

MITSCHRIEB

Algebra und Zahlentheorie

Emma Bach

Basierend auf:

Vorlesung Algebra und Zahlentheorie von
Prof. Dr. Wolfgang SOERGEL

2026-01-16

Inhalt

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Elementare Zahlentheorie | 2 |
| 1.1 | Primzahlen | 2 |
| 2 | Gruppen | 6 |
| 2.1 | Erste Versuche der Klassifikation | 6 |
| 2.2 | Gruppenoperationen und Kongruenzklassen | 17 |
| 2.3 | Kompositionsreihen | 22 |
| 2.4 | p -Gruppen und Sylowsätze | 23 |
| 3 | Ringe | 27 |
| 3.1 | Grundbegriffe | 27 |
| 3.2 | Polynomringe | 32 |
| 3.3 | Irreduzible Elemente und Faktorielle Ringe | 35 |
| 3.4 | Gaußprimzahlen und Summen zweier Quadrate | 38 |
| 3.5 | Bruchkörper, Bewertungen und Primfaktorzerlegung in Polynomringen | 40 |
| 3.6 | Kreisteilungspolynome | 43 |
| 3.7 | Symmetrische Polynome | 45 |
| 4 | Körper | 47 |
| 4.1 | Körpererweiterungen | 47 |
| 4.2 | Konstruktionen mit Zirkel und Lineal | 50 |
| 4.3 | Endliche Körper | 51 |
| 4.4 | Zerfallungskörper | 55 |
| 4.5 | Vielfachheit von Nullstellen | 56 |
| A | Axiomatik der Natürlichen Zahlen | 59 |
| A.1 | Die Ganzen Zahlen | 60 |
| A.2 | Die Reellen Zahlen | 61 |

Chapter 1

Elementare Zahlentheorie

1.1 Primzahlen

Definition 1.1.1. $H \subseteq \mathbb{Z}$ heißt Untergruppe von \mathbb{Z} , wenn

$$n \in H \implies -n \in H,$$

und

$$m, n \in H \implies m + n \in H$$

Satz 1.1.2. *Es gibt eine Bijektion*

$$\begin{aligned} \mathbb{N} &\leftrightarrow \{\text{Untergruppen von } (\mathbb{Z}, +)\} \\ n &\mapsto n\mathbb{Z} \end{aligned}$$

Beweis. Sei $H \subseteq \mathbb{Z}$ eine Untergruppe. Entweder $H = \{0\} = 0\mathbb{Z}$, oder $H \neq \{0\}$.

Sei also $H \neq \{0\}$. Dann gibt es ein kleinstes Element m der Menge $\{n \in H \mid n > 0\}$. Aus den Untergruppenaxiomen folgt $m\mathbb{Z} \subseteq H$. Gleichzeitig kann kein Element $n \notin m\mathbb{Z}$ in H enthalten sein, denn sonst wäre auch $r = n \bmod m \neq 0$ in H enthalten. Dann hätten wir aber $r < m$, was ein Widerspruch ist.

Als Umkehrfunktion wählen wir das kleinste positive Element von H . □

Definition 1.1.3. Eine **Primzahl** ist eine natürliche Zahl $p \in \mathbb{N}_{\geq 2}$, die nicht als Produkt zweier Zahlen $a, b < p$ geschrieben werden kann.

Satz 1.1.4. *Es gibt unendlich viele Primzahlen.*

Beweis. Angenommen, es gäbe endlich viele Primzahlen. Sei also p_1, \dots, p_r eine vollständige Liste aller Primzahlen. Dann wäre aber

$$q = 1 + \prod_{i=1}^r p_i$$

durch keine Primzahl teilbar, also selbst eine Primzahl. Widerspruch! \square

Satz 1.1.5. Jede Zahl $n \in \mathbb{N}$ kann als Produkt von Primzahlen geschrieben werden:

$$n = p_1 \cdot \dots \cdot p_r \quad (r \geq 0)$$

Beweis. Der Fall $n = 1$ gilt per Konvention durch das leere Produkt.

Sei $n \geq 2$ gegeben. Es gilt entweder:

- n ist eine Primzahl.
- n ist von der Gestalt $n = a \cdot b$, mit $a, b < n$.

Der Satz folgt durch Induktion über die entstehende Baumstruktur - nach Induktionsannahme haben a und b eine Primfaktorzerlegung. Also hat auch n eine Primfaktorzerlegung. \square

Definition 1.1.6. Der **größte gemeinsame Teiler** von $a, b \in \mathbb{Z}$ mit $a \neq 0$ oder $b \neq 0$ ist die Zahl:

$$\text{ggT}(a, b) = \max\{d \in \mathbb{N} : d \mid a \wedge d \mid b\}$$

Satz 1.1.7. Über den größten gemeinsamen Teiler: Seien $a, b \in \mathbb{Z}$. So gibt es $r, s \in \mathbb{N}$ mit

$$\text{ggT}(a, b) = ra + sb$$

Gegeben $d \mid a$ und $d \mid b$ gilt außerdem $d \mid \text{ggT}(a, b)$.

Beweis. Die Menge

$$H := \{ra + sb \mid r, s \in \mathbb{Z}\} = a\mathbb{Z} + b\mathbb{Z}$$

bildet eine Untergruppe von \mathbb{Z} , ist also eine Gruppe der Form $m\mathbb{Z}$ mit $m > 0$. Da $a \in m\mathbb{Z}$ und $b \in m\mathbb{Z}$ ist m ein gemeinsamer Teiler. Da m ein Element in H ist existiert außerdem per Definition eine Darstellung $m = r'a + s'b$. Es gilt also

$$(d \mid a) \wedge (d \mid b) \implies d \mid r'a + s'b \implies d \mid m.$$

Aus $(d \mid a) \wedge (d \mid b) \implies d \mid m$ folgt nun, dass jeder Teiler von a und b m teilt, also kann es keinen Teiler von a und b geben, welcher größer als m ist. \square

Die Existenz der Darstellung $\text{ggT}(a, b) = ra + sb$ ist auch als das **Lemma von Bézout** oder die **Bézoutsche Identität** bekannt.

Lemma 1.1.8. Lemma von Euklid: Sei p eine Primzahl und $a, b \in \mathbb{Z}$. Dann gilt:

$$p \mid ab \implies (p \mid a) \vee (p \mid b)$$

Beweis. Es reicht zu Zeigen:

$$(p \nmid a) \wedge (p \mid ab) \implies p \mid b$$

Aus $p \nmid a$ folgt $\text{ggT}(p, a) = 1$. Nach dem Lemma von Bézout können wir also 1 darstellen als:

$$1 = rp + sa$$

also:

$$b = rpb + sab$$

Es gilt trivial $p \mid rpb$, außerdem gilt per Annahme $p \mid ab$. Es folgt $p \mid rpb + sab = b$. \square

Satz 1.1.9. Eindeutigkeit der Primfaktorzerlegung im Ring \mathbb{Z} : Sei $n \in \mathbb{N}_{\geq 1}$ und

$$n = \prod_{i=1}^r p_i = \prod_{i=1}^s q_i$$

wobei alle q_i und r_i Primzahlen sind. So gilt $r = s$ und es gilt eine Permutation $\sigma \in S_r$ mit $p_i = q_{\sigma(i)}$.

Äquivalente Formulierungen:

- Falls die p_i und q_i Aufsteigend oder Absteigend sortiert sind, gilt $\forall i : p_i = q_i$
- Es existiert eine Bijektion zwischen endlichen Multimengen von Primzahlen und $\mathbb{N}_{\geq 1}$.

Beweis. Per Induktion folgt aus dem Lemma von Euklid schnell:

$$p_1 \mid p_1 \implies \bigvee_{i=1}^s p_1 \mid q_i$$

Also existiert ein q_i mit $p_1 = q_i$. Teilen wir nun beide Seiten durch p_1 , folgt die Aussage durch die Induktionsannahme. \square

Definition 1.1.10. Euklidischer Algorithmus

Chapter 2

Gruppen

Definition 2.0.1.

1. Eine Menge M mit Verknüpfung $\top : M \times M \rightarrow M$ heißt **Magma**.
2. Ein Magma mit neutralem Element heißt **unitäres Magma**.
3. Ein unitäres Magma mit assoziativer Verknüpfung heißt **Monoid**.
4. Ein Monoid mit inversen Elementen heißt **Gruppe**.
5. Eine Gruppe mit kommutativer Gruppe heißt **kommutative Gruppe** oder **abelsche Gruppe**.

Beispiel 2.0.2.

1. $(\mathbb{Z}, -)$ ist ein nichtunitäres Magma.
2. ?
3. $(\mathbb{N}, +)$ und (\mathbb{N}, \cdot) sind Monoide.
4. $(\mathbb{Z}, +)$ ist eine abelsche Gruppe.

Satz 2.0.3. *Das neutrale Element einer Gruppe ist eindeutig.*

- Es gibt keine Gruppe mit 0 Elementen, da die Leere Menge kein neutrales Element hat.
- Es gibt genau eine Gruppe mit einem Element, die Gruppe $\{e\}$.

2.1 Erste Versuche der Klassifikation

Satz 2.1.1. *Es gibt genau eine Gruppe mit zwei Elementen, nämlich die Gruppe $\{e, a\}$, mit Verknüpfungstabelle:*

| | | |
|-----|-----|-----|
| | e | a |
| e | e | a |
| a | a | e |

Beweis. Durch die Definition von e sind drei Teile der Tabelle schon eindeutig festgelegt. $a \cdot a = e$, da sonst a kein Inverses hätte. \square

Satz 2.1.2. *Gilt für ein Gruppenelement $a \in G$ $a^2 = a$, so gilt $a = e$.*

Beweis.

$$a = ae = aaa^{-1} = aa^{-1} = e$$

\square

Satz 2.1.3. *Aus $a \cdot x = a \cdot y$ folgt $x = y$.*

Beweis.

$$\begin{aligned} ax &= ay \\ a^{-1}ax &= a^{-1}ay \\ ex &= ey \\ x &= y \end{aligned}$$

\square

Es folgt, dass in einer Gruppentabelle in jeder Spalte und jeder Zeile kein Element doppelt vorkommen kann.

Korollar 2.1.4. *Es gibt nur eine Gruppe mit drei Elementen, nämlich:*

| | e | a | b |
|-----|-----|-----|-----|
| e | e | a | b |
| a | a | b | e |
| b | b | e | a |

Satz 2.1.5. *Es gibt zwei Gruppen mit vier Elementen, nämlich:*

| | e | a | b | c |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| e | e | a | b | c |
| a | a | e | c | b |
| b | b | c | a | e |
| c | c | b | e | a |

 $\simeq (\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}) \times (\mathbb{Z}/2\mathbb{Z})$

| | e | a | b | c |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| e | e | a | b | c |
| a | a | b | c | e |
| b | b | c | e | a |
| c | c | e | a | b |

 $\simeq \mathbb{Z}/4\mathbb{Z}$

Definition 2.1.6. Ein Gruppenhomomorphismus ist eine Abbildung

$$\varphi : (G, \top) \rightarrow (H, \perp)$$

mit

$$\varphi(a \top b) = \varphi(a) \perp \varphi(b)$$

Wir schreiben die Menge der Gruppenhomomorphismen von G nach H als $\text{Grp}(G, H)$.

Satz 2.1.7. $\text{Grp}((\mathbb{Z}, +), G) \simeq G$

Beweis. Ordne jedem Gruppenelement g die Abbildung $\varphi(n) : g \rightarrow g^n$ zu. \square

Satz 2.1.8. *Sind G und H Gruppen, so gilt $\text{Mag}(G, H) = \text{Mon}(G, H) = \text{Grp}(G, H)$.*

Definition 2.1.9. Eine Teilmenge $H \subseteq G$ einer Gruppe G heißt **Untergruppe**, wenn sie so mit einer Gruppenstruktur versehen werden kann, dass die Einbettungsabbildung $i : H \rightarrow G$ ein Gruppenhomomorphismus ist.

Dies ist eine sehr allgemeine Definition, die analog für Untervektorräume, Untermagmas etc. funktioniert. In der Praxis verwendet man meistens folgendes Kriterium:

Satz 2.1.10. *H ist genau dann eine Untergruppe, wenn $e \in H$ und wenn für jedes $a, b \in H$ auch $ab \in H$ und $a^{-1}, b^{-1} \in H$.*

Satz 2.1.11. Satz von Lagrange: *Sei G eine endliche Gruppe und H eine Untergruppe. So ist die Zahl der Elemente von H ein Teiler der Zahl der Elemente von G .*

Der Beweis folgt nach einigen weiteren Definitionen und Sätzen.

Definition 2.1.12. Sei G eine Gruppe mit Untergruppe H . Wir definieren:

$$gH = \{gh \mid h \in H\} \subseteq G$$

$$G/H = \{gH \mid g \in G\} \subseteq \mathcal{P}(G)$$

Lemma 2.1.13. Sei $h \in H$. Dann gilt $hH = H$.

Lemma 2.1.14. Je zwei Nebenklassen gH und $g'H$ sind entweder gleich oder disjunkt.

Aus diesen beiden Lemmas folgt $|G| = |G/H| \cdot |H|$, was den Satz von Lagrange impliziert.

Satz 2.1.15. Der Schnitt beliebig vieler Untergruppen bildet eine Untergruppe.

Definition 2.1.16. Sei G eine Gruppe und $T \subseteq G$ eine Teilmenge. Die **durch T erzeugte Untergruppe** $\langle T \rangle$ ist die kleinste Untergruppe, welche T enthält.

$\langle T \rangle$ besteht aus allen Elementen von G , welche durch beliebig häufige Anwendung von Inversionen und Gruppenoperationen entstehen kann, wobei wir die "leere Gruppenoperation" als e definieren (für den Fall $\langle \emptyset \rangle = \{e\}$.)

Satz 2.1.17. Sei $\varphi : G \rightarrow H$ ein Gruppenhomomorphismus. Sei A eine Untergruppe von G und B eine Untergruppe von H . So ist $\varphi(A)$ eine Untergruppe von H und $\varphi^{-1}(B)$ eine Untergruppe von G .

Satz 2.1.18. Universelle Eigenschaft surjektiver Gruppenhomomorphismen:

Sei $\varphi : G \twoheadrightarrow H$ ein surjektiver Gruppenhomomorphismus. Sei $\psi : G \rightarrow K$ ein Gruppenhomomorphismus, sodass $\ker \psi \supseteq \ker \varphi$. So existiert genau ein Gruppenhomomorphismus $\bar{\psi}$, sodass:

$$\psi = \bar{\psi} \circ \varphi$$

Also sodass das folgende Diagramm kommutiert:

$$\begin{array}{ccc} G & \xrightarrow{\varphi} & H \\ & \searrow \psi & \downarrow \exists! \bar{\psi} \\ & & K \end{array}$$

Beweis. Sei $\varphi(x) = \varphi(y)$, also $\varphi^{-1}(\varphi(x)) = \varphi^{-1}(\varphi(y))$. Dann gilt

$$\varphi(xy^{-1}) = \varphi(1) = 1,$$

also $xy^{-1} \in \ker \varphi$, also $y \in x \cdot \ker \varphi$. Somit gilt

$$\varphi^{-1}(\varphi(g)) = g \cdot \ker \varphi.$$

Es gilt außerdem

$$\psi(g \cdot \ker \varphi) = \psi(g) \cdot \psi(\ker \varphi) = \varphi(g),$$

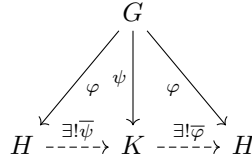
also ist ψ konstant auf den Fasern (also den Urbildern einzelner Elemente) von φ . Somit existiert ein $\bar{\psi}$ aufgrund der "universellen Eigenschaft surjektiver Funktionen", welche noch nicht eingeführt wurde :), folgt die Existenz eines $\bar{\psi}$ mit den gefragten Eigenschaften.

Zu zeigen ist noch, dass $\bar{\psi}$ ein Gruppenhomomorphismus ist.

Wähle hierfür $g \in G, g' \in G$ und $\varphi(g) = h$ und $\varphi(g') = h'$. Dann gilt

$$\bar{\psi}(hh') = \bar{\psi}(\varphi(gg')) = \psi(gg') = \psi(g) \cdot \psi(g') = \bar{\psi}(h) \cdot \bar{\psi}(h')$$

□



Die "Moral" dieses Satzes: Ein surjektiver Gruppenhomomorphismus $\varphi : G \twoheadrightarrow H$ wird durch $(G, \ker \varphi)$ "im wesentlichen eindeutig" festgelegt.

Die Frage ist nun, ob jede Untergruppe einer Gruppe G als Kern eines surjektiven Gruppenhomomorphismus festgelegt ist. Die Antwort auf diese Frage: Nein! Die einzigen Untergruppen, welche als solche Kerne auftreten, sind sogenannte **Normalteiler**.

Definition 2.1.19. Sei G eine Gruppe. Eine Untergruppe $N \subseteq G$ heißt **Normalteiler**, falls

$$\forall g \in G : gN = Ng$$

Beispiel 2.1.20. Wir betrachten die Gruppe $Q \subset GL(2, \mathbb{R})$ aller linearen Abbildungen, welche ein Quadrat auf sich selbst abbilden. Prof. Soergel nennt diese Gruppe auch gerne die "Bierdeckelgruppe B ". Die Gruppe hat acht Elemente:

- Die Rotationen d_0, d_1, d_2 und d_3 um Vielfache von 90° ,
- die Spiegelungen s_x und s_y an den Koordinatenachsen,
- und die Spiegelungen s_+ und s_- an den Diagonalachsen.

Diese Gruppe ist nicht kommutativ! Zum Beispiel ist $d_1 s_+ = s_y$, aber $s_+ d_1 = s_x$ (Wir notieren die Elemente als Abbildungen, also wird links zuerst s_+ und dann d_1 angewandt).

Wir betrachten nun die Untergruppe $H = \langle s_+ \rangle$. So gilt $d_1 H = \{s_y, d_1\}$, aber $H d_1 = \{s_x, d_1\}$

Satz 2.1.21. Der Kern eines Gruppenhomomorphismus ist immer ein Normalteiler.

