

Hopfbündel

Jürgen Womser-Schütz, <https://github.com/JW-Schuetz>

Die 3-Sphäre S^3

Die 3-Sphäre $S^3 \subset \mathbb{R}^4$ ist mit $\underline{p} = (p_1, p_2, p_3, p_4) \in \mathbb{R}^4$ definiert durch $\|\underline{p}\| = 1$. Identifiziert man durch die Korrespondenz

$$(x^1, y^1, x^2, y^2) \leftrightarrow (x^1 + iy^1, x^2 + iy^2)$$

das Kontinuum \mathbb{R}^4 mit \mathbb{C}^2 , dann erhält man für die 3-Sphäre

$$S^3 = \left\{ (z^1, z^2) \in \mathbb{C}^2 : |z^1|^2 + |z^2|^2 = 1 \right\}.$$

Diese Darstellung von S^3 ist von 4 Parametern abhängig, es sind aber nur 3 nötig. Also macht man z.B. mit $r_1, r_2 \geq 0$ und $\xi_1, \xi_2 \in \mathbb{R}$ den Ansatz $z^1 = r_1 \exp(i\xi_1)$ und $z^2 = r_2 \exp(i\xi_2)$. Es muss dann $r_1^2 + r_2^2 = 1$ gelten.

Man erhält so die Parametrierung für S^3 (siehe dazu im Anhang die Behauptung 1)

$$S^3 = \left\{ (\cos(\phi) \exp(i\xi_1), \sin(\phi) \exp(i\xi_2)) : \xi_1, \xi_2 \in \mathbb{R}, 0 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2} \right\}. \quad (1)$$

Um sich eine Vorstellung dieser Parametrierung von S^3 machen zu können, werden im folgenden drei Fälle für die Beträge von z^1 und z^2 (und damit von $\cos(\phi)$ und $\sin(\phi)$) behandelt.

Fall 1: $|z^1|^2 = |z^2|^2$

Aus (1) folgt $\cos(\phi) = \sin(\phi)$ und damit $\phi = \frac{\pi}{4}$ und $|z^1| = |z^2| = \frac{\sqrt{2}}{2}$. Die 3-Sphäre S^3 in diesem Fall ist der 2-dimensionale Torus (2D-Torus)

$$T = \left\{ \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \exp(i\xi_1), \frac{\sqrt{2}}{2} \exp(i\xi_2) \right) : \xi_1, \xi_2 \in \mathbb{R} \right\}. \quad (2)$$

Fall 2: $|z^1|^2 \leq |z^2|^2$

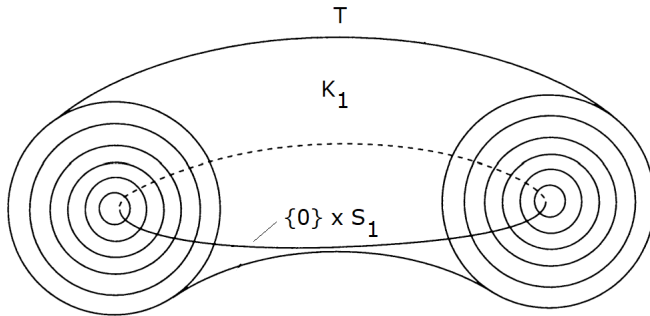


Abbildung 1: 2D-Torus T und horizontale Kreislinie $\{0\} \times S^1$

Aus (1) folgt $\cos(\phi) \leq \sin(\phi)$ und wegen $\phi \in [0, \frac{\pi}{2}]$ ergibt sich $\frac{\pi}{4} \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}$.

Für das untere Limit $\phi = \frac{\pi}{4}$ ergibt sich der 2D-Torus T nach Gleichung (2).

Für das obere Limit $\phi = \frac{\pi}{2}$ folgt $z^1 = 0$, $z^2 = 1$ und das ergibt die horizontale Kreislinie $K_H = \{0\} \times S^1$

$$K_H = \left\{ \left(0, \frac{\sqrt{2}}{2} \exp(i\xi_2) \right) : \xi_2 \in \mathbb{R} \right\}.$$

Für jeden Wert ϕ aus dem Intervall $[\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2})$ ergibt sich jeweils ein 2D-Torus T_ϕ . Durch die Vereinigung all dieser 2-dimensionalen Tori T_ϕ und der Kreislinie K_H entsteht der 3D-Torus

$$K_1 = \{(z^1, z^2) \in \mathbb{C}^2 : |z^1| \leq |z^2|\}, \quad (3)$$

der T als Oberfläche hat (siehe Abbildung 1).

Fall 3: $|z^1|^2 \geq |z^2|^2$

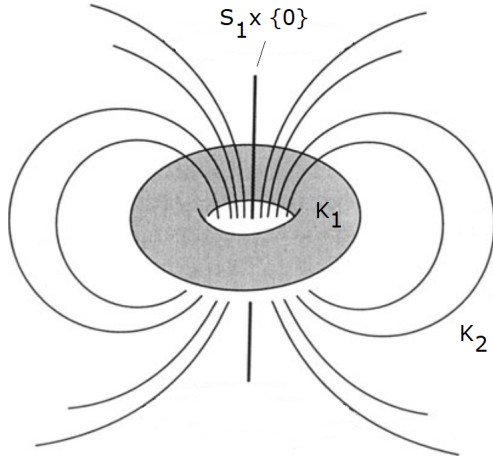


Abbildung 2: 3D-Torus K_1 und vertikale Kreislinie $S^1 \times \{0\}$

Aus (1) folgt $\cos(\phi) \geq \sin(\phi)$ und wegen $\phi \in [0, \frac{\pi}{2}]$ ergibt sich $0 \leq \phi \leq \frac{\pi}{4}$.

