

Anmerkungen und Lösungen zu

Einführung in die Algebra

Blatt 2

Jendrik Stelzner

Letzte Änderung: 9. November 2017

Aufgabe 1

(a)

Die Identität $\text{id}_G: G \rightarrow G$ ist ein Gruppenhomomorphismus mit $\ker \text{id}_G = \{e\}$. Also ist die Untergruppe $\{e\}$ normal mit $G/\{e\} \cong \text{im } \text{id}_G = G$.

(b)

Wie auf dem ersten Übungszettel gesehen, ist für die Gruppe der Einheitswurzeln,

$$\mu_\infty(\mathbb{C}) := \{z \in \mathbb{C} \mid z^n = 1\},$$

die Abbildung

$$f: \mathbb{Q} \rightarrow \mu_\infty(\mathbb{C}), \quad x \mapsto e^{2\pi i x}$$

ein surjektiver Gruppenhomomorphismus mit $\ker f = \mathbb{Z}$. Folglich ist \mathbb{Z} eine normale Untergruppe von \mathbb{Q} (dies ergibt sich auch daraus, dass \mathbb{Q} abelsch ist), und f induziert einen Isomorphismus

$$\bar{f}: \mathbb{Q}/\mathbb{Z} \rightarrow \mu_\infty(\mathbb{C}), \quad \bar{x} \mapsto f(x) = e^{2\pi i x}.$$

Inbesondere gilt $\mathbb{Q}/\mathbb{Z} \cong \mu_\infty(\mathbb{C})$.

(c)

Die Abbildung $\text{Im}: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{R}$, $z = x + iy \mapsto y$ ist ein surjektiver Gruppenhomomorphismus mit $\ker \text{Im} = \mathbb{R}$. Folglich ist \mathbb{R} eine normale Untergruppe von \mathbb{C} (dies ergibt sich auch daraus, dass \mathbb{C} abelsch ist), und Im induziert einen Isomorphismus

$$\overline{\text{Im}}: \mathbb{C}/\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, \quad \bar{z} \mapsto \text{Im } z.$$

(d)

Die beiden Abbildungen

$$\mathbb{C}^\times \rightarrow S^1, \quad z \mapsto \frac{z}{|z|}$$

und

$$S^1 \rightarrow S^1, \quad z \mapsto z^2$$

sind surjektive Gruppenhomomorphismen. Deshalb ist auch ihre Verknüpfung, also die Abbildung

$$f: \mathbb{C}^\times \rightarrow S^1, \quad z \mapsto \left(\frac{z}{|z|} \right)^2$$

ist ein surjektiver Gruppenhomomorphismus. Für $z \in \mathbb{C}^\times$ gilt dabei, dass

$$f(z) = 1 \iff \left(\frac{z}{|z|} \right)^2 = 1 \iff \frac{z}{|z|} = \pm 1 \iff z = \pm |z| \iff z \in \mathbb{R},$$

weshalb $\ker f = \mathbb{R}^\times$. Folglich ist \mathbb{R}^\times eine normale Untergruppe von \mathbb{C}^\times (dies ergibt sich auch daraus, dass \mathbb{C}^\times abelsch ist), und f induziert einen Isomorphismus

$$\bar{f}: \mathbb{C}^\times / \mathbb{R}^\times \rightarrow S^1, \quad \bar{z} \mapsto f(z) = \left(\frac{z}{|z|} \right)^2.$$

Inbesondere gilt $\mathbb{C}^\times / \mathbb{R}^\times \cong S^1$.

(e)

Die Untergruppe $\mathrm{SO}(2) \leq \mathrm{SO}(3)$ ist nicht normal, denn für

$$R := \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \in \mathrm{SO}(2) \quad \text{und} \quad S := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \in \mathrm{SO}(3)$$

gilt

$$\begin{aligned} SRS^{-1} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}^{-1} \\ &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \notin \mathrm{SO}(2) \end{aligned}$$

(Anschaulich gesehen ist R die Rotation um die z -Achse zum 90° , während S eine Rotation ist, welche die drei Koordinatenachsen in der Reihenfolge $x \rightarrow y \rightarrow z \rightarrow x$ zyklisch permutiert. Vertauscht man die Achsen $z \rightarrow x$, so wird die Drehung um die z -Achse zur Drehung um die x -Achse.)

