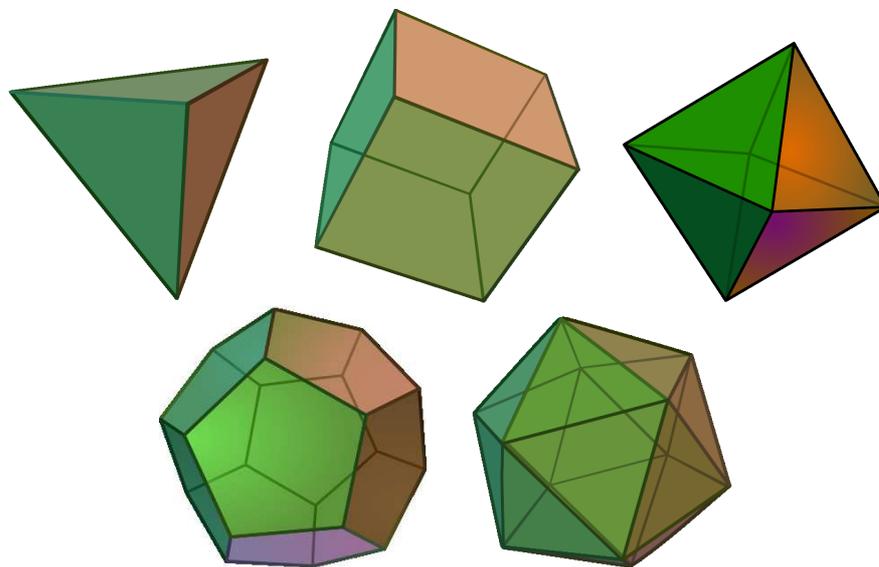


Einführung in die Algebra

Vorlesung 10

Bewegungen

Wir haben schon mehrfach die Würfelgruppe betrachtet, also die Gruppe der eigentlichen Symmetrien an einem Würfel. Jeder dieser Symmetrien ist insbesondere eine abstandserhaltende lineare Abbildung des umgebenden Raumes um eine eindeutig bestimmte Drehachse. Die Gesamtmenge der abstandserhaltenden linearen (eigentlichen) Abbildungen des Raumes bildet die sogenannte *orthogonale Gruppe* O_3 (bzw. SO_3). Dies ist natürlich eine sehr große, unendliche Gruppe. Interessant ist aber, dass die endlichen Untergruppen darin übersichtlich beschrieben werden können. Diese endlichen Untergruppen lassen sich stets als Symmetriegruppe zu einem geeigneten geometrischen Objekt auffassen. Dass eine einfache Klassifikation dieser endlichen Bewegungsgruppen möglich ist, beruht auf intrinsischen Struktureigenschaften des Raumes und liefert unter Anderem eine präzise Version dafür, dass es nur fünf reguläre Polyeder (die *platonischen Körper*) gibt.



Für die folgenden Überlegungen benötigen wir etwas lineare Algebra, insbesondere den Begriff des euklidischen Vektorraumes, siehe die Kurzübersicht auf der Kursseite unter „weitere Materialien“.

DEFINITION 10.1. Eine lineare Abbildung

$$\varphi : V \longrightarrow V$$

auf einem euklidischen Vektorraum V heißt *Isometrie*, wenn für alle $v, w \in V$ gilt:

$$\langle \varphi(v), \varphi(w) \rangle = \langle v, w \rangle .$$

DEFINITION 10.2. Eine Isometrie auf einem euklidischen Vektorraum heißt *eigentlich*, wenn ihre Determinante gleich 1 ist.

Die Gruppe, die aus allen Isometrien von V besteht, heißt *orthogonale Gruppe* zu V , und die eigentlichen Isometrien bilden die *spezielle orthogonale Gruppe*. Bei $V = \mathbb{R}^n$ schreibt man dafür

$$O_n \text{ bzw. } SO_n .$$

SATZ 10.3. Sei V ein euklidischer Vektorraum und sei

$$\varphi : V \longrightarrow V$$

eine lineare Isometrie. Dann besitzt jeder Eigenwert von φ den Betrag 1.

