

Mitschrieb Elementare Geometrie

Jens Ochsenmeier & Maximilian Franz & Nadine Schorpp

13. Februar 2018

1

Übungen

1.1 2017-10-27 - Übungsblatt 1

Aufgabe (1). Zeigen Sie: (\mathbb{R}^2, d) mit $d(x, y) = |(x_1 - y_1) + (x_2 - y_2)|$ ist pseudometrischer Raum.

- **Positivität.** Zu zeigen: $\forall x \in \mathbb{R}^2 : d(x, x) = 0$.
$$d(x, x) = |(x_1 - x_1) + (x_2 - x_2)| = |0| = 0.$$
- **Symmetrie.** Zu zeigen: $\forall x, y \in \mathbb{R}^2 : d(x, y) = d(y, x)$.
$$d(x, y) = |(x_1 - y_1) + (x_2 - y_2)| = |(y_1 - x_1) + (y_2 - x_2)| = d(y, x).$$
- **Dreiecksungleichung.** Zu zeigen: $\forall x, y, z \in \mathbb{R}^2 : d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$.
$$d(x, y) + d(y, z) = |(x_1 - y_1) + (x_2 - y_2)| + |(y_1 - z_1) + (y_2 - z_2)| \geq |(x_1 - z_1) + (x_2 - z_2)| = d(x, z).$$

Aufgabe (2). Gegeben:

- $\|x\|_1 := \sum_{i=1}^n |x_i|,$
- $\|x\|_2 := \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2},$
- $\|x\|_\infty := \max_{i=1, \dots, n} |x_i|.$

Wir zeigen, dass alle drei Normen sind. Dafür ist zu zeigen:

1. **Positivität:** $\|x\| \geq 0 \forall x, x = 0 \Leftrightarrow \|x\| = 0.$
2. **Sublinearität:** $\forall x, y \in V : \|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$
3. **Homogenität:** $\forall x \in V \forall \lambda \in \mathbb{R} : \|\lambda x\| = |\lambda| \cdot \|x\|.$

Positivität ist klar für alle drei. Homogenität ist auch arg simpel.

Sublinearität:

1.

$$\begin{aligned}\|x + y\|_1 &= \sum_{i=1}^n |x_i + y_i| \leq \sum_{i=1}^n |x_i| + |y_i| \\ &= \|x\|_1 + \|y\|_1\end{aligned}$$

2.

$$\begin{aligned}\|x + y\|_2^2 &= \langle x + y, x + y \rangle = \langle x, x \rangle + 2\langle x, y \rangle + \langle y, y \rangle \\ &\stackrel{\text{CSU}}{\leq} \|x\|_2^2 + 2\|x\|_2\|y\|_2 + \|y\|_2^2 = (\|x\|_2 + \|y\|_2)^2 \\ \Rightarrow \|x + y\|_2 &\leq \|x\|_2 + \|y\|_2\end{aligned}$$

3.

$$\begin{aligned}\|x + y\|_\infty &= \max_{i=1, \dots, n} |x_i + y_i| \leq \max_{i=1, \dots, n} (|x_i| + |y_i|) \\ &\leq \max_{i=1, \dots, n} \max_{j=1, \dots, n} (|x_i| + |y_j|) = (\max_i |x_i|) + (\max_j |y_j|) \\ &= \|x\|_\infty + \|y\|_\infty\end{aligned}$$

Aufgabe (3). Sei (X, d) ein metrischer Raum, $r_1, r_2 \in \mathbb{R}_{>0}$.

1. Beweise:

1. Falls $d(x, y) \geq r_1 + r_2$, dann sind $B_{r_1}(x), B_{r_2}(y)$ disjunkt.

Beweis: Angenommen, $\exists z \in B_{r_1}(x) \cap B_{r_2}(y)$.

Dann ist $d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y) < r_1 + r_2 \quad \text{!}$

2. Falls $d(x, y) \leq r_1 - r_2$, so ist $B_{r_2}(y) \subseteq B_{r_1}(x)$.

Beweis: Angenommen, $\exists z \in B_{r_2}(y) \setminus B_{r_1}(x)$. Dann ist

$$\begin{aligned}d(x, z) &\geq r_1 = (r_1 - r_2) + r_2 \\ &> d(x, y) + d(z, y) \quad \text{!}\end{aligned}$$

2. Finde je ein Gegenbeispiel für die Rückrichtung:

1. Sei $X = \{0, 1\}$ und d Metrik auf X mit $d(0, 1) = 1$.

Idee: Wir nehmen zwei Bälle, die sich in der Theorie überschneiden, weil die Summe der Radien kleiner ist als der Abstand, aber in der Schnittmenge liegen

keine Elemente.

Wir wählen $r_1 = r_2 = \frac{2}{3}$, $x = 0$, $y = 1$. Wir haben

$$B_{r_1}(0) = \{0\}, B_{r_2}(1) = \{1\}, \text{ aber } r_1 + r_2 = \frac{4}{3} > d(0, 1).$$

2. Metrik wie in erstem Gegenbeispiel, $r_1 = r_2 = 100$, $x = 0$, $y = 1$.

$$\text{Dann ist } B_{r_1}(0) = \{0, 1\}, B_{r_2}(1) = \{0, 1\}, \text{ aber } d(0, 1) > 100 - 100.$$

Aufgabe (4). 1. Zeigen Sie, dass (\mathbb{R}^2, d_1) und (\mathbb{R}^2, d_∞) isometrisch sind.

$$\text{Sei } f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2, (x, y) \mapsto (x + y, x - y).$$

Behauptung: $f : (\mathbb{R}^2, d_1) \rightarrow (\mathbb{R}^2, d_\infty)$ ist Isometrie.

f ist linear mit Rang 2, also bijektiv.

Seien $p = (x_1, y_1)$, $q = (x_2, y_2) \in \mathbb{R}^2$. Zu zeigen:

$$d_\infty(f(p), f(q)) = d_1(p, q).$$

Es ist

$$\begin{aligned} d_1(p, q) &= |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2| \\ &= \max\{|(x_1 - x_2) + (y_1 - y_2)|, |(x_1 - x_2) - (y_1 - y_2)|\} \\ &= \max\{|(x_1 + y_1) - (x_2 + y_2)|, |(x_1 - y_1) - (x_2 - y_2)|\} \\ &= (\text{undeutlich}) = d_\infty(f(p), f(q)). \end{aligned}$$

2. Zeigen Sie, dass (\mathbb{R}^n, d_1) und (\mathbb{R}^n, d_∞) **nicht** isometrisch sind für $n > 2$.

Angenommen, es gibt eine Isometrie $\varphi^1 : (\mathbb{R}^n, d_\infty) \rightarrow (\mathbb{R}^n, d_1)$. Die Abbildung $\varphi^2 : (\mathbb{R}^n, d_1) \rightarrow (\mathbb{R}^n, d_1)$, $x \mapsto x - \varphi^1(0)$ ist eine Translation, also eine Isometrie.

Wähle $\varphi := \varphi^2 \circ \varphi^1$. φ ist Isometrie mit $\varphi(0) = 0$.

Die Menge $\{(x_1, \dots, x_n) : x_i \in \{-1, 1\}\} =: A$ hat folgende Eigenschaft: Für alle $p, q \in A$ mit $p \neq q$ gilt $d_\infty(p, q) = 1$ und $d_1(p, 0) = n$.

Sei $B = \varphi(A)$. Für alle $p, q \in B$ mit $p \neq q$ gilt $d_1(p, q) = 1$ und $d_1(p, 0) = n$. Da φ injektiv ist, gilt $|B| = |A| = 2^n > 2n$ (weil $n \geq 3$). Da jedes $x \in B$ mindestens eine Koordinate $\neq 0$ hat, gibt es ein $i \in \{1, \dots, n\}$ und $p, q, r \in B$ mit $p_i, q_i, r_i \neq 0$.

Dann gibt es oBdA verschiedene $p, q \in B$ mit $p_i, q_i > 0$ (bzw haben selbes Vorzeichen, da es nur zwei mögliche Vorzeichen gibt).

$$\text{Es gilt } d_1(p, q) = \sum_{j=1}^n |p_j - q_j| \underset{\text{Bijektion}}{> 0} < \sum_{j=1}^n |p_j| + |q_j| = d_1(p, 0) + d_1(q, 0) = 2n$$

1.2 2017-11-03 - Übungsblatt 2

Aufgabe (1a). Es reicht zu zeigen, dass zu je zwei Punkten $p_1, p_2 \in \mathbb{R}^2$ eine Isometrie $\varphi_{p_1, p_2} : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ existiert mit $\varphi_{p_1, p_2}(0, 0) = p_1$ und $\varphi_{p_1, p_2}(0, l) = p_2$, wobei $:= d_e(p_1, p_2)$.

Dann gibt es für $p_1, p_2, q_1, q_2 \in \mathbb{R}^2$ mit $d_e(p_1, p_2) = l = d_e(q_1, q_2)$ eine Isometrie $\varphi := \varphi_{q_1, q_2} \circ \varphi_{p_1, p_2}^{-1}$, die das gewünschte Liefert.

Sei $p_1 = (x_1, y_1), p_2 = (x_2, y_2)$. Für $(x, y) \in \mathbb{R}^2$ wähle

$$\varphi_{p_1 p_2} := \begin{pmatrix} y_2 - y_1 & x_2 - x_1 \\ x_1 - x_2 & y_2 - y_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}$$

Dann ist $\varphi_{p_1 p_2}$ die gewünschte Isometrie.

Zeige, indem man $(0, 0)$ und $(0, l)$ einsetzt.

Aufgabe (1b). Analog zu a).

Sei $X = (S^2, d_s)$. Gesucht $\psi_{p_1 p_2} : S^2 \rightarrow S^2$ eine Isometrie mit:

$$\psi_{p_1 p_2} \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right) = p_1 \quad \psi_{p_1 p_2} \left(\begin{pmatrix} a \\ b \\ 0 \end{pmatrix} \right) = p_2 \quad (1.1)$$

wobei

$$a = \cos(d_s(p_1, p_2)) = \langle p_1, p_2 \rangle$$

$$b = \sin(d_s(p_1, p_2)) = \|p_1 \times p_2\|$$

Bemerkung: $d_s(p, q) = \cos^{-1} \langle p, q \rangle$.

Seien $p_1, p_2 \in S^2$ wähle:

$$\psi_{p_1 p_2} \left(\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \right) := x \cdot p_1 + \frac{y}{b}(p_2 - ap_1) + \frac{z}{b}(p_1 \times p_2)$$

Damit gilt wie gefordert:

$$\psi_{p_1 p_2} \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right) = p_1$$

$$\psi_{p_1 p_2} \left(\begin{pmatrix} a \\ b \\ 0 \end{pmatrix} \right) = p_2$$

Nachrechnen!

eine Isometrie von \mathbb{R}^3 nach \mathbb{R}^3 , die den Ursprung fest lässt, erzeugt eine Isometrie auf $S = \{p \in \mathbb{R}^3 \mid d_e(0, p) = 1\}$ mit der euklidischen Metrik d_e .

Zu zeigen: $\psi_{p_1 p_2}$ ist lineare Isometrie auf \mathbb{R}^3 .

Es reicht zu zeigen, dass $\{p_1, \frac{1}{b}(p_2 - ap_1), \frac{1}{b}(p_1 \times p_2)\}$ eine Orthonormalbasis ist.

Hier sind die Eigenschaften der ONB über die Skalarprodukte $\langle \cdot, \cdot \rangle$ nachzurechnen!

Speziell:

$\langle \frac{1}{b}(p_2 - ap_1), \frac{1}{b}(p_1 \times p_2) \rangle = 0$, weil lineare Kombinationen von p_1, p_2 immer orthogonal zu $p_1 \times p_2$ stehen.

Für $p, q \in S^2$ ist

$$\begin{aligned} d_e(p, q) &= \sqrt{\langle p - q, p - q \rangle} = \sqrt{\langle p, p \rangle - 2\langle p, q \rangle + \langle q, q \rangle} \\ &= \sqrt{2 - 2\langle p, q \rangle} \end{aligned}$$

und $d_s(p, q) = \cos^{-1}(\langle p, q \rangle) = \cos^{-1}(1 - \frac{1}{2}d_e(p, q)^2)$.

Sei $f(x) = \cos^{-1}(1 - \frac{1}{2}x^2)$.

Dann ist $d_s(p, q) = f(d_e(p, q))$.

