

# EINFÜHRUNG IN DIE ALGEBRA

## BLATT 5

Jendrik Stelzner

17. November 2013

### Aufgabe 5.1.

(i)

Nach Definition von  $N_H$  ist  $gH = Hg$  für alle  $g \in N_H$ . Da  $x \in N_H$ , ist  $\langle x \rangle \subseteq N_H$  eine Untergruppe, also  $\langle x \rangle H = H \langle x \rangle$ . Es ist

$$1 = 1 \cdot 1 \in \langle x \rangle H,$$

und für  $a, b \in \langle x \rangle H$  mit  $a = x^n h$  und  $b = x^m \tilde{h}$  ist

$$ab^{-1} = x^n h \tilde{h}^{-1} x^{-m} \in \langle x \rangle H \langle x \rangle = \langle x \rangle \langle x \rangle H = \langle x \rangle H,$$

also  $\langle x \rangle H$  eine Untergruppe. Da  $\langle x \rangle, H \subseteq N_H$  ist  $\langle x \rangle H$  eine Untergruppe von  $N_H$ , also insbesondere von  $G$ .

(ii)

Angenommen, es ist  $N_H \neq H$ . Dann gibt es ein  $x \in N_H$  mit  $x \notin H$ . Wie oben gezeigt ist  $\langle x \rangle H$  eine Untergruppe von  $N_H$ . Offenbar ist  $H \subsetneq \langle x \rangle H$  eine echte Untergruppe, und da  $H$  normal in  $N_H$  ist, ist  $H$  auch normal in  $\langle x \rangle H$ . Auch ist

$$\langle x \rangle H / H \cong \langle x \rangle / H \cap \langle x \rangle$$

zyklisch, da  $\langle x \rangle$  zyklisch ist, und somit insbesondere abelsch. Da  $H$  auflösbar ist, gibt es eine Normalreihe

$$1 = H_0 \subsetneq H_1 \subsetneq \dots \subsetneq H_n = H$$

mit abelschen Faktoren. Da  $\langle x \rangle H / H$  abelsch ist, ist daher

$$1 = H_0 \subsetneq H_1 \subsetneq \dots \subsetneq H_n \subsetneq H_{n+1} =: \langle x \rangle H$$

eine Normalreihe von  $\langle x \rangle H$  mit abelschen Faktoren. Das steht aber im Widerspruch zur maximalen Auflösbarkeit von  $H$ , da  $H$  eine echte Untergruppe von  $\langle x \rangle H$  ist. Also ist bereits  $N_H = H$ .

## Aufgabe 5.2.

(i)

**Bemerkung 1.** Sei  $n \geq 2$ . Dann ist  $(\mathfrak{S}_n : \mathfrak{A}_n) = 2$ . Insbesondere ist  $\mathfrak{A}_n$  normal in  $\mathfrak{S}_n$  (dies folgt auch aus  $\mathfrak{A}_n = \text{Ker sgn}$ ).

*Beweis.* Sei  $\tau = \begin{pmatrix} 1 & 2 \end{pmatrix} \in \mathfrak{S}_n$  und  $\varphi$  die Linkstranslation mit  $\tau$ . Aufgrund der Injektivität von  $\varphi$  induziert  $\varphi$  eine injektive Abbildung von der Menge aller gerader Permutationen  $\mathfrak{A}$  in die Menge aller ungerader Permutationen  $\mathfrak{S}_n - \mathfrak{A}$ , sowie auch eine injektive Abbildung von  $\mathfrak{S}_n - \mathfrak{A}$  nach  $\mathfrak{A}$ . Es ist daher

$$\text{ord } \mathfrak{A}_n \leq |\mathfrak{S}_n - \mathfrak{A}_n| \leq \text{ord } \mathfrak{A}_n,$$

also  $\text{ord } \mathfrak{A}_n = |\mathfrak{S}_n - \mathfrak{A}_n|$  und somit  $\text{ord } \mathfrak{S}_n = 2 \text{ ord } \mathfrak{A}_n$ .  $\square$

Sei  $\sigma \in H$  eine ungerade Permutation. Es ist  $H\mathfrak{A}_n = \mathfrak{S}_n$ : Da  $\mathfrak{A}_n \subseteq H\mathfrak{A}_n$  enthält  $H\mathfrak{A}$  alle geraden Permutationen. Jede ungerade Permutation  $\pi \in \mathfrak{S}_n$  lässt sich als

$$\pi = \sigma \cdot \sigma\pi$$

schreiben, wobei  $\sigma \in H$  und  $\sigma\pi$  als Produkt zweier ungerader Permutationen gerade ist, also in  $\mathfrak{A}_n$  ist. Also ist  $\pi \in H\mathfrak{A}_n$ .

