**Beweis:**  $\chi(K) = \chi(\Delta) - \underbrace{\underbrace{(-1)^n}_{n\text{-Simplex}} + \sum_{k=0}^n (-1)^k}_{(1+(-1))^{n+1}} = \chi(\Delta)$  ■

**Satz 2.9 (Eulersche Polyederformel)**

Sei  $P$  ein konvexes Polyeder in  $\mathbb{R}^3$ , d. h.  $\partial P$  ist ein 2-dimensionaler Simplizialkomplex, sodass gilt:

$$\forall x, y \in \partial P : [x, y] \subseteq P$$

Dann ist  $\chi(\partial P) = 2$ .

**Beweis:**

- 1) Die Aussage ist richtig für den Tetraeder.
- 2) O. B. d. A. sei  $0 \in P$  und  $P \subseteq \mathfrak{B}_1(0)$ . Projizierte  $0P$  von 0 aus auf  $\partial \mathfrak{B}_1(0) = S^2$ . Erhalte Triangulierung von  $S^2$ .
- 3) Sind  $P_1$  und  $P_2$  konvexe Polygone und  $T_1, T_2$  die zugehörigen Triangulierungen von  $S^2$ , so gibt es eine Triangulierung  $T$ , die sowohl um  $T_1$  als auch um  $T_2$  Verfeinerung ist.



Nach Korollar 2.8 ist  $\chi(\partial P_1) = \chi(T_1) = \chi(T) = \chi(T_2) = \chi(\partial P_2) = 2$ , weil o. B. d. A.  $P_2$  ein Tetraeder ist.

**Korollar 2.10 (Der Rand vom Rand ist 0)**

Sei  $K$  ein (endlicher) Simplizialkomplex mit Knotenmenge  $V$  und  $<$  eine Totalordnung auf  $V$ .

Was bedeutet diese Zeichnung?

Warum in Klammern?

Sei  $A_n$  die Menge der  $n$ -Simplizes in  $K$ , d. h.

$$A_n(K) := \{ \sigma \in K \mid \dim(\sigma) = n \} \quad \text{für } n = 0, \dots, d = \dim(K)$$

und  $C_n(K)$  der  $\mathbb{R}$ -Vektorraum mit Basis  $A_n(K)$ , d. h.

$$C_n(K) = \left\{ \sum_{\sigma \in A_n(K)} c_\sigma \cdot \sigma \mid c_\sigma \in \mathbb{R} \right\}$$

Sei  $\sigma = \Delta(x_0, \dots, x_n) \in A_n(K)$ , sodass  $x_0 < x_1 < \dots < x_n$ .

Für  $i = 0, \dots, n$  sei  $\partial_i \sigma := \Delta(x_0, \dots, \hat{x}_i, \dots, x_n)$  die  $i$ -te Seite von  $\sigma$  und  $d_\sigma = d_n \sigma := \sum_{i=0}^n (-1)^i \partial_i \sigma \in C_{n-1}(K)$  und  $d_n : C_n(K) \rightarrow C_{n-1}(K)$  die dadurch definierte lineare Abbildung.

Dann gilt:  $d_{n-1} \circ d_n = 0$



### Beispiel 26

$$a < b < c$$

$$d_2 \sigma = e_1 - e_2 + e_3 = (c - b) - (c - a) + (b - a) = 0$$

Beispiel auf Tetraeder übertragen

**Beweis:** Sei  $\sigma \in A_n$ . Dann gilt:

$$\begin{aligned} d_{n-1}(d_n \sigma) &= d_{n-1}\left(\sum_{i=0}^n (-1)^i \partial_i \sigma\right) \\ &= \sum_{i=0}^n (-1)^i d_{n-1}(\partial_i \sigma) \\ &= \sum_{i=0}^n (-1)^i \sum_{j=0}^{n-1} \partial_i(\partial_j \sigma) (-1)^j \\ &= \sum_{0 \leq i \leq j \leq n-1} (-1)^{i+j} \partial_j(\partial_i(\sigma)) + \sum_{0 \leq j < i \leq n} (-1)^{i+j} \partial_{i-1}(\partial_j \sigma) \\ &= 0 \end{aligned}$$

weil jeder Summand aus der ersten Summe auch in der zweiten Summe vorkommt, aber mit umgekehrten Vorzeichen. ■

### Definition 39

Sei  $Z_n := \text{Kern}(d_n) \subseteq C_n$  und  $B_n := \text{Bild}(d_{n+1}) \subseteq C_n$ .

- a)  $H_n = H_n(K, \mathbb{R}) := Z_n / B_n$  heißt  $n$ -te **Homotopiegruppe** von  $K$ .  
b)  $b_n(K) := \dim_{\mathbb{R}} H_n$  heißt  $n$ -te **Betti-Zahl** von  $K$ .

### Bemerkung 13

Nach Korollar 2.10 ist  $B_n \subseteq Z_n$ , denn  $d_{n+1}(C) \in \text{Kern}(d_n)$  für  $C \in C_{n+1}$ .

### Satz 2.11

Für jeden endlichen Simplicialkomplex  $K$  der Dimension  $d$  gilt:

$$\sum_{k=0}^d (-1)^k b_k(K) = \sum_{k=0}^d (-1)^k a_k(K) = \chi(K)$$

### Bemerkung 14

Es gilt nicht  $a_k = b_k \forall k \in \mathbb{N}_0$ .

#### Beweis:

- Dimensionsformel für  $d_n$ :  $a_n = \dim Z_n + \dim B_{n-1}$  für  $n \geq 1$
- Dimensionsformel für  $Z_n \rightarrow H_n = Z_n / B_n$ :  $\dim Z_n = b_n + \dim B_n$

$$\Rightarrow \sum_{k=0}^d (-1)^k a_k = a_0 + \sum_{k=1}^d (-1)^k (\dim Z_k + \dim B_{k-1}) \quad (2.1)$$

$$= a_0 + \sum_{k=1}^d (-1)^k \dim Z_k + \sum_{k=0}^d (-1)^{k+1} \dim B_{k-1} \quad (2.2)$$

$$= a_0 + \sum_{k=1}^d (-1)^k \dim Z_k - \sum_{k=0}^d (-1)^k \dim B_{k-1} \quad (2.3)$$

$$= a_0 + \sum_{k=1}^{d-1} (-1)^k b_k + (-1)^d \underbrace{\dim Z_d}_{=b_d} - \dim B_0 \quad (2.4)$$

$$= b_0 + \sum_{k=1}^{d-1} (-1)^k b_k + (-1)^d b_d \quad (2.5)$$

$$= \sum_{k=0}^d (-1)^k b_k \quad (2.6)$$

## Übungsaufgaben

### Aufgabe 5 (Zusammenhang)

- (a) Beweisen Sie, dass eine topologische Mannigfaltigkeit genau dann wegzusammenhängend ist, wenn sie zusammenhängend ist
- (b) Betrachten Sie nun wie in Beispiel 8) den Raum  $X := (\mathbb{R} \setminus \{ 0 \}) \cup \{ 0_1, 0_2 \}$  versehen mit der dort definierten Topologie. Ist  $X$  wegzusammenhängend?

# 3 Fundamentalgruppe und Überlagerungen

## 3.1 Homotopie von Wegen



(a)  $\gamma_1$  und  $\gamma_2$  sind homotop, (b)  $\gamma_1$  und  $\gamma_2$  sind wegen dem  
da man sie „zueinander ver- Hindernis nicht homotop.  
schieben“ kann.

Abbildung 3.1: Beispiele für Wege  $\gamma_1$  und  $\gamma_2$

### Definition 40

Sei  $X$  ein topologischer Raum,  $a, b \in X$ ,  $\gamma_1, \gamma_2 : [0, 1] \rightarrow X$  Wege von  $a$  nach  $b$ , d. h.  $\gamma_1(0) = \gamma_2(0) = a$ ,  $\gamma_1(1) = \gamma_2(1) = b$

a)  $\gamma_1$  und  $\gamma_2$  heißen **homotop**, wenn es eine stetige Abbildung

$$H(t, 0) = \gamma_1(t), H(t, 1) = \gamma_2(t) \quad \forall t \in [0, 1] =: I$$

und  $H(0, s) = a$  und  $H(1, s) = b$  für alle  $s \in I$  gibt. Dann schreibt man:  $\gamma_1 \sim \gamma_2$

$H$  heißt **Homotopie** zwischen  $\gamma_1$  und  $\gamma_2$ .

b)  $\gamma_s : I \rightarrow X$ ,  $\gamma_s(t) = H(t, s)$  ist Weg in  $X$  von  $a$  nach  $b$  für jedes  $s \in I$ .

### Korollar 3.1

„Homotop“ ist eine Äquivalenzrelation auf der Menge aller Wege in  $X$  von  $a$  nach  $b$ .

### Beweis:

- reflexiv:  $H(t, s) = \gamma(t)$  für alle  $t, s \in I \times I$
- symmetrisch:  $H'(t, s) = H(t, 1 - s)$  für alle  $t, s \in I \times I$
- transitiv: Seien  $H'$  bzw.  $H''$  Homotopien von  $\gamma_1$  nach  $\gamma_2$  bzw. von  $\gamma_2$  nach  $\gamma_3$ .

$$\text{Dann sei } H(t, s) := \begin{cases} H'(t, 2s) & \text{falls } 0 \leq s \leq \frac{1}{2} \\ H''(t, 2s - 1) & \text{falls } \frac{1}{2} \leq s \leq 1 \end{cases}$$

$\Rightarrow H$  ist stetig und Homotopie von  $\gamma_1$  nach  $\gamma_2$

■

### Beispiel 27

1) Sei  $X = S^1$ .  $\gamma_1$  und  $\gamma_2$  aus Abbildung 3.3a nicht homöotop.

Abbildung 3.2: Zwei Wege im  $\mathbb{R}^2$  mit Anfangs- und Endpunkt  $(0, 0)$ 

- 2) Sei  $X = T^2$ .  $\gamma_1, \gamma_2$  und  $\gamma_3$  aus [Abbildung 3.3b](#) sind paarweise nicht homöotop.
- 3) Sei  $X = \mathbb{R}^2$  und  $a = b = (0, 0)$ .

Je zwei Wege im  $\mathbb{R}^2$  mit Anfangs- und Endpunkt  $(0, 0)$  sind homöotop.

Sei  $\gamma_0 : I \rightarrow \mathbb{R}^2$  der konstante Weg  $\gamma_0(t) = 0 \forall t \in I$ . Sei  $\gamma(0) = \gamma(1) = 0$ .

$H(t, s) := (1 - s)\gamma(t)$  ist stetig,  $H(t, 0) = \gamma(t) \forall t \in I$  und  $H(t, 1) = 0 \forall t \in I$

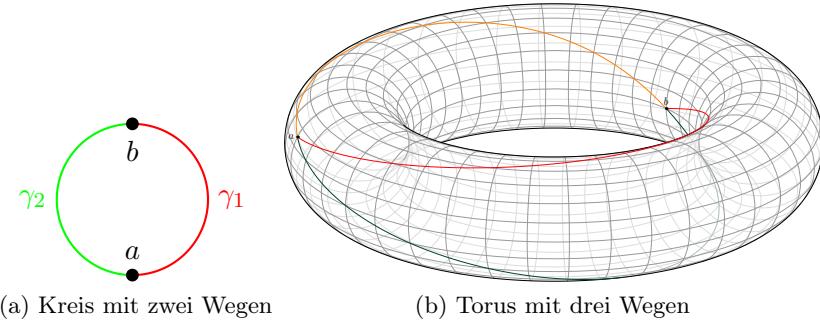


Abbildung 3.3: Beispiele für (nicht)-Homotopie von Wegen

### Korollar 3.2

Sei  $X$  ein topologischer Raum,  $\gamma : I \rightarrow X$  ein Weg und  $\varphi : I \rightarrow I$  stetig mit  $\varphi(0) = 0$ ,  $\varphi(1) = 1$ . Dann sind  $\gamma$  und  $\gamma \circ \varphi$  homotop.

**Beweis:** Sei  $H(t, s) = \gamma((1 - s)t + s \cdot \varphi(t))$ .

Dann ist  $H$  stetig,  $H(t, 0) = \gamma(t)$ ,  $H(t, 1) = \gamma(\varphi(t))$ ,  $H(0, s) = \gamma(0)$  und  $H(1, s) = \gamma(1 - s + s) = \gamma(1)$   
 $\Rightarrow H$  ist Homotopie. ■

**Definition 41**

Seien  $\gamma_1, \gamma_2$  Wege in  $X$  mit  $\gamma_1(1) = \gamma_2(0)$ . Dann ist

$$\gamma(t) = \begin{cases} \gamma_1(2t) & \text{falls } 0 \leq t < \frac{1}{2} \\ \gamma_2(2t - 1) & \text{falls } \frac{1}{2} \leq t \leq 1 \end{cases}$$

ein Weg in  $X$ . Er heißt **zusammengesetzter Weg** und man schreibt  $\gamma = \gamma_1 * \gamma_2$ .

**Korollar 3.3**

Das zusammensetzen von Wegen ist nur bis auf Homotopie assoziativ, d. h.:

$$\begin{aligned} \gamma_1 * (\gamma_2 * \gamma_3) &\neq (\gamma_1 * \gamma_2) * \gamma_3 \\ \gamma_1 * (\gamma_2 * \gamma_3) &\sim (\gamma_1 * \gamma_2) * \gamma_3 \end{aligned}$$

mit  $\gamma_1(1) = \gamma_2(0)$  und  $\gamma_2(1) = \gamma_3(0)$ .

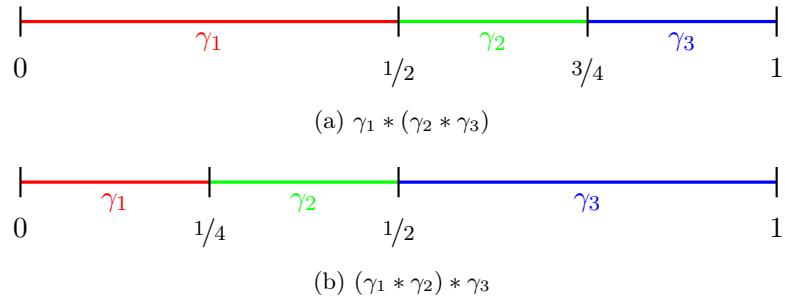


Abbildung 3.4: Das Zusammensetzen von Wegen ist nicht assoziativ

**Beweis:** Das Zusammensetzen von Wegen ist wegen [Korollar 3.2](#) bis auf Homotopie assoziativ, da

$$\gamma(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}t & \text{falls } 0 \leq t < \frac{1}{2} \\ t - \frac{1}{4} & \text{falls } \frac{1}{2} \leq t < \frac{3}{4} \\ 2t - 1 & \text{falls } \frac{3}{4} \leq t \leq 1 \end{cases}$$

**Korollar 3.4**

Sei  $X$  ein topologischer Raum,  $a, b, c \in X$ ,  $\gamma_1, \gamma'_1$  Wege von  $a$  nach  $b$  und  $\gamma_2, \gamma'_2$  Wege von  $b$  nach  $c$ .

