



WESTFÄLISCHE
WILHELMS-UNIVERSITÄT
MÜNSTER



FACHBEREICH 10
MATHEMATIK UND
INFORMATIK

Skript Grundlagen der Analysis, Topologie, Geometrie

**Mitschrift der Vorlesung „Grundlagen der Analysis, Topologie, Geometrie“
von Prof. Dr. Arthur Bartels**

Jannes Bantje

16. November 2015

Aktuelle Version verfügbar bei



<https://github.com/JaMeZ-B/latex-www>

GitHub ist eine Internetplattform, auf der viele OpenSource-Projekte gehostet werden. Diese Plattform nutzen wir zur Zusammenarbeit, also findet man hier neben den PDFs auch die \TeX -Dateien. Außerdem ist über diese Plattform auch direktes Mitarbeiten möglich, siehe nächste Seite.



sciebo die Campuscloud

<https://uni-muenster.sciebo.de/public.php?service=files&t=965ae79080a473eb5b6d927d7d8b0462>

Sciebo ist ein Dropbox-Ersatz der Hochschulen in NRW, der von der Uni Münster in leitender Position auf Basis der OpenSource-Software Owncloud aufgebaut wurde. Wenn man auf den Link klickt, kann man die Freigabe zum eigenen Speicher hinzufügen und hat dann immer automatisch die aktuellste Version.



Bittorrent Sync

B6WH2DISQ5QVYIRYIEZSF4ZR2IDVKPN3I

BTSync ist ein peer-to-peer Dateisynchronisations-Tool. Dabei werden die Dateien nur auf den Computern der Teilnehmer an einer Freigabe gespeichert. Ein RasPi ist permanent online, sodass stets die aktuellste Version verfügbar ist. [Clients](#) gibt es für jedes Betriebssystem. Zugang ist über das obige „Secret“ bzw. den QR-Code möglich.




Vorlesungshomepage


<https://wwwmath.uni-muenster.de/reine/u/topos/lehre/SS2014/AnaTopGeo/anatopgeo.html>

Hier ist ein Link zur offiziellen Vorlesungshomepage.

Vorwort — Mitarbeit am Skript


Dieses Dokument ist eine Mitschrift aus der Vorlesung „Grundlagen der Analysis, Topologie, Geometrie, SoSe 2014“, gelesen von Prof. Dr. Arthur Bartels. Der Inhalt entspricht weitestgehend dem Tafelanschrieb. Für die Korrektheit des Inhalts übernehme ich keinerlei Garantie! Für Bemerkungen und Korrekturen – und seien es nur Rechtschreibfehler – bin ich sehr dankbar. Korrekturen lassen sich prinzipiell auf drei Wegen einreichen:

- Persönliches Ansprechen in der Uni, Mails an [✉ j.bantje@wwu.de](mailto:j.bantje@wwu.de) (gerne auch mit annotieren PDFs) oder Kommentare auf <https://github.com/JaMeZ-B/latex-wwu> .
- *Direktes* Mitarbeiten am Skript: Den Quellcode poste ich auf GitHub (siehe oben), also stehen vielfältige Möglichkeiten der Zusammenarbeit zur Verfügung: Zum Beispiel durch Kommentare am Code über die Website und die Kombination Fork + Pull Request. Wer sich verdient macht oder ein Skript zu einer Vorlesung, die ich nicht besuche, beisteuern will, dem gewähre ich gerne auch Schreibzugriff.

Beachten sollte man dabei, dass dazu ein Account bei github.com  notwendig ist, der allerdings ohne Angabe von persönlichen Daten angelegt werden kann. Wer bei GitHub (bzw. dem zugrunde liegenden Open-Source-Programm „git“) – verständlicherweise – Hilfe beim Einstieg braucht, dem helfe ich gerne weiter. Es gibt aber auch zahlreiche empfehlenswerte Tutorials im Internet.¹

- *Indirektes* Mitarbeiten: \TeX -Dateien per Mail verschicken.

Dies ist nur dann sinnvoll, wenn man einen ganzen Abschnitt ändern möchte (zB. einen alternativen Beweis geben), da ich die Änderungen dann per Hand einbauen muss! Ich freue mich aber auch über solche Beiträge!

¹ zB. <https://try.github.io/levels/1/challenges/1> , ist auf Englisch, aber dafür interaktives LearningBy-Doing

Inhaltsverzeichnis

1. Topologische Räume	1
1.1. Definition: Metrischer Raum	1
1.2. Definition: Norm auf einem \mathbb{R} -Vektorraum	1
1.3. Beispiel: Normen auf \mathbb{R}^n	1
1.4. Beispiele für Metriken	1
1.5. Definition: Isometrie und Stetigkeit	2
1.6. Definition: Offenheit in einem metrischen Raum	2
1.7. Lemma: Charakterisierung von Stetigkeit über offene Mengen	2
1.8. Definition: Topologischer Raum	2
1.9. Beispiele für Topologien	2
1.10. Definition: Stetigkeit in topologischen Räumen	2
1.11. Lemma: Die Kompositionen stetiger Abbildungen sind stetig	2
1.12. Definition: Homöomorphismus	3
1.13. Beispiele für homöomorphe topologische Räume	3
1.14. Definition: Basis der Topologie	3
1.15. Beispiel: Basis der Topologie eines metrischen Raumes	3
1.16. Proposition: Bedingung, dass eine Familie von Teilmengen eine Topologie ist	3
1.17. Bemerkung: Eindeutigkeit der Topologie in Proposition 1.16	3
1.18. Beispiel: Topologie der punktweisen bzw. gleichmäßigen Konvergenz	4
1.19. Definition: Inneres, Abschluss und Rand von $Y \subseteq X$	4
1.20. Bemerkung: Gleichungen für Inneres, Abschluss und Rand	4
1.21. Definition: Umgebung	4
1.22. Definition: Hausdorffraum	4
1.23. Definition: topologische Mannigfaltigkeit	4
2. Konstruktion topologischer Räume	5
2.1. Definition: Spurtopologie	5
2.2. Bemerkung: Stetigkeit durch Verknüpfung mit Inklusion	5
2.3. Definition: Produkttopologie bei 2 Faktoren	5
2.4. Definition: Produkttopologie bei unendlichen vielen Faktoren	5
2.5. Bemerkung zur Stetigkeit der Projektionen und Stetigkeit im Produktraum	5
2.6. Bemerkung zur üblichen Topologie auf \mathbb{R}^n	5
2.7. Beispiel: Der Torus, T^2	6
2.8. Definition: Homotopie und homotop	6
2.9. Definition: Quotiententopologie	6
2.10. Beispiele zur Quotiententopologie	6
3. Konvergenz	8
3.1. Definition: Konvergenz in topologischen Räumen	8
3.2. Lemma: In Hausdorffräumen sind Grenzwerte eindeutig	8
3.3. Definition: Gerichtete Menge	8
3.4. Definition: Netz und Konvergenz bezüglich eines Netzes	8
3.5. Lemma: In Hausdorffräumen sind Grenzwerte konvergenter Netze eindeutig	8
3.6. Definition: Teilnetz	9

4. Kompakte Räume	10
4.1. Definition: Offene Überdeckung und Teilüberdeckung	10
4.2. Definition: Kompaktheit	10
4.3. Definition: Endliche Durchschnittseigenschaft	10
4.4. Lemma: Äquivalenz zur Kompaktheit eines Hausdorffraumes	10
4.5. Satz: Charakterisierung von Kompaktheit durch konvergente Teilnetze	10
4.6. Bemerkung zu Kompaktheit in metrischen Räumen	11
4.7. Satz von Tychonov	11
4.8. Beispiel: Metrik auf dem Produkt metrischer Räume, die Produkttopologie induziert	11
4.9. Definition: Netze immer wieder und schließlich in A	12
4.10. Definition: Universelles Netz	12
4.11. Lemma: Universelle Netze konvergieren in kompakten Räumen	12
4.12. Proposition: Jedes Netz besitzt universelles Teilnetz	12
4.13. Definition: Vektorraum der beschränkten Abbildungen	13
4.14. Satz (Mittelbarkeit von \mathbb{Z})	13
5. Kompaktifizierungen	15
5.1. Definition: Kompaktifizierung	15
5.2. Beispiele für Kompaktifizierungen	15
5.3. Definition: lokalkompakt	15
5.4. Beispiele für lokalkompakte Hausdorffräume	15
5.5. Proposition: Offene Teilräume kompakter Räume sind lokalkompakt	15
5.6. Definition: Einpunktkompaktifizierung (EPK)	16
5.7. Proposition über Eigenschaften der Einpunktkompaktifizierung	16
5.8. Frage nach Fortsetzungen stetiger Funktionen auf der Einpunktkompaktifizierung	16
5.9. Definition: Eigentliche stetige Abbildung	16
5.10. Satz: Charakterisierung von eigentlichen stetigen Abbildungen	17
6. Der Approximationssatz von Stone-Weierstraß	18
6.1. Definition: Verschwinden stetiger Funktionen im Unendlichen	18
6.2. Definition: $\mathcal{B} \subseteq C_0(X)$ trennt $x, y \in X$ streng	18
6.3. Satz (Stone-Weierstraß)	18
6.4. Satz von Dini	19
6.5. Lemma 1: Folge reeller Polynome, die gleichmäßig gegen Wurfelfunktion konvergiert	19
6.6. Bemerkung: Komposition mit Polynomen ist auch in einer Algebra $\mathcal{A} \subseteq C_0(X)$	20
6.7. Lemma 2: Betrag von $f \in \mathcal{A}$ liegt in $\bar{\mathcal{A}}$	20
6.8. Bemerkung: \max, \min von Funktionen aus \mathcal{A} liegen in $\bar{\mathcal{A}}$	20
6.9. Lemma 3: Existenz von $f \in \mathcal{A}$ mit $f(x) = \alpha, f(y) = \beta$, wenn \mathcal{A} streng trennt	20
7. Metrisierbarkeit	22
7.1. Definition: Metrisierbar	22
7.2. Definition: Normaler Hausdorffraum	22
7.3. Satz (Urysohn)	22
7.4. Urysohns Lemma	23

8. Zusammenhängende topologische Räume	24
8.1. Definition: Zusammenhängender, wegzusammenhängender topologischer Raum	24
8.2. Bemerkungen zu zusammenhängenden und wegzusammenhängenden Räumen	24
8.3. Beispiele zu (weg-)zusammenhängenden Räumen	24
8.4. Satz (Topologische Invarianz der Dimension)	25
9. Die Fundamentalgruppe	26
9.1. Definition: Einfach zusammenhängender topologischer Raum	26
9.2. Bemerkungen zu einfach zusammenhängenden Räumen	26
9.3. Definition: Homotopie mit festen Endpunkten	26
9.4. Definition: Schleife	26
9.5. Lemma: Charakterisierung von einfach zusammenhängend über Schleifen	26
9.6. Notation: Konstante Schleife c_x	26
9.7. Definition: Kompositionsweg	27
9.8. Lemma: Eigenschaften des Kompositionsweg als Verknüpfung	27
9.9. Korollar: Gruppenstruktur auf der Menge der Homotopieklassen von Schleifen	27
9.10. Definition: Fundamentalgruppe	28
9.11. Bemerkung: Isomorphie zwischen Fundamentalgruppen	28
10. Die Windungszahl	29
10.1. Frage nach der Gruppenstruktur von Fundamentalgruppen	29
10.2. Proposition: Hebung eines Weges auf S^1 nach \mathbb{R}	29
10.3. Definition: Windungszahl	29
10.4. Satz: Die Windungszahl definiert einen Isomorphismus $\pi_1(S^1, 1) \cong \mathbb{Z}$	29
10.5. Definition: Überlagerung und elementare Umgebung	29
10.6. Beispiele für Überlagerungen	30
10.7. Definition: Hebung	30
10.8. Homotopiehebungssatz	30
11. Induzierte Abbildungen	31
11.1. Lemma: Gruppenhom. zwischen Fundamentalgruppen durch induzierte Abbildung	31
11.2. Definition: Induzierte Abbildung	31
11.3. Definition: Punktierte Raum, punktierte Abbildung und punktiert homotop	31
11.4. Proposition: Homotopieinvarianz von π_1	31
11.5. Definition: Homotopieäquivalent und zusammenziehbar	31
11.6. Beispiele für Homotopieäquivalenzen und zusammenziehbare Räume	32
11.7. Korollar: Die induzierte Abbildung einer Homotopieäquivalenz ist ein Isomorphismus	32
11.8. Fixpunktsatz von Brouwer	32
11.9. Proposition: Induzierte Abbildung von $f : S^1 \rightarrow S^1, z \mapsto z^n$	33
11.10. Lemma: Konstruktion einer punktierten Homotopie aus einer nicht punktierten	33
11.11. Hauptsatz der Algebra	34
12. Eigentlich diskontinuierliche Wirkungen	35
12.1. Definition: Eigentlich diskontinuierliche Wirkung	35
12.2. Lemma: Eigentlich diskontinuierliche Wirkungen definieren Überlagerungen	35
12.3. Beispiele für eigentlich diskontinuierliche Wirkungen	35

12.4.	Satz: Zusammenhang der Fundamentalgruppe mit einer edk-Wirkung	36
12.5.	Bemerkung: S^n ist wegzusammenhängend, für $n \geq 2$ sogar einfach	36
12.6.	Definition: Decktransformation	36
12.7.	Lemma: $\Delta(p)$ wirkt eigentlich diskontinuierlich auf \hat{X}	36
12.8.	Bemerkung zu Untergruppen der Decktransformationsgruppe	37
12.9.	Definition: Normale Überlagerung	37
12.10.	Proposition: Für normale Überlagerungen ist $q' : \Delta(p) \backslash \hat{X} \rightarrow X$ Homöomor- phismus	37
13.	Klassifikation von Überlagerungen	38
13.1.	Hebungssatz	38
13.2.	Klassifikationssatz (Eindeutigkeit)	38
13.3.	Satz (Universelle Überlagerung)	39
13.4.	Definition: Universelle Überlagerung	40
13.5.	Klassifikationssatz (Existenz)	40
14.	Höhere Homotopiegruppen	41
14.1.	Rückblick auf die vorigen Kapitel	41
14.2.	Definition: Homotopie relativ zum Rand von Abbildungen $I^n \rightarrow X$	41
14.3.	Definition: Höhere Homotopiegruppe $\pi_n(X, x_0)$	41
14.4.	Definition: Analogon zu Kompositionswegen $\omega_1 *_k \omega_2$	41
14.5.	Lemma (Eckmann-Hilton-Argument)	42
14.6.	Proposition: Gruppenstruktur von $\pi_n(X, x_0)$ und induzierte Abbildungen	42
14.7.	Korollar: Die Homotopiegruppen punktiert homöomorpher Räume stimmen überein	43
14.8.	Proposition: Für $n \geq 2$ und eine Überlagerung p ist $\pi_n(p)$ ein Isomorphismus . .	43
14.9.	Korollar: $\pi_n(S^1, s_0) = 0$ für $n \geq 2$	43
14.10.	Definition: Serre-Faserung	43
14.11.	Satz: Existenz einer langen exakten Sequenz von Homotopiegruppen für Faserung	44
14.12.	Anwendung des Satzes über Faserungen	45
15.	Differenzierbare Mannigfaltigkeiten	46
15.1.	Frage zur Differenzierbarkeit von Funktionen auf Mannigfaltigkeiten	46
15.2.	Definition: Karten, Kartenwechsel, Atlanten	46
15.3.	Definition: Differenzierbare Mannigfaltigkeit	46
15.4.	Beispiele für differenzierbare Mannigfaltigkeiten	46
15.5.	Bemerkung: Maximaler Atlas	47
15.6.	Definition: Differenzierbarkeit einer Abbildung $f : M \rightarrow N$	47
15.7.	Bemerkungen zur Definition von C^∞	48
15.8.	Bemerkungen zu C^∞ -Mannigfaltigkeiten	48
15.9.	Definition: Untermannigfaltigkeit	48
15.10.	Definition: Einbettung	48
16.	Reguläre Werte	49
16.1.	Beispiel: Höhenfunktion beim T^2 Torus	49
16.2.	Definition: Rang des Differentials einer C^∞ -Abbildung $f : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$	49
16.3.	Definition: Rang einer C^∞ -Abbildung $f : N \rightarrow M$	49
16.4.	Lemma: Die Definition des Ranges hängt nicht von Karten ab	49

16.5.	Definition: reguläre Werte	50
16.6.	Satz (Urbilder regulärer Werte)	50
16.7.	Beispielanwendung von 16.6 für die orthogonalen Matrizen	51
16.8.	Satz über implizite Funktionen (Analysis II.)	51
16.9.	Satz von der Umkehrabbildung (Analysis II.)	51
16.10.	Bemerkung: Aussage des Satzes von Sard	51
17.	Approximation durch C^∞-Abbildungen	52
17.1.	Proposition: $C_0^\infty(M, \mathbb{R})$ liegt dicht in $C_0(M, \mathbb{R})$	52
17.2.	Korollar 1: Approximation von $\varphi : M \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig durch C^∞ -Funktionen	53
17.3.	Korollar 2: $\varphi : M \rightarrow S^n$ lässt sich approximieren durch C^∞ -Funktion $f : M \rightarrow S^n$	53
17.4.	Bemerkung: Jede stetige Abbildung zwischen C^∞ -Mfkt. ist approximierbar	53
17.5.	Proposition: Für $f : U \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, $m > n$ ist $f(U)$ eine Nullmenge	54
17.6.	Korollar 3: Für $f : N \rightarrow M$ glatt ist $M \setminus f(N) \subseteq M$ dicht, wenn $\dim M > \dim N$	54
17.7.	Satz: Für $n < m$ ist $\pi_n(S^m) = 0$	54
17.8.	Lemma für Satz 17.7	55
18.	Der Tangentialraum	56
18.1.	Beispiel: Tangentialraum des S^n	56
18.2.	Bemerkung: Parallelisierbarkeit von S^n	56
18.3.	Beispiel: Tangentialraum von Untermannigfaltigkeiten des \mathbb{R}^{n+k}	56
18.4.	Lemma 1: Vektoren in $T_x^u M$ sind Geschwindigkeitsvektoren von Wegen durch x	56
18.5.	Lemma 2: Äquivalenz, die allgemeine Definition von Tangentialvektoren ermöglicht	57
18.6.	Definition: Tangentialraum	57
18.7.	Bemerkung: Die Definition von $T_x^u M$ ist verträglich mit der allgemeinen Definition	57
18.8.	Bemerkung: Tangentialraum von $V \subseteq \mathbb{R}^n$ offen	57
18.9.	Bemerkung: Für $U \subseteq M$ offen gilt $T_x U = T_x M$	58
18.10.	Lemma 3: Wohldefiniertheit der Tangentialabbildung	58
18.11.	Definition: Tangentialabbildung	58
18.12.	Lemma 4: Die Tangentialabbildung ist eine Verallgemeinerung des Differentials	58
18.13.	Proposition: Vektorraumstruktur von $T_x M$, Linearität der Tangentialabbildung	58
18.14.	Bemerkung: $x \in N$ regulär $\iff T_x f : T_x N \rightarrow T_{f(x)} M$ surjektiv	59
19.	Das Tangentialbündel	60
19.1.	Definition: Vektorraumbündel	60
19.2.	Beispiel: Das Möbiusband ist ein nichttriviales Vektorraumbündel	60
19.3.	Definition: Lineare Abbildung über f	60
19.4.	Definition: Schnitt eines Vektorbündels	60
19.5.	Definition: Tangentialbündel	60
19.6.	Definition: Induzierte Bündelkarte	60
19.7.	Bemerkung: Bündelkartenwechsel	61
19.8.	Proposition: Topologie auf TM , die TM zu einem Vektorraumbündel macht	61
19.9.	Bemerkung: $T\varphi : TM \rightarrow TN$ ist linear, Vektorfelder als Schnitte von TM	61
A.	Anhang	63
A.1.	Ausführlicher Beweis zu Lemma 4.4	63
A.2.	Blatt3, Aufgabe 4: Hilfssatz für den Hauptsatz der Algebra	63

A.3. Blatt 10, Aufgabe 3	64
Index	A
Abbildungsverzeichnis	C

1. Topologische Räume

1.1. Definition Ein **metrischer Raum** (X, d) ist eine Menge X mit einer Abbildung, **Metrik** genannt, $d : X \times X \rightarrow [0, \infty)$ mit folgenden Eigenschaften:

- (i) $\forall x, y \in X : d(x, y) = d(y, x)$
- (ii) $\forall x, y \in X : d(x, y) = 0 \iff x = y$
- (iii) $\forall x, y, z \in X : d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$ (Dreiecksungleichung)

1.2. Definition Sei V ein \mathbb{R} -Vektorraum. Eine **Norm** auf V ist eine Abbildung $\|\cdot\| : V \rightarrow [0, \infty)$ mit folgenden Eigenschaften:

- (i) $\forall v \in V, \lambda \in \mathbb{R} : \|\lambda \cdot v\| = |\lambda| \cdot \|v\|$
- (ii) $\forall v, w \in V : \|v + w\| \leq \|v\| + \|w\|$ (Dreiecksungleichung)
- (iii) $\forall v \in V : \|v\| = 0 \iff v = 0$

Durch $d(v, w) := \|v - w\|$ erhalten wir eine Metrik auf V .

1.3. Beispiel Auf \mathbb{R}^n gibt es verschiedene Normen und damit auch verschiedene Metriken:
 Für $x = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n$

- (i) $\|x\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}$
- (ii) $\|x\|_1 = \sum_{i=1}^n |x_i|$
- (iii) $\|x\|_\infty = \max\{|x_i| \mid i = 1, \dots, n\}$

1.4. Beispiele

- (i) Auf $S^1 := \{z \in \mathbb{C} \mid |z| = 1\}$ wird durch $d(z, z') := \min\{|\theta| \mid \theta \in \mathbb{R} : z = e^{i\theta} \cdot z'\}$ eine Metrik definiert.
- (ii) Ist X ein metrischer Raum und A eine Teilmenge von X , so wird A durch die Einschränkung der Metrik auf A zu einem metrischen Raum. Wir sagen dann A ist ein Unterraum von X .
- (iii) Sei X eine beliebige Menge. Durch

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

wird auf X eine Metrik (die **diskrete Metrik**) definiert.

- (iv) Sei p eine Primzahl. Jedes $x \neq 0 \in \mathbb{Q}$ lässt sich eindeutig schreiben als $x = \frac{a}{b} p^n$ mit $n, a, b \in \mathbb{Z}, b \neq 0$ und a, b, p paarweise teilerfremd. Dann heißt

$$|x|_p := p^{-n}$$

der **p -adische Betrag** von x , ($|0|_p := 0$). Durch $d_p(x, y) := |x - y|_p$ erhält man die p -adische Metrik auf \mathbb{Q} .

1.5. Definition Seien (X, d_X) und (Y, d_Y) zwei metrische Räume. Eine Abbildung $f : X \rightarrow Y$ heißt eine **Isometrie**, falls gilt:

$$\forall x, x' \in X : d_Y(f(x), f(x')) = d_X(x, x')$$

f heißt **stetig**, falls für alle $x_0 \in X$ gilt:

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists \delta > 0 : d_X(x, x_0) < \delta \implies d_Y(f(x), f(x_0)) < \varepsilon$$

1.6. Definition Eine Teilmenge U eines metrischen Raums X heißt **offen**, falls gilt

$$\forall x \in U \exists \delta > 0 \text{ mit } B_\delta(x) = \{y \in X \mid d(x, y) < \delta\} \subseteq U$$

1.7. Lemma Sei $f : X \rightarrow Y$ eine Abbildung zwischen metrischen Räumen. Dann sind äquivalent:

- (i) f ist stetig
- (ii) Urbilder (unter f) offener Mengen in Y sind offen in X . ($\forall U \subseteq Y$ offen ist $f^{-1}(U) \subseteq X$ offen)

BEWEIS: Analysis II. □

1.8. Definition Ein **topologischer Raum** (X, \mathcal{O}) ist eine Menge X zusammen mit einer Familie \mathcal{O} von Teilmengen von X , so dass gilt:

- (i) $\emptyset, X \in \mathcal{O}$
- (ii) $U, V \in \mathcal{O} \implies U \cap V \in \mathcal{O}$
- (iii) Ist I eine Indexmenge und $U_i \in \mathcal{O}$ für $i \in I$, so gilt $\bigcup_{i \in I} U_i \in \mathcal{O}$.

\mathcal{O} heißt dann eine **Topologie** auf X . $U \subseteq X$ heißt **offen**, falls $U \in \mathcal{O}$. $A \subseteq X$ heißt **abgeschlossen**, falls $X \setminus A$ offen ist.

1.9. Beispiele

- (i) Jeder metrische Raum wird durch $\mathcal{O} := \{U \subseteq X \mid U \text{ ist offen}\}$ zu einem topologischen Raum.
- (ii) Sei X eine beliebige Menge.
 - (i) Die **grobe Topologie** ist $\mathcal{O}_{\text{grob}} := \{\emptyset, X\}$.
 - (ii) Die **diskrete Topologie** ist $\mathcal{O}_{\text{diskret}} := \mathcal{P}(X)$.
 - (iii) Die **koendliche Topologie** ist $\mathcal{O}_{\text{koendl.}} := \{U \subseteq X \mid X \setminus U \text{ endlich}\} \cup \{\emptyset\}$.

1.10. Definition Eine Abbildung $f : X \rightarrow Y$ zwischen topologischen Räumen heißt **stetig**, wenn Urbilder von offener Mengen offen sind.

1.11. Lemma Seien $f : X \rightarrow Y$, $g : Y \rightarrow Z$ stetige Abbildungen. Dann ist auch $g \circ f : X \rightarrow Z$ stetig.

BEWEIS: Sei $U \subseteq Z$ offen. Dann ist $g^{-1}(U) \subseteq Y$ offen, da g stetig ist. Da auch f stetig ist, gilt $(g \circ f)^{-1}(U) = f^{-1}(g^{-1}(U)) \subseteq X$ offen. \square

1.12. Definition Seien X, Y topologische Räume. Eine bijektive stetige Abbildung $f : X \rightarrow Y$ heißt ein **Homöomorphismus**, falls auch ihre Umkehrabbildung $f^{-1} : Y \rightarrow X$ stetig ist. Gibt es einen solchen Homöomorphismus, so heißen X und Y **homöomorph** und wir schreiben $X \cong Y$, andernfalls $X \not\cong Y$.

1.13. Beispiel

- (i) $(0, 1) \cong (0, \infty) \cong (-\infty, 0) \cong \mathbb{R}$ (einfach)
- (ii) $(0, 1) \not\cong [0, 1] \not\cong [0, 1] \not\cong (0, 1)$ (Übung)
- (iii) $\mathbb{R}^n \cong \mathbb{R}^m \iff n = m$ (schwer)

1.14. Definition Sei X ein topologischer Raum. Eine Familie \mathcal{U} von offenen Teilmengen von X heißt eine **Basis der Topologie**, falls für jede Teilmenge $W \subseteq X$ äquivalent sind:

- (1) W ist offen.
- (2) $\forall x \in W : \exists U \in \mathcal{U} \text{ mit } x \in U \subseteq W \iff W = \bigcup_{\substack{U \in \mathcal{U} \\ U \subseteq W}} U$

Man sagt X erfüllt das **zweite Abzählbarkeitsaxiom**, falls X eine abzählbare Basis der Topologie besitzt.

1.15. Beispiel Sei X ein metrischer Raum. Dann ist $\{B_\delta(x) \mid x \in X, \delta > 0\}$ eine Basis der Topologie von X . Gibt es eine abzählbare dichte Teilmenge $X_0 \subseteq X$, so ist $\{B_{1/n}(x) \mid x \in X_0, n \in \mathbb{N}\}$ eine abzählbare Basis der Topologie von X und X erfüllt das zweite Abzählbarkeitsaxiom.

1.16. Proposition Sei X eine Menge und \mathcal{U} eine Familie von Teilmengen von X mit $X = \bigcup_{U \in \mathcal{U}} U$. Dann ist \mathcal{U} genau dann die Basis einer Topologie \mathcal{O} auf X , wenn \mathcal{U} folgende Bedingungen erfüllt:

$$\forall U, V \in \mathcal{U} : \forall x \in U \cap V : \exists W \in \mathcal{U} \text{ mit } x \in W \subseteq U \cap V \quad (\star)$$

BEWEIS: Sei \mathcal{U} die Basis der Topologie \mathcal{O} und $U, V \in \mathcal{U} \Rightarrow U, V$ offen, also ist auch $U \cap V$ offen. Da \mathcal{U} eine Basis der Topologie ist, gibt es zu jedem $x \in U \cap V$ ein $W \in \mathcal{U}$ mit $x \in W \subseteq U \cap V$. Daher gilt (\star) .

Sei umgekehrt (\star) erfüllt. Definiere \mathcal{O} durch

$$W \in \mathcal{O} :\iff \forall x \in W : \exists U \in \mathcal{U} : x \in U \subseteq W.$$

Dann $\emptyset \in \mathcal{O}$. Wegen $X = \bigcup_{U \in \mathcal{U}} U$ gilt auch $X \in \mathcal{O}$. Weiter ist \mathcal{O} unter Vereinigungen abgeschlossen. Seien $W_1, W_2 \in \mathcal{O}$. Sei $x \in W_1 \cap W_2$. Dann gilt

$$\begin{aligned} x \in W_1, W_1 \text{ offen} &\Rightarrow \exists U_1 \in \mathcal{U} : x \in U_1 \subseteq W_1 \\ x \in W_2, W_2 \text{ offen} &\Rightarrow \exists U_2 \in \mathcal{U} : x \in U_2 \subseteq W_2 \end{aligned}$$

Also $x \in U_1 \cap U_2$. Mit (\star) folgt: $\exists W \in \mathcal{U}$ mit $x \in W \subseteq U_1 \cap U_2 \subseteq W_1 \cap W_2$. \square

1.17. Bemerkung Die Topologie \mathcal{O} in der Proposition 1.16 wird eindeutig durch \mathcal{U} bestimmt.

1.18. Beispiel

- Sei $\mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ der \mathbb{R} -Vektorraum aller reellen Folgen. Für $\delta > 0$, $n \in \mathbb{N}$, $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in \mathbb{R}$ sei

$$U_{n,\delta,\alpha_1,\dots,\alpha_n} := \{(x_i)_{i \in \mathbb{N}} \mid |x_i - \alpha_i| < \delta \text{ für } i = 1, \dots, n\}$$

Dann erfüllt $\mathcal{U} := \{U_{n,\delta,\alpha_1,\dots,\alpha_n} \mid n \in \mathbb{N}, \alpha_i \in \mathbb{R}, \delta > 0\}$ die Bedingung (\star) und ist die Basis der **Topologie der punktweisen Konvergenz**.

