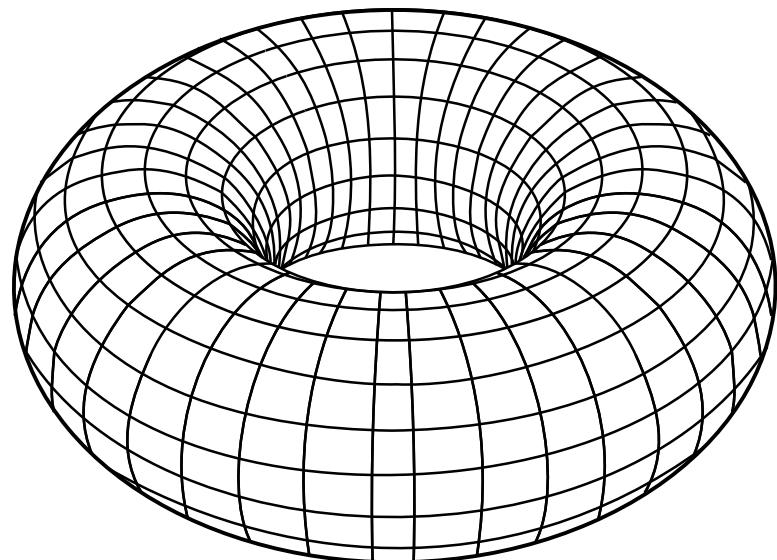


Einführung in die Geometrie und Topologie - Mitschrieb -

Vorlesung im Wintersemester 2011/2012

Sarah Lutteropp, Simon Bischof

8. Dezember 2011



Inhaltsverzeichnis

Einführung	2
I Grundlagen der Allgemeinen Topologie	10
1 Erste Beispiele topologischer Räume	10
2 Topologische Grundbegriffe	11
3 Stetige Abbildungen	19
4 Zusammenhang und Kompaktheit	23
5 Trennungseigenschaften	29
6 Abzählbarkeitsaxiome und lokale Kompaktheit	31
II Geometrische Beispiele und Konstruktionen topologischer Räume	34
1 Mannigfaltigkeiten	34
2 Quotientenräume	48
3 Quotientenabbildungen	51
4 Konstruktionen von Quotientenräumen	55
III Konzepte der Algebraischen Topologie	60
1 Die Fundamentalgruppe	60

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.

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 $\tilde{\mathcal{O}}$.

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"

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.

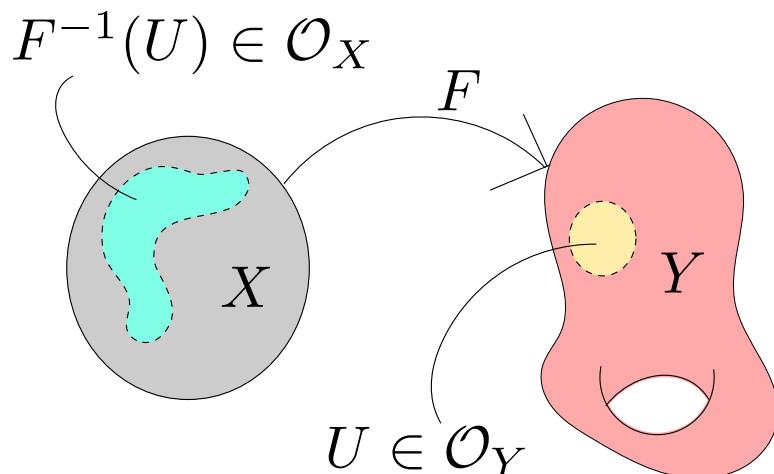


Abbildung 1: Stetige Abbildung

Bemerkung .1. Ist (X, d) ein metrischer Raum, so sind die offenen Mengen der von der Metrik induzierten Topologie¹ 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 $F(U_\delta(x)) \subset U_\epsilon(F(x))$.

¹siehe später

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 $X \times I$.

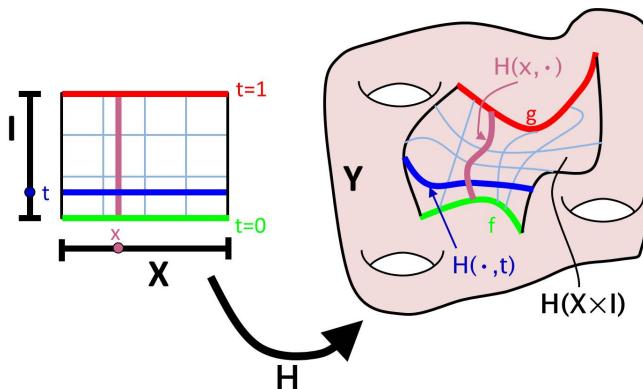


Abbildung 2: Homotopie

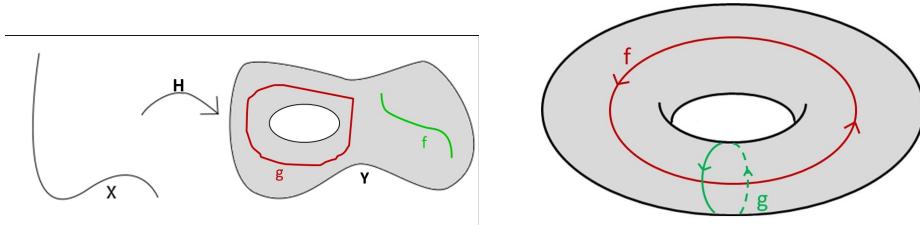


Abbildung 3: f und g sind jeweils homotop, vgl. Bemerkung .6!

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

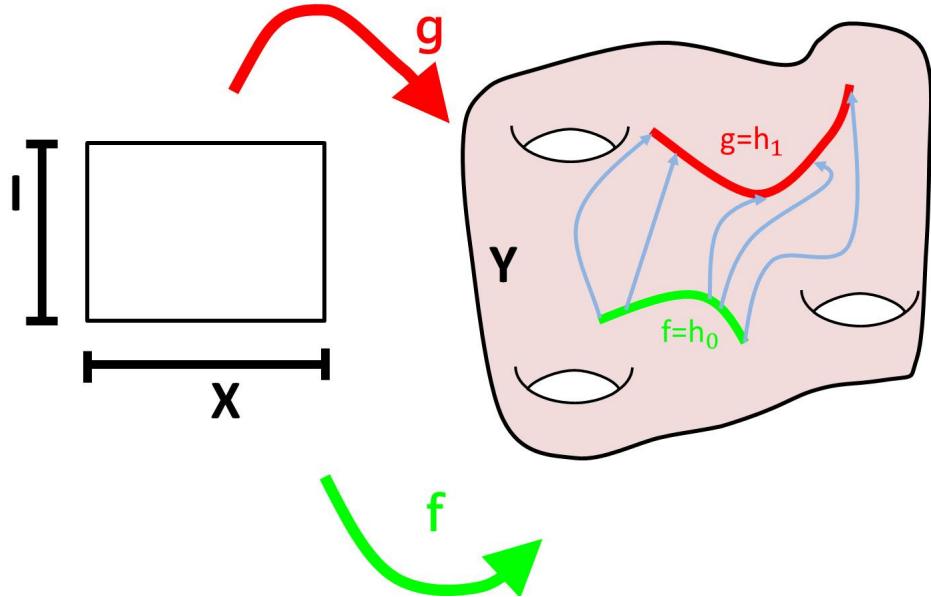


Abbildung 4: $H = (h_t), t \in [0, 1]$, von stetigen Abbildungen $h_t: X \rightarrow Y$ mit Anfang $h_0 = f$ und Ende $h_1 = g$.

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

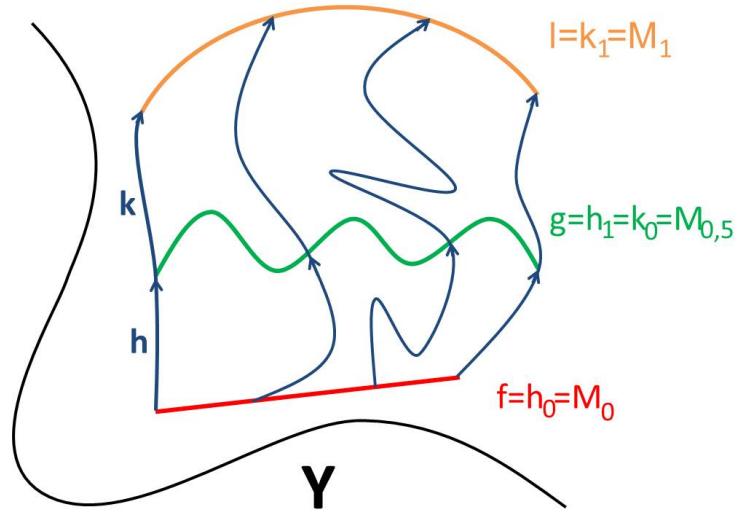


Abbildung 5: Transitivität der Relation "homotop sein"

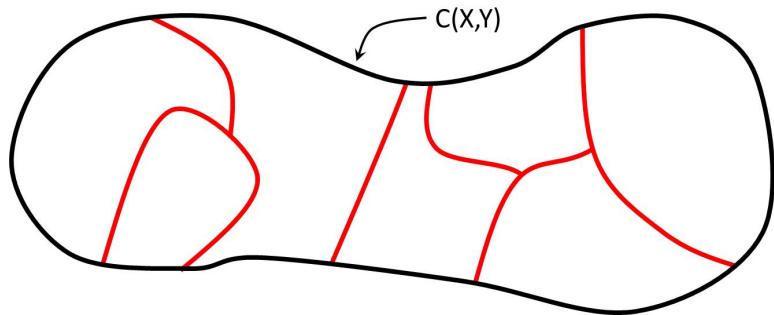


Abbildung 6: Äquivalenzklassen $[X, Y]$ von $C(X, Y)$

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

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 :

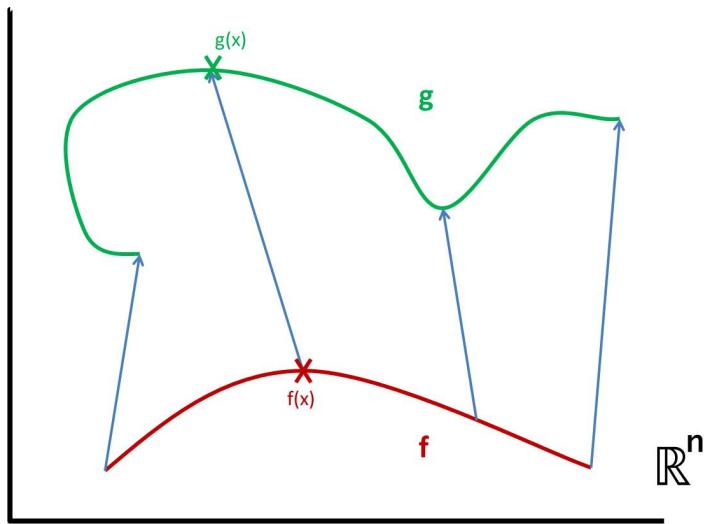


Abbildung 7: Zwei stetige Abbildungen $f, g: X \rightarrow \mathbb{R}^n$ sind immer homotop.

Nullhomotopie

Eine stetige Abbildung $f: X \rightarrow Y$ heißt nullhomotop, falls sie homotop zu einer konstanten Abbildung ist.

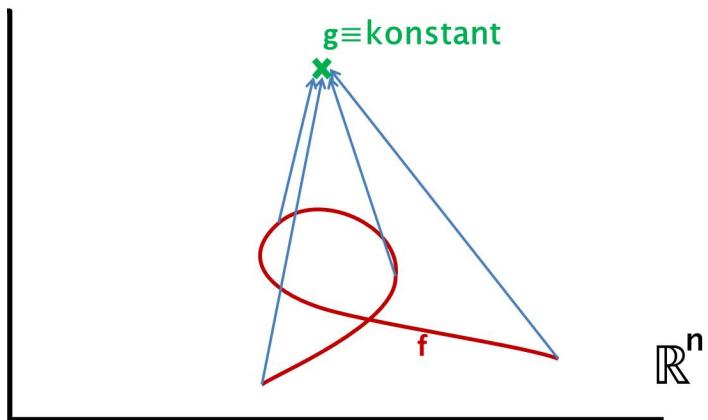


Abbildung 8: f ist nullhomotop

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!

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 $t \mapsto (1, 0)$.

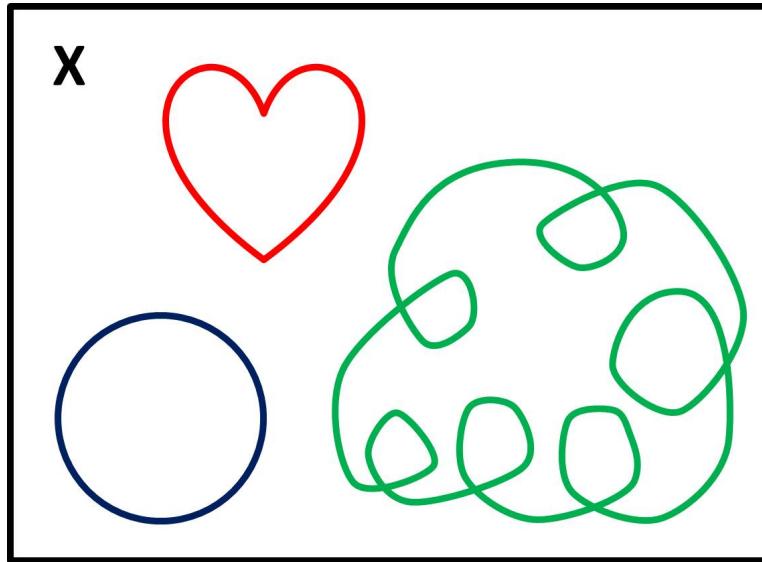


Abbildung 9: Geschlossene Wege in \mathbb{R}^n

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 eindelementig.