Sind  $\gamma_1 \sim \gamma'_1$  und  $\gamma_2 \sim \gamma'_2$ , so ist  $\gamma_1 * \gamma_2 \sim \gamma'_1 * \gamma'_2$ .

**Beweis:** Sei  $H_i$  eine Homotopie zwischen  $\gamma_i$  und  $\gamma'_i$ ,  $i = 1, 2$ .

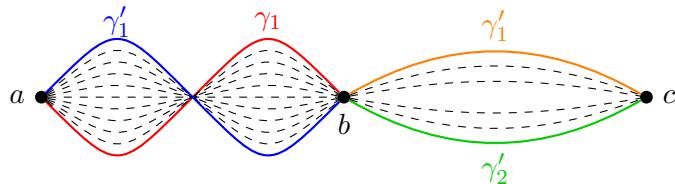


Abbildung 3.5: Situation aus [Korollar 3.4](#)

Dann ist

$$H(t, s) := \begin{cases} H_1(2t, s) & \text{falls } 0 \leq t \leq \frac{1}{2} \quad \forall s \in I \\ H_2(2t - 1, s) & \text{falls } \frac{1}{2} \leq t \leq 1 \end{cases}$$

Homotopie zwischen  $\gamma_1 * \gamma_2$  und  $\gamma'_1 * \gamma'_2$  (!)

Hier fehlt noch was

## 3.2 Fundamentalgruppe

Für einen Weg  $\gamma$  sei  $[\gamma]$  seine **Homotopiekasse**.

### Definition 42

Sei  $X$  ein topologischer Raum und  $x \in X$ . Sei außerdem

$$\pi_1(X, x) := \{ [\gamma] \mid \gamma \text{ ist Weg in } X \text{ mit } \gamma(0) = \gamma(1) = x \}$$

Durch  $[\gamma_1] *_G [\gamma_2] := [\gamma_1 * \gamma_2]$  wird  $\pi_1(X, x)$  zu einer Gruppe. Diese Gruppe heißt **Fundamentalgruppe** in  $X$  im Basispunkt  $x$ .

### Bemerkung 15

Im  $\mathbb{R}^2$  gibt es nur eine Homotopiekasse.

### Beweis: (Fundamentalgruppe ist eine Gruppe)

- a) Abgeschlossenheit folgt direkt aus der Definition von  $*_G$
- b) Assoziativität folgt aus **Korollar 3.3**
- c) Neutrales Element  $e = [\gamma_0], \gamma_0(t) = x \quad \forall t \in I. e * [\gamma] = [\gamma] = [\gamma] * e$ , da  $\gamma_0 * \gamma \sim \gamma$
- d) Inverses Element  $[\gamma]^{-1} = [\bar{\gamma}] = [\gamma(1-t)]$ , denn  $\bar{\gamma} * \gamma \sim \gamma_0 \sim \gamma * \bar{\gamma}$

### Beispiel 28

$$1) S^1 = \{ z \in \mathbb{C} \mid |z| = 1 \} = \{ (\cos \varphi, \sin \varphi) \in \mathbb{R}^2 \mid 0 \leq \varphi \leq 2\pi \}$$

$$\pi_1(S^1, 1) = \{ [\gamma^k] \mid k \in \mathbb{Z} \} \cong \mathbb{Z}$$

$$[\gamma^k] \mapsto k$$

$$2) \pi_1(\mathbb{R}^2, 0) = \pi_1(\mathbb{R}^2, x) = \{ e \} \text{ für jedes } x \in \mathbb{R}^2$$

$$3) \pi_1(\mathbb{R}^n, x) = \{ e \} \text{ für jedes } x \in \mathbb{R}^n$$

$$4) G \subseteq \mathbb{R}^n \text{ heißt } \mathbf{sternförmig} \text{ bzgl. } x \in G, \text{ wenn für jedes } y \in G \text{ auch die Strecke } [x, y] \subseteq G \text{ ist.}$$

Für jedes sternförmige  $G \subseteq \mathbb{R}^n$  ist  $\pi_1(G, x) = \{ e \}$

$$5) \pi_1(S^2, x_0) = \{ e \}, \text{ da im } \mathbb{R}^2 \text{ alle Wege homotop zu } \{ e \} \text{ sind. Mithilfe der stereographischen Projektion kann von } S^2 \text{ auf den } \mathbb{R}^2 \text{ abgebildet werden.}$$

Dieses Argument funktioniert nicht mehr bei flächendeckenden Wegen!

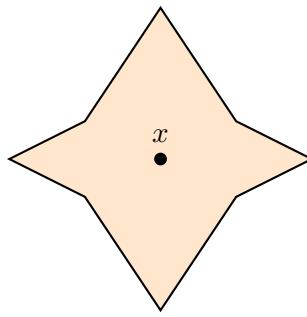


Abbildung 3.6: Sternförmiges Gebiet



Abbildung 3.7: Situation aus Korollar 3.5

**Korollar 3.5**

Sei  $X$  ein topologischer Raum,  $a, b \in X$ ,  $\delta : I \rightarrow X$  ein Weg von  $a$  nach  $b$ .

Dann ist die Abbildung

$$\alpha : \pi_1(X, a) \rightarrow \pi_1(X, b) \quad [\gamma] \mapsto [\bar{\delta} * \gamma * \delta]$$

ein Gruppenisomorphismus.

**Beweis:**

$$\begin{aligned} \alpha([\gamma_1] * [\gamma_2]) &= [\bar{\delta} * (\gamma_1 \gamma_2) * \delta] \\ &= [\bar{\delta} * \gamma_1 * \delta * \bar{\delta} * \gamma_2 * \delta] && = [\bar{\delta} * \gamma_1 * \delta] * [\bar{\delta} * \gamma_2 * \delta] \\ &= \alpha([\gamma_1]) * \alpha([\gamma_2]) \end{aligned}$$

**Definition 43**

Ein wegzusammenhängender topologischer Raum  $X$  heißt **einfach zusammenhängend**, wenn  $\pi_1(X, x) = \{e\}$  für ein (jedes)  $x \in X$ .

was  
denn  
nun?

**Korollar 3.6**

Es seien  $X, Y$  topologische Räume,  $f : X \rightarrow Y$  eine stetige Abbildung,  $x \in X, y := f(x) \in Y$ .

- Dann ist die Abbildung  $f_* : \pi_1(X, x) \rightarrow \pi_1(Y, y), [y] \mapsto [f \circ y]$  ein Gruppenhomomorphismus.
- Ist  $Z$  ein weiterer topologischer Raum und  $g : Y \rightarrow Z$  eine stetige Abbildung  $z := g(y)$ . Dann ist  $(g \circ f)_* = g_* \circ f_* : \pi_1(X, x) \rightarrow \pi_1(Z, z)$

**Beweis:**

- $f_*$  ist wohldefiniert: Seien  $\gamma_1, \gamma_2$  homotope Wege von  $x$ . z.Z.:  $f \circ \gamma_1 \sim f \circ \gamma_2$ : Nach Voraussetzung gibt es stetige Abbildungen  $H : I \times I \rightarrow X$  mit  $H(t, 0) = \gamma_1(t), H(t, 1) = \gamma_2(t), H(0, S) = H(1, S) = x$ . Dann ist  $f \circ H : I \times I \rightarrow Y$  mit  $\dots (f \circ H)(t, 0) = f(H(t, 0)) = f(\gamma_1(t)) = (f \circ \gamma_1)(t)$  etc.  $\Rightarrow f \circ \gamma_1 \sim f \circ \gamma_2$ .

$$f_*([\gamma_1] * [\gamma_2]) = [f \circ (\gamma_1 * \gamma_2)] = [(f \circ \gamma_1)] * [(f \circ \gamma_2)] = f_*([\gamma_1]) * f_*([\gamma_2])$$

Warum  
die  
Punk-  
te?

$$\text{b) } (g \circ f)_*([\gamma]) = [(g \circ f) \circ \gamma] = [g \circ (f \circ \gamma)] = g_*([f \circ \gamma]) = g_*(f_*([\gamma])) = (g_* \circ f_*)([\gamma])$$

**Beispiel 29**

- 1)  $f : S^1 \hookrightarrow \mathbb{R}^2$  ist injektiv, aber  $f_* : \pi_1(S^1, 1) \cong \mathbb{Z} \rightarrow \pi_1(\mathbb{R}^2, 1) - 0 \{ e \}$  ist nicht injektiv
- 2)  $f : \mathbb{R} \rightarrow S^1, t \mapsto (\cos 2\pi t, \sin 2\pi t)$  ist surjektiv, aber  $f_* : \pi_1(\mathbb{R}, 0) = \{ e \} \rightarrow \pi_1(S^1, 1) \cong \mathbb{Z}$  ist nicht surjektiv

**Korollar 3.7**

Sei  $f : X \rightarrow Y$  ein Homöomorphismus zwischen topologischen Räumen  $X, Y$ . Dann gilt:

$$f_* : \pi_1(X, x) \rightarrow \pi_1(Y, f(x))$$

ist ein Isomorphismus für jedes  $x \in X$ .

**Beweis:** Sei  $g : Y \rightarrow X$  die Umkehrabbildung, d. h.  $g$  ist stetig und  $f \circ g = \text{id}_Y, g \circ f = \text{id}_X$

$$\Rightarrow f_* \circ g_* = (f \circ g)_* = (\text{id}_Y)_* = \text{id}_{\pi_1(Y, f(x))} \text{ und } g_* \circ f_* = \text{id}_{\pi_1(X, x)}.$$

**Definition 44**

Seien  $X, Y$  topologische Räume,  $x_0 \in X, y_0 \in Y, f, g : X \rightarrow Y$  stetig mit  $f(x_0) = y_0 = g(x_0)$ .

$f$  und  $g$  heißen **homotop** ( $f \sim g$ ), wenn es eine stetige Abbildung  $H : X \times I \rightarrow Y$  gibt mit  $H(X, 0) = f(X), H(X, 1) = g(x)$  für alle  $x \in X$  und  $H(x_0, S) = y_0$  für alle  $s \in I$ .

**Korollar 3.8**

Sind  $f$  und  $g$  homotop, so ist  $f_* = g_* : \pi_1(X, x_0) \rightarrow \pi_1(Y, y_0)$ .

**Beweis:** Sei  $\gamma$  ein geschlossener Weg in  $X$  um  $x_0$ , d. h.  $[\gamma] \in \pi_1(X, x_0)$ .

Z. Z.:  $f \circ \gamma \sim g \circ \gamma$

Sei dazu  $H_\gamma : I \times I \rightarrow Y, (t, s) \mapsto H(\gamma(t), S)$ . Dann gilt:  $H_\gamma(t, 0) = H(\gamma(t), 0) = (g \circ \gamma)(t), H_\gamma(1, s) = H(\gamma(1), s) = H(x_0, s) = y_0$  für alle  $s$ .

**Beispiel 30**

$f : X \rightarrow Y, g : Y \rightarrow X$  mit  $g \circ f \sim \text{id}_X, f \circ g \sim \text{id}_Y$

$\Rightarrow f_*$  ist Isomorphismus. Konkret:  $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \{ 0 \}, g : \{ 0 \} \rightarrow \mathbb{R}^2$

$\Rightarrow f \circ g = \text{id}_{\{ 0 \}}, g \circ f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2, x \mapsto 0$  für alle  $x$ .

$g \circ f \sim \text{id}_{\mathbb{R}^2}$  mit Homotopie:  $H : \mathbb{R}^2 \times I \rightarrow \mathbb{R}^2, H(x, S) = (1 - s)x$  (stetig!)

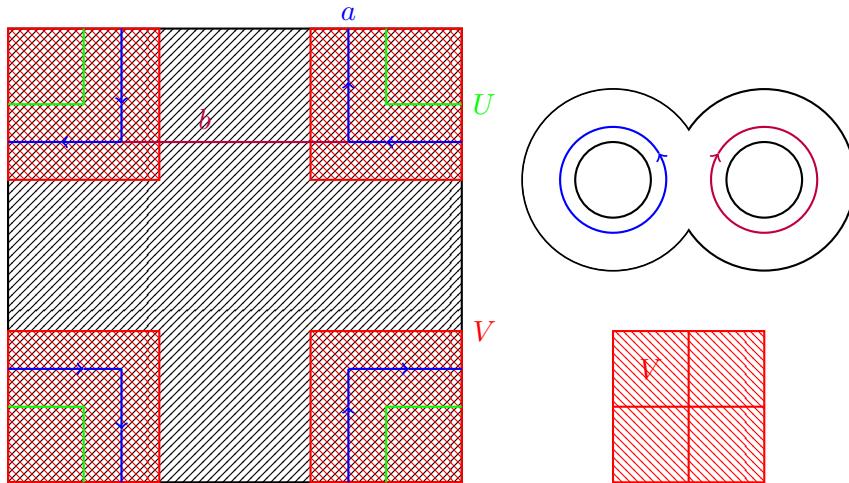
$\Rightarrow H(X, 0) = X = \text{id}_{\mathbb{R}^2}(X), H(X, 1) = 0, H(0, s) = 0$  für alle  $s \in I$

**Satz 3.9 (Satz von Seifert und van Kampen „light“)**

Sei  $X$  ein topologischer Raum,  $U, V \subseteq X$  offen mit  $U \cup V = X$  und  $U \cap V$  wegzusammenhängend.

Dann wird  $\pi_1(X, x)$  für  $x \in U \cap V$  erzeugt von geschlossenen Wegen um  $x$ , die ganz in  $U$  oder ganz in  $V$  verlaufen.

**Beweis:** Sei  $\gamma : I \rightarrow X$  ein geschlossener Weg von  $x$ . Überdecke  $I$  mit endlich vielen offenen Intervallen, die ganz in  $\gamma^{-1}(U)$  oder ganz in  $\gamma^{-1}(V)$  liegen.

Abbildung 3.8: Topologischer Raum  $X$ Abbildung 3.9:  $a * b = b * a \Leftrightarrow a * b * \bar{a} * \bar{b} \sim e$ 

O. B. d. A. sei  $\gamma(I_1) \subseteq U, \gamma(I_2) \subseteq V$ , etc.

Wähle  $t_i \in I_i \cap I_{i+1}$ , also  $\gamma(t_i) \in U \cap V$ . Sei  $\sigma_i$  Weg in  $U \cap V$  von  $x_0$  nach  $\gamma(t_i) \Rightarrow \gamma$  ist homotop zu

$$\underbrace{\gamma_1 * \bar{\sigma}_1}_{\text{in } U} * \underbrace{\sigma_1 * \gamma_2 * \bar{\sigma}_2}_{\text{in } V} * \dots * \sigma_{n-1} * \gamma_2$$

### Beispiel 31

- 1) Sei  $X$  wie in Abbildung 3.8.  $\pi_1(X, x)$  wird „frei“ erzeugt von  $a$  und  $b$ , weil  $\pi_1(U, x) = \langle a \rangle \cong \mathbb{Z}, \pi_1(V, x) = \langle b \rangle \cong \mathbb{Z}$ , insbesondere ist  $a * b$  nicht homotop zu  $b * a$ .
- 2) Torus:  $\pi_1(T^2, X)$  wird erzeugt von  $a$  und  $b$ .

## 3.3 Überlagerungen

### Definition 45

Es seien  $X, Y$  zusammenhängende topologische Räume und  $p : Y \rightarrow X$  eine stetige Abbildung.