Beweis. Sei $\varphi : G \rightarrow H$. So ist $(\ker \varphi)x = \varphi^{-1}(\varphi(x)) = x(\ker \varphi)$.

□

Satz 2.1.22. Für jeden Normalteiler $N \subseteq G$ gibt es einen surjektiven Gruppenhomomorphismus $\varphi : G \rightarrow H$ mit $\ker \varphi = N$.

Beweis. Wir wählen $H := G/N = \{xN : x \in G\}$. Für je zwei Teilmengen $A, B \subseteq G$ definieren wir $AB = \{ab : a \in A, b \in B\}$ und erhalten eine assoziative Verknüpfung auf $\mathcal{P}(G)$. Für einen Normalteiler $N \subseteq G$ ist G/N unter dieser Verknüpfung stabil (geschlossen), denn durch Abuse of Notation folgt $xNyN = xyNN = xyN$. Unter dieser Verknüpfung wird G/N eine Gruppe mit neutralem Element $1N = N$ und $x^{-1}N = (xN)^{-1}$.

Dadurch wird dann $\varphi : G \rightarrow G/N, x \rightarrow xN$ ein Gruppenhomomorphismus mit $\ker \varphi = N$. \square

Beispiel 2.1.23. Die Menge $D \subsetneq Q$ der Drehungen eines Quadrats ist ein Normalteiler der vollen Symmetriegruppe Q .

Beweis. Sei s eine Beliebige Spiegelung. So gilt $Ds = \{s_+, s_-, s_x, s_y\} = sD$. Einzelne Spiegelungen kommutieren also nicht mit einzelnen Gruppenelementen, es ist jedoch trotzdem eine Art "Kommutativität mit der Gruppe als Ganzes" vorhanden. \square

Die Menge der Drehungen ist desweiteren gegeben als der Kern der Determinante, welche ein Gruppenhomomorphismus in die Gruppe mit zwei Elementen ist (genauer in die Gruppe $\{\pm 1, \cdot\}$).

Satz 2.1.24. Sei $\varphi : G \rightarrow H$ ein Gruppenhomomorphismus. So induziert φ einen Isomorphismus $G/\ker \varphi \rightarrow \text{im } \varphi$.

Sei G eine Gruppe mit $|G| = 5$. Gemäß Lagrange hat G nur die triviale Gruppe und sich selbst als Untergruppe. Sei $g \in G \setminus \{1\}$. So haben wir einen Gruppenhomomorphismus

$$\begin{aligned} \varphi : (\mathbb{Z}, +) &\rightarrow G \\ n &\mapsto g^n \end{aligned}$$

Wir wissen nun, dass das Bild von φ eine Untergruppe von G bildet. Da $g \neq 1$ handelt es sich nicht um die triviale Gruppe, also ist $G = \text{im } \varphi$.

$\ker \varphi \subsetneq \mathbb{Z}$ ist eine Untergruppe, also existiert genau ein $n \in \mathbb{N}$, sodass $\ker \varphi = \mathbb{Z}n$. Da G 5 Elemente hat, muss $n = 5$. Die einzige Gruppe mit 5 Elementen ist also $\mathbb{Z}/5\mathbb{Z}$.

Korollar 2.1.25. Ist p eine Primzahl, so ist jede Gruppe mit p Elementen isomorph zu $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$.

Lemma 2.1.26. Sei $\pi : G \rightarrow H$ ein surjektiver Gruppenhomomorphismus und $N \subseteq G$ ein Normalteiler. So ist $\pi(N)$ ein Normalteiler von H .

Satz 2.1.27. Noetherscher Isomorphiesatz: Sei G eine Gruppe und seien H und K Normalteiler. So ist H/K ein Normalteiler von G/K und die Komposition kanonischer Abbildungen $G \twoheadrightarrow G/K \twoheadrightarrow (G/K)/(H/K)$ induziert einen Isomorphismus $G/H \rightarrow (G/K)/(H/K)$

Definition 2.1.28. Sei G eine Gruppe und $g \in G$. Wir definieren die Ordnung eines Elements als:

$$\text{ord}(g) = \inf\{n \in \mathbb{N}_{\geq 1} \mid g^n = e\}$$

Erinnerung: Das Infimum der leeren Menge ist ∞ , also gilt $\text{ord}(g) = \infty$ falls kein solches n existiert.

Proposition 2.1.29. Sei G eine Gruppe und $g \in G$.

1. $\text{ord}(g) = |\langle g \rangle|$
2. $\langle g \rangle$ ist isomorph zu $\mathbb{Z}/(\text{ord}(g))\mathbb{Z}$, falls die Ordnung endlich ist, und zu \mathbb{Z} , falls die Ordnung unendlich ist.
3. Falls $\text{ord}(g) < \infty$, so gilt $g^n = e \Leftrightarrow \text{ord}(g) \mid n$

Definition 2.1.30. Sei G eine Gruppe. So heißt $|G|$ die **Ordnung** der Gruppe.

Satz 2.1.31. Sei $g \in G$ ein Element einer endlichen Gruppe. So ist $\text{ord}(g)$ ein Teiler von $|G|$.

Beweis. $\text{ord}(g) = |\langle g \rangle|$. Nach Lagrange teilt die Größe der Untergruppe $\langle g \rangle$ die Größe der Gruppe G . □

Im Allgemeinen gibt es aber nicht für jeden Teiler ein Element mit der jeweiligen Ordnung. Zum Beispiel fehlt bei jeder nicht zyklischen Gruppe bereits die Ordnung selbst. Wohl aber gilt:

Satz 2.1.32. Cauchy: Sei p eine Primzahl mit $p \mid |G|$. So gibt es ein $g \in G$ mit $\text{ord}(g) = p$.

Ein Beweis folgt aber erst später.

Korollar 2.1.33. Sei $g \in G$ ein Element einer endlichen Gruppe. So gilt

$$g^{|G|} = e.$$

Beweis. $g^{|G|} = g^{r \cdot \text{ord}(g)} = e^r = e$. □

Satz 2.1.34. Kleiner Satz von Fermat: Sei p eine Primzahl und $a \in \mathbb{Z}$. So gilt

$$a^p \equiv a \pmod{p}$$

Beweis. Wir betrachten $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$. Falls $\alpha \equiv 0 \pmod{p}$ ist die Aussage trivial. Da außerdem die Multiplikative Gruppe die Ordnung $p-1$ hat gilt im Fall $\alpha \not\equiv 0$ ebenfalls trivial $\alpha^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$, also $\alpha^p \equiv \alpha \pmod{p}$. \square

Alternativ kann der Beweis auch auf "Allgemeinbildungsniveau" geführt werden:

Beweis. (Ohne Gruppentheorie): Sei $a \in \{0, \dots, p-1\}$. So sind die Zahlen $a, 2a, 3a, \dots, (p-1)a$ paarweise verschieden, also ist nach Schubfachprinzip ein Element jeder Restklasse \pmod{p} enthalten. Also gilt:

$$\prod_{k=1}^{p-1} ka \equiv \prod_{k=1}^{p-1} k \pmod{p}$$

$$\implies (p-1)!a^{p-1} \equiv (p-1)! \pmod{p}.$$

Allerdings ist $(p-1)!$ teilerfremd zu p , also können wir durch $(p-1)!$ teilen und erhalten $a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$. \square

Satz 2.1.35. Seien $a, b \in \mathbb{N}_{\geq 1}$ teilerfremd. So induziert

$$\begin{aligned} \varphi : \mathbb{Z} &\rightarrow \mathbb{Z}/a\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/b\mathbb{Z} \\ n &\mapsto (n + a\mathbb{Z}, n + b\mathbb{Z}) \end{aligned}$$

einen Isomorphismus:

$$\mathbb{Z}/ab\mathbb{Z} \xrightarrow{\sim} \mathbb{Z}/a\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/b\mathbb{Z}$$

Beweis. Nach Bézout gibt es $x, y \in \mathbb{Z}$ mit

$$xa + yb = 1.$$

Nun gilt:

$$\begin{aligned} n &= xy = 1 - yb \xrightarrow{\varphi} (0, 1) \\ m &= yb = 1 - xa \xrightarrow{\varphi} (1, 0) \end{aligned}$$

Diese Tupel bilden eine Basis des Bildraums, also ist φ surjektiv:

$$\begin{aligned} \varphi(\alpha n + \beta m) &= \varphi(\alpha n) + \varphi(\beta m) \\ &= \alpha \varphi(n) + \beta \varphi(m) \\ &= (\beta, \alpha) \end{aligned}$$

Da beide Seiten gleich viele Elemente haben handelt es sich sogar um einen Isomorphismus. \square

Beispiel 2.1.36. Das Kongruenzensystem

$$\begin{aligned} n &\equiv 3 \pmod{17} \\ n &\equiv 5 \pmod{9} \\ n &\equiv 1 \pmod{12} \end{aligned}$$

hat keine Lösung, denn aus $n \equiv 5 \pmod{9}$ folgt $n \equiv 2 \pmod{3}$, also $n \not\equiv 1 \pmod{12}$. Ersetzen wir jedoch 12 durch 13, so sind die Teiler teilerfremd und der chinesische Restsatz garantiert eine Lösung.

Satz 2.1.37. Chinesischer Restsatz / Satz von Sunzi / Satz von Aryabhata:

Satz 2.1.35 funktioniert auch für mehr als zwei Zahlen - sind $q_1, \dots, q_r \in \mathbb{N}_{\geq 1}$ teilerfremd, so ist

$$\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}/q_1\mathbb{Z} \times \dots \times \mathbb{Z}/q_r\mathbb{Z}$$

surjektiv und induziert einen Isomorphismus

$$\mathbb{Z}/q_1 \dots q_r \mathbb{Z} \xrightarrow{\sim} \mathbb{Z}/q_1\mathbb{Z} \times \dots \times \mathbb{Z}/q_r\mathbb{Z}$$

Genauer kann man isomorph jedem Element n das Tupel $(n \pmod{q_1}, \dots, n \pmod{q_r})$ zuordnen - so kommt man zurück zur "klassischen" Formulierung des Chinesischen Restsatzes.

Korollar 2.1.38. *Die Gruppe $\mathbb{Z}/q_1\mathbb{Z} \times \dots \times \mathbb{Z}/q_r\mathbb{Z}$ wird durch das Element $(1, \dots, 1)$ erzeugt und ist somit zyklisch.*

Lemma 2.1.39. Zentrales Lemma der RSA-Verschlüsselung: *Seien p und q prim und $st \equiv 1 \pmod{(p-1)(q-1)}$. So ist $(a^t)^s \equiv a \pmod{pq}$.*

Beweis. Wir wissen $a^x = a \pmod{p}$ falls $x \equiv 1 \pmod{p-1}$.

Also $a^x = a \pmod{pq}$, wenn $x \equiv 1 \pmod{p-1}$ und $x \equiv 1 \pmod{q-1}$, also insbesondere $a^x = a \pmod{pq}$ wenn $x \equiv 1 \pmod{(p-1)(q-1)}$. \square

In der RSA-Verschlüsselung werden dann letztendlich pq und t veröffentlicht, a^t als Nachricht zurückgeschickt, und dann durch Exponentiation mit s die Nachricht entschlüsselt.

Definition 2.1.40. Sei A eine abelsche Gruppe und p eine Primzahl. Wir definieren:

$$A(p) = \{a \in A \mid \exists n \in \mathbb{N} : \text{ord}(a) = p^n\}$$

Satz 2.1.41. *Sei $(A, +)$ eine abelsche Gruppe. Für jede Primzahl p ist $A(p) \subseteq A$ eine Untergruppe.*

Beweis. Seien $x, y \in A(p)$. So existieren $r, s \in \mathbb{N}_{\geq 0}$, sodass $p^r x = p^s y = 0$. Da A abelsch ist folgt

$$p^{r+s}(x+y) = p^r x + p^s y = 0$$

Also $x+y \in A(p)$.

Es gilt außerdem $p0 = 0$, also $0 \in A(p)$, und $p^r(-x) = -(p^r x) = -0 = 0$, also $-x \in A(p)$. \square

Satz 2.1.42. Sei $(A, +)$ eine abelsche Gruppe und seien p_1, \dots, p_r paarweise verschiedene Primzahlen. So liefert die Gruppenverknüpfung eine Injektion

$$A(p_1) \times \dots \times A(p_r) \hookrightarrow A$$

mit Bild alle Elemente endlicher Ordnung, in deren Ordnung nur die Primfaktoren p_1, \dots, p_r vorkommen.

Beweis. Sei sonst $(a_1, \dots, a_r) \neq (0, \dots, 0)$ ein Tupel mit $a_i \in A(p_i)$ und

$$a_1 + \dots + a_r = 0.$$

Sei OBdA $a_1 \neq 0$. So gilt:

$$-a_1 = a_2 + \dots + a_r$$

Für hinreichend großes n gilt nun

$$-(p_2 \dots p_r)^n a_1 = (p_2 \dots p_r)^n (a_2 + \dots + a_r) = 0$$

Allerdings gilt

$$(p_2 \dots p_r)^n a_1 \neq 0$$

Da die Primzahlen p_2, \dots, p_r alle die Ordnung von a_1 nicht teilen. Widerspruch!

Sei nun $a \in A$, $\text{ord}(a) = p_1^{\alpha_1} \dots p_r^{\alpha_r}$. So gilt:

$$\begin{aligned} \langle a \rangle &\cong \mathbb{Z}/\text{ord}(a)\mathbb{Z} \\ &= \mathbb{Z}/p_1^{\alpha_1} \dots p_r^{\alpha_r} \mathbb{Z} \\ &\cong \mathbb{Z}/p_1^{\alpha_1} \mathbb{Z} \times \dots \times \mathbb{Z}/p_r^{\alpha_r} \mathbb{Z} \end{aligned}$$

\square

Dieser Satz ist analog zur Hauptraumzerlegung eines Vektorraums - wir zerlegen A in eine direkte Summe aus Untergruppen. Es gibt in der kommutativen Algebra einen Satz

über Module über Ringe, welcher sowohl diesen Satz als auch die Hauptraumzerlegung gemeinsam verallgemeinert.

Korollar 2.1.43. *Sei E eine endliche abelsche Gruppe. Seien p_1, \dots, p_r die Primfaktoren der Kardinalität $|E|$ von E . So gilt:*

1. *Die Verknüpfung liefert eine Bijektion*

$$E(p_1) \times \dots \times E(p_r) \xrightarrow{\sim} E$$

2. *Für alle i ist $|E(p_i)|$ eine Potenz von p_i .*

Beweis.

1. Folgt direkt aus dem vorherigen Satz, da die Elemente endlicher Ordnung, in deren Ordnung nur die Primfaktoren p_1, \dots, p_r vorkommen, nun die ganze Gruppe ausmachen.
2. Folgt aus Induktion über $|E_p|$. Der Fall $|E_p| = 1$ ist klar:

$$|E_p| = 1 = p^0$$

Für $|E_p| > 1$ existiert ein Element $x \neq 0$. Es gilt $|\langle x \rangle| = p^r$ nach Annahme. Dann folgt

$$|E(p)/\langle x \rangle| = p^s$$

nach Induktionsannahme, da der Quotient kleiner ist. Somit folgt nach Lagrange

$$|E_p| = |E(p)/\langle x \rangle| \cdot |\langle x \rangle| = p^s \cdot p^r$$

□

Proposition 2.1.44. *Sei E eine endliche abelsche Gruppe, sodass die Ordnung jedes $x \in E$ eine Potenz von p prim ist. So ist $|E|$ ebenfalls eine p -Potenz.*

Proposition 2.1.45. *Es existiert eine Bijektion zwischen der Menge der endlichen abelschen Gruppen bis auf Isomorphismus und den endlichen Multimengen echter Primpotenzen. Genauer hat jede endliche abelsche Gruppe die Form*

$$\mathbb{Z}/p_1\mathbb{Z} \times \dots \times \mathbb{Z}/p_r\mathbb{Z}$$

Für p_1, \dots, p_r prim.

Zum Beispiel ist jede abelsche Gruppe der Ordnung 8 isomorph zu $\mathbb{Z}/8\mathbb{Z}$, $\mathbb{Z}/4\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$, oder $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$.

Satz 2.1.46. *Sei K ein Körper und K^\times dessen multiplikative Gruppe. So ist jede endliche Untergruppe von K^\times zyklisch.*

2.2 Gruppenoperationen und Kongruenzklassen

Definition 2.2.1. Sei G eine Gruppe und X eine Menge. Eine Operation von G auf X ist eine Abbildung

$$\begin{aligned} G \times G &\rightarrow X \\ (g, x) &\mapsto gx \end{aligned}$$

Sodass:

1. $\forall g, h \in G : (gh)x = g(hx)$
2. $1x = x$

Beispiel 2.2.2. Sei X eine Menge und

$$\text{Ens}^\times(X) := \{f : X \rightarrow X \mid f \text{ bijektiv}\}$$

So ist Ens^\times eine Gruppe, welche durch Anwendung der jeweiligen Funktion auf kanonische Weise auf X operiert:

$$\begin{aligned} \text{Ens}^\times(X) \times X &\rightarrow X \\ (f, x) &\mapsto f(x) \end{aligned}$$

Beispiel 2.2.3. S_n operiert durch Anwendung der jeweiligen Permutation auf $\{1, \dots, n\}$.

Beispiel 2.2.4. Analog operiert $\text{GL}(n, \mathbb{R})$ auf \mathbb{R}^n .

Definition 2.2.5. Sei G eine Gruppe, welche auf eine Menge X operiert. So nennen wir für $x \in X$ die Menge

$$Gx = \{gx \mid g \in G\}$$

die **Bahn** von x .

Beispiel 2.2.6. Wir lassen die Gruppe $\text{SO}(2)$ der zweidimensionalen Rotationsmatrizen auf \mathbb{R}^2 operieren. So ist die Bahn eines Vektors \vec{v} der Kreis mit Radius $\|\vec{v}\|$.

Beispiel 2.2.7. Sei H eine Untergruppe einer Gruppe G . So operiert H durch die Gruppenoperation auf G und die Bahnen Hg sind genau die Nebenklassen.

