

Algebra und Zahlentheorie

Wintersemester 2018/19

Mitschrift von Lukas Metzger

gehalten von Prof. Dr. Stefan Kebekus

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Mathematisches Institut

21. Juli 2019

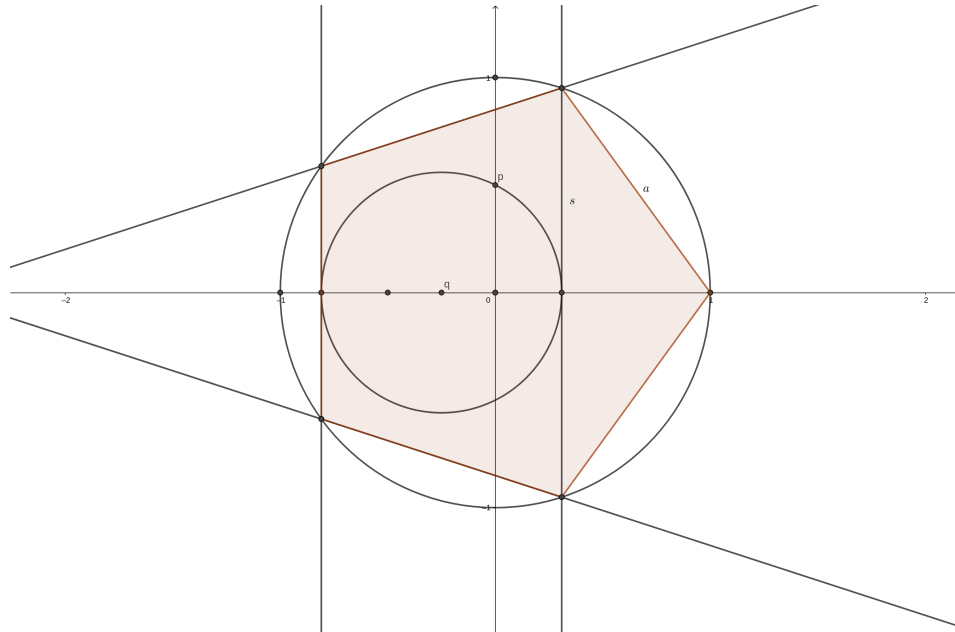
Inhaltsverzeichnis

0	Konstruktion mit Zirkel und Lineal	1
1	Körpererweiterungen	4
1.1	Ultrakurzwiederholung zentraler Begriffe	4
1.2	Algebraische und transzendente Elemente	6
1.3	Lösungsformel für Polynome	13
2	Ringe	14
2.1	Teilbarkeit	15
2.2	Der Quotientenkörper eines Integritätsrings	27
2.3	Hilfe bei der Anwendung des Eisenstein-Kriteriums	35
2.4	Ringe und Ideale	38
3	Körpertheorie	51
3.1	Grundbegriffe	51
3.2	Der algebraische Abschluss	53
3.3	Separable und Inseparable Körpererweiterungen	63
3.4	Galoissche Körpererweiterungen	70
4	Gruppentheorie	84
4.1	Grundbegriffe	84
4.2	Zyklische Gruppen	88
4.3	Die Sätze von Sylow	89
4.4	Abelsche Gruppen	94
4.5	Auflösbare Gruppen	95
5	Anwendungen	98
5.1	Satz vom primitiven Element	98
5.2	Kreisteilungskörper	100
5.3	Das Quadratische Reziprozitätsgesetz	105

0 Konstruktion mit Zirkel und Lineal

Beispiel 0.1 (Konstruktion des regelmäßigen 5-Ecks)

Anleitung zur Konstruktion



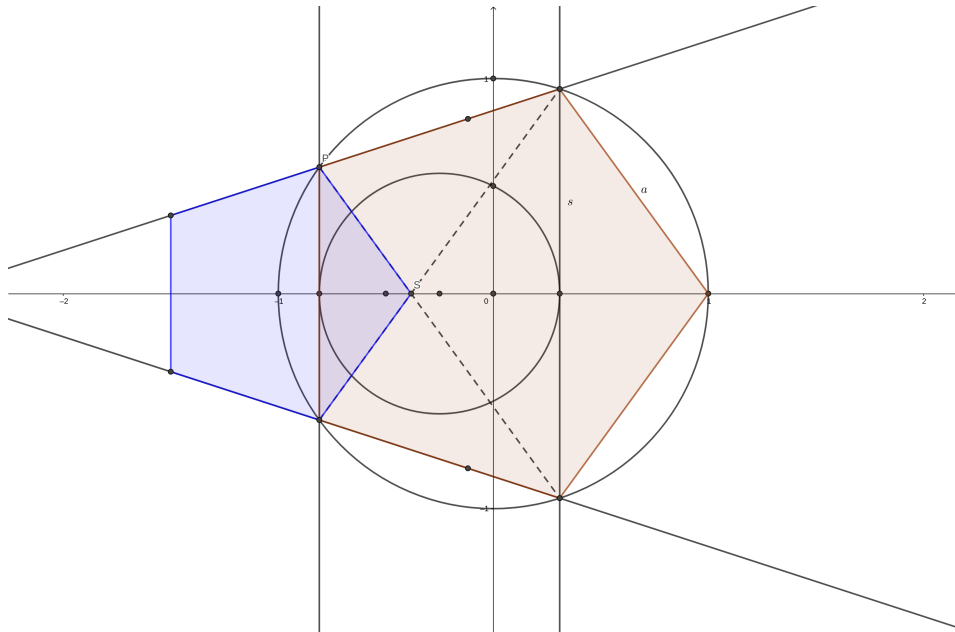
Erste Frage: Gegeben $n \in \mathbb{N}$, können wir das regelmäßige n -Eck konstruieren?

Beispielproblem: Betrachte Das 5-Eck, sei a die Kantenlänge und s die Sekantenlänge.

Dann ist $\frac{s}{a} \notin \mathbb{Q}$.

Beweis. Angenommen $\frac{s}{a}$ wäre in \mathbb{Q} . Dann schreibe $\frac{s}{a} = \frac{p}{q}$ mit $p, q \in \mathbb{N}$. Dann gibt es also eine Länge $d \in \mathbb{R}$, sodass s und a beide ganzzahlige Vielfache von d sind. $\exists n, m \in \mathbb{N}$
 $a = n \cdot d, s = m \cdot d$.

Betrachte/Erweitere die Konstruktion des 5-Ecks und erhalte ein kleines 5-Eck (vgl. blaues 5-Eck in der Abbildung unten) mit Sekantenlänge $s' = a$ und Kantenlänge $a' = s - a$.



Dann sind aber sowohl a' als auch s' wieder Vielfache von d . Das Verfahren können wir wiederholen und erhalten immer kleinere 5-Ecke, deren Größe nach 0 konvergiert, wo Kanten- und Sekantenlänge ganzzahlige Vielfache von d sind. ζ \square

Weitere Konstruktionsprobleme:

- 3-Teilung des Winkels
- Verdopplung des Würfels (d.h. Verdopplung des Volumens)
- Quadratur des Kreises (Gegeben ein Kreis, konstruiere Quadrat mit demselben Flächeninhalt)

Wiederholung: Was können wir mit Zirkel und Lineal eigentlich machen?

Antwort: 3 Konstruktionen

- 1) Gegeben Punkte a_1, a_2, b_1, b_2 der Ebene, betrachte die Geraden $\overline{a_1 a_2}$ und $b_1 b_2$ und erhalte Schnittpunkt $\overline{a_1 a_2} \cap \overline{b_1 b_2}$.
- 2) Gegeben Punkte a_1, a_2, b_1, b_2, b_3 der Ebene betrachte Kreis $K(b_1, \|b_2 - b_3\|)$ um b_1 mit Radius $\|b_2 - b_3\|$ und erhalte die Schnittpunkte $\overline{a_1 a_2} \cap K(b_1, \|b_2 - b_3\|)$
- 3) Gegeben Punkte $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$, erhalte Schnittpunkte $K(a_1, \|a_2 - a_3\|) \cap K(b_1, \|b_2 - b_3\|)$

Definition 0.2

Sei $M \subset \mathbb{R}^2$ eine Menge, $p \in \mathbb{R}^2$ ein Punkt.

Sage: p ist aus M mit Zirkel und Lineal konstruierbar, falls es Kette von Mengen gibt

$$M = M_1 \subseteq M_1 \subseteq \cdots \subseteq M_n \ni p$$

Wobei $\forall i$ die Menge M_i entsteht aus M_{i-1} durch Hinzunahme der Punkte die durch einen Konstruktionsschritt entstehen.

Historie: Einen Durchbruch bei der Lösung dieser Probleme gab es erst, als man begann, die Punkte des \mathbb{R}^2 mit komplexen Zahlen zu identifizieren.

Bemerkung: Frage nach der Konstruierbarkeit macht nur Sinn, wenn M mindestens 2 Punkte enthält \leadsto Häufig $M = \{0, 1\} \subset \mathbb{C}$.

In dieser Sprache

- Konstruktionsproblem: n -Eck ist äquivalent zu, können wir die n -ten Einheitswurzeln $e^{\frac{i2\pi}{n}}$ aus $M = \{0, 1\}$ konstruieren? Ist $e^{\frac{2\pi i}{n}} \in \text{Kons}(\{0, 1\})$?
- Verdopplung des Würfels \Leftrightarrow Ist $\sqrt[3]{2} \in \text{Kons}(\{0, 1\})$
- Quadratur des Kreises \Leftrightarrow Ist $\sqrt{\pi} \in \text{Kons}(\{0, 1\})$
- 3-teilung des Winkels \Leftrightarrow Für gegebenes $\varphi \in (0, 2\pi)$ ist $e^{\frac{i\varphi}{3}} \in \text{Kons}(\{0, 1, e^{i\varphi}\})$

Zentrale Beobachtung

Sei $M \subset \mathbb{C}$ eine Menge die 0 und 1 enthält. Sei $\text{Kons}(M)$ die Menge der aus M konstruierbaren Punkte.

Dann ist $\text{Kons}(M) \subset \mathbb{C}$ ein Unterkörper.

Dazu zu prüfen: Konstruierbarkeit von Summen, Differenzen, Produkten, Quotienten ... (vgl. Übungsaufgabe!)

Zusammenfassung/zentrales Thema der Vorlesung

Körpererweiterung / wie können Körper ineinander enthalten sein?

1 Körpererweiterungen

1.1 Ultrakurzwiederholung zentraler Begriffe

Definition 1.1 (Gruppe)

Eine Gruppe ist eine Menge G zusammen mit einer Abbildung $m : G \times G \rightarrow G$ sodass folgendes gilt:

- 1) Assoziativ: $\forall a, b, c \in G \ m(m(a, b), c) = m(a, m(b, c))$
- 2) Neutrales Element: $\exists n \in G \forall a \in G : m(n, a) = m(a, n) = a$
- 3) Inverse Elemente: $\forall a \in G \exists b \in G : ab = ba$ und dieses Produkt ist neutrales Element wie in 2)

Lemma 1.2 (Elementare Eigenschaften von Gruppen)

Für jede Gruppe gilt:

- Das neutrale Element ist eindeutig
- Inverse Elemente sind eindeutig

Definition 1.3 (Abelsche Gruppe)

Nenne Gruppe (G, m) Abel'sch, falls $\forall a, b \in G : m(a, b) = m(b, a)$.

Notation: Statt m schreibt man oft $+$ oder \cdot , wobei $+$ hauptsächlich für Abelsche Gruppen verwendet wird.

Beispiel 1.4

Beispiele für Gruppen:

- Abelsch: $(\mathbb{Z}, +)$, $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}, +)$, (Vektorraum, $+$)
- Nicht-Abelsch: Sei M eine Menge mit > 2 Elementen. Die bijektiven Abbildungen $M \rightarrow M$ mit der Hintereinanderausführung ist eine nicht-Abelsche Gruppe.
- Nicht-Abelsch: Sei K ein Schiefkörper, z.B. $K = \mathbb{R}, \mathbb{C}, \mathbb{H}$. Sei $K^*K \setminus \{0\}$. Dann ist (K^*, \cdot) eine Gruppe.
- Nicht-Beispiel: $G = \mathbb{R}^3$. Wir erhalten durch das Kreuzprodukt keine Gruppenkonstruktion.

Definition 1.5 (Ring)

Ein Ring ist eine Menge R mit 2 Verknüpfungen $+$ und \cdot sodass gilt:

- $(R, +)$ ist eine Abelsche Gruppe
- Distributivgesetz: $\forall a, b, c \in R \ (a + b) \cdot c = ac + bc$ und $a(b + c) = ab + ac$
- $(R \setminus 0, \cdot)$ ist fast Gruppe, nämlich assoziativ und es existiert ein neutrales Element

Beispiel 1.6

Beispiele für Ringe:

- $\mathbb{R}, \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$, Polynome, \mathbb{Z}
- Funktionen auf \mathbb{R}/\mathbb{C}
- holomorphe/stetige/ C^∞ /reell analytische lokal quadratintegrierbare Funktionen bilden ebenfalls einen Ring

Bemerkung: Mit Ringen können wir fast rechnen wie mit Zahlen, aber ACHTUNG:

- Nicht jedes Element in $R \setminus 0$ hat ein multiplikatives Inverses
- Wir können aus $a \cdot b = 0$ und $a \neq 0$ im Allgemeinen nicht folgern, dass $b = 0$
- Wir können aus $ab = ac$ und $a \neq 0$ im Allgemeinen nicht folgern, dass $b = c$ ist

Definition 1.7 (Nullteiler)

Sei R ein Ring, $a \in R \setminus \{0\}$. Falls $b \neq 0$ existiert mit $a \cdot b = 0$, nennen wir a einen Nullteiler.

Ringe ohne Nullteiler heißen nullteilerfrei oder Integritätsringe.

Definition 1.8 (Abelscher Ring)

Ein Ring heißt abel'sch, falls $\forall a, b \in R \ ab = ba$.

Bemerkung: In der Literatur heißen unsere Ringe oft Ringe mit 1.

Beispiel 1.9

Beispiele zu Nullteilern

- \mathbb{R}, \mathbb{Z} sind nullteilerfrei
- $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ ist nullteilerfrei $\Leftrightarrow n$ ist Prim
- Polynome sind nullteilerfrei
- Stetige Funktionen sind nicht nullteilerfrei

Bemerkung: Sei R ein Ring. Die Menge der Elemente, die ein multiplikatives Inverses haben, wird mit R^* bezeichnet.

- $\mathbb{Z}^* = \{1, -1\}$
- $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^* = \{[x] \mid x \text{ ist teilerfremd zu } n\}$
- $(C^\infty(\mathbb{R}))^* = \{f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \mid f \text{ ist } C^\infty \text{ und hat keine Nullstelle}\}$

Bemerkung: Sei R ein Ring, x eine Variable. Dann bezeichne mit $R[x]$ die Polynome mit Koeffizienten in R und Variable x .

- $1x + 2 \in \mathbb{Z}[x]$
- $\frac{\pi}{4} \cdot x^2 \notin \mathbb{Z}[x]$

Definition 1.10 (Schiefkörper)

Schiefkörper sind Ringe R wobei $R^ = R \setminus \{0\}$*

Definition 1.11 (Körper)

Ein Körper ist ein Schiefkörper, der auch noch kommutativ ist.

Beispiel 1.12

Beispiele für Körper und Schiefkörper

- *Quaternionen sind Schiefkörper*
- $\mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}, \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ sind Körper
- $\text{Kons}(\{0, 1\})$ ist Unterkörper von \mathbb{C}
- *Die Menge der rationalen Funktionen über einem Körper bilden wieder einen Körper*

1.2 Algebraische und transzendente Elemente

Sei L ein Körper und $k \subset L$ ein Unterkörper (z.B. $L = \mathbb{C}, k \subset \mathbb{R}$ oder $L = \mathbb{R}, k = \mathbb{Q}$).

Im Fall $k = \mathbb{Q}, L = \mathbb{R}$ wissen wir, dass es in \mathbb{R} sehr unterschiedliche Elemente gibt.

- $\sqrt{7} \dots$ algebraisch
- $\pi, e \dots$ transzendent

Definition 1.13

Situation wie oben. Sei $a \in L$ gegeben. Nenne a algebraisch über k , falls es ein Polynom $f \in k[x]$ und $f \neq 0$ gibt, sodass $f(a) = 0$.

Bemerkung: Nicht algebraische Elemente heißen transzendent.

Beispiel 1.14

Beispiele für algebraische und transzendente Zahlen

- $\sqrt{7}$ ist algebraisch über \mathbb{Q} , denn $f(\sqrt{7}) = 0$ mit $f(x) = x^2 - 7$
- π ist nicht algebraisch über \mathbb{Q} (Lindemann, 1844)

Bemerkung: In \mathbb{R} gibt es praktisch keine Zahlen, die algebraisch über \mathbb{Q} sind.

Wir wissen \mathbb{Q} ist abzählbar, also sind auch die Polynome mit Koeffizienten in \mathbb{Q} abzählbar. Jedes Polynom hat aber nur endlich viele Nullstellen. Das heißt die Menge der algebraischen Zahlen ist abzählbar, also eine Nullmenge im Sinne der Integrationstheorie.

Beispiel 1.15

Körpererweiterung $\mathbb{R} \subset \mathbb{C}$ - Beobachte: i ist algebraisch über \mathbb{R} , denn $f(i) = 0$ wobei $f(x) = x^2 + 1$

$z = i + 1$ ist Algebraisch mit $f(x) = (x - 1)^2 + 1$

$z = a + bi$ ist Algebraisch mit $f(x) = \left(\frac{x-a}{b}\right)^2 + 1$

\Rightarrow Jede komplexe Zahl ist algebraisch über \mathbb{R}

Definition 1.16

Eine Körpererweiterung $k \subset L$ heißt algebraisch, falls jedes $a \in L$ algebraisch über k ist.

Ansonsten nenne Körpererweiterung transzendent.

Bemerkung: Sei $k \subset L$ eine Körpererweiterung, sei $a \in L$ algebraisch über k und sei $f \in k[x]$ ein Polynom $\neq 0$ mit $f(a) = 0$.

Solche Polynome gibt es viele, wir interessieren uns für f 's mit minimalem Grad. Wenn so ein f gegeben ist:

$$f = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \cdots + a_0$$

dann dividiere durch a_n und erhalte Polynom

$$\hat{f} = x^n + \frac{a_{n-1}}{a_n} x^{n-1} + \cdots + \frac{a_0}{a_n} \in k[x]$$

mit a als Nullstelle.

1 Körpererweiterungen

Falls \hat{f} und \bar{f} in $k[x]$ zwei normierte Polynome minimalen Grades sind mit $\hat{f}(a) = \bar{f}(a) = 0$, dann betrachte Polynom $(\hat{f} - \bar{f}) \in k[x]$. Dann gilt

$$(\hat{f} - \bar{f})(a) = \hat{f}(a) - \bar{f}(a) = 0 - 0 = 0$$

und der Grad von $(\hat{f} - \bar{f})$ ist kleiner als der Grad von \hat{f} . Weil aber der Grad von \hat{f} minimal war, folgt: $\hat{f} = \bar{f}$.

Satz 1.17

Sei $k \subset L$ eine Körpererweiterung, sei $a \in L$ algebraisch über k . Dann gibt es genau ein Polynom $f \in k[x] \setminus \{0\}$ sodass gilt:

1) $f(a) = 0$

2) $\deg f$ ist minimal unter den Graden der Polynome die a als Nullstelle haben:

$$\deg(f) = \min\{\deg g \mid g \in k[x] \setminus \{0\}, g(a) = 0\}$$

3) f ist normiert (d.h. Leitkoeffizient = 1)

Nenne dieses f das Minimalpolynom von a über k .

Die Zahl $\deg f$ wird als Grad von a über k bezeichnet, in Symbolen $[a : k]$

Bemerkung: Sei $k \subset L$ Erweiterung, $a \in L$ algebraisch über k . Falls $[a : k] = 1$, dann $a \in k$.

Mehr Beispiele für Körpererweiterungen

Sei $k \subset L$ eine Körpererweiterung, sei $(L_i)_{i \in I}$ eine Menge von Zwischenkörpern, d.h. $k \subseteq L_i \subseteq L$.

Dann ist auch $K := \bigcap_{i \in I} L_i$ ein Körper.

Nutzanwendung: Sei $A \subset L$ irgendeine Teilmenge. Sei $(L_i)_{i \in I}$ die Menge der Zwischenkörper $k \subseteq L_i \subseteq L$ sodass $\forall i : A \subset L_i$. Dann betrachte K und es gilt:

- $k \subseteq K \subset L$, also K ist Zwischenkörper
- $A \subseteq K$
- K ist der kleinste Zwischenkörper, der A enthält

Bemerkung: Bezeichne K mit $k(A)$ und sage $k(A)$ entsteht aus k durch Adjunktion der Elemente von A .

1 Körpererweiterungen

Spezialfall: $A = \{a\}$ dann schreiben wir $k(a)$. Das ist dann der kleinste Unterkörper von L , der sowohl k als auch a enthält.

Definition 1.18 (Einfache Körpererweiterung)

Eine Körpererweiterung $k \subset L$ heißt einfach, falls a existiert, sodass $L = k(a)$.

Definition 1.19 (Grad der Körpererweiterung)

$$[L : k] = \dim_k L \quad \text{Grad der Körpererweiterung}$$

Beispiele

$$[\mathbb{C} : \mathbb{R}] = 2 \quad [\mathbb{R} : \mathbb{Q}] = \infty$$

Satz 1.20

Sei L/k eine Körpererweiterung, $a \in L$ dann gilt: $[a : k] = [k(a) : k]$

Beweis. Falls a transzendent, dann sind $1, a, a^2, \dots$ k -linear unabhängig, also ist $\dim_k k(a) = \infty$.

Betrachte also den Fall, wo a algebraisch ist mit Minimalpolynom

$$f(x) = x^n + b_{n-1} \cdot x^{n-1} + \dots + b_0 \in k[x]$$

Klar ist: Die Elemente $1, a, a^2, \dots, a^{n-1} \in k(a)$ sind linear unabhängig, denn jede lineare Relation gäbe ein Polynom $g(x)$ mit $\deg(g) < n$ mit $g(a) = 0$ \nmid .

Also: $\dim_k k(a) \geq n$

Um Gleichheit zu zeigen, genügt es zu zeigen, dass $\langle 1, a, a^2, \dots, a^{n-1} \rangle_k =: \tilde{k}$ bereits $k(a)$. Klar ist $\tilde{k} \subseteq k(a)$. Wegen der Minimalität von $k(a)$ genügt es für die Umkehrrichtung zu zeigen, dass \tilde{k} ein Körper ist.

Klar ist $0, 1 \in \tilde{k}$.

Zu zeigen ist Abgeschlossenheit unter Addition/Subtraktion (hier klar wegen Vektorraum) und unter Multiplikation/Division (noch nicht klar).

Zwischenbehauptung: Sei $s = \sum_{i=0}^{n-1} \lambda_i a^i \in \tilde{k}$ ein beliebiges Element. Dann ist $a \cdot s \in \tilde{k}$.

Wir wissen bereits: $a \cdot s = \underbrace{\sum_{i=0}^{n-2} \lambda_i a^{i+1}}_{\in \tilde{k}} + \lambda_{n-1} a^n$.

1 Körpererweiterungen

Ein Blick auf das Minimalpolynom zeigt jetzt: $a^n = -\sum_{i=0}^{n-1} b_i \cdot a^i \in \tilde{k}$.

Konsequenz: Wenn $s, t \in \tilde{k}$ beliebig sind, dann $s \cdot t \in \tilde{k}$, also gilt die Abgeschlossenheit unter Multiplikation.

Letzte Aufgabe: Existenz von multiplikativen Inversen. Sei also $s \in \tilde{k}, s \neq 0$ gegeben. Wegen Abgeschlossenheit unter Multiplikation ist s, s^2, s^3, \dots wieder in \tilde{k} . Also ist $1, s, \dots, s^n$ linear abhängig $\Rightarrow s$ ist algebraisch über k .

Sei $p(x) = x^m + p_{m-1} \cdot x^{m-1} + \dots + p_0$ das Minimalpolynom.

Beobachtung: $p_0 \neq 0$, denn sonst könnten wir x ausklammern, p wäre nicht minimal. Demnach können wir schreiben:

$$\begin{aligned} 0 &= p(s) = s^m + p_{m-1}s^{m-1} + \dots + p_0 \\ \Leftrightarrow -p_0 &= s(s^{m-1} + p_{m-1}s^{m-2} + \dots + p_1) \\ \Leftrightarrow \frac{1}{s} &= \underbrace{\frac{1}{-p_0}}_{\in k} \underbrace{(s^{m-1} + p_{m-1}s^{m-2} + \dots + p_1)}_{\in \tilde{k} \text{ wegen Abgeschlossenheit unter Multiplikation}} \in \tilde{k} \end{aligned}$$

□

Folgerung 1.21

- 1) Wenn $[a : k] = n$, dann ist $k(a) = \{\lambda_0 + \lambda_1 a + \dots + \lambda_{n-1} a^{n-1} \mid \lambda_i \in k\}$
- 2) Wenn $[a : k] < \infty$, dann ist $k(a)/k$ algebraisch

Beispiel 1.22

Sei $L = \mathbb{C}, k \subset \mathbb{C}$ ein Unterkörper, sei $b \in k$ und $a = \sqrt{b}$. Dann gilt:

$$[k(a) : k] = \begin{cases} 2 & \text{falls } a \notin k \\ 1 & \text{falls } a \in k \end{cases}$$

Proposition 1.23 (Umkehrung der Beobachtung)

Sei L/k eine Körpererweiterung von Grad 2. Dann entsteht L durch Adjunktion einer Quadratwurzel.

Lemma 1.24

Sei L/k eine algebraische Körpererweiterung, sodass der Erweiterungsgrad $[L : k]$ eine Primzahl ist. Dann ist die Erweiterung einfach, das heißt $\exists a \in L : L = k(a)$.

Beweis. Übung

□

1 Körpererweiterungen

Beweis. (von Proposition 1.23) Wähle $a \in L$ wie im Lemma. Dann ist klar $[a : k] = 2$. Also existieren $\lambda_1, \lambda_0 \in k$, sodass $a^2 + \lambda_1 a + \lambda_0 = 0$ ist. Also:

$$a \in \underbrace{\frac{-\lambda_1}{2}}_{\in k} \pm \underbrace{\sqrt{\left(\frac{\lambda_1}{2}\right)^2 - \lambda_0}}_{=:b}$$

Weil a und b sich nur um Elemente von k unterscheiden, ist $k(a) = k(b)$. Das Element b ist aber Quadratwurzel! \square

Bemerkung: Falls $\text{char}(k) = 2$ ist, muss man die Lösungsformel richtig hinschreiben.

Satz 1.25 (Gradformel)

Sei $k \subseteq L \subseteq M$ eine Kette von Körpern. Dann ist

$$[M : k] = [M : L] \cdot [L : k]$$

Beweis. (nur im Fall, wo $[M : L] < \infty$ und $[L : k] < \infty$)

Wähle Basis m_1, \dots, m_a für M als L -Vektorraum und l_1, \dots, l_b für L als k -Vektorraum.

Behauptung: Dann bilden die Elemente $(m_i \cdot l_j)_{i,j}$ eine Basis von M als k -Vektorraum.

Erzeugendensystem: Sei $m \in M$ gegeben. Dann ist m schreibbar als

$$m = \sum_{i=1}^a \lambda_i \cdot m_i$$

mit $\lambda_i \in L$.

Dann können wir jedes λ_i schreiben als

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^b \mu_j^i \cdot l_j$$

mit $\mu_j \in k$.

Einsetzen zeigt: m kann geschrieben werden als k -Linearkombination der Produkte $m_i \cdot l_j$.

Lineare Unabhängigkeit: Sei eine lineare Relation

$$0 = \sum_{i,j} \mu_{ij} \cdot (m_i \cdot l_j)$$

gegeben, wobei $\mu_{ij} \in k$. Dann gilt: $0 = \sum_i \left(\underbrace{\sum_j \mu_{ij} \cdot l_j}_{\in L} \right) \cdot m_i$

Weil die m_i per Wahl aber L -linear unabhängig sind, folgt für alle i , dass $\sum_j \underbrace{\mu_{ij}}_{\in k} \cdot l_j = 0$.

Weil die l_j per Wahl aber k -linear unabhängig sind, ist $\forall i \forall j : \mu_{ij} = 0$. \square

Folgerung 1.26

Wenn eine Kette von Körpererweiterungen $k \subseteq L \subseteq M$ gegeben ist, und wenn $[M : k] < \infty$, dann ist $[L : k] < \infty$ und sogar ein Teiler von $[M : k]$.

Satz 1.27

Sei L/k eine Körpererweiterung, dann ist äquivalent:

- 1) $[L : k] < \infty$
- 2) L ist algebraisch über k , und es gibt endlich viele $a_1, \dots, a_n \in L$ sodass $L = k(a_1, \dots, a_n)$
- 3) Es gibt endlich viele $a_1, \dots, a_n \in L$, die algebraisch über k sind und $L = k(a_1, \dots, a_n)$

Beweis. 1 \Rightarrow 2: Sei $s \in L$ beliebig. Dann sind $1, s, s^2, \dots, s^{[L:k]}$ linear abhängig, also ist s algebraisch über k . Das heißt L/k ist algebraisch. Um a_1, \dots, a_n zu finden, wähle Vektorraumbasis von L über k .

2 \Rightarrow 3: trivial

3 \Rightarrow 1: Betrachte

$$\underbrace{k}_{=:k_0} \subseteq \underbrace{k(a_1)}_{=:k_1} \subseteq \underbrace{k(a_1, a_2)}_{=:k_2} \subseteq \dots \subseteq \underbrace{k(a_1, \dots, a_n)}_{=:k_n}$$

Dann klar: $\forall i : a_i$ ist algebraisch über k_{i-1} (sogar algebraisch über k_0), also $[k_i : k_{i-1}] < \infty$, dann $k_i = k_{i-1}(a_i)$ und $[L : k] = \prod_i [k_i : k_{i-1}] < \infty$. \square

Lemma 1.28 (Nutzanwendung (Transitivität der Algebraizität))

Sei $k \subseteq L \subseteq M$ eine Kette von Körpererweiterungen. Falls L/k algebraisch ist und M/L algebraisch ist, dann ist M/k algebraisch.

Beweis. Sei $m \in M$ gegeben. Ziel: m ist algebraisch über k .

m ist algebraisch über L , das heißt es hat ein Minimalpolynom

$$f(x) = \sum_{i=0}^a l_i \cdot x^i \in L[x]$$

Wir wissen auch: Jedes der l_i ist algebraisch über k .

Betrachte jetzt den Zwischenkörper $L' = k(l_0, \dots, l_a)$. Dann ist L'/k endlich und m ist algebraisch über L' , also ist $m \in L'(m)$ und $L'(m)/L'$ ist endlich. Damit ist $L'(m)/k$ endlich, also algebraisch. \square

Proposition 1.29

Sei $k \subseteq L$ eine Körpererweiterung. Sei

$$\bar{k} := \{a \in L \mid a \text{ ist algebraisch über } k\}$$

Dann ist \bar{k} ein Körper.

Man nennt \bar{k} den algebraischen Abschluss von k in L .

Beweis. Klar ist, dass $0, 1 \in \bar{k}$ sind. Wir müssen klären, ob mit $a, b \in \bar{k}$ auch $a+b, a-b, a \cdot b$ und gegebenenfalls für $\frac{1}{a} \in \bar{k}$ sind. Das ist aber klar, denn all diese Elemente liegen in $k(a, b)$. Nach Satz 1.27 ist $k(a, b)$ algebraisch über k . \square

Bemerkung: Achtung: Es gibt einen anderen Begriff des (absoluten) algebraischen Abschlusses, der nicht von einem Oberkörper $L \supseteq k$ abhängt.

1.3 Lösungsformel für Polynome

Wissen aus der Schule: Quadratische Gleichungen in einer Variable haben Lösungsformel.

Wissen seit der Renaissance: Haben Formeln für Gleichungen von Grad 3 und 4.

