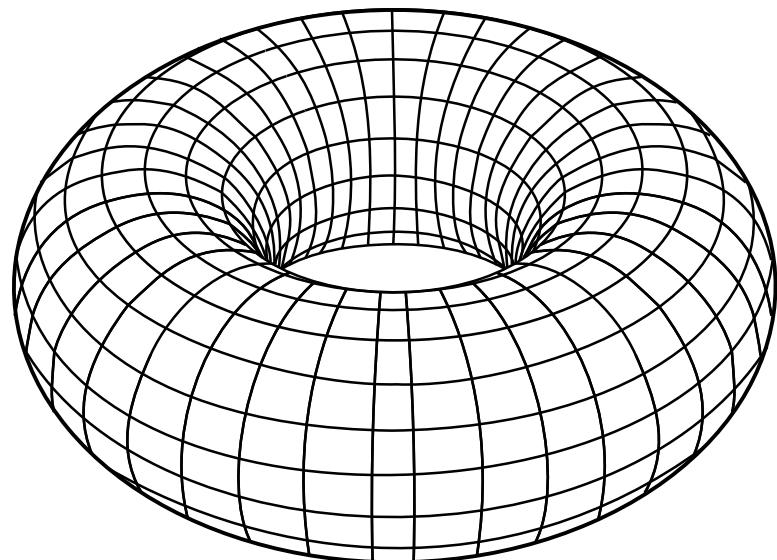


# **Einführung in die Geometrie und Topologie - Mitschrieb -**

**Vorlesung im Wintersemester 2011/2012**

Sarah Lutteropp, Simon Bischof

20. Dezember 2011



# Inhaltsverzeichnis

<b>Einführung</b>	<b>2</b>
<b>I Grundlagen der Allgemeinen Topologie</b>	<b>9</b>
1 Erste Beispiele topologischer Räume . . . . .	9
2 Topologische Grundbegriffe . . . . .	10
3 Stetige Abbildungen . . . . .	17
4 Zusammenhang und Kompaktheit . . . . .	20
5 Trennungseigenschaften . . . . .	25
6 Abzählbarkeitsaxiome und lokale Kompaktheit . . . . .	28
<b>II Geometrische Beispiele und Konstruktionen topologischer Räume</b>	<b>31</b>
1 Mannigfaltigkeiten . . . . .	31
2 Quotientenräume . . . . .	42
3 Quotientenabbildungen . . . . .	47
4 Konstruktionen von Quotientenräumen . . . . .	51
<b>III Konzepte der Algebraischen Topologie</b>	<b>56</b>
1 Die Fundamentalgruppe . . . . .	56
2 Überlagerungen . . . . .	74
3 Liften von Abbildungen . . . . .	84

## Zusammenfassung

Dies ist ein Mitschrieb der Vorlesung “Einführung in die Geometrie und Topologie” vom Wintersemester 2011/2012 am Karlsruher Institut für Technologie, die von Herrn Prof. Dr. Wilderich Tuschmann gehalten wird.

# Kapitel

# Einführung

Topologie ist qualitative Geometrie. Ihr grundlegendes Studienobjekt sind topologische Räume und Abbildungen zwischen diesen.

**Definition .1** (Topologischer Raum). Ein topologischer Raum  $X$  ist gegeben durch eine Menge  $X$  und ein System  $\mathcal{O}$  von Teilmengen von  $X$ , den so genannten offenen Mengen von  $X$ , welches unter beliebigen Vereinigungen und endlichen Durchschnitten abgeschlossen ist und  $X$  und die leere Menge  $\emptyset$  als Elemente enthält.

$X$  Menge,  $\mathcal{O} \subset \mathcal{P}(X)$ :

- (1)  $O_1, O_2 \in \mathcal{O} \Rightarrow O_1 \cap O_2 \in \mathcal{O}$
- (2)  $O_\alpha \in \mathcal{O}, \alpha \in A, A$  Indexmenge  $\Rightarrow \bigcup_{\alpha \in A} O_\alpha \in \mathcal{O}$
- (3)  $X, \emptyset \in \mathcal{O}$

**Beispiel:**

$\mathcal{O} = \{X, \emptyset\} \Rightarrow (X, \mathcal{O})$  ist topologischer Raum!

**Beispiel:**

$X$  Menge,  $\mathcal{O} = \{\{x\} \mid x \in X\} + \text{Axiome, die zu erfüllen sind} \rightsquigarrow \tilde{\mathcal{O}} = \mathcal{P}(X)$   
 $\Rightarrow (X, \tilde{\mathcal{O}})$  ist topologischer Raum.  $\mathcal{O}$  ist "Basis" der Topologie  $\tilde{\mathcal{O}}$ .

**Definition .2** (Metrischer Raum). Ein metrischer Raum  $X$  ist eine Menge  $X$  mit einer Abbildung  $d: X \times X \rightarrow \mathbb{R}$ , der "Metrik" auf  $X$ , die folgende Eigenschaften erfüllt:  $\forall x, y, z \in X$  gilt:

- (1)  $d(x, y) = d(y, x)$  "Symmetrie"
- (2)  $d(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y, d(x, y) \geq 0$  "Definitheit"

(3)  $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$  "Dreiecksungleichung"

**Definition .3** (Stetigkeit). Eine Abbildung  $F: X \rightarrow Y$  zwischen topologischen Räumen  $X$  und  $Y$  heißt stetig, falls die  $F$ -Urbilder offener Mengen in  $Y$  offene Teilmengen von  $X$  sind.

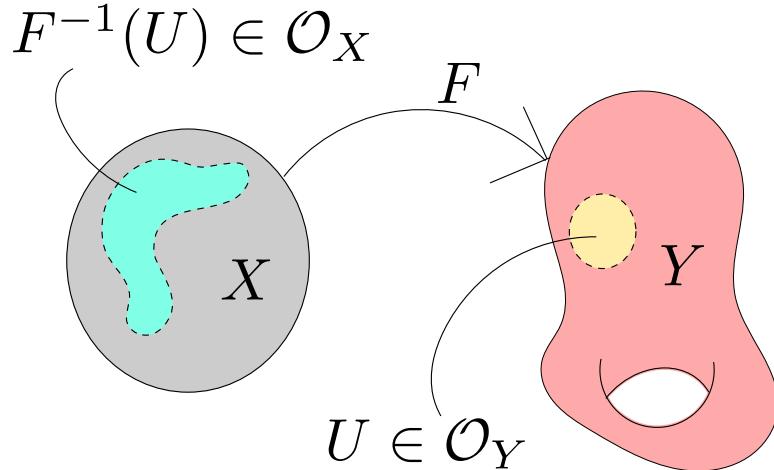


Abbildung 1: Stetige Abbildung

**Bemerkung .1.** Ist  $(X, d)$  ein metrischer Raum, so sind die offenen Mengen der von der Metrik induzierten Topologie<sup>1</sup> Vereinigungen von endlichen Durchschnitten von Umgebungen  $U_\epsilon(x) := \{y \in X \mid d(x, y) < \epsilon\} (\epsilon > 0)$ , und  $F: (X, d) \rightarrow (Y, d')$  ist stetig im obigen Sinn genau dann, falls für alle  $\epsilon > 0$  und alle  $x \in X$  ein  $\delta > 0$  existiert mit  $F(U_\delta(x)) \subset U_\epsilon(F(x))$ .

**Definition .4** (Homotopie). Eine Homotopie  $H: f \simeq g$  zwischen zwei (stetigen) Abbildungen  $f, g: X \rightarrow Y$  ist eine (stetige) Abbildung

$$H: X \times I \rightarrow Y, (x, t) \mapsto H(x, t)$$

mit  $H(x, 0) = f(x)$  und  $H(x, 1) = g(x) \quad \forall x \in X$ .

(Hier ist  $I = [0, 1] \subset \mathbb{R}$ )

$f$  und  $g$  heißen dann homotop, in Zeichen:  $f \simeq g$ .

**Achtung:** "Stetig" meint hier im Sinne der Produkt-Topologie (siehe später) auf  $X \times I$ .

**Bemerkung .2.**  $H$  heißt auch Homotopie von  $f$  nach  $g$ . Eine solche ist auch interpretierbar als eine stetige parametrisierte Schar.

---

<sup>1</sup>siehe später

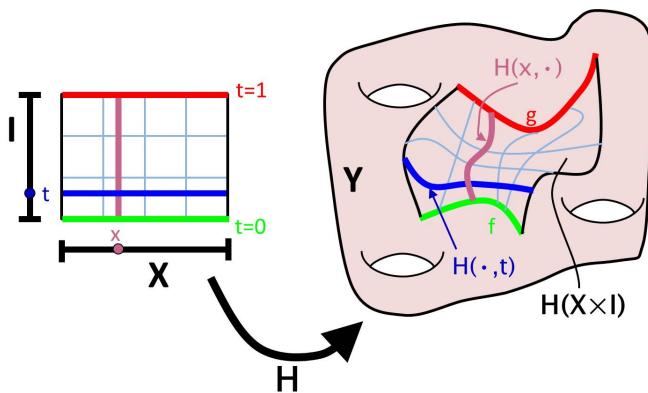
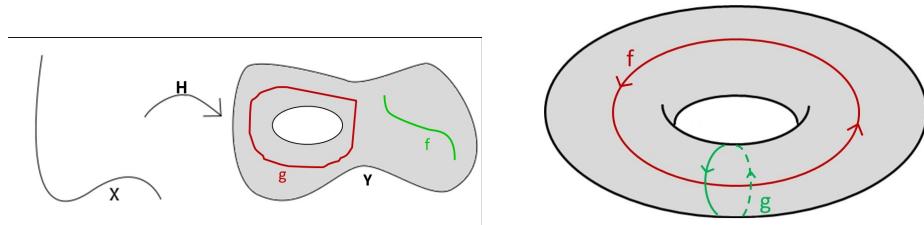


Abbildung 2: Homotopie

Abbildung 3:  $f$  und  $g$  sind jeweils homotop, vgl. Bemerkung .6!

**Definition .5** (Homotope Abbildungen  $f, g: X \rightarrow Y$ ). Zwei (stetige) Abbildungen heißen homotop, in Zeichen:  $f \simeq g$ , falls eine Homotopie mit Anfang  $f$  und Ende  $g$  existiert.

**Bemerkung .3.** "Homotop sein" ist eine Äquivalenzrelation.

**Beweis.** Symmetrie: Gilt für  $f, g \in C(X, Y) := \{F: X \rightarrow Y \text{ stetig}\}$   $f \simeq g$  vermöge  $H = (h_t), t \in [0, 1]$ , so liefert  $(\tilde{h}_t)$  mit  $\tilde{h}_t := h_{1-t}$  eine Homotopie von  $g$  nach  $f$ , d.h.  $f \simeq g \Leftrightarrow g \simeq f$ .

Reflexivität:  $f \simeq f$  vermöge  $h_t := f \forall t \in [0, 1]$

Transitivität: Es sei  $f \simeq g$  vermöge  $(h_t)$  und ferner  $g \simeq l$  vermöge  $(k_t)$ . Dann liefert  $M: X \times [0, 1] \rightarrow Y$  mit

$$M_t := \begin{cases} h_{2t} & 0 \leq t \leq \frac{1}{2} \\ k_{2t-1} & \frac{1}{2} \leq t \leq 1 \end{cases}$$

eine Homotopie von  $f$  nach  $l$ , d.h.  $f \simeq g, g \simeq l \Rightarrow f \simeq l$ .  $\square$

**Bemerkung .4.** Die Äquivalenzrelation "Homotopie von Abbildungen" liefert also eine Partition von  $C(X, Y)$  in Äquivalenzklassen. Diese heißen Ho-

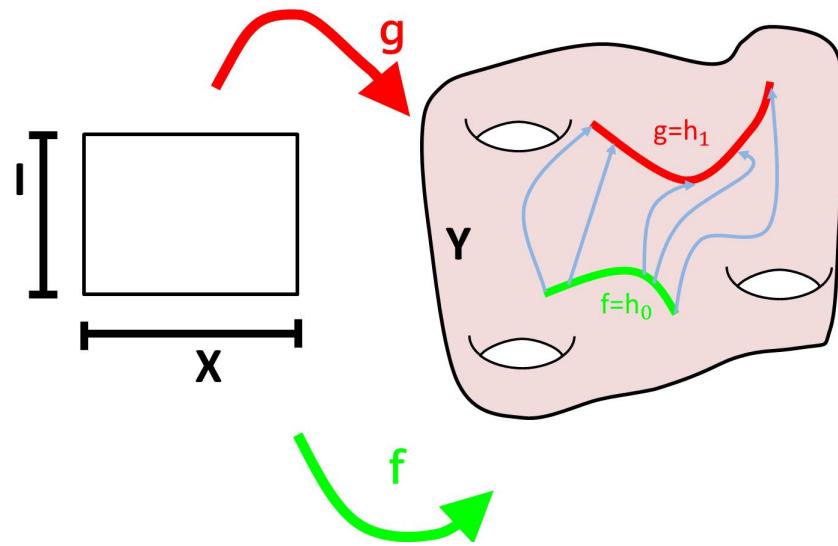


Abbildung 4:  $H = (h_t), t \in [0, 1]$ , von stetigen Abbildungen  $h_t: X \rightarrow Y$  mit Anfang  $h_0 = f$  und Ende  $h_1 = g$ .

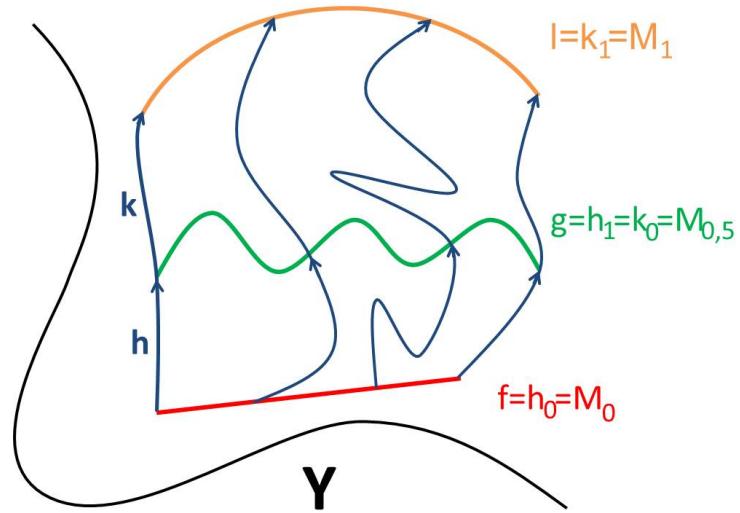


Abbildung 5: Transitivität der Relation "homotop sein"

motopieklassen und die Menge aller Homotopieklassen stetiger Abbildungen von  $X$  nach  $Y$  wird mit  $[X, Y]$  bezeichnet.

**Bemerkung .5.**  $C(X, Y)$  ist im Allgemeinen viel schwieriger zu verstehen als  $[X, Y]!$

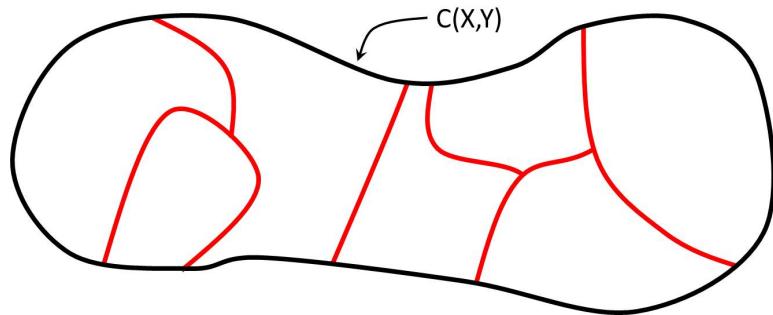


Abbildung 6: Äquivalenzklassen  $[X, Y]$  von  $C(X, Y)$

**Beispiel:**

Je zwei stetige Abbildungen  $f, g: X \rightarrow \mathbb{R}^n$  sind homotop! Denn

$$H(x, t) := (1 - t)f(x) + t \cdot g(x)$$

liefert eine Homotopie von  $f$  nach  $g$ :

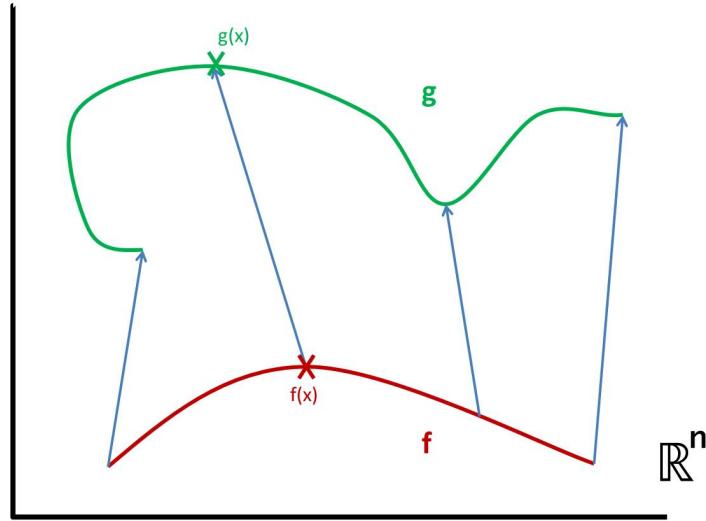


Abbildung 7: Zwei stetige Abbildungen  $f, g: X \rightarrow \mathbb{R}^n$  sind immer homotop.

**Definition .6** (Nullhomotopie). Eine stetige Abbildung  $f: X \rightarrow Y$  heißt nullhomotop, falls sie homotop zu einer konstanten Abbildung ist.

**Korollar .1.** Jede stetige Abbildung  $f: X \rightarrow \mathbb{R}^n$  ist nullhomotop, d.h. für jeden topologischen Raum  $X$  besteht  $[X, \mathbb{R}^n]$ ,  $n$  beliebig, nur aus einem Punkt!

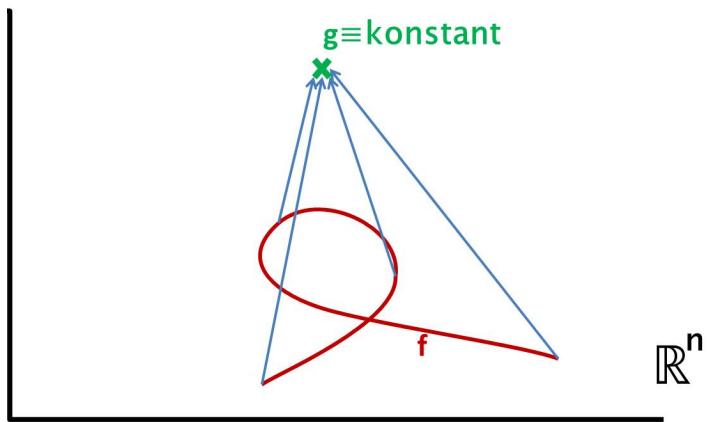


Abbildung 8:  $f$  ist nullhomotop.

**Beispiel:**

Jeder geschlossene Weg im  $\mathbb{R}^2$ , d.h. jede stetige Abbildung  $f: [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^2$  mit  $f(0) = f(1)$  ist nullhomotop.  $[[0, 1], \mathbb{R}^2]$  + gleicher Anfangs- und Endpunkt besteht nur aus einem Punkt, zum Beispiel der Äquivalenzklasse der konstanten Kurve  $t \mapsto (1, 0)$ .

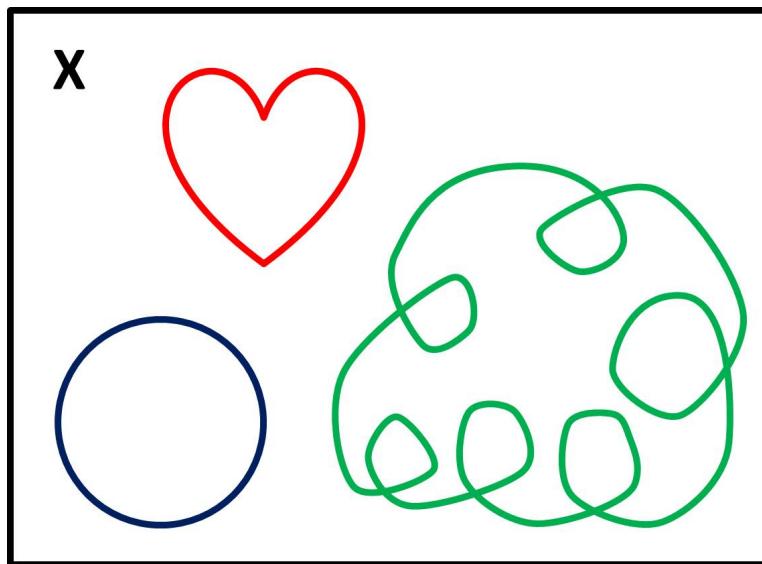


Abbildung 9: Geschlossene Wege in  $\mathbb{R}^n$ .

**Bemerkung .6.** Interpretiere einen geschlossenen Weg im  $\mathbb{R}^2$  auch als stetige Abbildung von  $S^1 := \{x \in \mathbb{R}^2 \mid \|x\| = 1\}$  in  $\mathbb{R}^2$ , so gilt also  $[S^1, \mathbb{R}^2]$  ist einelementig.

Aber  $[S^1, \mathbb{R}^2 \setminus \{0\}]$  ist nichttrivial, wenn für  $f: S^1 \rightarrow \mathbb{R}^2 \setminus \{0\}$  der Punkt  $f(1), 1 = (1, 0) \in S^1$ , unter allen betrachteten Homotopien festgelassen werden soll. Dieses Phänomen wird uns zum Studium der Fundamentalgruppe führen ...

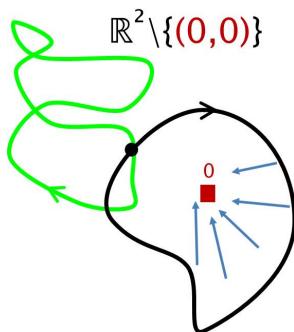


Abbildung 10:  $[S^1, \mathbb{R}^2 \setminus \{0\}]$  ist nichttrivial.

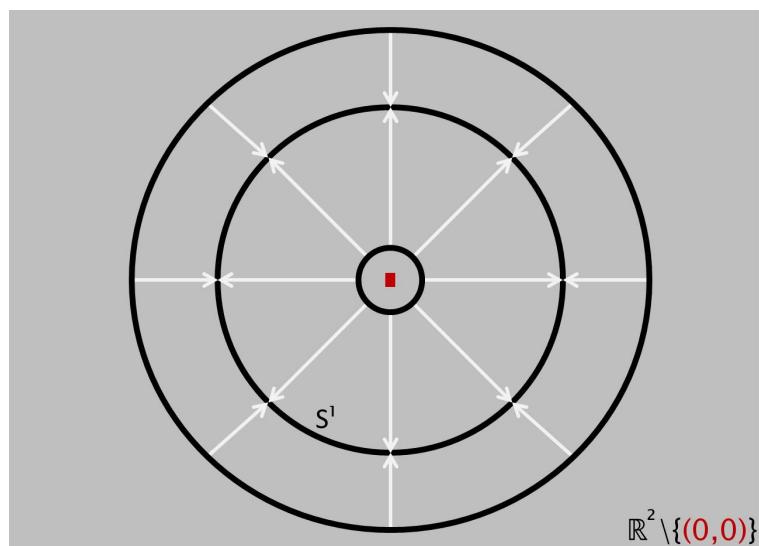


Abbildung 11:  $[S^1, \mathbb{R}^2 \setminus \{(0,0)\}] = [S^1, S^1]$ .

## Kapitel I

# Grundlagen der Allgemeinen Topologie

### 1 Erste Beispiele topologischer Räume

Beispiel:

- (1)  $X, \mathcal{O} := \{X, \emptyset\}$  ‘triviale Topologie’
- (2)  $X, \mathcal{O} := \mathcal{P}(X)$  ‘diskrete Topologie’
- (3) Metrische Räume, siehe unten
- (4)  $X := \{a, b, c, d\} \Rightarrow \mathcal{O} := \{X, \emptyset, \{a\}, \{b\}, \{a, c\}, \{a, b, c\}, \{a, b\}\}$  definiert eine Topologie auf  $X$ , aber  $\mathcal{O}' := \{X, \emptyset, \{a, c, d\}, \{b, d\}\}$  nicht!
- (5)  $X := \mathbb{R}, \mathcal{O} := \{O \mid O \text{ ist Vereinigung von Intervallen } (a, b) \text{ mit } a, b \in \mathbb{R}\} \Rightarrow (X, \mathcal{O})$  ist topologischer Raum, und  $\mathcal{O}$  heißt Standard-Topologie.
- (6)  $X := \mathbb{R}, \tilde{\mathcal{O}} := \{O \mid O = \mathbb{R} \setminus E, E \subset \mathbb{R} \text{ endlich}\} \cup \{\emptyset\}$  ist auch eine Topologie auf  $\mathbb{R}$ , die so genannte  $T_1$ -Topologie.

**Definition I.1** (Teilraumtopologie). Es sei  $(X, \mathcal{O})$  topologischer Raum und  $A \subset X$ . Die auf  $A$  durch

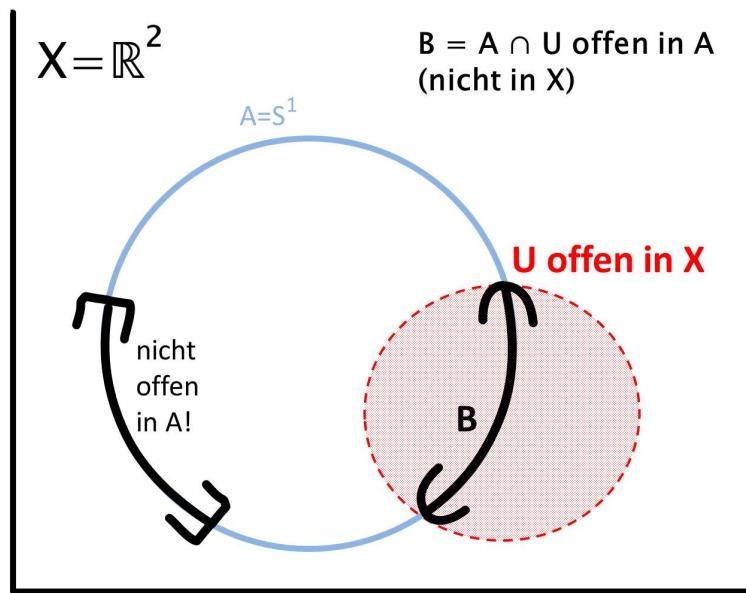
$$\mathcal{O}|_A := \{U \cap A \mid U \in \mathcal{O}\}$$

induzierte Topologie heißt Teilraumtopologie und der dadurch gegebene topologische Raum  $(A, \mathcal{O}|_A)$  heißt Teilraum von  $(X, \mathcal{O})$ .

**Bemerkung I.1.**  $B \subset A$  ist also genau dann offen in  $A$ , wenn  $B$  der Schnitt einer in  $X$  offenen Menge mit  $A$  ist.

**Beispiel:**

$$X = \mathbb{R}^2, A = S^1 = \{x \in \mathbb{R}^2 \mid \|x\| = 1\}$$



Achtung:  $B$  ist nicht offen in  $\mathbb{R}^2$ !

## 2 Topologische Grundbegriffe

**Definition I.2** (Abgeschlossenheit).  $A \subset X, X$  topologischer Raum, heißt abgeschlossen  
 $\Leftrightarrow X \setminus A$  ist offen.

Die De Morgan'schen Regeln der Mengenlehre zeigen:

**Bemerkung I.2.** Beliebige Durchschnitte abgeschlossener Mengen sind abgeschlossen, ebenso endliche Vereinigungen und genauso  $X$  und  $\emptyset$ .

**Beispiel:**

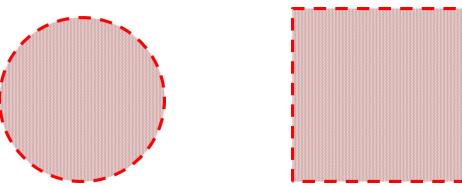
In einem diskreten topologischen Raum sind alle Teilmengen abgeschlossen, in  $\mathbb{R}^{T_1}_1$  alle endlichen Teilmengen und  $X, \emptyset$ .

**Definition I.3** (Umgebung). Ist  $X$  topologischer Raum und  $x \in X$ , so heißt jede offene Teilmenge  $O \subset X$  mit  $x \in O$  eine Umgebung von  $x$ .

**Bemerkung I.3.** Umgebungen sind per definitionem offen!

---

<sup>1</sup> $\mathbb{R}$  mit  $T_1$ -Topologie



**Bemerkung I.4.** Jede offene Teilmenge von  $\mathbb{R}_{Standard}$  ist eine Vereinigung disjunkter offener Intervalle, doch abgeschlossene Teilmengen von  $\mathbb{R}$  sind keinesfalls immer Vereinigungen abgeschlossener Intervalle!

**Beispiel:** Die Cantor-Menge  $\mathcal{C} := \left\{ x \in \mathbb{R} \mid x = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{3^k}, a_k \in \{0, 2\} \right\}$

$\Rightarrow \mathcal{C}$  ist abgeschlossen in  $\mathbb{R}$ , enthält überabzählbar viele Elemente und hat ‘Hausdorff-Dimension’  $\frac{\ln 2}{\ln 3} \approx 0,6\dots$

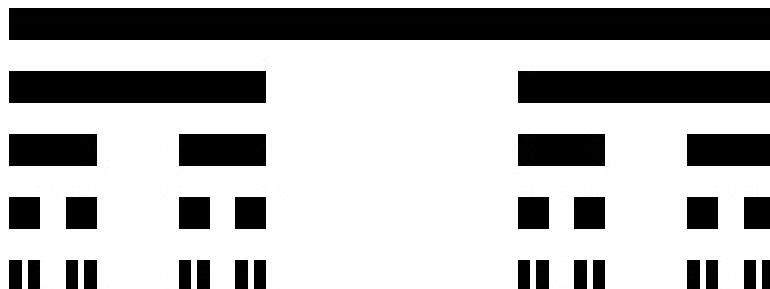


Abbildung I.1: Die Cantor-Menge.