Proposition 2.2.8. *Die Bahnen der Operation einer Gruppe auf einer Menge sind paarweise disjunkt.*

Proposition 2.2.9. *Die Bahnen der Operation eines Monoids auf einer Menge sind nicht unbedingt paarweise disjunkt.*

Definition 2.2.10. Sei G eine Gruppe, welche auf einer Menge X operiert. Sei $x \in X$. Wir nennen die Menge

$$G_x := \{g \in G \mid gx = x\}$$

die **Standgruppe** oder **Isotropiegruppe** von x .

Lemma 2.2.11. *Die Abbildung $G \rightarrow X : g \mapsto gx$ induziert eine Bijektion*

$$G/G_x \xrightarrow{\sim} Gx$$

Beweisskizze. Für jede G_x -Linksnebenklasse $L \subset G$ besteht die Menge Lx nur aus einem Punkt. Falls $L = gG_x$ haben wir genauer $Lx = gG_x x = \{gx\}$. Wir können nun unsere Bijektion definieren, indem wir jeder Linksnebenklasse $L \in G/G_x$ das einzige Element von Lx zuordnen. Sie ist trivial surjektiv, gleichzeitig ist sie injektiv, denn aus $gG_x x = hG_x x$ folgt $gx = hx$, also $h^{-1}g \in G_x$, also $gG_x = hG_x$. "□"

Korollar 2.2.12. Bahnformel:

$$|G| = |Gx| \cdot |G_x| = |G/G_x| \cdot |G_x|$$

Frage: Was sind die endlichen Untergruppen der dreidimensionalen Drehgruppe SO_3 ?

Vorüberlegung: Jede Gruppe G mit $x \in G$ operiert auf sich selber durch $g.x = gxg^{-1}$, auch notiert als $(\text{int}g)(x)$ für "interior", da dies einen sogenannten **inneren Automorphismus** bildet. Es gilt nämlich:

$$\begin{aligned} \text{int} : G &\rightarrow \text{Aut}(G) \\ g &\mapsto (x \mapsto gxg^{-1}) \end{aligned}$$

Wir nennen diese Operation die "Operation durch Konjugation".

Dabei gilt:

$$\begin{aligned} (hg).x &= hgx(hg)^{-1} \\ &= hgxg^{-1}h^{-1} \\ &= h(gxg^{-1})h^{-1} \\ &= h.(g.x) \end{aligned}$$

und außerdem:

$$g.(xy) = gxyg^{-1} = gxg^{-1}ygy^{-1} = (g.x)(g.y)$$

Intuitiv sind Drehungen, welche zueinander konjugiert werden können, "quasi die gleichen" - die Symmetriegruppe, welche den Raum an einer Achse um 180 Grad dreht, ist die gleiche, welche den Raum an einer anderen Achse um 180 Grad dreht. Es ist also sinnvoll, die Frage einzuschränken auf "Was sind die endlichen Untergruppen von SO_3 bis auf Konjugation?" Die Antwort ist nun:

Satz 2.2.13. Die endlichen Untergruppen der Drehgruppe SO_3 bis auf Konjugation sind genau:

1. Die zyklischen Gruppen C_k , für $k \geq 1$
2. Die **Diedergruppen** D_k , für $k \geq 2$ (die Verallgemeinerungen unserer Quadratgruppe)

3. Die Symmetriegruppen des Würfels (= die Symmetriegruppe des Oktaeders), des Tetraeders, und des Ikosaeders (= die Symmetriegruppe des Dodekaeders)

Beweis.

Proposition 2.2.14. $g \in SO_3 \setminus \text{id}$ hält genau eine Gerade punktweise fest. Diese sticht an zwei Punkten durch die Einheitssphäre S^2 .

Wir nennen diese Punkte die Pole $P \subset S^2$ von g . Sei also $G \subset SO(3)$ eine endliche Untergruppe. Wir definieren

$$M \in \{(g, p) \mid g \in G \setminus \text{id}, p \in P\}$$

Als die Menge der Pole der Drehachsen der Gruppe. Es gilt

$$\begin{aligned} |M| &= 2(|G| - 1) \\ |M| &= \sum_{p \in P} (|G_p| - 1) \end{aligned}$$

Die Gruppe operiert außerdem auf der Menge der Pole ($G \curvearrowright P$). Wir können die Menge der Pole somit zerlegen in ihre G -Bahnen, also $P \rightarrow P_1 \sqcup \dots \sqcup P_r$. Die Ordnung der Pole einer Bahn ist konstant, wir definieren also die **Polordnung** der Pole der i -ten Bahn als

$$\forall p \in P_i : n_i := |G_p|$$

Und erhalten

$$\sum_{p \in P} (|G_p| - 1) = \sum_{i=1}^r |P_i| \cdot (n_i - 1)$$

Aus der Bahnformel erhalten wir

$$|P_i| \cdot n_i = |G|$$

Also gilt:

$$\begin{aligned} 2(|G| - 1) &= \sum_{i=1}^r |P_i| \cdot (n_i - 1) \\ \implies 2 - \frac{2}{|G|} &= \sum_{i=1}^r 1 - \frac{1}{n_i} \end{aligned}$$

Fall $r = 0$: Es gibt keine Pole, also ist die Gruppe trivial. Die triviale Gruppe kann auch betrachtet werden als die zyklische Gruppe C_1 mit nur einem Element.

Fall $r = 1$: Dann gilt:

$$2 - \frac{2}{|G|} = 1 - \frac{1}{n_1}$$

Die Gruppe muss mindestens 2 Elemente haben, also ist der linke Term größer als 1 und der rechte Term kleiner als 1, was ein Widerspruch ist.

Fall $r = 2$: Dann gilt:

$$2 - \frac{2}{|G|} = 2 - \frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2}$$

Es gilt $n_i \leq |G|$, also ist die Gleichung genau dann erfüllt, wenn $n_1 = n_2 = |G|$. Wir haben also eine Gruppe mit zwei Polen, deren Ordnung die Ordnung der gesamten Gruppe ist. Die ganze Gruppe hat also nur eine Symmetrieachse, die Gruppe muss dann eine zyklische Gruppe sein.

Fall $r = 3$: Dann gilt:

$$\begin{aligned} 2 - \frac{2}{|G|} &= 3 - \frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2} - \frac{1}{n_3} \\ \implies 1 + \frac{2}{|G|} &= \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} + \frac{1}{n_3} \end{aligned}$$

Sei OBdA $n_1 \leq n_2 \leq n_3$. Behauptung: Dann muss $n_1 = 2$ sein.

Fall 3a: $n_2 = 2$: Dann gilt $2n_3 = |G|$. Nach Bahnformel folgt $|P_3| = 2$. Bei einer Polbahn mit zwei Elementen müssen sich die Pole gegenüberliegen. Wir erhalten die Diedergruppe D_{n_3} - n_3 entspricht der zentralen Drehsymmetrie und n_1 und n_2 entsprechen den seitlichen Symmetrieachsen durch die Ecken und Kanten.

Fall 3a: $n_2 > 2$:

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{n_2} + \frac{1}{n_3} > 1 + \frac{2}{|G|}$$

Also $n_2 = 3$ und $n_3 = 3$ oder $n_3 = 4$ oder $n_3 = 5$. Der erste Fall liefert den Tetraeder, der zweite Fall den Würfel und der dritte Fall den Ikosaeder.

Fall $r \geq 4$: Die Gleichungen sind nicht mehr lösbar.

□

Definition 2.2.15. Eine Gruppe $G \neq 1$ heißt **einfach**, falls ihre einzigen Normalteiler die triviale Gruppe 1 und die Gruppe G selbst sind.

Proposition 2.2.16. Jede Gruppe mit Primzahlordnung ist einfach (also $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ für p prim). Diese Gruppen sind die einzigen abelschen einfachen Gruppen.

Beweis. Satz von Lagrange. □

Proposition 2.2.17. *Für fast alle Körper k ist $GL(n, k)/k^\times$ einfach.*

Satz 2.2.18. *Die Ikosaedergruppe I ist einfach.*

Beweis. Wir haben:

- Ein Element der Ordnung 1 (die Identität)
- 15 Elemente der Ordnung 2 (Drehungen um Kantenmitten, da wir 30 Kanten haben und je zwei gegenüberliegende Kanten die selben Drehungen haben)
- 20 Elemente der Ordnung 3 (Drehungen um Flächenmitten, da wir 20 Flächen haben)
- Keine Elemente der Ordnung 4
- 24 Elemente der Ordnung 5 (Drehungen an Ecken, da wir 12 Ecken haben, an jeder Ecke vier Drehungen, aber je zwei gegenüberliegende Ecken die gleichen Drehungen haben)

Wir wollen die Elemente nun in Konjugationsklassen zerlegen. Die Elemente der Ordnung 2 und der Ordnung 3 bilden jeweils eine Konjugationsklasse. Die Drehungen um Ecken können jedoch nicht alle in der selben Konjugationsklasse liegen, da 24 kein Teiler von 60 ist. Die Drehungen um Ecken zerfallen also in zwei Konjugationsklassen - es handelt sich um die Drehungen um $2\pi/5$ (72° , "Eine Ecke weiter"), und die Drehungen um $4\pi/5$ (144° , "zwei Ecken weiter"). Größere Drehungen existieren nicht, da eine Drehung drei Ecken weiter einer Drehung um zwei Ecken in die andere Richtung entspricht und eine Drehung vier Ecken weiter einer Drehung um eine Ecke in die andere Richtung entspricht.

Sei also nun N ein Normalteiler von I . So muss $|N|$ ein Teiler von $|I|$ sein, also 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 15, 20, 30, 60.

Proposition 2.2.19. *Sei N ein Normalteiler einer Gruppe G . So ist N eine Vereinigung von Konjugationsklassen von G .*

Aus der Proposition folgt, dass $|I|$ außerdem eine Summe von 1, 20, 15, 12, 12 sein muss, wobei die 1 in der Summe enthalten sein muss (da N sonst nicht das neutrale Element enthalten würde). Die einzigen Möglichkeiten sind also $|N| = 1 = 1$ und $|N| = 60 = 1 + 20 + 15 + 12 + 12$. Also sind die einzigen Normalteiler von I die triviale Gruppe und I selbst. □

Proposition 2.2.20. *Die alternierenden Gruppen*

$$A_r := \ker(\text{sgn} : \mathcal{S}_r \rightarrow \{\pm 1\})$$

sind für $r \geq 5$ einfach. (Wobei der Kern genau den Permutationen mit $\text{sgn}(\sigma) = 1$ entspricht). Insbesondere ist A_5 isomorph zur Ikosaedergruppe, und diese ist die kleinste nichtabelsche einfache Gruppe.

Beweis. Ein Ikosaeder hat die selbe Symmetriegruppe wie ein Dodekaeder, da die beiden Körper dual zueinander sind (also können die Ecken des einen den Flächenmitten des anderen zugeordnet werden und umgekehrt).

Proposition 2.2.21. *Ein Dodekaeder enthält fünf eingeschriebene Würfel.*

Wir erhalten einen Gruppenhomomorphismus $\varphi : I \rightarrow \mathcal{S}_5$, welcher beschreibt, wie eine Symmetrie des Ikosaeders/Dodekaeders die eingeschriebenen Würfel permutiert. So ist $\text{sgn} \circ \varphi$ ein Homomorphismus $I \rightarrow \{\pm 1\}$. Da I einfach ist und $|I| \geq 2$ ist $\ker(\text{sgn} \circ \varphi) = I$.

$\ker(\varphi)$ ist ein von I verschiedener Normalteiler, also ist $\ker(\varphi) = 1$, also ist φ injektiv. Es gilt $|I| = 60$ und $|\mathcal{S}_5| = 120 \implies |A_5| = 60$, also ist φ auch surjektiv, also bijektiv, also ein Isomorphismus. \square

2.3 Kompositionsreihen

Definition 2.3.1. Eine **Kompositionsreihe** einer Gruppe G ist eine Folge von Untergruppen

$$1 = G_0 \subset G_1 \subset \dots \subset G_{r-1} \subset G_r = G$$

sodass jedes G_i Normalteiler von G_{i+1} ist und alle **Subquotienten** G_i/G_{i-1} einfach sind.

Satz 2.3.2. Jordan-Hölder: *Je zwei Kompositionsreihen einer endlichen Gruppe G haben die selbe Länge und bis auf Reihenfolge die selben Subquotienten.*

Dieser Satz gibt uns eine "Primfaktorzerlegung" von Gruppen, in der die "Primfaktoren" die Subquotienten sind.

Beispiel 2.3.3. Sei $G = \mathbb{Z}/20\mathbb{Z}$. Eine mögliche Kompositionsreihe ist nun:

$$\mathbb{Z}/20\mathbb{Z} \supset 2\mathbb{Z}/20\mathbb{Z} \supset 10\mathbb{Z}/20\mathbb{Z} \supset 0$$

Die Subquotienten hier sind dann $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$, $\mathbb{Z}/5\mathbb{Z}$ und $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$.

Proposition 2.3.4. *Es existiert eine universelle Eigenschaft surjektiver linearer Abbildungen, welche exakt analog zur universellen Eigenschaft surjektiver Gruppenhomomorphismen funktioniert.*

Eine lineare Abbildung ist also im Wesentlichen eindeutig durch ihren Kern bestimmt - alle surjektiven linearen Abbildungen mit dem selben Kern können durch Verkettung mit einem eindeutigen Isomorphismus ineinander überführt werden.

Proposition 2.3.5. *Für jeden Untervektorraum $U \subset V$ gibt es eine surjektive lineare Abbildung $s : V \twoheadrightarrow W$ mit $\ker s = U$. Dies ist genau die Abbildung $V \twoheadrightarrow V/U$.*

Proposition 2.3.6. *Für Vektorräume gilt $\dim V = \dim U + \dim V/U$. Diese Formel kann als Analogon zum Satz von Lagrange gesehen werden.*

Beispiel 2.3.7. Betrachte einen 3-dimensionalen Vektorraum V über \mathbb{F}_7 . Eine mögliche Kompositionsreihe ist

$$V \supset W \supset U \supset \{0\}$$

mit $\dim W = 2$ und $\dim U = 1$. Die Subquotienten V/W , W/U und $U/\{0\}$ sind jeweils eindimensionale Untervektorräume von V , also isomorph zur additiven Gruppe von \mathbb{F}_7 .

Beweis (Jordan-Hölder): Per Induktion über $|G|$. Ist $|G| = 1$, ist G die triviale Gruppe und somit insbesondere bereits alleine die vollständige Kompositionsreihe und die Aussage gilt trivial.

Seien nun $G \supset M \supset \dots$ und $G \supset N \supset \dots$ Kompositionsreihen. M und N müssen beide Ordnungen kleiner G haben, falls also $M = N$ ist gilt die Aussage per Induktion. Ist $N \neq M$, existiert ein surjektiver Homomorphismus $N \twoheadrightarrow G/M$ mit Kern $N \cap M$. Somit geht $N/N \cap M$ isomorph auf G/M .

Wir wissen also, dass der Subquotient G/M isomorph zu $N/N \cap M$ ist. Analog ist der Subquotient G/N isomorph zu $M/M \cap N$. Also sind $G \supset M \supset M \cap N \supset \dots$ und $G \supset N \supset M \cap N \supset \dots$ valide Kompositionsreihen, welche per Induktion äquivalent zu den ursprünglichen Kompositionsreihen sind. Somit folgt auch die gesuchte Aussage per Induktion. \square

2.4 p -Gruppen und Sylowsätze

Definition 2.4.1. Sei p eine Primzahl. Eine endliche Gruppe G heißt **p -Gruppe**, wenn

$$|G| = p^n.$$

Definition 2.4.2. Sei G eine Gruppe. Das **Zentrum** Z einer Gruppe ist die Menge der Elemente, welche mit allen anderen Gruppenelementen kommutieren:

$$Z(G) = \{z \in G \mid \forall g \in G : zg = gz\}$$

Satz 2.4.3. *Sei G eine nichttriviale p -Gruppe. So ist auch das Zentrum von G nicht-trivial.*

Beweis. Sei $|G| = p^r$. Wir zerlegen G in ihre Konjugationsklassen C_1, \dots, C_s . $|C_i|$ teilt $|G| = p^r$, also haben insbesondere alle Konjugationsklassen eine p -Potenz als Ordnung.

Ist $|C_i| = 1$, gilt $C_i = \{z\}$ mit $z \in Z(G)$. Also:

$$|G| \equiv |Z(G)| \pmod{p}$$

Ist $|G| \neq 1$, folgt $|Z(G)| \neq 1$. □

Satz 2.4.4. Sei p prim und $|G| = p^2$. So ist G abelsch und isomorph zu $\mathbb{Z}/p^2\mathbb{Z}$ oder $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$.

Beweis. Wir wissen $Z(G) \neq 1$. Wäre $Z(G) \neq G$, so wäre $|Z(G)| = p$ und für $x \in G \setminus Z(G)$ wäre

$$\langle Z(G), x \rangle = G$$

Aber diese erzeugte Gruppe ist abelsch! Widerspruch!!!!!! □

Definition 2.4.5. Sei G eine endliche Gruppe, p eine Primzahl, und p^r die größte p -Potenz, die $|G|$ teilt. Eine Untergruppe $S \subset G$ mit $|S| = p^r$ heißt **p -Sylow** von G

Satz 2.4.6. In jeder p -Gruppe $G \neq 1$ gibt es ein Element $g \in G$ der Ordnung p .

Satz 2.4.7. Jede p -Gruppe ist nilpotent.

Satz 2.4.8. Sylow-Sätze: Sei G eine endliche Gruppe und p prim, sodass p^r G maximal teilt.. So gilt:

1. Es gibt p -Sylows in G .
2. Je zwei p -Sylows in G sind zueinander konjugiert.
3. Jede Untergruppe $H \subset G$, deren Ordnung eine p -Potenz ist, liegt in einer p -Sylow.
4. Die Zahl der p -Sylows von G ist kongruent zu 1 modulo p und teilt $|G|/p^r$

Beispiel 2.4.9. In der Würfelgruppe W ist $|W| = 24$. Ein 2-Sylow ist also eine Untergruppe mit Ordnung $2^3 = 8$. Davon gibt es drei, und zwar die Untergruppen, die Isomorph zur Diedergruppe D_4 sind.