- Sei $C(\mathbb{R}, \mathbb{R})$ der \mathbb{R} -Vektorraum aller stetigen Abbildungen. Zu $[a, b] \subset \mathbb{R}$, $\delta > 0$, $g : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ stetig sei

$$U_{a,b,\delta,g} := \{f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \text{ stetig} \mid \forall t \in [a, b] : |f(t) - g(t)| < \delta\}.$$

Dann erfüllt $\mathcal{U} := \{U_{a,b,\delta,g}\}$ die Bedingung (\star) und ist die Basis der **Topologie der gleichmäßigen Konvergenz** auf kompakten Intervallen.

1.19. Definition Sei Y eine Teilmenge eines topologischen Raums X .

$\mathring{Y} := \{y \in Y \mid \exists U \subseteq X \text{ offen mit } y \in U \subseteq Y\}$ heißt das **Innere** von Y .

$\overline{Y} := \{x \in X \mid \forall U \subseteq X \text{ offen mit } x \in U : U \cap Y \neq \emptyset\}$ heißt **Abschluss** von Y .

$\partial Y := \overline{Y} \setminus \mathring{Y}$ heißt der **Rand** von Y .

1.20. Bemerkung

1) $\mathring{Y} = X \setminus (\overline{X \setminus Y})$, $\overline{Y} = X \setminus (X \setminus Y)^\circ$.

2) $\mathring{Y} = \bigcup_{\substack{U \subseteq Y \\ U \text{ offen}}} U$ ist offen.

3) $\overline{Y} = \bigcap_{\substack{A \supseteq Y \\ A \text{ abgeschlossen}}} A$ ist abgeschlossen.

4) $\partial Y = \overline{Y} \setminus \mathring{Y}$ ist abgeschlossen.

1.21. Definition Sei X ein topologischer Raum, $x \in X$. $V \subseteq X$ heißt eine **Umgebung** von x , falls es $U \subseteq X$ offen gibt mit $x \in U \subseteq V$. Ist V offen, so heißt V eine **offene Umgebung** von x .

1.22. Definition Ein topologischer Raum X heißt **hausdorffsch** (oder ein **Hausdorffraum**), falls es zu jedem Paar $x, y \in X$, $x \neq y$ offene Umgebungen U von x und V von y gibt mit $U \cap V = \emptyset$.

BEISPIEL:

- Metrische Räume sind hausdorffsch.
- Ist $|X| \geq 2$ so ist $(X, \mathcal{O}_{\text{grob}})$ nicht hausdorffsch.

1.23. Definition Ein Hausdorffraum M , der das zweite Abzählbarkeitsaxiom erfüllt, heißt eine **topologische Mannigfaltigkeit** der Dimension n (oder eine n -Mannigfaltigkeit), falls er lokal homöomorph zum \mathbb{R}^n ist; d.h. $\forall x \in M \exists$ offene Umgebung U von x mit $U \cong \mathbb{R}^n$.

2. Konstruktion topologischer Räume

2.1. Definition Sei X ein topologischer Raum und $A \subseteq X$. Die **Spurtopologie** auf A besteht aus allen Teilmengen von A der Form $A \cap U$ mit $U \subseteq X$ offen. Mit dieser Topologie heißt A ein Unterraum von X .

Achtung: $U \subseteq A$ offen $\not\Rightarrow U \subseteq X$ offen!

2.2. Bemerkung Sei $i : A \rightarrow X$ die Inklusion.

(i) i ist stetig.

(ii) Ist Y ein weiterer topologischer Raum und $f : Y \rightarrow A$ eine Abbildung. Dann gilt:

$$f \text{ stetig} \iff i \circ f : Y \rightarrow X \text{ stetig.}$$

2.3. Definition Seien X, Y topologische Räume. Eine Basis für die **Produkttopologie** auf $X \times Y$ ist

$$\mathcal{U} := \{U \times V \mid U \subseteq X \text{ offen}, V \subseteq Y \text{ offen}\}.$$

2.4. Definition Seien X_i für $i \in I$ topologische Räume. Die Produkttopologie auf ihrem Produkt

$$\prod_{i \in I} X_i = \{(x_i)_{i \in I} \mid x_i \in X_i\}$$

hat als Basis alle Mengen der Form $\prod_{i \in I} U_i$ mit

1) $U_i \subseteq X_i$ ist offen

2) Für fast alle i ist $U_i = X_i$.

2.5. Bemerkung Seien $p_j : \prod_{i \in I} X_i \rightarrow X_j$ die Projektionen auf die einzelnen Koordinaten. Dann gilt

(i) Die p_j sind stetig.

(ii) Ist Y ein weiterer topologischer Raum und $f : Y \rightarrow \prod_{i \in I} X_i$ eine Abbildung, so gilt:
 f ist stetig $\iff \forall j$ ist $f_j := p_j \circ f$ stetig.

2.6. Bemerkung Die übliche Topologie auf $\mathbb{R}^n = \prod_{i=1}^n \mathbb{R}$ stimmt mit der Produkttopologie überein.

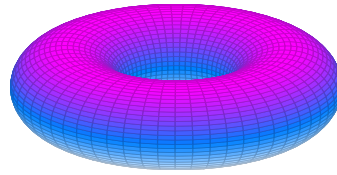


Abbildung 1: Der Torus T^2 , Quelle

2.7. Beispiel $T^n := \underbrace{S^1 \times \dots \times S^1}_n = \prod_{i=1}^n S^1$ heißt der n -Torus. Der n -Torus ist eine (glatte) n -Mannigfaltigkeit.

2.8. Definition Seien X und Y topologische Räume und $(f_t)_{t \in [0,1]}$ eine Familie von stetigen Abbildungen $f_t : X \rightarrow Y$. Wir sagen, dass die f_t stetig von t abhängen, falls

$$H : X \times [0, 1] \longrightarrow Y \text{ mit } H(x, t) = f_t(x)$$

stetig bezüglich der Produkttopologie ist. In diesem Fall heißen f_0 und f_1 **homotop** und H eine **Homotopie** zwischen f_0 und f_1 .

BEISPIEL: Je zwei Abbildungen $f, g : X \rightarrow \mathbb{R}^n$ sind homotop; eine Homotopie wird gegeben durch $H(x, t) := (1 - t) \cdot f(x) + t \cdot g(x)$. Wir werden später sehen, dass $\text{id} : S^1 \rightarrow S^1$ nicht homotop zu einer konstanten Abbildung ist.

2.9. Definition Sei X ein topologischer Raum, M eine Menge und $q : X \rightarrow M$ eine surjektive Abbildung. Die offenen Mengen der **Quotiententopologie** auf M (bezüglich q) sind alle $U \subseteq M$ für die $q^{-1}(U) \subseteq X$ offen ist.

BEMERKUNG:

(i) $q : X \rightarrow M$ ist stetig.

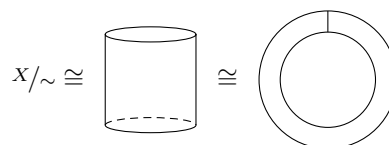
(ii) Ist Y ein weiterer topologischer Raum und $f : M \rightarrow Y$ eine Abbildung, so gilt

$$f \text{ ist stetig} \iff f \circ q \text{ ist stetig}$$

BEMERKUNG: Sei \sim eine Äquivalenzrelation auf dem topologischen Raum X . Dann ist die Äquivalenzklassenabbildung $q : X \rightarrow X/\sim, x \mapsto [x]_\sim$ surjektiv. Insbesondere wird X/\sim durch die Quotiententopologie zu einem topologischen Raum.

2.10. Beispiele $X = [0, 1] \times [0, 1]$: Definiere

(i) $(s, t) \sim (s', t') :\Leftrightarrow (s = s' \text{ und } t = t') \text{ oder } (s = 0, s' = 1, t = t')$. Dann



"Zusammenkleben" der Seiten

- (ii) $(s, t) \sim (s', t') : \Leftrightarrow (s = s' \text{ und } t = t') \text{ oder } (s = 0, s' = 1 \text{ und } t = 1 - t')$. Dann

Möbiusband: Verdrehen und dann Zusammenkleben

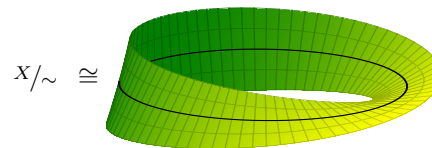



Abbildung 2: Möbius-Band, Quelle 

- (iii) Sei $\mathbb{R}P^n$ die Menge aller 1-dimensionalen Unterräume des \mathbb{R}^{n+1} . Wir erhalten eine surjektive Abbildung

$$q : \mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{R}P^n, \quad q(v) := \langle v \rangle$$

$\mathbb{R}P^n$ mit der Quotiententopologie bezüglich q heißt der **reell projektive Raum** der Dimension n . Er ist eine n -Mannigfaltigkeit. (siehe auch 15.4 ((3)))

- (iv) Betrachte auf \mathbb{R} die Relation $x \sim y : \Leftrightarrow x - y \in \mathbb{Q}$. Der Raum der Äquivalenzklassen bezeichnen wir mit \mathbb{R}/\mathbb{Q} . Dann ist \mathbb{R}/\mathbb{Q} mit der Quotiententopologie nicht hausdorffsch, obwohl \mathbb{R} natürlich hausdorffsch ist.
 (Übung: Die Quotiententopologie auf \mathbb{R}/\mathbb{Q} ist die grobe Topologie.)

- (v) Sei $f : X \rightarrow X$ eine stetige Abbildung. Betrachte auf $X \times [0, 1]$ die Äquivalenzrelation

$$(x, t) \sim (x', t') : \Leftrightarrow (x = x' \text{ und } t = t') \text{ oder } (t = 0, t' = 1 \text{ und } x' = f(x))$$

Der Quotient $T_f := X \times [0, 1] / \sim$ heißt der **Abbildungstorus** von f .

Beispiel: Betrachte $f : [-1, 1] \rightarrow [-1, 1]$ gegeben durch $f(x) = -x$. Dann ist T_f das Möbiusband.

3. Konvergenz

3.1. Definition Sei X ein topologischer Raum und $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge in X . Dann sagen wir $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ **konvergiert** gegen $x \in X$, falls gilt:

Zu jeder offenen Umgebung V von x , gibt es $N \in \mathbb{N}$, sodass $x_n \in V$ für alle $n \geq N$.

Wir schreiben dann $x_n \rightarrow x$ oder $x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} x$. x heißt ein **Grenzwert** von $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$.

BEMERKUNG: Bezüglich der groben Topologie ist jeder Punkt Grenzwert jeder Folge.

BEISPIEL: Betrachte die Topologie der gleichmäßigen Konvergenz auf kompakten Teilmengen (siehe 1.18) auf dem Raum $C(\mathbb{R}, \mathbb{R})$. Dann gilt für Folgen $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ von stetigen Abbildungen $f_n \in C(\mathbb{R}, \mathbb{R})$

$$f_n \rightarrow f \iff \forall a < b \text{ konvergiert } f_n|_{[a,b]} \rightarrow f|_{[a,b]} \text{ gleichmäßig.}$$

3.2. Lemma (Eindeutigkeit von Grenzwerten) Sei X hausdorffsch. Gilt $x_n \rightarrow x$ und $x_n \rightarrow y$, so folgt $x = y$.

BEWEIS: Übung! (Annahme: $x \neq y$, Hausdorffeigenschaft ausnutzen \Rightarrow Widerspruch) □

3.3. Definition Eine nichtleere Menge Λ mit einer Relation " \leq " heißt **gerichtet**, falls gilt

(i) $\forall \lambda \in \Lambda : \lambda \leq \lambda$

(ii) $\forall \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \in \Lambda : \lambda_1 \leq \lambda_2 \wedge \lambda_2 \leq \lambda_3 \Rightarrow \lambda_1 \leq \lambda_3$ (transitiv)

(iii) $\forall \lambda_1, \lambda_2 \in \Lambda : \exists \mu : \lambda_1 \leq \mu \wedge \lambda_2 \leq \mu$

3.4. Definition Sei X ein topologischer Raum. Ein **Netz** $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ in X besteht aus einer gerichteten Menge Λ und Elementen $x_\lambda \in X$ für $\lambda \in \Lambda$. Für $x \in X$ sagen wir $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ **konvergiert** gegen x , falls gilt:

$$\forall \text{ Umgebungen } U \text{ von } x : \exists \lambda_0 \in \Lambda : \forall \lambda \in \Lambda \text{ mit } \lambda \geq \lambda_0 \text{ gilt } x_\lambda \in U$$

Wir schreiben dann $x_\lambda \xrightarrow{\lambda \rightarrow \infty} x$ oder $x_\lambda \rightarrow x$.

*Dies ist die haupt-
sächliche Anwen-
dung von Netzen!*

BEISPIEL: Es sei X ein topologischer Raum und $x \in X$ ein Punkt. Dann ist die Menge $\Lambda := \{U \mid U \text{ ist offene Umgebung von } x\}$ gerichtet bezüglich

$$U \leq V :\Leftrightarrow V \subseteq U$$

Ist nun $x_U \in U$ für alle $U \in \Lambda$ so gilt $x_U \rightarrow x$.

3.5. Lemma (Eindeutigkeit von Grenzwerten) Sei X hausdorffsch. Gilt $x_\lambda \rightarrow x$ und $x_\lambda \rightarrow y$, so folgt $x = y$.

BEWEIS: Angenommen es gilt $x \neq y$. Da X hausdorffsch ist, existiert dann eine Umgebung U von x und V von y mit $U \cap V = \emptyset$.

$$x_\lambda \rightarrow x \Rightarrow \exists \lambda_U : x_\lambda \in U : \forall \lambda \geq \lambda_U$$

$$x_\lambda \rightarrow y \Rightarrow \exists \lambda_V : x_\lambda \in V : \forall \lambda \geq \lambda_V$$

Sei nun $\mu \in \Lambda$ mit $\mu \geq \lambda_U, \mu \geq \lambda_V$. Dann folgt $x_\mu \in U \cap V = \emptyset$ □

3.6. Definition Sei $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ ein Netz in X . Ein **Teilnetz** von $(x_{\lambda'})_{\lambda' \in \Lambda'}$ ist eine gerichtete Menge Λ' mit einer Abbildung $f : \Lambda' \rightarrow \Lambda$, so dass gilt

$$\text{i) } \lambda'_1 \leq \lambda'_2 \Rightarrow f(\lambda'_1) \leq f(\lambda'_2) \quad (f \text{ erhält "}\leq\text{"})$$

$$\text{ii) } \forall \lambda \in \Lambda : \exists \lambda' \in \Lambda' \text{ mit } \lambda \leq f(\lambda') \quad (f \text{ ist kofinal})$$

$$\text{iii) } x_{\lambda'} = x_{f(\lambda')} \text{ fur alle } \lambda' \in \Lambda'$$

Oft schreiben wir $(x_{f(\lambda')})_{\lambda' \in \Lambda'}$ fur ein Teilnetz.

BEMERKUNG: Ein Teilnetz einer Folge ist *nicht* notwendig eine Teilfolge.

4. Kompakte Räume

4.1. Definition Eine Familie \mathcal{U} von offenen Teilmengen von X heißt eine **offene Überdeckung**, falls

$$\bigcup_{U \in \mathcal{U}} U = X.$$

$\mathcal{V} \subseteq \mathcal{U}$ heißt eine **Teilüberdeckung**, falls immer noch $X \subseteq \bigcup_{V \in \mathcal{V}} V$ gilt.

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

4.3. Definition Eine Familie \mathcal{A} von abgeschlossenen Teilmengen von X hat die **endliche Durchschnittseigenschaft**, wenn für jedes $\mathcal{A}_0 \subseteq \mathcal{A}$ mit $|\mathcal{A}_0| < \infty$ gilt

$$\bigcap_{A \in \mathcal{A}_0} A \neq \emptyset.$$

4.4. Lemma Sei X ein Hausdorffraum. Dann ist X genau dann kompakt, wenn gilt: Hat eine Familie \mathcal{A} von abgeschlossenen Teilmengen von X die endliche Durchschnittseigenschaft, so gilt

$$\bigcap_{A \in \mathcal{A}} A \neq \emptyset.$$

BEWEIS: Ist \mathcal{U} eine Familie von offenen Teilmengen, so ist $\mathcal{A} := \{X \setminus U \mid U \in \mathcal{U}\}$ eine Familie von abgeschlossenen Teilmengen. Ist umgekehrt \mathcal{A} eine Familie von abgeschlossenen Teilmengen, so ist

$$\mathcal{U} := \{X \setminus A \mid A \in \mathcal{A}\}$$

eine Familie von offenen Teilmengen. Dann gilt:

- \mathcal{U} hat eine endliche Teilüberdeckung $\iff \mathcal{A}$ hat nicht die endliche Durchschnittseigenschaft.
- \mathcal{U} ist eine Überdeckung von $X \iff \bigcap_{A \in \mathcal{A}} A = \emptyset.$ □

Ein ausführlicher Beweis befindet sich im Anhang A.1 auf Seite 63.

4.5. Satz Sei X ein Hausdorffraum. Dann sind äquivalent:

- 1) X ist kompakt.
- 2) Jedes Netz in X besitzt ein konvergentes Teilnetz.

BEWEIS:

"1) \Rightarrow 2)": Sei $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ ein Netz in X . Für $\lambda \in \Lambda$ sei $A_\lambda := \overline{\{x_{\lambda'} \mid \lambda' \geq \lambda\}}$.

Behauptung(*): $\mathcal{A} := \{A_\lambda \mid \lambda \in \Lambda\}$ hat die endliche Durchschnittseigenschaft. Sei $\mathcal{A}_0 \subseteq \mathcal{A}$ endlich, also $\mathcal{A}_0 = \{A_\lambda \mid \lambda \in \Lambda_0\}$ für ein $\Lambda_0 \subseteq \Lambda$ endlich. Da Λ gerichtet ist, gibt es $\lambda \in \Lambda$ mit $\lambda \geq \mu$ für alle $\mu \in \Lambda_0$. Es folgt $x_\lambda \in \{x_{\lambda'} \mid \lambda' \geq \mu\}$ für alle $\mu \in \Lambda_0$. Insbesondere folgt daraus

$$x_\lambda \in \bigcap_{\mu \in \Lambda_0} A_\mu$$

Da X kompakt ist, folgt aus (\star) mit Lemma 4.4

$$\bigcap_{\lambda \in \Lambda} A_\lambda \neq \emptyset.$$

Wähle $x \in \bigcap_{\lambda \in \Lambda} A_\lambda$. Sei \mathcal{U} die Menge aller offenen Umgebungen von x . Sei

$$\Lambda_{\mathcal{U}} := \{(\lambda, U) \mid \lambda \in \Lambda, x_\lambda \in U \in \mathcal{U}\}$$

Durch $(\lambda, U) \leq (\lambda', U') : \Leftrightarrow \lambda \leq \lambda' \text{ und } U \supseteq U'$ wird $\Lambda_{\mathcal{U}}$ zu einer gerichteten Menge: Sei (λ_1, U_1) und $(\lambda_2, U_2) \in \Lambda_{\mathcal{U}}$. Sei $U := U_1 \cap U_2$. Wähle $\lambda \in \Lambda$ mit $\lambda \geq \lambda_1$ und $\lambda \geq \lambda_2$. Da $x \in A_\lambda = \{x_{\lambda'} \mid \lambda' \geq \lambda\}$ und U eine offene Umgebung von x ist, ist

$$U \cap \{x_{\lambda'} \mid \lambda' \geq \lambda\} \neq \emptyset$$

Also gibt es $\lambda' \geq \lambda$ mit $x_{\lambda'} \in U$. Also $(\lambda', U) \in \Lambda_{\mathcal{U}}$ und $(\lambda_1, U_1), (\lambda_2, U_2) \leq (\lambda', U)$. Mit $x_{(\lambda, U)} = x_\lambda$ ist $(x_{\lambda, U})_{(\lambda, U) \in \Lambda_{\mathcal{U}}}$ das gesuchte Teilnetz.

"2) \Rightarrow 1)": Sei \mathcal{A} eine Familie von abgeschlossenen Teilmengen mit der endlichen Durchschnittseigenschaft. Sei $\Lambda := \{\mathcal{A}_0 \subseteq \mathcal{A} \mid \mathcal{A}_0 \text{ ist endlich}\}$. Λ ist gerichtet bezüglich $\mathcal{A}_0 \leq \mathcal{A}_1 : \Leftrightarrow \mathcal{A}_0 \subseteq \mathcal{A}_1$. Zu $\mathcal{A}_0 \in \Lambda$ wähle

$$x_{\mathcal{A}_0} \in \bigcap_{A \in \mathcal{A}_0} A \neq \emptyset.$$

Sei nun $(x_{f(\lambda)})_{\lambda \in \Lambda'}$ mit $f : \Lambda' \rightarrow \Lambda$ ein konvergentes Teilnetz von $(x_{\mathcal{A}_0})_{\mathcal{A}_0 \in \Lambda}$. Sei x der Grenzwert von $(x_{f(\lambda')})_{\lambda' \in \Lambda'}$.

Behauptung: $x \in \bigcap_{A \in \mathcal{A}} A$.

Sei $A \in \mathcal{A}$ und $U = X \setminus A$. Angenommen $x \in U$. Da U eine offene Umgebung von x ist und $x_{f(\lambda')} \rightarrow x$ gilt, gibt es $\lambda'_0 \in \Lambda'$ mit $x_{f(\lambda')} \in U$ für alle $\lambda' \geq \lambda'_0$.

Zu $\{A\} \in \Lambda$ gibt es $\mu \in \Lambda'$ mit $f(\mu) \geq \{A\}$. Da Λ' gerichtet ist, gibt es $\mu' \geq \mu$ und $\mu' \geq \lambda'_0$. Es folgt $A \in f(\mu')$ und damit $x_{f(\mu')} \in A$, aber andererseits $x_{f(\mu')} \in U = X \setminus A$, da $\mu' \geq \lambda'_0$

⚡

□

4.6. Bemerkung Sei X ein metrischer Raum. Dann sind äquivalent:

- (1) X ist kompakt.
- (2) Jede Folge in X besitzt eine konvergente Teilfolge.

4.7. Satz von Tychonov Sei $(X_i)_{i \in I}$ eine Familie von kompakten topologischen Räumen. Dann ist auch $X := \prod_{i \in I} X_i$ kompakt.

BEWEIS: (unter Benutzung der nachfolgenden Punkte)

Ist $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ ein Netz in $\prod_i X_i$, so besitzt dieses Netz ein universelles Teilnetz $(x_{f(\mu)})_{\mu \in \Lambda'}$. Für jedes i ist dann $p_i(x_{f(\mu)})_{\mu \in \Lambda'}$ ein universelles Netz in X_i und nach dem Lemma 4.11 konvergent. Daher ist $(x_{f(\mu)})_{\mu \in \Lambda'}$ bezüglich der Produkttopologie konvergent

4.8. Beispiel Seien $(X_i, d_i)_{i \in \mathbb{N}}$ kompakte metrische Räume. Dann gibt es eine Metrik d auf $\prod X_i$, so dass die zugehörige Topologie die Produkttopologie ist. (Übung)

BEWEIS: Sei $p_j : \prod_i X_i \rightarrow X_j$ die Projektion auf den j -ten Faktor. Sei $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge in $\prod_i X_i$. Wähle induktiv $\mathbb{N} = N_0 \supseteq N_1 \supseteq N_2 \supseteq \dots$ mit

(i) $|N_i| = \infty$

(ii) $(p_i(x_n))_{n \in N_i}$ ist eine konvergente Folge in X_i .

(Dies ist möglich, da X_i kompakt ist.) Wähle nun $n_k \in N_k$ induktiv, so dass $n_k > n_{k-1}$. Dann ist $(x_{n_k})_{k \in \mathbb{N}}$ eine Teilfolge von $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$. Für $i \in \mathbb{N}$ ist $(p_i(x_{n_k}))_{k \in \mathbb{N}, k \geq i}$ eine Teilfolge der konvergenten Folge $(p_i(x_n))_{n \in N_i}$ und daher konvergent. Damit konvergiert auch $(p_i(x_{n_k}))_{k \in \mathbb{N}}$ für jedes i . Daher konvergiert $(x_{n_k})_{k \in \mathbb{N}}$ punktweise, also in der Produkttopologie (Übung). \square

4.9. Definition Sei $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ ein Netz in X und $A \subseteq X$. Wir sagen $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ ist **immer wieder in** A , falls gilt:

$$\forall \lambda \in \Lambda : \exists \mu \in \Lambda \text{ mit } \mu \geq \lambda \text{ und } x_\mu \in A$$

Wir sagen $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ ist **schließlich in** A , falls gilt

$$\exists \lambda \in \Lambda : \forall \mu \in \Lambda \text{ mit } \mu \geq \lambda \text{ gilt } x_\mu \in A$$

BEMERKUNG: $x_\lambda \rightarrow X \iff$ Für jede Umgebung U von x ist x_λ schließlich in U .

4.10. Definition Ein Netz $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ in X heißt **universell**, falls für jede Teilmenge $A \subseteq X$ gilt: Entweder ist $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ schließlich in A oder schließlich in $X \setminus A$.

BEMERKUNG:

- Ist $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ universell und immer wieder in A , dann ist $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ schließlich in A .
- Ist $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ ein universelles Netz in X und $f : X \rightarrow Y$ eine Abbildung, so ist auch $(f(x_\lambda))_{\lambda \in \Lambda}$ ein universelles Netz in Y .

4.11. Lemma Ist X kompakt und $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ ein universelles Netz in X , so konvergiert $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ in X .

BEWEIS: Sei X kompakt und $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ ein universelles Netz in X . Angenommen $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ konvergiert nicht in X . Dann gibt es zu jedem $x \in X$ genau eine offene Umgebung U_x von x , so dass $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ nicht schließlich in U_x ist. Da $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ universell ist, ist $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ schließlich in $X \setminus U_x$. Da $X = \bigcup_{x \in X} U_x$ und X kompakt ist, gibt es $x_1, \dots, x_k \in X$ mit $X = U_{x_1} \cup \dots \cup U_{x_k}$. Für jedes $i \in \{1, \dots, k\}$ sei $\lambda_i \in \Lambda$ mit $x_\mu \in X \setminus U_{x_i}$ für $\mu \geq \lambda_i$. Sei nun $\mu \in \Lambda$ mit $\mu \geq \lambda_i$ für $i = 1, \dots, k$. Es folgt

$$x_\mu \in \bigcap_{i=1}^k (X \setminus U_{x_i}) = X \setminus \left(\bigcup_{i=1}^k U_{x_i} \right) = X \setminus X = \emptyset \quad \not\vdash \quad \square$$

4.12. Proposition Jedes Netz besitzt ein universelles Teilnetz.

BEWEIS: Sei $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ ein Netz in X . Sei

$$\mathfrak{M} := \left\{ \mathfrak{B} \subseteq \mathcal{P}(X) \mid \begin{array}{l} (1) \quad B \in \mathfrak{B} \Rightarrow (x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda} \text{ ist immer wieder in } B \\ (2) \quad B, B' \in \mathfrak{B} \Rightarrow B \cap B' \in \mathfrak{B} \end{array} \right\}$$

Dann ist $\{X\} \in \mathfrak{M}$, insbesondere gilt $\mathfrak{M} \neq \emptyset$. Ist $\mathfrak{M}_0 \subseteq \mathfrak{M}$ mit

$$\mathfrak{B}, \mathfrak{B}' \in \mathfrak{M}_0 \Rightarrow \mathfrak{B} \subseteq \mathfrak{B}' \text{ oder } \mathfrak{B}' \subseteq \mathfrak{B}$$

so gilt $\bigcup_{\mathfrak{B} \in \mathfrak{M}_0} \mathfrak{B} \in \mathfrak{M}$. Nach dem Zornschen Lemma enthält \mathfrak{M} ein maximales Element \mathfrak{B} . Da \mathfrak{M}_0 ist die Kette \mathfrak{B} maximal ist, ist $\{X\} \in \mathfrak{B}$. Sei

$$\Lambda' := \{(B, \lambda) \mid B \in \mathfrak{B}, \lambda \in \Lambda, x_\lambda \in B\}.$$

Durch $(B, \lambda) \leq (B', \lambda') : \Leftrightarrow B \supseteq B', \lambda \leq \lambda'$ wird Λ' gerichtet. **Behauptung:** $(x_\lambda)_{(B, \lambda) \in \Lambda'}$ ist universell.

HILFSSATZ: Sei $(x_\lambda)_{(B, \lambda) \in \Lambda'}$ immer wieder in S . Dann gilt $S \in \mathfrak{B}$.

Beweis: Wir zeigen: $\mathfrak{B}^+ := \mathfrak{B} \cup \{S \cap B \mid B \in \mathfrak{B}\} \in \mathfrak{M}$. Da \mathfrak{B} maximal ist und $\mathfrak{B} \subseteq \mathfrak{B}^+$ folgt dann $\mathfrak{B} = \mathfrak{B}^+$ und $S \in \mathfrak{B}^+ = \mathfrak{B}$.

Offenbar erfüllt \mathfrak{B}^+ (2). Es bleibt (1) zu zeigen. Da $\mathfrak{B} \in \mathfrak{M}$ bleibt zu zeigen: $\forall B \in \mathfrak{B}$ ist $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ immer wieder in $B \cap S$. Sei also $\lambda \in \Lambda$. Gesucht ist nun $\mu \geq \lambda$ mit $x_\mu \in B \cap S$. Da $B \in \mathfrak{B} \in \mathfrak{M}$ gibt es $\lambda' \in \Lambda$, $\lambda' \geq \lambda$ mit $x_{\lambda'} \in B$. Also $(B, \lambda') \in \Lambda'$. Da $(x_\lambda)_{(B, \lambda) \in \Lambda'}$ immer wieder in S ist, gibt es

$$\Lambda' \ni (A, \mu) \geq (B, \lambda') \quad (*)$$

mit $x_\mu \in S$. Da $(A, \mu) \in \Lambda'$ ist $x_\mu \in A \stackrel{(*)}{\subseteq} B$. Also $x_\mu \in B \cap S$. \square

Sei $S \subseteq X$. Ist $(x_\lambda)_{(B, \lambda) \in \Lambda'}$ weder schließlich in S noch schließlich in $X \setminus S$, so ist $(x_\lambda)_{(B, \lambda) \in \Lambda'}$ immer wieder in S und immer wieder in $X \setminus S$. Mit dem Hilfssatz folgt nun, dass $S, X \setminus S \in \mathfrak{B}$. Dann gilt aber $\emptyset = S \cap (X \setminus S) \in \mathfrak{B} \not\checkmark$ \square

4.13. Definition Sei $\ell^\infty(\mathbb{Z})$ der \mathbb{R} -Vektorraum aller beschränkten Abbildungen $f : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{R}$.

$$\|f\|_\infty := \sup\{|f(n)| \mid n \in \mathbb{Z}\}$$

ist eine Norm auf $\ell^\infty(\mathbb{Z})$.