Die Isometrie $\psi := \psi_{p_1 p_2}$ von (S^2, d_e) ist auch eine Isometrie von (S^2, d_s) , denn

$$d_s(\psi(p), \psi(q)) = f(d_e(\psi(p), \psi(q))) \stackrel{\text{vor.}}{=} f(d_e(p, q)) \stackrel{Def.}{=} d_s(p, q)$$

Aufgabe (2). Seien $(X, d_x), (Y, d_y)$ metrische Räume.

Zu zeigen: $f : X \rightarrow Y$ ist stetig $\Leftrightarrow f$ ist folgenstetig.

" \Rightarrow ": Sei f stetig aber nicht folgenstetig.

Dann gibt es eine Folge (x_n) in X mit $x_n \rightarrow x_0$, aber $f((x_n))_n$ nicht gegen $f(x_0)$.

Dann gibt es ein $\varepsilon > 0$ sodass $d_y(f(x_n), f(x_0)) > \varepsilon$ für unendlich viele $n \in \mathbb{N}$. Für alle $\delta > 0$ gibt es nun ein $N \in \mathbb{N}$ mit $d_x(x_n, x_0) < \delta$ für alle $n > N$.

Für mindestens ein solches $n > N$ gilt $d_y(f(x_n), f(x_0)) > \varepsilon$, was ein Widerspruch zur Stetigkeit ist! ⚡

" \Leftarrow ": Angenommen f sei folgenstetig, aber nicht stetig.

1 Übungen

Dann gibt es ein $x_0 \in X$ und ein $\varepsilon > 0$, sodass für alle $\delta > 0$ ein $x \in X$ existiert mit:

$$d_x(x, x_0) < \delta \text{ aber } d_y(f(x_0), f(x)) \geq \varepsilon.$$

Wähle für alle $n \in \mathbb{N}$ ein $x_n \in X$ mit

$$d_x(x_n, x_0) < \frac{1}{n}, \text{ aber } d_y(f(x_0), f(x_n)) \geq \varepsilon.$$

Jetzt gilt $x_n \rightarrow x_0$, aber $(f(x_n))_n$ kann nicht gegen $f(x_0)$ konvergieren, da kein solches x_n in $B_\varepsilon(f(x_0))$ liegt, was ein Widerspruch zur Folgenstetigkeit ist! ⚡

1.3 2017-11-10 - Übungsblatt 3

Aufgabe (1). Sei (X, d) ein metrischer Raum. Zu zeigen: Die Menge \mathcal{O} aller d -offenen¹ Teilmengen von X ist Topologie. Wir zeigen die Eigenschaften einer Topologie.

$$1. \emptyset \in \mathcal{O}, X \in \mathcal{O} \quad \checkmark$$

2. Zu zeigen: beliebige Vereinigungen von d -offenen Mengen sind wieder d -offen.

Sei $\{A_i\}_{i \in I}$ eine Familie von d -offenen Mengen. Zu zeigen: $A := \bigcup_{i \in I} A_i$ ist d -offen.

Beweis: Sei $x \in A$ beliebig. Dann $\exists i \in I$ mit $x \in A_i$. Da A_i d -offen ist, gibt es ein $\varepsilon > 0$ mit $B_\varepsilon(x) \subseteq A_i \subseteq A$.

Damit ist A d -offen.

3. Zu zeigen: endliche Durchschnitte d -offener Mengen sind wieder d -offen.²

Seien A, B d -offen. Zu zeigen: $A \cap B$ ist wieder d -offen.

Sei $x \in A \cap B$. Da A und B d -offen sind, gibt es $\varepsilon, \varepsilon' > 0$, sodass $B_\varepsilon(x) \subseteq A$ und $B_{\varepsilon'}(x) \subseteq B$. Wähle $\varepsilon'' = \min\{\varepsilon, \varepsilon'\}$. Dann ist $B_{\varepsilon''}(x) = B_\varepsilon(x) \cap B_{\varepsilon'}(x) \subseteq A \cap B$ und $A \cap B$ ist d -offen.

Aufgabe (2). Seien X, Y_1, Y_2 topologische Räume, seien

$$p_i : Y_1 \times Y_2 \rightarrow Y_i \\ (y_1, y_2) \mapsto y_i \quad (\text{für } i = 1, 2).$$

1. Zu zeigen: f ist stetig $\Leftrightarrow f_1 := p_1 \circ f, f_2 := p_2 \circ f$ stetig.

Beweis:

- \Rightarrow . Sei f stetig. Zu zeigen (oBdA): f_1 ist stetig, i.e. die Urbilder offener Mengen sind wieder offen.

Sei $U \subseteq Y_1$. Zu zeigen: $f_1^{-1}(U)$ offen.

Es gilt³:

$$f_1^{-1}(U) = f^{-1}(p_1^{-1}(U)) = f^{-1}(U \times Y_2).$$

Diese Menge ist offen, da f stetig ist.

¹ d -offen: $U \subset X$ heißt d -offen, falls $\forall x \in U \exists \varepsilon > 0 : B_\varepsilon(x) \subseteq U$.

² Es ist immer nur der Schnitt zweier Mengen zu zeigen, da $A_1 \cap \dots \cap A_n = (((A_1 \cap A_2) \cap A_3) \dots)$.

Also ist sukzessive der gesamte Schnitt offen.

³ $p_1^{-1}(U) = U \times Y_2$

- \Leftarrow . Seien f_1, f_2 stetig. Zu zeigen: f ist stetig. Wir zeigen wieder, dass die Urbilder offener Mengen wieder offen sind.

Sei $U \in Y_1 \times Y_2$ offen. Zu zeigen: $f^{-1}(U)$ ist wieder offen.

Sei $x \in f^{-1}(U)$. Zu zeigen: Es gibt eine offene Menge $U' \subseteq f^{-1}(U)$ sodass $x \in U'$.

Es ist $f(x) \in U$. Da U offen ist in $Y_1 \times Y_2$ gibt es offene $V_1 \subseteq Y_1, V_2 \subseteq Y_2$, sodass $f(x) \in V_1 \times V_2 \subseteq U$.

Jetzt sei $U_1 := f_1^{-1}(V_1), U_2 := f_2^{-1}(V_2)$. Da f_1, f_2 stetig sind, sind U_1 und U_2 offen, also auch $U_1 \cap U_2 =: U'$ offen.

Da $f(x) \in V_1 \times V_2$, ist $f_1(x) = p_1(f(x)) \in V_1, f_2(x) = p_2(f(x)) \in V_2$, also $x \in U_1 \cap U_2 = U'$.

2. Sind p_1, p_2 immer offen?⁴

Ja — sei $U \subseteq Y_1 \times Y_2$ offen. Dann ist

$$U = \bigcup \{V_1 \times V_2 : V_1 \subseteq Y_1 \text{ offen, } V_2 \subseteq Y_2 \text{ offen, } V_1 \times V_2 \subseteq U\}.$$

Dann ist $p_1(U) = \bigcup \{V_1 : \text{analog zu } U, V_2 \neq \emptyset\}$ eine Vereinigung offener Mengen, also wieder offen — p_2 analog.

3. Sind p_1, p_2 immer abgeschlossen?

Nein — sei

$$M = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x \cdot y = 1\}.$$

Das ist eine klassische Hyperbel. M ist abgeschlossen, aber $p_1(M) = \mathbb{R} \setminus 0$ nicht, auch nicht $p_2(M) = \mathbb{R} \setminus 0$.

Aufgabe (3). Seien X, Y Hausdorffräume, $f, g : X \rightarrow Y$ stetig. Zu zeigen: $\{x \in X : f(x) = g(x)\}$ ist abgeschlossen.

Da Y Hausdorffraum ist

$$\Delta_y := \{(y, y) : y \in Y\}$$

in Y^2 abgeschlossen. (★)

Beweis (★). Zu zeigen: $\{(y, y') \in Y^2 : y \neq y'\} =: \Delta_y^c$ ist offen.

Sei $(y, y') \in \Delta_y^c$. Da Y hausdorffsch ist, gibt es offene Räume U_y und $U_{y'}$, sodass $y \in U_y, y' \in U_{y'}, U_y \cap U_{y'} = \emptyset$. Dann ist $(y, y') \in U_y \times U_{y'} \subseteq \Delta_y^c$.

⁴ **Offene + geschlossene Abbildungen:** $f : X \rightarrow Y$ heißt *offen*, wenn für alle offenen $U \subseteq X$ auch $f(U)$ offen ist; $f : X \rightarrow Y$ heißt *abgeschlossen*, wenn für alle abgeschlossenen $U \subseteq X$ auch $f(U)$ abgeschlossen ist.

Die Funktion

$$\begin{aligned} h : X &\rightarrow Y, \\ x &\mapsto (f(x), g(x)) \end{aligned}$$

ist stetig, denn $p_1 \circ h = f$ und $p_2 \circ h = g$ sind stetig nach Voraussetzung, also können wir den ersten Teil der Aufgabe 2 anwenden.

Da Δ_y abgeschlossen ist, ist $h^{-1}(\Delta_y) = \{x \in X : f(x) = g(x)\}$ ebenfalls abgeschlossen.

Aufgabe (4). Sei X topologischer Raum und \sim Äquivalenzrelation auf X . Die kanonische Abbildung $\pi : X \rightarrow X/\sim$ sei offen.

1. Zu zeigen: Falls X eine abzählbare Basis hat, dann auch X/\sim .

Sei B eine beliebige Basis von X . Sei $U \in X/\sim$ offen. Dann ist $\pi^{-1}(U)$ nach Definition der Quotiententopologie offen, also existiert $A \subseteq B$ mit $\pi^{-1}(U) = \bigcup_{M \in A} M$. Dann ist

$$U = \pi(\pi^{-1}(U)) = \pi\left(\bigcup_{M \in A} M\right) = \bigcup_{M \in A} \pi(M).$$

Damit ist $\pi(B) := \{\pi(M) : M \in B\}$ eine Basis von X/\sim und wenn B abzählbar ist, so ist auch $\pi(B)$ abzählbar.

2. Zu zeigen: Ist $A := \{(x, y) \in X^2 : x \sim y\}$ abgeschlossen, so ist X/\sim hausdorffsch.

Beweis: Sei A abgeschlossen. Seien $p_1, p_2 \in X/\sim, p_1 \neq p_2$. Wir wollen zeigen, dass p_1 und p_2 durch offene Mengen getrennt werden können.

Seien $x_1 \in \pi^{-1}(p_1), x_2 \in \pi^{-1}(p_2)$ (x_1 und x_2 existieren, weil die kanonische Abbildung surjektiv ist). Da $[x_1]_\sim = p_1 \neq p_2 = [x_2]_\sim$ ist $x_1 \not\sim x_2$, also $(x_1, x_2) \in A^c$.

Da A^c in der Produkttopologie auf X^2 offen ist, gibt es $U_1, U_2 \subseteq X$ offen, sodass $(x_1, x_2) \in U_1 \times U_2 \subseteq A^c$.

Sei nun $V_1 = \pi(U_1), V_2 = \pi(U_2)$. Es gilt $p_1 \in V_1, p_2 \in V_2$. V_1 und V_2 sind offen, da die kanonische Abbildung nach Voraussetzung offen ist.

Es bleibt zu zeigen, dass $V_1 \cap V_2 = \emptyset$. Sei $q_1 \in V_1, q_2 \in V_2, x_1 \in q_1, x_2 \in q_2$. Dann ist $(x_1, x_2) \in U_1 \times U_2 \subseteq A^c$, also ist $x_1 \not\sim x_2$ und demnach $q_1 = [x_1]_\sim \neq [x_2]_\sim = q_2$.

1.4 2017-11-17 - Übungsblatt 4

Aufgabe (1). Sei $A \subseteq X$ zusammenhängend. Zu zeigen: \bar{A} ist abgeschlossen.

Sei $B \subseteq \bar{A}$ offen und abgeschlossen in \bar{A} .

OBdA sei $B \cap A \neq \emptyset$, ansonsten setze $B' = \bar{A} \setminus B$. Da $B \cap A$ offen, abgeschlossen und nichtleer in A ist, folgt aus A zusammenhängend, dass $B \cap A = A$ also $A \subseteq B$.

Damit ist $A \subseteq B \subseteq \bar{A}$ und da B abgeschlossen ist, ist $\bar{A} \subseteq B$

und $B \subseteq \bar{A} \Rightarrow \bar{A} = B$

Folglich ist auch \bar{A} abgeschlossen.