Beweis (Erster Sylowsatz): Seien C_1, \dots, C_r die Konjugationsklassen von G . Wir können diese weiter Zerlegen in C_1, \dots, C_s mit $s < r$ und $Z(G)$. Wir wählen ein

$g_i \in C_i$ und erhalten (warum?)

$$|G| = |G/Z_G(g_1)| + \dots + |G/Z_G(g_s)| + |Z(G)|$$

Wobei $Z_G(x) = \{g \in G : gxg^{-1} = x\}$.

Wir führen nun einen Beweis durch Induktion durch. Gibt es ein i , sodass p^r $|Z_G(g_i)|$ teilt, dann folgt die Aussage direkt per Induktion.

Andernfalls teilt p $|G/Z_G(g_i)|$ für alle i , also teilt p auch $|Z(G)|$, also existiert ein $z \in Z(G)$ mit $\text{ord}(z) = p$.

Wir wissen $|G| = kp^r$ mit $k < p$, also gilt $|G/\langle z \rangle| = kp^{r-1}$. Insbesondere existiert eine Untergruppe $\bar{S} \subset G/\langle z \rangle$ mit $|\bar{S}| = p^{r-1}$, falls $k = 1$ ist dies die Gruppe $G/\langle z \rangle$ selbst. Wir definieren nun $S := \pi^{-1}(\bar{S}) \subset G$ - also ist S die Gruppe, die durch die Quotientenabbildung auf \bar{S} abgebildet wird - und es folgt $|S| = p^r$. \square

Lemma 2.4.10. Sei G eine Gruppe. Sei

$$\mathcal{S} = \{Q \subset G : |Q| = p^r\}$$

die Menge der p -Sylows von G . Ist $Q \in \mathcal{S}$ schreiben wir $g.Q = gQg^{-1}$ oder ist $x \in \mathcal{S}$ schreiben wir einfach $gx = gxg^{-1}$.

Ist $H \subset G$ eine p -Gruppe und $x = Q \in \mathcal{S}$ ein Fixpunkt von H in der Menge \mathcal{S} der p -Sylows, so gilt $H \subset Q$.

Beweis. $\forall h \in H : hx = x$ bedeutet $\forall h \in H : hQ = Qh$. Daraus folgt, dass HQ eine Untergruppe von G ist.

Also gilt gemäß Bahnformel $|HQ| = |QH/H| \cdot |H|$. Wir wissen $|H| = p^r$, da QH/H eine Q -Bahn ist, gilt außerdem $|QH/H| = p^s$. Also ist die Ordnung von HQ ebenfalls eine p -Potenz. Da die p -Potenz, die die Ordnung von Q teilt, bereits maximal ist, folgt $|HQ| = |Q|$, also $HQ = Q$. \square

Beweis (Zweiter Sylowsatz, Dritter Sylowsatz): Sei $P = x \in \mathcal{S}$ eine beliebige p -Sylow. Es gilt $P \subset G_P$, also gemäß Bahnformel $|GP| = |G|/|G_P|$, also teilt p nicht die Ordnung von GP . Ist jetzt also $H \subset G$ eine p -Gruppe, können wir GP in H -Bahnen B_1, \dots, B_r zerlegen. Da H eine p -Gruppe ist, ist für alle i die Ordnung $|B_i|$ eine p -Potenz. Da p aber nicht $|GP|$ teilt, muss es B_i mit $|B_i| = 1$ geben. Also existiert ein $y \in GP \subset \mathcal{S}$, welche Fixpunkte von H sind. Also existiert ein

Q der Gestalt gPg^{-1} , welches ein Fixpunkt von H ist, sodass $H \subset Q$. \square

Beweis (Vierter Sylowsatz): Ganz \mathcal{S} ist eine G -Bahn GP mit $P \in \mathcal{S}$ beliebig. Da es nur einen Fixpunkt gibt, und da alle Bahnen p -Potenzordnung haben, gilt $|\mathcal{S}| \equiv 1 \pmod{p}$. Es gilt außerdem $|GP| = |G|/|G_p| \mid |G|/|P| = |G|/p^r$. \square

Korollar 2.4.11. *Sei G eine endliche Gruppe und p eine Primzahl, die die Gruppenordnung teilt. So gibt es ein Element von G der Ordnung p .*

Beweis. Gemäß der Sylowsätze existiert ein p -Sylow und darin ein Element der Ordnung p . \square

Korollar 2.4.12. *Jede Gruppe mit 6 Elementen ist isomorph zu \mathcal{S}_3 oder $\mathbb{Z}/6\mathbb{Z}$.*

Beweis. Gemäß Sylowsätzen existiert ein $a \in G$ mit $|\langle a \rangle| = 2$ und ein $b \in G$ mit $|\langle b \rangle| = 3$. Also gilt

$$\langle a \rangle \times \langle b \rangle \hookrightarrow G,$$

also

$$G = \{1, b, b^2, a, ab, ab^2\}$$

Es folgt, dass entweder $ba = ab$ oder $ba = ab^2$. Wählen wir eine dieser beiden Möglichkeiten ist bereits die gesamte Gruppe festgelegt. Der erste Fall ergibt $\mathbb{Z}/6\mathbb{Z}$, der zweite Fall ergibt \mathcal{S}_3 . \square

Chapter 3

Ringe

3.1 Grundbegriffe

Beispiel 3.1.1. Die Abbildung $\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}$, welche jedes Element auf 0 abbildet, ist kein Ringhomomorphismus, da das Einselement auf das Nullelement abgebildet wird. Wohl aber ist für einen beliebigen Ring R die Abbildung $R \rightarrow 0$ in den Nullring ein Ringhomomorphismus.

Lemma 3.1.2. *Es gibt keinen Ringhomomorphismus $\varphi : \mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{Z}$.*

Beweis. Es müsste gelten $\varphi(1) = 1$, also $\varphi(2) = 2$, und $\varphi(2) \cdot \varphi(\frac{1}{2}) = 2 \cdot \varphi(\frac{1}{2}) = 1$. Allerdings gibt es kein solches Element in \mathbb{Z} . \square

Satz 3.1.3. *Für jeden Ring R gibt es genau einen Ringhomomorphismus $\mathbb{Z} \rightarrow R$.*

Beweis. Analog wie für einen Gruppenhomomorphismus aus einer zyklischen Gruppe:

Es gibt genau einen Gruppenhomomorphismus $\varphi : (\mathbb{Z}, +) \rightarrow (R, +)$ mit $1_{\mathbb{Z}} \rightarrow 1_R$. Dieser bildet auch einen Ringhomomorphismus, denn für natürliches a, b gilt:

$$\begin{aligned}\varphi(a \cdot b) &= \sum_{i=1}^{ab} 1_R \\ &= \sum_{i=1}^a 1_R \cdot \sum_{i=1}^b 1_R && \text{(Induktiv per Distributivgesetz)} \\ &= \varphi\left(\sum_{i=1}^a 1\right) \cdot \varphi\left(\sum_{i=1}^b 1\right) \\ &= \varphi(a) \cdot \varphi(b)\end{aligned}$$

Und für negative $a, b \in \mathbb{Z}$ folgt das Selbe, wenn man eine Summe bis zu einer negativen Zahl als Summe der Inversen definiert. \square

Satz 3.1.4. *Sei R ein Ring. So ist $\ker(Z \rightarrow R) = n\mathbb{Z}$ für ein $n \in \mathbb{N}$. Wir nennen dieses n die **Charakteristik** von R .*

Beweis. Jeder Ringhomomorphismus bildet einen Gruppenhomomorphismus. Der Kern muss also eine Untergruppe von \mathbb{Z} sein, also die Form $n\mathbb{Z}$ haben. \square

Satz 3.1.5. *Die Charakteristik von R ist das kleinste $m \geq 1$ mit $\sum_{i=1}^m 1_R = 0_R$, falls es ein solches m gibt, ansonsten 0.*

Beispiel 3.1.6.

- Es gilt $\text{char}(\mathbb{Z}) = \text{char}(b\mathbb{Q}) = \text{char}(\mathbb{R}) = 0$.
- Der einzige Ring mit Charakteristik 1 ist der Nullring.
- $\text{char}(\mathbb{F}_p) = p$.

Satz 3.1.7. *Die Charakteristik eines Körpers ist prim.*

Beweis. Hätten wir einen Körper K der Charakteristik $m = ab$, so wäre

$$a \cdot 1_K + b \cdot 1_K = m \cdot 1_K = 0,$$

(wobei $a \cdot 1_K = \sum_{i=1}^a 1_K$), also wäre der Körper nicht nullteilerfrei. \square

Satz 3.1.8. *Sei R ein Kring (kommutativer Ring) der Charakteristik p , mit p prim. So ist der **Frobeniushomomorphismus***

$$Fr : R \rightarrow R$$

$$a \mapsto a^p := \prod_{i=1}^p a$$

ein Ringhomomorphismus.

Beweis. Es gilt:

- $\varphi(1) = 1$
- $\varphi(ab) = \varphi(a)\varphi(b)$

$$\bullet \varphi(a+b) = (a+b)^p = \sum_{k=0}^p \binom{p}{k} a^k b^{p-k}$$

In der letzten Summe haben alle Terme außer dem ersten und dem letzten nun durch den Binomialkoeffizienten einen Faktor p und sind im Ring somit 0. Also

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^p \binom{p}{k} a^k b^{p-k} &= a^p + b^p \\ &= \varphi(a) + \varphi(b) \end{aligned}$$

□

Satz 3.1.9. Universelle Eigenschaft surjektiver Ringhomomorphismen: Sei $s : R \rightarrow Q$ ein surjektiver Ringhomomorphismus und $\varphi : R \rightarrow S$ ein beliebiger Ringhomomorphismus. So existiert genau dann ein Ringhomomorphismus $\bar{\varphi}$ mit $\bar{\varphi} \circ s = \varphi$, wenn $\ker \varphi \supseteq \ker s$. Falls $\bar{\varphi}$ existiert, ist es eindeutig.

Beweis. Es ist bereits bekannt, dass ein eindeutiger Gruppenhomomorphismus $\bar{\varphi}$ zwischen den additiven Gruppen existiert. Zu zeigen ist, dass $\bar{\varphi}$ ein Ringhomomorphismus ist. Dies ist jedoch simpel - es gilt:

- $\bar{\varphi}(1_Q) = (\bar{\varphi} \circ s)(1_R) = \varphi(1_R) = 1_S$
- Da s surjektiv ist, reicht für die Multiplikativität $\bar{\varphi}(s(a) \cdot s(b)) = \bar{\varphi}(s(a)) \cdot \bar{\varphi}(s(b))$.

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}(s(a) \cdot s(b)) &= \bar{\varphi}(s(ab)) \\ &= \varphi(ab) \\ &= \varphi(a) \cdot \varphi(b) \\ &= \bar{\varphi}(s(a)) \cdot \bar{\varphi}(s(b)) \end{aligned}$$

□

Wie im Fall für Gruppen existiert also genau ein Ringisomorphismus zwischen den Bildern zweier Ringhomomorphismen mit gleichem Kern. Wir fragen uns nun: Gegeben einen Ring R - welche Untergruppen von $(R, +)$ sind Kerne von Ringhomomorphismen? Die Antwort sind **Ideale**.

Definition 3.1.10. Eine Untergruppe I der Additiven Gruppe $(R, +)$ eines Rings R heißt **Ideal**, falls $RI \subset I$ und $IR \subset I$ (also wenn das Produkt eines Ideals mit einem beliebigen Ringelement immer im Ideal liegt)

Definition 3.1.11. Ein zyklisches Ideal heißt **Hauptideal**.

Lemma 3.1.12. Sei $\varphi : R \rightarrow S$ ein Ringhomomorphismus. So ist $\ker \varphi \subset R$ ein Ideal.

Beweis. $\varphi(x) = 0 \implies \varphi(ax) = \varphi(xa) = 0$ □

Satz 3.1.13. Gegeben einen Ring R mit Ideal I gibt es einen surjektiven Ringhomomorphismus $s : R \twoheadrightarrow Q$ mit Kern I .

Beweis. Betrachte die Gruppe $(R/I, +)$. Wir behaupten, dass es darauf genau eine Multiplikation gibt, die verträglich ist mit $\varphi : R \rightarrow R/I$. Zu zeigen ist nur, dass die Abbildung $s \circ \cdot_R$ konstant auf den Fasern von $s \times s : R \times R \rightarrow R/I \times R/I$ ist. Diese Fasern haben genau die Form $(a + I) \times (b + I)$. Es gilt:

$$\begin{aligned} (a + I) \circ (b + I) &= ab + aI + Ib + II \\ \implies s(ab + aI + Ib + II) &= ab + I \end{aligned}$$

(Da $aI + Ib + II \subset I$.) □

Satz 3.1.14. $n \in \mathbb{N}$ lässt beim Teilen durch 9 den selben Rest wie seine Quersumme und beim Teilen durch 11 den selben Rest wie seine alternierende Quersumme.

Beweis. $10^n \equiv 1^n \pmod{9}$ und $10^n \equiv -1^n \pmod{11}$ □

Definition 3.1.15. Sei R ein Kring.

1. Seien $a, b \in R$. Wir sagen, a **teilt** b , falls ein $c \in R$ existiert, sodass $ac = b$.
2. Ein Element $a \in R$ heißt **kürzbar**, wenn die Multiplikation $a \cdot : R \rightarrow R$ injektiv ist, also wenn $ax = ay \implies x = y$.
3. R heißt **Integritätskring**, wenn genau ein nicht kürzbares Element in R existiert (Dieses ist dann zwingend die 0_R).

Beispiel 3.1.16.

- Alle $a \in \mathbb{Z} \setminus 0$ sind kürzbar.
- $\mathbb{Z}/12\mathbb{Z}$ ist kein Integritätsring, da $3 \cdot 4 = 3 \cdot 8 = 3 \cdot 0$. Im Allgemeinen ist $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$ genau dann ein Integritätsring, wenn m prim ist.
- Jeder Körper ist ein Integritätsring.
- Jeder Teilring eines Körpers ist ein Integritätsring.

Korollar 3.1.17. *Die Ringmultiplikation ist genau dann injektiv, wenn ihr Kern trivial ist, also wenn der Ring Nullteilerfrei ist.*

Lemma 3.1.18. *Jeder endliche kommutative Integritätsring R ist ein Körper.*

Beweis. Sei $a \in R \setminus 0$ kürzbar. Dann ist die Multiplikation mit a injektiv. Da R endlich ist, ist die Multiplikation auch bijektiv, also existiert ein multiplikatives Inverses. Jeder kommutative Ring mit multiplikativen Inversen ist per Definition ein Körper. \square

Korollar 3.1.19. *Die Charakteristik eines Körpers ist 0 oder eine Primzahl.*

Beweis. $\mathbb{Z}/(\text{char}K)\mathbb{Z} \hookrightarrow K$ ist injektiv. Dies ist nur möglich, wenn $(\text{char}K)$ 0 oder prim ist. \square

Definition 3.1.20. Sei R ein kommutativer Ring. $a \in R$ heißt **Einheit**, wenn es ein multiplikatives Inverses gibt. Einheiten sind also quasi die "Einsteiler". Wir schreiben die Menge der Einheiten als R^\times (da die Einheiten die größte multiplikativen Gruppe des Rings bilden).

Beispiel 3.1.21.

- $\mathbb{Z}^\times = \{-1, 1\}$
- $\mathbb{Q}^\times = \mathbb{Q} \setminus 0$
- $0^\times = 0$
- $\mathbb{R}[X]^\times = \mathbb{R}^\times$

In der Physik hat man einen eindimensionalen \mathbb{R} -Vektorraum V der Länge, der Zeit, etc. Die Einheiten sind genau die Basen dieses Vektorraums, also bildet die Multiplikation eine Bijektion $\mathbb{R} \xrightarrow{\sim} V$. Analog ist die Multiplikation mit einer Einheit eine Bijektion $R \xrightarrow{\sim} R$.

Korollar 3.1.22. *In jedem endlichen kommutativen Ring sind die Einheiten genau die kürzbaren Elemente.*

Beispiel 3.1.23.

- $(\mathbb{Z}/12\mathbb{Z})^\times = \{1, 5, 7, 11\}$
- $(\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^\times = \{a \mid \text{ggT}(a, m) = 1\}$

Definition 3.1.24. Diffie-Hellman-Verschlüsselung:

1. Alice wählt eine beliebige Gruppe G und eine natürliche Zahl $a \in \mathbb{N}$. Sie wählt ein Element $g \in G$ und veröffentlicht G, g^a und g .

2. Daraufhin wählt Bob ein $b \in \mathbb{N}$ und sendet g^b .
3. Alice rechnet nun $(g^b)^a$ und Bob rechnet $(g^a)^b$. Dies ist der gemeinsame geheime Schlüssel.

Die Sicherheit des Algorithmus beruht darauf, dass der diskrete Logarithmus (also das Berechnen von a aus g^a) im Allgemeinen sehr ineffizient ist. Die häufigste Wahl ist $G = (\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^\times$ für eine sehr große Primzahl p , in besonders sicherheitskritischen Fällen wird als Gruppe oft eine elliptische Kurve über einem endlichen Körper genommen.

3.2 Polynomringe

Definition 3.2.1. Sei R ein Ring und $R[X]$ der Polynomring. Formell kann $R[X]$ auch definiert werden als die Menge aller Abbildungen $\mathbb{N} \rightarrow R$, die höchstens an endlich vielen Stellen $\neq 0$ sind (diese Stellen entsprechen dann den Koeffizienten.) Wir unterscheiden zwischen *Polynomen* und *Polynomfunktionen* - Im Allgemeinen ist die kanonische Abbildung $\mathbb{F}_p[X] \hookrightarrow \text{Ens}(\mathbb{F}_p, \mathbb{F}_p)$ nämlich nicht injektiv!

Lemma 3.2.2. Im Fall eines endlichen Körpers \mathbb{F}_p ist die kanonische Abbildung $\mathbb{F}_p[X] \rightarrow \text{Ens}(\mathbb{F}_p, \mathbb{F}_p)$ surjektiv. Der Kern dieser Abbildung ist das Ideal, welches von $(x^p - x)$ erzeugt wird.