**Definition I.4** (Basis). Ist  $(X, \mathcal{O})$  topologischer Raum mit  $\mathcal{B} \subset \mathcal{O}$ , so heißt  $\mathcal{B}$  Basis der Topologie : $\Leftrightarrow$  Jede (nichtleere) offene Menge ist Vereinigung von Mengen aus  $\mathcal{B}$ .

**Beispiel:**

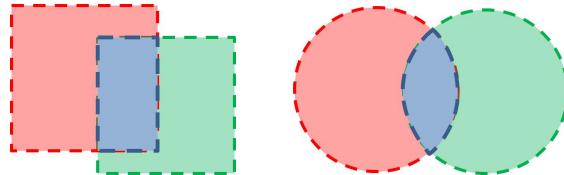
- (1) Die offenen Intervalle bilden eine Basis der Standard-Topologie von  $\mathbb{R}$ .
- (2) Sämtliche offenen<sup>2</sup> Kreisscheiben und auch sämtliche offenen Quadrate bilden Basen ein und derselben Topologie auf  $\mathbb{R}^2$ .

**Bemerkung I.5.** •  $\mathcal{B} \subset \mathcal{O}$  ist Basis der Topologie von  $X \Leftrightarrow \forall O \in \mathcal{O} \forall x \in O \exists B \in \mathcal{B}: x \in B \subset O$ .

---

<sup>2</sup>bezüglich der euklidischen Metrik

- $\mathcal{B} \subset \mathcal{P}(X)$  bildet die Basis einer Topologie auf  $X \Leftrightarrow X$  ist Vereinigung von Mengen aus  $\mathcal{B}$  und der Schnitt je zweier Mengen aus  $\mathcal{B}$  ist eine Vereinigung von Mengen aus  $\mathcal{B}$ .



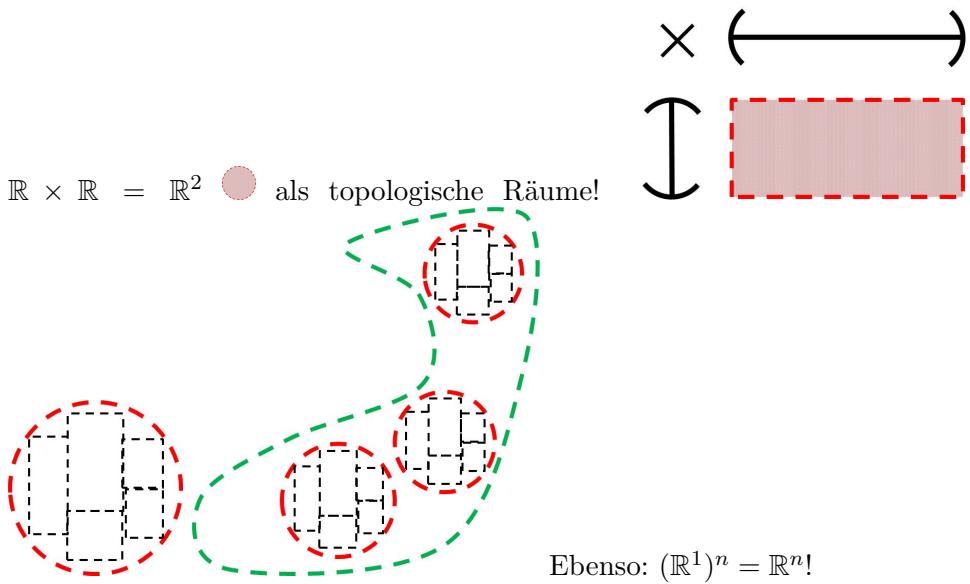
**Definition I.5** (Produkt-Topologie). Sind  $(X, \mathcal{O}_X)$  und  $(Y, \mathcal{O}_Y)$  topologische Räume, so bildet

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

die Basis einer Topologie für die Menge  $X \times Y$ , und diese heißt Produkt-Topologie auf  $X \times Y$ .

Versehen mit der Produkt-Topologie ist  $X \times Y$  selbst ein topologischer Raum und für gegebene  $X, Y$  denkt man sich  $X \times Y$  stillschweigend mit der Produkt-Topologie versehen.

**Beispiel:**



**Definition I.6** (Feiner und größer). Sind  $\mathcal{O}_1$  und  $\mathcal{O}_2$  Topologien auf  $X$  und  $\mathcal{O}_1 \subset \mathcal{O}_2$ , so heißt  $\mathcal{O}_2$  feiner als  $\mathcal{O}_1$  und  $\mathcal{O}_1$  größer als  $\mathcal{O}_2$ .

**Beispiel:**

- Die triviale Topologie ist die gröbste Topologie auf  $X$ , die diskrete Topologie die feinste.
- Die Standard-Topologie auf  $\mathbb{R}$  ist feiner als die  $T_1$ -Topologie.

### Mehr zu metrischen Räumen

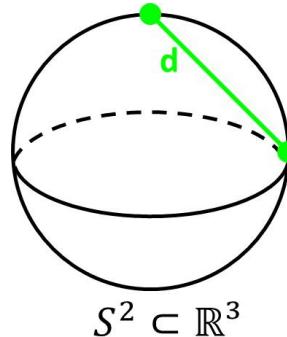
**Definition I.7** ( $\epsilon$ -Ball, Sphäre). Für einen metrischen Raum  $(X, d)$  und  $\epsilon > 0$  sei für  $p \in X$

- $B_\epsilon(p) := \{x \in C \mid d(p, x) < \epsilon\}$  der offene  $\epsilon$ -Ball um  $p$
- $D_\epsilon(p) := \{x \in C \mid d(p, x) \leq \epsilon\}$  der abgeschlossene  $\epsilon$ -Ball um  $p$
- $S_\epsilon(p) := \{x \in C \mid d(p, x) = \epsilon\}$  die  $\epsilon$ -Sphäre um  $p$  (oder Sphäre vom Radius  $\epsilon$  um  $p$ )

**Definition I.8** (Metrischer Unterraum). Ist  $(X, d)$  metrischer Raum und  $A \subset X$ , so heißt der metrische Raum  $(A, d|_{A \times A})$  metrischer Unterraum von  $X$ .

#### Beispiel:

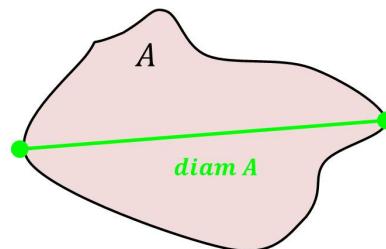
Für  $X = \mathbb{R}_{Eukl}^n$  sind  $B_1(0), D_1(0) =: D^n$  und  $S^{n-1} := S_1(0)$  metrische Unterräume und heißen auch offener bzw. abgeschlossener Einheitsball bzw.  $(n - 1)$ -Sphäre.



**Definition I.9** (Beschränktheit, Durchmesser).  $A \subset (X, d)$  heißt beschränkt

$\Leftrightarrow \exists 0 < \rho \in \mathbb{R}: d(x, y) < \rho \forall x, y \in A$

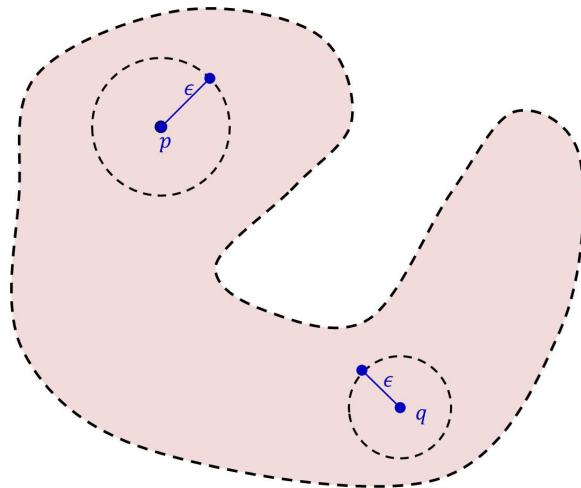
Das Infimum,  $\text{diam } A$ , dieser  $\rho$  heißt dann Durchmesser von  $A$ .



**Bemerkung I.6.** In einem metrischen Raum  $(X, d)$  bilden die offenen Bälle die Basis einer Topologie  $\mathcal{O} = \mathcal{O}_d$  von  $X$ , diese heißt die von der Metrik induzierte Topologie.

**Bemerkung I.7.**  $A \subset (X, d)$  ist offen

$$\Leftrightarrow \forall p \in A \exists \text{ ein offener Ball } B_\epsilon(p) \text{ um } p \text{ mit } B_\epsilon(p) \subset A$$



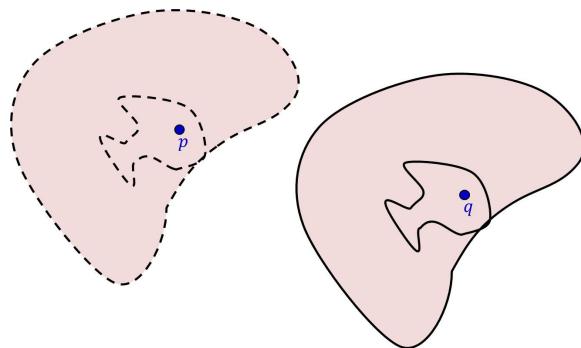
**Definition I.10** (Abstand).  $(X, d)$  sei metrischer Raum und  $A \subset X, p \in X$ .

$$d(p, A) := dist(p, A) := \inf\{d(p, a) \mid a \in A\}$$

heißt Abstand von  $p$  und  $A$ .

**Erinnerung** Ist  $(X, \mathcal{O})$  topologischer Raum und  $A \subset X$ , so definiert  $\mathcal{O}_A := \{A \cap O \mid O \in \mathcal{O}\}$  eine Topologie auf  $A$ , die Teilraumtopologie der in  $A$  offenen Mengen.

**Bemerkung I.8.** Ist  $A \subset X$  offen in  $X$ , so ist auch jede in  $A$  offene Menge offen in  $X$ , und abgeschlossene<sup>3</sup> Teilmengen einer in  $X$  abgeschlossenen Menge  $A$  sind auch abgeschlossen in  $X$ .




---

<sup>3</sup>in  $A$

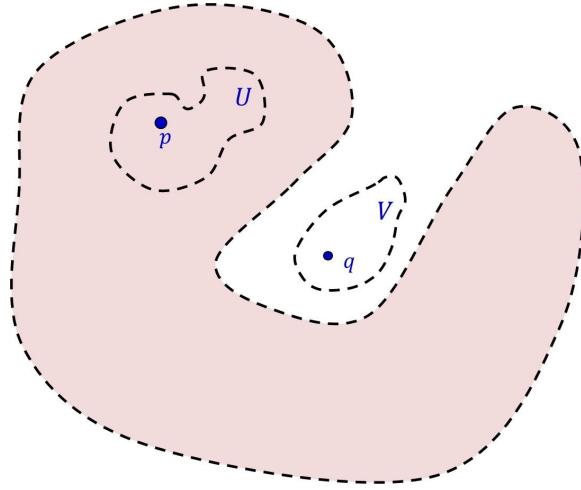
Aber abgeschlossene Mengen  $B$  in  $A \subset X$  sind für beliebiges  $A$  im Allgemeinen nicht abgeschlossen in  $X$ .

### Beispiel: Beispiel zu Bemerkung I.8

$$B := A := (a, b) \subset X := \mathbb{R}$$

**Definition I.11** (Innerer Punkt, äußerer Punkt, Randpunkt). Für  $p \in A \subset X$ ,  $X$  topologischer Raum, heißt  $p$

- (1) innerer Punkt von  $A$ , falls es eine in  $A$  enthaltene Umgebung  $U$  um  $p$  gibt.
- (2) äußerer Punkt, falls eine zu  $p$  disjunkte Umgebung  $V$  in  $X$  existiert.
- (3) Randpunkt von  $A$ , falls jede Umgebung von  $p$  nichtleeren Durchschnitt mit  $A$  und  $X \setminus A$  hat.



**Definition I.12** (Inneres). Für  $A \subset X$  heißt die größte in  $X$  offene und in  $A$  enthaltene Teilmenge  $\overset{\circ}{A}$  Inneres von  $A$ .

**Bemerkung I.9.**  $\overset{\circ}{A}$  ist die Menge aller inneren Punkte von  $A$  und die Vereinigung aller in  $X$  offenen Teilmengen von  $A$ , und  $A$  ist offen  $\Leftrightarrow A = \overset{\circ}{A}$

### Beispiel:

$$\mathbb{R} \setminus \mathbb{Q} = \overset{\circ}{\mathbb{Q}} = \emptyset$$

**Definition I.13** (Abschluss). Der Abschluss  $\bar{A}$  von  $A$  ist  $X \setminus ((X \setminus A))$ .

**Definition I.14** (Rand). Der Rand  $\partial A$  von  $A$  ist

$$\partial A := \bar{A} \setminus \overset{\circ}{A},$$

d.h. Rand  $A = \{ \text{Randpunkte von } A \}$ .

**TODO:Exkurs zu "Randbildung (topologisch) und Ableitung (analytisch) sind dual zueinander"**

### 3 Stetige Abbildungen

**Definition I.15** (Stetigkeit).  $f: X \rightarrow Y$  ist stetig  $\Leftrightarrow \forall$  offenen Mengen in  $Y$  ist das Urbild unter  $f$  offene Menge in  $X$ .

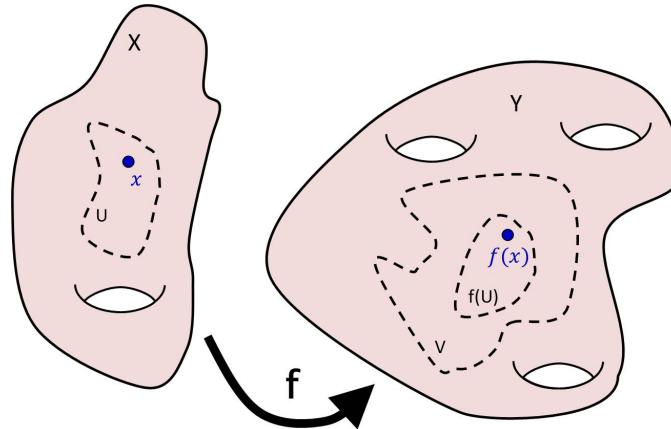
**Beispiel:**

- $f: X \rightarrow Y$  ist stetig  $\Leftrightarrow$  Urbilder abgeschlossener Mengen sind abgeschlossen.
- Sind  $\mathcal{O}_1$  und  $\mathcal{O}_2$  Topologien auf  $X$ , so ist die Identität  $\text{id}: (X, \mathcal{O}_1) \rightarrow (X, \mathcal{O}_2)$  stetig  $\Leftrightarrow \mathcal{O}_2 \subset \mathcal{O}_1$ .
- Für  $A \subset X$  ist die Teilraumtopologie  $\mathcal{O}_A = \mathcal{O}|_A$  die größte Topologie, bezüglich der die Inklusion  $i: A \hookrightarrow X, a \mapsto a$  stetig ist.

**Definition I.16** (Stetigkeit).  $f: X \rightarrow Y$  ist stetig in  $x \in X$

$\Leftrightarrow \forall$  Umgebungen  $V$  von  $f(x)$   $\exists$  Umgebung  $U$  von  $x$  mit

$$f(U) \subset V.$$



**Bemerkung I.10.**  $f: X \rightarrow Y$  ist stetig  $\Leftrightarrow f$  ist stetig in jedem Punkt  $x \in X$ .

**Beispiel:**

Eine Abbildung  $f: X \rightarrow Y$  zwischen metrischen Räumen ist bezüglich der von den Metriken induzierten Topologien stetig in  $x \in X$  genau dann, wenn für jeden offenen Ball  $B$  um  $f(x)$  ein offener Ball um  $x$  existiert, der unter  $f$  in  $B$  abgebildet wird. (Und ferner stetig in  $x \in X$  genau dann, wenn für alle  $\epsilon > 0$  ein  $\delta > 0$  existiert, so dass für alle  $x' \in X$  mit  $d_X(x, x') < \delta$  auch  $d_Y(f(x), f(x')) < \epsilon$  folgt.)

**Definition I.17** (Isometrische Einbettung, Isometrie). Sind  $X, Y$  metrische Räume, so heißt eine Abbildung  $f: X \rightarrow Y$  isometrische Einbettung : $\Leftrightarrow \forall x, x' \in X$  gilt  $d_Y(f(x), f(x')) = d_X(x, x')$ .

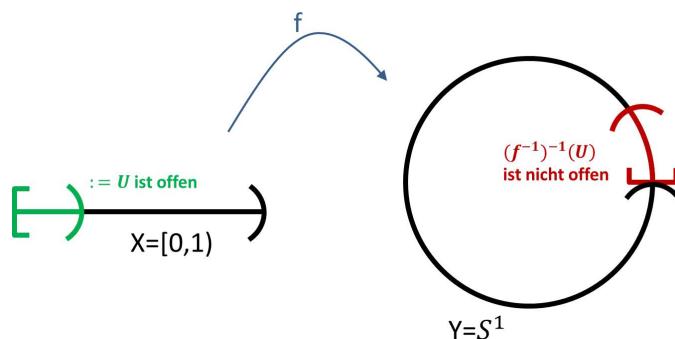
Eine isometrische Einbettung ist immer injektiv.

Ist  $f$  zusätzlich bijektiv, so heißt  $f$  Isometrie.

**Definition I.18** (Homöomorphismus). Eine invertierbare Abbildung  $f: X \rightarrow Y$  topologischer Räume heißt Homöomorphismus, falls  $f$  und  $f^{-1}$  stetig sind.

**Beispiel:**

- $f: [0, 1] \rightarrow S^1 \subset \mathbb{C} \hat{=} \mathbb{R}^2, t \mapsto e^{2\pi i t} (= \cos 2\pi t, \sin 2\pi t)$  ist stetig, injektiv, aber kein Homöomorphismus!



- $id_X: X \rightarrow X$  ist immer ein Homöomorphismus, Kompositionen von Homöomorphismen ebenfalls.

**Bemerkung I.11.** ‘Homöomorph sein’ ist eine Äquivalenzrelation für topologische Räume.

**Definition I.19** (homöomorph). Zwei topologische Räume  $X$  und  $Y$  heißen homöomorph oder vom gleichen Homöomorphietyp, in Zeichen  $X \cong Y$ , falls es einen Homöomorphismus  $f: X \rightarrow Y$  gibt.

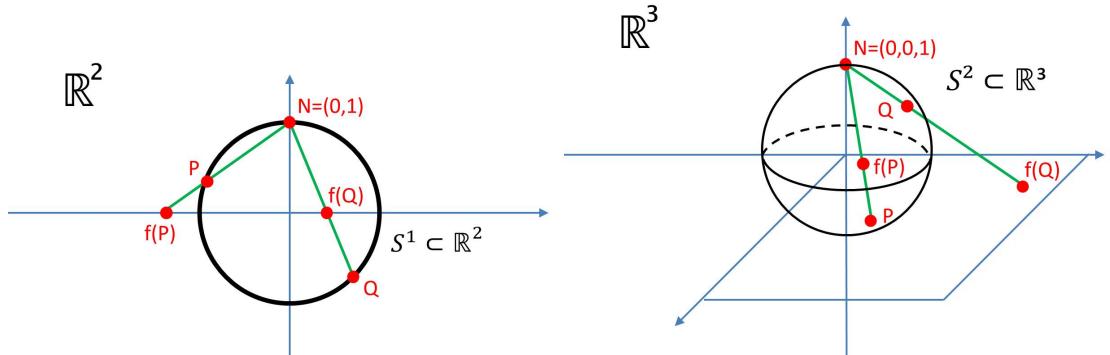
**Bemerkung I.12.** Homöomorphismen erhalten sämtliche topologischen Strukturen:

- Ist  $f: X \rightarrow Y$  Homöomorphismus, so ist  $U \subset X$  offen  $\Leftrightarrow f(U)$  offen in  $Y$ .
- $A \subset X$  ist abgeschlossen  $\Leftrightarrow f(A)$  ist abgeschlossen in  $Y$ .
- $f(\bar{A}) = \overline{f(A)}, f(\mathring{A}) = (f(\mathring{A}))$ .
- $U$  ist Umgebung von  $x \in X \Leftrightarrow f(U)$  ist Umgebung von  $f(x)$ .

**Beispiel:**

- Jede Isometrie zwischen metrischen Räumen ist ein Homöomorphismus.
- $[0, 1] \cong [a, b] \forall a < b \in \mathbb{R}$
- $(0, 1) \cong (a, b) \cong \mathbb{R} \forall a < b \in \mathbb{R}$

**Beispiel: Stereographische Projektion**



Die stereographische Projektion ist ein Homöomorphismus von  $S^n \setminus \{N\}$ ,  $N := (0, \dots, 0, 1) \in \mathbb{R}^{n+1}$ , gegeben wie folgt:

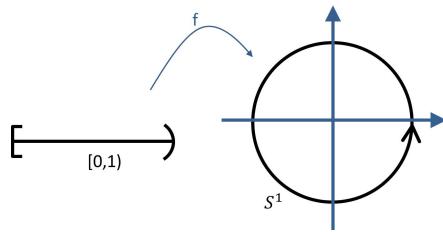
Der Schnitt der Geraden im  $\mathbb{R}^{n+1}$  durch  $N$  und  $x \in S^n \setminus \{N\}$  mit der Hyperebene  $\mathbb{R}^n = \{x \in \mathbb{R}^{n+1} \mid x_{n+1} = 0\}$ ,  $f(x)$ , ist gegeben durch  $x = (x_1, \dots, x_{n+1}) \mapsto (\frac{x_1}{1-x_{n+1}}, \frac{x_2}{1-x_{n+1}}, \dots, \frac{x_n}{1-x_{n+1}}) =: f(x)$  mit Umkehrabbildung  $y = (y_1, \dots, y_n) \mapsto (\frac{2y_1}{\|y\|^2+1}, \dots, \frac{2y_n}{\|y\|^2+1}, \frac{\|y\|^2-1}{\|y\|^2+1})$ .

**Definition I.20** (Einbettung).  $f: X \rightarrow Y$  stetig heißt Einbettung

$$\Leftrightarrow X \xrightarrow{f} f(X) \subset Y \text{ Homöomorphismus.}$$

**Beispiel:**

- Für  $A \subset X$  ist die Inklusion  $\iota: A \hookrightarrow X, x \mapsto x$ , stets eine Einbettung.
- $[0, 1] \rightarrow S^1$  ist keine Einbettung!



- Der Satz über die Umkehrabbildung/ Impliziter Funktionensatz aus der Analysis zeigt:  
Ist  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$  stetig differenzierbar und in  $p \in \mathbb{R}^n$  die Jacobi-Matrix  $Df(p)$  invertierbar, so existiert eine Umgebung von  $p$ , auf der  $f|_U$  eine Einbettung ist.

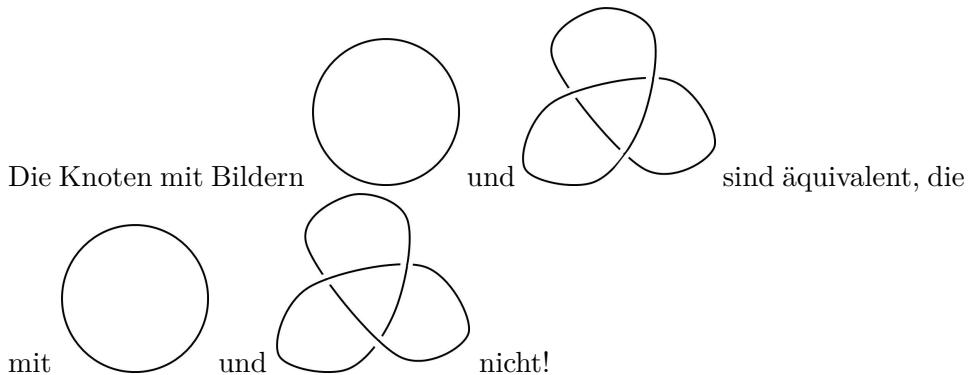
**Definition I.21** (Äquivalenz von Einbettungen). Zwei Einbettungen  $f, g: X \rightarrow Y$  heißen äquivalent : $\Leftrightarrow \exists$  Homöomorphismen  $h_X: X \rightarrow X, h_Y: Y \rightarrow Y$  mit  $g \circ h_X = h_Y \circ f$ , d.h. dass das Diagramm

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{f} & Y \\ h_x \downarrow & \curvearrowright & \downarrow h_y \\ X & \xrightarrow{g} & Y \end{array}$$

kommutiert.

**Definition I.22** (Knoten). Eine Einbettung  $S^1 \rightarrow \mathbb{R}^3$  heißt Knoten.

Beispiel:



## 4 Zusammenhang und Kompaktheit

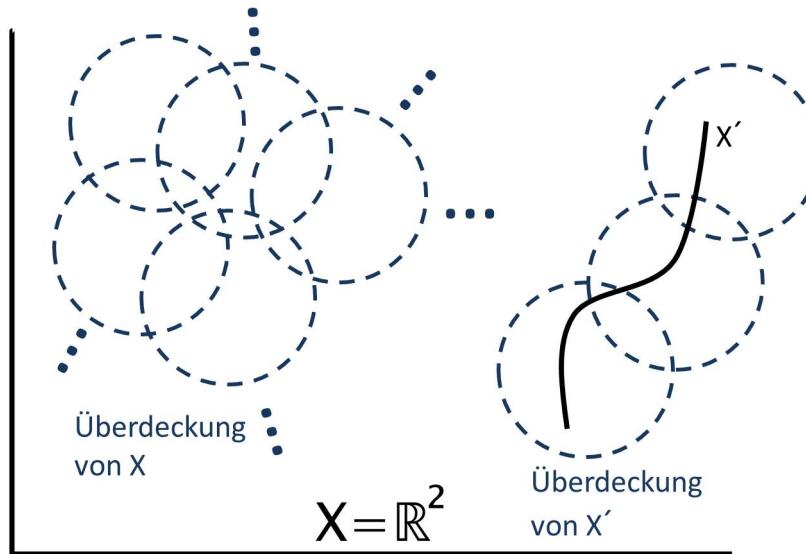
**Definition I.23** (zusammenhängend). Ein topologischer Raum heißt zusammenhängend : $\Leftrightarrow$  Die einzigen in  $X$  gleichzeitig offen und abgeschlossenen Teilmengen sind  $\emptyset$  und  $X$ .

Ansonsten heißt  $X$  un- oder nicht zusammenhängend.

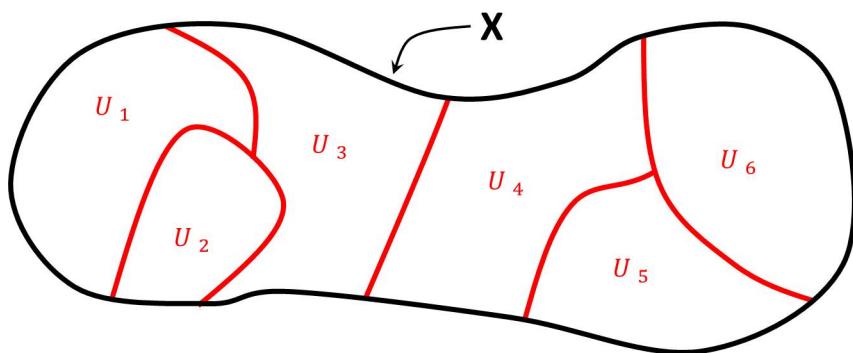
**Definition I.24** (Überdeckung). Eine Familie  $\mathcal{U} = \{U_\alpha \mid \alpha \in A\}$ <sup>4</sup> von Teilmengen von  $X$  heißt Überdeckung von  $X$  : $\Leftrightarrow X = \bigcup_{\alpha \in A} U_\alpha$ .

$\mathcal{U}$  heißt offene beziehungsweise abgeschlossene Überdeckung  $\Leftrightarrow$  alle  $U_\alpha$  sind offen beziehungsweise abgeschlossen.

Für  $X' \subset X$  heißt eine Familie  $\mathcal{U} = \{U_\alpha\}$  wie oben Überdeckung von  $X'$  : $\Leftrightarrow X' \subset \bigcup_{\alpha \in A} U_\alpha$ .



**Definition I.25** (Partition). Eine Partition oder Zerlegung einer Menge ist eine Überdeckung dieser Menge durch paarweise disjunkte, nichtleere Teilmengen.




---

<sup>4</sup> A Indexmenge

**Bemerkung I.13.** Ein topologischer Raum  $X$  ist zusammenhängend  $\Leftrightarrow$  Es existiert keine Partition von  $X$  in zwei nichtleere offene Teilmengen  $\Leftrightarrow$  es existiert keine Partition von  $X$  in zwei nichtleere abgeschlossene Teilmengen  
Denn:  $A \subset X$  ist offen und abgeschlossen  $\Leftrightarrow A$  und  $X \setminus A$  sind offen  $\Leftrightarrow A$  und  $X \setminus A$  sind abgeschlossen

**Beispiel:**

- $\mathbb{Q}$  als Teilmenge von  $\mathbb{R}$  ist nicht zusammenhängend, denn  $\mathbb{Q} = (\mathbb{Q} \cap (-\infty, \pi)) \cup (\mathbb{Q} \cap (\pi, +\infty))$ .
- Die einzigen zusammenhängenden und mit der diskreten Topologie versehenen Räume sind  $\emptyset$  und der nur aus einem Punkt bestehende Raum.

**Bemerkung I.14.** Allgemein sagt man von einer Menge, sie sei zusammenhängend, wenn diese, aufgefasst als Teilraum eines topologischen Raumes, zusammenhängend ist.