Aufgabe (1b). Seien $A, B \subseteq X$ zusammenhängend und $A \cap B = \emptyset$.

Zu zeigen: $A \cup B$ zusammenhängend. **Beweis:** Sei $C \subseteq A \cup B$ nichtleer, offen und abgeschlossen in $A \cup B$.

Sei $x \in C$, dann ist $x \in A$ (oBdA, sonst wähle B)

Da $C \cap A$ abgeschlossen, offen und nichtleer in A und da A zusammenhängend, ist $C \cap A = A$ also $A \subseteq C$. Damit ist $\emptyset \neq A \cap B \subseteq C \cap B$. Weiter ist $C \cap B$ abgeschlossen, offen und nichtleer in B . Da B zusammenhängend ist, ist $C \cap B = B$ und $B \subseteq C$. Damit ist $C \subseteq A \cup B \subseteq C$.

Also $C = A \cup B \Rightarrow A \cup B$ ist zusammenhängend, da $A \cup B$ und \emptyset die einzigen gleichzeitig offenen und abgeschlossenen Mengen sind.

Aufgabe (1c). Sei $\{A_i\}_{i \in I}$ eine zusammenhängende Familie (Familie zusammenhängender Mengen), sodass $A_i \cap A_j \neq \emptyset$.

Zu zeigen: $A := \bigcup_{i \in I} A_i$ ist zusammenhängend.

Sei $B \subseteq A$ offen, abgeschlossen und nichtleer. Sei weiter $x \in B$. Dann existiert $i \in I$ mit $x \in A_i$. Sei $y \in A$ beliebig.

Behauptung: $y \in B$ **Beweis:** Sei $j \in I$, sodass $y \in A_j$ nach Aufgabenteil b) ist dann $A_j \cup A_i$ zusammenhängend. Damit ist $B \cap (A_i \cup A_j) = A_j \cup A_i$, weil alle A_i zusammenhängend. Weiter ist $y \in A_i \cup A_j$ und $y \in B$.

Daraus folgt: $A \subseteq B$ und $B \subseteq A \Rightarrow A = B$.

Aufgabe (2a). Zu zeigen: B ist die Basis einer Topologie O_p auf P .

1. Zeige: $P \in O_p$, wobei $O_p = \{\bigcup_{U \in A} U \mid A \subseteq B\}$.

$P = U_\emptyset(0, 0, \dots) \in B$ also $P \in O_p$

2. Für $V_1, V_2 \in O_p$ gilt $V_1 \cap V_2 \in O_p$.

Sei $V_1 = \bigcup_{U \in A_1} U, V_2 = \bigcup_{U \in A_2} U$.

Behauptung: Für alle $U, U' \in B : U \cap U' \in B$ oder $U \cap U' = \emptyset$.

Dann ist

$$V_1 \cap V_2 = \bigcup_{U \in A_1} \bigcup_{U' \in A_2} (U \cap U') \text{ also } V_1 \cap V_2 \in O_p$$

Beweis: Seien $U = U_\mu(a) \in B, U' = U_{\mu'}(a') \in B$. Falls $U \cap U' \neq \emptyset$ existiert $a'' \in U \cap U'$. Dann gilt $U = U_\mu(a''), U' = U_{\mu'}(a'')$. Also:

$$U \cap U' = U_{\mu \cup \mu'}(a'')$$

3. O_p ist bezüglich Vereinigung abgeschlossen, denn O_p besteht aus Vereinigungen von Elementen aus B .

Insgesamt folgt damit: O_p ist Topologie!

Aufgabe (2b). Ist (P, O_p) zusammenhängend, unzusammenhängend oder total unzusammenhängend?

Behauptung:: (P, O_p) ist total unzusammenhängend!

Beweis: Seien $a, b \in P$ Zeige: Es gibt offene, abgeschlossene Mengen U_a, U_b mit $U_a \cup U_b = P, U_a \cap U_b = \emptyset$ und weiter $a \in U_a, b \in U_b$.

Seien $a \neq b \Rightarrow \exists i \in \mathbb{N}$ sodass $a_i \neq b_i$. Setze $U_a = U_{\{i\}}(a)$ und $U_b = U_{\{i\}}(b)$.

U_a und U_b sind in O_p offen. Nach Wahl von i ist $U_a \cap U_b = \emptyset$ und $U_a \cup U_b = P$.

Angenommen es gibt ein zusammenhängendes $V \subseteq P$ mit $|V| \geq 2$.

Wähle $a, b \in V$ mit $a \neq b$ und konstruiere U_a, U_b wie oben.

Dann ist $V = (V \cap U_a) \cup (V \cap U_b)$ eine offene disjunkte Zerlegung von V .

Widerspruch! \nexists

Aufgabe (3a). Es reicht zu zeigen, dass alle p_i stetig sind.

" \Rightarrow ": Die Mengen:

- $p_i^{-1}(\{0, 1\}) = P$
- $p_i^{-1}(\{1\}) = U_{\{i\}}(1, \dots)$
- $p_i^{-1}(\{0\}) = U_{\{i\}}(0, \dots)$
- $p_i^{-1}(\emptyset) = \emptyset$

sind alle offen.

" \Leftarrow ": Sei $U \subseteq P$ offen. Dann ist $U = \bigcup_{U' \in A} U'$ für $A \subseteq B$ also $f^{-1}(U) = \bigcup_{U' \in A} f^{-1}(U')$.

Falls alle $f^{-1}(U')$ offen sind, dann auch $f^{-1}(U)$. Damit können wir uns für U auf

1 Übungen

Basiselemente beschränken. Sei also $U = U_\mu(a) \in B$.

Sei weiter $M = \{i_1, \dots, i_n\}$. Dann ist:

$$U = U_{i_1}(a) \cap \dots \cap U_{i_n}(a) = p_i^{-1}(\{a_{i_1}\}) \cap \dots \cap p_i^{-1}(\{a_{i_n}\})$$

Also ist: $f^{-1}(U) = f_{i_1}^{-1}(\{a_{i_1}\}) \cap \dots \cap f_{i_n}^{-1}(\{a_{i_n}\})$.

Diese Menge ist endlicher Schnitt offener Mengen, weil alle f_i stetig sind.

Aufgabe (3b). Zu zeigen: $f : X \rightarrow (P, \mathcal{P}(P))$ ist nicht genau dann stetig, wenn alle $f_i : X \rightarrow \{0, 1\}$ stetig sind.

Beispiel: $X = (P, O_P)$, $f : (P, O_P) \rightarrow (P, \mathcal{P}(P))$, $a \mapsto a$.

Sei $A \in \mathcal{P}(P) \setminus O_P$ beliebig, dann ist A offen in $\mathcal{P}(P)$ aber $f^{-1}(A) = A$ ist in (P, O_P) nicht offen, also ist f nicht stetig.

1.5 2017-11-24 - Übungsblatt 5

Aufgabe (1a). Sei $Y \subseteq \mathbb{R}^n$. Y heißt konvex, falls für $p, q \in Y$ auch die Verbindungsgerade \overline{pq} in Y .

Zeigen sie: Jede konvexe Teilmenge von \mathbb{R}^n ist zusammenhängend.

Behauptung: Y konvex $\Rightarrow Y$ wegzusammenhängend.

Seien $p, q \in Y$, Sei $c : [0, 1] \rightarrow Y, t \mapsto (1-t)p + tq$ Die Verbindungsstrecke. Dann ist $c(0) = p, c(1) = q, c([0, 1]) \subseteq Y$ wegen Konvexität.

Da p, q bel. waren, ist Y wegzusammenhängend.

Aufgabe (2). vgl. Aufgabentext..

Zu zeigen: X ist kompakt \iff für alle Familien $(A_i)_{i \in I}$ **abgeschlossen** Teilmengen von X mit endlicher Schnitteigenschaft gilt: $\bigcap_{i \in I} A_i \neq \emptyset$.

Sei (A_i) , Familie und $\forall i \in I$ sei $B_i := X \setminus A_i = A_i^C$.

Dann gelten: $(A_i)_{i \in I}$ ist Familie von offenen Mengen $\iff (B_i)$ besteht aus abg. Mengen.

$$\bigcap_{i \in M} A_i \neq \emptyset \iff X \setminus \bigcap_{i \in M} A_i \neq X \setminus \emptyset \iff \bigcup_{i \in M} (X \setminus A_i) \neq X \iff (B_i)_{i \in M}$$

ist keine Überdeckung von X .

Beweis: Alle Familien abgeschlossener Teilmengen von X mit endl. Schnitteigenschaft haben nichtleeren Schnitt. \iff Alle Familien mit abgeschlossenen Teilmengen von X mit leerem Schnitt besitzen eine unendliche Teilfamilie mit leerem Schnitt.

\iff Alle Familien offener Teilmengen von X , die X überdecken, besitzen eine endliche Teilfamilie, die X überdeckt. $\iff X$ ist kompakt

Aufgabe (3). Sei X kompakt, $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ stetig.

Zeigen Sie: f nimmt auf \mathbb{R} ein endliches Minimum und endliches Maximum an.

Beweis: Da stetige Bilder kompakter Mengen wieder kompakt sind, ist $f(X)$ kompakt in \mathbb{R} .

Nach dem Satz von Heine-Borel sind die kompakten Mengen in \mathbb{R} genau die abgeschlossenen, beschränkten Mengen. Damit ist $f(X)$ also abgeschlossen und beschränkt, außerdem nichtleer.

Zeige ausführlich (statt mit Ana I): $f(X)$ hat Maximum, Minimum.

Sei $s := \sup f(X)$. Da $f(X)$ nichtleer ist, ist $s > -\infty$.

Da $f(X)$ nach oben beschränkt ist, ist $s < \infty$. Für alle $n \in \mathbb{N}$ gibt es ein $x_n \in f(X)$

sodass $s - \frac{1}{n} < x_n \leq s$, weil $s - \frac{1}{n}$ keine obere Schranke von $f(X)$ ist.

Damit ist $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = s$. Damit ist $s \in f(X)$ und somit Maximum von f .

Aufgabe (4a). Sind Mannigfaltigkeiten stückweise wegzusammenhängend?

Behauptung: Ja!

Beweis: Sei $x \in M$, M sei $n - \dim$ Mannigfaltigkeit.

Dann gibt es eine Karte (φ, U) von M , $\varphi : U \rightarrow \mathbb{R}^n$, $x \in U$.

Damit ist $\varphi(x)$ innerer Punkt von $\varphi(U)$, also gibt es einen offenen Ball

$B := B_\varepsilon(\varphi(x)) \subseteq \varphi(U)$.

B ist wegzusammenhängend, also auch $\varphi^{-1}(B) \subseteq U$ wegzusammenhängend und $\varphi^{-1}(B)$ ist **offene** Umgebung von $\varphi^{-1}(\varphi(x)) = x$, wie gesucht.

Aufgabe (4b). Sind zusammenhängende Mannigfaltigkeiten immer wegzusammenhängend?

Behauptung: Ja!

Beweis: Für alle $x \in X$ ist $W(x)$ offen.

Zu zeigen: Für alle $y \in W(x)$ gibt es eine in X offene Umgebung von y in $W(x)$.

Sei $y \in W(x)$. Dann ist $W(x) = W(y)$. Sei U eine offene, wegzusammenhängende Umgebung von y .

Dann ist $U \subseteq W(y) = W(x)$ die gesuchte Umgebung.

Angenommen, X ist nicht wegzusammenhängend.

Dann gibt es $x, y \in X$ mit $x \in W(x)$, $y \notin W(x)$.

Nun ist $W(x)$ offen (siehe oben), und $W(x)$ ist abgeschlossen, denn

$$X \setminus W(x) = \bigcup_{z \notin W(x)} W(z)$$

ist auch offen. Damit ist $W(x)$ Zeuge, dass X nicht zusammenhängend ist. Damit folgt die Behauptung.