Proposition 3.2.3. Sei R ein kommutativer Ring und $c \in R$. So gibt es genau einen Ringhomomorphismus

$$E_c : R[X] \rightarrow R,$$

so dass $E_c(X) = c$ und $E_c \circ \iota = \text{id}$. (Wobei ι die kanonische Einbettung $R \rightarrow R[X]$ ist, welche ein Element als konstantes Polynom auffasst. Professor Soergel schreibt diese auch als can .)

Wir nennen E_c den **Einsetzungshomomorphismus** und schreiben abkürzend

$$P(c) := E_c(P)$$

Proposition 3.2.4. Sei $\varphi : R \rightarrow S$ ein Ringhomomorphismus und $c \in S$ (nicht $c \in R$!) ein Element, welches für alle $r \in R$ mit $\varphi(r)$ bezüglich der Multiplikation kommutiert. So gibt es genau einen Ringhomomorphismus

$$E_{c,\varphi} : R[X] \rightarrow S$$

mit $E_{c,\varphi}[X] = c$ und $E_{c,\varphi} \circ \iota = \varphi$.

Diese Proposition verallgemeinert die Vorherige, indem sie uns zum Beispiel erlaubt, Matrizen oder komplexe Zahlen in reelle Polynome einzusetzen.

Proposition 3.2.5. Jeder Ringhomomorphismus $\varphi : R \rightarrow S$ liefert einen Ringhomomorphismus $\varphi[X] : R[X] \rightarrow S[X]$.

Definition 3.2.6. Sei R ein kommutativer Ring und $P \in R[X]$. Ein Element $\lambda \in R$ heißt **Nullstelle von P** , falls $P(\lambda) = 0$.

Definition 3.2.7. Der **Grad** eines Polynoms ist definiert als:

$$\deg(P) = \begin{cases} n & \text{Falls } P = a_n x^n + \dots + a_0 x^0, a_n \neq 0 \\ -\infty & \text{Falls } P = 0. \end{cases}$$

Korollar 3.2.8. Sei R ein Integritätsring und $P, Q \in R[X]$. Dann gilt

$$\deg(PQ) = \deg(P) + \deg(Q)$$

Unser Ziel ist es, folgenden Satz zu beweisen:

Satz 3.2.9. Sei R ein kommutativen Integritätsring und $P \in R[X] \setminus 0$. Dann hat P höchstens $\deg(P)$ Nullstellen.

Beweisskizze. Die kommutativen Integritätsringe sind genau die Ringe, über denen die gewohnte Zerlegung in Linearfaktoren funktioniert. "□"

Gegenbeispiel 3.2.10. Sei $R = \text{Ens}(M, \mathbb{R})$. Dann ist R ein Ring, aber kein Integritätsring. So hat das Polynom $X^2 - X$ unendlich viele Nullstellen, nämlich alle Abbildungen $f : M \rightarrow \{0, 1\}$.

Gegenbeispiel 3.2.11. Ebenso gilt der Satz nicht für nichtkommutative Ringe. Es existieren zum Beispiel Zahlreiche Matrixringe, welche idempotente Matrizen enthalten, also Matrizen M mit $M^n = I$. Somit sind alle skalaren Vielfachen dieser Matrizen Nullstellen von X^n .

Satz 3.2.12. Sei k ein kommutativer Ring und $P, Q \in k[X]$, wobei Q normiert ist (also Leitkoeffizient 1 hat.) Dann existieren eindeutige $A, B \in k[X]$, sodass

$$P = A \cdot Q + B$$

Wobei $\deg B \leq (\deg Q) - 1$

Beispiel 3.2.13. Der Quotientenring $\mathbb{R}[X]/\langle X^2 + 1 \rangle$ ist isomorph zu den komplexen Zahlen (Da $X^2 + 1 = 0 \implies X^2 = -1 \implies i := X$)

Satz 3.2.14. Sei $P \in \mathbb{R}[X]$ ein Polynom vom Grad 2 ohne reelle Nullstellen, und sei $\alpha \in \mathbb{C}$ mit $P(\alpha) = 0$. Dann gilt $\mathbb{R}[X]/\langle P \rangle \xrightarrow{\sim} \mathbb{C}$.

Satz 3.2.15. Sei R ein Ring, $\mathfrak{a}_1, \dots, \mathfrak{a}_r \subset R$ Ideale mit $i \neq j \implies \mathfrak{a}_i + \mathfrak{a}_j = R$. So ist die durch Restklassen gegebene Abbildung φ eine Surjektion $R \twoheadrightarrow R/\mathfrak{a}_1 \times \dots \times R/\mathfrak{a}_j$.

Beweis. Die Abbildung ist klar ein Ringhomomorphismus. Es reicht also zu zeigen, dass alle "Einheitsvektoren" $(0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$ im Bild liegen, da dann der Rest durch Linearkombination folgt.

OBdA reicht $(1, 0, \dots, 0) \in \text{im}(\varphi)$. Es gilt:

$$\begin{aligned}
 \mathfrak{a}_1 + \mathfrak{a}_i &= R \\
 \implies \exists a_i \in \mathfrak{a}_1, b_i \in \mathfrak{a}_i : a_i + b_i &= 1 \\
 \implies 1 - a_i &= b_i \\
 \implies \varphi_1(1 - a_i) &= [1 - a_i]_{\mathfrak{a}_1} = 1, \\
 \varphi_i(1 - a_i) &= [b_i]_{\mathfrak{a}_i} = 0 \\
 \implies \varphi \left(\prod_{i \geq 2} (1 - a_i) \right) &= (1, \dots, 0)
 \end{aligned}$$

□

Korollar 3.2.16. Polynominterpolation: Gegeben $x_1, \dots, x_r \in \mathbb{R}$ paarweise verschieden und $y_1, \dots, y_r \in \mathbb{R}$ beliebig gibt es ein Polynom $P \in \mathbb{R}[T]$, sodass $\forall i : P(x_i) = y_i$.

Beweis.

$$\begin{array}{ccc}
 \mathbb{R}[T] & \xrightarrow{E_x} & \mathbb{R} \\
 & \searrow & \nearrow \sim \\
 & \mathbb{R}[T] / \langle T - x \rangle &
 \end{array}$$

The rest should be entirely obvious and is left as an exercise to the reader. (Maybe coming later :) □

Führt man eine Polynominterpolation durch, findet man die "Basisvektoren", indem man pro x_i für alle x_j die Geraden durch (x_i, y_0) und $(x_j, 0)$ miteinander multipliziert. Diese werden dann aufsummiert. Letztendlich führt man also die selbe Rechnung durch wie in unserem abstrakteren Beweis über Ideale.

Satz 3.2.17. Es gilt zusätzlich $\ker \varphi = \bigcap_{i=1}^r \mathfrak{a}_i$. Ist R kommutativ, ist dies außerdem äquivalent zu $\langle \mathfrak{a}_1 \mathfrak{a}_2 \dots \mathfrak{a}_r \rangle$.

Beweis. Seien $\mathfrak{a}_1, \mathfrak{a}_2 \subset R$ und R kommutativ mit $\mathfrak{a}_1 + \mathfrak{a}_2 = R$. Wir zeigen $\mathfrak{a}_1 \cap \mathfrak{a}_2 = \langle \mathfrak{a}_1 \mathfrak{a}_2 \rangle$. Die Richtung $\mathfrak{a}_1 \cap \mathfrak{a}_2 \supseteq \langle \mathfrak{a}_1 \mathfrak{a}_2 \rangle$ ist klar.

Es existieren $a_1 \in \mathfrak{a}_1$, $a_2 \in \mathfrak{a}_2$, sodass $a_1 + a_2 = 1$. Dann gilt insbesondere

$$\forall x \in \mathfrak{a}_1 \cap \mathfrak{a}_2 :$$

$$a_1 x + a_2 x = x$$

Also $\mathfrak{a}_1 \cap \mathfrak{a}_2 \subseteq \langle \mathfrak{a}_1 \mathfrak{a}_2 \rangle$, also auch $\mathfrak{a}_1 \cap \mathfrak{a}_2 = \langle \mathfrak{a}_1 \mathfrak{a}_2 \rangle$. Der Rest folgt durch Induktion. \square

Korollar 3.2.18.

$$\mathbb{R}[T]/\langle X^2 - 1 \rangle \cong \mathbb{R}[T]/\langle X + 1 \rangle \times \mathbb{R}[T]/\langle X - 1 \rangle \cong \mathbb{R} \times \mathbb{R}$$

3.3 Irreduzible Elemente und Faktorielle Ringe

Wir wollen nun eine "Primfaktorzerlegung" für beliebige Ringe definieren:

Definition 3.3.1. Sei R ein kommutativer Ring. Ein Element $a \in R$ heißt **irreduzibel** in R , falls es weder eine Einheit ist noch sich als Produkt von zwei Nichteinheiten darstellen lässt, also:

$$a = bc \implies b \in R^\times \vee c \in R^\times$$

Definition 3.3.2. Ein kommutativer Ring R heißt **faktoriell**, wenn

1. R ein Integritätsring ist,
2. Jedes $a \in R \setminus (R^\times \cup \{0\})$ ist Produkt von irreduziblen Elementen $a = p_1 p_2 \dots p_r$
3. Ist $p_1 p_2 \dots p_r = q_1 q_2 \dots q_s$, so ist $s = r$ und es gibt eine Permutation $\sigma \in \mathcal{S}_r$ und ein $u_i \in R^\times$, sodass für alle i

$$p_i = u_i q_{\sigma(i)}$$

Anmerkung 3.3.3. Körper besitzen zwar keine irreduziblen Elemente, sind aber trotzdem faktoriell, da jedes Element kürzbar ist und außerdem jedes Element eine Einheit ist, also $R \setminus (R^\times \cup \{0\}) = \emptyset$.

Proposition 3.3.4. Der Ring $C(\mathbb{R}, \mathbb{R})$ der stetigen Funktionen $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ ist nicht faktoriell, zum Beispiel ist die Funktion $|x|$ kein Produkt von irreduziblen Funktionen, da wir die Funktion als ein beliebig langes Produkt von Wurzeln von sich selbst schreiben können.

Proposition 3.3.5. $R = \mathbb{Z}[\sqrt{-5}] = \{a + b\sqrt{-5} \mid a, b \in \mathbb{Z}\}$ ist nicht faktoriell.

Beweis. Es gilt $6 = 2 \cdot 3 = (1 + \sqrt{-5})(1 - \sqrt{-5})$. Alle dieser Faktoren sind irreduzibel. \square

Definition 3.3.6. Ein kommutativer Integritätsring R heißt **euklidisch**, falls man "mit Rest teilen kann", also "der Euklidische Algorithmus funktioniert". Formell bedeutet das, dass es eine Abbildung

$$\sigma : R \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{N}$$

gibt, sodass für alle $a, b \in R$ mit $b \neq 0$ $q, r \in R$ existieren, sodass

$$a = b \cdot q + r$$

und $r = 0$ oder $\sigma(b) > \sigma(r)$.

Anmerkung 3.3.7. Die Abbildung σ kann durch eine Abbildung in eine beliebige wohlgeordnete Menge ersetzt werden.

Beispiel 3.3.8.

1. $R = \mathbb{Z}$, $\sigma(n) = |n|$.
2. $R = K[X]$ (für einen beliebigen Körper K), $\sigma(P) = \deg(P)$.
3. $R = \mathbb{Z}[i]$, $\sigma(a + bi) = a^2 + b^2$. (Ausführlicher später).

Satz 3.3.9. In einem euklidischen Ring R ist jedes Ideal I ein Hauptideal.

Beweis. Falls $I = \langle 0 \rangle$, so sind wir fertig. Falls $I \neq \langle 0 \rangle$ gibt es ein $b \in I \setminus 0$ mit kleinstmöglichem $\sigma(b)$. So gilt $I = \langle b \rangle$, denn falls $a \in I \setminus Rb$, so wäre $a = b \cdot q + r$, mit $r \neq 0$, $\sigma(r) < \sigma(b)$ und $r = a - bq \in I$. Widerspruch!!!!!! \square

Beispiel 3.3.10. Sei K ein Körper und $A \in \text{Mat}(n \times n, K)$. So ist

$$I = \{P \in K[X] \mid P(A) = 0\}$$

ein Ideal, welches vom Minimalpolynom von A erzeugt wird.

Definition 3.3.11. Ein Integritätsring R , welcher kein Körper ist und in dem jedes Ideal ein Hauptideal ist, heißt **Hauptidealring**.

Anmerkung 3.3.12. Körper werden aus den Hauptidealringen ausgeschlossen, da man später in der kommutativen Algebra gerne hätte, dass die faktoriellen Ringe der *Krull-Dimension* 1 die Hauptidealringe sind und die der Dimension 0 die Körper.

Satz 3.3.13. Jeder Hauptidealring ist faktoriell.

Beweis.

1. Zeige: Jedes $r \in R \setminus (R^\times \cap \{0\})$ ist ein Produkt $r = p_1 \dots p_r$, $r \geq 1$, mit p_i irreduzibel.

Sei $r \in R$ ein Gegenbeispiel. Dann gilt:

- $r \notin R^\times$.
- $r \neq 0$.
- r ist nicht irreduzibel.

Also $r = r_1 \cdot r'$, mit $r_1, r' \notin R^\times$. Also ist entweder r_1 oder r_2 auch ein Gegenbeispiel. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit sei dies r_1 . Wir wissen nun, dass $\langle r_1 \rangle \supsetneq \langle r \rangle$ sein muss, da r' keine Einheit ist und somit r_1 kein Vielfaches von r sein kann. Wir faktorisieren weiter und finden eine Kette

$$\langle r \rangle \subsetneq \langle r_1 \rangle \subsetneq \dots$$

Da diese Ideale jeweils ineinander liegen ist diese Vereinigung ein Ideal, also insbesondere ein Hauptideal. Somit existiert ein Element $k \in R$, welches dieses Ideal erzeugt. Insbesondere existiert ein i , sodass $k \in \langle r_i \rangle$. Dann muss aber

$$\langle r_i \rangle = \langle r_{i+1} \rangle = \dots$$

gelten. Widerspruch!

2. Zeige: Die Faktorisierung ist eindeutig. Wir zeigen allgemeiner: Ist p irreduzibel mit $p \mid ab$, so folgt $p \mid a$ oder $p \mid b$. Äquivalent dazu ist: $p \mid ab \wedge \neg(p \mid a) \implies p \mid b$.

Wir betrachten nun das Ideal $\langle p, a \rangle$. Dieses muss ein Hauptideal $\langle c \rangle$ sein. Dann gilt $c \mid p$ und $c \mid a$. Da p irreduzibel ist gilt $c \in R^\times$ oder $c \in R^\times p$. Da $p \nmid a$ nicht teilt, kann c kein Vielfaches von p sein. Also ist c eine Einheit. Das von p und a erzeugte Ideal ist also R . Es folgt

$$xp + ya = 1,$$

also

$$xpb + yab = b.$$

Nun gilt trivial $p \mid xpb$. Wir wissen außerdem $p \mid ab$, also $p \mid yab$. Es folgt $p \mid b$.

Die Eindeutigkeit der Faktorisierung folgt nun genau wie im Fall der ganzen Zahlen.

□

Korollar 3.3.14. Für jeden Körper K existiert eine Bijektion, gegeben durch die Mul-

Multiplikation, zwischen Multimengen von irreduziblen $K[X]$ -Polynomen und normierten $K[X]$ -Polynomen.

Proposition 3.3.15. *Über algebraisch abgeschlossenen Körpern haben alle irreduziblen Polynome den Grad 1.*

Definition 3.3.16. Ein Ideal eines Rings heißt **echtes Ideal**, wenn es nicht der ganze Ring ist. Es heißt außerdem **maximales Ideal**, falls es keine echte Teilmenge eines echten Ideals ist.

Proposition 3.3.17. *Ein Ideal ist genau dann maximal, wenn es ein von einem irreduziblen Element erzeugtes Hauptideal ist.*

Proposition 3.3.18. *Ein Ring ist genau dann ein Körper, wenn das einzige maximale Ideal das Nullideal ist.*

Satz 3.3.19. *Sei R ein Hauptidealring und $a \in R \setminus \{0\}$. So ist $R/\langle a \rangle$ genau dann ein Körper, wenn $\langle a \rangle$ maximal ist.*

3.4 Gaußprimzahlen und Summen zweier Quadrate

Lemma 3.4.1. *Der Ring $\mathbb{Z}[i]$ der Gauß'schen Zahlen ist euklidisch und faktoriell.*

Definition 3.4.2. Wir nennen die irreduziblen Elemente von $\mathbb{Z}[i]$ **Gaußprimzahlen**. Außerdem nennen wir die Einheiten von $\mathbb{Z}[i]$ **Gaußeinheiten**.

Proposition 3.4.3. *Es gibt genau vier Gaußeinheiten, nämlich*

$$\mathbb{Z}[i]^\times = \{1, -1, i, -i\}$$

Lemma 3.4.4.

1. *Jede Gaußprimzahl $\pi \in \mathbb{Z}[i]$ teilt genau eine Primzahl $p \in \mathbb{N}$.*
2. *Jede Primzahl $p \in \mathbb{N}$ ist entweder Gaußprim oder zerfällt in das Produkt einer Gaußprimzahl mit ihrer Konjugierten.*

Beweis.

