

Anmerkungen und Lösungen zu
Einführung in die Algebra
Blatt 2

Jendrik Stelzner

Letzte Änderung: 4. November 2017

Aufgabe 4

(a)

Bemerkung 1. Für Permutationen in Zykelschreibe 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

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

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

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

Dies gilt aber nicht, da

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

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

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

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. Diese 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

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

Alle Untergruppen

Es gilt zunächst zu zeigen, dass die Abbildung

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

eine wohldefinierte Bijektion ist.

Die Abbildung ψ 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

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

Die Abbildung ψ' ist wohldefiniert:

Lemma 3. *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 von links auf H/W durch $h \cdot \bar{h}' := \overline{h h'}$, und es gilt

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

Über φ lässt sich diese Gruppenwirkung zu einer Linkswirkung von G auf H/W mit $g \cdot \bar{h} := \overline{\varphi(g) \cdot h} = \overline{\varphi(g) h}$ zurückziehen. Dies lässt sich auf (mindestens) zwei Weisen sehen:

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

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

- Die Gruppenwirkung von H auf H/W entspricht dem Gruppenhomomorphismus $\alpha: H \rightarrow S(H/W)$ mit $\alpha(h)(\bar{h}') = \overline{hh'}$. 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

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

Es folgt, dass

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

eine Untergruppe von G ist. □

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

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

weshalb $\psi \circ \psi' = \text{id}_H$.

Lemma 4. *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 $U \subseteq \varphi^{-1}(\varphi(U))$ sowie $K = \varphi^{-1}(1) \subseteq \varphi^{-1}(\varphi(U))$, und somit gilt $UK \subseteq \varphi^{-1}(\varphi(U))$. 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 $g = u \cdot u^{-1}g$, wobei $u^{-1}g \in \ker \varphi$ da $\varphi(u^{-1}g) = \varphi(u)^{-1}\varphi(g) = 1$. □

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

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

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

Insgesamt zeigt dies, dass ψ eine Bijektion ist, und dass $\psi^{-1} = \psi'$.

Normale Untergruppen

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

Lemma 5. *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 $ghg^{-1} \in W$.

- 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

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

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

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

(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

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

- Da $\mathbb{Z}/12$ zyklisch ist, ist auch jeder Quotient von $\mathbb{Z}/12$ zyklisch. Für jede Untergruppe $H \leq \mathbb{Z}/12$ gilt deshalb

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

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 $[g, h] := ghg^{-1}h^{-1}$. Dann ist $[G, G] = \langle [g, h] \mid g, h \in G \rangle$.

Lemma 6. 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. 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 7. 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

$$\varphi([h_1, h_2]) = \varphi(h_1 h_2 h_1^{-1} h_2^{-1}) = \varphi(h_1) \varphi(h_2) \varphi(h_1)^{-1} \varphi(h_2)^{-1} = [\varphi(h_1), \varphi(h_2)]$$

2. Es gilt

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

□

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 8. 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
- 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 9. Für jede Untergruppe $H \leq G$ gilt $[H, H] \leq [G, G]$.

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

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

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

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 10. *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. Es gilt $[\varphi(P), \varphi(P)] = \varphi([P, P]) = \varphi(P)$. □

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

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

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 11. 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 8, 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 12. *Ist $N \trianglelefteq G$ eine normale Untergruppe, so ist G/N genau dann abelsch, wenn $[G, G] \leq N$.*

Beweis. Es gilt

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

Es 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 nach Aufgabenteil (b) auch $\text{Perf}(G) \leq [G, G]$ und somit $[G, G] = \text{Perf}(G)$; insbesondere ist $[G, G]$ dann perfekt.