Beweis. Es sei $\varphi(v) = \lambda v$ mit $v \neq 0$, d.h. v ist ein Eigenvektor zum Eigenwert λ . Wegen der Isometrieeigenschaft gilt

$$\|v\| = \|\varphi(v)\| = \|\lambda v\| = |\lambda| \cdot \|v\| .$$

Wegen $\|v\| \neq 0$ folgt daraus $|\lambda| = 1$, also $\lambda = \pm 1$. □

Im Allgemeinen muss es keine Eigenwerte geben (bei ungerader Dimension allerdings schon). Wir besprechen zunächst den zweidimensionalen Fall ausführlicher.

Bewegungen in der Ebene

SATZ 10.4. Sei

$$\varphi : \mathbb{R}^2 \longrightarrow \mathbb{R}^2$$

eine eigentliche lineare Isometrie. Dann ist φ eine Drehung, und ihre Matrix hat die Gestalt

$$D(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} .$$

mit einem eindeutig bestimmten Drehwinkel $\theta \in [0, 2\pi)$.

Beweis. Es seien (x, y) und (u, v) die Bilder der Einheitsvektoren $(1, 0)$ und $(0, 1)$. Unter einer Isometrie wird die Länge eines Vektors erhalten, daher ist

$$\left\| \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \right\| = \sqrt{x^2 + y^2} = 1 .$$

Daher ist x eine reelle Zahl zwischen -1 und $+1$ und $y = \pm\sqrt{1-x^2}$, d.h. (x, y) ist ein Punkt auf dem reellen Einheitskreis. Der Einheitskreis wird

bekanntlich durch die trigonometrischen Funktionen parametrisiert, d.h. es gibt einen eindeutig bestimmten Winkel θ , $0 \leq \theta < 2\pi$, mit

$$(x, y) = (\cos \theta, \sin \theta).$$

Da unter einer Isometrie die Senkrechtsbeziehung erhalten bleibt, muss

$$\left\langle \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \right\rangle = xu + yv = 0$$

gelten. Bei $y = 0$ folgt daraus (wegen $x = \pm 1$) $u = 0$. Dann ist $v = \pm 1$ und wegen der Eigentlichkeit muss das Vorzeichen positiv sein. Sei also $y \neq 0$. Dann gilt

$$\begin{pmatrix} -v \\ u \end{pmatrix} = \frac{u}{y} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}.$$

Da die zwei Vektoren die Länge 1 haben, muss der skalare Faktor u/y den Betrag 1 haben. Bei $u = y$ wäre $v = -x$ und die Determinante wäre -1 . Also muss $u = -y$ und $v = x$ sein, was die Behauptung ergibt. \square

SATZ 10.5. *Sei $G \subset \text{SO}_2$ eine endliche Untergruppe der linearen Bewegungsgruppe der reellen Ebene. Dann ist G eine zyklische Gruppe.*

Beweis. Jedes Element aus G ist nach Satz 10.4 eine Drehung der Ebene um einen bestimmten Winkel θ . Wir betrachten den surjektiven Gruppenhomomorphismus

$$\mathbb{R} \longrightarrow \text{SO}_2, \theta \longmapsto D(\theta),$$

der einen Winkel auf die zugehörige Drehung abbildet. Es sei $H \subseteq \mathbb{R}$ das Urbild von G unter dieser Abbildung, d.h. H besteht aus allen Drehwinkeln zu Drehungen, die zu G gehören. Die Gruppe H wird von einem Repräsentantensystem für die Elemente aus G zusammen mit 2π erzeugt. Insbesondere ist also H eine endlich erzeugte Untergruppe von \mathbb{R} . Da jedes Gruppenelement aus G eine endliche Ordnung besitzt, muss jedes $\theta \in H$ die Gestalt $\theta = 2\pi q$ mit einer rationalen Zahl $q \in \mathbb{Q}$ haben. Dies bedeutet, dass H eine endlich erzeugte Untergruppe von $2\pi\mathbb{Q} \subseteq \mathbb{R}$ ist. Damit ist H isomorph zu einer endlich erzeugten Untergruppe der rationalen Zahlen. Nach Aufgabe 3.9 ist H zyklisch, sagen wir $H = \mathbb{Z}\alpha$ mit einem eindeutig bestimmten Winkel $\alpha \in [0, 2\pi)$. Dann ist die Gruppe G als Bild von H ebenfalls zyklisch. \square