Bemerkung 1. Es sei $S^2 := \{x \in \mathbb{R}^3 \mid |x| = 1\}$ die zweidimensionale Sphäre. Die orthogonale Gruppe $\mathrm{SO}(3)$ wirkt auf S^2 durch

$$R.x := Rx \quad \text{für alle } R \in \mathrm{SO}(3), x \in S^2.$$

Diese Wirkung ist transitiv, d.h. für alle $x, y \in S^2$ gibt es eine Rotation $R \in \mathrm{SO}(3)$ mit $R.x = y$. Der Stabilisator $\mathrm{Stab}_{\mathrm{SO}(3)}(e_3)$ besteht aus allen Rotationen, welche die z -Achse fixieren; es gilt also $\mathrm{Stab}_{\mathrm{SO}(3)}(e_3) = \mathrm{SO}(2)$. Wir erhalten somit eine Bijektion

$$\mathrm{SO}(3)/\mathrm{SO}(2) \rightarrow S^2, \quad \bar{R} \mapsto R.e_3 = Re_3.$$

Wir können uns $\mathrm{SO}(3)/\mathrm{SO}(2)$ also als die zweidimensionale Sphäre vorstellen. Allgemeiner gilt für alle $n \geq 1$, dass $\mathrm{SO}(n+1)/\mathrm{SO}(n) \cong S^n$ als topologische Räume.

(f)

Die Untergruppe $\mathrm{O}(2) \leq \mathrm{GL}_2(\mathbb{R})$ ist nicht normal, denn für

$$S := \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \in \mathrm{O}(2) \quad \text{und} \quad T := \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \in \mathrm{GL}_2(\mathbb{R})$$

gilt

$$\begin{aligned} TST^{-1} &= \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \notin \mathrm{O}(2). \end{aligned}$$

(Anschaulich gesehen ist S die Spiegelung an der Winkelhalbierenden, d.h. S vertauscht die beiden Standardbasisvektoren e_1 und e_2 . Die Matrix T erfüllt $Te_1 = e_1$ und $Te_2 = e_1 + e_2$. Die obige Komposition TST^{-1} vertauscht deshalb die beiden Vektoren e_1 und $e_1 + e_2$, und ist somit nicht längenerhaltend.)

(g)

Die Abbildung $\det|_{\mathrm{O}(n)}: \mathrm{O}(n) \rightarrow \mathbb{R}^\times$ ist aufgrund der Multiplikativität der Determinante ein Gruppenhomomorphismus, und es gilt $\ker \det|_{\mathrm{O}(n)} = \mathrm{SO}(n)$. Für jede orthogonale Matrix $S \in \mathrm{O}(n)$ gilt $SS^T = I$ und somit

$$1 = \det I = \det(SS^T) = (\det S)(\det S^T) = \det(S)^2,$$

also $\det(S) = \pm 1$. Andererseits gilt für

$$S_\pm := \begin{pmatrix} \pm 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 1 \end{pmatrix} \in \mathrm{O}(n)$$

dass $\det S_{\pm} = \pm 1$. Somit gilt $\text{im det}|_{\text{O}(n)} = \{1, -1\}$. Also induziert $\text{det}|_{\text{O}(n)}$ einen Isomorphismus

$$\text{O}(n)/\text{SO}(n) \rightarrow \text{im det}|_{\text{O}(n)} = \{1, -1\}, \quad \overline{S} \mapsto \det S.$$

Inbesondere gilt $\text{O}(n)/\text{SO}(n) \cong \text{im det}|_{\text{O}(n)} \cong \mathbb{Z}/2$.

(h)

Für $n = 1$ ist S_1 trivial, und somit $S_1 \leq WB_1$ normal mit $WB_1/S_1 \cong WB_1$. Für $n \geq 2$ ist $S_n \leq WB_n$ nicht normal: Wir betrachten die Permutation

$$\tau := \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & \cdots & n \\ 2 & 1 & 3 & \cdots & n \end{pmatrix} \in S_n$$

und die Vorzeichen-Permutation

$$\pi := \begin{pmatrix} 1 & 2 & \cdots & n \\ -1 & 2 & \cdots & n \end{pmatrix} \in WB_n.$$

(D.h. es gilt $\pi(\pm 1) = \mp 1$ und $\pi(\pm i) = \pm i$ für alle $2 \leq i \leq n$.) Dann gilt

$$\pi\tau\pi^{-1} = \pi\tau\pi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & \cdots & n \\ -2 & -1 & 3 & \cdots & n \end{pmatrix} \notin S_n.$$

(i)

Die Untergruppe $\text{GL}_2(\mathbb{R}) \leq \text{GL}_2(\mathbb{C})$ ist nicht normal, denn für

$$S := \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \in \text{GL}_2(\mathbb{R}) \quad \text{und} \quad D := \begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \in \text{GL}_2(\mathbb{C})$$

gilt

$$DSD^{-1} = \begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -i & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & i \\ -i & 0 \end{pmatrix} \notin \text{GL}_2(\mathbb{R}).$$

Aufgabe 4

(a)

Bemerkung 2. Für Permutationen in Zykelschreibe gelten die folgenden nützlichen Rechenregeln:

- Für alle paarweise verschiedenen Zahlen $1 \leq a_1, \dots, a_r \leq n$ gilt

$$(a_1 \cdots a_r) = (a_1 a_2) \cdots (a_{r-1} a_r).$$

- Für alle paarweise verschiedenen Zahlen $1 \leq a_1, \dots, a_r \leq n$ und jede Permutation $\pi \in S_n$ gilt

$$\pi(a_1 \cdots a_r) \pi^{-1} = (\pi(a_1) \cdots \pi(a_r)).$$

Für $n = 1$ ist S_1 trivial, und $S_1 \leq WB_1$ somit normal. Insbesondere ist die angegebene Verknüpfung dann wohldefiniert. Wir betrachten daher im Folgenden nur den Fall $n \geq 2$.