Beispiel: $x^3 + ax^2 + bx + c = 0$. Setze:

$$h = -\frac{1}{2}c + \frac{1}{6}ab - \frac{1}{24}a^3$$

$$w_1 = \sqrt{-3(a^2b^2 - 4a^3c - 4b^3 + 18abc - 27c^2)}$$

$$w_2 = \sqrt[3]{h + \frac{1}{18}w_1}$$

$$w_3 = \sqrt[3]{h - \frac{1}{18}w_1}.$$

Dann ist

$$x = -\frac{1}{3}a + w_2 - w_3$$

2 Ringe

eine Lösung, wenn die Wurzeln w_2, w_3 so gewählt sind dass $w_2 w_3 = \frac{1}{8}a^2 - \frac{1}{3}b$.

Frage: Gibt es eine Lösungsformel für Gleichungen vom Grad 5?

Bescheidener: Können wir die Lösung überhaupt hinschreiben? (als komplizierten Ausdruck in Wurzeln/Polynomen)

Definition 1.30

Sei L/k eine Körpererweiterung. Nenne diese Erweiterung Radikalerweiterung, falls es $a_1, \dots, a_n \in L$ und $m_1, \dots, m_n \in \mathbb{N}$ gibt, sodass

- 1) $L = k(a_1, \dots, a_n)$
- 2) $\forall i : a_i^{m_i} \in k(a_1, \dots, a_{i-1})$. Also a_i ist die m_i -te Wurzel eines Elementes aus $k(a_1, \dots, a_{i-1})$.

Was bedeutet das?

- 1) $a_1^{m_1} \in k$, also $k(a_1) = \langle 1, a_1, a_1^2, \dots, a_1^{m_1-1} \rangle_k$
- 2) $a_2^{m_2} \in k(a_1)$, also $k(a_1, a_2) = \langle 1, a_2, a_2^2, \dots, a_2^{m_2-1} \rangle_{k(a_1)}$
- 3) ...

Bescheidene Frage, präzise formuliert: Gegeben ein Polynom

$$f(x) = \sum_{i=1}^n a_i x^i \in \mathbb{Q}[x] \text{ oder } \mathbb{R}[x]$$

gibt es dann eine Radikalerweiterung $L/\mathbb{Q}(a_0, \dots, a_n)$ (beziehungsweise L/\mathbb{R}) sodass f in L eine Nullstelle hat? Gerne $L \subseteq \mathbb{C}$.

2 Ringe

Warum Ringe betrachten? Gegeben eine Körpererweiterung L/k und $a \in L$ und wir suchen das Minimalpolynom $f_a(x) \in k[x]$.

Häufig findet man $g \in k[x]$ mit $g(a) = 0$ und muss dann entscheiden, ob g das Minimalpolynom ist. Das ist gar nicht leicht!

Beobachtung: Polynomdivision zeigt:

$$g(x) = s(x) \cdot f_a(x) + \text{rest}(x)$$

wobei $\deg \text{rest}(x) < \deg f_a(x)$. Einsetzen von a ergibt

$$\underbrace{g(a)}_{=0} = s(a) \cdot \underbrace{f_a(a)}_{=0} + \text{rest}(a) \Rightarrow \text{rest}(a) = 0$$

$$\Rightarrow \text{rest}(x) \equiv 0$$

$$\Rightarrow g(x) = s(x) \cdot f_a(x).$$

Wir sehen: Das Minimalpolynom ist ein Teiler von g im Ring der Polynome.

Ziel: Wir müssen Teilbarkeit verstehen!

2.1 Teilbarkeit

Definition 2.1

Sei R ein Ring. Dann bezeichne mit $R[x]$ den Ring der Polynome mit Variable x und Koeffizienten aus R .

Warnung: Polynome geben Funktionen $R \rightarrow R$, aber Polynome sind nicht Funktionen!

Definition 2.2

Sei $f \in R[x]$ ein Polynom. Dann definiere den Grad von f wie üblich.

Lemma 2.3 (Gradformel für Polynome)

Sei R ein Integritätsring, $f, g \in R[x]$. Dann ist

$$\deg(f \cdot g) = \deg(f) + \deg(g)$$

Beweis. Sei $n_f = \deg(f)$ und $n_g = \deg(g)$. Schreibe

$$\begin{aligned} f(x) &= a_f \cdot x^{n_f} + (\text{kleinere Terme}), a_f \neq 0 \\ g(x) &= a_g \cdot x^{n_g} + (\text{kleinere Terme}) \end{aligned}$$

Dann ist

$$(f \cdot g)(x) = a_f \cdot a_g \cdot x^{n_f+n_g} + (\text{kleinere Terme})$$

und weil R ein Integritätsring ist, ist $a_f \cdot a_g \neq 0$, also $\deg(f \cdot g) = n_f + n_g$. □

Folgerung 2.4

Sei R ein Integritätsring. Dann ist $R[x]$ selbst wieder ein Integritätsring.

2 Ringe

Beweis. Seien $f, g \in R[x] \setminus \{0\}$. Wir müssen zeigen:

$$f \cdot g \neq 0 \in R[x] \quad (*)$$

Falls $\deg f = \deg g = 0$, folgt $(*)$ weil R ein Integritätsring ist. Ansonsten folgt $(*)$, weil $\deg f \cdot g = \deg f + \deg g > 0$. \square

Ausblick: Dann ist $(R[x])[y]$ auch wieder ein Integritätsring. Und natürlich ist $(R[x])[y] \simeq R[x, y]$.

Folgerung 2.5

Sei R ein Integritätsring. Dann ist $(R[x])^* = R^*$.

Beweis. Sei $f(x) \in (R[x])^*$, das heißt $\exists g(x) \in R[x] : f \cdot g \equiv 1$.

$$\Rightarrow \deg f + \deg g = \deg 1 = 0$$

$\Rightarrow \deg f = 0$, also ist Polynom f konstant, ebenso für g . \square

Bemerkung: Per Induktion folgt auch $(R[x_1, \dots, x_n])^* = R^*$

Definition 2.6

Sei R ein Ring, seien $s, r \in R$ Elemente. Wir sagen: s ist Teiler von r (in Symbolen $s \mid r$), wenn es $a \in R$ gibt, sodass $s \cdot a = r$.

Lemma 2.7

Sei R ein Integritätsring, seien s, r Elemente. Dann ist äquivalent

$$1) \exists \varepsilon \in R^*, s = \varepsilon \cdot r$$

$$2) s \mid r \text{ und } r \mid s$$

Wenn diese Bedingungen erfüllt sind, nennen wir s und r assoziiert (in Symbolen $s \sim r$).

Beweis. $1) \Rightarrow 2) \checkmark$

$2) \Rightarrow 1)$ Aus $s \mid r$ und $r \mid s \Rightarrow$ wir finden $a, b \in R : s \cdot a = r$ und $r \cdot b = s$.

$$\Rightarrow (r \cdot b) \cdot a = r \Rightarrow r \cdot (b \cdot a - 1) = 0$$

Da R Integritätsring ist: $\Rightarrow b \cdot a = 1 \quad \Rightarrow b, a \in R^*$

(geht so nur für $r \neq 0$, der Fall muss extra behandelt werden) \square

Definition 2.8

Sei R ein Integritätsring, seien $s, r \in R$ Elemente. Dann nenne s einen echten Teiler von r (in Symbolen $s \parallel r$), falls gilt:

- 1) $s \mid r$
- 2) $s \notin R^*$
- 3) r und s sind nicht assoziiert

Definition 2.9

Sei R ein Integritätsring. Ein Element $r \in R$ heißt irreduzibel, falls $r \notin R^*$ und falls r keine echten Teiler hat.

Beispiel 2.10

Die irreduziblen Elemente von $R = \mathbb{Z}$ sind exakt $\pm(\text{Primzahl})$.

Lemma 2.11

Sei R ein Integritätsring. Seien $r, s, t, s_1, s_2, u, v \in R$. Dann gilt:

- 1) $r \mid r$
- 2) $r \mid s$ und $s \mid t \Rightarrow r \mid t$
- 3) $r \mid s_1$ und $r \mid s_2 \Rightarrow r \mid (s_1 + s_2)$
- 4) $r \mid s_1$ und $r \mid (s_1 + s_2) \Rightarrow r \mid s_2$
- 5) $r \mid s$ und $u \mid v \Rightarrow ru \mid sv$

Nächstes Ziel: In \mathbb{Z} ist jede Zahl darstellbar als Produkt von Primzahlen und die Darstellung ist eindeutig bis auf Reihenfolge und Vorzeichen.

Wunschtraum: Sei R ein Integritätsring. Dann ist jedes Element eindeutig darstellbar als Produkt von irreduziblen Elementen.

Beispiel 2.12

Betrachte $R = \mathbb{Z}[\sqrt{-5}] = \{a + b \cdot \sqrt{-5} \mid a, b \in \mathbb{Z}\} \subset \mathbb{C}$

Dieser Ring ist ein Unterring von \mathbb{C} und deshalb nullteilerfrei und

$$9 = 3 \cdot 3 = \underbrace{(2 + \sqrt{-5})(2 - \sqrt{-5})}_{2^2 - (\sqrt{-5})^2}$$

Die Elemente $3, 2 \pm \sqrt{-5}$ sind irreduzibel und nicht zueinander assoziiert.

Definition 2.13

Sei R ein Integritätsring. Eine Teilerkette ist eine Folge $(r_i)_{i \in \mathbb{N}}$ von Elementen aus R , sodass $\forall i : r_{i+1} \mid r_i$. Wir sagen, im Ring R gilt der Teilerkettensatz für Elemente, falls in jeder Teilerkette die stärkere Bedingung $r_{i+1} \parallel r_i$ nur endlich oft gilt.

Beispiel 2.14

Im Ring \mathbb{Z} gilt der Teilerkettensatz für Elemente, denn falls $r_{i+1} \parallel r_i$ ist, dann gilt $|r_{i+1}| < |r_i|$.

Analog im Polynomring mit \deg statt $|\cdot|$.

Satz 2.15

Sei R ein Integritätsring, in dem der Teilerkettensatz für Elemente gilt. Dann ist jedes $r \in R, r \notin R^*, r \neq 0$ als Produkt von endlich vielen irreduziblen Elementen darstellbar.

Beweis. (Noether Rekursion) Wir wollen zeigen, dass $M = \{r \in R \mid r \notin R^*, r \neq 0 \text{ und } r \text{ nicht als Produkt von endlich vielen Irreduziblen darstellbar}\}$ leer ist. Widerspruchsbeweis: angenommen $M \neq \emptyset$.

Beobachtungen:

- 1) $\forall r \in M$ gilt: r ist nicht irreduzibel (denn sonst wäre r eine Darstellung), also hat r echte Teiler
- 2) $\exists r \in M$, sodass alle echten Teiler von r nicht mehr in M liegen (denn sonst nehme echten Teiler aus M , wiederhole das Verfahren, erhalte unendliche Teilerkette wo wir in jedem Schritt echte Teiler haben, \nexists zur Annahme)

Also gegeben r wie in Beobachtung 2), dann ist jeder echte Teiler als Produkt von endlich vielen Irreduziblen darstellbar, also auch r selbst. (Schreibe $r = r_1 \cdot r_2$ mit r_1, r_2 echte Teiler. Dann $r_1 = a_1 \cdots a_n, r_2 = b_1 \cdots b_m$ mit $\forall i, j : a_i, b_j$ irreduzibel, dann $r = a_1 \cdots a_n b_1 \cdots b_m$) \nexists . \square

Definition 2.16

Sei R ein Integritätsring, sei $r \in R, r \notin R^*, r \neq 0$. Seien

$$r = a_1 \cdots a_n = b_1 \cdots b_m$$

zwei Darstellungen von r als Produkt von endlich vielen Irreduziblen.

Nenne die Darstellung äquivalent, falls gilt

- 1) gleich lang: $n = m$
- 2) \exists Permutation $\sigma \in S_n$ und Einheiten $\varepsilon_1 \cdots \varepsilon_n \in R^*$ sodass $\forall i : a_i = \varepsilon_i \cdot b_{\sigma(i)}$

2 Ringe

Bemerkung: In Ringen, in denen der Teilerkettensatz gilt, sind Darstellungen nicht immer äquivalent! Zum Beispiel $R = \mathbb{Z}[\sqrt{-5}]$.

Das Problem ist, dass die irreduziblen Elemente in $\mathbb{Z}[\sqrt{-5}]$ nicht unbedingt prim sind.

Definition 2.17

Sei R ein Integritätsring, $r \in R, r \neq 0$ ein Element. Nenne r prim, falls $\forall a, b \in R$

$$r \mid (a \cdot b) \quad \implies \quad r \mid a \text{ oder } r \mid b$$

Beispiel 2.18

In $R = \mathbb{Z}[\sqrt{-5}]$ ist $(2 + \sqrt{-5})$ irreduzibel, aber nicht prim, denn $(2 + \sqrt{-5}) \mid 3 \cdot 3$ aber $(2 + \sqrt{-5}) \nmid 3$.

Lemma 2.19 (Elementare Rechenregeln für Prim-Elemente)

Sei R ein Integritätsring, $p, q \in R$

- 1) p prim $\Rightarrow p$ irreduzibel
- 2) p prim, $p \sim s \Rightarrow s$ prim
- 3) p, q prim und $p \mid q \Rightarrow p \sim q$
- 4) p prim und $p \mid a_1 \cdots a_n \Rightarrow \exists i \ p \mid a_i$

Beweis. zu 1)

Sei p prim. Angenommen p habe echten Teiler $a \in R$. Dann sei $b \in R$ sodass $p = a \cdot b$, insbesondere $p \mid ab$. Also $p \mid a$ oder $p \mid b$. oBdA gelte $p \mid a$.

Also $\exists h \in R : p \cdot h = a$. Einsetzen liefert

$$p = p \cdot h \cdot b \quad \iff \quad p(1 - hb) = 0 \quad \underset{R \text{ Integritätsring}}{\iff} \quad 1 = h \cdot b$$

$\Rightarrow b$ ist eine Einheit, kein echter Teiler. □

Satz 2.20

Im Ring \mathbb{Z} ist jedes irreduzible Element auch prim.

Beweis. Angenommen es existiert in \mathbb{Z} ein irreduzibles Element p , das nicht prim ist. Dann ist $-p$ irreduzibel und auch nicht prim. Wir können also oBdA annehmen $p > 0$. Wir können auch annehmen, dass p das kleinste positive, irreduzible Element ist, das nicht prim ist.

Also $\exists a, b \in \mathbb{N} : p \mid a \cdot b$ aber $p \nmid a$ und $p \nmid b$.

Division mit Rest liefert

$$\begin{aligned} a &= x \cdot p + a' && \text{wobei } a' < p \\ b &= y \cdot p + b' && \text{wobei } b' < p \end{aligned}$$

Sehe sofort $p \nmid a'$ und $p \nmid b'$.

Sehe auch $a \cdot b = xyp^2 + (xb' + a'y)p + a'b'$, also $p \mid a'b'$. Wähle also a, b so, dass $a \cdot b$ minimal ist, und dann ist $a < p, b < p, ab < p^2$. Finde $h \in \mathbb{N} : p \cdot h = a \cdot b$.

Sei jetzt p' ein irreduzibler Teiler von $h, p' > 0$. Dann existiert $h' > 0, h = p' \cdot h'$ und $p' \leq h < p$. Nach Wahl von p (kleinstes irreduzibles das nicht prim ist) ist p' prim und $p \cdot p' \cdot h' = a \cdot b$.

Also gilt $p' \mid a \cdot b \xRightarrow{p' \text{ prim}} p' \mid a$ oder $p' \mid b$. oBdA gelte $p' \mid a$. Finde also $a' < a$ sodass $p' \cdot a' = a$. Einsetzen liefert

$$p \cdot p' \cdot h' = p' \cdot a' \cdot b \xRightarrow{\mathbb{Z} \text{ Integritätsring}} p \cdot h' = a'b \implies p \mid a'b$$

Da $a'b < ab$ ist, gilt nach Wahl von $a \cdot b$ (a, b Gegenbeispiel zur Prim-Eigenschaft mit minimalem Produkt) also $p \mid a'$ oder $p \mid b$. Da $a' \mid a$ ist folgt $p \mid a$ oder $p \mid b$. $\nmid \quad \square$

Satz 2.21

Sei R ein Integritätsring. Dann ist äquivalent:

- 1) Jedes $r \in R, r \notin R^*, r \neq 0$ ist als Produkt von endlich vielen Irreduziblen darstellbar und je zwei Darstellungen sind äquivalent.
- 2) In R gilt der Teilerkettensatz für Elemente und alle Irreduziblen sind prim.

Falls diese Eigenschaften gelten, nenne R faktoriell oder UFD.

Beweis. 1) \Rightarrow 2)

Teilerkettensatz: Sei $(r_i)_{i \in \mathbb{N}}$ eine Teilerkette. Sei i sodass $r_{i+1} \parallel r_i$, das heißt $\exists h : h \notin R^*, h \neq 0 : r_{i+1} \cdot h = r_i$.

Nach Annahme können r_i, r_{i+1}, h als Produkt von endlich vielen Irreduziblen geschrieben werden:

$$\begin{aligned} r_i &= a_1 \cdots a_n \\ r_{i+1} &= b_1 \cdots b_m \\ h &= c_1 \cdots c_k \end{aligned}$$

2 Ringe

Dann gilt

$$\underbrace{b_1 \cdots b_m}_{\text{Darstellung von } r_{i+1}} \cdot c_1 \cdots c_k = \underbrace{a_1 \cdots a_n}_{\text{Darstellung von } r_i}$$

Da alle Darstellungen äquivalent sind, folgt $n = m + k > m$.

Also: In der Teilerkette gibt es höchstens endlich viele echte Teiler, nämlich höchstens so viele, wie eine (jede) Darstellung von r_1 lang ist. \Rightarrow Teilerkettensatz gilt

Irreduzibel \Rightarrow Prim: Sei r irreduzibel und seien $a, b \in R \setminus \{0\}$ sodass $r \mid ab$. Also existiert $h \in R \setminus \{0\}$, sodass $r \cdot h = a \cdot b$. Wir wissen h, a, b haben Darstellung

$$a = a_1 \cdots a_n, \quad b = b_1 \cdots b_m, \quad h = h_1 \cdots h_k$$

Also

$$r \cdot h_1 \cdots h_k = a_1 \cdots a_n \cdot b_1 \cdots b_m$$

zwei Darstellungen von $a \cdot b$. Per Annahme sind diese Darstellungen äquivalent also $\exists i : r \sim a_i$ oder $\exists j : r \sim b_j$

$\Rightarrow r \mid a$ oder $r \mid b$. Also ist r prim.

2) \Rightarrow 1)

Wir haben schon bewiesen: Teilerkettensatz \Rightarrow Darstellbarkeit, es fehlt noch die Äquivalenz $\forall r \in R, r \notin R^*, r \neq 0$ und für alle Darstellungen $r = \underbrace{a_1 \cdots a_n = b_1 \cdots b_m}_{(*)}$ mit

$n \neq m$ gilt, dass beide Darstellungen äquivalent sind.

Beweis per Induktion über n :

Induktionsanfang: $n = 1 : a_1 = b_1 \cdots b_m$

Per Annahme ist a_1 prim, also $\exists j : a_1 \mid b_j$.

Rechenregeln: $a_1 \sim b_j$, insbesondere sind alle $b_k, k \neq j$ schon Einheiten. $\Rightarrow m = 1 = j$ (da die Faktoren in der Darstellung irreduzibel und keine Einheiten sind).

Induktionsschritt: Sei die Aussage für alle Zahlen $< n$ schon bewiesen.

Wieder gilt $a_1 \mid b_1 \cdots b_m \Rightarrow \exists j : a_1 \sim b_j$. oBdA sei $j = 1$, also existiert eine Einheit $\varepsilon \in R^*$ sodass $a_1 = \varepsilon b_1$.

R ist also Integritätsring, kann also in $(*)$ kürzen, erhalte

$$a_2 \cdots a_n = (\varepsilon b_2) \cdot b_3 \cdots b_m$$

Per Induktionsannahme sind diese Darstellungen äquivalent. □

Folgerung 2.22

\mathbb{Z} ist faktoriell.

Folgerung 2.23

Alle Körper sind faktoriell.

Satz 2.24 (Gauß)

Wenn R ein faktorieller Ring ist, dann auch $R[x]$.

Und damit auch $(R[x])[y] = R[x, y]$ und auch $R[x_1, \dots, x_n] \forall n \in \mathbb{N}$.

Beweis. Wir müssen zeigen:

- 1) In $R[x]$ gilt der Teilerkettensatz
- 2) Je zwei Darstellungen sind äquivalent

zu 1): Wenn $r(x), s(x) \in R[x]$ und $r(x) \parallel s(x)$, dann $\deg r(x) < \deg s(x)$ oder $\exists a \in R \setminus R^*, a \neq 0 : a \cdot r(x) = s(x)$.

\Rightarrow alle Koeffizienten von s werden von a geteilt. In R gilt aber der Teilerkettensatz!

Hausaufgabe: Also gilt der Teilerkettensatz auch in $R[x]$.

zu 2): Widerspruchsbeweis! Angenommen es gibt $r(x) \in R[x], r \neq 0, r \notin R[x]^* = R^*$ sodass r zwei Darstellungen hat, die nicht äquivalent sind

$$r(x) = p_1(x) \cdots p_\alpha(x) = q_1(x) \cdots q_\beta(x) \quad (*)$$

Wir können oBdA einige Annahmen treffen

- $\deg(r(x))$ ist minimal unter allen Polynomen, die nicht äquivalente Darstellungen haben
- die irreduziblen Polynome $p_1, \dots, p_\alpha, q_1, \dots, q_\beta$ sind nach Graden sortiert, also $\deg p_1 \geq \deg p_2 \geq \dots \geq \deg p_\alpha$ und $\deg q_1 \geq \deg q_2 \geq \dots \geq \deg q_\beta$
- $\deg q_1 \geq \deg p_1$

Sei $n := \deg p_1, m := \deg q_1$. Seien a, b die Leitkoeffizienten von p_1 beziehungsweise q_1 . Das heißt:

$$\begin{aligned} p_1 &= a \cdot x^n + (\text{lot}) \\ q_1 &= b \cdot x^m + (\text{lot}) \end{aligned}$$

2 Ringe

Beobachtungen:

- $\deg r(x) > 0$, denn sonst wären $r(x)$ und alle $q_i(x), p_j(x)$ konstant, also in R . Per Annahme das R faktoriell ist, müssten die Darstellungen dann äquivalent sein.

$$\Rightarrow n > 0 \text{ und } m > 0$$

- Angenommen es gäbe ein j , sodass $p_1 \sim q_j$. Dann könnten wir in $(*)$ auf beiden Seiten p_1 kürzen und erhielten Polynom vom Grad $(\deg r(x)) - n < \deg r(x)$, das zwei nicht äquivalente Darstellungen hat. \nmid zur Minimalität von $\deg r(x)$.

Betrachte Hilfspolynom:

$$s(x) = \underbrace{\left[b \cdot p_1(x) \cdot x^{m-n} - a \cdot q_1(x) \right]}_{\deg(\cdot) < \deg q_1(x)} \cdot q_2 \cdots q_\beta \quad (\star)$$

Wir erhalten zwei offensichtliche Fälle:

- 1) $s(x) = 0$: Dann ist

$$b \cdot p_1(x) \cdot x^{m-n} - a \cdot q_1(x) = 0$$

- 2) $s(x) \neq 0$: Wir sehen $\deg s(x) < \deg r(x)$. Also sind je zwei Darstellungen von $s(x)$ äquivalent! Schreibe $s(x)$ um:

$$\begin{aligned} s(x) &= b \cdot p_1(x) x^{m-n} \cdot q_2 \cdots q_\beta - a \underbrace{q_1 \cdots q_\beta}_{r(x)} \\ &= b \cdot p_1 x^{m-n} \cdot q_2 \cdots q_\beta - a \cdot p_1 \cdots p_\alpha \\ &= p_1(x) \left[b \cdot x^{m-n} \cdot q_2(x) \cdots q_\beta(x) - a \cdot p_2(x) \cdots p_\alpha(x) \right] \quad (\mathcal{L}) \end{aligned}$$

Wir können die Ausdrücke (\star) und (\mathcal{L}) verfeinern zu Produkten von Irreduziblen, indem wir die Ausdrücke in $[\dots]$ als Produkt von Irreduziblen schreiben. Diese Darstellungen von $s(x)$ müssen dann per Annahme äquivalent sein.

Konsequenz: In der Darstellung von (\star) muss es einen Faktor geben, der zu p_1 assoziiert ist. Da $p_1 \sim q_2 \cdots p_1 \sim q_\beta$, muss p_1 ein Primfaktor vom $[\dots]$ -Ausdruck in (\star) sein.

$$\Rightarrow p_1 \mid (bp_1 \cdot x^{m-n} - aq_1) \quad \Rightarrow p_1 \mid aq_1$$

Insgesamt ergibt sich in jedem der beiden Fälle:

$$\exists h \in R[x] : \quad p_1(x) \cdot h(x) = a \cdot q_1(x) \quad (\spadesuit)$$

2 Ringe

Beobachte: Wenn $a \in R^*$, dann $p_1 \mid q_1$ und $p_1 \sim q_1 \nmid$. Also ist $a \in R \setminus R^*, a \neq 0$.

Zwischenbehauptung (Beweis später): Sei $p \in R$ irreduzibel. Dann ist das konstante Polynom $p \in R[x]$ prim.

Anwendung der Zwischenbehauptung: Schreibe a als Produkt von Irreduziblen. Wenn jetzt p einer der irreduziblen Faktoren ist, dann $p \mid p_1 \cdot h$.

$\Rightarrow \underbrace{p \mid p_1}_{\text{kann nicht sein, denn } p_1 \text{ ist irreduzibel, hat also überhaupt keine echten Teiler.}} \quad \text{oder } p \mid h.$

Also können wir p aus (\spadesuit) herausteilen und erhalten:

$$p_1 \cdot \frac{h}{p} = \frac{a}{p} \cdot q_1$$

Das geht mit jedem Primfaktor von a , erhalte also am Ende:

$$p_1 \cdot \frac{h}{a} = q_1 \quad \Rightarrow p_1 \mid q_1 \quad \Rightarrow p_1 \sim q_1 \quad \Rightarrow \nmid$$

Zwischenbehauptung (jetzt der Beweis): Sei $p \in R$ irreduzibel. Dann ist das konstante Polynom $p \in R[x]$ prim.

Sei $p \in R$ irreduzibel. Wir zeigen die Kontraposition: wenn $a(x), b(x) \in R[x]$ Polynome sind mit $p \nmid a(x)$ und $p \nmid b(x)$, dann gilt $p \nmid (a \cdot b)(x)$

Seien also $a(x), b(x)$ gegeben. Schreibe

$$\begin{aligned} a(x) &= a_0 + a_1x + \cdots + a_nx^n \\ b(x) &= b_0 + b_1x + \cdots + b_mx^m \end{aligned}$$

Erinnere: $p \mid a(x) \Leftrightarrow \forall i : p \mid a_i$

Kann also minimale Indizes i und j wählen, sodass $p \nmid a_i$ und $p \nmid b_j$. Betrachte Produktpolynom $(a \cdot b)(x)$ und rechne den Koeffizienten von x^{i+j} im Produktpolynom aus. Dieser Koeffizient ist

$$\gamma := \sum_{\substack{\alpha+\beta=i+j \\ \alpha, \beta \in \mathbb{N}}} a_\alpha \cdot b_\beta$$

In dieser Summe sind alle Summanden durch p teilbar, weil stets $\alpha < i$ oder $\beta < j$ gilt, mit der Ausnahme des Summanden $\alpha = i, \beta = j, (= a_i \cdot b_j)$.

2 Ringe

Weil R per Annahme faktoriell ist, und $p \in R$ deshalb prim ist, folgt $p \nmid a_i \cdot b_j$

$$\Rightarrow p \nmid \gamma \quad \Rightarrow p \nmid (a \cdot b)(x)$$

□

Was tun wir mit faktoriellen Ringen?

Sei R ein faktorieller Ring. Betrachte die Äquivalenzrelation $a \sim b \Leftrightarrow a$ assoziiert zu b .

Wähle Repräsentantensystem $P \subset R$ für die irreduziblen Elemente (= zu jedem irreduziblen $a \in R$ gibt es genau ein $b \in P$ mit $a \sim b$).

Wenn dann irgendein $a \in R$ gegeben ist, dann können wir schreiben:

$$a = \varepsilon \cdot \prod_{p \in P} p^{\alpha_p}$$

wobei $\varepsilon \in R^*$, $\alpha_p \in \mathbb{N}$ und alle bis auf endlich viele $\alpha_p = 0$.

Teilbarkeit wird dann ganz einfach. Seien $a, b \in R$

$$a = \varepsilon_a \cdot \prod_{p \in P} p^{\alpha_{a,p}}, \quad b = \varepsilon_b \cdot \prod_{p \in P} p^{\alpha_{b,p}}$$

und

$$\begin{aligned} a \mid b &\Leftrightarrow \forall p \in P : \alpha_{a,p} \leq \alpha_{b,p} \\ a \parallel b &\Leftrightarrow (\forall p \in P : \alpha_{a,p} \leq \alpha_{b,p}) \quad \& \quad (\exists p \in P : \alpha_{a,p} < \alpha_{b,p}) \\ a \sim b &\Leftrightarrow \forall p \in P : \alpha_{a,p} = \alpha_{b,p} \end{aligned}$$

Weiter mit Grundschulstoff:

Sei R ein Integritätsring, seien $a, b \in R \setminus R^*$, $a \cdot b \neq 0$

- 1) Ein Element $c \in R$ heißt *größter gemeinsamer Teiler* (*ggT*), wenn gilt: $c \mid a$ und $c \mid b$ und wenn für jedes andere c' mit $c' \mid a$ und $c' \mid b$ gilt: $c' \mid c$.
- 2) Ein Element $c \in R$ heißt *kleinstes gemeinsames Vielfaches* (*kgV*), wenn $a \mid c$ und $b \mid c$ ist und für alle $c' \in R$ mit $a \mid c'$ und $b \mid c'$ gilt: $c \mid c'$.

Satz 2.25

Sei R faktoriell. Seien $a, b \in R$ dann existieren *ggT* und *kgV*.

Beweis. Wähle Repräsentantensystem $P \subset R$. Schreibe

$$a = \varepsilon_a \cdot \prod_{p \in P} p^{\alpha_{a,p}}, \quad b = \varepsilon_b \cdot \prod_{p \in P} p^{\alpha_{b,p}}$$

2 Ringe

Setze

$$\text{ggT}(a, b) := \prod_{p \in P} p^{\min(\alpha_{a,p}, \alpha_{b,p})}$$

und

$$\text{kgV}(a, b) := \prod_{p \in P} p^{\max(\alpha_{a,p}, \alpha_{b,p})}$$

Blick nach oben zeigt, dass dies exakt die Bedingungen erfüllt. □

Satz 2.26

Seien $f, g \in k[x]$ Polynome. Betrachte Divisionsreste

$$f = q_1 \cdot g + r_1 \tag{1}$$

$$g = q_2 \cdot r_1 + r_2 \tag{2}$$

Definiere dann induktiv Polynome r_n als Divisionsrest

$$r_{n-2} = q_n \cdot r_{n-1} + r_n \tag{n}$$

Beobachtung: Die Grade der Polynome r_1, r_2, \dots werden immer kleiner. Der Prozess stoppt also nach endlich vielen Schritten, das heißt irgendwann geht die Division auf. Es existiert also $n \in \mathbb{N}$ sodass

$$r_{n-1} = q_{n+1} \cdot r_n + 0 \tag{n+1}$$

Dann ist $r_n = \text{ggT}(f, g)$.

Beweis. 1) Wenn t ein gemeinsamer Teiler von f, g ist

$$\begin{array}{ccc} \xRightarrow{(1)} t \mid r_1 & \dots & \xRightarrow{(n)} t \mid r_n \\ \xRightarrow{(2)} t \mid r_2 & & \end{array}$$

2) Andere Richtung analog:

$$\begin{array}{l} (n+1) \implies r_n \mid r_{n-1} \\ (n) \implies r_n \mid r_{n-2} \\ \vdots \\ (2) \implies r_n \mid g \\ (1) \implies r_n \mid f \end{array}$$

Da $k[t]$ faktoriell ist genügen 1) + 2) um $r_n = \text{ggT}$ zu zeigen.