Wenn man auch noch uneigentliche Symmetrien, also Isometrien mit der Determinante -1 (etwa Achsenspiegelungen) zulässt, so gibt es noch eine weitere Familie von endlichen Untergruppen der O_2 , nämlich die Diedergruppen.

DEFINITION 10.6. Zu einem regelmäßigen n -Eck ($n \geq 3$) heißt die Gruppe der eigentlichen oder uneigentlichen linearen Symmetrien die *Diedergruppe* D_n .

Die Diedergruppe besteht aus den Drehungen des n -Ecks und aus den Achsenspiegelungen an den folgenden Achsen durch den Nullpunkt: bei n gerade

die Achsen durch gegenüberliegende Eckpunkte und gegenüberliegende Kantenmittelpunkte, bei n ungerade die Achsen durch einen Eckpunkt und einen gegenüberliegenden Kantenmittelpunkt. In beiden Fällen besteht die Diedergruppe aus $2n$ Elementen.

Bewegungen im Raum

SATZ 10.7. *Sei*

$$\varphi : \mathbb{R}^3 \longrightarrow \mathbb{R}^3$$

eine Isometrie. Dann gibt es einen Eigenvektor zum Eigenwert 1 oder -1 .

Beweis. Das charakteristische Polynom P zu φ ist ein normiertes Polynom vom Grad drei. Für $t \mapsto +\infty$ geht $P(t) \mapsto +\infty$ und für $t \mapsto -\infty$ geht $P(t) \mapsto -\infty$. Nach dem Zwischenwertsatz besitzt daher P mindestens eine Nullstelle. Eine solche Nullstelle ist ein Eigenwert von φ . Nach Satz 10.3 ist der Eigenwert gleich 1 oder gleich -1 . \square

SATZ 10.8. *Eine eigentliche Isometrie*

$$\varphi : \mathbb{R}^3 \longrightarrow \mathbb{R}^3$$

besitzt einen Eigenvektor zum Eigenwert eins, d.h. es gibt eine Gerade (durch den Nullpunkt), die unter φ fest bleibt.

Beweis. Wir betrachten das charakteristische Polynom von φ , also

$$P(\lambda) = \det(\lambda E_3 - \varphi).$$

Dies ist ein normiertes reelles Polynom vom Grad drei. Für $\lambda = 0$ ergibt sich

$$P(0) = \det(-\varphi) = -\det(\varphi) = -1.$$

Da für $\lambda \mapsto \infty$ das Polynom $P(\lambda) \mapsto \infty$ geht, muss es für ein positives λ eine Nullstelle geben. Aufgrund von Satz 10.3 kommt dafür nur $\lambda = 1$ in Frage. \square

LEMMA 10.9. *Sei*

$$\varphi : V \longrightarrow V$$

eine lineare Isometrie und sei $U \subseteq V$ ein invarianter Unterraum. Dann ist auch das orthogonale Komplement U^\perp invariant. Insbesondere kann man φ schreiben als direkte Summe

$$\varphi = \varphi_U \oplus \varphi_{U^\perp},$$

wobei die Einschränkungen φ_U und φ_{U^\perp} ebenfalls Isometrien sind.