$p$  heißt **Überlagerung**, wenn jedes  $x \in X$  eine offene Umgebung  $U = U(x) \subseteq X$  besitzt, sodass  $p^{-1}(U)$  disjunkte Vereinigung von offenen Teilmengen  $V_j \subseteq Y$  ist ( $j \in I$ ) und  $p|_{V_j} : V_j \rightarrow U$  ein Homöomorphismus ist.

### Beispiel 32

- 1) siehe Abbildung 3.10
- 2) siehe Abbildung 3.11a
- 3)  $\mathbb{R}^n \rightarrow T^n = \mathbb{R}^n / \mathbb{Z}^n$



Abbildung 3.10:  $\mathbb{R} \rightarrow S^1$ ,  
 $t \mapsto (\cos 2\pi t, \sin 2\pi t)$

- 4)  $S^n \rightarrow \mathcal{P}^n(\mathbb{R})$   
 5)  $S^1 \rightarrow S^1$ ,  $z \mapsto z^2$ , siehe Abbildung 3.11b

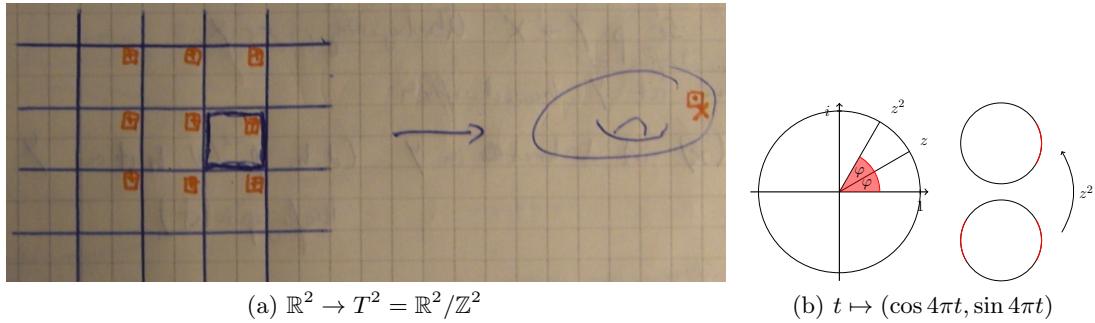


Abbildung 3.11: Beispiele für Überlagerungen

### Korollar 3.10

Überlagerungen sind surjektiv.

**Beweis:** durch Widerspruch

Sei  $p$  eine Überlagerung.

Annahme:  $p$  ist nicht surjektiv

Dann  $\exists x \in X$  mit  $U = U(x) : p^{-1}(U) = \emptyset$ . Da  $p$  eine Überlagerung ist, existiert eine offene Umgebung  $U$ , sodass  $p^{-1}(U)$  eine disjunkte Vereinigung von offenen Teilmengen  $V_j \subseteq Y$  ist und  $p|_{V_j} : V_j \rightarrow U$  ein Homöomorphismus ist.

Da jedes  $x$  eine solche Umgebung  $U$  besitzt, ist  $U \neq \emptyset$ . Da  $p|_{V_j} : V_j \rightarrow U$  ein Homöomorphismus ist, kann also auch  $V_j$  nicht leer sein.  $\Rightarrow$  Widerspruch zur Annahme. ■

### Definition 46

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

$f$  heißt **offen** : $\Leftrightarrow \forall V \subseteq X$  offen:  $f(V)$  ist offen in  $Y$ .

### Korollar 3.11

Überlappungen sind offene Abbildungen.

**Beweis:** Sei  $y \in V$  und  $x \in p(V)$ , sodass  $x = p(y)$  gilt. Sei weiter  $U = U_x$  die offene Umgebung von  $x$  wie in Definition 45 und  $V_j$  die Komponente von  $p^{-1}(U)$ , die  $y$  enthält.

Dann ist  $V \cap V_j$  offene Umgebung von  $y$ .

$\Rightarrow p(V \cap V_j)$  ist offen in  $p(V_j)$ , also auch offen in  $X$ . Außerdem ist  $p(y) = x \in p(V \cap V_j)$  und  $p(V \cap V_j) \subseteq p(V)$ .

$\Rightarrow p(V)$  ist offen.

Die Definition von Diskret habe ich mir überlegt. Hatten wir das schon mal? Haben wir Häufungspunkt definiert?

#### Definition 47

Sei  $M$  eine Menge und  $X$  ein topologischer Raum.

$M$  heißt **diskret** in  $X$ , wenn  $M$  in  $X$  keinen Häufungspunkt hat.

#### Korollar 3.12

Sei  $p : Y \rightarrow X$  Überlagerung,  $x \in X$ .

- a)  $X$  hausdorffsch  $\Rightarrow Y$  hausdorffsch
- b)  $p^{-1}(X)$  ist diskret in  $Y$

#### Beweis:

- a) Seien  $y_1, y_2 \in Y$ .

1. Fall:  $p(y_1) = p(y_2) = x$ .

Sei  $U$  Umgebung von  $x$  wie in Definition 45,  $V_{j_1}$  bzw.  $V_{j_2}$  die Komponente von  $p^{-1}(U)$ , die  $y_1$  bzw.  $y_2$  enthält.

Dann ist  $V_{j_1} \neq V_{j_2}$ , weil beide ein Element aus  $p^{-1}(x)$  enthalten.

$\Rightarrow V_{j_1} \cap V_{j_2} = \emptyset$  nach Voraussetzung.

2. Fall:  $p(y_1) \neq p(y_2)$ .

Dann seien  $U_1$  und  $U_2$  disjunkte Umgebungen von  $p(y_1)$  und  $p(y_2)$ .

$\Rightarrow p^{-1}(U_1)$  und  $p^{-1}(U_2)$  sind Umgebungen von  $y_1$  und  $y_2$ .

- b) Sei  $y \in Y$

1. Fall:  $y \in p^{-1}(x)$

Finde  $v_j$ , sodass kein ...

...

2. Fall:  $y \notin p^{-1}(x)$

...

#### Korollar 3.13 (Eindeutigkeit der Liftung)

Sei  $p : Y \rightarrow X$  Überlagerung,  $x_1, x_2 \in X$ .

Dann ist  $|p^{-1}(x_1)| = |p^{-1}(x_2)|$ .<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>  $|p^{-1}(x_1)| = \infty$  ist erlaubt!

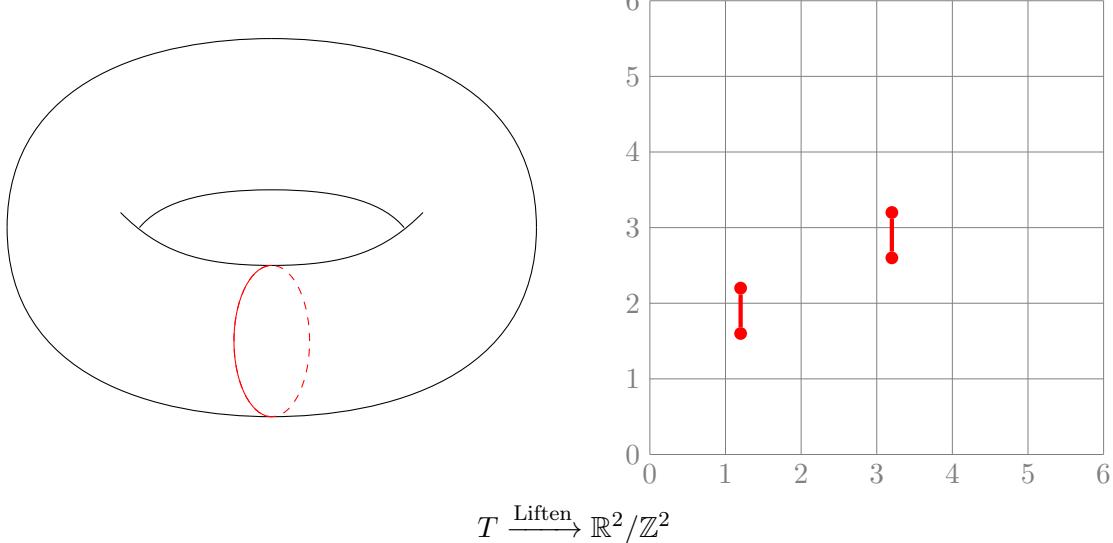


Abbildung 3.12: Beim Liften eines Weges bleiben geschlossene Wege im allgemeinen nicht geschlossen

$$\begin{array}{ccc} Z & \xrightarrow{\tilde{f}} & Y \\ & \searrow f \quad \nearrow \parallel & \swarrow p \\ & X & \end{array}$$

Abbildung 3.13: Situation aus **Korollar 3.14**

**Beweis:** Sei  $U$  Umgebung von  $x_1$  wie in Definition 45,  $x \in U$ . Dann enthält jedes  $V_j, j \in I_X$  genau ein Element von  $p^{-1}(x)$

$\Rightarrow |p^{-1}(x)|$  ist konstant auf  $U$

$\xrightarrow[X \text{ zhd.}]{} |p^{-1}(x)|$  ist konstant auf  $X$

#### Definition 48

Sei  $p : Y \rightarrow X$  Überlagerung,  $Z$  ein weiterer topologischer Raum,  $f : Z \rightarrow X$  stetig.

Eine stetige Abbildung  $\tilde{f} : Z \rightarrow Y$  heißt **Liftung** von  $f$ , wenn  $p \circ \tilde{f} = f$  ist.

#### Korollar 3.14

Sei  $Z$  zusammenhängend und  $f_0, \dots, f_1 : Z \rightarrow Y$  Liftungen von  $f$ .

$\exists z_0 \in Z : f_0(z) = f_1(z) \Rightarrow f_0 = f_1$

**Beweis:** Sei  $T = \{z \in Z \mid f_0(z) = f_1(z)\}$ .

Z. Z.:  $T$  ist offen und  $Z \setminus T$  ist auch offen.

Sei  $z \in T$ ,  $x = f(z)$ ,  $U$  Umgebung von  $x$  wie in Definition 45,  $V$  die Komponente von  $p^{-1}(U)$ , die  $y := f_0(z) = f_1(z)$ .

Sei  $q : U \rightarrow V$  die Umkehrabbildung zu  $p|_V$ .

deutsch?



Abbildung 3.14: Skizze für den Beweis von Satz 3.15

Sei  $W := f^{-1}(U) \cap f_0^{-1}(V) \cap f_1^{-1}(V)$ .  $W$  ist offene Umgebung in  $Z$  von  $z$ .

Behauptung:  $B \subseteq T$

Denn für  $w \in W$  ist  $q(f(w)) = q((p \circ f_0))(w) = ((q \circ p) \circ f_0)(w) = f_0(w) = q(f(w)) = f_1(w)$

$\Rightarrow T$  ist offen.

Analog:  $Z \setminus T$  ist offen.

### Satz 3.15

Sei  $p : Y \rightarrow X$  Überlagerung,  $\gamma : I \rightarrow X$  ein Weg,  $y \in Y$  mit  $p(y) = \gamma(0) =: x$ .

Dann gibt es genau einen Weg  $\tilde{\gamma} : I \rightarrow Y$  mit  $\tilde{\gamma}(0) = y$  und  $p \circ \tilde{\gamma} = \gamma$ .

**Beweis:** Existenz: Siehe Abbildung 3.14.

$p : Y \rightarrow X$  Überlagerung,  $X, Y$  wegzusammenhängend.  $p$  stetig und surjektiv, zu  $x \in X \exists$  Umgebung  $U$ , so dass  $p^{-1}(U) = \bigcup V_j$

$p|V_j : V_j \rightarrow U$  Homöomorphismus.

### Bemerkung 16

Wege in  $X$  lassen sich zu Wegen in  $Y$  liften.

Zu jedem  $y \in p^{-1}(\gamma(0))$  gibt es genau einen Lift von  $\gamma$ .

### Proposition 3.16

Seien  $p : Y \rightarrow X$  eine Überlagerung,  $a, b \in X$ ,  $\gamma_0, \gamma_1 : I \rightarrow X$  homotope Wege von  $a$  nach  $b$ ,  $\tilde{a} \in p^{-1}(a)$ ,  $\tilde{\gamma}_0, \tilde{\gamma}_1$  Liftungen von  $\gamma_0$  bzw.  $\gamma_1$  mit  $\tilde{\gamma}_i(0) = \tilde{a}$ .

Dann ist  $\tilde{\gamma}_0(1) = \tilde{\gamma}_1(1)$  und  $\tilde{\gamma}_0 \sim \tilde{\gamma}_1$ .

**Beweis:** Sei  $H : I \times I \rightarrow X$  Homotopie zwischen  $\gamma_1$  und  $\gamma_2$ .

Für  $s \in [0, 1]$  sei  $\gamma_s : I \rightarrow X$ ,  $t \mapsto H(t, s)$ .

Sei  $\tilde{\gamma}_s$  Lift von  $\gamma_s$  mit  $\tilde{\gamma}_s(0) = \tilde{a}$

Sei  $\tilde{H} : I \times I \rightarrow Y$ ,  $\tilde{H}(t, s) := (\tilde{\gamma}_s(t), s)$

Dann gilt:

- (i)  $\tilde{H}$  ist stetig (Beweis wie für Korollar 3.14)
- (ii)  $\tilde{H}(t, 0) = \tilde{\gamma}_s(t) = \tilde{H}(t, 1) = \tilde{\gamma}_1(t)$
- (iii)  $\tilde{H}(0, s) = \tilde{\gamma}_s(0) = \tilde{0}$
- (iv)  $\tilde{H}(1, s) \in p^{-1}(b)$

Da  $p^{-1}(b)$  diskrete Teilmenge von  $Y$  ist

$$\Rightarrow \tilde{H}(1, s) = \tilde{H}(1, 0) = \tilde{b}_s \forall s \in I$$

$\Rightarrow \tilde{b}_0 = \tilde{b}_1$  und  $H$  ist Homotopie zwischen  $\tilde{\gamma}_0$  und  $\tilde{\gamma}_1$ . ■

### Korollar 3.17

Sei  $p : Y \rightarrow X$  eine Überlagerung,  $x_0 \in X, y_0 \in p^{-1}(x_0)$

- a)  $p_1 : \pi_1(Y, y_0) \rightarrow \pi_1(X, x_0)$  ist injektiv
- b)  $[\pi_1(X, x_0) : p_*(\pi_1(Y, y_0))] = \deg(p)$

#### Beweis:

- a) Sei  $\tilde{\gamma}$  ein Weg in  $Y$  um  $y_0$  und  $p_*([\tilde{\gamma}]) = e$ , also  $p \circ \tilde{\gamma} \sim \gamma_{x_0}$

Nach Proposition 3.16 ist dann  $\tilde{\gamma}$  homotop zum Lift des konstanten Wegs  $\gamma_{x_0}$  mit Anfangspunkt  $y_0$ , also zu  $\gamma_{y_0} \Rightarrow [\tilde{\gamma}] = e$

- b) Sei  $d = \deg p, p^{-1}(x_0) = \{y_0, y_1, \dots, y_{d-1}\}$ . Für einen geschlossenen Weg  $\gamma$  in  $X$  um  $x_0$  sei  $\tilde{\gamma}$  die Liftung mit  $\tilde{\gamma}(0) = y_0$ .

