

# Algebra I – Prof. Christian Urech

Mitschrift: Franz Nowak

Herbstsemester 2025

## Vorlesung 1

**Definition 1.** Eine **Gruppe** ist eine Menge  $G$  zusammen mit einer Verknüpfung  $\ast: G \rightarrow G, (g, h) \rightarrow g \ast h$ , sodass:

- (1) (Assoziativität)  $\forall g, h, k \in G: (g \ast h) \ast k = g \ast (h \ast k)$
- (2) (Neutrales Element)  $\exists e \in G: g \ast e = e \ast g = g \quad \forall g \in G$
- (3) (Inverses Element)  $\forall g \in G \exists g^{-1} \in G$  s.d.  $g \ast g^{-1} = g^{-1} \ast g = e$

Eine Gruppe ist **abelsch** (kommutativ), wenn  $\forall g, h \in G, g \ast h = h \ast g$ .

Wir schreiben oft 1 oder  $1_G$  für  $e$  und  $gg'$  für  $g \ast g'$  mit  $g, g' \in G$ . Wenn  $G$  kommutativ ist, dann schreiben wir  $e = 0$  und  $a + b$  für  $a \ast b$ . Des Weiteren sind

$a^n := \overbrace{a \cdots a}^{\text{n-mal}}$  und  $a^0 := 1$ .

**Bemerkung 1.** Wenn  $G$  assoziativ ist, dann ist  $g_1 g_2 \cdots g_n$  eindeutig definiert (für  $g_1, g_2, \dots, g_n \in G$ ).

**Satz 1.** (a) Das neutrale Element ist eindeutig.

(b) Das Inverse von jedem Element ist eindeutig.

*Beweis:* (a) Seien  $e, e' \in G$  neutrale Elemente. Dann ist  $e = ee' = e'$ .

(b) Seien  $\bar{g}, g^{-1}$  Inverse von  $g \in G$ . Dann ist  $\bar{g} = \bar{g}e = \bar{g}gg^{-1} = eg^{-1} = g^{-1}$ . □

**Satz 2.** Seien  $G$  eine Gruppe und  $a, b, c \in G$ , sodass  $ab = ac$ . Dann ist  $b = c$ .

*Beweis:*

$$ab = ac \implies \underbrace{a^{-1}a}_e b = \underbrace{a^{-1}a}_e c \implies b = c$$

□

## Beispiele

- Ganze Zahlen mit Addition,  $(\mathbb{Z}, +)$  oder  $\mathbb{Z}^+$
- Reelle Zahlen mit Addition,  $(\mathbb{R}, +)$  oder  $\mathbb{R}^+$
- Körper  $K$  mit Addition,  $(K, +)$  oder  $K^+$ . (Bemerkung: Keine Gruppe mit Multiplikation, wenn 0 enthalten ist.)
- Vektorraum  $V$  mit Addition,  $(V, +)$  oder  $V^+$ .
- Allgemeine lineare Gruppe,  $GL_n(K)$
- Spezielle lineare Gruppe,  $SL_n(K) := \{A \in GL_n(K) \mid \det A = 1\}$
- Orthogonale Gruppe,  $O_n$
- Unitäre Gruppe,  $U_n$

## Permutationsgruppen

Sei  $\text{Sym}(M)$  die Menge der Bijektionen von einer Menge  $M$  zu sich selbst, zusammen mit der Verknüpfung von Abbildungen. Die **symmetrische Gruppe**  $S_n := \text{Sym}(\{1, 2, \dots, n\})$  ist eine Gruppe mit  $n!$  Elementen.

**Bemerkung 2.** Jedes Element in  $S_n$  ist ein Produkt von Transpositionen.

**Erinnerung:** Eine **Transposition** ist eine Permutation, die genau zwei Elemente vertauscht und die übrigen gleich lässt.

**Beispiel 1.**  $S_3$ , die Gruppe der Permutationen von  $\{1, 2, 3\}$ . Seien  $\sigma, \tau \in S_3$ ,

$$\sigma: \begin{cases} 1 \rightarrow 2 \\ 2 \rightarrow 1 \\ 3 \rightarrow 3 \end{cases} \quad \tau: \begin{cases} 1 \rightarrow 2 \\ 2 \rightarrow 3 \\ 3 \rightarrow 1 \end{cases}$$

Dann sind  $\sigma^2 = \text{id}$  und  $\tau^3 = \text{id}$ .

$$\left. \begin{array}{l} \sigma\tau(1) = 1 \\ \tau\sigma(1) = 3 \end{array} \right\} \rightarrow \sigma\tau \neq \tau\sigma$$

D.h.  $S_3$  ist nicht abelsch.

## Untergruppen

**Definition 2.** Sei  $G$  eine Gruppe. Eine **Untergruppe**  $H \leq G$  ist eine Teilmenge  $H \subseteq G$  sodass

- (a)  $\forall a, b \in H, ab \in H$
- (b)  $1_G \in H$
- (c)  $\forall a \in H, a^{-1} \in H$

**Bemerkung 3.** Jede Untergruppe ist eine Gruppe  $(H, *_{\mathcal{H}})$ .  $*_G$  induziert  $*_{\mathcal{H}}$ .

**Bemerkung 4.**  $H \subseteq G$  mit  $H \neq \{\emptyset\}$  ist eine Untergruppe von  $G$  genau wenn  $\forall a, b \in H, ab^{-1} \in H$ .

*Beweis:* " $\Rightarrow$ ": klar.

" $\Leftarrow$ ": Bedingung: Seien  $a, b \in H$ .

- (a)  $\Rightarrow b^{-1} \in H$   
 $\Rightarrow ab = a(b^{-1})^{-1} \in H$
- (b)  $\Rightarrow aa^{-1} \in H, \text{ d.h. } 1_G \in H$
- (c)  $\Rightarrow 1_G a^{-1} \in H \text{ d.h. } a^{-1} \in H$

□

**Bemerkung 5.** Jede Gruppe  $G$  hat als Untergruppen immer  $\{1\}$  (die triviale Untergruppe) und  $G$  selbst. Andere Untergruppen heissen **echte** Untergruppen.