Beweis. Es ist

$$U^\perp = \{v \in V \mid \langle v, u \rangle = 0 \text{ für alle } u \in U\}.$$

Für ein solches $v \in U^\perp$ und ein beliebiges $u \in U$ ist

$$\langle \varphi(v), u \rangle = \langle \varphi^{-1}(\varphi(v)), \varphi^{-1}(u) \rangle = \langle v, u' \rangle = 0,$$

da $u' = \varphi^{-1}(u) \in U$ liegt wegen der Invarianz. Also ist wieder $\varphi(v) \in U^\perp$. \square

SATZ 10.10. *Sei*

$$\varphi : \mathbb{R}^3 \longrightarrow \mathbb{R}^3$$

eine eigentliche Isometrie. Dann ist φ eine Drehung um eine feste Achse. Das bedeutet, dass φ in einer geeigneten Orthonormalbasis durch eine Matrix der Form

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

beschrieben wird.

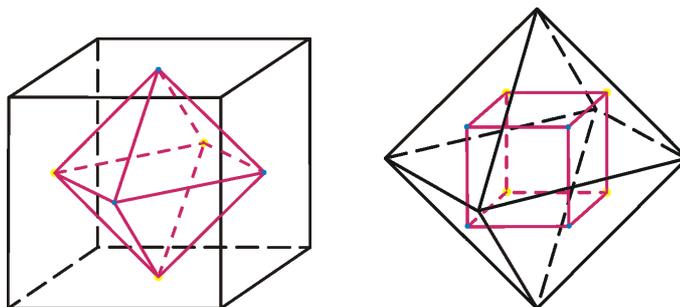
Beweis. Nach Satz 10.8 gibt es einen Eigenvektor u zum Eigenwert 1. Sei $U = \mathbb{R}u$ die davon erzeugte Gerade. Diese ist fix und insbesondere invariant unter φ . Nach Lemma 10.9 ist dann auch das orthogonale Komplement U^\perp invariant unter φ , d.h. es gibt eine lineare Isometrie

$$\varphi_2 : U^\perp \longrightarrow U^\perp,$$

die auf U^\perp mit φ übereinstimmt. Dabei muss φ_2 eigentlich sein, und daher muss nach Satz 10.4 φ_2 eine Drehung sein. Wählt man einen Vektor der Länge eins aus U und dazu eine Orthonormalbasis von U^\perp , so hat φ bzgl. dieser Basis die angegebene Gestalt. \square

Halbachsensysteme

Es sei $G \subseteq \text{SO}_3$ eine endliche Untergruppe der Gruppe der eigentlichen linearen Isometrien. Jedes Element $g \in G$, $g \neq \text{id}$, ist eine Drehung um eine eindeutig bestimmte Drehachse A . Insbesondere sind an einer endlichen Symmetriegruppe nur endlich viele Drehachsen beteiligt. Jedes Gruppenelement bewirkt dann eine Permutation der Drehachsenmenge, und diese Bedingung schränkt die möglichen Gruppen wesentlich ein. Eine Drehachse zerfällt in zwei Halbachsen, und es ist sinnvoll, die Wirkungsweise der Gruppe auf diesen Halbachsen zu untersuchen.



Bei einem Würfel gibt es drei verschiedene Arten von Drehachsen: es gibt drei Drehachsen, die durch die Seitenmittelpunkte gegeben sind, vier Drehachsen, die durch die Eckpunkte gegeben sind und sechs Drehachsen, die durch die Kantenmittelpunkte gegeben sind. Betrachtet man alle *Durchstoßungspunkte* dieser Achsen mit der Sphäre vom Radius eins, so ergeben sich $6 + 8 + 12 = 26$ Punkte. Diese Punkte entsprechen den *Halbachsen*. Dabei gibt es zu je zwei Eckpunkten (bzw. den zugehörigen Durchstoßungspunkten) (mindestens) eine Würfelbewegung, die sie ineinander überführt, ebenso zu je zwei Kantenmittelpunkten und zu je zwei Seitenmittelpunkten. Jede Bewegung permutiert diese charakteristischen Punkte. Wenn man eine Achse (oder einen Durchstoßungspunkt) fixiert, so kann man die Menge der Bewegungen betrachten, die diese Achse als Drehachse haben. Es kann natürlich auch die Achse zwar auf sich selbst abgebildet werden, aber nicht fix sein. Dann werden die gegenüberliegenden Durchstoßungspunkte ineinander überführt.