Nach Bemerkung 1 ist  $\mathfrak{A}_n$  normal in  $\mathfrak{S}_n$  mit  $(\mathfrak{S}_n : \mathfrak{A}_n) = 2$ . Also ist  $\mathfrak{A}_n \cap H$  normal in  $H$  mit

$$H/\mathfrak{A}_n \cap H \cong H\mathfrak{A}_n/\mathfrak{A}_n = \mathfrak{S}_n/\mathfrak{A}_n.$$

Insbesondere ist daher

$$(H : \mathfrak{A}_n \cap H) = \text{ord } H/\mathfrak{A}_n \cap H = \text{ord } \mathfrak{S}_n/\mathfrak{A}_n = (\mathfrak{S}_n : \mathfrak{A}_n) = 2.$$

(ii)

Da  $\text{ord } H > 2$  enthält  $H$  eine  $\pi \neq \text{id}$  gerader Ordnung: Da  $H$  nichttrivial ist, gibt es ein  $\sigma \in H$  mit  $\sigma \neq \text{id}$ . Ist  $\sigma$  gerade, so sei  $\pi := \sigma$ . Ist  $\sigma$  ungerade so wird zwischen zwei Fällen unterschieden: Ist  $\sigma$  nicht selbstinvers, so sei  $\pi := \sigma^2$ . Ist  $\sigma$  selbstinvers, so muss  $H$  wegen  $\text{ord } H > 2$  noch ein weiteres Element  $\tau \in H - \{\text{id}, \sigma\}$  beinhalten. Wiederholt man die oberen Schritte für  $\tau$ , so findet man entweder ein entsprechendes Element  $\pi$  oder auch  $\tau$  ist selbstinvers. Sind  $\sigma$  und  $\tau$  selbstinvers, so sei  $\pi := \sigma\tau$ .

Es folgt, dass  $H \cap \mathfrak{A}_n \supseteq \{\text{id}, \pi\}$  nichttrivial ist. Da  $\mathfrak{A}_n$  normal in  $\mathfrak{S}_n$  ist, ist  $H \cap \mathfrak{A}_n$  normal in  $H$ . Da  $H$  einfach ist, folgt, dass  $H \cap \mathfrak{A}_n = H$  ist. Also ist  $H \subseteq \mathfrak{A}_n$  eine Untergruppe.

## Aufgabe 5.3.

**Bemerkung 2.** Sei  $R$  ein Ring mit mindestens zwei Elementen. Dann ist sind Null- und Einselement in  $R$  verschieden.

*Beweis.* Da  $R$  mindestens zwei Elemente besitzt, gibt es ein  $a \in R$  mit  $a \neq 0$ . Es ist

$$1 \cdot a = a \neq 0 = 0 \cdot a,$$

also  $0 \neq 1$ .  $\square$

**Bemerkung 3.** Sei  $R$  ein Integritätsring. Gibt es für  $b \in R$  ein  $a \in R$  mit  $a \neq 0$  und  $ab = a$  oder  $ba = a$ , so ist bereits  $b = 1$ . Insbesondere gilt für jede Ringerweiterung  $R' \subseteq R$  mit  $R' \neq 0$ , dass  $R'$  genau dann ein Einselement beinhaltet, wenn  $1 \in R'$ .

*Beweis.* Da  $a \neq 0$  impliziert die Nullteilerfreiheit von  $R$  direkt die Injektivität der Links-, bzw. Rechtsmultiplikation mit  $a$ . Da  $1 \cdot a = a = a \cdot 1$  ist daher  $b = 1$ .  $\square$

Nach Aufgabenstellung ist  $R$  ein kommutativer Ring mit Einselement. Da  $R$  mindestens zwei Elemente besitzt folgt aus Bemerkung 2, dass  $0 \neq 1$ . Es gilt also nur noch zu zeigen, dass es für jedes  $a \in R$  mit  $a \neq 0$  ein multiplikativ Inverses  $b \in R$  mit  $ab = 1$  gibt.