### Beispiele

- $SL_n(K) \leq GL_n(K)$
- $n\mathbb{Z} \leq \mathbb{Z} \quad \forall n \in \mathbb{Z}$
- Sei  $S^1 := \{c \in \mathbb{C}^* \mid |c| = 1\}$ .  $S^1 \leq \mathbb{C}^*$ . ( $\mathbb{C}^* := (\mathbb{C} \setminus \{0\}, \cdot)$ )
- $B_n(K) := \{A \in GL_n(K) \mid \text{Aobere Dreiecksmatrix}\}$ .  $B_n \leq GL_n(K)$ .
- $O_n \leq GL_n(\mathbb{R})$
- Die alternierende Gruppe  $A_n \leq S_n$  ist die Untergruppe aller Permutationen, die das Produkt einer geraden Anzahl von Transpositionen sind.

**Bemerkung 6.** Seien  $G$  eine Gruppe und  $a \in G$ . Dann ist

$$\langle a \rangle := \{\dots, a^{-2}, a^{-1}, a^0, a, a^2, \dots\}$$

eine Untergruppe von  $G$ , genannt die von  $a$  erzeugte **zyklische Gruppe**.

**Bemerkung 7.**  $\langle a \rangle$  ist abelsch:  $a^m a^n = a^{m+n} = a^{n+m} = a^n a^m$

**Lemma 1.** Sei  $X \subseteq \mathbb{Z}$  die Menge der Zahlen  $n$ , sodass  $a^n = 1$ . Dann ist  $X = m\mathbb{Z}$  für ein  $m \in \mathbb{Z}$ .

*Beweis:*  $X$  ist eine Untergruppe von  $\mathbb{Z}$ :

- (a) Seien  $m, n \in X$ , dann ist  $a^{m+n} = a^m a^n = 1_G \Rightarrow m+n \in X$
- (b)  $a^0 = 1_G \Rightarrow 0 \in X$
- (c)  $n \in X \Rightarrow a^{-n} = a^n a^{-n} = 1_G \Rightarrow -n \in X$

Gemäss Übung ist  $X$  von der Form  $m\mathbb{Z}$  für ein  $m \in \mathbb{Z}$ . □

Falls  $m \neq 0$ :

Für  $n \in \mathbb{Z}$  schreibe  $n = km + r$  für ein  $k \in \mathbb{Z}$  s.d.  $0 \leq r < m$ . Dann ist  $a^n = a^{km+r} = a^{km}a^r = a^r$ .  $\implies \langle a \rangle = \{1, a, \dots, a^{m-1}\}$  und all diese Elemente sind verschieden. (Falls  $a^r = a^{r'} \implies a^{r-r'} = 1 \implies r - r' \in m\mathbb{Z} \implies r = r' \quad 0 \leq r, r' < m$ )

Falls  $m = 0$ :

Dann ist  $\langle a \rangle = \{\dots, a^{-2}, a^{-1}, 1, a, a^2, \dots\}$  und alle Partitionen sind verschieden.

## Vorlesung 2

**Definition 3.** Die **Ordnung**  $|G|$  einer Gruppe  $G$  ist die Anzahl der Elemente in  $G$  (kann  $\infty$  sein). Die **Ordnung des Elements**  $a \in G$  ist  $|\langle a \rangle|$ , wobei  $\langle a \rangle = \{1, a, \dots, a^{m-1}\}$  mit  $m > 0$  die kleinste Zahl s.d.  $a^m = 1$ .

**Beispiele**

- $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \in GL_2(\mathbb{R})$  hat Ordnung 6.
- $B = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \in GL_2(\mathbb{R})$  hat Ordnung  $\infty$ .

## Homomorphismen

**Definition 4.** Seien  $G, G'$  zwei Gruppen. Ein **Homomorphismus** ist eine Abbildung  $\phi: G \rightarrow G'$  s.d.  $\phi(ab) = \phi(a)\phi(b) \quad \forall a, b \in G$ .

**Definition 5.** Ein **Isomorphismus** ist ein bijektiver Homomorphismus.

**Beispiele**

- $\det: GL_n(K) \rightarrow K^*$
- signum - sign:  $S_n \rightarrow \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ ,  

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 0 & \text{gerade Anzahl von Transpositionen} \\ 1 & \text{ungerade Anzahl von Transpositionen} \end{cases}$$
- Fixiere  $a \in G$ .  $\phi: \mathbb{Z} \rightarrow G$ ,  $\phi(n) = a^n$ .  $\phi$  ist injektiv  $\Leftrightarrow \text{Ord}(a) = \infty$ .
- $H \leq G$ , die Inklusion  $\iota: H \rightarrow G$ ,  $\iota(x) = x$ .

**Satz 3.**

- (1) Falls  $\phi: G \rightarrow G'$  und  $\psi: G' \rightarrow G''$  Homomorphismen sind, so auch  $\psi \circ \phi: G \rightarrow G''$ .

(2) Falls  $\phi: G \rightarrow G'$  ein Isomorphismus ist, so auch  $\phi^{-1}: G' \rightarrow G$ .

*Beweis:* (1)  $\psi \circ \phi(ab) = \psi(\phi(a)\phi(b)) = \psi \circ \phi(a)\psi \circ \phi(b)$

(2) zu zeigen:  $\phi^{-1}$  ist ein Homomorphismus.

Seien  $a', b' \in G'$ . Dann gibt es  $a, b \in G$  s.d.  $\phi(a) = a', \phi(b) = b'$

Es gilt  $\phi(ab) = \phi(a)\phi(b) = a'b' \implies \phi^{-1}(a'b') = \phi^{-1}(a')\phi^{-1}(b')$

□

**Bemerkung 8.** Zwei zyklische Gruppen gleicher Ordnung sind immer isomorph.

*Beweis:* Seien  $G = \langle a \rangle, G' = \langle b \rangle$  und  $\phi: G \rightarrow G', \phi(a^n) \mapsto b^n$ .

Falls  $|G| = |G'|$  endlich ist, so ist  $G = \{1, a, \dots, a^{m-1}\}, G' = \{1, b, \dots, b^{m-1}\}$ . Somit ist  $\phi$  wohldefiniert, bijektiv und ein Homomorphismus.

Falls  $|G| = |G'| = \infty$ , so ist  $\phi$  wohldefiniert, bijektiv und ein Homomorphismus.

□

Wir schreiben  $C_n$  für die zyklische Gruppe der Ordnung  $n$ .