DEFINITION 10.11. Es sei $G \subseteq \text{SO}_3$ eine endliche Untergruppe der Gruppe der eigentlichen linearen Isometrien im \mathbb{R}^3 . Dann nennt man jede Gerade durch den Nullpunkt, die als Drehachse eines Elementes $g \neq \text{id}$ auftritt, eine *Achse* von G . Die Halbgeraden dieser Drehachsen nennt man die *Halbachsen* der Gruppe und die Gesamtmenge dieser Halbachsen nennen wir das zu G gehörige *Halbachsensystem*. Es wird mit $\mathfrak{H}(G)$ bezeichnet. Zwei Halbachsen $H_1, H_2 \in \mathfrak{H}(G)$ heißen *äquivalent*, wenn es ein $g \in G$ gibt mit $g(H_1) = H_2$. Die Äquivalenzklassen zu dieser Äquivalenzrelation nennt man *Halbachsenklassen*.

Da jede von id verschiedene Drehung genau eine Drehachse hat, ist das Halbachsensystem zu einer endlichen Symmetriegruppe endlich (und zwar ist die Anzahl maximal gleich $2(\text{ord}(G) - 1)$). Wenn H eine Halbachse ist und $g \in G$, so ist auch $g(H)$ eine Halbachse: wenn nämlich $h \in G$ die durch H definierte Achse als Drehachse besitzt, so ist

$$(ghg^{-1})(g(H)) = (gh)((gg^{-1})(H)) = (gh)(H) = g(h(H)) = g(H).$$

Mit „äquivalenten Halbachsen“ ist also wirklich eine Äquivalenzrelation definiert.

BEISPIEL 10.12. Beim Würfel werden die Halbachsen repräsentiert durch die Eckpunkte, die Seitenmittelpunkte und die Kantenmittelpunkte. Diese drei Arten bilden dann auch die Äquivalenzklassen, also die Halbachsenklassen. Der Vergleich mit dem Oktaeder zeigt, dass die Sprechweise mit den Halbachsen für die Bewegungsgruppe als solche angemessener ist als die Sprechweise mit Ecken, Kanten, Mittelpunkten.

BEISPIEL 10.13. Bei einem Tetraeder gibt es vier Eck-Seitenmittelpunkt-Achsen und vier Kantenmittelpunktachsen. Die Kantenmittelpunkthalbachsen sind dabei alle untereinander äquivalent, während die zuerst genannten Achsen in zwei Halbachsenklassen zerfallen, nämlich die Eckhalbachsen und die Seitenhalbachsen.

An diesem Beispiel sieht man auch, dass die beiden durch eine Drehachse gegebenen Halbachsen nicht zueinander äquivalent sein müssen.

Abbildungsverzeichnis

Quelle = Tetrahedron.svg, Autor = Benutzer Cyp auf engl. Wikipedia, Lizenz = CC-by-sa 3.0	1
Quelle = Hexahedron.svg, Autor = Benutzer Cyp auf engl. Wikipedia, Lizenz = CC-by-sa 3.0	1
Quelle = Octahedron.svg, Autor = Benutzer Cyp auf engl. Wikipedia, Lizenz = CC-by-sa 3.0	1
Quelle = POV-Ray-Dodecahedron.svg, Autor = Benutzer Cyp auf engl. Wikipedia, Lizenz = CC-by-sa 3.0	1
Quelle = Icosahedron.svg, Autor = Benutzer Cyp auf engl. Wikipedia, Lizenz = CC-by-sa 3.0	1
Quelle = Duality Hexa-Okta.png, Autor = Benutzer Peter Steinberg auf Commons, Lizenz = CC-by-sa 3.0	6
Quelle = Duality Okto-Hekta.png, Autor = Benutzer Peter Steinberg auf Commons, Lizenz = CC-by-sa 3.0	6