

Mitschrieb Elementare Geometrie

Jens Ochsenmeier

6. Dezember 2017

Inhaltsverzeichnis

- 1 Einstieg — Metrische Räume • 5
 - 1.1 Vorbemerkungen • 5
 - 1.2 Definitionen zu metrischen Räumen • 5
 - 1.3 Beispiele zu metrischen Räumen • 6
- 2 Längenmetriken • 9
 - 2.1 Graphen • 9
 - 2.2 Euklidische Metrik • 10
 - 2.3 Sphärische Geometrie • 13
 - 2.4 Wozu sind Metriken gut? • 15
- 3 Grundbegriffe der allgemeinen Topologie • 17
 - 3.1 Topologische Räume • 17
 - 3.2 Hausdorffsches Trennungsaxiom • 22
 - 3.3 Stetigkeit • 23
 - 3.4 Zusammenhang • 26
 - 3.5 Kompaktheit • 29
- 4 Spezielle Klassen von topologischen Räumen • 33
 - 4.1 Übersicht • 33
 - 4.2 Topologische Mannigfaltigkeiten • 33
 - 4.3 Differenzierbare Mannigfaltigkeiten • 35
 - 4.4 Simplicialkomplexe • 42

1

Einstieg — Metrische Räume

1.1 Vorbemerkungen

Inhalt dieser Vorlesung wird sowohl *Stetigkeitsgeometrie* (Topologie) als auch *metrische Geometrie* sein. Die seitlich abgebildeten Objekte sind im Sinne der Stetigkeitsgeometrie "topologisch äquivalent", im Sinne der metrischen Geometrie sind diese allerdings verschieden.

Bemerkung 1 (Kartographieproblem). Ein zentrales Problem der Kartographie ist die *längentreue* Abbildung einer Fläche auf der Weltkugel auf eine Fläche auf Papier. Mithilfe der Differentialgeometrie und der Gauß-Krümmung lässt sich zeigen, dass das nicht möglich ist.

1.2 Definitionen zu metrischen Räumen

Definition 1.1 (Metrik). Sei X eine Menge. Eine Funktion $d : X \times X \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ ist eine **Metrik** (Abstandsfunktion), falls $\forall x, y, z \in X$ gilt:

1. **Positivität:** $d(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$
2. **Symmetrie:** $d(x, y) = d(y, x)$
3. **Dreiecksungleichung:** $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$

Definition 1.2 (Metrischer Raum). Ein **metrischer Raum** ist ein Paar (X, d) aus einer Menge und einer **Metrik** auf dieser.

Definition 1.3 (Pseudometrik). Eine **Pseudometrik** erfüllt die gleichen Bedingungen wie eine **Metrik**, außer $d(x, y) = 0 \Rightarrow x = y$ — die Umkehrung gilt.

Definition 1.4 (Abgeschlossener r -Ball um x). Eine Teilmenge

$$\overline{B_r(x)} := \{y \in X : d(x, y) \leq r\}$$

heißt **abgeschlossener r -Ball um x** .

Definition 1.5 (Abstandserhaltende Abbildung). Sind (X, d_X) und (Y, d_Y) **metrische Räume**, so heißt eine Abbildung $f : X \rightarrow Y$ **abstandserhaltend**, falls

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

Definition 1.6 (Isometrie). Eine **Isometrie** ist eine bijektive **abstandserhaltende Abbildung**. Falls eine Isometrie

$$f : (X, d_X) \rightarrow (Y, d_Y)$$

existiert, so heißen X und Y *isometrisch*.

1.3 Beispiele zu metrischen Räumen

Beispiel 1.7 (Triviale Metrik). Menge X ,

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

also lässt mithilfe der **trivialen Metrik** jede Menge zu einem **metrischen Raum** verwursten.

Beispiel 1.8 (Simple **Metriken**). Sei $X = \mathbb{R}$.¹

- $d_1(s, t) := |s - t|$ ist Metrik.
- $d_2(s, t) := \log(|s - t| + 1)$ ist Metrik.

Beispiel 1.9 (Euklidische Standardmetrik). $X = \mathbb{R}^n$,

$$d_e(x, y) := \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} = \|x - y\|$$

ist die (**euklidische**) **Standardmetrik** auf dem \mathbb{R}^n . Die Dreiecksungleichung folgt aus der Cauchy-Schwarz-Ungleichung².

Bemerkung 2 (aus LA II). **Isometrien** von (\mathbb{R}^n, d_e) sind Translationen, Rotationen und Spiegelungen.

Beispiel 1.10 (Maximumsmetrik). $X = \mathbb{R}$,

$$d(x, y) := \max_{1 \leq i \leq n} |x_i - y_i|$$

ist **Metrik**.

Beispiel 1.11 (**Standardmetrik** und **Maximumsmetrik** allgemein: Norm). V sei \mathbb{R} -Vektorraum.

Eine **Norm** auf V ist eine Abbildung

$$\|\cdot\| : V \rightarrow \mathbb{R}_{>0},$$

so dass $\forall v, w \in V, \lambda \in \mathbb{R}$:

1. **Definitheit**: $\|v\| = 0 \Leftrightarrow v = 0$
2. **absolute Homogenität**: $\|\lambda v\| = |\lambda| \cdot \|v\|$
3. **Dreiecksungleichung**: $\|v + w\| \leq \|v\| + \|w\|$

Eine Norm definiert eine **Metrik** durch $d(v, w) := \|v - w\|$.

¹ **Anmerkung**: Wenn $d(x, y)$ eine **Metrik** ist, so ist auch $\tilde{d}(x, y) := \lambda d(x, y)$ mit $\lambda \in \mathbb{R}_{>0}$ eine Metrik.

² **Cauchy-Schwarz-Ungleichung**: $\langle x, y \rangle \leq \|x\| \cdot \|y\| \quad (x, y \in \mathbb{R})$

Beispiel 1.12 (Einheitssphäre).

$$S_1^n := \{x \in \mathbb{R}^{n+1} : \|x\| = 1\}$$

ist die n -te **Einheitssphäre**.

Auf dieser ist mit

$$d_W(x, y) := \arccos(\langle x, y \rangle)$$

die **Winkel-Metrik** definiert.

Beispiel 1.13. (Hamming-Metrik) Es ist \mathbb{F}_2 der Körper mit zwei Elementen $\{0, 1\}$,

$$X := \mathbb{F}_2^n = \{(f_1, \dots, f_n) : f_i = 0 \vee f_i = 1 \ (i \in 1, \dots, n)\}$$

die Menge der binären Zahlenfolgen der Länge n . Die **Hamming-Metrik** ist definiert als

$$d_H : X \times X \rightarrow \mathbb{R}_{>0}, \quad d_H(u, v) = |\{i : u_i \neq v_i\}|.$$

2

Längenmetriken

2.1 Graphen

Definition 2.1 (Graph). Ein **Graph** $G = (E, K)$ besteht aus einer *Ecken-Menge* E und einer Menge von Paaren $\{u, v\}$ ($u, v \in E$), genannt *Kanten*.

Definition 2.2 (Erreichbarkeit). Seien $p, q \in E$ von $G = (E, K)$. q ist **erreichbar** von p aus, falls ein *Kantenzug* von p nach q existiert.

Definition 2.3 (Zusammenhängend). $G = (E, K)$ heißt **zusammenhängend**, falls alle Ecken von einer beliebigen, festen Ecke aus erreichbar sind.
Ist G ein zusammenhängender **Graph**, so ist $d(p, q)$ = minimale Kantenzahl eines Kantenzuges von p nach q eine **Metrik**.

Beispiel 2.4 (Wortmetrik). Sei $\Gamma := \langle S \rangle$ vom endlichen Erzeugendensystem S erzeugte Gruppe. Dann:

$$g \in \Gamma \Rightarrow g = s_1 \cdot \dots \cdot s_n \text{ (multiplikativ, nicht eindeutig),} \quad (2.1)$$

z.B. $\mathbb{Z} = \langle \pm 1 \rangle$.

Dann lässt sich über die Länge von $g \in \Gamma$ (minimales n in **Gleichung 2.1**) eine **Metrik** definieren:

Definition 2.5 (Wortmetrik).

$$d_S(g, k) := |g^{-1}k|$$

ist eine **Metrik** mit

$$\begin{aligned} d_s(kg, kh) &= |(kg)^{-1}kh| \\ &= |g^{-1}\underbrace{k^{-1}k}_{=e}h| = |g^{-1}h| \\ &= d_s(g, h), \end{aligned}$$

also ist d_s linksmultiplikativ mit $k \in \Gamma$ und damit eine **Isometrie**.

Definition 2.6 (Cayley-Graph). Der **Cayley-Graph** $\text{Cay}(\Gamma, S)$ von Γ bezüglich S ist der Graph $G = (E, K)$ mit

$$E := \Gamma, \quad K := \{(g, gs) : g \in \Gamma, s \in S\}.$$

Die **Graphen-Metrik** auf $\text{Cay}(\Gamma, S)$ ist **isometrisch** zur **Wortmetrik**.

2.2 Euklidische Metrik

Beispiel 2.7 (Euklidische Metrik auf \mathbb{R}^2 als Standardmetrik). Sei

$$c : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^2, \quad t \mapsto (x(t), y(t))$$

eine stückweise differenzierbare¹ Kurve.

Die **euklidische Länge** von C ist

$$\begin{aligned} L_{\text{euk}}(c) &:= \int_a^b \|C'(t)\| dt \quad (\text{via Polynom-Approximation}) \\ &= \int_a^b \sqrt{(x'(t))^2 + (y'(t))^2} dt. \end{aligned}$$

Beispiel: Geraden-Segment.

$$g : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^2, \quad t \mapsto g(t) = (1-t)p + tq.$$

¹ **Hinweis:** Mit *differenzierbar* ist im Folgenden immer C^∞ -differenzierbar gemeint, wenn nicht anders angegeben.

Dann:

$$g'(t) = -p + q, \quad \|g'(t)\| = \|p - q\|$$

und damit

$$\underline{L_{\text{euk}}}(g) = \int_0^1 \|p - q\| dt = \|p - q\| = \underline{d_e}(p, q).$$

Lemma 2.8 (Unabhängigkeit von L_{euk}).

1. $L_{\text{euk}}(c)$ ist unabhängig von Kurvenparametrisierung.
2. $L_{\text{euk}}(c)$ ist invariant unter Translationen, Drehungen und Spiegelungen.

Beweis.

1. Zu zeigen: Für $c : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^2, t \mapsto c(t)$ und einen monoton wachsenden Diffeomorphismus² $t : [c, d] \rightarrow [a, b], s \mapsto t(s)$ gilt:

$$L_{\text{euk}}(c(t(s))) = L_{\text{euk}}(c(t)).$$

Das folgt unmittelbar aus der Substitutionsregel für Integrale:

$$\int_c^d \left\| \frac{dc}{ds} \right\| ds = \int_c^d \left\| \frac{d_c(t(s))}{dt} \right\| \frac{dt}{ds} ds = \int_{t(c)=a}^{t(d)=b} \left\| \frac{dc}{dt} \right\| dt.$$

□

2. • Translation.

Für $p = (p_1, \dots, p_n) \in \mathbb{R}^2$ sei

$$T_p(c(t)) = c(t) + p = (\lambda(t) + p_1, y(t) + p_2)$$

die von p verschobene Kurve. Es gilt

$$(T_p \circ c)(t) = c'(t) \Rightarrow \int_a^b \|(T_p \circ c)'\| dt = \int_a^b \|c'\| dt$$

und damit gilt das Lemma für Translationen.

□

- Drehung.

Für $\vartheta \in [0, 2\pi]$ sei

$$\begin{aligned} D_\vartheta \circ c(t) &= \begin{pmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix} c(t) \\ &= (\cos \vartheta x(t) - \sin \vartheta y(t), \sin \vartheta x(t) + \cos \vartheta y(t)) \end{aligned}$$

die um Winkel ϑ gedrehte Kurve.

Da D_ϑ eine orthogonale Abbildung ist, folgt

$$(D_\vartheta \circ c(t))' = D_\vartheta \cdot c'(t)$$

² **Diffeomorphismus:** Bijektive, stetig differenzierbare Abbildung, deren Umkehrabbildung auch stetig differenzierbar ist.

und damit

$$\|(D_{\vartheta} \circ c(t))'\| = \|D_{\vartheta} \cdot c'\| \stackrel{\text{orth.}}{=} \|c'\|$$

und damit gilt das Lemma für Drehungen. \square

- Spiegelungen sind wie Drehungen orthogonal, ihre Invarianz folgt aus der Invarianz der Drehungen.

Lemma 2.9 (Geraden sind am kürzesten). Die kürzesten Verbindungskurven zwischen Punkten in \mathbb{R}^2 sind genau die Geradensegmente.