**Satz 4.** Sei  $\phi: G \rightarrow G'$  ein Homomorphismus. Dann sind  $\phi(1_G) = 1_{G'}$  und  $\phi(a^{-1}) = \phi(a)^{-1} \forall a \in G$

*Beweis:*

$$\begin{aligned} 1_G &= 1_G 1_G \\ \implies \phi(1_G) &= \phi(1_G 1_G) = \phi(1_G)\phi(1_G) \\ &\stackrel{\text{kürzen}}{\implies} 1_{G'} = \phi(1_G) \end{aligned}$$

Ausserdem:

$$\begin{aligned} \phi(a^{-1}\phi(a)) &= \phi(a^{-1}a) = \phi(1_G) = 1_{G'} \\ \implies \phi(a^{-1}) &= \phi(a)^{-1} \end{aligned}$$

□

**Definition 6.** Ein **Automorphismus** ist ein Isomorphismus  $\phi: G \rightarrow G$  von einer Gruppe  $G$  zu sich selbst.

**Beispiel 2.** Für  $f \in G$  definiere  $\phi: G \rightarrow G, \phi(g) := fgf^{-1}$  ( $fgf^{-1}$  ist das Konjugierte von  $g$  unter  $f$ ).  $\phi$  ist ein Automorphismus.

*Beweis:* Homomorphismus:  $\phi(gh) = fghf^{-1} = fg(f^{-1}f)hf^{-1} = \phi(g)\phi(h)$ .  
Bijektiv:  $\phi^{-1}(g) = f^{-1}gf$

□

**Definition 7.** Für einen Homomorphismus  $\phi: G \rightarrow G'$  definiere:

Bild  $\phi := \{x \in G' \mid x = \phi(a) \text{ für ein } a \in G\}$

Kern  $\phi := \{a \in G \mid \phi(a) = 1\}$

Übung: Zeige, dass beides Untergruppen von  $G'$  bzw.  $G$  sind.

### Beispiele

- $\det: GL_n(K) \rightarrow K^*$ , Kern  $\det = SL_n(K)$
- $\text{sign} S_n \rightarrow C_2$ , Kern  $\text{sign} = A_n$

**Bemerkung 9.** Seien  $\phi: G \rightarrow G'$  ein Homomorphismus und  $a \in \text{Kern } \phi$  und  $b \in G$ . Dann ist

$$\begin{aligned} \phi(bab^{-1}) &= \phi(b)\phi(a)\phi(b)^{-1} = 1 \\ \implies bab^{-1} &\in \text{Kern } \phi \end{aligned}$$

**Definition 8.** Eine Untergruppe  $N \leq G$  heisst **Normalteiler**, falls  $a \in N$  und  $\forall b \in G \quad bab^{-1} \in N$ .

$\xRightarrow{\text{Bem. 9}}$  Kern  $\phi$  ist immer ein Normalteiler.

## Vorlesung 3

**Erinnerung:** Eine Untergruppe  $N \leq G$  ist ein Normalteiler, falls:

$$\forall a \in N, \forall b \in G : bab^{-1} \in N$$

. Clicker Frage zu Normalteilern  $\trianglelefteq$ :

1.  $B_n(K) \leq GL_n(K)$  ist kein Normalteiler.
2.  $Z^+ \trianglelefteq R^+$  ist Normalteiler (weil  $R^+$  abelsch)
3.  $SL_n(K) \trianglelefteq GL_n(K)$ , weil  $\det(ABA^{-1}) = \det(A)\det(B)\det(A)^{-1} = \det(B)$ ,  
oder bemerke, dass  $SL_n(K) = \text{Kern } \det$
4.  $A_n \trianglelefteq S_n$  weil  $A_n = \text{Kern } \text{sign}$ .

### Partitionen

Sei  $\phi: G \rightarrow G'$  ein Homomorphismus. Für jedes Element  $h \in H$  betrachte die **Faser**  $\phi^{-1}(h) = \{g \in G \mid \phi(g) = h\}$  (Urbild von  $G$  in  $H$ ). Die Fasern bilden eine Partition von  $G$ .

**Beispiel 3.** Sei  $\phi: \mathbb{C}^* \rightarrow \mathbb{R}_{>0}^*$ ,  $\phi(z) \mapsto |z|$ . Allgemein:  $\phi^{-1} = \text{Kern } \phi$ .

**Satz 5.** Sei  $U: G \rightarrow G'$  ein Homomorphismus mit Kern  $N$ . Für  $a, b \in G$  gilt  $\phi(a) = \phi(b) \Leftrightarrow \exists n' \in N \text{ s.d. } b = an', \text{ d.h. } a^{-1}b \in N$ .

*Beweis:* “ $\Rightarrow$ ”: Falls  $\phi(a) = \phi(b)$ , dann ist  $U(a)^{-1}\phi(b) = \phi(a^{-1}b) = 1$ , d.h.  $\exists n \in N$ , s.d.  $a^{-1}b = n \implies b = an$ .

“ $\Leftarrow$ ” Falls  $b = an$  für  $n \in N$ , dann ist  $\phi(b) = \phi(a)\phi(n) = \phi(a)$ .  $\square$

Aus dem Satz folgt, dass die Fasern von  $\phi$  alle von der folgenden Form sind:

$$aN = \{g \in G \mid g = an \text{ für ein } n \in N\}$$

**Korollar 1.** Ein Homomorphismus  $\phi: G \rightarrow G'$  ist injektiv  $\Leftrightarrow \text{Kern } \phi = \{1\}$ .

*Beweis:* “ $\Rightarrow$ ” klar.

“ $\Leftarrow$ ” Man nehme an, dass der Kern  $\phi = \{1\}$ .  $\phi(a) = \phi(b) \Leftrightarrow a^{-1}b \in \text{Kern } \phi$ , d.h.  $a^{-1}b = 1 \implies a = b$ .  $\square$

## Nebenklassen

**Erinnerung:** Sei  $X$  eine Menge. Eine **Äquivalenzrelation** auf  $X$  ist eine binäre Relation  $\sim$  so dass:

- i) (Transitivität) Falls  $a \sim b$  und  $b \sim c$ , dann ist  $a \sim c$ .
- ii) (Symmetrie) Falls  $a \sim b$ , so ist  $b \sim a$ .
- iii) (Reflexivität)  $a \sim a$  für alle  $a \in X$ .

**Gesehen:** Jede Äquivalenzrelation definiert eine Partition von  $X$ . Diese besteht aus den **Äquivalenzklassen**, d.h. Teilmengen von der Form  $[a] := \{b \in X \mid b \sim a\}$ .

Sei  $\overline{X}$  die Menge der Äquivalenzklassen. Dann erhalten wir eine surjektive Abbildung  $\pi: X \rightarrow \overline{X}$ ,  $\pi(a) := [a]$ . Dann ist  $\pi^{-1}([a]) = \{b \in X \mid b \sim a\}$ .