$\tilde{\gamma}(1) \in \{y_0, \dots, y_{d-1}\}$  hängt nur von  $[\gamma] \in \pi_1(X, x_0)$  ab.

Es gilt:

$$\begin{aligned} \tilde{\gamma}_0(1) &= \tilde{\gamma}_1(1) \\ \Leftrightarrow [\tilde{\gamma}_0 * \tilde{\gamma}_1^{-1}] &\in \pi_1(Y, y_0) \\ \Leftrightarrow [\gamma_0 * \gamma_1^{-1}] &\in p_*(\pi_1(Y, y_0)) \end{aligned}$$

Zu  $i \in \{0, \dots, d-1\}$  gibt es Weg  $\delta_i$  in  $Y$  mit  $\delta_i(0) = y_0$  und  $\sigma_i(1) = y_i$

$\Rightarrow p * \delta_i$  ist geschlossener Weg in  $X$  um  $x_0$ .

$$\Rightarrow \sigma_i = p * \delta_i$$

$\Rightarrow$  Jedes  $y_i$  mit  $i = 0, \dots, d-1$  ist  $\tilde{\gamma}(1)$  für ein  $[\gamma] \in \pi_1(X, x_0)$

### Korollar 3.18

Sei  $p : Y \rightarrow X$  Überlagerung und  $X$  einfach zusammenhängend.

Dann ist  $p$  ein Homöomorphismus.

**Beweis:** Wegen Korollar 48.a ist auch  $Y$  einfach zusammenhängend und wegen Korollar 48.b ist  $\deg(p) = 1$ ,  $p$  ist also bijektiv.

Nach 12.2 ist  $p$  offen  $\Rightarrow p^{-1}$  ist stetig. ■

Was  
ist  
das?

**Definition 49**

Eine Überlagerung  $p : \tilde{X} \rightarrow X$  heißt **universell**, wenn  $\tilde{X}$  einfach zusammenhängend ist.

**Beispiel 33**

$$\mathbb{R} \rightarrow S^1, \quad t \mapsto (\cos 2\pi t, \sin 2\pi t)$$

$$\mathbb{R}^2 \rightarrow T^2 = \mathbb{R}^2 / \mathbb{Z}^2$$

$$S^n \rightarrow \mathcal{P}^n(\mathbb{R}) \text{ für } n \geq 2$$

**Satz 3.19**

Sei  $p : \tilde{X} \rightarrow X$  eine universelle Überlagerung,  $q : Y \rightarrow X$  weitere Überlagerung.

Sei  $x_0 \in X, \tilde{x}_0 \in \tilde{X}, y_0 \in Y$  mit  $q(y_0) = x_0, p(\tilde{x}_0) = x_0$ .

Dann gibt es genau eine Überlagerung  $\tilde{p} : \tilde{X} \rightarrow Y$  mit  $\tilde{p}(\tilde{x}_0) = y_0$ .

**Beweis:** Sei  $z \in \tilde{X}, y_z : I \rightarrow \tilde{X}$  ein Weg von  $\tilde{x}_0$  nach  $z$ .

Sei  $\delta_Z$  die Liftung von  $p \circ \gamma_z$  nach  $y$  mit  $\delta_Z(0) = y_0$ .

Setze  $\tilde{p}(z) = \delta_Z(1)$ .

Da  $\tilde{X}$  einfach zusammenhängend ist, hängt  $\tilde{p}(z)$  nicht vom gewählten  $y_z$  ab.

Offensichtlich ist  $q(\tilde{p}(z)) = p(z)$ .

$\tilde{p}$  ist stetig (in  $z \in \tilde{X}$ ). Sei  $W \subseteq Y$  offene Umgebung von  $\tilde{p}(z)$ .

$\xrightarrow{q \text{ offen}} q(W)$  ist offene Umgebung von  $p(z) \cdot d(\tilde{p}(z))$ .

Sei  $U \subseteq q(W)$  offen wie in Definition 45 und  $V \subseteq q^{-1}(U)$  die Komp. die  $\tilde{p}(z)$  enthält. Was?

O. B. d. A. sei  $V \subseteq W$ .

Sei  $Z := p^{-1}(U)$ . Für  $u \in Z$  sei  $\delta$  ein Weg in  $Z$  von  $z$  nach  $u$ .

$\Rightarrow \gamma_Z * \delta$  ist Weg von  $x_0$  nach  $u$

$\Rightarrow \tilde{p}(u) \in V$

$\Rightarrow Z \subseteq \tilde{p}^{-1}(W)$

$\Rightarrow \tilde{p}$  ist stetig

**Korollar 3.20**

Sind  $p : X \rightarrow X$  und  $q : \tilde{Y} \rightarrow X$  universelle Überlagerungen, so sind  $\tilde{X}$  und  $\tilde{Y}$  homöomorph.

**Beweis:** Seien  $x_0 \in X, \tilde{x}_0 \in \tilde{X}$  mit  $p(\tilde{x}_0) = x_0$  und  $\tilde{y}_0 \in q^{-1}(x_0) \subseteq \tilde{Y}$ .

Nach Satz 3.19 gibt es genau eine Überlagerung

$$f : \tilde{X} \rightarrow \tilde{Y} \text{ mit } f(\tilde{x}_0) = \tilde{y}_0 \text{ und } q \circ f = p$$

und genau eine Überlagerung

$$g : \tilde{Y} \rightarrow \tilde{X} \text{ mit } g(\tilde{y}_0) = \tilde{x}_0 \text{ und } p \circ g = q$$

Damit gilt:  $p \circ q \circ f = q \circ f = p, q \circ f \circ g = p \circ g = q$ . Also ist  $g \circ f : \tilde{X} \rightarrow \tilde{X}$  Lift von  $p : \tilde{X} \rightarrow X$  mit  $(g \circ f)(\tilde{x}_0) = \tilde{x}_0$ .

Hier stimmt was mit den Tildden nicht

Da auch  $\text{id}_{\tilde{x}}$  diese Eigenschaft hat, folgt mit [Korollar 3.13](#):  $g \circ f = \text{id}_{\tilde{X}}$ . Analog  $f \circ g = \text{id}_{\tilde{Y}}$ .

■

Die Frage, wann es eine universelle Überlagerung gibt, beantwortet der folgende Satz:

**Satz 3.21**

Es sei  $X$  ein wegzusammenhängender topologischer Raum in dem jeder Punkt eine Umgebungsbasis aus einfach zusammenhängenden Mengen hat.

Dann gibt es eine universelle Überlagerung.

**Beweis:** Sei  $x_0 \in X$  und  $\tilde{X} := \{ (x, [\gamma]) \mid x \in X, \gamma \text{ Weg von } x_0 \text{ nach } x \}$  und  $p : \tilde{X} \rightarrow X, (x, [\gamma]) \mapsto x$ .

Die Topologie auf  $\tilde{X}$  ist folgende: Definiere eine Umgebungsbasis von  $(x, [\gamma])$  wie folgt: Es sei  $U$  eine einfach zusammenhängende Umgebung von  $x$  und

$$\tilde{U} = \tilde{U}(x, [\gamma]) := \{ (y, [\gamma * \alpha]) \mid y \in U, \alpha \text{ Weg in } U \text{ von } x \text{ nach } y \}$$

$p$  ist Überlagerung:  $p|_{\tilde{U}} : \tilde{U} \rightarrow U$  bijektiv.  $p$  ist stetig und damit  $p|_{\tilde{U}}$  ein Homöomorphismus.

Sind  $\gamma_1, \gamma_2$  Wege von  $x_0$  nach  $x$  und  $\gamma_1 \sim \gamma_2$ , so ist  $\tilde{U}(x, [\gamma_1]) \cap \tilde{U}(x, [\gamma_2]) = \emptyset$ , denn: Ist  $\gamma_1 * \alpha \sim \gamma_2 * \alpha$ , so ist auch  $\gamma_1 \sim \gamma_2$ . Also ist  $p$  eine Überlagerung.

$\tilde{X}$  ist einfach zusammenhängend: Es sei  $\tilde{x}_0 := (x_0, e)$  und  $\tilde{\gamma} : I \rightarrow \tilde{X}$  ein geschlossener Weg um  $\tilde{x}_0$ .

Sei  $\gamma := p(\tilde{\gamma})$ .

Annahme:  $[\tilde{\gamma}] \neq e$

Mit [Korollar 48.a](#) folgt dann:  $[\gamma] \neq e$ .

Dann ist der Lift von  $\gamma$  nach  $\tilde{x}$  mit Anfangspunkt  $\tilde{x}_0$  ein Weg von  $\tilde{x}_0$  nach  $(x_0, [\gamma])$ . Widerspruch.

**Definition 50**

Es sei  $p : Y \rightarrow X$  eine Überlagerung und  $f : Y \rightarrow Y$  ein Homöomorphismus.

$f$  heißt **Decktransformation** von  $p$  : $\Leftrightarrow p \circ f = p$ .

Ist  $p$  eine Decktransformation und  $|\text{Deck}(Y/X)| = \deg p$ , so heißt  $p$  **regulär**.

**Korollar 3.22**

- a) Die Decktransformationen von  $p$  bilden eine Gruppe, die sog. **Decktransformationengruppe**  $\text{Deck}(p) = \text{Deck}(Y/X) = \text{Deck}(Y \rightarrow X)$
- b) Ist  $f \in \text{Deck}(Y/X)$  und  $f \neq \text{id}$ , dann hat  $f$  keinen Fixpunkt.
- c)  $|\text{Deck}(Y/X)| \leq \deg p$
- d) Ist  $p$  eine reguläre Decktransformation, dann gilt:  $\forall x \in X : \text{Deck}(Y/X)$  operiert transitiv auf der Menge der Urbilder  $p^{-1}(x)$ .

**Beweis:**

a) Es gilt:

- $\text{id}_Y \in \text{Deck } Y/X$ ,
- $f, g \in \text{Deck } Y/X \Rightarrow p \circ (f \circ g) = (p \circ f) \circ g = p \circ g \Rightarrow f \circ g \in \text{Deck } Y/X$
- $f \in \text{Deck } Y/X \Rightarrow p \circ f = p \Rightarrow p \circ f^{-1} = (p \circ f) \circ f^{-1} = p \circ (f \circ f^{-1}) = p \Rightarrow f^{-1} \in \text{Deck } Y/X$

b) Die Menge

$$\text{Fix}(f) = \{ y \in Y \mid f(y) = y \}$$

ist abgeschlossen als Urbild der Diagonale  $\Delta \subseteq Y \times Y$  unter der stetigen Abbildung  $y \mapsto (f(y), y)$ . Außerdem ist  $\text{Fix}(f)$  offen, denn ist  $y \in \text{Fix}(f)$ , so sei  $U$  eine Umgebung von  $p(y) \in X$  wie in Definition 45 und  $U \subseteq p^{-1}(U)$  die Komponente, die  $y$  enthält; also  $p : V \rightarrow U$  ein Homöomorphismus. Dann ist  $W := f^{-1}(V) \cap V$  offene Umgebung von  $y$ .

Für  $z \in W$  ist  $f(z) \in V$  und  $p(f(z)) = p(z)$ . Da  $p$  injektiv auf  $V$  ist, folgt  $f(z) = z$ , d. h.  $\text{Fix}(f) \neq \emptyset$ .

Da  $Y$  zusammenhängend ist, folgt aus  $\text{Fix}(\tilde{f}) \neq \emptyset$  schon  $\text{Fix}(f) = Y$ , also  $f = \text{id}_Y$ .

c) Es sei  $x_0 \in X$ ,  $\deg(p) = d$  und  $p^{-1}(x_0) = \{y_0, \dots, y_{d-1}\}$ . Für  $f \in \text{Deck}(Y/X)$  ist  $f(y_0) = \{y_0, \dots, y_{d-1}\}$ .

Zu  $i \in \{0, \dots, d-1\}$  gibt es höchstens ein  $f \in \text{Deck}(Y/X)$  mit  $f(y_0) = y_i$ , denn ist  $f(y_0) = g(y_0)$ , so ist  $(g^{-1} - f)y_0 = y_0$ , also nach 50.c  $g^{-1} \circ f = \text{id}_Y$ .

Was steht hier?

### Beispiel 34

- 1)  $p : \mathbb{R} \rightarrow S^1 : \text{Deck}(\mathbb{R}/S^1) = \{t \mapsto t + n \mid n \in \mathbb{Z}\} \cong \mathbb{Z}$
- 2)  $p : \mathbb{R}^2 \rightarrow T^2 : \text{Deck}(\mathbb{R}^2/T^2) \cong \mathbb{Z} \times \mathbb{Z} = \mathbb{Z}^2$
- 3)  $p : S^n \rightarrow \mathcal{P}^n(\mathbb{R}) : \text{Deck}(g^n/\mathcal{P}^n(\mathbb{R})) = \{x \mapsto \pm x\} \cong \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$

Nun werden wir eine Verbindung zwischen der Decktransformationsgruppe und der Fundamentalgruppe herstellen:

### Satz 3.23

Ist  $p : \tilde{X} \rightarrow X$  eine universelle Überlagerung, so gilt:

$$\text{Deck}(\tilde{X}/X) \cong \pi_1(X, x_0) \quad \forall x_0 \in X$$

**Beweis:** Wähle  $\tilde{x}_0 \in p^{-1}(x_0)$ . Es sei  $\rho : \text{Deck}(\tilde{x}/x) \rightarrow \pi_1(X, x_0)$  die Abbildung, die  $f$  auf  $[p(\gamma_f)]$  abbildet, wobei  $\gamma_f$  ein Weg von  $\tilde{x}_0$  nach  $f(\tilde{x}_0)$  sei. Da  $\tilde{x}$  einfach zusammenhängend ist, ist  $\gamma_f$  bis auf Homotopie eindeutig bestimmt und damit auch  $\rho$  wohldefiniert.

- $\rho$  ist Gruppenhomomorphismus: Seien  $f, g \in \text{Deck}(\tilde{X}/X) \Rightarrow \gamma_{g \circ f} = \gamma_g * g(\gamma_f) \Rightarrow p(\gamma_{g \circ f}) = p(\gamma_g) * \underbrace{(p \circ g)(\gamma_f)}_{=p} = \rho(g) \neq \rho(f)$
- $\rho$  ist injektiv:  $\rho(f) = e \Rightarrow p(\gamma_f) \sim \gamma_{x_0} \xrightarrow{3.15} \gamma_f \sim \gamma_{\tilde{x}_0} \Rightarrow f(x_0) = \tilde{x}_0 \xrightarrow{50.c} f = \text{id}_{\tilde{x}}$ .

- $\rho$  ist surjektiv: Sei  $[\gamma] \in \pi_1(X, x_0)$ ,  $\tilde{\gamma}$  Lift von  $\gamma$  nach  $\tilde{x}$  mit Anfangspunkt  $\tilde{x}_0$ . Der Endpunkt von  $\tilde{\gamma}$  sei  $\tilde{x}_1$ .