**Beispiel:**

$[0, 1] \subset \mathbb{R}$  ist zusammenhängend, aber  $[0, 1] \cup (2, 3)$  nicht!

**Beispiel:**

Eine Teilmenge  $A$  von  $\mathbb{R}_{T_1}$  ist zusammenhängend  $\Leftrightarrow A$  ist leer, einpunktig, oder unendlich!

**Bemerkung I.15.** Eigenschaften zusammenhängender Mengen

- $A$  zusammenhängend  $\Rightarrow \bar{A}$  zusammenhängend
- $A, B \subset X$  zusammenhängend,  $A \cap B \neq \emptyset \Rightarrow A \cup B$  zusammenhängend
- $A \cup B$  zusammenhängend,  $A \cap B$  zusammenhängend  $\not\Rightarrow A, B$  zusammenhängend ( $A = \mathbb{Q}, B = \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$ )

**Definition I.26** (Zusammenhangskomponente). Eine Zusammenhangskomponente eines topologischen Raumes  $X$  ist eine im Sinne der Inklusion von Mengen maximale zusammenhängende Teilmenge von  $X$ .

**Bemerkung I.16.**

- Jeder Punkt von  $X$  liegt genau in einer Zusammenhangskomponente, und diese ist die Vereinigung aller diesen Punkt enthaltenden zusammenhängenden Teilmengen.
- Zwei Zusammenhangskomponenten sind damit entweder gleich oder disjunkt.

- Zusammenhangskomponenten sind abgeschlossen.

**Satz I.1.** *Stetige Bilder zusammenhängender Mengen sind zusammenhängend.*

(D.h.: Ist  $f: X \rightarrow Y$  stetig und  $X$  zusammenhängend, so auch  $f(X) \subset Y$ .)

*Beweis.* Es sei ohne Einschränkung  $Y = f(X)$  und sei  $Y = U \cup V$  Partition von  $Y$  in zwei offene Mengen  $\Rightarrow f^{-1}(U), f^{-1}(V)$  sind offen in  $X$  ( $f$  stetig) und bilden eine Partition von  $X$ .  $X$  ist zusammenhängend.  $\Rightarrow f^{-1}(U)$  oder  $f^{-1}(V) = \emptyset$ .

Sei o.E.  $f^{-1}(U) = \emptyset \Rightarrow U = f(\emptyset) = \emptyset \Rightarrow V = f(X)$  ( $f$  surjektiv auf  $f(X)$ )

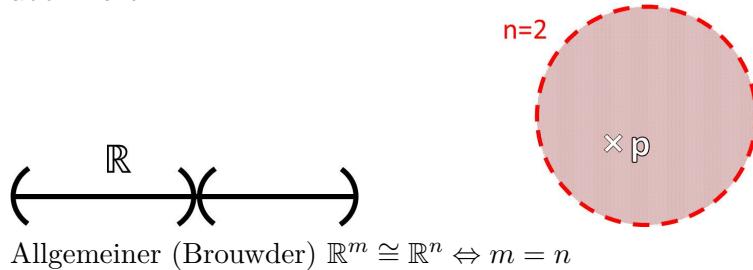
$\Rightarrow$  Es existiert keine Partition von  $Y$  in nichtleere offene Mengen  $\Leftrightarrow Y$  zusammenhängend.  $\square$

**Korollar I.1.** *Zusammenhang bleibt unter Homöomorphismen erhalten, und ebenso die Zahl der Zusammenhangskomponenten.*

### Beispiel:

Für  $n > 1$  sind  $\mathbb{R}^n$  und  $\mathbb{R}$  nicht homöomorph!

Denn:  $\mathbb{R}^n \cong \mathring{D}^n$  (Einheitskugel) und nimmt man aus  $\mathring{D}^n$  einen Punkt  $p$  heraus, so bleibt für  $n > 1$   $\mathring{D}^n \setminus \{p\}$  zusammenhängend,  $\mathring{D}^1 = (-1, 1) \cong \mathbb{R}$  aber nicht!

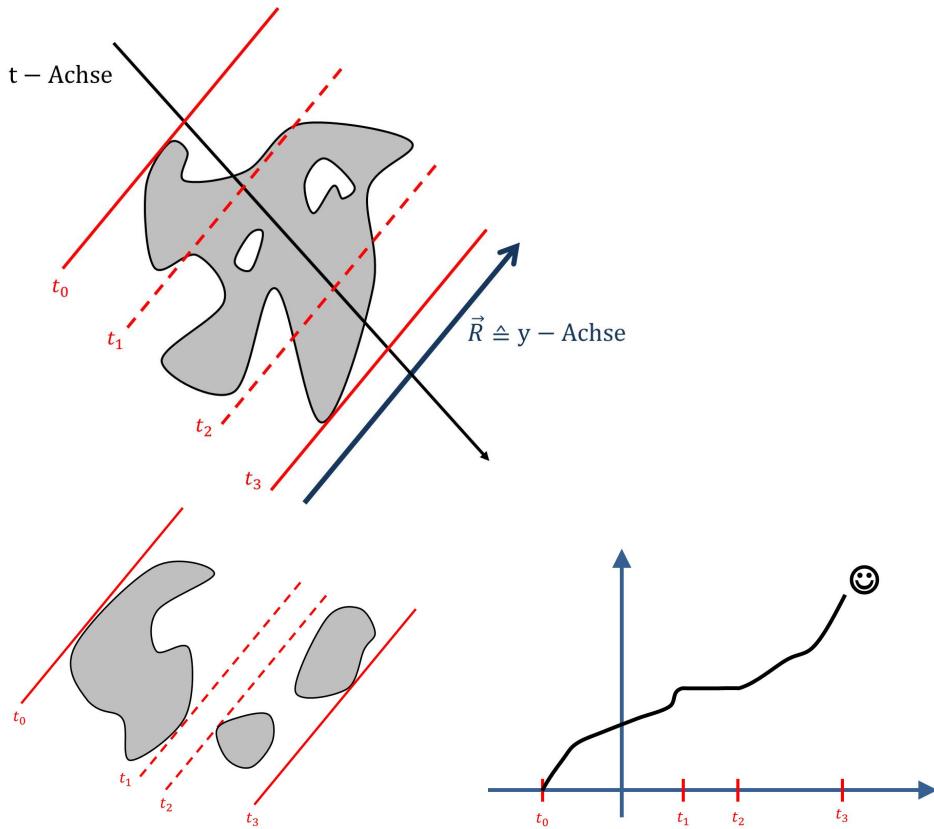


Allgemeiner (Brouwder)  $\mathbb{R}^m \cong \mathbb{R}^n \Leftrightarrow m = n$

**Korollar I.2.** *Zwischenwertsatz: Eine stetige Funktion  $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  nimmt jeden Wert zwischen  $f(a)$  und  $f(b)$  an.*

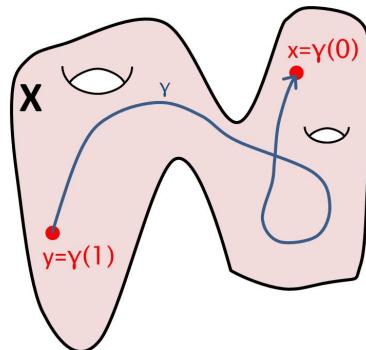
### Beispiel: Waffelteilen

Eine Waffel, wie unregelmäßig auch immer, lässt sich immer in zwei gleich große Teile schneiden.



Bei unzusammenhängenden Waffeln ist die Schnittgerade selbst bei vorgegebener Schnittrichtung nicht eindeutig.

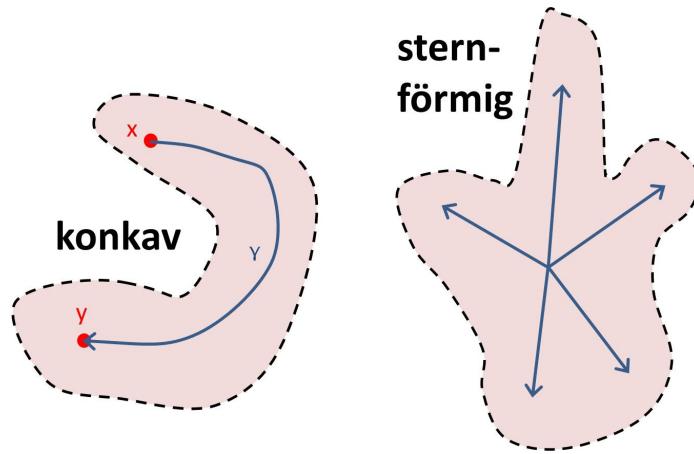
**Definition I.27** (Weg, Anfangspunkt, Endpunkt). ein Weg in einem topologischen Raum  $X$  ist eine stetige Abbildung  $\gamma: [0, 1] \rightarrow X$ , und  $\gamma(0)$  heißt Anfangs-,  $\gamma(1)$  Endpunkt.



**Definition I.28** (Wegzusammenhang).  $X$  heißt wegzusammenhängend

$\Leftrightarrow$  Zu je zwei Punkten  $x, x' \in X \quad \exists$  Weg  $\gamma: [0, 1] \rightarrow X$

mit  $\gamma(0) = x, \gamma(1) = x'$ .



**Beispiel:**

$$A = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x > 0, y = \sin \frac{1}{x}\} \subset \mathbb{R}^2$$

$$B = A \cup \{(0, 0)\}$$

$\Rightarrow B$  ist zusammenhängend, aber nicht wegzusammenhängend.

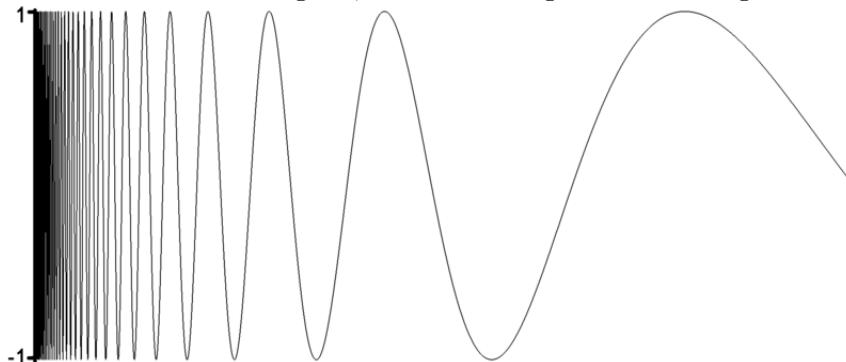


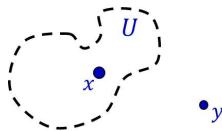
Bild: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Sinuseinsdurchx.png&filetimestamp=20080624085708>

**Definition I.29** (Kompaktheit). Ein topologischer Raum  $X$  heißt kompakt, falls jede offene Überdeckung von  $X$  eine endliche Teilüberdeckung enthält.

## 5 Trennungseigenschaften

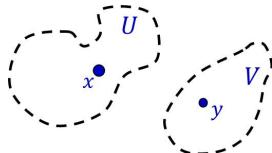
**Definition I.30** ( $T_1$ -Raum). Ein topologischer Raum  $X$  heißt  $T_1$ -Raum bzw. erfüllt das erste Trennungsaxiom : $\Leftrightarrow$  Für je zwei verschiedene Punkte von  $X$  existiert für jeden dieser Punkte eine Umgebung in  $X$ , die den anderen nicht enthält.

$$\forall x \neq y \in X \exists U = U_x : y \notin U_x$$



**Definition I.31** ( $T_2$ -Raum).  $X$  heißt Hausdorff- oder  $T_2$ -Raum bzw. erfüllt das zweite Trennungsaxiom : $\Leftrightarrow$  Je zwei verschiedene Punkte in  $X$  besitzen disjunkte Umgebungen.

$$\forall x \neq y \in X \exists U_x \ni x, U_y \ni y \text{ mit } U_x \cap U_y = \emptyset$$

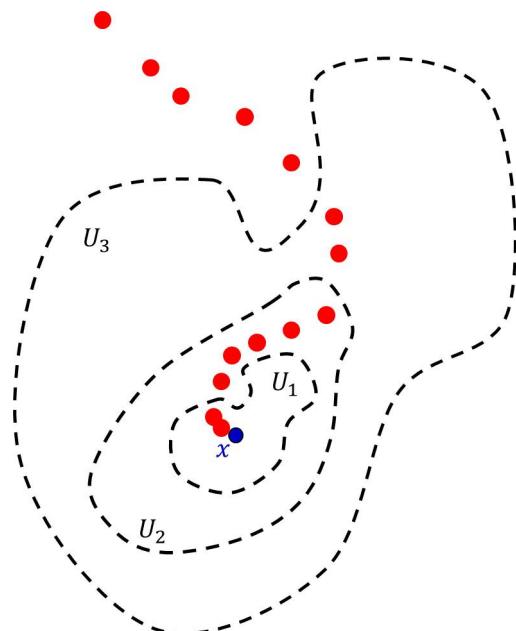


### Beispiel:

Jeder metrische Raum ist Hausdorff-Raum.

**Bemerkung I.17.** Hausdorff-Räume sind z.B. deshalb wichtig, weil Grenzwerte dort eindeutig sind!

**Definition I.32** (Grenzwert). Ist  $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$  eine Folge von Punkten in einem topologischen Raum  $X$ , so heißt  $x \in X$  Grenzwert der Folge  $(x_n)$  genau dann, wenn zu jeder Umgebung  $U$  von  $x$  ein  $N \in \mathbb{N}$  existiert mit  $x_n \in U \quad \forall n \geq N$ .



**Beispiel:**

In einem Hausdorff-Raum hat jede Folge höchstens einen Grenzwert.

**Bemerkung I.18.** Hausdorff-Räume sind auch  $T_1$ -Räume, aber:

**Beispiel:**

In  $X = \mathbb{R}_{T_1}$  ist jeder Punkt abgeschlossen ( $\Rightarrow T_1$ ), doch je zwei nichtleere offene Mengen schneiden sich -  $X$  ist damit nicht  $T_2$ ! "Schlimmer": In  $\mathbb{R}_{T_1}$  ist jeder Punkt Grenzwert der Folge  $x_n = n$ ! Denn eine Umgebung eines Punktes in  $\mathbb{R}_{T_1}$  hat die Form  $U = \mathbb{R} \setminus \{x_1, \dots, x_M\}$  mit  $x_1 < \dots < x_M$ . Dann gilt aber  $x_n = n \in U \forall n > x_M$ .

## 6 Abzählbarkeitsaxiome und lokale Kompaktheit

**Definition I.33** (Umgebungsbasis). Ist  $X$  topologischer Raum und  $x \in X$ , so ist eine Umgebungsbasis oder Basis von  $X$  in  $x$  eine Familie von Umgebungen von  $x$ , sodass jede Umgebung von  $x$  eine Umgebung aus der Familie enthält.

**Beispiel:**

Ist  $B$  Basis der Topologie eines Raumes  $X$ , so ist für jedes  $x \in X$   $\{U \in B \mid x \in U\}$  eine Basis von  $X$  in  $x$ .

**Beispiel:**

In einem metrischen Raum  $X$  sind folgende Mengen von Bällen Basen von  $X$  in  $x \in X$ :

- alle offenen Bälle mit Zentrum  $x$
- alle offenen Bälle mit Zentrum  $x$  und rationalen Radii

**Beispiel:**

Ist  $X$  mit der diskreten bzw. trivialen Topologie versehen, so ist die ‘kleinste’ Basis in  $x \in X$  gegeben durch  $\{\{x\}\}$  bzw.  $\{X\}$ .

**Definition I.34** (Abzählbarkeitsaxiome, Separabilität).  $X$  erfüllt das erste Abzählbarkeitsaxiom : $\Leftrightarrow$  jeder Punkt  $x \in X$  besitzt eine abzählbare Basis.

$X$  erfüllt das zweite Abzählbarkeitsaxiom : $\Leftrightarrow X$  selbst besitzt eine abzählbare Basis.

$X$  heißt separabel : $\Leftrightarrow X$  enthält eine abzählbare und dichte ( $\bar{A} = X$ ) Menge  $A$ .

**Bemerkung I.19.** Das zweite Abzählbarkeitsaxiom impliziert das erste, aber:

**Beispiel:**

Überabzählbare diskrete Räume (wie  $(\mathbb{R}, \mathcal{O}_{diskret})$ ) erfüllen nach Beispiel 6 das erste Abzählbarkeitsaxiom, nicht aber das zweite!

**Bemerkung I.20.** Jeder metrische Raum erfüllt das erste Abzählbarkeitsaxiom und jeder separable metrische Raum auch das zweite.

**Beispiel:**

$\mathbb{R}_{T_1}$  erfüllt nicht das erste Abzählbarkeitsaxiom, ist aber separabel -  $\mathbb{N}$  ist dicht!

**Beispiel:**

Euklidische Räume und alle ihre Teilmengen erfüllen das 2. Abzählbarkeitsaxiom und sind separabel.

Wozu das Ganze?

~~ Funktionenräume

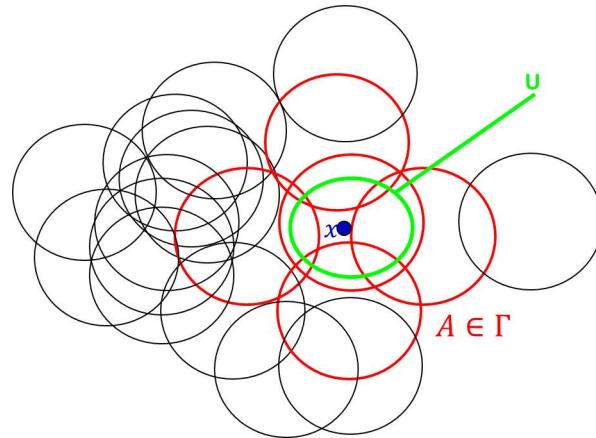
~~ Mannigfaltigkeiten

~~ Satz von Lindelöf: Jede offene Überdeckung eines Raumes, der das zweite Abzählbarkeitsaxiom erfüllt, enthält auch eine abzählbare Teilüberdeckung.

**Definition I.35** (Lokale Kompaktheit).  $X$  heißt lokal kompakt

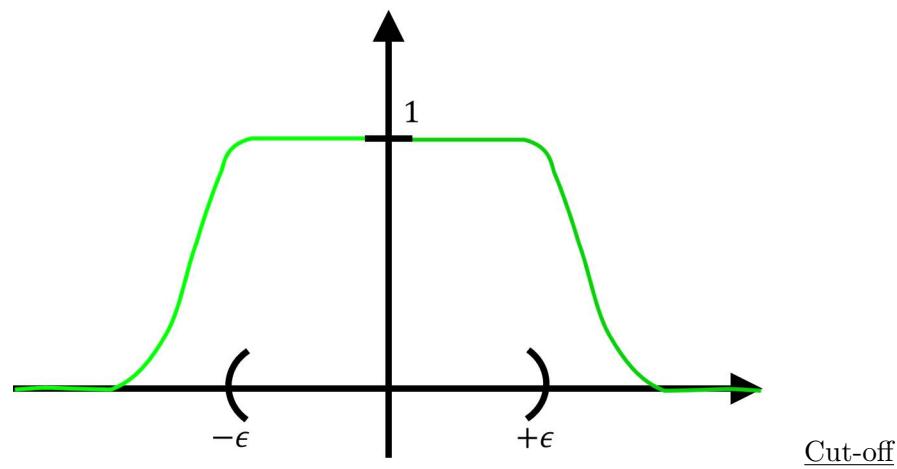
$\Leftrightarrow$  Jeder Punkt  $x \in X$  besitzt eine Umgebung  $U$ , sodass  $\overline{U}$  kompakt ist.

**Definition I.36** (Lokale Endlichkeit). Eine Familie  $\Gamma$  von Teilmengen eines topologischen Raumes  $X$  heißt lokal endlich : $\Leftrightarrow \forall x \in X \quad \exists U = U(x): A \cap U = \emptyset \quad \forall A \in \Gamma$  bis auf endlich viele  $A$ .



**Definition I.37** (Verfeinerung).  $\Gamma, \Delta$  Überdeckungen von  $X$ .  $\Delta$  heißt Verfeinerung von  $\Gamma$   
 $\Leftrightarrow \forall A \in \Delta \exists B \in \Gamma: A \subset B$ .

**Definition I.38** (Parakompaktheit).  $X$  heißt parakompakt : $\Leftrightarrow$  Jede offene Überdeckung besitzt eine lokal endliche offene Verfeinerung.



**Beispiel:**

- Kompakte Räume sind parakompakt.
- $\mathbb{R}^n$  ist parakompakt.
- Mannigfaltigkeiten sind parakompakt!

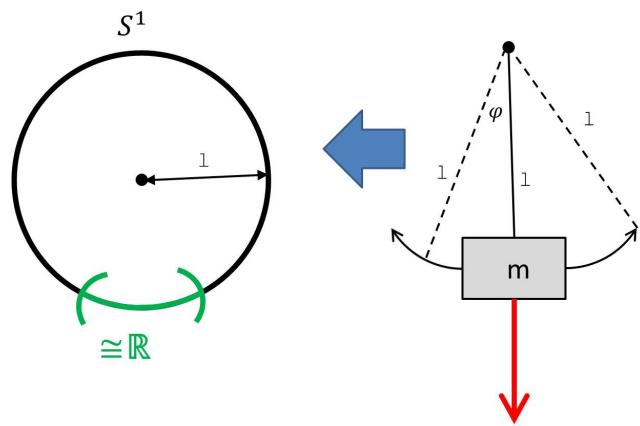
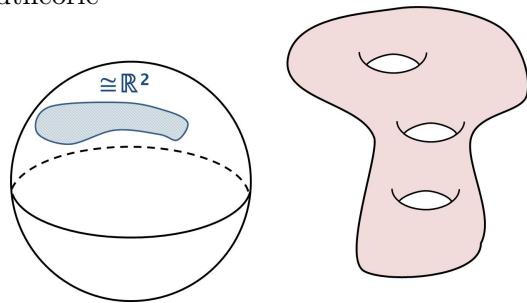
**Bemerkung I.21.** Parakompaktheit ist wichtig, da dann bestimmte Einbettungen und sogenannte Zerlegungen der Eins existieren.

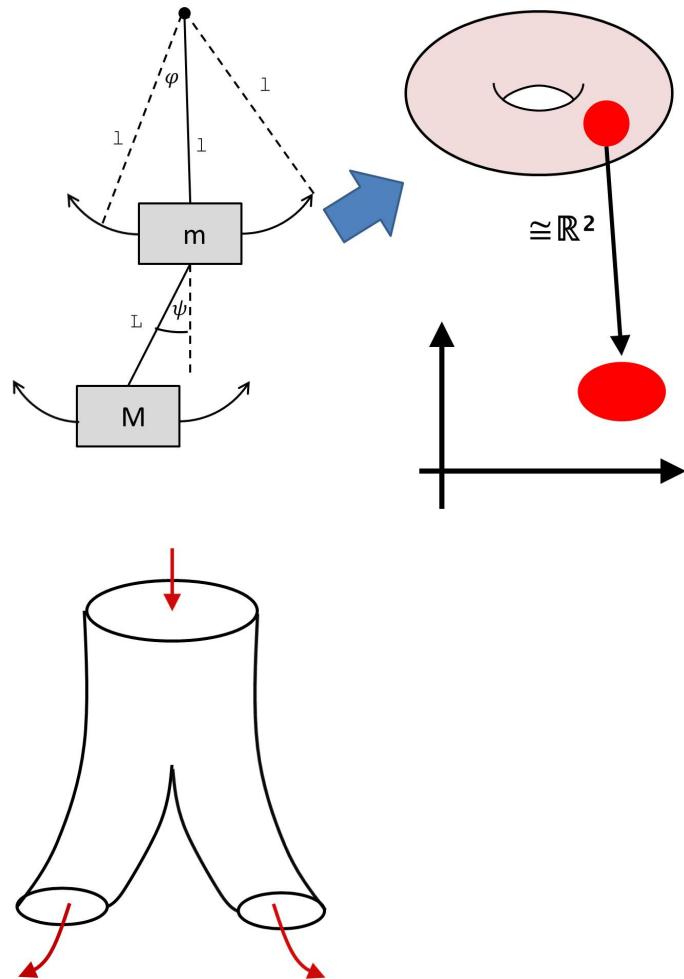
## Kapitel II

# Geometrische Beispiele und Konstruktionen topologischer Räume

### 1 Mannigfaltigkeiten

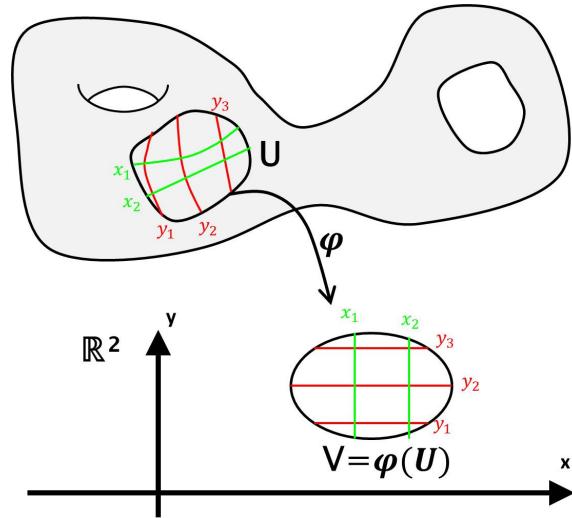
Beispiele zu Mannigfaltigkeiten (Exkurs) Doppelpendel, Quantenfeldtheorie





**Definition II.1** (Mannigfaltigkeit, Karte). Ein topologischer Raum  $M$  heißt  $n$ -dimensionale (topologische) Mannigfaltigkeit, wenn gilt:

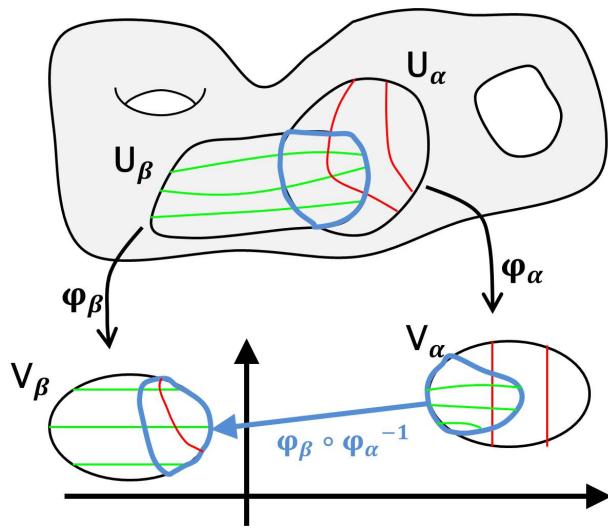
1.  $M$  ist ein Hausdorff-Raum mit abzählbarer Basis der Topologie
  2.  $M$  ist lokal homöomorph zu  $\mathbb{R}^n$ , d.h. zu jedem  $p \in M$  existieren eine Umgebung  $U = U(p) \subset_{\text{offen}} M$  und ein Homöomorphismus  $\varphi: U \rightarrow V, V \subset_{\text{offen}} \mathbb{R}^n$ .
- Jedes solche Paar  $(U, \varphi)$  heißt eine Karte oder ein lokales Koordinatensystem um  $p$ .



**Bemerkung II.1.** Die Zahl  $n$ , die Dimension von  $M$ , ist eindeutig bestimmt! (folgt aus Brouwers Satz von der Invarianz des Gebietes)

**Definition II.2** (Atlas). Ein Atlas für eine topologische  $n$ -Mannigfaltigkeit  $M$  ist eine Menge  $\mathcal{A} = \{(\varphi_\alpha, U_\alpha) \mid \alpha \in \Lambda\}$ <sup>1</sup> von Karten  $\varphi_\alpha: U_\alpha \rightarrow V_\alpha = \varphi(U_\alpha) \subset \mathbb{R}^n$ , so dass  $M = \bigcup_{\alpha \in \Lambda} U_\alpha$

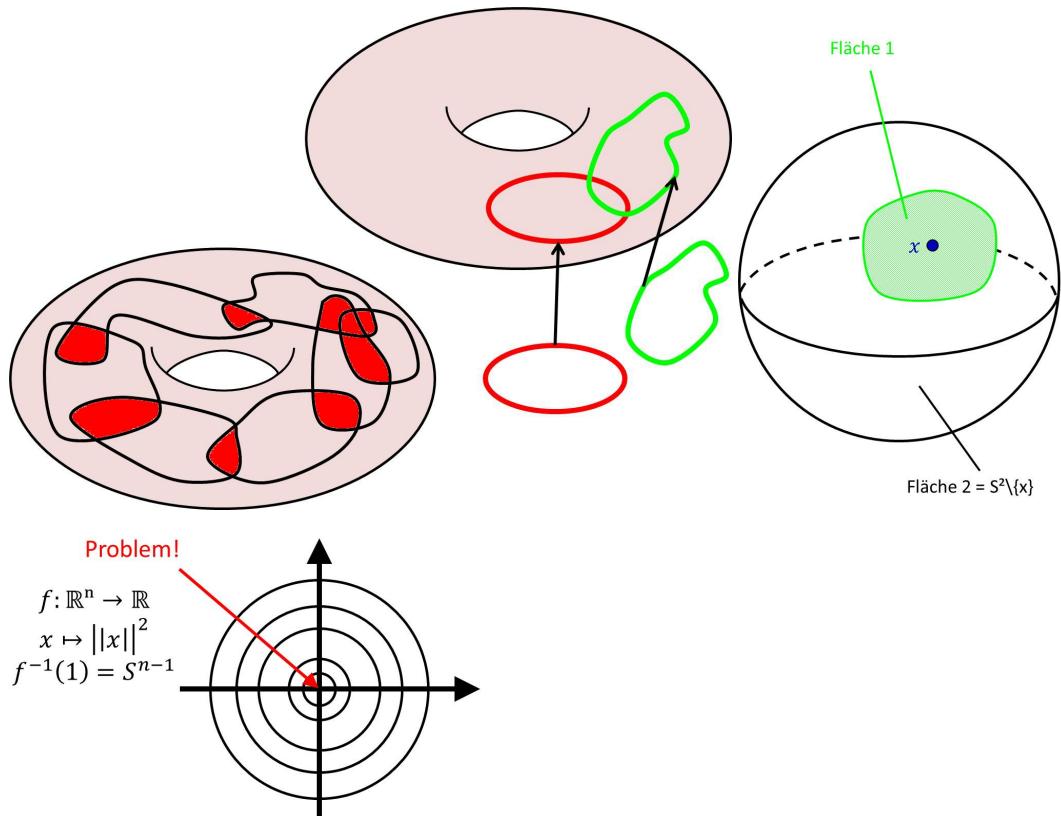
**Definition II.3** ( $C^k$ -Atlas, Kartenwechsel). Ein Atlas heißt differenzierbar von der Klasse  $C^k$  (oder:  $C^k$ -Atlas von  $M$ ), wenn für alle  $\alpha, \beta \in \Lambda$  mit  $U_\alpha \cap U_\beta \neq \emptyset$  der Kartenwechsel  $\varphi_\beta \circ \varphi_\alpha^{-1}: \varphi_\alpha(U_\alpha \cap U_\beta) \rightarrow \varphi_\beta(U_\alpha \cap U_\beta)$  eine  $C^k$ -Abbildung, also  $k$ -mal stetig differenzierbar ist. ( $k = 0, 1, 2, \dots, \infty, \omega$ )



<sup>1</sup>  $\Lambda$  Indexmenge

**Definition II.4** (Verträglichkeit, differenzierbare Struktur). Ist  $M$  topologische Mannigfaltigkeit und  $\mathcal{A} = \{(\varphi_\alpha, U_\alpha) \mid \alpha \in \Lambda\}$  ein  $C^k$ -Atlas von  $M$ , so heißt eine Karte  $(\varphi, U)$  von  $M$  mit  $\mathcal{A}$  verträglich, falls  $\mathcal{A}' := \mathcal{A} \cup \{(\varphi, U)\}$  ebenfalls  $C^k$ -Atlas ist. Ein  $C^k$ -Atlas heißt maximal (oder differenzierbare Struktur (der Klasse  $C^k$ )), falls  $\mathcal{A}$  alle mit  $\mathcal{A}$  verträglichen Karten enthält.