Beweis. Seien $p, q \in \mathbb{R}^2$ beliebig. Durch geeignete Rotation und Translation kann man (p, q) überführen in Punkte in spezieller Lage;

$$p' = (0, 0), \quad q' = (0, l).$$

Wegen der **Invarianz von L_{euk}** ändert sich dabei die Länge entsprechender Verbindungskurven nicht.

Sei jetzt $c(t) := (x(t), y(t))$ eine stückweise differenzierbare Kurve zwischen p' und q' . Dann gilt:

$$\begin{aligned} L_{\text{euk}}(c) &= \int_a^b \sqrt{(x')^2 + (y')^2} dt \geq \int_a^b |y'| dt \geq \int_a^b y'(t) dt = \int_{y(a)=0}^{y(b)=l} dy \\ &= l. \end{aligned}$$

l ist die Länge des Geradensegmentes zwischen p' und q' .

\Rightarrow Infimum der Längenwerte wird angenommen. Eindeutigkeit bleibt zu zeigen.

Gilt für eine Kurve c , dass $L_{\text{euk}}(c) = l$, so hat man in obigen Ungleichungen überall Gleichheit, also insbesondere $x'(t) = 0$ ($\forall t$), also $x(t) = \text{konstant} = x(0) = 0$ und somit $\tilde{c} = (0, y(t))$. Also ist \tilde{c} auch (parametrisiertes) Geradensegment.

Definition 2.10 (Euklidische Metrik auf \mathbb{R}^2 -Kurven). Für $p, q \in \mathbb{R}^2$ sei $\Omega_{pq}(\mathbb{R}^2)$ die Menge der stetig differenzierbaren Verbindungskurven zwischen p und q . Wir setzen dann:

$$(p, q) = \inf L_{\text{euk}}(c), \quad c \in \Omega_{pq}(\mathbb{R}^2).$$

Satz 2.11 ("Neuer" metrischer \mathbb{R}^2).

$$(\mathbb{R}^2, d_{\text{euk}})$$

ist ein **metrischer Raum** und **isometrisch** zu (\mathbb{R}^2, d_e) .

Beweis. Direkter Beweis nach dem **Lemma über Geradensegmente**.

Man hat eine explizite Formel

$$d_{\text{euk}}(p, q) = \|p - q\| = d_e(p, q).$$

Die Identität ist eine Isometrie.

Beweis. Konzeptioneller, allgemeinerer Beweis. Es werden die Metrik-Eigenschaften gezeigt.

- *Symmetrie.*

Sei

$$\Omega_{pq}(\mathbb{R}^2) \ni c : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^2.$$

Idee: Kurve wird rückwärts durchlaufen.

Es ist $d_e = d_{\text{euk}}$, denn ist $\tilde{c}(t) = (a + b - t) \in \Omega_{qp}(\mathbb{R}^2)$ (mit gleicher Länge wie c) und die Abbildung $c \mapsto \tilde{c}$ ist bijektiv. Dann $L(\tilde{c}) = L(c)$, und damit

$$d(q, p) = \inf(L(\tilde{c})) = \inf(L(c)) = d(p, q).$$

- *Dreiecksungleichung.*

Zu zeigen: $d_{\text{euk}}(p, q) \leq d_{\text{euk}}(p, r) + d_{\text{euk}}(r, q)$ ($\forall p, q, r \in \mathbb{R}^2$).

Verknüpfen von Wegen von p nach r mit solchen von r nach q liefert gewisse — aber i.A. nicht alle — Wege von p nach q :

$$\Omega_{pr} \cup \Omega_{rq} \not\subseteq \Omega_{pq}.$$

Infimumbildung liefert die Behauptung.

- *Positivität.*

Zu zeigen: $d_{\text{euk}}(p, q) = 0 \Leftrightarrow p = q$.

- Falls $p = q$.

Die konstante Kurve $c : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^2, t \mapsto c(t) = p$ hat

$$c'(t) = 0 \Rightarrow L_{\text{euk}}(c) = 0 \leadsto d_{\text{euk}}(p, p) = 0.$$

- Falls $p \neq q$.

Die kürzeste Kurve ist das Geradensegment³

$$t \mapsto (1 - t)p + tq$$

mit der Länge $d_{\text{euk}} = \|p - q\| = 0$.

2.3 Sphärische Geometrie

Beispiel 2.12 (2-dimensionale sphärische Geometrie als Längenraum). Eine 2-dimensionale Sphäre von Radius R in \mathbb{R}^3 ist

$$S_{\mathbb{R}}^2 := \{x \in \mathbb{R}^3 : \|x\| = R\} = \{(x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3 : x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 = R^2\}.$$

³ **Anmerkung:** nur an dieser Stelle wird die Geometrie des \mathbb{R}^2 benötigt!

Für eine stückweise differenzierbare Kurve

$$c : [a, b] \rightarrow S_{\mathbb{R}}^2 \subset \mathbb{R}^3, \quad t \mapsto (x_1(t), x_2(t), x_3(t))$$

definiere die **sphärische Länge** durch

$$L_S(c) := \int_a^b \|c'(t)\| dt = \int_a^b \sqrt{x_1'^2 + x_2'^2 + x_3'^2} dt$$

und

$$d_s(p, q) := \inf L_S(c) \quad (c \in \Omega_{pq}(S_{\mathbb{R}}^2)).$$

Lemma 2.13 (Kurvenlängen rotationsinvariant). Die Länge einer differenzierbaren Kurve auf $S_{\mathbb{R}}^2$ ist invariant unter Rotationen von \mathbb{R}^2 .

Beweis. Eine orthogonale Matrix im \mathbb{R}^2 ist (bzgl. Standardbasis) gegeben durch eine orthogonale Matrix $D \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$. Da $\|D(x)\| = \|x\|$ für $x \in \mathbb{R}^2$ gilt, ist $D(S_{\mathbb{R}}^2) = S_{\mathbb{R}}^2$. Insbesondere ist für eine Kurve c in $S_{\mathbb{R}}^2$ auch das Bild $D \circ c \subset S_{\mathbb{R}}^2$.

Weiter folgt aus $(D \circ c(t))' = D \circ c'(t)$:

$$\begin{aligned} L_S(D \circ c) &= \int_a^b \|(D \circ c(t))'\| dt = \int_a^b \|D(c'(t))\| dt \\ &= \int_a^b \|c'(t)\| dt = L_S(c). \end{aligned}$$

Lemma 2.14 (Großkreise sind am kürzesten). Die kürzesten Verbindungskurven zwischen zwei Punkten in $S_{\mathbb{R}}^2$ sind **Großkreise**, also Schnitte von $S_{\mathbb{R}}^2$ und zweidimensionalen Untervektorräumen des \mathbb{R}^3 .

Beweis. Seien zwei beliebige Punkte p, q auf $S_{\mathbb{R}}^2$. Dann finden wir eine Rotation von \mathbb{R}^3 , die p auf $p' = (0, 0, R)$ – also den "Nordpol" – und q auf $q' = (0, y, z) \in S_{\mathbb{R}}^2$ abbildet. Aufgrund der **Rotationsinvarianz der Kurvenlängen** und der Definition ist $d_s(p, q) = d_s(p', q')$. Es genügt also eine kürzeste Verbindung zwischen p' und q' zu finden.

Idee: Mittels "geographischer Koordinaten" φ und ϑ . Nun kann eine Verbindung zwischen p' und q' geschrieben werden als

$$c(t) = R(\sin \vartheta(t) \cos \varphi(t), \sin \vartheta(t) \sin \varphi(t), \cos \vartheta(t))$$

und somit

$$c'(t) = (R \vartheta' \cos \vartheta \cos \varphi - R \varphi' \sin \vartheta \sin \varphi, R \vartheta' \cos \vartheta \sin \varphi + R \varphi' \sin \vartheta \cos \varphi, -R \vartheta' \sin \vartheta),$$

also

$$\|c'(t)\| = R^2(\vartheta'^2 + \varphi'^2 \sin^2 \vartheta)$$

und somit

$$\begin{aligned}
L_s(c) &= R \int_a^b \sqrt{\vartheta'^2 + \varphi'^2 \sin^2 \vartheta} dt \geq R \int_a^b \sqrt{\vartheta'^2} dt \\
&= R \int_a^b |\vartheta'(t)| dt \geq R \int_a^b \vartheta'(t) dt = \int_{\vartheta(a)}^{\vartheta(b)} d\vartheta = R(\vartheta(b) - \vartheta(a))
\end{aligned}$$

mit oBdA $\vartheta(b) \geq \vartheta(a)$.

Diese untere Schranke wird durch ein Großkreissegment realisiert.

Eine weitere Kurve diese Länge kann es (wieder) nicht geben — man hätte sonst überall Gleichheit in den Ungleichungen, also insbesondere $\varphi' = 0$, also wäre φ konstant $= \varphi(a) = \frac{\pi}{2}$. Also liegt die Kurve auf Meridian und ist somit Großkreis.

Satz 2.15 (Infimums- & Winkelmetrik isometrisch). $(S_{\mathbb{R}}^2, d_s)$ ist ein metrischer Raum und isometrisch zu $(S_{\mathbb{R}}^2, R \cdot d_W)$.

Beweis. Analog zu (R^2, d_{euk}) .

2.4 Wozu sind Metriken gut?

Bemerkung 3 (Erinnerung: Konvergenz). In Analysis I heißt eine Folge von reellen Zahlen $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ *konvergent*, wenn

$$\exists a \in \mathbb{R} : \forall \varepsilon > 0 \exists N = N(\varepsilon) : |a_n - a| < \varepsilon \quad (\forall n \geq N).$$

Bemerkung 4 (Konvergenz in metrischen Räumen). Sei (X, d) metrischer Raum. Eine Folge $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ aus X heißt **konvergent**, wenn

$$\exists x \in X \forall \varepsilon > 0 \exists N = N(\varepsilon) : d(x_n, x) \leq \varepsilon \quad (\forall n \geq N).$$

Also $x_n \in B_\varepsilon(x)$ ($\forall n \geq N$).

Bemerkung 5 (Erinnerung: Stetigkeit). $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ heißt *stetig* in $t_0 \in \mathbb{R}$ falls

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta = \delta(\varepsilon) > 0 : |t - t_0| < \delta \Rightarrow |f(t) - f(t_0)| < \varepsilon.$$

f heißt *stetig*, wenn sie stetig ist $\forall t_0 \in \mathbb{R}$.

Bemerkung 6 (Stetigkeit in metrischen Räumen). Metrische Räume (X, d_X) , (Y, d_Y) . Eine Abbildung $f : X \rightarrow Y$ heißt **stetig** in $x_0 \in X$, falls

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta = \delta(\varepsilon) > 0$$

sodass

$$d_Y(f(x), f(x_0)) < \varepsilon \text{ falls } d_X(x, x_0) < \delta.$$

Also wenn $f(x) \in B_\varepsilon^Y(f(x))$ falls $x \in B_\delta^X(x_0)$.

f heißt *stetig*, falls f stetig ist $\forall x \in X$.

Bemerkung 7 (Grenzwerte für stetige Funktionen).

$$f : X \rightarrow Y \text{ stetig} \Rightarrow f(\lim_{n \rightarrow \infty} x_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n).$$

Als Übungsaufgabe zu zeigen, der Beweis ist analog zum Beweis in der Analysis.

Diese Beobachtung führt historisch (um 1900) durch die Verallgemeinerung metrischer Räume zu topologischen Räume.

3

Grundbegriffe der allgemeinen Topologie

3.1 Topologische Räume

Definition 3.1 (Topologischer Raum). Ein **topologischer Raum** ist ein Paar (X, \mathcal{O}) bestehend aus einer Menge X und einem System bzw. einer Familie

$$\mathcal{O} \subseteq \mathcal{P}(X)$$

von Teilmengen von X , so dass gilt

1. $X, \emptyset \in \mathcal{O}$
2. Durchschnitte von *endlich* vielen und Vereinigungen von *beliebig* vielen Mengen aus \mathcal{O} sind wieder in \mathcal{O} .

Ein solches System \mathcal{O} heißt **Topologie** von X . Die Elemente von \mathcal{O} heißen **offene Teilmengen** von X .

$A \subset X$ heißt **abgeschlossen**, falls das Komplement $X \setminus A$ offen ist.

Beispiel 3.2 (Extrembeispiele).

1. Menge X , $\mathcal{O}_{\text{trivial}} := \{X, \emptyset\}$ ist die **triviale Topologie**.
2. Menge X , $\mathcal{O}_{\text{diskret}} := \mathcal{P}(X)$ ist die **diskrete Topologie**.