4.14. Satz (Mittelbarkeit von \mathbb{Z}) Es gibt eine Abbildung $M : \ell^\infty(\mathbb{Z}) \rightarrow \mathbb{R}$ mit

- a) M ist \mathbb{R} -linear
- b) M ist positiv: $f \geq 0 \Rightarrow M(f) \geq 0$
- c) $M(\mathbb{1}) = 1$ für $\mathbb{1} : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{R}$, wobei $\mathbb{1}(n) = 1$ für alle $n \in \mathbb{Z}$.
- d) M ist \mathbb{Z} -invariant: Für $f \in \ell^\infty(\mathbb{Z})$ sei $Tf \in \ell^\infty(\mathbb{Z})$ gegeben durch $(Tf)(n) = f(n+1)$, dann gilt $M(f) = M(Tf)$.

BEWEIS: Sei $\mathfrak{M} := \{M : \ell^\infty(\mathbb{Z}) \rightarrow \mathbb{R} \mid M \text{ erfüllt a), b), c)}\}$. Sei $M_n \in \mathfrak{M}$ mit $M_n(f) = \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n f(i)$. Dann gilt für $f \in \ell^\infty(\mathbb{Z})$

$$\begin{aligned} M_n(f) - M_n(Tf) &= \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n f(i) - Tf(i) = \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n (f(i) - f(i+1)) \\ &= \frac{1}{n+1} (f(0) - f(n+1)) \end{aligned}$$

Es folgt $|M_n(f) - M_n(Tf)| \leq \frac{2 \cdot \|f\|_\infty}{n+1}$. Wir konstruieren nun eine kompakte Topologie auf \mathfrak{M} , dann können wir anschließend ein konvergentes Teilnetz der Folge $(M_n)_{n \in \mathbb{N}}$ betrachten. Sei

$$X := \prod_{f \in \ell^\infty(\mathbb{Z})} [-\|f\|_\infty, \|f\|_\infty]$$

Aus a), b), c) folgt, dass für $f \in \ell^\infty(\mathbb{Z})$, $M \in \mathfrak{M}$ gilt: $M(f) \in [-\|f\|_\infty, \|f\|_\infty]$. Mittels

$$\mathfrak{M} \ni M \mapsto (M(f))_{f \in \ell^\infty(\mathbb{Z})} \in X$$

wird \mathfrak{M} zu einem abgeschlossenen Unterraum von X . \mathfrak{M} ist kompakt bezüglich der Produkttopologie auf X , also bezüglich punktweiser Konvergenz.

Sei nun $\alpha : \Lambda \rightarrow \mathbb{N}$, sodass $M_{\alpha(\lambda)} \rightarrow M \in \mathfrak{M}$ (existiert da \mathfrak{M} kompakt). Es folgt

$$\forall f \in \ell^\infty(\mathbb{Z}) : M_{\alpha(\lambda)}(f) \rightarrow M(f)$$

Wegen $M_{\alpha(\lambda)}(f) - M_{\alpha(\lambda)}(Tf) \xrightarrow{\lambda \rightarrow \infty} M(f) - M(Tf)$ und

$$|M_{\alpha(\lambda)}(f) - M_{\alpha(\lambda)}(Tf)| \leq \frac{2 \cdot \|f\|_\infty}{\alpha(\lambda) + 1} \xrightarrow{\alpha(\lambda) \rightarrow \infty} 0$$

folgt $M(f) = M(Tf)$ für alle $f \in \ell^\infty(\mathbb{Z})$. □

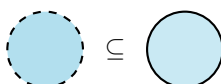
5. Kompaktifizierungen

5.1. Definition Sei X ein topologischer Raum. Ein kompakter Raum \bar{X} heißt eine **Kompaktifizierung** von X , falls er X als offenen, dichten Unterraum enthält. (Oft heißt $\partial X := \bar{X} \setminus X$ der Rand der Kompaktifizierung)

5.2. Beispiele

(i) $(-1, 1) \subseteq [-1, 1]$

(ii) $\mathring{D}^n := \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x\|_2 < 1\} \subseteq D^n = \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x\|_2 \leq 1\}$. Für $n = 2$:



Es gilt $\partial D^n = S^{n-1} := \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x\|_2 = 1\}$.

(iii) $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathring{D}^n$, $f(x) := \frac{x}{1+\|x\|_2}$ ist ein Homöomorphismus. Daher können wir \mathbb{R}^n zu

$$\overline{\mathbb{R}^n} := \mathbb{R}^n \cup (S^{n-1} \times \{\infty\}) \cong D^n$$

kompaktifizieren.

(iv) Definiere auf $\mathbb{R}^n \cup \{\infty\}$ folgende Topologie

$$\mathcal{O} := \{U \mid U \subseteq \mathbb{R}^n \text{ ist offen}\} \cup \{U \cup \{\infty\} \mid U \subseteq \mathbb{R}^n \text{ offen und } \exists R > 0 : \mathbb{R}^n \setminus B_R(0) \subseteq U\}$$

Dann ist $\mathbb{R}^n \cup \{\infty\}$ eine weitere Kompaktifizierung von \mathbb{R}^n . Übung: $\mathbb{R}^n \cup \{\infty\} \cong S^n$.

5.3. Definition Ein Hausdorffraum X heißt **lokalkompakt**, wenn für jedes $x \in X$ und jede offene Umgebung U von x eine kompakte Umgebung K von x existiert mit $K \subseteq U$.

5.4. Beispiel

(i) \mathbb{R}^n ist lokalkompakt: Sei $x \in \mathbb{R}^n$ und $U \subseteq \mathbb{R}^n$ eine offene Umgebung von x . U ist offen $\Rightarrow \exists \varepsilon > 0$ mit $B_\varepsilon(x) \subseteq U$. Es folgt $\overline{B_{\varepsilon/2}(x)} \subseteq B_\varepsilon(x) \subseteq U$. Dann ist $\overline{B_{\varepsilon/2}(x)}$ eine kompakte Umgebung von x , die in U liegt.

(ii) Topologische Mannigfaltigkeiten sind lokalkompakt.

(iii) Offene Teilräume von lokalkompakten Räumen sind lokalkompakt.

5.5. Proposition Sei K kompakt und $W \subseteq K$ offen. Dann ist W lokalkompakt. Insbesondere sind kompakte Räume auch lokalkompakt.

BEWEIS: Sei $x \in W$ und U eine offene Umgebung von x in W . K ist Hausdorff $\Rightarrow \forall y \in K \setminus U$ gibt es offene Umgebungen V_y von y und W_y von x mit $V_y \cap W_y = \emptyset$. Dann ist $\{V_y \mid y \in K \setminus U\}$ eine offene Überdeckung von $K \setminus U$. Da mit K auch $K \setminus U$ kompakt ist, gibt es $Y_0 \subseteq K \setminus U$ endlich mit

$$K \setminus U \subseteq \bigcup_{y \in Y_0} V_y.$$

Nun ist $L := K \setminus \bigcup_{y \in Y_0} V_y$ kompakt und $L \subseteq U$. Da $(\bigcap_{y \in Y_0} W_y) \cap U$ offen ist und $(\bigcap_{y \in Y_0} W_y) \cap U \subseteq L$ ist L eine Umgebung von x . \square

5.6. Definition Sei X lokalkompakt. Die **Einpunktkompaktifizierung**, EPK (EPK) von X ist $\text{EPK}(X) := X \cup \{\infty\}$ mit der folgenden Topologie:

$U \subseteq X \cup \{\infty\}$ offen $\Leftrightarrow U \subseteq X$ ist offen oder $U = (X \setminus K) \cup \{\infty\}$ mit $K \subseteq X$ kompakt

5.7. Proposition $\text{EPK}(X)$ ist kompakt. Ist X nicht kompakt, so ist $\text{EPK}(X)$ eine Kompaktifizierung von X .

BEWEIS: Sei \mathcal{U} eine offene Überdeckung von $\text{EPK}(X)$. Sei $U_0 \in \mathcal{U}$ mit $\infty \in U_0$. Dann existiert $K \subseteq X$ kompakt mit $U_0 = (X \setminus K) \cup \{\infty\}$. Da K kompakt ist, gibt es $U_1, \dots, U_n \in \mathcal{U}$ mit $K \subseteq U_1 \cup \dots \cup U_n$. Dann ist U_0, U_1, \dots, U_n eine endliche Teilüberdeckung von $\text{EPK}(X)$.

Zu zeigen: $\text{EPK}(X)$ ist Hausdorff. Seien $x, y \in \text{EPK}(X), x \neq y$. Gilt $x \neq \infty \neq y$ so gibt es $U, V \subseteq X$ mit $x \in U, y \in V$ und $U \cap V = \emptyset$, da X hausdorffsch ist. Nach Definition sind dann U, V auch offen in $\text{EPK}(X)$. Andernfalls sei o.B.d.A. $x = \infty$. Da X lokalkompakt ist, gibt es eine Umgebung K von y mit $K \subseteq X$ kompakt. Dann sind $U := \mathring{K}$ und $V := (X \setminus K) \cup \{\infty\}$ disjunkte offene Umgebungen von x und y .

Insgesamt gezeigt: $\text{EPK}(X)$ ist kompakt. Sei X nicht kompakt. Ist U eine Umgebung von $\infty \in \text{EPK}(X)$, so gibt es $K \subseteq X$ kompakt mit $U = (X \setminus K) \cup \{\infty\}$. Dann ist $U \cap X = X \setminus K$. Da X nicht kompakt ist, ist $X \neq K$, also $X \setminus K \neq \emptyset$. Daher hat jede Umgebung von $\infty \in \text{EPK}(X)$ einen nicht-trivialen Schnitt mit X . Also ist $X \subseteq \text{EPK}(X)$ dicht. \square

KOROLLAR: Ein topologischer Raum besitzt genau dann eine Kompaktifizierung, wenn er lokalkompakt ist.

5.8. Frage Sei $f : X \rightarrow Y$ stetig, X, Y lokalkompakt. Gibt es dann eine stetige Fortsetzung $\bar{f} : \text{EPK}(X) \rightarrow \text{EPK}(Y)$ mit $\bar{f}(\infty) = \infty$?

BEISPIEL:

(i) $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, f(x) \equiv 0$. Dann ist $\bar{f} : \text{EPK}(\mathbb{R}) \rightarrow \text{EPK}(\mathbb{R})$ mit

$$\bar{f}(x) = \begin{cases} f(x) = 0, & \text{falls } x \in \mathbb{R} \\ \infty, & \text{falls } x = \infty \end{cases}$$

sicher nicht stetig. Natürlich ist aber $\tilde{f} : \text{EPK}(\mathbb{R}) \rightarrow \text{EPK}(\mathbb{R})$ mit $\tilde{f}(x) = 0 \forall x \in \text{EPK}(\mathbb{R})$ stetig.

(ii) $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ mit

$$f(x) = \begin{cases} 1, & \text{falls } x \geq 1 \\ x, & \text{falls } x \in [0, 1] \\ 0, & \text{falls } x \leq 0 \end{cases}$$

Dann gibt es keine stetige Fortsetzung $\bar{f} : \text{EPK}(\mathbb{R}) \rightarrow \text{EPK}(\mathbb{R})$, denn die Folge $x_n = n$ konvergiert in $\text{EPK}(\mathbb{R})$ gegen ∞ . Da $f(x_n) = 1 \forall n$ müsste $\bar{f}(\infty) = 1$ sein. Die Folge $y_n = -n$ konvergiert in $\text{EPK}(\mathbb{R})$ auch gegen ∞ . Da $f(y_n) = 0 \forall n$ müsste auch $\bar{f}(\infty) = 0$ sein. \nexists

5.9. Definition Seien X und Y lokalkompakt. Eine stetige Abbildung $f : X \rightarrow Y$ heißt **eigentlich**, wenn für jede kompakte Teilmenge $K \subseteq Y$ auch $f^{-1}(K) \subseteq X$ kompakt ist.

5.10. Satz Seien X, Y lokalkompakt und $f : X \rightarrow Y$ stetig. Dann sind äquivalent:

- (1) f ist eigentlich.
- (2) $\bar{f} : \text{EPK}(X) \rightarrow \text{EPK}(Y)$ mit

$$\bar{f}(x) = \begin{cases} f(x), & \text{falls } x \in X \\ \infty, & \text{falls } x = \infty \end{cases}$$

ist stetig.

BEWEIS:

"(1) \Rightarrow (2)": Sei $U \subseteq \text{EPK}(Y)$ offen. Ist $\infty \notin U$, so ist $\bar{f}^{-1}(U) = f^{-1}(U)$ offen, da f stetig ist. Ist $\infty \in U$, so gibt es $K \subseteq Y$ mit $U = (Y \setminus K) \cup \{\infty\}$. Da f eigentlich ist, ist auch $L := f^{-1}(K) \subseteq X$ kompakt und $\bar{f}^{-1}(U) = (X \setminus L) \cup \{\infty\}$ ist offen in $\text{EPK}(X)$.

"(2) \Rightarrow (1)": Sei $K \subseteq Y$ kompakt. Dann ist $U = (Y \setminus K) \cup \{\infty\} \subseteq Y$ offen. Da \bar{f} stetig ist, ist auch $\bar{f}^{-1}(U) = (X \setminus f^{-1}(K)) \cup \{\infty\}$ offen. Damit ist $f^{-1}(K) \subseteq X$ kompakt. \square

6. Der Approximationssatz von Stone-Weierstraß

6.1. Definition Sei X ein lokalkompakter Raum. Eine stetige Funktion $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ **verschwindet im Unendlichen**, falls für jedes $\varepsilon > 0$

$$K_\varepsilon := \{x \in X \mid |f(x)| \geq \varepsilon\}$$

kompakt ist. Die **Algebra**¹ aller solchen Funktionen bezeichnen wir mit $C_0(X)$ und für $f \in C_0(X)$ setzen wir

$$\|f\|_\infty := \sup_{x \in X} |f(x)| = \max_{x \in X} |f(x)|$$

$\|\cdot\|_\infty$ ist eine Norm auf $C_0(X)$.

BEMERKUNG: $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ liegt in $C_0(X) \iff \bar{f} : \text{EPK}(X) \rightarrow \mathbb{R}$ mit $\bar{f}(x) = \begin{cases} f(x), & \text{falls } x \in X \\ 0, & \text{falls } x = \infty \end{cases}$ ist stetig.

6.2. Definition Sei $\mathcal{B} \subseteq C_0(X)$. Wir sagen, dass \mathcal{B} die Punkte von X **streng trennt**, falls es zu $x, y \in X, x \neq y$ ein $f \in \mathcal{B}$ gibt mit $0 \neq f(x) \neq f(y) \neq 0$.

BEMERKUNG: Sei $\mathcal{A} \subseteq C_0(X)$ eine Unteralgebra. Gilt

a) $\forall x, y \in X : \exists f \in \mathcal{A} : f(x) \neq f(y)$

b) $\forall x \in X : \exists g \in \mathcal{A} : g(x) \neq 0$

so trennt \mathcal{A} die Punkte von X streng.

BEISPIEL: Sei $[a, b] \subseteq \mathbb{R}$ ein kompaktes Intervall. Sei $\mathcal{A} := \{x \mapsto p(x) \mid p \in R[t]\} \subseteq C_0([a, b])$. Dann trennt \mathcal{A} die Punkte von $[a, b]$ streng.

6.3. Satz (Stone-Weierstraß) Sei X ein lokalkompakter Raum und sei $\mathcal{A} \subseteq C_0(X)$ eine Unteralgebra, die die Punkte von X streng trennt. Dann ist $\mathcal{A} \subseteq C_0(X)$ dicht bezüglich $\|\cdot\|_\infty$.

BEWEIS (MIT LEMMA 1, 2 & 3): Sei $h \in C_0(X)$ beliebig. Sei $\varepsilon > 0$ beliebig. Zu zeigen: $\exists f \in \bar{\mathcal{A}} : \|f - h\|_\infty < \varepsilon$, da $\bar{\bar{\mathcal{A}}} = \bar{\mathcal{A}}$ gilt.

$\bar{\mathcal{A}} := \text{Abschluss}$
von \mathcal{A} bezüglich
 $\|\cdot\|_\infty$

Schritt 1: Wir konstruieren für $y \in X$ $f_y \in \bar{\mathcal{A}}$ mit

a) $f_y(y) = h(y)$

b) $f_y(z) \geq h(z) - \varepsilon$ für alle $z \in X$

Zu $x \in X$ gibt es nach Lemma 3 (6.9) $g_x \in \mathcal{A}$ mit

$$g_x(y) = h(y) \quad \text{und} \quad g_x(x) = h(x).$$

¹ Vektorraum mit Multiplikation, die mit Vektorraumstruktur verträglich, also bilinear ist

Sei $U_x := \{z \in X \mid g_x(z) > h(z) - \varepsilon\}$. Da g_x und h stetig sind, ist U_x offen. Da g_x und h in ∞ verschwinden, ist $X \setminus U_x$ kompakt. Wegen $g_x(x) = h(x)$ ist $x \in U_x$. Zu festem $x_1 \in X$ gibt es dann x_2, \dots, x_k mit $X \setminus U_{x_1} \subseteq \bigcup_{i=2}^k U_{x_i}$. Dann gilt auch

$$X \subseteq \bigcup_{i=2}^k U_{x_i}$$

$f_y := \max\{g_{x_1}, \dots, g_{x_k}\}$ ist die gesuchte Funktion. Wegen Lemma 2 (6.7) bzw. der Bemerkung 6.8 gilt $f_y \in \mathcal{A}$.

Schritt 2: Konstruktion von f : Zu $y \in X$ sei $V_y := \{z \in X \mid f_y(z) < h(z) + \varepsilon\}$. Wieder ist V_y offen, $X \setminus V_y$ kompakt und $y \in V_y$. Also gibt es wieder y_1, \dots, y_l mit $X = \bigcup_{i=1}^l V_{y_i}$. Für $f := \min\{f_{y_1}, \dots, f_{y_l}\}$ gilt dann

$$h(z) - f(z) = \max_i h(z) - f_{y_i}(z) < \varepsilon$$

da $f_{y_i}(z) \geq h(z) - \varepsilon \stackrel{a)}{\Rightarrow} h(z) - f_{y_i}(z) \leq \varepsilon$ für jedes i . Weiter gilt

$$f(z) - h(z) = \min_i f_{y_i}(z) - h(z) < \varepsilon$$

nach Definition der V_{y_i} . Also $\|f - h\|_\infty < \varepsilon$. □

6.4. Satz von Dini Sei $(f_n : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R})_{n \in \mathbb{N}}$ eine punktweise monoton wachsende Folge stetiger Funktionen, die punktweise gegen die stetige Funktion f konvergiert. Dann $f_n \rightarrow f$ gleichmäßig, d.h. $\|f_n - f\|_\infty \rightarrow 0$.

BEWEIS: Sei $\varepsilon > 0$. Zu jedem $t \in [0, 1]$ gibt es n_t mit

$$\forall n \geq n_t : f(t) \geq f_n(t) \geq f_{n_t}(t) \geq f(t) - \varepsilon.$$

Da f und f_{n_t} stetig sind, ist $U_t := \{s \in [0, 1] \mid f(s) - f_{n_t}(s) < \varepsilon\}$ offen. Da $[0, 1]$ kompakt ist, gibt es $t_0, \dots, t_k \in [0, 1]$ mit

$$[0, 1] = U_{t_0} \cup \dots \cup U_{t_k}.$$

Für alle $n \geq \max\{n_{t_0}, \dots, n_{t_k}\}$ folgt $\|f_n - f\|_\infty \leq \varepsilon$. □

6.5. Lemma 1 Sei $g(t) = \sqrt{t}$ für $t \in [0, 1]$. Es gibt eine Folge $(p_n)_{n \in \mathbb{N}}$ von reellen Polynomen so dass $p_n \rightarrow g$ gleichmäßig auf $[0, 1]$ und $p_n(0) = 0$.

BEWEIS: Sei $p_0 \equiv 0$ und für $n > 0$

$$p_{n+1}(t) := p_n(t) - \frac{1}{2} \cdot (p_n(t)^2 - t)$$

Dann $p_n(0) = 0$. Per Induktion nach n zeigen wir, dass $0 \leq p_n(t) \leq \sqrt{t}$ für alle $t \in [0, 1]$ gilt:

$n = 0$ Klar ✓

$n \mapsto n+1$ Es gilt

$$\begin{aligned} p_{n+1}(t) - \sqrt{t} &= p_n(t) - \sqrt{t} - \frac{1}{2}(p_n(t)^2 - t) = (p_n(t) - \sqrt{t}) - \frac{1}{2}(p_n(t) - \sqrt{t})(p_n(t) + \sqrt{t}) \\ &= \underbrace{(p_n(t) - \sqrt{t})}_{\leq 0} \underbrace{\left(1 - \frac{1}{2}(p_n(t) + \sqrt{t})\right)}_{\substack{\text{IV.: } \leq 2\sqrt{t} \\ \geq 0}} \end{aligned}$$

Also $p_{n+1}(t) - \sqrt{t} \leq 0$.

Weiter gilt, dass $p_n(t)$ monoton wachsend ist für jedes t . Wegen $p_n(t) \leq \sqrt{t}$ existiert $\lim_{n \rightarrow \infty} p_n(t)$ für $t \in [0, 1]$. Es folgt

$$\begin{aligned} 0 &= \lim_{n \rightarrow \infty} p_{n+1}(t) - \lim_{n \rightarrow \infty} p_n(t) = \lim_{n \rightarrow \infty} (p_{n+1}(t) - p_n(t)) = \lim_{n \rightarrow \infty} -\frac{1}{2}(p_n(t)^2 - t) \\ &= -\frac{1}{2} \left(\left(\lim_{n \rightarrow \infty} p_n(t) \right)^2 - t \right) \end{aligned}$$

$\Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} p_n(t) = \sqrt{t}$. Mit dem Satz von Dini (6.4) folgt $p_n \rightarrow g$ gleichmäßig. \square

6.6. Bemerkung Sei $\mathcal{A} \subseteq C_0(X)$ eine Algebra. Ist $p \in \mathbb{R}[t]$ ein Polynom mit $p(0) = 0$ und $f \in \mathcal{A}$, so liegt auch $p \circ f \in \mathcal{A}$: Sei dazu $p = \sum_{i=1}^n a_i t^i$, dann gilt

$$p(f(t)) = \sum_{i=1}^n a_i f(t)^i = \left(\sum_{i=1}^n a_i f^i \right)(t) \in \mathcal{A}.$$

6.7. Lemma 2 Sei X lokalkompakt, $\mathcal{A} \subseteq C_0(X)$ eine Unteralgebra. Dann gilt: $f \in \mathcal{A} \Rightarrow |f| \in \bar{\mathcal{A}}$.

BEWEIS: Sei $f \in \mathcal{A}$. O.B.d.A. sei $f(X) \subseteq [-1, 1]$. Dann ist $f(x)^2 \in [0, 1]$ für alle $x \in X$. Sei $(p_n)_{n \in \mathbb{N}}$ Folge von Polynome aus Lemma 1 (6.5). Dann gilt

$$\left| p_n(f(x)^2) - \sqrt{f(x)^2} \right| = |p_n(f(x)^2) - |f(x)|| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

gleichmäßig in $x \in X$. Es folgt $\|p_n(f^2) - |f|\|_\infty \rightarrow 0$. Wegen $f \in \mathcal{A}$ gilt $f^2 \in \mathcal{A}$ und nach 6.6 $p_n(f^2) \in \mathcal{A}$. Also $|f| \in \bar{\mathcal{A}}$. \square

6.8. Bemerkung

(i) Für $f, g \in \mathcal{A}$ gilt

$$\max(f, g) = \frac{1}{2}(f + g + |f - g|) \in \bar{\mathcal{A}} \quad \text{und} \quad \min(f, g) = \frac{1}{2}(f + g - |f - g|) \in \bar{\mathcal{A}}$$

(ii) Wegen $\bar{\mathcal{A}} = \bar{\bar{\mathcal{A}}}$ gilt auch $f, g \in \bar{\mathcal{A}} \Rightarrow \min(f, g), \max(f, g) \in \bar{\mathcal{A}}$.

6.9. Lemma 3 Sei X lokalkompakt, $\mathcal{A} \subseteq C_0(X)$ eine Unteralgebra, die die Punkte von X streng trennt. Zu $x, y \in X$, $x \neq y$, $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ gibt es dann $f \in \mathcal{A}$ mit $f(x) = \alpha$, $f(y) = \beta$.

BEWEIS: Es gibt $g \in \mathcal{A}$ mit $0 \neq g(x) \neq g(y) \neq 0$. Ansatz: Für $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$ betrachte $f := \lambda g + \mu g^2$.

$$\begin{aligned} f(x) = \alpha & \iff g(x)\lambda + g(x)^2\mu = \alpha \\ f(y) = \beta & \iff g(y)\lambda + g(y)^2\mu = \beta \end{aligned}$$

Da

$$\det \begin{pmatrix} g(x) & g(x)^2 \\ g(y) & g(y)^2 \end{pmatrix} = g(x)g(y)^2 - g(y)g(x)^2 = g(x)g(y)(g(y) - g(x)) \neq 0$$

gibt es $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$, sodass das Gleichungssystem eine Lösung hat. □

7. Metrisierbarkeit

7.1. Definition Ein topologischer Raum X heißt **metrisierbar**, wenn es eine Metrik auf X gibt, so dass die zugehörige Topologie die Topologie von X ist.

BEMERKUNG: Ist X metrisierbar, so gibt es für jedes $x \in X$ eine abzählbare Umgebungsbasis \mathcal{U}_x bei x , also eine abzählbare Menge von offenen Umgebungen von x , sodass jede Umgebung von x eine Menge aus \mathcal{U}_x enthält.

BEISPIEL: $(X, \mathcal{O}_{\text{dis}})$ ist metrisierbar mit der diskreten Metrik $d_{\text{dis}}(x, y) := \begin{cases} 1, & \text{falls } x \neq y \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$

7.2. Definition Ein topologischer Hausdorffraum X heißt **normal**, wenn er die folgende Trennungseigenschaft hat: Sind $A, B \subseteq X$ abgeschlossen mit $A \cap B = \emptyset$, so gibt es $U, V \subseteq X$ offen mit $A \subseteq U$, $B \subseteq V$ mit $U \cap V = \emptyset$.

BEMERKUNG: Metrisierbare Räume sind normal.

(Übung: Blatt 5 Aufgabe 4)

7.3. Satz (Urysohn) Sei X ein normaler Raum, der das zweite Abzählbarkeitsaxiom erfüllt (1.14). Dann ist X metrisierbar.

BEWEIS (MIT URYSOHNS LEMMA, 7.4): Sei \mathcal{U} eine abzählbare Basis der Topologie von X . Da X normal ist, gibt es zu jedem Paar $U, V \in \mathcal{U}$ mit $\overline{U} \subseteq V$ (also $\overline{U} \cap X \setminus V = \emptyset$) eine stetige Funktion $f_{U,V} : X \rightarrow [0, 1]$ mit $f_{U,V}(x) = 0$ für $x \in \overline{U}$ und $f_{U,V}(y) = 1$ für $y \notin V$ (7.4). Da \mathcal{U} abzählbar ist, ist das abzählbare Produkt

$$Z := \prod_{\substack{U, V \in \mathcal{U} \\ \overline{U} \subseteq V}} [0, 1]$$

metrisierbar (Übung: Blatt 4 Aufgabe 3). Wir definieren $F : X \rightarrow Z$ durch

$$F(x) := \left(f_{U,V}(x) \right)_{\substack{U, V \in \mathcal{U} \\ \overline{U} \subseteq V}}$$

Da die $f_{U,V}$ stetig sind, ist F bezüglich der Produkttopologie auf Z auch stetig. Es bleibt zu zeigen: $F : X \rightarrow F(X) \subseteq Z$ ist ein Homöomorphismus.

Sind $x, y \in X$ mit $x \neq y$, so gibt es $U, V \in \mathcal{U}$ mit $\overline{U} \subseteq V$, $x \in U$, $y \notin V$. Daher gilt $f_{U,V}(x) = 0 \neq 1 = f_{U,V}(y)$. Insbesondere ist F injektiv; durch Einschränkung auf das Bild also bijektiv. Es genügt nun zu zeigen, dass F offene Mengen von X auf offene Mengen in $F(X)$ abbildet. Sei $W \subseteq X$ offen, sei $x \in W$. Wir müssen eine offene Menge $O \subseteq Z$ finden mit $F(x) \in O$ und $F^{-1}(O) \subseteq W$.

Behauptung: $\exists U_0 \in \mathcal{U}$ mit $x \in U_0$, $\overline{U_0} \subseteq W$.

Sei $O := \prod_{\overline{U} \subseteq V} I_{U,V}$ mit

$$I_{U,V} = \begin{cases} [0, 1), & \text{falls } U = U_0, V = W \\ [0, 1], & \text{sonst} \end{cases}$$

Dann ist $F^{-1}(O) = f_{U_0, W}^{-1}([0, 1)) \subseteq W$ und $F(x) \in O$, da $f_{U_0, W}(x) = 0$.

BEWEIS DER BEHAUPTUNG: Da X Hausdorff ist, ist $\{x\}$ abgeschlossen. Da auch $X \setminus W$ abgeschlossen ist, gibt es offene Mengen U_1 und V_1 mit $U_1 \cap V_1 = \emptyset$, $x \in U_1$ und $X \setminus W \subseteq V_1$. Insbesondere ist $\overline{U_1} \subseteq X \setminus V_1 \subseteq W$. Da \mathcal{U} eine Basis ist, gibt es $U_0 \in \mathcal{U}$ mit $x \in U_0$ und $U_0 \subseteq U_1$. \square

7.4. Urysohns Lemma Sei X normal und $A, B \subseteq X$ abgeschlossen mit $A \cap B = \emptyset$. Dann gibt es eine stetige Funktion $f : X \rightarrow [0, 1]$ mit $f(a) = 0$ für alle $a \in A$ und $f(b) = 1$ für alle $b \in B$.

BEWEIS: Sei $U_1 := X \setminus B$. Da X normal ist, gibt es $U_0 \subseteq X$ offen mit $A \subseteq U_0$ und $U_0 \cap B = \emptyset$, also $\overline{U_0} \subseteq U_1$.