**Definition II.5** ( $C^k$ -Mannigfaltigkeit, glatt). Eine differenzierbare Mannigfaltigkeit der Klasse  $C^k$  (kurz:  $C^k$ -Mannigfaltigkeit) ist ein Paar  $(M, \mathcal{A})$  bestehend aus einer topologischen Mannigfaltigkeit  $M$  und einer  $C^k$ -Struktur auf  $M$ . Eine  $C^\infty$ -Mannigfaltigkeit heißt auch glatt.



Richtig toller Exkurs zu Mannigfaltigkeiten ... Killing-Fields, Lie-Groups (festgenommener Matheprof kurz nach 9/11), Perverse Garben, wir leben in einer 4-dimensionalen Mannigfaltigkeit, ...

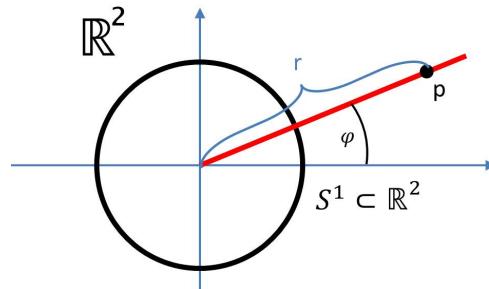
**Bemerkung II.2.** Bemerkung zur Produkt-Topologie

- Produkte von Hausdorff-Räumen sind Hausdorff-Räume.
- Produkte von zusammenhängenden Räumen sind zusammenhängend.
- Produkte von wegzusammenhängenden Räumen sind wegzusammenhängend.
- Produkte von kompakten/separablen Räumen sind kompakt/separabel.
- Produkte von Räumen, die das erste oder zweite Abzählbarkeitsaxiom erfüllen, erfüllen diese auch.

**Folgerung** Produkte topologischer oder differenzierbarer Mannigfaltigkeiten sind topologische oder differenzierbare<sup>2</sup> Mannigfaltigkeiten.

**Beispiel:**

- $\mathbb{R}^2 \setminus \{0\} \cong S^1 \times \mathbb{R}^{>0}$  (Polarkoordinaten)



- $O(n) \cong SO(n) \times O(1)$
- $(S^1)^n := \underbrace{S^1 \times \dots \times S^1}_{n \text{ mal}}$  heißt n-dimensionaler Torus (TODO: Bild 3:  
Exkurs höherdimensionale Sphären)

---

<sup>2</sup>( $C^\infty$ )

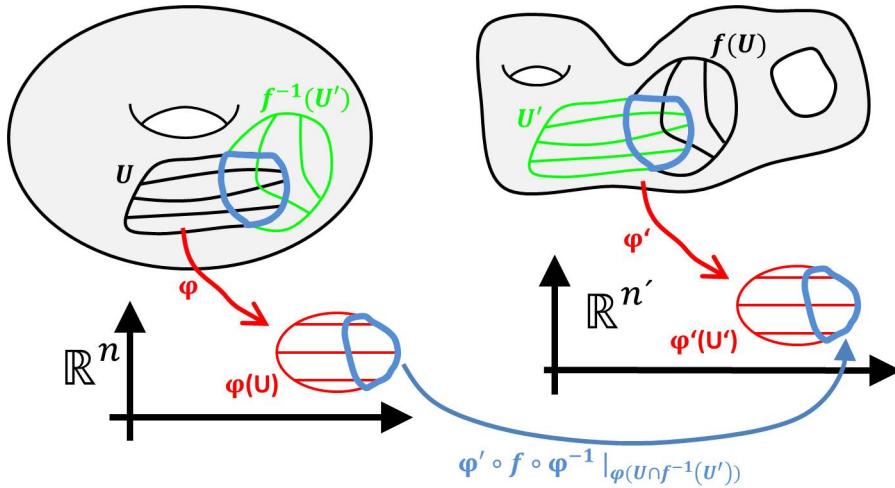
## 1.1 Differenzierbare Abbildungen

**Definition II.6** ( $C^l$ -Abbildung). Es seien  $(M, \mathcal{A})$  eine  $n$ -dimensionale  $C^k$ -Mannigfaltigkeit,  $(M', \mathcal{A}')$  eine  $n'$ -dimensionale  $C^{k'}$ -Mannigfaltigkeit und  $l \leq \min(k, k')$ . Eine stetige Abbildung  $f: M \rightarrow M'$  heißt differenzierbar (von der Klasse  $C^l$ ) oder kurz:  $C^l$ -Abbildung, falls gilt:

$$\forall (\varphi, U) \in \mathcal{A} \text{ und } (\varphi', U') \in \mathcal{A}' \text{ mit } f(U) \cap U' \neq \emptyset \text{ ist}$$

$$\boxed{\varphi' \circ f \circ \varphi^{-1}: \varphi(U \cap f^{-1}(U')) \rightarrow \varphi'(f(U) \cap U')}$$

eine  $C^l$ -Abbildung im üblichen Sinn.



TODO: Exkurs über Tangentialvektoren, Vektorfelder, Satz vom Igel, Physik des starren Körpers, Differentialtopologie

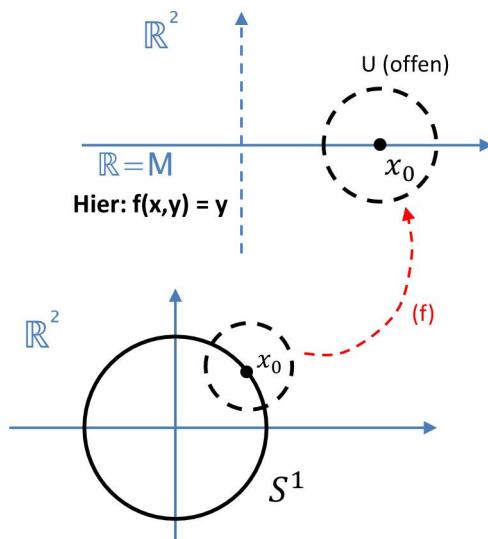
**Spezielle Mannigfaltigkeiten: Untermannigfaltigkeiten topologischer Räume:**

**Satz II.1** (Äquivalente Beschreibungen einer Untermannigfaltigkeit von  $\mathbb{R}^{n+l}$ ). Für Teilmengen  $M \subset \mathbb{R}^{n+l}$  sind äquivalent:

(a)  $\forall x_0 \in M \exists U \text{ Umgebung } U = U(x_0) \subset_{\text{offen}} \mathbb{R}^{n+l} \text{ und}$

$$f \in C^\infty(U, \mathbb{R}^l) := \{g: U \rightarrow \mathbb{R}^l \mid g \text{ ist } C^\infty\} \text{ mit } \text{Rang } Df(x) = l \quad \forall x \in U$$

<sup>3</sup> dergestalt, dass  $U \cap M = f^{-1}(0) = \{x \in U \mid f(x) = 0\}$



(b)  $\forall x_0 \in M \exists U = U(x_0) \subset_{\text{offen}} \mathbb{R}^{n+l} \text{ und } \varphi: U \rightarrow \mathbb{R}^{n+l} \text{ mit folgenden Eigenschaften: } \varphi(U) \subset \mathbb{R}^{n+l} \text{ ist offen, } \varphi \text{ ist } C^\infty\text{-Diffeomorphismus } U \rightarrow \varphi(U) \text{ und}$

$$\varphi(U \cap M) = \varphi(U) \cap (\mathbb{R}^n \times \{0\}) = \{(y_1, \dots, y_{n+l}) \in \varphi(U) \mid y_{n+1} = \dots = y_{n+l} = 0\}$$

(c)  $\forall x_0 \in M \exists U = U(x_0) \subset_{\text{offen}} \mathbb{R}^{n+l}, W \subset \mathbb{R}^n \text{ offen und } \psi \in C^\infty(W, U)$  mit

- $\psi$  ist Homöomorphismus  $W \rightarrow U \cap M$
- $D\psi(w)$  ist injektiv für alle  $w \in W$

(Jedes solche  $\psi$  heißt lokale Parametrisierung von  $M$ ).

---

<sup>3</sup>  $Df$  ist die Jacobi-Matrix von  $f$

### Interpretation

- (a) besagt:  $U \cap M$  ist (im Sinne der Rangbedingung) durch  $l$  unabhängige Gleichungen  $f_1(x) = \dots = f_l(x) = 0$  definiert.
- (b) besagt: nach Anwendung eines Diffeomorphismus sieht  $U \cap M$  wie eine offene Teilmenge eines linearen Unterraumes von  $\mathbb{R}^{n+l}$  aus.
- (c) besagt:  $M$  lässt sich lokal parametrisieren.

**Definition II.7** (Untermannigfaltigkeit). Eine Menge  $M \subset \mathbb{R}^{n+l}$ , die eine der Bedingungen (a), (b) oder (c) erfüllt, heißt dann  $n$ -dimensionale (glatte/differenzierbare) Untermannigfaltigkeit von  $\mathbb{R}^{n+l}$ .

**Satz II.2.** Äquivalente Beschreibung einer glatten Untermannigfaltigkeit von  $\mathbb{R}^{n+l}$ . Es sei  $M \subseteq \mathbb{R}^{n+l}$ . Es sind äquivalent:

- (a)  $\forall x_0 \in M \exists U = U(x_0) \subseteq_{\text{offen}} \mathbb{R}^{n+l}$  und  $f \in C^\infty(U, \mathbb{R}^l)$  mit Rang  $Df(x) = l$  für alle  $x \in U$  dergestalt, dass  $U \cap M = f^{-1}(0)$ .
- (b)  $\forall x_0 \in M \exists U = U(x) \subseteq_{\text{offen}} \mathbb{R}^{n+l}$  und  $\varphi: U \rightarrow \mathbb{R}^{n+l}$  mit folgenden Eigenschaften:
  - $\varphi(U) \subseteq \mathbb{R}^{n+l}$  ist offen
  - $\varphi$  ist  $C^\infty$ -Diffeomorphismus  $U \rightarrow \varphi(U)$
  - $\varphi(U \cap M) = \varphi(U) \cap (\mathbb{R}^n \times \{0\}) = \{(y_1, \dots, y_n) \in \varphi(U) \mid y_{n+1} = \dots = y_{n+l} = 0\}$
- (c)  $\forall x_0 \in M \exists U = U(x_0) \subseteq_{\text{offen}} \mathbb{R}^{n+l}$ ,  $W \subseteq \mathbb{R}^n$  offen und  $\psi \in C^\infty(W, U)$  mit folgenden Eigenschaften:
  - $\psi$  ist Homöomorphismus  $W \rightarrow U \cap M$
  - $D\psi(w)$  ist injektiv für alle  $w \in W$ .

### Beispiel:

zu (a)

Die  $n$ -Sphäre vom Radius  $r$

$$S_r^n = \{x \in \mathbb{R}^{n+1} \mid \|x\| = r\}$$

ist eine  $n$ -dimensionale glatte Untermannigfaltigkeit von  $\mathbb{R}^{n+1}$ .

Denn: Definiere  $f: \mathbb{R}^{n+1} \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $x \mapsto \|x\|^2 - r^2$ . Dann gilt:

- $S_r^n = f^{-1}(0)$  und
- $Df(x) = (2x_1, \dots, 2x_{n+1}) = 2x$  erfüllt Rang  $Df(x) = 1$  für alle  $x \in \mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\} \supseteq S_r^n$  (wegen  $\|x\| = \sqrt{x_1^2 + \dots + x_{n+1}^2}$ ).

Allgemeiner:

- Niveaumengen: Es seien  $V \subseteq_{\text{offen}} \mathbb{R}^{n+l}$ ,  $f \in C^\infty(V, \mathbb{R}^l)$ ,  $c \in \mathbb{R}^l$ . Gilt  $\text{Rang } Df(x) = l$  in jedem Punkt  $x$  der Niveaumenge

$$f^{-1}(c) = \{x \in V \mid f(x) = c\},$$

so ist  $f^{-1}(c)$  eine glatte  $n$ -dimensionale Untermannigfaltigkeit von  $\mathbb{R}^{n+l}$ .

*Beweis.* (a) $\Rightarrow$ (b): Es seien  $U$  und  $f$  wie in (a) gewählt und  $f_1, \dots, f_l$  die Komponenten von  $f$ . Sei  $x_0 \in M$ . Durch Umnummerierung seien die Indizes so gewählt, dass ohne Einschränkung die Reihenfolge so, dass die  $(l \times l)$ -Matrix

$$\left( \frac{\partial f_i}{\partial x_{n+j}} \right)_{i,j \in \{1, \dots, l\}}$$

in  $x_0$  invertierbar ist. Definiere die Abbildung  $\varphi: U \rightarrow \mathbb{R}^{n+l}$ ,  $x \mapsto (x_1, \dots, x_n, f_1(x), \dots, f_l(x))$ . Dann gilt:

$$D\varphi(x_0) = (\text{TODO : Matrix2})$$

und damit

$$\det D\varphi(x_0) = \det \left( \frac{\partial f_i}{\partial x_{n+j}} \right)_{i,j} \neq 0.$$

Mit dem Satz über inverse Funktionen (oder "Satz über die Umkehrabbildung") folgt: Es existieren Umgebungen  $U' = U'(x_0) \subseteq U$  und  $V'(\varphi(x_0)) \subseteq V = \varphi(U)$ , so dass  $\varphi|_{U'}: U' \rightarrow V'$  ist  $C^\infty$ -Diffeomorphismus.

Es gilt:  $\varphi(U' \cap M) = \{(y_1, \dots, y_{n+l}) \in \varphi(U') \mid y_{n+1} = \dots = y_{n+l} = 0\}$ , denn: " $\subseteq$ " : ist klar nach Definition von  $f$  und  $\varphi$ .

" $\supseteq$ " : Ist  $y$  Element der rechten Seite, so existiert  $x \in U'$  mit  $\varphi(x) = y$  und  $f(x) = 0$ . Da  $x \in U' \subseteq U$  und  $f(x) = 0$ , gilt:  $x \in U' \cap M$ , und damit  $y = \varphi(x) \in \varphi(U' \cap M)$ .

(b) $\Rightarrow$ (c): Es seien  $U$  und  $\varphi$  wie in (b) gewählt und

$$\pi: \mathbb{R}^{n+l} = \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^l \rightarrow \mathbb{R}^n, (x_1, \dots, x_{n+l}) \mapsto (x_1, \dots, x_n),$$

die Projektion und

$$\iota: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n+l}, (x_1, \dots, x_n) \mapsto (x_1, \dots, x_n, 0, \dots, 0)$$

die Inklusion.

Setze  $W := \pi(\varphi(U \cap M))$  und definiere  $\psi: W \rightarrow U$  durch  $\psi := \varphi^{-1} \circ \iota$ .

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{R}^{n+l} & \xrightleftharpoons[\pi]{\iota} & \mathbb{R}^n \\ \varphi \uparrow & & \downarrow \\ U & \xleftarrow[\psi = \varphi^{-1} \circ \iota]{} & W \end{array}$$

Dann ist  $W$  offen und  $\psi: W \rightarrow U \cap M$  ein Homöomorphismus, denn  $\iota': W \rightarrow \varphi(U \cap M)$  ist Homöomorphismus und  $\varphi^{-1}: \varphi(U \cap M) \rightarrow U \cap M$  ist Homöomorphismus.

Mit der Kettenregel folgt: Für alle  $w \in W$  gilt:

$$\begin{aligned} D\psi(w) &= D(\varphi^{-1} \circ \iota')(w) = (D\varphi^{-1})(\iota'(w)) \cdot D\iota'(w) \\ (D\varphi^{-1})(y) &= ((D\varphi)(\varphi^{-1}(y)))^{-1} ((D\varphi)(\varphi^{-1}(\iota'(w))))^{-1} \circ \iota' \\ &= (D\varphi(\psi(w)))^{-1} \circ \iota'. \end{aligned}$$

Somit ist  $D\psi(w)$  als Komposition einer bijektiven und einer injektiven Abbildung injektiv für alle  $w \in W$ .

(c) $\Rightarrow$ (a): Es seien  $U, W$  und  $\psi$  wie in (c) gewählt und  $\psi(\hat{w}) = x_0$  für  $\hat{w} \in W$ . Da Rang  $D\psi(\hat{w}) = n$  folgt nach evtl. Umnummerierung

$$\left( \frac{\delta \psi_i}{\delta w_j} (\hat{w}) \right)_{i,j \in \{1, \dots, n\}}$$

ist invertierbar. Definiere  $g: W \times \mathbb{R}^l \rightarrow \mathbb{R}^{n+l}, (w, y) \mapsto \psi(w) + (0, y)$ , d.h.  $g(w_1, \dots, w_n, y_1, \dots, y_l) = (\psi_1(w), \dots, \psi_n(w), \psi_{n+1}(w) + y_1, \psi_{n+l}(w) + y_l)$ . Dann gilt:

$$Dy(\hat{w}, 0) = (TODO : Matrix4)$$

ist invertierbar. Mit dem Satz über inverse Funktionen folgt: Es existieren Umgebungen  $V = V((\hat{w}, 0)) \subseteq W \times \mathbb{R}^l$  und  $U' = U'(g(\hat{w}, 0))$ , so dass  $g|_V: V \rightarrow U'$  ein  $C^\infty$ -Diffeomorphismus ist.

Verkleinert man gegebenenfalls  $V$ , so kann man ohne Einschränkung annehmen, dass gilt:  $U' \subseteq U$ . Da  $\{w \in W \mid (w, 0) \in V\}$  offen ist in  $W$  und  $\psi: W \rightarrow \psi(W)$  nach Voraussetzung ein Homöomorphismus ist, folgt:  $\{\psi(w) \mid (w, 0) \in V\}$  ist offen in  $\psi(W)$ .

Nach Definition der Unterraumtopologie existiert  $U'' \subseteq_{\text{offen}} \mathbb{R}^{n+l}$  mit  $\{\psi(w) \mid (w, 0) \in V\} = U'' \cap \psi(W)$ .

Wegen  $\psi(w) = g(w, 0)$  bedeutet dies:

$$(*) U'' \cap \psi(W) = g(V \cap (W \times \{0\})).$$

Setze  $\tilde{U} := U' \cap U''$ ,  $\tilde{V} := (g|_V)^{-1}(\tilde{U}) = g^{-1}(\tilde{U}) \cap V$ . Dann ist  $g|_{\tilde{V}}: \tilde{V} \rightarrow \tilde{U}$  ein  $C^\infty$ -Diffeomorphismus.

Behauptung: Es gilt:  $\tilde{U} \cap M = g(\tilde{V} \cap (\mathbb{R}^n \times \{0\}))$ .

[Beweis: folgt mit (\*)].

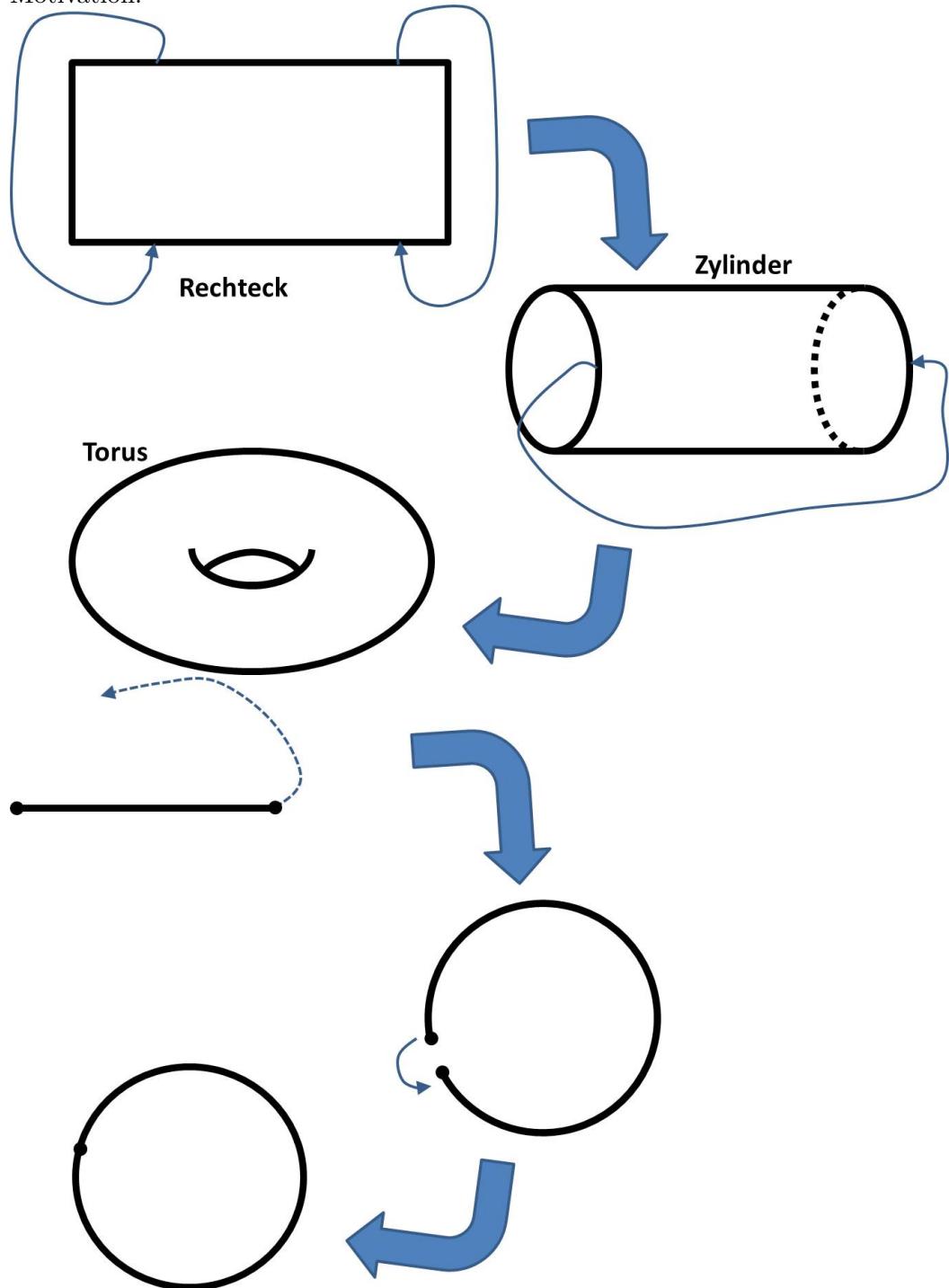
Ist  $\pi: \mathbb{R}^{n+l} \rightarrow \mathbb{R}^l$ ,  $(x_1, \dots, x_{n+l}) \mapsto (x_{n+1}, \dots, x_{n+l})$  die Projektion, so erfüllt  $f := \pi \circ (g|_{\tilde{V}})^{-1}: \tilde{U} \rightarrow \mathbb{R}^l$  die Bedingung in (a).  $\square$

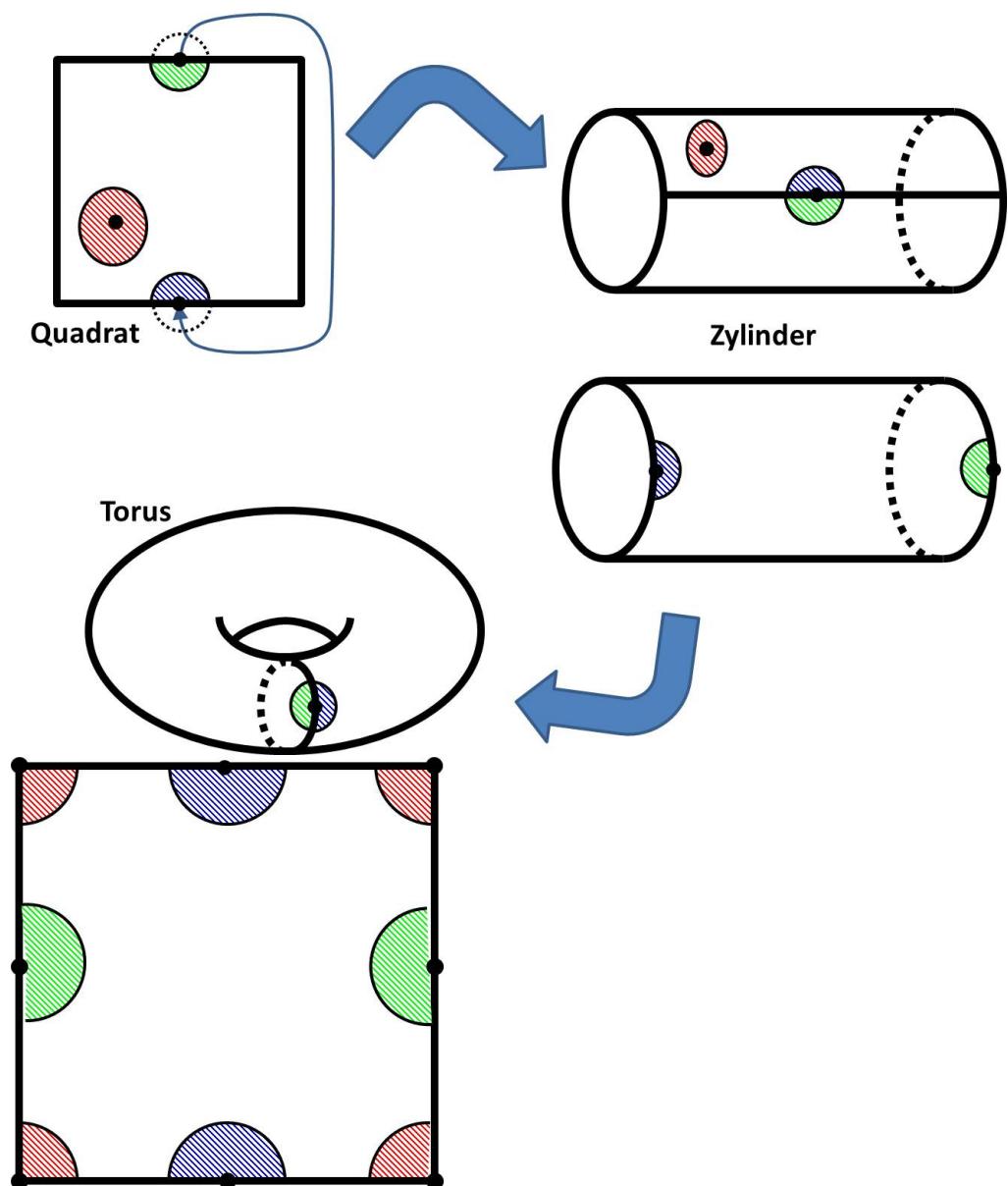
**Satz II.3.** ( $C^\infty$ -Untermannigfaltigkeiten von  $\mathbb{R}^{n+l}$  sind  $C^\infty$ -Mannigfaltigkeiten)

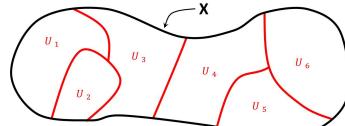
Es sei  $M \subseteq \mathbb{R}^{n+l}$   $n$ -dimensionale  $C^\infty$ -Untermannigfaltigkeit von  $\mathbb{R}^{n+l}$  und  $\{\psi_\alpha: W_\alpha \rightarrow U_\alpha \cap M \mid \alpha \in \Lambda\}$  eine Menge lokaler Parametrisierungen (wie in (c)) mit  $M \subseteq \bigcup_{\alpha \in \Lambda} U_\alpha$ . Dann ist  $\mathcal{A} = \{(\psi_\alpha^{-1}, U_\alpha \cap M) \mid \alpha \in \Lambda\}$  ein  $C^\infty$ -Atlas und  $M$  eine  $C^\infty$ -Mannigfaltigkeit.