1.6 2017-12-01 - Übungsblatt 6

Aufgabe (1a). Zu zeigen: **Stereographische Projektion** an p_+ und p_- ist genau die Umkehrabbildung φ^{-1} .

$$\psi_{\pm} : S^2 \setminus \{p_{\pm}\} \rightarrow \mathbb{R}^k, (x, y, z) \mapsto \left(\frac{x}{1 \pm z}, \frac{y}{1 \pm z} \right).$$

$$\text{zz: } \psi_+ \circ \varphi_+ = id.$$

$$\text{Nachrechnen...: } \psi_+(\varphi_+(x, y)) = \dots = (x, y)$$

$$\text{zz: } \varphi_+ \circ \psi_+ = id.$$

$$\text{Nachrechnen...: } \varphi_+(\psi_+(x, y, z)) = \dots = (x, y, z)$$

Aufgabe (1b). Zeige: Der Kartenwechsel $\psi_+ \circ \psi_-^{-1} = \varphi_+^{-1} \circ \varphi_-$ ist C^∞ .

$$\text{Sei } f : \psi_-(S^2 \setminus \{p_+, p_-\}) \rightarrow \psi_+(S^2 \setminus \{p_+, p_-\}).$$

$$f(x, y) = \dots = \frac{1}{x^2 + y^2} (x, y) \text{ ist } C^\infty.$$

$$\text{Seien dafür: } g(x, y) = \left(\frac{p(x, y)}{(x^2 + y^2)^n}, \frac{q(x, y)}{(x^2 + y^2)^n} \right) \text{ für } p, q \in \mathbb{R}[x, y].$$

Behauptung: Es gibt $N \in \mathbb{N}, P, Q \in \mathbb{R}[x, y]$ sodass:

$$g_x(x, y) = \left(\frac{P(x, y)}{(x^2 + y^2)^n}, \frac{Q(x, y)}{(x^2 + y^2)^n} \right)$$

Mit dieser Behauptung folgt, dass alle partiellen Ableitungen von f auf $\mathbb{R}^2 \setminus \{0\}$ existieren.

Beweis:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} g(x, y) &= ((x^2 + y^2)p_x(x, y) - 2xp(x, y), \\ (x^2 + y^2)q_x(x, y) - 2xq(x, y)) &\cdot \frac{1}{(x^2 + y^2)^n + 1} = Q(x, y) \end{aligned}$$

Aufgabe (2a). Der Tangentialraum $T_p F$ von F in p sei definiert als $T_p F := \text{Bild}(d\varphi(\varphi^{-1}(p)))$, wobei $\varphi : V \rightarrow F, V \subseteq \mathbb{R}^2$, eine Parametrisierung von F um den Punkt $p \in F$ ist.

Zeige: Diese Definition ist unabhängig von φ .

Ansatz: Wähle zwei Parametrisierungen und zeige, dass das Bild das selbe ist.

Beweis: Seien φ, ψ Parametrisierungen von F um p . Sei $q = \varphi^{-1}(p), r = \psi^{-1}(p)$,

Zu Zeigen:

$$\text{Bild}(d\varphi(q)) = \text{Bild}(d\psi(r))$$

Es gilt $\psi = \varphi \circ (\varphi^{-1} \circ \psi)$ wobei $f := (\varphi^{-1} \circ \psi)$.

also: $d\psi(r) = d(\varphi \circ f(r)) = d\varphi(f(r)) \cdot df(r) = d\varphi(q) \cdot df(r)$, also:

$$\text{Bild}(d\psi(r)) \subseteq \text{Bild}(d\varphi(q)).$$

Durch Vertauschung von ψ, φ erhalten wir auch $\text{Bild}(d\varphi(q)) \subseteq \text{Bild}(d\psi(r))$ also:

$$\text{Bild}(d\varphi(q)) = \text{Bild}(d\psi(r))$$

Aufgabe (2b). Vgl. Aufgabenstellung...

Beweis:

Sei $p = (p_x, p_y, p_z)$. Sei oBdA $p_z > 0$.

Sei $\varphi : B_1(0) \rightarrow S^2, (x, y) \mapsto (x, y, \sqrt{1-x^2-y^2})$.

Dann ist:

$$d\varphi(p) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \frac{-x}{\sqrt{1-x^2-y^2}} & \frac{-y}{\sqrt{1-x^2-y^2}} \end{pmatrix} (p) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \frac{-p_x}{p_z} & \frac{-p_y}{p_z} \end{pmatrix}$$

Also:

$$T_p S^2 = \left[\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \frac{-p_x}{p_z} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ \frac{-p_y}{p_z} \end{pmatrix} \right] = \left[\begin{pmatrix} p_z \\ 0 \\ -p_x \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ p_z \\ -p_y \end{pmatrix} \right]$$

Jetzt ist: $p \cdot t_1 = p_x p_z - p_z p_x = 0$ und $p \cdot t_2 = p_y p_z - p_z p_y = 0$ also $\{p\} \perp \{t_1, t_2\}$ und $[p] \perp [t_1, t_2] = T_p S$, also auch $T_p S = [p]^\perp$.

Aufgabe (3a). Sei

$$U_i := \{[x_1, \dots, x_{n+1}] \in P^n \mathbb{R} \mid x_i \neq 0\}$$

und

$$\varphi_i([x_1, \dots, x_n]) = \frac{1}{x_i}(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_{n+1})$$

Zeige: (U_i, φ_i) bilden einen differenzierbaren Atlas von $P^n \mathbb{R}$.

Behauptung: Es gilt:

$$\varphi_i^{-1}(u_1, \dots, u_n) = [u_1, \dots, u_{i-1}, 1, u_i, \dots, u_n]$$

Zeige: $\varphi_i \circ \varphi_j^{-1}$ ist differenzierbar für $i, j = 1, \dots, n+1, i < j$.

$$\begin{aligned}\varphi_i(\varphi_j^{-1}(u_1, \dots, u_n)) &= \varphi_i([u_1, \dots, u_{i-1}, 1, u_i, \dots, u_n]) \\ &= \left(\frac{u_1}{u_i}, \dots, \frac{u_{i-1}}{u_i}, \frac{u_{i+1}}{u_i}, \dots, \frac{u_{j-1}}{u_i}, \frac{1}{u_i}, \frac{u_j}{u_i}, \dots, \frac{u_n}{u_i} \right)\end{aligned}$$

ist C^∞ von $\{u \in \mathbb{R}^n : u_i \neq 0\}$ nach $\{u \in \mathbb{R}^n : u_{j-1} \neq 0\}$.

Noch zz: $U_1 \cup \dots \cup U_{n+1} = P^n \mathbb{R}$.

Für $[x_1, \dots, x_{n+1}] \in P^n \mathbb{R}$ gibt es mindestens ein i mit $x_i \neq 0$ damit ist $[x_1, \dots, x_{n+1}]$ in U_i . Damit gilt $U_1 \cup \dots \cup U_{n+1} = P^n \mathbb{R}$.

Aufgabe (3b). Behauptung: $P^n \mathbb{R}$ ist hausdorffsch mit abzählbarer Basis.

Wir wissen aus der VL, dass $P^n \mathbb{R} = S^n / \sim$ wobei $x \sim y \Leftrightarrow x = \pm y$.

(Vgl. Abbildung).

Seien $\pm x, \pm y \in S^2 / \sim$.

Seien $U_x := B_\varepsilon(x) \cup B_\varepsilon(-x)$ und

$U_y := B_\varepsilon(y) \cup B_\varepsilon(-y)$.

Zu jedem $z \in U_x$ ist auch $-z \in U_x$.

Zu jedem $z \in U_y$ ist auch $-z \in U_y$.

Also ist $\pi^{-1}(\pi(U_x)) = U_x$ also $\pi(U_x)$ auch offen in $S^n / \sim \cong P^n \mathbb{R}$.

Da U_x, U_y disjunkt gilt: $\pi(U_x) \cap \pi(U_y) = \emptyset$. Also sind $\pi(U_y), \pi(U_x)$ disjunkte offene Umgebungen von $\pm x, \pm y$ und damit ist $S^n / \sim = P^n \mathbb{R}$ hausdorffsch.

Zur abzählbaren Basis:

Seien B_1, \dots, B_{n+1} abzählbare Basis von U_1, \dots, U_{n+1} . Dann ist $B_1 \cup B_2 \cup \dots \cup B_{n+1}$ eine abzählbare Basis von $P^n \mathbb{R}$??? -> Weiß nicht was hier hin sollte

1.7 2017-12-08 - Übungsblatt 7

Aufgabe (1a). Vgl. Aufgabenstellung.

Zu zeigen: $S := f^{-1}(0)$ ist reguläre Fläche. Wobei $f : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ stetig differenzierbar und für alle Punkte $p \in S$ gelte $f(0) \neq 0$.

Beweis: Sei $p \in S$. Dann gilt nach Vor.

$$f(p) := \left(\frac{\partial f}{\partial x}(p), \frac{\partial f}{\partial y}(p), \frac{\partial f}{\partial z}(p) \right) \neq 0$$

Sei oBdA $\frac{\partial}{\partial z} P(p) \neq 0$. Nach dem Satz über implizit definierte Funktion gibt es $U \subseteq \mathbb{R}^2, V \subseteq \mathbb{R}, g : U \rightarrow V, p \in U \times V$, sodass gilt

$$g(x, y) = z \iff f(x, y, z) = 0 \quad \forall (x, y) \in U, z \in V,$$

g ist stetig differenzierbar. Dann ist g ein Homöomorphismus von U auf $(U \times V) \cap S$, denn $\varphi^{-1} : (x, y, z) \rightarrow (x, y)$ ist eine stetige Umkehrabbildung.

Also ist φ Parametrisierung von S um p .

$$\varphi : U \rightarrow (U \times V) \cap S, (x, y) \mapsto (x, y, g(x, y))$$

Dann ist S eine reguläre Fläche. Die Jacobimatrix von φ ist

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ g_x & g_y \end{pmatrix} \text{ und hat immer Rang 2.}$$

Aufgabe (1b). Benutze hier Δ statt des Nabla-Symbols (vorerst).

Zu Zeigen: $T_p S = \text{Kern}(\Delta f(p))$.

Beweis: Sei $\varphi : U \rightarrow S$ irgendeine Parametrisierung um einen Punkt $p \in S$.

Jetzt ist $f \circ \varphi = 0$. Ableiten ergibt

$$0 = \partial_q 0 = \partial_q (f \circ \varphi) = \partial_{\varphi(q)} f \cdot \partial_q \varphi = \Delta_p f \cdot \partial_q \varphi.$$

Damit ist $T_p S = \text{Bild}(\partial_q \varphi) \subseteq \text{Kern}(\Delta_p f)$.

Da $\Delta_p f \neq 0$ ist, ist $\dim \text{Kern} \Delta_p f = 2, \dim T_p S = 2$.

Also ist $\text{Kern}(\Delta_p f) = T_p S$.

Aufgabe (2a). K_n ist ein vollständiger Graph mit n Ecken, d.h. die Ecken von K_n sind paarweise durch eine Kante verbunden.

Zu zeigen: Für $n \leq 4$ ist K_n planar.

Zeige, indem einzelne Einbettungen für alle $n \leq 4$ gezeichnet werden.

Aufgabe (2b). Behauptung: Für $n \geq 5$ ist K_n nicht planar.

Beweis: Angenommen es gibt eine Einbettung von K_n in eine Ebene. Betrachte vier Ecken von K_n :

Eine weitere Ecke von K_n muss dann in a, b, c, d liegen, aber man kann sie dann nicht, mit A, B, C, D verbinden.

Aufgabe (3). Sei G ein Graph mit Ecken p_1, \dots, p_n .

Für $i, j = 1, \dots, n$ sei

$$A := ((a_{i,j}))_{i,j=1,\dots,n} \quad a_{i,j} := \begin{cases} 0, & \text{wenn keine Kante } p_i p_j \text{ in } G \\ 1, & \text{wenn Kante } p_i p_j \text{ in } G \text{ existiert} \end{cases}$$

Die Matrix A heißt Adjazenzmatrix von G . **Zu zeigen:** Sei $G = K_n$ dann ist $n - 1$ der größte Eigenwert von A .

$$A = \begin{pmatrix} 0 & & 1 \\ & \ddots & \\ 1 & & 0 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix}}_{1\text{-Matrix}} - \overbrace{\begin{pmatrix} 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix}}^{\text{Einheitsmatrix}}$$

Die Eigenräume von $\mathbf{1}_n$ sind:

$$E_0 = \left[\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} \right]$$

Jeder Eigenwert λ von A mit zugehörigem Eigenvektor v erfüllt

$$\mathbf{1}_n \cdot v = (A + I_n) \cdot v = Av + v = \lambda v + v = (\lambda + 1)v, \text{ also ist } \lambda + 1 \text{ EW von } \mathbf{1}_n.$$

Damit sind die Eigenvektoren von A höchstens -1 oder $n - 1$, und da

$$A = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n-1 \\ n-1 \\ \vdots \\ n-1 \end{pmatrix}$$

Ist $n-1$ der größte EW von A .