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 Homotopen festgelassen werden soll. Dieses Phänomen wird uns zum Studium der Fundamentalgruppe führen ...

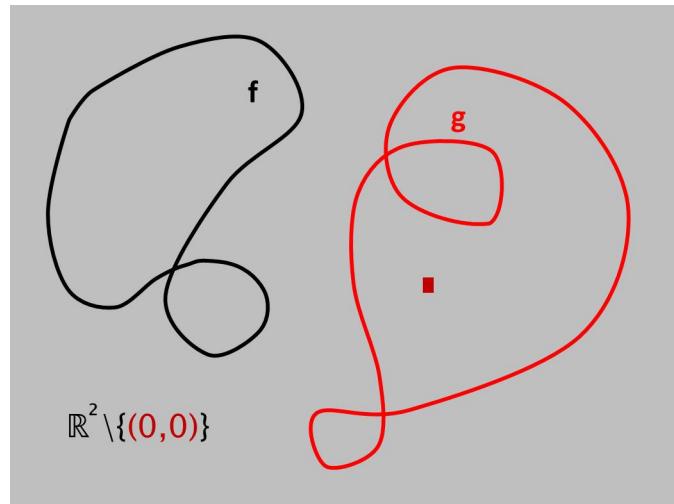


Abbildung 10: $[S^1, \mathbb{R}^2 \setminus \{0\}]$ ist nichttrivial

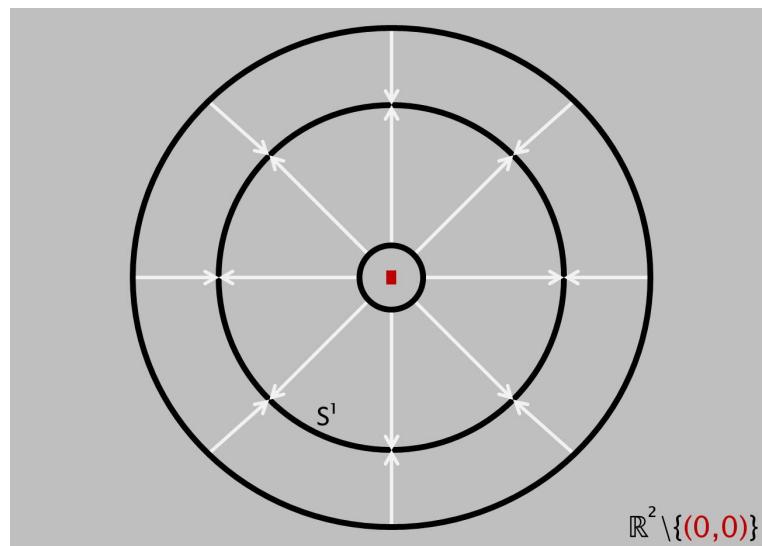


Abbildung 11: $[S^1, \mathbb{R}^2 \setminus \{(0,0)\}] = [S^1, S^1]$

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.

Teilraumtopologie

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

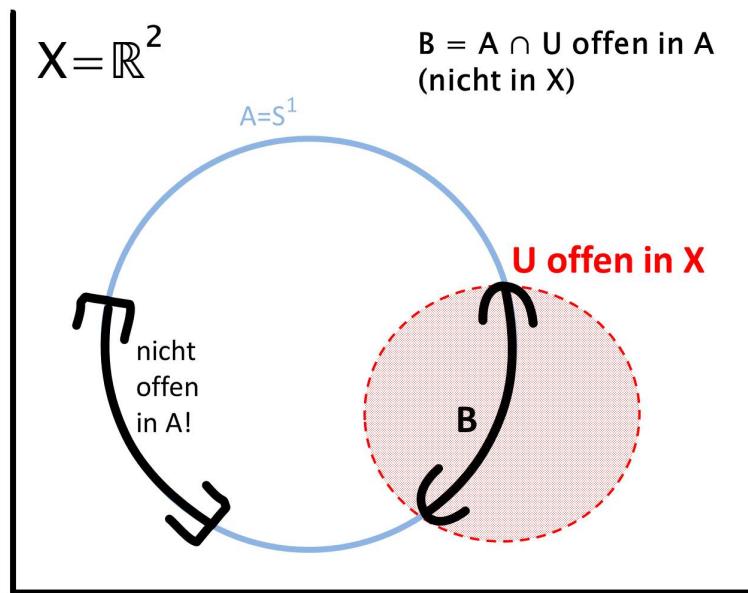
$$\mathcal{O}|_A := \{U \cap A \mid U \in \mathcal{O}\}$$

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

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 .

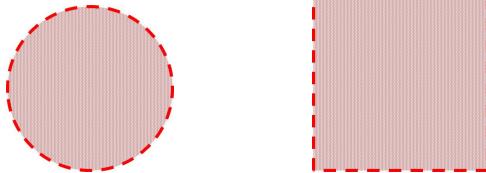
Beispiel:

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

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 .

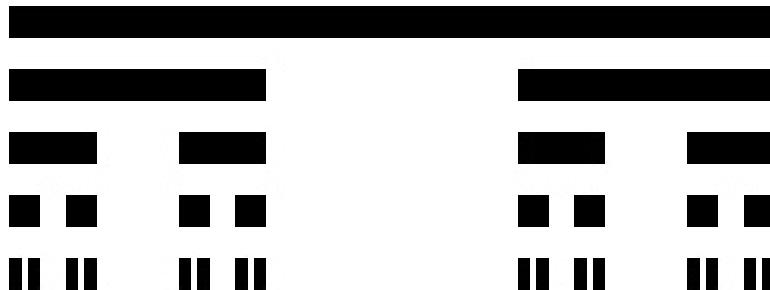
Bemerkung I.3. *Umgebungen sind per definitionem offen!*



Bemerkung I.4. *Jede offene Teilmenge von $\mathbb{R}_{\text{Standard}}$ 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' $\frac{\ln 2}{\ln 3} \approx 0,6\dots$

**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} .

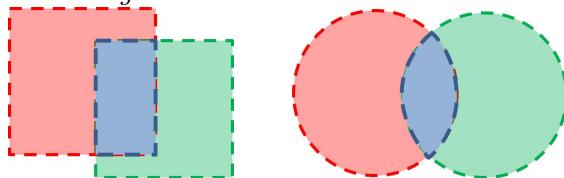
¹ \mathbb{R} mit T_1 -Topologie

Beispiel:

- (1) Die offenen Intervalle bilden eine Basis der Standard-Topologie von \mathbb{R} .
- (2) Sämtliche offenen² 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 $X \Leftrightarrow \forall O \in \mathcal{O} \forall x \in O \exists B \in \mathcal{B}: x \in B \subset O$.

• $\mathcal{B} \subset \mathcal{P}(X)$ 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} .

**Produkt-Topologie**

Sind (X, \mathcal{O}_X) und (Y, \mathcal{O}_Y) topologische Räume, so bildet

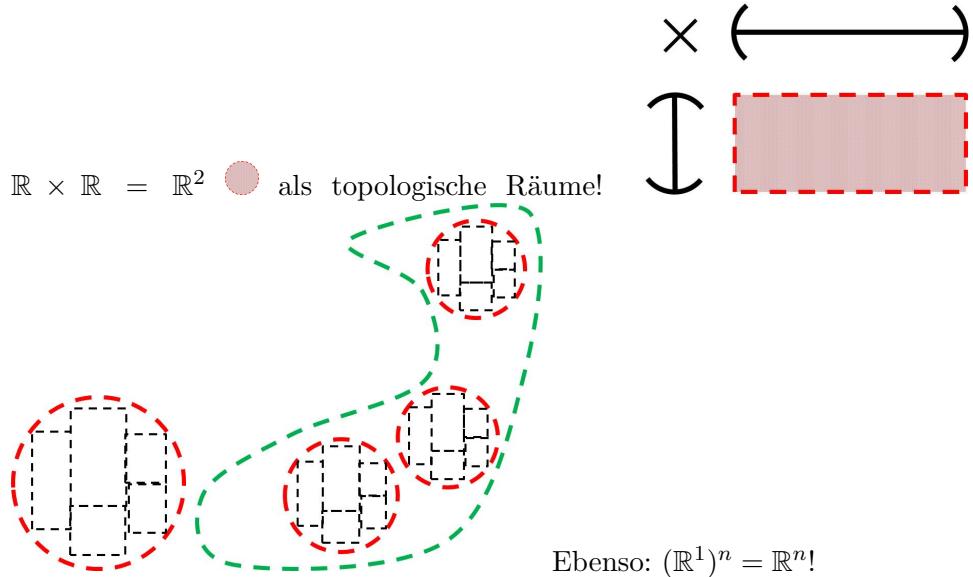
$$\mathcal{B}_{X \times Y} := \{U \times V \mid U \in \mathcal{O}_X, V \in \mathcal{O}_Y\}$$

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.

²bezüglich der euklidischen Metrik

Beispiel:



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 größte 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

ϵ -Ball, Sphäre

Für einen metrischen Raum (X, d) und $\epsilon > 0$ sei für $p \in X$

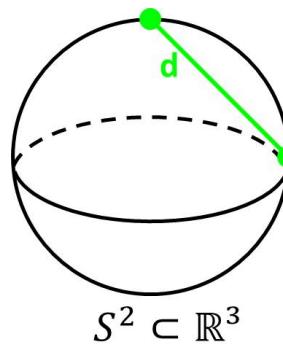
- $B_\epsilon(p) := \{x \in C \mid d(p, x) < \epsilon\}$ der offene ϵ -Ball um p
- $D_\epsilon(p) := \{x \in C \mid d(p, x) \leq \epsilon\}$ der abgeschlossene ϵ -Ball um p
- $S_\epsilon(p) := \{x \in C \mid d(p, x) = \epsilon\}$ die ϵ -Sphäre um p (oder Sphäre vom Radius ϵ um p)

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.

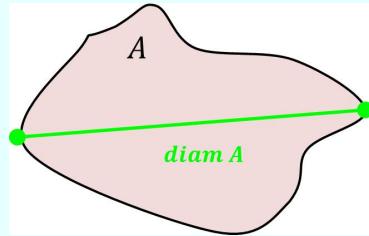


Beschränktheit, Durchmesser

$A \subset (X, d)$ heißt beschränkt

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

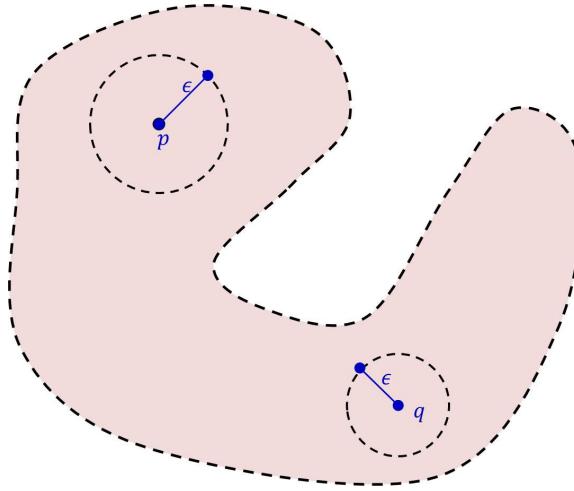
Das Infimum, $\text{diam } A$, dieser ρ heißt dann Durchmesser von A .



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

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



Abstand

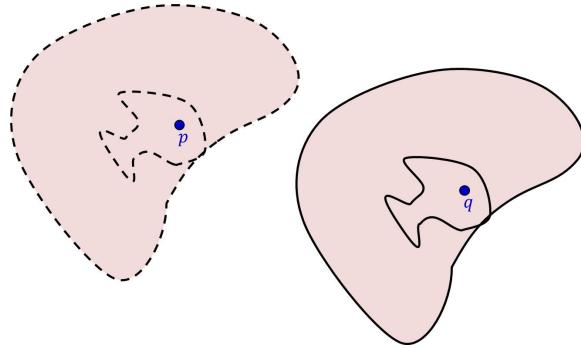
(X, d) sei metrischer Raum und $A \subset X, p \in X$.

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

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 abgeschlossene³ Teilmengen einer in X abgeschlossenen Menge A sind auch abgeschlossen in X .



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

Beispiel: Beispiel zu Bemerkung I.8

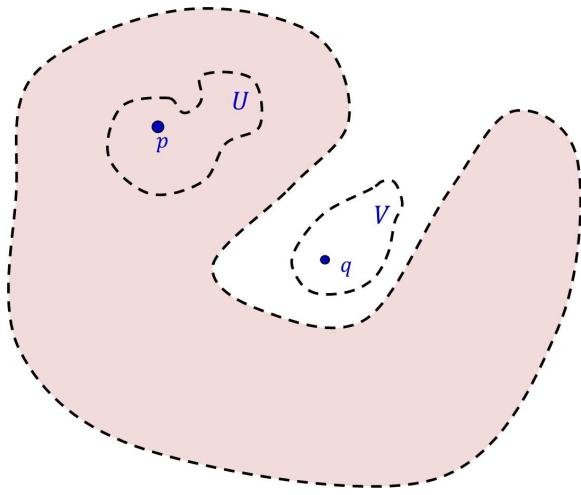
$$B := A := (a, b) \subset X := \mathbb{R}$$

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.