$p$  ist reguläre Überlagerung: Seien  $\tilde{x}_0, \tilde{x}_1 \in \tilde{X}$  mit  $p(\tilde{x}_0) = p(\tilde{x}_1)$ . Nach Satz 3.19 gibt es genau eine Überlagerung  $\tilde{p} : \tilde{X} \rightarrow X$  mit  $p = p \circ \tilde{p}$  und  $\tilde{p}(\tilde{x}_0) = \tilde{x}_1$ . Somit ist  $\tilde{p}$  eine Decktransformation und damit  $p$  eine reguläre Überlagerung.

Da  $p$  reguläre Überlagerung ist, gibt es ein  $f \in \text{Deck}(\tilde{X}/X)$  mit  $f(\tilde{x}_0) = \tilde{x}_1$ .

Aus der Definition von  $\rho$  folgt:  $\rho(f) = p(\gamma_f) = \gamma$

■

### Beispiel 35 (Bestimmung von $\pi_1(S^1)$ )

$p : \mathbb{R} \rightarrow S^1, t \mapsto (\cos 2\pi t, \sin 2\pi t)$  ist universelle Überlagerung, da  $\mathbb{R}$  zusammenhängend ist.

Für  $n \in \mathbb{Z}$  sei  $f_n : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, t \mapsto t + n$  die Translation um  $n$ .

Es gilt:  $(p \circ f_n)(t) = p(f_n(t)) = p(t) \quad \forall t \in \mathbb{R}$ , d. h.  $f_n$  ist Decktransformation.

Ist umgekehrt  $g$  irgendeine Decktransformation, so gilt insbesondere für  $t = 0$ :

$$(\cos(2\pi g(0)), \sin(2\pi g(0))) = (p \circ g)(0) = p(0) = (1, 0)$$

Es existiert  $n \in \mathbb{Z}$  mit  $g(0) = n$ . Da auch  $f_n(0) = 0 + n = n$  gilt, folgt mit Korollar 50.c  $g = f_n$ . Damit folgt:

$$\text{Deck}(\mathbb{R}/S^1) = \{f_n \mid n \in \mathbb{Z}\} \cong \mathbb{Z}$$

Nach Satz 3.23 also  $\pi_1(S^1) \cong \text{Deck}(\mathbb{R}/S^1) \cong \mathbb{Z}$

## 3.4 Gruppenoperationen

### Definition 51

Sei  $(G, \cdot)$  eine Gruppe und  $X$  eine Menge.

Eine **Gruppenoperation** von  $G$  auf  $X$  ist eine Abbildung  $\circ$ :

$$\circ : G \times X \rightarrow X, \quad (g, x) \mapsto g \cdot x,$$

für die gilt:

- (i)  $1_G \circ x = x \quad \forall x \in X$
- (ii)  $(g \cdot h) \circ x = g \circ (h \circ x) \quad \forall g, h \in G \forall x \in X$

### Beispiel 36

- 1)  $G = (\mathbb{Z}, +), X = \mathbb{R}, nx = x + n$
- 2)  $G$  operiert auf  $X = G$  durch  $g \circ h := g \cdot h$
- 3)  $G$  operiert auf  $X = G$  durch  $g \circ h := g \cdot h \cdot g^{-1}$ , denn
  - i)  $1_G \circ h = 1_G \cdot h \cdot 1_G^{-1} = h$

ii)

$$\begin{aligned}(g_1 \cdot g_2) \circ h &= (g_1 \cdot g_2) \cdot h \cdot (g \cdot g_2)^{-1} \\ &= g_1 \cdot (g_2 \cdot h \cdot g_2^{-1}) \cdot g_1^{-1} \\ &= g_1 \circ (g_2 \circ h)\end{aligned}$$

**Definition 52**

Sei  $G$  eine Gruppe,  $X$  ein topologischer Raum und  $\circ : G \times X \rightarrow X$  eine Gruppenoperation.

- a)  $G$  operiert durch Homomorphismen, wenn für jedes  $g \in G$  die Abbildung

$$m_g : X \rightarrow X, x \mapsto g \cdot X$$

ein Homöomorphismus ist.

- b) Ist  $G$  eine topologische Gruppe, so heißt die Gruppenoperation  $\circ$  **stetig**, wenn  $\circ : G \times X \rightarrow X$  stetig ist.

**Korollar 3.24**

Jede stetige Gruppenoperation ist eine Gruppenoperation durch Homöomorphismen.

**Beweis:** Nach Voraussetzung ist  $\circ|_{\{g\} \times X} : X \rightarrow X, x \mapsto g \circ x$  stetig.

Die Umkehrabbildung zu  $m_g$  ist  $m_{g^{-1}}$ :

$$\begin{aligned}(m_{g^{-1}} \circ m_g)(x) &= m_{g^{-1}}(m_g(x)) \\ &= m_{g^{-1}}(g \circ x) \\ &= g^{-1} \circ (g \circ x) \\ &\stackrel{51.ii}{=} (g^{-1} \cdot g) \circ x \\ &= 1_G \circ x \\ &\stackrel{51.i}{=} x\end{aligned}$$

**Beispiel 37**

In Beispiel 36.1 operiert  $\mathbb{Z}$  durch Homöomorphismen.

**Korollar 3.25**

Sei  $G$  eine Gruppe und  $X$  eine Menge.

- a) Die Gruppenoperation von  $G$  auf  $X$  entsprechen bijektiv den Gruppenhomomorphismen  $\varrho : G \rightarrow \text{Perm}(X) = \text{Sym}(X) = \{ f : X \rightarrow X \mid f \text{ ist bijektiv} \}$
- b) Ist  $X$  ein topologischer Raum, so entsprechen dabei die Gruppenoperationen durch Homöomorphismus den Gruppenhomomorphismen  $G \rightarrow \text{Homöo}(X)$

**Beweis:**

Sei  $\circ : G \times X \rightarrow X$  eine Gruppenoperation von  $G$  auf  $X$ . Dann sei  $\varrho : G \rightarrow \text{Perm}(X)$  definiert durch  $\varrho(g)(X) = g \cdot X \quad \forall g \in G, x \in X$ , also  $\varrho(g) = m_g$ .

$\varrho$  ist Homomorphismus:  $\varrho(g_1 \cdot g_2) = m_{g_1 \cdot g_2} = m_{g_1} \circ m_{g_2} = \varrho(g_1) \circ \varrho(g_2)$ , denn für  $x \in X : \varrho(g_1 \cdot g_2)(x) = (g_1 \cdot g_2) \circ x = g_1 \circ (g_2 \circ x) = \varrho(g_1)(\varrho(g_2)(x)) = (\varrho(g_1) \circ \varrho(g_2))(x)$

Umgekehrt: Sei  $\varrho : G \rightarrow \text{Perm}(X)$  Gruppenhomomorphismus. Definiere  $\circ : G \times X \rightarrow X$  durch  $g \circ x = \varrho(g)(x)$ .

z. Z. 51.ii:

$$\begin{aligned}
 g_1 \circ (g_2 \circ x) &= \varrho(g_1)(g_2 \circ x) \\
 &= \varrho(g_1)(\varrho(g_2)(x)) \\
 &= (\varrho(g_1) \circ \varrho(g_2))(x) \\
 &\stackrel{\varrho \text{ ist Hom.}}{=} \varrho(g_1 \cdot g_2)(x) \\
 &= (g_1 \cdot g_2) \circ x
 \end{aligned}$$

z. Z. 51.i:  $1_G \cdot x = \varrho(1_G)(x) = \text{id}_X(x) = x$ , weil  $\varrho$  Homomorphismus ist.

### Beispiel 38

Sei  $X$  ein wegzusammenhängender topologischer Raum,  $p : \tilde{X} \rightarrow X$  eine universelle Überlagerung,  $x_0 \in X$ ,  $\tilde{x}_0 \in \tilde{X}$  mit  $p(\tilde{x}_0) = x_0$ .

Dann operiert  $\pi_1(X, x_0)$  auf  $\tilde{X}$  durch Homöomorphismen wie folgt:

Für  $[\gamma] \in \pi_1(X, x_0)$  und  $\tilde{x} \in \tilde{X}$  sei  $[\gamma] \circ \tilde{x} = \gamma \tilde{*} \varrho(1)$  wobei  $\tilde{\gamma}$  ein Weg von  $\tilde{x}_0$  nach  $\tilde{x}$  in  $\tilde{X}$  sei,  $\varrho := p(\tilde{\delta}) = p \circ \delta$ .

Also:  $\delta$  ist ein Weg in  $X$  von  $x_0$  nach  $x = p(\tilde{x})$  und  $\widetilde{\gamma * \delta}$  die Liftung von  $\gamma * \delta$  mit Anfangspunkt  $\tilde{x}_0$ .

$[\gamma] \cdot \tilde{x}$  hängt nicht von der Wahl von  $\tilde{\gamma}$  ab; ist  $\tilde{\gamma}'$  ein anderer Weg von  $\tilde{x}_0$  nach  $\tilde{x}$ , so sind  $\tilde{\delta}$  und  $\tilde{\delta}'$  homotop, also auch  $\widetilde{\gamma * \delta}$  und  $\widetilde{\gamma' * \delta'}$  homotop.

Gruppenoperation, denn:

- i)  $[e] \circ \tilde{x} = \widetilde{e * \delta} = \tilde{x}$
- ii)  $\gamma_1 \widetilde{* \gamma_2 * \delta}(1) = [\gamma_1 * \gamma_2] \circ \tilde{x} = ([\gamma_1] * [\gamma_2]) \circ \tilde{x}$   
 $\gamma_1 * \gamma_2 * \delta(1) = [\gamma_1] \circ (\gamma_2 * \delta)(1) = [\gamma_1] \circ ([\gamma_2] \circ \tilde{x})$

**Erinnerung:** Die Konstruktion aus [Korollar 3.25](#) induziert zu der Gruppenoperation  $\pi_1(X, x_0)$  aus [Beispiel 38](#) einen Gruppenhomomorphismus  $\varrho : \pi_1(X, x_0) \rightarrow \text{Hom}\ddot{o}(X)$ . Nach [Satz 3.23](#) ist  $\varrho(\pi_1(X, x_0)) = \text{Deck}(\tilde{X}/X) = \left\{ f : \tilde{X} \rightarrow \tilde{X} \text{ Homöomorphismus} \mid p \circ f = p \right\}$

### Beispiel 39

Sei  $X := S^2 \subseteq \mathbb{R}^3$  und  $\tau$  die Drehung um die  $z$ -Achse um  $180^\circ$ .

$g = \langle \tau \rangle = \{ \text{id}, \tau \}$  operiert auf  $S^2$  durch Homöomorphismen.

Frage: Was ist  $S^2/G$ ? Ist  $S^2/G$  eine Mannigfaltigkeit?

# 4 Euklidische und nichteuklidische Geometrie

## 4.1 Axiome für die euklidische Ebene

Axiome bilden die Grundbausteine jeder mathematischen Theorie. Eine Sammlung aus Axiomen nennt man Axiomensystem. Da der Begriff des Axiomensystems so grundlegend ist, hat man auch ein paar sehr grundlegende Forderungen an ihn: Axiomensysteme sollen **widerspruchsfrei** sein, die Axiome sollen möglichst **unabhängig** sein und **Vollständigkeit** wäre auch toll. Mit Unabhängigkeit ist gemeint, dass kein Axiom sich aus einem anderem herleiten lässt. Dies scheint auf den ersten Blick eine einfache Eigenschaft zu sein. Auf den zweiten Blick muss man jedoch einsehen, dass das Parallelenproblem, also die Frage ob das Parallelenaxiom unabhängig von den restlichen Axiomen ist, über 2000 Jahre nicht gelöst wurde. Ein ganz anderes Kaliber ist die Frage nach der Vollständigkeit. Ein Axiomensystem gilt als Vollständig, wenn jede Aussage innerhalb des Systems verifizierbar oder falsifizierbar ist. Interessant ist hierbei der Gödelsche Unvollständigkeitssatz, der z. B. für die Arithmetik beweist, dass nicht alle Aussagen formal bewiesen oder widerlegt werden können.

Kehren wir nun jedoch zurück zur Geometrie. Euklid hat in seiner Abhandlung „Die Elemente“ ein Axiomensystem für die Geometrie aufgestellt.

### Euklids Axiome

- **Strecke** zwischen je zwei Punkten
- Jede Strecke bestimmt genau eine **Gerade**
- **Kreis** (um jeden Punkt mit jedem Radius)
- Je zwei rechte Winkel sind gleich (Isometrie, Bewegung)
- Parallelenaxiom von Euklid:  
Wird eine Gerade so von zwei Geraden geschnitten, dass die Summe der Innenwinkel zwei Rechte ist, dann schneiden sich diese Geraden auf der Seite dieser Winkel.

Man mache sich klar, dass das nur dann nicht der Fall ist, wenn beide Geraden parallel sind und senkrecht auf die erste stehen.

### Definition 53

Eine **euklidische Ebene** ist ein metrischer Raum  $(X, d)$  zusammen mit einer Teilmenge  $\emptyset \neq G \subseteq \mathcal{P}(X)$ , sodass die Axiome §1 - §4 erfüllt sind:

#### §1) Inzidenzaxiome:

- (i) Zu  $P \neq Q \in X$  gibt es genau ein  $g \in G$  mit  $\{P, Q\} \subseteq g$ .
- (ii)  $|g| \geq 2 \quad \forall g \in G$

(iii)  $X \notin G$

§2) **Abstandsaxiom:** Zu  $P, Q, R \in X$  gibt es genau dann ein  $g \in G$  mit  $\{P, Q, R\} \subseteq g$ , wenn gilt:

- $d(P, R) = d(P, Q) + d(Q, R)$  oder
- $d(P, Q) = d(P, R) + d(R, Q)$  oder
- $d(Q, R) = d(Q, P) + d(P, R)$

#### Definition 54

- a)  $P, Q, R$  liegen **kollinear**, wenn es  $g \in G$  gibt mit  $\{P, Q, R\} \subseteq g$ .
- b)  $Q$  liegt **zwischen**  $P$  und  $R$ , wenn  $d(P, R) = d(P, Q) + d(Q, R)$
- c) **Strecke**  $\overline{PR} := \{Q \in X \mid Q \text{ liegt zwischen } P \text{ und } R\}$
- d) **Halbgeraden:**  
 $PR^+ := \{Q \in X \mid Q \text{ liegt zwischen } P \text{ und } R \text{ oder } R \text{ liegt zwischen } P \text{ und } Q\}$   
 $PR^- := \{Q \in X \mid P \text{ liegt zwischen } Q \text{ und } R\}$