Aufgabe (3b). Zeige: Für allgemeines G sind die Eigenvektoren von A nicht größer als $n-1$.

Beweis: Sei $x = (x_1 \dots x_n)^T$ Eigenvektor von G mit EW λ .

Sei weiter $i \in \{1, \dots, n\}$ sodass $|x_i| \geq |x_j|$ für alle j .

Sei oBdA $x_i > 0$, also $x_i \geq |x_j|$ für alle j . Aus $Ax = \lambda x$ folgt $(Ax)_i = \lambda x_i$:

$$\lambda x_i = (Ax)_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i \leq (n-1)x_i,$$

Damit folgt $\lambda \leq n-1$.

Aufgabe (4). Zu zeigen: G ist Baum $\iff G$ ist zusammenhängend aber besitzt keinen Kreis.

" \implies ": Sei G ein Baum. Dann ist G zusammenhängend.

Angenommen, G besitzt einen Kreis. Wenn man eine einzige Kante dieses Kreises entfernt, so bleibt der entstehende Graph zusammenhängend, denn jeden verbindenden Pfad in G , der durch diese Kante geht, können wir um den Kreis umleiten.

Formaler: Sei $p_0 \dots p_n = p_0$ ein Kreis.

Zwischen je zwei Ecken in G gibt es einen Weg $q = q_0 \dots q_n = q'$ in G . Ersetzen wir in diesem Weg jedes Vorkommen von $p_0 p_{n-1}$ durch $p_0 p_1 \dots p_{n-1}$ und $p_{n-1} p_0$ durch $p_{n-1} \dots p_0$ so finden wir einen Kantenzug in $G \setminus \{\overline{p_0 p_{n-1}}\}$ der q, q' verbindet.

Damit ist $G \setminus \{p_0 p_{n-1}\}$ zusammenhängend, also ist G kein Baum. Widerspruch!

" \impliedby ": Sei G zusammenhängend und besitze keinen Kreis.

Angenommen G ist kein Baum, also dass es eine Kante pp' gibt, nach deren Entfernung G noch zusammenhängend ist. Also $G \setminus \{\overline{pp'}\}$ zusammenhängend.

Dann gibt es einen Weg $p = p_0 \dots p_n = p'$ in $G \setminus \{\overline{pp'}\}$. Damit ist p_0, \dots, p_n, p_0 ein Kreis. Widerspruch.

1.8 2017-12-15 - Übungsblatt 8

Aufgabe (1a). Sei $n \geq 3$, sei G ein planarer Graph mit $k(G) \geq n$, so dass alle Kreise in G min. Länge n haben.

Zu zeigen: $k(G) \leq \frac{n}{n-2}(e(G) - 2)$.

Sei oBdA G eben. Sei K die Menge der Kanten von G , sei S die Menge der Flächenstücke von G .

Sei $W = \{(k, s) \in K \times S : k \text{ liegt auf dem Rand von } s\}$.

Für alle $k \in K$ gibt es höchstens zwei $s \in S$ mit $(k, s) \in W$, damit gilt $|W| \leq 2|K|$.

Für alle $s \in S$ gibt es mindestens n Kanten $k \in K$, sodass $(k, s) \in W$, denn falls s beschränkt ist, besteht der äußere Rand von s aus einem Kreis, der min n Kanten hat (Vor.). Wenn s unbeschränkt:

- **Fall 1:** G ist Baum. Dann ist s das einzige Flächenstück und alle Kanten berühren s . ($k(G) \geq n$).
- **Fall 2:** G ist kein Baum, dann schließt s andere Flächenstücke ein, der Rand dieser Einschlüsse besteht aus einem oder mehreren Kreisen. Alle $\geq n$ Kanten dieser Kreise berühren s .

Also erhalten wir $|W| \geq n|S|$. Wir erhalten $n \cdot s(G) = n|S| \leq |W| \leq 2|K| = 2k(G)$.

Nach Eulerformel gilt:

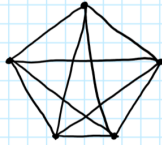
$s(G) = k(G) - e(G) + 2$, also $\frac{2}{n}k(G) \geq \frac{n}{n} s(G) = k(G) - e(G) + 2$.

$$\Rightarrow \frac{2-n}{n}k(G) \geq -e(G) + 2$$

$$\Rightarrow \frac{n-2}{n}k(G) \leq e(G) - 2$$

$$\Rightarrow k(G) \leq \frac{n}{n-2}(e(G) - 2)$$

Aufgabe (1b). Vgl. Zeichnungen:



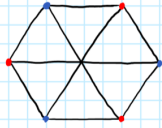
=: G

$$k(G) = 10$$

$$e(G) = 5$$

$$n = 3$$

$$10 > \frac{3}{3-2} \cdot (5-2) \Rightarrow G \text{ ist nicht planar}$$



=: G'

$$k(G') = 9$$

$$e(G') = 6$$

$$n = 4$$

G' enthält keine Dreiecke

$$9 > \frac{4}{4-2} (6-2) \Rightarrow G' \text{ ist nicht planar}$$

Aufgabe (3). Für einen platonischen Körper $P \subseteq \mathbb{R}^3$ mit Zentrum 0 ist:

$$\text{Sym}(P) := \{f \in O(3) : f(P) = P\}$$

$$\text{Sym}_0(P) := \{f \in SO(3) : f(P) = P\}$$

Sei P Würfel.

Zu zeigen:

- $\text{Sym}(P) = S_4 \times \{1, -1\}$
- $\text{Sym}_0(P) = S_4$

Behauptung: $|\text{Sym}(P)| \leq 48, |\text{Sym}_0(P)| \leq 24$.

Beweis: Sei S eine Ecke von P und seien F, G, H die zu E benachbarten Ecken. Da φ Ecken von P auf Ecken von P abbildet, gibt es nur 8 mögliche Werte von $\varphi(E)$. Da φ benachbarte Ecken auf benachbarte Ecken von P abbildet, sind $\varphi(G), \varphi(H), \varphi(F)$ in einer von 6 Reihenfolgen die Nachbarn von $\varphi(E)$. Jetzt ist aber φ vollständig durch $\varphi|_{\{E, F, G, H\}}$ bestimmt, da E, F, G, H ein Erzeugendensystem von \mathbb{R}^3 ist.

Damit ist $|\text{Sym}(P)| \leq 6 \cdot 8 = 48$.

$\text{Sym}_0(P)$ ist Untergruppe von $\text{Sym}(P)$.

Nach dem Satz von Lagrange ist $\frac{|\text{Sym}(P)|}{|\text{Sym}_0(P)|} \in \mathbb{N}(\star)$.

$$\text{Da } \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \in \text{Sym}(P), \text{ aber } \det(-I) = (-1)^3 = -1,$$

ist $I \in \text{Sym}(P) \setminus \text{Sym}_0(P)$, also ist $|\text{Sym}(P)| > |\text{Sym}_0(P)|$.

Wegen (\star) folgt

$$\frac{|Sym(P)|}{|Sym_0(P)|} \geq 2 \Rightarrow |Sym_0(P)| \leq \frac{1}{2} |Sym(P)| \leq 24,$$

Sei D die Menge der Hauptdiagonalen von P . Dann ist

$$h : Sym_0(P) \rightarrow B_{ij}(D) \cong S_4, h(\varphi) := (d \mapsto \varphi(d))$$

Gruppenhomomorphismus.

Behauptung: h ist surjektiv.

Da $B_{ij}(D)$ von Transpositionen erzeugt wird reicht es zu zeigen, dass $Bild(h)$ jede Transposition enthält. Sei also (d_1, d_2) eine beliebige Transposition in $B_{ij}(D)$.

Gesucht: $\varphi \in Sym_0(P)$ mit $h(\varphi) = (d_1, d_2)$,

Wähle φ als Rotation um 180° um die gestrichelte Achse (vgl. Abb.), dann ist $\varphi(P) = P$, $\det(\varphi) = 1$, $\varphi(RL) = BL$, $\varphi(BL) = RL$, $\varphi(GL) = GL$, $\varphi(YL) = YL$.
Wobei GL = Grüne Linie, etc.

Damit ist $h(\varphi) = (d_1, d_2)$,

Wir haben einen surjektiven Hom. $h : Sym_0(P) \rightarrow B_{ij}(D)$. Aus $|Sym_0(P)| \leq 24 = |S_4| = |B_{ij}(D)|$ folgt sofort, dass $|Sym_0(P)| = |B_{ij}(D)|$ ist und dass h bijektiv ist:

$$Sym_0(P) \cong B_{ij}(D) \cong S_4,$$

Behauptung: $Sym(P) \cong Sym_0(P) \times \{-1, 1\}$,

Beweis: Seien:

$$g : Sym(P) \rightarrow Sym_0(P) \times \{-1, 1\}, \psi \mapsto (\det(\psi) \cdot \psi, \det(\psi))$$

$$k : Sym_0(P) \times \{-1, 1\} \rightarrow Sym(P), (\varphi, \varepsilon) \mapsto \varepsilon \varphi,$$

Behauptung: k, g sind zueinander Invers.

Bew:

$$g(k(\varphi, \varepsilon)) = g(\varepsilon \varphi) = (\varepsilon^3 \cdot \varepsilon \varphi, \varepsilon) = (\varphi, \varepsilon)$$

$$k(g(\psi)) = k(\det(\psi) \cdot \psi, \det(\psi)) = \det(\psi)^2 \cdot \psi = \psi$$

Behauptung: k ist Hom.

Beweis:

$$k((\varphi, \varepsilon) \cdot (\varphi', \varepsilon')) = k(\varphi, \varepsilon) \cdot k(\varphi', \varepsilon'),$$

Damit folgt Behauptung. Also ist

$$\text{Sym}(P) \cong \text{Sym}_0(P) \times \{-1, 1\} \cong S_4 \times \{-1, 1\},$$

1.9 2018-01-12 - Übungsblatt 9

Definition zu Aufgabe 1 (Vgl. Blatt): Eine triangulierte Fläche (M, K, t) besteht aus einer Fläche M , einem Simplicialkomplex K und einem Homöomorphismus $t : |K| \rightarrow M$.

(K, t) heißt *Triangulierung* von M .

Die Eulercharakteristik $\chi(M)$ ist definiert als $\chi(K)$, $\chi(M)$ hängt also nicht von (K, t) ab.

Aufgabe (1). Frage: Ist das eine Triangulierung des Torus T ?

Antwort: Nein!

Begründung: In der Zeichnung werden alle Ecken identifiziert, aber Dreiecke in Simplicialkomplexen haben drei verschiedene Ecken (0-Simplices). Außerdem ist der Schnitt der zwei Dreiecke in der Zeichnung kein Simplex.

Überlegung: Was ist dann eine korrekte Triangulierung des Torus T ?

Bonusfrage: Wieviele Dreiecke braucht man mindestens, um einen Torus korrekt zu triangulieren?

Antwort: 14!

Sei (K, t) eine Triangulierung des Torus, sei

- e die Anzahl der Ecken von K .
- k die Anzahl der Kanten von K .
- s die Anzahl der Dreiecke von K .

Zeichne auf jede Seite von jedem Dreieck innen ein Punkt. Sei x die Anzahl der Punkte.

Da in jedem Dreieck drei Punkte liegen gilt $x = 3s$.

Da in jeder Kante zwei Punkte liegen gilt $x = 2k$, also $3s = 2k$.

Der Torus hat Euler-Charakteristik 0, also gilt

$$3 \cdot 0 = 3 \cdot (s - k + e) = 3s - 3k + 3e = \underbrace{(3s - 2k)}_{=0} - k + 3e \Rightarrow k = 3e$$

Damit ist $2e = \frac{2}{3}k = \frac{2}{3}s = s$.

Da es $\binom{e}{2}$ Paare von Ecken gibt und jede Kante ein anderes Eckenpaar als Enden hat,

gilt $\binom{e}{2} \geq k = 3e$ Da $\binom{e}{2} \geq 3e$ erst ab $e \geq 7$ erfüllt ist, gilt $e \geq 7$, also $s = 2e \geq 14$.
Um zu beweisen, dass der kleinste Wert für s genau 14 ist, reicht ein Beispiel:

Aufgabe (2). *Vorraussetzungen:* Seien M_1, M_2 zwei Flächen. Für jede Fläche existiert eine Triangulierung.