Wäre die angegebene binäre Verknüpfung wohldefiniert, so würde für die Transposition $\tau := (1 \ (n+1)) \in S_{n+1}$ gelten, dass

$$\tau S_n = (\text{id } \tau) S_n = \text{id } S_n \cdot \tau S_n = (1 \ 2) S_n \cdot \tau S_n = (1 \ 2) \tau S_n.$$

Dies gilt aber nicht, da

$$\tau^{-1}(1 \ 2) \tau = (\tau^{-1}(1) \ \tau^{-1}(2)) = (2 \ (n+1)) \notin S_n.$$

Wäre S_n normal in S_{n+1} , so wäre die angegebene Verknüpfung wohldefiniert; folglich kann S_n nicht normal in S_{n+1} sein.

Bemerkung 3. Ist allgemeiner G eine Gruppe und $H \leq G$ eine nicht-normale Untergruppe, so gibt es $h \in H$ und $g \in G$ mit $g^{-1}hg \notin H$. Führt man dann in der obigen Rechnung die Ersetzungen

$$S_{n+1} \rightarrow G, \quad S_n \rightarrow H, \quad \tau \rightarrow g, \quad (1 \ 2) \rightarrow h, \quad \text{id} \rightarrow 1_G$$

durch, so ergibt sich, dass die binäre Verknüpfung

$$(G/H) \times (G/H) \rightarrow G/H, \quad (\overline{g_1}, \overline{g_2}) \mapsto \overline{g_1 g_2}$$

nicht wohldefiniert ist. Die Verknüpfung ist also *genau dann* wohldefiniert, wenn H normal in G ist.

(b)

Es seien

$$\mathcal{G} := \{U \mid K \leq U \leq G\} \quad \text{und} \quad \mathcal{H} := \{W \mid W \leq H, \}$$

sowie

$$\mathcal{G}^{\trianglelefteq} := \{U \mid K \leq U \trianglelefteq G\} \quad \text{und} \quad \mathcal{H}^{\trianglelefteq} := \{W \mid W \trianglelefteq H, \}$$

Alle Untergruppen

Es gilt zunächst zu zeigen, dass die Abbildung

$$\Phi: \mathcal{G} \rightarrow \mathcal{H}, \quad U \mapsto \varphi(U)$$

eine wohldefinierte Bijektion ist.

Die Abbildung Φ ist wohldefiniert, denn für jede Untergruppe $U \leq G$ ist die Einschränkung $\varphi|_U$ ebenfalls ein Gruppenhomomorphismus, und somit $\varphi(U) = \text{im } \varphi|_U$ eine Untergruppe von H .

Zum Nachweis der Bijektivität betrachten wir die Abbildung

$$\Phi': \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{G}, \quad W \mapsto \varphi^{-1}(W)$$

Die Abbildung Φ' ist wohldefiniert:

Lemma 4. *Für jeden Gruppenhomomorphismus $\varphi: G \rightarrow H$ und jede Untergruppe $W \leq H$ ist das Urbild $\varphi^{-1}(W)$ eine Untergruppe von G .*

Beweis. Wir geben zwei mögliche Beweise:

- Es gilt $\varphi(1) = 1 \in W$ und somit $1 \in \varphi^{-1}(W)$. Für alle $g_1, g_2 \in \varphi^{-1}(W)$ gilt $\varphi(g_1), \varphi(g_2) \in W$ und somit auch $\varphi(g_1 g_2) = \varphi(g_1) \varphi(g_2) \in W$, also $g_1 g_2 \in \varphi^{-1}(W)$. Für jedes $g \in \varphi^{-1}(W)$ gilt $\varphi(g) \in W$ und somit auch $\varphi(g^{-1}) = \varphi(g)^{-1} \in W$, also $g^{-1} \in \varphi^{-1}(W)$.
- Die Gruppe H wirkt auf H/W durch

$$h.\bar{h}' := \overline{hh'} \quad \text{für alle } h \in H, \bar{h}' \in H/W,$$

und es gilt

$$\text{Stab}_H(\bar{1}) = \{h \in H \mid h.\bar{1} = \bar{1}\} = \{h \in H \mid \bar{h} = \bar{1}\} = \{h \in H \mid h \in W\} = W.$$