**Gesehen:** “Rechnen modulo  $m$ ”.  $\mathbb{Z}$  mit Äquivalenzrelation  $\equiv$ , wobei  $a \equiv b$  falls  $a - b \in m\mathbb{Z}$ .

Menge der Äquivalenzklassen:  $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$ .  $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z} = \{[0], [1], \dots, [m-1]\}$ .

Außerdem können wir die Klassen in  $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$  miteinander addieren, so dass  $[a + b] = [a] + [b]$ .

$\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$  mit Addition ist somit eine Gruppe, und die Quotientenabbildung  $\pi: \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$ ,  $\pi(n) := [n]$  ist ein Homomorphismus.

**Definition 9.** Sei  $H \leq G$  eine Untergruppe. Eine **Linksnebenklasse** von  $H$  ist eine Teilmenge von der Form  $aH = \{ah \mid h \in H\}$  für ein  $a \in G$ .

**Beispiel 4.**  $m\mathbb{Z}^+ \leq \mathbb{Z}^+$ . Dann sind die Linksnebenklassen  $m\mathbb{Z}$  die Teilmengen von der Form  $0 + m\mathbb{Z}, 1 + m\mathbb{Z}, \dots, (m-1) + m\mathbb{Z}$ .

Wir schreiben  $a \equiv b$ , falls ein  $h \in H$  existiert, so dass  $b = ah$ , d.h. falls  $b \in aH$ .

**Satz 6.** Die Relation " $\equiv$ " ist eine Äquivalenzrelation.

*Beweis:* 1. Falls  $a \equiv b$  und  $b \equiv a \implies \exists h, h' \in H$ , so dass  $b = ah$  und  $c = bh' \implies c = a \underbrace{hh'}_{\in H} \implies c \equiv a$ .

2. falls  $a \equiv b$ , so  $\exists h \in H$  s.d.  $b = ah \implies a = b \underbrace{h^{-1}}_{\in H} \implies b \equiv a$ .

3.  $a = a \cdot 1$  und  $1 \in H \implies a \equiv a$ .

$\phi: X \rightarrow Y$  Abbildung  $\phi^{-1}(y) = \{x \in X \mid \phi(x) = y\}$  für  $y \in Y$ . □

**Korollar 2.** Die Linksnebenklassen bilden eine Partition von  $G$ .

*Beweis:*  $aH = bH \Leftrightarrow a \equiv b$ . □

**Definition 10.** Die Anzahl der Linksnebenklassen von  $H$  in  $G$  ist der sogenannte **Index von  $H$  in  $G$** . Wir schreiben  $[G : H]$  für den Index. ( $[G : H]$  kann  $\infty$  sein.)

**Beispiel 5.**  $m \geq 1$ ,  $[\mathbb{Z} : m\mathbb{Z}] = m$ .

**Satz 7.** Sei  $G$  eine endliche Gruppe und  $H \leq G$ . Dann ist  $|G| = |H|[G : H]$ .

*Beweis:* Die Abbildung  $\phi: H \rightarrow aH$ ,  $\phi(h) = ah$ .

$\phi$  ist eine Bijektion.  $\implies |H| = |aH|$ .

Die Linksnebenklassen bilden eine Partition von  $G$ .  $\implies |G| = |H|[G : H]$  □

Daraus folgt direkt:

**Korollar 3** (Satz von Lagrange). Seien  $G$  eine Gruppe und  $H \leq G$  eine Untergruppe. Dann ist  $|H|$  ein Teiler von  $|G|$ .

**Bemerkung 10.** Falls  $a \in G$ , dann folgt mit Lagrange, dass  $|\langle a \rangle| \mid |G|$ , d.h.  $\text{Ord}(a)$  teilt die Ordnung von  $G$ .

**Korollar 4.** Sei  $G$  eine Gruppe, s.d.  $|G|$  prim ist. Sei  $a \in G, a \neq 1$ , dann ist  $G = \langle a \rangle$ .

*Beweis:*  $\text{ord } a \mid p$ , da  $\text{ord } a > 1$  ist,  $\text{ord } a = p$ , d.h.  $|\langle a \rangle| = p \implies \langle a \rangle = G$ . □

**Korollar 5.** Seien  $G, G'$  endliche Gruppen und  $\phi: G \rightarrow G'$  ein Homomorphismus. Dann gilt:

$$|G| = |\text{Kern } \phi| \cdot |\text{Bild } \phi|$$



*Beweis:* Gesehen: Die Linksnebenklassen von  $\text{Kern } \phi$  sind die Fasern von  $\phi$ .

$$\implies |\text{Bild } \phi| = [G : \text{Kern } \phi]$$

$$\implies |G| = |\text{Kern } \phi| \cdot [G : \text{Kern } \phi]$$

$$= |\text{Kern } \phi| \cdot |\text{Bild } \phi|$$

□

**Definition 11.** Sei  $G$  eine Gruppe und  $H \leq G$ . Die **Rechtsnebenklassen** von  $H$  in  $G$  sind die Mengen  $Ha := \{ha \mid h \in H\}$ .

Definiere  $a \equiv_R b$ , falls es ein  $h \in H$  gibt, so dass  $b = ha$ .

Dies definiert eine Äquivalenzrelation auf  $G$  und die Rechtsnebenklassen sind die Äquivalenzklassen bezüglich dieser Relation.  $\sim$  Partition von  $G$ .

**Satz 8.** Eine Untergruppe  $H \leq G$  ist ein Normalteiler  $\Leftrightarrow$  jede Linksnebenklasse ist auch eine Rechtsnebenklasse. In diesem Fall ist  $aH = Ha$ .

*Beweis:* " $\Rightarrow$ "  $H$  Normalteiler. Sei  $h \in H$  und  $a \in G$ .

$$\implies ah = \underbrace{(aha^{-1})}_{=: k \in H} a = ka$$

$$\implies aH \subseteq Ha$$

Analog zeigt man  $Ha \subseteq aH$ .  $\implies aH = Ha$ .

" $\Leftarrow$ " Man nehme an,  $H$  ist kein Normalteiler.

$$\implies \exists h \in H, g \in G \text{ s.d. } aha^{-1} \notin H, \text{ d.h. es gibt kein } h' \in H \text{ s.d. } ah = h'a.$$

$$\implies ah \in aH, \text{ aber } ah \notin Ha, \text{ d.h. } aH \neq Ha.$$

Gleichzeitig ist  $a \in aH \cap Ha \neq \emptyset$

$\implies aH$  ist in keiner anderen Rechtsnebenklasse enthalten. D.h. Rechts- und Linksnebenklassen definieren zwei verschiedene Partitionen. □

## Vorlesung 4

Clicker Frage zu Homomorphismen  $\phi: G \rightarrow G'$ :

- Gesehen in Übung:  $\text{Bild } \phi \leq G'$ .
- Dann folgt mit Kor. 3:  $|\text{Bild } \phi| \mid |G'|$
- Und mit Kor. 5:  $|\text{Bild } \phi| \mid |G|$ .