□

2.2 Der Quotientenkörper eines Integritätsrings

Ziel: Gegeben ein Ring R , suche einen möglichst kleinen Körper k sodass: $R \subset k$ (besser: sodass es einen injektiven Ringmorphismus $R \hookrightarrow k$ gibt). Wir denken an $\mathbb{Z} \hookrightarrow \mathbb{Q}$.

Beobachtung: So etwas kann es nicht geben, wenn R Nullteiler hat! Betrachte also nur Integritätsringe.

Definition 2.27

Sei R ein Integritätsring. Ein Quotientenkörper von R ist ein Körper k zusammen mit einem injektiven Ringmorphismus $\varphi : R \rightarrow k$, sodass folgende (universelle) Eigenschaft gilt: Wann immer $\Phi : R \rightarrow L$ ein injektiver Ringmorphismus in einen Körper ist, dann gibt es genau einen Körpermorphismus $\eta : k \rightarrow L$, sodass das folgende Diagramm kommutiert.

$$\begin{array}{ccc} R & \xrightarrow{\varphi} & k \\ \mathbb{1}_R \downarrow & & \downarrow \exists! \eta \\ R & \xrightarrow{\Phi} & L \end{array}$$

Bemerkung: Körpermorphismen $k \xrightarrow{\eta} L$ sind immer injektiv! Denn wäre $a \in k \setminus \{0\}, a \in \ker(\eta)$, dann

$$1_L = \eta(1_k) = \eta(a \cdot a^{-1}) = \underbrace{\eta(a)}_{=0_L} \cdot \eta(a^{-1}) = 0_L$$

Widerspruch!

Satz 2.28

Sei R ein Integritätsring. Dann existiert ein Quotientenkörper $(k, \varphi : R \rightarrow k)$. Dieser ist eindeutig bis auf kanonische Isomorphie. Das bedeutet: Wenn $(k', \varphi' : R \rightarrow k')$ ein weiterer Quotientenkörper ist, dann existiert genau ein Körperisomorphismus $\eta : k \rightarrow k'$ sodass das folgende Diagramm kommutiert.

$$\begin{array}{ccc} R & \xrightarrow{\varphi} & k \\ \mathbb{1}_R \downarrow & & \downarrow \exists! \eta \\ R & \xrightarrow{\varphi'} & k' \end{array}$$

Beweis. Eindeutigkeit: Seien Quotientenkörper $(k, \varphi : R \rightarrow k)$ sowie $(k', \varphi' : R \rightarrow k')$ gegeben. Nach der universellen Eigenschaft existiert dann genau ein Körpermorphismus $\eta : k \rightarrow k'$ sodass das folgende Diagramm kommutiert:

2 Ringe

$$\begin{array}{ccc}
 R & \xrightarrow{\varphi} & k \\
 \mathbb{1}_R \downarrow & & \downarrow \eta \\
 R & \xrightarrow{\varphi'} & k'
 \end{array}$$

Wir wissen auch: Weil k' Quotientenkörper ist, existiert genau ein Körpermorphismus $\eta' : k' \rightarrow k$ sodass das folgende Diagramm kommutiert:

$$\begin{array}{ccc}
 R & \xrightarrow{\varphi} & k \\
 \mathbb{1}_R \downarrow & & \downarrow \eta \\
 R & \xrightarrow{\varphi'} & k' \\
 \mathbb{1}_R \downarrow & & \downarrow \eta' \\
 R & \xrightarrow{\varphi} & k
 \end{array}$$

Die universelle Eigenschaft angewandt auf

$$\begin{array}{ccc}
 R & \xrightarrow{\varphi} & k \\
 \mathbb{1}_R \downarrow & & \downarrow \mathbb{1}_k \eta' \circ \eta \\
 R & & \\
 \mathbb{1}_R \downarrow & & \\
 R & \xrightarrow{\varphi} & k
 \end{array}$$

zeigt: $\eta' \circ \eta = \mathbb{1}_k$.

Genauso folgt $\eta \circ \eta' = \mathbb{1}_{k'}$. Also ist der Körpermorphismus η' die Umkehrung von η .

Existenz: Wir konstruieren den Quotientenkörper wie folgt:

- 1) Betrachte die Menge

$$B = \{(a, b) \in R \times R \mid b \neq 0\}$$

und sage (a, b) ist äquivalent zu (a', b') wenn gilt $ab' = a'b$. Das ist eine Äquivalenzrelation. Symmetrie und Reflexivität sind klar per Definition. Wir müssen also

2 Ringe

noch die Transitivität zeigen: Seien also Tupel gegeben, sodass

$$\begin{array}{lll} (a, b) \sim (a', b') & & (a', b') \sim (a'', b'') \\ \Leftrightarrow & ab' = a'b & a'b'' = a''b' \end{array}$$

Und damit dann

$$\Rightarrow ab' \cdot a'b'' = a'b \cdot a''b'$$

Im Integritätsring falls $a' \neq 0$

$$\Rightarrow ab'' = a''b \Leftrightarrow (a, b) \sim (a'', b'')$$

Falls $a' = 0$ ist der Beweis sowieso einfach.

Definiere als Menge

$$k := B / \sim$$

Notation: Die Äquivalenzklasse von (a, b) wird mit $\frac{a}{b}$ bezeichnet.

Betrachte die Abbildung $\varphi : R \rightarrow k, a \mapsto \frac{a}{1}$. Diese Abbildung ist injektiv, denn

$$\varphi(a) = \varphi(a') \Leftrightarrow \frac{a}{1} = \frac{a'}{1} \stackrel{\text{Def.}}{\Leftrightarrow} a \cdot 1 = a' \cdot 1 \Leftrightarrow a = a'$$

2) Definiere auf k die Struktur eines Körpers mit Verknüpfungen

$$\begin{aligned} \cdot : k \times k &\rightarrow k, & \left(\frac{a}{b}, \frac{c}{d}\right) &\mapsto \frac{ac}{bd} \\ + : k \times k &\rightarrow k, & \left(\frac{a}{b}, \frac{c}{d}\right) &\mapsto \frac{ad + cb}{bd} \end{aligned}$$

Muss noch nachrechnen: Wohldefiniertheit

Das bedeutet: Gegeben $\frac{a}{b}$ und $\frac{c}{d}$ sowie $\frac{a'}{b'}$ und $\frac{c'}{d'}$ mit $\frac{a}{b} = \frac{a'}{b'}$ sowie $\frac{c}{d} = \frac{c'}{d'}$, dann gilt

$$\frac{ad+cb}{bd} = \frac{a'd'+c'b'}{b'd'}$$

$$\Leftrightarrow (ad + cb) \cdot b'd' = (a'd' + c'b') \cdot bd$$

$$\Leftrightarrow adb'd' + cbb'd' = a'd'bd + c'b'bd$$

Wir wissen $ab' = a'b$ und $cd' = c'd$

$$\Leftrightarrow 0 = 0$$

Die Addition ist wohldefiniert.

2 Ringe

Hausaufgabe: Dasselbe für Multiplikation

Lästige Rechnerei: Diese Verknüpfungen definieren eine Körperstruktur auf k , so dass die Abbildung $\varphi : R \rightarrow k$ ein Ringmorphismus ist. Es gilt

$$0_k = \frac{0}{1} \quad 1_k = \frac{1}{1} \quad \text{falls } a \neq 0 \text{ dann } \left(\frac{a}{b}\right)^{-1} = \frac{b}{a}$$

3) Beweis der *universellen Eigenschaft*

Sei Körper L gegeben und ein injektiver Ringmorphismus $\Phi : R \rightarrow L$, dann müssen wir zeigen $\exists! \eta : k \rightarrow L$ sodass ...

Eindeutigkeit: Angenommen wir hätten η sodass das folgende Diagramm kommutiert

$$\begin{array}{ccc} R & \xrightarrow{\varphi} & k \\ \mathbb{1}_R \downarrow & & \downarrow \exists! \eta \\ R & \xrightarrow{\Phi} & L \end{array}$$

dann gilt für alle $a \in R$

$$\eta(\varphi(a)) = \Phi(\mathbb{1}_R(a)) \Leftrightarrow \eta\left(\frac{a}{1}\right) = \Phi(a)$$

Falls $a \neq 0$ ist gilt

$$\eta\left(\frac{1}{a}\right) = \eta\left(\left(\frac{a}{1}\right)^{-1}\right) \stackrel{\text{Körpermorphismus}}{=} \eta\left(\frac{a}{1}\right)^{-1}$$

also gilt für alle $\frac{a}{b} \in k$

$$\eta\left(\frac{a}{b}\right) = \eta\left(\frac{a}{1} \cdot \frac{1}{b}\right) = \eta\left(\frac{a}{1}\right) \cdot \eta\left(\frac{1}{b}\right) = \Phi(a) \cdot (\Phi(b))^{-1}$$

also ist η eindeutig.

Existenz: Definiere $\eta : k \rightarrow L$, $\frac{a}{b} \mapsto \Phi(a) \cdot \Phi(b)^{-1}$.

Wieder ist auf Wohldefiniertheit zu prüfen: Seien dazu $\frac{a}{b} = \frac{a'}{b'}$. Wir müssen zeigen:

$$\begin{aligned} & \Phi(a) \cdot \Phi(b)^{-1} = \Phi(a') \cdot \Phi(b')^{-1} \\ \Leftrightarrow & \Phi(a) \cdot \Phi(b') = \Phi(a') \cdot \Phi(b) \\ \Leftrightarrow (\Phi \text{ ist Ringmorphismus}) & \Phi(ab') = \Phi(a'b) \\ \Leftrightarrow & \text{wahr, wegen Annahme} \end{aligned}$$

Nachrechnen: das ist ein Körpermorphismus.

□

Beispiel 2.29

- $R = \mathbb{Z}$. Dann ist $Q(\mathbb{Z}) = \mathbb{Q}$
- Ist R ein Körper, dann ist $Q(R) = R$
- $R = \mathbb{Z}[2 + \sqrt{-5}]$, dann ist $Q(R) = \mathbb{Q}(2 + \sqrt{-5}) \subset \mathbb{C}$

Grund: Wir haben eine Inklusion $R \subset \mathbb{Q}(2 + \sqrt{-5})$. Deshalb gibt es einen Körpermorphismus $Q(R) \rightarrow \mathbb{Q}(2 + \sqrt{-5})$.

Dieser ist injektiv, denn $Q(R)$ enthält das Element $a = 2 + \sqrt{-5}$. Wir wissen aber, dass $\mathbb{Q}(2 + \sqrt{-5})$ der kleinste Körper ist, der dieses Element enthält.

- Sei R faktoriell. Wähle Repräsentantensystem $P \subset R$. Dann können wir alle Elemente von $Q(R)$ auf eindeutige Weise schreiben als $\varepsilon \cdot \prod_{p \in P} p^{\alpha_p}$, wobei $\varepsilon \in R^*$, $\alpha_p \in \mathbb{Z}$ und fast alle $\alpha_p = 0$.

Warum das alles?

Wenn R faktoriell ist, können wir manchmal entscheiden, ob Polynome in $R[x]$ irreduzibel sind.

Beispiel: $f(x) = x^3 - 2 \in \mathbb{Z}[x]$

Behauptung: f ist irreduzibel in $\mathbb{Z}[x]$

Angenommen es gäbe einen echten Teiler, dann gäbe es einen linearen Teiler, das heißt

$$\exists a, b \in \mathbb{Z}, a \neq 0 : f(x) = (ax + b)g(x)$$

wobei $g(x)$ quadratisch in $\mathbb{Z}[x]$.

Sehe sofort: $a \in \{\pm 1\}, b \in \{\pm 1, \pm 2\}$

Nachrechnen: keine dieser Möglichkeiten ist ein Teiler

Der folgende Satz zeigt, dass f auch in $\mathbb{Q}[x]$ irreduzibel ist.

Satz 2.30 (Satz von Gauß)

Sei R ein faktorieller Ring. Falls $f(x) \in R[x]$ irreduzibel als Element von $R[x]$, dann ist f auch irreduzibel als Element von $Q(R)[x]$.

2 Ringe

Vorbemerkung: Sei $f \in Q(R)[x]$ irgendein Polynom. Dann existiert $a \in Q(R)$, sodass $a \cdot f(x) \in R[x]$ und $\text{ggT}(\text{Koeffizienten von } a \cdot f(x)) = 1$ (Koeffizienten sind teilerfremd).

Beweis dazu: Auf Hauptnenner bringen und durch größten gemeinsamen Teiler der Koeffizienten teilen.

Beweis. Angenommen wir haben $f(x) \in R[x]$ welches als Polynom in $Q(R)[x]$ reduzibel ist. Das heißt es existieren Polynome $q(x), p(x) \in Q(R)[x]$ mit q, p nicht konstant, sodass $f(x) = q(x) \cdot p(x)$.

Ziel: Schreibe f als Produkt $f = q'(x) \cdot p'(x)$ wobei $q', p' \in R[x]$ echte Teiler sind.

Beobachtung: Wenn $\gamma \in R$ jeden Koeffizienten von f teilt und $\gamma \notin R^*, \gamma \neq 0$, dann ist γ ein echter Teiler von f und wir sind fertig. Wir nehmen also ab sofort an, dass die Koeffizienten von f teilerfremd sind.

Wende Vorbemerkung auf Polynome $p(x), q(x)$ an und erhalte $a, b \in Q(R)$, sodass $a \cdot p(x) \in R[x]$ und $b \cdot q(x) \in R[x]$ und Koeffizienten dieser Polynome jeweils teilerfremd in R sind.

Durch Multiplikation erhalten wir die Gleichung

$$a \cdot b \cdot f(x) = a \cdot p(x) \cdot b \cdot q(x) \in R[x] \quad (*)$$

Beachte: die linke Seite ist in $R[x]$, weil beide Faktoren der rechten Seite in $R[x]$ sind.

Behauptung: Es ist $a \cdot b \in R$.

Beweis: Angenommen $a \cdot b \notin R$, das heißt es existiert ein Primelement $p \in R$, welches in der Darstellung von $a \cdot b$ mit negativem Exponenten auftritt. Da aber $a \cdot b \cdot f(x) \in R[x]$, muss die Darstellung jedes Koeffizienten das Element p mit positivem Exponenten enthalten. Also $p \mid \text{Koeffizienten} \nmid$ zu $\text{ggT}(\text{Koeffizienten}) = 1$.

Behauptung: Es gilt sogar $a \cdot b \in R^*$

Beweis: Angenommen $a \cdot b \notin R^*$. Dann hätten wir einen echten irreduziblen Teiler $\gamma \in R$ irreduzibel mit $\gamma \mid a \cdot b$.

$$\Rightarrow \gamma \mid a \cdot b \cdot f(x) \quad \Rightarrow \gamma \mid [a \cdot p(x)][b \cdot q(x)]$$

Erinnerung: $\gamma \in R$ irreduzibel $\Rightarrow \gamma$ prim in $R[x]$.

Also gilt

$$\gamma \mid a \cdot p(x) \quad \text{oder} \quad \gamma \mid b \cdot q(x)$$

2 Ringe

oBdA sei $\gamma \mid a \cdot p(x) \nmid$ zur Wahl von a .

Damit können wir $(*)$ umschreiben zu

$$f(x) = \underbrace{\left[(a \cdot b)^{-1} \cdot a \cdot p(x) \right]}_{\in R[x]} \cdot \underbrace{[b \cdot q(x)]}_{\in R[x]}$$

□

Zusammenfassung: Wir sind jetzt in der Lage, für ganzzahlige Polynome zu entscheiden, ob sie in $\mathbb{Q}[x]$ irreduzibel sind. (z.B. $x^3 - 2$ ist irreduzibel in $\mathbb{Q}[x]$, Folgerung: $[\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}) : \mathbb{Q}] = 3$, denn wir wissen jetzt, dass $x^3 - 2$ das Minimalpolynom von $\sqrt[3]{2}$ ist)

Erinnerung: Das geht so:

Lagrangesche Interpolationsformel (= Polynom von Grad $\leq n$ ist durch seine Werte an $n + 1$ Stellen festgelegt) Sei k Körper, $f(x) \in k[x]$ Polynome von Grad $\leq n$, seien $a_1, \dots, a_{n+1} \in k$ unterschiedliche Körperelemente. Dann ist f durch die Werte $f(a_i)$ eindeutig festgelegt, nämlich

$$f(x) = \sum_{j=1}^{n+1} f(a_j) \prod_{k \neq j} \frac{x - a_k}{a_j - a_k} =: h(x) \in k[x]$$

Dann gilt für alle i

$$h(a_i) = \sum_{j=1}^{n+1} f(a_j) \prod_{k \neq j} \frac{a_i - a_k}{a_j - a_k} = f(a_i) \prod_{k \neq i} \frac{a_i - a_k}{a_i - a_k} = f(a_i)$$

$\Rightarrow h - f$ ist Polynom von Grad $\leq n$ mit Nullstellen a_1, \dots, a_{n+1}

$\Rightarrow h - f = 0$

Damit haben wir folgendes Verfahren, um Irreduzibilität in $\mathbb{Z}[x]$ und also auch in $\mathbb{Q}[x]$ zu testen:

Gegeben $f(x) \in \mathbb{Z}[x]$ von Grad $\leq n$ so, dass $\text{ggT}(\text{Koeffizienten}) = 1$.

Wähle $a_1, \dots, a_{n+1} \in \mathbb{Z}$ so, dass $f(a_i) \neq 0$ und betrachte $f(a_1), \dots, f(a_n) \in \mathbb{Z}$.

Wir wissen, wenn $g(x)$ ein Teiler von $f(x)$ in $\mathbb{Z}[x]$ ist, dann gilt für alle $i : q(a_i) \mid f(a_i)$

Für $g(a_i)$ gibt es also nur endlich viele Möglichkeiten.

2 Ringe

Nur endlich viele Polynome kommen als Teiler in Frage. Wir müssen also durch Polynomdivision testen, ob die Kandidatenpolynome tatsächlich Teiler sind.

Satz 2.31 (Eisenstein-Kriterium)

Sei R ein faktorieller Ring, sei

$$f(x) = a_0 + a_1x + \cdots + a_nx^n \in R[x]$$

mit $n > 0$ und $\text{ggT}(a_0, \dots, a_n) = 1$. Falls es ein irreduzibles $p \in R$ gibt, sodass $p \mid a_0, p \mid a_1, \dots, p \mid a_{n-1}$ und $p^2 \nmid a_0$, dann ist f irreduzibel in $R[x]$ und also auch in $Q(R)[x]$.

Beweis. Sei f wie im Satz gegeben. Angenommen wir können f schreiben als Produkt

$$f(x) = \alpha(x) \cdot \beta(x)$$

wobei $\alpha, \beta \in R[x], \deg \alpha > 0, \deg \beta > 0$.

Schreibe

$$\begin{aligned}\alpha(x) &= \alpha_0 + \alpha_1x + \dots \\ \beta(x) &= \beta_0 + \beta_1x + \dots\end{aligned}$$

Beobachte: $a_0 = \alpha_0 \cdot \beta_0$

Per Annahme gilt: $p \mid a_0 \xRightarrow[\text{faktoriell}]{R} p \mid \alpha_0 \text{ oder } p \mid \beta_0$.

Per Annahme $p^2 \nmid a_0$ kann p nicht beide Elemente teilen. Wir nehmen also $p \mid \alpha_0$ und $p \nmid \beta_0$ an.

Weil $\text{ggT}(a_0, \dots, a_n) = 1$, wissen wir: p teilt nicht alle α_i . Sei also i minimal, sodass $p \nmid \alpha_i$. Wir wissen schon mal $i < n$, insbesondere $p \mid a_i$.

Es ist aber

$$a_i = \underbrace{\alpha_0\beta_i}_{\text{Vielfaches von } p} + \underbrace{\alpha_i\beta_{i-1}}_{\text{Vielfaches von } p} + \underbrace{\alpha_2\beta_{i-2}}_{\text{Vielfaches von } p} + \cdots + \underbrace{\alpha_i\beta_0}_{\text{kein Vielfaches von } p}$$

\nmid zu Teilbarkeitsregeln. □

Bemerkung: Polynome, welche die Annahmen des Satzes erfüllen, heißen Eisensteinpolynome.

Ein Beispiel dafür ist $R = \mathbb{Z}, f(x) = x^3 - 2$.

2.3 Hilfe bei der Anwendung des Eisenstein-Kriteriums

Sei R faktoriell und $\varphi : R[x] \rightarrow S$ ein Ringmorphismus in einen Integritätsring S . Angenommen φ hat die Eigenschaft, dass $\forall f \in R[x] : \deg f > 0 \Rightarrow \varphi(f) \notin S^*$.

Wenn jetzt ein $f \in R[x]$ gegeben ist mit $f(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n$ mit $n > 0$ und $\text{ggT}(a_0, \dots, a_n) = 1$ und $\varphi(f)$ irreduzibel ist, dann ist f irreduzibel.

Beweis. Angenommen $f(x)$ sei reduzibel in $R[x] \Rightarrow \exists \alpha(x), \beta(x) \in R[x]$ mit $f(x) = \alpha(x) \cdot \beta(x)$ und $\deg \alpha > 0, \deg \beta > 0$. Dann gilt

$$\varphi(f) = \varphi(\alpha \cdot \beta) = \underbrace{\varphi(\alpha)}_{\notin S^*} \cdot \underbrace{\varphi(\beta)}_{\notin S^*}$$

Also hat $\varphi(f)$ echte Teiler in S und ist damit nicht irreduzibel. \square

Wie finden wir φ ?: Keine Ahnung, wir müssen rumprobieren.

Beispielhafte Konstruktionen

- 1) Gegeben ein Ringmorphismus $\phi : R \rightarrow S$ (z.B. $\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$, oder $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ mit $a \mapsto a^p$)

Betrachte dann folgenden Morphismus von Polynomringen

$$\varphi : R[x] \rightarrow S[x], \sum a_i x^i \mapsto \sum \phi(a_i) x^i$$

- 2) Situation wie in 1), zusätzlich sei $s \in S$ gegeben. Betrachte

$$\varphi^* : R[x] \rightarrow S, \sum a_i x^i \mapsto \sum \phi(a_i) s^i$$

- 3) Situation wie in 2). Betrachte Morphismus

$$\varphi^{\mathbb{C}} : R[x] \rightarrow s[x], \sum a_i x^i \mapsto \sum \phi(a_i) (x - s)^i$$

Beispielhafte Nutzanwendung: Betrachte $p \in \mathbb{N}$ prim und

$$f(x) = x^{p-1} + x^{p-2} + \dots + x + 1 \in \mathbb{Z}[x]$$

Das ist kein Eisenstein-Polynom.

Beobachte aber auch $(x-1)f(x) = x^p - 1$.

Das legt nahe, folgenden Morphismus zu probieren:

$$\varphi : \mathbb{Z}[x] \rightarrow \mathbb{Z}[x], g(x) \mapsto g(x+1)$$

was ist $\varphi(f)$?

$$\varphi(x^p - 1) = \varphi((x-1)f) = \underbrace{\varphi(x-1)}_{=x} \cdot \varphi(f)$$

und außerdem:

$$\varphi(x^p - 1) = (x+1)^p - 1 = \sum_{i=1}^p \binom{p}{i} x^i - 1$$

$$\Rightarrow \varphi(f) = \sum_{i=1}^p \binom{p}{i} \cdot x^{i-1}$$

das ist ein Eisenstein-Polynom.

Also ist $f(x)$ irreduzibel in $\mathbb{Z}[x]$, also auch in $\mathbb{Q}[x]$.

Ernte einfahren: Wir können mit unseren Methoden einige Fragen beantworten!

Erinnerung: Gegeben $M \subset \mathbb{C}$, eine Menge die $0, 1$ enthält. $\text{Kons}(M)$ = Menge der aus M konstruierbaren Punkte.

- 1) $\text{Kons}(M)$ ist ein Unterkörper von \mathbb{C}
- 2) Wenn $z \in \text{Kons}(M) \subset \mathbb{C}$, dann gibt es $n \in \mathbb{N}$ sodass $[k(z) : k] = 2^n$ wobei $k = \mathbb{Q}(M \cup \overline{M})$ und $M = \{\overline{m} \mid m \in M\}$.

Beispiel 2.32

Das Element $z = \sqrt[3]{2}$ ist nicht aus $M = \{0, 1\}$ konstruierbar, denn in diesem Fall wäre $\overline{M} = M$ und $k = \mathbb{Q}(0, 1) = \mathbb{Q}$ aber $[\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2} : \mathbb{Q})] = 3$, denn wir wissen: $x^3 - 2$ ist das Minimalpolynom.

Dieselbe Argumentation liefert mehr!

Satz 2.33

Sei $\varphi \in (0, 2\pi)$ sodass $e^{i\varphi} \in \mathbb{C}$ transzendent ist. Dann ist der Winkel $\angle e^{i\varphi}$, aufgespannt durch x -Achse und $e^{i\varphi}$ nicht durch Zirkel und Lineal 3-teilbar.

2 Ringe

Bemerkung: Die Abbildung

$$(0, 2\pi) \rightarrow \mathbb{C}, \varphi \mapsto e^{i\varphi}$$

ist injektiv, hat also überabzählbar viele Bildpunkte, es gibt aber nur abzählbar viele algebraische Zahlen. Also ist $e^{i\varphi}$ transzendent für fast alle φ .

Für dieses Problem betrachte bei gegebenem φ die Menge $M = \{0, 1, e^{i\varphi}\}$. Ist $e^{i\frac{\varphi}{3}} \in \text{Kons}(M)$? Also betrachten wir

$$k = \mathbb{Q}(M \cup \overline{M}) = \mathbb{Q}(z) = \mathbb{Q}(e^{i\varphi})$$

Müssen diskutieren: $[k(e^{i\frac{\varphi}{3}}) : k]$ das ist eine 2-er Potenz falls $e^{i\frac{\varphi}{3}}$ konstruierbar ist.

Wir sehen $e^{i\frac{\varphi}{3}}$ ist Nullstelle des Polynoms $f(x) = x^3 - e^{i\varphi} \in k[x]$. Falls f das Minimalpolynom ist, ist $[k(e^{i\frac{\varphi}{3}}) : k] = 3$, also $e^{i\frac{\varphi}{3}} \notin \text{Kons}(M)$.

Um zu sehen, dass $f \in k[x]$ tatsächlich irreduzibel ist, müssen wir k verstehen!

Behauptung: k ist isomorph zum Körper der rationalen Funktionen $\mathbb{Q}(y)$

Beweis. Wir betrachten einen Ringmorphismus

$$\mathbb{Q}[y] \rightarrow k = \mathbb{Q}(e^{i\varphi}), f(y) \mapsto f(e^{i\varphi})$$

Die Funktion ist injektiv weil $e^{i\varphi}$ transzendent ist.

Außerdem gilt: $\mathbb{Q}[y] \rightarrow Q(\mathbb{Q}[y]) = \mathbb{Q}(y)$

Die universelle Eigenschaft liefert einen Isomorphismus $\eta : \mathbb{Q}(y) \rightarrow k$.

η ist surjektiv weil $e^{i\varphi} = \eta(y)$ im Bild liegt und k der kleinste Körper ist, der $e^{i\varphi}$ enthält. \square

Wir wollen entscheiden, ob $f(x) = x^3 - e^{i\varphi} \in k[x]$ irreduzibel ist. Wir können also auch untersuchen, ob $x^3 - y$ in $(\mathbb{Q}(y))[x]$ irreduzibel ist.

\Leftrightarrow Ist $x^3 - y \in (\mathbb{Q}[y])[x]$ irreduzibel?

$-y$ ist prim = irreduzibel in $\mathbb{Q}[y]$ und damit ist $x^3 - y$ ein Eisenstein-Polynom.

Beispiel 2.34

Falls p prim ist und das regelmäßige p -Eck konstruierbar ist, ist $p-1$ von der Form 2^n .

2 Ringe

Beweis. Betrachte $M = \overline{M} = \{0, 1\}$ und $k = \mathbb{Q}(M \cup \overline{M}) = \mathbb{Q}$.

Das regelmäßige p -Eck ist konstruierbar $\Leftrightarrow e^{\frac{2\pi i}{p}} \in \text{Kons}(M)$.

Falls das so ist, ist $[\mathbb{Q}(e^{\frac{2\pi i}{p}}) : \mathbb{Q}] = 2^n$ für ein $n \in \mathbb{N}$.

Wir wissen $e^{\frac{2\pi i}{p}}$ ist Nullstelle von $x^p - 1 \in \mathbb{Q}[x]$.

Aber $x^p - 1 = (x - 1)(x^{p-1} + \dots + 1)$. Das Minimalpolynom ist also $x^{p-1} + \dots + 1$. Und damit $[\mathbb{Q}(e^{\frac{2\pi i}{p}}) : \mathbb{Q}] = p - 1$. \square

2.4 Ringe und Ideale

Definition 2.35

Sei R ein Ring (kommutativ, mit 1). Sei $I \subset R$ eine nicht-leere Teilmenge. Nenne I ein Ideal, falls gilt:

$$1) \quad \forall a, b \in I : a + b \in I$$

$$2) \quad \forall a \in I, \forall r \in R : ra \in I$$

Bemerkung: Für nicht-kommutative Ringe definiert man Linksideale (wie oben) und Rechtsideale (mit ar statt ra in 2)).

Bemerkung: • Die 0 ist in jedem Ideal enthalten

- $\{0\}, R$ sind immer Ideale
- Falls R ein Körper ist, sind $\{0\}$ und R die einzigen Ideale, denn:

Sei k ein Körper, $I \subset k$ ein Ideal. Angenommen $\exists a \in I \setminus \{0\}$. Sei $b \in k$ gegeben; dann ist $b = (b \cdot a^{-1}) \cdot a \in I$.

- Falls $I \subset R$ ein Ideal und $1 \in I \Rightarrow I = R$

Beispiel 2.36 • $R = \mathbb{Z}, a \in \mathbb{Z}$ ein Element $I = \{\text{alle Vielfachen von } a\}$

- *Besonders einfache Ideale:* sei R ein Ring, $I \subset R$ ein Ideal. Nenne I ein Hauptideal falls $\exists a \in I : I = (a)$. Nenne R Hauptidealring falls alle Ideale Hauptideale sind. z.B. \mathbb{Z} ist ein Hauptidealring.

Sei $I \subset \mathbb{Z}$ ein Ideal, $I \neq (0)$. Wir wissen: I enthält positive Elemente. Sei $a \in I$ das kleinste positive Element. Will zeigen: $I = (a)$. Inklusion \supset ist klar. Sei also

2 Ringe

$b \in I \setminus \{0\}$ irgendein Element. oBdA sei $b > 0$. Division mit Rest:

$$\underbrace{b}_{\in I} = \underbrace{* \cdot a}_{\in I} + c, \text{ wobei } 0 \leq c < a.$$

Damit ist $c \in I$ aber auch $c < a \Rightarrow c = 0$ und damit $b \in (a)$.

Das gleiche gilt, falls k ein Körper und $R = k[x]$ ist.

$R = k[x, y]$ ist kein Hauptidealring, denn $I = (x, y)$ ist kein Hauptideal, denn

- 1) $I \neq R$ genauer $1 \notin I$, denn alle Elemente von I außer 0 haben positiven Grad.
- 2) Wenn I ein Hauptideal wäre, $I = (a)$, dann $a \mid x$ und $a \mid y$, Aber $\text{ggT}(x, y) = 1$. Also wäre a Einheit, $I = R \nmid$.

Einige Rechenregeln

- $(a) \subset (b) \Leftrightarrow b \mid a$
- $(a) = (b) \Leftrightarrow a \sim b$

- R beliebiger Ring, $(a_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ eine Familie von Elementen

$$I = \{r_1 \cdot a_{\lambda_1} + \dots + r_n \cdot a_{\lambda_n} \mid n \in \mathbb{N}, r_1, \dots, r_n \in R, \lambda_1, \dots, \lambda_n \in \Lambda\}$$

Wir sagen das Ideal ist von $(a_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ erzeugt und schreibe

$$I = ((a_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}) = (a_\lambda \mid \lambda \in \Lambda)$$

Falls die Familie endlich ist, schreibt man auch

$$I = (a_1, \dots, a_n)$$

Definition 2.37

Sei R ein Ring und $I \subset R$ ein Ideal. Nenne I endlich erzeugt, falls es endlich viele $a_1, \dots, a_n \in I$ gibt, sodass

$$I = (a_1, \dots, a_n)$$

Bemerkung: Die Ähnlichkeit zwischen Erzeugendensystemen von Idealen und Untervektorräumen geht nicht sehr weit!