Beispiel 3.3 (Standard-**Topologie** auf \mathbb{R}). $X = \mathbb{R}$,

$$\mathcal{O}_s(\text{standard}) := \{I \subset \mathbb{R} : I = \text{Vereinigung von offenen Intervallen}\}$$

ist Topologie auf \mathbb{R} .¹

Beispiel 3.4 (Zariski-**Topologie** auf \mathbb{R}). $X = \mathbb{R}$,

$$\mathcal{O}_{Z(\text{ariski})} := \{O \subset \mathbb{R} : O = \mathbb{R} \setminus E, E \subset \mathbb{R} \text{ endlich}\} \cup \{\emptyset\}$$

ist die *Zariski-Topologie* auf \mathbb{R} .

Mit anderen Worten: Die abgeschlossenen Mengen sind genau die endlichen Mengen, \emptyset und \mathbb{R} .

Diese Topologie spielt eine wichtige Rolle in der algebraischen Geometrie beim Betrachten von Nullstellen von Polynomen:

$$(a_1 \dots, a_n) \leftrightarrow p(X) = (X - a_1) \cdots (X - a_n)$$

$$\mathbb{R} \leftrightarrow \text{Nullpolynom}$$

$$\emptyset \leftrightarrow X^2 + 1$$

Definition 3.5 (Metrischer Raum \rightarrow topologischer Raum). Metrische Räume (z.B. (X, d)) sind topologische Räume:

$$U \subset X \text{ ist } d\text{-offen} \Leftrightarrow \forall p \in U \exists \varepsilon = \varepsilon(p) > 0,$$

sodass der offene Ball $B_\varepsilon(p) = \{x \in X : d(x, p) < \varepsilon\}$ um p mit Radius ε ganz in U liegt: $B_\varepsilon(p) \subset U$.

Die d -offenen Mengen bilden eine Topologie — die von der Metrik d **induzierte Topologie**².

Definition 3.6 (Basis). Eine **Basis** für die **Topologie** \mathcal{O} ist eine Teilmenge $\mathcal{B} \subset \mathcal{O}$, sodass für jede offene Menge $\emptyset \neq V \in \mathcal{O}$ gilt:

$$V = \bigcup_{i \in I} V_i, \quad V_i \in \mathcal{B}.$$

¹ **Offenes Intervall:** $(a, b) := \{t \in \mathbb{R} : a < t < b\}$,
 a und b beliebig

² **Übungsaufgabe:** Zeigen, dass es sich wirklich um eine Topologie handelt

Beispiel: $\mathcal{B} = \{\text{offene Intervalle}\}$ für **Standard-Topologie** auf \mathbb{R} .

Beispiel 3.7 (Komplexität einer **Topologie**). \mathbb{R}, \mathbb{C} haben eine abzählbare Basis bezüglich **Standard-Metrik** $d(x, y) = |x - y|$ (beziehungsweise **Standard-Topologie**):
Bälle mit rationalen Radien und rationalen Zentren.

Bemerkung 8 (Gleichheit von **Topologien**). Verschiedene **Metriken** können die gleiche Topologie induzieren:

Sind d, d' Metriken auf X und enthält jeder Ball um $x \in X$ bezüglich d einen Ball um x bezüglich d' ($B_\varepsilon^d(x) \subset B_\varepsilon^{d'}(x)$), dann ist jede d -offene Menge auch d' -offen und somit $\mathcal{O}(d) \subset \mathcal{O}(d')$.

Gilt auch die Umkehrung ($\mathcal{O}(d') \subset \mathcal{O}(d)$), so sind die Topologien gleich: $\mathcal{O}(d) = \mathcal{O}(d')$.

Beispiel 3.8 (Bälle und Würfel sind gleich). $X = \mathbb{R}^2, x = (x_1, x_2), y = (y_1, y_2)$.

$$d(x, y) := \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2},$$

$$d'(x, y) := \max\{|x_1 - y_1|, |x_2 - y_2|\}.$$

Die **induzierten Topologien** sind gleich.

Beispiel 3.9 (Metrische Information sagt nichts über **Topologie**). (X, d) sei ein beliebiger **metrischer Raum**,

$$d'(x, y) := \frac{d(x, y)}{1 + d(x, y)}$$

ist **Metrik** mit $\mathcal{O}(d) = \mathcal{O}(d')$.

Für d' gilt: $d'(x, y) \leq (\forall x, y)$, insbesondere ist der Durchmesser von X bezüglich d' :

$$= \sup_{x, y \in X} d'(x, y) \leq 1,$$

das heißt, der Durchmesser eines metrischen Raumes ("metrische Information") sagt nichts über die Topologie aus.

Definition 3.10 (Umgebung). (X, \mathcal{O}) sei ein **topologischer Raum**. $U \subset X$ heißt **Umgebung** von $A \subset X$, falls

$$\exists O \in \mathcal{O} : A \subset O \subset U.$$

Definition 3.11 (Innerer und äußerer Punkt). Für $A \subset X$, $p \in X$ heißt p ein **innerer Punkt** von A (bzw. **äußerer Punkt** von A), falls A (bzw. $X \setminus A$) **Umgebung** von $\{p\}$ ist. Das **Innere** von A ist die Menge $\overset{\circ}{A}$ der inneren Punkte von A .

Definition 3.12 (Abgeschlossene Hülle). Die **abgeschlossene Hülle** von A ist die Menge $\overline{A} \subset X$, die nicht **äußere Punkte** sind.

Beispiel: $(a, b) = \{t \in \mathbb{R} : a < t < b\}$,

$\overline{(a, b)} = [a, b] = \{t \in \mathbb{R} : a \leq t \leq b\}$.

Bemerkung 9 (Drei konstruierte **topologische Räume**). Folgende drei einfache Konstruktionen von neuen topologischen Räumen aus gegebenen:

1. **Teilraum-Topologie:** (X, \mathcal{O}_X) topologischer Raum, $Y \subseteq X$ Teilmenge.

$$\mathcal{O}_Y := \{U \subseteq Y : \exists V \in \mathcal{O}_X \wedge U = V \cap Y\}$$

definiert eine Topologie auf Y , die sogenannte *Teilraum-Topologie*.³

Achtung! $U \in \mathcal{O}_Y$ ist i.A. nicht offen in X , z.B. $X = \mathbb{R}$, $Y = [0, 1]$, $V = (-1, 2)$, also $U = V \cap Y = Y$.

2. **Produkttopologie:** (X, \mathcal{O}_X) und (Y, \mathcal{O}_Y) zwei topologische Räume. Eine Teilmenge $W \subseteq X \times Y$ ist *offen* in der *Produkt-Topologie* $\Leftrightarrow \forall (x, y) \in W \exists$ **Umgebung** U von x in X und V von y in Y sodass das "Kästchen" $U \times V \subseteq W$. **Achtung!** Nicht jede offene Menge in $X \times Y$ ist ein Kästchen: die Vereinigung von zwei Kästchen ist beispielsweise auch offen.

Beispiel: $X = \mathbb{R}$ mit Standard-Topologie, dann ist

$$\underbrace{X \times \cdots \times X}_{x \text{ mal}} = \mathbb{R}^n$$

induzierter topologischer Raum.

3. **Quotiententopologie:** (X, \mathcal{O}) topologischer Raum, \sim Äquivalenzrelation⁴ auf X . Für $x \in X$ sei

$$[x] := \{y \in X : y \sim x\}$$

³ Zu überprüfen!

⁴ Impliziert Partitionierung von X in disjunkte Teilmengen

die Äquivalenzklasse von x ,

$$X / \sim$$

die Menge der Äquivalenzklassen und

$$\begin{aligned}\pi : X &\rightarrow X / \sim \\ x &\mapsto [x]\end{aligned}$$

die kanonische Projektion (surjektiv!).

Die *Quotienten-Topologie* auf X / \sim nutzt:

$U \subset X / \sim$ ist offen $\stackrel{\text{Def.}}{\Leftrightarrow} \pi^{-1}(U)$ ist offen in X .

Beispiel: $X = \mathbb{R}$ mit **Standard-Topologie** (induziert durch **Standard-Metrik**

$$d_{\mathbb{R}}(s, t) = |s - t|).$$

Seien $s, t \in \mathbb{R}$. Wir definieren

$$s \sim t \stackrel{\text{Def.}}{\Leftrightarrow} \exists m \in \mathbb{Z} : t = s + 2\pi m.$$

Dann ist

$$\mathbb{R} / \sim \underset{\text{bijektiv}}{=} S^1 = \text{Einheitskreis}.$$

Anstatt dies heuristisch auszudrücken kann dies auch explizit getan werden:

$$\begin{aligned}\mathbb{R} &\rightarrow S^1 = \{z \in \mathbb{C} : |z| = 1\} = \{(x, y) \in \mathbb{R} : x^2 + y^2 = 1\} \\ t &\mapsto e^{it}.\end{aligned}$$

Bemerkung: Andere Interpretation via Gruppen-Aktionen.

$G = (\mathbb{Z}, +)$ operiert auf $X = \mathbb{R}$.

Bahnen-Raum $= \mathbb{R} / \sim$ mit

$$\begin{aligned}\mathbb{Z} \times \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R} \\ (m, t) &\mapsto t + 2\pi m.\end{aligned}$$

Die Äquivalenzklasse $[t]$ ist die Bahn von

$$t = \mathbb{Z} \cdot t = \{t + 2\pi m : m \in \mathbb{Z}\},$$

mehr dazu später.

3.2 Hausdorffsches Trennungsaxiom

Bemerkung 10 (Hausdorffsches Trennungsaxiom T_2). Ein **topologischer Raum** (X, \mathcal{O}) heißt **hausdorffsch**, falls man zu je zwei verschiedenen Punkten $p, q \in X$ disjunkte **Umgebungen** finden kann, also Umgebungen $U \ni p$ und $V \ni q$ mit $U \cap V = \emptyset$.

Beispiel:

1. **Metrische Räume** sind **hausdorffsch**.

Beweis. Sei $d(p, q) =: \varepsilon$.

Behauptung: $B_{\varepsilon/3}(p) \cap B_{\varepsilon/3}(q) = \emptyset$.

Sei $z \in B_{\varepsilon/3}(p) \cap B_{\varepsilon/3}(q)$. Dann gilt

$$d(p, q) \stackrel{\Delta\text{-Ugl.}}{\leq} d(p, z) + d(z, q) \leq \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} + \frac{2\varepsilon}{3} > \varepsilon \quad \text{!}$$

2. $(\mathbb{R}, \mathcal{O}_{\text{standard}})$ ist hausdorffsch, da die Standard-Topologie von der **Metrik** induziert wird.
3. $(\mathbb{R}, \mathcal{O}_{\text{Zariski}})$ ist nicht hausdorffsch: offene Mengen sind Komplemente von endlich vielen Punkten, also für $p, q \in \mathbb{R}$, $p \neq q$:

$$U_p = \mathbb{R} \setminus \{p_1, \dots, p_n\}$$

$$U_q = \mathbb{R} \setminus \{q_1, \dots, q_k\},$$

$$\text{also } U_p \cap U_q \neq \emptyset.$$

Wichtige Konsequenz von "hausdorffsch": In einem Hausdorff-Raum hat jede Folge höchstens einen Limespunkt/Grenzwert.⁵

Bemerkung 11 (Eigenschaften von Hausdorff-Räumen).

1. Jeder Teilraum (mit **Teilraum-Topologie**) eines **Hausdorff-Raumes** ist hausdorffsch.
2. X, Y Hausdorff-Räume $\Rightarrow X \times Y$ ist Hausdorff-Raum bezüglich **Produkt-Topologie**.

⁵ **Erinnerung: Konvergenz:** $(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset X$ (**top. Raum**). $X \ni a$ heißt **Limes** um $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ falls es zu jeder **Umgebung** U von a ein $n_0 \in \mathbb{N}$ gibt, sodass $x_n \in U \forall n \geq n_0$.

3.3 Stetigkeit

Definition 3.13 (Stetigkeit). $(X, \mathcal{O}_X), (Y, \mathcal{O}_Y)$ **topologische Räume**. Eine Abbildung $f : X \rightarrow Y$ heißt **stetig**, falls die Urbilder von offenen Mengen in Y offen sind in X .

Beispiel 3.14 (Einfache Stetigkeiten).

1. $\text{Id} : X \rightarrow X, x \mapsto x$ ist stetig.
2. Die Komposition von stetigen Abbildungen ist stetig.
3. Für $(X, \mathcal{O}) = (\mathbb{R}, \mathcal{O}_{\text{standard}}) = (Y, \mathcal{O}_Y)$ gibt es unendlich viele Beispiele in Analysis I.

Für **metrische Räume** ist diese Definition äquivalent zur ε - δ -Definition und zur Folgenstetigkeit⁶.

Definition 3.15 (Homöomorphismus).