Seien  $G$  eine Gruppe und  $H \leq G \rightsquigarrow G/H$  Linksnebenklassen von  $H$  in  $G$ . Können wir auf  $G/H$  eine Gruppenstruktur definieren, so dass die Abbildung  $\pi: G \rightarrow G/H, \pi(g) = gH$  ein Gruppenhomomorphismus ist?

Ja, wenn  $H \trianglelefteq G$  (siehe Übung).

## Faktorgruppen

**Lemma 2.** Seien  $G$  eine Gruppe und  $X$  eine Menge mit einer Verknüpfung. Sei  $\phi: G \rightarrow X$  eine surjektive Abbildung, so dass  $\phi(ab) = \phi(a)\phi(b) \quad \forall a, b \in G$ . Dann ist  $X$  eine Gruppe.

*Beweis:* (i) Seien  $u, v, w \in X$ .  $\exists a, b, c \in G$  s.d.  $\phi(a) = u, \phi(b) = v, \phi(c) = w$ .  
Dann ist

$$\begin{aligned} u(vw) &= \phi(a)(\phi(b)\phi(c)) = \phi(a)\phi(bc) \\ &= \phi(abc) = \phi(ab)\phi(c) \\ &= (\phi(a)\phi(b))\phi(c) = (uv)w \end{aligned}$$

$\rightsquigarrow$  Assoziativität der Verknüpfung auf  $X$ .

(ii) Sei  $e := \phi(1)$  und  $u \in X$ . Dann

$$\exists u \in G, \text{ s.d. } u = \phi(a) \implies eu = \phi(1)\phi(a) = \phi(1a) = \phi(a) = u.$$

Analog:  $ue = u$ .  $\rightsquigarrow e$  ist ein neutrales Element.

(iii) Sei  $u \in X \implies \exists a \in G$  s.d.  $u = \phi(a)$ . Sei  $u' := \phi(a^{-1})$ . Dann ist

$$u'u = \phi(a^{-1})\phi(a) = \phi(a^{-1}a) = \phi(1) = e.$$

Analog:  $uu' = e$ .  $\rightsquigarrow$  es existieren Inverse.

□

Notation: Seien  $G$  eine Gruppe,  $A, B \subseteq G$ . Dann definieren wir

$$AB := \{ab \mid a \in A, b \in B\} \subseteq G.$$

**Lemma 3.** Seien  $G$  eine Gruppe,  $N \trianglelefteq G$  ein Normalteiler und  $a, b \in G$ . Dann ist  $(aN)(bN) = abN$ . Das Produkt von zwei Nebenklassen ist also wieder eine Nebenklasse.

*Beweis:* In Vorlesung 3 gesehen:

$$Nb = bN \quad \forall b \in G$$

Da  $N$  eine Untergruppe ist, ist  $NN = N$  (Übung).

$$\implies (aN)(bN) = a(Nb)N = a(bN)N = abNN = abN.$$

□

Wir erhalten also eine Verknüpfung auf die Nebenklassen. Falls  $K_1, K_2 \in G/N$ : Sei  $a \in K_1, b \in K_2$ .  $\implies K_1 = aN, K_2 = bN$ . Dann ist  $K_1K_2 = abN$  (gemäss Lemma), d.h.  $K_1K_2$  ist die Nebenklasse, die das Element  $ab$  enthält.

**Satz 9.** Seien  $G$  eine Gruppe und  $N \trianglelefteq G$ . Mit dieser Verknüpfung bildet  $G/N =: \overline{G}$  eine Gruppe und die Abbildung  $\pi: G \rightarrow G/N = \overline{G} \quad a \mapsto aN =: \overline{a}$  ist ein Homomorphismus.

*Beweis:* Bereits beobachtet:  $\pi(a)\pi(b) = (aN)(bN) = abN = \pi(ab)$ .

Aus Lem. 2 folgt, dass  $\overline{G} = G/N$  eine Gruppe ist und daher  $\pi$  ein Homomorphismus ist.  $\square$

**Korollar 6.** Jeder Normalteiler  $N \leq G$  ist Kern von einem Homomorphismus. Nämlich vom Homomorphismus  $\pi: G \rightarrow G/N$ .

*Beweis:* Das neutrale Element von  $G/N$  ist  $N$ .  $\rightsquigarrow \text{Kern } \pi = N$   $\square$

**Satz 10** (erster Isomorphiesatz). Sei  $\phi: G \rightarrow G'$  ein surjektiver Homomorphismus und  $N := \text{Kern } \phi$ . Dann ist die Gruppe  $G/N$  isomorph zur Gruppe  $G'$  unter dem Homomorphismus  $\overline{\phi}: G/N \rightarrow G' \quad \overline{a} = aN \mapsto \phi(a)$

*Beweis:* 1.  $\overline{\phi}$  ist wohldefiniert:  $\phi(an) = \phi(a)\phi(n) = \phi(a)$ , d.h.  $\overline{\phi}(aN)$  hängt nicht von der Wahl des Repräsentanten ab.

2.  $\overline{\phi}$  ist ein Homomorphismus:

$$\begin{aligned} \overline{\phi}((aN)(bN)) &= \overline{\phi}(abN) \\ &= \phi(ab) = \phi(a)\phi(b) \\ &= \overline{\phi}(aN)\overline{\phi}(bN) \end{aligned}$$

3.  $\overline{\phi}$  ist bijektiv:  $\overline{\phi}$  ist surjektiv, da  $\phi$  surjektiv ist.  $\overline{\phi}$  ist injektiv, da  $\text{Kern } \overline{\phi} = \{N\}$  und  $N$  ist das neutrale Element in  $G/N$ .  $\implies \overline{\phi}$  ist injektiv.  $\square$

**Definition 12.** Seien  $G, G'$  Gruppen, dann ist  $G \times G'$  eine Gruppe mit der Verknüpfung  $(a, a')(b, b') = (ab, a'b')$ . Neutrales Element:  $(1_G, 1_{G'})$ . Inverses Element:  $(a, a')^{-1} = (a^{-1}, a'^{-1})$ . Es heisst das **direkte Produkt** von  $G$  und  $G'$ .