Für das obere Limit $\phi = \frac{\pi}{4}$ ergibt sich wieder der 2D-Torus T nach Gleichung (2).

Für das untere Limit $\phi = 0$ folgt $z^1 = 1$, $z^2 = 0$ und das ergibt die vertikale Kreislinie $K_V = S^1 \times \{0\}$

$$K_V = \left\{ \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \exp(i\xi_1), 0 \right) : \xi_1 \in \mathbb{R} \right\}.$$

K_V erscheint in Abbildung 2 als Gerade, ist aber eine Kreislinie durch einen Punkt im Unendlichen.

Für jeden Wert ϕ aus dem Intervall $(0, \frac{\pi}{4}]$ ergibt sich jeweils ein 2D-Torus T_ϕ . Durch die Vereinigung all dieser 2-dimensionalen Tori T_ϕ und der Kreislinie K_V entsteht der 3D-Torus (siehe Abbildung 2)

$$K_2 = \{(z^1, z^2) \in \mathbb{C}^2 : |z^1| \geq |z^2|\}.$$

Die Späre S_3 stellt sich also als Vereinigung zweier miteinander „verschränkter“ 3D-Tori K_1 und K_2 dar, die den \mathbb{R}^3 vollständig ausfüllt.

Hauptfaserbündel (Prinzipalbündel)

Für $\underline{p} = (z^1, z^2) \in S_3$ und $g \in S^1$ gilt $\underline{p}g = (z^1g, z^2g) \in S^3$, die Abbildung $(\underline{p}, g) \rightarrow \underline{p}g$ ist aus C^∞ . Falls $g_1, g_2 \in S^1$ gilt für alle $\underline{p} \in S^3$ $(\underline{p}g_1)g_2 = \underline{p}(g_1g_2)$. Die Identität in S^1 ist $e = \exp(i0)$ und es gilt $\underline{p}e = \underline{p}$ für alle $\underline{p} \in S^3$.

Diese Eigenschaften machen die Abbildung $(\underline{p}, g) \rightarrow \underline{p}g$ zu einer stetigen Rechtsoperation der Liegruppe S^1 auf der Mannigfaltigkeit S^3 .

Für fixe $\underline{p} \in S^3$ wird der Orbit von \underline{p} als die Teilmenge $\{\underline{p}g : g \in S^1\}$ von S^3 definiert, die durch das Durchlaufen aller $g \in S^1$ entsteht. Der Orbit von \underline{p} ist ein Kreis in S^3 durch den Punkt \underline{p} . Man kann zeigen, dass dieser Kreis sogar ein Grosskreis auf S^3 ist (also die Schnittmenge von $S^3 \subseteq \mathbb{R}^4$ mit einer 2D-Ebene in \mathbb{R}^4) der auf einem der Tori liegt, die zusammen S^3 bilden.

Anhang

Behauptung 1

Es existiert für jedes Tupel (r_1, r_2) mit $r_1, r_2 \geq 0$ und $r_1^2 + r_2^2 = 1$ ein eindeutig bestimmter Winkel $\phi \in [0, \frac{\pi}{2}]$ mit $r_1 = \cos(\phi)$ und $r_2 = \sin(\phi)$.

Beweis

Zu r_1 kann man den Winkel $\phi_1 = \arccos(r_1)$ hinzubestimmen und zu r_2 den Winkel $\phi_2 = \arcsin(r_2)$.

Aus $r_1^2 + r_2^2 = 1$ folgt $r_2 = \pm\sqrt{1-r_1^2}$. Wegen $r_2 \geq 0$ kommt nur das positive Vorzeichen in Frage. Also gilt $r_2 = \sqrt{1-r_1^2}$.

Wegen der Identität (siehe dazu [2])

$$\arccos(x) = \arcsin(\sqrt{1-x^2})$$

ergibt sich

$$\phi_2 = \arcsin(r_2) = \arcsin(\sqrt{1-r_1^2}) = \arccos(r_1) = \phi_1.$$

Die beiden Winkel ϕ_1 und ϕ_2 sind also identisch.

Für $x \geq 0$ gilt $0 \leq \arcsin(x) \leq \frac{\pi}{2}$ und $0 \leq \arccos(x) \leq \frac{\pi}{2}$. Für den Winkel ϕ gilt also $\phi \in [0, \frac{\pi}{2}]$. ■

Literatur

- [1] Topology, Geometry and Gauge fields; Naber, Gregory; Springer Science+Business Media; 2011
- [2] https://de.wikipedia.org/wiki/Formelsammlung_Trigonometrie#Additionstheoreme; Abschnitt: Umrechnung in andere trigonometrische Funktionen