³in A



Innere

Für $A \subset X$ heißt die größte in X offene und in A enthaltene Teilmenge \mathring{A} Inneres von A .

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

Beispiel:

$$\mathbb{R} \setminus \mathbb{Q} = \mathring{\mathbb{Q}} = \emptyset$$

Abschluss

Der Abschluss \bar{A} von A ist $X \setminus ((X \setminus A)^\circ)$.

Rand

Der Rand ∂A von A ist

$$\partial A := \bar{A} \setminus \mathring{A},$$

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

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

3 Stetige Abbildungen

Stetigkeit

$f: X \rightarrow Y$ ist stetig $\Leftrightarrow \forall$ offenen Mengen in Y ist das Urbild unter f offene Menge in X .

Beispiel:

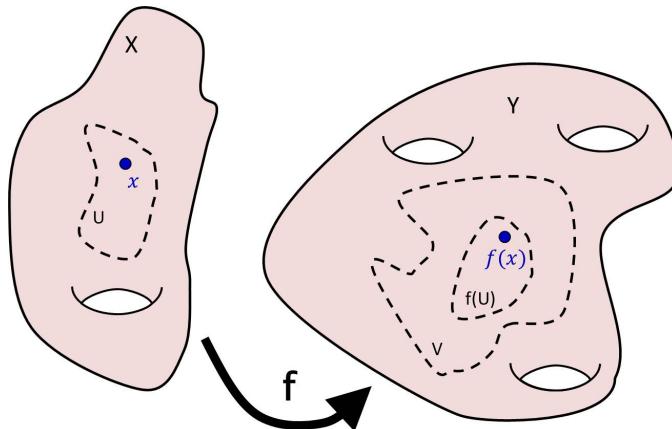
- $f: X \rightarrow Y$ ist stetig \Leftrightarrow Urbilder abgeschlossener Mengen sind abgeschlossen.
- Sind \mathcal{O}_1 und \mathcal{O}_2 Topologien auf X , so ist die Identität $\text{id}: (X, \mathcal{O}_1) \rightarrow (X, \mathcal{O}_2)$ stetig $\Leftrightarrow \mathcal{O}_2 \subset \mathcal{O}_1$.
- 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.

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.)

Isometrische Einbettung, Isometrie

Sind X, Y metrische Räume, so heißt eine Abbildung $f: X \rightarrow Y$ isometrische Einbettung

$$\Leftrightarrow \forall x, x' \in X \text{ gilt } d_Y(f(x), f(x')) = d_X(x, x').$$

Eine isometrische Einbettung ist immer injektiv.

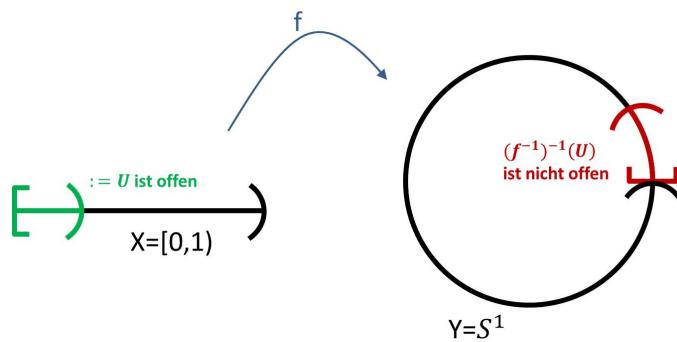
Ist f zusätzlich bijektiv, so heißt f Isometrie.

Homöomorphismus

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

Beispiel:

- $f: [0, 1] \rightarrow S^1 \subset \mathbb{C} \hat{=} \mathbb{R}^2, t \mapsto e^{2\pi it} (= \cos 2\pi t, \sin 2\pi t)$ 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.

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.

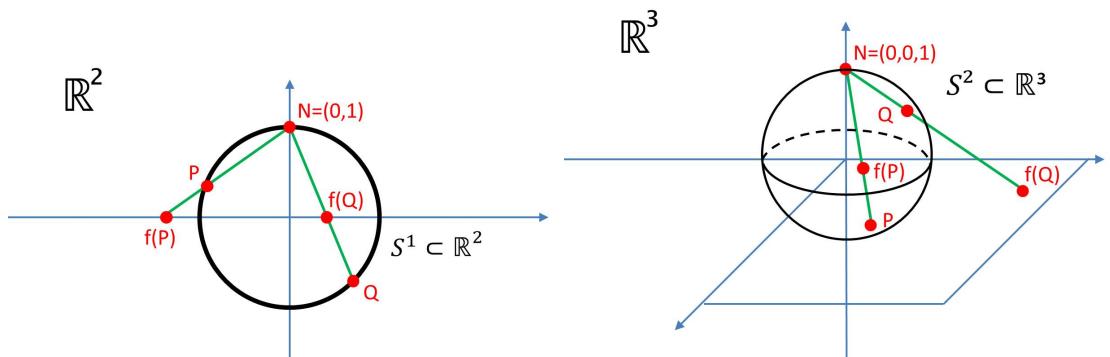
Bemerkung I.12. Homöomorphismen erhalten sämtliche topologischen Strukturen:

- 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 .
- $f(\bar{A}) = \overline{f(A)}$, $f(\overset{\circ}{A}) = (f(\overset{\circ}{A}))$.
- 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 $y = (y_1, \dots, y_n) \mapsto (\frac{2y_1}{\|y\|^2+1}, \dots, \frac{2y_n}{\|y\|^2+1}, \frac{\|y\|^2-1}{\|y\|^2+1})$.

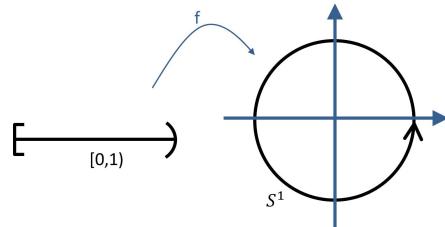
Einbettung

$f: X \rightarrow Y$ stetig heißt Einbettung

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

Beispiel:

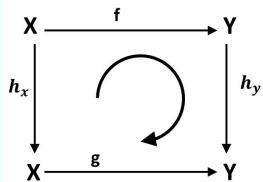
- Für $A \subset X$ ist die Inklusion $\iota: A \hookrightarrow X, x \mapsto x$, stets eine Einbettung.
- $[0, 1) \rightarrow S^1$ ist keine Einbettung!



- 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.

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 $g \circ h_X = h_Y \circ f$,

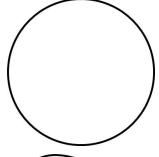
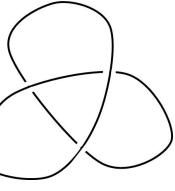
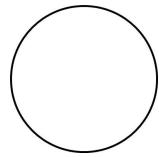
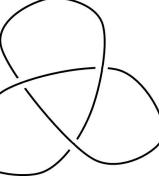


d.h. dass das Diagramm kommutiert.

Knoten

Eine Einbettung $S^1 \rightarrow \mathbb{R}^3$ heißt Knoten.

Beispiel:

Die Knoten mit Bildern  und  sind äquivalent, die mit  und  nicht!

4 Zusammenhang und Kompaktheit**zusammenhängend**

Ein topologischer Raum heißt zusammenhängend \Leftrightarrow Die einzigen in X gleichzeitig offenen und abgeschlossenen Teilmengen sind \emptyset und X . Ansonsten heißt X un- oder nicht zusammenhängend.

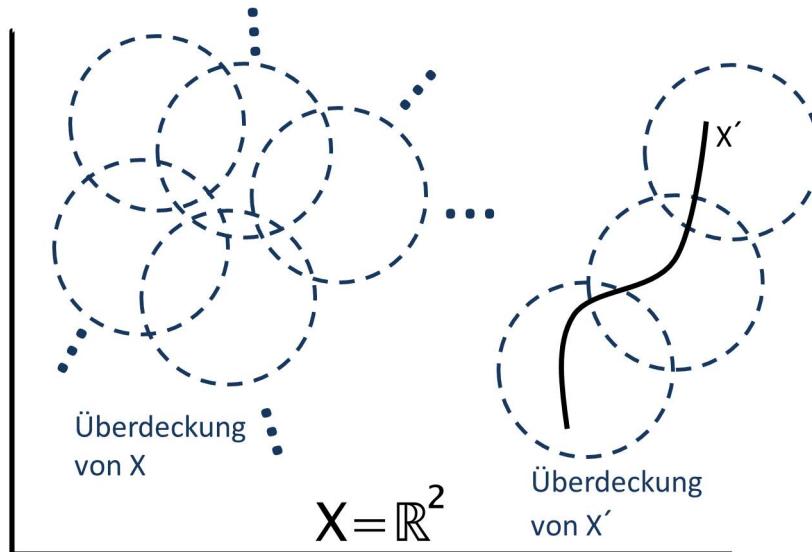
Überdeckung

Eine Familie $\mathcal{U} = \{U_\alpha \mid \alpha \in A\}$ ^a 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_α sind offen beziehungsweise abgeschlossen.

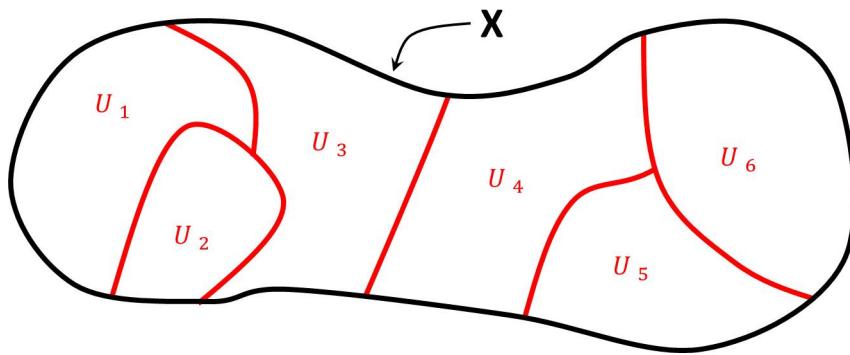
Für $X' \subset X$ heißt eine Familie $\mathcal{U} = \{U_\alpha\}$ wie oben Überdeckung von X' $\Leftrightarrow X' \subset \bigcup_{\alpha \in A} U_\alpha$.

^aA Indexmenge



Partition

Eine Partition oder Zerlegung einer Menge ist eine Überdeckung dieser Menge durch paarweise disjunkte, nichtleere Teilmengen.



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 ($A = \mathbb{Q}, B = \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$)

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 $f^{-1}(V) = \emptyset$.

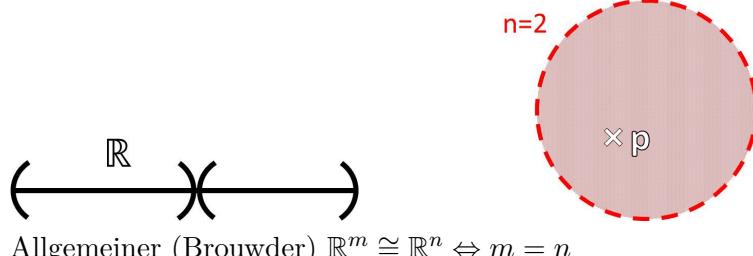
Sei o.E. $f^{-1}(U) = \emptyset \Rightarrow U = f(\emptyset) = \emptyset \Rightarrow V = f(X)$ (f surjektiv auf $f(X)$)
 \Rightarrow Es existiert keine Partition von Y in nichtleere offene Mengen $\Leftrightarrow Y$ zusammenhängend. \square

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!

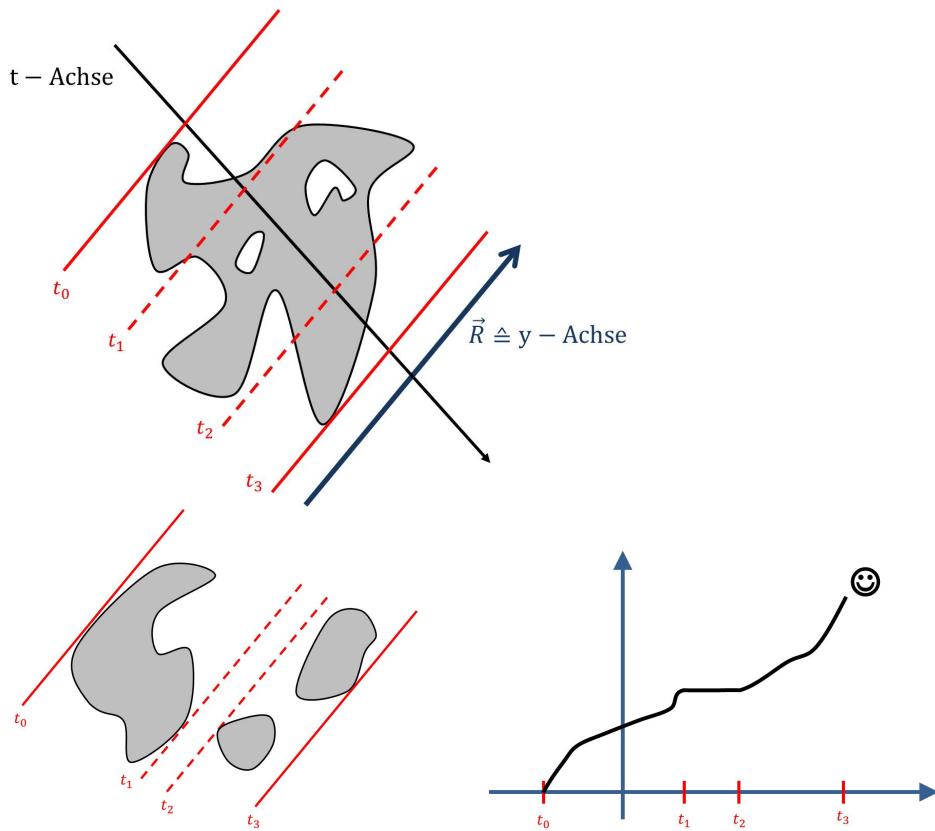


Allgemeiner (Brouwder) $\mathbb{R}^m \cong \mathbb{R}^n \Leftrightarrow m = n$

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

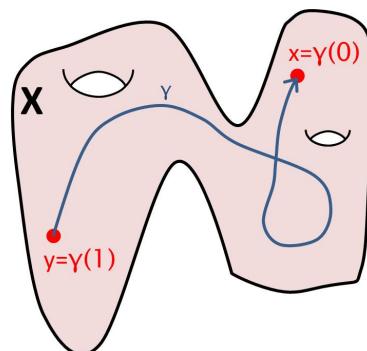
Eine Waffel, wie unregelmäßig auch immer, lässt sich immer in zwei gleich große Teile schneiden.