## Vorlesung 5

Clicker Frage: Sei  $S^1 \leq \mathbb{C}^*$  die Untergruppe der komplexen Zahlen bestehend aus den Elementen mit Betrag 1. Dann ist der Quotient  $\mathbb{C}^*/S^1$  isomorph zu  $\mathbb{R}_{>0}^*$ . (Wahr)

Begründung: Die Abbildung  $\phi: \mathbb{C}^* \rightarrow \mathbb{R}_{>0}^*$ ,  $z \mapsto |z|$  ist ein surjektiver Homomorphismus.  $\text{Kern } \phi = S^1 \stackrel{\text{Isosatz}}{\xrightarrow{1.}} \mathbb{C}^*/S^1 \simeq \mathbb{R}_{>0}^*$

Clicker Frage: Sei  $G$  eine Gruppe und  $H_1, H_2 \leq G$  Untergruppen. Dann ist  $H_1 \cup H_2$  eine Untergruppe von  $G$ . (Wahr)

Begründung:

$$\begin{aligned} 1 &\in H_1 \cup H_2 \\ a, b \in H_1 \cup H_2 &\implies ab \in H_1 \cup H_2 \\ a^{-1} &\in H_1 \cup H_2 \end{aligned}$$

AllgemeinL Falls  $H_i \leq G, i \in I$  eine Familie von Untergruppen ist, so ist  $\cup_{i \in I} H_i \leq G$  eine Untergruppe (selber Beweis).

**Definition 13.** Sei  $S \subseteq G$  eine Teilmenge. Dann ist  $\langle S \rangle := \cup_{H \leq G, S \subseteq H} H$  die **von  $S$  erzeugte Untergruppe**.

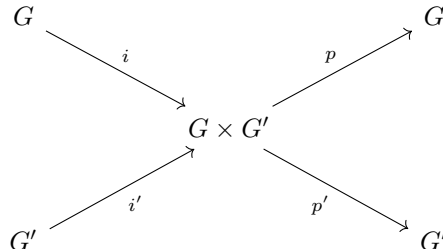
**Erinnerung:**  $G, G'$  Gruppen  $\rightsquigarrow G \times G'$  ist Gruppe mit Verknüpfung  $(a, a')(b, b') = (ab, a'b')$ .

**Bsp:** Kleinsche Vierergruppe (die "Maträtzengruppe").

$$C_2 \times C_2 = \{(1, 1), (1, -1), (-1, 1), (-1, -1)\}$$

**Bsp:**  $m, n > 0$  s.d.  $\text{ggT}(m, n) = 1$  dann ist  $C_{mn} \simeq C_m \times C_n$

Wir haben vier Homomorphismen:



$$\begin{aligned} i(x) &= (x, 1) \\ i'(x) &= (1, x') \\ p(x, x') &= x \\ p'(x, x') &= x' \end{aligned}$$

**Bemerkung 11.**  $i, i'$  sind injektiv, d.h.

$$\begin{aligned} G \times 1 &= \text{Bild } i \simeq G \\ 1 \times G' &= \text{Bild } i' \simeq G' \end{aligned}$$

$p$  und  $p'$  sind surjektiv

$$\text{Kern } p = 1 \times G', \text{ Kern } p' = G \times 1$$

Sei  $H$  eine Gruppe und  $\phi: H \rightarrow G, \phi': H \rightarrow G'$  Homomorphismen. Dann ist  $\Phi: H \rightarrow G \times G' \quad \Phi(h) = (\phi(h), \phi'(h))$  ein Homomorphismus.

Umgekehrt ist jeder Homomorphismus  $\Phi: H \rightarrow G \times G'$  von dieser Form mit  $\phi = \Phi \circ p$  und  $\phi' = \Phi \circ p'$ .

**Bemerkung 12.**  $\Phi(h) = (1, 1) \Leftrightarrow \phi(h) = 1$  und  $\phi'(h) = 1$  d.h.  $\text{Kern } \Phi = \text{Kern } \phi \cup \text{Kern } \phi'$ .

Seien  $H, K \leq G$ . Betrachte  $HK = \{hk \mid h \in H, k \in K\}$ . Wann ist  $HK$  eine Untergruppe? Wann ist  $\pi: H \times K \rightarrow G \quad \pi(h, k) = hk$  ein Homomorphismus?

**Satz 11.** (a) Ist  $H \cup K = \{1\}$ , so ist  $\pi$  injektiv.

(b) Ist  $H$  oder  $K$  ein Normalteiler, so ist  $HK = KH$  und  $HK$  ist eine Untergruppe von  $G$ .

(c) Sind  $H$  und  $K$  Normalteiler und gilt  $H \cup K = \{1\}$  und  $HK = G$  so ist  $\pi: H \times K \rightarrow G$  ein Isomorphismus.

*Beweis:* (a) Seien  $(h_1, k_1), (h_2, k_2) \in H \times K$  s.d.  $h_1 k_1 = h_2 k_2$ .

$$\begin{aligned} \implies \underbrace{k_1 k_2^{-1}}_{\in K} &= \underbrace{h_1^{-1} h_2}_{\in H} \stackrel{H \cup K = \{1\}}{=} 1 \\ \implies k_1 &= k_2 \text{ und } h_1 = h_2 \\ \implies \pi &\text{ ist injektiv.} \end{aligned}$$

(b) oBdA.  $H$  ist Normalteiler. Seien  $h \in H, k \in K$ .

$$\begin{aligned} \implies kh &= \underbrace{(khk^{-1})}_{\in H} k \in HK \\ \implies KH &\subset HK \end{aligned}$$

Analog:  $HK \subset KH \implies KH = HK$ . Z.z:  $HK$  ist Untergruppe.

(i) Seien  $hk, h'k' \in HK$ .

$$\begin{aligned} \implies (hk)(h'k') &= h \underbrace{(kh')}_{\in KH=HK} k' \\ &= h(h''k'')k' \\ &= (hh'')(k''k') \in HK \end{aligned}$$

(ii)  $1 \in HK$

(iii)  $hk \in HK \implies (hk) = k^{-1}h^{-1} \in kh = HK$

(c) Seien  $h \in H, k \in K$

$$\implies \underbrace{\underbrace{(hkh^{-1})}_{\in K}}_{\in K} k^{-1} = h \underbrace{\underbrace{(kh^{-1}k^{-1})}_{\in H}}_{\in H}$$

$$\implies hkh^{-1}k^{-1} = 1$$

$$\implies hk = kh$$

$$\implies \pi(h_1, k_1)\pi(h_2, k_2) = h_1k_1h_2k_2 = h)1h_2k_1k_2 = \pi((h_1, k_1)(h_2, k_2))$$

$\implies \pi$  ist Homomorphismus. Gemäss (a) ist  $\pi$  injektiv. Da  $HK = G$  ist  $\pi$  surjektiv  $\implies \pi$  ist Isomorphismus.