- Eine bijektive Abbildung $f : X \rightarrow Y$ zwischen **topologischen Räumen** heißt **Homöomorphismus**, falls f und f^{-1} stetig sind.
- X und Y heißen **homöomorph**, falls ein Homöomorphismus $f : X \rightarrow Y$ existiert (notiere $X \cong Y$).

Bemerkung 12 (Homöomorphismengruppe).

- $\text{Id}_X : X \rightarrow X, x \mapsto x$ ist **Homöomorphismus**.
- Verkettungen von Homöomorphismen sind wieder Homöomorphismen.
- Inverses eines Homöomorphismus ist ein Homöomorphismus.

Aus diesen drei Punkten folgt, dass die Homöomorphismen eine Gruppe bilden.

Beispiel 3.16 (Einfache Homöomorphismen).

- $[0, 1] = \{t \in \mathbb{R} : 0 \leq t \leq 1\} \cong [a, b]$ mit $a < b \in \mathbb{R}$
(via $f(t) = a + t(b - a)$).
- $(0, 1) = \{t \in \mathbb{R} : 0 < t < 1\} \cong (a, b)$ mit $a < b$ beliebig.
- $\mathbb{R} \cong (-1, 1) \cong (0, 1)$
(z.B. via $t \mapsto \tanh t = \frac{e^{2t} - 1}{e^{2t} + 1}$).

⁶ Übungsaufgabe!

- **Stetig** und injektiv, aber kein Homöomorphismus!

$f : [0, 1) \rightarrow S^1, t \mapsto e^{2\pi i t} = \cos(2\pi t) + i \sin(2\pi t)$ ist stetig, injektiv, aber kein Homöomorphismus.

- Projektions-Abbildungen sind stetig, z.B. $p_1 : X_1 \times X_2 \rightarrow X_1, (x_1, x_2) \mapsto x_1$: Für U offen in X_1 ist $p_1^{-1}(U) = U \times X_2$ offen bezüglich der **Produkttopologie**.
- **Metrische Räume** $(X, d_X), (Y, d_Y)$ und **Isometrie** $f : X \rightarrow Y$, also eine bijektive Abbildung, so dass

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

Behauptung: f ist Homöomorphismus (bzgl. der durch **Metrik** definierten **Topologien**).

Beweis. (über ε - δ -Definition): $\delta := \varepsilon$.

$d_X(x, y) < \delta \Rightarrow d_Y(f(x), f(y)) = d_X(x, y) < \delta = \varepsilon$, also ist f stetig.

Analog für f^{-1} .

- $S^n = \{x \in \mathbb{R}^{n+1} : \|x\|^2 = 1\}$ ist die n -dimensionale **Einheitssphäre** in \mathbb{R}^{n+1} . $e_{n+1} = (0, \dots, 0, 1)$ sei der "Nordpol" von S^n .

Behauptung: $S^n \setminus \{e_{n+1}\} \cong \mathbb{R}^n$.

Beweis. (via stereographische Projektion):

$$\mathbb{R}^n \cong \{x \in \mathbb{R}^{n+1} : x_{n+1} = 0\},$$

$$f(x) := \left(\frac{x_1}{1-x_{n+1}}, \dots, \frac{x_n}{1-x_{n+1}} \right) \text{ stetig,}$$

$$f^{-1} : \mathbb{R}^n \rightarrow S^n, y \mapsto \left(\frac{2y_1}{\|y\|^2+1}, \dots, \frac{2y_n}{\|y\|^2+1}, \frac{\|y\|^2-1}{\|y\|^2+1} \right) \text{ auch stetig.}$$

Also ist f homöomorph.

Achtung: S^n ist nicht homöomorph zu \mathbb{R}^n (da S^n **kompakt** und \mathbb{R}^n nicht kompakt ist, mehr dazu später).

Bemerkung 13 (**Isometrien**-Untergruppe). Isometrien bilden eine Untergruppe der **Homöomorphismen** von X (versehen mit von der **Metrik** induzierten Topologie):

$$\text{Isom}(X, d) \subseteq \text{Homö}(X, \mathcal{O}_d) \subseteq \text{Bij}(X).$$

Bemerkung 14 (Exkurs 1: Kurven). Was ist eine Kurve?

Naive Definition: Eine Kurve ist ein stetiges Bild eines Intervalls.

Problem: \exists stetige, surjektive (aber nicht injektive) Abbildungen $I = [0, 1] \rightarrow I^2$

(“Peano-Kurven”, “space-filling curves”)⁷.

Ausweg 1: Jordan-Kuven (bzw. geschlossene J-Kurven).

$\text{:= top. Raum, homöomorph zu } I = [0, 1] \text{ (J-Kurve)}$

$\text{:= top. Raum, homöomorph zu } S^1 \text{ (geschlossene J-Kurve)}$

Ausweg 2: reguläre stetig differenzierbare Kurven (lokal injektiv).

Verwendung: z.B. Knoten — spezielle geschlossene Jordankurve als Unterraum von \mathbb{R}^3 :

$$\exists f : S^1 \rightarrow \mathbb{R}^3 \text{ mit } f(S^1) \cong S^1$$

mit **Teilraumtopologie** von \mathbb{R}^3 .

Zwei Knoten $K_1, K_2 \subset \mathbb{R}^3$ sind *äquivalent*, falls es einen Homöomorphismus h von \mathbb{R}^3 gibt mit $h(K_1) = K_2$.⁸

Bemerkung 15 (Exkurs 2: Topologische Gruppen). Eine **topologische Gruppe** ist eine Gruppe versehen mit einer **Topologie**, sodass die Gruppenmultiplikation

$$m : G \times G \rightarrow G, \quad (g, h) \mapsto g \cdot h$$

mit **Produkt-Topologie** und die Inversenbildung

$$i : G \rightarrow G, \quad g \mapsto g^{-1}$$

stetig sind.

Beispiel 3.17 (Topologische Gruppen).

1. G beliebige Gruppe mit **diskreter Topologie** ist **topologische Gruppe**.
2. \mathbb{R}^n mit **Standard-Topologie** ist abelsche topologische Gruppe.
3. $\mathbb{R} \setminus \{0\}, \mathbb{C} \setminus \{0\}$ sind multiplikative topologische Gruppen.
4. $H \subset G$ Untergruppe einer topologischen Gruppe ist topologische Gruppe bzgl. **Teilraumtopologie**.
5. Das Produkt von topologischen Gruppen mit **Produkttopologie** ist eine topologische Gruppe.
6. $\text{GL}(n, \mathbb{R}) = \{A \in \underbrace{\mathbb{R}^{n \times n}}_{=\mathbb{R}^{n^2}} : \det A \neq 0\}$ allg. reelle lineare Gruppe.

$\text{GL}(n, \mathbb{R}) \subset \mathbb{R}^{n^2}$ versehen mit **Teilraum-Topologie** induziert von $\mathbb{R}^{n^2} = \mathbb{R}^{n \times n}$ ist topologische Gruppe:

⁷ Mehr dazu in Königsberger — Analysis I.

⁸ **Knotentheorie** studiert die Äquivalenz von Knoten, siehe z.B. Sossinsky — Mathematik der Knoten

- Matrizenmultiplikation ist **stetige** Abbildung ($\mathbb{R}^{n^2} \times \mathbb{R}^{n^2} \rightarrow \mathbb{R}^{n^2}$),
- Inversen-Abbildung ist ebenfalls stetig (wegen expliziter Formel für A^{-1}).

7. $\text{SO}(n) = \{A \in \text{GL}(n, \mathbb{R}) : A^T A = E_n, \det A = 1\}$ ist die **spezielle orthogonale Gruppe**. Sie ist eine topologische Gruppe nach Beispiel 4 und 6.

Insbesondere ist

$$\text{SO}(2) = \left\{ \begin{pmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix} : \vartheta \in [0, 2\pi] \right\} \cong S^1$$

eine abelsche topologische Gruppe.

3.4 Zusammenhang

Definition 3.18 (Zusammenhängend). Ein **topologischer Raum** (X, \mathcal{O}) heißt **zusammenhängend**, falls \emptyset und X die einzigen gleichzeitig offenen und abgeschlossenen Teilmengen von X sind.

Äquivalent: X ist zusammenhängend $\Leftrightarrow X$ ist *nicht* disjunkte Vereinigung von 2 offenen, nichtleeren Teilmengen.

Beweis. $A \subset X$ offen und abgeschlossen $\Leftrightarrow A$ und $X \setminus A$ offen $\Leftrightarrow A$ und $X \setminus A$ abgeschlossen.

Beispiel 3.19 (Zusammenhang).

1. \mathbb{R} (und ebenso beliebige Intervalle) ist **zusammenhängend**, $\mathbb{R} \setminus \{0\}$ ist *nicht* zusammenhängend.

Beweis. Sei $I \subseteq \mathbb{R}$ (abgeschlossenes oder offenes oder halboffenes) Intervall.

Annahme: $I \neq U \neq \emptyset$, sei eine offen-abgeschlossene Teilmenge von I . Dann gibt es mindestens einen Punkt $u \in U$ und $v \in I \setminus U$. OBdA $u < v$. Setze $U_0 := \{x \in U : x < v\}$ und $c := \sup U_0$. Also $u \leq c \leq v$. Weiter ist $c \in U$, da U abgeschlossen ist. Eine ganze **Umgebung** von c gehört auch zu U , da U offen ist. Damit gehört eine ganze Umgebung von c auch zu U_0 \nrightarrow

Bemerkung 16 (Ergänzung: Zusammenhang von Teilmengen). *Allgemein:* Eine Teilmenge $B \subset X$ heißt **zusammenhängend**, falls sie bezüglich der **Teilraumtopologie** zusammenhängend ist.

Bemerkung 17 (Einpunktige Mengen). Einpunktige Mengen sind **zusammenhängend**: $\{x\}$ mit **Teilraumtopologie** ist diskret (also sind $\{x\}$ und \emptyset die einzigen offenen Mengen).

Definition 3.20 (Zusammenhangskomponente). Sei $x \in X$. Die **Zusammenhangskomponente** $Z(x)$ ist die Vereinigung aller **zusammenhängenden** Teilmengen, die x enthalten.

Lemma 3.21 (Eigenschaften **zusammenhängender** Mengen).

1. A ist zusammenhängend $\Rightarrow \overline{A}$ (abgeschlossene Hülle von A) ist zusammenhängend.
2. A, B zusammenhängend, $A \cap B \neq \emptyset \Rightarrow A \cup B$ zusammenhängend.⁹

Bemerkung 18 (Zusammenhängende Mengen bilden disjunkte Zerlegung). **Zusammenhangskomponenten** von X sind zusammenhängende Mengen und bilden eine disjunkte Zerlegung von X .

Beweis. Definiere eine Äquivalenzrelation (für $x, y \in X$):

$$x \sim y \stackrel{\text{Def}}{\iff} \exists \text{ zusammenhängende Menge } A : x, y \in A.$$

\sim ist Äquivalenzrelation:

- **Reflexivität:** $x \sim x$, denn die einpunktige Menge $\{x\}$ ist zusammenhängend.
- **Symmetrie:** $x \sim y \Rightarrow y \sim x$ nach Definition.
- **Transitivität:** $x \sim y \wedge y \sim z \Rightarrow x \sim z$:
 $x \sim y : \exists A$ zusammenhängend mit $x, y \in A$.
 $y \sim z : \exists B$ zusammenhängend mit $y, z \in B$.
Also $y \in A \cap B \stackrel{\text{Lemma}}{\Rightarrow} A \cup B$ zusammenhängend.

Beispiel 3.22 (**Zusammenhangskomponenten**).

1. $\mathbb{R} \setminus \{t\} = \{s \in \mathbb{R} : s < t\} \cup \{s \in \mathbb{R} : s > t\}$ hat 2 Zusammenhangskomponenten.
2. $\mathbb{Q} = \mathbb{R} \setminus \{\text{irrationale Zahlen}\}$ mit **Teilraum-Topologie** von $(\mathbb{R}, \mathcal{O}_{\text{standard}})$ ist **total unzusammenhängend**, d.h. alle Zusammenhangskomponenten sind einpunktig.

Beweis. Annahme: $A \subset \mathbb{Q}$ mit mindestens 2 verschiedenen Punkten.

Behauptung: A ist nicht zusammenhängend.

Sei $\{q_1, q_2\} = A \subset \mathbb{Q}$ mit $q_1 \neq q_2$ (oBdA $q_1 < q_2$). Sei $s \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$ mit $q_1 < s < q_2$, $O_1 = \{t \in \mathbb{R} : t < s\}$, $O_2 = \{t \in \mathbb{R} : t > s\}$, $\widetilde{O}_1 = O_1 \cap A$, $\widetilde{O}_2 = O_2 \cap A$. \widetilde{O}_1 und \widetilde{O}_2 sind offen in A oder in \mathbb{Q} bezüglich der Teilraumtopologie. Es ist $A = \widetilde{O}_1 \cup \widetilde{O}_2$ mit $\widetilde{O}_1 \cap \widetilde{O}_2 \neq \emptyset$, d.h. A ist *nicht* zusammenhängend.