($A \subseteq U_0$ und $V_0 \supseteq B$ mit $U_0 \cap V_0 = \emptyset \Rightarrow \overline{U_0} \cap B = \emptyset$ also $\overline{U_0} \subseteq U_1$)

Ebenso finden wir

- $U_{1/2} \subseteq X$ offen mit $\overline{U_0} \subseteq U_{1/2}$ und $\overline{U_{1/2}} \subseteq U_1$,
- $U_{1/4}, U_{3/4} \subseteq X$ offen mit $\overline{U_0} \subseteq U_{1/4}$, $\overline{U_{1/4}} \subseteq U_{1/2}$ und $\overline{U_{1/2}} \subseteq U_{3/4}$, $\overline{U_{3/4}} \subseteq U_1, \dots$

Induktiv finden wir für jedes $r = \frac{m}{2^n}$ mit $0 \leq m \leq 2^n$ eine offene Menge $U_r \subseteq X$ so dass gilt: $\overline{U_r} \subseteq U_s$ für $r < s$ mit $A \subseteq U_0$ und $B = X \setminus U_1$. Sei nun $f : X \rightarrow [0, 1]$ definiert durch

$$f(x) = \begin{cases} 1, & \text{falls } x \in B \\ \inf\{r \mid x \in U_r\}, & \text{falls } x \notin B \end{cases}$$

Für $\alpha \in [0, 1]$ ist $f^{-1}([0, \alpha)) = \bigcup_{r < \alpha} U_r$ offen und

$$f^{-1}((\alpha, 1]) = \bigcup_{r > \alpha} X \setminus U_r = \bigcup_{r > \alpha} X \setminus \overline{U_r}$$

offen. Damit ergibt sich leicht die Stetigkeit von f . \square

8. Zusammenhängende topologische Räume

8.1. Definition Sei X ein topologischer Raum.

- (1) X heißt **zusammenhängend**, falls er nicht als die disjunkte Vereinigung von zwei nicht leeren offenen Mengen geschrieben werden kann.
- (2) X heißt **wegzusammenhängend**, falls es zu allen $x, y \in X$ eine stetige Abbildung $\omega : [0, 1] \rightarrow X$ gibt mit $\omega(0) = x$ und $\omega(1) = y$. ω heißt dann ein **Weg** von x nach y .
- (3) X heißt **lokal zusammenhängend**, falls es für jedes $x \in X$ und jede offene Umgebung U von x eine zusammenhängende Umgebung V von x gibt mit $V \subseteq U$.
- (4) X heißt **lokal wegzusammenhängend**, falls es für jedes $x \in X$ und jede offene Umgebung U von x eine wegzusammenhängende Umgebung V von x gibt mit $V \subseteq U$.

8.2. Bemerkung

- (1) $\mathbb{R} \setminus \{0\} = (-\infty, 0) \cup (0, \infty)$ ist nicht zusammenhängend und auch nicht wegzusammenhängend (ZWS!).
- (2) $[0, 1]$ ist zusammenhängend: Angenommen es wäre $[0, 1] = U \cup V$ mit U, V offen, $U \cap V = \emptyset$. Dann sind $U = [0, 1] \setminus V$ und $V = [0, 1] \setminus U$ auch abgeschlossen. O.B.d.A. sei $0 \in U$. Dann liegt $\inf V$ sowohl in \bar{V} als auch in \bar{U} . Also $U \cap V = \bar{U} \cap \bar{V} \neq \emptyset$ \nmid .
Natürlich ist $[0, 1]$ auch wegzusammenhängend: Zu $x, y \in [0, 1]$ ist $\omega : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ mit $\omega(t) = (1-t) \cdot x + t \cdot y$ ein stetiger Weg von x nach y .
- (3) Ist $f : X \rightarrow Y$ stetig und surjektiv und X zusammenhängend, so ist auch Y zusammenhängend: Ist $Y = U \cup V$, so ist auch $X = f^{-1}(U) \cup f^{-1}(V)$ und es gilt $U \neq \emptyset \iff f^{-1}(U) \neq \emptyset$ und $V \neq \emptyset \iff f^{-1}(V) \neq \emptyset$.
- (4) Ist X wegzusammenhängend, so ist X auch zusammenhängend: Sei $X = U \cup V$ mit U, V offen und $U \neq \emptyset, V \neq \emptyset$. Sei $x \in U$ und $y \in V$. Da X wegzusammenhängend ist, gibt es einen Weg $\omega : [0, 1] \rightarrow X$ von x nach y . Dann ist $[0, 1] = \omega^{-1}(U) \cup \omega^{-1}(V)$. Es ist $0 \in \omega^{-1}(U)$ und $1 \in \omega^{-1}(V)$. Also $\omega^{-1}(U) \neq \emptyset \neq \omega^{-1}(V)$. Da $[0, 1]$ nach (1) zusammenhängend ist, ist $\omega^{-1}(U) \cap \omega^{-1}(V) \neq \emptyset$. Damit ist auch $U \cap V \neq \emptyset$.
- (5) Ist $f : X \rightarrow Y$ ein Homöomorphismus, so gelten:

$$\begin{aligned} X \text{ wegzusammenhängend} &\iff Y \text{ wegzusammenhängend} \\ X \text{ zusammenhängend} &\iff Y \text{ zusammenhängend} \end{aligned}$$

8.3. Beispiel

(i) Der sogenannte **Polnische Kreis** PK , gegeben durch

$$PK = \left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^2 \left| \begin{array}{ll} (x \in [-1, 1] \wedge y = 1) \\ \vee (x \in \{-1, 1\} \wedge y \in [0, 1]) \\ \vee (x \in [-1, 0] \wedge y = 0) \\ \vee (x = 0 \wedge y \in [-1/2, 1/2]) \\ \vee (x \in (0, 1] \wedge y = 1/2 \cdot \sin(\pi/x)) \end{array} \right. \right\}$$

ist wegzusammenhängend, aber nicht lokal wegzusammenhängend.

(ii)

$$\left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid \begin{array}{ll} x = 0 & \wedge \quad y \in [-1/2, 1/2] \\ \vee \quad x \in (0, 1] & \wedge \quad y = 1/2 \cdot \sin(\pi/x) \end{array} \right\}$$

ist zusammenhängend, aber nicht wegzusammenhängend.

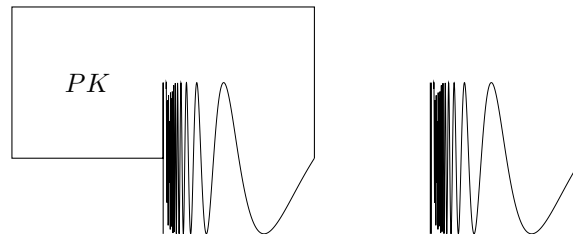


Abbildung 3: Der Polnische Kreis und eine nicht wegzusammenhängende Teilmenge davon

8.4. Satz (Topologische Invarianz der Dimension) Es gilt: $\mathbb{R}^n \cong \mathbb{R}^m \iff n = m$

BEWEIS FÜR $n = 1$: Angenommen es gibt einen Homöomorphismus $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^m$ mit $m \geq 2$. Durch Einschränkung von f erhalten wir dann auch einen Homöomorphismus $\mathbb{R} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{R}^m \setminus \{f(0)\}$. Es ist aber $\mathbb{R} \setminus \{0\}$ nicht wegzusammenhängend und für $m \geq 2$, $x \in \mathbb{R}^m$ ist $\mathbb{R}^m \setminus \{x\}$ wegzusammenhängend \nexists . \square

BEMERKUNG: Eine Variante dieses Arguments kann benutzt werden, um zu zeigen, dass $\mathbb{R}^n \cong \mathbb{R}^m$ genau dann gilt, wenn $n = m$. Dafür benötigt man aber höher dimensionale Varianten des Begriffs wegzusammenhängend.

9. Die Fundamentalgruppe

9.1. Definition Ein topologischer Raum X heißt **einfach zusammenhängend**, wenn jede stetige Abbildung $f : S^1 \rightarrow X$ eine stetige Fortsetzung $F : D^2 \rightarrow X$ besitzt.

BEMERKUNG: Ein topologischer Raum X ist genau dann wegzusammenhängend, wenn jede stetige Abbildung $f : S^0 \rightarrow X$ eine stetige Fortsetzung $F : D^1 \rightarrow X$ besitzt.

9.2. Bemerkung

(i) \mathbb{R}^n ist einfach zusammenhängend: Sei $f : S^1 \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig. Definiere $F : D^2 \rightarrow \mathbb{R}^n$ durch

$$F(t \cdot v) := t \cdot f(v) \quad \text{für } t \in [0, 1], v \in S^1$$

(ii) Ist $X \cong Y$ dann gilt: X einfach zusammenhängend $\Leftrightarrow Y$ einfach zusammenhängend.

(iii) Später: $\mathbb{R}^2 \setminus \{0\}$ ist nicht einfach zusammenhängend.

9.3. Definition Seien $\omega_0, \omega_1 : [0, 1] \rightarrow X$ Wege in X . Eine **Homotopie mit festen Endpunkten** (oder relativ $\{0, 1\}$) zwischen ω_0 und ω_1 ist eine stetige Abbildung $H : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow X$, so dass gilt:

- (i) $H(s, 0) = \omega_0(s) \quad \forall s \in [0, 1]$
- (ii) $H(s, 1) = \omega_1(s) \quad \forall s \in [0, 1]$
- (iii) $H(0, t) = \omega_0(0) = \omega_1(0) \quad \forall t \in [0, 1]$
- (iv) $H(1, t) = \omega_0(1) = \omega_1(1) \quad \forall t \in [0, 1]$

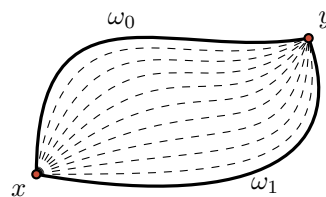


Abbildung 4: Homotopie relativ $\{0, 1\}$

Durch

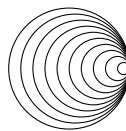
$$\omega_0 \sim \omega_1 :\Leftrightarrow \exists \text{ Homotopie relativ } \{0, 1\} \text{ zwischen } \omega_0 \text{ und } \omega_1$$

wird eine Äquivalenzrelation auf der Menge aller Wege in X erklärt. Die Äquivalenzklassen heißen **Homotopieklassen**, wir schreiben $[\omega]$ für die Homotopieklasse von ω .

9.4. Definition Ein Weg $\omega : [0, 1] \rightarrow X$ heißt eine **Schleife** in X , falls $\omega(0) = \omega(1)$ gilt. Dieser Punkt heißt **Basispunkt** von ω .

9.5. Lemma X ist genau dann einfach zusammenhängend, wenn jede Schleife in X homotop relativ $\{0, 1\}$ zu einer konstanten Schleife ist.

BEWEIS: Beweis per Zeichnung:



□

9.6. Notation Für $x \in X$ bezeichne $c_x : [0, 1] \rightarrow X$ die konstante Schleife bei x ; $c_x(t) = x \quad \forall t \in [0, 1]$.

9.7. Definition Seien ω und ω' Wege in X mit $\omega(1) = \omega'(0)$. Dann ist der **Kompositionsweg** $\omega * \omega' : [0, 1] \rightarrow X$ definiert durch

$$\omega * \omega'(t) = \begin{cases} \omega(2t), & \text{falls } t \in [0, 1/2] \\ \omega'(2t - 1), & \text{falls } t \in [1/2, 1] \end{cases}$$

9.8. Lemma

a) Seien $\omega, \omega', \omega''$ Wege in X mit $\omega(1) = \omega'(0)$ und $\omega'(1) = \omega''(0)$. Dann gilt

$$[(\omega * \omega') * \omega''] = [\omega * (\omega' * \omega'')]$$

b) Seien $\omega_0, \omega'_0, \omega_1, \omega'_1$ Wege in X mit $\omega_0(1) = \omega'_0(0)$, $\omega_1(1) = \omega'_1(0)$ und $[\omega_0] = [\omega_1]$ und $[\omega'_0] = [\omega'_1]$. Dann gilt

$$[\omega_0 * \omega'_0] = [\omega_1 * \omega'_1]$$

c) Sei ω ein Weg in X . Sei $\bar{\omega} : [0, 1] \rightarrow X$ der umgekehrte Weg, also $\bar{\omega}(t) := \omega(1 - t)$. Dann gilt $[\omega * \bar{\omega}] = [c_{\omega(0)}]$ und $[\bar{\omega} * \omega] = [c_{\omega(1)}]$.

d) Sei ω ein Weg in X . Dann gilt

$$[\omega * c_{\omega(1)}] = [\omega]$$

BEWEIS (NUR A): Sei $\varphi : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ gegeben wie in Abbildung 5 gezeichnet. Dann gilt

$$(\omega * (\omega' * \omega''))(s) = ((\omega * \omega') * \omega'')(\varphi(s))$$

die anderen Beweise funktionieren ähnlich

Die gesuchte Homotopie mit festen Endpunkten wird durch

$$H(s, t) := ((\omega * \omega') * \omega'')((1 - t)s + t\varphi(s))$$

definiert. □

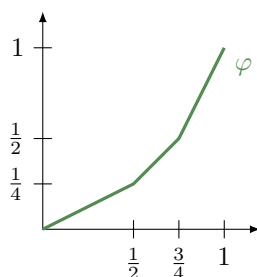


Abbildung 5: Funktion φ aus dem Beweis zu 9.8

9.9. Korollar Sei X ein topologischer Raum und $x_0 \in X$ fest. Dann wird

$$\pi_1(X, x_0) := \{[\omega] \mid \omega \text{ ist eine Schleife in } X \text{ mit } \omega(0) = x_0\}$$

durch die Komposition von Wegen zu einer Gruppe mit neutralem Element $e = [c_{x_0}]$.

9.10. Definition $\pi_1(X, x_0)$ heißt die **Fundamentalgruppe** von X bezüglich des **Basispunktes** x_0 .

BEMERKUNG: X ist genau dann einfach zusammenhängend, wenn $\pi_1(X, x_0)$ für alle $x_0 \in X$ die triviale Gruppe ist.

9.11. Bemerkung Sei η ein Weg in X von x_1 nach x_0 . Dann definiert

$$\pi_1(X, x_0) \ni [\omega] \xrightarrow{\text{conj}_\eta} [\eta * \omega * \bar{\eta}] \in \pi_1(X, x_1)$$

einen Isomorphismus zwischen $\pi_1(X, x_0)$ und $\pi_1(X, x_1)$. Wir zeigen nur: conj_η ist ein Gruppenhomomorphismus.

$$\begin{aligned} \text{conj}_\eta([\omega] * [\omega']) &= \text{conj}_\eta([\omega * \omega']) = [(\eta * (\omega * \omega')) * \bar{\eta}] \\ \text{conj}_\eta([\omega]) \cdot \text{conj}_\eta([\omega']) &= [(\eta * \omega) * \bar{\eta}] \cdot [(\eta * \omega') * \bar{\eta}] = [((\eta * \omega) * \bar{\eta}) * ((\eta * \omega') * \bar{\eta})] \\ &\stackrel{\text{a)}}{=} \left[\left(\eta * (\omega * (\bar{\eta} * \eta)) * \omega' \right) * \bar{\eta} \right] \stackrel{\text{c)}}{=} \left[\left(\eta * ((\omega * c_{\omega(1)}) * \omega') \right) * \bar{\eta} \right] \\ &\stackrel{\text{d)}}{=} [(\eta * (\omega * \omega')) * \bar{\eta}] \end{aligned}$$

Insbesondere hängt der Isomorphietyp von $\pi_1(X, x_0)$ für wegzusammenhängende Räume nicht von der Wahl des Basispunktes ab.

10. Die Windungszahl

10.1. Frage

$$\pi_1(\mathbb{R}^2 \setminus \{0\}, x_0) = ? \quad \pi_1(S^1, x_0) = ?$$

10.2. Proposition Sei $p : \mathbb{R} \rightarrow S^1$ definiert durch $p(t) = e^{2\pi i t}$. Sei $\omega : [0, 1] \rightarrow S^1$ stetig und $t_0 \in \mathbb{R}$ mit $p(t_0) = \omega(0)$. Dann gibt es eine eindeutige stetige Abbildung $\hat{\omega} : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ mit $\hat{\omega}(0) = t_0$ und $p \circ \hat{\omega} = \omega$.

$$\begin{array}{ccc} \{0\} & \xrightarrow{t_0} & \mathbb{R} \\ \downarrow & \searrow \hat{\omega} & \downarrow p \\ [0, 1] & \xrightarrow{\omega} & S^1 \end{array}$$

Ist $\eta : [0, 1] \rightarrow S^1$ mit $[\eta] = [\omega]$ und $\hat{\eta} : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ mit $\hat{\eta}(0) = t_0$, $p \circ \hat{\eta} = \eta$ so gilt $\hat{\eta}(1) = \hat{\omega}(1)$.

BEWEIS: Homotopiehebungssatz (später: 10.8) □

10.3. Definition Sei $\omega : [0, 1] \rightarrow S^1$ eine Schleife in S^1 mit $\omega(0) = \omega(1) = 1$. Sei $\hat{\omega} : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ mit $p \circ \hat{\omega} = \omega$ und $\hat{\omega}(0) = 0$. Dann heißt $\hat{\omega}(1) \in \mathbb{Z} = p^{-1}(1)$ die **Windungszahl** von ω .

10.4. Satz Die Windungszahl definiert einen Isomorphismus $d : \pi_1(S^1, 1) \rightarrow \mathbb{Z}$, $[\omega] \mapsto \hat{\omega}(1)$.

BEWEIS: Nach Proposition 10.2 ist d eine wohldefinierte Abbildung.

d ist surjektiv: Sei $\hat{\omega}_n : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ gegeben durch $\hat{\omega}_n(t) = t \cdot n$ für $n \in \mathbb{Z}$. Dann ist

$$d([p \circ \hat{\omega}_n]) = \hat{\omega}_n(1) = n$$

d ist Gruppenhomomorphismus: Seien $\omega, \eta : [0, 1] \rightarrow S^1$ Schleifen mit $\omega(0) = \eta(0) = 1$. Seien $\hat{\omega}, \hat{\eta} : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ mit $\hat{\eta}(0) = 0, \hat{\omega}(0) = 0, p \circ \hat{\omega} = \omega, p \circ \hat{\eta} = \eta$. Also $d([\omega]) = \hat{\omega}(1)$ und $d([\eta]) = \hat{\eta}(1)$. Sei nun $\hat{\eta}_+ : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ gegeben durch $\hat{\eta}_+(s) = \hat{\eta}(s) + \hat{\omega}(1)$. Dann ist $\hat{\omega} * \hat{\eta}_+$ definiert und es gilt $(\hat{\omega} * \hat{\eta}_+)(0) = 0, (\hat{\omega} * \hat{\eta}_+)(1) = \hat{\eta}(1) + \hat{\omega}(1)$. Also folgt

$$d([\omega * \eta]) = (\hat{\omega} * \hat{\eta}_+)(1) = \hat{\eta}(1) + \hat{\omega}(1) = d([\omega]) + d([\eta]).$$

d ist injektiv: Sei $\omega : [0, 1] \rightarrow S^1$ eine Schleife mit $d([\omega]) = 0$. Dann gibt es $\hat{\omega} : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ mit $\hat{\omega}(0) = 0 = \hat{\omega}(1)$ und $p \circ \hat{\omega} = \omega$. Nun ist $\hat{H} : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ mit

$$\hat{H}(s, t) := (1 - t) \cdot \hat{\omega}(s)$$

eine Homotopie mit festen Endpunkten zwischen $\hat{\omega}$ und c_0 . Dann ist $p \circ \hat{H}$ eine Homotopie mit festen Endpunkten zwischen ω und c_1 . Also $[\omega] = e \in \pi_1(S^1, 1)$. □

10.5. Definition Eine surjektive stetige Abbildung $p : \hat{X} \rightarrow X$ heißt eine **Überlagerung**, falls es zu jedem $x \in X$ eine Umgebung U gibt, so dass sich $p^{-1}(U)$ schreiben lässt als die disjunkte Vereinigung von offenen Mengen $U_i \subseteq \hat{X}$ und für jedes i die Einschränkung $p|_{U_i} : U_i \rightarrow U$ ein Homöomorphismus ist. Eine solche Umgebung U heißt eine **elementare Umgebung**.

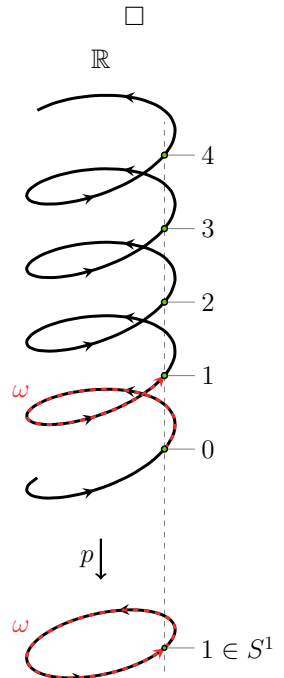


Abb. 6: Schleife ω mit der Windungszahl 1

10.6. Beispiel

- (1) $p : \mathbb{R} \rightarrow S^1, t \mapsto e^{2\pi i t}$ ist eine Überlagerung.
- (2) $p_n : S^1 \rightarrow S^1, z \mapsto z^n$ ist eine Überlagerung.
- (3) Sind $p : \hat{X} \rightarrow X, q : \hat{Y} \rightarrow Y$ Überlagerungen, so ist $p \times q : \hat{X} \times \hat{Y} \rightarrow X \times Y$ eine Überlagerung. zB: $\mathbb{R}^2 \rightarrow T^2 = S^1 \times S^1$
- (4) $S^2 \rightarrow \mathbb{R}P^2 = S^2 / x \sim -x$ ist eine Überlagerung. (Übung!)

10.7. Definition Sei $p : \hat{X} \rightarrow X$ eine Überlagerung und $f : Z \rightarrow X$ eine stetige Abbildung. Eine **Hebung** von f (bezüglich p) ist eine stetige Abbildung $\hat{f} : Z \rightarrow \hat{X}$ mit $p \circ \hat{f} = f$

$$\begin{array}{ccc} \hat{X} & & \\ \hat{f} \uparrow & \searrow p & \\ Z & \xrightarrow{f} & X \end{array}$$

10.8. Homotopiehebungssatz Sei $p : \hat{X} \rightarrow X$ eine Überlagerung, $H : Z \times [0, 1] \rightarrow X$ eine Homotopie und $\hat{f} : Z \rightarrow \hat{X}$ eine Hebung von $f = H(-, 0) := H|_{Z \times \{0\}}$. Dann gibt es eine eindeutige Hebung von H mit $\hat{H}(-, 0) = \hat{f}$

$$\begin{array}{ccc} Z \times \{0\} & \xrightarrow{\hat{f}} & \hat{X} \\ \downarrow i & \nearrow \hat{H} & \downarrow p \\ Z \times [0, 1] & \xrightarrow{H} & X \end{array}$$

BEWEIS: Sei \mathcal{U} eine Überdeckung von X durch elementare Umgebungen. Wir können \mathcal{U} mittels H zurückziehen und erhalten eine offene Überdeckung $H^{-1}(\mathcal{U}) := \{H^{-1}(U) \mid U \in \mathcal{U}\}$ von $Z \times [0, 1]$.

Sei $z_0 \in Z$ fest. Da $\{z_0\} \times [0, 1]$ kompakt ist, gibt es $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_n = 1$ und $U_1, \dots, U_n \in \mathcal{U}$ mit

$$H(\{z_0\} \times [t_i, t_{i+1}]) \subseteq U_i.$$

Da die U_i offen sind gibt es zu jedem i eine offene Umgebung V_i von z_0 mit $H(V_i \times [t_i, t_{i+1}]) \subseteq U_i$. Sei $V := \bigcap_{i=1}^n V_i$, dann ist $H(V \times [t_i, t_{i+1}]) \subseteq U_i$. Da alle U_i elementar sind, finden wir induktiv eindeutige Hebungen \hat{H}_i^V von $H|_{V \times [t_i, t_{i+1}]}$ mit

$$\hat{H}_i^V(-, 0) = \hat{f}|_V \quad \text{und} \quad \hat{H}_i^V(-, t_i) = \hat{H}_{i-1}^V(-, t_i).$$

Nun erhalten wir mit $\hat{H}^V(z, t) := \hat{H}_i^V(z, t)$ für $z \in V, t \in [t_i, t_{i+1}]$ eine eindeutige Hebung von $H|_{V \times [0, 1]}$ mit $\hat{H}^V(-, 0) = \hat{f}|_V$. Dabei bleibt \hat{H}^V eindeutig auch wenn wir V verkleinern. Nun finden wir für jedes $z \in Z$ eine Umgebung V_z und eine eindeutige Hebung \hat{H}^{V_z} von $H|_{V_z \times [0, 1]}$ mit $\hat{H}^{V_z}(-, 0) = \hat{f}|_{V_z}$. Wegen der Eindeutigkeit gilt

$$\hat{H}^{V_z}(\xi, t) = \hat{H}^{V_{z'}}(\xi, t)$$

für alle $\xi \in V_z \cap V_{z'}$. Daher definiert $\hat{H}(z, t) := \hat{H}^{V_z}(z, t)$ die gesuchte eindeutige Hebung. \square

Die $H^{-1}(U_i)$ überdecken $\{z_0\} \times [0, 1]$

11. Induzierte Abbildungen

11.1. Lemma Sei $f : X \rightarrow Y$ stetig mit $f(x_0) = y_0$. Dann definiert $f_*([\omega]) := [f \circ \omega]$ einen Gruppenhomomorphismus $f_* : \pi_1(X, x_0) \rightarrow \pi_1(Y, y_0)$.

BEWEIS: Wir zeigen nur, dass f_* wohldefiniert ist. Seien $\omega, \eta : [0, 1] \rightarrow X$ Schleifen mit $\omega(0) = x_0 = \eta(0)$ und $[\omega] = [\eta]$. Dann gibt es eine Homotopie $H : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow X$ mit festen Endpunkten zwischen ω und η .² Dann ist $f \circ H$ eine Homotopie mit festen Endpunkten zwischen $f \circ \omega$ und $f \circ \eta$. Also

$$f_*([\omega]) = [f \circ \omega] = [f \circ \eta] = f_*([\eta]) \in \pi_1(Y, y_0) \quad \square$$

11.2. Definition f_* heißt die von f **induzierte Abbildung**. Manchmal schreibt man auch $\pi_1(f)$ für f_* , um f_* von anderen induzierten Abbildungen zu unterscheiden.

BEMERKUNG:

(i) Für $f : Y \rightarrow Z, g : Y \rightarrow Y$ gilt $(f \circ g)_* = f_* \circ g_*$.

(ii) Es gilt $(\text{id}_X)_* = \text{id}_{\pi_1(X, x_0)}$.

11.3. Definition Ein topologischer Raum X zusammen mit einem Basispunkt $x_0 \in X$, (X, x_0) heißt ein **punktierter Raum**. Eine **punktierte Abbildung** zwischen punktierten Räumen $f : (X, x_0) \rightarrow (Y, y_0)$ ist eine stetige Abbildung $f : X \rightarrow Y$ mit $f(x_0) = y_0$. Punktierte Abbildungen $f, g : (X, x_0) \rightarrow (Y, y_0)$ heißen **punktiert homotop**, falls es eine Homotopie $H : X \times [0, 1] \rightarrow Y$ von f nach g gibt mit

$$H(x_0, t) = y_0 \quad \forall t \in [0, 1].$$

11.4. Proposition (Homotopieinvarianz von π_1) Seien $f, g : (X, x_0) \rightarrow (Y, y_0)$ homotop. Dann gilt

$$f_* = g_* : \pi_1(X, x_0) \rightarrow \pi_1(Y, y_0)$$

BEWEIS: Sei H eine Homotopie zwischen f und g . Für $[\omega] \in \pi_1(X, x_0)$ ist $H \circ \omega$ eine Homotopie mit festen Endpunkten zwischen $f \circ \omega$ und $g \circ \omega$. Also

$$f_*([\omega]) = [f \circ \omega] = [g \circ \omega] = g_*([\omega]) \quad \square$$

11.5. Definition Seien X, Y topologische Räume. Dann heißen X und Y **homotopieäquivalent**, falls es stetige Abbildungen $f : X \rightarrow Y, g : Y \rightarrow X$ gibt, so dass

$$f \circ g \simeq \text{id}_Y \quad \text{und} \quad g \circ f \simeq \text{id}_X.$$

$f \simeq g \Leftrightarrow f$ homotop zu g

Wir schreiben dann $X \simeq Y$ oder $X \xrightarrow{f} Y$. g heißt **Homotopie-Inverse** von f . Entsprechendes benutzen wir auch für punktierte Räume. Falls $X \simeq \{0\}$, so sagen wir: X ist **zusammenziehbar**.

Homöomorphe Räume sind homotopieäquivalent!

² $H(-, 0) = \omega, H(-, 1) = \eta, H(t, 0) = H(t, 1) = x_0$ für alle $t \in [0, 1]$

11.6. Beispiel

- (1) S^{n-1} ist homotopieäquivalent zu $\mathbb{R}^n \setminus \{0\}$: Benutze die Inklusion $i : S^{n-1} \hookrightarrow \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$ und die Normierung $p : \mathbb{R}^n \setminus \{0\} \rightarrow S^{n-1}, v \mapsto \frac{v}{\|v\|}$. Dann gilt

$$p \circ i = \text{id}_{S^{n-1}} \quad , \quad i \circ p \simeq \text{id}_{\mathbb{R}^n \setminus \{0\}}$$

mit der Homotopie $H(v, t) = t \cdot v + (1-t) \frac{v}{\|v\|}$.

- (2) Sei $K \subseteq \mathbb{R}^n$ eine konvexe Teilmenge und $x_0 \in K$. Dann ist (K, x_0) zusammenziehbar:

$$\begin{aligned} i : (\{x_0\}, x_0) &\rightarrow (K, x_0) && \text{die Inklusion} \\ p : (K, x_0) &\rightarrow (\{x_0\}, x_0) && \text{die konstante Abbildung} \end{aligned}$$

$p \circ i = \text{id}_{(\{x_0\}, x_0)}$ und $i \circ p \simeq \text{id}_{(K, x_0)}$ mit der Homotopie $H(x, t) = t \cdot x + (1-t)x_0$.

- (3) Auch $X := \mathbb{R}^2 \setminus \{(x, y) \mid x \in (0, \infty), y \in [0, 1]\}$ ist kontrahierbar.

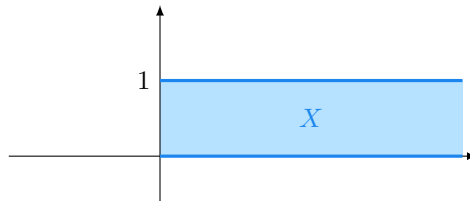


Abbildung 7: Kontrahierbare Teilmenge des \mathbb{R}^2

Setze $H := \{(x, y) \mid x \leq 0\}$. Dann ist $X \simeq H \simeq \{x_0\}$.