Über φ lässt sich diese Gruppenwirkung zu einer Wirkung von G auf H/W mit

$$g.\bar{h} := \varphi(g).\bar{h} = \overline{\varphi(g)h} \quad \text{für alle } g \in G, \bar{h} \in H/W$$

zurückziehen. Dies lässt sich auf (mindestens) zwei Weisen sehen:

- Es gilt $1_G.\bar{h} = \varphi(1_G).\bar{h} = 1_H.\bar{h} = \bar{h}$, und für alle $g_1, g_2 \in G$ gilt

$$g_1.(g_2.\bar{h}) = \varphi(g_1).(\varphi(g_2).\bar{h}) = (\varphi(g_1)\varphi(g_2)).\bar{h} = \varphi(g_1 g_2).\bar{h} = (g_1 g_2).\bar{h}.$$

- Die Gruppenwirkung von H auf H/W entspricht dem Gruppenhomomorphismus $\alpha: H \rightarrow S(H/W)$ mit $\alpha(h)(\bar{h}') = \bar{h}h'$. Die Komposition $\alpha \circ \varphi: G \rightarrow S(H/W)$ ist dann ebenfalls ein Gruppenhomomorphismus, und entspricht einer Gruppenwirkung von G auf H/W mit

$$g.\bar{h} = (\alpha \circ \varphi)(g)(h) = \alpha(\varphi(g))(h) = \overline{\varphi(g)h}.$$

Es folgt, dass $\text{Stab}_G(\bar{1})$ eine Untergruppe von G ist, wobei

$$\begin{aligned} \text{Stab}_G(\bar{1}) &= \{g \in G \mid g.\bar{1} = \bar{1}\} = \{g \in G \mid \varphi(g).\bar{1} = \bar{1}\} \\ &= \{g \in G \mid \varphi(g) \in \text{Stab}_H(\bar{1})\} = \{g \in G \mid \varphi(g) \in W\} = \varphi^{-1}(W). \quad \square \end{aligned}$$

Aus der Surjektivität ergibt sich für jede Untergruppe $W \leq H$, dass

$$\Phi(\Phi'(W)) = \varphi(\varphi^{-1}(W)) = W,$$

weshalb $\Phi \circ \Phi' = \text{id}_{\mathcal{H}}$ gilt. Für die Komposition $\Phi' \circ \Phi$ nutzen wir die folgende Beobachtung:

Lemma 5. *Ist $\varphi: G \rightarrow H$ ein Gruppenhomomorphismus, so gilt mit $K := \ker \varphi$ für jede Untergruppe $U \leq G$, dass $\varphi^{-1}(\varphi(U)) = UK$.*

Beweis. Es gelten $U \subseteq \varphi^{-1}(\varphi(U))$ und $K = \varphi^{-1}(1) \subseteq \varphi^{-1}(\varphi(U))$, und deshalb $UK \subseteq \varphi^{-1}(\varphi(U))$. Ist andererseits $g \in \varphi^{-1}(\varphi(U))$, so gilt $\varphi(g) \in \varphi(U)$, weshalb es $u \in U$ mit $\varphi(g) = \varphi(u)$ gibt. Dann gilt $g = uu^{-1}g$ mit $u^{-1}g \in \ker \varphi$, denn $\varphi(u^{-1}g) = \varphi(u)^{-1}\varphi(g) = 1$. \square

Für jede Untergruppe $U \leq G$ mit $K \leq U$ gilt somit, dass

$$\Phi'(\Phi(U)) = \varphi^{-1}(\varphi(U)) = UK = U,$$

weshalb $\Phi' \circ \Phi = \text{id}_G$ gilt.

Insgesamt zeigt dies, dass Φ eine Bijektion ist, und dass $\Phi^{-1} = \Phi'$ gilt.

Normale Untergruppen

Die Aussage gilt auch dann noch, wenn man „Untergruppen“ durch „normale Untergruppen“ ersetzt. Hierfür genügt es zu zeigen, dass sich Φ und Φ' zu Abbildungen $\mathcal{G}^{\triangleleft} \rightarrow \mathcal{H}^{\triangleleft}$ und $\mathcal{H}^{\triangleleft} \rightarrow \mathcal{G}^{\triangleleft}$ einschränken. Dies ergibt sich aus dem Folgenden:

Lemma 6. *Es sei $\varphi: G \rightarrow H$ ein Gruppenhomomorphismus.*

- 1) *Für jede normale Untergruppe $W \trianglelefteq H$ ist auch $\varphi^{-1}(W) \leq G$ normal.*
- 2) *Ist φ surjektiv, so ist für jede normale Untergruppe $U \trianglelefteq G$ auch $\varphi(U) \leq H$ normal.*

Beweis.