Beispiel 2.38

Sei k ein Körper (z.B. \mathbb{R}) und $X \subset k^n$ eine Teilmenge (z.B. $X = \text{Einheitskreis in } \mathbb{R}^2$)

2 Ringe

Betrachte $R = k[x_1, \dots, x_n]$ und

$$I = \left\{ f \in k[x_1, \dots, x_n] \mid f(x_1, \dots, x_n) = 0 \forall \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \in X \right\}$$

Diese Konstruktion ist besonders interessant, falls X die Lösungsmenge eines polynomiellen Gleichungssystems ist.

Definition 2.39

Sei R ein Ring. Sage „in R gilt der Teilerkettensatz für Ideale“, falls jede aufsteigende Kette von Idealen

$$I_1 \subseteq I_2 \subseteq I_3 \subseteq \dots$$

nach endlich vielen Schritten konstant wird.

Satz 2.40

Sei R ein Ring, dann sind äquivalent:

- 1) Jedes Ideal ist endlich erzeugt
- 2) In R gilt der Teilerkettensatz für Ideale
- 3) In jeder nicht-leeren Menge von Idealen gibt es ein Element, das bezüglich Inklusion maximal ist

Falls diese Eigenschaften gelten, nenne R Noethersch.

Beweis. 1) \Rightarrow 2) Sei $I_1 \subseteq I_2 \subseteq \dots$ eine Folge von Idealen. Beachte:

$$I = \bigcup_{i=0}^{\infty} I_i$$

ist ein Ideal, also per Annahme endlich erzeugt: $I = (a_1, \dots, a_n)$ für geeignete $a_1, \dots, a_n \in \bigcup I_i$. Dann gibt es also i_1, \dots, i_n sodass $a_i \in I_{i_1}, a_2 \in I_{i_2}$ wenn $m = \max\{i_1, \dots, i_n\}$. Dann gilt $a_1 \in I_m, a_2 \in I_m, \dots$ und somit:

$$(a_1, \dots, a_n) \subset I_m \subset I = (a_1, \dots, a_m)$$

also auch $I_m = I_{m+1} = I_{m+2} = \dots$

2) \Rightarrow 3) Sei M eine nicht-leere Menge von Idealen ohne maximales Element. Sei $I_i \in M$ irgendein Element. Finde dann $I_2 \in M$ mit $I_1 \subsetneq I_2$. Da I_2 auch nicht maximal ist finde also $I_3 \in M$ mit $I_2 \subsetneq I_3$. Erhalte so eine Kette

$$I_1 \subsetneq I_2 \subsetneq I_3 \subsetneq \dots$$

2 Ringe

\Rightarrow Teilerkettensatz für Ideale gilt nicht!

3) \Rightarrow 1) Sei $I \subset R$ ein Ideal, $I \neq (0)$. Sei $M = \{J \subset I \mid J \text{ ein Ideal, } J \text{ endlich erzeugt}\}$

Wir wissen es gibt ein maximales $m \in M$. Behauptung $m = I$

Denn sonst wäre $m = (a_1, \dots, a_n) \subsetneq I$ und es gäbe $a_{n+1} \in I \setminus m$. Dann ist $m' = (a_1, \dots, a_n, a_{n+1})$ endlich erzeugt, also in M und $m' \supsetneq m \nsubseteq$ \square

Satz 2.41 (Hilbert)

Sei R Noethersch. Dann ist auch $R[x]$ Noethersch.

Beweis. Angenommen $R[x]$ nicht Noethersch. Wir müssen zeigen R ist nicht Noethersch.

Wir wissen: Es gibt in $R[x]$ ein Ideal I , das nicht endlich erzeugt ist.

Wähle in I ein Element f von minimalem Grad. Dann ist $I \subsetneq (f_1)$, also $I \setminus (f_1) \neq \emptyset$, wähle $f_2 \in I \setminus (f_1)$ von minimalem Grad. $I \supsetneq (f_1, f_2)$ wähle $f_3 \in I \setminus (f_1, f_2)$ von minimalem Grad.

Erhalte Folge von Polynomen f_1, f_2, f_3, \dots sodass $\deg f_1 \leq \deg f_2 \leq \deg f_3 \leq \dots$

Setze $n_i = \deg f_i$, $a_i = \text{Leitkoeffizient von } f_i \in R$.

Wir wollen zeigen, dass folgende Kette von Idealen in R nicht stationär wird:

$$(a_1) \subseteq (a_1, a_2) \subseteq (a_1, a_2, a_3) \subseteq \dots$$

Denn dann wird klar sein, dass R nicht Noethersch war.

Angenommen es gäbe k mit $(a_1, \dots, a_k) = (a_1, \dots, a_{k+1}) \Leftrightarrow a_{k+1} \in (a_1, \dots, a_k)$

Dann gibt es also eine Linearkombination

$$a_{k+1} = \sum_{i=1}^k r_i a_i$$

für geeignete $r_i \in R$. Betrachte Polynom

$$s(x) = \sum_{i=1}^k r_i \cdot x^{n_{k+1}-n_i} \cdot f_i(x)$$

Wesentliche Eigenschaften von s :

$$1) \deg s = n_{k+1} = \deg f_{k+1}$$

2) Leitkoeffizient $(s) = a_{k+1}$

3) $s \in (f_1, \dots, f_k)$

Betrachte $\underbrace{f_{k+1}(x)}_{\notin (f_1, \dots, f_k)} - \underbrace{s(x)}_{\in (f_1, \dots, f_k)} = t(x)$.

Damit ist $t(x) \notin (f_1, \dots, f_k)$ und $\deg t(x) < n_{k+1}$.

↳ zur Wahl von f_{k+1} als Element von $I \setminus (f_1, \dots, f_k)$ von minimalem Grad. \square

Satz 2.42

Sei R ein Integritätsring, der Hauptidealring ist. Dann ist R faktoriell.

Beweis. Sei p irreduzibel, seien $a, b \in R$, sowie $p \nmid a, p \nmid b$. Dann müssen wir zeigen: $p \nmid a \cdot b$.

Wir wissen: (p, a) ist ein Hauptideal, also $\exists c \in R$ sodass $(p, a) = (c)$. Also p ist Vielfaches von c , also $c \mid p$. Aber p ist irreduzibel, hat also keine echten Teiler. Also $c \in R^*$ oder $c \sim p$.

Aber $c \sim p \Leftrightarrow p \mid a$, was wir per Annahme ausschließen!

Also $c \in R^* \Rightarrow (a, p) = (1)$. Es gibt also eine Linearkombination

$$1 = \alpha_1 a_1 + \alpha_2 p \quad (*)$$

Analog finde $\beta_1, \beta_2 \in R$

$$1 = \beta_1 b + \beta_2 p \quad (**)$$

Es folgt

$$1 = \alpha_2 \beta_2 p^2 + (\alpha_1 \beta_2 a + \alpha_2 \beta_1 b)p + \alpha_1 a \beta_1 b$$

$\Rightarrow p \nmid \alpha_1 \beta_1 ab$, denn sonst würde p die Summe teilen, also auch $p \mid 1$.

$\Rightarrow p \nmid a \cdot b$ \square

Quotienten: Sei R ein Ring, $I \subset R$ ein Ideal. Dann definiere $r, s \in R$ als äquivalent, falls $r - s \in I$.

Satz 2.43

Es gibt auf Quotientenmengen eindeutige Verknüpfungen $+$, \cdot , sodass die Quotientenabbildung

$$q : R \rightarrow R/I$$

ein Ringmorphismus ist.

Beispiel 2.44

$R = \mathbb{Z}, I = (p)$ das von einer Primzahl p erzeugte Hauptideal. Dann gilt

$$R/I = \mathbb{Z}/p\mathbb{Z} = \mathbb{F}_p = \underline{F}_p$$

Beispiel 2.45

Sei k ein Körper, $R = k[x]$, $f \in R$ ein Polynom, sowie $I = (f)$. Dann betrachte $R/(f)$.

Beobachtung: Sei $n = \deg f$. Polynomdivision zeigt: die Polynome von $\deg < n$ bilden vollständiges Repräsentantensystem. Insbesondere $\dim_k R/(f) = n$.

Multiplikation und Addition ist sehr einfach zu beschreiben: Wenn a, b Polynome von $\deg < n$

$$[a] \cdot [b] = [c]$$

wobei c der Divisionsrest von $a \cdot b$ bei Division durch f ist.

Beispiel 2.46

Sei k ein Körper, $X \subset k^n$ eine Teilmenge (z.B. Lösungsmenge eines algebraischen Gleichungssystems).

Dann setze $R = k[x_1, \dots, x_n]$

$$I = \{f \in R \mid f|_X \equiv 0\}$$

und $R/I = \{\text{Funktionen } X \rightarrow k, \text{ die sich zu Polynomen } k^n \rightarrow k \text{ fortsetzen lassen}\} = \text{Polynomiale Funktionen} = \text{algebraische Funktionen}$

Satz 2.47 (Universelle Eigenschaft)

Sei R ein Ring, sei $I \subset R$ ein Ideal. Sei $q : R \rightarrow R/I$ die Restklassenabbildung. Dann gilt folgende universelle Eigenschaft: für jeden surjektiven Ringmorphismus $\varphi : R \rightarrow S$ mit $\ker(\varphi) \supseteq I$ gibt es genau einen Ringmorphismus $\eta : R/I \rightarrow S$ sodass das folgende Diagramm kommutiert:

$$\begin{array}{ccc} R & \xrightarrow{q} & R/I \\ \mathbb{1}_R \downarrow & & \downarrow \exists! \eta \\ R & \xrightarrow{\varphi} & S \end{array}$$

Beweis.

Eindeutigkeit: Angenommen wir haben zwei Morphismen η_1, η_2 . Sei $[a] \in R/I$ gegeben. Weil die Diagramme kommutieren, muss dann $\eta_1([a]) = \eta_1(q(a)) = \varphi(a) = \eta_2([a])$.

Existenz: Setze $\eta : R/I \rightarrow S, [a] \mapsto \varphi(a)$. Dabei ist die Wohldefiniertheit zu zeigen. Sei also $[a] = [a']$ d.h. $a - a' \in I \subset \ker(\varphi)$. Dann ist $\varphi(a) - \varphi(a') = \varphi(a - a') = 0$, also $\varphi(a) = \varphi(a')$ und die Wohldefiniertheit ist klar. Muss noch nachrechnen: η ist Ringmorphismus, bin aber zu faul. \square

Beispiel 2.48

Sei $\varphi : R \rightarrow S$ ein surjektiver Ringmorphismus. Dann ist $S \simeq R/\ker(\varphi)$.

Beweis. Nach universeller Eigenschaft gibt es genau eine Abbildung $\eta : R/\ker(\varphi) \rightarrow S$ sodass das folgende Diagramm kommutiert.

$$\begin{array}{ccc} R & \xrightarrow{\quad} & R/\ker(\varphi) \\ \mathbb{1}_R \downarrow & & \downarrow \exists! \eta \\ R & \xrightarrow{\quad \varphi \quad} & S \end{array}$$

Behauptung: η ist Isomorphismus. Muss zeigen: η bijektiv also injektiv und surjektiv. Surjektivität folgt sofort aus Kommutativität des Diagramms und der Surjektivität von φ . Noch zu zeigen η injektiv bzw. $\ker(\eta) = 0_{R/\ker(\varphi)}$.

Sei also $[a] \in \ker(\eta)$. Wegen der Kommutativität des Diagramms:

$$0_S = \eta([a]) = \eta(q(a)) = \varphi(a) \Rightarrow a \in \ker(\varphi),$$

also $[a] = 0_{R/\ker(\varphi)}$. \square

Warum das Bohei um Quotienten?

Wir betrachten Körpererweiterung L/k und algebraische Elemente $a \in L$.

Wir wissen: a hat das Minimalpolynom $f \in k[x]$. Jedes andere Polynom $g \in k[x]$ mit $g(a) = 0$ ist Vielfaches von f . ($g(a) = 0 \Leftrightarrow g \in (f)$).

Betrachte Abbildung:

$$\begin{aligned} k[x] &\rightarrow k(a) \\ g &\mapsto g(a) \end{aligned}$$

Wir wissen:

- $\ker(\varphi) = (f)$
- Die Elemente von $k(a)$ können wir schreiben als $\lambda_1 + \lambda_2 a + \dots + \lambda_n a^{n-1}$ mit $\lambda_i \in k$
 $\Rightarrow \varphi$ ist surjektiv!

Insgesamt:

$$k(a) \cong k[x]/(f)$$

Satz 2.49

Sei $\varphi : R \rightarrow S$ ein Ringmorphismus. Dann gilt

- 1) Für jedes Ideal $I \subset S$ ist $\varphi^{-1}(I)$ ein Ideal, das $\ker(\varphi)$ enthält.
- 2) Wenn φ surjektiv ist, dann ist die Abbildung

$$\begin{aligned} \{\text{Ideale in } S\} &\xrightarrow{\alpha} \{\text{Ideale in } R, \text{ die } \ker(\varphi) \text{ enthalten}\} \\ I &\mapsto \varphi^{-1}(I) \end{aligned}$$

bijektiv.

- 3) Wenn φ surjektiv ist, $J \subset R$ ein Ideal, dann ist $\varphi(J) \subset S$ ein Ideal.
- 4) Wenn φ surjektiv ist, und $I \subset S$ ein Ideal ist, dann betrachte die Komposition ψ von

$$R \xrightarrow[\varphi]{} S \rightarrow S/I$$

und es ist $\ker(\psi) = \varphi^{-1}(I)$. Also ist $S/I \simeq R/\varphi^{-1}(I)$.

Beweis. 1) Hausaufgabe!

- 2) Weil φ per Annahme surjektiv ist, ist die Abbildung α injektiv. Also noch Surjektivität zu zeigen. Sei also $J \subset R$ ein Ideal, das $\ker(\varphi)$ enthält. Wir wissen: $S \simeq R/\ker(\varphi)$. Also gibt es nach universeller Eigenschaft ein Diagramm

$$\begin{array}{ccc} R & \xrightarrow{\varphi} & R/\ker(\varphi) \\ \mathbb{1}_R \downarrow & & \downarrow \exists! \eta \\ R & \xrightarrow{q} & R/J \end{array}$$

und $J = q^{-1}((0)) = \varphi^{-1}(\eta^{-1}(0))$, setze $I = \eta^{-1}(0)$, fertig.

3) Sei $J \subset R$ ein Ideal. Wir müssen zeigen

C1: Wenn $a, b \in \varphi(J)$, dann ist $a + b \in \varphi(J)$. $\exists a', b' \in J$ mit $a = \varphi(a'), b = \varphi(b')$ und dann $a + b = \varphi(\underbrace{a' + b'}_{\in J})$

C2: Sei $a \in \varphi(J)$, sei $b \in S$ beliebig. Dann ist $s \cdot a \in \varphi(J)$. Weil φ surjektiv ist, $\exists s' \in R : s = \varphi(s')$. Außerdem $\exists a' \in J : a = \varphi(a')$ und $\varphi(\underbrace{s'a'}_{\in J}) = \varphi(s')\varphi(a') = sa$

4) Sei $r \in R$. Es gilt

$$\begin{aligned} r \in \ker(\psi) &\Leftrightarrow q(\varphi(r)) = 0_{S/I} \\ &\Leftrightarrow \varphi(r) \in I \\ &\Leftrightarrow r \in \varphi^{-1}(I) \end{aligned}$$

□

Folgerung 2.50

Sei R noethersch (bzw. Hauptidealring). Sei $I \subset R$ ein Ideal. Dann ist R/I Noethersch (bzw. Hauptidealring).

Notation: Sei R Ring. Seien $I \subseteq J \subseteq R$ Ideale. Dann betrachte $q_I : R \rightarrow R/I$.

Das Ideal $q_I(J) \subseteq R/I$ wird mit J/I bezeichnet.

Satz 2.51 (Noetherscher Isomorphiesatz)

Situation wie oben. Dann

$$R/J \simeq (R/I)/(J/I)$$

Beweis. Wir haben Ringmorphisamen

$$R \xrightarrow{q_I} R/I \xrightarrow{q_{J/I}} (R/I)/(J/I)$$

Wir wissen $\ker(\eta) = q_I^{-1}(J/I) = J$. Also folgt die Aussage.

□

Wir haben 2 wichtige Typen von Idealen

- Primideale: R ein Ring, $I \subseteq R$ ein Ideal. Nenne I prim, falls $\forall a, b \in R : a \cdot b \in I \Rightarrow a \in I \vee b \in I$
- Maximale Ideale: R ein Ring. Ein Ideal $I \subset R$ heißt maximal, falls gilt

2 Ringe

1) $I \neq R$

2) Wenn $J \supsetneq I$ ein echt größeres Ideal ist, dann ist $J = R$.

Beispiel 2.52 • Sei R ein Ring, $p \in R$ ein prim-Element. Dann ist (p) ein Primideal.

• Sei k ein Körper, $R = k[x_1, \dots, x_n]$ und

$$I = (x_1, x_2, \dots, x_n) = \{ \underbrace{x_1 f_1 + x_2 f_2 + \dots + x_n f_n}_{\text{haben stets Nullstelle am Ursprung!}} \mid f_i \in k[x_1, \dots, x_n] \}$$

Wir wissen $1 \notin I$, denn 1 hat keine Nullstelle.

Beobachte: Ein Polynom liegt genau dann in I , wenn der konstante Teil gleich Null ist (d.h. wenn $f(0) = 0_k$).

Sei jetzt $J \supsetneq I$ echt größer! Sei $f \in J \setminus I$. Dann

$$\underbrace{f}_{\in J} = \text{const}^{\neq 0} + \underbrace{(\text{Polynom ohne konstanten Teil})}_{\in I \subset J}$$

$$\Rightarrow \text{const}^{\neq 0} \in J \Rightarrow J = R$$

Variante: Seien $a_1, \dots, a_n \in k$. Dann ist $I' = (x_1 - a_1, x_2 - a_2, \dots, x_n - a_n)$ auch maximal.

Zurück zu Beispiel ohne Variante

$$\begin{aligned} R/I &= k[x_1, \dots, x_n]/(x_1, \dots, x_n) \xrightarrow{\simeq} k \\ [f] &\longmapsto f(0) \end{aligned}$$

Beispiel 2.53

Sei k ein Körper, $f \in k[x]$ irreduzibel. Dann ist (f) maximal.

Beweis. Sei $J \supsetneq (f)$ größer, sei $g \in J \setminus (f)$ ein Element (g kein Vielfaches von f).

Wissen (Euklidischer Algorithmus): $\text{ggT}(f, g) \in J$. Aber f ist irreduzibel hat also keine echten Teiler d.h. $\text{ggT}(f, g) = 1$ □

Satz 2.54

Sei R ein Ring, $I \subset R$ ein Ideal. Dann gilt

1) I ist prim $\Leftrightarrow R/I$ ist Integritätsring

2) I ist maximal $\Leftrightarrow R/I$ ist ein Körper

2 Ringe

Insbesondere: maximale Ideale sind prim (denn Körper sind Integritätsringe)

Beweis. 1) \Rightarrow : Sei I prim. Seien $[a], [b] \in R/I$ Äquivalenzklassen von Elementen $a, b \in R$ sodass $[a] \neq 0_{R/I}$ und $[b] \neq 0_{R/I}$. Dann gilt $a \notin I$ und $b \notin I$.

Da I prim $a \cdot b \notin I \Rightarrow [a \cdot b] \neq 0_{R/I}$

1) \Leftarrow : Sei R/I ein Integritätsring. Seien $a, b \in R \setminus I$. Dann $[a] \neq 0_{R/I}$ und $[b] \neq 0_{R/I}$ und $[a \cdot b] \neq 0_{R/I}$.

$\Rightarrow ab \notin I$

2) \Rightarrow : Sei I maximal. Sei $a \in R$ mit $[a] \neq 0_{R/I}$ d.h. $a \notin I$.

Dann betrachte $J = (I, a)$. Wir wissen $J \supsetneq I$ also $(1) = J$. Also können wir schreiben:

$$1 = f + g \cdot a \quad \text{mit } f \in I, g \in R$$

$$\Rightarrow \underbrace{[1]}_{=1_{R/I}} = \underbrace{[f]}_{0_{R/I}} + [g] \cdot [a]$$

also ist $[g] = [a]^{-1}$ in R/I

2) \Leftarrow : Sei R/I ein Körper, sei $J \supsetneq I$ ein echtes Oberideal. Dann gibt es $a \in J \setminus I$.

Wir wissen $[a] \neq 0_{R/I}$, per Annahme $\exists b \in R$ mit $[a] \cdot [b] = [1]$. Das bedeutet $\exists f \in I$ sodass

$$\underbrace{a \cdot b}_{\in J} + \underbrace{f}_{\in I \subset J} = 1$$

das heißt $1 \in J$ d.h. $J = R$. □

Bemerkung: Teil 2) des Satzes liefert neuartige Methode, um Beispiele von Körpern zu konstruieren!

Weitere Beobachtungen/Konstruktionen mit Idealen

Sei R ein Ring, seien I_1, \dots, I_n Ideale in R

- Dann ist $I_1 \cap I_2 \cap \dots \cap I_n$ ein Ideal
- Dann ist $I_1 + \dots + I_n = \{f_1 + \dots + f_n \in R \mid \forall i f_i \in I_i\}$ ein Ideal

Beispiel 2.55

$$R = \mathbb{Z} \quad I_1 = (a) \quad I_2 = (b)$$

$$I_1 \cap I_2 = (\text{kgV}(a, b))$$

$$I_1 + I_2 = (\text{ggT}(a, b))$$

Definition 2.56

Zwei Ideale I_1, I_2 heißen teilerfremd, wenn $I_1 + I_2 = (1)$.

Nutzanwendung: Manchmal hat man Aufgaben der Form: gegeben ein Ring R , Ideale I_1, \dots, I_n und Elemente $r_1, \dots, r_n \in R$. Finde ein/alle $r \in R$

$$\begin{aligned} r &\equiv r_1 \pmod{I_1} \\ r &\equiv r_2 \pmod{I_2} \\ &\vdots \\ r &\equiv r_n \pmod{I_n} \end{aligned}$$

Antwort ist Chinesischer Restsatz: Situation wie oben. Fall $\forall i \neq j$ die Ideale I_i und I_j stets teilerfremd sind, dann ist die Abbildung:

$$\begin{aligned} \varphi : R &\rightarrow R/I_1 \times R/I_2 \times \dots \times R/I_n \\ r &\mapsto ([r]_{R/I_1}, [r]_{R/I_2}, \dots, [r]_{R/I_n}) \end{aligned}$$

surjektiv und $\ker(\varphi) = I_1 \cap \dots \cap I_n$.

Beweis. Aussage über $\ker(\varphi)$ ist trivial. Müssen surjektiv zeigen!

Seien $k \neq l$ gegeben. Wir wissen $(1) = I_k + I_l$. Also existieren Elemente $a_{kl} \in I_k$ und $b_{kl} \in I_l$ sodass $1 = a_{kl} + b_{kl}$

Setze

$$s_l = \prod_{k \neq l} a_{kl} = \prod_{k \neq l} (1 - b_{kl}) \in R$$

Beobachtung: Seien $k \neq l$ gegeben. Dann $s_l \equiv 0 \pmod{I_k}$, denn der Faktor a_{kl} aus dem 1. Produkt ist $\equiv 0 \pmod{I_k}$.

$s_l \equiv 1 \pmod{I_l}$, denn es ist stets $b_{kl} \equiv 0 \pmod{I_l}$, also jeder Faktor des rechten Produktes $\equiv 1 \pmod{I_l}$.

Seien $r_1, \dots, r_n \in R$ gegeben.

2 Ringe

Setze: $r = \sum r_i \cdot s_i$ dann gilt $\forall i : r \equiv r_i \pmod{I_i}$, also

$$\varphi(r) = [r_1] \times [r_2] \times \cdots \times [r_n]$$

□

Einschub Mengenlehre

Definition 2.57

Sei M eine Menge. \leq sei eine Relation. Wie nennen \leq eine Halbordnung, falls gilt:

1) $\forall a \in M : a \leq a$

2) Wenn $a, b, c \in M$ gegeben sind mit

$$a \leq b, b \leq c \Rightarrow a \leq c$$

3) $\forall a, b \in M : a \leq b$ und $b \leq a \Rightarrow a = b$

Wir fordern nicht, dass $\forall a, b \in M : a \leq b$ oder $b \leq a$ gilt. (Falls das gilt nenne \leq vollständig)

Beispiel 2.58

Betrachte $S = \text{Studierende}$, $M = \text{Pot}(S)$.

Gegeben $m_1, m_2 \in M$, schreibe $m_1 \leq m_2$ falls $m_1 \subseteq m_2$ ist.

Definition 2.59

Sei (M, \leq) eine Menge mit Halbordnung. Eine Kette ist eine Teilmenge $N \subset M$, so dass die auf N induzierte Halbordnung vollständig ist. Ein Element $m \in M$ heißt obere Schranke der Kette N , falls gilt: $\forall n \in N : n \leq m$.

Beispiel 2.60

Sei (M, \leq) gegeben. Sei $(n_i)_{i \in \mathbb{N}}$ eine Folge von Elementen sodass $n_1 \leq n_2 \leq \dots$ ist. Dann ist $N = \{n_i \mid i \in \mathbb{N}\}$ eine Kette.

Beispiel 2.61

Sei $M = \mathbb{R}$ und \leq wie üblich definiert. Dann ist jede Teilmengen eine Kette, denn \leq ist sowieso vollständig. Obere Schranken existieren genau dann wenn N nach oben beschränkt ist.

Satz 2.62 (Lemma von Zorn)

Sei (M, \leq) eine halbgeordnete Menge, $M \neq \emptyset$. Falls jede Kette eine obere Schranke besitzt, dann gibt es in M ein maximales Element.

3 Körpertheorie

Bemerkung: Dies ist äquivalent zum Auswahlaxiom. Sei $(M_\alpha)_{\alpha \in A}$ eine Familie von Mengen. Dann gibt es eine Abbildung

$$A \rightarrow \bigcup_{\alpha \in A} M_\alpha$$

sodass $\forall \alpha \in A : \varphi(\alpha) \in M_\alpha$.

Satz 2.63

Sei R ein Ring, $I \subset R$ ein Ideal. Dann gibt es ein maximales Ideal $m \subset R$, das I enthält

Beweis. Sei

$$M = \{\text{Ideale } J \subset R \text{ mit } I \subseteq J \subsetneq R\}$$

wähle \subseteq als Halbordnung.

Beachte: Wenn $N \subset M$ eine Kette ist, dann ist $s = \bigcup_{n \in N} n$ eine obere Schranke.

- Ketteneigenschaft garantiert, dass s ein Ideal ist
- $1 \notin s$, denn für alle $m \in M : 1 \notin m$. Also $s \subsetneq R$, also $s \in M$

Zorn: Es existiert in M ein maximales Element m .

Nachrechnen: Dies ist ein maximales Ideal in R , welches I enthält. □

3 Körpertheorie

3.1 Grundbegriffe

Beobachtung: Sei k ein Körper, sei 1_k das neutrale Element der Multiplikation. Dann betrachte Ringmorphismus

$$\eta : \mathbb{Z} \rightarrow k$$
$$n \mapsto \begin{cases} \underbrace{1_k + \dots + 1_k}_{n \text{ mal}} & \text{falls } n \geq 0 \\ \underbrace{-(1_k + \dots + 1_k)}_{n \text{ mal}} & \text{falls } n < 0 \end{cases}$$

Beobachte: Wenn $k' \subset k$ ein Unterkörper ist, dann $\text{Bild}(\eta) \subseteq k'$.

3 Körpertheorie

Beobachtung: Wenn $(k_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ eine Familie von Unterkörpern ist, dann ist

$$k' := \bigcap_{\lambda \in \Lambda} k_\lambda$$

wieder ein Unterkörper.

Definition 3.1

Gegeben ein Körper k , betrachte

$$k' := \bigcap_{\substack{k'' \subseteq k \\ \text{Unterkörper}}} k''$$

Dieser Unterkörper heißt *Primkörper* von k .

Mit der Beobachtung von oben: $\text{Bild}(\eta) \subseteq \text{Primkörper}$

Beachte: η ist entweder injektiv oder nicht.

Fall η ist injektiv:

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{Z} & \xrightarrow{\varphi} & Q(\mathbb{Z}) = \mathbb{Q} \\ \mathbb{1}_R \downarrow & & \downarrow \exists! \varphi \\ \mathbb{Z} & \xrightarrow{\eta} & \text{Primkörper von } k \end{array}$$

Beachte: $\text{Bild}(\varphi)$ ist Unterkörper des Primkörpers, welcher der kleinste Unterkörper von k ist, also $\text{Bild}(\varphi) = \text{Primkörper}$. Also insgesamt: Falls η injektiv ist, ist der Primkörper kanonisch isomorph zu \mathbb{Q} .

Fall η nicht injektiv: Dann ist $\ker(\eta) \subseteq \mathbb{Z}$ ein nicht-triviales Ideal.

Weil $\eta(1_{\mathbb{Z}}) = 1_k \neq 0_k$, ist $\ker(\eta) \subsetneq \mathbb{Z}$ also Hauptideal der Form (p) für ein $p \in \mathbb{N}$. Weil k nullteilerfrei ist, ist p eine Primzahl und nach universeller Eigenschaft von Quotienten haben wir ein Diagramm.

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{Z} & \xrightarrow{\varphi} & \mathbb{Z}/(p) \\ \mathbb{1}_R \downarrow & & \downarrow \exists \varphi \\ \mathbb{Z} & \xrightarrow{\eta} & \text{Primkörper von } k \end{array}$$

Argumentiere wie oben, erhalte einen kanonischen Isomorphismus zwischen dem Primkörper und $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$.

Zusammenfassung/Notation: Sei k ein Körper. Sei $k' \subseteq k$ der Primkörper. Dann entweder

- $k' \simeq \mathbb{Q}$ und man sagt: k hat Charakteristik 0, $\text{char}(k) = 0$
- $k' \simeq \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ für eine Primzahl p und man sagt k hat die Charakteristik p

Bemerkung zum Gruseln: Sei $\text{char}(k) = p > 0$. Dann ist $(x+y)^p = x^p + y^p$. Insbesondere ist

$$\begin{aligned} \text{Frob: } k[x] &\rightarrow k[x] \\ f &\mapsto f^p \end{aligned}$$

ein Ringmorphismus. Außerdem ist die Ableitung von $f(x) = x^p$ gegeben als $f'(x) = px^{p-1} \equiv 0$.

$$f(x) = x^p + x^{p+2} \text{ und } f'(x) = (p+2) \cdot x^{p+1} = 2 \cdot x^{p+1}$$

Schlussbeobachtung: Sei k ein endlicher Körper, dann ist $\text{char}(k) = p > 0$. Beobachte: k ist ein Vektorraum über dem Primkörper $\simeq \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$.

Sei $n = \dim_{\text{Prim}} k$. Dann $n < \infty$ und $\#k = p^n$.

3.2 Der algebraische Abschluss

Beobachtung: Das Polynom $x^2 + 2$ hat in \mathbb{Q} keine Nullstelle, aber im Oberkörper \mathbb{C} . Es gilt sogar jedes nicht konstante $f \in \mathbb{C}[x]$ hat in \mathbb{C} eine Nullstelle.

Ziel: Wir wollen Ähnliches für beliebige Körper konstruieren. Gegeben Körper k , konstruiere einen Oberkörper \bar{k} , sodass alle nicht konstanten Polynome $f \in \bar{k}[x]$ in \bar{k} eine Nullstelle haben.

Aber: \bar{k} erfüllt keine gute universelle Eigenschaft \rightsquigarrow Galois-Theorie: Symmetrie von Erweiterungen

Spielwiese: Betrachte \mathbb{Q} und $k = \mathbb{Q}[x]/(x^2 + 1)$.

Wir können \mathbb{Q} in k einbetten durch

$$\begin{aligned}\mathbb{Q} &\hookrightarrow k \\ q &\mapsto [q]\end{aligned}$$

Also ist k Oberkörper von \mathbb{Q} .