11.7. Korollar Ist $f : (X, x_0) \rightarrow (Y, y_0)$ eine Homotopieäquivalenz, so ist $f_* : \pi_1(X, x_0) \rightarrow \pi_1(Y, y_0)$ ein Isomorphismus. Insbesondere ist $\pi_1(X, x_0) = \{1\}$, falls (X, x_0) zusammenziehbar ist.

BEWEIS: Sei $g : (Y, y_0) \rightarrow (X, x_0)$ eine Homotopie-Inverse zu f , also $g \circ f \simeq \text{id}_X$, $f \circ g \simeq \text{id}_Y$. Dann ist $g_* = (f_*)^{-1}$ (und f_* ein Isomorphismus):

$$f_* \circ g_* = (f \circ g)_* = (\text{id}_Y)_* = \text{id}_{\pi_1(Y, y_0)}$$

$$g_* \circ f_* = (g \circ f)_* = (\text{id}_X)_* = \text{id}_{\pi_1(X, x_0)}$$

□

11.8. Fixpunktsatz von Brouwer Jede stetige Abbildung $f : D^n \rightarrow D^n$ hat einen Fixpunkt.

BEWEIS: Für $n = 1$ ist dies eine Folgerung aus dem Zwischenwertsatz. ($D^1 = [-1, 1]$)

Angenommen $f : D^n \rightarrow D^n$ hat keinen Fixpunkt, also $f(x) \neq x$ für alle $x \in D^n$. Wir konstruieren eine stetige Abbildung $F : D^n \rightarrow S^{n-1}$ mit $F|_{S^{n-1}} = \text{id}_{S^{n-1}}$ sodass gilt

(i) $F(x) = t(x - f(x)) + x, t \geq 0$

(ii) $F(x) \in S^{n-1}$

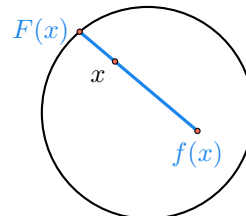


Abb. 8: Konstruktion von F

Sei $x_0 \in S^{n-1}$. Wir haben also

$$\begin{array}{ccc}
 (S^{n-1}, x_0) & \xrightarrow{\text{id}} & (S^{n-1}, x_0) \\
 \downarrow i & \nearrow F & \\
 (D^n, x_0) & &
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{ccc}
 \pi_1(S^{n-1}, x_0) & \xrightarrow{(\text{id})_* = \text{id}} & \pi_1(S^{n-1}, x_0) \\
 \downarrow i_* & \nearrow F_* & \\
 \pi_1(D^n, x_0) & &
 \end{array}$$

Da (D^n, x_0) zusammenziehbar ist, gilt $\pi_1(D^n, x_0) = \{e\}$. Für $n = 2$ ist das zweite Diagramm also

$$\begin{array}{ccc}
 \mathbb{Z} & \xrightarrow{(\text{id})_* = \text{id}} & \mathbb{Z} \\
 \downarrow i_* & \nearrow F_* & \\
 \{e\} & &
 \end{array}$$

Daher folgt $\text{id} = F_* \circ i_* = \text{triviale Null-Abbildung}$ \nparallel □

BEMERKUNG: Für $n \geq 3$ ist $\pi_1(S^{n-1}, x_0)$ trivial. In diesem Fall benutzt der Beweis eine andere Invariante als die Fundamentalgruppe.

11.9. Proposition Für $n \in \mathbb{Z}$ sei $f_n : S^1 \rightarrow S^1, z \mapsto z^n$. Dann ist $(f_n)_* : \pi_1(S^1, 1) \rightarrow \pi_1(S^1, 1)$ durch Multiplikation mit n gegeben:

$$(f_n)_*([\omega]) = n \cdot [\omega] \in \pi_1(S^1, 1) = \mathbb{Z}$$

Weiter sind die f_n paarweise nicht homotop zueinander.

BEWEIS: Sei $p : \mathbb{R} \rightarrow S^1, t \mapsto e^{2\pi i t}$. Zu jeder Schleife $\omega : [0, 1] \rightarrow S^1$ mit $\omega(0) = \omega(1) = 1$ gibt es eine eindeutige Hebung $\hat{\omega} : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ zu einem Weg mit $\hat{\omega}(0) = 0$. Der Isomorphismus $d : \pi_1(S^1, 1) \rightarrow \mathbb{Z}$ bildet $[\omega]$ auf $\hat{\omega}(1) \in \mathbb{Z} \subseteq \mathbb{R}$ ab. Sei $\hat{f}_n : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, t \mapsto n \cdot t$. Dann gilt $p \circ \hat{f}_n = f_n \circ p$ und $\hat{f}_n(0) = 0$. Ist $\hat{\omega}$ eine Hebung von ω , so ist $\hat{f}_n \circ \hat{\omega}$ eine Hebung von $f_n \circ \omega$, da

$$\begin{aligned}
 (\hat{f}_n \circ \hat{\omega})(0) &= \hat{f}_n(0) = 0 \\
 p \circ \hat{f}_n \circ \hat{\omega} &= f_n \circ p \circ \hat{\omega} = f_n \circ \omega
 \end{aligned}$$

Es folgt

$$d([f_n \circ \omega]) = (\hat{f}_n \circ \hat{\omega})(1) = \hat{f}_n(\hat{\omega}(1)) = \hat{f}_n(d[\omega]) = n \cdot d[\omega]$$

Da d ein Isomorphismus ist, folgt die Behauptung.

Mit der Homotopieinvarianz von induzierten Abbildungen folgt, dass die $f_n : (S^1, 1) \rightarrow (S^1, 1)$ als punktierte Abbildungen nicht punktiert homotop sind. Mit dem nächsten Lemma folgt das die f_n paarweise nicht homotop sind. □

11.10. Lemma Seien $f, g : (X, x_0) \rightarrow (S^1, 1)$ stetig. Sei $H : X \times [0, 1] \rightarrow S^1$ eine (unpunktierte) Homotopie zwischen f und g . Dann ist $\tilde{H} : X \times [0, 1] \rightarrow S^1$,

$$\tilde{H}(x, t) = \frac{H(x, t)}{H(x_0, t)}$$

ein punktierte Homotopie zwischen f und g .

BEWEIS: Es ist $\tilde{H}(x_0, t) = \frac{H(x_0, t)}{H(x_0, t)} = 1$ für alle t . Da $H(x_0, 0) = f(x_0) = 1 = g(x_0) = H(x_0, 1)$ gilt, ist

$$\tilde{H}(x, 0) = H(x, 0) = f(x) \quad \text{und} \quad \tilde{H}(x, 1) = H(x, 1) = g(x). \quad \square$$

11.11. Hauptsatz der Algebra Jedes Polynom $p = X^n + a_{n-1}X^{n-1} + \dots + a_0 \in \mathbb{C}[X]$ von $\text{grad } p = n \geq 1$ hat eine Nullstelle.

BEWEIS: Angenommen p hat keine Nullstelle. In den Übungen haben wir gezeigt, dass dann $f_n : S^1 \rightarrow S^1, z \mapsto z^n$ homotop zu einer konstanten Abbildung ist. Aus der Proposition 11.9 folgt dann aber $n = 0$. \square

Der Beweis aus der Übung befindet sich im Anhang A.2 auf Seite 63.

12. Eigentlich diskontinuierliche Wirkungen

12.1. Definition Sei G eine Gruppe und X ein topologischer Raum.

(1) Eine **Wirkung** $G \curvearrowright X$ von G auf X ist eine Abbildung $G \times X \rightarrow X$, $(g, x) \mapsto g \cdot x$, so dass gilt

- Für $g \in G$ ist $\lambda_g : X \rightarrow X$, $x \mapsto g \cdot x$ stetig.
- Für $g, h \in G$ gilt $g \cdot (h \cdot x) = (g \cdot h) \cdot x$
- Für das neutrale Element $e \in G$ gilt $e \cdot x = x$ für alle $x \in X$

(2) Eine Wirkung heißt **frei**, falls $g \cdot x = x \Rightarrow g = e$. ($G \rightarrow \text{Sym}(X)$ ist injektiv)

(3) Eine Wirkung heißt **eigentlich diskontinuierlich** (e.d.k.), falls es zu jedem $x \in X$ eine Umgebung U von x gibt mit $gU \cap U = \emptyset$ für alle $g \in G \setminus \{e\}$.

(4) Durch $x \sim y : \Leftrightarrow \exists g \in G : g \cdot x = y$ ($\Leftrightarrow Gx = Gy$) wird eine Äquivalenzrelation auf X erklärt. Die Äquivalenzklassen dieser Äquivalenzrelation sind genau die **Bahnen** $Gx = \{g \cdot x \mid g \in G\}$ der Wirkung. Die Menge der Äquivalenzklassen bezeichnen wir mit $G \backslash X := X / \sim$. Durch die Quotiententopologie bezüglich der Quotientenabbildung $X \rightarrow G \backslash X$, $x \mapsto Gx$ wird $G \backslash X$ zu einem topologischen Raum.

12.2. Lemma Sei $G \curvearrowright X$ eine e.d.k. Wirkung. Dann ist $p : X \rightarrow G \backslash X$, $x \mapsto Gx$ eine Überlagerung.

BEWEIS: Offenbar ist p surjektiv und stetig. Sei $\bar{x} := Gx \in G \backslash X$. Sei U eine offene Umgebung von $x \in X$, für die $gU \cap U = \emptyset$ für alle $g \neq e$ ist. Dann ist $p(U)$ eine elementare Umgebung von \bar{x} , denn

$$p^{-1}(p(U)) = \bigcup_{g \in G} gU$$

ist die disjunkte Vereinigung der gU , $g \in G$. □

12.3. Beispiel

(1) $\mathbb{Z}^n \curvearrowright \mathbb{R}^n$ mit $z \cdot x := x + z$ ist eine e.d.k. Wirkung: Ist $\varepsilon < \frac{1}{2}$ so gilt

$$B_\varepsilon(x) \cap B_\varepsilon(x) + z = B_\varepsilon(x) \cap B_\varepsilon(x + z) = \emptyset$$

für alle $x \in \mathbb{R}^n$, $z \in \mathbb{Z}^n \setminus \{0\}$. Da $\mathbb{Z} \backslash \mathbb{R} \cong S^1$ folgt $\mathbb{Z}^n \backslash \mathbb{R}^n \cong (\mathbb{Z} \backslash \mathbb{R})^n \cong (S^1)^n = T^n$. Wir erhalten eine Überlagerung $\mathbb{R}^n \rightarrow T^n$ des n -Torus.

(2) Sei $\mathbb{Z}/2 = \{e, \tau\}$. Durch $\tau \cdot v := -v$ erhalten wir eine e.d.k. Wirkung $\mathbb{Z}/2 \curvearrowright S^n$. Dann gilt

$$\mathbb{Z}/2 \backslash S^n \cong \mathbb{R}P^n$$

und wir erhalten eine Überlagerung $S^n \rightarrow \mathbb{R}P^n$.

(3) Zu $m, n \in \mathbb{Z}$ sei $f_{n,m} : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ mit $f_{n,m}(x, y) = (x + n, (-1)^n y + m)$. Dann ist

$$G := \{f_{n,m} \mid n, m \in \mathbb{Z}\}$$

eine Gruppe bezüglich der Verknüpfung von Abbildungen. $f_{n,m} \circ f_{n',m'} = f_{n+n', m+(-1)^n m'}$. Die kanonische Wirkung von G auf \mathbb{R}^2 $f_{n,m} \cdot x := f_{n,m}(x)$ ist e.d.k., da

$$f_{n,m}(U_\varepsilon(x)) \cap U_\varepsilon(x) = \emptyset$$

für $(n, m) \neq (0, 0)$ und $\varepsilon < \frac{1}{2}$. Der Quotient $G \backslash \mathbb{R}^2 =: K$ heißt die **Kleinsche Flasche**. Wir erhalten eine Wirkung $\mathbb{R}^2 \rightarrow K$.

Übung: $K \cong T_{S^1 \rightarrow S^1}$ (Abbildungstorus)
 $z \mapsto -z$

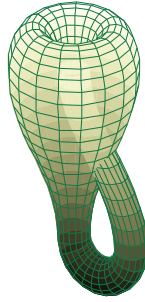


Abbildung 9: Kleinsche Flasche, Quelle

12.4. Satz Sei X wegzusammenhängend und einfach zusammenhängend. Sei $G \curvearrowright X$ eine e.d.k. Wirkung. Für jedes $\bar{x}_0 \in G \backslash X$ ist dann

$$\pi_1(G \backslash X, \bar{x}_0) \cong G.$$

BEWEIS: Sei $x_0 \in X$ ein Urbild von \bar{x}_0 , also $\bar{x}_0 = Gx_0$. Zu jeder Schleife $\omega : [0, 1] \rightarrow G \backslash X$ mit $\omega(0) = \omega(1) = \bar{x}_0$ gibt es eine Hebung $\hat{\omega} : [0, 1] \rightarrow X$ mit $\hat{\omega}(0) = x_0$. Hier heben wir bezüglich der Überlagerung $p : X \rightarrow G \backslash X, x \mapsto Gx$, also $p \circ \hat{\omega} = \omega$.

Da $p(\hat{\omega}(1)) = \omega(1) = \bar{x}_0$ folgt $\hat{\omega}(1) \in p^{-1}(\bar{x}_0) = Gx_0$. Es gibt also $g_\omega \in G$ mit $g_\omega \cdot x_0 = \hat{\omega}(1)$. Wie im Fall der Überlagerung $\mathbb{R} \rightarrow S^1$ zeigt man mit Hilfe des Homotopiehebungssatzes, dass $[\omega] \mapsto g_\omega$ ein Gruppenhomomorphismus $\varphi : \pi_1(G \backslash X, \bar{x}_0) \rightarrow G$ definiert.

Surjektivität von φ : Sei $g \in G$. Sei $\hat{\omega} : [0, 1] \rightarrow X$ ein Weg von x_0 nach $g \cdot x_0$ (Solch einen Weg gibt es, da X wegzusammenhängend ist). Dann ist $\hat{\omega}$ die Hebung von $\omega := p \circ \hat{\omega}$ und es folgt $\varphi([\omega]) = g_\omega = g$, da $\hat{\omega}(1) = g \cdot x_0$. Also $g \in \text{Im } \varphi$.

Injektivität von φ : Sei $\omega : [0, 1] \rightarrow G \backslash X$ eine Schleife mit $\omega(0) = \omega(1) = \bar{x}_0$, für die $\varphi([\omega]) = e$. Sei $\hat{\omega} : [0, 1] \rightarrow X$ die Hebung von ω mit $\hat{\omega}(0) = x_0$. Da $\varphi([\omega]) = e$ ist, gilt $\hat{\omega}(1) = x_0$, $\hat{\omega}$ ist also eine Schleife in X . Da X einfach zusammenhängend ist, ist $[\hat{\omega}] = e \in \pi_1(X, x_0)$. Es folgt

$$[\omega] = [p \circ \hat{\omega}] = p_*[\hat{\omega}] = p_*(e) = e.$$

□

12.5. Bemerkung Für $n \geq 1$ ist S^n wegzusammenhängend. (einfache Übung)
Für $n \geq 2$ ist S^n einfach zusammenhängend. (weniger einfache Übung)

Nach Satz 12.4 ist daher $\pi_1(\mathbb{R}P^n, x_0) = \mathbb{Z}/2$ für $n \geq 2$. Es folgt $\mathbb{R}P^n \not\cong S^n$ für $n \geq 2$. (Andererseits ist $\mathbb{R}P^1 \cong S^1$.)

12.6. Definition Sei $p : \hat{X} \rightarrow X$ eine Überlagerung. Eine **Decktransformation** von p ist ein Homöomorphismus $f : \hat{X} \rightarrow \hat{X}$, sodass $p \circ f = p$. Die Decktransformationen von p bilden eine Gruppe $\Delta(p)$. Diese Gruppe wirkt in kanonischer Weise auf \hat{X} .

12.7. Lemma Sei $p : \hat{X} \rightarrow X$ eine Überdeckung wobei \hat{X} wegzusammenhängend ist. Dann ist die Wirkung der Decktransmutationsgruppe $\Delta(p)$ auf \hat{X} eigentlich diskontinuierlich.

BEWEIS: Wir zeigen zunächst, dass die Wirkung frei ist. Sei $f \in \Delta(p)$ und $x \in \hat{X}$ mit $f(x) = x$. Zu zeigen: $f = \text{id}_{\hat{X}}$. Sei $y \in \hat{X}$ und $\hat{\omega} : [0, 1] \rightarrow \hat{X}$ ein Weg von x nach y . Dann sind $\hat{\omega}$ und $f \circ \hat{\omega}$ zwei Hebungen von $\omega := p \circ \hat{\omega}$. Da $\hat{\omega}(0) = x = f(x) = f \circ \hat{\omega}(0)$ folgt mit der Eindeutigkeit im Homotopiehebungssatz $\hat{\omega} = f \circ \hat{\omega}$ und insbesondere $y = f(y)$. Da y beliebig war, ist $f = \text{id}_{\hat{X}}$.

Wir können nun zeigen, dass die Wirkung eigentlich diskontinuierlich ist: Sei $x \in \hat{X}$. Sei U eine elementare Umgebung von $p(x)$. Dann ist $p^{-1}(U)$ die disjunkte Vereinigung von offenen Mengen V , $V \in \mathcal{V}$ von denen jede homöomorph auf U abgebildet wird. Sei $V_0 \in \mathcal{V}$ mit $x \in V_0$. Sei $f \in \Delta(p)$, $f \neq \text{id}$. Für $y \in V_0$ gilt dann $p(f(y)) = p(y)$. Da $f(y) \neq y$ gilt, folgt $f(y) \notin V_0$, denn andernfalls wäre $p|_{V_0}$ nicht injektiv. Daher ist $f(V_0) \cap V_0 = \emptyset$. \square

12.8. Bemerkung Sei $p : \hat{X} \rightarrow X$ eine Überlagerung wobei \hat{X} wegzusammenhängend ist. Sei $H \leq \Delta(p)$ eine Untergruppe. Dann ist auch die Wirkung $H \curvearrowright \hat{X}$ eigentlich diskontinuierlich und die Quotientenabbildung $q : \hat{X} \rightarrow H \backslash \hat{X}$ eine Überlagerung. Weiter ist $q' : H \backslash \hat{X} \rightarrow X$ mit $q'(Hx) := p(x)$ stetig, da $q' \circ q = p$ stetig ist. Ist $U \subseteq X$ elementar für p , so ist U auch elementar für q' . q' ist also auch eine Überlagerung. Insgesamt haben wir also jeder Untergruppe von $\Delta(p)$ eine Überlagerung $H \backslash \hat{X}$ zugeordnet, die zwischen \hat{X} und X liegt.³

$$\begin{array}{ccc} \hat{X} & \xrightarrow{p} & X \\ \downarrow q & \nearrow q' & \\ H \backslash \hat{X} & & \end{array}$$

12.9. Definition Sei $p : \hat{X} \rightarrow X$ eine Überlagerung. Für $x \in X$ wirkt dann $\Delta(p)$ auf $p^{-1}(x)$. Die Überlagerung heißt **normal**, falls diese Wirkung transitiv ist, d.h. falls es zu $\hat{x}, \hat{y} \in p^{-1}(x)$ immer $f \in \Delta(p)$ gibt mit $f(\hat{x}) = \hat{y}$.

12.10. Proposition Sei $\hat{X} \xrightarrow{p} X$ eine normale Überlagerung, wobei \hat{X} wegzusammenhängend ist. Dann ist die Abbildung

$$q' : \Delta(p) \backslash \hat{X} \rightarrow X, \quad q'(\Delta(p)x) = p(x)$$

ein Homöomorphismus. Wenn zusätzlich \hat{X} einfach zusammenhängend und wegzusammenhängend ist, dann gilt $\pi_1(X, x_0) \cong \Delta(p)$ für einen beliebigen Basispunkt $x_0 \in X$.

BEWEIS: Wir haben in Bemerkung 12.8 schon gesehen, dass q' eine Überlagerung ist. Unabhängig davon ob p normal ist. Ist p normal, so ist q' bijektive Überlagerung und daher Homöomorphismus. \square

³ An dieser Stelle darf man sich gerne an die Galois-Gruppen aus „Einführung in die Algebra“ erinnern.

13. Klassifikation von Überlagerungen

13.1. Hebungssatz Sei $p : \hat{X} \rightarrow X$ eine Überlagerung. Sei $x_0 \in X, \hat{x}_0 \in \hat{X}, p(\hat{x}_0) = x_0$. Sei Z wegzusammenhängend und lokal wegzusammenhängend. Sei $z_0 \in Z, f : Z \rightarrow X$ stetig mit $f(z_0) = x_0$. Dann gibt es eine Hebung $\hat{f} : Z \rightarrow \hat{X}$ mit $\hat{f}(z_0) = \hat{x}_0$ genau dann, wenn

$$f_*(\pi_1(Z, z_0)) \subseteq p_*(\pi_1(\hat{X}, \hat{x}_0)) \quad (*)$$

als Untergruppe von $\pi_1(X, x_0)$ gilt. In diesem Fall ist \hat{f} eindeutig.

$$\begin{array}{ccc} X & \xleftarrow{p} & \hat{X} \\ f \uparrow & \nearrow \hat{f} & \\ Z & & \end{array}$$

BEWEIS: Existiert \hat{f} , so folgt $(*)$ aus $f_* = p_* \circ \hat{f}_*$. Sei umgekehrt $(*)$ erfüllt. Sei $z \in Z$. Sei $\omega : [0, 1] \rightarrow Z$ ein Weg von z_0 nach z . Sei $\hat{\omega} : [0, 1] \rightarrow \hat{X}$ die eindeutige Hebung von $f \circ \omega$ mit $\hat{\omega}(0) = \hat{x}_0$ (Homotopiehebungssatz, 10.8). Existiert \hat{f} , so ist auch $\hat{f} \circ \omega$ eine Hebung von $f \circ \omega$ mit $\hat{f} \circ \omega(0) = \hat{f}(z_0) = \hat{x}_0$, also $\hat{\omega} = \hat{f} \circ \omega$ und insbesondere ist $\hat{f}(z) = \hat{f}(\omega(1)) = \hat{\omega}(1)$. Daher ist \hat{f} eindeutig, falls es existiert.

Zur Existenz setzen wir $\hat{f}(z) := \hat{\omega}(1)$. Wir müssen zeigen:

Wohldefiniertheit: Sei $\eta : [0, 1] \rightarrow Z$ ein zweiter Weg von z_0 nach z . Sei $\hat{\eta} : [0, 1] \rightarrow \hat{X}$ die zugehörige Hebung. Zu zeigen: $\hat{\eta}(1) = \hat{\omega}(1)$. Betrachte die Schleife $\bar{\omega} * \eta$ in Z . Dann ist $\bar{\omega} * \hat{\eta}$ eine Hebung von $f \circ (\bar{\omega} * \eta)$. Aus $(*)$ folgt, dass $[f \circ (\bar{\omega} * \eta)]$ im Bild von $p_* : \pi_1(\hat{X}, \hat{x}_0) \rightarrow \pi_1(X, x_0)$ liegt. Mit dem Homotopiehebungssatz ergibt sich, dass auch $\bar{\omega} * \hat{\eta}$ eine Schleife ist (Übung!). Damit folgt $\hat{\omega}(1) = \hat{\eta}(1)$.

Stetigkeit: Sei $U \subseteq \hat{X}$ offen. Sei $z \in \hat{f}^{-1}(U)$. Sei V eine elementare Umgebung von $f(z)$. Indem wir V wenn nötig klein machen, erhalten wir eine offene Umgebung V' von $\hat{f}(z)$, die unter p homöomorph auf V abgebildet wird. Da f stetig ist und Z lokal wegzusammenhängend ist, gibt es eine wegzusammenhängende Umgebung W von z mit $f(W) \subseteq V$. Sei nun $\omega : [0, 1] \rightarrow Z$ ein Weg von z_0 nach z . Zu $z' \in W$ gibt es einen Weg $\eta : [0, 1] \rightarrow W$ von z nach z' und $\omega * \eta$ ist ein Weg von z_0 nach z' . Insbesondere ist

$$\hat{f}(z') = \widehat{(\omega * \eta)}(1) = \hat{\omega} * p|_{V'}^{-1}(\eta)(1) = (p|_{V'})^{-1}(\eta(1)) \in V'$$

Also $\hat{f}(W) \subseteq V' \subseteq U$ und \hat{f} ist stetig. \square

13.2. Klassifikationssatz (Eindeutigkeit) Seien $p_1 : \hat{X}_1 \rightarrow X, p_2 : \hat{X}_2 \rightarrow X$ zwei Überlagerungen. Dabei seien \hat{X}_1 und \hat{X}_2 wegzusammenhängend und lokal wegzusammenhängend. Seien $\hat{x}_1 \in \hat{X}_1, \hat{x}_2 \in \hat{X}_2$ mit $p_1(\hat{x}_1) = p_2(\hat{x}_2) = x_0$. Dann sind äquivalent:

- Es gibt einen Homöomorphismus $f : \hat{X}_1 \rightarrow \hat{X}_2$ mit $p_2 \circ f = p_1$ und $f(\hat{x}_1) = \hat{x}_2$.
- $p_{1*}(\pi_1(\hat{X}_1, \hat{x}_1)) = p_{2*}(\pi_1(\hat{X}_2, \hat{x}_2))$ als Untergruppen von $\pi_1(X, x_0)$

BEWEIS:

a) \Rightarrow b): Ist f wie in a), so ist $f_* : \pi_1(\hat{X}_1, \hat{x}_1) \rightarrow \pi_1(\hat{X}_2, \hat{x}_2)$ ein Isomorphismus und es folgt siehe 11.7

$$(p_1)_*(\pi_1(\hat{X}_1, \hat{x}_1)) = (p_2 \circ f)_*(\pi_1(\hat{X}_1, \hat{x}_1)) = (p_2)_* \circ (f)_*(\pi_1(\hat{X}_1, \hat{x}_1)) = (p_2)_*(\pi_1(\hat{X}_2, \hat{x}_2))$$

b) \Rightarrow a): Betrachte

$$\begin{array}{ccc} & \hat{X}_2 & \\ f \nearrow & \downarrow p_2 & \\ \hat{X}_1 & \xrightarrow{p_1} & X \end{array}$$

Hebungssatz $\Rightarrow \exists f : \hat{X}_1 \rightarrow \hat{X}_2$ mit $p_2 \circ f = p_1$, $f(\hat{x}_1) = \hat{x}_2$. Betrachte nun

$$\begin{array}{ccc} & \hat{X}_1 & \\ g \nearrow & \downarrow p_1 & \\ \hat{X}_2 & \xrightarrow{p_2} & X \end{array}$$

Wieder liefert der Hebungssatz: $\exists g : \hat{X}_2 \rightarrow \hat{X}_1$ mit $p_1 \circ g = p_2$, $g(\hat{x}_2) = \hat{x}_1$. Betrachte nun

$$\begin{array}{ccc} & \hat{X}_1 & \\ g \circ f \nearrow & \downarrow p_1 & \\ \hat{X}_1 & \xrightarrow{p_1} & X \end{array}$$

$\text{id}_{\hat{X}_1}$

Die Eindeutigkeit im Hebungssatz liefert $g \circ f = \text{id}_{\hat{X}_1}$. Analog folgt $f \circ g = \text{id}_{\hat{X}_2}$. \square

13.3. Satz (Universelle Überlagerung) Sei X wegzusammenhängend, lokal wegzusammenhängend und lokal einfach zusammenhängend. Dann gibt es eine wegzusammenhängende und einfach zusammenhängende Überlagerung $\tilde{X} \xrightarrow{p} X$.

KONSTRUKTIONSSKIZZE: Sei $x_0 \in X$. Sei $P = \{\omega : [0, 1] \rightarrow X \mid \omega(0) = x_0\}$. Sei

$$\tilde{X} := P / \text{Homotopie mit festen Endpunkten}$$

Dann induziert $\omega \mapsto \omega(1)$ eine wohldefinierte Abbildung $p : \tilde{X} \rightarrow X$. Sei $\omega \in P$ und V eine wegzusammenhängende, einfach zusammenhängende Umgebung von $\omega(1)$ in X . Setze

$$U(V, \omega) = \left\{ [\omega * \eta] \mid \eta : [0, 1] \rightarrow V \text{ Weg mit } \eta(0) = \omega(1) \right\}$$

Die $U(V, \omega)$ bilden die Basis der Topologie von \tilde{X} . Da V wegzusammenhängend und einfach zusammenhängend ist, ist

$$p|_{U(V, \omega)} : U(V, \omega) \rightarrow V$$

bijektiv. Da X lokal wegzusammenhängend und lokal einfach zusammenhängend ist, ist $p|_{U(V,\omega)}$ sogar ein Homöomorphismus. Damit ist V eine elementare Umgebung von $\omega(1)$. Da X wegzusammenhängend ist, ist p auch surjektiv und $p: \tilde{X} \rightarrow X$ eine Überlagerung.

\tilde{X} ist wegzusammenhängend: Sei $\tilde{x}_0 := [c_{x_0}] \in \tilde{X}$. Sei $\tilde{x} = [\omega] \in \tilde{X}$. Sei $\omega_s: [0, 1] \rightarrow X$ mit

$$\omega_s(t) = \begin{cases} \omega(t), & \text{falls } t \leq s \\ \omega(s), & \text{falls } t \geq s \end{cases}$$

Dann ist $\alpha: [0, 1] \rightarrow \tilde{X}$ mit $\alpha(s) = [\omega_s]$ ein Weg von \tilde{x}_0 nach \tilde{x} . Damit ist \tilde{X} wegzusammenhängend.