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

Weg, Anfangspunkt, Endpunkt

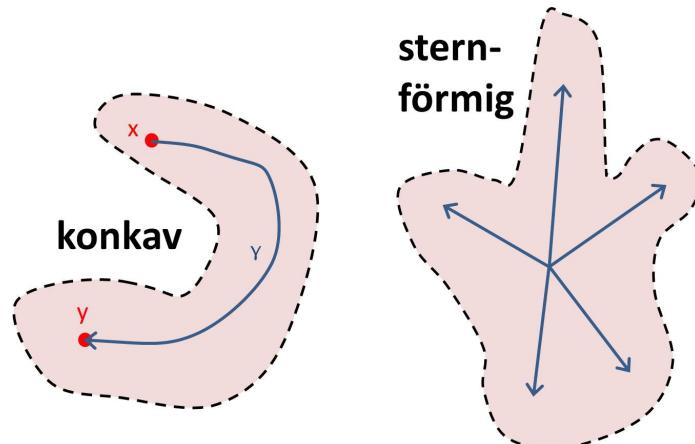
ein Weg in einem topologischen Raum X ist eine stetige Abbildung $\gamma: [0, 1] \rightarrow X$, und $\gamma(0)$ heißt Anfangs-, $\gamma(1)$ Endpunkt.



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.

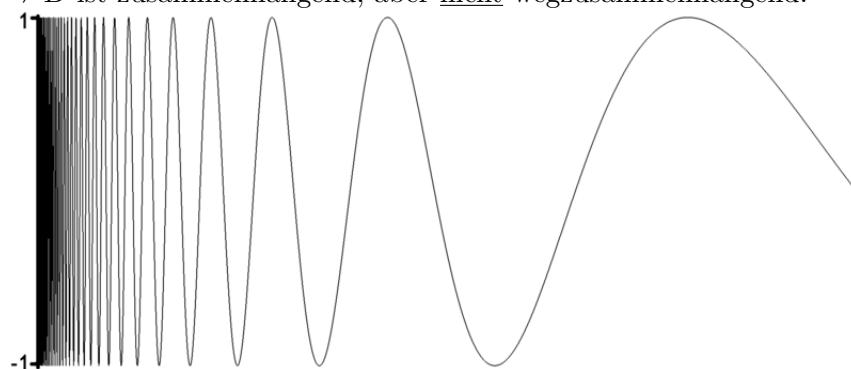


Bild: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Sinuseinsdurchx.png&filetimestamp=20080624085708>

Kompaktheit

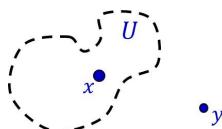
Ein topologischer Raum X heißt kompakt, falls jede offene Überdeckung von X eine endliche Teilüberdeckung enthält.

5 Trennungseigenschaften

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.

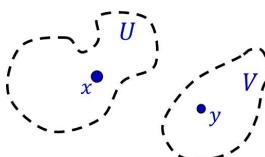
$$\forall x \neq y \in X \exists U = U_x : y \notin U_x$$



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.

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



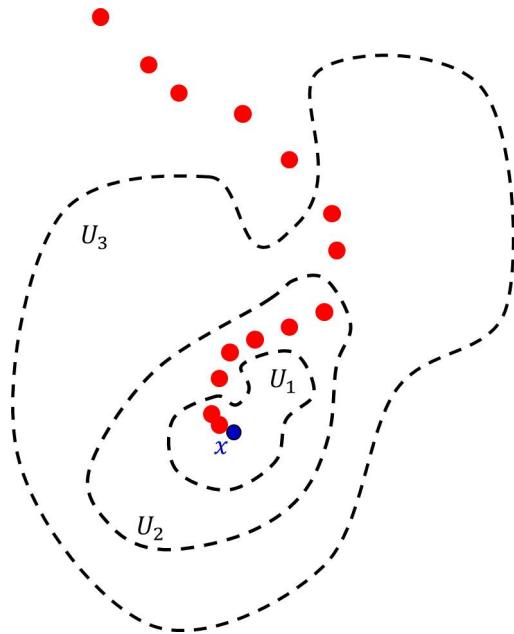
Beispiel:

Jeder metrische Raum ist Hausdorff-Raum.

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

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

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. $\{X\}$.

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 separabile 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.

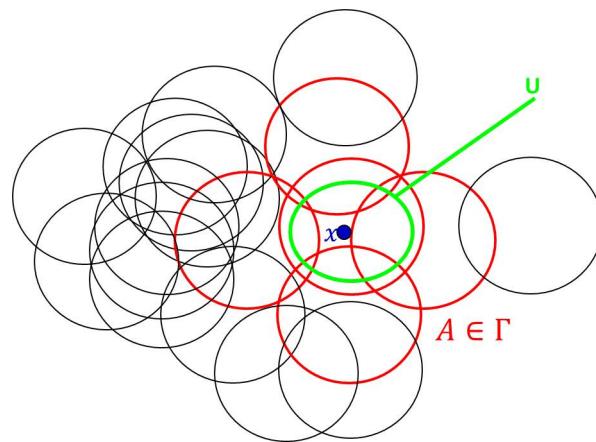
Lokale Kompaktheit

X heißt lokal kompakt

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

Lokale Endlichkeit

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

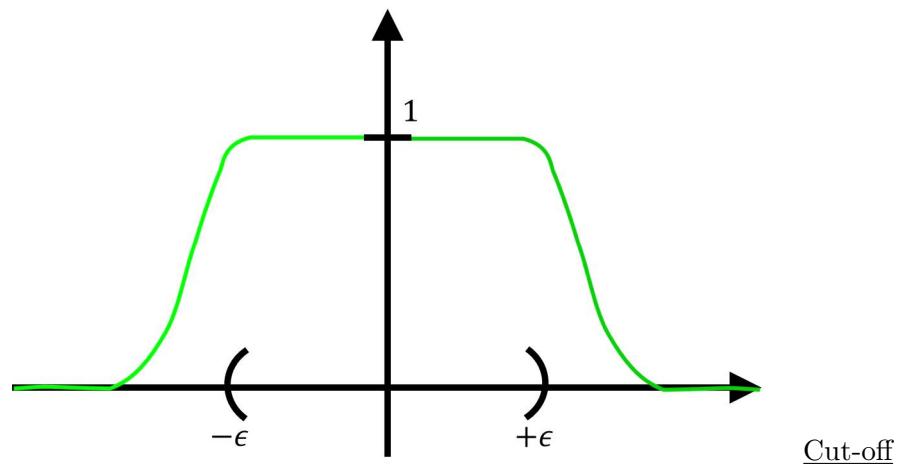


Verfeinerung

Γ, Δ Überdeckungen von X . Δ heißt Verfeinerung von Γ
 $\Leftrightarrow \forall A \in \Delta \exists B \in \Gamma: A \subset B$.

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!

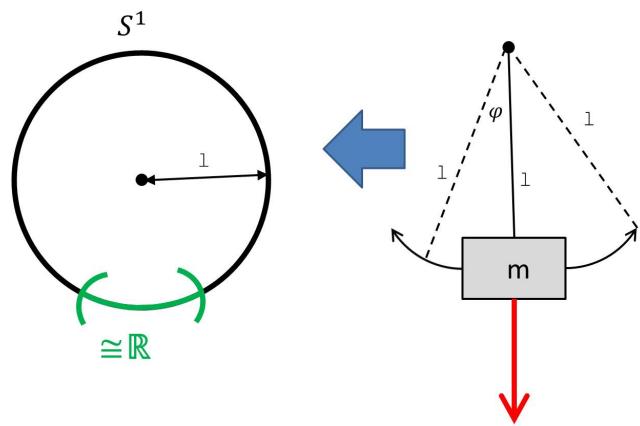
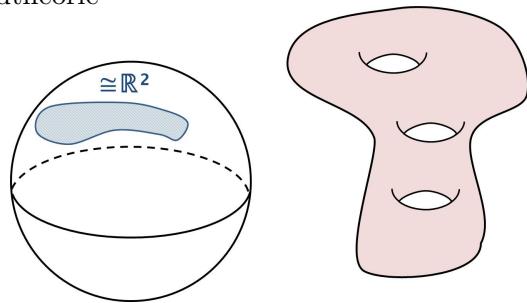
Bemerkung I.21. Parakompaktheit ist wichtig, da dann bestimmte Einbettungen und sogenannte Zerlegungen der Eins existieren.

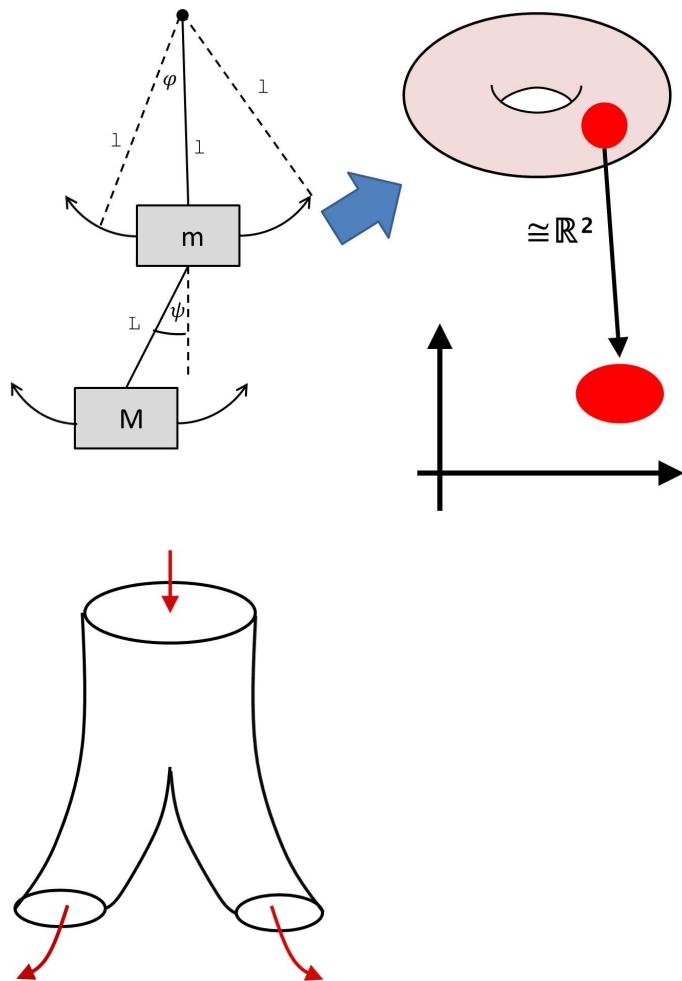
Kapitel II

Geometrische Beispiele und Konstruktionen topologischer Räume

1 Mannigfaltigkeiten

Beispiele zu Mannigfaltigkeiten (Exkurs) Doppelpendel, Quantenfeldtheorie

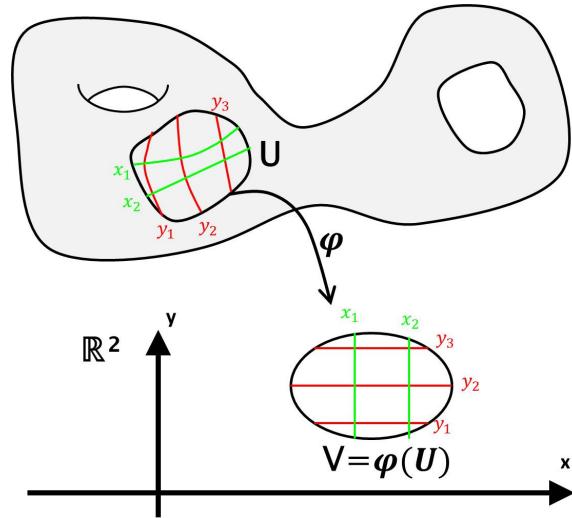




Mannigfaltigkeit, Karte

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 $U = U(p) \subset_{offen} M$ und ein Homöomorphismus $\varphi: U \rightarrow V, V \subset_{offen} \mathbb{R}^n$.
- Jedes solche Paar (U, φ) 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)