Betrachte das Element $a := [x] \in k$

Beobachte: $a^2 + 1_k = a \cdot a + 1_k = [x][x] + [1_{\mathbb{Q}}] = [x \cdot x + 1_{\mathbb{Q}}] = [x^2 + 1_{\mathbb{Q}}] = 0_k$.

Einsicht: $a \in k$ ist Nullstelle des Polynoms $x^2 + 1_k \in k[x]$

Wie soll die Konstruktion von \bar{k} gehen? Grundidee: so wie in der Spielwiese.

Satz 3.2

Sei k ein Körper, sei $f \in k[x]$ nicht konstant. Dann gibt es einen Oberkörper $L \supseteq k$, sodass f als Polynom in $L[x]$ eine Nullstelle in L hat.

Beweis. Sei $p(x)$ ein irreduzibler Faktor von f . Setze $L := k[x]/(p)$. Das ist ein Körper, weil (p) ein maximales Ideal ist.

Bette k mit Hilfe des injektiven Körpermorphismus

$$\begin{aligned}k &\rightarrow L \\ a &\mapsto [a]\end{aligned}$$

in L ein. Beachte, dass $a := [x] \in L$ eine Nullstelle von p und also auch von f ist. \square

Beobachtung: Wir wissen schon: wenn wir diese Konstruktion anwenden auf $k = \mathbb{R}$, $f = x^2 + 1$, dann erhalten wir \mathbb{C} . Wir sehen schon an diesem Beispiel, dass die so erhaltene Erweiterung Symmetrien besitzt, nämlich die komplexe Konjugation. Also ist es nicht richtig, dass \mathbb{C} bis auf kanonische Isomorphie eindeutig ist.

Satz 3.3

Sei k ein Körper. Dann ist äquivalent:

- 1) *Jedes nicht-konstante Polynom in $k[x]$ hat eine Nullstelle in k .*
- 2) *Jedes nicht-konstante Polynom zerfällt in Linearfaktoren.*
- 3) *Jedes irreduzible Polynom ist linear.*
- 4) *Wenn L/k eine algebraische Körpererweiterung ist, dann ist $L = k$.*

Nenne k algebraisch abgeschlossen, falls diese Bedingungen erfüllt sind.

Beweis. 1) \Rightarrow 2): Polynomdivision: wenn f bei a eine Nullstelle hat dann ist f ein Vielfaches von $(x - a)$.

2) \Rightarrow 3): trivial

3) \Rightarrow 4): Sei L/k eine algebraische Körpererweiterung. Sei $a \in L$ gegeben. Dann ist a algebraisch über k . Sei $f \in k[x]$ das Minimalpolynom. Dann ist f irreduzibel, also linear, also $f(x) = x - a \in k[x] \Rightarrow a \in k$.

4) \Rightarrow 1): Sei $f \in k[x]$ nicht konstant. Sei $p(x)$ ein irreduzibler Faktor von f . Setze

$$L = k[x]/(p)$$

Das ist eine endliche Erweiterung, denn $\dim_k L = \deg p < \infty$, also ist L algebraisch. Außerdem gilt: f hat in L eine Nullstelle. Nach 4) ist $L = k$, also hat f bereits in k eine Nullstelle. □

Definition 3.4

Sei k ein Körper. Ein Oberkörper \bar{k}/k heißt algebraischer Abschluss von k , falls gilt:

1) \bar{k} ist algebraisch abgeschlossen

2) \bar{k}/k ist algebraisch

Achtung: \mathbb{C} ist kein algebraischer Abschluss von \mathbb{Q} !

Nicht verwechseln mit algebraischer Abschluss von k in einem Oberkörper $L = \{l \in L \mid l \text{ ist algebraisch über } k\}$.

Definition 3.5

Seien R, S Ringe (später meistens Körper) die beide den Ring T als Unterring besitzen. Ein Ringmorphismus $\varphi : R \rightarrow S$ heißt T -Morphismus, falls $\varphi|_T = \text{id}_T$.

Beispiel 3.6

$R = S = \mathbb{C}$, $T = \mathbb{R}$. Dann ist die Konjugation

$$\begin{aligned} \varphi : \mathbb{C} &\rightarrow \mathbb{C} \\ z &\mapsto \bar{z} \end{aligned}$$

ein \mathbb{R} -Morphismus.

Satz 3.7

Sei k ein Körper, \bar{k} ein algebraischer Abschluss von k . Sei L/k algebraisch, sei L_0 ein Zwischenkörper $k \subseteq L_0 \subseteq L$. Sei weiter ein k -Morphismus $\varphi_0 : L_0 \rightarrow \bar{k}$ gegeben.

Dann existiert eine Fortsetzung $\varphi : L \rightarrow \bar{k}$ (d.h. ein Körpermorphismus φ , sodass $\varphi|_T L_0 = \varphi_0$).

Insbesondere ($L_0 = k$): jede algebraische Körpererweiterung von k bettet in \bar{k} ein.

Typische Anwendung: Sei k ein Körper, seien \bar{k} und \bar{k}' zwei algebraische Abschlüsse von k . Dann $\bar{k} \simeq \bar{k}'$.

Beweis. Wende den Satz 3.7 an mit $L = \bar{k}'$, $L_0 = k$ und $\varphi_0 = Id_k$. Der Satz sagt dann, dass es einen Körpermorphismus (sogar k -Morphismus) gibt

$$\varphi : \bar{k}' \rightarrow \bar{k}$$

Wir wissen: φ ist injektiv. Wir behaupten: φ ist sogar surjektiv. Der Grund dafür ist: Wir haben eine Kette von Körpern $k \subseteq \text{Bild}(\varphi) \subseteq \bar{k}$.

Wir wissen auch: $\text{Bild}(\varphi) \simeq \bar{k}'$ ist algebraisch abgeschlossen. \bar{k}/k ist algebraisch $\Rightarrow \bar{k}/\text{Bild}(\varphi)$ ist algebraisch.

Insgesamt: $\bar{k} = \text{Bild}(\varphi)$, denn algebraisch abgeschlossene Körper haben keine echten algebraischen Erweiterungen. \square

Beweis. (zu Satz 3.7) Verwende Zorns Lemma und betrachte

$$M = \{(L', \varphi') \mid L' \text{ ist Zwischenkörper } L_0 \subseteq L' \subseteq L \text{ und} \\ \varphi' : L' \rightarrow \bar{k} \text{ ist Körpermorphismus mit } \varphi'|_{L_0} = \varphi_0\}$$

Definiere eine Halbordnung durch $(L', \varphi') \leq (L'', \varphi'')$ falls gilt:

- 1) $L' \subseteq L''$
- 2) $\varphi''|_{L'} = \varphi'$

Fakt ohne Beweis: Das ist tatsächlich eine Halbordnung.

Zwischenbehauptung: In (M, \leq) hat jede Kette eine obere Schranke.

3 Körpertheorie

Sei $(L_\lambda, \varphi_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ eine Kette. Dann ist $L' := \bigcup_{\lambda \in \Lambda} L_\lambda$ ein Unterkörper von L (sogar Zwischenkörper: $L_0 \subseteq L' \subseteq L$). Sei $a \in L'$ und seien $\lambda_1, \lambda_2 \in \Lambda$ sodass $a \in L_{\lambda_1}$ und $a \in L_{\lambda_2}$ ist. Dann gilt:

$$\varphi_{\lambda_1}(a) = \varphi_{\lambda_2}(a)$$

Auswahlaxiom sagt: finde Abbildung $\eta : L' \rightarrow \Lambda$ sodass für alle $a \in L'$ $L_{\eta(a)} \ni a$.

Definiere dann:

$$\begin{aligned} \varphi' : L' &\rightarrow \bar{k} \\ a &\mapsto \varphi_{\eta(a)}(a) \end{aligned}$$

Das ist ein Körpermorphismus, der φ_0 fortsetzt. Also ist (L', φ') eine obere Schranke für die Kette.

Insgesamt sagt Zorns Lemma: Es gibt ein maximales Element $(L_{\max}, \varphi_{\max}) \in M$. Wir sind fertig, wenn wir zeigen: $L_{\max} = L$.

Angenommen es gibt $a \in L \setminus L_{\max}$.

Wir wissen: a ist algebraisch über L_{\max} , mit Minimalpolynom

$$f(x) = \sum \lambda_i x^i \in L_{\max}[x]$$

Wir wissen auch:

$$L_{\max}(a) \simeq L_{\max}[x]/(f)$$

Betrachte das Polynom

$$\bar{f} = \sum \varphi_{\max}(\lambda_i) \cdot x^i \in \text{Bild}(\varphi_{\max})[x] \subset \bar{k}[x]$$

Wir wissen: \bar{f} hat eine Nullstelle $\bar{a} \in \bar{k}$ und

$$\text{Bild}(\varphi_{\max})(\bar{a}) \simeq \text{Bild}(\varphi_{\max})[x]/(\bar{f}) \simeq L_{\max}[x]/(f) \simeq L_{\max}(a)$$

Insgesamt haben wir also einen Morphismus

$$L_{\max} \subsetneq L_{\max}(a) \xrightarrow{\varphi_{\max}} \text{Bild}(\varphi_{\eta(a)})(\bar{a}) \subseteq \bar{k}$$

Per Konstruktion ist $\varphi_{\max}|_{L_{\max}} = \varphi_{\max}$

Insgesamt: $(L_{\max}, \varphi_{\max}) \subsetneq (L_{\max}(a), \varphi_{\max})$, \nsubseteq zur Maximalität von $(L_{\max}, \varphi_{\max})$. □

Definition 3.8 (Polynomringe in ∞ vielen Variablen)

Sei $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ eine Menge von Variablennamen, sei R ein Ring. Dann betrachte:

$$R[(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}] = \bigcup_{\{x_{\lambda_1}, \dots, x_{\lambda_n}\} \text{ endl.}} R[x_{\lambda_1}, \dots, x_{\lambda_n}]$$

Bemerkung: Polynome enthalten immer nur endlich viele Terme und endlich viele Variablen!

Fakt: (universelle Eigenschaft) Gegeben sei ein Ringmorphismus $\varphi : R \rightarrow S$ und eine beliebige Abbildung: $\alpha : \Lambda \rightarrow S$. Dann gibt es genau einen Ringmorphismus $\Phi : R[(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}] \rightarrow S$ sodass $\Phi|_R = \varphi$

$$\exists \lambda \in \Lambda : \Phi(x_\lambda) = \alpha(\lambda)$$

Idee:

$$\Phi(x_{\lambda_1}^2 + x_{\lambda_2} + r \cdot x_{\lambda_3}^7 \cdot x_{\lambda_4}) = \alpha(\lambda_1)^2 + \alpha(\lambda_2) + \varphi(r) \cdot \alpha(\lambda_3)^7 \cdot \alpha(\lambda_4)$$

Satz 3.9 (Steinitz)

Sei k ein Körper. Dann existiert ein algebraischer Abschluss.

Beweis. (Mike Artin) Betrachte:

- $\Lambda = \{\text{nicht-konstante Polynome in } k[x]\}$
- Polynomring $k[(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}] =: P$
- Für jedes $f \in \Lambda$ das Element $f(x_f)$
- Das Ideal $I = (f(x_f) \mid f \in \Lambda)$

Behauptung 1: $I \subsetneq P$ d.h. $1 \notin I$

Beweis: Angenommen es wäre $1 \in I$. Dann können wir schreiben:

$$1 = \sum_{i=1}^n g_i \cdot f_i(x_{f_i})$$

für geeignete $f_1, \dots, f_n \in \Lambda, g_1, \dots, g_n \in P$. Das kann nicht sein!

Erinnerung: Es gibt eine Körpererweiterung k_1/k sodass f_1 eine Nullstelle $a_1 \in k_1$ hat.

Wiederholte Anwendung: Es gibt eine Körpererweiterung k'/k sodass für alle i gilt: f_i hat in k' eine Nullstelle $a_i \in k'$.

Universelle Eigenschaft: Es gibt Ringmorphismus $\Phi : P \rightarrow k'$ sodass für alle i gilt $x_{f_i} \mapsto a_i$.

Dann ist

$$\Phi(1_{k'}) = \Phi(1_P) = \sum_{i=1}^n \underbrace{\Phi(g_i)f_i(a_i)}_{=0} = 0$$

Widerspruch! Damit ist Behauptung 1 bewiesen.

Erinnerung: I ist vielleicht nicht maximal, aber Zorn sagt: Es gibt ein maximales Ideal $I \subseteq m \subsetneq P$.

Erinnerung: $E_1 := P/m$ ist ein Körper.

Wesentliche Eigenschaften dieses Körpers.

- 1) Haben Abbildung $k \rightarrow P \rightarrow E_1 = P/m, a \mapsto \text{konst. Pol. } a$. Diese Abbildung ist injektiv, deshalb Inklusion von Körpern. Fasse ab sofort k als Unterkörper von E_1 auf.
- 2) Die Polynome $f \in \Lambda$ haben Nullstellen in E_1 , nämlich $f(x_f) \in I \subset m$, also $f([x_f]) = 0$ in $E_1 = P/m$
- 3) Die Körpererweiterung E_1/k ist algebraisch. Sei $a \in E_1$ irgendein Element. Schreibe $a = [g]$, wobei $g \in P$ ein Polynom in den endlich vielen Variablen $x_{\lambda_1}, \dots, x_{\lambda_n}$ ist. Dann $a \in k([x_{\lambda_1}], \dots, [x_{\lambda_n}]) \subset E_1$.

Wir wissen aber: für alle i ist $[x_{\lambda_i}]$ Nullstelle des Polynoms $\lambda_i \in \Lambda$.

Beobachtung: Es ist nicht klar, dass E_1 ein algebraischer Abschluss von k ist.

Wir wissen: Polynome mit Koeffizienten in k haben in E_1 eine Nullstelle.

Wir wissen nicht: Polynome mit Koeffizienten in E_1 haben in E_1 eine Nullstelle.

Wir wiederholen diese Konstruktion und erhalten die Erweiterungen

$$k \subseteq E_1 \subseteq E_2 \subseteq \dots$$

sodass für alle $i \in \mathbb{N}$ jedes nicht-konstante Polynom in $E_i[x]$ eine Nullstelle in E_{i+1} hat und E_{i+1}/E_i algebraisch ist. Insbesondere ist E_i/k algebraisch.

Setze

$$E := \bigcup_i E_i$$

dann gilt:

- 1) Weil wir eine Kette haben, ist E ein Körper
- 2) Gegeben $a \in E$. Dann $\exists x : a \in E_i$, also ist a algebraisch über k . $\Rightarrow E/k$ ist algebraisch.
- 3) Sei $f \in E[x]$ ein Polynom, $f(x) = \sum_{j=1}^n e_j x^j$. Dann gibt es ein $i \in \mathbb{N} : \forall j : e_j \in E_i$. Das Polynom $f \in E_i[x]$ hat also eine Nullstelle in $E_{i+1} \subseteq E$.

□

Definition 3.10

Sei k ein Körper, f ein nicht konstantes Polynom, $f \in k[x]$. Eine Erweiterung L/k heißt Zerfällungskörper von f , falls gilt:

- 1) f zerfällt in $L[x]$ in ein Produkt von linearen Polynomen

$$f = \text{const} \cdot \prod (x - a_i) \in L[x]$$

- 2) $L = k(a_1, \dots, a_n)$

Wesentliches Problem: Gegeben k und f , finde ein L .

Satz 3.11

Sei k ein Körper, dann gilt:

- 1) Jedes nicht-konstante f hat einen Zerfällungskörper
- 2) Gegeben f , dann sind je zwei Zerfällungskörper von f isomorph
- 3) Gegeben f und ein Zerfällungskörper L , dann ist

$$[L : k] \leq (\deg f)!$$

Beweis. 1) Sei f gegeben. Seien $a_1, \dots, a_n \in \bar{k}$ die Nullstellen, dann setze $L = k(a_1, \dots, a_n) \subseteq \bar{k}$.

2) Sei f gegeben. Wähle L wie in Schritt 1), sei L' ein weiterer Zerfällungskörper, seien $\bar{a}'_1, \dots, \bar{a}'_n$ die Nullstellen von f in L' .

Wir wissen: L'/k ist algebraisch. Nach universeller Eigenschaft haben wir einen k -Morphismus

$$\varphi : L' \rightarrow \bar{k} \supseteq L$$

Banale Beobachtung: Die Abbildung φ bildet Nullstellen von f auf Nullstellen von f in \bar{k} ab. Sei $a_i \in L$ eine Nullstelle. Dann schreibe $f(x) = \sum f_i \cdot x^i$, wobei $f_i \in k$. Dann ist

$$0_{\bar{k}} = \varphi(f(a)) = \varphi\left(\sum f_i \cdot a^i\right) = \sum \varphi(f_i) \cdot \varphi(a)^i = \sum f_i \varphi(a)^i = f(\varphi(a))$$

Also: $\forall i : \varphi(a'_i) = a_j$ für geeignetes j .

$$\Rightarrow \text{Bild}(\varphi) = \varphi(k(a'_1, \dots, a'_n)) \subseteq \underbrace{k(a_1, \dots, a_n)}_{=L} \subseteq \bar{k}$$

Andererseits: $\text{Bild}(\varphi)$ ist ein Zerfällungskörper, enthält alle n Nullstellen $\Rightarrow \text{Bild}(\varphi) = L$.

$\Rightarrow \varphi$ ist Isomorphismus

3) Sei f gegeben, seien $a_1, \dots, a_n \in L$ die Nullstellen. Dann ist $L = k(a_1, \dots, a_n)$ und wir haben eine Kette

$$k \subseteq k(a_1) \subseteq k(a_1, a_2) \subseteq \dots$$

Dann:

- f ist Polynom in k , das a_1 als Nullstelle hat

$$[k(a_1) : k] \leq \deg f$$

- $f/(x - a_1)$ ist Polynom in $k(a_1)$, das a_2 als Nullstelle hat

$$[k(a_1, a_2) : k(a_1)] \leq n - 1$$

- Wiederholte Anwendung liefert:

$$[L : k] \leq n!$$

□

Beispiel 3.12

$k = \mathbb{Q}$, $f = x^2 - 2$.

Dann ist $L = \mathbb{Q}(-\sqrt{2}, \sqrt{2})$ der Zerfällungskörper und

$$[\mathbb{Q}(\sqrt{2}) : \mathbb{Q}] = 2$$

sowie

$$[\mathbb{Q}(\sqrt{2}, -\sqrt{2}) : \mathbb{Q}(\sqrt{2})] = 1$$

$\Rightarrow \deg[L : \mathbb{Q}] = 2$.

Beispiel 3.13

$k = \mathbb{Q}$, $f = x^3 - 2$. Dann:

$$L = \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}, \xi \sqrt[3]{2}, \xi^2 \sqrt[3]{2})$$

wobei $\xi = e^{\frac{2\pi i}{3}}$, und

$$[\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}) : \mathbb{Q}] = 3$$

und

$$[\mathbb{Q}(\xi \cdot \sqrt[3]{2}, \sqrt[3]{2}) : \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})] = 2$$

weil $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}) \subset \mathbb{R}$, $\xi \notin \mathbb{R}$

$$\Rightarrow [L : \mathbb{Q}] = 6$$

Nächstes Ziel: Zerfällungskörper verstehen. Dazu Nullstellenmengen von (irreduziblen) Polynomen verstehen.

Dazu Sprache: Sei $S \supseteq R$ eine Erweiterung von Ringen und sei $(a_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ eine Familie von Elementen aus S . Betrachte dann:

$$\bigcap_{\substack{\text{Zwischenringe } R \subseteq A \subseteq S \\ \forall \lambda \in \Lambda, a_\lambda \in A}} A = R[(a_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}]$$

Fakt:

- $R[(a_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}]$ ist ein Unterring von S , der alle a_λ enthält.
- $R[(a_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}]$ ist der kleinste Unterring von S der alle $(a_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ enthält.
- Sei $\varphi : R[(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}] \rightarrow S$ die eindeutige Abbildung, die $\forall \lambda$ x_λ auf a_λ abbildet. Dann ist $R[(a_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}] = \text{Bild}(\varphi)$

Auf Deutsch: Elemente von $R[(a_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}]$ sehen aus wie Polynome in a_λ .

$$r_1 a_{\lambda_1}^7 a_{\lambda_2} + r_2 a_{\lambda_3}^8 \cdot a_{\lambda_4} \cdot a_{\lambda_1}$$

Spezialfall: Die Ringe R, S sind Körper. Gegeben also eine Körpererweiterung L/k und Familie von Elementen aus L , $A := (a_\lambda)_{\lambda \in \Lambda} \subseteq L$. Dann haben wir Ringe/Körper

$$k \subseteq k[A] \xrightarrow{i} k(A) \subseteq L$$

und wir haben $k[A] \hookrightarrow Q(k[A])$. Zudem erhalten wir genau ein $\eta : Q(k[A]) \rightarrow k(A)$ wobei η durch die universelle Eigenschaft des Quotientenkörpers gegeben ist.

Klar: $\text{Bild}(\eta)$ ist Unterkörper von $k(A)$, der $k[A]$ enthält $\Rightarrow \text{Bild}(\eta) = k(A)$. Also η ist isomorph.

Satz 3.14

Situation wie oben. Dann

$$k(A) \cong Q(k(A))$$

mit kanonischer Isomorphie.

Beispiel 3.15

$k = \mathbb{R}$, $L = \mathbb{C} = \mathbb{R}(i)$

Wir wissen: jede komplexe Zahl können wir schreiben als $r_1 + ir_2$, also $\mathbb{R}[i] = \mathbb{R}(i) = \mathbb{C}$.

Allgemein: Sei L/k eine Körpererweiterung, sei $a \in L$ algebraisch über k . Dann können wir alle Elemente von $k(a)$ schreiben als $k_0 + k_1 \cdot a + k_2 a^2 + \dots + k_{n-1} a^{n-1}$, wobei $n = [a : k]$. Also $k(a) = k[a]$.

Beispiel 3.16

L/k Körpererweiterung, $a \in L$ sei transzendent über k . Dann haben wir eine Abbildung

$$\varphi : k[x] \rightarrow k[a] \subseteq k(a), \quad f(x) \mapsto f(a)$$

Per Definition ist φ surjektiv. Per Annahme a transzendent ist φ injektiv. $\Rightarrow k[a] \cong k[x]$. Insbesondere ist $k[a]$ kein Körper, also $\neq k(a)$. Induktiv beweist man:

Satz 3.17

Sei L/k eine Körpererweiterung, seien $a_1, \dots, a_n \in L$ endlich viele Elemente, dann sind äquivalent

- 1) *alle a_i sind algebraisch*
- 2) $k[a_1, \dots, a_n] = k(a_1, \dots, a_n)$

Bemerkung: Achtung: für ∞ viele Elemente ist das falsch! z.B. sei L/k beliebig, $A = L$. Dann ist $k[A] = k(A)$.

3.3 Separable und Inseparable Körpererweiterungen

Frage: Sei L/k Erweiterung, $a \in L$ sei algebraisch über k und $f \in k[x]$ das Minimalpolynom. Kann f mehrfache Nullstellen in L haben?

Teilantwort: Wenn $k = \mathbb{Q}$ ist, geht das nicht! Denn wenn f die Zahl $a \in L$ als mehrfache Nullstelle hat, dann $f'(a) = 0$. \nmid zur Annahme f Minimalpolynom.

Ziel: Argument erweitern zu beliebigen Körpern

Definition 3.18

Sei k ein Körper, $f \in k[x]$ ein Polynom. Dann schreibe

$$f(x) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot x^i$$

und setze

$$f'(x) = \sum_{i=1}^n \underline{i} \cdot a_i \cdot x^{i-1}$$

wobei $\underline{i} = \underbrace{1 + \dots + 1}_{i\text{-mal}} \in k$

Satz 3.19

Alle bekannten Ableitungsregeln gelten.

Zurück zur Frage: Wenn k ein beliebiger Körper der Charakteristik 0 ist, und a eine mehrfache Nullstelle von f ist (d.h. in $L[x]$), können wir schreiben:

$$f = (x - a)(x - a) \cdot \text{rest}$$

Dann sagt die Ketten-/Produkt-Regel dass f' das Element a immer noch als Nullstelle hat, wegen $\text{char}(k) = 0$ und $f' \neq 0$. Also \nmid wie oben.

Bemerkung: In $\text{char}(k) = p > 0$ ist immer noch wahr, dass $f'(a) = 0$ ist, aber es könnte sein, dass $f' \equiv 0$.

Definition 3.20

Ein irreduzibles Polynom f heißt separabel, wenn f in \bar{k} keine mehrfache Nullstelle hat. Ein beliebiges Polynom f ist separabel, wenn alle irreduziblen Faktoren separabel sind. Ansonsten nenne f inseparabel.

Bemerkung: Falls $\text{char}(k) = 0$, sind alle Polynome separabel.

Bemerkung: (Nicht-irreduzible) separable Polynome können mehrfache Nullstellen haben.

Konstruktion mit Frobenius-Morphismus: Sei R ein Ring ein Ringmorphismus $R \rightarrow S$. Dieser induziert einen Ringmorphismus $R[x] \rightarrow S[x]$. Für $S = R$ und den Frobenius-Morphismus erhalten wir den Ringmorphismus

$$\eta : R[x] \rightarrow R[x], \quad \sum a_i x^i \mapsto \sum a_i^p x^i$$

Falls R Integritätsring ist, ist η injektiv.

$\text{Bild}(\eta) = (R^p)[x] \subseteq R[x]$ und die Abbildung $\eta : R[x] \rightarrow R^p[x]$ ist ein Isomorphismus.

Satz 3.21 (Charakterisierung inseparabler Polynome)

Sei k ein Körper, sei $f \in k[x]$ irreduzibel. Dann sind äquivalent

1) f ist inseparabel

2) $f' \equiv 0$

3) $p = \text{char}(k)$ ist eine Primzahl. Es gibt ein irreduzibles separables $g \in k[x]$ und $n \in \mathbb{N}$ sodass $f(x) = g(x^{p^n}) = g((x^p)^n)$.

Beweis. 1) \Rightarrow 2): Sei f inseparabel, d.h. f hat in \bar{k} eine mehrfache Nullstelle a , dann ist auch $f'(a) = 0$. Widerspruch zur Irreduzibilität falls $f \not\equiv 0$. Also $f' \equiv 0$.

2) \Rightarrow 3): Sei $f(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i$. Dann:

$$f'(x) = \sum_{i=1}^n a_i \cdot i \cdot x^{i-1}$$

wobei i hier $\varphi(i) = \underbrace{1 + \dots + 1}_{i\text{-mal}}$.

Falls $\text{char}(k) = 0$ wäre, dann wäre $\forall i$ mit $a_i \neq 0$ auch $i \cdot a_i \neq 0$, also $f'(x) \not\equiv 0$. Somit ist $\text{char}(k) = p > 0$. Die Zahl p ist prim weil k ein Körper ist.

Beobachtung: Falls i kein Vielfaches von p ist, dann $\varphi(i) \neq 0$. Es ist aber $a_i \cdot \varphi(i) = 0 \Rightarrow a_i = 0$ für alle i , die kein Vielfaches von p sind. Also

$$f(x) = \sum_{j=0}^{n/p} a_{j \cdot p} x^{j \cdot p}$$

Setze $g_1(x) = \sum_{j=0}^{n/p} a_{j \cdot p} x^j$. Dann $f(x) = g_1(x^p)$.

Idee: Falls g_1 inseparabel ist, wiederhole Prozedur, finde $g_2(x)$ sodass $g_1(x) = g_2(x^p)$ ($\Rightarrow f(x) = g_2(x^{2p})$). Weil der Grad der Polynome dabei sinkt, endet diese Prozedur nach endlich vielen Schritten, finde $g = g_n$ sodass $f(x) = g(x^{n \cdot p})$ und g separabel ist.

Damit das funktioniert, müssen wir zeigen, dass g_1 irreduzibel ist (per Induktion sind dann auch $g_2, \dots, g_n = g$ irreduzibel).

Erinnerung: hatten Morphismen

$$\varphi_1 : k[x] \rightarrow (k^p)[x], \quad \sum h_i \cdot x^i \mapsto \sum h_i^p \cdot x_i$$

$$\mathcal{F} : k[x] \rightarrow (k^p)[x^p] \subseteq (k^n)[x] \subseteq k[x], \quad \sum h_i \cdot x^i \mapsto \sum h_i^p \cdot x^{i \cdot p}$$

3 Körpertheorie

Nachrechnen: es ist $\varphi(f) \in (k^p)[x^p]$ weil $f \in k[x^p]$ und $g = \mathcal{F}^{-1}(\varphi(f))$. Da φ, \mathcal{F} Isomorphismen sind folgt aus f irreduzibel g_1 irreduzibel.

3) \Rightarrow 1): Angenommen f hat folgende Eigenschaft: $\exists g(x) \in k[x] : f(x) = g(x^p)$. Sei $a \in \bar{k}$ eine Nullstelle von g , d.h. $g(x) = (x - a) \cdot \text{rest}$ in $\bar{k}[x]$. Wähle $b \in \bar{k}$ mit $b^p = a$ (das geht, weil \bar{k} algebraisch abgeschlossen ist). Dann

$$g(x^p) = (x^p - b^p) \cdot \text{rest} = (x - b)^p \cdot \text{rest}$$

$\Rightarrow b \in \bar{k}$ ist p -fache Nullstelle von f , also f inseparabel. □

Warum diese Diskussion von Inseparabilität? Antwort kommt jetzt!

Lemma 3.22

Sei L/k eine Körpererweiterung und $a \in L$, sei algebraisch über k . Setze $M = k(a)$. Sei $f(x) \in k[x]$ das Minimalpolynom von a . Angenommen f hat exakt m unterschiedliche Nullstellen in \bar{k} . Dann gibt es genau m unterschiedliche k -Morphismen

$$\varphi : M \rightarrow \bar{k}$$

Bemerkung: Falls f separabel ist, $m = \deg f$. Falls f inseparabel ist, ist $m < \deg f$.

Beweis. Beobachtung 1: Wir wissen schon: Die Elemente von M können wir schreiben als

$$\lambda_0 + \lambda_1 a + \lambda_2 a^2 + \cdots + \lambda_{n-1} a^{n-1}$$

mit $\lambda_i \in k$ wobei $n = \deg f$. Insbesondere ist für alle solche Elemente

$$\varphi(\lambda_0 + \lambda_1 a + \cdots + \lambda_{n-1} a^{n-1}) = \sum \lambda_i \varphi(a)^i$$

Das bedeutet: φ ist durch $\varphi(a)$ eindeutig festgelegt!

Beobachtung 2: Gegeben einen k -Morphismus φ , dann ist $\varphi(a)$ eine Nullstelle des Polynoms $f(x) \in k[x]$, wir haben aber nur m unterschiedliche Nullstellen!

Insgesamt also höchstens m unterschiedliche Morphismen!

Noch zu zeigen: Wenn $b \in \bar{k}$ eine Nullstelle von f ist, dann existiert ein k -Morphismus $\varphi : M \rightarrow \bar{k}$ sodass $\varphi(a) = b$ ist.

Erinnerung: Wir wissen $M \simeq k[x]/(f)$, wobei a mit $[x]$ identifiziert wird.

Haben Morphismus:

$$\Omega : k[x] \rightarrow \bar{k}, \quad g \mapsto g(b)$$

Dann $f \in \text{Ker}(\Omega)$, der Kern ist ein Hauptideal und f irreduzibel, also: $(f) = \text{ker}(\Omega)$. Also erhalte (nach universeller Eigenschaft) einen Morphismus $k[x]/(f) \rightarrow \bar{k}$ wobei $[x] \mapsto b$.

Erhalte $M \rightarrow \bar{k}$ durch Komposition der Morphismen.

Varianten mit völlig analogem Beweis

Lemma 3.23

Sei L/k eine Körpererweiterung. $a \in L$ algebraisch mit Minimalpolynom $f \in k[x]$. f hat m unterschiedliche Nullstellen in L . Dann gibt es genau m unterschiedliche k -Morphismen $\varphi : M \rightarrow L$, wobei $M = k(a)$ ist.