1. Sei $\pi \in \mathbb{Z}[i]$ gaußprim. So ist π nicht Null und keine Gaußeinheit. Somit gilt $\pi\bar{\pi} > 1$. Aus $\pi \mid \pi\bar{\pi}$ folgt $\pi \mid p$ für mindestens einen Primteiler p von $\pi\bar{\pi}$, also teilt π mindestens eine Primzahl. Angenommen, es gilt $\pi \mid p$ und $\pi \mid q$ für Primzahlen p und q . Dann folgt sofort $\pi\bar{\pi} \mid p^2$ und $\pi\bar{\pi} \mid q^2$, also $p = q$, da $\pi\bar{\pi}$ keine Einheit ist.
2. Gegeben eine Primzahl p würde jede Zerlegung $p = \alpha\beta\gamma$ in Nichtgaußeinheiten in $\mathbb{Z}[i]$ eine Zerlegung in Nichteinheiten $p^2 = (\alpha\bar{\alpha})(\beta\bar{\beta})(\gamma\bar{\gamma})$, woraus folgen würde, dass p nicht Prim ist. Folglich ist jede Primzahl das Produkt von höchstens zwei Gaußprimzahlen α und β . Dann folgt sofort

$$p^2 = (\alpha\bar{\alpha})(\beta\bar{\beta}), \text{ also } p = \alpha\bar{\alpha} = \beta\bar{\beta}, \text{ also } \beta = \bar{\alpha}.$$

□

Proposition 3.4.5. *Es gilt:*

- $2 = (1+i)(1-i)$.
- 3 ist Gaußprim.
- $5 = (1+2i)(1-2i)$.
- 7 ist Gaußprim.
- 11 ist Gaußprim.
- $13 = (2+3i)(2-3i)$

Anmerkung 3.4.6. Die 2 spielt hier eine seltsame Sonderrolle, da $(1+i) = i(1-i)$, also $2 = i(1-i)^2$. Die 2 hat also bis auf Einheiten nur einen Gaußprimfaktor - alle anderen Primzahlen haben selbst bis auf Einheiten zwei Gaußprimfaktoren.

Satz 3.4.7. *Für eine Primzahl $p \in \mathbb{N}$ ist gleichbedeutend:*

1. p ist nicht gaußprim;
2. p ist eine Summe von zwei Quadraten;
3. $p \equiv 1 \pmod{4}$ oder $p \equiv 2 \pmod{4}$;
4. Das Polynom $X^2 + 1$ ist nicht irreduzibel in $\mathbb{F}_p[X]$;
5. (-1) ist ein Quadrat in \mathbb{F}_p .

Beweis.

- 1 \iff 2: Sei p nicht gaußprim. So gilt $p = \pi\bar{\pi}$. Für $\pi = x + iy$ folgt dann $p = x^2 + y^2$. Umgekehrt folgt auch aus $p = x^2 + y^2$ direkt $p = (x+iy)(x-iy)$, also ist p nicht Gaußprim.
- 2 \implies 3: Die Quadrate in $\mathbb{Z}/4\mathbb{Z}$ sind 0 und 1. Somit muss eine Summe von zwei Quadraten modulo 4 kongruent zu 0, 1 oder 2 sein. Ist die Summe 0, so ist p ein Vielfaches von 4, also nicht prim.

1 \iff 4: Wir betrachten folgendes Diagramm:

$$\begin{array}{ccc}
 & \mathbb{Z}[X] & \\
 \swarrow \text{mod } \langle p \rangle & & \searrow \text{mod } \langle X^2+1 \rangle \\
 \mathbb{F}_p[X] & & \mathbb{Z}[i] \\
 \searrow \text{mod } \langle X^2+1 \rangle & & \swarrow \text{mod } \langle p \rangle \\
 & \mathbb{F}_p[X] / \langle X^2+1 \rangle = \mathbb{Z}[i] / \langle p \rangle &
 \end{array}$$

dieses kommutiert gemäß universeller Eigenschaft der Quotientenabbildung.

Somit ist $\langle X^2+1 \rangle$ genau dann nicht irreduzibel, wenn $\mathbb{Z}[i]/\langle p \rangle$ kein Körper ist, also wenn p nicht irreduzibel ist.

3 \implies 5: Sei $p \equiv 1 \pmod{4}$. So gilt $p-1 = 4m$, also

$$|\mathbb{F}_p^\times| = p-1 = 4m,$$

also:

$$|\mathbb{F}_p^\times| \cong (\mathbb{Z}/4m, +)$$

somit existiert ein Element $x \in \mathbb{F}_p^\times$ der Ordnung 4. Somit hat x^2 die Ordnung 2. Da in $(\mathbb{Z}/4m, +)$ nur ein solches Element existieren kann, kann auch in \mathbb{F}_p^\times nur ein solches Element der Ordnung 2 existieren. Wir wissen bereits, dass -1 in \mathbb{F}_p^\times die Ordnung 2 hat, also folgt $x^2 = -1$.

5 \implies 4: trivial.

□

Korollar 3.4.8. Wir erhalten direkt einen formellen Beweis von Proposition 3.4.5.

Korollar 3.4.9. Eine positive natürliche Zahl $n \in \mathbb{N}_1$ lässt sich genau dann als Summe $n = x^2 + y^2$ zweier Quadratzahlen schreiben, wenn in der Primfaktorzerlegung $n = p_1^{r_1} p_2^{r_2} \dots p_t^{r_t}$ die Primfaktoren, welche Kongruent zu 3 modulo 4 sind, alle in geraden Potenzen auftreten.

3.5 Bruchkörper, Bewertungen und Primfaktorzerlegung in Polynomringen

Definition 3.5.1. Sei R ein Integritätsbereich. So definieren wir eine Äquivalenzrelation \sim auf $R \times R^\times$ durch $(n, d) \sim (m, b)$, falls $nb = md$. So definieren wir den **Bruchkörper**

$\text{Frac}(R)$ als die Menge der Äquivalenzklassen von \sim , wobei wir die Äquivalenzklasse von (n, d) als $\frac{n}{d}$ schreiben.

Anmerkung 3.5.2. Wir schreiben für den Bruchkörper eines Polynomrings $k[X]$ über einem Körper k auch

$$\text{Frac } k[X] := k(X)$$

Proposition 3.5.3. *Der Bruchkörper $\text{Frac}(R)$ bildet einen Körper, wenn wir:*

1. *Summen definieren durch*

$$\frac{n}{d} + \frac{m}{b} = \frac{nb + md}{db}$$

2. *Produkte definieren durch*

$$\frac{n}{d} \cdot \frac{m}{b} = \frac{nm}{db}$$

Anmerkung 3.5.4. Der Bruchkörper $\text{Frac}(R)$ kann auch durch eine universelle Eigenschaft definiert werden - Sei $h : R \rightarrow F$ ein injektiver Ringhomomorphismus aus R in einen Körper F . Dann gibt es genau einen Ringhomomorphismus $g : \text{Frac}(R) \rightarrow F$, sodass

$$g|_R = h.$$

Definition 3.5.5. Sei R ein faktorieller Ring und $p \in R$ irreduzibel. Die **p -adische Bewertung** (oder einfach **p -Bewertung**) ist die Abbildung

$$v_p : \text{Frac}(R) \rightarrow \mathbb{Z} \cup \{\infty\}$$

mit

$$p^n \frac{a}{b} \mapsto n$$

falls $a, b \in R \setminus 0$ und teilerfremd zu p (und $v_p(0) = \infty$).

Proposition 3.5.6. $v_p(xy) = v_p(x) + v_p(y)$

Anmerkung 3.5.7. Die Abbildung $d_p(x, y) = v_p(x - y)$ ist eine Metrik. Vervollständigen wir \mathbb{Q} gemäß dieser Metrik erhalten wir die sogenannten **p -adischen Zahlen**, welche große Relevanz insbesondere in der algebraischen Zahlentheorie haben.

Beispiel 3.5.8. Sei $R = k[X]$ über einem Körper k . Dann ist $v_{(x-\lambda)}(P)$ genau die Vielfachheit der Nullstelle λ in P .

Proposition 3.5.9. Sei $a \in \text{Frac}(R)$. Dann ist $a \in R$ genau dann, wenn für alle irreduziblen Elemente $p \in R$ $v_p(a) \geq 0$ gilt.

Proposition 3.5.10. Sei $a \in \text{Frac}(R)$ und $v_p(a) = 0$ für alle p . Dann ist $a \in R^\times$.

Definition 3.5.11. Sei R ein faktorieller Ring und $p \in R$ irreduzibel. Wir definieren die **Minimalbewertung von P bei p** als die Abbildung:

$$w_p : (\text{Frac}(R))[X] \rightarrow \mathbb{Z} \sqcup \{\infty\}$$

$$\sum_{i=0}^n a_i X^i \mapsto \min \{v_p(a_i) \mid 1 \leq i \leq n\}$$

Lemma 3.5.12. Lemma von Gauss: Sei R ein faktorieller Ring, $p \in R$ irreduzibel, und $A, B \in (\text{Frac}(R))[X]$. So gilt

$$w_p(AB) = w_p(A) + w_p(B)$$

Beweis. Sei fürs erste $w_p(A) = w_p(B) = 0$ und $A, B \in R[X]$. Betrachten wir die Äquivalenzklassen in $(R / \langle p \rangle)[X]$, so gilt $[A] \neq [0]$ und $[B] \neq [0]$ (da mindestens ein Koeffizient existiert, der kein Vielfaches einer p -Potenz ist, sonst wäre ja w_p nicht 0.) Es folgt $[A][B] = [AB] \neq 0$. Also existiert in $[AB]$ ebenfalls ein Term, der kein Vielfaches einer p -Potenz ist, also gilt $w_p(AB) = 0$.

Der allgemeine Fall folgt nun durch vorheriges Multiplizieren der Polynome mit p -Potenzen, um sie in die gefragte Form zu bringen. \square

Definition 3.5.13. Sei $P \in (\text{Frac}(R))[X]$. Wir nennen P **primitiv**, oder genauer **R -primitiv**, wenn für alle irreduziblen Elemente p gilt $w_p(P) = 0$, also wenn es kein p gibt, welches alle Koeffizienten teilt.

Satz 3.5.14. Ist R faktoriell, so auch $R[X]$, und die irreduziblen Elemente sind genau:

1. Die irreduziblen Elemente von R ,
2. Die irreduziblen Polynome aus $(\text{Frac}(R))[X]$, die primitiv sind.

Anwendung 3.5.15. Die Primfaktorzerlegung von $X^n - 1$ in $\mathbb{Q}[X]$, bzw. über $\mathbb{Z}[X]$. Über den komplexen Zahlen sind die Nullstellen genau die n -ten Einheitswurzeln ζ . Die sogenannten Kreisteilungspolynome sind dann definiert als:

$$\Phi_d(x) = \prod_{\text{ord } \zeta = d} (X - \zeta)$$

Man kann nun induktiv zeigen, dass diese sogar in $\mathbb{Z}[X]$ liegen, und aus unserem Satz (und viel Extraarbeit) folgt, dass sie sogar irreduzibel sind.

Satz 3.5.16. Sei R faktoriell. So ist $R[X]$ ebenfalls faktoriell, und die irreduziblen Elemente sind genau:

1. Die Irreduziblen von R ,
2. und die primitiven Polynome von $R[X]$, die irreduzibel in $(\text{Frac}(R))[X]$ sind.

Korollar 3.5.17. Sei R faktoriell und $P \in R[X] \setminus R$ (also P nicht konstant), sodass P in $(\text{Frac } R)[X]$ nicht irreduzibel. Dann gibt es auch $A, B \in R[X]$ von positivem Grad mit

$$P = A \cdot B$$

Beweisskizze. "Durch Widerspruch" :)

"□"

Korollar 3.5.18. Sei R faktoriell, so ist auch $R[X_1, \dots, X_n]$ faktoriell.

Beweisskizze. Per Induktion.

"□"

Satz 3.5.19. Sei k ein Körper, $f, g \in k[X, Y] \setminus \{0\}$ teilerfremd. So ist

$$|\{(x, y) \in k^2 \mid f(x, y) = g(x, y) = 0\}| < \infty$$

Beweis. Da f und g teilerfremd sind gibt es in $(\text{Frac } k[X])[Y]$ eine Darstellung

$$1 = pf + qg.$$

mit $p, q \in (\text{Frac } k[X])[Y]$. Dann können wir an die Gleichung das Produkt $h \in k[X] \setminus 0$ der Nenner von p und q multiplizieren und erhalten eine Darstellung

$$h = \tilde{p} \cdot f + \tilde{q} \cdot g$$

mit $\tilde{p}, \tilde{q} \in k[X, Y]$. Somit muss jede gemeinsame Nullstelle von f und g eine Nullstelle von h sein. Da $h \in k[X] \setminus 0$ ist, gibt es davon nur endlich viele. □

3.6 Kreisteilungspolynome

Wir wollen darauf hinarbeiten, das Polynom $X^n - 1$ in den Rationalen Zahlen zu faktorisieren. Dafür betrachten wir zuerst Faktorisierungen in den komplexen Polynomen - In Anmerkung 3.5.15 haben wir das sogenannte **d -te Kreisteilungspolynom** oder **d -te zyklotomische Polynom** definiert als:

$$\Phi_d(x) = \prod_{\text{ord } \zeta_i = d} (X - \zeta_i)$$

Wobei ζ_i die n -ten Einheitswurzeln, also die komplexen Zahlen mit $\zeta_i^n = 1$, sind, und $\text{ord } \zeta_i$ im gruppentheoretischen Sinne gemeint ist, also ist $m = \text{ord } \zeta_i$ die kleinste Zahl, sodass $\zeta_i^m = 1$.

Proposition 3.6.1. *Es gilt*

$$X^n - 1 = \prod_{d|n} \Phi_d(X)$$

Proposition 3.6.2. *Es gilt:*

1. $\Phi_1(X) = X - 1$
2. $\Phi_2(X) = X + 1$
3. $\Phi_3(X) \cdot \Phi_1(X) = X^3 - 1$, also $\Phi_3(X) = X^2 + X + 1$.
4. $\Phi_4(X) = (X + i)(X - i) = X^2 + 1$.

Satz 3.6.3. *Die Kreisteilungspolynome sind in $\mathbb{Z}[X]$ enthalten und normiert.*

Beweis. Per Induktion über Proposition 3.6.1. □

Wir wollen letztendlich zeigen, dass alle Kreisteilungspolynome irreduzibel in $\mathbb{Q}[X]$ und $\mathbb{Z}[X]$ sind. Dafür brauchen wir aber noch einige Hilfssätze.

Satz 3.6.4. (Eisenstein-Kriterium) *Sei*

$$P = \sum_{i=1}^n a_i X^i \in \mathbb{Z}[X].$$

Sei p eine Primzahl, sodass

1. $p \nmid a_n$,
2. $p \mid a_i$ für alle $i < n$,
3. und $p^2 \nmid a_0$.

Dann ist P irreduzibel in $\mathbb{Q}[X]$.

Beweis. Sei P nicht irreduzibel in $\mathbb{Q}[X]$. So gibt es nicht konstante $A, B \in \mathbb{Z}[X]$ mit $\deg A = r$, $\deg B = s$, $n = r + s$, sodass

$$P = A \cdot B$$

Es folgt

$$\overline{P} = \overline{A} \cdot \overline{B}$$

im Quotientenring $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})[X]$. Nach Annahme ist

$$\overline{P} = \overline{a}_n X^n$$

Also folgt $\overline{A} = nX^r$ und $\overline{B} = mX^s$, mit $n, m \neq 0$ (und alle anderen Koeffizienten verschwinden). Es folgt (?) $p^2 \mid a_0$, was ein Widerspruch ist. □

Wenden wir nun das Eisensteinkriterium auf $\Phi_p(Y+1)$ an, erhalten wir modulo p :

$$\begin{aligned}\bar{\Phi}_p(Y+1) &= \frac{(Y+1)^p - 1}{Y+1-1} \\ &= \frac{Y^p + 1^p - 1}{Y} \\ &= \frac{Y^p}{Y} \\ &= Y^{p-1} \in \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}\end{aligned}$$

Satz 3.6.5. *Sei p eine Primzahl. Dann ist $\Phi_p(X)$ irreduzibel in $\mathbb{Z}[X]$.*

3.7 Symmetrische Polynome

Definition 3.7.1. Sei k ein Ring. Ein Polynom $P \in k[X_1, \dots, X_n]$ heißt symmetrisch, wenn es gleich jeder Permutation seiner Variablen ist, also $\sigma(P) = P$ für jedes $\sigma : X_i \rightarrow X_{\sigma(i)}$

Anmerkung 3.7.2. Abstrakter: Die symmetrischen Polynome sind die Polynome, die unter der Wirkung der symmetrischen Gruppe auf dem Ring $k[X_1, \dots, X_n]$ invariant sind.

Proposition 3.7.3. *Die Invarianten der Wirkung einer Gruppe G auf einen Ring R bilden immer ebenfalls einen Teilring von R , den sogenannten **Invariantenring** R^G .*

Definition 3.7.4. In $\mathbb{Z}[X_1, \dots, X_n]$ sind die **elementarsymmetrischen Polynome** die Polynome

$$s_i = \sum_{|I|=i} \left(\prod_{j \in I} X_j \right)$$

Allgemeiner sind in einem kommutativen Ring $k[T]$ die Koeffizienten des Polynoms $\pi_{i=1}^n(T - \zeta_i)$ genau die elementarsymmetrischen Polynome in den $-\zeta_i$.

Satz 3.7.5. *Sei k ein kommutativer Ring. Dann lässt sich jedes symmetrisch Polynom eindeutig als Polynom in den elementarsymmetrischen Polynomen darstellen.*

Beweis. Wir notieren für $\alpha \in \mathbb{N}^n$

$$X^\alpha = X_1^{\alpha_1} \dots X_n^{\alpha_n}$$

Wir betrachten die lexikographische Ordnung (quasi die "Wörterbuchordnung") \prec auf \mathbb{N}^n . Diese ist auf \mathbb{N}^n (mit $n \in \mathbb{N}$, also endlich) eine Wohlordnung - jede nichtleere Teilmenge hat ein kleinstes Element. Gegeben

$$f = \sum_{\alpha \in \mathbb{N}^n} c_\alpha X^\alpha \in k[X_1, \dots, X_n] \setminus \{0\}$$

heißt das größte α mit $c_\alpha \neq 0$ sein **Leitindex**. Ist f symmetrisch, So gilt für

den Leitindex $\alpha_1 \geq \alpha_2 \geq \dots \geq \alpha_n$. (Da jede Permutation des Leitkoeffizients als Koeffizient vorkommen muss, und diese Permutation die Lexikographisch größte ist).