- 1) Wir geben zwei Beweise:

- Für $h \in \varphi^{-1}(W)$ gilt für jedes $g \in G$ dass

$$\varphi(ghg^{-1}) = \varphi(g) \underbrace{\varphi(h)}_{\in W} \varphi(g)^{-1} \in W,$$

und somit dass $ghg^{-1} \in \varphi^{-1}(W)$.

- Die kanonische Projektion $p: H \rightarrow H/W$, $h \mapsto \bar{h}$ ist ein Gruppenhomomorphismus mit $W = \ker p = p^{-1}(1)$. Deshalb ist $p \circ \varphi: G \rightarrow H/W$ ein Gruppenhomomorphismus mit

$$\ker(p \circ \varphi) = (p \circ \varphi)^{-1}(1) = \varphi^{-1}(p^{-1}(1)) = p^{-1}(W).$$

2) Für jedes $h \in H$ gibt es ein $g \in G$ mit $h = \varphi(g)$, weshalb

$$h\varphi(U)h^{-1} = \varphi(g)\varphi(U)\varphi(g)^{-1} = \varphi(gUg^{-1}) = \varphi(U). \quad \square$$

Bemerkung 7. Ist $H = G/K$ und $\varphi: G \rightarrow H, g \mapsto \bar{g}$ die kanonische Projektion, so wollen wir noch die folgenden Beobachtungen festhalten:

- Für jede Untergruppe $U \leq G$ mit $K \leq U$ ist die entsprechende Untergruppe $\Phi(U) \leq H = G/K$ genau U/K , denn

$$\Phi(U) = \varphi(U) = \{\varphi(u) \mid u \in U\} = \{uK \mid u \in U\} = U/K.$$

- Es seien $W' \trianglelefteq W \leq H$ Untergruppen. Für die entsprechenden Untergruppen $U' \leq U \leq G$ mit $U = \Phi^{-1}(U)$, $U' = \Phi^{-1}(W')$ gilt dann bereits $U' \trianglelefteq U$ mit $U/U' \cong W/W'$:
 - Wie bereits gesehen gilt $W = U/K$. Die Einschränkung $\psi := \varphi|_U: U \rightarrow W$, $u \mapsto \varphi(u) = uK$ ist die kanonische Projektion $U \rightarrow U/K$. Aus der Normalität von $W' \trianglelefteq W$ folgt deshalb, dass $U' = \Phi^{-1}(W') = \varphi^{-1}(W')$ normal in U ist.
 - Es gelten $W = U/K$ und $W' = U'/K$, und somit

$$U/U' \cong (U/K)/(U'/K) = W/W'$$

nach einem der Isomorphiesätze.

Beispiel 8. Ist $K \trianglelefteq G$ eine beliebige normale Untergruppe, $p: G \rightarrow G/K, g \mapsto \bar{g}$ die kanonische Projektion und

$$1 = H_0 \trianglelefteq H_1 \trianglelefteq H_2 \trianglelefteq \cdots \trianglelefteq H_n = G/K$$

eine Normalenreihe für G/K , so erhält man für die zurückgezogenen Untergruppen $G_i := p^{-1}(H_i) \leq G$ eine Normalenreihe

$$1 \trianglelefteq K = G_0 \trianglelefteq G_1 \trianglelefteq G_2 \trianglelefteq \cdots \trianglelefteq G_n = G$$

mit $G_i/G_{i-1} \cong H_i/H_{i-1}$ für alle i . Auf diese Weise lassen sich induktiv Normalenreihen konstruieren, und ggf. Aussagen über die entsprechenden auftretenden Quotienten treffen.

(c)

Es gibt (mindestens) zwei Möglichkeiten, die Untergruppen von $\mathbb{Z}/12$ zu bestimmen:

- Da die Gruppe $\mathbb{Z}/12$ zyklisch ist, sind auch alle Untergruppen von $\mathbb{Z}/12$ zyklisch. Hieraus ergeben sich die Untergruppen

$$\begin{aligned} \langle \bar{1} \rangle = \langle \bar{5} \rangle = \langle \bar{7} \rangle = \langle \bar{11} \rangle &= \{\bar{0}, \bar{1}, \dots, \bar{11}\}, & \langle \bar{2} \rangle = \langle \bar{10} \rangle &= \{\bar{0}, \bar{2}, \bar{4}, \bar{6}, \bar{8}, \bar{10}\}, \\ \langle \bar{3} \rangle = \langle \bar{9} \rangle &= \{\bar{0}, \bar{3}, \bar{6}, \bar{9}\}, & \langle \bar{4} \rangle = \langle \bar{8} \rangle &= \{\bar{0}, \bar{4}, \bar{8}\}, & \langle \bar{6} \rangle &= \{\bar{0}, \bar{6}\}, & \langle \bar{0} \rangle &= \{\bar{0}\}. \end{aligned}$$