Behauptung: $\chi(M_1 \# M_2) = \chi(M_1) + \chi(M_2) - 2$.

Lemma 1: Homöomorphe Flächen haben die gleiche Euler-Charakteristik.

Beweis: Sei $\varphi : M \rightarrow \tilde{M}$ Homöo. Sei (K, t) eine Triangulierung von M .

Dann ist $(K, \varphi \circ t)$ Triangulierung von \tilde{M} , denn $\varphi \circ t$ ist Verkettung von Homöomorphismen.

s

Lemma 2: Seien M_1, M_2, N_1, N_2 Flächen, sodass $M_1 \cong N_1, M_2 \cong N_2$.

Dann ist $M_1 \# M_2 \cong N_1 \# N_2$.

Beweisansatz: Seien $\varphi_1 : M_1 \rightarrow N_1, \varphi_2 : M_2 \rightarrow N_2$ Homöomorphismen.

Sei $M := M_1 \# M_2, N := N_1 \# N_2$ beliebige zusammenhängende Summen.

Seien $B_1 \subseteq M_1, B_2 \subseteq M_2$ die Kreisscheiben, die zur Konstruktion von M verwendet wurden und sei $F : \partial B_1 \rightarrow \partial B_2$ der verwendete Homöomorphismus.

Seien $C_1 := \varphi_1(B_1), C_2 := \varphi_2(B_2)$.

Sei dann $\tilde{f} : \partial C_1 \rightarrow \partial C_2$ gegeben durch

$$\tilde{f}(p) := \varphi_2(f(\varphi_1^{-1}(p)))$$

Sei \tilde{N} zusammenhängende Summe von N_1, N_2 mittels C_1, C_2, \tilde{f} .

Dann ist

$$\varphi : M \rightarrow \tilde{N}, [p] \mapsto \begin{cases} [\varphi_1(p)], & \text{falls } p \in M_1 \\ [\varphi_2(p)], & \text{falls } p \in M_2, \end{cases}$$

ein wohldefinierter Homöomorphismus.

Also ist $M \cong \tilde{N} \cong N$.

Beweis der Aufgabe:

Seien (K_1, t_1) und (K_2, t_2) Triangulierungen von M_1 und M_2 .

Jetzt ist nach *Vorraussetzung* $M_1 \cong |K_1|, M_2 \cong |K_2|$ also ist

$$M_1 \# M_2 \underset{\text{Lemma 2}}{\cong} |K_1| \# |K_2|$$

also auch:

$$\chi(M_1 \# M_2) \stackrel{\text{Lemma 1}}{=} (|K_1| \# |K_2|)$$

wobei wir uns die Verklebung von $|K_1|$ und $|K_2|$ beliebig aussuchen dürfen.

Seien also Δ_1, Δ_2 Dreiecke in K_1 bzw. K_2 .

Sei $f : \partial\Delta_1 \rightarrow \partial\Delta_2$ ein Homöomorphismus, der Ecken von Δ_1 auf Ecken von Δ_2 abbildet.

Sei S die zusammenhängende Summe von $|K_1|$ und $|K_2|$ bzgl. Δ_1, Δ_2, f .

Dann hat S eine durch K_1 und K_2 erzeugte simpliziale Struktur.

Es gilt:

$$s(K) = s(K_1) + s(K_2) - 2 \text{ da die Dreiecke fehlen}$$

$$k(K) = k(K_1) + k(K_2) - 3 \text{ da drei Kantenpaare verklebt wurden}$$

$$e(K) = e(K_1) + e(K_2) - 3 \text{ da drei Eckenpaare verklebt wurden}$$

Also ist

$$\chi(K) = \chi(K_1) + \chi(K_2) - 3 + 3 - 2 = \chi(K_1) + \chi(K_2) - 2$$

Damit ist

$$\begin{aligned} \chi(M_1 \# M_2) &= \chi(|K_1| \# |K_2|) \\ &= \chi(S) = \chi(K) \\ &= \chi(K_1) + \chi(K_2) - 2 \\ &= \chi(M_1) + \chi(M_2) - 2, \end{aligned}$$

Aufgabe (3). Sei I ein Intervall und $c : I \rightarrow \mathbb{R}^3$ eine diff'bare Kurve mit $\frac{dc}{ds}(t) \neq 0$ für alle $t \in I$.

Zu zeigen: Es gibt ein Intervall J und einen Diffeomorphismus $\varphi : I \rightarrow J$, sodass für die umparametrisierte Kurve $\tilde{c} : c \circ \varphi^{-1}$ die Gleichung

$$\left\| \frac{d\tilde{c}}{ds}(s) \right\| = 1$$

für alle $s \in J$ gilt.

Beweis: Sei $a \in I$ beliebig. Sei $\varphi : I \rightarrow \mathbb{R}$ gegeben durch

$$\varphi(x) := \int_a^x \left\| \frac{dc}{dt}(t) \right\| dt$$

Da $\left\| \frac{dc}{dt}(t) \right\| > 0$ für alle $t \in I$ ist, ist φ stetig und streng monoton steigend, also ist

φ Homöomorphismus von I nach $J := \varphi(I)$.

Nach Konstruktion ist φ stetig diff'bar...

$$\left(\frac{d\varphi}{dx}(x) = \left\| \frac{dc}{dt}(x) \right\| \right)$$

... mit nicht verschwindender Ableitung also ist φ^{-1} auch überall stetig diff'bar und damit ist φ ein Diffeomorphismus.

Sei nun $\tilde{c} = c \circ \varphi^{-1}$, sei $s_0 \in J$ beliebig. Sei $t_0 = \varphi^{-1}(s_0)$

Jetzt gilt $c = \tilde{c} \circ \varphi$, mit Kettenregel folgt:

$$\begin{aligned} \frac{dc}{dt}(t_0) &= \frac{d\tilde{c}}{ds}(\varphi(t_0)) \cdot \frac{d\varphi}{dt}(t_0) \\ \Rightarrow \left\| \frac{dc}{dt}(t_0) \right\| &= \left\| \frac{d\tilde{c}}{ds}(s_0) \right\| \cdot \left| \frac{d\varphi}{dt}(t_0) \right| = \left\| \frac{d\tilde{c}}{ds}(s_0) \right\| \cdot \left\| \frac{dc}{dt}(t_0) \right\| \end{aligned}$$

Kürzen mit $\left\| \frac{dc}{dt}(t_0) \right\|$ ergibt $1 = \left\| \frac{d\tilde{c}}{ds}(s_0) \right\|$ wie gewünscht.

1.10 2018-01-19 - Übungsblatt 10

Aufgabe (1). Vorraussetzungen: Vergleich Aufgabenstellung.

Beweis:

Erinnerung: Sind $x, x' : U \rightarrow \mathbb{R}^3$ parametrisierte Flächenstücke und ist $I_x(u, v) = I_{x'}(u, v)$ für alle $(u, v) \in U$, dann sind $x(U), x'(U)$ lokal isometrisch durch $x' \circ x^{-1}$

Anwendung: Berechne:

$$x_u = \begin{pmatrix} -\sin(u) \\ \cos(u) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad x_v = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad x'_u = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad x'_v = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

also gilt:

$$I_x(u, v) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad I'_x(u, v) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Also ist $x' \circ x^{-1} : x(U) \rightarrow x'(U)$ die gesuchte lokale Isometrie.

Optional: Berechne explizite Darstellung von $x' \circ x^{-1}$

Aufgabe (2a). Gegeben sei eine Rotationsfläche durch:

$$x : (0, 2\pi) \times (a, b) \rightarrow \mathbb{R}^3, \\ (u, v) \mapsto (\varphi(v)\cos u, \varphi(v)\sin u, \psi(v))$$

wobei $\varphi, \psi : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}, \varphi \neq 0$ (o.B.d.A $\varphi > 0$).

Sie entsteht also durch die Rotation der Kurve $v \mapsto (\varphi(v), 0, \psi(v))$ um die x_3 -Achse.

Zu zeigen: Berechne die Gauß-Krümmung von x in Abh. von φ, ψ .

$$x_u = \begin{pmatrix} -\varphi(v)\sin(u) \\ \varphi(v)\cos(u) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad x_v = \begin{pmatrix} -\varphi'(v)\sin(u) \\ \varphi'(v)\cos(u) \\ \psi'(v) \end{pmatrix}$$

Damit folgt:

$$I_x(u, v) = \begin{pmatrix} \varphi(v)^2 & 0 \\ 0 & \varphi'(v)^2 + \psi'(v)^2 \end{pmatrix}, \\ x_u \wedge x_v = \begin{pmatrix} \varphi(v)\psi'(v)\cos u \\ \varphi(v)\psi'(v)\sin u \\ -\varphi(v)\varphi'(v) \end{pmatrix}, \\ \|x_u \wedge x_v\| = \sqrt{\varphi(v)^2\psi'(v)^2 + \varphi(v)^2\varphi'(v)^2} \\ = \varphi(v)\sqrt{\varphi'(v)^2 + \psi'(v)^2}$$

Damit folgt für n :

$$n = \frac{1}{\sqrt{\varphi'(v)^2 + \psi'(v)^2}} \begin{pmatrix} \psi'(v)\cos(u) \\ \psi'(v)\sin(u) \\ -\varphi(v) \end{pmatrix}$$

Weiter sind:

$$x_{uu} = \begin{pmatrix} -\varphi(v)\cos(u) \\ -\varphi(v)\sin(u) \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$x_{uv} = \begin{pmatrix} -\varphi(v)\sin(u) \\ \varphi(v)\cos(u) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$x_{vv} = \begin{pmatrix} -\varphi''(v)\cos(u) \\ \varphi''(v)\sin(u) \\ \psi''(v) \end{pmatrix}$$

Damit ist dann:

$$II_x(u, v) = \frac{1}{\sqrt{\varphi'(v)^2 + \psi'(v)^2}} \cdot \begin{pmatrix} -\varphi(v)\psi'(v) & 0 \\ 0 & \varphi''(u)\psi'(v) - \psi'(u)\varphi''(v) \end{pmatrix}$$

$$K = \frac{\det(II)}{\det(I)} = \varphi \cdot \psi'$$

Anmerkung: Hier bin ich mir mit den Variablen von φ, ψ nicht ganz sicher.. Für Verbesserungen gerne melden.

Aufgabe (2b). Geben Sie Beispiele von Rotationsflächen mit konstanter Gauß-Krümmung 1, 0, -1 an.

Wir suchen für ein vorgegebens K solche φ, ψ sodass () erfüllt wird. Um unsere Suche einzuschränken, können wir Bedingungen an φ, ψ stellen.

Bspw: Fordern wir, dass $\psi(v) = v$ gilt. Aus (*) folgt dann

$$K = \frac{-\varphi''}{\varphi(\varphi'^2 + 1)^2}$$

das heißt:

$$\varphi'' = -K\varphi \cdot (\varphi'^2 + 1)^2$$

Zitat: "Das ist nicht so schön, es ist sogar ziemlich hässlich."

Es zeigt uns aber, dass Lösungen existieren.

Versuchen wir eine andere Bedingungen an φ, ψ zu stellen.

Wir können fordern, dass die Kurve $v \mapsto (\varphi(v), 0, \psi(v))$ nach Bogenlänge parametrisiert ist. Das heißt, dass $\varphi'^2 + \psi'^2 = 1$. (+)

Also gilt auch:

1 Übungen

$$0 = \frac{d}{dv}(\varphi'^2 + \psi'^2) = 2\varphi'\varphi'' + 2\psi'\psi''$$

Nun ist

$$K = \frac{\varphi'\psi'\psi'' - \psi'^2\varphi''}{\underbrace{\varphi(\varphi'^2 + \psi'^2)}_{=1}} = \frac{-\varphi'^2\varphi'' - \psi'^2\varphi''}{\varphi} = \frac{-\varphi''}{\varphi}$$

Damit ist $\varphi'' = -K\varphi$ (**)

Fall K = 1:

Die Lösungen von $\varphi'' = -\varphi$ sind $\varphi(v) = a\cos v + b\sin v$ ($a, b \in \mathbb{R}$).

Suchen wir uns $\varphi(v) = \cos v$ aus, so können wir $\psi(v) = \sin v$ wählen, um (+) zu erfüllen.