Sei  $a \in R$  mit  $a \neq 0$  beliebig aber fest und  $\mathfrak{a} := (a)$  das von  $a$  erzeugte Ideal in  $R$ . Da  $a \in \mathfrak{a}$  ist  $a \neq 0$ , und es gilt bereits  $\mathfrak{a} = R$ : Als Ideal ist  $\mathfrak{a}$  eine additive Untergruppe von  $R$  sowie unter der Multiplikation abgeschlossen, wobei sich Assoziativität, Kommutativität und Distributivität der Multiplikation von  $R$  auf  $\mathfrak{a}$  vererben. Aus der entsprechenden Eigenschaft von  $R$  folgt, dass  $\mathfrak{a}$  ein Ring mit Einselement bildet. Aus Bemerkung 3 folgt damit, dass  $1 \in \mathfrak{a}$ , und daher bereits  $\mathfrak{a} = R$ . Da  $aR = \mathfrak{a} = R$  gibt es insbesondere ein  $b \in R$  mit  $ab = 1$ .

## Aufgabe 5.4.

(ii)

Für alle  $a \in R$  ist

$$a^2 + 1 = a + 1 = (a + 1)^2 = a^2 + 2a + 1,$$

also  $2a = 0$ . Insbesondere ist  $a = -a$ .

(i)

Für alle  $a, b \in R$  ist

$$ab - ba = ab + ba = (a + b)^2 - a^2 - b^2 = a + b - a - b = 0,$$

also  $ab = ba$ , und daher  $R$  kommutativ.

(iii)

Seien  $a, b \in R$  mit  $a \neq b$ . Es ist

$$(a - b)ab = a^2b - ab^2 = ab - ab = 0.$$

Da  $a \neq b$  ist  $a - b \neq 0$ , wegen der Nullteilerfreiheit von  $R$  also  $ab = 0$ . Wegen der Nullteilerfreiheit ist also  $a = 0$  oder  $b = 0$ . Aus der Beliebigkeit von  $a$  und  $b$  folgt, dass es neben 0 nur ein weiteres Element in  $R$  gibt. Da aus Bemerkung 2 folgt, dass  $0 \neq 1$ , ist also  $R = \{0, 1\}$ . Betrachtet man die Verknüpfungstabellen von  $R$ ,

+	0	1
0	0	1
1	1	0

und

·	0	1
0	0	0
1	0	1

,

so ist  $R$  offenbar isomorph zu  $\mathbb{F}_2$ .

## Aufgabe 5.5.

(i)

Es bezeichne

$$\mathfrak{a}[X] := \left\{ f \in R[X] : f = \sum_{i=0}^n a_i X^i \text{ mit } n \geq 0, a_i \in \mathfrak{a} \text{ für alle } i \right\}$$

die Menge aller Polynome in  $R[X]$  mit Koeffizienten in  $\mathfrak{a}$ . Da  $\mathfrak{a}$  als Ideal abgeschlossen unter Addition ist, ist es auch  $\mathfrak{a}[X]$ . Das von  $\mathfrak{a}$  in  $R[X]$  erzeugte Ideal  $\mathfrak{b}$  hat die Form

$$\mathfrak{b} = \sum_{a \in \mathfrak{a}} aR[X] = \sum_{a \in \mathfrak{a}} \{af : f \in R[X]\}$$

Sei  $f \in \mathfrak{a}[X]$ . Dann hat  $f$  die Form  $f = \sum_{i=0}^n a_i X^i$  mit  $a_i \in \mathfrak{a}$  für alle  $i$ . Es ist  $a_i X^i \in a_i R[X]$  für alle  $i$ , und daher  $f \in \sum_{i=0}^n a_i R[X] \subseteq \mathfrak{b}$ . Also ist  $\mathfrak{a}[X] \subseteq \mathfrak{b}$ . Sei  $a \in \mathfrak{a}$  und  $f \in aR[X]$ . Dann hat  $f$  die Form  $f = \sum_{i=0}^n (aa_i) X^i$  mit  $a_i \in R$  für alle  $i$ . Da  $a \in \mathfrak{a}$  und  $\mathfrak{a}$  ein Ideal ist, ist  $aa_i \in \mathfrak{a}$  für alle  $i$ . Es ist daher  $f \in \mathfrak{a}[X]$ . Also ist  $aR[X] \subseteq \mathfrak{a}[X]$  für alle  $a \in \mathfrak{a}$ . Da  $\mathfrak{a}[X]$  abgeschlossen unter Addition ist, ist daher auch  $\mathfrak{b} = \sum_{a \in \mathfrak{a}} aR[X] \subseteq \mathfrak{a}[X]$ .