- Nach Aufgabenteil (b) entsprechen die Untergruppen von $\mathbb{Z}/12$ bijektiv den Untergruppen von \mathbb{Z} , die $12\mathbb{Z}$ enthalten. Jede Untergruppe von \mathbb{Z} ist zyklisch, da \mathbb{Z} zyklisch ist, und somit von der Form $n\mathbb{Z}$ für $n \in \mathbb{Z}$. Dabei gilt genau dann $12\mathbb{Z} \subseteq n\mathbb{Z}$, wenn $12 \in n\mathbb{Z}$, wenn also $n \mid 12$. Die Untergruppen von $\mathbb{Z}/12$ entsprechen also bijektiv den Teilern von 12, und sind gegeben durch

$$\begin{aligned}\mathbb{Z}/12 &= \{\bar{0}, \bar{1}, \dots, \bar{11}\}, & 2\mathbb{Z}/12 &= \{\bar{0}, \bar{2}, \bar{4}, \bar{6}, \bar{8}, \bar{10}\}, & 3\mathbb{Z}/12 &= \{\bar{0}, \bar{3}, \bar{6}, \bar{9}\}, \\ 4\mathbb{Z}/12 &= \{\bar{0}, \bar{4}, \bar{8}\}, & 6\mathbb{Z}/12 &= \{\bar{0}, \bar{6}\}, & 12\mathbb{Z}/12 &= \{\bar{0}\}.\end{aligned}$$

Alle Untergruppen von $\mathbb{Z}/12$ sind normal, da $\mathbb{Z}/12$ abelsch ist. Die entsprechenden Quotienten lassen sich auf (mindestens) zwei verschiedene Weisen berechnen:

- Nach einem der Isomorphiesätze gilt für jeden Teiler d von 12, dass

$$(\mathbb{Z}/12)/(d\mathbb{Z}/12) \cong \mathbb{Z}/d.$$

Die entsprechenden Quotienten sind also

$$\begin{aligned}(\mathbb{Z}/12)/(\mathbb{Z}/12) &\cong \mathbb{Z}/1 \cong 0, & (\mathbb{Z}/12)/(2\mathbb{Z}/12) &\cong \mathbb{Z}/2, & (\mathbb{Z}/12)/(3\mathbb{Z}/12) &\cong \mathbb{Z}/3, \\ (\mathbb{Z}/12)/(4\mathbb{Z}/12) &\cong \mathbb{Z}/4, & (\mathbb{Z}/12)/(6\mathbb{Z}/12) &\cong \mathbb{Z}/6, & (\mathbb{Z}/12)/(12\mathbb{Z}/12) &\cong \mathbb{Z}/12.\end{aligned}$$

- Jeder Quotient von $\mathbb{Z}/12$ ist zyklisch, da $\mathbb{Z}/12$ zyklisch ist. Für jede Untergruppe $H \leq \mathbb{Z}/12$ gilt $|(\mathbb{Z}/12)/H| = 12/|H|$, und somit

$$(\mathbb{Z}/12)/H \cong \mathbb{Z}/(12/|H|).$$

Für jedes $d \in \{0, 1, 2, 3, 4, 6\}$ gilt somit

$$(\mathbb{Z}/12)/\langle d \rangle \cong \mathbb{Z}/(12/|\langle d \rangle|) = \mathbb{Z}/(12/(12/d)) = \mathbb{Z}/d.$$

Aufgabe 5

Für $g, h \in G$ schreiben wir im Folgenden abkürzend $[g, h] := ghg^{-1}h^{-1}$. Es gilt

$$[g, h]^{-1} = (ghg^{-1}h^{-1})^{-1} = hgh^{-1}g^{-1} = [h, g] \quad \text{für alle } g, h \in G,$$

und deshalb $[G, G] = \langle [g, h] \mid g, h \in G \rangle$.

Lemma 9. Für $S \subseteq G$ und jeden Gruppenhomomorphismus $\varphi: G \rightarrow H$ gilt

$$\varphi(\langle S \rangle) = \langle \varphi(S) \rangle.$$

Beweis. Wir geben zwei mögliche Beweise an:

- Es gilt

$$\begin{aligned}\varphi(\langle S \rangle) &= \varphi(\{s_1^{\varepsilon_1} \cdots s_n^{\varepsilon_n} \mid n \geq 0, s_1, \dots, s_n \in S, \varepsilon_i = \pm 1\}) \\ &= \{\varphi(s_1)^{\varepsilon_1} \cdots \varphi(s_n)^{\varepsilon_n} \mid n \geq 0, s_1, \dots, s_n \in S, \varepsilon_i = \pm 1\} \\ &= \{t_1^{\varepsilon_1} \cdots t_n^{\varepsilon_n} \mid n \geq 0, t_1, \dots, t_n \in \varphi(S), \varepsilon_i = \pm 1\} = \langle \varphi(S) \rangle.\end{aligned}$$