□

### Beispiele

- Gruppen von der Ordnung 1: nur  $\{1\}$
- Gruppen von der Ordnung 2: nur  $C_2$
- Gruppen von der Ordnung 3: nur  $C_3$
- Gruppen von der Ordnung 4:  $C_4, C_2 \times C_2$  (s. Übung).
- Gruppen von der Ordnung 5:  $C_5$

**Behauptung 1.** Die einzigen Gruppen von Ordnung 6 sind  $C_6$  und  $S_3$  (bis auf Isomorphie).

*Beweis:* Sei  $G$  eine Gruppe mit  $|G| = 6$ . Falls  $G$  ein Element der Ordnung 6 enthält, so ist  $G \simeq C_6$ . Ansonsten 3 mögliche Fälle:

- (a) Alle  $g \in G, g \neq 1$  haben Ordnung 2
- (b) Alle  $g \in G, g \neq 1$  haben Ordnung 3
- (c) Es gibt  $g \in G$  von Ordnung 2 und  $h \in G$  von Ordnung 3.

Falls (a), so ist  $G$  abelsch. Sei  $g \in G$

$$\begin{aligned} \implies \langle g \rangle &= \{1, g\} \trianglelefteq G \\ \implies |G/\langle g \rangle| &= 3 \\ \implies G/\langle g \rangle &\simeq C_3 \end{aligned}$$

$\pi: G \rightarrow G/\langle g \rangle$  Quotient

$\forall g \in G$  ist  $\pi(g)^2 = \pi(g^2) = 1$ . Widerspruch zu  $|G/\langle g \rangle| = 3$ .

Falls (b), so gilt  $g = g^{-1}$  nur wenn  $g = 1$ .  $\implies G = \{1, g, g^{-1}, h, h^{-1}, \dots\}$ .  
Nicht möglich, da  $G$  eine gerade Ordnung hat.

D.h. wir sind im Fall (c).  $G$  enthält  $1, g, h, h^2, gh, gh^2$ . (kleine Übung: Diese Elemente sind alle verschieden).  $\implies G = \{1, g, h, h^2, gh, gh^2\}$ .

Wir haben  $hg = gh$  oder  $hg = gh^2$ . Falls  $hg = gh$ , so hätte  $(gh)$  Ordnung 6. Das haben wir aber ausgeschlossen. Also ist  $hg = gh^2$ .

Die Relation  $gh = h^2g$  definiert die Verknüpfung auf  $G$  eindeutig. Jedes Produkt in  $g$  und  $h$  lässt sich mit dieser Regel in die Form  $g^i h^j$  bringen, wobei  $0 \leq i \leq 1, 0 \leq j \leq 2$ .

Im Fall (c) gibt es also höchstens eine Gruppe. Diese muss  $S_3$  sein.  $\square$

**Bemerkung 13.** Seien  $g, h \in S_3$ , mit

$$g: \begin{cases} 1 \mapsto 2 \\ 2 \mapsto 3 \\ 3 \mapsto 1 \end{cases} \quad h: \begin{cases} 1 \mapsto 2 \\ 2 \mapsto 3 \\ 3 \mapsto 1 \end{cases}$$

Dann ist  $S_3 = \{1, g, h, h^2, gh, gh^2\}$ .

**Bemerkung 14.** Jede echte Untergruppe von  $S_3$  ist zyklisch (da von Ordnung 2 oder 3).

**Bemerkung 15.**  $A_3 = \langle h \rangle$

## Symmetrie

Isometrien von  $\mathbb{R}^n$

**Definition 14.** Eine **Isometrie** von  $\mathbb{R}^n$  ist eine Abbildung  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$  von der Form  $f(X) = BX + a$  wobei  $B \in O(n), a \in \mathbb{R}^n$ . Wir bezeichnen mit  $\text{Isom}(\mathbb{R}^n)$  die Gruppe der Isometrien von  $\mathbb{R}^n$ .

**Bemerkung 16.** Man kann zeigen, dass Isometrien genau die Abbildungen  $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$  sind, welche die Distanzen erhalten.

Zwei wichtige Untergruppen:

- (1)  $\mathcal{T}_n \leq \text{Isom}(\mathbb{R}^n)$ : Die Untergruppe der **Translationen**, d.h. Abbildung on der Form  $t_a: X \mapsto X + a$  für  $a \in \mathbb{R}^n$ . Es gilt  $t_a t_{a'} = t_{a+a'}$ .
- (2)  $O \leq \text{Isom}(\mathbb{R}^n)$ : Die Untergruppe der Isometrien von der Form  $d_B: X \mapsto BX$  für  $B \in O(n)$ . Es gilt  $d_B d_{B'} = d_{BB'}$ .

Jedes  $f \in \text{Isom}(\mathbb{R}^n)$  lässt sich eindeutig schreiben als  $t_a d_B$  für  $B \in O(n), a \in \mathbb{R}^n$ . Falls  $f(X) = BX + a, g(X) = B'X + a'$ , dann ist

$$\begin{aligned} f \circ g(X) &= B(B'X + a') + a \\ &= BB'X + Ba' + a \end{aligned}$$

D.h. falls  $F = t_a d_B, g = t_{a'} + d_{B'}$ , so ist

$$\begin{aligned} f \circ g &= t_a d_B t_{a'} d_{B'} \\ &= t_{Ba' + a} d_{BB'}. \end{aligned}$$

Wir haben also insbesondere Homomorphismus  $\psi: \text{Isom}(\mathbb{R}^n) \rightarrow O, \psi(t_a d_B) = d_B$ .

Kern  $\psi = \mathcal{T}_n$ .

**Bemerkung 17.** Die Abbildung  $\text{Isom}(\mathbb{R}^n) \rightarrow \mathcal{T}_n, t_a d_B \mapsto t_a$  ist kein Homomorphismus.

## Vorlesung 6

**Gestern:**  $\text{Isom}(\mathbb{R}^n)$  Abbildung  $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$  von der Form  $f(x) = t_a d_B(x) = BX + a$   $B \in O(n), a \in \mathbb{R}^n$ .