(ii)

**Lemma 4.** Seien  $R, R'$  Ringe und  $\phi : R \rightarrow R'$  ein Ringhomomorphismus. Dann induziert  $\phi$  einen Ringhomomorphismus  $\psi : R[X] \rightarrow R'[X]$  mit

$$\psi \left( \sum_{i=0}^n a_i X^i \right) := \sum_{i=0}^n \phi(a_i) X^i.$$

Dabei ist

$$\text{Ker } \psi = \left\{ f \in R[X] : f = \sum_{i=0}^n a_i X^i \text{ mit } n \geq 0 \text{ und } a_i \in \text{Ker } \phi \text{ für alle } i \right\}$$

und

$$\text{Im } \psi = \left\{ g \in R'[X] : g = \sum_{i=0}^n b_i X^i \text{ mit } n \geq 0 \text{ und } b_i \in \text{Im } \phi \text{ für alle } i \right\}.$$

Insbesondere ist  $\psi$  genau dann injektiv, wenn  $\phi$  injektiv ist, und  $\psi$  genau dann surjektiv, wenn  $\phi$  surjektiv ist.

*Beweis.* Es gilt zunächst zu zeigen, dass  $\psi$  ein Ringhomomorphismus ist. Hierfür bemerken wir, dass sich  $\psi$  auch als

$$\psi : R[X] \rightarrow R'[X], f \mapsto \phi \circ f = \phi f$$

schreiben lässt, indem  $f \in R[X]$  als Abbildung  $f : \mathbb{N} \rightarrow R$  gesehen wird. Da  $\phi$  ein Ringhomomorphismus ist und die Addition in  $R[X]$  komponentenweise verläuft, ist für alle  $f, g \in R[X]$

$$\psi(f + g) = \phi(f + g) = \phi f + \phi g = \psi(f) + \psi(g).$$

Auch ist für alle  $i \in \mathbb{N}$

$$\begin{aligned}\psi(f \cdot g)(i) &= \phi(f \cdot g)(i) = \phi\left(\sum_{\mu+\nu=i} f(\mu) \cdot g(\nu)\right) \\ &= \sum_{\mu+\nu=i} (\phi f)(\mu) \cdot (\phi g)(\nu) = ((\phi f) \cdot (\phi g))(i) = (\psi(f) \cdot \psi(g))(i),\end{aligned}$$

also  $\psi(f \cdot g) = \psi(f) \cdot \psi(g)$ .  $\psi$  ist auch unitär, da

$$\psi(1) = \psi(1 \cdot X^0) = \phi(1) \cdot X^0 = 1 \cdot X^0 = 1.$$

Dies zeigt, dass  $\psi$  ein Ringhomomorphismus ist.

Es ist  $f = \sum_{i=0}^n a_i X^i \in R[X]$  genau dann in  $\text{Ker } \psi$ , wenn  $\psi(f) = 0$ , also  $\phi(a_i) = 0$  für alle  $i$ , also  $a_i \in \text{Ker } \phi$  für alle  $i$ .

Andererseits ist  $g = \sum_{i=0}^n b_i X^i \in R[X]$  genau dann in  $\text{Im } \psi$ , wenn es ein  $f = \sum_{i=0}^n a_i X^i \in R[X]$  mit  $\psi(f) = g$  gibt, also  $\phi(a_i) = b_i$  für alle  $i$ , also  $b_i \in \text{Im } \phi$  für alle  $i$ .  $\square$

Es sei  $\pi : R \twoheadrightarrow R/\mathfrak{a}$  die kanonische Projektion. Da  $\pi$  ein Ringepimorphismus ist, folgt aus Lemma 4, dass  $\pi$  einen Ringepimorphismus  $\psi : R[X] \twoheadrightarrow (R/\mathfrak{a})[X]$  induziert. Auch folgt wegen  $\text{Ker } \pi = \mathfrak{a}$  aus dem Lemma, dass  $\text{Ker } \psi$  genau aus den Polynomen besteht, deren Koeffizienten alle in  $\mathfrak{a}$  liegen, also  $\mathfrak{a}[X]$ ; wie im vorherigen Aufgabenteil gezeigt, ist dies gerade  $\mathfrak{b}$ . Es ist daher

$$R[X]/\mathfrak{b} = R[X]/\text{Ker } \psi \cong \text{Im } \psi = (R/\mathfrak{a})[X].$$