- Es ist $\varphi(\langle S \rangle)$ eine Untergruppe von H , denn Bilder von Untergruppen sind Untergruppen. Es gilt $\varphi(S) \subseteq \varphi(\langle S \rangle)$ da $S \subseteq \langle S \rangle$. Somit gilt $\langle \varphi(S) \rangle \subseteq \varphi(\langle S \rangle)$, denn $\langle \varphi(S) \rangle$ ist die kleinste Untergruppe von H , die $\varphi(S)$ enthält.

Andererseits ist $\varphi^{-1}(\langle \varphi(S) \rangle)$ eine Untergruppe von G , denn Urbilder von Untergruppen sind Untergruppen (siehe Lemma 4). Dabei gilt $S \subseteq \varphi^{-1}(\langle \varphi(S) \rangle)$ da $\varphi(S) \subseteq \langle \varphi(S) \rangle$. Somit gilt auch $\langle S \rangle \subseteq \varphi^{-1}(\langle \varphi(S) \rangle)$, denn $\langle S \rangle$ ist die kleinste Untergruppe von G , die S enthält. Deshalb gilt auch $\varphi(\langle S \rangle) \subseteq \langle \varphi(S) \rangle$. \square

(a)

Lemma 10. *Es sei $\varphi: G \rightarrow H$ ein Gruppenhomomorphismus.*

1. *Für alle $g_1, g_2 \in G$ gilt $\varphi([g_1, g_2]) = [\varphi(g_1), \varphi(g_2)]$.*
2. *Es gilt $\varphi([G, G]) = [\varphi(G), \varphi(G)]$.*

Beweis. 1. Es gilt

$$\varphi([g_1, g_2]) = \varphi(g_1 g_2 g_1^{-1} g_2^{-1}) = \varphi(g_1) \varphi(g_2) \varphi(g_1)^{-1} \varphi(g_2)^{-1} = [\varphi(g_1), \varphi(g_2)]$$

2. Mit Lemma 9 ergibt sich, dass

$$\begin{aligned} \varphi([G, G]) &= \varphi(\langle [g_1, g_2] \mid g_1, g_2 \in G \rangle) = \langle \varphi([g_1, g_2]) \mid g_1, g_2 \in G \rangle \\ &= \langle [\varphi(g_1), \varphi(g_2)] \mid g_1, g_2 \in G \rangle = \langle [h_1, h_2] \mid h_1, h_2 \in \varphi(G) \rangle = [\varphi(G), \varphi(G)]. \end{aligned}$$

\square

Da für jedes $g \in G$ die Konjugationsabbildung $\varphi_g: G \rightarrow G$, $h \mapsto ghg^{-1}$ ein Gruppenautomorphismus ist, gilt

$$g[G, G]g^{-1} = \varphi_g([G, G]) = [\varphi_g(G), \varphi_g(G)] = [G, G].$$

Bemerkung 11. Eine Untergruppe $H \leq G$ heißt *charakteristisch*, falls $\varphi(H) = H$ für jeden Gruppenautomorphismus $\varphi: G \rightarrow G$ gilt. Die obige Rechnung zeigt eigentlich, dass

- $[G, G]$ eine charakteristische Untergruppe von G ist,

und dass

- charakteristische Untergruppen stets normal sind.

Anschaulich gesehen ist eine Untergruppe $H \leq G$ charakteristisch, wenn sie sich durch die Gruppenstruktur von G beschreiben lässt, bzw. sich aus dieser ergibt: Weitere Beispiele für eine charakteristische Untergruppen sind das Zentrum $Z(G)$, sowie die iterierten Kommutatorgruppen $G^{(n)}$ mit $G^{(1)} = G$ und $G^{(n+1)} = [G^{(n)}, G^{(n)}]$.

(b)

Lemma 12. Für jede Untergruppe $H \leq G$ gilt $[H, H] \leq [G, G]$.

Beweis. Es gilt $[H, H] = \langle [h_1, h_2] \mid h_1, h_2 \in H \rangle \leq \langle [g_1, g_2] \mid g_1, g_2 \in G \rangle = [G, G]$. \square

Für jede perfekte Untergruppe $P \leq G$ gilt $P = [P, P] \leq [G, G]$.