⁹ Übungsaufgabe, es wird nur die Definition von Zusammenhang benötigt.

Definition 3.23 (Weg-Zusammenhängend). Sei (X, \mathcal{O}) ein **topologischer Raum**. X heißt **weg-zusammenhängend**, wenn es zu je zwei Punkten $p, q \in X$ einen Weg (d.h. stetige Abbildung $\alpha : [0, 1] \rightarrow X$ mit $\alpha(0) = p$ und $\alpha(1) = q$) zwischen p und q gibt.

Lemma 3.24 (Weg-Zusammenhang). X ist **weg-zusammenhängend** $\Rightarrow X$ ist **zusammenhängend**.

Beweis. Wäre X nicht zusammenhängend, dann \exists eine disjunkte Zerlegung $X = A \cup B$ mit A, B offen und nicht-leer, $A \cap B = \emptyset$ mit $p \in A$ und $q \in B$. Sei $\alpha : [0, 1] \rightarrow X$ ein (stetiger) Weg zwischen p und q , also $\alpha(0) = p$ und $\alpha(1) = q$. Daraus folgt, dass $[0, 1] = \alpha^{-1}(\alpha([0, 1])) = \alpha^{-1}(A \cap \alpha([0, 1])) \cup \alpha^{-1}(B \cap \alpha([0, 1])) \Rightarrow [0, 1]$ ist nicht zusammenhängend \nexists

Achtung: Umkehrung gilt nicht! Z.B. "topologische Sinuskurve"¹⁰ X ist zusammenhängend, aber *nicht* weg-zusammenhängend:

$$X := \left\{ \left(x, \sin \frac{1}{x} \right) \in \mathbb{R}^2 : 0 < x \leq 1 \right\} \cup \{ (0, y) : |y| < 1 \}.$$

Lemma 3.25 (Weg-Zusammenhang von Bildern). **Stetige** Bilder von (**weg-**)**zusammenhängenden** Räumen sind (weg-)zusammenhängend.

Beweis.

1. Sei $f : X \rightarrow X$ stetig und $f(X) = A \cup B$ eine disjunkte Zerlegung in nichtleere offene Mengen.
Dann ist $X = f^{-1}(A) \cup f^{-1}(B)$ eine disjunkte Zerlegung.
2. Seien $x = f(p), y = f(q)$ zwei Punkte in $f(X)$. Es ist $p = f^{-1}(x), q = f^{-1}(y)$.
Dann existiert $a : [0, 1] \rightarrow X$ mit $a(0) = p$ und $a(1) = q$ und somit ist $f \circ a : [0, 1] \rightarrow f(X)$ ein **stetiger Weg** in $f(X)$.

Korollar 3.26 (Zwischenwertsatz). Eine **stetige Funktion** $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ nimmt jeden Wert zwischen $f(a)$ und $f(b)$ an.

Bemerkung 19 (Test auf **Homöomorphie** via **Zusammenhang**).

Beispiel: $\mathbb{R} \cong \mathbb{R}^n$ nur falls $n = 1$.

Beweis. Wir nehmen an, dass $\mathbb{R} \cong \mathbb{R}^n$ für $n \geq 1$. Es ist

$$\underbrace{\mathbb{R} \setminus \{\text{Punkt}\}}_{\text{nicht zusammenhängend}} \cong \underbrace{\mathbb{R}^n \setminus \{\text{Punkt}\}}_{\text{zusammenhängend für } n \geq 2} \quad \nexists$$

Ebenso: $[0, 1] \cong [0, 1]^n$ nur für $n = 1$.

¹⁰ **Details:** Singer-Thorpe p.52

Satz 3.27 (von Brouwer). $\mathbb{R}^n \not\cong \mathbb{R}^m$ für $m \neq n$.

Beweis. Der Beweis benutzt den **Satz von Gebietstreue** (Brouwer):

Ist $U \subseteq \mathbb{R}^n$ offen und $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$ eine injektive **stetige** Abbildung, so ist $f(U) \subseteq \mathbb{R}^n$ offen.

Beweisidee: Ist $m < n$, so ist

$$j : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n, \quad (x_1, \dots, x_m) \mapsto (x_1, \dots, x_m, 0, \dots, 0)$$

eine Einbettung und eine injektive, stetige Abbildung von \mathbb{R}^m auf eine *nicht* offene Teilmenge von \mathbb{R}^n . Wäre $\mathbb{R}^m \cong \mathbb{R}^n$, so hat man einen Widerspruch zum Satz von Gebietstreue.¹¹

3.5 Kompaktheit

Definition 3.28 ((Lokal) kompakt). Ein **topologischer Raum** heißt **kompakt**, wenn jede offene Überdeckung von X eine *endliche* Teilüberdeckung besitzt, also

$$X = \bigcup_{i \in I} U_i, \quad U_i \text{ offen} \Rightarrow \exists i_1, \dots, i_k \in I :$$

$$X = U_{i_1} \cup \dots \cup U_{i_k}$$

- $A \subseteq X$ heißt *kompakt*, wenn A bezüglich der **Teilraumtopologie** kompakt ist.
- X heißt *lokal kompakt*, wenn jeder Punkt von X eine kompakte Umgebung besitzt.

Bemerkung 20 (Verwendung **kompakter Räume**). Kompakte Räume sind oft “einfacher” als nicht-kompakte, weil man beispielsweise von lokalen Eigenschaften auf globale schließen kann.

Begründung: $\forall x \in X \exists U_x : f|_{U_x} \leq c_x$. Schreibe $X = \bigcup_{x \in X} U_x$. Da X kompakt ist existieren $x_1, \dots, x_k \in X$, sodass $X = \bigcup_{i=1}^k U_{x_i}$.
 $\Rightarrow f(x) \leq \max\{c_{x_1}, \dots, c_{x_k}\}$.

Beispiel 3.29 (Beschränktheit im Kompakten). Ist X kompakt und $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ **lokal beschränkt** (d.h. jeder Punkt von X hat eine Umgebung, in der f beschränkt ist — z.B. wahr für **stetige** Funktionen), dann ist f beschränkt.

Beispiel 3.30 (**Kompaktheit** von Intervallen). $I = [0, 1]$ ist kompakt (ebenso $[a, b]$).

Beweis. Sei $(U_i)_{i \in I}$ eine offene Überdeckung von $[0, 1]$. Dann existiert eine sogenannte **Lebesgue-Zahl** $\delta > 0$, sodass jedes Teilintervall $I_\delta \subset I$ der Länge δ in einem U_i liegt. Da

¹¹ siehe auch Alexandrov-Hopf, Topologie, 1935, Kap. X.2

$[0, 1]$ mit endlich vielen Intervallen der Länge δ überdeckt werden kann, kann man das auch mit endlich vielen U_i .

Bemerkung 21 (Hinweise zur **Lebesgue-Zahl**). Gäbe es ein solches $\delta > 0$ nicht, so wählt man eine Folge von Intervallen $(I_n)_{n \geq 1}$, $I_n \subset [0, 1]$ der Länge $\frac{1}{n}$, die jeweils in keiner Überdeckungsmenge U_i liegen. Nach Bolzano Weierstraß¹² folgt, dass eine Teilfolge der Mittelpunkte m_n von I_n konvergiert gegen ein $t \in I$. Dieses t liegt aber in einem U_i . Also, da U_i offen ist, liegen auch die m_n in U_j für genügend großes n ↯

Satz 3.31 (Sätze über kompakte Räume).

1. **Stetige Bilder** von **kompakten Räumen** sind kompakt.
2. Abgeschlossene Teilräume von kompakten Räumen sind kompakt.
3. Produkte von kompakten Räumen sind kompakt.

Beweis.

1. Sei $f(X) = \bigcup_{i \in I} U_i$ eine offene Überdeckung. Daraus folgt, dass $(F^{-1}(U_i))_{i \in I}$ eine offene Überdeckung von X ist. X ist kompakt, also

$$X = F^{-1}(U_{i_1}) \cup \dots \cup F^{-1}(U_{i_k})$$

und schließlich

$$f(X) = U_{i_1} \cup \dots \cup U_{i_k}.$$

2. Sei X kompakt und $A \subset X$ abgeschlossen.

$A = \bigcup_{i \in I} U_i$ ist offene Überdeckung, also ist $U_i = V_i \cap A$ für V_i offen in X .

A ist abgeschlossen, also ist $X \setminus A$ offen und $X = (X \setminus A) \cup \bigcup_{i \in I} V_i$ ist offene Überdeckung von X .

Da X kompakt ist gilt:

$$X = (X \setminus A) \cup V_{i_1} \cup \dots \cup V_{i_k} \Rightarrow A = X \cap A$$

also

$$A = X \cap A = (V_{i_1} \cup \dots \cup V_{i_k}) \cap A = U_{i_1} \cup \dots \cup U_{i_k}.$$

3. Die allgemeine Aussage (**Satz von Tichonow**¹³) benutzt das **Lemma von Zorn**¹⁴.

Seien X und Y kompakte Räume.

Behauptung: $X \times Y$ ist kompakt.

Sei $X \times Y = \bigcup_{\lambda \in \Lambda} W_\lambda$ offene Überdeckung. Für jedes $(x, y) \in X \times Y$ existiert $\lambda(x, y)$

¹² "jede konvergente Folge in \mathbb{C} hat konvergente Teilfolgen"

¹³ Ist $(X_i)_{i \in I}$ eine Familie kompakter topologischer Räume, dann ist auch das kartesische Produkt mit der Produkttopologie kompakt.

¹⁴ Eine halbgeordnete Menge, in der jede Kette eine obere Schranke hat, enthält mindestens ein maximales Element.

sodass $(x, y) \in W_{\lambda(x, y)}$. Da $W_{\lambda(x, y)}$ offen ist existiert $U_{(x, y)} \subset X$ und $V_{(x, y)} \subset Y$ sodass

$$(x, y) \in U_{(x, y)} \times V_{(x, y)} \subset W_{\lambda(x, y)}.$$

Für festes x ist $\bigcup_{y \in Y} V_{(x, y)}$ eine offene Überdeckung von Y , also — da Y kompakt ist — existieren $y_1(x), \dots, y_{m_x}(x)$ sodass

$$Y = V_{(x, y_1(x))} \cup \dots \cup V_{(x, y_{m_x}(x))}.$$

Setze

$$U_x := U_{(x, y_1(x))} \cap \dots \cap U_{(x, y_{m_x}(x))}.$$

Da X kompakt ist existieren x_1, \dots, x_n sodass $X = U_{x_1} \cup \dots \cup U_{x_n}$. Dann ist

$$X \times Y = \bigcup_{\substack{k=1, \dots, n \\ j=1, \dots, m_x}} W_{\lambda(x_k, y_j(x_k))}.$$

Beispiel 3.32 (Weitere **kompakte Mengen**).

1. Produkte kompakter Mengen:

$$[0, 1]^n = \underbrace{[0, 1] \times \dots \times [0, 1]}_{n \text{ Faktoren}}$$

ist kompakt (Würfel — allgemein $[a, b]^n$ ist kompakt)

2. Abgeschlossene Teilräume kompakter Mengen:

Abgeschlossene Teilräume des n -dimensionalen Würfels sind kompakt. Insbesondere: jede abgeschlossene beschränkte¹⁵ Teilmenge von \mathbb{R}^n (mit **Standard-Topologie**) ist kompakt (da diese Teilmenge im Würfel mit Kantenlänge $2c$ liegt, wenn sie in einem Ball um den Nullpunkt mit Radius c liegt).

Satz 3.33 (Heine-Borel). Die **kompakten Teilmengen** von \mathbb{R}^n sind genau die abgeschlossen-beschränkten Teilmengen.

Beweis.

- \Leftarrow . Siehe **obiges Beispiel**.
- \Rightarrow . Sei $K \subset \mathbb{R}^n$ kompakt.

Die **Norm** $\|\cdot\| : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \|x\| = \sqrt{x_1^2 + \dots + x_n^2} = d(0, x)$ ist stetig, also insbesondere lokal beschränkt und damit global beschränkt.

Dass K abgeschlossen ist folgt aus dem nächsten Lemma.

¹⁵ Eine Menge $A \subset \mathbb{R}^n$ ist *beschränkt*, wenn sie in einem beliebig großen Ball um den Nullpunkt liegt, also falls $\forall a \in A : \|a\| \leq x < \infty$

Lemma 3.34 (Kompakte Mengen in Hausdorffraum abgeschlossen). Sei X ein topologischer Raum, der hausdorffsch ist, und $K \subseteq X$ kompakt. Dann ist K abgeschlossen.

Beweis. Es ist zu zeigen dass $X \setminus K$ offen ist in X .