13.4. Definition $\tilde{X} \xrightarrow{p} X$ heißt die **universelle Überlagerung** von X .

13.5. Klassifikationssatz (Existenz) Sei X wegzusammenhängend, lokal wegzusammenhängend und lokal einfach zusammenhängend. Sei $x_0 \in X$. Dann gibt es zu jeder Untergruppe $H \leq \pi_1(X, x_0)$ eine Überlagerung $q: \hat{X} \rightarrow X$ und $\hat{x}_0 \in p^{-1}(x_0)$ mit $q_*(\pi_1(\hat{X}, \hat{x}_0)) = H$

Setze dazu $Z = \hat{X}$
in 13.1

BEWEIS: Sei $p: \tilde{X} \rightarrow X$ die universelle Überlagerung. Der Hebungssatz impliziert, dass $p: \tilde{X} \rightarrow X$ normal ist. Es folgt $\Delta(p) \backslash \tilde{X} \cong X$ und $\pi_1(X, x_0) \simeq \Delta(p)$. Genauer: Zu $\tilde{x}_0 \in p^{-1}(x_0)$ gibt es einen Isomorphismus $\varphi: \Delta(p) \rightarrow \pi_1(X, x_0)$ mit

$$\varphi(f) = [p \circ \tilde{\omega}_f],$$

wobei $\tilde{\omega}_f: [0, 1] \rightarrow \tilde{X}$ ein Weg von \tilde{x}_0 nach $f(\tilde{x}_0)$ ist. Setze $H_\Delta := \varphi^{-1}(H) \leq \Delta(p)$. Wir erhalten Überlagerungen $\tilde{X} \xrightarrow{q'} H_\Delta \backslash \tilde{X} \xrightarrow{q} X$ mit $q'(x) = H_\Delta x$ und $q(H_\Delta x) = p(x)$. Da \tilde{X} einfach zusammenhängend ist, ist $\pi_1(H_\Delta \backslash \tilde{X}, H_\Delta \hat{x}_0) \cong H_\Delta$ nach Satz 12.4. Sei $\hat{x}_0 := H_\Delta \tilde{x}_0$. Genauer gibt es einen Isomorphismus

$$\psi: H_\Delta \rightarrow \pi_1(H_\Delta \backslash \tilde{X}, \hat{x}_0) \quad \text{mit} \quad \psi(f) = [q' \circ \omega_f].$$

Es folgt

$$q_*(\psi(f)) = q_*[q' \circ \omega_f] = [q \circ q' \circ \omega_f] = [p \circ \omega_f] = \varphi(f)$$

Also $q_*(\pi_1(H_\Delta \backslash \tilde{X}, \hat{x}_0)) = H$. Mit $\hat{X} := H_\Delta \backslash \tilde{X}$ folgt die Behauptung. \square

14. Höhere Homotopiegruppen

Dieses Kapitel ist nur ein kleiner Exkurs zu einem Thema, das auch ganze Vorlesungsreihen füllen könnte.

14.1. Rückblick Sei (X, x_0) ein punktierter Raum. Sei in diesem Abschnitt $I = [0, 1]$.

Wegzusammenhang: Punkte in X können wir auch wie folgt verstehen: $I^0 = \{x\} \rightarrow X$. Wege in X sind dann Homotopien solcher Abbildungen. $\pi_0(X, x_0)$ ist dann die (punktierte) Menge der Homotopieklassen von Abbildungen $I^0 \rightarrow X$.

Fundamentalgruppe: Die Schleifen in X sind stetige Abbildungen $\omega : I \rightarrow X$ mit $\omega(0) = x_0 = \omega(1)$. $\pi_1(X, x_0)$ ist die Menge der Homotopieklassen von Schleifen und heißt die **Fundamentalgruppe**.

Ziel: Definition von höher dimensionalen Analoga.

14.2. Definition Seien $\omega_0, \omega_1 : I^n \rightarrow X$ stetige Abbildungen mit $\omega_0(\partial I^n) = \{x_0\} = \omega_1(\partial I^n)$. Eine **Homotopie** (relativ zum Rand) zwischen ω_0 und ω_1 ist eine stetige Abbildung $H : I^n \times [0, 1] \rightarrow X$, sodass Folgendes gilt:

- $H(s_1, \dots, s_n, 0) = \omega_0(s_1, \dots, s_n)$ für alle $(s_1, \dots, s_n) \in I^n$
- $H(s_1, \dots, s_n, 1) = \omega_1(s_1, \dots, s_n)$ für alle $(s_1, \dots, s_n) \in I^n$
- $H(s_1, \dots, s_n, t) = x_0$ für alle $t \in [0, 1]$, $(s_1, \dots, s_n) \in \partial I^n$

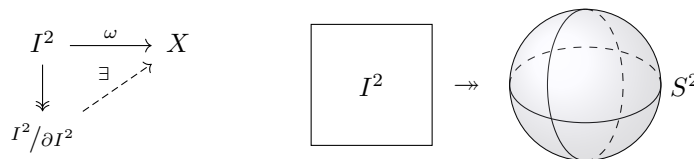
BEMERKUNGEN:

- Homotopie relativ zum Rand definiert eine Äquivalenzrelation auf der Menge der stetigen Abbildungen $I^n \rightarrow X$.
- Für $n = 1$ erhalten wir die Begriffe aus Kapitel 9.

14.3. Definition Sei (X, x_0) ein punktierter Raum. Definiere $\pi_n(X, x_0)$ als die Menge der Homotopieklassen $[\omega]$ von stetigen Abbildungen $\omega : I^n \rightarrow X$ mit $\omega(\partial I^n) = \{x_0\}$.

für $n > 0$

BEMERKUNG: Wenn wir den Rand auf einen Punkt kollabieren, erhalten wir zum Beispiel für $n = 2$:



Allgemein erhalten wir für jede stetige Abbildung $\omega : I^n \rightarrow X$ mit $\omega(\partial I^n) = \{x_0\}$ eine punktierte Abbildung $(S^n, s_0) \rightarrow (X, x_0)$.

14.4. Definition Sei $1 \leq k \leq n$ und seien $\omega_1, \omega_2 : I^n \rightarrow X$ stetig mit $\omega_i(\partial I^n) = \{x_0\}$ für $i = 1, 2$. Definiere:

$$(\omega_1 * \omega_2)(s_1, \dots, s_n) := \begin{cases} \omega_1(s_1, \dots, s_{k-1}, 2s_k, s_{k+1}, \dots, s_n), & \text{falls } 0 \leq s_k \leq \frac{1}{2} \\ \omega_2(s_1, \dots, s_{k-1}, 2s_k - 1, s_{k+1}, \dots, s_n), & \text{falls } \frac{1}{2} \leq s_k \leq 1 \end{cases}$$

(vergleiche Definition 9.7)

14.5. Lemma (Eckmann-Hilton-Argument) Sei A eine Menge mit zwei inneren Verknüpfungen $\square, \diamond : A \times A \rightarrow A$, sodass gilt:

- a) Es gibt $e \in A$ mit $e \square a = a \square e = a = e \diamond a = a \diamond e$ für alle $a \in A$
- b) Für alle $a, b, c, d \in A$ gilt $(a \square b) \diamond (c \square d) = (a \diamond c) \square (b \diamond d)$.

Dann stimmen \square und \diamond überein, sind assoziativ und kommutativ.

BEWEIS:

$$\begin{aligned} a \square b &= (e \diamond a) \square (b \diamond e) = (e \square b) \diamond (a \square e) = b \diamond a \\ b \diamond a &= (b \square e) \diamond (e \square a) = (b \diamond e) \square (e \diamond a) = b \square a \\ a \square (b \square c) &= (a \diamond e) \square (b \diamond c) = (a \square b) \diamond (e \square c) = (a \square b) \square c \end{aligned}$$

$\Rightarrow \square = \diamond$ und ist assoziativ und kommutativ. □

14.6. Proposition

- a) Sei $1 \leq k \leq n$ und seien $\omega_0, \omega'_0, \omega_1, \omega'_1 : I^n \rightarrow X$ stetig mit $\omega_i(\partial I^n) = \{x_0\} = \omega'_i(\partial I^n)$ für $i = 0, 1$. Es gelte $[\omega_0] = [\omega_1]$ und $[\omega'_0] = [\omega'_1]$ in $\pi_n(X, x_0)$. Dann gilt

$$[\omega_0 *_k \omega'_0] = [\omega_1 *_k \omega'_1] \in \pi_n(X, x_0)$$

Schreibe \cdot_k für die induzierte Verknüpfung.

- b) Seien $1 \leq k, l \leq n$. Dann gilt $\cdot_k = \cdot_l$. Für $n \geq 2$ ist \cdot kommutativ und außerdem assoziativ.
- c) $\pi_n(X, x_0)$ ist eine abelsche Gruppe für $n \geq 2$.
- d) Sei $f : (X, x_0) \rightarrow (Y, y_0)$ stetig. Dann definiert $[\omega] \mapsto [f \circ \omega]$ einen Gruppenhomomorphismus $\pi_n(f) : \pi_n(X, x_0) \rightarrow \pi_n(Y, y_0)$, falls $n \geq 1$.
- e) Es ist $\pi_n(\text{id}_X) = \text{id}_{\pi_n(X, x_0)}$ und $\pi_n(f \circ g) = \pi_n(f) \circ \pi_n(g)$.
- f) Ist f punktiert homotop zu g , so gilt $\pi_n(f) = \pi_n(g)$.

BEWEIS:

- a) Sei H eine Homotopie zwischen ω_0 und ω_1 und H' eine Homotopie zwischen ω'_0 und ω'_1 . Dann ist $H *_k H'$ die gesuchte Homotopie. (vgl. 9.8)

- b) Für $n = 2$

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} \omega *_1 \omega' \\ \omega'' *_1 \omega''' \end{pmatrix} \begin{matrix} *_2 \\ *_1 \end{matrix} = \begin{array}{|c|c|} \hline \omega & \omega' \\ \hline \omega'' & \omega''' \\ \hline \end{array} = \begin{pmatrix} \omega \\ *_2 \\ \omega'' \end{pmatrix} *_1 \begin{pmatrix} \omega' \\ *_2 \\ \omega''' \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Mit dem Eckmann-Hilton-Argument folgt $\cdot_k = \cdot_l$, die Kommutativität und die Assoziativität.

- c) Nur die Existenz von Inversen muss noch gezeigt werden: Gegeben $\omega : I^n \rightarrow X$. Wähle $1 \leq k \leq n$ und setze

$$\bar{\omega}(s_1, \dots, s_n) := \omega(s_1, \dots, s_{k-1}, 1 - s_k, s_{k+1}, \dots, s_n).$$

Dann ist $[\bar{\omega}]$ das Inverse von $[\omega]$, da $[\bar{\omega} *_k \omega]$ nullhomotop ist.

d) einfach.

e) einfach.

f) einfach. □

14.7. Korollar Es gilt

$$(X, x_0) \simeq (Y, y_0) \implies \pi_n(X, x_0) \cong \pi_n(Y, y_0)$$

für alle n . Insbesondere: (X, x_0) zusammenziehbar $\implies \pi_n(X, x_0) = 0$ für $n \geq 2$.

14.8. Proposition Sei $p : \hat{X} \rightarrow X$ Überlagerung und $\hat{x}_0 \in \hat{X}, x_0 \in X$ mit $p(\hat{x}_0) = x_0$ Basispunkte. Dann ist $\pi_n(p) : \pi_n(\hat{X}, \hat{x}_0) \rightarrow \pi_n(X, x_0)$ ein Isomorphismus für $n \geq 2$.

BEWEIS: Übung Blatt 10 Aufgabe 3, siehe Anhang A.3 auf Seite 64.

14.9. Korollar Es ist $\pi_n(S^1, s_0) = 0$ für $n \geq 2$

BEWEIS: Es gibt eine Überlagerung $\mathbb{R} \rightarrow S^1$. Da \mathbb{R} zusammenziehbar ist, folgt die Behauptung aus 14.8. □

14.10. Definition Eine stetige Abbildung $p : E \rightarrow B$ heißt (Serre-)Faserung, falls sie folgende Homotopiehebungseigenschaft hat: Für jedes $n \geq 0$, jede Homotopie $H : I^n \times [0, 1] \rightarrow B$ und jede partielle Hebung $\tilde{H} : I^n \times \{0\} \cup \partial I^n \times [0, 1] \rightarrow E$ existiert eine Hebung \bar{H} von H entlang p , die \tilde{H} fortsetzt. Nenne $p^{-1}(b)$ die **Faser** über b .

$$\begin{array}{ccc}
 I^n \times \{0\} \cup \partial I^n \times [0, 1] & \xrightarrow{\tilde{H}} & E \\
 \downarrow & \nearrow \bar{H} & \downarrow p \\
 I^n \times [0, 1] & \xrightarrow{H} & B
 \end{array}$$

BEISPIELE:

- Überlagerungen sind Faserungen (!)
- Die Projektion $B \times F \rightarrow B$ ist eine Faserung.

14.11. Satz Sei $p : E \rightarrow B$ eine Faserung. Seien $b_0 \in B, e_0 \in E$ mit $p(e_0) = b_0$. Setze $F := p^{-1}(b_0)$. Sei $i : (F, e_0) \hookrightarrow (E, e_0)$ die Inklusion. Dann existiert eine lange exakte Sequenz

$$\begin{aligned} \dots \pi_{n+1}(B, b_0) &\xrightarrow{\partial_{n+1}} \pi_n(F, e_0) \xrightarrow{\pi_n(i)} \pi_n(E, e_0) \xrightarrow{\pi_n(p)} \pi_n(B, b_0) \xrightarrow{\partial_n} \pi_{n-1}(F, e_0) \dots \\ \dots &\longrightarrow \pi_1(B, b_0) \xrightarrow{\partial_1} \pi_0(F, e_0) \xrightarrow{\pi_0(i)} \pi_0(E, e_0) \xrightarrow{\pi_0(p)} \pi_0(B, b_0) \end{aligned}$$

D.h.

- ∂_n ist ein Homomorphismus für $n > 2$
- $\ker \pi_n(p) = \text{Im } \pi_n(i)$, $\ker(\partial_{n+1}) = \text{Im } \pi_{n+1}(p)$, $\ker \pi_n(i) = \text{Im } \partial_{n+1}$ für $n \geq 1$
- $\partial_1(x) = [e_0] \iff x \in \text{Im } \pi_1(p)$
- $\pi_0(i)(x) = [e_0] \iff x \in \text{Im } \partial_1$
- $\pi_0(p)(x) = [b_0] \iff x \in \text{Im } \pi_0(i)$

ZUM BEWEIS: Definition von ∂_n : Sei $\omega : I^n \rightarrow B, \omega(\partial I^n) = \{b_0\}$. Fasse ω als Homotopie $I^{n-1} \times [0, 1] \rightarrow B$ auf. Dann ist die konstante Abbildung $\text{const}_{e_0} : I^{n-1} \times \{0\} \cup \partial I^{n-1} \times [0, 1] \rightarrow E$ mit Wert e_0 eine partielle Hebung. Da p eine Faserung ist, existiert eine Hebung $\tilde{\omega} : I^{n-1} \times [0, 1] \rightarrow E$, die const_{e_0} fortsetzt.

$$\begin{array}{ccc} I^{n-1} \times \{0\} \cup \partial I^{n-1} \times [0, 1] & \xrightarrow{\text{const}_{e_0}} & E \\ \downarrow & \searrow \tilde{\omega} & \downarrow p \\ I^{n-1} \times [0, 1] & \xrightarrow{\omega} & B \end{array}$$

Definiere nun $\partial_n([\omega]) := [\tilde{\omega}|_{I^{n-1} \times \{1\}}]$.

Wohldefiniertheit: Seien $\omega, \omega' : I^n \rightarrow B$ mit $[\omega] = [\omega']$, d.h. es gibt eine Homotopie $H : I^n \times [0, 1] \rightarrow B$ zwischen ω und ω' . Sei

$$J := I^{n-1} \times \{0\} \times [0, 1] \cup I^n \times \{0\} \cup I^n \times \{1\} \cup \partial I^{n-1} \times I \times [0, 1]$$

Diese Menge ist homöomorph zu $I^n \times \{0\} \cup \partial I^n \times [0, 1]$ unter dem Homöomorphismus $I^{n+1} \cong I^{n+1}$, der die letzte und vorletzte Koordinate vertauscht.

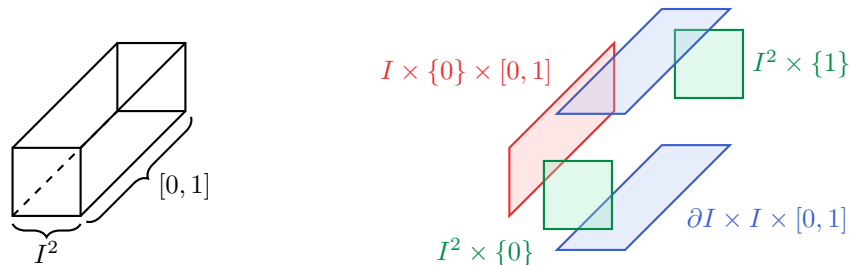


Abbildung 10: Die Menge J für $n = 2$

Wir können eine partielle Hebung $\tilde{H} : J \rightarrow E$ von H definieren, indem wir $\tilde{H}|_{I^n \times \{0\}} = \tilde{\omega}$ und $\tilde{H}|_{I^n \times \{1\}} = \tilde{\omega}'$ setzen und \tilde{H} sonst konstant e_0 sein lassen ($\tilde{\omega}$ und $\tilde{\omega}'$ sind gewählte Hebungen von ω und ω'). Nach der Vorbemerkung über J können wir \tilde{H} zu einer Hebung \tilde{H} von H fortsetzen. Dann ist $\tilde{H}|_{I^{n-1} \times \{1\} \times [0,1]}$ eine Homotopie zwischen $\tilde{\omega}|_{I^{n-1} \times \{1\}}$ und $\tilde{\omega}'|_{I^{n-1} \times \{1\}}$ in F .

Homomorphismus: Wir betrachten Exaktheit nur an den Stellen, an denen alle beteiligten Abbildungen Homomorphismen sind.

Exaktheit bei $\pi_n(E, e_0)$: Sei $[\omega] \in \pi_n(F, e_0)$. Dann ist $p \circ i \circ \omega \equiv b_0$, also $\text{Im } \pi_n(i) \subseteq \ker \pi_n(p)$.

Sei nun $[\omega] \in \pi_n(E, e_0)$, sodass eine Homotopie $H : I^n \times [0, 1] \rightarrow B$ zwischen $p \circ \omega$ und const_{b_0} existiert, also $[\omega] \in \ker \pi_n(p)$. Indem wir ω durch die konstante Abbildung auf $I^n \times \{0\} \cup \partial I^n \times [0, 1]$ fortsetzen, können wir die Homotopiehebungseigenschaft anwenden und erhalten eine Hebung \tilde{H} von H . Diese Hebung ist eine Homotopie zwischen ω und $\omega' := \tilde{H}|_{I^n \times \{1\}}$. Da $p \circ \omega' = \text{const}_{b_0}$, ist $\omega' : I^n \rightarrow F$. Also $\text{Im } \pi_n(i) \subseteq \ker \pi_n(p)$.

Exaktheit bei $\pi_n(B, b_0)$: Sei $\omega : I^n \rightarrow E$. Dann ist ω selbst eine zulässige Hebung für $p \circ \omega$, wie wir sie in der Definition von ∂_n benutzt haben. Also ist

$$\partial_n([p \circ \omega]) = [\omega|_{I^{n-1} \times \{1\}}] = [\text{const}_{e_0}],$$

d.h. $\text{Im } \pi_n(p) \subseteq \ker \partial_n$.

Gelte nun $[\omega] \in \ker \partial_n$, d.h. es gibt eine Homotopie H zwischen $\tilde{\omega}|_{I^{n-1} \times \{1\}}$ und const_{e_0} in F . Dann definiert $[\tilde{\omega} *_n H]$ ein Element in $\pi_n(E, e_0)$ und $p \circ (\tilde{\omega} *_n H) = \omega *_n \text{const}_{b_0}$, da H eine Homotopie in F ist. Also gilt $\ker \partial_n \subseteq \text{Im } \pi_n(p)$.

Notation wie in Def. von ∂_n

Exaktheit bei $\pi_n(F, e_0)$: Sei $[\omega] \in \pi_n(B, b_0)$. Wähle $\tilde{\omega}$ wie in der Definition von ∂_n . Dann ist $\tilde{\omega}$ eine Homotopie zwischen $i \circ \tilde{\omega}|_{I^{n-1} \times \{1\}}$ und const_{e_0} , also $\text{Im } \partial_{n+1} \subseteq \ker \pi_n(i)$.

Sei nun $[\omega] \in \pi_n(F, e_0)$, sodass eine Homotopie $H : I^n \times [0, 1] \rightarrow E$ zwischen $i \circ \omega$ und const_{e_0} existiert. Diese Homotopie ist eine Hebung von $p \circ H$, die zeigt, dass $\partial_{n+1}([p \circ H]) = [\omega]$. Also $\ker \pi_n(i) \subseteq \text{Im } \partial_{n+1}$. \square

14.12. Anwendung Es gibt eine Faserung $S^3 \xrightarrow{p} S^2$, sodass $p^{-1}(s) \cong S^1$ („Hopf-Faserung“). Es gilt $\pi_1(S^n) = 1$ für $n \geq 2$ und $\pi_2(S^3) = 0$. Betrachte nun:

$$\begin{array}{ccccccc} \dots & \longrightarrow & \underbrace{\pi_3(S^1)}_{=0} & \longrightarrow & \pi_3(S^3) & \longrightarrow & \pi_3(S^2) \longrightarrow \underbrace{\pi_2(S^1)}_{=0} \\ & & & & & & \\ & & \longrightarrow & \underbrace{\pi_2(S^3)}_{=0} & \longrightarrow & \pi_2(S^2) & \longrightarrow \pi_1(S^1) \longrightarrow \underbrace{\pi_1(S^3)}_{=1} \longrightarrow \dots \end{array}$$

Mit Exaktheit folgt $\pi_2(S^2) \cong \pi_1(S^1) \cong \mathbb{Z}$ und $\pi_3(S^3) \cong \pi_3(S^2)$. Tatsächlich gilt sogar $\pi_3(S^3) \cong \mathbb{Z}$.

15. Differenzierbare Mannigfaltigkeiten

15.1. Frage Sei M eine topologische Mannigfaltigkeit. Welche Funktionen $f : M \rightarrow \mathbb{R}$ sind differenzierbar? Was sind Richtungsableitungen für solche Funktionen? Was sind Richtungen in M ?

ANSATZ: $f : M \rightarrow \mathbb{R}$ heißt $C^\infty \Leftrightarrow$

$$\forall x \in M : \exists U \subseteq M \text{ offen mit } x \in U \text{ und } h : U \xrightarrow{\sim} V \subseteq \mathbb{R}^n : f \circ h^{-1} : V \rightarrow \mathbb{R} \text{ ist } C^\infty$$

ABER::

- a) Ob $f \circ h^{-1} : V \rightarrow \mathbb{R}$ C^∞ ist oder nicht, hängt von der Wahl von h ab.
- b) Jeder Homöomorphismus $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ ist in dieser Definition C^∞ !

15.2. Definition Sei M^n eine topologische n -Mannigfaltigkeit.

- a) Eine **Karte** für M ist ein Homöomorphismus $h : U \xrightarrow{\sim} V$ mit $U \subseteq M$ offen, $V \subseteq \mathbb{R}^n$ offen. U heißt das **Kartengebiet** von h . Ist $x \in U$, so heißt h eine **Karte um** x .
- b) Sind $h_i : U_i \xrightarrow{\sim} V_i$, $i = 0, 1$ zwei Karten, so heißt

$$h_1 \circ h_0^{-1} \Big|_{h_0(U_0 \cap U_1)} : \underset{\subseteq V_0 \subseteq \mathbb{R}^n}{h_0(U_0 \cap U_1)} \rightarrow \underset{\subseteq V_1 \subseteq \mathbb{R}^n}{h_1(U_0 \cap U_1)}$$

der **Kartenwechsel** zwischen h_0 und h_1 . Ein Kartenwechsel ist ein Homöomorphismus zwischen offenen Teilmengen des \mathbb{R}^n .

- c) Eine Menge von Karten $\{h_\alpha : U_\alpha \rightarrow V_\alpha \mid \alpha \in A\}$ heißt ein **Atlas** für M , wenn die Kartengebiete U_α die Mannigfaltigkeit überdecken: $M = \bigcup_{\alpha \in A} U_\alpha$
- d) Ein Atlas \mathcal{A} heißt C^∞ (oder **glatt**), wenn alle Kartenwechsel zwischen Karten aus \mathcal{A} C^∞ -Abbildungen sind.

15.3. Definition Eine C^∞ -Mannigfaltigkeit ist eine topologische Mannigfaltigkeit zusammen mit einem C^∞ -Atlas \mathcal{A} .

15.4. Beispiele

- (1) $U \subseteq \mathbb{R}^n$ offen ist eine C^∞ -Mannigfaltigkeit mit Atlas $\{\text{id}_U\}$.
- (2) S^n ist eine C^∞ -Mannigfaltigkeit: Definiere Kartengebiete $U_{k,j} := \{x \in S^n \mid (-1)^j x_k > 0\}$ für $k = 0, \dots, n$, $j = 0, 1$. Sei

$$h_{k,j} : U_{k,j} \rightarrow \overset{\circ}{D}^n = \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x\|_2 < 1\}$$

mit

$$h_{k,j}(x_0, \dots, x_n) = (x_0, \dots, x_{k-1}, x_{k+1}, \dots, x_n)$$

Dann ist $\mathcal{A} = \{h_{k,j} \mid k = 0, \dots, n, j = 0, 1\}$ ein C^∞ -Atlas für S^n .

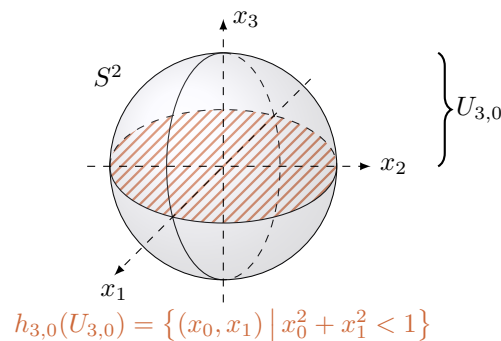


Abbildung 11: Die C^∞ -Mannigfaltigkeit S^2 mit dem Kartengebiet $U_{3,0}$

(3) $\mathbb{R}P^n = S^n / x \sim -x$ ist eine C^∞ -Mannigfaltigkeit: Setze

$$U_k := \{[(x_0, \dots, x_n)] \in \mathbb{R}P^n \mid x_k \neq 0\}$$

und definiere $h_k : U_k \rightarrow \mathring{D}^n$ durch

$$h_k([x_0, \dots, x_n]) = \frac{x_k}{|x_k|}(x_0, \dots, x_{k-1}, x_{k+1}, \dots, x_n).$$

Dann ist $\{h_k \mid k = 0, \dots, n\}$ ein C^∞ -Atlas für $\mathbb{R}P^n$.

(4) Sind (M, \mathcal{A}) und (N, \mathcal{B}) C^∞ -Mannigfaltigkeiten, so ist $\{h \times k \mid h \in \mathcal{A}, k \in \mathcal{B}\}$ ein C^∞ -Atlas für $M \times N$.

15.5. Bemerkung Sei (M, \mathcal{A}) eine C^∞ -Mannigfaltigkeit. Eine Karte $h : U \rightarrow V$ für M (nicht notwendig in \mathcal{A}) heißt eine C^∞ -Karte, wenn alle Kartenwechsel zwischen h und einer Karte aus \mathcal{A} C^∞ sind. Offenbar besteht \mathcal{A} aus C^∞ -Karten. Es ist auch $\mathcal{A}_{\max} := \{h \mid h \text{ ist } C^\infty\text{-Karte}\}$ ein C^∞ -Atlas für M . Dieser Atlas ist maximal, d.h. man kann keine weiteren Karten zu \mathcal{A}_{\max} hinzufügen und immer noch einen C^∞ -Atlas erhalten.

15.6. Definition Seien M, N C^∞ -Mannigfaltigkeiten. Sei $f : M \rightarrow N$ eine stetige Abbildung.

a) Sei $x \in M$. f heißt C^∞ oder **glatt** in x , wenn es eine Karte $h_0 : U_0 \rightarrow V_0$ von M um x und $h_1 : U_1 \rightarrow V_1$ von N um $f(x)$ gibt, sodass

$$h_1 \circ f \circ h_0^{-1}$$

auf einer Umgebung von $h_0(x)$ eine C^∞ -Abbildung ist.

b) Ist f in allen $x \in M$ glatt, so heißt f eine C^∞ -**Abbildung**. Wir schreiben $C^\infty(M, N)$ für die Menge der C^∞ -Abbildungen von M nach N .

c) M und N heißen **diffeomorph** (\cong), wenn es $f \in C^\infty(M, N)$ und $g \in C^\infty(N, M)$ gibt mit $f \circ g = \text{id}_N$ und $g \circ f = \text{id}_M$.

\approx homöomorph
 \cong diffeomorph

In diesem Fall heißen f und g **Diffeomorphismen**.

BEISPIEL: (M, \mathcal{A}) und (M, \mathcal{A}_{\max}) sind diffeomorph: $\text{id}_M : (M, \mathcal{A}) \rightarrow (M, \mathcal{A}_{\max})$ ist ein Diffeomorphismus.

15.7. Bemerkung

- a) Ist $f : M \rightarrow N$ glatt in x , so ist $h_1 \circ f \circ h_0^{-1}$ glatt in einer Umgebung von $h_0(x)$ für alle Wahlen von C^∞ -Karten h_0 um x und h_1 um $f(x)$.
- b) Die Komposition von C^∞ -Abbildungen ist wieder eine C^∞ -Abbildung.
- c) Ist $f : M \rightarrow N$ bijektiv und C^∞ ist, so ist f noch nicht notwendigerweise ein Diffeomorphismus. (z.B. $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto x^3$)

15.8. Bemerkung

- a) Es gibt C^∞ -Mannigfaltigkeiten M und N , sodass M und N zueinander homöomorph sind, aber nicht diffeomorph sind. Dabei kann man sogar $M = S^7$ wählen.
- b) Es gibt topologische Mannigfaltigkeiten, auf denen kein C^∞ -Atlas existiert.

15.9. Definition Eine Teilmenge $N \subseteq M^{n+k}$ einer $(n+k)$ -dimensionalen C^∞ -Mannigfaltigkeit M , heißt eine n dimensionale C^∞ -**Untermannigfaltigkeit**, wenn es um jedes $x \in N$ eine Karte $h : U \rightarrow V \subseteq \mathbb{R}^{n+k}$ für M gibt, so dass $h(N \cap U) = V \cap (\mathbb{R}^n \times \{0\})$. $k = \dim M - \dim N$ heißt die **Kodimension** von N in M . Durch Einschränkung dieser Karten von M auf N erhalten wir einen C^∞ -Atlas für N . Insbesondere ist N eine n -dimensionale C^∞ -Mannigfaltigkeit.