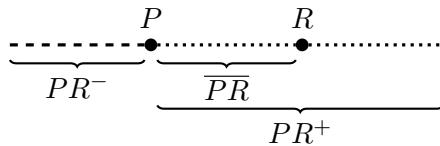


Abbildung 4.1: Halbgeraden

#### Korollar 4.1

- (i)  $PR^+ \cup PR^- = PR$
- (ii)  $PR^+ \cap PR^- = \{P\}$

#### Beweis:

- (i) „ $\subseteq$ “ folgt direkt aus der Definition von  $PR^+$  und  $PR^-$   
„ $\supseteq$ “: Sei  $Q \in PR \Rightarrow P, Q, R$  sind kollinear.  
 $\stackrel{2}{\Rightarrow} \begin{cases} Q \text{ liegt zwischen } P \text{ und } R \Rightarrow Q \in PR \\ R \text{ liegt zwischen } P \text{ und } Q \Rightarrow Q \in PR \\ P \text{ liegt zwischen } Q \text{ und } R \Rightarrow Q \in PR \end{cases}$
- (ii) „ $\supseteq$ “ ist offensichtlich  
„ $\subseteq$ “: Sei  $PR^+ \cap PR^-$ . Dann ist  $d(Q, R) = d(P, Q) + d(P, R)$  weil  $Q \in PR^-$  und
$$\begin{aligned} & \left\{ \begin{array}{l} d(P, R) = d(P, Q) + d(Q, R) \text{ oder} \\ d(P, Q) = d(P, R) + d(R, Q) \end{array} \right\} \\ & \Rightarrow d(Q, R) = 2d(P, Q) + d(Q, R) \\ & \Rightarrow d(P, Q) = 0 \\ & \Rightarrow P = Q \\ & d(P, Q) = 2d(P, R) + d(P, Q) \\ & \Rightarrow P = R \\ & \Rightarrow \text{Widerspruch} \end{aligned}$$

**Definition 55****§3) Anordnungsaxiome**

- (i) Zu jedem  $P \in X$  jeder Halbgerade  $H$  mit Anfangspunkt  $P$  und jedem  $r \in \mathbb{R}_{\geq 0}$  gibt es genau ein  $Q \in H$  mit  $d(P, Q) = r$ .
- (ii) Jede Gerade zerlegt  $X \setminus g = H_1 \dot{\cup} H_2$  in zwei nichtleere Teilmengen  $H_1, H_2$ , sodass für alle  $A \in H_i, B \in H_j$  mit  $i, j \in \{1, 2\}$  gilt:  $\overline{AB} \cap g \neq \emptyset \Leftrightarrow i \neq j$ .  
Diese Teilmengen  $H_i$  heißen **Halbebenen** bzgl.  $g$ .
- §4) **Bewegungsaxiom:** Zu  $P, Q, P', Q' \in X$  mit  $d(P, Q) = d(P', Q')$ . Isometrien  $\varphi_1, \varphi_2$  mit  $\varphi_i(P) = P'$  und  $\varphi_i(Q) = Q'$ ,  $i = 1, 2$  (Spiegelung an der Geraden durch  $P$  und  $Q$  ist nach Identifizierung von  $P \cong P'$  und  $Q \cong Q'$  eine weitere Isometrie.)
- §5) **Parallelenaxiom:** Für jedes  $g \in G$  und jedes  $P \in X \setminus g$  gibt es höchstens ein  $h \in G$  mit  $h \cap g = \emptyset$ .<sup>1</sup>

**Satz 4.2 (Satz von Pasch)**

Seien  $P, Q, R$  nicht kollinear,  $g \in G$  mit  $g \cap \{P, Q, R\} = \emptyset$  und  $g \cap \overline{PQ} \neq \emptyset$ .

Dann ist entweder  $g \cap \overline{PR} \neq \emptyset$  oder  $g \cap \overline{QR} \neq \emptyset$ .

Dieser Satz besagt, dass Geraden, die eine Seite eines Dreiecks (also nicht nur eine Ecke) schneiden, auch eine weitere Seite scheiden.

**Beweis:**  $g \cap \overline{PQ} \neq \emptyset$

- <sup>3(ii)</sup>  $\Rightarrow P$  und  $Q$  liegen in verschiedenen Halbebenen bzgl.  $g$
- $\Rightarrow$  o. B. d. A.  $R$  und  $P$  liegen in verschiedenen Halbebenen bzgl.  $g$
- $\Rightarrow g \cap \overline{RP} \neq \emptyset$

**Korollar 4.3**

Sei  $P, Q \in X$  mit  $P \neq Q$  sowie  $A, B \in X \setminus PQ$  mit  $A \neq B$ . Außerdem seien  $A$  und  $B$  in der selben Halbebene bzgl.  $PQ$  sowie  $Q$  und  $B$  in der selben Halbebene bzgl.  $PA$ .

Dann gilt:  $PB^+ \cap \overline{AQ} \neq \emptyset$

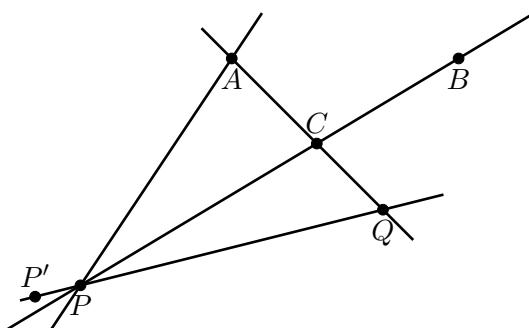


Abbildung 4.2: Situation aus **Korollar 4.3**

Auch **Korollar 4.3** lässt sich Umgangssprachlich sehr viel einfacher ausdrücken: Die Diagonalen eines konvexen Vierecks schneiden sich.

<sup>1</sup>  $h$  heißt „Parallele zu  $g$  durch  $P$ “.

**Beweis:** Sei  $P' \in PQ^-$ ,  $P' \neq P$   $\xrightarrow{\text{Satz 4.2}}$   $PB$  schneidet  $\overline{AP'} \cup \overline{AQ}$

Sei  $C$  der Schnittpunkt. Dann gilt:

(i)  $C \in PB^+$ , denn  $A$  und  $B$  liegen in derselben Halbebene bzgl.  $PQ = P'Q$ , also auch  $\overline{AP'}$  und  $\overline{AQ}$ .

(ii)  $C$  liegt in derselben Halbebene bzgl.  $PA$  wie  $B$ , weil das für  $Q$  gilt.

$\overline{AP'}$  liegt in der anderen Halbebene bzgl.  $PA \Rightarrow C \notin \overline{P'A} \Rightarrow C \in \overline{AQ}$

Da  $C \in PB^+$  und  $C \in \overline{AQ}$  folgt nun direkt:  $\emptyset \neq \{C\} \subseteq PB^+ \cap \overline{AQ}$  ■

#### Korollar 4.4

Seien  $P, Q \in X$  mit  $P \neq Q$  und  $A, B \in X \setminus PQ$  in der selben Halbebene bzgl.  $PQ$ . Außerdem sei  $d(A, P) = d(B, P)$  und  $d(A, Q) = d(B, Q)$ .

Dann ist  $A = B$ .

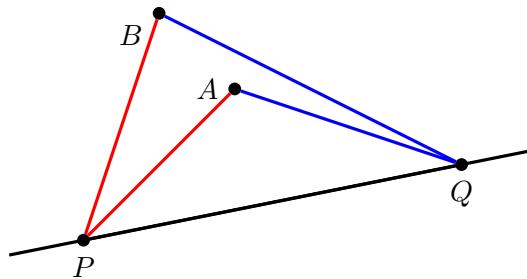


Abbildung 4.3: **Korollar 4.4:** Die beiden roten und die beiden blauen Linien sind gleich lang.  
Intuitiv weiß man, dass daraus folgt, dass  $A = B$  gilt.

**Beweis:** durch Widerspruch

Annahme:  $A \neq B$

Dann ist  $B \notin (PA \cup QA)$  wegen §2.

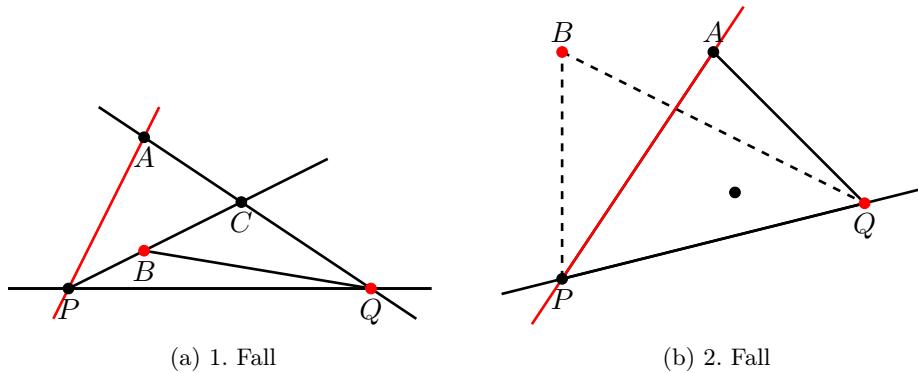


Abbildung 4.4: Fallunterscheidung aus **Korollar 4.4**

1. Fall:  $Q$  und  $B$  liegen in derselben Halbebene bzgl.  $PA$

**Korollar 4.3**  $\Rightarrow PB^+ \cap \overline{AQ} \neq \emptyset$ .

Sei  $C$  der Schnittpunkt vom  $PB$  und  $AQ$ .

Dann gilt:

$$(i) \quad d(A, C) + d(A, Q) = d(B, Q) < d(B, C) + d(C, Q) \Rightarrow d(A, C) < d(B, C)$$

(ii) a)  $B$  liegt zwischen  $P$  und  $C$ .

$$\begin{aligned} d(P, A) + d(A, C) &> d(P, C) = d(P, B) + d(B, C) = d(P, A) + d(B, C) \Rightarrow d(A, C) > \\ d(B, C) &\Rightarrow \text{Widerspruch zu (i)} \end{aligned}$$

b)  $C$  liegt zwischen  $P$  und  $B$

$$\begin{aligned} d(P, C) + d(C, A) &> d(P, A) = d(P, B) = d(P, C) + d(C, B) \\ \Rightarrow d(C, A) &> d(C, B) \\ \Rightarrow \text{Widerspruch zu (i)} \end{aligned}$$

2. Fall:  $Q$  und  $B$  liegen auf verschiedenen Halbebenen bzgl.  $PA$ .

Dann liegen  $A$  und  $Q$  in derselben Halbebene bzgl.  $PB$ .

Tausche  $A$  und  $B$   $\Rightarrow$  Fall 1 ■

#### Korollar 4.5

Sei  $(X, d, G)$  eine Geometrie, die §1 - §3 erfüllt und  $\varphi$  eine Isometrie mit  $\varphi(P) = P$  und  $\varphi(Q) = Q$ .

Dann gilt  $\varphi(S) = S \quad \forall S \in PQ$ .

**Beweis:**

$$\text{O. B. d. A. sei } S \in \overline{PQ} \Leftrightarrow d(P, Q) = d(P, S) + d(S, Q) \quad (4.1)$$

$$\stackrel{\varphi \in \text{Iso}(X)}{\Rightarrow} d(\varphi(P), \varphi(Q)) = d(\varphi(P), \varphi(S)) + d(\varphi(S), \varphi(Q)) \quad (4.2)$$

$$\stackrel{P, Q \in \text{Fix}(\varphi)}{\Rightarrow} d(P, Q) = d(P, \varphi(S)) + d(\varphi(S), Q) \quad (4.3)$$

$$\Rightarrow \varphi(S) \text{ liegt zwischen } P \text{ und } Q. \text{ Es gilt } d(P, \varphi(S)) = d(P, S) \quad (4.4)$$

$$\stackrel{3(i)}{\Rightarrow} \varphi(S) = S \quad (4.5) \quad \blacksquare$$

#### Proposition 4.6

In einer Geometrie, die §1 - §3 erfüllt, gibt es zu  $P, P', Q, Q'$  mit  $d(P, Q) = d(P', Q')$  höchstens zwei Isometrien mit  $\varphi(P) = P'$  und  $\varphi(Q) = Q'$

Aus den Axiomen folgt, dass es in den Situation §4 höchstens zwei Isometrien mit  $\varphi_i(P) = P'$  und  $\varphi_i(Q) = Q'$  gibt.

**Beweis:** Seien  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  Isometrien mit  $\varphi_i(P) = P', \varphi_i(Q) = Q', i = 1, 2, 3$

**Beh.: (1)**  $\exists R \in X \setminus PQ$  mit  $\varphi_1(R) = \varphi_2(R)$ .

**Beh.: (2)** Hat  $\varphi$  3 Fixpunkte, die nicht kollinear sind, so ist  $\varphi = \text{id}_X$ .

Aus Beh. 1 und Beh. 2 folgt, dass  $\varphi_2^{-1} \circ \varphi_1 = \text{id}_X$ , also  $\varphi_2 = \varphi_1$ , da  $P, Q$  und  $R$  in diesem Fall Fixpunkte sind.

**Beweis:**

**Beh.:** Sind  $P \neq Q$  Fixpunkte einer Isometrie, so ist  $\varphi(R) = R$  für jedes  $R \in PQ$ .

**Beweis: (von Beh. 2 mit Korollar 4.5)** Seien  $P, Q$  und  $R$  Fixpunkte von  $\varphi$ ,  $R \in PG$  und  $A \notin \overline{PQ} \cup \overline{PR} \cup \overline{QR}$ . Sei  $B \in \overline{PQ} \setminus \{P, Q\}$ . Dann ist  $\varphi(B) = B$  wegen Korollar 4.5.

Ist  $R \in AB$ , so enthält  $AB$  2 Fixpunkte von  $\varphi$   $\xrightarrow{\text{Korollar 4.5}} \varphi(A) = A$ .

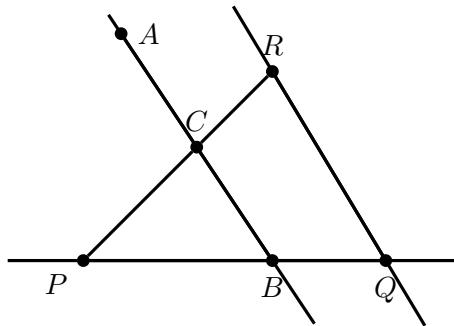


Abbildung 4.5:  $P, Q, R$  sind Fixpunkte,  $B \in \overline{PQ} \setminus \{P, Q\}$ ,  $A \notin PQ \cup PR \cup QR$

Ist  $R \notin AB$ , so ist  $AB \cap \overline{PR} \neq \emptyset$  oder  $AB \subset \overline{RQ} \neq \emptyset$  nach Satz 4.2. Der Schnittpunkt  $C$  ist dann Fixpunkt von  $\varphi'$  nach Korollar 4.5  $\Rightarrow \varphi(A) = A$ .

**Beweis: (von Beh. 1)** Sei  $R \in X \setminus PQ$ . Von den drei Punkten  $\varphi_1(R), \varphi_2(R), \varphi_3(R)$  liegen zwei in der selben Halbebene bzgl.  $P'Q' = \varphi_i(PQ)$ .

O. B. d. A. seien  $\varphi_1(R)$  und  $\varphi_2(R)$  in der selben Halbebene.

Es gilt:

$$d(P', \varphi_1(R)) = d(\varphi_1(P), \varphi_1(R)) \quad (4.6)$$

$$= d(P, R) \quad (4.7)$$

$$= d(\varphi_2(P), \varphi_2(R)) \quad (4.8)$$

$$= d(P', \varphi_2(R)) \quad (4.9)$$

$$= d(Q', \varphi_2(R)) \quad (4.10)$$

und analog  $d(Q', \varphi_1(R)) = d(Q', \varphi_2(R))$

### Bemerkung 17

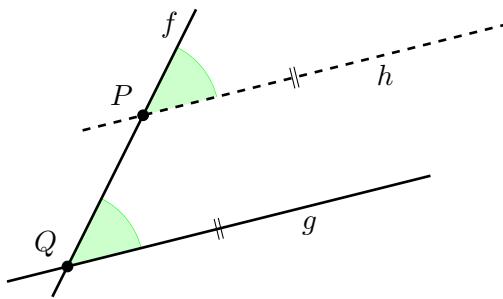
Mit 4.4 lassen sich die Kongruenzsätze für Dreiecke, wie man sie aus der Schule kennt, beweisen.