Sei dafür $x_0 \in X \setminus K$. Für jedes $x \in K$ wähle eine offene Umgebung U_x von x_0 und V_x von x , sodass $U_x \cap V_x = \emptyset$ (das geht, weil X hausdorffsch ist).

Da K kompakt ist, existieren Punkte $x_1, \dots, x_n \in K$ mit

$$K = (V_{x_1} \cap K) \cup \dots \cup (V_{x_n} \cap K).$$

K kann also durch endlich viele Mengen überdeckt werden.

Setze $U := U_{x_1} \cap \dots \cap U_{x_n}$. Dann gilt:

$$\begin{aligned} U \cap K &\subseteq U \cap (V_{x_1} \cup \dots \cup V_{x_n}) \\ &= (V_{x_1} \cap U) \cup \dots \cup (V_{x_n} \cap U) \\ &\subseteq (V_{x_1} \cap U_{x_1}) \cup \dots \cup (V_{x_n} \cap U_{x_n}) = \emptyset, \end{aligned}$$

also $x_0 \in U \subset X \setminus K$.

Korollar 3.35 (Minimum und Maximum von Teilmengen). Jede stetige Funktion $f : K \rightarrow \mathbb{C}$ auf einer kompakten Teilmenge eines Hausdorffraums nimmt ein endliches Maximum und Minimum an.¹⁶

Satz 3.36 (Homöomorphismen auf Hausdorff-Räumen). Eine stetige, bijektive Abbildung $f : K \rightarrow Y$ von einem kompakten Raum K auf einen Hausdorff-Raum Y ist ein Homöomorphismus.

Bemerkung: Das gilt im Allgemeinen nicht! Beispielsweise

$$X = [0, 1], \quad Y = S^1, \quad f(t) = e^{it2\pi}$$

ist bijektiv und stetig, aber kein Homöomorphismus. Sonst wäre $[0, 1] \cong S^1$ (da S^1 kompakt ist, aber $[0, 1]$ nicht)

Beweis. Zu zeigen: Inverse Abbildung f^{-1} ist stetig.

Wir müssen zeigen, dass die Bilder von offenen (bzw. abgeschlossenen) Mengen von $f = (f^{-1})^{-1}$ offen (bzw. abgeschlossen) sind.

Sei $A \subseteq K$ abgeschlossen. Dann ist A kompakt (als Teilraum eines kompakten Raumes). Dann ist $f(A)$ kompakt (als stetiges Bild einer kompakten Menge) in Y und somit ist $f(A) \subset Y$ abgeschlossen (als kompakter Teilraum eines Hausdorff-Raumes).

¹⁶ Übungsaufgabe: Beweisen (siehe Satz von Weierstraß in Analysis)

4

Spezielle Klassen von topologischen Räumen

4.1 Übersicht

Folgende spezielle Klassen sollen diskutiert werden:

- **metrische Räume** \leadsto metrische Geometrie
- **Mannigfaltigkeiten** (Grundobjekte in Differenzialgeometrie, Physik,...)
- **Polyeder, Simplicialkomplexe** (Kombinatorik, algebraische Topologie)
- Bahnen-Räume von Gruppenaktionen (geometrische Gruppentheorie)

4.2 Topologische Mannigfaltigkeiten

Definition 4.1 (Topologische Mannigfaltigkeit). Eine **topologische Mannigfaltigkeit** ist ein **topologischer Raum** M mit folgenden Eigenschaften:

1. M ist **lokal euklidisch**, d.h. $\forall p \in M \exists$ offene Umgebung U von p und ein **Homöomorphismus** $\varphi : U \rightarrow \varphi(U) \subset \mathbb{R}^n$ mit festem n . Das Paar (φ, U) heißt **Karte**¹ und $\mathcal{A} = \{(\varphi_\alpha, U_\alpha) : \alpha \in A\}$ mit $\bigcup_{\alpha \in A} U_\alpha = M$ heißt **Atlas**.
2. M ist **hausdorffsch** und besitzt abzählbare Basis der Topologie.

¹ Eine mathematische Karte ist einer echten Karte ähnlich. Man nehme einen Punkt, zum Beispiel Karlsruhe, und beschreibe die Umgebung von Karlsruhe in Form einer Karte auf einer DIN A4-Karte. Das ist natürlich nicht bijektiv, aber man versucht es möglichst bijektiv zu machen.

Bemerkung:

- Die zweite Eigenschaft ist "technisch" und garantiert, dass eine "Zerlegung der Eins" existiert (braucht man z.B. für die Existenz von Riemannschen Metriken).
- Die Zahl n heißt **Dimension** von M (eindeutig, wenn M **zusammenhängend** ist, siehe **Satz von Gebietstreue**).

Beispiel 4.2 (Topologische Mannigfaltigkeiten).

0. Eine abzählbare Menge mit **diskreter Topologie** (jeder Punkt ist offen) ist eine 0-dimensionale Mannigfaltigkeit.

1. S^1 ist eine **kompakte, zusammenhängende** 1-dimensionale Mannigfaltigkeit.

\mathbb{R} ist nichtkompakte, zusammenhängende 1-Mannigfaltigkeit.

2. Jede offene Teilmenge einer Mannigfaltigkeit ist wieder eine Mannigfaltigkeit, z.B. ist jede offene Teilmenge von \mathbb{R}^n eine n -dimensionale Mannigfaltigkeit (hier ist **Karte** = Einschränkung der Identität).

Spezialfall: $GL(n, \mathbb{R}) = \{A \in \mathbb{R}^{n \times n} : \det A \neq 0\}$ ist offene Teilmenge von \mathbb{R}^{n^2} , also eine n^2 -dimensionale Mannigfaltigkeit, denn:

- $\det : \mathbb{R}^{n \times n} \rightarrow \mathbb{R}$ ist stetig
- $\{0\}$ ist abgeschlossen in \mathbb{R}
- $\det^{-1}\{0\}$ ist abgeschlossen in $\mathbb{R}^{n \times n}$
- $\mathbb{R}^{n \times n} \setminus \det^{-1}\{0\} = GL(n, \mathbb{R})$ ist offen in $\mathbb{R}^{n \times n}$

3. Die **n -dimensionale Sphäre** mit Radius $R > 0$,

$$S_R^n = \{x \in \mathbb{R}^{n+1} : \|x\| = R\},$$

ist n -dimensionale topologische Mannigfaltigkeit.

Beweis. Sei $(x_1, \dots, x_{n+1}) = p \in S_R^n$, oBdA $x_{n+1} > 0$. Man betrachte die Abbildung

$$\begin{aligned} \varphi^{-1} : D_R^n &:= \{x \in \mathbb{R}^n : \|x\| < R\} \rightarrow \varphi(D_R^n) \subset S_R^n \\ (x_1, \dots, x_n) &\mapsto (x_1, \dots, x_n, \sqrt{R^2 - (x_1^2 + \dots + x_n^2)}) \end{aligned}$$

d.h. φ ist Einschränkung der Orthogonalprojektion

$$\mathbb{R}^{n+1} \rightarrow \mathbb{R}^n \subset \mathbb{R}^{n+1}$$

$$(x_1, \dots, x_{n+1}) \mapsto (x_1, \dots, x_n, 0)$$

auf S_R^n .

Alternativ kann via stereographischer Projektion mit 2 Karten auskommen werden.

Ein **Atlas** mit einer Karte existiert nicht.

4. Das Produkt von n_1 -dimensionaler Mannigfaltigkeit M_1 und n_2 -dimensionaler Mannigfaltigkeit M_2 ist $(n_1 + n_2)$ -dimensionale Mannigfaltigkeit.

Karten: $(p_1, p_2) \in M_1 \times M_2$,

$$\tilde{\varphi} : U_1 \times U_2 \rightarrow \varphi_1(U_1) \times \varphi_2(U_2) \subset \mathbb{R}^{n_1} \times \mathbb{R}^{n_2}$$

mit (U_1, φ_1) Karte von M_1 um p_1 und (U_2, φ_2) Karte von M_2 um p_2 .

Bemerkung 22 ("Wieviele **topologische Mannigfaltigkeiten** gibt es?").

- *Dimension $n = 1$:* Im wesentlichen \mathbb{R} (nicht **kompakt**) oder S^1 (kompakt).
- *Dimension $n = 2$:* Liste für **zusammenhängende**, kompakte, "orientierbare", "randlose" Mannigfaltigkeiten:
 - $g = 0$: S^2 **Einheitssphäre**
 - $g = 1$: $T^2 = S^1 \times S^1$ Torus
 - $g = 2$: Brezel
 - ...

g ist das **Geschlecht** der Mannigfaltigkeit.

- *Dimension $n = 3$:* Thurston's **Geometrisierungs-Vermutung** (~ 1978)
Bewiesen von Perelman (2002), ein Milleniumsproblem.
- *Dimension $n \geq 4$:* Allgemeine Klassifikation unmöglich, weil das Homöomorphieproblem hier nicht entscheidbar ist (Markov, 1960).

4.3 Differenzierbare Mannigfaltigkeiten

Definition 4.3 (Kartenwechsel, differenzierbare Mannigfaltigkeit). Sei M **topologische Mannigfaltigkeit**, $p \in M$. Ein **Kartenwechsel** ist ein **Homöomorphismus**

$$\psi \circ \varphi^{-1} : \underbrace{\varphi(D)}_{\subset \mathbb{R}^n} \rightarrow \underbrace{\psi(D)}_{\subset \mathbb{R}^n}.$$

Ein **Atlas** \mathcal{A} von M ist ein **C^∞ -Atlas**, falls alle möglichen Kartenwechsel C^∞ -Abbildungen von \mathbb{R}^n sind, also alle partiellen Ableitungen existieren und stetig sind. Ein maximaler C^∞ -Atlas heißt **C^∞ -Struktur** auf der topologischen Mannigfaltigkeit M . Eine C^∞ -Mannigfaltigkeit ist eine topologische Mannigfaltigkeit mit einer C^∞ -Struktur (auch **glatte** oder **differenzierbare Mannigfaltigkeit**).

Bemerkung 23.

1. Es gibt **topologische Mannigfaltigkeiten** ohne **differenzierbare Struktur**².
2. Auf \mathbb{R}^n , $n \neq 4$ ³, existiert genau eine differenzierbare Struktur.
3. Auf S^7 existieren 28 differenzierbare Strukturen⁴.

Frage: Wozu die Differenzierbarkeitsbedingung für **Kartenwechsel**? Beispielsweise für die Definition von differenzierbaren Abbildungen zwischen **differenzierbaren Mannigfaltigkeiten**.

Definition 4.4 (Differenzierbarkeit). Seien M^m, N^n **differenzierbare Mannigfaltigkeiten** und $F : M^m \rightarrow N^n$ stetig. F heißt **differenzierbar in** $p \in M$, falls für **Karten** (U, φ) um p und (V, ψ) um $F(p)$ gilt:

$$\psi \circ F \circ \varphi^{-1} : \underbrace{\varphi(U)}_{\subset \mathbb{R}^m} \rightarrow \underbrace{\psi(V)}_{\subset \mathbb{R}^n}$$

ist C^∞ -Abbildung in $\varphi(p)$.

So kommt man von einem abstrakten F zwischen den Mannigfaltigkeiten zu einer konkreten Darstellung von F .

F heißt **differenzierbar** (C^∞), falls F differenzierbar ist für alle $p \in M$.

Bemerkung 24 (Wohldefiniertheit der Differenzierbarkeit). Differenzierbarkeit in p ist wohldefiniert (also unabhängig von der Wahl der Karten)

Beweis. Erster Test: $\psi \circ F \circ \varphi^{-1}$, zweiter Test $\tilde{\psi} \circ F \circ \tilde{\varphi}^{-1}$

Es gilt:

$$\begin{aligned} \psi \circ F \circ \varphi^{-1} &= \psi \circ \underbrace{\tilde{\psi}^{-1} \circ \tilde{\psi}}_{\text{Id}_{\mathbb{R}^n}} \circ F \circ \underbrace{\tilde{\varphi}^{-1} \circ \tilde{\varphi}}_{\text{Id}_{\mathbb{R}^n}} \circ \varphi^{-1} \\ &= \underbrace{(\psi \circ \tilde{\psi}^{-1})}_{C^\infty} \circ (\tilde{\psi} \circ F \circ \tilde{\varphi}^{-1}) \circ \underbrace{(\tilde{\varphi} \circ \varphi^{-1})}_{\text{Kartenwechsel}} \end{aligned}$$

Also: Abbildung in Test 1 ist $C^\infty \Leftrightarrow$ Abbildung in Test 2 ist C^∞ .

² Kerraire 1960

³ Kirby, Friedman 1980

⁴ Milnor 1956

Bemerkung 25.