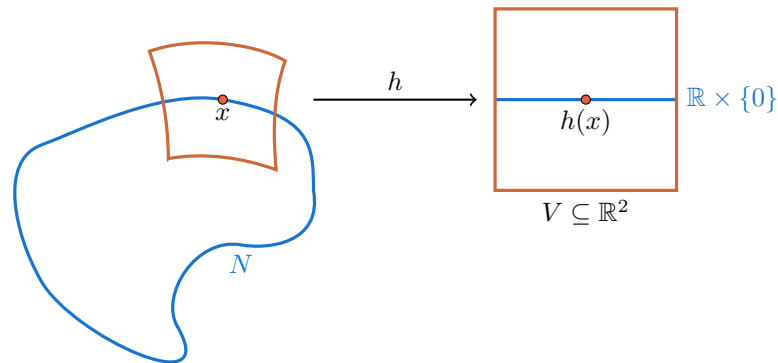


Abbildung 12: Skizze einer Untermannigfaltigkeit N der Mannigfaltigkeit $M = \mathbb{R}^2$

15.10. Definition Eine C^∞ -Abbildung $f : N \rightarrow M$ heißt eine **Einbettung**, wenn $f(N) \subseteq M$ eine C^∞ -Untermannigfaltigkeit ist und $f : N \rightarrow f(N)$ ein Diffeomorphismus ist.

16. Reguläre Werte

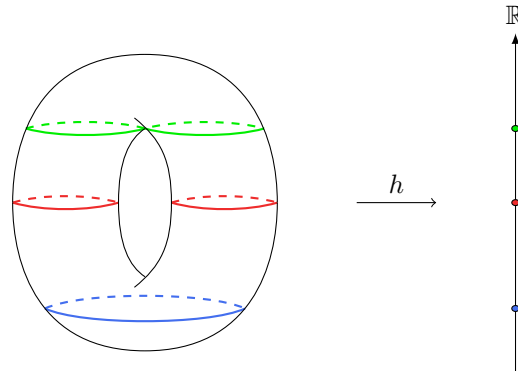


Abbildung 13: Höhenfunktion beim T^2 Torus

16.1. Beispiel

16.2. Definition Sei $U \subseteq \mathbb{R}^n$ offen und $f : U \rightarrow \mathbb{R}^m$ eine C^∞ -Abbildung. Für $x \in U$ sei $Df_x : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ das **Differential** von f in x . Der Rang der linearen Abbildung $Df_x : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ heißt der **Rang** von f in x .

16.3. Definition Seien N^n und M^m glatte Mannigfaltigkeiten mit $\dim N = n, \dim M = m$. Sei $f : N \rightarrow M$ glatt und $x \in N$. Seien $h_0 : U_0 \rightarrow V_0 \subseteq \mathbb{R}^n$ und $h_1 : U_1 \rightarrow V_1 \subseteq \mathbb{R}^m$ Karten von N um x und M um $f(x)$. Der **Rang** von f in x ist erklärt als

$$\text{Rg}_x f := \text{Rang} \left(D(h_1 \circ f \circ h_0^{-1})_{h_0(x)} \right).$$

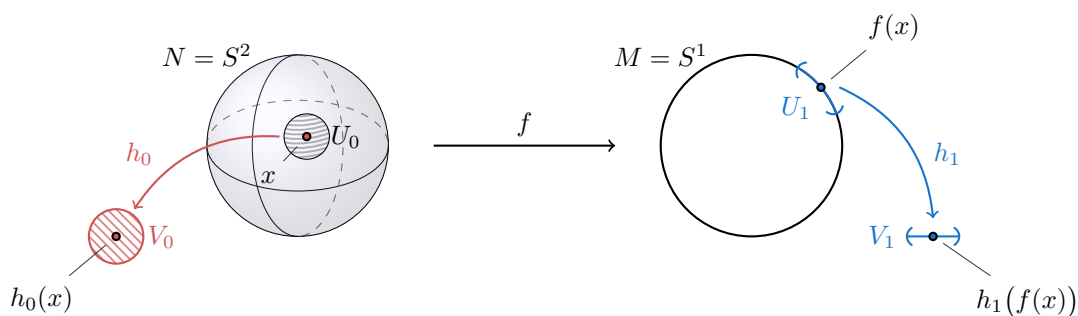


Abbildung 14: Diagramm zur Definition des Ranges einer glatten Abbildung $f : N \rightarrow M$

16.4. Lemma Sind $\hat{h}_0 : \hat{U}_0 \rightarrow \hat{V}_0$ und $\hat{h}_1 : \hat{U}_1 \rightarrow \hat{V}_1$ zwei weitere Karten um x und $f(x)$, so gilt:

$$\text{Rang} \left(D(h_1 \circ f \circ h_0^{-1})_{h_0(x)} \right) = \text{Rang} \left(D(\hat{h}_1 \circ f \circ \hat{h}_0^{-1})_{\hat{h}_0(x)} \right)$$

Insbesondere hängt $\text{Rg}_x f$ nicht von der Wahl von Karten ab.

BEWEIS:

$$\begin{aligned} D(\hat{h}_1 \circ f \circ \hat{h}_0^{-1})_{\hat{h}_0(x)} &= D(\hat{h}_1 \circ h_1^{-1} \circ h_1 \circ f \circ h_0^{-1} \circ h_0 \circ \hat{h}_0^{-1})_{\hat{h}_0(x)} \\ &= D(\hat{h}_1 \circ h_1^{-1})_{h_1(f(x))} \circ D(h_1 \circ f \circ h_0^{-1})_{h_0(x)} \circ D(h_0 \circ \hat{h}_0^{-1})_{\hat{h}_0(x)} \end{aligned}$$

Da $\hat{h}_1 \circ h_1^{-1}$ und $h_0 \circ \hat{h}_0^{-1}$ Diffeomorphismen (um $h_1(f(x))$ bzw. $\hat{h}_0(x)$) sind, sind $D(\hat{h}_1 \circ h_1^{-1})_{h_1(f(x))}$ und $D(h_0 \circ \hat{h}_0^{-1})_{\hat{h}_0(x)}$ invertierbar. Es folgt die Behauptung. \square

16.5. Definition Sei $f : N \rightarrow M$ eine C^∞ -Abbildung.

- a) $x \in N$ heißt **regulär** für f , wenn $\text{Rg}_x f = \dim M$.
- b) $y \in M$ heißt ein **regulärer Wert** für f , falls alle $x \in f^{-1}(y)$ regulär sind.

16.6. Satz (Urbilder regulärer Werte) Sei $f : N \rightarrow M$ eine C^∞ -Abbildung und $y \in M$ ein regulärer Wert. Dann ist $f^{-1}(y)$ eine Untermannigfaltigkeit der Kodimension $\dim M$ von N .

BEWEIS: Sei $x \in f^{-1}(y)$. Zu zeigen: \exists Karte $\varphi : U \rightarrow V \subseteq \mathbb{R}^k \times \mathbb{R}^m$ um x mit

$$\{u \in U \mid f(u) = y\} = \{\varphi^{-1}(x, 0) \mid (x, 0) \in V\}.$$

Da es Karten um x und y gibt, können wir oBdA annehmen, dass $N \subseteq \mathbb{R}^k \times \mathbb{R}^m$ und $M \subseteq \mathbb{R}^m$ offene Teilmengen sind. Weiter können wir annehmen, dass $x = 0, y = 0$ gilt. Nach Voraussetzung ist $Df_0 : \mathbb{R}^k \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^m$ surjektiv. Indem wir f – falls nötig – um einen linearen Isomorphismus von $\mathbb{R}^{k+m} = \mathbb{R}^k \times \mathbb{R}^m$ ändern, können wir erreichen, dass $Df_0(\{0\} \times \mathbb{R}^m) = \mathbb{R}^m$ gilt.

Seien nun $0 \in U_1 \subseteq \mathbb{R}^k, 0 \in U_2 \subseteq \mathbb{R}^m$ offen mit $U_1 \times U_2 \subseteq N$. Mit dem Satz über implizite Funktionen (16.8) folgt: Es existieren V_1, V_2 offen, $0 \in V_1 \subseteq U_1, 0 \in V_2 \subseteq U_2$ und eine C^∞ -Abbildung $g : V_1 \rightarrow V_2$ mit: Für $(x_1, x_2) \in V_1 \times V_2$ gilt

$$f(x_1, x_2) = 0 \iff x_2 = g(x_1).$$

Betrachte nun

$$\begin{array}{ccc} V_1 \times V_2 & \xrightarrow{f} & M \\ \downarrow \varphi & & \\ \mathbb{R}^k \times \mathbb{R}^m & & \end{array}$$

mit $\varphi(x_1, x_2) = (x_1, x_2 - g(x_1))$. Für $(x_1, x_2) \in V_1 \times V_2$ gilt dann

$$f(x_1, x_2) = 0 \iff \varphi(x_1, x_2) \in \mathbb{R}^k \times \{0\}.$$

Weiter ist $D\varphi_0 = \begin{pmatrix} \text{id} & 0 \\ -Dg_0 & \text{id} \end{pmatrix}$ invertierbar. Mit dem Satz von der Umkehrfunktion folgt: Es existieren offene Umgebungen $0 \in U \subseteq V_1 \times V_2$ und $0 \in V \subseteq \mathbb{R}^k \times \mathbb{R}^m$, sodass $\varphi|_U : U \rightarrow V$ ein Diffeomorphismus ist. Dies ist die gesuchte Karte. \square

16.7. Beispiel Sei $O(n) = \{A \in \mathbb{R}^{n \times n} \mid A^t \cdot A = \mathbb{1}_n\}$ die Gruppe der orthogonalen $n \times n$ -Matrizen. Sei

$$S = \{B \in \mathbb{R}^{n \times n} \mid B = B^t\}.$$

Dann $S \cong \mathbb{R}^{\frac{n(n+1)}{2}}$. Nun ist $f : \mathbb{R}^{n \times n} \rightarrow S$ mit $f(A) = A^t \cdot A$ eine C^∞ -Abbildung und es ist $O(n) = f^{-1}(\mathbb{1}_n)$. Behauptung: $\mathbb{1}_n$ ist regulärer Wert von f . Dann folgt: $O(n)$ ist eine Untermannigfaltigkeit von $\mathbb{R}^{n \times n} \cong \mathbb{R}^{n^2}$.

Sei $A \in O(n)$, $B \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Für $\lambda \in \mathbb{R}$ ist dann

$$\begin{aligned} f(A + \lambda B) &= (A + \lambda B)^t (A + \lambda B) = A^t A + \lambda B^t A + \lambda A^t B + \lambda^2 B^t B \\ &= A^t A + \lambda(B^t A + A^t B) + \lambda^2 B^t B. \end{aligned}$$

Es folgt, dass die Richtungsableitung in Richtung B von f in A genau $B^t A + A^t B$ ist. Die Richtungsableitungen von f sind genau das Bild des Differentials von f in A . Für $B \in S$ ist mit $B := \frac{1}{2} A \cdot C$, $C = B^t A + A^t B$. Also ist das Differential surjektiv und A regulär für f . \square

16.8. Satz über implizite Funktionen (Analysis II.) Seien $U_1 \subseteq \mathbb{R}^n$ und $U_2 \subseteq \mathbb{R}^m$ offen. Seien $x_1 \in U_1$, $x_2 \in U_2$ und $f : U_1 \times U_2 \rightarrow \mathbb{R}^m$ eine C^∞ -Abbildung, für die

$$Df_{(x_1, x_2)} \Big|_{\{0\} \times \mathbb{R}^n} = \frac{\partial f}{\partial y}(x_1, x_2)$$

invertierbar ist. Dann gibt es eine C^∞ -Abbildung $g : V_1 \rightarrow V_2$ mit $x_1 \in V_1 \subseteq U_1$, $x_2 \in V_2 \subseteq U_2$, $g(x_1) = x_2$ und

$$\{(y_1, y_2) \in V_1 \times V_2 \mid f(y_1, y_2) = f(x_1, x_2)\} = \{(y_1, g(y_1)) \mid y_1 \in V_1\}.$$

BEWEIS: Siehe Skript Analysis II.⁴ \square

16.9. Satz von der Umkehrabbildung (Analysis II.) Seien $U_1 \subseteq \mathbb{R}^m$, $U_2 \subseteq \mathbb{R}^n$ offen, $x_1 \in U_1$. Sei $f : U_1 \rightarrow U_2$ eine C^∞ -Abbildung für die Df_{x_1} ein Isomorphismus ist. Dann gibt es offene Umgebungen $V_1 \subseteq U_1$ von x_1 und $V_2 \subseteq U_2$ von $f(x_1)$, so dass

$$f|_{V_1} : V_1 \rightarrow V_2$$

ein Diffeomorphismus ist. Weiter gilt $D(f^{-1})_{f(x_1)} = (Df_{x_1})^{-1}$.

BEWEIS: Siehe Skript Analysis II.⁴ \square

16.10. Bemerkung Nach dem Satz von Sard⁵ ist die Menge der **kritischen Werte**, also der nicht regulären Werte einer C^∞ -Abbildung $f : N \rightarrow M$ eine Menge mit Lebesgue-Maß Null. Insbesondere gibt es immer reguläre Werte.

⁴ Verfügbar unter <https://github.com/JaMeZ-B/latex-wwu>, siehe dazu auch Wikipedia

⁵ Wikipedia: https://de.wikipedia.org/wiki/Satz_von_Sard

17. Approximation durch C^∞ -Abbildungen

17.1. Proposition Sei M eine C^∞ -Mannigfaltigkeit. Dann ist $C_0^\infty(M, \mathbb{R}) := C^\infty(M, \mathbb{R}) \cap C_0(M, \mathbb{R})$ dicht in $C_0(M, \mathbb{R})$ bezüglich $\|\cdot\|_\infty$.

siehe 6.1 für $C_0(M, \mathbb{R})$

BEISPIEL (GLOCKENFUNKTIONEN): Seien $\psi, \varphi_\varepsilon : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ für $\varepsilon > 0$ gegeben durch

$$\psi(t) := \begin{cases} 0, & \text{falls } t \leq 0 \\ e^{-t^{-2}}, & \text{falls } t > 0 \end{cases}, \quad \varphi_\varepsilon(t) = \frac{\psi(t)}{\psi(t) + \psi(\varepsilon - t)}$$

ψ und φ_ε sind C^∞ -Funktionen (Analysis II.).

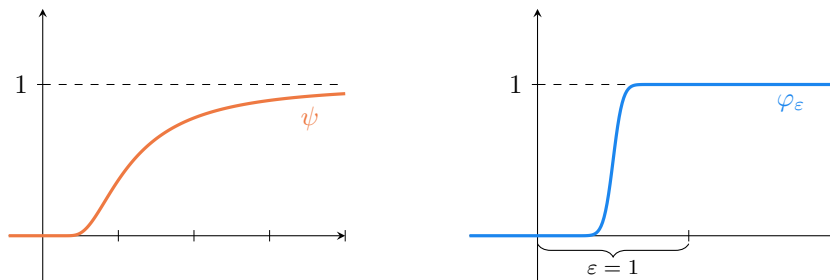


Abbildung 15: Die Funktionen ψ und φ_ε für $\varepsilon = 1$

Für $r > 0$ sei nun $f_{\varepsilon,r} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ gegeben durch $f_{\varepsilon,r}(x) = 1 - \varphi_\varepsilon(\|x\| - r)$.

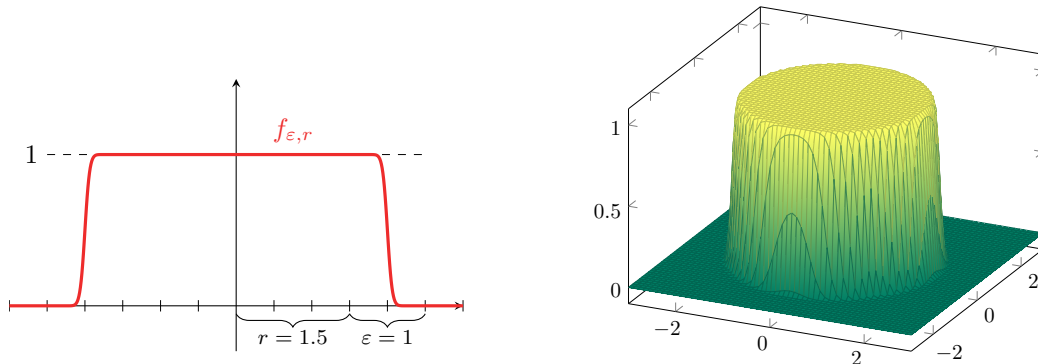


Abbildung 16: Glockenfunktion $f_{\varepsilon,r}$ für \mathbb{R} und \mathbb{R}^2 , wobei $\varepsilon = 1$, $r = 1.5$

Es ist $f_{\varepsilon,r} \in C^\infty(\mathbb{R}^n)$ und es gilt $f_{\varepsilon,r}(x) \subseteq [0, 1]$ für alle $x \in \mathbb{R}^n$. Weiter ist $f_{\varepsilon,r}(x) = 1$ für $|x| \leq r$, $f_{\varepsilon,r}(x) = 0$ für $|x| \geq r + \varepsilon$.

BEWEIS: Wir wollen den Approximationssatz von Stone-Weierstraß(6.3) anwenden: Dazu müssen wir zeigen:

$$\forall x, y \in M : \exists f \in C_0^\infty(M, \mathbb{R}) \text{ mit } f(x) \neq f(y) \text{ und } f(x) \neq 0 \neq f(y)$$

Wähle dazu Karten $\varphi : U \rightarrow V$ und $\hat{\varphi} : \hat{U} \rightarrow \hat{V}$ von M mit $x \in U$, $y \in \hat{U}$ und $U \cap \hat{U} = \emptyset$. Indem wir, wenn nötig, einen Isomorphismus von \mathbb{R}^n anwenden, können wir außerdem fordern, dass $\varphi(x) = 0$, $\hat{\varphi}(y) = 0$, $B_2(0) \subseteq V$ und $B_2(0) \subseteq \hat{V}$ gilt. Dann ist $f_x \in C_0^\infty(M, \mathbb{R})$ mit

$$f_x(z) = \begin{cases} 0, & \text{falls } z \notin U \\ f_{1/2,1}(\varphi(z)), & \text{sonst} \end{cases}$$

Dann gilt $f_x(x) = 1$ und $f_x(y) = 0$. Ebenso gibt es $f_y \in C_0^\infty(M, \mathbb{R})$ mit $f_y(x) = 0$ und $f_y(y) = 1$. Nun ist $f := 2f_x + f_y$ die gesuchte Funktion. \square

17.2. Korollar 1 Sei M eine kompakte C^∞ -Mannigfaltigkeit und $\varphi : M \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig. Dann gibt es zu jedem $\varepsilon > 0$ eine C^∞ -Abbildung $f : M \rightarrow \mathbb{R}^n$ mit $\|\varphi(x) - f(x)\|_2 \leq \varepsilon \quad \forall x \in M$.

BEWEIS: Schreibe $\varphi = (\varphi_1, \dots, \varphi_n)$ und approximiere die φ_i durch C^∞ -Funktionen. \square

17.3. Korollar 2 Sei M eine kompakte C^∞ -Mannigfaltigkeit und $\varphi : M \rightarrow S^n$ stetig. Dann gibt es zu jedem $\varepsilon > 0$ eine C^∞ -Abbildung $f : M \rightarrow S^n$ mit $\|f(x) - \varphi(x)\|_2 \leq \varepsilon$ für alle $x \in M$.

BEWEIS: Da $S^n \subseteq \mathbb{R}^{n+1}$, gibt es nach Korollar 1 (17.2) eine C^∞ -Abbildung $f_0 : M \rightarrow \mathbb{R}^{n+1}$ mit $\|f_0(x) - \varphi(x)\|_2 \leq \varepsilon \quad \forall x \in M$. OBdA sei $\varepsilon < 1$. Wegen $\varphi(x) \in S^n$ folgt

$$1 - \varepsilon \leq \|f_0(x)\|_2 \leq 1 + \varepsilon$$

Sei $f : M \rightarrow S^n$ die durch $f(x) := \frac{f_0(x)}{\|f_0(x)\|_2}$ definierte C^∞ -Abbildung. Dann gilt:

$$\begin{aligned} \|f(x) - \varphi(x)\| &\leq \|f(x) - f_0(x)\|_2 + \|f_0(x) - \varphi(x)\|_2 \\ &\leq \left\| \frac{f_0(x)}{\|f_0(x)\|_2} - f_0(x) \right\|_2 + \varepsilon \\ &= \left| 1 - \frac{1}{\|f_0(x)\|_2} \right| \cdot \|f_0(x)\|_2 + \varepsilon \\ &= \left| \frac{\|f_0(x)\|_2 - 1}{\|f_0(x)\|_2} \right| \cdot \|f_0(x)\|_2 + \varepsilon \\ &\leq \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} (1 + \varepsilon) + \varepsilon \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0} 0 \end{aligned}$$


Damit folgt die Behauptung. \square

17.4. Bemerkung Allgemein lässt sich jede stetige Abbildung zwischen C^∞ -Mannigfaltigkeiten durch C^∞ -Abbildungen approximieren. Dazu zeigt man:

- (i) Jede (kompakte) C^∞ -Mannigfaltigkeit lässt sich in den \mathbb{R}^N für $N \gg \dim M$ einbetten.
- (ii) $M \subseteq \mathbb{R}^N$ besitzt eine **Tubenumgebung**⁶. Dies erlaubt es, eine C^∞ -Retraktion $K \rightarrow M$ auf einer kompakten Umgebung K von $M \subseteq \mathbb{R}^N$ zu konstruieren.

ZIEL:

$$\pi_n(S^m, e_0) = 0 \text{ für } n < m$$

⁶ Wikipedia: https://de.wikipedia.org/wiki/Tubulare_Umgebung 

17.5. Proposition Sei $U \subseteq \mathbb{R}^n$ offen und $f : U \rightarrow \mathbb{R}^m$ eine C^∞ -Abbildung. Ist $m > n$, so ist $f(U) \subseteq \mathbb{R}^m$ eine Nullmenge bezüglich des Lebesgue-Maßes.

BEWEIS: Jede offene Teilmenge des \mathbb{R}^n ist die abzählbare Vereinigung von kompakten Teilmengen. Die abzählbare Vereinigung von Nullmengen ist wieder eine Nullmenge. Daher genügt es zu zeigen: Ist $K \subseteq U$ kompakt, so ist $f(K) \subseteq \mathbb{R}^m$ eine Nullmenge.

Da K kompakt ist, ist $\|Df_x\|$ für $x \in K$ beschränkt. Insbesondere ist f auf K Lipschitz-stetig. Es gibt also $\alpha > 0$ mit

$$\forall \varepsilon > 0 : f(B_\varepsilon(x) \cap K) \subseteq B_{\alpha\varepsilon}(f(x))$$

Sei nun $R > 0$ mit $K \subseteq [-R, R]^n$. Zu $\varepsilon > 0$ gibt es dann eine Überdeckung von K durch $(2\lceil \frac{R}{\varepsilon} \rceil)^n$ viele Bälle $B_\varepsilon(x_i) \subseteq \mathbb{R}^n$. Es folgt

$$\text{Vol}_{\mathbb{R}^m}(f(K)) \leq \left(2\lceil \frac{R}{\varepsilon} \rceil\right)^n \cdot \text{Vol}_{\mathbb{R}^m}(B_{\alpha\varepsilon}(0)) = \left(2\lceil \frac{R}{\varepsilon} \rceil\right)^n \cdot (\alpha\varepsilon)^m \cdot C_m$$

mit $C_m := \text{Vol}_{\mathbb{R}^m}(B_1(0))$. Wegen $m > n$ gilt $(2\lceil \frac{R}{\varepsilon} \rceil)^n \cdot (\alpha\varepsilon)^m \cdot C_m \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0} 0$. Also $\text{Vol}_{\mathbb{R}^m}(f(K)) = 0$. \square

17.6. Korollar 3 Sei $f : N \rightarrow M$ eine C^∞ -Abbildung. Sei $\dim M > \dim N$. Dann ist $M \setminus f(N) \subseteq M$ dicht. Insbesondere ist f nicht surjektiv.

BEWEIS: Sei $y \in M$. Sei U eine offene Umgebung von y . Zu zeigen: $U \setminus f(N) \neq \emptyset$. OBdA sei U das Kartengebiet einer Karte $h : U \rightarrow V$. Da N das zweite Abzählbarkeitsaxiom erfüllt, können wir $f^{-1}(U)$ durch abzählbar viele C^∞ -Kartengebiete U_i von Karten $k_i : U_i \rightarrow V_i$ von N überdecken, für die wir $U_i \subseteq f^{-1}(U)$ annehmen dürfen. Nun ist

$$h(f(N) \cap U) = h\left(\bigcup_i f(h_i^{-1}(V_i))\right) = \bigcup_i h \circ f \circ h_i^{-1}(V_i).$$

Nach Proposition 17.5 ist jedes $h \circ f \circ h_i^{-1}(V_i)$ eine Nullmenge in V . Da die abzählbare Vereinigung von Nullmengen eine Nullmenge ist, ist auch $h(f(N) \cap U)$ eine Nullmenge in V . Insbesondere ist $V \setminus h(f(N) \cap U) \neq \emptyset$. Da h bijektiv ist, folgt auch $U \setminus f(N) \neq \emptyset$. \square

17.7. Satz Für $n < m$ ist $\pi_n(S^m) = 0$. Insbesondere ist S^m für $m > 1$ einfach zusammenhängend.

NOTATION: Sei e_0, \dots, e_n die übliche Orthonormalbasis von \mathbb{R}^{n+1} .

BEWEIS (MIT LEMMA 17.8): Wir müssen zeigen, dass jede stetige Abbildung $f : (S^n, e_0) \rightarrow (S^m, e_0)$ homotop zu einer konstanten Abbildung ist.⁷ Nach Korollar 2 (17.3) gibt es eine C^∞ -Abbildung $\varphi : S^n \rightarrow S^m$ mit $\|f(x) - \varphi(x)\| \leq \frac{1}{2}$ für alle $x \in S^n$. Sei nun $H : S^n \times [0, 1] \rightarrow S^m$ definiert durch

$$H(x, t) := \frac{t \cdot f(x) + (1-t)\varphi(x)}{\|t \cdot f(x) + (1-t)\varphi(x)\|}$$

⁷ Man erinnere sich an das Kollabieren des Randes in Kapitel 14, insbesondere Bemerkung 14.3

H ist eine (nicht notwendig punktierte!) Homotopie von φ nach f . Mit Lemma 17.8 folgt: Es existiert $A : [0, 1] \rightarrow O(m)$ mit $A(0) = \mathbb{1}_m$ und $A(t) \cdot H(e_0, t) = e_0$ für alle t . Nun ist $\tilde{H} : S^n \times [0, 1]$ mit $\tilde{H}(x, t) := A(t) \cdot H(x, t)$ eine punktierte Homotopie zwischen f und der C^∞ -Abbildung $\tilde{f} := A(1) \cdot \varphi$. Mit Korollar 3 (17.6) folgt, dass \tilde{f} nicht surjektiv ist. Sei $y \in S^m \setminus \tilde{f}(S^n)$. Nun ist $S^m \setminus \{y\} \cong \mathbb{R}^m$. Daher ist jede stetige Abbildung $(S^n, e_0) \rightarrow (S^m \setminus \{y\}, e_0)$ punktiert homotop zur konstanten Abbildung. Daher ist \tilde{f} , und damit auch f , punktiert homotop zur konstanten Abbildung. \square

17.8. Lemma Sei $\omega : [0, 1] \rightarrow S_+^m = \{(x_0, \dots, x_m) \in S^m \mid x_0 > 0\}$ ein Weg mit $\omega(0) = e_0$. Dann gibt es einen Weg $A : [0, 1] \rightarrow O(m+1)$ mit $A(0) = \mathbb{1}_{m+1}$ und $A(t) \cdot \omega(t) = \omega(0)$ für $t \in [0, 1]$.

BEWEIS: Da $\omega(t) \in S_+^m$, ist $\omega(t), e_1, \dots, e_m$ immer noch eine Basis von \mathbb{R}^{n+1} . Das Gram-Schmidt-Verfahren liefert dann für jedes t eine Orthonormalbasis

$$\omega(t), e_1(t), e_2(t), \dots, e_m(t).$$

Dabei sind die e_i stetige Wege $[0, 1] \rightarrow S^m$. Definiere nun A durch $A(t) \cdot e_i(t) = e_i$. \square

18. Der Tangentialraum

18.1. Beispiel Betrachte $S^n \subseteq \mathbb{R}^{n+1}$. Zu $x \in S^n$ betrachten wir den Unterraum $T_x S^n := \{v \in \mathbb{R}^{n+1} \mid \langle v, x \rangle = 0\}$. Diesen können wir als \mathbb{R} -Vektorraum von „Richtungen“ von S^n in x auffassen. Die Vereinigung der $T_x S^n$, $T^n S^n = \bigcup_{x \in S^n} T_x S^n$ ist auf natürlicher Weise ein Unterraum des topologischen Raumes $S^n \times \mathbb{R}^{n+1}$, also

$$T^n S^n = \{(x, v) \mid x \in S^n, v \in x^\perp\}$$

Insbesondere ist $T^n S^n$ ein topologischer Raum.

18.2. Bemerkung S^n heißt **parallelisierbar**, falls es einen Homöomorphismus $\Theta : T^n S^n \rightarrow S^n \times \mathbb{R}^n$ gibt, so dass für jedes $x \in S^n$ die Einschränkung

$$\Theta|_{T_x S^n} : T_x S^n \rightarrow \{x\} \times \mathbb{R}^n$$

ein \mathbb{R} -Vektorraumisomorphismus ist. Unter den Sphären sind genau S^1 , S^3 und S^7 parallelisierbar.⁸

18.3. Beispiel Sei $M \subseteq \mathbb{R}^{n+k}$ eine n -dimensionale C^∞ -Untermannigfaltigkeit. Sei $x \in M$. Dann gibt es eine an M angepasste Karte

$$\mathbb{R}^{n+k} \supseteq U \xrightarrow[h]{\cong} V \subseteq \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^k$$

siehe 15.9

um x mit $h(M \cap U) = (\mathbb{R}^n \times \{0\}) \cap V$. Das Urbild von $\mathbb{R}^n \times \{0\}$ unter Dh_x ist der **Tangentialraum** $T_x^u M$ von M im Punkt x . Da h ein Diffeomorphismus ist, ist Dh_x ein Isomorphismus von \mathbb{R} -Vektorräumen. Insbesondere ist $\dim T_x^u M = \dim \mathbb{R}^n = n$.

$T_x^u M$ ist unabhängig von der Wahl der Karte h : Ist k eine zweite an M angepasste Karte, so ist

$$D(h \circ k^{-1})_{k(x)} = \begin{pmatrix} A & * \\ 0 & * \end{pmatrix}$$

mit $A \in \text{GL}(n, \mathbb{R})$. Das **Tangentialbündel** von M ist


$$T^n M := \{(x, v) \mid x \in M, v \in T_x^u M\} \subseteq M \times \mathbb{R}^{n+k}$$

BEMERKUNG: Ist $V \subseteq \mathbb{R}^n$ eine Untermannigfaltigkeit der Kodimension 0, also $V \subseteq \mathbb{R}^n$ offen, so ist $T^n V = \mathbb{R}^n$.