## 2 Quotientenräume

Motivation:







**Erinnerung** Jede Partition bestimmt eine Äquivalenzrelation auf  $X$  (und umgekehrt). Menge der Äquivalenzklassen (oder auch: Quotient von  $X$  nach  $S$ ) ist  $X/S$ . Zusätzlich existiert dann die Quotientenabbildung  $\pi: X \rightarrow X/S, x \mapsto [x]$

**Bemerkung II.3.** Ist  $X$  ein topologischer Raum und  $X/S$  ein Quotientenraum von  $X$ , so gibt es auf  $X/S$  eine natürliche Topologie:

**Definition II.8** (Quotienten(raum)topologie). Eine Teilmenge  $U \subset X/S$  heißt offen : $\Leftrightarrow \pi^{-1}(U)$  ist offen in  $X$

**Bemerkung II.4.** Alle im Sinne dieser Definition offenen Teilmengen von  $X/S$  definieren dann eine Topologie auf  $X/S$  und die Menge  $X/S$  zusammen mit dieser Topologie heißt Quotientenraum von  $X$  nach  $S$ .

**Bemerkung II.5.**  $\pi: X \rightarrow X/S, X/S$  versehen mit der Quotiententopologie, ist dann eine stetige Abbildung zwischen topologischen Räumen.

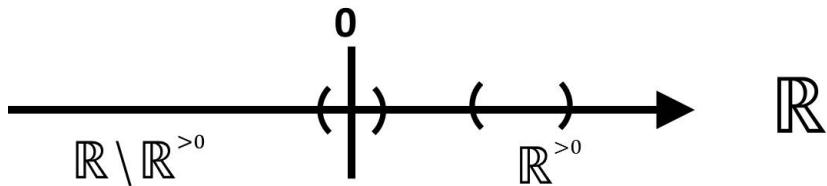
### Eigenschaften der Quotiententopologie

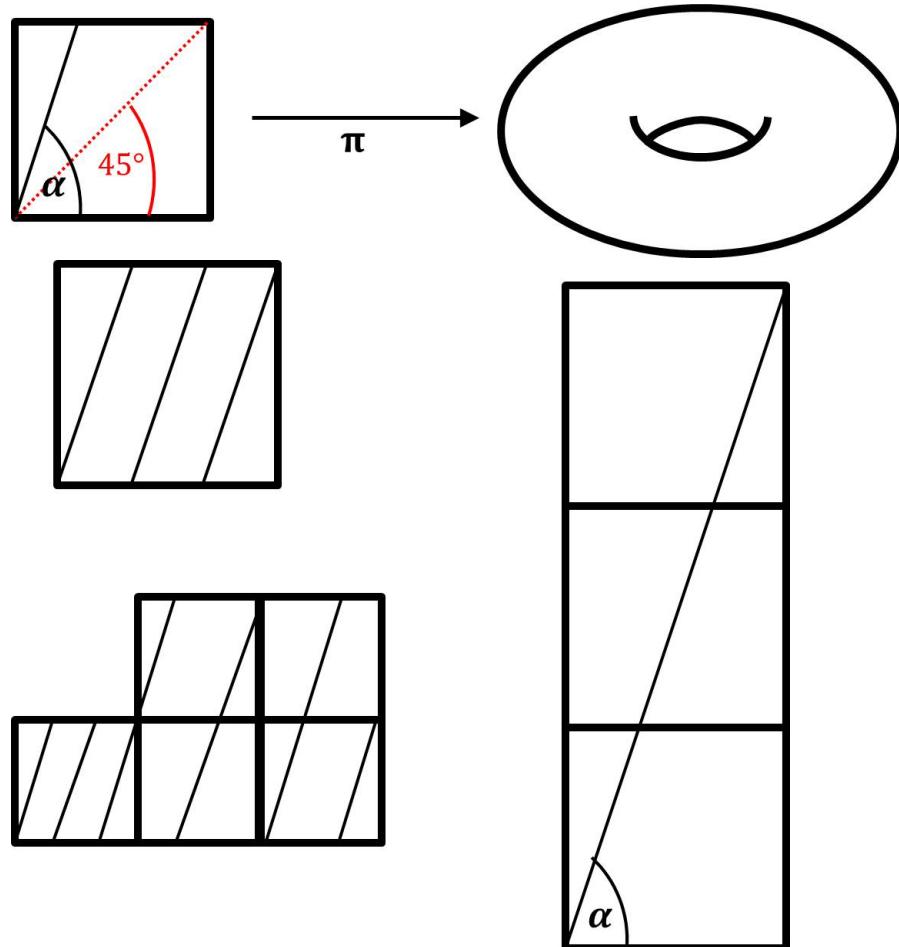
- Quotientenräume zusammenhängender Räume sind zusammenhängend.
- Quotientenräume wegzusammenhängender Räume sind wegzusammenhängend.
- Quotientenräume separabler Räume sind separabel.
- Quotientenräume kompakter Räume sind kompakt.

**Achtung:** Die Hausdorff-Eigenschaft vererbt sich i.a. nicht!

### Beispiel:

$$X = \mathbb{R}, \quad S := \{\mathbb{R}^{>0}, \mathbb{R} \setminus \mathbb{R}^{>0}\}$$

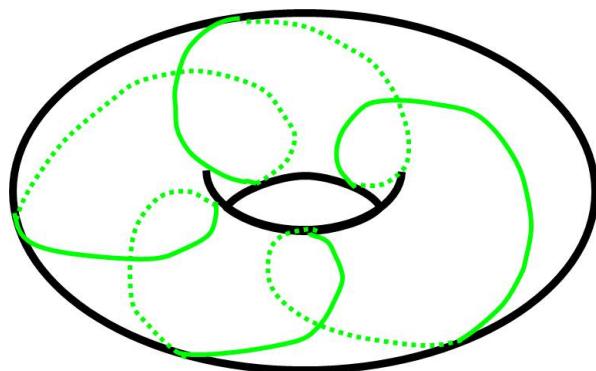




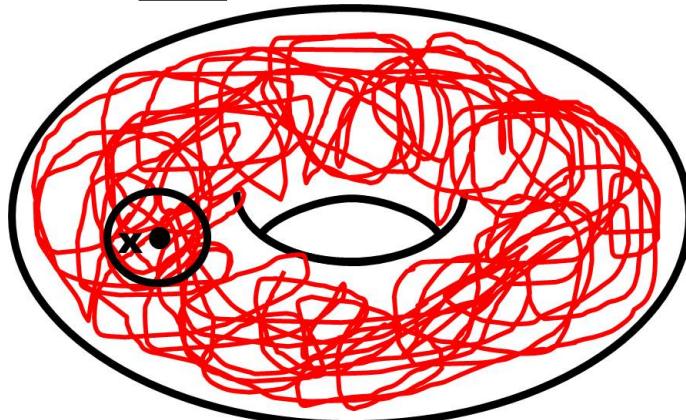
Ist  $\alpha$  rational, so schließen sich die ins Einheitsquadrat "zurückgeholteten" Kurvensegmente zu einer geschlossenen Kurve  $K_\alpha$  auf dem Torus  $T^2$ , doch für  $\alpha \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$  füllt die entsprechende Kurve  $K_\alpha$  den  $T^2$  dicht aus.  $\leadsto$

$$\alpha \in \mathbb{Q} \Rightarrow K_\alpha \cong S^1$$

$$\alpha \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q} \Rightarrow K_\alpha \cong \mathbb{R} \dots !$$



$\alpha \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$ : ÜBEL!



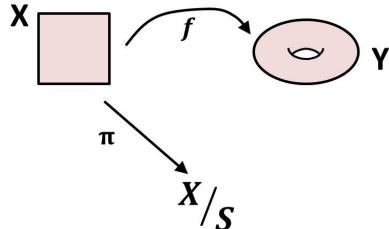
$t \mapsto e^{2\pi i t}$

$T^2$  ist Hausdorffsch,  $T^2 / \sim$  nicht!

**TODO:** Exkurs: Instabilität von Planetensystemen

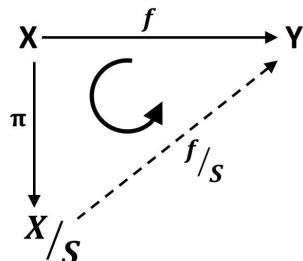
### 3 Quotientenabbildungen

**Definition II.9** (Quotientenabbildung). Ist  $S$  eine Partition von  $X$  in nichtleere disjunkte Teilmengen und  $f: X \rightarrow Y$  eine Abbildung, die auf jedem Element von  $S$  konstant ist, so existiert eine Abbildung  $X/S \rightarrow Y$ , die jedes Element  $A$  von  $S$  auf  $f(a)$ ,  $a \in A$ , abbildet.



Diese heißt dann **Quotientenabbildung** von  $f$  nach  $S$ , in Zeichen  $f/S$ .

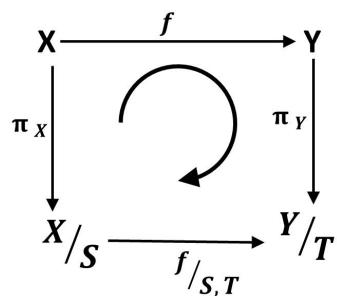
#### Interpretation



**Allgemeiner**  $S$  Partition von  $X$ ,  $T$  Partition von  $Y$

$\Rightarrow$  Jede Abbildung  $f: X \rightarrow Y$ , die jedes Element von  $S$  auf ein Element von  $T$  abbildet, induziert eine Abbildung

$$f/S, T: X/S \rightarrow Y/T$$



**Bemerkung II.6.** Sind  $X, Y$  topologische Räume,  $S$  Partition von  $X$  und  $f: X \rightarrow Y$  eine auf Elementen von  $S$  konstante, stetige Abbildung, so ist auch  $f/S: X/S \rightarrow Y$  stetig.

$f \mapsto f/S$  ist dann Bijektion!

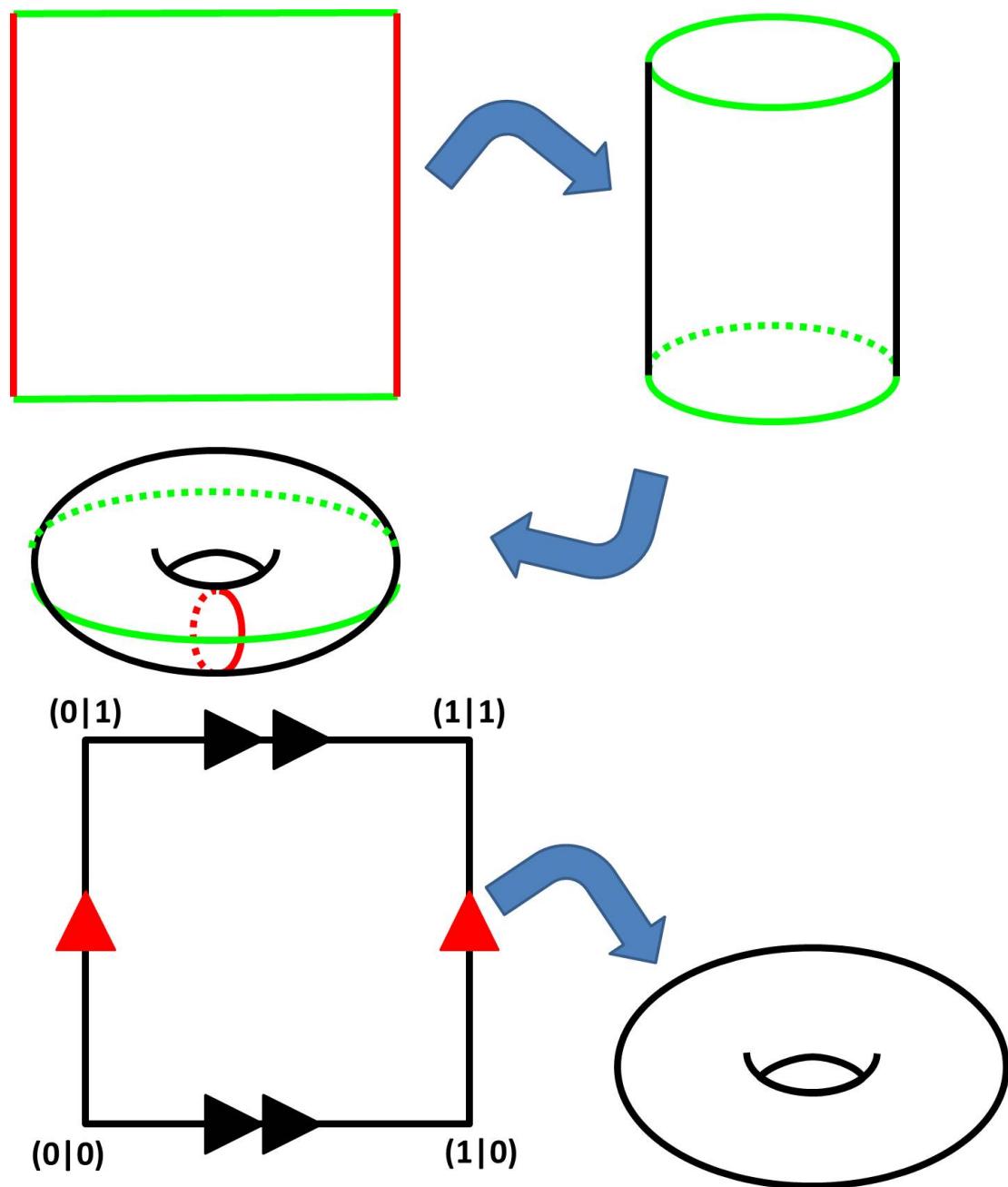
**Erinnerung**  $F: X \rightarrow Y$  stetige Bijektion von einem kompakten Raum  $X$  auf einen Hausdorff-Raum  $Y \Rightarrow F$  ist Homöomorphismus!

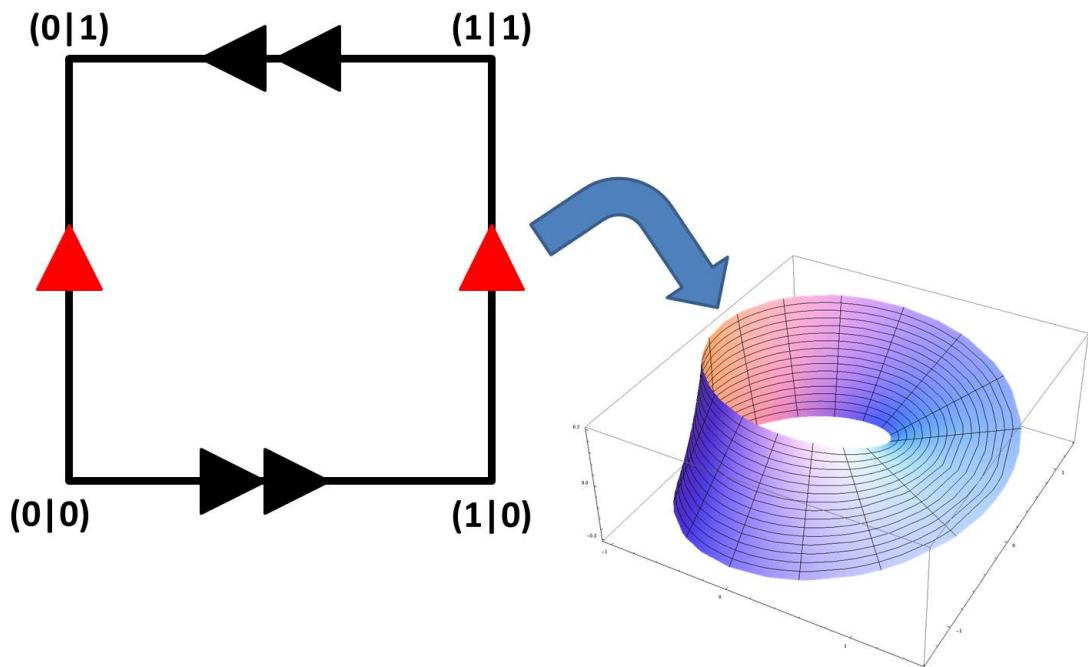
**Korollar II.1.**  $X$  kompakt,  $Y$  Hausdorffsch und  $f: X \rightarrow Y$  sei stetig  $\Rightarrow$  Der injektive Quotient  $f/S(f)$  ist Homöomorphismus  $X/S(f) \rightarrow f(X)$

**Definition II.10** (injektiver Quotient). Jede Abbildung  $f: X \rightarrow Y$  definiert eine Partition  $S = S(f)$  von  $X$ , und zwar in die nichtleeren Urbilder der Elemente von  $Y$  unter  $f$ .

Die induzierte Abbildung  $f/S(f): X/S(f) \rightarrow Y$  ist dann injektiv und heißt injektiver Quotient von  $f$ .

Beispiel:





$$(x, 0) \sim (1 - x, 1)$$

Möbiusband

Bild Möbiusband von:

<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:M%C3%BCbiusband.png&filetimestamp=20090802105255>

## 4 Konstruktionen von Quotientenräumen

Im Folgenden "Kontrahieren", "Anheften", "Verkleben" etc.

**Definition II.11** (Kontraktion). Die Quotientenmenge eines topologischen Raumes  $X$  bzgl. einer Partition  $S$  von  $X$ , welche aus einer Teilmenge  $A$  von  $X$  und allen Einpunktmengen aus  $X \setminus A$  besteht,

$$S = A \cup \{\{x\} \mid x \in X \setminus A\}$$

heißt Kontraktion (von  $X$  bzgl.  $X \setminus A$ ), und für  $X/S$  schreibt man einfach  $X/A$ .

Beispiel:

- $X = [0, 1], A = [\frac{1}{3}, \frac{2}{3}]$

$$X/A \cong I = [0, 1]$$

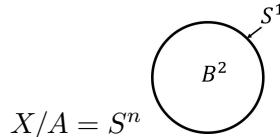
- $X = [0, 1], A = \{\frac{1}{3}\}$

$$\Rightarrow X/A \cong \begin{array}{c} \text{---} \\ | \\ 0 \end{array} \xrightarrow{\cong} \begin{array}{c} \text{---} \\ | \\ 0 \end{array} \cong \text{---} \cong \text{---} \cong \text{---}$$

- $X = [0, 1], A = \{0, 1\}$

$$\Rightarrow X/A \cong \text{---} \cong S^1$$

- $X = \overline{B^n} = D^n$  abgeschlossener Einheitsball in  $\mathbb{R}^n$  mit Rand  $S^{n-1}$  und Innerem  $B^n$ .  $A := S^{n-1} = \partial \overline{B^n}, X = \overline{B^n}$



$$\overline{B^n}/_{S^1} = \text{---} \cong S^2$$

Formal:  $S = S^{n-1} \cup \{\{x\} \mid x \in B^n = (\overset{\circ}{B^n})\}$  <sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> $S$  ist die Partition.

Mit anderen Worten: Kontraktion des Randes des abgeschlossenen  $n$ -Balles liefert die  $n$ -Sphäre!

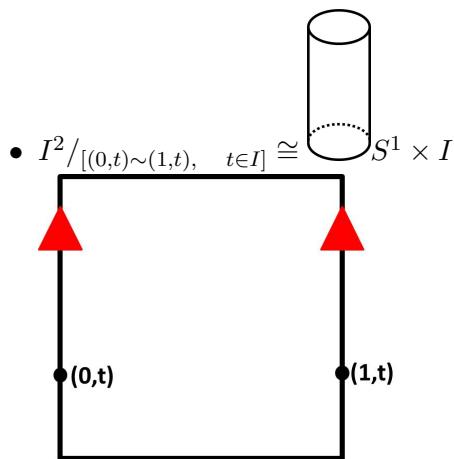
**Bemerkung II.7.** Wie beschreibt man Partitionen  $S$  von  $X$  möglichst bequem?

Oftmals einfach durch die entsprechende Äquivalenzrelation, die  $S$  liefert, und hier dann nur durch die nicht-trivialen Relationen.

Für  $X/S$  schreibt man dann oft nur  $X/[\text{Relation 1}, \text{Relation 2}, \dots]$ .

### Beispiel:

- Für  $X = I = [0, 1]$  ist  $I/[0 \sim 1] \cong S^1$ .



**Andere Sichtweise:** Der Zylinder  $S^1 \times I$  entsteht aus dem Quadrat  $I^2$  durch geeignetes "Verkleben" zweier Kanten.

**Definition II.12** (Verkleben). Sind  $A$  und  $B$  disjunkte Teilräume eines topologischen Raumes  $X$  und ist  $f: A \rightarrow B$  ein Homöomorphismus,

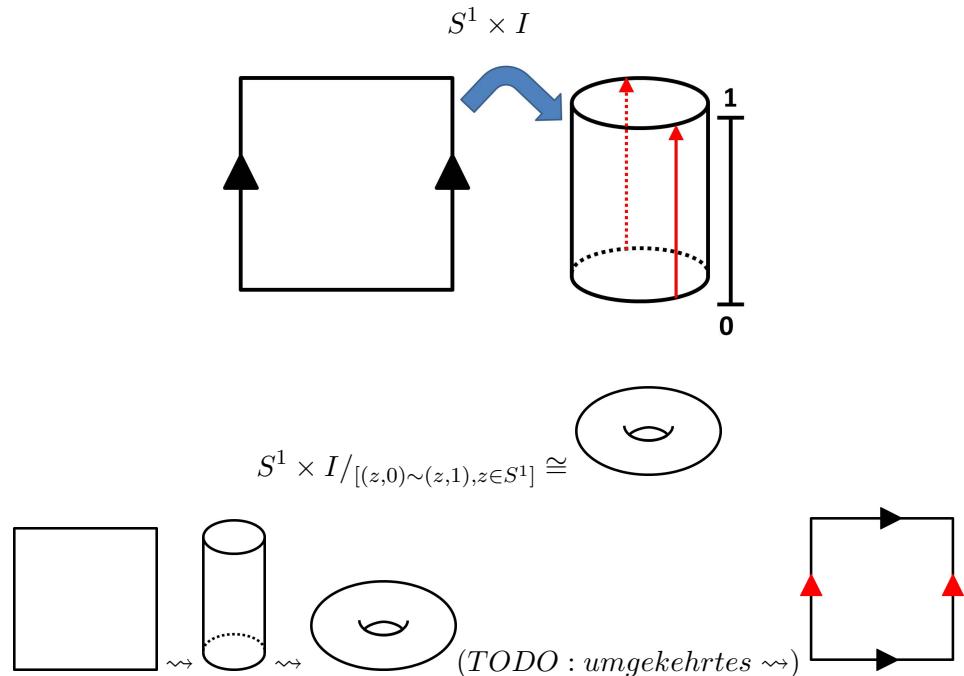


mus, so heißt der Übergang zum Quotientenraum, der durch die Partition von  $X$  in die Einpunktmengen von  $X \setminus (A \cup B)$  und die Zweipunktmengen  $\{x, f(x)\}, x \in A$  gegeben ist, Verkleben (von  $X$  längs  $A$  und  $B$  via des Homöomorphismus  $f$ ) und dieser Prozess einfach auch Verkleben von  $A$  und  $B$ .

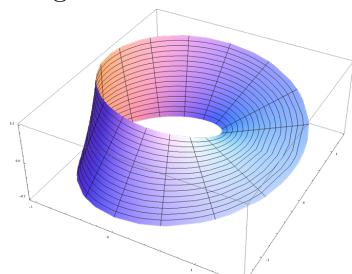
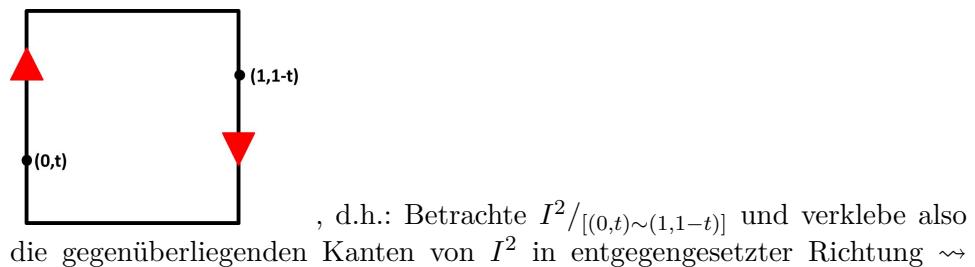
**Notation:**

$$X/_{[a \sim f(a)]} \quad (\text{mit } a \in A)$$

**Beispiel:**



**Beispiel:**

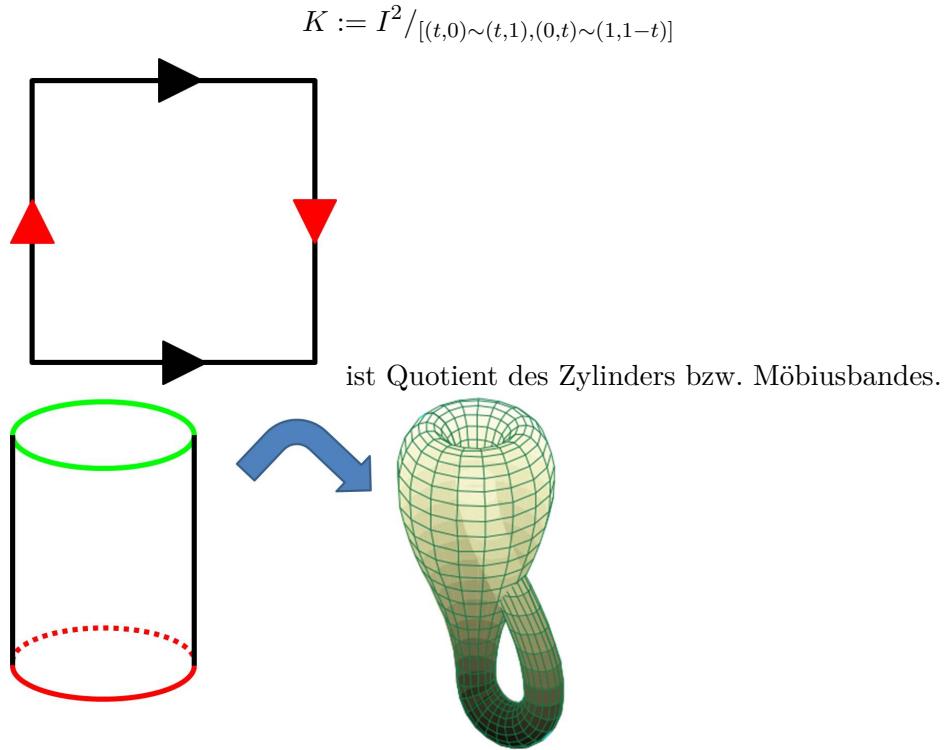


Möbiusband

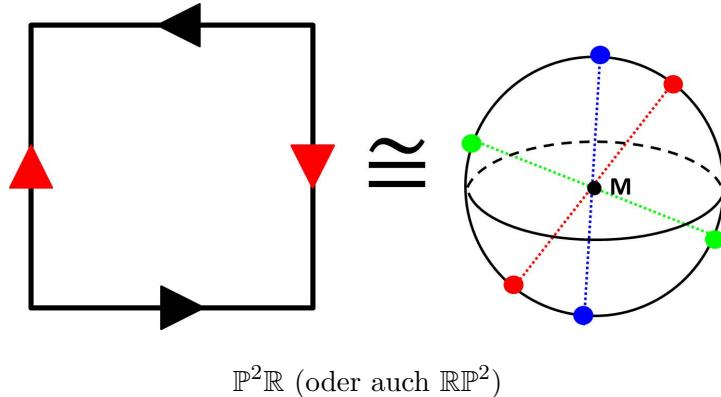
Bild Möbiusband von:

<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:M%C3%B6biusband.png&filetimestamp=20090802105255>

### Beispiel: Die Kleinsche Flasche/ der Kleinsche Schlauch



### Beispiel: Die projektive Ebene



**Definition II.13** ( $n$ -dimensionaler projektiver Raum). Der  $n$ -dimensionale reell-projektive Raum<sup>5</sup> ist

$$\mathbb{RP}^n := S^n / [x \sim -x]$$

---

<sup>5</sup> Anschaulich (projektive Geometrie): Die Menge aller Geraden durch den Ursprung im  $\mathbb{R}^{n+1}$

und der  $n$ -dimensionale komplex-projektive Raum ist

$$\mathbb{CP}^n := \underbrace{S^{2n+1}}_{\subset \mathbb{C}^{n+1}} /_{[v \sim \lambda v, \lambda \in S^1]}$$

**TODO: Exkurs: Video von einer Kleinschen Flasche (Klein Bottle Adventures)**

**TODO: Exkurs: Homotopietheorie, Homologietheorie**

## Kapitel III

# Konzepte der Algebraischen Topologie

### 1 Die Fundamentalgruppe

**Erinnerung** Homotopie von Abbildungen  
 $X, Y$  topologische Räume,  $f, g: X \rightarrow Y$  stetig.  
Eine stetige Abbildung

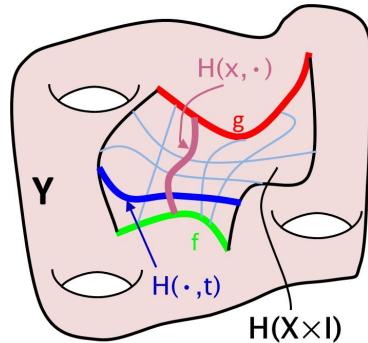
$$H: X \times I \rightarrow Y, (x, t) \mapsto H(x, t)$$

mit

$$H(x, 0) = f(x), H(x, 1) = g(x) \quad \forall x \in X$$

heißt Homotopie von  $f$  nach  $g$ , und  $f$  und  $g$  dann homotop,  
in Zeichen:

$$f \simeq g.$$



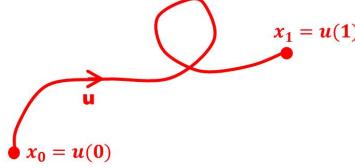
$$H \hat{=} (h_t)_{t \in I}, h_t: X \rightarrow Y$$

$$h_0 = f, \quad h_1 = g$$

Wege  $u: I \rightarrow X$ ,  $u$  stetig, spielen eine ganz wesentliche Rolle im Homotopiekonzept für Abbildungen.