- $N = \mathbb{R}$, $F : M \rightarrow \mathbb{R}$ (differenzierbar) heißt **differenzierbare Funktion**.
- $M = \mathbb{R}$ (oder $I \subset \mathbb{R}$), $F : I \rightarrow N$ heißt **differenzierbare Kuve**.
- Eine Abbildung $F : M \rightarrow N$ zwischen differenzierbaren Mannigfaltigkeiten heißt **Diffeomorphismus**, falls F bijektiv und F und F^{-1} differenzierbar sind (also C^∞).
- Ein Homöomorphismus ist nicht unbedingt ein Diffeomorphismus. Beispielsweise \mathbb{R} mit Id als Karte, $F : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, $x \mapsto x^3$ ist Homöomorphismus, aber kein Diffeomorphismus, da $F^{-1} : x \mapsto \sqrt[3]{x}$ ist nicht C^∞ .
- Die Menge der Diffeomorphismen einer differenzierbaren Mannigfaltigkeit ist eine Gruppe mit der Verkettung von Abbildungen.

Beispiel 4.5.

1. $U \subseteq \mathbb{R}^n$ offen (bzgl. Standard-Topologie).
 $\varphi_0 := \text{Id} \mid_U$ mit zugehörigem maximalen Atlas definiert C^∞ -Struktur auf U , die kanonische differenzierbare Struktur.
2. 2-dimensionale Mannigfaltigkeiten heißen auch **Flächen**, speziell *regulär parametrisierte Flächen*⁵.

Definition 4.6 (Reguläre Fläche). Eine Teilmenge S von \mathbb{R}^3 (mit Teilraum-Topologie von \mathbb{R}^3) heißt **reguläre Fläche**, falls für jeden Punkt $p \in S$ eine Umgebung V von p in \mathbb{R}^3 und eine Abbildung

$$F : \underset{\text{offen}}{U \subset \mathbb{R}^2} \rightarrow \underset{\text{offene TM von } S}{V \cap S \subset \mathbb{R}^3}$$

$$(u, v) \mapsto (x(u, v), y(u, v), z(u, v))$$

existiert, so dass gilt:

1. F ist ein differenzierbarer Homöomorphismus
2. das Differential (Jacobi-Matrix) von F ,

$$dF_q : \mathbb{R}^2 \supseteq T_q U \rightarrow T_{F(q)} \mathbb{R}^3 \cong \mathbb{R}^3$$

ist *injektiv* (d.h. Jacobi-Matrix hat Rang 2) für $\forall q \in U$.

F heißt **lokale Parametrisierung** von S .

⁵ Gegenstand der klassischen Differentialgeometrie, siehe auch Kapitel 5

Beispiel 4.7 (Rotationsfläche). Gegeben ist eine ebene Kurve $c(v) = (r(v), 0, h(v))$, $v \in [a, b]$ mit $r(v) > 0$, $c'(v) = (r'(v), 0, h'(v))$ Tangentialvektor (mit C^∞ -Funktionen r, h).⁶

$$F(u, v) := \begin{pmatrix} r(v) \cos u \\ r(v) \sin u \\ h(v) \end{pmatrix}$$

ist reguläre Fläche.⁷

Beispiel: 2-Sphäre von Radius R :

$$(u, v) \mapsto \begin{pmatrix} R \cos v \cos u \\ R \cos v \sin u \\ R \sin v \end{pmatrix}.$$

Es gibt andere Parametrisierungen, beispielsweise

$$(u, v) \mapsto \begin{pmatrix} u \\ v \\ \sqrt{R^2 - u^2 - v^2} \end{pmatrix}$$

Bemerkung 26 (Geometrische Eigenschaften parametrisierungsunabhängig).

Geometrische Eigenschaften sollten unabhängig sein von Parametrisierung. Das wird durch Eigenschaft 2 von regulären Flächen garantiert. Genauer gilt: Parameterwechsel sind differenzierbar (\leadsto reguläre Flächen sind differenzierbare 2-dimensionale Mannigfaltigkeiten mit F^{-1} (Umkehr-Abbildung der Parametrisierung) als Karten):

Sei $p \in S$ und $F_1 : \mathbb{R}^2 \supseteq U \rightarrow S$, $F_2 : \mathbb{R}^2 \supseteq V \rightarrow S$ zwei Parametrisierungen, sodass $p \in F_1(U) \cap F_2(V) =: W$.

Behauptung: Der Parameterwechsel

$$H := F_1^{-1} \circ F_2 : \mathbb{R}^2 \supset F_2^{-1}(W) \rightarrow F_1^{-1}(W) \subset \mathbb{R}^2$$

ist Diffeomorphismus.

Beweis. H ist Homöomorphismus, da F_1 und F_2 Homöomorphismen sind.

Problem: F_1^{-1} ist auf einer offenen Teilmenge von S definiert und da weiß man nicht was

⁶ $\|c'(v)\| \neq 0 \Leftrightarrow (r')^2 + (h')^2 \neq 0$

⁷ Übung!

differenzierbar heißt.

Ausweg: Erweiterung von F . Sei $r \in F_2^{-1}(W)$ und $q := H(r)$. Da

$$F_1(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v))$$

reguläre Parametrisierung ist können wir oBdA (erst Koordinatenachsen von \mathbb{R}^3 umbenennen) annehmen, dass

$$\frac{J(x, y)}{J(u, v)}(q) \neq 0 \quad (\text{Jacobi-Determinante}).$$

Trick: Erweitere F_1 zu Abbildung

$$\widetilde{F}_1 : U \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^3$$

$$\widetilde{F}_1(u, v, t) := (x(u, v), y(u, v), z(u, v) + t).$$

\widetilde{F}_1 ist differenzierbar und $\widetilde{F}_1|_{U \times \{0\}} = F_1$.

Die Jacobi-Determinante von \widetilde{F}_1 in $(q, 0)$,

$$\det \begin{pmatrix} \frac{dx}{du} & \frac{dx}{dv} & 0 \\ \frac{dy}{du} & \frac{dy}{dv} & 0 \\ \frac{dz}{du} & \frac{dz}{dv} & 1 \end{pmatrix} (q, 0) = \det \begin{pmatrix} \frac{dx}{du} & \frac{dx}{dv} \\ \frac{dy}{du} & \frac{dy}{dv} \end{pmatrix} (q) \neq 0.$$

Nach dem Umkehrsatz (Analysis II) existiert eine Umgebung A von $\widetilde{F}_1(q, 0) = F_1(q)$ in \mathbb{R}^3 sodass \widetilde{F}_1^{-1} auf A existiert und differenzierbar (C^∞) ist. Da F_2 stetig ist existiert Umgebung B von v in V , sodass $F_2(B) \subset A$. Und nun ist $H|_B = \widetilde{F}_1^{-1} \circ F_2|_B$ ist Verkettung von differenzierbaren Abbildungen, also differenzierbar in r und da r beliebig ist ist H differenzierbar auf $F_2^{-1}(W)$.

Beispiel 4.8 (Weitere Beispiele von differenzierbaren Mannigfaltigkeiten).

1. **n-Sphäre** von Radius R (und Zentrum 0):

$$S_R^n := \{x \in \mathbb{R}^{n+1} : \|x\| = R\}.$$

Karten via stereographischer Projektion.

$$N := (0, \dots, 0, R),$$

$$S := (0, \dots, 0, -R)$$

$$U_1 := S_R^n \setminus \{N\},$$

$$U_2 := S_R^n \setminus \{S\}$$

Stereographische Projektion bzgl N :

$$\varphi_1 : U_1 \rightarrow \mathbb{R}^n, p = (p_1, \dots, p_{n+1}) \mapsto (x_1(p), \dots, x_n(p)), x_i(p) := \frac{Rp_i}{R - p_{i+1}}$$

Stereographische Projektion bzgl. S :⁸

$$\varphi_1 : U_2 \rightarrow \mathbb{R}^n, p = (p_1, \dots, p_{n+1}) \mapsto (x_1(p), \dots, x_n(p)), x_i(p) := \frac{Rp_i}{R - p_{i+1}}$$

Kartenwechsel:

$$\varphi_2 \circ \varphi_1^{-1} : \mathbb{R}^n \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{R}^n \setminus \{0\}, \varphi_2 \circ \varphi_1^{-1}(x) = \frac{x}{\|x\|} R^2$$

ist C^∞ .

$\Rightarrow \mathcal{A} := \{(U_1, \varphi_1), (U_2, \varphi_2)\}$ ist ein differenzierbarer Atlas für S_R^n .

\leadsto max. Atlas aller mit \mathcal{A} verträglichen Karten (also allen (U, φ)) mit $\varphi \circ \psi^{-1}$ ist C^∞ für ψ aus \mathcal{A} sofern Verkettung definiert ist) definiert differenzierbare Struktur auf S_R^n , also ist S_R^n eine C^∞ -Mannigfaltigkeit mit Dimension n .

2. n -dimensionaler reell projektiver Raum

$$P^n \mathbb{R} := \{1\text{-dim. UVR von } \mathbb{R}^{n+1}\} \equiv (\mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\}) / \sim$$

mit $x \sim y \stackrel{\text{Def.}}{\Leftrightarrow} \exists \mathbb{R} \ni \lambda \neq 0 : x = \lambda y$ (1-dimensionaler UVR = Äquivalenzklasse) $\equiv S^n / \sim$ mit $x \sim y \stackrel{\text{Def.}}{\Leftrightarrow} x = -y$.

Wir sehen:

1. *Definition:* Eindimensionale Untervektorräume

2. *Definition:* Äquivalenzklassen in $\mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\}$

3. *Definition:* Äquivalenzklassen in S^n

Es ist leicht zu sehen, dass diese Definitionen äquivalent sind.

Aus der 3. Definition sieht man

$$P^n \mathbb{R} = S^n / \sim$$

ist kompakt als Quotientenraum von S^n (Quotiententopologie $X \xrightarrow{\pi} Y = X / \sim$ mit topologischem Raum X und Quotiententopologie: U offen in $Y \Leftrightarrow \pi^{-1}(U)$ ist offen in X). Diese Abbildung ist stetig, und ein stetiges Bild von einer kompakten Menge ist wieder kompakt.

Karten:

$$\tilde{U}_i := \{x \in S^n : x_i \neq 0\}, \quad i = 1, \dots, n+1$$

$$U_i := \pi(\tilde{U}_i) \text{ mit } \pi : S^n \rightarrow S^n / \sim = P^n \mathbb{R}.$$

⁸ Übung: φ_1 und φ_2 sind Homöomorphismen.

Projektion:

$$\varphi_i : U_i \rightarrow \mathbb{R}^n, \quad \varphi_i([x]) := \left(\frac{x_i}{x_i}, \dots, \frac{x_{i-1}}{i}, \frac{x_{i+1}}{i}, \dots, \frac{x_n}{x_i} \right)$$

sind Homöomorphismen.⁹

Bemerkung 27. Man kann zeigen: $P^n \mathbb{R}$ ist hausdorffsch und hat eine abzählbare Basis der Topologie. Also ist $P^n \mathbb{R}$ eine n -dimensionale C^∞ -Mannigfaltigkeit.

Analogue: $P^n \mathbb{C} := \{\text{komplexe 1-dim. UVR von } C^{n+1}\}$ ist kompakte $2n$ -dimensionale C^∞ -Mannigfaltigkeit.

Beispiel 4.9 (Produkt-Mannigfaltigkeiten). Für M^m und N^n m - bzw. n -dimensionale differenzierbare Mannigfaltigkeit ist die **Produkt-Mannigfaltigkeit** $M \times N$ eine $(m+n)$ -dimensionale C^∞ -Mannigfaltigkeit.¹⁰

Exkurs 1 (Lie-Gruppen). Eine **Lie-Gruppe** ist eine Gruppe mit einer C^∞ -Mannigfaltigkeitsstruktur, so dass die Abbildung

$$G \times G \rightarrow G, \quad (g, h) \mapsto gh^{-1}$$

C^∞ ist.

Beispiel 4.10 (zu Lie-Gruppen).

- $(\mathbb{Z}, +)$ ist eine 0-dimensionale Lie-Gruppe.
- $SO(2) = \left\{ \begin{pmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix} : \vartheta \in [0, 2\pi] \right\} \cong_{\text{homö}} S^1$ ist kompakte 1-dimensionale C^∞ -Mannigfaltigkeit und Lie-Gruppe.¹¹
- $SU(2) := \left\{ \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ -\bar{\beta} & \bar{\alpha} \end{pmatrix} : \alpha, \beta \in \mathbb{C}, \alpha\bar{\alpha} + \beta\bar{\beta} = 1 \right\} \cong_{\text{homö}} S^3$ ist kompakte 3-dimensionale C^∞ -Mannigfaltigkeit.¹²
- $GL(n, \mathbb{R})$ (offene) Untermannigfaltigkeit von $\mathbb{R}^{n^2} \leadsto n^2$ -dimensionale C^∞ -Mannigfaltigkeit.