Lemma 3.24

Seien L_1 und L_2 Körper und $\sigma : L_1 \rightarrow L_2$ Körpermorphismen. $a \in L_2$ sei algebraisch über $\text{Bild}(\sigma)$ mit Minimalpolynom f . Angenommen f hat m unterschiedliche Nullstellen in L_2 . Dann gibt es genau m unterschiedliche Fortsetzungen von σ zu Morphismen $\Sigma : M \rightarrow L_2$, wobei $M \supseteq L$, der Körper $\sigma(L_1)(a)$.

□

Spezialfall: $M = \bar{k}$. Dann hat f (mit Vielfachheit) genau $n = \deg f$ Nullstellen. Beachte f separabel $\Leftrightarrow n$ unterschiedliche Nullstellen $\Leftrightarrow n$ unterschiedliche Fortsetzungen von φ zu $k(a)$.

Definition 3.25

Sei L/k Körpererweiterung. Nenne algebraisches $a \in L$ separabel, wenn das zugehörige Minimalpolynom separabel ist. Nenne L/k separabel, falls alle $a \in L$ algebraisch und separabel über k sind. Nenne L/k inseparabel falls algebraisches $a \in L$ existiert, das nicht separabel über k ist.

Satz 3.26

Sei L/k eine endliche Körpererweiterung und $n := [L : k]$. Dann gilt:

- 1) Es gibt höchstens n k -Morphismen $L \rightarrow \bar{k}$
- 2) L/k ist genau dann separabel, wenn es exakt n solche Morphismen gibt

Beweis. Vorbereitung: Wegen der Endlichkeit, finde $a_1, \dots, a_l \in L$ sodass $L = k(a_1, \dots, a_l)$. Betrachte Kette von Erweiterungen

$$k \subseteq k(a_1) \subseteq k(a_1, a_2) \subseteq \dots \subseteq k(a_1, \dots, a_l) = L$$

Sei $k_0 = k$ und $k_l = k_{l-1}(a_l)$.

1) *Erinnerung:* es gibt höchstens $[a_1 : k_0]$ viele unterschiedliche k -Morphismen $\sigma_1 : k_1 \rightarrow \overline{k}$.

Erinnerung: Gegeben $\sigma_1 : k_1 \rightarrow \overline{k}$, dann gibt es maximal $[a_2 : k_1]$ viele Fortsetzungen von σ_1 zu Morphismen $\sigma_2 : k_2 \rightarrow \overline{k}$.

Erinnerung: Gegeben $\sigma_i : k_i \rightarrow \overline{k}$, dann gibt es höchstens $[a_{i+1} : k_i]$ viele Fortsetzungen von σ_i zu $\sigma_{i+1} : k_{i+1} \rightarrow \overline{k}$.

Insgesamt: Maximal

$$[a_1 : k_0] \cdot [a_2 : k_1] \cdot \dots \cdot [a_l : k_{l-1}] = [L : k]$$

viele Fortsetzungen von $Id_k : k \rightarrow \overline{k}$ zu Morphismen $L \rightarrow \overline{k}$.

2) Angenommen L/k ist separabel. Wir wissen: die maximale Zahl von Erweiterungen existiert, falls für alle i gilt a_{i+1} ist separabel über k_i . Per Annahme: a_{i+1} ist separabel über k .

Aber: $f_{k_i} \mid f_k$ also klar, dass f_{k_i} keine mehrfachen Nullstellen hat.

b) \Leftarrow Angenommen L/k nicht separabel. Wir können die a_i so wählen, dass bereits a_1/k nicht separabel ist.

\Rightarrow wir haben weniger als $[a_1 : k_0]$ viele k -Morphismen $\sigma_i : k_1 \rightarrow \overline{k}$.

\Rightarrow wir haben insgesamt weniger als $[L : k]$ viele k -Morphismen $\sigma_l : L \rightarrow \overline{k}$. \square

Folgerung 3.27

Sei L/k endlich. $n = [L : k]$. Sei M/k algebraisch. Dann gibt es höchstens n unterschiedliche k -Morphismen $L \rightarrow M$.

Beweis. Bette M in \overline{k} ein. Dann liefert jeder k -Morphismus $L \rightarrow M$ automatisch einen k -Morphismus $L \rightarrow \overline{k}$. \square

Folgerung 3.28

Sei L/k endlich. $L = k(a_1, \dots, a_l)$. Falls für alle i gilt, dass a_{i+1} separabel über $k(a_1, \dots, a_i)$ ist, dann gibt es genau $[L : k]$ -viele k -Morphismen $L \rightarrow \overline{k}$.

Folgerung 3.29

Sei L/K eine Körpererweiterung. Seien $a_1, \dots, a_n \in L$. Wenn a_{i+1} separabel über $K(a_1, \dots, a_i)$ ist, dann ist $K(a_1, \dots, a_n)$ eine separable Erweiterung von K .

Folgerung 3.30

Sei $k \subseteq L \subseteq M$ eine Kette von Körpererweiterungen sodass L/k und M/L jeweils separabel sind, dann ist M/k separabel.

Beweis. Sei $m \in M$ gegeben. Betrachte das Minimalpolynom $f_L(x) \in L[x]$ von m . Schreibe $f_L(x) = \sum_{i=1}^n a_i x^i$, wobei $a_i \in L$ geeignete Koeffizienten sind.

Betrachte den Zwischenkörper

$$L' = k(a_0, \dots, a_{n-1})$$

und schreibe

$$L'' = k(a_0, \dots, a_{n-1}, m)$$

Wir wenden die letzte Folgerung auf L'' an, somit erhalten wir mit dem vorherigen Satz, dass L''/k separabel ist. Also ist m/k separabel. \square

Folgerung 3.31

Sei L/k eine Körpererweiterung. Sei

$$L_{\text{Sep}} = \{l \in L \mid l \text{ ist separabel über } k\}$$

Dann ist L_{Sep} ein Unterkörper von L .

Notation: Nenne L_{Sep} den separablen Abschluss (separable Hülle) von k in L ist.

Beweis. Gegeben $a, b \in L_{\text{Sep}}$, müssen zeigen dass $a + b, a \cdot b, a - b$ und gegebenenfalls a/b in L_{Sep} liegen.

Wissen: all diese Elemente liegen in $k(a, b)$, das nach obiger Folgerung separabel ist. \square

Notation: Sei L/k Körpererweiterung. Nenne $[L_{\text{Sep}} : k]$ den Sepearabilitätsgrad von L/k .

Definition 3.32

Nenne Körper k vollkommen, falls jede algebraische Körpererweiterung automatisch separabel ist.

Bemerkung: Trivial: Körper der $\text{char} = 0$ und algebraisch abgeschlossene Körper sind vollkommen.

Satz 3.33

Sei k ein Körper mit positiver Charakteristik. Dann ist äquivalent:

- 1) k ist vollkommen
- 2) Der Frobenius-Morphismus $F : k \rightarrow k$ ist surjektiv

Beweis. 1) \Rightarrow 2) Beweis der Kontraposition: Sei F nicht surjektiv. Sei also $k \in k \setminus k^p$. Sei $b \in \bar{k}$ sodass $b^p = a$. (Erinnerung $F : \bar{k} \rightarrow \bar{k}$ ist injektiv, das heißt b ist eindeutig).

Betrachte die Erweiterung $k(b)/k$. Das Minimalpolynom von b ist Teiler von $x^p - a$ (das hat lediglich b als Nullstelle), hat also nur eine Nullstelle, nämlich b .

2) \Rightarrow 1) Angenommen F wäre surjektiv, $k = k^p$. Angenommen k wäre nicht vollkommen, dann gäbe es ein inseparables, irreduzibles Polynom $f(x) \in k[x]$.

Erinnerung: Es gibt $g \in k[x]$ sodass $f(x) = g(x^p)$. Schreibe $g(x) = \sum_{i=0}^n g_i \cdot x^i$.

Per Annahme $\forall i \exists h_i \in k$ mit $g_i = (h_i)^p$. Also

$$\begin{aligned} g(x) &= \sum (h_i)^p x^i \\ g(x^p) &= \sum (h_i x^i)^p = \left(\sum h_i x^i \right)^p \end{aligned}$$

also ist $\sum h_i x^i$ ein echter Teiler von $f(x)$ in $k[x]$. \nrightarrow zur Irreduzibilität von f . \square

3.4 Galoissche Körpererweiterungen

Definition 3.34

Sei L/k eine Körpererweiterung. Betrachte die Menge

$$\text{Gal}(L/k) = \{k\text{-Morphismen } L \rightarrow L \text{ die surjektiv, also isomorph sind}\}$$

Beobachtung: $\text{Gal}(L/k)$ ist eine Gruppe mit Einheit Id_L und der Hintereinanderausführung als Gruppenverknüpfung. Die Inversen sind die Umkehrabbildungen.

Diese Gruppe heißt Galoisgruppe

Variante: Sei k ein Körper, $f \in k[x]$ ein Polynom, L der Zerfällungskörper. Dann bezeichne $\text{Gal}(L/k)$ auch als $\text{Gal}(f)$ (Galoisgruppe von f).

Zentrale Beobachtung: Falls L/k endlich ist dann ist $\text{Gal}(L/k)$ endlich und $\# \text{Gal}(L/k) \leq [L : k]$.

Analog

$$\# \text{Gal}(f) \leq [\text{Zerfällungskörper von } f : k] \leq (\deg f)!$$

Beispiel 3.35 1) $k = \mathbb{Q}, L = \mathbb{Q}(\sqrt{2})$ Wissen: die Elemente von L schreiben sich als $a + b\sqrt{2}$ mit $a, b \in \mathbb{Q}$.

3 Körpertheorie

Die Elemente der Galoisgruppe sind durch die Bilder von $\sqrt{2}$ festgelegt, und $\sqrt{2}$ kann nur auf andere Nullstellen von $x^2 - 2$ abgebildet werden. Es gibt aber nur eine andere Nullstelle, nämlich $-\sqrt{2}$.

$$\Rightarrow \text{Gal}(L/k) = \{Id, a + b\sqrt{2} \mapsto a - b\sqrt{2}\} \simeq (\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}, +)$$

2) Analog $\text{Gal}(\mathbb{C}/\mathbb{R}) = \{Id_{\mathbb{C}}, \text{Konjugation}\}$

3) $k = \mathbb{Q}, L = \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})$ Wieder: Elemente der Galoisgruppe sind durch das Bild von $\sqrt[3]{2}$ bestimmt und als Bilder kommen nur die Nullstellen von $x^3 - 2$ in Frage. In L ist $\sqrt[3]{2}$ aber die einzige Nullstelle.

$$\Rightarrow \text{Gal}(L/\mathbb{Q}) = \{Id_L\}$$

4) Sei k ein endlicher Körper, sei \mathbb{F}_p der Primkörper von k . Betrachte k/\mathbb{F}_p . Betrachte den Frobenius-Morphismus $F : k \rightarrow k$.

Beobachtung:

$$\begin{aligned} F(1) &= 1^p = 1 \\ F(1+1) &= 1+1 \\ &\vdots \\ F(1+\dots+1) &= 1+\dots+1 \end{aligned}$$

Das heißt für alle $a \in \mathbb{F}_p$ gilt $F(a) = a$.

Beobachte auch: Die $a \in k$, für die $F(a) = a$ gilt, sind exakt die Nullstellen des Polynoms $x^p - x$. Dieses Polynom hat höchstens p Nullstellen. Also für alle $a \in k$ gilt $F(a) = a \Leftrightarrow a \in \mathbb{F}_p$.

Insgesamt: Der Frobenius-Morphismus ist ein \mathbb{F}_p -Automorphismus von k . $F \in \text{Gal}(k/\mathbb{F}_p)$.

Fakt: Die Galoisgruppe ist von F erzeugt, d.h. alle Elemente sind von der Form

- Id_k
- $\underbrace{F \circ \dots \circ F}_{n\text{-mal}}$
- $\underbrace{F^{-1} \circ \dots \circ F^{-1}}_{n\text{-mal}}$

Ziel: Die Galois-Gruppe ausrechnen!

Falls L/k algebraisch:

Beobachtung: Wir können stets L in \bar{k} einbetten. Jedes $\sigma \in \text{Gal}(L/k)$ ist dann automatisch ein Morphismus

$$L \rightarrow L \subseteq \bar{k}$$

Falls L/k endlich ist, wissen wir: Es existieren höchstens $[L : k]$ viele k -Morphismen $L \rightarrow \bar{k}$. Also

$$\# \text{Gal}(L/k) \leq [L : k]$$

Frage: Haben wir Gleichheit?

Antwort: Im Allgemeinen nein!

- Falls L/k inseparabel ist, dann weniger als $[L : k]$ viele k -Morphismen $L \rightarrow \bar{k}$.
- Es kann passieren, dass für gegebenes $\sigma : L \rightarrow \bar{k}$, $\text{Bild}(\sigma) \neq L$ ist. \Rightarrow dieses σ liefert kein Element von $\text{Gal}(L/k)$.

Definition 3.36

Sei L/k eine Körpererweiterung. Nenne L/k normal, wenn L/k algebraisch ist und wenn jedes irreduzible Polynom $f \in k[x] \setminus \{0\}$, das in L überhaupt eine Nullstelle hat, bereits über L in Linearfaktoren zerfällt.

Beispiel 3.37 • \mathbb{C}/\mathbb{R} ist normal

- $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})/\mathbb{Q}$ ist nicht normal, denn $x^3 - 2$ hat Nullstelle, zerfällt aber nicht.
- \bar{k}/k ist immer normal
- Werden gleich sehen: Zerfällungskörper sind normal!

Satz 3.38

Sei L/k eine algebraische Körpererweiterung. Dann sind folgende Aussagen äquivalent:

- 1) L/k ist normal
- 2) Es gibt eine Familie $(f_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ von Polynomen in $k[x]$, sodass L durch Adjunktion sämtlicher Nullstellen der f_λ in \bar{L} aus k entsteht.
- 3) Jeder k -Morphismus $\sigma : L \rightarrow \bar{L}$ hat $\text{Bild}(\sigma) = L$

Beweis. L/k ist algebraisch. Wir betrachten L daher als Unterkörper von \bar{k} .

1) \Rightarrow 2) : Finde Elemente $(a_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ von L , sodass $L = k(a_\lambda \mid \lambda \in \Lambda)$. Die a_λ sind algebraisch über k und haben Minimalpolynome f_λ . Jedes der f_λ hat eine Nullstelle in L (nämlich a_λ), zerfällt also über L (da L/k normal). Sei jetzt $(b_\mu)_{\mu \in M}$ die Familie der Nullstellen aller f_λ . Per Annahme: alle $b_\mu \in L$ und $L = k(b_\mu \mid \mu \in M)$, da $L \subseteq \{b_\mu \mid \mu \in M\} \supseteq \{a_\lambda \mid \lambda \in \Lambda\}$.

2) \Rightarrow 3) : Sei L wie in 2) gegeben. Das heißt es gibt Familie $(f_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ von Polynomen, sodass $L = k(b_\mu \mid \mu \in M)$ wobei $(b_\mu)_{\mu \in M}$ die Familie der Nullstellen der f_λ in \bar{k} ist. Weiter sei ein k -Morphismus $\sigma : L \rightarrow \bar{k}$ gegeben. Wir müssen zeigen: $\text{Bild}(\sigma) = L$.

Schritt 1: Zeige: $\text{Bild}(\sigma) \subseteq L$. Da $L = k(b_\mu \mid \mu \in M)$ ist, genügt es zu zeigen dass für alle μ $\sigma(b_\mu) \in L$. Sei μ gegeben, per Definition finden wir ein λ sodass $f_\lambda(b_\mu) = 0$. Erinnerung: σ ist ein k -Morphismus und $f_\lambda \in k[x]$. Das bedeutet $\sigma(b_\mu)$ ist wieder eine Nullstelle von f_λ . Also $\sigma(b_\mu) \in L$.

Schritt 2: Zeige: $\text{Bild}(\sigma) \supseteq L$. Es genügt zu zeigen: Für alle μ gilt $b_\mu \in \text{Bild}(\sigma)$. Sei also ein μ gegeben. Wieder finde λ sodass $f_\lambda(b_\mu) = 0$. Das f_λ hat weitere Nullstellen $b_\mu, b_{\mu_1}, \dots, b_{\mu_d}$ wobei $d = \deg(f_\lambda) - 1$. Wir wissen: σ bildet die d Nullstellen $b_\mu, b_{\mu_1}, \dots, b_{\mu_d}$ injektiv auf die Nullstellen von f_λ ab. $\Rightarrow \sigma(b_\mu) = b_\mu$, oder es gibt $1 \leq i \leq d$ sodass $\sigma(b_{\mu_i}) = b_\mu$.

3) \Rightarrow 1) : Wir Müssen zeigen: jedes irreduzible $f \in k[x]$, das in L eine Nullstelle hat, zerfällt über L in Linearfaktoren. Sei also $f \in k[x]$ wie oben gegeben, sei $a \in L$ eine Nullstelle von f , sei $b \in \bar{k}$ eine weitere Nullstelle. Wir müssen zeigen: $b \in L$. Wir wissen: es gibt k -Isomorphismen

$$k(a) \longleftarrow k[x]/(f) \longrightarrow k(b)$$

sodass für die Komposition φ gilt $\varphi(a) = b$. Insgesamt haben wir

$$L \supseteq k(a) \xrightarrow{\varphi} k(b) \subseteq \bar{k}$$

Universelle Eigenschaft von \bar{k} . Wir können Morphismus φ fortsetzen zu $\sigma : L \rightarrow \bar{k}$. Per Annahme: $\text{Bild}(\sigma) = L$, aber $b \in \text{Bild}(\sigma)$. \square

Folgerung 3.39

Sei L/k endlich. Dann ist äquivalent:

- 1) L/k ist normal
- 2) L ist Zerfällungskörper eines einzigen Polynoms

Beweis. 2) \Rightarrow 1) : folgt aus dem Satz

3 Körpertheorie

1) \Rightarrow 2) : L/k ist endlich, also gibt es $a_1, \dots, a_n \in L$ sodass $L = k(a_1, \dots, a_n)$. Seien f_1, \dots, f_n die Minimalpolynome. Behauptung: L ist Zerfällungskörper von $f = f_1 \cdot \dots \cdot f_n$.

Seien $(b_\mu)_{\mu \in M}$ die Nullstellen von f . Weil L/k normal ist, folgt

$$L = k(a_1, \dots, a_n) = k(b_\mu \mid \mu \in M)$$

Also ist L der Zerfällungskörper. □

Folgerung 3.40

Sei L/k eine algebraische Körpererweiterung. Dann gibt es einen Oberkörper $k \subseteq L \subseteq N \subseteq \bar{k}$ sodass gilt

1) N/k ist normal

2) Wenn wir einen Zwischenkörper habe

$$k \subseteq L \subseteq N' \subseteq N$$

sodass N'/k normal ist $\Rightarrow N = N'$

Wenn \tilde{N} ein weiterer Oberkörper ist mit Eigenschaften 1) und 2) $\Rightarrow \tilde{N}$ und N sind k -Isomorph.

Nenne N/k die normale Hülle von L/k .

Beweis. Schreibe $L = k(a_\lambda \mid \lambda \in \Lambda)$. Seien f_λ die Minimalpolynome der a_λ . Sei $(b_\mu)_{\mu \in M}$ die Familie aller Nullstellen. Setze $N := k(b_\mu \mid \mu \in M)$. Mit Satz folgt N ist normal.

Sei N' ein Zwischenkörper. Um zu zeigen $N = N'$ müssen wir zeigen: alle $b_\mu \in N'$. Sei also μ gegeben, wähle λ sodass $f_\lambda(b_\mu) = 0$. Dann f_λ hat Nullstelle in N' (nämlich a_λ) also zerfällt f_λ über N' , das heißt $b_\mu \in N' \Rightarrow N = N'$

Sei jetzt \tilde{N} gegeben. Finde Einbettung $\sigma : \tilde{N} \rightarrow \bar{k}$. Es ist $\tilde{N} \simeq \text{Bild}(\sigma)$. Also genügt es, den Fall zu betrachten, wo $\tilde{N} \subseteq \bar{k}$ und für jedes solche \tilde{N} zu zeigen: $N = \tilde{N}$.

Beobachte: $N \cap \tilde{N}$ ist ein Oberkörper von L , der wieder normal ist.

Also haben wir

$$k \subseteq L \subseteq N' \subseteq N$$

Da $N' = N \cap \tilde{N}$ folgt $N' = N$ daraus folgt $N \subseteq \tilde{N}$.

Die andere Inklusion $N \supseteq \tilde{N}$ folgt analog. □

Satz 3.41

Sei L/K eine endliche Körpererweiterung. Dann sind folgende Aussagen äquivalent

- 1) L/K ist normal und separabel
- 2) L ist Zerfällungskörper eines separablen Polynoms $f \in K[x]$
- 3) $|\text{Gal}(L/K)| = [L : K]$

solche Körpererweiterungen heißen *Galoissche Körpererweiterung*.

Beweis. $1) \Rightarrow 2)$ L ist der Zerfällungskörper eines $f \in K[x]$. Die irreduziblen Faktoren von f können keine mehrfache Nullstelle haben, denn ein solcher Faktor ist das Minimalpolynom eines separablen Elements $\in L$.

$2) \Rightarrow 1)$ L ist separabel, weil f separabel ist. L ist normal, denn es ist ein Zerfällungskörper über K .

$1) \Leftrightarrow 2)$ Sei \bar{L} ein algebraischer Abschluss von L . $\sigma \in \text{Gal}(L/K)$ kann zu einem K -Morphismus $L \rightarrow \bar{L}$ fortgesetzt werden.

Angenommen $[L : K] = n$, dann gibt es maximal n K -Morphismen $L \rightarrow \bar{L}$ und es gibt genau n weil L separabel ist. Außerdem ist L/K genau dann normal, wenn für jeden K -Morphismus $\tau : L \rightarrow \bar{K}$ gilt $\tau(L) = L$; deshalb ist τ ein Element von $\text{Gal}(L/K)$. \square

Folgerung 3.42

Sei K ein Körper der Charakteristik 0, dann ist jeder Zerfällungskörper über K *Galois-Erweiterung*.

Bemerkung: Wenn $K \subset L \subset M$ Körpererweiterungen sind und M/K Galois ist, dann ist M/L Galois, aber L/K muss nicht Galois sein.

Bemerkung: Sei $f \in K[x]$ ein separables Polynom mit Zerfällungskörper L . Dann notiere $\text{Gal}(f) = \text{Gal}(L/K)$.

- 1) Seien $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ die Nullstellen von f . Dann permutiert $\sigma \in \text{Gal}(f)$ die $\alpha_1, \dots, \alpha_n$, und σ wird durch diese Permutation eindeutig bestimmt. Wir können also $\text{Gal}(f)$ als Untergruppe von S_n betrachten.

Für $f(\alpha_i) = 0$ gilt

$$c_n \alpha_i^n + \dots + c_1 \alpha_i + c_0 = 0 \quad c_i \in K$$

und damit

$$\begin{aligned} & \sigma(c_n \alpha_i^n + \cdots + c_1 \alpha_i + c_0) = \sigma(0) \\ \Rightarrow & \sigma(c_n) \sigma(\alpha_i)^n + \cdots + \sigma(c_1) \sigma(\alpha_i) + \sigma(c_0) = 0 \\ \Rightarrow & f(\sigma(\alpha_i)) = c_n \sigma(\alpha_i)^n + \cdots + c_1 \sigma(\alpha_i) + c_0 = 0 \end{aligned}$$

- 2) Die Nullstellen der irreduziblen Faktoren werden untereinander permutiert.
- 3) Wenn f irreduzibel ist, dann operiert $\text{Gal}(f)$ transitiv auf der Menge der Nullstellen. (siehe Definition 4.3)
- 4) Sei $n = \deg(f)$ und f irreduzibel, dann gilt $n \mid |\text{Gal}(f)|$

Beweis. 3) Seien a und b Nullstellen von f . Dann ist

$$L \supset K(a) \cong K[x]/(f) \cong K(b) \subset L$$

Und damit: ein Isomorphismus $\sigma : K(a) \rightarrow L$. σ kann zu einem K -morphimus $L \hookrightarrow \bar{L}$ erweitert werden. Da L/K normal ist, gilt $\sigma(L) = L$, also $\sigma \in \text{Gal}(L/K)$. \square

Definition 3.43

Sei L/K eine Galoissche Körpererweiterung und $\alpha \in L$ ein beliebiges Element, dann nennen wir die Elemente $\sigma(\alpha), \sigma \in \text{Gal}(L/K)$, die Konjugierten von α . Die Menge $\{\sigma(\alpha) \mid \sigma \in \text{Gal}(L(K))\}$ ist die Menge der Nullstellen des Minimalpolynoms von α .

Beispiel 3.44

$f = X^3 - 3 \in \mathbb{Q}[X]$, hat Nullstellen $\sqrt[3]{2} \in \mathbb{R}$ und $\sqrt[3]{2} \cdot \zeta_3, \sqrt[3]{2} \cdot \zeta_3^2 \in \mathbb{C}$ mit $\zeta_3 = e^{2\pi i/3}$.

$\mathbb{Q}(\alpha)/\mathbb{Q}$ ist nicht Galois.

$L = \mathbb{Q}(\alpha, \zeta_3)$ ist der Zerfällungskörper von f .

$[L : \mathbb{Q}]$ ist 6. Denn $\text{Gal}(f) \subset S_3$ und $\#S_3 = 6$ und damit $\mathbb{Q} \subset_3 \mathbb{Q}(\alpha) \subset_2 L$. Also $\text{Gal}(f) = S_3$.

Satz 3.45

Sei K ein Körper und $G \subset \text{Aut}(K)$ eine endliche Untergruppe. Dann ist

$$\text{Fix}(G) = \{\alpha \in K \mid \sigma(\alpha) = \alpha, \forall \sigma \in G\}$$

ein Unterkörper von K , genannt der Fixkörper von G .

Satz 3.46 (E. Artin)

Sei G eine endliche Untergruppe von $\text{Aut}(L)$ für einen beliebigen Körper L . Schreibe $K = \text{Fix}(G)$. Dann ist L/K Galois, und $G = \text{Gal}(L/K)$.

Insbesondere $[L : K] = \#G$.

Satz 3.47

Sei K ein endlicher Körper, mit q Elementen. Dann ist $q = p^m$ für eine Primzahl p und $m \in \mathbb{Z}_{>0}$. Außerdem ist K isomorph zu dem Zerfällungskörper von

$$x^q - x \in \mathbb{F}_p[x]$$

Umgekehrt, für jedes $q = p^m$, hat der Zerfällungskörper \mathbb{F}_q von $x^q - x \in \mathbb{F}_p[x]$ q Elemente.

Die Galois Gruppe ist $\text{Gal}(\mathbb{F}_q/\mathbb{F}_p) = (\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}, +)$ und wird erzeugt vom Frobenius-Morphismus: $F : \mathbb{F}_q \rightarrow \mathbb{F}_q, a \mapsto a^p$.

Beweis. Sei $\mathbb{F}_p \subset K$ mit $m = [K : \mathbb{F}_p]$ und damit $q = p^m$.

Wir haben gesehen dass $\mathbb{F}_p = \{\alpha \in K \mid F(\alpha) = \alpha\} = \text{Fix}(F)$.

Also gibt es $\tilde{m} \in \mathbb{Z}_{>0}$ sodass $F^{\tilde{m}} = \text{Id}_K$. Also ist

$$G = \{\text{Id}, F, F^2, \dots, F^{\tilde{m}-1}\} \subset \text{Aut}(K)$$

Also ist $\text{Fix}(G) = \mathbb{F}_p$. Mit dem Satz von Artin folgt $K/\text{Fix}(G)$ ist Galois mit Gruppe G .

Also ist K/\mathbb{F}_p ist Galois. $m = [K : \mathbb{F}_p] = \#G \Rightarrow \tilde{m} = m$.

Es gilt $F^m : K \rightarrow K = \text{Id}_K$. Also ist $x^{p^m} = x$, oder auch $x^q - x = 0, \forall x \in K$. Also gilt $X^q - X = \prod_{x \in K} (X - x)$. Insbesondere ist K isomorph zu einem Zerfällungskörper von $X^q - X$.

Umgekehrt, wenn $q = p^m$ eine Primzahlpotenz ist. Betrachte $\{x \in \overline{\mathbb{F}_p} \mid x^q = x\} = \text{Fix}(F^m)$. Das ist ein Körper. Außerdem ergibt $X^q - X$ abgeleitet $qX^{q-1} - 1 = -1 \neq 0$. Also gilt $\#\text{Fix}(F^m) = q$. \square

Definition 3.48

Sei H eine Gruppe, und L ein Körper. Sei L^* die Gruppe der Einheiten in L , also $L^* = L \setminus \{0\}$.

Ein (L -wertiger) Charakter von H ist ein Gruppenmorphismus

$$H \rightarrow L^*$$

Beachte: Wenn $\sigma : K \rightarrow L$ ein Körpermorphismus ist erhalten wir einen Charakter $K^* \rightarrow L^*$ der Gruppe K^* .

Satz 3.49

Seien $\sigma_1, \dots, \sigma_n$ paarweise verschiedene Charaktere einer Gruppe H mit Werten in einem Körper L . Seien $a_1, \dots, a_n \in L$ sodass die Linearkombination

$$\sum_{i=1}^n a_i \sigma_i : H \rightarrow L, h \mapsto \sum_{i=1}^n a_i \sigma_i(h)$$

die Nullabbildung ist. Dann gilt $a_1 = a_2 = \dots = a_n = 0$.

Beweis. Induktion über n .

Fall $n = 1$: $a_1 \cdot \sigma_1(h) = 0, \sigma_1(h) \in L^* \Rightarrow a_1 = 0$

Fall $n > 1$:

$$\sum_{i=1}^n a_i \sigma_i(h) = 0 \quad \forall h \in H$$

Da $\sigma_1 \neq \sigma_n$, also gibt es $g \in H$ sodass $\sigma_1(g) \neq \sigma_n(g)$.

$$\sum_{i=1}^n a_i \sigma_n(g) \sigma_i(h) = 0 \quad \forall h \in H \quad (*)$$

$$\sum_{i=1}^n a_i \sigma_i(g) \sigma_i(h) = \sum_{i=1}^n a_i \sigma_i(gh) = 0 \quad \forall h \in H \quad (**)$$

Wir betrachten die Differenz von $(*)$ und $(**)$.

$$\sum_{i=1}^n (a_i \sigma_i(g) \sigma_i(h) - a_i \sigma_n(g) \sigma_i(h)) = 0 \quad \forall h \in H$$

oder

$$\sum_{i=1}^{n-1} a_i (\sigma_i(g) - \sigma_n(g)) \sigma_i(h) = 0$$

Mit der Induktionsvoraussetzung folgt für alle $i < n$ $a_i (\sigma_i(g) - \sigma_n(g)) = 0$ und da $\sigma_1(g) \neq \sigma_n(g)$ gilt $a_1 = 0$.

Also erhalten wir

$$\sum_{i=2}^n a_i \sigma_i(h) = 0 \quad \forall h \in H$$

und durch Induktion $a_2 = a_3 = \dots = a_n = 0$. □

Satz 3.50 (E. Artin (wdh.))

Sei G eine endliche Untergruppe von $\text{Aut}(L)$ für einen beliebigen Körper L . Schreibe $K = \text{Fix}(G)$. Dann ist L/K Galois, und $G = \text{Gal}(L/K)$.

Insbesondere $[L : K] = \#G$.

3 Körpertheorie

Beweis. Betrachte $\sigma \in G$, dann gilt für alle $a \in K, b \in L$ $\sigma(a \cdot b) = \sigma(a) \cdot \sigma(b) = a\sigma(b)$.

Also ist $\sigma \in G$ K -linear und damit $G \subset \text{Gal}(L/K)$. Damit also $\#G \leq \# \text{Gal}(L/K) \leq [L : K]$. Wir wollen zeigen $[L : K] \leq \#G$.

Setze $n = \#G$ und schreibe $G = \{\sigma_1, \dots, \sigma_n\}$.

Für jedes $y \in L$ betrachte

$$S(y) = \sum_{i=1}^n \sigma_i(y)$$

und

$$\sigma_j(S(y)) = \sigma_j\left(\sum_{i=1}^n \sigma_i(y)\right) = \sum_{i=1}^n \sigma_j(\sigma_i(y)) = \sum_{i=1}^n (\sigma_j \circ \sigma_i)(y) = \sum_{\sigma \in G} \sigma(y) = S(y)$$

$\Rightarrow S(y) \in K$.