### Proposition 4.7

Sei  $(X, d, G)$  eine Geometrie mit den Axiomen §1 - §4.

Dann gibt es zu jedem  $g \in G$  und jedem  $P \in X \setminus g$  ein  $h \in G$  mit  $P \in h$  und  $g \cap h \neq \emptyset$ .

**Beweis:** Sei  $f \in G$  mit  $P \in f$ . Ist  $f \cap g = \emptyset$ , so setze  $h := f$ . Andernfalls sei  $\{Q\} := f \cap g$ .

Abbildung 4.6: Situation aus [Proposition 4.7](#)

Sei  $\varphi$  die eindeutige Isometrie mit  $\varphi(Q) = P$ ,  $\varphi(P) = P'$ , die die Halbebenen bzgl.  $f$  nicht vertauscht.

Setze  $h := \varphi(g)$ .

Z. Z.:  $h \cap g = \emptyset$ .

Andernfalls sei  $\{R\} = h \cap g$ .

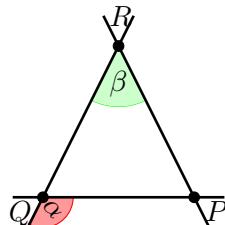
### Bemerkung 18

Jeder Innenwinkel eines Dreiecks ist kleiner als alle nicht-anliegenden Außenwinkel.

**Beweis:** Sei  $\varphi$  die Isometrie, die  $Q$  auf  $P$  und  $P$  auf  $P'$  mit  $P' \in f$ ,  $d(P, P') = d(P, Q)$  abbildet und die Halbebenen bzgl.  $f$  erhält.

**Beh.: (Herz)**  $\varphi(g) \cap g = \emptyset$

**Beweis:** Ist  $\varphi(g) \cap g \neq \emptyset$ , so ist  $R$  der Schnittpunkt.

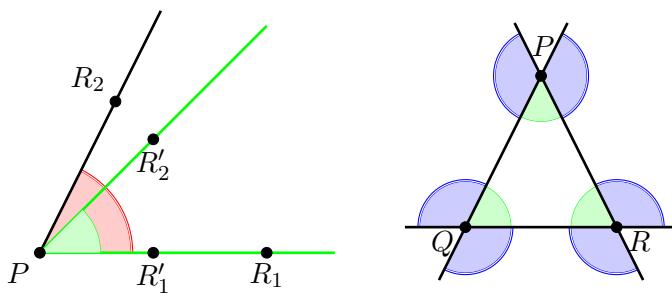
Abbildung 4.7: Skizze zu [Behauptung 4](#)

### Definition 56

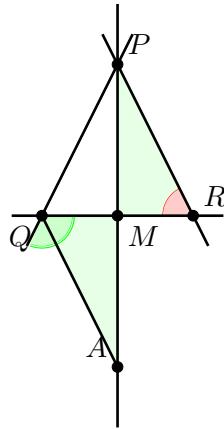
- Ein **Winkel** ist ein Punkt  $P \in X$  zusammen mit 2 Halbgeraden mit Anfangspunkt  $P$ . Man schreibt:  $\angle R_1 P R_2$  bzw.  $\angle R_2 P R_1^2$
- Zwei Winkel sind **gleich**, wenn es eine Isometrie gibt, die den einen Winkel auf den anderen abbildet.
- $\angle R'_1 P' R'_2$  heißt **kleiner** als  $\angle R_1 P R_2$ , wenn es eine Isometrie  $\varphi$  gibt, mit  $\varphi(P) = P'$ ,  $\varphi(P R'_1 +) = P' R_1 +$  und  $\varphi(R'_2)$  liegt in der gleichen Halbebene bzgl.  $P R_1$  wie  $R_2$  und in der gleichen Halbebene bzgl.  $P R_2$  wie  $R_1$
- Im Dreieck  $\triangle PQR$  gibt es Innenwinkel und Außenwinkel.

### Korollar 4.8

In einem Dreieck ist jeder Innenwinkel kleiner als jeder nicht anliegende Außenwinkel.



- (a)  $\angle R'_1 P' R'_2$  ist kleiner als  $\angle R_1 P R_2$  (b) Innenwinkel und Außenwinkel in  $\triangle PQR$ , vgl. Punkt c  
vgl. Punkt c (Bild 5)

Abbildung 4.8: Situation aus [Definition 56](#)Abbildung 4.9: Situation aus [Korollar 4.8](#)

**Beweis:** Zeige  $\angle PRQ < \angle RQP'$ .

Sei  $M$  der Mittelpunkt der Strecke  $\overline{QR}$ . Sei  $A \in MP^-$  mit  $d(P, M) = d(M, A)$ .

Es gilt:  $d(Q, M) = d(M, R)$  und  $d(P, M) = d(M, A)$  sowie  $\angle PMR = \angle AMQ \Rightarrow \triangle MRQ$  ist kongruent zu  $\triangle AMQ$ , denn eine der beiden Isometrien, die  $\angle PMR$  auf  $\angle AMQ$  abbildet, bildet  $R$  auf  $P$  und  $Q$  auf  $A$  ab.

$\Rightarrow \angle MQA = \angle MRP = \angle QRP = \angle PRQ$ .

Noch zu zeigen:  $\angle MQA < \angle RQP'$ , denn  $A$  liegt in der selben Halbebene bzgl.  $PQ$  wie  $M$ .

**Beweis:** (von [Proposition 4.7](#)) Wäre  $\varphi(g)$  nicht parallel zu  $g$ , so gäbe es einen Schnittpunkt  $R$ . Dann ist  $\angle QPR < \angle RQP^+$  nach [Korollar 4.8](#) und  $\angle QPR = \angle RQP^+$ , weil  $\varphi(\angle RQP') = \angle RPQ$ .

**Folgerung 4.9**

Die Summe zweier Innenwinkel in einem Dreieck ist kleiner als  $\pi$ , d. h. es gibt eine Isometrie  $\varphi$  mit  $\varphi(Q) = P$  und  $\varphi(QP^+) = PR^+$ , sodass  $\varphi(R)$  in der gleichen Halbebene bzgl.  $PQ$  liegt wie  $R$ .

**Beweis:** Die Summe eines Innenwinkels mit den anliegenden Außenwinkeln ist  $\pi$ , d. h. die beiden Halbgeraden bilden eine Gerade.

<sup>2</sup>Für dieses Skript gilt:  $\angle R_1 P R_2 = \angle R_2 P R_1$ . Also sind insbesondere alle Winkel  $\leq 180^\circ$ .

TODO  
/

Abbildung 4.10: In der sphärischen Geometrie gibt es, im Gegensatz zur euklidischen Geometrie, Dreiecke mit drei  $90^\circ$ -Winkeln.

**Proposition 4.10**

In einer Geometrie mit den Axiomen §1 - §4 ist in jedem Dreieck die Summe der Innenwinkel  $\leq \pi$ .

Sei im Folgenden „IWS“ die „Innenwinkelsumme“.

**Beweis:** Sei  $\triangle$  ein Dreieck mit  $IWS(\triangle) = \pi + \varepsilon$

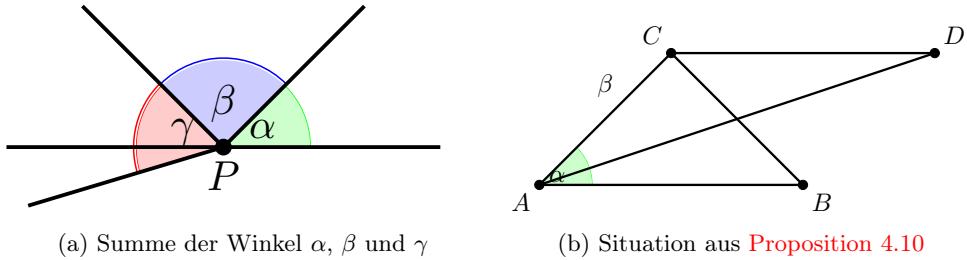


Abbildung 4.11: Situation aus Proposition 4.10

Sei  $\alpha$  ein Innenwinkel von  $\triangle$ .

**Beh.:** Es gibt ein Dreieck  $\triangle'$  mit  $IWS(\triangle') = IWS(\triangle)$  und einem Innenwinkel  $\alpha' \leq \frac{\alpha}{2}$ .

Dann gibt es für jedes  $n$  ein  $\triangle_n$  mit  $IWS(\triangle_n) = IWS(\triangle)$  und Innenwinkel  $\alpha' \leq \frac{\alpha}{2^n}$ . Für  $\frac{\alpha}{2^n} < \varepsilon$  ist dann die Summe der beiden Innenwinkel um  $\triangle_n$  größer als  $\pi \Rightarrow$  Widerspruch zu Folgerung 4.9.

**Beweis: (der Behauptung)** Sei  $M$  der Mittelpunkt  $\overline{RC}$  und  $A' \in MA^-$  mit  $d(A', M) = d(A, M) \Rightarrow \triangle(MA'C)$  und  $\triangle(MAB)$  sind kongruent.  $\Rightarrow \angle ABM = \angle A'CM$  und  $\angle MA'C = \angle MAB$ .  $\Rightarrow \alpha + \beta + \gamma = IWS(\triangle ABC) = IWS(\triangle AA'C)$  und  $\alpha_1 + \alpha_2 = \alpha$ , also o. B. d. A.  $\alpha_1 \leq \frac{\alpha}{2}$

# Lösungen der Übungsaufgaben

## Lösung zu Aufgabe 1

**Teilaufgabe a)** Es gilt:

- (i)  $\emptyset, X \in \mathfrak{T}_X$ .
- (ii)  $\mathfrak{T}_X$  ist offensichtlich unter Durchschnitten abgeschlossen, d. h. es gilt für alle  $U_1, U_2 \in \mathfrak{T}_X : U_1 \cap U_2 \in \mathfrak{T}_X$ .
- (iii) Auch unter beliebigen Vereinigungen ist  $\mathfrak{T}_X$  abgeschlossen, d. h. es gilt für eine beliebige Indexmenge  $I$  und alle  $U_i \in \mathfrak{T}_X$  für alle  $i \in I : \bigcup_{i \in I} U_i \in \mathfrak{T}_X$

Also ist  $(X, \mathfrak{T}_X)$  ein topologischer Raum.

**Teilaufgabe b)** Wähle  $x = 1, y = 0$ . Dann gilt  $x \neq y$  und die einzige Umgebung von  $x$  ist  $X$ . Da  $y = 0 \in X$  können also  $x$  und  $y$  nicht durch offene Mengen getrennt werden.  $(X, \mathfrak{T}_X)$  ist also nicht hausdorffsch.

**Teilaufgabe c)** Nach Bemerkung 3 sind metrische Räume hausdorffsch. Da  $(X, \mathfrak{T}_X)$  nach (b) nicht hausdorffsch ist, liefert die Kontraposition der Trennungseigenschaft, dass  $(X, \mathfrak{T}_X)$  kein metrischer Raum sein kann.

## Lösung zu Aufgabe 2

**Teilaufgabe a)**

**Beh.:**  $\forall a \in \mathbb{Z} : \{a\}$  ist abgeschlossen.

Sei  $a \in \mathbb{Z}$  beliebig. Dann gilt:

Hat jemand diesen Beweis?

**Teilaufgabe b)**

**Beh.:**  $\{-1, 1\}$  ist nicht offen

**Bew.:** durch Widerspruch

Annahme:  $\{-1, 1\}$  ist offen.

Dann gibt es  $T \subseteq \mathfrak{B}$ , sodass  $\bigcup_{M \in T} M = \{-1, 1\}$ . Aber alle  $U \in \mathfrak{B}$  haben unendlich viele Elemente. Auch endlich viele Schnitte von Elementen in  $\mathfrak{B}$  haben unendlich viele Elemente  $\Rightarrow$  keine endliche nicht-leere Menge kann in dieser Topologie offen sein  $\Rightarrow \{-1, 1\}$  ist nicht offen. ■

**Teilaufgabe c)**

**Beh.:** Es gibt unendlich viele Primzahlen.

**Bew.:** durch Widerspruch

Annahme: Es gibt nur endlich viele Primzahlen  $p \in \mathbb{P}$

Dann ist

$$\mathbb{Z} \setminus \{-1, +1\} \stackrel{\text{FS d. Arithmetik}}{=} \bigcup_{p \in \mathbb{P}} U_{0,p}$$

endlich. Das ist ein Widerspruch zu  $|\mathbb{Z}|$  ist unendlich und  $|-1, 1|$  ist endlich. ■

### Lösung zu Aufgabe 3

(a) **Beh.:** Die offenen Mengen von  $P$  sind Vereinigungen von Mengen der Form

$$\prod_{j \in J} U_j \times \prod_{i \in \mathbb{N}, i \neq j} P_i$$

wobei  $J \subseteq \mathbb{N}$  endlich und  $U_j \subseteq P_j$  offen ist.

**Beweis:** Nach Definition der Produkttopologie bilden Mengen der Form

$$\prod_{i \in J} U_j \times \prod_{\substack{i \in \mathbb{N} \\ i \notin J}} P_i, \text{ wobei } J \subseteq \mathbb{N} \text{ endlich und } U_j \subseteq P_j \text{ offen } \forall j \in J$$

eine Basis der Topologie. Damit sind die offenen Mengen von  $P$  Vereinigungen von Mengen der obigen Form. ■

(b) **Beh.:** Die Zusammenhangskomponenten von  $P$  sind alle einpunktig.

**Beweis:** Es seien  $x, y \in P$  und  $x$  sowie  $y$  liegen in der gleichen Zusammenhangskomponente  $Z \subseteq P$ . Da  $Z$  zusammenhängend ist und  $\forall i \in I : p_i : P \rightarrow P_i$  ist stetig, ist  $p_i(Z) \subseteq P_i$  zusammenhängend für alle  $i \in \mathbb{N}$ . Die zusammenhängenden Mengen von  $P_i$  sind genau  $\{0\}$  und  $\{1\}$ , d. h. für alle  $i \in \mathbb{N}$  gilt entweder  $p_i(Z) \subseteq \{0\}$  oder  $p_i(Z) \subseteq \{1\}$ . Es sei  $z_i \in \{0, 1\}$  so, dass  $p_i(Z) \subseteq \{z_i\}$  für alle  $i \in \mathbb{N}$ . Dann gilt also:

$$\underbrace{p_i(x)}_{=x_i} = z_i = \underbrace{p_i(y)}_{=y_i} \quad \forall i \in \mathbb{N}$$

Somit folgt:  $x = y$  ■

### Lösung zu Aufgabe 4

(a) **Beh.:**  $\text{GL}_n(\mathbb{R})$  ist nicht kompakt.

**Bew.:**  $\det : \text{GL}_n(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R} \setminus \{0\}$  ist stetig. Außerdem ist  $\det(\text{GL}_n(\mathbb{R})) = \mathbb{R} \setminus \{0\}$  nicht kompakt.  $\overset{1.15}{\Rightarrow} \text{GL}_n(\mathbb{R})$  ist nicht kompakt. ■

(b) **Beh.:**  $\text{SL}_1(\mathbb{R})$  ist nicht kompakt, für  $n > 1$  ist  $\text{SL}_n(\mathbb{R})$  kompakt.