Angenommen, $k[s_1, \dots, s_n] \neq k[X_1, \dots, X_n]^{\mathcal{S}_n}$. Sei dafür f symmetrisch, aber kein Polynom symmetrischer Polynom, sodass f den kleinstmöglichen Leitindex hat, also:

$$f = c_\alpha X^\alpha + \sum_{\beta \prec \alpha} c_\beta X^\beta$$

Da f symmetrisch ist, gilt $\alpha_1 \geq \alpha_2 \dots \alpha_n$. Behauptung: Das Polynom

$$g := s_n^{\alpha_n} \cdot \prod_{i=1}^{n-1} s_i^{\alpha_i - \alpha_{i+1}}$$

hat den selben Leitindex. (Später als Lemma refaktorisieren?). Somit hat das Polynom $h := f - c_\alpha g$ einen kleineren Leitindex. Außerdem ist h kein Polynom in den elementarsymmetrischen Polynom, sonst wäre $f = h + c_\alpha$ ebenfalls ein solches. Dies widerspricht der Annahme, dass f einen kleinstmöglichen Leitindex hat. \square

Definition 3.7.6. (Einfügen: Algebraische Unabhängigkeit)

Satz 3.7.7. Die elementarsymmetrischen Polynome sind algebraisch unabhängig.

Proposition 3.7.8. Das Polynom

$$T^3 + pT + q \in k[T]$$

in einem algebraisch abgeschlossenen Körper k hat genau dann mehrfache Nullstellen, wenn

$$4p^3 + 27q^2 = 0.$$

Lemma 3.7.9.

$$(X - Y)^2(Y - Z)^2(Z - X)^2 = s_1^2 s_2^2 - 4s_1^3 s_3 + 18s_1 s_2 s_3 - 4s_2^3 - 27s_3^2$$

Lemma 3.7.10. Durch Betrachtung der Grade haben wir

$$\begin{aligned} & (X - Y)^2(Y - Z)^2(Z - X)^2 \\ &= As_1^6 + Bs_1^4 s_2 + Cs_1^3 s_3 + Ds_1^2 s_2^2 + Es_1 s_2 s_3 + Fs_2^3 + Gs_3^2 \end{aligned}$$

Korollar 3.7.11.

$$T^3 + aT^2 + bT + c \in k[T]$$

in einem algebraisch abgeschlossenen Körper k hat genau dann mehrfache Nullstellen, wenn

$$a^2 b^2 - 4a^3 c + 18abc - 4b^3 - 27c^3 = 0$$

Chapter 4

Körper

4.1 Körpererweiterungen

Definition 4.1.1. Sei K ein Körper. Wir nennen den von der leeren Menge erzeugten Teilkörper $T = (\emptyset)_K$ den **Primkörper von K** . Dieser ist automatisch der kleinste Unterkörper von K .

Definition 4.1.2. Eine **Körpererweiterung** ist ein paar $L \supset K$ bestehend aus einem Körper L und einem Unterkörper K . Man schreibt dann statt $L \supset K$ meist L/K und nennt K den **Grundkörper** und L den **Erweiterungskörper** oder **Oberkörper** der Körpererweiterung.

Definition 4.1.3. Sei L/K eine Körpererweiterung und $\alpha \in L$. Wir nennen α **algebraisch über K** , wenn es ein vom Nullpolynom verschiedenes Polynom $0 \neq Q \in K[X]$ mit $Q(\alpha) = 0$ gibt. Ist α nicht algebraisch, heißt es **transzendent**.

Satz 4.1.4. Sei L/K eine Körpererweiterung, $\alpha \in L$.

1. Ist α transzendent, so ist der Einsetzungshomomorphismus $\varphi_\alpha : K[X] \rightarrow L$ injektiv. Desweiteren induziert φ_α einen Körperhomomorphismus $\tilde{\varphi}_\alpha : \text{Frac}(K[X]) \rightarrow L$ mit Bild $K(\alpha)$, also dem kleinsten von K und α erzeugten Unterkörper von L .
2. Ist α algebraisch über K , so ist $\ker(\varphi_\alpha) \neq \{0\}$. So gibt es in $K[X] \setminus \{0\}$ unter allen P mit $P(\alpha) = 0$ genau ein normiertes Polynom von kleinstem Grad. Wir nennen dieses das **Minimalpolynom** $\text{Irr}(\alpha, K)$.

Beweis. 1. (...)

2. $K[X]$ ist ein Hauptidealring. Somit existiert mindestens ein $Q \in K[X] \setminus \{0\}$ mit $\ker(\varphi_\alpha) = \langle Q \rangle$. Wir wählen ein Q mit kleinstmöglichem Grad und normieren es und erhalten das Minimalpolynom.

□

Lemma 4.1.5. *Jedes Polynom $P \in K[X]$ mit $P(\alpha) = 0$ ist ein Vielfaches des Minimalpolynoms.*

Beweisskizze. "Ist klar."

"□"

Korollar 4.1.6. *Ist $Q \in K[X] \setminus 0$ irreduzibel und normiert mit $Q(\alpha) = 0$, so ist Q bereits das Minimalpolynom.*

Lemma 4.1.7. *Das Minimalpolynom ist $K[X]$ -irreduzibel.*

Beweis. Gemäß Isomorphiesatz für Quotientenringe gilt

$$(K[X] / \langle Q \rangle) = (K[X] / \ker(\varphi_\alpha)) \cong \text{Im}(\varphi_\alpha) = K[\alpha] \subset L$$

Da $K[\alpha] \subset L$ ist $K[\alpha]$ ein kommutativer Integritätsring, also ist $K[X] / Q$ ebenfalls ein kommutativer Integritätsring. Wäre Q nun nicht irreduzibel in $K[X]$, so wären die Faktoren Nullteiler. □

Lemma 4.1.8. *Ist $d = \deg(\text{Irr}(\alpha, K))$, so ist $\alpha^0, \alpha^1, \dots, \alpha^{d-1}$ eine K -Basis von $K(\alpha)$.*

Beispiel 4.1.9.

1. $\text{Irr}(5, \mathbb{Q}) = X - 5$
2. $\text{Irr}(0, \mathbb{Q}) = X$
3. $\text{Irr}(i, \mathbb{R}) = X^2 + 1$
4. $\text{Irr}(i, \mathbb{C}) = X - i$
5. $\text{Irr}(\sqrt{5}, \mathbb{Q}) = X^2 - 5$
6. $\text{Irr}(\sqrt[4]{5}, \mathbb{Q}) = X^4 - 5$ (Irreduzibel gemäß Eisenstein)
7. $\text{Irr}(\sqrt[4]{5}, \mathbb{Q}) = \text{Irr}(\sqrt{2}, \mathbb{Q}) = X^2 - 2$

Definition 4.1.10. Sei L/K eine Körpererweiterung. Wir definieren den **Grad der Körpererweiterung** als

$$[L : K] = \dim_K L,$$

also den Grad von L als K -Vektorraum.

Beispiel 4.1.11.

1. $[\mathbb{C} : \mathbb{R}] = \dim_{\mathbb{R}} \mathbb{C} = 2$
2. $[\mathbb{R} : \mathbb{Q}] = \dim_{\mathbb{Q}} \mathbb{R} = \infty$ (muss sein, da \mathbb{Q} abzählbar und \mathbb{R} überabzählbar)

Proposition 4.1.12.

1. Ist $\alpha \in L$ algebraisch über K , so ist

$$[K(\alpha) : K] = \deg(\text{Irr}(\alpha, K)).$$

2. Ist $\alpha \in L$ transzendent über K , so ist

$$[K(\alpha) : K] = \infty.$$

Beweis.

1. (?)
2. Ist $[K(\alpha) : K] < \infty$, so können $\alpha^0, \alpha^1, \dots$ nicht K -linear unabhängig sein. Somit gibt es eine nichttriviale Linearkombination dieser Elemente, welche 0 ergibt. Diese ist genau ein Polynom mit α als Nullstelle, also ist α in diesem Fall nicht transzendent.

□

Lemma 4.1.13. Sei L/K , $\alpha \in L$. Die folgenden Aussagen sind äquivalent:

1. α ist algebraisch über K
2. $[K(\alpha) : K] < \infty$

Proposition 4.1.14. Bis auf einen Sonderfall entsteht jede Körpererweiterung mit Grad 2 durch Adjunktion einer Quadratwurzel. Genauer: Sei L/K eine Körpererweiterung und $\text{char}(K) \neq 2$. Dann ist $[L : K] = 2$ genau dann, wenn es $\alpha \in L \setminus K$ gibt, sodass $\alpha^2 \in K$ und $L = K(\alpha)$

Satz 4.1.15. (Turmregel) Seien $M \supset L \supset K$ Körper. Dann gilt:

$$[M : K] = [M : L][L : K]$$

Beweisskizze. Sei m_1, \dots, m_r eine Basis von M als L -Vektorraum und l_1, \dots, l_k eine Basis von L als K -Vektorraum. Behauptung: $(m_i l_j)$ ist eine K -Basis von M . "□"

Korollar 4.1.16. Gegeben eine endliche Körpererweiterung ist jedes Element des Oberkörpers algebraisch über dem Unterkörper und sein Grad über dem Unterkörper teilt den Grad der Körpererweiterung.

Korollar 4.1.17. Es gilt $\sqrt{2} \notin \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})$.

Beweis. Das Minimalpolynom von $\sqrt{2}$ in \mathbb{Q} ist $X^2 - 2$ und das Minimalpolynom von $\sqrt[3]{2}$ ist $X^3 - 2$, also hat $\sqrt{2}$ den Grad 2 und $\sqrt[3]{2}$ den Grad 3. Wäre nun $\sqrt{2} \in \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})$, so hätten wir $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}) \supset \mathbb{Q}(\sqrt{2}) \supset \mathbb{Q}$, also per Turmregel $[\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}) : \mathbb{Q}(\sqrt{2})] \cdot 2 = 3$. \square

Korollar 4.1.18. Seien L/K eine Körpererweiterung und $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in L$ algebraisch über K . So ist $K(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ endlich über K und insbesondere sind alle Elemente dieser Körpererweiterung auch algebraisch über K .

4.2 Konstruktionen mit Zirkel und Lineal

Definition 4.2.1. Sei $E \subset \mathbb{C}$.

1. Eine reelle affine Gerade durch zwei verschiedene Punkte von E heißt eine *aus E elementar konstruierbare Gerade*
2. Ein Kreis durch einen Punkt von E mit Mittelpunkt in einem anderen Punkt von E heißt ein *aus E elementar konstruierbarer Kreis*
3. Alle aus E elementar konstruierbaren Geraden und Kreise nennen wir die *aus E konstruierbaren Figuren*
4. Ein Punkt $z \in \mathbb{C}$ heißt *Elementar konstruierbar aus E* , wenn er im Schnitt von zwei verschiedenen, aus E elementar konstruierbaren Figuren liegt.

Lemma 4.2.2.

1. Die Senkrechte zu einer Geraden AB durch einen Punkt P ist aus AB und P elementar konstruierbar.
2. Die Parallele zu einer Geraden AB durch einen Punkt P ist aus AB und P elementar konstruierbar.

Satz 4.2.3. Die Folgenden Teilmengen K und Q von \mathbb{C} sind identisch:

1. Die kleinste Teilmenge $K \subset \mathbb{C}$, die 0 und 1 enthält, sodass jede aus K elementar konstruierbare komplexe Zahl wieder in K liegt (die **konstruierbaren Zahlen**)
2. Die kleinste Teilmenge $Q \subset \mathbb{C}$, die sowohl ein Teilkörper ist als auch stabil unter dem Bilden von Quadratwurzeln.

Proposition 4.2.4. Wir können K und Q bilden, indem wir den Schnitt aller Mengen mit den gefragten Eigenschaften nehmen. Dieser hat wieder die gefragten Eigenschaften.

Lemma 4.2.5. Sei $a \in \mathbb{C}^\times$. Folgende Aussagen sind äquivalent:

1. $a \in K$,
2. $|a| \in K$ und $\frac{a}{|a|} \in K$,

3. $\operatorname{Re}(a) \in K$ und $\operatorname{Im}(A) \in K$.

Lemma 4.2.6. K ist ein Körper.

Lemma 4.2.7. K ist unter der Bildung von Quadratwurzeln geschlossen.

Proposition 4.2.8. Sei L/K eine Körpererweiterung und K von Charakteristik ungleich 2. So ist gleichbedeutend:

1. $[L : K] = 2$
2. $\exists \alpha \in L$, sodass $\alpha \notin K$, $\alpha^2 \in K$ und $L = K(\alpha)$.

Satz 4.2.9. Ist $z \in Q$, so ist z algebraisch über \mathbb{Q} mit $\operatorname{Grad} [\mathbb{Q}(z) : \mathbb{Q}] = 2^r$.

Beweis. $z \in Q$ gilt genau dann, wenn es eine Körperkette $\mathbb{Q} = K_0 \subset K_1 \subset \dots \subset K_r$ gibt, sodass $z \in K_r$. An jeder Stelle wird eine Quadratwurzel adjungiert, also ist für alle i $[K_{i+1} : K_i] = 2$. \square

Korollar 4.2.10. $\sqrt[3]{2}$ ist nicht mit Zirkel und Lineal konstruierbar, also kann man zu einem gegebenen Würfel keinen Würfel mit doppeltem Volumen konstruieren.

Beweis. Das Minimalpolynom $\operatorname{Irr}(\sqrt[3]{2}, \mathbb{Q})$ von $\sqrt[3]{2}$ über \mathbb{Q} ist $X^3 - 2$, also gilt $[\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}) : \mathbb{Q}] = 3 \neq 2^r : r \in \mathbb{N}$. \square

Korollar 4.2.11. $\sqrt[7]{1} = e^{\frac{2\pi i}{7}}$ ist nicht konstruierbar, also ist das Regelmäßige 7-Eck nicht konstruierbar.

Beweis. $\operatorname{Irr}(\sqrt[7]{1}, \mathbb{Q}) = \Phi_7(X) = X^6 + X^5 + \dots + 1$ \square

Korollar 4.2.12. Es gibt keine Konstruktion zu einer Dreiteilung von Winkeln.

Beweis. $\sqrt[3]{1}$ ist konstruierbar, da $\operatorname{Irr}(\sqrt[3]{1}, \mathbb{Q}) = X^2 + X + 1$, also sind 120° -Winkel konstruierbar. Allerdings ist $\zeta_9 := \sqrt[9]{1}$ nicht konstruierbar, da $\operatorname{Irr}(\sqrt[9]{1}, \mathbb{Q}) = X^6 + X^3 + 1$, also kann man innerhalb dieses konstruierten 120° -Winkel keine 40° -Winkel konstruieren. \square

4.3 Endliche Körper

Satz 4.3.1. Jeder endliche Schiefkörper ist bereits ein Körper.

Satz 4.3.2. *Die Kardinalität eines endlichen Körpers ist stets eine echte Primzahlpotenz, und zu jeder echten Primzahlpotenz gibt es einen bis auf (nicht eindeutigen) Isomorphismus eindeutig bestimmten endlichen Körper mit dieser Kardinalität. Die Kardinalität ist also eine bijektive Abbildung*

$$\{\text{endliche Körper modulo Isomorphismus}\} \xrightarrow{\sim} \{\text{echte Primzahlpotenzen}\}$$

Beweis (Teil 1). Ein endlicher Körper \mathbb{F} hat notwendig eine positive Charakteristik p . Wir haben bereits bewiesen, dass diese eine Primzahl sein muss. Wir erhalten also direkt eine Einbettung $\mathbb{F}_p \rightarrow \mathbb{F}$.

Durch diese Einbettung wird \mathbb{F} ein endlichdimensionaler \mathbb{F}_p -Vektorraum (?). Mit $r = \dim_{\mathbb{F}_p} \mathbb{F} = [\mathbb{F} : \mathbb{F}_p]$ gilt dann bereits $|\mathbb{F}| = p^r$. Somit ist die Kardinalität eines endlichen Körpers stets eine Primzahlpotenz. \square

Es gilt noch zu zeigen, dass die Kardinalitätsabbildung auf den endlichen Körpern bijektiv ist. Hierfür beweisen wir als Hilfsmittel erst einen weiteren Satz und zwei Hilfslemmata.

Lemma 4.3.3. (Adjunktion von Nullstellen): *Gegeben ein Körper K und ein nichtkonstantes Polynom $P \in K[X] \setminus K$ gibt es einen Körperhomomorphismus $i : K \rightarrow L$ derart, dass unter der von i auf den Polynomringen induzierte Abbildung $i_{[X]} : K[X] \rightarrow L[X]$ das Bild $i_{[X]}(P)$ von P eine Nullstelle in L hat.*

Beweis. 1. Angenommen, P ist irreduzibel in $K[X]$. Da $K[X]$ ein Polynomring in einer Veränderlichen über einem Körper ist, ist $K[X]$ ein Hauptidealring. Somit ist der Quotientenring $L := K[X]/\langle P \rangle$ ein Körper.

Sei $\bar{Q} \in L$ die Nebenklasse eines Polynoms $Q \in K[X]$. Wir betrachten den eindeutigen Körperhomomorphismus

$$i : K \rightarrow L = K[X]/\langle P \rangle \quad a \mapsto a$$

Dann gilt:

$$\begin{aligned} (i_{[X]}(P))(\bar{X}) &= \sum_{i=1}^n \bar{a}_i \bar{X}^i \\ &= \overline{\left(\sum_{i=1}^n a_i X^i \right)} \\ &= \bar{P} = \bar{0} \end{aligned}$$

also ist \bar{X} eine Nullstelle des Polynoms $i_{[X]}(P) \in L[X]$.

2. Angenommen, P ist nicht irreduzibel. Dann bilden wir stattdessen den Quotientenring über einen beliebigen irreduziblen Faktor von P . Dadurch adjungieren wir einen Nullstelle dieses Faktors, also auch eine Nullstelle von P selbst.

□

Diese Konstruktion wird in manchen Quellen auch als die **Kronecker-Konstruktion** bezeichnet.

Proposition 4.3.4. *Sei $P \in K[X]$ irreduzibel. Sei $L \supset K$ eine Körpererweiterung von K und $\alpha \in L$ eine Nullstelle von P . Dann induziert das Einsetzen von α für X einen Körperisomorphismus*

$$K[X]/\langle P \rangle \xrightarrow{\sim} K(\alpha)$$

Korollar 4.3.5. (Zerfällung von Polynomen in Körpererweiterungen): *Gegeben ein Körper K und ein von Null verschiedenes Polynom $P \in K[X]$ gibt es eine endliche Körpererweiterung L von K derart, dass P als Element von $L[X]$ in Linearfaktoren zerfällt.*

Lemma 4.3.6. *Seien p eine Primzahl, $q = p^r$ mit $r \geq 1$, und L ein Körper der Charakteristik p . Zerfällt das Polynom $P(X) = X^q - X$ über dem Körper L vollständig in Linearfaktoren, so bilden die Nullstellen von $P(X)$ in L einen Unterkörper der Kardinalität q .*

Beweis. Die Abbildung $F : L \rightarrow L, a \mapsto a^q$ ist ein Körperhomomorphismus. Die Nullstellen unseres Polynoms sind genau die Elemente a mit $a = a^q$, also die Fixpunkte von F .