18.4. Lemma 1 Sei $M \subseteq \mathbb{R}^{n+k}$ eine C^∞ -Untermannigfaltigkeit. Sei $x \in M$. Für $v \in \mathbb{R}^{n+k}$ sind äquivalent:

(1) $v \in T_x^u M$.

(2) Es gibt einen C^∞ -Weg $\omega : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow M$ mit $\omega(0) = x$ und $\frac{d\omega}{dt}(0) = v$.

⁸ Bott-Milnor, *On the parallelizability of the spheres* <https://projecteuclid.org/euclid.bams/1183522319> 

BEWEIS: Sei $\mathbb{R}^{n+k} \supseteq U \xrightarrow{h} V \subseteq \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^k$ eine Karte mit $h(M \cap U) = V \cap (\mathbb{R}^n \times \{0\})$. Ohne Einschränkungen können wir $h(x) = 0$ annehmen.

"(1) \Rightarrow (2)": Ist $v \in T_x^u M$, so gilt $Dh_x(v) \in \mathbb{R}^n \times \{0\}$. Sei $\omega : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow M$ definiert durch $\omega(t) := h^{-1}(t \cdot Dh_x(v))$. Dann gilt

$$\frac{d\omega}{dt}(0) = \frac{d}{dt} h^{-1}(t \cdot Dh_x(v)) = (Dh^{-1})_{h(x)}(Dh_x(v)) = v.$$

"(2) \Rightarrow (1)": Es ist

$$Dh_x\left(\frac{d\omega}{dt}(0)\right) = Dh_{\omega(0)}\left(\frac{d\omega}{dt}(0)\right) = D(h \circ \omega)_0(1)$$

Da $h \circ \omega : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow \mathbb{R}^n \times \{0\}$, folgt auch $D(h \circ \omega)_0(1) \in \mathbb{R}^n \times \{0\}$. \square

18.5. Lemma 2 Seien $\omega, \eta : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow \mathbb{R}^n$ zwei C^∞ -Abbildungen, mit $\omega(0) = \eta(0)$. Dann sind äquivalent:

$$(1) \quad \frac{d\omega}{dt}(0) = \frac{d\eta}{dt}(0)$$

$$(2) \quad \text{Für alle } f \in C^\infty(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}) \text{ gilt } \frac{d(f \circ \omega)}{dt}(0) = \frac{d(f \circ \eta)}{dt}(0)$$

BEWEIS: Mit

$$\frac{d(f \circ \omega)}{dt}(0) = (Df)_{\omega(0)}\left(\frac{d\omega}{dt}(0)\right) \quad (\text{Kettenregel})$$

folgt (1) \Rightarrow (2). Sei nun $P_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ die Projektion auf die i -te Koordinate. Dann gilt

$$\frac{d(P_i \circ \omega)}{dt}(0) = P_i\left(\frac{d\omega}{dt}(0)\right). \quad (\text{Linearisierung einer linearen Abbildung})$$

Es folgt (2) \Rightarrow (1). \square

18.6. Definition Sei M eine C^∞ -Mannigfaltigkeit. Sei $x \in M$. Sei $\mathcal{T}_x M$ die Menge der C^∞ -Abbildungen $\omega : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow M$ mit $\omega(0) = x$. Durch

$$\omega \sim \eta \Leftrightarrow \forall f \in C^\infty(M, \mathbb{R}) : \frac{d(f \circ \omega)}{dt}(0) = \frac{d(f \circ \eta)}{dt}(0)$$

erhalten wir eine Äquivalenzrelation auf $\mathcal{T}_x M$. Der **Tangentialraum** zu M im Punkt x ist definiert als die Menge der Äquivalenzklassen $T_x M := \mathcal{T}_x M / \sim$.

18.7. Bemerkung Sei $M \subseteq \mathbb{R}^{n+k}$ eine Untermannigfaltigkeit und $x \in M$. Wegen Lemma 1 (18.4) ist die Abbildung $\mathcal{T}_x M \rightarrow T_x^u M, \omega \mapsto \frac{d\omega}{dt}(0)$ surjektiv und induziert wegen Lemma 2 (18.5) eine bijektive Abbildung $\alpha_x^u : T_x M \rightarrow T_x^u M$.

18.8. Bemerkung Sei $V \subseteq \mathbb{R}^n$ offen und $x \in V$. Dann erhalten wir aus Bemerkung 18.7 eine Bijektion $\alpha_x^u : T_x V \rightarrow \mathbb{R}^n, [\omega] \mapsto \frac{d\omega}{dt}(0)$, denn $V \subseteq \mathbb{R}^n$ ist eine C^∞ -Mannigfaltigkeit der Kodimension 0. Oft werden wir diesen Isomorphismus unterschlagen und einfach $T_x V = \mathbb{R}^n$ schreiben.

18.9. Bemerkung Sei U eine offene Umgebung von $x \in M$. Dann gilt $T_x U = T_x M$. Genauer induziert die Inklusion $U \subseteq M$ eine Inklusion $\mathcal{T}_x U \rightarrow \mathcal{T}_x M$, die wiederum einen kanonischen Isomorphismus $T_x U \xrightarrow{\cong} T_x M$ induziert.

18.10. Lemma 3 Sei $\varphi : N \rightarrow M$ eine C^∞ -Abbildung und $x \in N$. Dann definiert $[\omega] \mapsto [\varphi \circ \omega]$ eine wohldefinierte Abbildung $T_x \varphi : T_x N \rightarrow T_{\varphi(x)} M$.

BEWEIS: Seien $\omega, \eta : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow N$ glatte Wege mit $\omega(0) = x = \eta(0)$ und $[\omega] = [\eta] \in T_x N$. Sei $f \in C^\infty(M, \mathbb{R})$ eine Testfunktion. Zu zeigen ist:

$$\frac{d(f \circ \varphi \circ \omega)}{dt}(0) = \frac{d(f \circ \varphi \circ \eta)}{dt}(0)$$

Sei $g := f \circ \varphi \in C^\infty(N, \mathbb{R})$. Da $[\omega] = [\eta] \in T_x N$, gilt

$$\frac{d(g \circ \omega)}{dt}(0) = \frac{d(g \circ \eta)}{dt}(0). \quad \square$$

18.11. Definition $T_x \varphi$ heißt die **Tangentialabbildung** von φ in x .

BEMERKUNG (FUNKTORIALITÄT DER TANGENTIALABBILDUNG):

a) Für die Identität $\text{id}_M : M \rightarrow M$ gilt $T_x \text{id} = \text{id}_{T_x M}$.

b) Für $N \xrightarrow{\varphi} M \xrightarrow{\psi} W$ gilt $T_x(\psi \circ \varphi) = T_{\varphi(x)} \psi \circ T_x \varphi$.

Dies bezeichnet man auch als die Kettenregel für die Tangentialabbildung.

18.12. Lemma 4 Seien $U \subseteq \mathbb{R}^n$ offen, $V \subseteq \mathbb{R}^m$ offen und $\varphi : U \rightarrow V$ eine C^∞ -Abbildung mit $\varphi(x) = y$. Dann ist

$$T_x \varphi : \mathbb{R}^n = T_x U \rightarrow T_{\varphi(x)} V = \mathbb{R}^m$$

genau das Differential $D\varphi_x$ von φ im Punkt x .

BEWEIS: Sei $v \in \mathbb{R}^n$. Unter $\mathbb{R}^n = T_x U$ ist $v = [\omega_v]$ mit $\omega_v(t) = x + t \cdot v$. Unter $T_y V = \mathbb{R}^m$ ist

$$T_x \varphi([\omega_v]) = [\varphi \circ \omega_v] = \frac{d(\varphi \circ \omega_v)}{dt}(0) = D\varphi_x \circ D\omega_v(1) = D\varphi_x(v). \quad \square$$

18.13. Proposition

a) Sei M eine C^∞ -Mannigfaltigkeit und $x \in M$. Dann gilt es eine eindeutige \mathbb{R} -Vektorraumstruktur auf $T_x M$ mit folgender Eigenschaft:

Ist $V \subseteq \mathbb{R}^k$ offen, $\varphi : V \rightarrow M$ glatt mit $\varphi(y) = x$, so ist $T_y \varphi : \mathbb{R}^k = T_y V \rightarrow T_x M$ \mathbb{R} -linear.

b) Ist $f : N \rightarrow M$ eine C^∞ -Abbildung mit $f(x) = y$, so ist $T_x f : T_x N \rightarrow T_y M$ bezüglich der \mathbb{R} -Vektorraumstruktur aus a) \mathbb{R} -linear.

BEMERKUNG ZU A): Ist $M \supseteq U \xrightarrow{h} V \subseteq \mathbb{R}^n$ eine Karte um x , so legt $T_x h : T_x M = T_x U \rightarrow T_{h(x)} V = \mathbb{R}^n$ die \mathbb{R} -Vektorraumstruktur auf $T_x M$ fest.

BEWEIS:

- a) Sei $M \supseteq U \xrightarrow{h} W \subseteq \mathbb{R}^n$ eine C^∞ -Karte um x . Dann ist $T_x h : T_x M = T_x U \rightarrow T_{h(x)} W = \mathbb{R}^n$ bijektiv mit $(T_x h)^{-1} = T_{h(x)}(h^{-1})$. Wir benutzen diesen Isomorphismus um die \mathbb{R} -Vektorraumstruktur auf $T_x M$ zu definieren:

$$v + w := (T_{h(x)} h^{-1})(T_x h(v) + T_x h(w))$$

Dies ist die einzige \mathbb{R} -Vektorraumstruktur auf $T_x M$, für die $T_{h(x)}(h^{-1})$ \mathbb{R} -linear ist.

Sei nun $\varphi : V \rightarrow M$ eine C^∞ -Abbildung mit $V \subseteq \mathbb{R}^k$ offen und $\varphi(y) = x$. Um zu zeigen, dass $T_y \varphi : \mathbb{R}^k = T_y V \rightarrow T_x M$ \mathbb{R} -linear ist, genügt es zu zeigen, dass die Komposition $T_x(h) \circ T_y(\varphi) : \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^n$ \mathbb{R} -linear ist.

Nun gilt aber nach Lemma 4 (18.12)

$$T_x(h) \circ T_y(\varphi) = T_y(h \circ \varphi) = D_y(h \circ \varphi).$$

Also ist $T_x(h) \circ T_y(\varphi)$ \mathbb{R} -linear, da $D_y(h \circ \varphi)$ \mathbb{R} -linear ist.

- b) Seien $N \supseteq U \xrightarrow{h} V \subseteq \mathbb{R}^n$ und $M \supseteq \hat{U} \xrightarrow{\hat{h}} \hat{V} \subseteq \mathbb{R}^m$ glatte Karten um x bzw. um y . Da

$$\begin{aligned} T_x h : T_x N = T_x U &\rightarrow T_{h(x)} V = \mathbb{R}^n \\ T_y \hat{h} : T_y M = T_y \hat{U} &\rightarrow T_{\hat{h}(y)} \hat{V} = \mathbb{R}^m \end{aligned}$$

Isomorphismen von \mathbb{R} -Vektorräumen sind, genügt es zu zeigen, dass $(T_y \hat{h}) \circ (T_x f) \circ (T_x h)^{-1}$ \mathbb{R} -linear ist. Dies folgt mit der Kettenregel:

$$(T_y \hat{h}) \circ (T_x f) \circ (T_x h)^{-1} = T_{h(x)}(\hat{h} \circ f \circ h^{-1}) \stackrel{\text{Lemma 4 (18.12)}}{=} D(\hat{h} \circ f \circ h^{-1})_{h(x)} \quad \square$$

18.14. Bemerkung Ist $f : N \rightarrow M$ glatt und $x \in N$, so gilt $\text{Rang}_x f = \text{Rg}(T_x f)$. Insbesondere ist x genau dann regulär, wenn $T_x f : T_x N \rightarrow T_{f(x)} M$ surjektiv ist.

19. Das Tangentialbündel

19.1. Definition Sei X ein topologischer Raum. Ein n -dimensionales **Vektorraumbündel** über X ist eine stetige, surjektive Abbildung $\pi : E \rightarrow X$, wobei für jedes $x \in X$ die Faser $E_x := \pi^{-1}(\{x\})$ mit einer n -dimensionalen \mathbb{R} -Vektorraumstruktur versehen ist, so dass gilt:

(\star) Für alle $x \in X$ gibt es eine offene Umgebung $U \subseteq X$ von x und einen Homöomorphismus

$$f : \pi^{-1}(U) \xrightarrow{\sim} U \times \mathbb{R}^n,$$

sodass für jedes $y \in U$ $g_y := f|_{E_y} : E_y \rightarrow \{y\} \times \mathbb{R}^n$ ein \mathbb{R} -Vektorraumisomorphismus ist.

Oft sagt man für (\star) auch, dass E **lokal trivial** ist. Das Paar (f, U) heißt dann **Bündelkarte** für E .

19.2. Beispiel Sei $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, $f(v) = -v$. Dann ist der Abbildungstorus von f (vgl. Beispiel 2.10 ((v))) $T(f)$ ein 1-dimensionales Vektorraumbündel über S^1 , denn $T(f)$ ist wieder das Möbiusband und als Vektorraumbündel nicht trivial, da $T(f) \not\cong S^1 \times \mathbb{R}$.

19.3. Definition Seien E und E' Vektorraumbündel über X und X' . Sei $f : X \rightarrow X'$ stetig. Eine **lineare Abbildung über f** ist eine stetige Abbildung $F : E \rightarrow E'$, so dass

$$(i) \quad \begin{array}{ccc} E & \xrightarrow{F} & E' \\ \downarrow \pi & & \downarrow \pi' \\ X & \xrightarrow{f} & X' \end{array} \text{ kommutiert.}$$

(ii) $\forall x \in X$ ist $F_x := F|_{E_x} : E_x \rightarrow E'_{f(x)}$ \mathbb{R} -linear.

WARNUNG: Im F und $\ker F$ sind im Allgemeinen keine Vektorraumbündel! (F ist im Allgemeinen nicht linear)

19.4. Definition Sei E ein Vektorraumbündel über X . Ein stetiger **Schnitt** von E ist eine stetige Abbildung $s : X \rightarrow E$ mit $\pi \circ s = \text{id}_X$.

19.5. Definition Sei M eine C^∞ -Mannigfaltigkeit. Das **Tangentialbündel** von M ist

$$TM := \bigsqcup_{x \in M} T_x M.$$

Wir werden im Folgenden eine Topologie auf TM konstruieren, sodass TM mit der kanonischen Projektion $\pi : TM \rightarrow M$ ein Vektorbündel ist.

19.6. Definition Sei M eine C^∞ -Mannigfaltigkeit. Sei $M \supseteq U \xrightarrow{h} V \subseteq \mathbb{R}^n$ eine C^∞ -Karte von M . Dann heißt $Th : TU \rightarrow V \times \mathbb{R}^n$ mit

$$Th(v) = (h(\pi(v)), T_{\pi(v)}h(v))$$

die von h **induzierte Bündelkarte** von TM .

19.7. Bemerkung Seien $M \supseteq U_i \xrightarrow{h_i} V_i \subseteq \mathbb{R}^n$, $i = 0, 1$ zwei C^∞ -Karten von M . Dann ist der **Bündelkartenwechsel** zwischen den Bündelkarten Th_0 und Th_1

$$Th_1 \circ (Th_0)^{-1} : h_0(U_0 \cap U_1) \times \mathbb{R}^n \longrightarrow h_1(U_0 \cap U_1) \times \mathbb{R}^n$$

gegeben durch $(x, v) \mapsto (h_1(h_0^{-1}(x)), D(h_1 \circ h_0^{-1})_x(v))$. Insbesondere ist der Bündelkartenwechsel stetig und sogar C^∞ .

19.8. Proposition Sei M eine C^∞ -Mannigfaltigkeit.

- a) $\mathcal{U} := \{(Th)^{-1}(W) \mid h : U \rightarrow V \text{ Karten für } M, W \subseteq V \times \mathbb{R}^n \text{ offen}\}$ ist die Basis einer Topologie auf TM .
- b) Mit dieser Topologie ist TM ein Vektorraumbündel.

BEWEIS (GROBE SKIZZE):

- (i) Folgt aus der Stetigkeit der Bündelkartenwechsel.
- (ii) Die Bündelkarten liefern die lokale Trivialität. □

19.9. Bemerkung

- Ist $\varphi : M \rightarrow N$ eine C^∞ -Abbildung, so ist $T\varphi : TM \rightarrow TN$ mit $T\varphi(v) := (T_{\pi(v)}\varphi)(v)$ eine lineare Abbildung über φ .
- Schnitte des Tangentialbündels heißen **Vektorfelder**. Ein C^∞ -Vektorfeld ist ein Vektorfeld $s : M \rightarrow TM$, so dass $Th \circ s|_U : U \rightarrow V \times \mathbb{R}^n$ für jede C^∞ -Karte $h : U \rightarrow V$ von M eine C^∞ -Abbildung ist.

A. Anhang

A.1. Ausführlicher Beweis zu Lemma 4.4 Sei X ein Hausdorffraum. Dann ist X genau dann kompakt, wenn gilt: Hat eine Familie \mathcal{A} von abgeschlossenen Teilmengen von X die endliche Durchschnittseigenschaft, so gilt

$$\bigcap_{A \in \mathcal{A}} A \neq \emptyset.$$

BEWEIS:

" \Rightarrow ": Sei X kompakt und sei \mathcal{A} eine Familie von abgeschlossenen Mengen mit der endlichen Durchschnittseigenschaft. Angenommen $\bigcap_{A \in \mathcal{A}} A = \emptyset$. Dann gilt

$$X = X \setminus \bigcap_{A \in \mathcal{A}} A = \bigcup_{A \in \mathcal{A}} X \setminus A.$$

Nun ist $\mathcal{U} := \{X \setminus A \mid A \in \mathcal{A}\}$ eine offene Überdeckung von X und da X kompakt ist, existiert $\mathcal{A}_0 \subset \mathcal{A}$ endlich, sodass

$$X = \bigcup_{A \in \mathcal{A}_0} X \setminus A = X \setminus \underbrace{\bigcap_{A \in \mathcal{A}_0} A}_{\neq \emptyset} \quad \nexists$$

" \Leftarrow ": Sei nun $\mathcal{U} = \{U_i\}_{i \in I}$ eine offene Überdeckung von X . Angenommen für jede endliche Teilmenge $J \subseteq I$ gilt $X \neq \bigcup_{i \in J} U_i$. Betrachte nun $\mathcal{A} = \{X \setminus U_i\}_{i \in I}$. Dann gilt nach Annahme

$$\bigcap_{i \in J} X \setminus U_i = X \setminus \bigcup_{i \in J} U_i \neq \emptyset.$$

Also hat \mathcal{A} die endliche Durchschnittseigenschaft. Nach Voraussetzung gilt dann

$$\emptyset \neq \bigcap_{i \in I} X \setminus U_i = X \setminus \underbrace{\bigcup_{i \in I} U_i}_{=X} \quad \nexists \quad \square$$

A.2. Blatt 3, Aufgabe 4 Diese Übungsaufgabe ist zentral für den Beweis des Hauptsatzes der Algebra in 11.11.

Sei $p(x) = x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \dots + a_1x + a_0$ mit $n \in \mathbb{N}_0$ ein Polynom mit Koeffizienten $a_i \in \mathbb{C}$, dass keine Nullstelle in \mathbb{C} besitzt. Sei $S^1 = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| = 1\}$.

- (a) $f : S^1 \rightarrow S^1$ gegeben durch $f(z) = \frac{p(z)}{|p(z)|}$ ist wohldefiniert und homotop zu einer konstanten Abbildung.
- (b) f ist homotop zur Abbildung $g_n : S^1 \rightarrow S^1$ mit $g_n(z) = z^n$.

BEWEIS:

(a) **Wohldefiniertheit:** Sei $z \in S^1$ beliebig. Dann gilt

$$\left| \frac{p(z)}{|p(z)|} \right| = \frac{1}{|p(z)|} \cdot |p(z)| = 1,$$

also ist $f(z) \in S^1$.

Homotop zu einer konstanten Abbildung: Definiere $f_t : S^1 \rightarrow S^1$ für $t \in [0, 1]$ durch

$$f_t(z) = \frac{p(t \cdot z)}{|p(t \cdot z)|}$$

Dies ist mit der gleichen Begründung wie oben wohldefiniert. Außerdem ist $f_0(z) = \frac{a_0}{|a_0|} \in S^1$ konstant und $f_1(z) = \frac{p(z)}{|p(z)|} = f(z)$. Definiere nun $H : S^1 \times [0, 1] \rightarrow S^1$ durch $H(x, t) := f_t(x)$. Dann ist H stetig, da Polynome und $|\cdot|$, sowie Multiplikation stetig sind. H ist die gesuchte Homotopie.

(b) Sei $h : S^1 \times [0, 1] \rightarrow \mathbb{C}$ gegeben durch $h(z, t) = z^n + \sum_{k=0}^{n-1} a_k z^k t^{n-k}$. Dann gilt $h(z, 0) = z^n \neq 0$, da $z \in S^1$. Für $t \neq 0$ gilt nun

$$h(z, t) = 0 \iff \frac{h(z, t)}{t^n} = 0 \iff \frac{z^n}{t^n} + \sum_{k=0}^{n-1} a_k \frac{z^k}{t^k} = 0 \iff p\left(\frac{z}{t}\right) = 0.$$

Aber nach Voraussetzung gilt $p\left(\frac{z}{t}\right) \neq 0$. Also $h(z, t) \neq 0$ für alle $t \in [0, 1]$. Definiere nun $H : S^1 \times [0, 1] \rightarrow S^1$ durch $H(z, t) = \frac{h(z, t)}{|h(z, t)|}$. Wie eben gezeigt, ist dies wohldefiniert und offensichtlich stetig. Da

$$H(z, 0) = \frac{z^n}{|z^n|} = z^n \quad \text{und} \quad H(z, 1) = \frac{h(z, 1)}{|h(z, 1)|} = \frac{p(z)}{|p(z)|} = f(z)$$

ist H die gesuchte Homotopie. □

A.3. Blatt 10, Aufgabe 3 Diese Übungsaufgabe lieferte den Beweis zu 14.8.

Sei $p : \bar{X} \rightarrow X$ eine Überlagerung. Seien $\bar{x}_0 \in \bar{X}$ und $x_0 = p(\bar{x}_0)$ Basispunkte. Dann ist die induzierte Abbildung $\pi_n(p) : \pi_n(\bar{X}, \bar{x}_0) \rightarrow \pi_n(X, x_0)$ ein Isomorphismus für alle $n \geq 2$.

BEWEIS: Als Überlagerung ist p stetig, also ist $\pi_n(p)$ ein Gruppenhomomorphismus nach Proposition 14.6 (d)).

Surjektivität: Sei $[\omega] \in \pi_n(X, x_0)$, also $\omega : I^n \rightarrow X$ mit $\omega(\partial I^n) = \{x_0\}$. Betrachte ω nun als Abbildung $I^{n-1} \times [0, 1] \rightarrow X$:

$$\begin{array}{ccc} I^{n-1} \times \{0\} & \xrightarrow{\text{const}_{\bar{x}_0}} & \bar{X} \\ \downarrow & & \downarrow p \\ I^{n-1} \times I & \xrightarrow{\omega} & X \end{array}$$

$\text{const}_{\bar{x}_0} : I^{n-1} \times \{0\} \rightarrow \bar{X}$ ist eine Hebung von $\omega|_{I^{n-1} \times \{0\}} \equiv x_0$. Nach dem Homotopiehebungsatz (10.8) existiert eine Hebung $\bar{\omega} : I^{n-1} \times I \rightarrow \bar{X}$ von ω mit $\bar{\omega}|_{I^{n-1} \times \{0\}} \equiv \bar{x}_0$. Also gilt

$$p \circ \bar{\omega}|_{\partial I^n} = \omega|_{\partial I^n} \equiv x_0 \implies \bar{\omega}|_{\partial I^n} \in p^{-1}(\{x_0\}).$$

Da $p^{-1}(\{x_0\})$ diskret und ∂I^n für $n \geq 2$ zusammenhängend ist, muss $\bar{\omega}|_{\partial I^n}$ konstant sein. Da $\bar{\omega}|_{I^{n-1} \times \{0\}} \equiv \bar{x}_0$ gilt, folgt somit $\bar{\omega}(\partial I^n) = \{\bar{x}_0\}$. Also ist $[\bar{\omega}] \in \pi_n(\bar{X}, \bar{x}_0)$ und weiter gilt

$$\pi_n(p)([\bar{\omega}]) = [p \circ \bar{\omega}] = [\omega] \in \pi_n(X, x_0).$$

Injektivität: Sei $[\omega] \in \ker \pi_n(p)$, also $[p \circ \omega] = [c_{x_0}]$. Es existiert also eine Homotopie H relativ ∂I^n zwischen $p \circ \omega$ und c_{x_0} . Offensichtlich ist ω eine Hebung von $p \circ \omega$. Mit dem Homotopiehebungssatz erhalten wir eine Hebung \bar{H} von H mit $\bar{H}(-, 0) = \omega$. Weiter wissen wir, dass

$$\bar{H}|_{\partial I^n \times [0,1]} \in p^{-1}(\{x_0\}) \quad \text{und} \quad \bar{H}|_{I^n \times \{1\}} \in p^{-1}(\{x_0\})$$

gelten muss, da $H = p \circ \bar{H}$ und $H(-, 1) = c_{x_0} \equiv x_0$. Mit dem gleichen Argument wie oben folgt, dass $\bar{H}|_{\partial I^n \times [0,1]}$ und $\bar{H}|_{I^n \times \{1\}}$ konstant sind. Für $z \in \partial I^n$ gilt nun

$$\bar{H}(z, 0) = \omega(z) = \bar{x}_0.$$

Da $\partial I^n \times [0, 1] \cap I^n \times \{1\} \neq \emptyset$, muss also auch $\bar{H}(-, 1) \equiv \bar{x}_0$ gelten. Damit folgt $[\omega] = [c_{x_0}]$.
 \square

Index

Die Seitenzahlen sind mit Hyperlinks zu den entsprechenden Seiten versehen, also anklickbar

Abbildungstorus, 7

abgeschlossen, 2

Abschluss, 4

Algebra, 18

Atlas, 46

glatter, 46

maximaler, 47

Bahn, 35

Basis der Topologie, 3

Basispunkt, 26, 28

Bündelkarte, 60

induzierte Bündelkarte, 60

Bündelkartenwechsel, 61

C^∞ -Abbildung, 47

Decktransformation, 36

diffeomorph, 47

Diffeomorphismen, 47

Differential, 49

Differenzierbarkeit, 47

eigentliche Abbildung, 16

Einbettung, 48

Einpunktkompaktifizierung, EPK, 16

endliche Durchschnittseigenschaft, 10

Faser, 43

Faserung, 43

Fundamentalgruppe, 28, 41

gerichtete Menge, 8

Grenzwert, 8

Hausdorffraum, 4

normal, 22

hausdorffsch, 4

Hebung, 30

homotop, 6

punktiert, 31

Homotopie, 6, 41

mit festen Endpunkten, 26

Homotopie-Inverse, 31

Homotopieklassen, 26

homotopieäquivalent, 31

homöomorph, 3

Homöomorphismus, 3

immer wieder in, 12

induzierte Abbildung, 31

Innere, 4

Isometrie, 2

Karte, 46

Kartengebiet, 46

Kartenwechsel, 46

Kleinsche Flasche, 35

Kodimension, 48

kompakt, 10

Kompaktifizierung, 15

Kompositionsweg, 27

kritischer Wert, 51

lokal trivial, 60

lokal kompakt, 15

Metrik, 1

diskrete, 1

metrischer Raum, 1

metrisierbar, 22

Netz, 8

Konvergenz, 8

universell, 12

Norm, 1

offen, 2

offene Überdeckung, 10

p -adischer Betrag, 1

parallelisierbar, 56

Polnischer Kreis, 24

Produkttopologie, 5

punktierte Abbildung, 31

Quotiententopologie, 6

Rand, 4

- Rang, 49
- reell projektive Raum, 7
- regulär, 50
- regulärer Wert, 50
- Schleife, 26
- schließlich in, 12
- Schnitt, 60
- Spurtopologie, 5
- stetig, 2
- Tangentialabbildung, 58
- Tangentialbündel, 56, 60
- Tangentialraum, 57
 - einer Untermannigfaltigkeit, 56
- Teilnetz, 9
- Teilüberdeckung, 10
- Topologie, 2
 - diskrete, 2
 - grobe, 2
 - koendliche, 2
- Topologie der gleichmäßigen Konvergenz, 4
- Topologie der punktweisen Konvergenz, 4
- topologische Mannigfaltigkeit, 4
- topologischer Raum, 2
 - lokal wegzusammenhängend, 24
 - lokal zusammenhängend, 24
 - einfach zusammenhängend, 26
 - punktiert, 31
 - wegzusammenhängend, 24
 - zusammenhängend, 24
- Tubenumgebung, 53
- Umgebung, 4
 - elementare Umgebung, 29
 - offene Umgebung, 4
- Untermannigfaltigkeit, 48
- Vektorfelder, 61
- Vektorraumbündel, 60
- verschwindende Funktion, 18
- Weg, 24
- Windungszahl, 29
- Wirkung, 35
 - eigentlich diskontinuierlich, 35
 - freie Wirkung, 35
- zusammenziehbar, 31
- zweites Abzählbarkeitsaxiom, 3
- Überlagerung, 29
 - normal, 37
 - universell, 40

Abbildungsverzeichnis

1. Der Torus T^2	6
2. Möbius-Band	7
3. Der Polnische Kreis und eine nicht wegzusammenhängende Teilmenge davon	25
4. Homotopie relativ $\{0, 1\}$	26
5. Funktion φ aus dem Beweis zu 9.8	27
6. Schleife ω mit der Windungszahl 1	29
7. Kontrahierbare Teilmenge des \mathbb{R}^2	32
8. Konstruktion von F	32
9. Kleinsche Flasche	36
10. Die Menge J für $n = 2$	44
11. Die C^∞ -Mannigfaltigkeit S^2 mit dem Kartengebiet $U_{3,0}$	47
12. Skizze einer Untermannigfaltigkeit N der Mannigfaltigkeit $M = \mathbb{R}^2$	48
13. Höhenfunktion beim T^2 Torus	49
14. Diagramm zur Definition des Ranges einer glatten Abbildung $f : N \rightarrow M$	49
15. Die Funktionen ψ und φ_ε für $\varepsilon = 1$	52
16. Glockenfunktion $f_{\varepsilon,r}$ für \mathbb{R} und \mathbb{R}^2 , wobei $\varepsilon = 1$, $r = 1.5$	52