Dann ist

$$x(u, v) = \begin{pmatrix} \cos(v)\cos(u) \\ \cos(v)\sin(u) \\ \sin(v) \end{pmatrix}$$

und das ist genau die Parametrisierung der 2-Sphäre. **Fall K = 0:**

Aus (**) folgt $\varphi'' = 0$ das heißt:

$\varphi(v) = av + b, \psi(v) = cv + d$ mit $\sqrt{a^2 + c^2} = 1$, damit (+) gilt.

Fall K = -1: Aus (**) folgt dann $\varphi'' = \varphi$, das heißt:

$\varphi(v) = a \cdot e^v + b \cdot e^{-v}$ ($a, b \in \mathbb{R}$)

Wir suchen uns $\varphi(v) = e^v$ aus, dann ist wegen (+)

$$\psi'(v) = \sqrt{1 - e^{2v}}, \text{ und } \psi(v) = \int \sqrt{1 - e^{2v}} dv = \sqrt{1 - e^{2v}} - \tanh^{-1}(\sqrt{1 - e^{2v}}),$$

Zitat: "Wie man darauf kommt, weiß ich auch nicht."

Aufgabe (3). Zu zeigen: Für die geodätischen Krümmungen $\kappa_g, \tilde{\kappa}_g$ gilt: $-\tilde{\kappa}_g(t) = \kappa_g(l - t)$.

Erinnerung: Für eine nach Bogenlänge parametrisierte Flächenkurve c ist $\{c', n \wedge c', n\}$ eine ONB an jedem Punkt $c(t)$.

Es ist $c''(t) = 0 \cdot c'(t) + \kappa_g(t)(n(t) \wedge c'(t)) + \alpha(t)n(t)$.

Da die Normale n nicht von der Parametrisierung von c abhängt gilt $\tilde{n}(t) = n(l - t)$.

Weiter gilt $\tilde{c}'(t) = \frac{d}{dt}[c(l - t)] = -c'(l - t)$ und

$\tilde{c}''(t) = \frac{d}{dt}[\tilde{c}'(t)] = c''(l - t)$ und

$$\tilde{n}(t) \wedge \tilde{c}'(t) = n(l-t) \wedge -c'(l-t) = -n(l-t) \wedge c'(l-t).$$

Also ist:

$$\begin{aligned} 0c'(l-t) + \kappa_g(l-t)(n(l-t) \wedge c'(l-t)) + \alpha(l-t)n(l-t) &= c''(l-t) \\ &= \tilde{c}''(t) = 0\tilde{c}'(t) + \tilde{\kappa}_g(t)(\tilde{n}(t) \wedge \tilde{c}(l-t) + \tilde{\alpha}(t)\tilde{n}(t)) \\ &= -0c'(l-t) - \tilde{\kappa}_g(t)(n(l-t) \wedge c'(l-t)) + \tilde{\alpha}(t) \cdot n(l-t) \end{aligned}$$

Durch Koeffizientenvergleich:

$$-0 = 0 \text{ und } \tilde{\alpha}(t) = \alpha(l-t).$$

Daraus folgt direkt die Behauptung.

1.11 2018-02-02 - Übungsblatt 11

Aufgabe (1). Voraussetzung: Parametrisierung des Rotationstorus!

Zu zeigen: Zeige, wo auf dem Torus die Gauß-Krümmung K größer 0, kleiner 0 oder verschwindend ist.

Erster Weg: Gauß-Krümmung ausrechnen und entsprechend auflösen.

→ Rechenaufwand!

Zweiter Weg: In der letzten Übung haben wir die Gauß-Krümmung von Rotationsflächen bestimmt.

$$x(u, v) = \begin{pmatrix} \varphi(u)\cos(v) \\ \varphi(u)\sin(v) \\ \psi(u) \end{pmatrix}$$

Dann ist die Gauß-Krümmung gegeben durch:

$$K(u, v) = \frac{\varphi' \psi' \psi'' - \varphi'' \psi'^2}{\varphi(\varphi'^2 + \psi'^2)}$$

Für $\varphi(u) = R + r\cos u$, $\psi(u) = r\sin u$ erhalten wir:

$$\begin{aligned} K(u, v) &= \frac{-(r\sin u)(r\cos u)(-r\sin u) - (-r\cos u)(r\cos u)^2}{(R + r\cos u)((-r\sin u)^2 + (r\cos u)^2)} \\ &= \frac{r^3(\cos u(\sin^3 u + \cos^3 u))}{(R + r\cos u)r^4} \\ &= \frac{\cos u}{r(R + r\cos u)} \end{aligned}$$

Da weiter $r(R + r \cos u) > 0$ ist, folgt:

$$K > 0 \Leftrightarrow \cos u > 0$$

$$K = 0 \Leftrightarrow \cos u = 0$$

$$K < 0 \Leftrightarrow \cos u < 0$$

Aufgabe (2). Voraussetzung: Vgl. Aufgabe!

Zu zeigen: $\bar{\mathbb{C}}$ ist kompakt.

Beweis: Sei \ddot{U} eine offene Überdeckung von $\bar{\mathbb{C}}$.

Wähle $U_\infty \in \ddot{U}$, sodass $\infty \in U_\infty$. Dann ist $U_\infty \cap \mathbb{C}$ offen in \mathbb{C} , also ist $\bar{\mathbb{C}} \setminus U_\infty = \mathbb{C} \setminus U_\infty$ abgeschlossen und beschränkt. Nach Heine-Borel ist $\bar{\mathbb{C}} \setminus U_\infty$ also kompakt.

Die Menge $\tilde{U} := \{\tilde{U} \setminus U_\infty : U \in \ddot{U}\}$ ist offene Überdeckung von $\bar{\mathbb{C}} \setminus U_\infty$, denn für alle $x \in \bar{\mathbb{C}} \setminus U_\infty$ gibt es ein $U_x \in \ddot{U}$ mit $x \in U_x$, also auch $\tilde{U}_x := U_x \setminus U_\infty \in \tilde{U}$ mit $x \in \tilde{U}_x$,

Da \tilde{U} offene Überdeckung einer kompakten Menge ist hat \tilde{U} eine endliche Teilüberdeckung:

$$\{U_1 \setminus U_\infty, \dots, U_n \setminus U_\infty\}, U_1, \dots, U_n \in \ddot{U}$$

Dann ist $\{U_1, \dots, U_n, U_\infty\}$ eine endliche Teilüberdeckung von \ddot{U} , denn für alle $x \in \bar{\mathbb{C}}$ ist entweder $x \in U_\infty$, oder $x \notin U_\infty$ aber im zweiten Fall gibt es $i \in \{1, \dots, n\}$ mit

$$x \in U_i \setminus U_\infty \subseteq U_i$$

also $x \in U_i$.

Aufgabe (3). Voraussetzung: Sei $A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in GL(2, \mathbb{C})$ **Zu zeigen:** Zeigen Sie, dass

$$M_A : \bar{\mathbb{C}} \rightarrow \bar{\mathbb{C}}, z \mapsto \frac{az + b}{cz + d}, \infty \mapsto \frac{a}{c}$$

bijektiv ist.

Beweis: Benutzt folgendes Lemma:

Lemma: Für alle $A, B \in GL(2, \mathbb{C})$ ist $M_A \circ M_B = M_{A \cdot B}$.

Beweis des Lemma:

Sei $A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} e & f \\ g & h \end{pmatrix}$.

Fall 1: $Z \neq \infty, gz + h \neq 0$.

Dann ist:

$$\begin{aligned} M_A(M_B(z)) &= M_A\left(\frac{ez + f}{gz + h}\right) = \frac{a\left(\frac{ez+f}{gz+h}\right) + b}{c\left(\frac{ez+f}{gz+h}\right) + d} \\ &= \frac{a(ez + f) + b(gz + h)}{c(ez + f) + d(gz + h)} = \frac{(ae + bg)z + (af + bh)}{(ce + dg)z + (cf + dh)} \\ &= M_{\begin{pmatrix} ae+bg & af+bh \\ ce+dg & cf+dh \end{pmatrix}} \end{aligned}$$

Fall 2: $gz + h = 0$

$$\begin{aligned} M_A(M_B(z)) &= M_A\left(\frac{ez + f}{gz + h}\right) = M_A(\infty) = \frac{a}{c} = \frac{a(ez + f)}{c(ez + f)} \\ &= \frac{a(ez + f) + b(gz + h)}{c(ez + f) + d(gz + h)} \\ &= M_{AB}(z) \end{aligned}$$

Fall 3: Für $z = \infty, g \neq 0$:

$$M_A(M_B(\infty)) = M_A\left(\frac{e}{g}\right) = \frac{a \cdot \frac{e}{g} + b}{c \cdot \frac{e}{g} + d} = \frac{ae + bg}{ce + dg} = M_{AB}(\infty)$$

Fall 4: $z = \infty, g = 0$:

$$M_A(M_B(\infty)) = M_A\left(\frac{e}{g}\right) = M_A(\infty) = \frac{a}{c} = \frac{ae}{ce} = \frac{ae + bg}{ce + dg} = M_{AB}(\infty)$$

Beweis Aufgabe: Sei nun $A \in GL(2, \mathbb{C})$ beliebig. Nach Lemma ist:

$$M_A \circ M_{A^{-1}} = M_{\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}} = M_{A^{-1}} \circ M_A$$

und

$$M_{\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}} : z \mapsto \frac{1z + 0}{0z + 1} = z, \infty \mapsto \frac{1}{0} = \infty$$

also ist M_A Umkehrfunktion zu $M_{A^{-1}}$, also ist M_A bijektiv.

Aufgabe (4). Voraussetzung: Vgl. Aufgabenstellung.

Zu zeigen: Die Möbius-Transformation:

1 Übungen

$$M : z \mapsto \frac{iz + 1}{z + c}, \infty \mapsto i$$

Seien $A_1 := \{z \in \mathbb{C} : \operatorname{Im} z > 0\} = H^2$,

$A_2 := \{z \in \mathbb{C} : \operatorname{Im} z < 0\}$,

$A_3 := \{z \in \mathbb{C} : \operatorname{Im} z = 0\} \cup \{\infty\} = \bar{\mathbb{R}}$,

$B_1 := \{z \in \mathbb{C} : |z| < 1\} = D^2$,

$B_2 := \{z \in \mathbb{C} : |z| > 1\} \cup \{\infty\}$,

$B_3 := \{z \in \mathbb{C} : |z| = 1\} = S^1$,

Behauptung: $M(A_i) = B_i$ für $i = 1, 2, 3$.

" \subseteq ": *Bemerkung:* $\bar{\mathbb{C}} = A_1 \cup A_2 \cup A_3$.

Sei $z \in \bar{\mathbb{C}}$ beliebig.

Fall 1: $z = 0$. Dann ist $z \in A_3$ und $M(z) = i \in B_3$.

Fall 2: $z = -i$. Dann ist $z \in A_2$ und $M(z) = \infty \in B_2$.

Fall 3: $z = a + ib \in \mathbb{C}, z \neq -i$. Dann ist:

$$M(z) = \frac{i(a + ib) + 1}{a + ib + i} = \frac{i(a + ib - i)}{a + ib + i}$$

also

$$|M(z)| = \frac{|a + ib - i|}{|a + ib + i|} = \frac{\sqrt{a^2 + (b - 1)^2}}{\sqrt{a^2 + (b + 1)^2}}$$

Da gilt:

$$(b + 1)^2 > (b - 1)^2 \Leftrightarrow b > 0$$

$$(b + 1)^2 = (b - 1)^2 \Leftrightarrow b = 0$$

$$(b + 1)^2 < (b - 1)^2 \Leftrightarrow b < 0$$

gilt dasselbe auch für $|M(z)|$.

1. **Fall 3.1:** $b > 0 \Rightarrow z \in A_1, M(z) \in B_1$

2. **Fall 3.2:** $b = 0 \Rightarrow z \in A_3, M(z) \in B_3$

3. **Fall 3.3:** $b < 0 \Rightarrow z \in A_2, M(z) \in B_2$

" \supseteq ": *Bemerkung:* $\bar{\mathbb{C}} = B_1 \cup B_2 \cup B_3$.

M ist Möbiustransformation, also surjektiv.