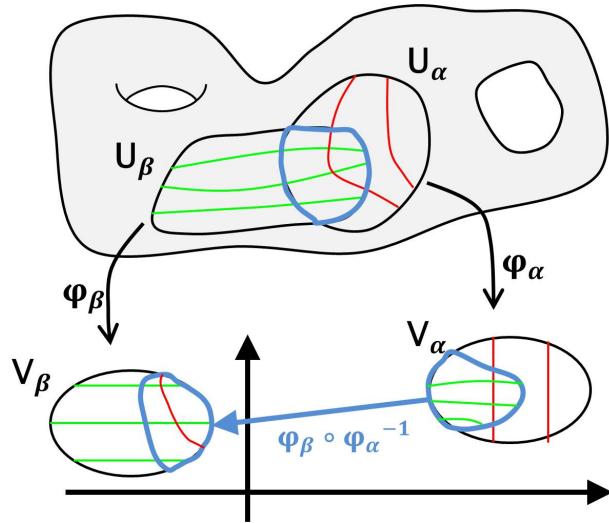
Atlas

Ein Atlas für eine topologische n -Mannigfaltigkeit M ist eine Menge $\mathcal{A} = \{(\varphi_\alpha, U_\alpha) \mid \alpha \in \Lambda\}$ ^a von Karten $\varphi_\alpha: U_\alpha \rightarrow V_\alpha = \varphi(U_\alpha) \subset \mathbb{R}^n$, so dass $M = \bigcup_{\alpha \in \Lambda} U_\alpha$

^a Λ Indexmenge

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. ($k = 0, 1, 2, \dots, \infty, \omega$)

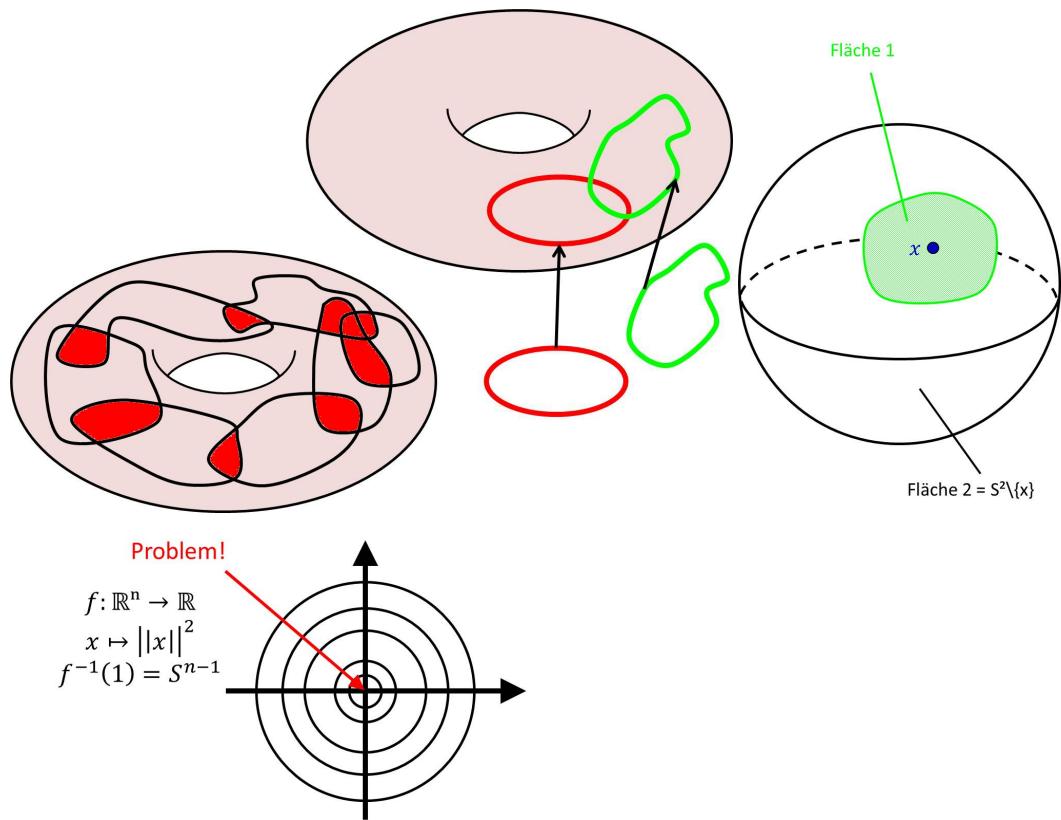


Verträglichkeit, differenzierbare Struktur

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 (φ, 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.

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^∞ -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, ...

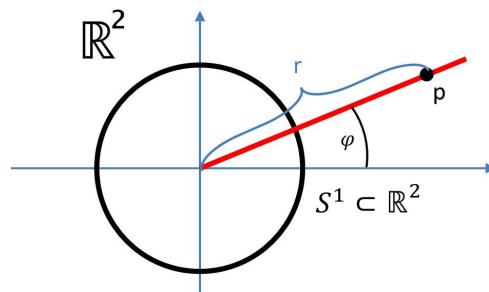
Bemerkung II.2. *Bemerkung zur Produkt-Topologie*

- 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 differenzierbare¹ 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)

¹(C^∞)

1.1 Differenzierbare Abbildungen

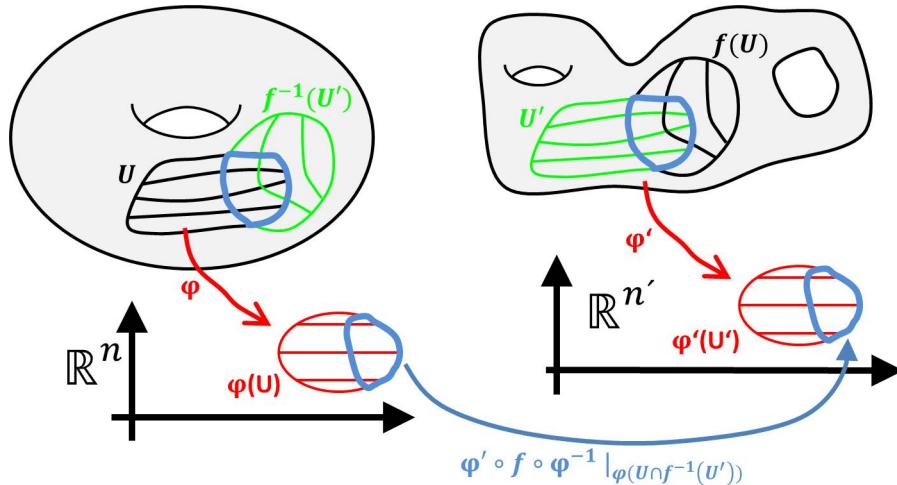
C^l -Abbildung

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:

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

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

eine C^l -Abbildung im üblichen Sinn.



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

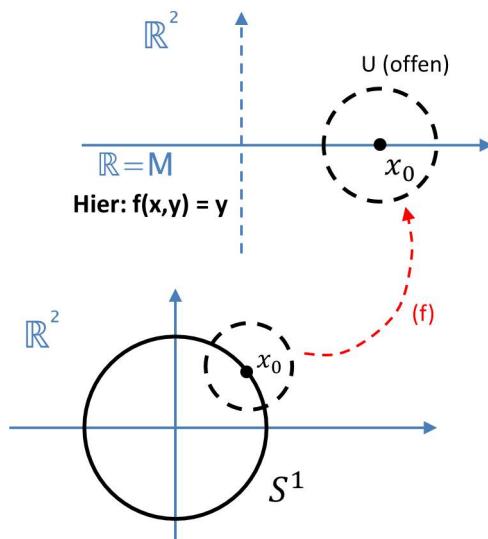
Spezielle Mannigfaltigkeiten: Untermannigfaltigkeiten topologischer Räume:

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

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

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

² dergestalt, dass $U \cap M = f^{-1}(0) = \{x \in U \mid f(x) = 0\}$



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

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

(Jedes solche ψ heißt lokale Parametrisierung von M).

² 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.

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
 - φ ist C^∞ -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:
 - ψ 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 $\text{Rang } Df(x) = 1$ 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^∞ -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 φ .

" \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 φ 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 $\psi := \varphi^{-1} \circ \iota$.

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

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 ψ 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^∞ -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^∞ -Diffeomorphismus.

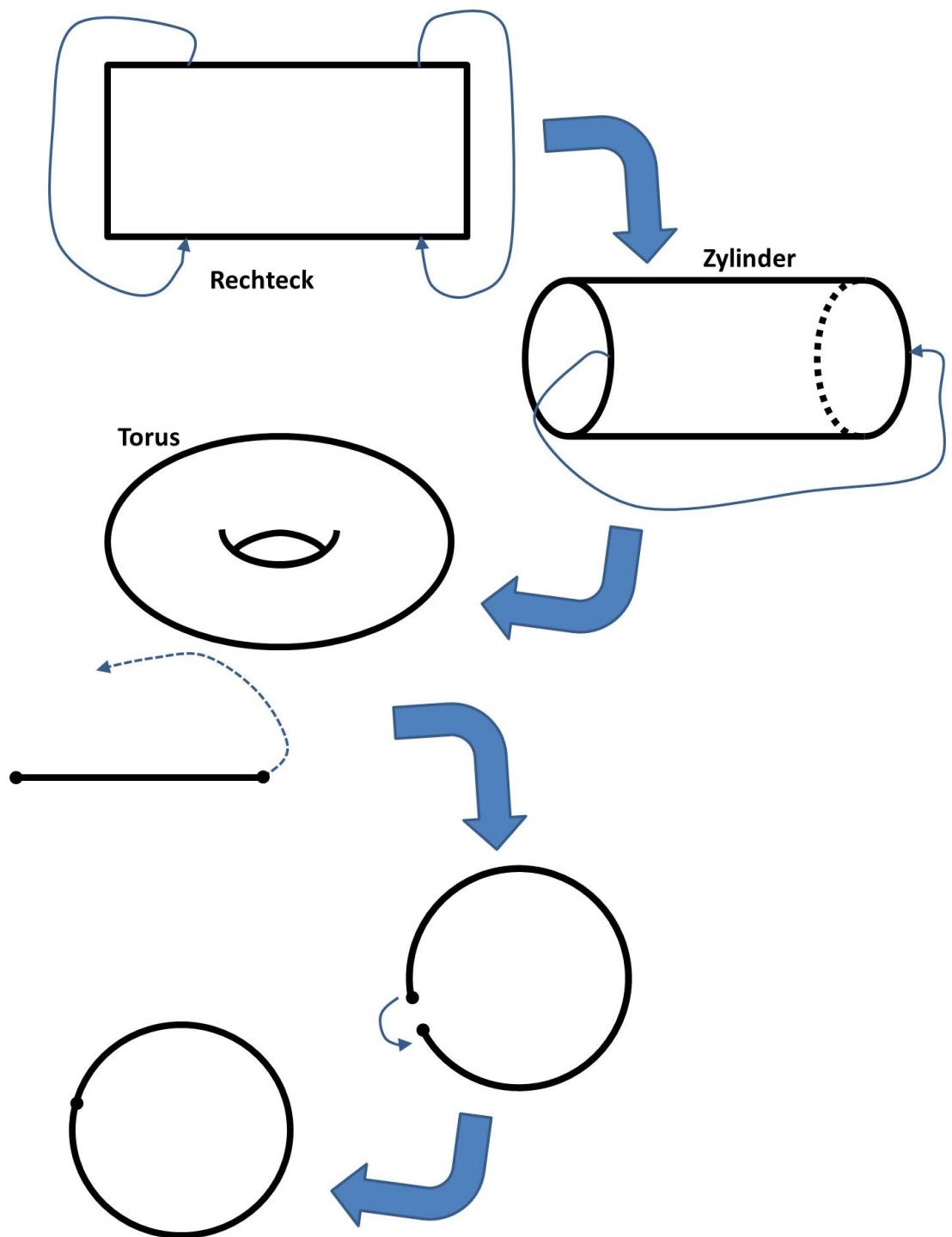
Behauptung: Es gilt: $\tilde{U} \cap M = g(\tilde{V} \cap (\mathbb{R}^n \times \{0\}))$.