**Beispiel:**

- Jeder Weg  $u$  ist selbst eine Homotopie, und zwar zwischen den konstanten Abbildungen  $f \equiv u(0), g \equiv u(1)$ .



- Jede Homotopie besteht aus Wegen:

Ist  $(h_t)_{t \in I}$  Homotopie  $f \simeq g$  und  $x \in X$ , so ist  $u_x: I \rightarrow X, t \mapsto h_t(x)$  ein Weg.

- Jede (allgemeine) Homotopie ist (selber) ein Weg:

$\forall t \in I$  ist  $h_t: X \rightarrow Y$  stetige Abbildung.

$\rightsquigarrow \Gamma: I \rightarrow C(X, Y) := \{f: X \rightarrow Y \text{ stetig}\}, \quad t \mapsto h_t$

$\Gamma$  ist zunächst nur eine Abbildung, doch gilt:

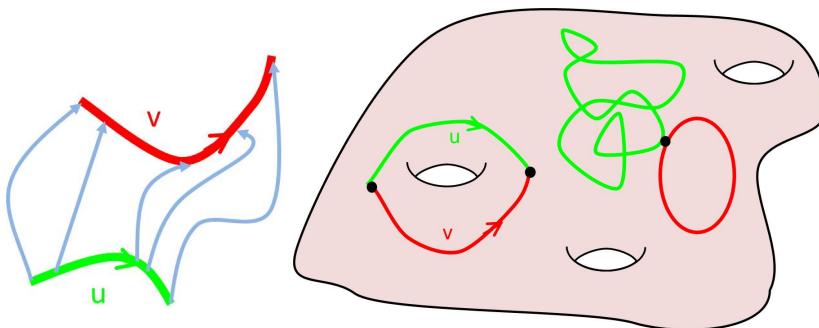
**Bemerkung III.1.**  $C(X, Y)$  ist, versehen mit der sogenannten kompakt-offenen Topologie, selbst ein topologischer Raum und jede Homotopie  $H: f \simeq g, \quad f, g \in C(X, Y)$  ist bezüglich dieser Topologie auf  $C(X, Y)$  dann tatsächlich als stetige Abbildung (also Weg)  $\Gamma: I \rightarrow C(X, Y)$ ,  $\Gamma$  wie oben, interpretierbar.

Die kompakt-offene Topologie auf  $C(X, Y)$  wird erzeugt von allen Mengen der Form  $\{\varphi \in C(X, Y) \mid \varphi(A) \subset B\}, \quad A \subset X$  kompakt,  $B \subset Y$  offen

**TODO: Exkurs: Anwendungen von  $C(X, Y)$  mit dieser Topologie:  
Lösen von DGL, DGL-Systemen usw. Homotopie von Wegen ist zunächst nicht sehr interessant:**

**Bemerkung III.2.** Zwei Wege  $u, v: I \rightarrow X$  sind homotop

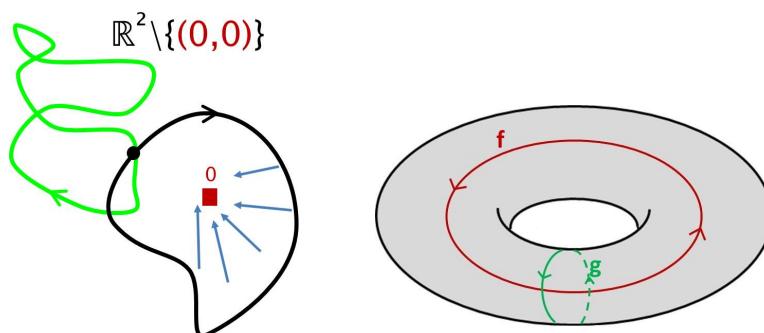
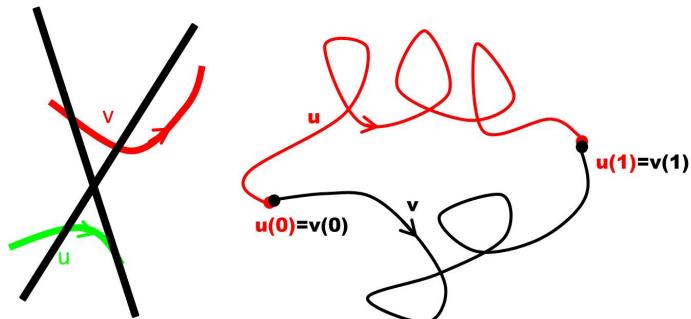
$\Leftrightarrow u(I)$  und  $v(I)$  liegen in derselben Wegzusammenhangskomponente



Deshalb neues Konzept:

**Definition III.1** (homotop bezüglich der Endpunkte). Zwei Wege  $u, v: I \rightarrow X$ ,  $X$  topologischer Raum, heißen homotop (bezüglich der Endpunkte) : $\Leftrightarrow$

1.  $u(0) = v(0), u(1) = v(1)$
2.  $\exists$  Homotopie  $H: u \simeq v$  (mit  $H(0, t) \equiv u(0), H(1, t) \equiv u(1)$ )



$$u, v: \underbrace{I}_{=X} \rightarrow \underbrace{X}_{=Y}$$

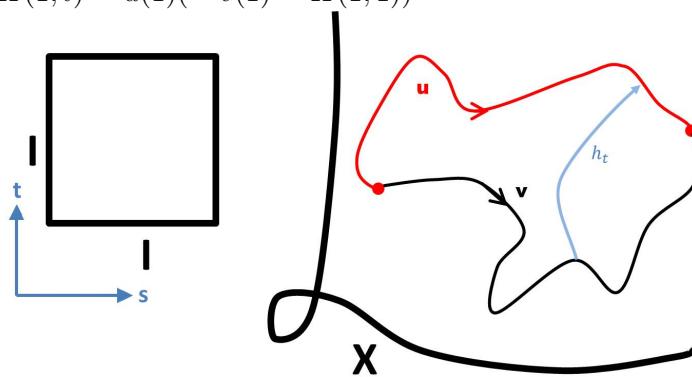
$$H: I \times I \rightarrow X, (s, t) \mapsto H(s, t)$$

$$u = u(s), v = v(s)$$

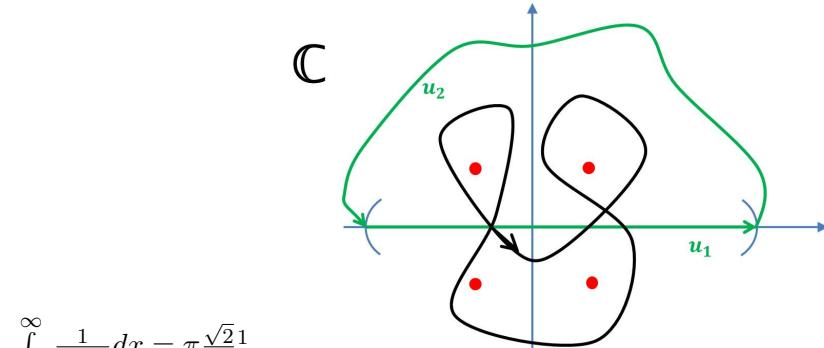
$$H(s, 0) = u(s), H(s, 1) = v(s)$$

$$H(0, t) \equiv u(0) (= v(0) = H(0, 0))$$

$$H(1, t) \equiv u(1) (= v(1) = H(1, 1))$$



**Beispiel:**



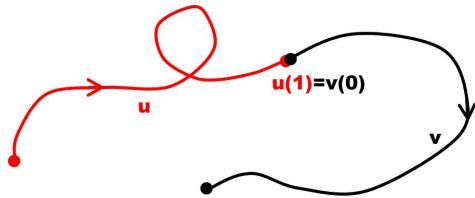
$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{1+x^4} dx = \pi \frac{\sqrt{2}}{2} 1$$

TODO: Exkurs: Residuensatz, Wegintegrale

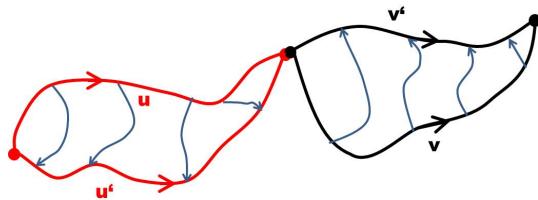
**Bemerkung III.3.** Die Homotopie von Wegen ist eine Äquivalenzrelation und für die Homotopieklassen eines Weges  $u$  schreibt man  $[u]$ .

**Definition III.2** (Produkt von Wegen). Sind  $u, v$  Wege in  $X$  mit  $u(1) = v(0)$ , so heißen  $u$  und  $v$  zusammensetzbare oder aneinanderfügbar und ihr Produkt  $u \cdot v$  ist definiert als

$$(u \cdot v)(s) := \begin{cases} u(2s) & 0 \leq s \leq \frac{1}{2} \\ v(2s - 1) & \frac{1}{2} \leq s \leq 1 \end{cases}$$



**Bemerkung III.4.** Gilt  $u \simeq u'$  und  $v \simeq v'$  und ist  $u \cdot v$  definiert, so auch  $u' \cdot v'$ , und  $u' \cdot v$  ist dann auch homotop zu  $u \cdot v$ .



Denn

$$u_t: I \rightarrow X \text{ sei Homotopie } u \simeq u',$$

$$v_t: I \rightarrow X \text{ sei Homotopie } v \simeq v'$$

$$\Rightarrow u_t \cdot v_t: I \rightarrow X \text{ ist Homotopie } uv \simeq u'v'$$

<sup>1</sup>Explodiert für  $x^4 = -1$  (Singularität)

Formal(er):  $u \cdot v$  ist definiert  $\Rightarrow u(1) = v(0)$

$$u \simeq u' \Rightarrow u'(1) = u(1), \quad v \simeq v' \Rightarrow v'(0) = v(0) (= u(1) = u'(1))$$

$$\Rightarrow u' \cdot v' \text{ ist definiert.}$$

Homotopie  $H$  von  $u \cdot v$  zu  $u' \cdot v'$  ist dann die stetige Abbildung

$$H: I \times I \rightarrow X \text{ mit } (s, t) \mapsto \begin{cases} H^{u, u'}(2s, t) & s \in [0, \frac{1}{2}] \\ H^{v, v'}(2s - 1, t) & s \in [\frac{1}{2}, 1] \end{cases}$$

wobei  $H^{u, u'}: u \simeq u'$ ,  $H^{v, v'}: v \simeq v'$ .

Folgerung: Setzt man für aneinanderfügbare Wege  $u, v$

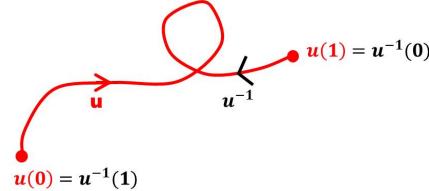
$$[u] \cdot [v] := [u \cdot v],$$

so ist dieses Produkt wohldefiniert!

**Definition III.3** (Konstanter Weg, Inverser Weg, Geschlossener Weg).

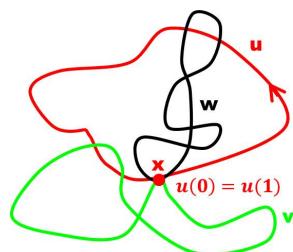
Für  $x \in X$  sei  $c_x: I \rightarrow X$  mit  $c_x \equiv x$  der konstante Weg in  $x \in X$ .

- Für einen Weg  $u: I \rightarrow X$  sei  $u^{-1}: I \rightarrow X, s \mapsto u(1-s)$ , der zu  $u$  inverse (oder: umgekehrt durchlaufene) Weg.



- $u: I \rightarrow X$  heißt geschlossener Weg (oder: Schleife) in  $x \in X$

$$\Leftrightarrow u(0) = x = u(1)$$



**Bemerkung III.5.** Geschlossene Wege (in  $x$ ) sind immer aneinanderfügbar.

**Definition III.4** (nullhomotop, einfach zusammenhängend).

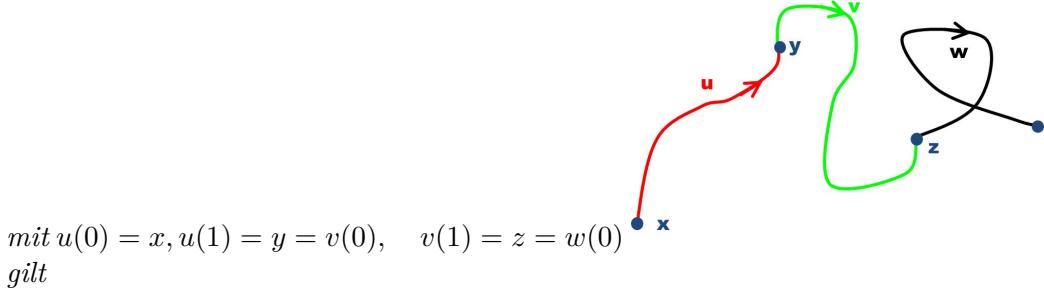
schlossener Weg  $u$  in  $x$  heißt nullhomotop

$$\Leftrightarrow [u] = [c_x]$$

• Ein ge-

- $X$  heißt einfach zusammenhängend : $\Leftrightarrow$   
 $X$  ist wegzusammenhängend und  
jeder geschlossene Weg  $u$  in  $X$  ist nullhomotop (zu  $c_{u(0)}$ ).

**Lemma III.1.** Für Wege  $u, v, w: I \rightarrow X$



1.  $[u] \cdot [u^{-1}] = [u \cdot u^{-1}] = [c_x]$
2.  $[u^{-1}] \cdot [u] = [u^{-1} \cdot u] = [c_y]$
3.  $[u] \cdot [c_y] = [u] = [c_x] \cdot [u]$
4.  $[u] \cdot ([v] \cdot [w]) = ([u] \cdot [v]) \cdot [w]$

*Beweis.* (von (1), Rest analog)

Es sei  $H$  die Homotopie

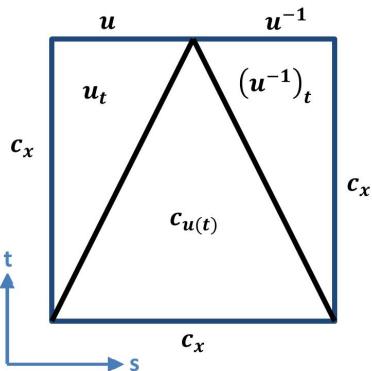
$$(s, t) \mapsto \begin{cases} u(2s) & 0 \leq s \leq \frac{t}{2} \\ u(t) & \frac{t}{2} \leq s \leq 1 - \frac{t}{2} \\ u(2 - 2s) & 1 - \frac{t}{2} \leq s \leq 1 \end{cases}$$

Es gilt

$$(u \cdot u^{-1})(s) = \begin{cases} u(2s) & 0 \leq s \leq \frac{1}{2} \\ u^{-1}(2s - 1) & \frac{1}{2} \leq s \leq 1 \end{cases}$$

$H$  ist stetig und erfüllt

1.  $H(s, 0) = u(t) = u(0) = x = c_x(s)$
2.  $H(s, 1) = (u \cdot u^{-1})(s)$ , denn
  - $H(s, 1)|_{[0, \frac{1}{2}]} = u(2s) = (u \cdot u^{-1})|_{[0, \frac{1}{2}]}$
  - $H(s, 1)|_{[\frac{1}{2}, 1]} = u(2 - 2s) = u(1 - (2s - 1)) = u^{-1}(2s - 1) = (u \cdot u^{-1})|_{[\frac{1}{2}, 1]}$
3.  $H(0, t) = u(0) = x = c_x(0) = (u \cdot u^{-1})(0)$
4.  $H(1, t) = u(2 - 2) = u(0) = x = c_x(1) = (u \cdot u^{-1})(1)$



Schematisch:

Also ist  $H$  Homotopie von  $c_x$  nach  $(u \cdot u^{-1})$  und

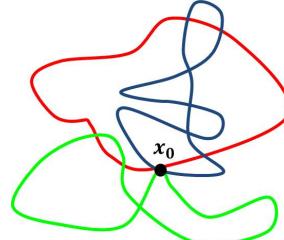
$$[u] \cdot [u^{-1}] = [u \cdot u^{-1}] = [c_x]$$

□

**Satz III.1.** Für einen topologischen Raum  $X$  und  $x_0 \in X$  ist

$$\pi_1(X, x_0) := \{[u] \mid u: I \rightarrow X \text{ geschlossener Weg in } x_0\}$$

bezüglich  $[u] \cdot [v] := [u \cdot v]$  eine Gruppe, die sogenannte Fundamentalgruppe

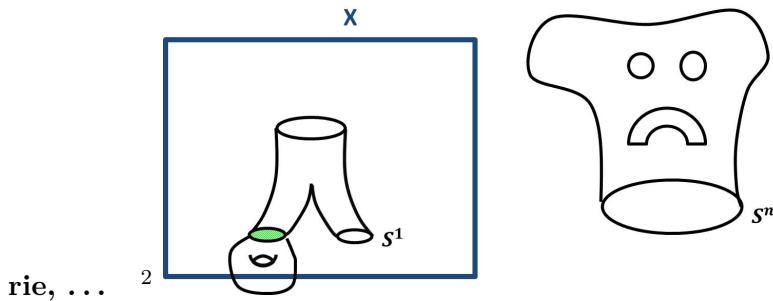


oder erste Homotopiegruppe von  $X$  in  $x_0$ .

Neutrales Element ist  $1 = 1_{x_0} := [c_{x_0}]$

und Inverses zu  $\alpha = [u]$  ist  $\alpha^{-1} = [u^{-1}]$ .

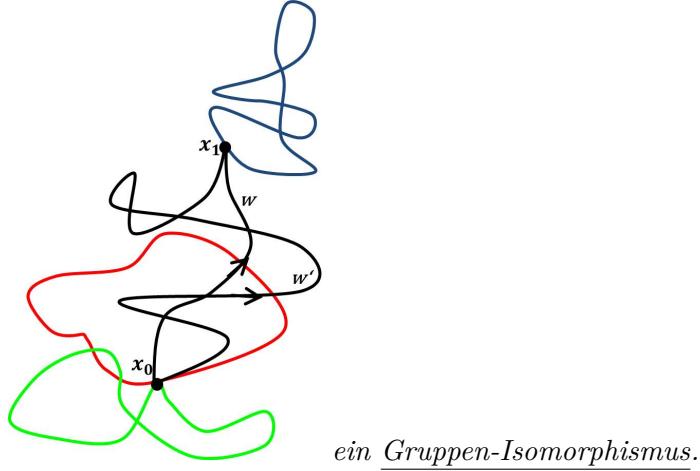
**TODO. Exkurs: Kobordismus von Mannigfaltigkeiten, Stringtheo-**



<sup>2</sup><http://www.scienceblogs.de/mathlog/2008/03/physik-topologie-logik-und-berechenbarkeit.php>

**Satz III.2** (Unabhängigkeit vom Basispunkt). *Ist  $w: I \rightarrow X$  Weg von  $x_0$  nach  $x_1$ , so ist die Abbildung*

$$w_{\#}: \pi_1(X, x_0) \rightarrow \pi_1(X, x_1), \quad [u] \mapsto [w^{-1} \cdot u \cdot w]$$



*Beweis.* Lemma  $\Rightarrow w_{\#}$  ist Homomorphismus und  $(w_{\#})^{-1} = (w^{-1})_{\#}$   
 $\Rightarrow w_{\#}$  ist Isomorphismus! □

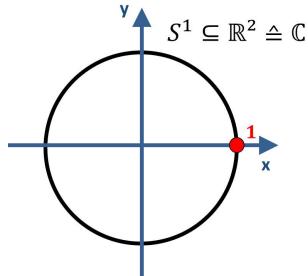
**Bemerkung III.6.** Dieser Isomorphismus hängt von  $w$  ab und ist deshalb im Allgemeinen nicht kanonisch! Kanonisch ist er, falls  $\pi_1$  abelsche Gruppe ist!

$$[w^{-1}][u \cdot v][w] = [w^{-1}uw][w^{-1}vw] \Rightarrow w_{\#}$$
 ist Homomorphismus.

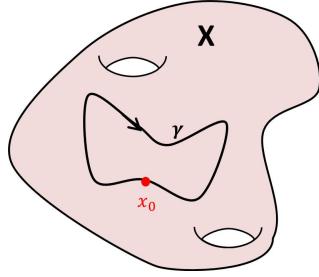
**Erinnerung**  $\forall$  topologischen Räume  $X$  und  $x_0 \in X$  ist  $\pi_1(X, x_0)$ , die Menge der Homotopieklassen  $[u]$  geschlossener Wege in  $x_0$ , mit der Multiplikation  $[u] \cdot [v] = [u \cdot v]$  eine Gruppe, die sogenannte Fundamentalgruppe von  $X$  in  $x_0$ .

### 1.1 Geschlossene Wege als Abbildungen $S^1 \rightarrow X$

**Definition III.5** (Schleife). Es sei  $S^1 = \{x \in \mathbb{R}^2 \mid \|x\| = 1\} = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| = 1\}$  und  $1 := (1, 0) \in S^1$

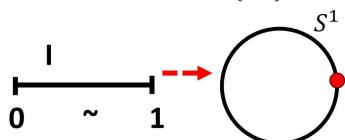


Eine stetige Abbildung  $\gamma: S^1 \rightarrow X$ ,  $X$  topologischer Raum,  $x_0 \in X$ , mit  $\gamma(1) = x_0$ , heißt Schleife in  $x_0$ .

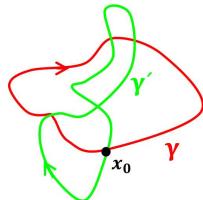


**Bemerkung III.7.** Assoziiert man zu einer Schleife  $\gamma$  in  $x_0 \in X$  die Komposition mit der Exponentialabbildung  $\exp: I \rightarrow S^1, t \mapsto e^{2\pi i \cdot t} = (\cos 2\pi t, \sin 2\pi t)$ , so ist  $\gamma \circ \exp$  ein gewöhnlicher geschlossener Weg in  $x_0$ . Tatsächlich kann jeder gewöhnliche geschlossene Weg in  $x_0$  auf diese Art aus einer Schleife in  $x_0$  erhalten werden:

Denn ist  $u: I \rightarrow X$  geschlossener Weg in  $x_0 \in X$ , so existiert eine Quotientenabbildung  $\tilde{u}: I / \{0,1\} \rightarrow X$  und  $I / \{0,1\} \cong S^1$ !



**Definition III.6** (schleifenhomotop). Zwei Schleifen  $\gamma, \gamma'$  in  $x_0$  heißen (schleifen-)homotop, falls es eine Homotopie zwischen ihnen gibt, die auf  $1 \in S^1$  stationär ist, also  $\gamma(1) = x_0 = \gamma'(1)$  die ganze Zeit festhält.



**Bemerkung III.8.** Zwei Schleifen in  $x_0$  sind genau dann homotop, wenn die entsprechenden gewöhnlichen geschlossenen Wege homotop sind.

Denn: " $\Rightarrow$ " Ist  $H: S^1 \times I \rightarrow X$  eine Homotopie von Schleifen, so definiert

$$H': I \times I \rightarrow X, \quad (s, t) \mapsto H(e^{2\pi i s}, t)$$

eine Homotopie geschlossener Wege.

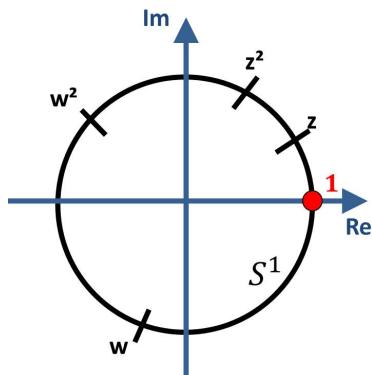
" $\Leftarrow$ " Homotopien von Schleifen sind nichts anderes als Quotientenräume von Homotopien von gewöhnlichen geschlossenen Wegen nach der Partition des Einheitsquadrates  $I \times I$ , die von  $(0, t) \sim (1, t)$  erzeugt wird.

**Bemerkung III.9.**  $\pi_1(X, x_0)$  lässt sich dann auch vollständig über die Multiplikation von Schleifen in  $x_0$  definieren!

### Beispiel:

Sind  $\gamma, \gamma'$  Schleifen in  $x_0$ , die zu den Wegen  $u, u': I \rightarrow X$  (mit  $u(0) = u(1) = x_0 = u'(0) = u'(1)$ ) gehören, so entspricht dem Produkt  $u \cdot u'$  die Abbildung

$$S^1 \ni z \mapsto \begin{cases} \gamma(z^2) & \operatorname{Im}(z) \geq 0 \\ \gamma'(z^2) & \operatorname{Im}(z) \leq 0 \end{cases}$$

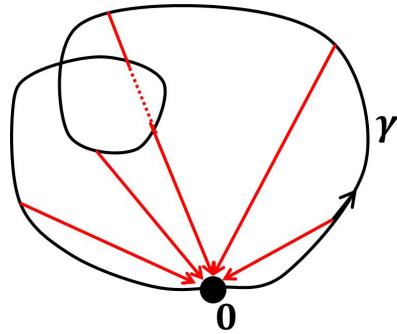


## 1.2 Erste Beispiele von Fundamentalgruppen

### Beispiel:

$$\pi_1(\mathbb{R}^n, 0) = \{0\} \text{ (ist trivial)}$$

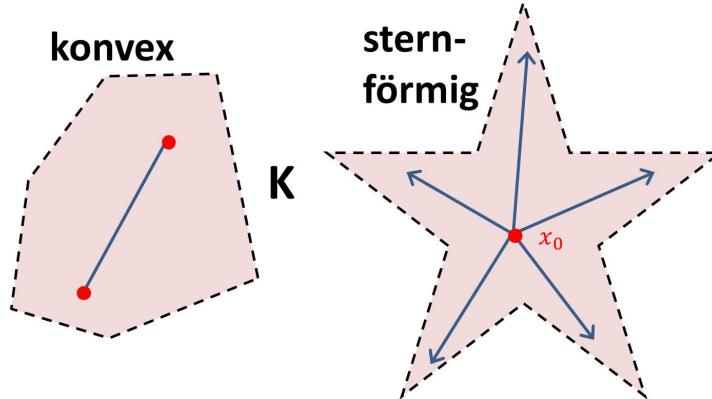
Denn zwischen jeder Schleife in  $0 \in \mathbb{R}^n$  und  $c_0$  gibt es eine Homotopie.



**Bemerkung III.10.** Für triviale, also nur aus einem Element bestehende, Fundamentalgruppe schreibt man oft auch  $\pi_1 = \{1\}$  (statt " $= \{0\}$ ").

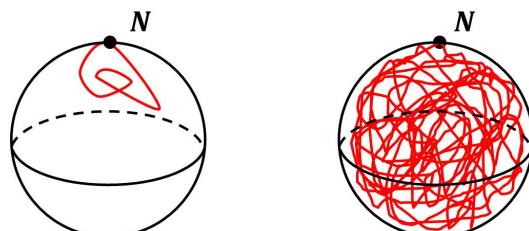
### Beispiel:

Für jede konvexe oder auch sternförmige Teilmenge  $K \subset \mathbb{R}^n$  und alle  $x_0 \in K$  ist  $\pi_1(K, x_0)$  trivial.

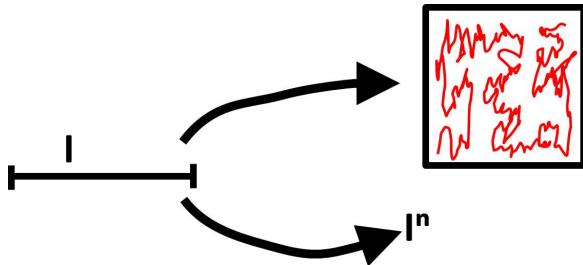


### Beispiel:

$$\pi_1(S^n, N := (0, \dots, 0, 1)) = \{0\} \quad \forall n \geq 2$$



Achtung:  $\forall n \in \mathbb{N}$  existieren stetige Surjektionen  $I \rightarrow S^n$

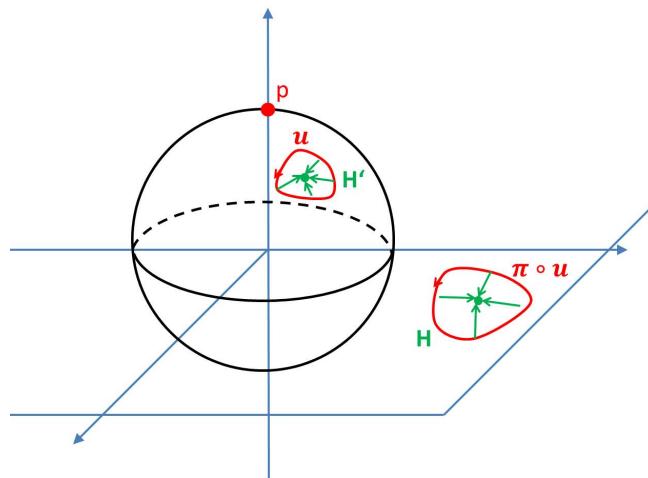


Frage: Gibt es stetige Surjektionen  $I \rightarrow S^n$ , die nullhomotop sind? Ja: Ist  $u$  eine, so ist  $u \cdot u^{-1}$  auch eine, doch  $\sim 0$ !