Mit der linearen Unabhängigkeit der Charaktere folgt $\exists y \in L^*, S(y) \neq 0$.

Außerdem gilt $\forall z_1, z_2 \in L : S(z_1 + z_2) = S(z_1) + S(z_2)$

und $\forall x \in K, z \in L : S(xz) = xS(z)$.

Seien $a_1, \dots, a_{n+1} \in L$ beliebig. Betrachte das Gleichungssystem

$$\sum_{k=1}^{n+1} \sigma_i^{-1}(a_k) x_k = 0 \text{ für } i = 1, \dots, n$$

Also haben wir n Gleichungen in den Variablen x_1, x_2, \dots, x_{n+1} . Also haben wir eine nicht-triviale Lösung $(y_1, \dots, y_{n+1}) \in L^{n+1}$. Wir können (durch umsordern) annehmen dass $y_1 \neq 0$.

Wenn (y_1, \dots, y_{n+1}) eine Lösung ist und $z \in L^*$ dann ist (zy_1, \dots, zy_{n+1}) eine weitere Lösung.

Wir wählen $z = y/y_1$, dann könne wir annehmen dass $S(y_1) \neq 0$. Anwenden von σ_i auf die Gleichung i ergibt

$$\sum_{k=1}^{n+1} a_k \sigma_i(y_k) = 0$$

Summieren über i ergibt

$$0 = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{n+1} a_k \sigma_i(y_k) = \sum_{k=1}^{n+1} a_k \sum_{i=1}^n \sigma_i(y_k) = \sum_{k=1}^{n+1} a_k S(y_k) = \sum_{k=1}^{n+1} \underbrace{S(y_k)}_{\in K} \underbrace{a_k}_{\in L}$$

Also sind $a_1, \dots, a_{n+1} \in L$ linear abhängig über K . Also $\dim_K(L) \leq n$ und damit $[L : K] \leq \#G$. \square

Satz 3.51 (Hauptsatz der Galois-Theorie)

Sei L/K eine Galois-Erweiterung mit Galois-Gruppe $G = \text{Gal}(L/K)$.

- 1) Für jeden Zwischenkörper $K \subset Z \subset L$, ist die Gruppe $\text{Gal}(L/Z)$ eine Untergruppe von G .

Für jede Untergruppe $H \subset G$ ist der Fixkörper $\text{Fix}(H)$ ein Zwischenkörper $K \subset \text{Fix}(H) \subset L$.

- 2) Schreibe \mathcal{Z} für die Menge der Zwischenkörper $K \subset Z \subset L$ und \mathcal{H} für die Menge der Untergruppen $H \subset G$. Dann sind die Abbildungen

$$\begin{aligned} \text{Gal}(L/_) : \mathcal{Z} &\rightarrow \mathcal{H} \\ z &\mapsto \text{Gal}(L/Z) \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} \text{Fix}(_) : \mathcal{H} &\rightarrow \mathcal{Z} \\ H &\mapsto \text{Fix}(H) \end{aligned}$$

bijektiv und invers zueinander.

- 3) Die Abbildungen sind umgekehrte Inklusionen und erhalten Indizes.

$$Z_1 \subset Z_2 \Rightarrow \text{Gal}(L/Z_1) \supset \text{Gal}(L/Z_2) \text{ und } [Z_2 : Z_1] = [\text{Gal}(L/Z_1) : \text{Gal}(L/Z_2)].$$

$$H_1 \subset H_2 \Rightarrow \text{Fix}(H_1) \supset \text{Fix}(H_2) \text{ und } [H_2 : H_1] = [\text{Fix}(H_1) : \text{Fix}(H_2)]$$

- 4) Für jedes $\sigma \in G, Z \in \mathcal{Z}$ ist $\sigma(Z)$ ein Zwischenkörper und $\text{Gal}(L/\sigma(Z)) = \sigma \circ \text{Gal}(L/Z) \circ \sigma^{-1} = \{\sigma\tau\sigma^{-1} \mid \tau \in \text{Gal}(L/K)\} \subseteq \text{Gal}(L/K)$.

- 5) Für $Z \in \mathcal{Z}$ ist Z/K Galois genau dann wenn $G(L/Z) \subset G$ eine normale Untergruppe ist, in anderen Worten wenn $\sigma \circ \text{Gal}(L/Z) \circ \sigma^{-1} = \text{Gal}(L/Z)$ für alle $\sigma \in G$.

In dem Fall gilt

$$\text{Gal}(Z/K) = \text{Gal}(L/K) / \text{Gal}(L/Z)$$

Bemerkung: Sei G eine endliche Gruppe, Sei $H \subseteq G$ eine Untergruppe. Dann gilt $\#H \mid \#G$. Den Quotienten bezeichnet man als Grad der Gruppenerweiterung $[G : H]$.

Beispielanwendung: Sei $k = \mathbb{Q}$, sei L der Zerfällungskörper von $x^3 - 2$.

Erinnerung: Wir wissen: $L = \mathbb{Q}(\underbrace{\sqrt[3]{2}}_{a_1}, \underbrace{\xi\sqrt[3]{2}}_{a_2}, \underbrace{\xi^2\sqrt[3]{2}}_{a_3})$ wobei $\xi = e^{\frac{2\pi i}{3}}$.

3 Körpertheorie

Wir wissen auch $[L : \mathbb{Q}] = 6$

Zudem wissen wir $L = \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}, i \cdot \sqrt[2]{3})$

Frage: Welche Zwischenkörper gibt es? Welche sind Galois?

Gegenfrage: Was ist $\text{Gal}(L/K)$?

Antwort: Jedes Element von $\text{Gal}(L/K)$ permutiert $\{a_1, a_2, a_3\}$ erhalte also Abbildung:

$$\text{Gal}(L/K) \xrightarrow{\alpha} \text{Perm}(\{a_1, a_2, a_3\}) = S_3$$

Wissen auch: die Elemente von $\text{Gal}(L/K)$ sind durch die Permutation eindeutig bestimmt. Also ist α injektiv.

Wissen auch: L/K ist Galois, also

$$6 = [L : k] = \# \text{Gal}(L/K) = \# S_3$$

α ist also bijektiv.

Wie viele Elemente hat S_3 ? Wie sehen die aus?

$$\{Id, (123), (12)(3), (13)(2), (23)(1), (132)\} = S_3$$

Untergruppen sind

$$\begin{aligned} &\{Id\} \\ &\{Id, (12)(3)\}, \{Id, (13)(2)\}, \{(23)(1)\} \\ &\{Id, (123), (132)\} \\ &S_3 \end{aligned}$$

Wir sehen die normalen Untergruppen sind exakt $\{Id\}, \{Id, (123), (132)\}, S_3$.

Welche Körpererweiterungen gibt es also?

$$\text{Fix}(Id) = L$$

$$\text{Fix}(Id, (12)(3)) = k(a_3)$$

Denn: Klar ist, dass Elemente von k und a_3 fix sind, also $k(a_3) \subseteq \text{Fix}(Id, (12)(3))$. Wende 3) an mit $H_2 = S_3, H_1 = (Id, (12)(3))$ also

$$\Rightarrow [\text{Fix}(H_1) : \text{Fix}(H_2)] = [H_2 : H_1] = 3$$

Aber $[k(a_3), k] = 3$ also Gleichheit.

Außerdem

$\text{Fix}(Id, (13)(2)) = k(a_2)$ und $\text{Fix}(Id, (23)(1)) = k(a_1)$ sind nicht Galois.

$\text{Fix}(S_3) = k$

$\text{Fix}(Id, (123), (132)) = k(i \cdot \sqrt[3]{3})$. Warum ist $i \cdot \sqrt[3]{3}$ überhaupt invariant? Wir wissen

$$i \cdot \sqrt[3]{3} = \frac{a_2 - a_3}{a_1} = \frac{\xi \sqrt[3]{2} - \xi^2 \sqrt[3]{2}}{\sqrt[3]{2}} = \xi - \xi^2$$

aber

$$\frac{a_3 - a_1}{a_2} = \frac{\xi^2 \sqrt[3]{3} - \sqrt[3]{3}}{\xi \sqrt[3]{3}} = \xi - \bar{\xi} = \xi - \xi^2$$

Beweis des Hauptsatzes. 1) ist bereits bewiesen

2) Wir müssen zeigen: Für jeden Zwischenkörper Z ist $\text{Fix}(\text{Gal}(L/Z)) = Z$

Und für jede Untergruppe H ist

$$\text{Gal}(L/\text{Fix}(H)) = H$$

Letztere Aussage ist Satz von Artin, also fertig.

Sei Z gegeben. Klar per Definition $\text{Fix}(\text{Gal}(L/Z)) \supseteq Z$. Will Gleichheit zeigen mit Hilfe des Gradargumentes.

Artin $L/\text{Fix}(\text{Gal}(L/Z))$ ist Galois'sch, $[L : \text{Fix}(\text{Gal}(L/Z))] = \# \text{Gal}(L/Z)$

Wir L/Z ist auch Galois'sch, also $[L : Z] = \# \text{Gal}(L/Z)$.

Also: $[\text{Fix}(\text{Gal}(L/Z)) : Z] = 1$

3) Wir beweisen nur die zweite Aussage. Seien also Gruppen $H_1 \subseteq H_2 \subseteq \text{Gal}(L/K)$ gegeben. Klar ist: jedes $l \in L$, das fix ist unter H_2 ist auch fix unter $H_1 \Rightarrow \text{Fix}(H_2) \subseteq \text{Fix}(H_1)$ Inklusionsumkehr ist also bewiesen.

Artin $[L : \text{Fix}(H_1)] = \#H_1$ und $[L : \text{Fix}(H_2)] = \#H_2$

$$\Rightarrow [\text{Fix}(H_1) : \text{Fix}(H_2)] = \frac{[L : \text{Fix}(H_2)]}{[L : \text{Fix}(H_1)]} = \frac{\#H_2}{\#H_1} = [H_2 : H_1]$$

4) Sei σ und Z gegeben. Klar ist $\sigma(Z)$ ist ein Zwischenkörper. Behaupte

$$\text{Gal}(L/\sigma(Z)) \supseteq \sigma \text{Gal}(L/Z)\sigma^{-1} \quad (*)$$

Beweis der Behauptung: Sei $\tau \in \sigma \text{Gal}(L/Z)\sigma^{-1}$ und sei $z \in \sigma(Z)$. Muss zeigen, dass $\tau(z) = z$ ist. Schreibe dazu $\tau = \sigma\tau'\sigma^{-1}$ und $z = \sigma(z')$ für geeignete $\tau' \in \text{Gal}(L/Z)$, $z' \in Z$. Dann ist

$$\tau(z) = \sigma\tau\sigma^{-1}\sigma(z') = \sigma\tau'z' = \sigma(z') = z$$

Noch zu zeigen: Wir haben Gleichheit in $(*)$

Beobachte: Die Gruppen $\text{Gal}(L/Z)$ und $\sigma \text{Gal}(L/Z)\sigma^{-1}$ sind isomorph, haben also gleich viele Elemente.

Isomorphie ist

$$\begin{aligned} \text{Gal}(L/Z) &\rightarrow \sigma \text{Gal}(L/Z)\sigma^{-1} \\ \tau &\mapsto \sigma\tau\sigma^{-1} \end{aligned}$$

Beobachtung: L/Z ist Galois'sch

$$\# \text{Gal}(L/Z) = [L : Z] = [\sigma(L) : \sigma(Z)] = [L : \sigma(Z)] = \# \text{Gal}(L/\sigma(Z))$$

Insgesamt: Die beiden Gruppen in $(*)$ haben gleich viele Elemente!

5) Sei Z ein Zwischenkörper.

Beobachtung 1: Z/K ist separabel. Also: Z/K ist Galois'sch $\Leftrightarrow Z/K$ ist normal \Leftrightarrow für jede k -Morphismus $\sigma : Z \rightarrow \bar{L}$ ist $\sigma(Z) = Z$.

Beobachtung 2: Jeder Morphismus $\sigma : Z \rightarrow \bar{L}$ setzt sich fort zu Morphismus $\bar{\sigma} : L \rightarrow \bar{L}$. Weil L/K per Annahme Galois'sch, also normal ist, gilt: $\overline{\sigma(L)} = L$.

Zusammenfassung: Z/K ist Galois'sch $\Leftrightarrow \forall \sigma \in \text{Gal}(L/K) \sigma(Z) = Z$.

$$\stackrel{2)}{\Rightarrow} \forall \sigma \in \text{Gal}(L/K) : \text{Gal}(L/\sigma(Z)) = \text{Gal}(L/Z)$$

$$\stackrel{4)}{\Rightarrow} \forall \sigma \in \text{Gal}(L/K) : \sigma \text{Gal}(L/Z)\sigma^{-1} = \text{Gal}(L/Z)$$

$$\Leftrightarrow \text{Gal}(L/Z) \text{ ist normale Untergruppe von } \text{Gal}(L/K)$$

Falls Z/K Galois'sch ist, haben wir Einschränkung

$$r : \text{Gal}(L/K) \rightarrow \text{Gal}(Z/K)$$

die Abbildung r ist surjektiv, weil wir Morphismen fortsetzen können. $\ker(r) = \text{Gal}(L/Z)$.

□

4 Gruppentheorie

4.1 Grundbegriffe

Definition 4.1

Sei G eine Gruppe, M eine Menge. Eine Gruppenwirkung ist eine Abbildung

$$\alpha : G \times M \rightarrow M$$

sodass

$$1) \forall m \in M : \alpha(e, m) = m$$

$$2) \forall m \in M, \forall g, h \in G \alpha(h, \alpha(g, m)) = \alpha(h \cdot g, m)$$

Bemerkung: Gegeben eine Gruppenwirkung $\alpha : G \times M \rightarrow M$ und $g \in G$ betrachte oft die Abbildung

$$\begin{aligned} \alpha_g : M &\longrightarrow M \\ m &\longmapsto \alpha(g, m) \end{aligned}$$

(Translation). Die Axiome 1) und 2) sagen:

$$\alpha_e = \text{id}_M, \forall g, h : \alpha_h \circ \alpha_g = \alpha_{h \cdot g}$$

Insbesondere: Alle α_g sind bijektiv, $(\alpha_g)^{-1} = \alpha_{g^{-1}}$.

Insbesondere: erhalte Gruppenmorphimus

$$\begin{aligned} \underbrace{\alpha} : G &\longrightarrow \text{Perm}(M) \\ g &\longmapsto \alpha_g \end{aligned}$$

Andersherum: Gegeben Gruppenmorphimus

$$\underline{\beta} : G \rightarrow \text{Perm}(M)$$

dann liefert

$$\begin{aligned} \beta : G \times M &\longrightarrow M \\ (g, m) &\longmapsto (\underline{\beta}(g))(m) \end{aligned}$$

eine Gruppenwirkung.

Beispiel 4.2 • k ein Körper. Dann wirkt $\mathrm{Gl}_n(k)$ auf k^n

- $(\mathbb{R}, +)$ wirkt auf \mathbb{R} .

$$\begin{aligned} a : \mathbb{R} \times \mathbb{R} &\longrightarrow \mathbb{R} \\ (a, b) &\longmapsto a + b \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m : \mathbb{R} \times \mathbb{R} &\longrightarrow \mathbb{R} \\ (a, b) &\longmapsto \exp(a)b \end{aligned}$$

- k ein Körper, f ein Polynom mit Zerfällungskörper L . Sei $G = \mathrm{Gal}(L/K)$. Dann haben wir natürliche Wirkungen

- G wirkt auf L
- G wirkt auf die Nullstellenmenge von f
- G wirkt auf die Menge der Zwischenkörper $k \subseteq \cdot \subseteq L$

- Sei G eine Gruppe. Dann wirkt G auf sich selbst ($M = G$)

$$\begin{aligned} l : G \times G &\longrightarrow G \\ (g, m) &\longmapsto g \cdot m \\ r : G \times G &\longrightarrow G \\ (g, m) &\longmapsto m \cdot g^{-1} \\ c : G \times G &\longrightarrow G \\ (g, m) &\longmapsto g \cdot m \cdot g^{-1} \end{aligned}$$

- Variante: Sei $H \subseteq G$ eine Untergruppe. Dann:

$$\begin{aligned} l : H \times G &\rightarrow G & (h, m) &\mapsto hm \\ r : H \times G &\rightarrow G & (h, m) &\mapsto mh^{-1} \\ c : H \times G &\rightarrow G & (h, m) &\mapsto hmh^{-1} \end{aligned}$$

- Sei ODE auf M gegeben, sodass Anfangswertprobleme für alle Zeilen lösbar sind. Dann ist die Lösungsabbildung

$$\begin{aligned} \mathbb{R} \times M &\longrightarrow M \\ (t, m) &\longmapsto \text{Lösung des AWP zum Wert } m \text{ und Zeit } t \end{aligned}$$

Wirkung von \mathbb{R} auf M .

Definition 4.3

Sei $\alpha : G \times M \rightarrow M$ eine Gruppenwirkung.

- 1) Wir schreiben statt $\alpha(g, m)$ oft $g \cdot m$.
- 2) Gegeben $m \in M$. Dann betrachte alle Elemente, die wir von m erreichen können

$$G \cdot m = \{g \cdot m \mid g \in G\}$$

Dies heißt die Bahn von m .

- 3) Gegeben Teilmenge $N \subseteq M$, betrachte Untergruppen

$$\text{Fix}(N) = \{g \in G \mid \forall n \in N : g \cdot n = n\}$$

$$\text{Stab}(N) = \{g \in G \mid g \cdot N = N\}$$

Spezialfall: $m \in M$ gegeben. Dann nenne $\text{Fix}(\{m\})$ die Isotropiegruppe von m .

- 4) Ein Element $m \in M$ sodass $\forall g \in G : g \cdot m = m$ heißt Fixpunkt der Gruppenwirkung.
- 5) Eine Gruppenwirkung heißt transitiv, falls es nur eine Bahn gibt.

Zentrale Beobachtung: Sei $\alpha : G \times M \rightarrow M$ eine Gruppenwirkung, seien $m_1, m_2 \in M$ gegeben. Betrachte Bahnen $G \cdot m_1$ und $G \cdot m_2$. Falls die Bahnen einen Schnittpunkt haben, sind sie gleich!

Beweis. Sei m_3 ein Schnittpunkt. Das heißt finde $g_1, g_2 \in G : m_3 = g_1 \cdot m_1 = g_2 \cdot m_2$.

Sei $n \in Gm_1$ jetzt irgendein Element, also $n = h \cdot m_1$, dann $n = hg_1^{-1}g_2m_2$ also $n \in G \cdot m_2$.

$\Rightarrow G \cdot m_1 \subseteq G \cdot m_2$. Andere Inklusion analog! □

Die Relation auf M

$$a \sim b \Leftrightarrow \exists g \in G : a = g \cdot b \Leftrightarrow \text{Bahnen von } a \text{ und } b \text{ sind gleich}$$

ist eine Äquivalenzrelation! Die Gruppenwirkung zerlegt den Raum in eine disjunkte Vereinigung von Bahnen.

Besonders relevanter Fall: Sei G eine Gruppe, $H \subseteq G$ eine Untergruppe, Wirkung: l . Die Bahnen heißen Rechtsnebenklassen. Die Anzahl der Bahnen wird mit $[G : H]$ bezeichnet und heißt Index von H in G .

Satz 4.4

Sei G eine endliche Gruppe, die auf M wirkt. Sei $m \in M$ gegeben. Dann ist

$$\#G = \# \text{Iso}(m) \cdot \#(G \cdot m)$$

Beweis. Betrachte Bahnabbildung

$$\begin{aligned} b : G &\longrightarrow M \\ g &\longmapsto g \cdot m \end{aligned}$$

Bild der Bahnabbildung ist die Bahn $G \cdot m$. Was sind die Fasern?

$$b^{-1}(m) = \{g \in G \mid g \cdot m = m\} = \text{Iso}(m)$$

Gegeben $h \in G$

$$b^{-1}(h \cdot m) = \{g \in G \mid g \cdot m = h \cdot m\} = h^{-1} \cdot \text{Iso}(m)$$

Also alle Urbildmengen enthalten stets $\# \text{Iso}(m)$ Elemente. Es gibt exakt $\#(G \cdot m)$ Urbildmengen.

\Rightarrow hat $\# \text{Iso}(m) \cdot \#(G \cdot m)$ viele Elemente. □

Anwendung auf Spezialfall: $H \subseteq G$ wirkt auf $M = G$ durch Linksmultiplikation.

Satz 4.5 (Kleiner Satz von Lagrange)

Sei G eine endliche Gruppe, sei $H \subseteq G$ eine Untergruppe. Dann $\#G = [G : H] \cdot \#H$.

Beweis. Die Menge G ist disjunkte Vereinigung von $[G : H]$ vielen Bahnen. Müssen also zeigen: alle Bahnen enthalten exakt $\#H$ viele Elemente. Wegen Satz 4.4 genügt es zu zeigen $\forall g \in G : \text{Iso}(g) = \{e\}$.

Erinnerung: $\text{Iso}(g) = \{h \in H \mid h \cdot g = g\}$ □

Folgerung 4.6

$[G : H] = \#G / \#H$. Insbesondere ist $[G : H]$ Teiler von $\#G$. Insbesondere ist $\#H$ Teiler von $\#G$.

Folgerung 4.7

Sei G endlich. G wirke auf Menge M . Sei $m \in M$ dann $\#(G \cdot m) = [G : \text{Iso}(m)]$.

Wesentliches weiteres Beispiel

G wirkt auf sich selbst durch Konjugation. Die Bahnen heißen Konjugationsklassen. Gegeben Untergruppe $H \subseteq G$, betrachte $\text{Fix}(H) = \{g \in G \mid ghg^{-1} = h, \forall h \in H\} = Z(H) \subseteq G$ diese Untergruppe heißt Zentralisator von H .

$$\text{Stab}(H) = \{g \in G \mid gHg^{-1} = H\} \subseteq G$$

Beobachtung: $H \subseteq \text{Stab}(H)$ ist normale Untergruppe.

Klassengleichung: Die Gruppe G zerlegt sich in Konjugationsklassen. Wenn wir aus jeder Klassen einen Vertreter wählen $h_1, \dots, h_n \in G$. Dann

$$\#G = \sum_{i=1}^n H \cdot h_i = \sum_{i=1}^n [G : Z(h_i)] = \#Z(H) + \sum_{\substack{i=1 \dots n \\ h_i \notin Z(H)}} [G : Z(h_i)]$$

4.2 Zyklische Gruppen

Gegeben sei eine Gruppe G und ein Element $g \in G$. Dann gibt es einen Gruppenmorphimus

$$\begin{aligned} \varphi_g : \mathbb{Z} &\longrightarrow G \\ n &\longmapsto \begin{cases} g^n & \text{falls } n > 0 \\ e & \text{falls } n = 0 \\ (g^{-1})^n & \text{falls } n < 0 \end{cases} \end{aligned}$$

Bild ist eine Untergruppe von G , genannt $\langle g \rangle$ die von g erzeugte Zyklische Untergruppe.

- Falls φ_g injektiv ist, dann ist $\langle g \rangle$ isomorph zu \mathbb{Z} .
- Falls φ_g nicht injektiv ist, beachte $\ker(\varphi_g)$ enthält positive Zahlen. Sei also $n = \min(\ker(\varphi_g) \cap \mathbb{N})$. Wie immer ist

$$\langle g \rangle \simeq (\mathbb{Z}/(n), +)$$

Beispiel 4.8

Sei G eine endliche Gruppe. Sei $\#G = p$ eine Primzahl. Sei $g \in G$ gegeben. Dann ist $\langle g \rangle \subseteq G$ also: $\#\langle g \rangle \mid \#G$.

\Rightarrow entweder $\langle g \rangle = \{e\}$ oder $\langle g \rangle = G$.

Konsequenz:

1) G hat überhaupt keine echten Untergruppen.

2) G ist zyklisch.

Definition 4.9

Sei G eine Gruppe und $g \in G$, definiere:

$$\text{ord}(g) = \min\{n \in \mathbb{N} : g^n = e\} \in \mathbb{N} \cup \{\infty\}$$

$$\text{ord}(g) = \#\langle g \rangle, \text{ falls endlich ist } \text{ord}(g) \mid \#G$$

Beispiel 4.10 1) Falls $\#G$ eine Primzahl ist, dann ist G zyklisch.

2) Gegeben $n \in \mathbb{N}$ betrachte $G = \{\xi \in \mathbb{C} \mid \xi^n = 1\}$.

3) Sei R ein Integritätsring, sei $G \subset (R^*, \cdot)$ endlich. Dann ist G zyklisch.

Beweis. Weil $R \hookrightarrow Q(R)$ eingebettet ist, können wir ohne Einschränkung annehmen. $R = k$ ist ein Körper. Sei $m = \max\{\text{ord}(h) \mid h \in G\}$. Dann gilt $\forall g \in G$

$$g^m = \underbrace{(g^{\text{ord}(g)})}_{=e}^{m/\text{ord}(g)} = e$$

Also: alle $g \in G$ sind Nullstellen des Polynoms $x^m - 1$. Dieses Polynom hat maximal m Nullstellen $\Rightarrow \#G \leq m$. Wenn wir $g \in G$ nehmen, mit $\text{ord}(g) = m$, dann ist $\#(g) = m$. Insbesondere $G = \langle g \rangle$, G ist zyklisch. \square

4.3 Die Sätze von Sylow

Frage: Wenn G endliche Gruppe ist, $H \subseteq G$ eine Untergruppe, dann $\#H \mid \#G$. Wenn wir $n \in \mathbb{N}$ haben, mit $n \mid \#G$, gibt es dann auch eine Untergruppe H mit $\#H = n$?

Sylow-Sätze geben Teilantwort. Die Zentrale Beobachtung ist einfach!

Lemma 4.11

Sei G eine Gruppe, sei $\#G = p^n$ für p Primzahl, $n \in \mathbb{N}$. G wirke auf endliche Menge M . Setze $M_0 = \text{Fix}(G)$. Dann ist $\#M \equiv \#M_0 \pmod{p}$.

Beweis. M ist disjunkte Vereinigung der Bahnen. Bahnen mit einem Element sind exakt die Fixpunkte. Wenn B eine Bahn mit mehr als einem Element ist, dann $1 < \#B \mid p^n \Rightarrow \#B \equiv 0 \pmod{p}$. \square

Satz 4.12 (Satz von Cauchy)

Sei G endliche Gruppe und sei p eine Primzahl sodass $p \mid \#G$. Dann gibt es ein $g \in G$: $\text{ord}(g) = p$.

Beweis. Betrachte $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}, +)$. Diese Gruppe wirkt auf $\underbrace{G \times \cdots \times G}_{p\text{-mal}}$ durch zyklische Vertauschung:

$$1 : (g_1, \dots, g_p) \mapsto (g_p, g_1, \dots, g_{p-1})$$

Beobachte: Die Menge $M = \{(g_1, \dots, g_p) \in G^p \mid g_1 \cdots g_p = e\}$ ist stabil unter der Wirkung von $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$.

Beobachte: $\#M = (\#G)^{p-1}$

Beobachte: Fixpunkte der $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ -Wirkung auf M sind Elemente der Form $\underbrace{(g, \dots, g)}_{p\text{-mal}}$ mit $g^p = e$.

$\Rightarrow g = e$ oder $\text{ord}(g) = p$.

Wir wissen:

1) $\# \text{Fix}(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}) \geq 1$, denn $(e \dots e) \in \text{Fix}(\dots)$

2) Lemma: $\# \text{Fix}(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}) \equiv 0 \pmod{p}$

$\Rightarrow \# \text{Fix}(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}) \geq p$. Also existiert ein Element der Ordnung p . □

Definition 4.13

Sei p eine Primzahl. Eine Gruppe heißt p -Gruppe, wenn $\forall g \in G \exists n \in \mathbb{N} : \text{ord}(g) = p^n$.

Satz 4.14

Sei G eine endliche Gruppe, sei p eine Primzahl. Dann sind äquivalent:

1) G ist p -Gruppe

2) $\#G = p^m$ für geeignetes $m \in \mathbb{N}$

Beweis. 2) \Rightarrow 1) Klar, denn wir wissen:

$$\forall g \in G : \text{ord}(g) \mid \#G = p^m$$

$\Rightarrow \text{ord}(g)$ ist Potenz von p

1) \Rightarrow 2) Beweis der Kontraposition!

Angenommen $\#G$ ist keine Potenz von p .

\Rightarrow Es gibt Primzahl $q \neq p$ mit $q \mid \#G$.

Cauchy: Es gibt ein Element $g \in G$ mit $\text{ord}(g) = q$.

$\Rightarrow G$ ist keine p -Gruppe. □

Lemma 4.15

Sei G eine endliche p -Gruppe. Dann: G hat nicht triviales Zentrum

$$Z(G) \supsetneq \{e\}$$

Beweis. Betrachte die Wirkung von G auf $M = G$ durch Konjugation. Dann $Z(G) = \text{Fix}(G)$.

Wieder gilt: $\{e\} \subseteq \text{Fix}(G)$

$\# \text{Fix}(G) \equiv 0 \pmod{p} \Rightarrow \# \text{Fix}(G) \geq p$. □

Definition 4.16

Sei G eine Gruppe, p eine Primzahl. Eine p -Sylowgruppe ist eine maximal große p -Untergruppe von G .

Satz 4.17 (ohne Beweis)

Mit Zorns Lemma existieren Sylowgruppen.

Lemma 4.18

Sei G eine Gruppe, sei $G_p \subseteq G$ eine p -Sylowgruppe, sei $g \in G$ ein Element $\Rightarrow gG_pg^{-1}$ ist eine Sylowgruppe.

Beweis. Klar ist $\#G_p = \#gG_pg^{-1}$ also ist gG_pg^{-1} schon mal eine p -Gruppe. Angenommen gG_pg^{-1} wäre nicht maximal, das heißt p -Gruppe U mit $gG_pg^{-1} \subsetneq U \Rightarrow G_p \subsetneq g^{-1}Ug$ und $g^{-1}Ug \simeq U$ also p -Gruppe.

$\Rightarrow G_p$ nicht Sylow! □

Lemma 4.19

Sei G endlich, sei $U \subseteq G$ eine p -Untergruppe dann gilt:

$$[G : U] = [N(U) : U] \pmod{p}$$

(Erinnerung: $N(U) = \{g \in G \mid gUg^{-1} = U\}$. Das ist eine Untergruppe von G und U ist normal in $N(U)$)

4 Gruppentheorie

Beweis. Betrachte die Wirkung von U auf G durch Linkstranslation. Sei $M = \text{Quot}$. Anders gesagt $M = \text{Menge der Bahnen}$ also

$$M = \{U \cdot g \mid g \in G\}$$

Nachrechnen: U wirkt auf der Menge M durch:

$$\begin{aligned} U \times M &\longrightarrow M \\ (u, U \cdot g) &\longmapsto U \cdot g \cdot u^{-1} \end{aligned}$$

Betrachte wieder $M_0 \subseteq M$, die Fixpunktmenge dieser Wirkung.

Beobachte:

$$\begin{aligned} Z \cdot g \in M_0 &\Leftrightarrow \forall u \in U : U \cdot g \cdot u^{-1} = Ug \\ &\Leftrightarrow \forall u \in U : Ugu^{-1}g^{-1} = U \Leftrightarrow g \in N(U) \end{aligned}$$

Wir wissen:

$$[G : U] = \#M = \#M_0 \pmod{p}$$

wobei $\#M_0 = \#\text{Bahnen der Wirkung von } U \text{ auf Gruppe } N(U) = [N(U) : U]$ □

Zusatz: Falls gilt $p \mid [G : U]$, dann $[N(U) : U] = 0 \pmod{p}$

$$\Rightarrow [N(U) : U] \neq 1 \Rightarrow N(U) \subsetneq U$$

Satz 4.20 (Sylow-Satz 1)

Sei G eine endliche Gruppe, sei p eine Primzahl. Schreibe $\#G = p^n \cdot m$ wobei $p \nmid m$. Dann gilt:

- 1) $\forall 0 \leq i \leq n$ gilt: Es existiert eine p -Untergruppe von G mit p^i -Elementen.
- 2) $\forall 0 \leq i < n$ und alle p -Untergruppen $U \subseteq G$ mit p^i Elementen: Es gibt eine p -Untergruppe $U' \subseteq G$ mit p^{i+1} Elementen. $U \subseteq U'$ und U ist normal in U' .