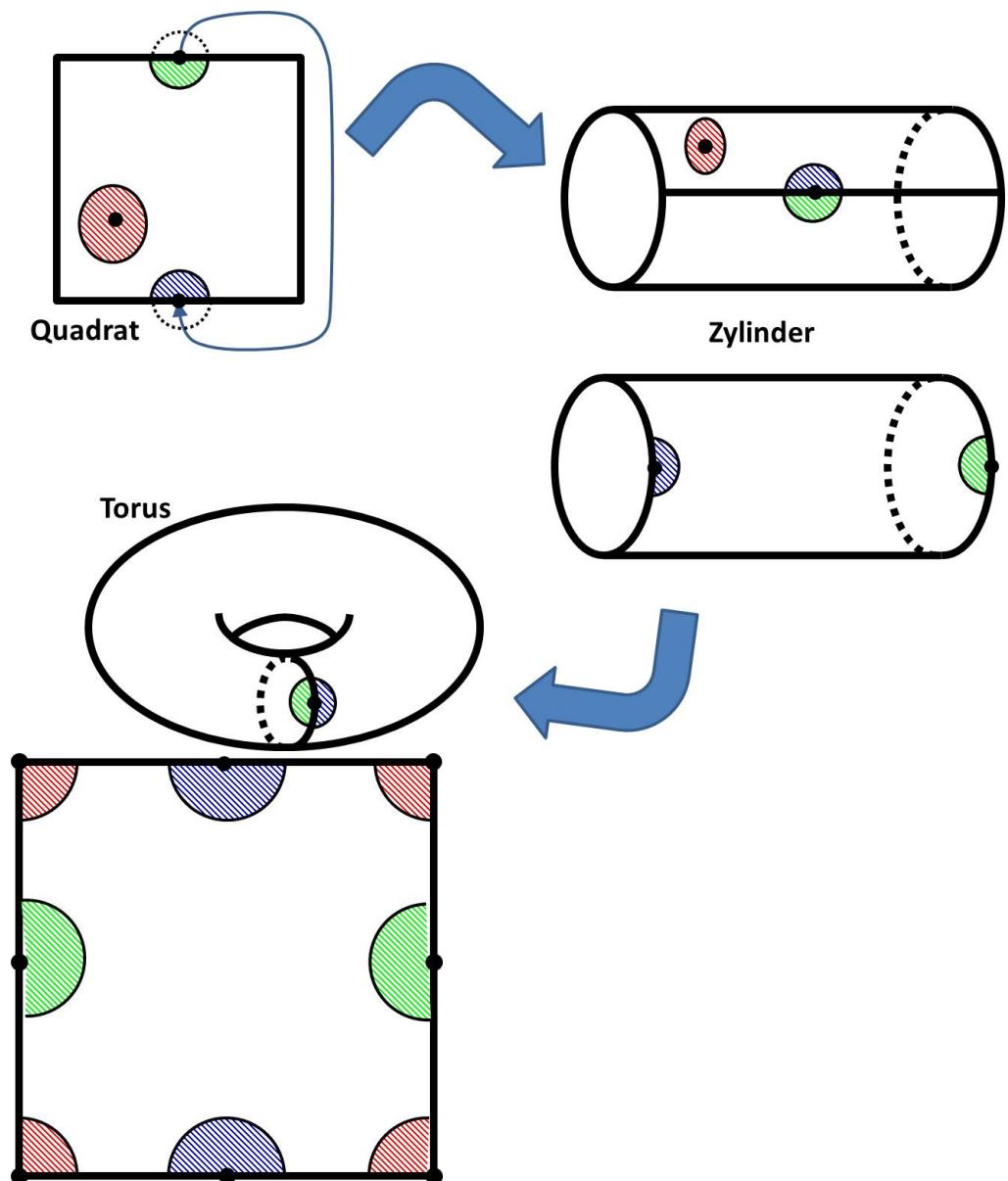
[Beweis: folgt mit (*)].

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

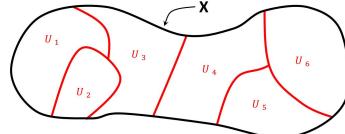
Satz II.3. (C^∞ -Untermannigfaltigkeiten von \mathbb{R}^{n+l} sind C^∞ -Mannigfaltigkeiten)

Es sei $M \subseteq \mathbb{R}^{n+l}$ n -dimensionale C^∞ -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^∞ -Atlas und M eine C^∞ -Mannigfaltigkeit.





2 Quotientenräume



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:

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.

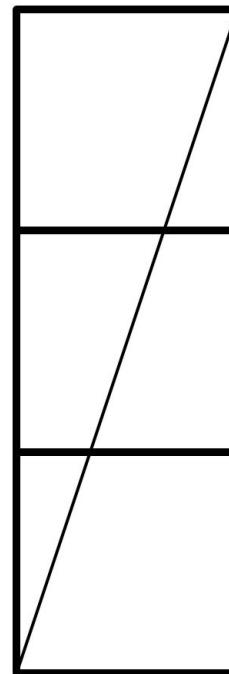
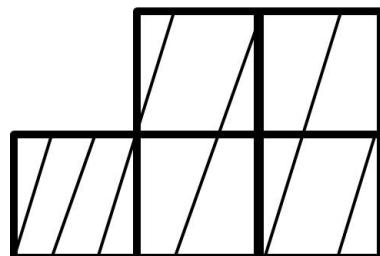
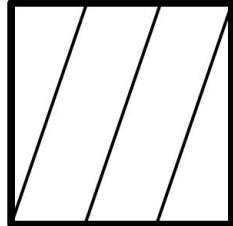
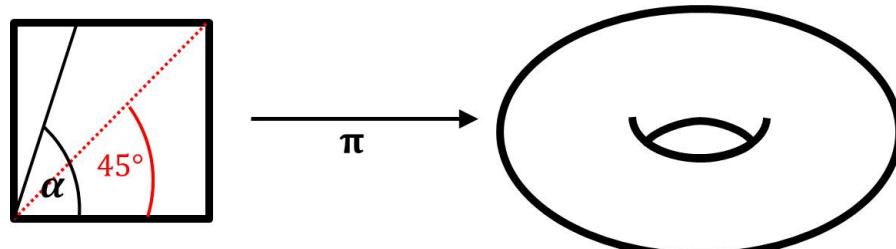
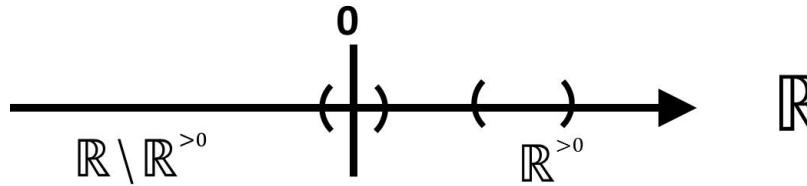
Eigenschaften der Quotiententopologie

- 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:

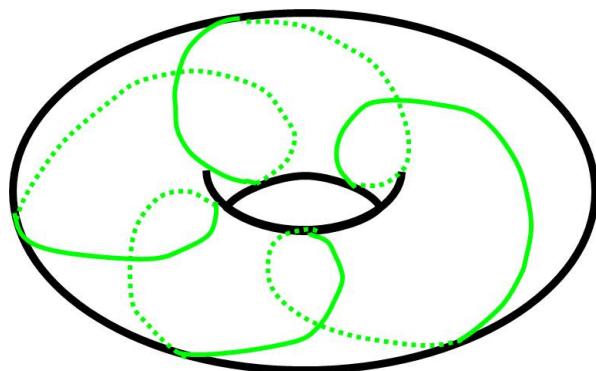
$$X = \mathbb{R}, \quad S := \{\mathbb{R}^{>0}, \mathbb{R} \setminus \mathbb{R}^{>0}\}$$



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

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

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



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



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

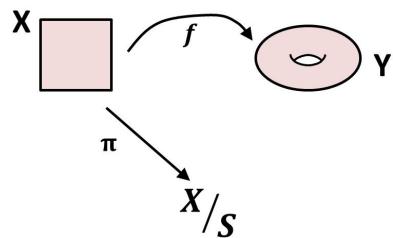
T^2 ist Hausdorffsch, T^2 / \sim nicht!

TODO: Exkurs: Instabilität von Planetensystemen

3 Quotientenabbildungen

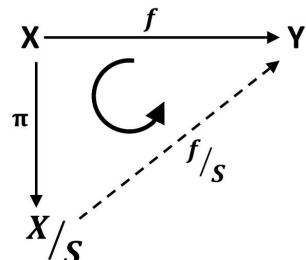
Quotientenabbildung

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 .

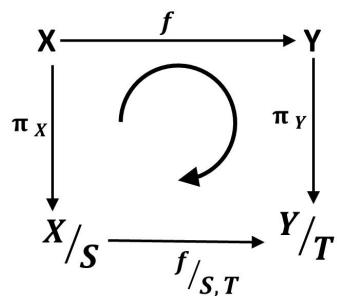
Interpretation



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!

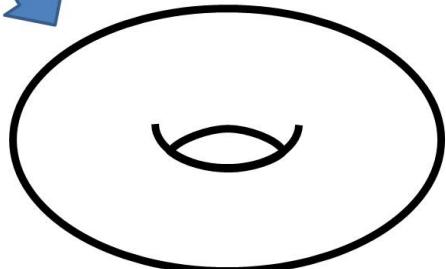
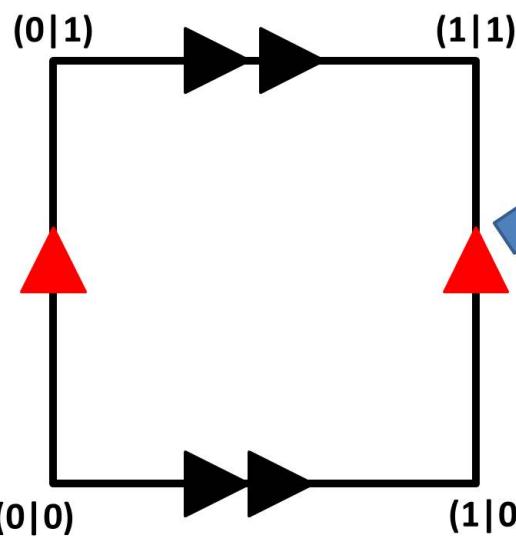
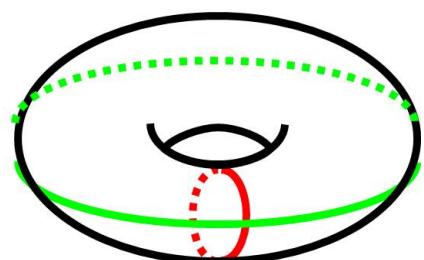
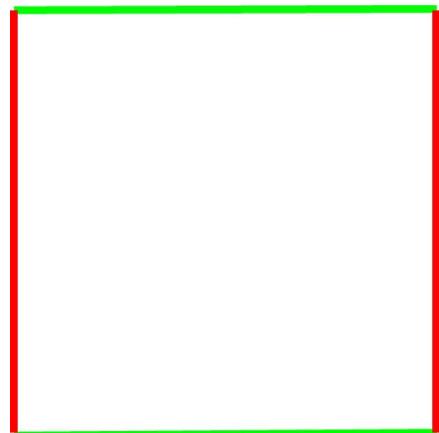
Erinnerung $F: X \rightarrow Y$ stetige Bijektion von einem kompakten Raum X auf einen Hausdorff-Raum $Y \Rightarrow F$ ist Homöomorphismus!

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

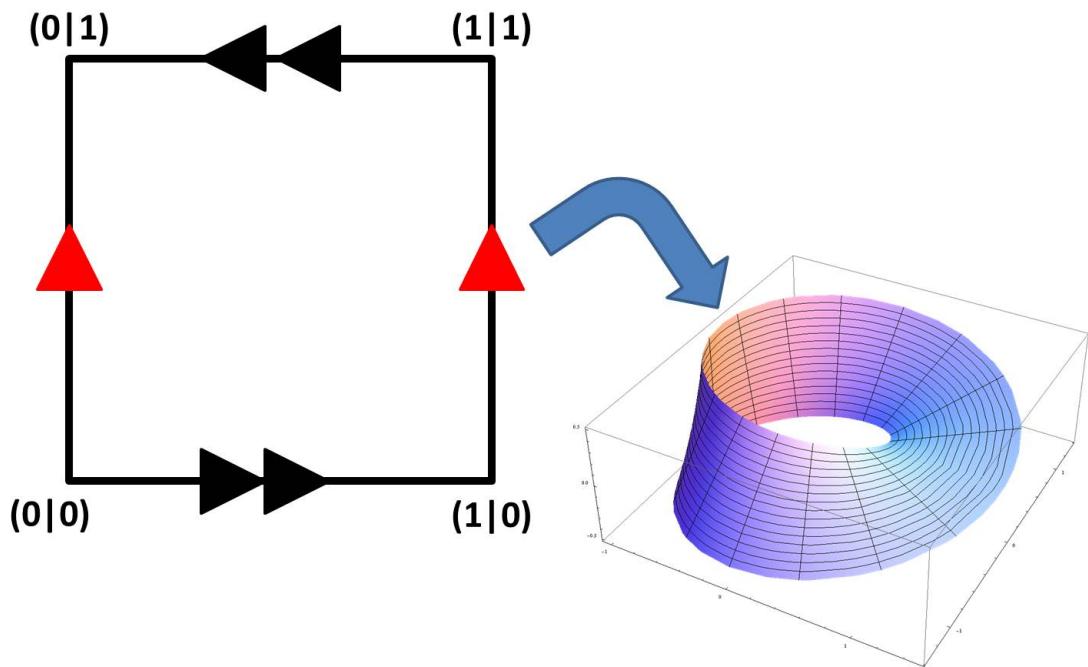
injektiver Quotient

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:



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



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

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.

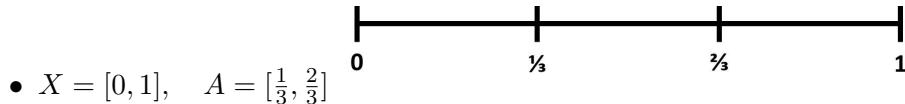
Kontraktion

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,

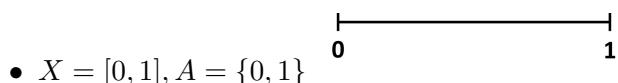
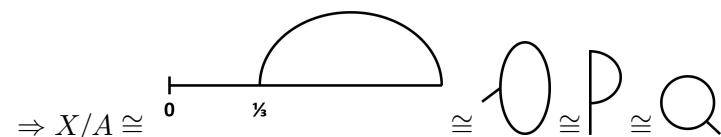
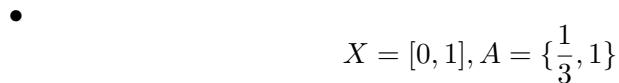
$$S = A \cup \{\{x\} \mid x \in X \setminus A\}$$

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

Beispiel:

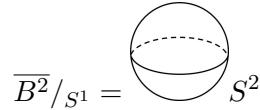
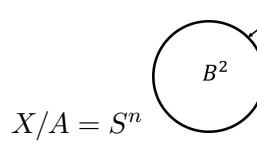


$$X/A \cong I = [0, 1]$$



$$\Rightarrow X/A \cong S^1$$

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



Formal: $S = S^{n-1} \cup \{\{x\} \mid x \in B^n = (\overset{\circ}{B^n})\}$ ³

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

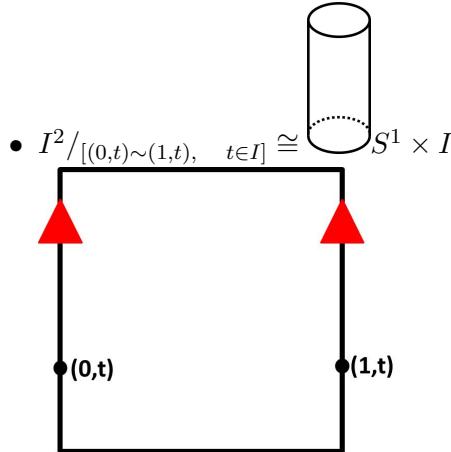
Bemerkung II.7. Wie beschreibt man Partitionen S von X möglichst bequem?