Angenommen, $\exists z \in \bar{\mathbb{C}}$ mit $z \in B_i$, aber $z \notin M(A_1)$ für ein $i \in \{1, 2, 3\}$.

oBdA $i = 1$

Für dieses z gilt:

- $z \in M(A_1)$ nach Annahme,
- $z \in B_2 \supseteq M(A_2)$ wegen $B_1 \cap B_2 = \emptyset$,
- $z \in B_3 \supseteq M(A_3)$ wegen $B_1 \cap B_3 = \emptyset$,

Damit ist

$$z \in M(A_1) \cup M(A_2) \cup M(A_3) = M(A_1 \cup A_2 \cup A_3) = M(\bar{\mathbb{C}}) = \bar{\mathbb{C}} \quad \text{!}$$

Damit ist dann:

- a) $M(H^2) = M(A_1) = B_1 = D^2$ ✓
- b) $M(\bar{H}^2) = M(A_1 \cup A_3) = M(A_1) \cup M(A_3) = B_1 \cup B_3 = \bar{D}^2$ ✓
- c) $M(\mathbb{R}) = M(A_3) = B_3 = S^1$ ✓

1.12 2018-02-09 - Übungsblatt 12

Aufgabe (1). Zu zeigen:

Kreise und Geraden ("Kreislinsen") in $\mathbb{C} \cong \mathbb{R}^2$ sind genau die Mengen der Form:

$$\{z \in \mathbb{C} : \alpha z \bar{z} + \beta z + \bar{\beta} \bar{z} + \gamma = 0\}$$

Für $\alpha, \gamma \in \mathbb{R}, \beta \in \mathbb{C}, \beta \cdot \bar{\beta} > \alpha\gamma$

Beweis:

- Sei K ein Kreis in \mathbb{C} mit Mittelpunkt $w \in \mathbb{C}$, Radius $r < 0$:

$$\begin{aligned} K &= \{z \in \mathbb{C} : |z - w| = r\} \\ &= \{z \in \mathbb{C} : (z - w)(\bar{z} - \bar{w}) = r^2\} \\ &= \{z \in \mathbb{C} : z\bar{z} - w\bar{z} - \bar{z}w + w\bar{w} - r^2 = 0\} \\ &= \{z \in \mathbb{C} : \alpha z \bar{z} + \beta z + \bar{\beta} \bar{z} + \gamma = 0\} \\ \alpha &= 1, \quad \beta = -\bar{w}, \quad \gamma = w\bar{w} - r^2 \end{aligned}$$

Hier ist $\beta \bar{\beta} = \bar{w}w > \bar{w}w - r^2 = \gamma = \alpha\gamma$.

- Sei L eine Gerade in \mathbb{C} mit Normale $n \in S^1 \subset \mathbb{C}$ und $x \in L$. Dann ist $L - x$ eine Gerade mit Normale n durch 0 und $\bar{n}(L - x)$ eine Gerade mit Normale 1 durch 0, also die imaginäre Achse. Also ist

$$\begin{aligned} L &= \{z \in \mathbb{C} : 2\operatorname{Re}(\bar{n}(z - x)) = 0\} \\ &= \{z \in \mathbb{C} : \bar{n}(z - x) + (\bar{n}(z - x)) = 0\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \{z \in \mathbb{C} : \bar{n}z + n\bar{z} - \bar{n}x - n\bar{x} = 0\} \\
 &= \{z \in \mathbb{C} : \alpha z\bar{z} + \beta z + \bar{\beta}\bar{z} + \gamma = 0\} \\
 \alpha &= 0, \quad \beta = \bar{n}, \quad \gamma = -n\bar{x} - \bar{n}x \\
 \beta\bar{\beta} &= |n|^2 = 1 > 0 = 0\gamma = \alpha\gamma
 \end{aligned}$$

$$\bullet M = \{z \in \mathbb{C} : \alpha z\bar{z} + \beta z + \bar{\beta}\bar{z} + \gamma = 0\}, \bar{\beta} \cdot \beta > 0$$

Fall 1: $\alpha \neq 0$ Dann ist.

$$\begin{aligned}
 M &= \{z \in \mathbb{C} : z\bar{z} + \frac{\beta}{\alpha}z + \frac{\bar{\beta}}{\alpha}\bar{z} + \frac{\beta\bar{\beta}}{\alpha^2} - \frac{\beta\bar{\beta}}{\alpha^2} + \frac{\gamma}{\alpha} = 0\} \\
 &= \{z \in \mathbb{C} : (z + \frac{\bar{\beta}}{\alpha})(\bar{z} + \frac{\beta}{\alpha}) = \underbrace{\frac{\beta\bar{\beta}}{\alpha^2} - \frac{\alpha\gamma}{\alpha}}_{>0}\} \\
 &= \{z \in \mathbb{C} : |z + w|^2 = r^2\}
 \end{aligned}$$

Also ist M der Kreis um $w = -\frac{\bar{\beta}}{\alpha}$ mit Radius $r = \sqrt{\frac{1}{\alpha}(\beta\bar{\beta} - \alpha\gamma)}$

Fall 2: $\alpha = 0$, also $\beta \neq 0$.

$$\begin{aligned}
 M &= \left\{z \in \mathbb{C} : \frac{\beta}{|\beta|}z + \frac{\bar{\beta}}{|\beta|}\bar{z} + \frac{\gamma}{|\beta|} = 0\right\} \\
 &= \left\{z \in \mathbb{C} : \left(\frac{\beta}{|\beta|} + \frac{\gamma}{z|\beta|}\right) + \left(\frac{\bar{\beta}}{|\beta|} + \frac{\gamma}{\bar{z}|\beta|}\right) = 0\right\} \\
 &= \{z \in \mathbb{C} : \operatorname{Re}(\bar{n}(z - x)) = 0\}
 \end{aligned}$$

wobei

$$n = \frac{\bar{\beta}}{|\beta|}, x = \frac{-n\gamma}{2|\beta|}$$

Dies ist eine Gerade mit Normale n durch x .

Aufgabe (2a). Gegeben:

$$J : \bar{\mathbb{C}} \rightarrow \bar{\mathbb{C}}, z \mapsto \frac{-1}{z}, 0 \mapsto \infty, \infty \mapsto 0.$$

Zu zeigen: J ist Kreislinie.

Anmerkung: Geraden in $\bar{\mathbb{C}}$ enthalten ∞ .

Bemerkung: J ist selbstinverser Bijektion, also kann man Mengen der Form $\{J(Z) : z \in \mathbb{C}, \text{Eigenschaft}(z)\}$, auch so schreiben:

$$\{z \in \mathbb{C} : \text{Eigenschaft}(J(z))\}.$$

Nach Aufgabe 1 kann man Kreislinien in \mathbb{C} so darstellen:

$$M_{\alpha, \beta, \gamma} := \{z \in \mathbb{C} \setminus \{o\} : \alpha z \bar{z} + \beta z + \bar{\beta} \bar{z} + \gamma = 0\} \\ \cup \{0 : \gamma = 0\} \cup \{\infty : \alpha = 0\}$$

Nun ist:

$$J(M_{\alpha, \beta, \gamma}) = \{J(z) : z \in \mathbb{C} \setminus \{0\}, \alpha z \bar{z} + \beta z + \bar{\beta} \bar{z}\} \\ \cup \{J(0) : \gamma = 0\} \\ \cup \{J(\infty) : \alpha = 0\} \\ = \left\{z \in \mathbb{C} \setminus \{0\} : \alpha \cdot \frac{-1}{z} \cdot \frac{-1}{\bar{z}} + \beta \cdot \frac{-1}{z} + \bar{\beta} \cdot \frac{-1}{\bar{z}} + \gamma = 0\right\} \\ \cup \{0 : \gamma = 0\} \\ \cup \{0 : \alpha = 0\} \\ = \{z \in \mathbb{C} \setminus \{0\} : \alpha - \beta \bar{z} - \bar{\beta} z + \gamma z \bar{z} = 0\} \\ \cup \{0 : \alpha = 0\} \\ \cup \{\infty : \gamma = 0\} = M_{\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}, \tilde{\gamma}}$$

mit

$$\tilde{\alpha} = \gamma, \tilde{\gamma} = \alpha, \tilde{\beta} = -\bar{\beta},$$

Das ist eine Kreislinie.

Aufgabe (2b). **Frage:** Ist J (aus Teil (a)) eine Möbiustransformation auf H^2 ?

Antwort: Ja, denn $J : z \mapsto \frac{-1}{z} = \frac{0z-1}{1z+0}$, $\infty \mapsto 0 = \frac{0}{1}$. Also ist J die Möbiustransformation zur Matrix.

$$M = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \in SL(2, \mathbb{R})$$

also eine H^2 - Möbiustransformation.

Aufgabe (3a). Sei L hyperbolische Gerade, die \mathbb{R} im Punkt α trifft.

Zu zeigen: Für geeignetes $\beta \in \mathbb{R}$ ist

$$T : z \mapsto \frac{-1}{\alpha - z} + \beta$$

eine Möbiustransformation mit $T(L) = i\mathbb{R}^+$

Zu zeigen: T ist Möbiustransformation.

Für $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ ist

$$\frac{1}{\alpha - z} + \beta = \frac{1}{\alpha - z} + \frac{\beta\alpha - \beta z}{\alpha - z} = \frac{-\beta z + \beta\alpha + 1}{-z + \alpha}$$

also ist T die \mathbb{C} -Möbiustransformation zur Matrix

$$A = \begin{pmatrix} -\beta & \beta\alpha + 1 \\ -1 & \alpha \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$$

Wegen $\det A = -\alpha\beta + \beta\alpha + 1 = 1$, also gilt $A \in SL(2, \mathbb{R})$ und T ist H^2 -Möbiustransformation.

Aufgabe (3b). Zu zeigen: Es gilt $T(L) = i\mathbb{R}^+$, also bildet T die hyperbolische Gerade L auf die positive imaginäre Halbebene ab.

Diejenigen Kreislinien $K \subset \bar{\mathbb{C}}$, die zur reellen Achse senkrecht stehen, kann man durch $\bar{K} = K$ und $K \neq \bar{\mathbb{R}} = \mathbb{R} \cup \{\infty\}$ charakterisieren.

Da $A \in SL(2, \mathbb{R})$, ist $T(K) = T(\bar{K}) = \overline{T(K)}$, also bildet T hyperbolische Geraden auf hyperbolische Geraden ab.

Wähle $\beta = \frac{-1}{\alpha - \gamma}$, wobei γ das andere Ende von L bezeichnet. Da $i\mathbb{R}^+$ die einzige hyperbolische Gerade mit Endpunkten 0 und ∞ ist, reicht es zu zeigen, dass $T(\alpha) = \infty$ und $T(\gamma) = 0$:

$$T(\alpha) = \frac{1}{\alpha - \alpha} - \frac{1}{\alpha - \gamma} = \frac{1}{0} - \frac{1}{\alpha - \gamma} = \infty$$

$$T(\gamma) = \frac{1}{\alpha - \gamma} - \frac{1}{\alpha - \gamma} = 0$$

also ist $T(L) = i\mathbb{R}^+$, was zu beweisen war.

Aufgabe (4). Auf D^2 sei die Metrik d_h^* definiert durch:

$$d_h^*(z, z') = d_h(M^{-1}(z), M^{-1}(z'))$$

wobei

$$M : H^2 \rightarrow D^2, z \mapsto \frac{iz + 1}{z + i}$$

Weiter ist d_h die hyperbolische Metrik auf H^2 .

Zu zeigen: (D^2, d_h^*) ist homogen.

Beweis: Seien $x, y \in D^2$ beliebig.

Gesucht ist Isometrie $\psi : D^2 \rightarrow D^2$ mit $\psi(x) = y$.

Wähle Isometrie $\varphi : H^2 \rightarrow H^2$ mit $\varphi(M^{-1}(x)) = M^{-1}(y)$.

Wähle nun $\psi := M \circ \varphi \circ M^{-1}$.

Bleibt zu zeigen: ψ ist Isometrie und $\psi(x) = y$.

$\psi(x) = M(\varphi(M^{-1}(x))) = M(M^{-1}(y)) = y$ und weiter gilt für alle $z, w \in D^2$

$$\begin{aligned} d_h^*(\psi(z), \psi(w)) &= d_h^*(M(\varphi(M^{-1}(z))), M(\varphi(M^{-1}(w)))) \\ &= d_h(M^{-1}(M(\varphi(M^{-1}(z))))), M^{-1}(M(\varphi(M^{-1}(w))))) \\ &= d_h(\varphi(M^{-1}(z)), \varphi(M^{-1}(w))) \\ &= d_h(M^{-1}(z), M^{-1}(w)) \\ &= d_h^*(z, w) \end{aligned}$$

Damit ist ψ eine Isometrie.