(c)

Es sei $\mathcal{P} := \{P \leq G \mid P \text{ ist perfekt}\}$ die Menge der perfekten Untergruppen von G . Dann ist

$$\text{Perf}(P) := \left\langle \bigcup_{P \in \mathcal{P}} P \right\rangle$$

die kleinste Untergruppe von G , die alle perfekten Untergruppen enthält. Für jede perfekte Untergruppe $P \in \mathcal{P}$ gilt

$$[\text{Perf}(G), \text{Perf}(G)] = \langle [g, h] \mid g, h \in \text{Perf}(G) \rangle \supseteq \langle [g, h] \mid g, h \in P \rangle = [P, P] = P,$$

und somit $\bigcup_{P \in \mathcal{P}} P \subseteq [\text{Perf}(G), \text{Perf}(G)]$. Somit gilt auch

$$\text{Perf}(G) = \left\langle \bigcup_{P \in \mathcal{P}} P \right\rangle \subseteq [\text{Perf}(G), \text{Perf}(G)],$$

was zeigt, dass $\text{Perf}(G)$ perfekt ist. Per Konstruktion enthält $\text{Perf}(G)$ jede perfekte Untergruppe von G .

(d)

Lemma 13. Ist P perfekt, so ist für jeden Gruppenhomomorphismus $\varphi: P \rightarrow H$ auch $\varphi(P)$ perfekt, d.h. Bilder von perfekten Gruppen sind ebenfalls perfekt.

Beweis. Nach Lemma 10 gilt $[\varphi(P), \varphi(P)] = \varphi([P, P]) = \varphi(P)$. \square

Für jeden Gruppenhomomorphismus $\varphi: G \rightarrow G$ gilt somit

$$\begin{aligned} \varphi(\text{Perf}(G)) &= \varphi\left(\left\langle \bigcup_{P \in \mathcal{P}} P \right\rangle\right) = \left\langle \varphi\left(\bigcup_{P \in \mathcal{P}} P\right) \right\rangle = \left\langle \bigcup_{P \in \mathcal{P}} \varphi(P) \right\rangle \\ &\subseteq \left\langle \bigcup_{P' \in \mathcal{P}} P' \right\rangle = \text{Perf}(G). \end{aligned}$$

Für jedes $g \in G$ ist die Konjugationsabbildung $\varphi_g: G \rightarrow G$, $h \mapsto ghg^{-1}$ ein Gruppenhomomorphismus, und somit

$$g \text{Perf}(G) g^{-1} = \varphi_g(\text{Perf}(G)) \subseteq \text{Perf}(G).$$

Bemerkung 14. Jeder Gruppenautomorphismus $\varphi: G \rightarrow G$ induziert eine Bijektion $\mathcal{P} \rightarrow \mathcal{P}$, $P \mapsto \varphi(P)$, weshalb $\varphi(\text{Perf}(G)) = \text{Perf}(G)$. Die Untergruppe $\text{Perf}(G) \leq G$ ist also charakteristisch im Sinne von Bemerkung 11, und somit normal.

(e)

Da $\text{Perf}(G) \trianglelefteq G$ normal ist, induziert die Gruppenstruktur von G eine Gruppenstruktur auf $G/\text{Perf}(G)$ mit

$$(G/\text{Perf}(G)) \times (G/\text{Perf}(G)) \rightarrow G/\text{Perf}(G), \quad (\overline{g_1}, \overline{g_2}) \mapsto \overline{g_1 g_2}.$$

(f)

(i)

Es gilt

$$G/\text{Perf}(G) \text{ ist trivial} \iff G = \text{Perf}(G) \iff G \text{ ist perfekt.}$$

(ii)

Lemma 15. *Ist $N \trianglelefteq G$ eine normale Untergruppe, so ist G/N genau dann abelsch, wenn $[G, G] \leq N$.*

Beweis. Es gilt

$$\begin{aligned} G/N \text{ ist abelsch} &\iff \overline{gh} = \overline{hg} \text{ f\"ur alle } g, h \in G \\ &\iff \overline{ghg^{-1}h^{-1}} = 1 \text{ f\"ur alle } g, h \in G \\ &\iff \overline{ghg^{-1}h^{-1}} = 1 \text{ f\"ur alle } g, h \in G \\ &\iff \overline{[g, h]} = 1 \text{ f\"ur alle } g, h \in G \\ &\iff [g, h] \in N \text{ f\"ur alle } g, h \in G \iff [G, G] \leq N. \quad \square \end{aligned}$$

Somit gilt

$$G/\text{Perf}(G) \text{ ist abelsch} \iff [G, G] \leq \text{Perf}(G).$$

Ist nun $[G, G]$ perfekt, so gilt $[G, G] \leq \text{Perf}(G)$. Gilt andererseits $[G, G] \leq \text{Perf}(G)$, so gilt wegen $\text{Perf}(G) \leq [G, G]$ (siehe Aufgabenteil (b)) bereits $[G, G] = \text{Perf}(G)$. Insbesondere ist $[G, G]$ dann perfekt.