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 $X/[\text{Relation 1, Relation 2, ...}]$.

Beispiel:

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

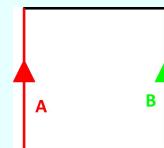


Andere Sichtweise: Der Zylinder $S^1 \times I$ entsteht aus dem Quadrat I^2 durch geeignetes "Verkleben" zweier Kanten.

³ S ist die Partition.

Verkleben

Sind A und B disjunkte Teilmengen eines topologischen Raums



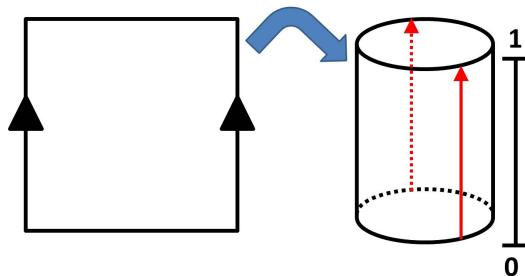
es X und ist $f: A \rightarrow B$ ein Homöomorphismus, so heißt der Übergang zum Quotientenraum, der durch die Partition von X in die Einpunktmengen von $X \setminus (A \cup B)$ und die Zweipunktmengen $\{x, f(x)\}, x \in A$ gegeben ist, Verkleben (von X längs A und B via des Homöomorphismus f) und dieser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

Notation:

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

Beispiel:

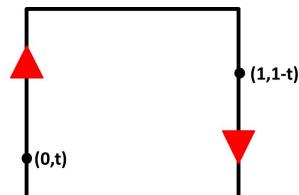
$$S^1 \times I$$



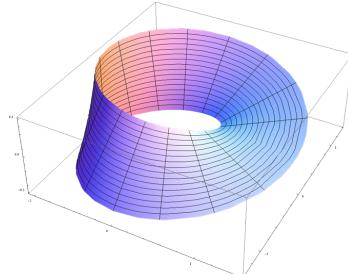
$$S^1 \times I /_{[(z,0) \sim (z,1), z \in S^1]} \cong$$



Beispiel:



, d.h.: Betrachte $I^2 / [(0,t) \sim (1,1-t)]$ und verklebe also die gegenüberliegenden Kanten von I^2 in entgegengesetzter Richtung \rightsquigarrow



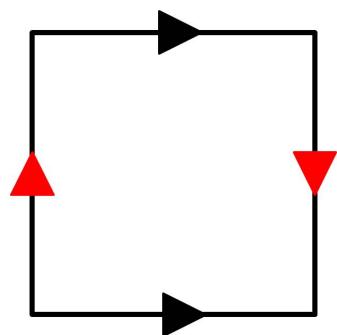
Möbiusband

Bild Möbiusband von:

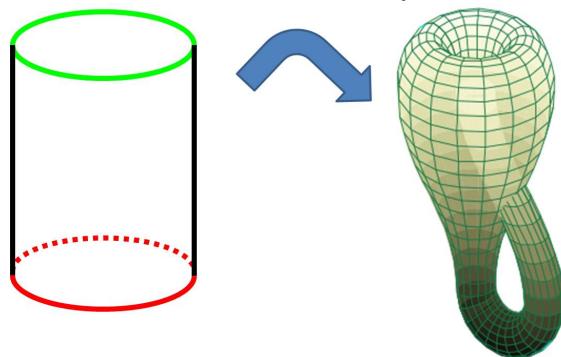
<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:M%C3%BCbiusband.png&filetimestamp=20090802105255>

Beispiel: Die Kleinsche Flasche/ der Kleinsche Schlauch

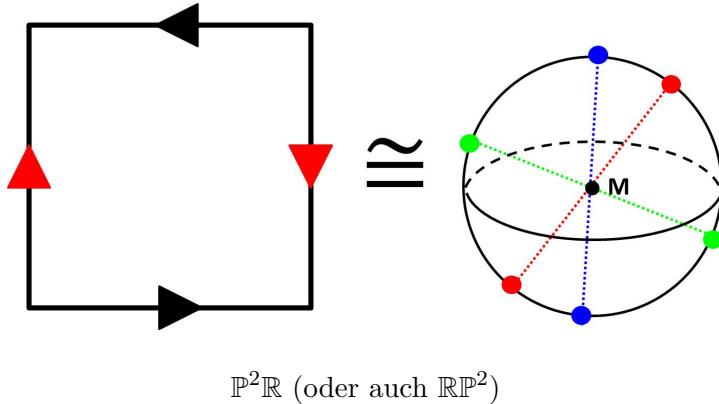
$$K := I^2 / [(t,0) \sim (t,1), (0,t) \sim (1,1-t)]$$



ist Quotient des Zylinders bzw. Möbiusbandes.



Beispiel: Die projektive Ebene



n-dimensionaler projektiver Raum

Der *n*-dimensionale reell-projektive Raum^a ist

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

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

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

^aAnschaulich (projektive Geometrie): Die Menge aller Geraden durch den Ursprung im \mathbb{R}^{n+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

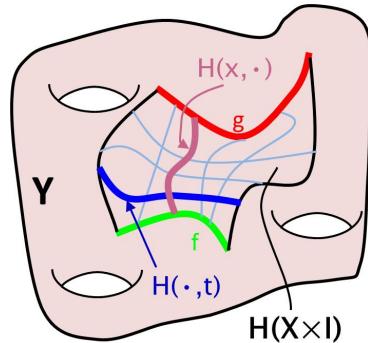
$$H: X \times I \rightarrow Y, (x, t) \mapsto H(x, t)$$

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:

$$f \simeq g.$$



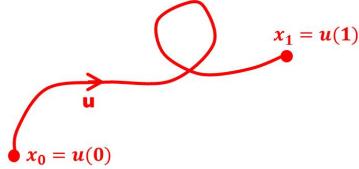
$$H \hat{=} (h_t)_{t \in I}, h_t: X \rightarrow Y$$

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

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.

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

Γ ist zunächst nur eine Abbildung, doch gilt:

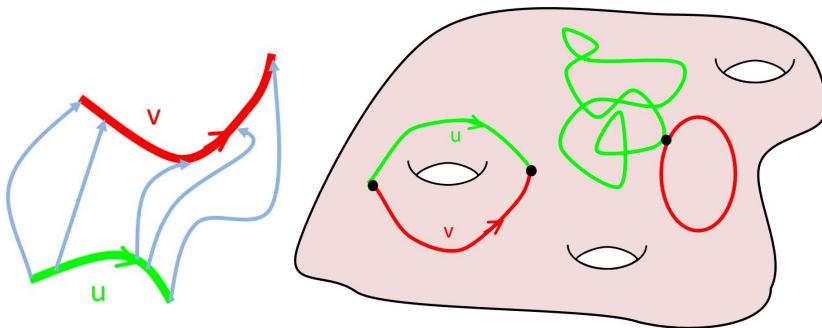
Bemerkung III.1. *$C(X, Y)$ ist, versehen mit der sogenannten kompakt-offenen Topologie, selbst ein topologischer Raum und jede Homotopie $H: f \simeq g, \quad f, g \in C(X, Y)$ ist bezüglich dieser Topologie auf $C(X, Y)$ dann tatsächlich als stetige Abbildung (also Weg) $\Gamma: I \rightarrow C(X,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

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

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*

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

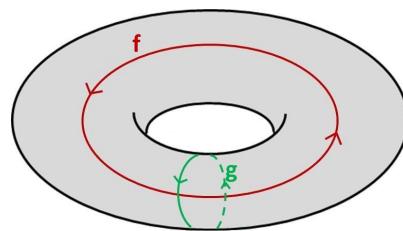
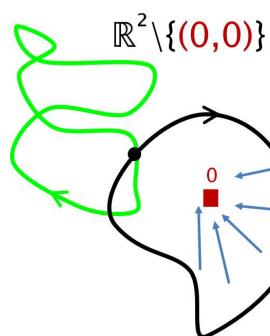
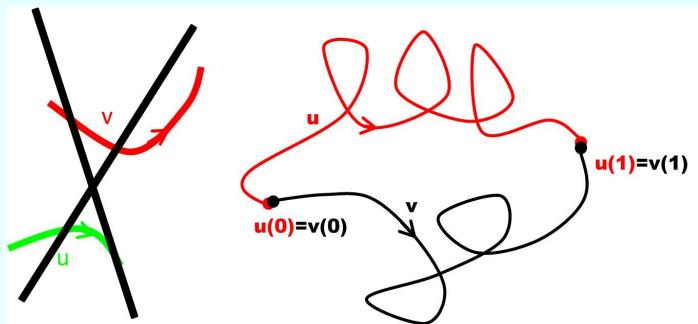


Deshalb neues Konzept:

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 $H(0, t) \equiv u(0), H(1, t) \equiv u(1)$)



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

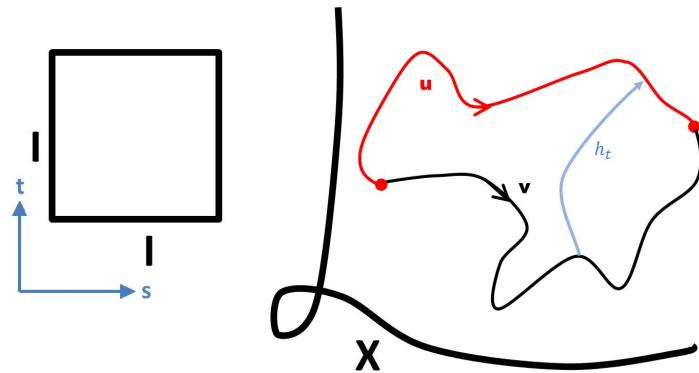
$$H: I \times I \rightarrow X, (s, t) \mapsto H(s, t)$$

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

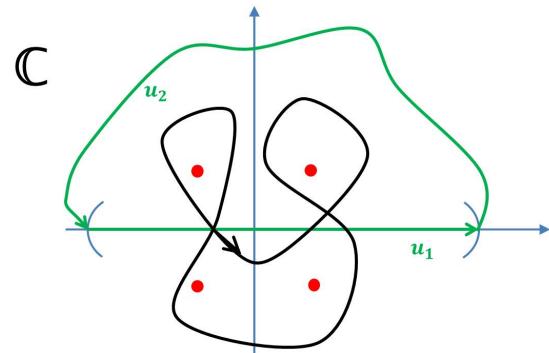
$$H(s, 0) = u(s), H(s, 1) = v(s)$$

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

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



Beispiel:



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

TODO: Exkurs: Residuensatz, Wegintegrale

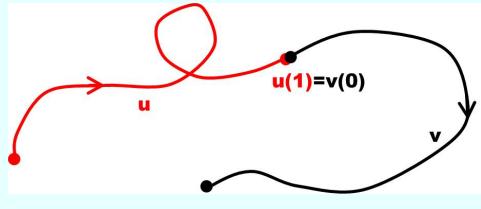
Bemerkung III.3. Die Homotopie von Wegen ist eine Äquivalenzrelation und für die Homotopieklassen eines Weges u schreibt man $[u]$.

¹Explodiert für $x^4 = -1$ (Singularität)

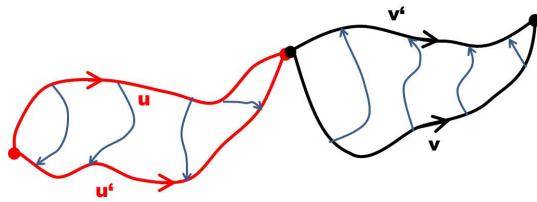
Produkt von Wegen

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

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

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

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

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

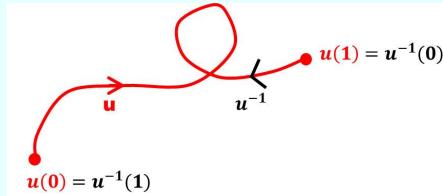
Folgerung: Setzt man für aneinanderfügbare Wege u, v

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

so ist dieses Produkt wohldefiniert!