Beweis. Banal: $\{e\}$ hat p^0 Elemente

Cauchy: Es existiert eine Untergruppe mit p Elementen. Per Induktion genügt es also Teil 2) zu zeigen.

Sei also $0 \leq i < n$ gegeben, sei U mit p^i Elementen gegeben. Wissen dann (Lemma und Zusatz) $N(U) \supsetneq U$. Weil U normal ist in $N(U)$ können wir Quotientengruppe betrachten!

$$\pi : N(U) \longrightarrow N(U)/U$$

Lemma: $[N(U) : U] = [G : U] \equiv 0 \pmod{p}$

$$\Rightarrow \#N(U)/U \equiv 0 \pmod{p}$$

$$\Rightarrow p \mid \#N(U)/U$$

Cauchy: Finde in $N(U)/U$ eine Untergruppe $\underline{U}' \subseteq N(U)/U$ von Ordnung $\#\underline{U}' = p$. Setze $U' := \pi^{-1}(\underline{U}')$. Diese Gruppe hat dann p^{i+1} viele Elemente und $U' \subseteq N(U)$, also $U \subseteq U'$ normal. \square

Satz 4.21 (Sylow-Satz 2)

Sei G eine endliche Gruppe: Zu jeder p -Untergruppe $H \subseteq G$ und jeder p -Sylowgruppe $P \subseteq G$ gibt es $g \in G : gHg^{-1} \subseteq P$.

Insbesondere: je zwei p -Sylowgruppen sind zueinander konjugiert!

Beweis. H wirkt auf die Menge $G/P =: M$.

$$\#G = p^n \cdot m \text{ wobei } p \nmid m \text{ und } \#P = p^n$$

$$\Rightarrow \#M = m \not\equiv 0 \pmod{p}$$

Mit Lemma 4.11 folgt $M_0 \neq \emptyset$.

Also gibt es $g \in G$ sodass $gP \in G/P$ Fixpunkt von H ist.

Für alle $h \in H$ gilt $h \cdot g \cdot P = g \cdot P$.

$$\Rightarrow g^{-1}hg \cdot P = P \forall h \in H.$$

$$\forall h \in H : g^{-1}hg \in P \Rightarrow g^{-1}Hg \subseteq P$$

\square

Satz 4.22 (Sylow-Satz 3)

Sei G eine endliche Gruppe $s_p = \#p$ -Sylowgruppen

$$\Rightarrow s_p \mid \#G \text{ und } s_p \equiv 1 \pmod{p}$$

Beweis. Betrachte die Wirkung von G auf $\text{subgrp}(G) = \{H \subset G \mid H \text{ Untergruppe}\}$ durch Konjugation: $(g, H) \mapsto g^{-1}Hg$.

Alle p -Sylow Untergruppen bilden eine Bahn mit Länge s_p .

Die Länge einer Bahn teilt $\#G$, also teilt $s_p \#G$.

Sei $P \subset G$ eine p -Sylow Untergruppe. P wirkt durch Konjugation auf die Menge der p -Sylow Untergruppen.

Die Fixpunkte dieser Wirkung sind

$$M_0 = \{Q \mid g^{-1}Qg = Q \ \forall g \in P\}$$

oder auch $Q \in M_0 \Leftrightarrow P \subset N(Q) = \{g \in G \mid g^{-1}Qg = Q\} \subseteq G$

Beobachte: P und Q sind p -Sylow Untergruppen von $N(Q)$.

Nach Sylow-Satz 2 sind beide zueinander konjugiert: Es gibt also $h \in N(Q)$ sodass $P = h^{-1}Qh = Q$. $\Rightarrow M_0 = \{P\}$. Mit Lemma 4.11 folgt $s_p \equiv \#M_0 = 1 \pmod p$. \square

4.4 Abelsche Gruppen

Sei G eine abelsche Gruppe. Für $n \in \mathbb{N}$ und $g \in G$ schreibe $n \cdot g = \underbrace{g + \dots + g}_{n\text{-mal}}$ und $(-n) \cdot a = -(n \cdot a)$.

Beachte: Für $n \in \mathbb{Z}$, und $g, h \in G$ gilt $n(a + b) = na + nb$.

Definition 4.23

Eine abelsche Gruppe G ist endlich erzeugt, falls es eine endliche Liste von Elementen $g_1, \dots, g_n \in G$ gibt, sodass jedes $g \in G$ als Linearkombination geschrieben werden kann.

$$g = \sum_{i=1}^n n_i g_i, \quad n_i \in \mathbb{Z}$$

Definition 4.24

Ein Erzeugendensystem $\{g_1, \dots, g_n\}$ heißt Basis falls gilt

$$0 = \sum_{i=1}^n n_i g_i \Rightarrow n_i = 0 \ \forall i$$

Wenn G eine Basis hat, heißt G frei.

Lemma 4.25

Wenn G frei ist, haben je zwei Basen dieselbe Länge. Die Länge heißt dann Rang von G .

Satz 4.26

Sei G eine endlich erzeugte abelsche Gruppe. Dann gibt es $r \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ und $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{Z}_{>0}$ mit $a_i \mid a_{i+1} \forall i \in \{1, \dots, n-1\}$ sodass

$$G \cong \mathbb{Z}^r \oplus \mathbb{Z}/(a_1) \oplus \dots \oplus \mathbb{Z}/(a_n)$$

r, a_1, \dots, a_n sind durch G eindeutig bestimmt.

Bemerkung: 1) Wir nennen r den Rang von G und a_1, \dots, a_n die Elementarteiler von G .

2) Die Summe $\mathbb{Z}/(a_1) \oplus \dots \oplus \mathbb{Z}/(a_n)$ ist der Torsionsanteil von G und \mathbb{Z}^r der freie Anteil von G .

3) Der Torsionsteil ist eindeutig bestimmte Untergruppe von G und ist $\text{Tors}(G) = \{g \in G \mid \text{ord}(g) < \infty\}$.

4) Der freie Anteil von G ist nicht notwendigerweise eindeutig bestimmt als Untergruppe, aber es gilt $\mathbb{Z}^r \cong G / \text{Tors}(G)$

4.5 Auflösbare Gruppen

Sei G eine Gruppe. Wir versuchen G zu verstehen.

Finde eine normale Untergruppe $N \subset G, 1 \neq N \neq G$. Wir betrachten N und G/N .

Definition 4.27

Eine Gruppe G heißt auflösbar, wenn es eine endliche Kette

$$G = N_k \supset N_{k-1} \supset N_{k-2} \supset \dots \supset N_1 \supset N_0 = \{e\}$$

gibt, sodass N_i normal in N_{i+1} ist und dass N_{i+1}/N_i abelsch ist für alle i .

Satz 4.28

Jede endliche p -Gruppe ist auflösbar.

Beweis. Sei G eine endliche p -Gruppe. Angenommen $G \neq \{e\}$. Dann ist $Z(G)$ ebenso nicht trivial.

Betrachte jetzt $G/Z(G)$ und beweise durch Induktion wie folgt:

Nehme an wir haben eine Auflösungskette

$$G/Z(G) = \tilde{N}_k \supset \tilde{N}_{k-1} \supset \dots \supset \tilde{N}_1 \supset \tilde{N}_0 = \{e\}$$

Sei $\varphi : G \rightarrow G/Z(G)$ die Quotientenabbildung und setze $N_i = \varphi^{-1}(\tilde{N}_i)$. Damit erhalten wir die Kette

$$G = N_k \supset N_{k-1} \supset \cdots \supset N_1 \supset N_0 = Z(G) \subset N_{-1} = \{e\}$$

$$\ker(q_i) = N_i \subset \underbrace{N_{i+1} \twoheadrightarrow \tilde{N}_{i+1} \twoheadrightarrow \tilde{N}_{i+1}/\tilde{N}_i}_{q_i}$$

$\Rightarrow N_i \subset N_{i+1}$ ist normal

$\Rightarrow N_{i+1}/N_i \cong \tilde{N}_{i+1}/\tilde{N}_i$ ist abelsch

□

Satz 4.29

Sei G eine endliche auflösbare Gruppe. Dann ist jede Untergruppe und jeder Quotient auflösbar.

Satz 4.30

Sei G eine auflösbare Gruppe, and sei $N \subset G$ eine normale Untergruppe.

Dann gibt es eine Auflösungskette

$$\{e\} \subset N_1 \subset \cdots \subset N_k \subset G$$

sodass

$$1) N \in \{\{e\}, N_1, \dots, N_k, G\}$$

$$2) N_{i+1}/N_i \text{ ist zyklisch mit primer Ordnung}$$

Beweis. 1) Sei $\{e\} \subset \tilde{N}_1 \subset \tilde{N}_2 \subset \cdots \subset \tilde{N}_l = N$ eine Auflösungskette für N .

Sei $N/N = \tilde{N}_l \subset \tilde{N}_{l+1} \subset \cdots \subset \tilde{N}_k = G/N$ eine Auflösungskette für G/N . Sei $q : G \rightarrow G/N$ dann is

$$\{e\} \subset \tilde{N}_1 \subset \cdots \subset \tilde{N}_l = N = q^{-1}(\tilde{N}_l) \subset q^{-1}(\tilde{N}_{l+1}) \subset \cdots \subset q^{-1}(\tilde{N}_k) = G$$

eine Auflösungskette für G .

2) Wenn $\{N_i\}$ eine Auflösungskette ist, dann ist $N_{i+1}/N_i = \mathbb{Z}/(a_1) \oplus \cdots \oplus \mathbb{Z}/(a_m)$ abelsch.

Sei p eine Primzahl die $|N_{i+1}/N_i|$ teilt. Dann sagt der Satz von Cauchy dass N_{i+1}/N_i eine zyklische Untergruppe H der Ordnung p hat sodass $\{e\} \subset H \subset N_{i+1}/N_i$.

$$\{e\} \subset N_1 \subset N_2 \subset \cdots \subset N_i \subset q^{-1}(H) \subset N_{i+1} \subset \cdots \subset N_k$$

□

Definition 4.31

Eine Gruppe G ist einfach, wenn die einzigen normalen Untergruppen $\{e\}$ und G sind.

Satz 4.32

Wenn G eine endliche einfache abelsche Gruppe ist, dann ist

$$G \cong \mathbb{Z}/(p)$$

für eine Primzahl p .

Satz 4.33

Für $n \geq 5$ ist S_n nicht auflösbar.

Beweis. Nutze den nächsten Satz. □

Satz 4.34

Für $n \geq 5$ ist A_n einfach.

Wobei $A_n = \{\sigma \in S_n \mid \text{sign}(\sigma) = 1\}$.

Beweis. Zwei Zutaten: Sei $\{e\} \neq N \subset A_n$ eine normale Untergruppe.

1) Wenn N ein 3-Zykel enthält, dann ist $N = A_n$

2) N enthält einen 3-Zykel

1) Sei $(abc) \in N$. Wir zeigen $(abd) \in N$.

Wir nehmen $\tau = (ab)(cd) \in A_n$. Dann ist $\tau\sigma\tau^{-1} = (bad)$.

Also ist $(abd) = (\tau\sigma\tau^{-1})^{-1} \in A_n$.

Weil N normal ist gilt $(abd) \in N$.

2) Sei $e \neq \sigma \in N$ ein Element, dass so viele Elemente von $\{1, 2, 3, \dots, n\}$ festhält wie möglich.

Angenommen σ fixiert $n - 3$ Elemente, dann ist σ ein 3-Zykel.

Angenommen σ fixiert $n - 4$ Elemente

$$\sigma = \begin{cases} (abcd) & \notin A_n \\ (ab)(cd) & \end{cases}$$

5 Anwendungen

Sei $e \in \{1, \dots, n\}$ verschieden von a, b, c und d . Setze $\tau = (cde) \in A_n$

Dann ist $\tilde{\sigma} = \tau\sigma\tau^{-1} = (ab)(de) \in N$ und $\tilde{\sigma}\sigma = (dce) \in N \not\subset$.

Angenommen σ ändert ≥ 5 Elemente. Schreibe σ also Produkt von disjunkten Zykeln absteigend geordnet nach Länge. Also

$$\sigma = \begin{cases} (abcde \dots)(\dots)(\dots) \dots \\ (abcd)(ef \dots) \dots \\ (abc)(de \dots) \\ (ab)(cd) \dots \end{cases}$$

Konjugiere jetzt σ durch $\tau = (bcd) \in A_n$, dann fixiert $\tau\sigma\tau^{-1} \in N$ mehr Elemente als σ .

Also enthält N einen 3-Zykel.

$\Rightarrow N = A_n$ also ist A_n einfach.

Für $n = 5$ und $\#A_5 = 60$

- Berechne eine Tabelle von Konjugationsklassen von A_5 .
- Wenn N normal ist, dann ist es eine Vereinigung von Konjugationsklassen.
- Auf der anderen Seite teilt $\#N \mid \#A_5 = 60$.

□

5 Anwendungen

5.1 Satz vom primitiven Element

Erinnerung: Sei L/k eine Körpererweiterung. Die Erweiterung heißt einfach, falls $a \in L$ existiert, mit $L = k(a)$. Solche $a \in L$ heißen primitiv.

Ziel: Sehr viele Erweiterungen sind einfach.

Satz 5.1 (Kriterium für Einfachheit)

Sei L/k eine Körpererweiterung dann sind äquivalent:

- 1) L/k ist einfach und algebraisch

5 Anwendungen

2) *Es gibt nur endlich viele Zwischenkörper*

Beweis. 1) \Rightarrow 2) Angenommen L sei einfach und algebraisch. Wähle primitives Element $a \in L$. Das Minimalpolynom von a sei $f_k(x) \in k[x] \subseteq L[x]$.

Beobachtung: Wenn Z ein Zwischenkörper ist, dann ist a algebraisch über Z und hat Minimalpolynom $f_Z(x) \in Z[x] \subseteq L[x]$.

Es gilt: im Ring $L[x]$ ist f_Z ein normierter Teiler von f_k .

Habe also Abbildung

$$\{\text{Zwischenkörper}\} \xrightarrow{\phi} \underbrace{\{\text{norm. Polynome in } L[x], \text{ die Teiler von } f_k \text{ sind}\}}_{\text{endl. weil } L[x] \text{ faktoriell ist}}$$

Wir möchten zeigen: diese Abbildung ist injektiv. Dazu hätten wir gerne eine Abbildung η sodass $\eta \circ \phi = \text{Id}$.

Das geht so: Gegeben Polynom $f(x) = \sum_{i=0}^{n-1} b_i x^i + x^n$. Dann betrachte den Körper $\eta(f) = k(b_0, \dots, b_{n-1})$.

Um zu prüfen, ob $\eta \circ \phi = \text{Id}$, sei Z ein Zwischenkörper. Dann sei $f_Z(x) = \phi(Z) \in Z[x] \subseteq L[x]$.

Da die Koeffizienten von f_Z alle aus Z sind, ist $\eta(f_Z) \subseteq Z$.

Sehe: $f_Z \in \eta(f_Z)[x]$ ist irreduzibel, hat also Nullstelle $\Rightarrow f_Z$ ist Minimalpolynom von a über $\eta(f_Z)$.

$$\Rightarrow [L : Z] = [Z(a) : Z] = \deg f_Z = [L : \eta(f_Z)] = [\eta(f_Z)(a) : \eta(f_Z)]$$

$$\Rightarrow [Z : \eta(f_Z)] = 1 \Rightarrow Z = \eta(f_Z)$$

2) \Rightarrow 1) Angenommen es gibt nur endlich viele Zwischenkörper.

L ist algebraisch: Widerspruch! Angenommen es gäbe ein transzendentes Element a . Dann $L \supseteq k(a) \supseteq k$ ein Zwischenkörper, und $k(a) \simeq k(x)$ den rationalen Funktionen in einer Variablen.

Dann haben wir aber Unterkörper $k(a) \supsetneq k(a^2) \supsetneq k(a^4) \dots$

Wir haben also ∞ viele Zwischenkörper. \nexists

5 Anwendungen

L ist einfach: Die Körpererweiterung L/k ist sogar endlich, also $L = k(a_1, \dots, a_n)$ für geeignete $a_i \in L$. Denn durch Adjunktion

$$k \subseteq k(a_1) \subseteq k(a_1, a_2) \subseteq \dots$$

konstruieren wir Ketten von Zwischenkörpern, es gibt aber nur endlich viele!

Falls k endlich ist, dann ist L auch endlich (weil endliche Erweiterungen von endlichem Körper) und L^* ist zyklisch. Finde also $a \in L^*$ sodass $L^* = \{a, a^2, a^3, \dots, a^n\}$

$\Rightarrow k(a) = L$, also ist a primitiv!

Sei also ab sofort k unendlich.

Wir wissen schon: es gibt endlich viele $a_1, \dots, a_n \in L$ sodass $L = k(a_1, \dots, a_n)$. Betrachte Abbildung

$$\begin{aligned} k &\longrightarrow \text{Zwischenkörper} \\ \lambda &\longmapsto k(a_1 + \lambda a_2) \end{aligned}$$

Finde also $\lambda_1 \neq \lambda_2 \in k$ sodass $k(a_1 + \lambda_1 a_2) = k(a_1 + \lambda_2 a_2) = Z$.

Wir wissen: $Z \subseteq k(a_1, a_2)$ und wissen auch: $\lambda_2(a_1 + \lambda_1 a_2) - \lambda_1(a_1 + \lambda_2 a_2) = (\lambda_2 - \lambda_1)a_1 \in Z$. $\Rightarrow a_1 \in Z$.

Analog folgt auch $a_2 \in Z$.

Insgesamt: $k(a_1 \ddot{u} \lambda_1 a_2) = k(a_1, a_2)$

also $k(a_1, a_2, \dots, a_n) = k(a_1 \ddot{u} \lambda_1 a_2, a_3, \dots, a_n)$.

Wiederhole das Argument, erhalte primitives Element $a \in L$. □

Satz 5.2 (Satz vom primitiven Element)

Sei L/k eine separable, endliche Körpererweiterung. Dann ist $L(k)$ einfach.

Beweis. Sei $N \subset \bar{k}$ die normale Hülle von L . Dann ist N/k endlich und galois'sch. Dann gibt es maximal endlich viele Zwischenkörper $N \supseteq \dots \supseteq k$. (genau so viele wie $\text{Gal}(N/k)$ Untergruppen hat) $\Rightarrow L/k$ hat endlich viele Zwischenkörper und ist damit einfach. □

5.2 Kreisteilungskörper

Ziel: Antwort auf die Frage, ob das regelmäßige n -Eck konstruierbar ist.

5 Anwendungen

Dazu betrachte Zerfällungskörper L_n von $x^n - 1 \in \mathbb{Q}[x]$, genannt n -te Kreisteilungskörper.

Wir wissen: $L_n \subseteq \mathbb{C}$, die Nullstellen von $x^n - 1$ heißen n -te Einheitswurzeln. Die Menge der n -ten Einheitswurzeln bilden zyklische Untergruppe von \mathbb{C}^* , eine Einheitswurzel heißt primitiv, wenn sie die Gruppe erzeugt.

Ganz allgemein: Identifiziere die Gruppe der n -ten Einheitswurzeln $\{e^{\frac{2\pi i}{n} \cdot j} \mid 1 \leq j \leq n\}$ und $\mathbb{Z}/(n)$.

Wissen schon: Die j -te Einheitswurzel ist primitiv $\Leftrightarrow \text{ggT}(j, n) = 1 \Leftrightarrow$ Restklasse von j ist Einheit in $\mathbb{Z}/(n)$.

Muss primitive Einheitswurzeln verstehen, um die irreduziblen Faktoren von $x^n - 1$ (und damit L_n) zu verstehen. Wie viele primitive Einheitswurzeln gibt es?

Definition 5.3

Die Abbildung

$$\begin{aligned} \mathbb{N} &\xrightarrow{\varphi} \mathbb{N} \\ n &\mapsto \#\{\text{prim } n\text{-te Einheitswurzeln}\} \end{aligned}$$

heißt Eulersche φ -Funktion.

Satz 5.4

Es gilt:

1) Wenn $n, m \in \mathbb{N}$ teilerfremd sind $\Rightarrow \varphi(n \cdot m) = \varphi(n) \cdot \varphi(m)$

2) Wenn $p \in \mathbb{N}$ prim ist $\alpha \in \mathbb{N} \Rightarrow \varphi(p^\alpha) = p^{\alpha-1}(p-1)$

3) Dann

$$\varphi(p_1^{\alpha_1} \cdot \dots \cdot p_n^{\alpha_n}) = p_1^{\alpha_1-1} \cdot \dots \cdot p_n^{\alpha_n-1} (p_1 - 1) \cdot \dots \cdot (p_n - 1)$$

falls p_1, \dots, p_n paarweise verschiedene Primzahlen sind.

Beweis. 1) Chinesischer Restsatz: $\mathbb{Z}/(n \cdot m) = \mathbb{Z}/(n) \times \mathbb{Z}/(m)$ also

$$(\mathbb{Z}/(n \cdot m))^* = (\mathbb{Z}/(n))^* \times (\mathbb{Z}/(m))^*$$

also $\varphi(n \cdot m) = \varphi(n) \cdot \varphi(m)$

2) Die Nullteiler (= nicht Einheiten) im Ring $\mathbb{Z}/(p^\alpha)$ sind genau die Restklassen der j mit $\text{ggT}(j, p^\alpha) \neq 1$. Das sind exakt:

$$p, 2 \cdot p, 3 \cdot p, \dots, p^{\alpha-1}p$$

also $p^{\alpha-1}$ viele. Also $\#\text{Einheiten} = p^\alpha - p^{\alpha-1} = p^{\alpha-1} \cdot (p-1)$ □

Definition 5.5

Das n -te Kreisteilungspolynom ist

$$\phi_n(x) = \prod_{\substack{\xi \text{ eine prim} \\ n\text{-te EHW}}} (x - \xi) \in \mathbb{C}[x]$$

Dann $\deg \phi_n = \varphi(n)$.

Bemerkung: ϕ_n kann man ganz gut ausrechnen! Denn

$$\phi_n(x) = \prod_{\substack{\xi \text{ eine} \\ n\text{-te EHW}}} (x - \xi)$$

Wenn ξ jetzt irgendeine n -te Einheitswurzel ist, mit $\text{ord}(\xi) = d$, dann ist $d \mid n$ und ξ ist primitive d -te Einheitswurzel.

$$\Rightarrow x^n - 1 = \prod_{\substack{\xi \text{ eine} \\ n\text{-te EHW}}} (x - \xi) = \prod_{d \mid n} \prod_{\substack{\xi \text{ eine prim} \\ n\text{-te EHW}}} (x - \xi) = \prod_{d \mid n} \phi_d(x)$$

Wissen noch: $\phi_1(x) = x - 1$

Falls p prim:

$$x^p - 1 = \phi_1(x) \cdot \phi_p(x) \Rightarrow \phi_p(x) = \frac{x^p - 1}{x - 1} = x^{p-1} + x^{p-2} + \dots + 1$$

Analog:

$$x^{15} - 1 = \phi_1(x) \cdot \phi_3(x) \cdot \phi_5(x) \phi_{15}(x)$$

$$\phi_{15}(x) = \frac{x^{15} - 1}{(x - 1)(x^2 + x + 1)(x^4 + x^3 + x^2 + x + 1)} = x^8 - x^7 + x^5 - x^4 + x^3 - x + 1$$

Bemerkung: Für alle n gilt sogar $\phi_n \in \mathbb{Z}[x]$

Bemerkung: Für alle n ist ϕ_n irreduzibel.

Zusammenfassung:

- L_n ist Zerfällungskörper von $x^n - 1$, also L_n/\mathbb{Q} ist Galois

5 Anwendungen

- Wenn ξ eine primitive n -te Einheitswurzel ist, dann ist $L_n = \mathbb{Q}(\xi)$. Minimalpolynom von ξ ist ϕ_n .

$$\Rightarrow [L_n : \mathbb{Q}] = \phi(n) = \#(\mathbb{Z}/(n))^*$$

Satz 5.6

$$\text{Gal}(L_n/\mathbb{Q}) \cong (\mathbb{Z}/(n))^*$$

Beweis. Müssen injektiven Gruppenmorphismus finden! Wähle primitive Einheitswurzel ξ . Gegeben $\sigma \in \text{Gal}(L_n/\mathbb{Q})$ betrachte $\sigma(\xi)$. Dies ist primitive n -te Einheitswurzel, weil σ die Nullstellen von ϕ_n permutiert.

Also: $\sigma(\xi) = \xi^{r_\sigma}$ wobei $r_\sigma \in (\mathbb{Z}/(n))^*$.

Nachrechnen: Die Abbildung

$$\begin{aligned} \text{Gal}(L_n/\mathbb{Q}) &\longrightarrow (\mathbb{Z}/(n))^* \\ \sigma &\longmapsto r_\sigma \end{aligned}$$

ist Gruppenmorphismus. Die Abbildung ist injektiv, denn σ ist durch $\text{Bild}(\sigma(\xi))$ festgelegt, denn $L_n = \mathbb{Q}(\xi)$. □

Satz 5.7 (nach ein Satz von Gauß)

Das reguläre n -Eck ist genau dann konstruierbar, wenn n von der Form

$$n = 2^\alpha \cdot p_1 \cdot \dots \cdot p_r$$

ist, wobei $\alpha \in \mathbb{N}$, und p_i sind unterschiedliche Primzahlen der Form $2^{n_i} + 1$.

Bemerkung: Angenommen $r = m \cdot l$ mit l ungerade

$$\Rightarrow 2^\nu + 1 = (2^{m+1} + 1) \cdot (2^{m(l-1)} - 2^{m(l-2)} + \dots - 2^l + 1)$$

keine Primzahl.

Inhalt... Konsequenz: Bei den Zahlen $2^{n_i} + 1$ aus dem Satz von Gauß darf n_i keine ungeraden Primteiler haben. d.h. n_i ist 2-er Potenz.

Sprache: Primzahlen der Form

$$2^{(2^{m_i})} + 1$$

heißen Fermatsche Primzahlen.

Beweis der Notwendigkeit von Gauß Bedingung. Sei n gegeben, sodass das reguläre n -Eck konstruierbar ist. $e^{\frac{2\pi i}{n}} \in \text{Kons}(\{0, 1\})$.

Wir wissen schon: dann ist $\underbrace{[\mathbb{Q}(\xi) : \mathbb{Q}]}_{\varphi(n)} = 2^m$ für geeignete $m \in \mathbb{N}$.

Zerlegen n in Primfaktoren:

$$n = \prod p_i^{\alpha_i}$$

wobei p_i Primzahlen $\alpha_i \in \mathbb{N}$.

Dann

$$\varphi(n) = \prod p_i^{\alpha_i-1} \prod (p_i - 1) \leftarrow \text{soll 2-er Potenz sein}$$

Also in Primfaktorzerlegung von n dürfen alle ungeraden Primfaktoren maximal mit Multiplizität 1 auftreten und müssen Fermatsch sein! \square

Die Hinreichendheit der Gaußschen Bedingung folgt aus diesem Satz:

Satz 5.8

Sei $\{0, 1\} \subseteq M \subseteq \mathbb{C}$, sei $k = \mathbb{Q}(M \cup \overline{M})$, sei $z \in \mathbb{C}$. Dann ist die Zahl z mit Zirkel und Lineal aus M konstruierbar, wenn der Zerfällungskörper L/k des Minimalpolynoms von z über k Grad $[L : k] = 2^m$ hat.

Beweis. L/k ist separabel, normal und endlich, also galois'sch, $\text{Gal}(L/k) = 2^m$ ist also eine 2er-Gruppe.

Sylow \Rightarrow finde Kette von Untergruppen

$$\{1\} = N_0 \subsetneq N_1 \subsetneq N_2 \subseteq \cdots \subseteq N_l = \text{Gal}(L/K)$$

Wobei für alle i gilt:

- N_i ist normal in N_{i+1}
- $N_{i+1}/N_i \simeq \mathbb{Z}/(2)$

Hauptsatz der Galoistheorie: dazu gehört Kette von Zwischenkörpern

$$L = Z_l \supsetneq Z_{l-1} \supsetneq \cdots \supsetneq Z_0 = k$$

sodass für alle i : Z_i/Z_{i-1} ist galois'sch mit Gruppe $\mathbb{Z}/(2)$, also insbesondere $[Z_i : Z_{i-1}] = 2$.

$\Rightarrow \forall i$: Z_i entsteht aus Z_{i-1} durch Adjunktion einer Quadratwurzel. Aber: Quadratwurzeln können wir mit Zirkel und Lineal konstruieren. \square

5.3 Das Quadratische Reziprozitätsgesetz

Sei p eine Primzahl. Sei $a \in \mathbb{Z}$ kein Vielfaches von p . Nenne a einen quadratischen Rest modulo p wenn die Gleichung $x^2 \equiv q \pmod{p}$ in \mathbb{Z} eine Lösung hat. Ansonsten nenne a quadratischen Nichtrest \pmod{p} .

Frage: Wie viele quadratische Reste gibt es? Wie können wir entscheiden, ob gegebener $a \in \mathbb{Z}$ ein Quadratischer Rest ist.

Erste Beobachtung

- Die Eigenschaft: $e \notin (p) \Leftrightarrow$ Restklasse $\underline{a} \neq 0$ in $\mathbb{Z}/(p) = \mathbb{F}_p$. Also: $\underline{a} \in \mathbb{F}_p^*$.
- a ist quadratischer Rest $\pmod{p} \Leftrightarrow \underline{a}$ ist Quadrat in $\mathbb{F}_p^* \Leftrightarrow \underline{a}$ liegt im Bild des Gruppenmorphismus

$$\begin{aligned} q : \mathbb{F}_p^* &\longrightarrow \mathbb{F}_p^* \\ n &\longmapsto n^2 \end{aligned}$$

Frage: Wie viele Elemente von \mathbb{F}_p^* sind Quadrate?

Antwort: Falls $p = 2$: Alle! $\mathbb{F}_p^* = \{1\}$

Antwort: Sei $p \neq 2$. Dann $\ker(q) = \{\pm 1\}$

Also ist $\# \operatorname{Im}(q) = \# \mathbb{F}_p^* / \# \ker = \frac{p-1}{2}$

Das heißt: genau die Hälfte der Elemente in \mathbb{F}_p^* sind Quadrate.

Frage: Ist unser gegebenes $a \in \mathbb{F}_p^*$ jetzt ein Quadrat?

Antwort 1: Ausprobieren, indem man alle Elemente quadriert. Das macht aber sehr viel Mühe!

Antwort 2 (Euler): Man betrachte folgenden Gruppenmorphismus:

$$\begin{aligned} e : \mathbb{F}_p^* &\longrightarrow \mathbb{F}_p^* \\ n &\longmapsto n^{\frac{p-1}{2}} \end{aligned}$$

Man erinnere sich: \mathbb{F}_p^* ist zyklisch mit $p-1$ Elementen gegeben $n \in \mathbb{F}_p^*$, dann $\operatorname{ord}(n) \mid p-1$

5 Anwendungen

$$\Rightarrow \text{ord}(n^{\frac{p-1}{2}}) \in \{1, 2\}$$

Wenn n ein Quadrat ist, $n = m^2$ in \mathbb{F}_p^* , dann

$$n^{\frac{p-1}{2}} = m^{p-1} = 1$$

Wir sehen insgesamt: Die Abbildung e ist ein Morphismus

$$e : \mathbb{F}_p^* \longrightarrow (\{\pm 1\}, \cdot) \subseteq \mathbb{F}_p^*$$

Also: $\# \ker(e) = \#\mathbb{F}_p^*/2 = \frac{p-1}{2} = \#\text{Quadrate}$.

Da alle Quadrate im Kern liegen $\Rightarrow \ker = \{\text{Quadrate}\}$

Euler Kriterium: a ist Quadrat in \mathbb{F}_p^* genau dann wenn $a^{\frac{p-1}{2}} = 1$ in \mathbb{F}_p^* .

Die Abbildung e ist multiplikativ.

Das Euler Kriterium ist viel besser, macht aber immer noch sehr viel Arbeit. Die beste Lösung: quadratische Reziprozität