⁹ **Übung:** Kartenwechsel $\varphi_i \circ \varphi_j^{-1}$ sind C^∞ .

¹⁰ **Übung!**

¹¹ **Übung:** Wieso?

¹² $1 = \alpha\bar{\alpha} + \beta\bar{\beta} = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2$ mit $\alpha = x_1 + ix_2$ und $\beta = x_3 + ix_4$.

Bemerkung 28 (Fakt von Cartan). Abgeschlossene Untergruppen von Lie-Gruppen sind Lie-Gruppen.

Beispiel 4.11 (Fakt von Cartan benutzen).

$$SO(n) = \{A \in GL(n, \mathbb{R}) : AA^T = E, \det A = 1\} \text{ und} \\ SL(n, \mathbb{R}) = \{A \in GL(n, \mathbb{R}) : \det A = 1\}$$

sind Lie-Gruppen: Benutze, dass

$$A = \{x \in X : f(x) = g(x)\} \text{ und } X \text{ ist hausdorffsch}$$

$\Rightarrow A$ abgeschlossen, f, g stetige Abbildungen

4.4 Simplicialkomplexe

Simplicialkomplexe sind Objekte der algebraischen Topologie. Mittels Kombinatorik sollen topologische Invarianten bestimmt werden.

Definition 4.12 (Simplex). Ein k -dimensionales **Simplex** im \mathbb{R}^n ist die konvexe Hülle von $k + 1$ Punkten v_0, \dots, v_k in allgemeiner Lage:

$$s(v_0, \dots, v_k) := \left\{ \sum_{i=0}^n \lambda_i v_i : \forall \lambda_i \geq 0, \sum_{i=0}^k \lambda_i = 1 \right\}$$

für $v_0 - v_1, \dots, v_0 - v_k$ linear unabhängig.

Beispiel 4.13 (Einfache Simplices).

- **0-Simplex:** v_0 (Punkt)
- **1-Simplex:** $v_0 - v_1$ (Strecke, $s(v_0, v_1) = \{\lambda v_0 + (1 - \lambda)v_1 : 0 \leq \lambda \leq 1\}$)
- **2-Simplex:** $\triangle v_0, v_1, v_2$ (Dreiecksfläche)
- **3-Simplex:** v_0, v_1, v_2, v_3 ((volles) Tetraeder)

Definition 4.14 (Teilsimplex, Seite). Die konvexe Hülle einer Teilmenge von $\{v_0, \dots, v_k\}$ heißt **Teilsimplex** oder **Seite** von $s(v_0, \dots, v_k)$.

Definition 4.15 (Simplizialkomplex). Eine endliche Menge K von Simplices in \mathbb{R}^n heißt **Simplizialkomplex**, wenn gilt:

1. Mit jedem seiner Simplices enthält K auch dessen sämtliche Teilsimplices.
2. Der Durchschnitt von je zwei Simplices ist entweder leer oder ein gemeinsamer Teilsimplex.

Definition 4.16 (Geometrische Realisierung).

$$|K| := \bigcup_{s \in K} s \subset \mathbb{R}^n$$

mit Teilraumtopologie von \mathbb{R}^n heißt der dem Simplicialkomplex K zugrunde liegende topologische Raum.

Achtung: Verschiedene Simplicialkomplexe K, K' können das gleiche $|K| = |K'|$ haben.

Bemerkung 29 (Vorteil von Simplicialkomplexen). Kennt man von einem (endlichen) Simplicialkomplex die **wesentlichen Simplices** (also solche, die nicht Seiten von anderen sind) in jeder Dimension und ihre **Inzidenzen** (also welche Ecken sie gemeinsam haben), so kennt man $|K|$ (bis auf Homöomorphie).

Beweis (Konstruktionsidee von $|K|$ aus diesen Daten).

1. Wähle in jeder Dimension einen *Standard-Simplex* $\Delta_k := s(\underbrace{e_1, \dots, e_{k+1}}_{\text{Std.-Basis-Vek.}})$
2. Bilde disjunkte Vereinigung von solchen Δ_k in jeder Dimension k so viele wie es wesentliche k -Simplices gibt:

$$X := \underbrace{\Delta_0 \cup \dots \cup \Delta_0}_{\# \text{ wesentliche 0-Simp.}} \cup \dots \cup \underbrace{\Delta_n \cup \dots \cup \Delta_n}_{\# \text{ wesentliche } n\text{-Simp.}}$$

3. Identifiziere Inzidenzen (via Äquivalenzrelation) gemäß Inzidenz-Angaben für Ecken

Diese drei Schritte liefern dann eine stetige Bijektion des (kompakten) Quotientenraumes X / \sim auf Hausdorff-Raum $|K|$, also ein Homöomorphismus.

Definition 4.17 (Dimension). Die **Dimension** eines Simplicialkomplexes K ist die maximale Dimension seiner Simplices.

Bemerkung 30 (Spezialfall — Graph). Ein **endlicher Graph** ist ein endlicher, 0- oder 1-dimensionaler Simplicialkomplex,¹³ gebaut aus 1-dimensionalen (*Kanten*) und

¹³ Aufgrund der Eindimensionalität haben beispielsweise die Dreiecke in einem Graph keine Füllung!

0-dimensionalen (Ecken) Simplices.

Ein Graph G heißt **zusammenhängend**, falls zu je zwei Ecken $p, p' \in G$ eine Folge $p = p_0, p_1, \dots, p_n = p'$ paarweise verschiedener Ecken von G existiert, sodass p_{i-1} und p_i durch eine Kante verbunden sind.

Ein **Baum** ist ein zusammenhängender Graph T , so dass für jedes 1-Simplex (Kante) $s \in T$ gilt: $|T| \setminus \hat{s}$ ist nicht zusammenhängend (mit $\hat{s} = \text{offener 1-Simplex}$, also Kante ohne Endpunkte).

Definition 4.18 (Euler-Charakteristik). Sei G ein endlicher Graph,

$\alpha_0 :=$ Anzahl Ecken in G ,

$\alpha_1 :=$ Anzahl Kanten in G .

Die **Euler-Charakteristik** von G ist

$$\chi(G) := \alpha_0 - \alpha_1$$

Bemerkung: $\chi(G)$ ist invariant unter Unterteilung (also dem Hinzufügen von neuen Ecken auf einer Kante).

Satz 4.19 (χ von Bäumen). Sei T ein (endlicher) Baum. Dann gilt $\chi(T) = 1$.

Beweis. Induktion nach $\alpha_0 =$ Anzahl Ecken.

- $n = 1$. Dann ist G ein Punkt, $\alpha_0 = 1, \alpha_1 = 0, \chi(T) = \alpha_0 - \alpha_1 = 1$ ✓
- $n = 2$. Dann ist G eine Kante mit Endpunkten, $\alpha_0 = 2, \alpha_1 = 1, \chi(T) = 1$ ✓
- **Induktionsannahme:** Satz gilt für alle Bäume mit n Ecken.

- **Induktionsschritt:** $\chi(T) = 1$ für Bäume mit $n + 1$ Ecken.

Sei T ein Baum mit $n + 1$ Ecken und v_0 ein **Ende** von T (also eine Ecke die zu genau einer Kante gehört). Ein solches Ende existiert.¹⁴

Sei $|T_1| := |T| \setminus \{s_1 \cup v_0\}$. T_1 ist wieder ein Baum, sonst existiert s_2 sodass $T_1 \setminus \{s_2\}$ zusammenhängend ist, also auch $T \setminus \{s_2\}$ zusammenhängend \nexists .

T_1 hat n Ecken, also nach IV: $\chi(T_1) = 1$.

Da $\alpha_0(T) = \alpha_0(T_1) + 1$ und $\alpha_1(T) = \alpha_1(T_1) + 1$ ist $\chi(T_1) = 1$. □

Satz 4.20 (χ von zusammenhängenden Graphen). Sei G ein zusammenhängender, endlicher Graph. Sei n die Anzahl von offenen 1-Simplices (Kanten), die man aus G entfernen kann, sodass G zusammenhängend bleibt. Dann ist $\chi(G) = 1 - n$.¹⁵

¹⁴ vgl. Übung

¹⁵ Die Aussage aus dem vorhergehenden Satz folgt aus diesem direkt.

Beweis. Ist G ein Baum, so ist $n = 0$ und die Behauptung gilt.

Ist G kein Baum, so existiert ein offenes 1-Simplex s_1° , sodass $|G_1| = |G| \setminus \{s_1^\circ\}$ zusammenhängend ist. Ist G_1 ein Baum, so hält man an. Ist G_1 kein Baum, so entfernt man eine Kante s_2° usw.

G hat endlich viele Kanten, also existiert ein max. n , so dass $|G| \setminus \{s_1^\circ \cup \dots \cup s_n^\circ\}$ ein Baum ist. Es gilt dann $\chi(G) = \chi(T) - n = 1 - n$. \square

Bemerkung: Das Komplement T aller offenen Kanten die man aus G entfernen kann (wie im Beweis) ist ein sog. **spannender Baum** für G , der alle Ecken in G enthält (nicht eindeutig).

Definition 4.21 (Ebene und planare Graphen). Ein Graph heißt **eben**, falls er durch Punkte und Geradenstücke in der Ebene (also \mathbb{R}^2) realisiert ist, so dass sich die Kanten nicht schneiden (außer in den Ecken).

Ein (abstrakter) Graph (also gegeben durch Ecken-Mengen und Inzidenzen) heißt **planar**, falls er *isomorph* zu einem ebenen Graphen ist.

Beispiel 4.22.

1. K_4 = vollständiger Graph mit 4 Ecken (d.h. alle Ecken-Paare sind durch Kanten verbunden). Zeichnet man diesen Graphen als Quadrat, so ist dieser nicht eben. Man kann aber K_4 so zeichnen, dass der Graph eben ist. Also ist K_4 planar.
2. K_5 = vollständiger Graph mit 5 Ecken. Dieser Graph ist nicht isomorph zu einem ebenen Graphen, also ist K_5 nicht planar.

Definition 4.23 (Seiten). Die **Seiten** eines ebenen Graphen G sind die Zusammenhangskomponenten von $\mathbb{R}^2 \setminus G$.

Satz 4.24 (Euler-Formel). Für einen zusammenhängenden, ebenen Graphen G gilt:

$$\chi(G) := e(G) - k(G) + s(G) = 2,$$

wobei $e(G)$ die Anzahl Ecken von G , $k(G)$ die Anzahl Kanten von G und $s(G)$ die Anzahl Seiten von G ist.

$\chi(G)$ ist die **Euler-Charakteristik** von G .

Beweis. Sei T ein **aufspannender Baum** für G (also ein Baum der alle Ecken von G enthält). Dann gilt $e(T) - k(T) = 1$ und $s(T) = 1$. Also gilt die Behauptung für T .

G erhält man aus T durch Hinzufügen von Kanten. Für jede neue Kante entsteht auch eine neue

Seite, welche sich in der Summe aus der Behauptung aufheben. Also

$$\chi(G) = e(G) - k(G) + s(G) = 2.$$

□

Definition 4.25 (Polyeder). Eine Teilmenge P von \mathbb{R}^3 heißt **(konvexes) Polyeder**, falls

1. P ist Durchschnitt von endlich vielen **affinen Halbräumen** von \mathbb{R}^3 (d.h. gegeben durch Ungleichungen $a_i x + b_i y + c_i z \geq d_i, i = 1, \dots, k$)
2. P ist beschränkt und nicht in einer Ebene enthalten.

Der **Rand** von P besteht dann aus Seiten(flächen), Kanten und Ecken (gegeben als 2-dimensionale, 1-dimensionale und 0-dimensionale Schnitte von Ebenen).

Bemerkung 31 (Bezug von Polyedern zu Graphen). Das **1-Skelett** von P (also die Menge der Ecken und Kanten) von P ist ein Graph in \mathbb{R}^3 .

Man kann zeigen (Resultat der konvexen Geometrie): durch Zentralprojektion von einem Punkt nahe bei einem "Seitenmittelpunkt" auf eine geeignete Ebene wird das 1-Skelett $p^{(1)}$ von P auf einen *ebenen* Graphen G_p abgebildet (sog. **Schlegel-Diagramm**). Es gilt dann: $s(P) = s(G_p), k(P) = k(G_p), e(P) = e(G_p)$.

Folgerung 1 (Eulersche Polyeder-Formel).

$$e(P) - k(P) + s(P) = 2.$$

Definition 4.26 (Regulärer Polyeder). Ein Polyeder in \mathbb{R}^3 heißt **regulär**, falls alle Seitenflächen kongruente reguläre n -Ecke (d.h. sie haben gleich lange Kanten) sind.