**Zwei Schritte zum Beweis von  $\pi_1(S^n, N) = \{0\}$ :**

1. Jeder geschlossene Weg  $u: I \rightarrow S^n$  mit  $u(I) \neq S^n$  ist für  $n \geq 2$  nullhomotop.

Denn: Es sei  $p \in S^n \setminus u(I)$  und  $\pi: S^n \setminus \{p\} \rightarrow \mathbb{R}^n$  die stereographische Projektion (von  $p$  aus). Dann ist  $\pi \circ u$  geschlossener Weg in  $\mathbb{R}^n$  und nullhomotop in  $\mathbb{R}^n$ .

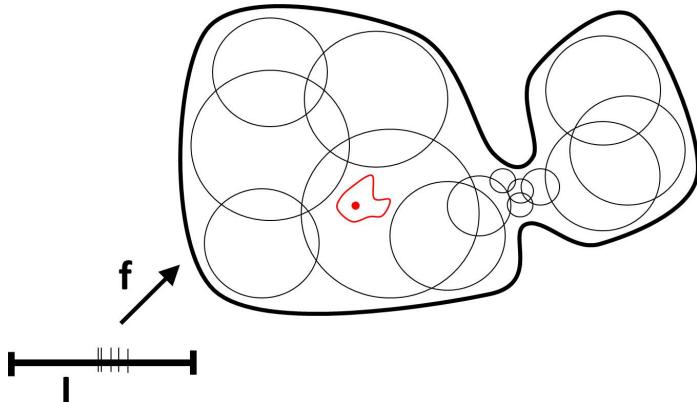


Ist  $H$  Homotopie, so ist  $H':=\pi^{-1} \circ H$  eine Homotopie, die  $u$  auf  $S^n$  zu einer konstanten Kurve homotopiert, d.h.  $u \sim c_{x_0}$ .

2. Jeder stetige Weg auf  $S^n$  mit  $n \geq 2$  ist homotop zu einem nicht surjektiven Weg auf  $S^n$ !

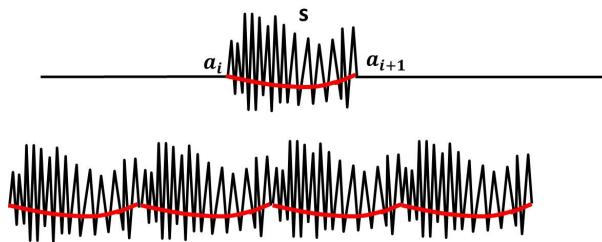
**Erinnerung (Lebesguelemma)** Ist  $f: Z \rightarrow Y$ ,  $Z$  kompakter metrischer Raum,  $Y$  topologischer Raum und  $\Gamma$  eine offene Überdeckung von  $Y$ , so existiert  $\delta > 0$  mit:

$\forall A \subset Z$  mit  $diam(A) < \delta$  ist  $f(A)$  in einem Element von  $\Gamma$  (ganz) enthalten.

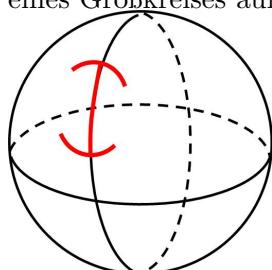


**Korollar III.1.** Ist  $s: I \rightarrow X$  Weg und  $\Gamma$  offene Überdeckung von  $X$ , so existiert eine Folge von Punkten  $a_1, \dots, a_N \in I$  mit  $0 = a_1 < \dots < a_{N-1} < a_N = 1$  mit  $s([a_i, a_{i+1}])$  ist in einem Element von  $\Gamma$  enthalten.

**Lemma III.2.**  $\forall n \geq 2$  gilt:  $\forall$  Wege  $s: I \rightarrow S^n$  existiert eine endliche Unterteilung von  $I$  in Teilintervalle, so dass die Einschränkung von  $s$  auf jedes der Teilintervalle homotop zu einer Abbildung mit nirgendwo dichtem Bild ist, und zwar durch eine Homotopie, die auf den Endpunkten des Intervalls fixiert ist.



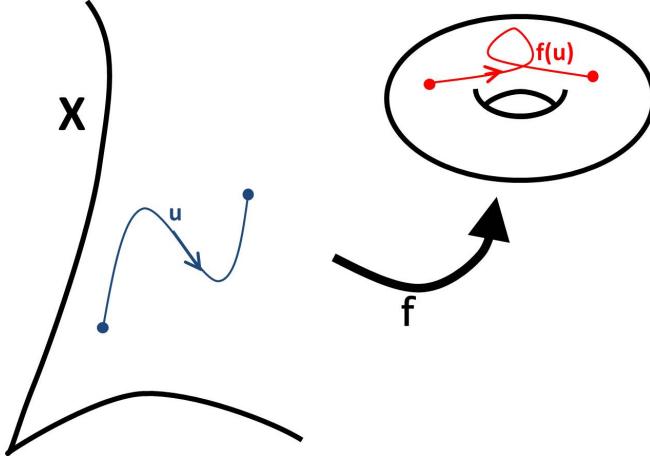
*Beweis.* Denn: Sei  $x \in S^n$  beliebig und überdecke  $S^n$  durch  $U := S^n \setminus \{x\}$  und  $V := S^n \setminus \{-x\}$ . Korollar zu Lebesgue-Lemma  $\Rightarrow \exists a_0, \dots, a_N \in I, 0 = a_1 < \dots < a_N = 1: \forall i$  liegt  $s([a_i, a_{i+1}])$  ganz in  $U$  oder  $V$ .  $U, V \cong \mathbb{R}^n$  (hier sind alle Wege homotop)  $\Rightarrow \forall i: s|_{[a_i, a_{i+1}]} \sim$  Weg, der Teil eines Großkreises auf  $S^n$  ist.



Für  $n \geq 2$  füllt letzterer nicht  $S^n$ . □

### 1.3 Induzierte Homomorphismen

**Bemerkung III.11.** Ist  $f: X \rightarrow Y$  eine stetige Abbildung zwischen topologischen Räumen, so liefert jeder Weg in  $X$  einen Weg in  $Y$ ,



und für aneinanderfügbare Wege  $u, v: I \rightarrow X$  gilt offenbar  $f \circ (u \cdot v) = (f \circ u) \cdot (f \circ v)$ .

Sind  $u$  und  $v$  ferner homotop, so auch  $f \circ u$  und  $f \circ v$ , denn ist  $H: I \times I \rightarrow X$  eine Homotopie zwischen  $u$  und  $v$ , so ist  $f \circ H: I \times I \rightarrow Y$  eine Homotopie zwischen  $f \circ u$  und  $f \circ v$ .

Betrachtet man insbesondere geschlossene Wege  $u$  in  $x_0 \in X$ , so definiert  $[u] \mapsto [f \circ u]$  also einen Homomorphismus  $f_*: \pi_1(X, x_0) \rightarrow \pi_1(Y, f(x_0))$ , den sogenannten von  $f$  induzierten Homomorphismus der Fundamentalgruppen. Ist  $g: Y \rightarrow Z$  eine weitere stetige Abbildung topologischer Räume, so gilt für jeden Weg  $u$  in  $X$

$$(g \circ f)(u) = g(f(u)) = g \circ (f \circ u)$$

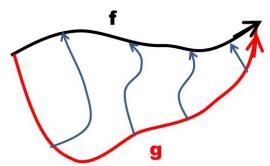
und damit für die induzierten Homomorphismen  $(g \circ f)_* = g_* \circ f_*$   
Speziell gilt für  $id_X: X \rightarrow X, x \mapsto x$ , und  $x_0 \in X$

$$id_* = id_{\pi_1(X, x_0)}$$

**Folgerung** Homöomorphe Räume haben isomorphe Fundamentalgruppen! Denn:  $f: X \cong Y$  Homöomorphismus  $\Rightarrow f_*$  Isomorphismus!

$(f^{-1})_* = (f_*)^{-1}$ , denn für  $f: X \rightarrow Y, f^{-1}: Y \rightarrow X$  gilt:  
 $(f^{-1} \circ f)_* = id_* = (f^{-1})_* \circ f_*$

**Bemerkung III.12.** Tatsächlich hängt der von einer stetigen Abbildung  $f: X \rightarrow Y$  induzierte Homomorphismus  $f_*: \pi_1(X, x_0) \rightarrow \pi_1(Y, f(x_0))$  sogar nur von der Homotopieklasse von  $f \in C(X, Y)$  ab, und damit gilt:  
Die Fundamentalgruppe eines (wegzusammenhängenden) topologischen Raumes ist nicht nur eine Homöomorphie-, sondern sogar eine Homotopie-Invariante, d.h. hängt nur vom Homotopietyp des Raumes ab!



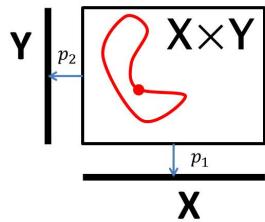
$$f \simeq g \Rightarrow f_* = g_*$$

## 1.4 Produkte

**Satz III.3.** Sind  $X, Y$  topologische Räume und  $x_0 \in X, y_0 \in Y$ , so ist die Fundamentalgruppe des Produktraumes  $X \times Y$  in  $(x_0, y_0)$  kanonisch isomorph zum Produkt der Fundamentalgruppen der Faktoren:

$$\boxed{\pi_1(X \times Y, (x_0, y_0)) = \pi_1(X, x_0) \cdot \pi_1(Y, y_0)}$$

*Beweis.*  $p_1: X \times Y \rightarrow X$  und  $p_2: X \times Y \rightarrow Y$  seien die Projektionen von  $X \times Y$  auf den ersten bzw. zweiten Faktor.



Ist  $Z$  irgendein anderer topologischer Raum, so entspricht jeder stetigen Abbildung  $f: Z \rightarrow X \times Y$  bijektiv ein Paar  $(f_1, f_2)$  stetiger Abbildungen  $f_1: Z \rightarrow X, f_2: Z \rightarrow Y$  mit  $f_i = p_i \circ f, i = 1, 2$

Insbesondere entspricht jeder Weg  $u$  in  $X \times Y$  seinen Projektionen  $u_1$  in  $X$  und  $u_2$  in  $Y$  ( $u_i = p_i \circ u$ ), und zwei Wege in  $X \times Y$  sind homotop genau dann, wenn ihre Projektionen in  $X$  und in  $Y$  homotop sind.

Betrachtet man nun die Fundamentalgruppen von  $X \times Y, X, Y$  in  $(x_0, y_0), x_0, y_0$ , so ist

$$p_*: \pi_1(X \times Y, (x_0, y_0)) \rightarrow \pi_1(X, x_0) \times \pi_1(Y, y_0), [u] \mapsto ([\underbrace{p_1 \circ u}_{=p_{1*}[u]}], [\underbrace{p_2 \circ u}_{=p_{2*}[u]}])$$

deshalb eine Bijektion.

Fasst man  $\pi_1(X, x_0) \times \pi_1(Y, y_0)$  jetzt als direktes Produkt von Gruppen auf, so ist  $p_*$  auch ein Homomorphismus, denn  $p_{1*}$  und  $p_{2*}$  sind Homomorphismen, und damit, weil bijektiv, ist  $p_*$  Isomorphismus.  $\square$

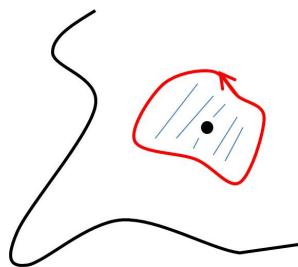
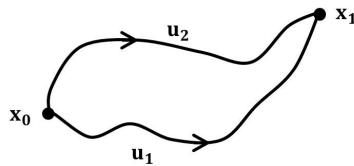
### Beispiel:

$$\begin{aligned} \pi_1(S^1, x_0) &\cong \mathbb{Z} \text{ (siehe später)} \\ \Rightarrow \pi_1(T^n, x_0) &\cong \mathbb{Z}^n \end{aligned}$$

**Satz III.4.** Für einen wegzusammenhängenden Raum  $X$  sind äquivalent:

1.  $\pi_1(X, x_0) = \{0\}$  (für ein und damit alle  $x_0 \in X$ );
2. Jede stetige Abbildung  $\gamma: S^1 \rightarrow X$  ist (frei) nullhomotop;
3. Jede stetige Abbildung  $\gamma: S^1 \rightarrow X$  setzt sich stetig auf  $D^2$  fort;

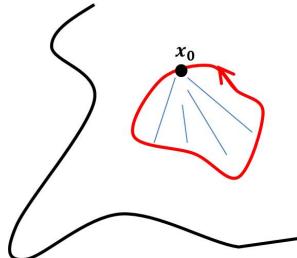
4. Je zwei Wege  $u_1, u_2$  in  $X$  mit gleichen Anfangs- bzw. Endpunkten sind homotop.



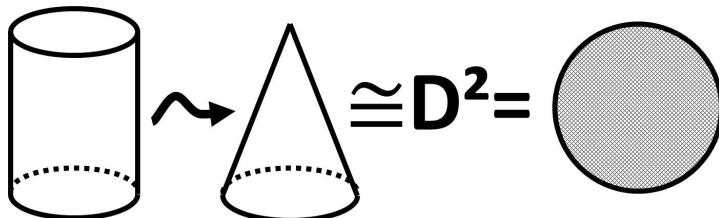
Beweis.

(1)  $\Rightarrow$  (2):  $X$  einfach zusammenhängend  $\Rightarrow$  Jeder geschlossene Weg in  $X$  ist nullhomotop  $\Rightarrow$  Jede Schleife in  $X$  ist nullhomotop  $\Rightarrow$  jede Schleife in  $X$  ist frei nullhomotop

(2)  $\Rightarrow$  (3): Für jede stetige Abbildung  $\gamma: S^1 \rightarrow X$  existiert eine Homotopie  $H: S^1 \times I \rightarrow X$  mit  $H(z, 0) = \gamma(z), H(z, 1) = x_0$



$\Rightarrow \exists$  stetige Abbildung  $H': S^1 \times I /_{S^1 \times \{1\}} \rightarrow X$  mit  $H = H' \circ \pi$ ,  
mit  $\pi: S^1 \times I \rightarrow \underbrace{S^1 \times I /_{S^1 \times \{1\}}}_{\cong D^2}$ :



(3)  $\Rightarrow$  (4): Es sei  $G$  die Abbildung mit

$$G(t, 0) = u_1(t), G(t, 1) = u_2(t), G(0, t) = x_0, G(1, t) = x_1 \text{ für } t \in I,$$

d.h.  $G$  bildet den  $\underbrace{\text{Rand von } I \times I}_{\cong S^1}$  auf  $X$  ab.

Wegen  $I \times I \cong D^2$  und  $\partial(I \times I) \cong S^1$ , setzt sich  $G$  stetig auf ganz  $I \times I$  fort

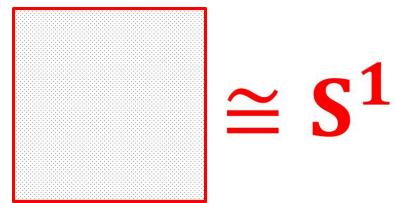


Abbildung III.1: Der Rand des Einheitsquadrates ist homöomorph zur  $S^1$ .

und ist Homotopie  $u_1 \simeq u_2$ .

(4)  $\Rightarrow$  (1): klar

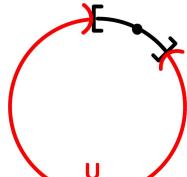
□

## 2 Überlagerungen

**Motivation** Betrachte die stetige und surjektive Abbildung

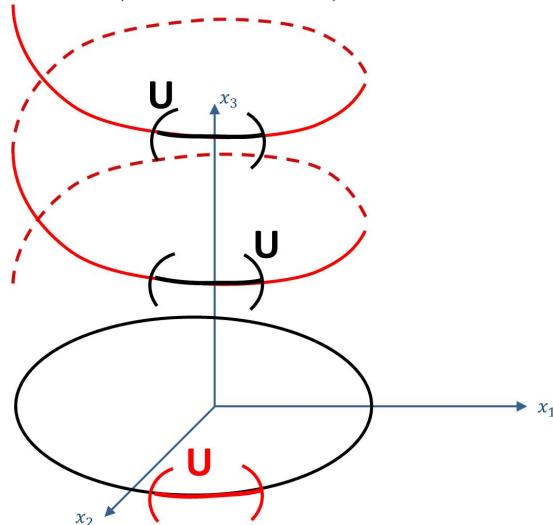
$$\pi: \mathbb{R} \rightarrow S^1 \subset \mathbb{R}^2, t \mapsto (\cos 2\pi t, \sin 2\pi t) = e^{2\pi i t}$$

Entfernt man aus  $S^1$  einen Punkt oder auch ein abgeschlossenes Kreissegment



, so erhält man eine offene Teilmenge  $U$  von  $S^1$ , deren Urbild unter  $\pi$  aus disjunkten offenen Intervallen besteht, und jedes dieser Intervalle wird unter  $\pi$  homöomorph auf  $U$  abgebildet.

**Veranschaulichung** Identifiziere  $\mathbb{R}$  zunächst mit einer "Spirale" im  $\mathbb{R}^3$  via  $t \mapsto (\cos 2\pi t, \sin 2\pi t, t)$ ;



projiziere orthogonal auf die x-y-Ebene, die  $S^1$  enthält.

Zu  $\pi$  gehört zudem eine Gruppe von Homöomorphismen von  $\mathbb{R}$ , die Gruppe der ganzzahligen Translationen

$$\tau_k: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto x + k, k \in \mathbb{Z}$$

und zwei Punkte  $t_0, t_1 \in \mathbb{R}$  haben dasselbe Bild unter  $\pi$  genau dann, wenn sie sich um eine ganze Zahl  $k \in \mathbb{Z}$  unterscheiden.

Jede solche "Deckbewegung" ist durch eine ganze Zahl, z.B. das Bild von  $0 \in \mathbb{R}$ , eindeutig bestimmt.

Es gilt ferner:

$$\tau_{(k+l)} = \tau_k \circ \tau_l$$

Betrachtet man abermals  $\mathbb{R}$  als via  $\pi$  auf  $S^1$  "aufgewickelt", so wird jedes Intervall der Form  $[0, n]$  bzw.  $[-n, 0]$ ,  $n \in \mathbb{N}$ , auf einen geschlossenen Weg auf  $S^1$  abgebildet, und man erhält dadurch alle Elemente der Fundamentalgruppe  $\pi_1(S^1, 1)$ .

Wir werden sehen:  $\pi_1(S^1, 1)$  ist isomorph zur Gruppe der Deckbewegungen von  $\pi: \mathbb{R} \rightarrow S^1$ , also  $\cong \mathbb{Z}$ , weil  $\mathbb{R}$  einfach zusammenhängend ist und dieses Phänomen allgemein für sogenannte "universelle" Überlagerungen gilt.

$$\begin{aligned}\mathbb{R}/\mathbb{Z} &\cong S^1 \\ \tilde{X}/G = X, \pi_1(\tilde{X}) &= \{0\} \Rightarrow \pi_1(X) \cong G\end{aligned}$$

**Definition III.7** (Überlagerung). (TODO: Tuschmann wegen Wegzusammenhang fragen) Ist  $X$  ein wegzusammenhängender topologischer Raum, so ist eine Überlagerung von  $X$  ein wegzusammenhängender Raum  $\tilde{X}$  zusammen mit einer stetigen surjektiven Abbildung  $\pi: \tilde{X} \rightarrow X$ , so dass gilt:

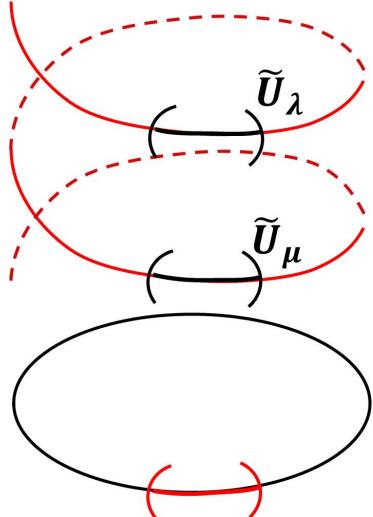
(Ü) Jeder Punkt  $x \in X$  besitzt eine offene Umgebung  $U = U(x)$ , so dass das Urbild  $\pi^{-1}(U(x)) \subset \tilde{X}$  eine disjunkte Vereinigung von offenen Teilmengen von  $\tilde{X}$  ist,

$$\pi^{-1}(U(x)) = \{\tilde{U}_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}, \tilde{U}_\lambda \subset \tilde{X} \text{ ist offen, } \tilde{U}_\lambda \cap \tilde{U}_\mu = \emptyset \quad \forall \lambda \neq \mu,$$

so dass für alle  $\lambda \in \Lambda$

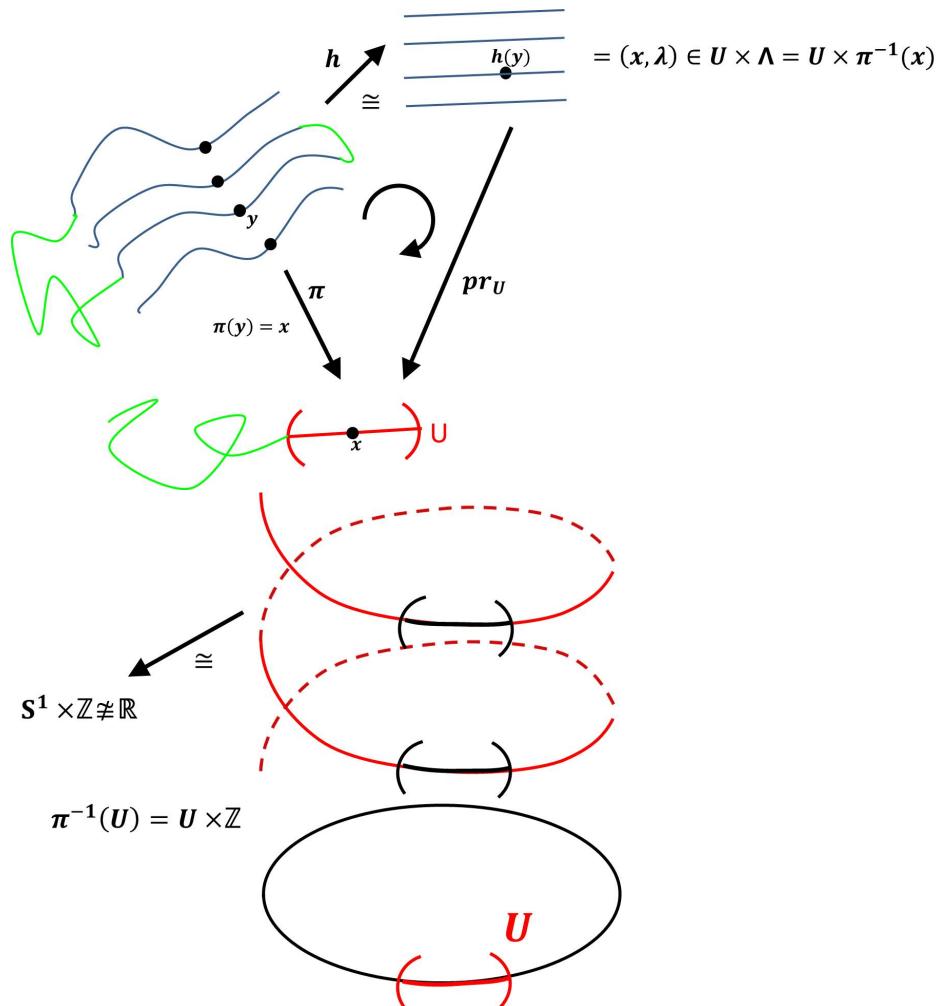
$$\pi|_{\tilde{U}_\lambda}: \tilde{U}_\lambda \rightarrow U(x)$$

ein Homöomorphismus ist.



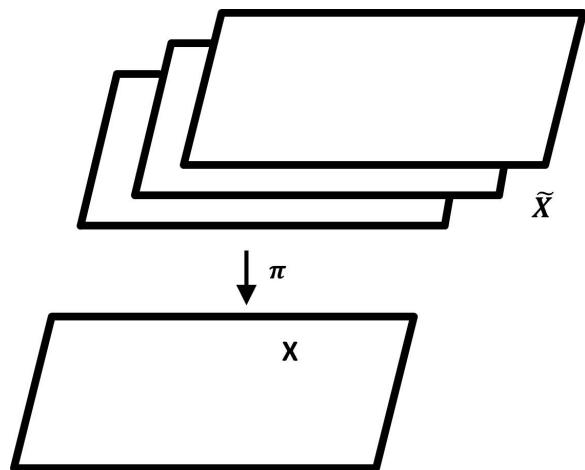
**Terminologie/Sprechweisen**  $\pi: \tilde{X} \rightarrow X$  heißt auch Projektion oder Überlagerungsabbildung,  $\tilde{X}$  der überlagernde und  $X$  der überlagerte Raum. Für  $A \subset X$  sagt man auch,  $\tilde{A} := \pi^{-1}(A)$  liege über  $A$ , und speziell für  $x \in X$  heißt  $\pi^{-1}(x) \subset \tilde{X}$  auch Faser über  $x$ . Für die Einschränkung  $\pi^{-1}(A), \pi|_{\pi^{-1}(A)}$  von  $\pi: \tilde{X} \rightarrow X$  auf  $A \subset X$  schreibt man auch kurz  $\tilde{X}|_A$ .  $U(x)$  wie in III.7.(Ü) heißt auch kanonische oder lokal trivialisierende Umgebung von  $x$ .

**Bemerkung III.13.**  $\pi: \tilde{X} \rightarrow X$  ist also eine Überlagerung, wenn es für alle  $x \in X$  offenes  $U = U(x)$  und einen diskreten Raum  $\Lambda$  gibt, so dass  $\tilde{X}|_U$  und  $U \times \Lambda$  über  $U$  homöomorph sind:



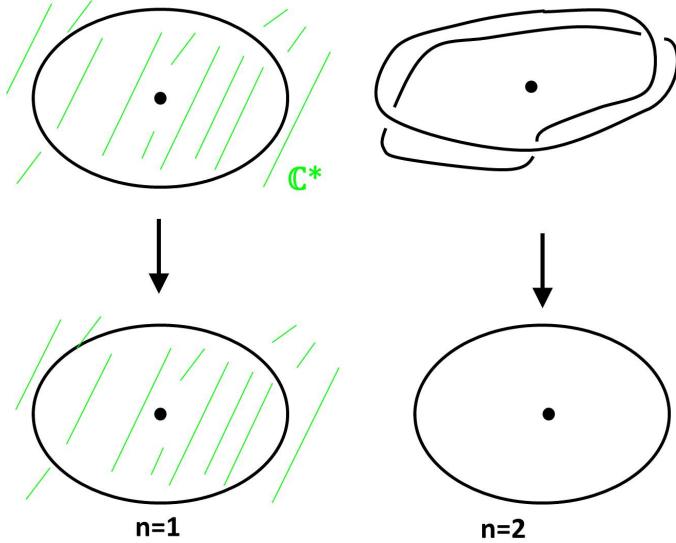
Für  $\Lambda$  kann natürlich auch  $\pi^{-1}(x)$  gewählt werden!

**Bemerkung III.14.** Die Kardinalität von  $\pi^{-1}(x)$  heißt Blätterzahl der Überlagerung  $\pi: \tilde{X} \rightarrow X$  und ist für zusammenhängendes  $X$  konstant.



### Beispiel: Beispiele für Überlagerungen

1.  $\pi: \mathbb{R} \rightarrow S^1$
2.  $\pi: \mathbb{C}^* := \mathbb{C} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{C}^*$ ,  $z \mapsto z^n$ ,  $n \in \mathbb{N}$ , ist für jedes  $n = 1, 2, 3, \dots$  eine Überlagerung.



Für alle  $n \in \mathbb{N}$  überlagert  $S^1$  sich aber selber, und läuft auf unendlich viele verschiedene Arten.

**Mini-Exkurs: Funktionentheorie, verzweigte Überlagerung**  
...

**Definition III.8** (Äquivalenz von Überlagerungen). Zwei Überlagerungen

$\pi: \tilde{X} \rightarrow X, \pi': \tilde{X}' \rightarrow X$  heißen äquivalent

$\Leftrightarrow \exists$  Homöomorphismus  $f: \tilde{X} \rightarrow \tilde{X}'$

mit  $\pi' \circ f = \pi$ :

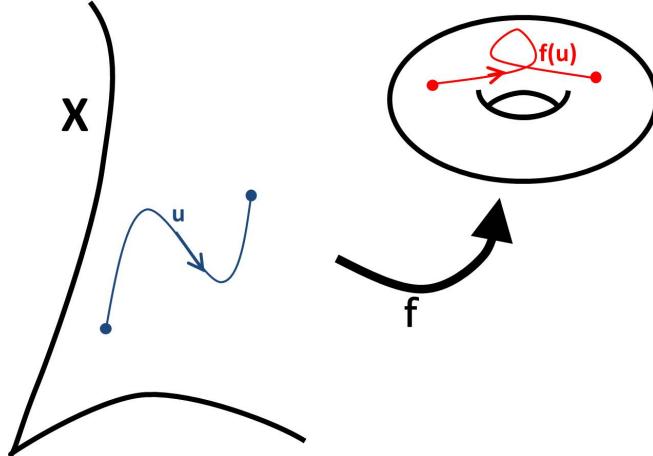
$$\begin{array}{ccc} \tilde{X} & \xrightarrow{f} & \tilde{X}' \\ \pi \searrow & \curvearrowright & \swarrow \pi' \\ & X & \end{array}$$

**Beispiel:**

$\mathbb{R}^2 \rightarrow \underbrace{S^1 \times \mathbb{R}}_{\cong \mathbb{C}^*}, (x, y) \mapsto (e^{2\pi i x}, y)$  und  $\mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}^*, z \mapsto e^z$  sind (wenn man  $S^1 \times \mathbb{R}$  mit  $\mathbb{C}^*$  identifiziert) äquivalent.

## 2.1 Induzierte Homomorphismen

**Bemerkung III.15.** Ist  $f: X \rightarrow Y$  eine stetige Abbildung zwischen topologischen Räumen, so liefert jeder Weg in  $X$  einen Weg in  $Y$ ,



und für aneinanderfügbare Wege  $u, v: I \rightarrow X$  gilt offenbar  $f \circ (u \cdot v) = (f \circ u) \cdot (f \circ v)$ .