Als Fixpunkte eines Körperautomorphismus bilden sie einen Unterkörper \mathbb{F} von L . Es bleibt nur noch zu zeigen, dass es genau q Elemente hat. Da $X^q - X$ von Grad q ist und in Linearfaktoren zerfällt, hat es genau dann q Nullstellen, wenn es nur einfache Nullstellen hat. Ist aber a eine Nullstelle, so gilt in $\mathbb{F}_q[X]$ die Gleichheit:

$$\begin{aligned} X^q - X &= (X - a)^q - (X - a) \\ &= ((X - a)^{q-1} - 1)(X - a) \end{aligned}$$

und da a keine Nullstelle von $((X - a)^{q-1} - 1)$ sein kann, handelt es sich um eine einfache Nullstelle. Der erste Schritt gilt, da sich durch die Charakteristik p die zusätzlichen Terme in der Binomischen Erweiterung wegfallen:

$$\begin{aligned} (X - a)^q - (X - a) &= (X^q - X) + a^q - a + p^r \left(\sum \dots \right) \\ &= X^q - X \end{aligned}$$

□

Wir können nun auch den zweiten Teil unseres Satzes über die Kardinalität endlicher Körper beweisen:

Beweis (Kardinalität endlicher Körper, Teil 2).

1. Als erstes müssen wir noch zeigen, dass es zu jeder echten Potenz q einer Primzahl auch tatsächlich einen Körper mit q Elementen gibt.

Wir wissen nun, dass wir zu \mathbb{F}_p eine Körpererweiterung von L finden, durch die das Polynom $X^{p^r} - X$ über $\mathbb{F}_p[X]$ vollständig in Linearfaktoren zerfällt, und dass die Nullstellen einen Unterkörper von L der Kardinalität p^r bilden.

2. Als letztes ist noch zu zeigen, dass endliche Körper der selben Kardinalität isomorph sind.

Sei dafür \mathbb{F} ein endlicher Körper mit $q = p^r$ Elementen. So gilt durch Anwendung des kleinen Satzes von Fermat für alle $a \in \mathbb{F}^\times$ $a^{q-1} = 1$, also $a^q - a = 0$ für alle $a \in \mathbb{F}$.

Insbesondere sind also die Minimalpolynome der Elemente von \mathbb{F} über \mathbb{F}_p genau die \mathbb{F}_p -irreduzibeln Faktoren des Polynoms $X^q - X \in \mathbb{F}_p[X]$. Die Erzeuger der Körpererweiterung \mathbb{F} sind damit genau die Nullstellen der \mathbb{F}_p -irreduziblen Faktoren P vom Grad r unseres Polynoms $X^q - X$. Da die multiplikative Gruppe eines endlichen Körpers zyklisch ist, gibt es solche Erzeuger. Somit folgt für das Minimalpolynom P dieser Erzeuger

$$\mathbb{F} \cong \mathbb{F}_p[X]/\langle P \rangle$$

für einen und jeden \mathbb{F}_p -irreduziblen Faktor P vom Grad r des Polynoms $X^q - X$.

□

Satz 4.3.7. (Unterkörper endlicher Körper): *Gegeben ein endlicher Körper F liefert die Kardinalität eine Bijektion*

$$\{\text{Unterkörper } K \subset F\} \xrightarrow{\sim} \{q \in \mathbb{N} : \exists r \in \mathbb{N} : q^r = |F|\}$$

Gegeben zwei endliche Körper lässt sich also insbesondere der eine genau dann in den anderen Einbetten, wenn die Kardinalität des einen eine Potenz der Kardinalität des anderen ist.

Beweis. Wir wissen nun, dass für den Grad $d : [F : K] \mid F| = |K|^d$ gilt, also liefert die Kardinalität tatsächlich eine Abbildung zwischen den beschriebenen Mengen.

Weiter muss gemäß kleinem Satz von Fermat der Unterkörper K , falls es ihn gibt, genau aus den $(|K| - 1)$ -ten Einheitswurzeln von F und der Null bestehen. Diese Bedingung definiert den Unterkörper eindeutig, also gibt es genau einen Unterkörper jeder solcher Kardinalität, also ist die Abbildung injektiv.

Für den Nachweis der Surjektivität überlegen wir uns zunächst, dass es in \mathbb{F}_{q^r} stets genau $(q - 1)$ Elemente der Ordnung $q - 1$ gibt. Dies folgt, da $\mathbb{F}_{q^r}^\times$ eine zyklische Gruppe der Ordnung $q^r - 1$ ist und da $q - 1$ ein Teiler von $q^r - 1$ ist (?). Also gibt es in \mathbb{F}_{q^r} genau q Lösungen der Gleichung $X^q - X$. Wir wissen inzwischen, dass diese einen Unterkörper von \mathbb{F}_{q^r} mit q Elementen bilden. \square

4.4 Zerfallungskörper

Definition 4.4.1. Sei K ein Körper, $P \in K[X] \setminus K$. $L \supset K$ heißt **minimaler Zerfallungskörper von P** , oder einfach **Zerfallungskörper von P** , wenn:

1. P in $L[X]$ in Linearfaktoren zerfällt, und
2. $L = K(\alpha \in L \mid P(\alpha) = 0)$

Satz 4.4.2. (Existenz und Eindeutigkeit von Zerfallungskörpern): Seien K ein Körper und $P \in K[X] \setminus 0$. So existieren Zerfallungskörper von P , und sind M/K und M'/K zwei Zerfallungskörper von P , so gibt es einen Körperisomorphismus $M \xrightarrow{\sim} M'$, der eingeschränkt auf K die Identität induziert.

Proposition 4.4.3. Gegeben eine Körpererweiterung $j : K \hookrightarrow M$ und eine primitive algebraische Erweiterung $K(\alpha)$ ihres Unterkörpers K liefert das Auswerten an α eine Bijektion

$$\begin{aligned} \text{Kring}^K(K(\alpha), M) &\xrightarrow{\sim} \{\beta \in M \mid \text{Irr}(\alpha, K)(\beta) = 0\} \\ \varphi &\mapsto \varphi(\alpha) \end{aligned}$$

Lemma 4.4.4. Sei ein kommutatives Dreieck von Körperhomomorphismen gegeben, so dass die linke Hälfte des folgenden Diagramms kommutiert: Sei außerdem α algebraisch

$$\begin{array}{ccccc} K & \xrightarrow{\quad} & L & \xrightarrow{\quad} & L(\alpha) \\ & \searrow & \downarrow & \swarrow & \\ & & M & & \end{array}$$

über K .

Falls $\text{Irr}(\alpha, K)$ über $M[X]$ vollständig in Linearfaktoren zerfällt, so gibt es einen Homomorphismus $\varphi : L(\alpha) \rightarrow M$, sodass das Diagramm kommutiert.

Beweis. $\text{Irr}(\alpha, L)$ teilt $\text{Irr}(\alpha, K)$. Also zerfällt auf $\text{Irr}(\alpha, L)$ in $M[X]$ und hat also Nullstellen $\beta \in M$. \square

Satz 4.4.5. Seien $K \hookrightarrow L$, $K \hookrightarrow M$ Körpererweiterungen. Dann gilt:

$$|\text{Kring}^K(L, M)| \leq [L : K]$$

Definition 4.4.6. Eine Körpererweiterung $L \supset K$ heißt **algebraisch**, wenn jedes $\alpha \in L$ algebraisch über K ist.

Definition 4.4.7. Eine Körpererweiterung $L \supset K$ heißt **normal**, wenn sie algebraisch ist und für jedes $\alpha \in L$ das Minimalpolynom $\text{Irr}(\alpha, K)$ über L vollständig in Linearfaktoren zerfällt.

Satz 4.4.8. Für eine endliche Körpererweiterung $N \supset K$ sind gleichbedeutend:

1. $N \supset K$ ist normal,
2. N ist der Zerfällungskörper eines Polynoms $P \in K[X]$.
3. Gegeben $Q \in K[X]$ und L/K Zerfällungskörper von Q und $\varphi, \psi \in \text{Kring}^K(N, L)$ gilt $\varphi(N) = \psi(N)$

Proposition 4.4.9. Sei $N \supset K$ eine normale Körpererweiterung, $L \supset K$ eine beliebige Körpererweiterung. So gilt für alle $\varphi, \psi \in \text{Kring}^K(N, L)$ bereits:

$$\varphi(N) = \psi(N)$$

Beweis. $\varphi(N)$ ist der Teilkörper von L , der aus den in L enthaltenen Nullstellen L aller Minimalpolynome $\text{Irr}(\alpha, K)$ für $\alpha \in N$ besteht. \square

4.5 Vielfachheit von Nullstellen

Definition 4.5.1. Ist K ein Körper, $P \in K[X]$ ein Polynom, und $\lambda \in K$ eine Nullstelle von P . Dann nennen wir

$$\sup_{n \in \mathbb{N}} (X - \lambda)^n \mid P$$

die **Vielfachheit** oder **Ordnung** von λ .

Satz 4.5.2. Ableitungsregeln für Polynome.

Satz 4.5.3. Sei K ein Körper, $P \in K[X]$, $\alpha \in K$ mit $P(\alpha) = 0$. Dann ist α eine mehrfache Nullstelle, wenn $P'(\alpha) = 0$.

Beweis.

$$\begin{aligned} P(X) &= (X - \alpha)Q(X) \\ \implies P'(X) &= Q(X) + (X - \alpha)Q'(X) \\ \implies P'(\alpha) &= Q(\alpha) \end{aligned}$$

□

Definition 4.5.4. Sei K ein Körper, $f, g \in K[X]$ nicht beide Null. Betrachte das Hauptideal $\langle f, g \rangle_{K[X]} := \langle d \rangle_{K[X]}$. Dann gibt es genau ein normiertes d mit diesen Eigenschaften. Wir nennen d den **größtengradigen gemeinsamen normierten Teiler** von f, g :

$$d = \text{ggnT}_K(f, g)$$

Proposition 4.5.5. Sei L/K eine Körpererweiterung, $f, g \in K[X]$ Polynome mit $g \neq 0$. Dann gilt:

1. Polynomdivision mit Rest von f durch g liefert das selbe Resultat in $K[X]$ und $L[X]$.
2. g ist genau dann ein Teiler von f in $L[X]$, wenn dasselbe gilt in $K[X]$.
3. $\text{ggnT}_K(f, g) = \text{ggnT}_L(f, g)$

Satz 4.5.6. Sei K ein Körper, $P \in K[X] \setminus 0$. Dann sind gleichbedeutend:

1. P hat keine mehrfache Nullstellen in seinem Zerfällungskörper;
2. $\text{ggnT}_K(P, P') = 1$

Beweis. ?

□

Satz 4.5.7. Sei K ein Körper. Gilt $\text{char}K = 0$ oder ist K endlich, so hat ein K -irreduzibles Polynom $P \in K[X]$ keine mehrfachen Nullstellen in seinem Zerfällungskörper L .

Beweis. Zeige $\text{ggnT}(P, P') = 1$. Dies folgt jedoch direkt daraus, dass P irreduzibel ist und $\deg P' < \deg P$ gilt (und gemäß $\text{char}K = 0$ auch $P' \neq 0$ gilt). □

Definition 4.5.8. Sei K ein Körper und $P \in K[X]$. So heißt P **separabel**, wenn es in seinem Zerfällungskörper L keine mehrfachen Nullstellen hat.

Satz 4.5.9. Sei $P \in K[X]$ irreduzibel. Dann ist gleichbedeutend:

1. P ist nicht separabel,
2. $P' = 0$.
3. Es gilt $\text{char}K = p > 0$ und es gibt $Q \in K[X]$ mit $P(X) = Q(X^p)$.
4. Jede Nullstelle von P in seinem Zerfällungskörper ist eine mehrfache Nullstelle.

Definition 4.5.10. Ein Körper K heißt **vollkommen** (eng. **perfect**) wenn $\text{char}K = 0$ oder wenn $\text{char}K = p > 0$ und

$$\text{Fr} : \alpha \mapsto \alpha^p$$

surjektiv ist (also jedes Element eine p -te Wurzel hat).

Definition 4.5.11. Eine Körpererweiterung L/K heißt **separabel**, falls sie algebraisch ist und für alle $\alpha \in L$ das Minimalpolynom von α über K separabel ist.

Appendix A

Axiomatik der Natürlichen Zahlen

Satz A.0.1. *Es gibt Paare (N, s) mit N Menge und $s : N \hookrightarrow N$ eine injektive Abbildung, sodass $N \setminus s(N)$ aus genau einem Element besteht (wir nennen dieses Element 0) und sodass jede s -stabile Teilmenge $M \subset N$ bereits die ganze Menge N ist.*

s ist hier bekannt als die Nachfolgerfunktion ("successor function"), oft auch geschrieben als suc oder succ . Letztendlich wird dies im Standardmodell der natürlichen Zahlen der Abbildung $s : n \mapsto n + 1$ entsprechen.

Beweis. Die Existenz einer Menge A und $s : A \hookrightarrow A$, sodass $A \setminus s(A) \neq \emptyset$, ist das Unendlichkeitsaxiom der Mengenlehre. Sei N die kleinste s -stabile Teilmenge von A mit $0 \in N$, also der Schnitt über alle solchen Mengen. \square

Satz A.0.2. *Gegeben (X, f, x) mit einer Menge X , $f : X \rightarrow X$, $x \in X$ gibt es genau ein $\psi : N \rightarrow X$ mit $\psi(0) = x$ und $\psi \circ s = f \circ \psi$*

Im Standardmodell fordern wir genau $\psi(n+1) = f(\psi(n))$ und $\psi(0) = x$, also gilt $\psi(n) = f^n(x)$.

Beweis. Wir betrachten alle $G \subset N \times X$ mit $(0, x) \in G$ und $(n, y) \in G \implies (s(n), f(y)) \in G$. Sei G' der Schnitt aller solcher Teilmengen. Dieses G' ist dann genau der Graph von ψ , also die Menge von Tupeln $(n, \psi(n)) = (n, f^n(x))$. \square

Satz A.0.3. *Ist (N', s') ein weiteres Paar wie oben, so ist die Eindeutige Abbildung $\psi : N \rightarrow N'$ mit $\psi s = s' \psi$ und $\psi(0) = 0'$ eine Bijektion.*

Also sind alle Modelle der natürlichen Zahlen isomorph.

A.1 Die Ganzen Zahlen

Wir wollen die Konstruktion der ganzen Zahlen aus den natürlichen Zahlen direkt in verallgemeinerter Form einführen.

Satz A.1.1. *Sei (M, \circ) ein kommutatives Monoid und $N \subset M$ ein Untermonoid. So definieren wir die Struktur $N^{-1}M$ folgendermaßen:*

$$N^{-1}M := M \times N / \equiv$$

mit $(m, a) \equiv (n, b)$ genau dann wenn ein $x \in N$ existiert, sodass $m \circ b \circ x = n \circ a \circ x$. Falls die Monoidoperation injektiv ist, reicht bereits $m \circ b = n \circ a$.

Wir erklären nun eine Verknüpfung durch

$$[(m, a)] \circ [(n, b)] = [(m \circ n, a \circ b)]$$

diese ist wohldefiniert und macht $N^{-1}M$ zu einem kommutativen Monoid.

Beispiel A.1.2. 1. $(\mathbb{Q}, \cdot) = (\mathbb{Z} \setminus \{0\}, \cdot)^{-1}(\mathbb{Z}, \cdot)$

2. $(\mathbb{Z}, +) = (\mathbb{N}, +)^{-1}(\mathbb{N}, +)$

Proposition A.1.3. *Für jedes Monoid M ist $M^{-1}M$ eine abelsche Gruppe.*

Satz A.1.4. *Sei $(R, +, \geq)$ eine angeordnete abelsche Gruppe, also:*

1. \geq ist eine lineare Ordnung

2. $a \geq b \implies a + c \geq b + c$

Sei auf $R_{\geq 0}$ eine kommutative Monoidstruktur \cdot gegeben, sodass für alle $a, b, c \in R_{>0}$ das Distributivgesetz gilt. So gibt es genau eine Fortsetzung von \cdot auf ganz R , sodass $(R, +, \cdot)$ einen kommutativen Ring bildet. (Insbesondere folgt direkt "– mal – ist +")

Beweis (Eindeutigkeit). Wir brauchen:

$$a \cdot b = \begin{cases} 0 & a = 0 \vee b = 0 \\ -((-a) \cdot b) & a < 0, b > 0 \\ -(a \cdot (-b)) & a > 0, b < 0 \\ (-a) \cdot (-b) & a < 0, b < 0 \end{cases}$$

Denn

$$ab + (-a)b = (a + (-a))b = 0b = 0,$$

also $ab = -((-a)b)$, und

$$\begin{aligned}
 0 &= (a + (-a))(b + (-b)) \\
 &= ab + (-a)b + a(-b) + (-a)(-b) \\
 &= ab + -(-a)(-b) + -(-a)(-b) + (-a)(-b) \\
 &= ab + -(-a)(-b),
 \end{aligned}$$

also $ab = -(-((-a)(-b))) = (-a)(-b)$

□

A.2 Die Reellen Zahlen

$$\mathbb{R} := \left\{ \alpha \subset \mathbb{Q} : \begin{array}{l} \alpha \text{ hat untere Schranke} \\ x \in \alpha \text{ und } y > x \implies y \in \alpha \\ \alpha \text{ hat kein kleinstes Element} \end{array} \right\}$$

Satz A.2.1. *Sei $y \subset \mathbb{R}$, sodass y eine untere Schranke hat. Dann gilt*

$$\inf y = \bigcup_{\alpha \in y} \alpha \in \mathbb{R}$$