$O \leq \text{Isom}(\mathbb{R}^n)$ : Isometrien, die den Ursprung fixieren, d.h. von der Form  $f(X) = d_B(X) = BX$ .

$\mathcal{T}_n \leq \text{Isom}(\mathbb{R}^n)$  Translationen

## Orientierung

Falls  $n = 2$ :

$$\text{Erinnerung: } SO(2) = \left\{ \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \mid 0 \leq \theta \leq 2\pi \right\}$$

$$O(2)/SO(2) = \{\pm 1\} \simeq C_2$$

$$\implies SO(2) \text{ hat zwei Nebenklassen: } O(2) = SO(2) \cup \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} SO(2).$$

**Definition 15.** Sei  $f \in \text{Isom}(\mathbb{R}^2)$ ,  $f = t_a d_B$ .

Falls  $B \in SO(2)$  ist, heisst  $f$  **orientierungserhaltend**.

Falls  $B \in \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} SO(2)$ , so heisst  $f$  **orientierungsumkehrend**.

**Bemerkung 18.** Falls  $B \in SO(2)$ , so ist  $d_B$  eine Drehung um  $O$  um den Winkel  $\theta$ .

**Bemerkung 19.** Falls  $B \in \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$ , so definiert  $d_B$  eine Spiegelung an der Geraden mit Winkel  $\theta/2$  zur  $x$ -Achse.

**Satz 12.** Die Untergruppe von  $\text{Isom}(\mathbb{R}^n)$  der Elemente, die einen Punkt  $p \in \mathbb{R}^n$  fixieren, ist die konjugierte Untergruppe  $O' = t_p O t_p^{-1} \leq \text{Isom}(\mathbb{R}^n)$



*Beweis:*

$$\begin{aligned}
f(p) = p &\Leftrightarrow t_p^{-1}f(p) = t_p^{-1}(p) = 0 \\
&\Leftrightarrow t_p^{-1}f(t_p(0)) = 0 \\
&\Leftrightarrow t_p^{-1}ft_p \in O \\
&\Leftrightarrow f \in t_p O t_p^{-1}
\end{aligned}$$

□

**Satz 13.** Sei  $G \leq \text{Isom}(\mathbb{R}^n)$  eine endliche Untergruppe. So hat  $G$  einen Fixpunkt.

*Beweis:* Sei  $m = |G|$ , sei  $G = \{f_1, \dots, f_m\}$ . Sei  $q \in \mathbb{R}^n$  beliebig. Betrachte die Bilder  $q_i := f_i(q)$  für  $i \in 1, \dots, m$ . Sei  $p := \frac{1}{m}(q_1 + \dots + q_m)$ .

**Behauptung:**  $f_j(p) = p \quad \forall f_j \in G$ .

*Beweis:* Schreibe  $f_j(X) = B_j X + a_j$ .

$$\begin{aligned}
\Rightarrow f_j(p) &= B_j \left( \frac{1}{m}(q_1 + \dots + q_m) \right) + a_j \\
&= \frac{1}{m}(B_j q_1 + \dots + B_j q_m + m a_j) \\
&= \frac{1}{m}((B_j q_1 + a_j) + \dots + (B_j q_m + a_j)) \\
&= \frac{1}{m}(f_j(q_1) + \dots + f_j(q_m)) \\
&= \frac{1}{m}(f_j f_1(q) + \dots + f_j f_m(q)) \\
&\stackrel{(*)}{=} \frac{1}{m}(q_1 + \dots + q_m) = p
\end{aligned}$$

$$(*) : \{f_1, \dots, f_m\} = \{f_j f_1, \dots, f_j f_m\}$$

□

**Korollar 7.** Sei  $G \leq \text{Isom}(\mathbb{R}^n)$ . eine endliche Untergruppe. So gibt es ein  $a \in \mathbb{R}^n$  so dass  $t_a^{-1} G t_a \leq O$ .

*Beweis:* Sei  $a \in \mathbb{R}^n$  der Fixpunkt von  $G$ . Dann ist  $G \leq t_a O t_a^{-1}$

$$\Rightarrow t_a^{-1} G t_a \leq O.$$

□

**Satz 14.** Sei  $n = 2$  und sei  $G \leq O$  eine endliche Untergruppe. So ist  $G$  eine der folgenden Gruppen:

- (a) Die zyklische Gruppe der Ordnung  $n$  erzeugt von der Drehung um den Winkel  $\theta = 2\pi/n$ .

(b) Die **Diedergruppe**  $D_n$  von Ordnung  $2n$  erzeugt von zwei Elementen: der Drehung um den Winkel  $\theta = 2\pi/n$  und einer Spiegelung  $S$  an einer geraden durch den Nullpunkt.

*Beweis:* **1. Fall:** Alle Elemente in  $G$  sind in  $SO(2)$ , d.h. Drehungen.

**Behauptung:**  $G$  ist zyklisch.

*Beweis:* Falls  $G=\{1\}$ , klar. Sonst: Sei  $\theta$  der kleinste positive Drehwinkel der Elemente in  $G$ . Sei  $d_\theta \in G$  diese Drehung.

Z.Z:  $\langle d_\theta \rangle = G$ .

Sei  $d_\alpha \in G$  eine Drehung um den Winkel  $\alpha > 0$ . Schreibe  $\alpha = n\theta + \beta$  mit  $0 \leq \beta < \theta$  und  $n \in \mathbb{Z}$ .

$$d + B = d_\alpha d_{-n\theta} = d_\alpha (d_\theta^{-1})^n \in G$$

$$\implies \beta = 0$$

$$\implies d_\alpha (d_\theta^{-1})^n = 1$$

$$\implies d_\alpha = (d_\theta)^n \in \langle d_\theta \rangle$$

Sei  $n \in \mathbb{N}$  minimal, s.d.  $n\theta \geq 2\pi$ .

D.h.  $2\pi \leq n\theta < 2\pi + \theta$ . Da  $\theta$  der kleinste Drehwinkel in  $G$  ist, folgt daraus:  
 $\implies 2\pi = n\theta \implies \theta = 2\pi/n$ .

**2. Fall:**  $G$  enthält Spiegelung. Betrachte  $\phi: G \rightarrow \{\pm 1\}$  gegeben durch  $\text{Det}$ .  
 $\xrightarrow{1.Fall}$  Kern  $\phi$  ist zyklisch erzeugt von Drehung  $\implies G = \text{Kern } \phi + S \text{ Kern } \phi$   
mit  $S$  Spiegelung.  $\square$