Sind  $u$  und  $v$  ferner homotop, so auch  $f \circ u$  und  $f \circ v$ , denn ist  $H: I \times I \rightarrow X$  eine Homotopie zwischen  $u$  und  $v$ , so ist  $f \circ H: I \times I \rightarrow Y$  eine Homotopie zwischen  $f \circ u$  und  $f \circ v$ .

Betrachtet man insbesondere geschlossene Wege  $u$  in  $x_0 \in X$ , so definiert  $[u] \mapsto [f \circ u]$  also einen Homomorphismus  $f_*: \pi_1(X, x_0) \rightarrow \pi_1(Y, f(x_0))$ , den sogenannten von  $f$  induzierten Homomorphismus der Fundamentalgruppen. Ist  $g: Y \rightarrow Z$  eine weitere stetige Abbildung topologischer Räume, so gilt

für jeden Weg  $u$  in  $X$

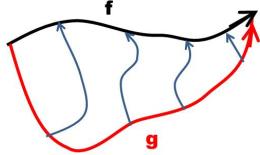
$$(g \circ f)(u) = g(f(u)) = g \circ (f \circ u)$$

und damit für die induzierten Homomorphismen  $(g \circ f)_* = g_* \circ f_*$   
Speziell gilt für  $\text{id}_X: X \rightarrow X, x \mapsto x$ , und  $x_0 \in X$

$$\text{id}_* = \text{id}_{\pi_1(X, x_0)}$$

**Folgerung** Homöomorphe Räume haben isomorphe Fundamentalgruppen!  
Denn:  $f: X \cong Y$  Homöomorphismus  $\Rightarrow f_*$  Isomorphismus!  
 $(f^{-1})_* = (f_*)^{-1}$ , denn für  $f: X \rightarrow Y, f^{-1}: Y \rightarrow X$  gilt:  
 $(f^{-1} \circ f)_* = \text{id}_* = (f^{-1})_* \circ f_*$

**Bemerkung III.16.** Tatsächlich hängt der von einer stetigen Abbildung  $f: X \rightarrow Y$  induzierte Homomorphismus  $f_*: \pi_1(X, x_0) \rightarrow \pi_1(Y, f(x_0))$  sogar nur von der Homotopieklasse von  $f \in C(X, Y)$  ab, und damit gilt:  
Die Fundamentalgruppe eines (wegzusammenhängenden) topologischen Raumes ist nicht nur eine Homöomorphie-, sondern sogar eine Homotopie-Invariante, d.h. hängt nur vom Homotopietyp des Raumes ab!



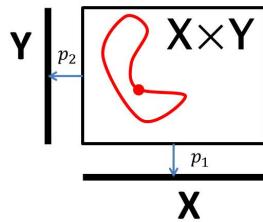
$$f \simeq g \Rightarrow f_* = g_*$$

## 2.2 Produkte

**Satz III.5.** Sind  $X, Y$  topologische Räume und  $x_0 \in X, y_0 \in Y$ , so ist die Fundamentalgruppe des Produktraumes  $X \times Y$  in  $(x_0, y_0)$  kanonisch isomorph zum Produkt der Fundamentalgruppen der Faktoren:

$$\boxed{\pi_1(X \times Y, (x_0, y_0)) = \pi_1(X, x_0) \cdot \pi_1(Y, y_0)}$$

*Beweis.*  $p_1: X \times Y \rightarrow X$  und  $p_2: X \times Y \rightarrow Y$  seien die Projektionen von  $X \times Y$  auf den ersten bzw. zweiten Faktor.



Ist  $Z$  irgendein anderer topologischer Raum, so entspricht jeder stetigen Abbildung  $f: Z \rightarrow X \times Y$  bijektiv ein Paar  $(f_1, f_2)$  stetiger Abbildungen  $f_1: Z \rightarrow X, f_2: Z \rightarrow Y$  mit  $f_i = p_i \circ f, i = 1, 2$

Insbesondere entspricht jeder Weg  $u$  in  $X \times Y$  seinen Projektionen  $u_1$  in  $X$  und  $u_2$  in  $Y$  ( $u_i = p_i \circ u$ ), und zwei Wege in  $X \times Y$  sind homotop genau dann, wenn ihre Projektionen in  $X$  und in  $Y$  homotop sind.

Betrachtet man nun die Fundamentalgruppen von  $X \times Y, X, Y$  in  $(x_0, y_0), x_0, y_0$ , so ist

$$p_*: \pi_1(X \times Y, (x_0, y_0)) \rightarrow \pi_1(X, x_0) \times \pi_1(Y, y_0), [u] \mapsto ([\underbrace{p_1 \circ u}_{=p_{1*}[u]}], [\underbrace{p_2 \circ u}_{=p_{2*}[u]}])$$

deshalb eine Bijektion.

Fasst man  $\pi_1(X, x_0) \times \pi_1(Y, y_0)$  jetzt als direktes Produkt von Gruppen auf, so ist  $p_*$  auch ein Homomorphismus, denn  $p_{1*}$  und  $p_{2*}$  sind Homomorphismen, und damit, weil bijektiv, ist  $p_*$  Isomorphismus.  $\square$

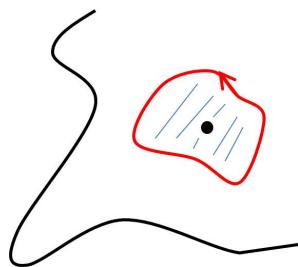
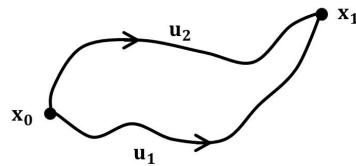
### Beispiel:

$$\begin{aligned} \pi_1(S^1, x_0) &\cong \mathbb{Z} \text{ (siehe später)} \\ \Rightarrow \pi_1(T^n, x_0) &\cong \mathbb{Z}^n \end{aligned}$$

**Satz III.6.** Für einen wegzusammenhängenden Raum  $X$  sind äquivalent:

1.  $\pi_1(X, x_0) = \{0\}$  (für ein und damit alle  $x_0 \in X$ );
2. Jede stetige Abbildung  $\gamma: S^1 \rightarrow X$  ist (frei) nullhomotop;
3. Jede stetige Abbildung  $\gamma: S^1 \rightarrow X$  setzt sich stetig auf  $D^2$  fort;

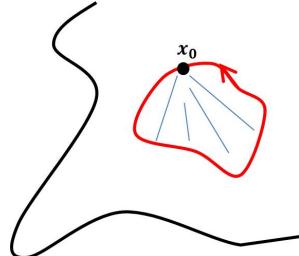
4. Je zwei Wege  $u_1, u_2$  in  $X$  mit gleichen Anfangs- bzw. Endpunkten sind homotop.



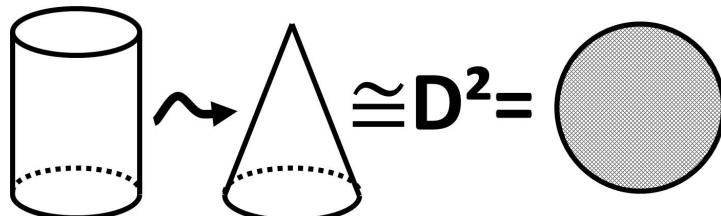
Beweis.

(1)  $\Rightarrow$  (2):  $X$  einfach zusammenhängend  $\Rightarrow$  Jeder geschlossene Weg in  $X$  ist nullhomotop  $\Rightarrow$  Jede Schleife in  $X$  ist nullhomotop  $\Rightarrow$  jede Schleife in  $X$  ist frei nullhomotop

(2)  $\Rightarrow$  (3): Für jede stetige Abbildung  $\gamma: S^1 \rightarrow X$  existiert eine Homotopie  $H: S^1 \times I \rightarrow X$  mit  $H(z, 0) = \gamma(z), H(z, 1) = x_0$



$\Rightarrow \exists$  stetige Abbildung  $H': S^1 \times I /_{S^1 \times \{1\}} \rightarrow X$  mit  $H = H' \circ \pi$ ,  
mit  $\pi: S^1 \times I \rightarrow \underbrace{S^1 \times I /_{S^1 \times \{1\}}}_{\cong D^2}$ :



(3)  $\Rightarrow$  (4): Es sei  $G$  die Abbildung mit

$$G(t, 0) = u_1(t), G(t, 1) = u_2(t), G(0, t) = x_0, G(1, t) = x_1 \text{ für } t \in I,$$

d.h.  $G$  bildet den  $\underbrace{\text{Rand von } I \times I}_{\cong S^1}$  auf  $X$  ab.

Wegen  $I \times I \cong D^2$  und  $\partial(I \times I) \cong S^1$ , setzt sich  $G$  stetig auf ganz  $I \times I$  fort

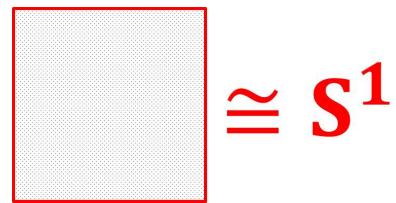


Abbildung III.2: Der Rand des Einheitsquadrates ist homöomorph zur  $S^1$ .

und ist Homotopie  $u_1 \simeq u_2$ .

(4)  $\Rightarrow$  (1): klar

□

### 3 Liften von Abbildungen

**Definition III.9** (Lift, Hochhebung). Ist  $\pi: \tilde{X} \rightarrow X$  Überlagerung und  $f: Z \rightarrow X$  eine Abbildung, so heißt eine Abbildung  $\tilde{f}: Z \rightarrow \tilde{X}$  mit  $f = \pi \circ \tilde{f}$  ein Lift oder Hochhebung von  $f$  (in  $\tilde{X}$ ). (TODO: Bild 1)

(TODO: Bild 2)

**Satz III.7** (Liften von Wegen). Es sei  $\pi: \tilde{X} \rightarrow X$  Überlagerung.

Ist  $[a, b] \subset \mathbb{R}$  und  $v: [a, b] \rightarrow X$  stetig sowie  $v(a) = x_0 \in X$  und  $\tilde{x}_0 \in \tilde{X}$  mit  $\pi(\tilde{x}_0) = x_0$ , so existiert genau ein stetiger Lift  $\tilde{v}$  von  $v$  in  $\tilde{X}$  mit  $\tilde{v}(a) = \tilde{x}_0$ . Insbesondere lassen sich Wege in  $X$  bei vorgegebenem Anfangspunkt in der Faser stets eindeutig zu Wegen in  $\tilde{X}$  liften. (TODO: Bild 3)

*Beweis.* Jeder Punkt  $t \in [a, b]$  besitzt in  $[a, b]$  eine Umgebung, die durch  $v$  in einer lokal trivialisierenden Umgebung von  $v(t)$  abgebildet wird. Ferner existiert eine Zerlegung  $a = t_0 < t_1 < \dots < t_n = b$  von  $[a, b]$ , sodass gilt:

$v([t_{i-1}, t_i])$  ist in einer lokal trivialisierenden Umgebung in  $X$  enthalten.

$\tilde{v}(a) := \tilde{x}_0$  existiert und ist eindeutig bestimmt.

Ist  $\tilde{v}(t)$  für  $a \leq t \leq t_{i-1}$  bereits erklärt, so betrachte  $v(t)$  für  $t_{i-1} \leq t \leq t_i$ . Dieses Wegstück liegt in einer lokal trivialisierenden Umgebung  $U$ , und wegen (Ü) existiert  $\tilde{U}_\lambda \subset \tilde{X}$  offen, so dass  $\pi|_{\tilde{U}_\lambda}: \tilde{U}_\lambda \rightarrow U$  ist Homöomorphismus, und  $\tilde{v}(t_{i-1}) \in \tilde{U}_\lambda$  enthalten ist.

$$q := (\pi(\tilde{U}_\lambda))^{-1}: U \rightarrow \tilde{U}_\lambda \Rightarrow \tilde{v}(t) := (q \circ v)(t)$$

ist stetig für  $t_{i-1} \leq t \leq t_i \Rightarrow \tilde{v}(t)$  ist auch auf  $[t_{i-1}, t_i]$  erklärt, und damit auf  $[0, t]$ .

Soll andererseits  $\tilde{v}$  für  $t_{i-1} \leq t \leq t_i$  stetig sein, so kann  $\tilde{v}(t)$  für diese  $t$  die Wegzusammenhangskomponente von  $\tilde{v}(t_{i-1}) \subset \pi^{-1}(U)$  nicht verlassen, also erst recht nicht  $\tilde{U}_\lambda \Rightarrow \tilde{v}$  ist eindeutig.  $\square$

**Korollar III.2.** Ist  $w: I \rightarrow X$  ein Weg mit Lift  $\tilde{w}$  und  $\tilde{v}$  ein Lift von  $w^{-1}$ , so dass  $\tilde{v}(0) = \tilde{w}(1)$  (TODO: Bild 4) so gilt  $\tilde{v} = (\tilde{w})^{-1}$ , denn  $\tilde{v}$  und  $\tilde{w}^{-1}$  liegen über  $w^{-1}$  und haben denselben Anfangspunkt.

**Korollar III.3.**  $x, y \in X \Rightarrow \#\pi^{-1}(x) = \#\pi^{-1}(y)$ , d.h. die Blätterzahl einer Überlagerung ist wohldefiniert.

Denn:  $X$  ist wegzusammenhängend  $\Rightarrow \exists$  Weg  $w$  von  $x$  nach  $y$ . Lifte  $w$  auf alle möglichen Weisen  $\Rightarrow$  alle Punkte von  $\pi^{-1}(x)$  sind genau einmal Anfangspunkt  $\Rightarrow$  Jeder Punkt  $\in \pi^{-1}(y)$  ist genau einmal Endpunkt nach vorstehendem Korollar.

**Satz III.8** (Hochheben/Liften von Homotopien). *Es sei  $f: Z \rightarrow X$  stetige Abbildung und  $\tilde{f}: Z \rightarrow \tilde{X}$  (stetiger) Lift von  $f$  sowie  $H: Z \times I \rightarrow X$  mit  $H_0 = f$  stetig  $\Rightarrow \exists!$  stetige Abbildung  $\tilde{H}: Z \times I \rightarrow \tilde{X}$  mit:*

$$\tilde{H} \text{ ist Lift von } H \text{ und } \tilde{H}_0 = \tilde{f}.$$

Ferner gilt:

Ist  $A \subset Z$  und  $H$  Homotopie relativ  $A$ <sup>3</sup>, so auch  $\tilde{H}$ .

*Beweis.* Satz über das Liften von Wegen zeigt:

$\forall z \in Z$  muss  $\tilde{H}_z: I \rightarrow \tilde{X}$  derjenige Weg sein, der über  $H_z$  liegt und Anfangspunkt  $\tilde{f}(z)$  besitzt.  $\Rightarrow$

$\Rightarrow \tilde{H}$  ist eindeutig bestimmt, und damit folgt auch der letzte Teil des Satzes.  
 $\tilde{H}$  ist stetig: Folgt daraus, dass  $\pi: \tilde{X} \rightarrow X$  lokaler Homöomorphismus ist.  
(TODO: Bild 5)  $\square$

**TODO:** Exkurs: Jede Gruppe ist realisierbar als Fundamentalgruppe eines C-W-Komplexes. Dieser ist kompakt, falls es endlich viele Erzeuger/Zellen gibt. (Man kann Räume aus Zellen "zusammenlegen", so ist z.B. die  $S^2 =$  Nullzelle + Zweizelle.)

**Satz III.9** (Monodromie-Satz). *Sind  $w_0, w_1: I \rightarrow X$  Wege in  $X$  mit Liften  $\tilde{w}_0, \tilde{w}_1$ , die denselben Anfangspunkt haben, so gilt  $w_0 \simeq w_1 \Leftrightarrow \tilde{w}_0 \simeq \tilde{w}_1$*

*Beweis.*  $\Rightarrow$ :  $H: I \times I \rightarrow X$  sei Homotopie  $w_0 \simeq w_1$  letzter Satz  $\Rightarrow \exists$  Homotopie  $\tilde{H}: I \times I \rightarrow \tilde{X}$  über  $H$  ( $\pi \circ \tilde{H} = H$ ) zwischen  $\tilde{w}_0$  und  $\tilde{w}_1$   
 $\tilde{w}_0(0) = \tilde{w}_1(0)$  und Eindeutigkeit der Liftung von Wegen  $\Rightarrow \tilde{H}_1 = \tilde{w}_1$ , also  $\tilde{w}_1 \simeq \tilde{w}_0$ .

$\Leftarrow$ : klar, da  $\pi$  stetig.  $\square$

### 3.1 Überlagerungen und Fundamentalgruppe

**Satz III.10.** *Ist  $\pi: \tilde{X} \rightarrow X$  Überlagerung und  $\tilde{x} \in \tilde{X}$ , so ist die induzierte Abbildung  $\pi_*: \pi_1(\tilde{X}, \tilde{x}) \rightarrow \pi_1(X, \pi(\tilde{x}))$  injektiv!<sup>4</sup>*

*Beweis.* Ist  $w$  geschlossener Weg in  $\tilde{x} \in \tilde{X}$  und

$$\pi_*([w]) = [\pi \circ w] = 1 \in \pi_1(X, \pi(\tilde{x})),$$

so ist  $\pi \circ w$  homotop zum konstanten Weg  $c_{\pi(\tilde{x})}$ . Ist nun  $H$  eine Homotopie von Wegen zwischen  $\pi \circ w$  und  $c_{\pi(\tilde{x})}$ , so liefert ein Lift von  $H$  eine Homotopie von Wegen zwischen  $w$  und einem Lift von  $c_{\pi(\tilde{x})}$ . (TODO: Bild 6, Bild 7)  
Aber jeder Lift eines konstanten Weges ist konstant!  $\square$

<sup>3</sup>Auf dem Teilraum  $A$  ist diese Homotopie konstant, also stationär.

<sup>4</sup>Ein Raum kann nur von einem anderen Überlagert werden, wenn der andere eine Fundamentalgruppe hat, die Untergruppe der Fundamentalgruppe von ihm ist / "in die andere reinkommt".

**Definition III.10** (charakterisierende Untergruppe). Die Untergruppe  $U(\pi, \tilde{x}) := \pi_*(\pi_1(\tilde{X}, \tilde{x})) < \pi_1(X, \pi(\tilde{x}))$  heißt charakterisierende Untergruppe der Überlagerung  $\tilde{X} \rightarrow X$ .

**Bemerkung III.17.**  $U(\pi, \tilde{x})$  besteht also aus den Homotopieklassen von Schleifen in  $X$ , deren lift mit Anfangspunkt  $\tilde{x}$  wieder eine Schleife in  $\tilde{x}$  ist.

**Definition III.11** (Lift).  $L_\pi(w, \tilde{x}) :=$  Lift von  $w$  zu  $\tilde{X}$  mit Anfangspunkt  $\tilde{x}$  ( $w$  Weg in  $X$ )

D.h.  $U(\pi, \tilde{x}) = \{[w] \mid w \text{ ist Schleife in } \pi(\tilde{x}) \text{ und } L_\pi(w, \tilde{x}(1)) = \tilde{x}$  (TODO: Bild 8) Wie hängt  $U(\pi, \tilde{x})$  von  $\tilde{x}$  ab?

**Bemerkung III.18.** Ist  $\pi: \tilde{X} \rightarrow X$  Überlagerung,  $x \in X$ , und  $\tilde{x}, \tilde{x}' \in \pi^{-1}(x)$  und ist  $w$  Weg von  $\tilde{x}$  zu  $\tilde{x}'$ , so ist  $\pi \circ w$  Schleife in  $x$  und es gilt

$$U(\pi, \tilde{x}') = [\pi \circ w]^{-1} \cdot U(\pi, \tilde{x})[\pi \circ w]$$

d.h.  $U(\pi, \tilde{x}')$  und  $U(\pi, \tilde{x})$  sind konjugiert und

$$U(\pi, \tilde{x}') = U(\pi, \tilde{x}) \Leftrightarrow [\pi \circ w] \text{ normalisiert } U(\pi, \tilde{x})$$

Denn:  $[\pi \circ w]^{-1} U(\pi, \tilde{x}) [\pi \circ w] \subset U(\pi, \tilde{x}')$ :  $v$  Schleife in  $(\tilde{X}, \tilde{x})$  (TODO: Bild 9)

$\Rightarrow (\pi \circ w^{-1}) \cdot (\pi \circ v) \cdot (\pi \circ w)$  hat in  $\pi_1(X, \pi(\tilde{x}))$  die Form  $\pi(w^{-1} \cdot v \cdot w)$ , d.h. gehört zu  $U(\pi, \tilde{x}')$ .

**Erinnerung**  $\pi: \tilde{X} \rightarrow X, \tilde{x} \in \tilde{X}, x = \pi(\tilde{x})$

$$\Rightarrow \pi_*: \pi_1(\tilde{X}, \tilde{x}) \rightarrow \pi_1(X, x) \text{ ist Monomorphismus!}$$

$U(\pi, \tilde{x}) := \pi_*(\pi_1(\tilde{X}, \tilde{x}))$  heißt charakterisierende Untergruppe der Überlagerung  $\pi: \tilde{X} \rightarrow X$ . (TODO Bild 1)

**Bemerkung III.19.** Für  $U(\pi, \tilde{x})$  gilt:

Sind  $\tilde{x}, \tilde{x}' \in \tilde{X}$  Punkte über  $x = \pi(\tilde{x}) = \pi(\tilde{x}') \in X$ , und ist  $H := \pi_*(\pi_1(\tilde{X}, \tilde{x}))$ ,  $H' := \pi_*(\pi_1(\tilde{X}, \tilde{x}'))$  sowie  $\tilde{w}$  Weg in  $\tilde{X}$  von  $\tilde{x}$  nach  $\tilde{x}'$  und  $w = \pi \circ \tilde{w}$ , so gilt  $H' = [w]^{-1} H [w]$  und für jedes  $\alpha \in \pi_1(X, x)$  existiert auch immer ein  $\tilde{x}' \in \tilde{X}$  über  $x$ , so dass  $H' = \alpha H \alpha^{-1}$  ist, d.h.  $\pi: \tilde{X} \rightarrow X$  entspricht einer Klasse von zueinander konjugierten Untergruppen von  $\pi_1(X, x)$ . (TODO: Bild 2)

Diese<sup>5</sup> hängt auch nicht von der Wahl des Punktes  $x \in X$  ab, da für  $x, x' \in X$  ja auch  $\pi_1(X, x)$  und  $\pi_1(X, x')$  konjugiert sind.

---

<sup>5</sup>  $w$  sei Weg in  $X$  mit Anfangspunkt  $x$  und  $\tilde{w}$  sei Lift von  $w$  zu  $\tilde{x} \in \pi^{-1}(x) \subset \tilde{X}$ .  $\tilde{w}(1)$  hängt (TODO: Bild 3) nur von  $[w]$  ab und es gilt

<sup>5</sup>Klasse von Untergruppen

**Satz III.11.** Es seien  $\tilde{w}_1$  und  $\tilde{w}_2$  wege in  $\tilde{X}$  mit  $\tilde{w}_1(0) = \tilde{x} = \tilde{w}_2(0)$  sowie  $w_1 = \pi \circ \tilde{w}_1, w_2 = \pi \circ \tilde{w}_2$ . Dann gilt

$$\tilde{w}_1(1) = \tilde{w}_2(1) \Leftrightarrow w_1(1) = w_2(1) \text{ und } [w_1 \cdot w_2^{-1}] \in H = \pi_*(\pi_1(\tilde{X}, \tilde{x})) = U(\pi, \tilde{x})$$

*Beweis.* Denn:  $\tilde{w}_1(1) = \tilde{w}_2(1) \Rightarrow \exists \tilde{w}_1 \cdot \tilde{w}_2^{-1}$ , und dies ist geschlossener Weg  $\Rightarrow w_1(1) = w_2(1), [w_1 \cdot w_2^{-1}] \in H$ .

Sei umgekehrt  $w_1(1) = w_2(1)$ , also damit  $w_1 w_2^{-1}$  definiert, und  $[w_1 \cdot w_2^{-1}] \in H$ . Über (TODO: Bild 4)  $w_2^{-1}$  liegt ein Weg  $\tilde{v}$  mit  $\tilde{v}(0) = \tilde{w}_1(1)$ , und  $\tilde{w}_1 \cdot \tilde{v}$  liegt über  $w_1 \cdot w_2^{-1}$ .

Ferner existiert nach Voraussetzung in  $\tilde{X}$  ein geschlossener Weg  $\tilde{u}$  mit  $\tilde{u}(0) = \tilde{x}$  sowie  $\pi_*([u]) = [w_1 \cdot w_2^{-1}]$ . Eindeutigkeit von Lifts/Homotopien  $\Rightarrow \tilde{u} \simeq \tilde{w}_1 \cdot \tilde{v} \Rightarrow \tilde{w}_1 \cdot \tilde{v}$  ist geschlossen  $\Rightarrow \tilde{v}(1) = \tilde{x}$ .

$\tilde{v}^{-1}, \tilde{w}_2$  liegen über  $\tilde{w}_2 \Rightarrow \tilde{w}_2 = \tilde{v}^{-1} \Rightarrow \tilde{w}_2(1) = \tilde{v}(0) = \tilde{w}_1(1)$ .  $\square$

**Andere Interpretation:** Betrachte alle Homotopieklassen von Wegen in  $X$  mit Anfangspunkt  $x$ .

Es sei  $H < \pi_1(X, x)$  eine Untergruppe, und setze

$$H[w] := \{\gamma \cdot [w] \mid \gamma \in H\}$$

$[w'] \in H \cdot [w]$  bedeutet:  $\exists$  geschlossenen Weg  $v$  mit  $[w'] = [v] \cdot [w]$  und  $[v] \in H$ . Hier ist  $w'(1) = w(1)$ , also  $w' \cdot w^{-1}$  erklärt, und es gilt  $[w' \cdot w^{-1}] = [w'] \cdot [w^{-1}] = [v] \cdot [w] \cdot [w^{-1}] = [v] \in H$ .

Ist umgekehrt  $w'(1) = w(1)$  und  $[w' \cdot w^{-1}] \in H$ , so ist  $[w'] = [w'][w^{-1} \cdot w] = [w' \cdot w^{-1}][w] \in H[w]$ , d.h.

$$(*) \quad [w'] \in H[w] \Leftrightarrow w'(1) = w(1) \text{ und } [w'][w^{-1}] \in H.$$

Wegen  $[w][w'^{-1}] = [w \cdot w'^{-1}] = [(w' \cdot w^{-1})^{-1}] = [w' \cdot w^{-1}]^{-1}$  ist deshalb  $[w'] \in H[w] \Leftrightarrow [w] \in H[w']$

$\Rightarrow$  Für zwei Wege  $w_1, w_2$  mit Anfangspunkt  $x \in X$  gilt entweder  $H[w_1] = H[w_2]$  oder  $H[w_1] \cap H[w_2] = \emptyset$ !

$H[w]$  heißt Rechtsnebenklasse von  $[w]$  nach  $H$ ,

und ist  $w$  geschlossen, so ist  $H[w]$  eine Rechtsnebenklasse (oder Rechtsrestklasse) von  $\pi_1(X, x)$  nach  $H$  im üblichen Sinn der Gruppentheorie.

Damit gilt der

**Satz III.12.** Ist  $H = \pi_*(\pi_1(\tilde{X}, \tilde{x})) = U(\pi, \tilde{x})$  und  $w$  Weg in  $X$  mit Anfangspunkt  $x = \pi(\tilde{x})$  sowie  $\tilde{w}$  der Lift von  $w$  mit Anfangspunkt  $\tilde{x}$ , so ist

$$(**) \quad H[w] \mapsto \tilde{w}(1)$$

eine Bijektion zwischen der Menge der Rechtsnebenklassen  $\{H[w]\}$  und  $\tilde{X}$ !

**Erläuterung** Dies gilt, weil  $\tilde{X}$  wegzusammenhängend ist und also jeder Punkt von  $\tilde{X}$  als  $\tilde{w}(1)$  für geeignetes  $w$  erhalten werden kann. Durch  $H[w] \mapsto \tilde{w}(1)$  ist  $\pi: \tilde{X} \rightarrow X$  nun eindeutig charakterisiert: (\*\*\*) legt zunächst die Menge der Punkte von  $\tilde{X}$ <sup>6</sup> fest und wegen  $\pi \circ \tilde{w} = w$  lässt sich  $\pi$  dann durch  $\tilde{X} \ni \tilde{w}(1) \mapsto H[w] \mapsto w(1) \in X$  beschreiben!

**Satz III.13** (Liften von Abbildungen in Überlagerungen). *Es sei  $\pi: \tilde{X} \rightarrow X$  eine Überlagerung,  $\tilde{x} \in \tilde{X}$  und  $x = \pi(\tilde{x}) \in X$ . Ferner sei  $Z$  ein wegzusammenhängender und lokal wegzusammenhängender topologischer Raum mit  $z \in Z$  sowie  $f: Z \rightarrow X$  mit  $f(z) = x$  stetig. Dann sind äquivalent:*

1. *f besitzt einen Lift  $\tilde{f}: (Z, z) \rightarrow (\tilde{X}, \tilde{x})$  (TODO: Bild 5) (mit  $\tilde{f}(z) = \tilde{x}$ )*
2.  *$f_*(\pi_1(Z, z)) \subset \pi_*(\pi_1(\tilde{X}, \tilde{x}))$*

**Definition III.12** (lokal wegzusammenhängend). *Z lokal wegzusammenhängend : $\Leftrightarrow$  in jeder Umgebung jedes Punktes in  $Z$  ist immer eine wegzusammenhängende Umgebung enthalten. (TODO: Bild 6)*

---

<sup>6</sup>im Überlagerungsraum