**Bew.:** Für  $\text{SL}_1(\mathbb{R})$  gilt:  $\text{SL}_1(\mathbb{R}) = \{A \in \mathbb{R}^{1 \times 1} \mid \det A = 1\} = \{1\} \cong \{1\}$ .  $\overset{1.15}{\Rightarrow} \text{SL}_1(\mathbb{R})$  ist kompakt.

$\mathrm{SL}_n(\mathbb{R}) \subseteq \mathrm{GL}_n(\mathbb{R})$  lässt sich mit einer Teilmenge des  $\mathbb{R}^{n^2}$  identifizieren. Nach [Satz 1.16](#) sind diese genau dann kompakt, wenn sie beschränkt und abgeschlossen sind. Definiere nun für  $n \in \mathbb{N}_{\geq 2}, m \in \mathbb{N} : A_m = \mathrm{diag}_n(m, \frac{1}{m}, \dots, 1)$ . Dann gilt:  $\det A_m = 1$ , d. h.  $A_m \in \mathrm{SL}_n(\mathbb{R})$ , und  $A_m$  ist unbeschränkt, da  $\|A_m\|_\infty = m \xrightarrow[m \rightarrow \infty]{} \infty$ . ■

(c) **Beh.:**  $\mathcal{P}(\mathbb{R})$  ist kompakt.

**Bew.:**  $\mathcal{P}(\mathbb{R}) \cong S^n /_{x \sim -x}$ . Per Definition der Quotiententopologie ist die Klassenabbildung stetig. Da  $S^n$  als abgeschlossene und beschränkte Teilmenge des  $\mathbb{R}^{n+1}$  kompakt ist  $\xrightarrow[1.15]{} \mathcal{P}(\mathbb{R})$  ist kompakt. ■

## Lösung zu Aufgabe 5

(a) **Vor.:** Sei  $M$  eine topologische Mannigfaltigkeit.

**Beh.:**  $M$  ist wegzusammenhängend  $\Leftrightarrow M$  ist zusammenhängend

**Beweis:** „ $\Rightarrow$ “: Da  $M$  insbesondere ein topologischer Raum ist folgt diese Richtung direkt aus [Korollar 1.17](#).

„ $\Leftarrow$ “: Seien  $x, y \in M$  und

$$Z := \{ z \in M \mid \exists \text{Weg von } x \text{ nach } z \}$$

Es gilt:

- (i)  $Z \neq \emptyset$ , da  $M$  lokal wegzusammenhängend ist
- (ii)  $Z$  ist offen, da  $M$  lokal wegzusammenhängend ist
- (iii)  $Z^C := \{ \tilde{z} \in M \mid \nexists \text{Weg von } x \text{ nach } \tilde{z} \}$  ist offen

Da  $M$  eine Mannigfaltigkeit ist, existiert zu jedem  $\tilde{z} \in Z^C$  eine offene und wegzusammenhängende Umgebung  $U_{\tilde{z}} \subseteq M$ .

Es gilt sogar  $U_{\tilde{z}} \subseteq Z^C$ , denn gäbe es ein  $U_{\tilde{z}} \ni \bar{z} \in Z$ , so gäbe es Wege  $\gamma_2 : [0, 1] \rightarrow M, \gamma_2(0) = \bar{z}, \gamma_2(1) = x$  und  $\gamma_1 : [0, 1] \rightarrow M, \gamma_1(0) = \tilde{z}, \gamma_1(1) = \bar{z}$ . Dann wäre aber

$$\gamma : [0, 1] \rightarrow M, \quad \gamma(x) = \begin{cases} \gamma_1(2x) & \text{falls } 0 \leq x \leq \frac{1}{2} \\ \gamma_2(2x - 1) & \text{falls } \frac{1}{2} < x \leq 1 \end{cases}$$

ein stetiger Weg von  $\tilde{z}$  nach  $x \Rightarrow$  Widerspruch.

Da  $M$  zusammenhängend ist und  $M = \underbrace{Z}_{\text{offen}} \cup \underbrace{Z^C}_{\text{offen}}$ , sowie  $Z \neq \emptyset$  folgt  $Z^C = \emptyset$ . Also ist  $M = Z$  wegzusammenhängend. ■

(b) **Beh.:**  $X$  ist wegzusammenhängend.

**Beweis:**  $X := (\mathbb{R} \setminus \{0\}) \cup \{0_1, 0_2\}$  und  $(\mathbb{R} \setminus \{0\}) \cup \{0_2\}$  sind homöomorph zu  $\mathbb{R}$ .

Also sind die einzigen kritischen Punkte, die man nicht verbinden können könnte  $0_1$  und  $0_2$ .

Da  $(\mathbb{R} \setminus \{0\}) \cup \{0_1\}$  homöomorph zu  $\mathbb{R}$  ist, existiert ein Weg  $\gamma_1$  von  $0_1$  zu einem beliebigen Punkt  $a \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$ .

Da  $(\mathbb{R} \setminus \{ 0 \}) \cup \{ 0_2 \}$  ebenfalls homöomorph zu  $\mathbb{R}$  ist, existiert außerdem ein Weg  $\gamma_2$  von  $a$  nach  $0_2$ . Damit existiert ein (nicht einfacher) Weg  $\gamma$  von  $0_1$  nach  $0_2$ .

■

# Bildquellen

Alle Bilder, die hier nicht aufgeführt sind, wurden selbst erstellt.

Teilweise wurden die im folgenden aufgelisteten Bilder noch leicht modifiziert.

Abb. 0.1a  $S^2$ : Tom Bombadil, [tex.stackexchange.com/a/42865](http://tex.stackexchange.com/a/42865)

Abb. 0.1b Würfel: Jan Hlavacek, [tex.stackexchange.com/a/12069](http://tex.stackexchange.com/a/12069)

Abb. 0.1e  $T^2$ : Jake, [tex.stackexchange.com/a/70979/5645](http://tex.stackexchange.com/a/70979/5645)

Abb. 1.6 Stereographische Projektion: [texample.net/tikz/examples/map-projections](http://texample.net/tikz/examples/map-projections)

Abb. 1.11 Knoten von Jim.belk aus der „Blue knots“-Serie:

- Trivialer Knoten: [commons.wikimedia.org/wiki/File:Blue\\_Uncrossed\\_Knot.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Blue_Uncrossed_Knot.png)
- Kleeblattknoten: [commons.wikimedia.org/wiki/File:Blue\\_Trefoil\\_Knot.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Blue_Trefoil_Knot.png)
- Achterknoten: [commons.wikimedia.org/wiki/File:Blue\\_Figure-Eight\\_Knot.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Blue_Figure-Eight_Knot.png)
- $6_2$ -Knoten: [commons.wikimedia.org/wiki/File:Blue\\_6\\_2\\_Knot.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Blue_6_2_Knot.png)

Abb. 1.12 Reidemeister-Züge: YAMASHITA Makoto ([1](#), [2](#), [3](#))

Abb. 1.13 Kleeblattknoten, 3-Färbung: Jim.belk, [commons.wikimedia.org/wiki/File:Tricoloring.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tricoloring.png)

Abb. 2.1 Doppeltorus: Oleg Alexandrov, [commons.wikimedia.org/wiki/File:Double\\_torus\\_illustration.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Double_torus_illustration.png)

Abb. 3.3b 3 Pfade auf Torus: Charles Staats, [tex.stackexchange.com/a/149991](http://tex.stackexchange.com/a/149991)

Abb. 3.10 Überlappung vom  $S^1$  mit  $\mathbb{R}$ : Alex, [tex.stackexchange.com/a/149706](http://tex.stackexchange.com/a/149706)

# Symbolverzeichnis

## Mengenoperationen

$A^C$	Komplement der Menge $A$
$\mathcal{P}(M)$	Potenzmenge von $M$
$\overline{M}$	Abschluss der Menge $M$
$\partial M$	Rand der Menge $M$
$M^\circ$	Inneres der Menge $M$
$A \times B$	Kreuzprodukt zweier Mengen
$A \subseteq B$	Teilmengenbeziehung
$A \subsetneq B$	echte Teilmengenbeziehung
$A \setminus B$	$A$ ohne $B$
$A \cup B$	Vereinigung
$A \dot{\cup} B$	Disjunkte Vereinigung
$A \cap B$	Schnitt

## Weiteres

$\mathfrak{B}$	Basis einer Topologie
$\mathfrak{B}_\delta(x)$	$\delta$ -Kugel um $x$
$\mathfrak{T}$	Topologie
$\mathcal{P}$	Projektiver Raum
$\langle \cdot, \cdot \rangle$	Skalarprodukt
$X/\sim$	$X$ modulo $\sim$
$[x]_\sim$	Äquivalenzklassen von $x$ bzgl. $\sim$
$\ x\ $	Norm von $x$
$ x $	Betrag von $x$
$S^n$	Sphäre
$T^n$	Torus

## Zahlenmengen

$\mathbb{N}$	Natürliche Zahlen ( $\{1, 2, 3, \dots\}$ )
$\mathbb{Z}$	Ganze Zahlen ( $\mathbb{N} \cup \{0, -1, -2, \dots\}$ )
$\mathbb{Q}$	Rationale Zahlen ( $\mathbb{Z} \cup \{\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{2}{3}\}$ )
$\mathbb{R}$	Reelle Zahlen ( $\mathbb{Q} \cup \{\sqrt{2}, -\sqrt[3]{3}, \dots\}$ )
$\mathbb{R}^+$	Echt positive reelle Zahlen
$\mathbb{R}^\times$	Einheitengruppe von $\mathbb{R}$ ( $\mathbb{R} \setminus \{0\}$ )
$\mathbb{C}$	Komplexe Zahlen ( $\{a + ib \mid a, b \in \mathbb{R}\}$ )
$\mathbb{P}$	Primzahlen ( $2, 3, 5, 7, \dots$ )

$[\gamma]$	Homotopieklassse eines Weges $\gamma$
$\pi_X$	Projektion auf $X$
$f _U$	$f$ eingeschränkt auf $U$
$f^{-1}(M)$	Urbild von $M$
$\text{Rg}(M)$	Rang von $M$
$\chi(K)$	Euler-Charakteristik von $K$
$\Delta^k$	Standard-Simplex
$X \# Y$	Verklebung von $X$ und $Y$
$\gamma_1 * \gamma_2$	Zusammenhängen von Wegen

## Gruppen

$\text{Hom}\ddot{o}(X)$	Homöomorphismengruppe
$\text{Iso}(X)$	Isometriengruppe
$\text{GL}_n(K)$	Allgemeine lineare Gruppe (general linear group)
$\text{Perm}(X)$	Permutationsgruppe
$\text{Sym}(X)$	Symmetrische Gruppe

$f : S^1 \hookrightarrow \mathbb{R}^2$	Einbettung der Kreislinie in die Ebene
$\pi_1(X, x)$	Fundamentalgruppe im topologischen Raum $X$ um $x \in X$
$\text{Fix}(f)$	Menge der Fixpunkte der Abbildung $f$

# Stichwortverzeichnis

- Abbildung  
differenzierbare, 26  
homotope, 43  
offene, 45  
simpliziale, 31  
stetige, 8  
abgeschlossen, 2  
Abschluss, 3  
Abstandsaxiom, 57  
Achterknoten, 18  
Aktion, *siehe* Gruppenoperation  
Anordnungsaxiome, 58  
Atlas, 21  
Axiom, 56  
Axiomensystem, 56  
  
Basis, 3  
Baum, 33  
Belit-Zahl, 36  
Bewegungssaxiom, 58  
  
Cantorsches Diskontinuum, 20  
 $C^k$ -Struktur, 26  
  
Decktransformation, 51  
  reguläre, 51  
Decktransformationsgruppe, 51  
dicht, 3  
Diffeomorphismus, 26  
Dimension, 30  
diskret, 46  
  
Ebene  
  euklidische, 56  
einfach zusammenhängend, 42  
Euler-Charakteristik, *siehe* Eulerzahl  
Eulersche Polyederformel, 34  
Eulerzahl, 32  
  
Färbbarkeit, 19  
Faser, *siehe* Urbild  
Fläche  
  reguläre, 26  
Fundamentalgruppe, 41  
  
Graph, 33  
Grenzwert, 7  
Gruppe  
  topologische, 29  
Gruppenaktion, *siehe* Gruppenoperation  
Gruppenoperation, 53, 53–55  
  stetige, 54  
  
Halbebene, 58  
Halbgerade, 57  
Hilbert-Kurve, 17  
Homöomorphismengruppe, 9  
Homöomorphismus, 8  
Homotopie, 38  
Homotopiegruppe, 36  
Homotopiekasse, 41  
  
Inneres, 3  
Inzidenzaxiome, 56  
Isotopie, 18  
  
Jordankurve, 17  
  geschlossene, 17  
  
Karte, 21  
Kartenwechsel, 25  
Kern  
  offener, 3  
Kleeblattknoten, 18  
Klumpentopologie, *siehe* triviale Topologie  
Knoten, 18, 16–19  
  äquivalente, 18  
  trivialer, 18  
Knotendiagramm, 18  
kollinear, 57  
kompakt, 13  
Kreis, 33  
  
Lage  
  allgemeine, 30

- Lie-Gruppe, 29  
liegt zwischen, 57  
Liftung, 47  
Limes, 7
- Mannigfaltigkeit, 21  
differenzierbare, 25  
glatte, 25  
mit Rand, 24
- Metrik, 5  
diskrete, 6  
SNCF, 6
- Neilsche Parabel, 24
- offen, 2
- Oktaeder, 30
- Parallelenaxiom, 56
- Polyzyylinder, 16
- Produkttopologie, 4
- Projektion  
stereographische, 9
- Quotiententopologie, 4
- Rand, 3, 24
- Raum  
hausdorffscher, 7  
metrischer, 5  
projektiver, 5, 20, 21, 45  
topologischer, 2
- Realisierung  
geometrische, 30
- Seite, 30
- Sierpińskiiraum, 3, 20
- Simplex, 30
- Simplizialkomplex, 30
- Sphäre  
exotische, 26
- Spurtopologie, 3
- Standard-Simplex, 30
- Standardtopologie, 2
- sternförmig, 41
- Stetigkeit, 8–10
- Strecke, 57
- Struktur  
differenzierbare, 26
- Subbasis, 3
- Teilraum, 3
- Teilsimplex, 30
- Topologie  
diskrete, 2, 6  
euklidische, 2  
triviale, 2  
Zariski, 2, 11, 13
- Torus, ii
- Total Unzusammenhängend, 66
- Überdeckung, 13
- Übergangsfunktion, *siehe* Kartenwechsel
- Überlagerung, 44, 44–53  
universelle, 50
- Umgebung, 3
- Verklebung, 23
- verträglich, 26
- Würfel, 30
- Weg, 16  
einfacher, 16  
geschlossener, 16  
homotope, 38  
zusammengesetzter, 40
- Wegzusammenhang, 16
- Winkel, 62
- zusammenhängend, 11
- Zusammenhang, 11–12
- Zusammenhangskomponente, 12