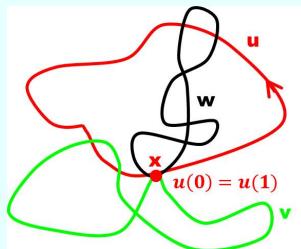
Konstanter Weg, Inverser Weg, Geschlossener Weg

- 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 $x \in X$

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

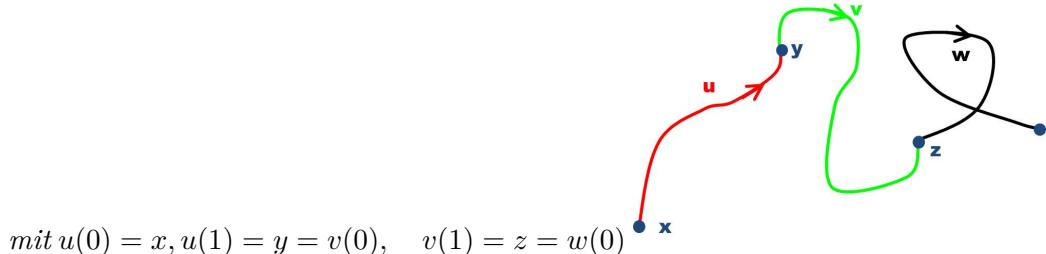


Bemerkung III.5. *Geschlossene Wege (in x) sind immer aneinanderfügbar.*

nullhomotop, einfach zusammenhängend

- Ein geschlossener Weg u in x heißt nullhomotop
 $\Leftrightarrow [u] = [c_x]$
- 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

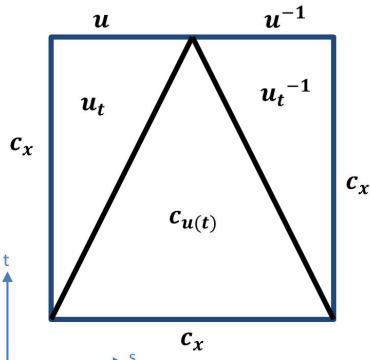
$$(s, t) \mapsto \begin{cases} u(2s) & 0 \leq s \leq \frac{t}{2} \\ u(t) & \frac{t}{2} \leq s \leq 1 - \frac{t}{2} \\ u(2 - 2s) & 1 - \frac{t}{2} \leq s \leq 1 \end{cases}$$

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

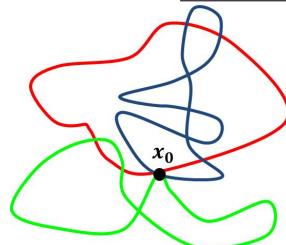
$$[u] \cdot [u^{-1}] = [u \cdot u^{-1}] = [c_x]$$

□

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

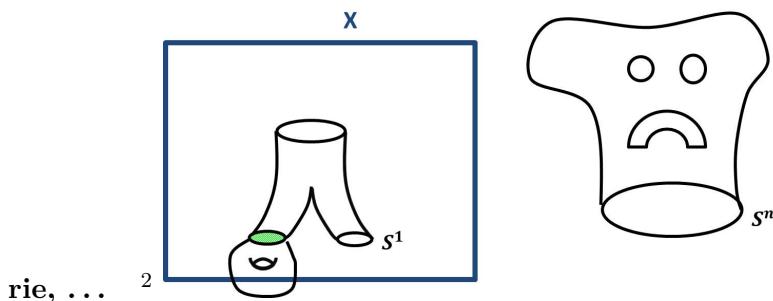


oder erste Homotopiegruppe von X in x_0 .

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-



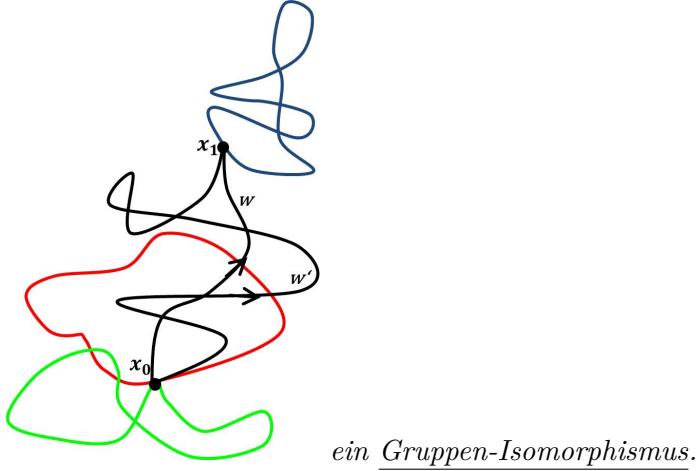
rie, ...

2

²<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 π_1 abelsche Gruppe ist!

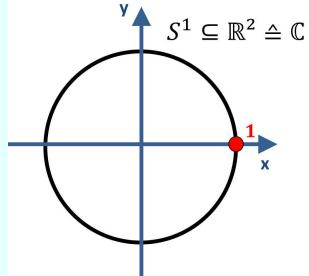
$$[w^{-1}][u \cdot v][w] = [w^{-1}uw][w^{-1}vw] \Rightarrow w_{\#} \text{ ist Homomorphismus.}$$

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 .

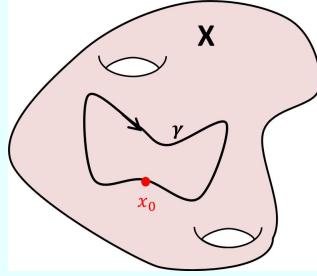
1.1 Geschlossene Wege als Abbildungen $S^1 \rightarrow X$

Schleife

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

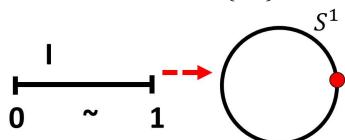


Eine stetige Abbildung $\gamma: S^1 \rightarrow X$, X topologischer Raum, $x_0 \in X$, mit $\gamma(1) = x_0$, heißt Schleife in x_0 .



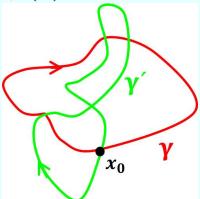
Bemerkung III.7. Assoziiert man zu einer Schleife γ in $x_0 \in X$ die Komposition mit der Exponentialabbildung $\exp: I \rightarrow S^1, t \mapsto e^{2\pi i \cdot t} (= (\cos 2\pi t, \sin 2\pi t))$, so ist $\gamma \circ \exp$ ein gewöhnlicher geschlossener Weg in x_0 . Tatsächlich kann jeder gewöhnliche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

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



schleifenhomotop

Zwei Schleifen γ, γ' 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.

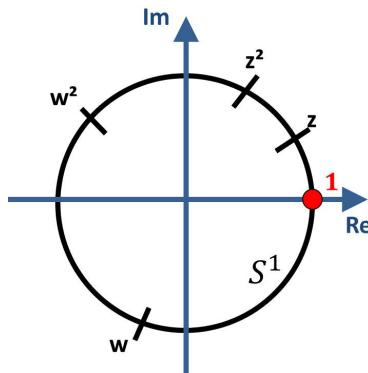
" \Leftarrow " Homotopien von Schleifen sind nichts anderes als Quotientenräume von Homotopien von gewöhnlichen geschlossenen Wegen nach der Partition des Einheitsquadrates $I \times I$, die von $(0, t) \sim (1, t)$ erzeugt wird.

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

Beispiel:

Sind γ, γ' 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

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

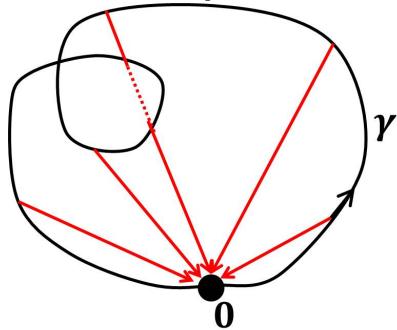


1.2 Erste Beispiele von Fundamentalgruppen

Beispiel:

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

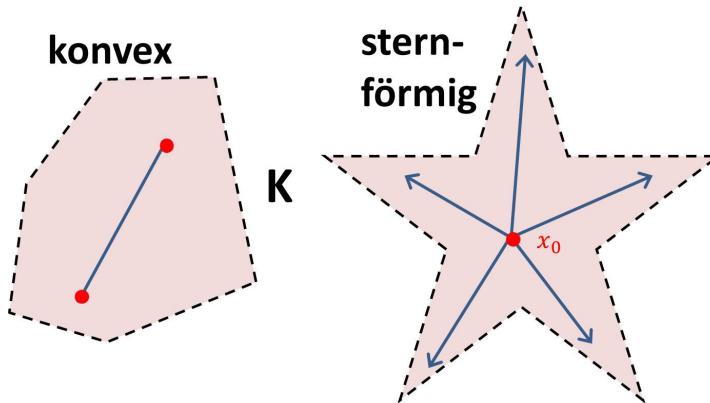
Denn zwischen jeder Schleife in $0 \in \mathbb{R}^n$ und c_0 gibt es eine Homotopie.



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

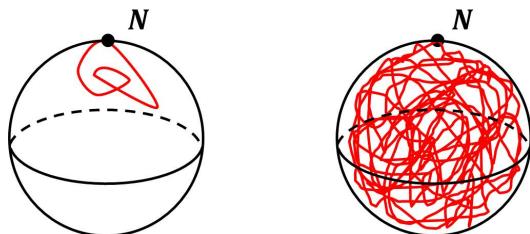
Beispiel:

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.

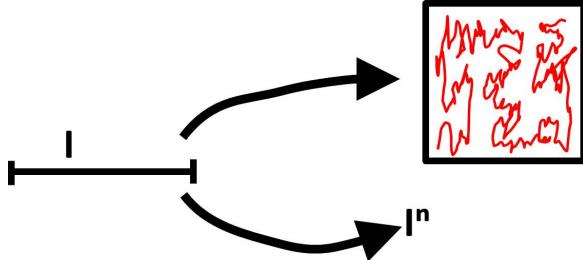


Beispiel:

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



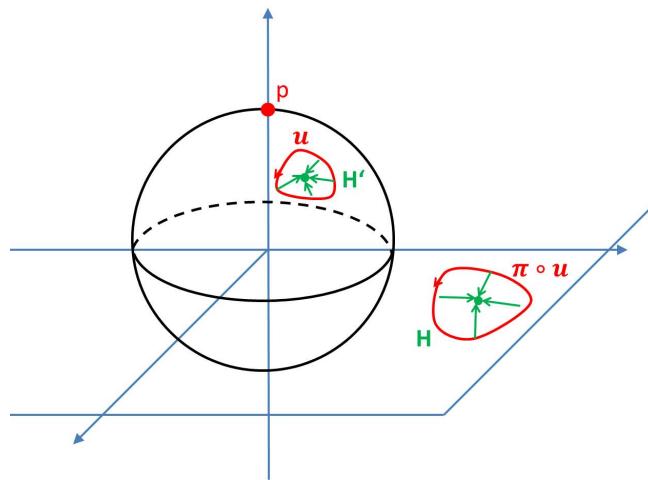
Achtung: $\forall n \in \mathbb{N}$ existieren stetige Surjektionen $I \rightarrow S^n$



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 ~ 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 .

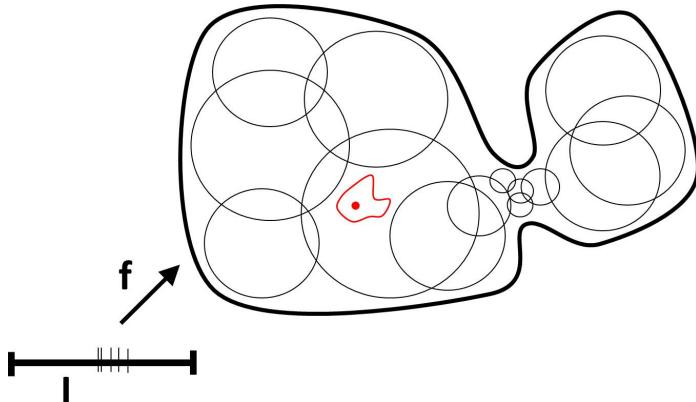


Ist H Homotopie, so ist $H':=\pi^{-1} \circ H$ eine Homotopie, die u auf S^n zu einer konstanten Kurve homotopiert, d.h. $u \sim c_{x_0}$.

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

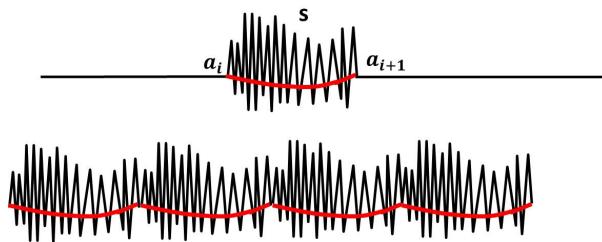
Erinnerung (Lebesguelemma) Ist $f: Z \rightarrow Y$, Z kompakter metrischer Raum, Y topologischer Raum und Γ eine offene Überdeckung von Y , so existiert $\delta > 0$ mit:

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

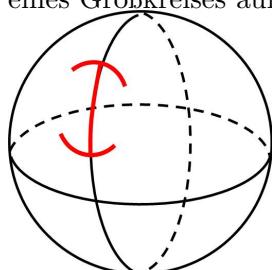


Korollar III.1. Ist $s: I \rightarrow X$ Weg und Γ offene Überdeckung von X , so existiert eine Folge von Punkten $a_1, \dots, a_N \in I$ mit $0 = a_1 < \dots < a_{N-1} < a_N = 1$ mit $s([a_i, a_{i+1}])$ ist in einem Element von Γ enthalten.

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 , (TODO: Bild 1) 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.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 Homotopieklassse 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!

(TODO: Bild 2)

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

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. (TODO: Bild 3)

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

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

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. (TODO: Bild 4)

Beweis. (TODO: Bild 5)

(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 $H(z, 0) = \gamma(z), H(z, 1) = x_0$

(TODO: Bild 6)

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

mit $\pi: S^1 \times I \rightarrow \underbrace{S^1 \times I /_{S^1 \times \{1\}}}_{\cong D^2}$: (TODO: Bild 7)

(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. (TODO: Bild 8)

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 und ist Homotopie $u_1 \simeq u_2$.

(4) \Rightarrow (1): klar □