Algebra WiSe 17/18 Definitionen

Prof. Scheithauer
Mitschrift von Daniel Kallendorf
Danke an Sandra Kühne für ihre Mitschriften

Version vom 21. März 2018

Inhaltsverzeichnis

1 Wiederholung

Satz 1.1. *Seien $\mathfrak{a} \subset A$, dann*

a) $\mathfrak{a}$ ist Primideal $\Leftrightarrow A/\mathfrak{p}$ ist Integritätsbereich (nullteilerfrei)

b) $\mathfrak{a}$ ist maximales Ideal $\Leftrightarrow A/\mathfrak{a}$ ist ein Körper.

Beweis. a) $\Rightarrow$ Sei $a + \mathfrak{a} \in A/p$ ein Nullteiler, dann existiert $x \in A \setminus p$, sodass

$$(a + \mathfrak{a})(x + \mathfrak{a}) = ax + \mathfrak{a} = p$$

Also ist $ax \in \mathfrak{a}$ und da $\mathfrak{a}$ Primideal folgt $a \in \mathfrak{a}$.

$\Leftarrow$ Sei $A/\mathfrak{a}$ Integritätsbereich und sei $ab \in \mathfrak{a}$, dann ist

$$(a + \mathfrak{a})(b + \mathfrak{a}) = ab + \mathfrak{a} = \mathfrak{a}$$

Da $A/\mathfrak{a}$ Integritätsbereich ist gilt $a + \mathfrak{a} = \mathfrak{a}$ oder $b + \mathfrak{a} = \mathfrak{a}$, also $a \in \mathfrak{a}$ oder $b \in \mathfrak{a}$.

b) $\Rightarrow$ Sei $I/\mathfrak{a}$ ein Ideal in $A/\mathfrak{a}$.
Hierbei ist I eine Ideal in A welches $\mathfrak{a}$ enthält, also $\mathfrak{a} \subseteq I \subseteq A$.
Da $\mathfrak{a}$ maximal ist, muss $\mathfrak{a} = I$ oder $\mathfrak{a} = A$. Also ist $A/\mathfrak{a}$ ein Körper.

$\Leftarrow$ Sei I ein Ideal in A mit $\mathfrak{a} \subseteq I \subseteq A$.
Dann ist $I/\mathfrak{a}$ eine Ideal in $A/\mathfrak{a}$, d.h.

$$I/\mathfrak{a} = \mathfrak{a}/\mathfrak{a} \quad \text{oder} \quad I/\mathfrak{a} = A/\mathfrak{a}$$

Damit folgt $I = \mathfrak{a}$ oder $I = \mathfrak{A}$.

□

Bemerkung. Insbesondere ist jedes maximale ideal prim.

Definition 1.2. Sei $A \neq \emptyset$. Eine **Relation** auf A ist eine Teilmenge $R \subset A \times A$.
R heißt **partielle Ordnung** wenn

a) $\forall a \in A$ gilt $(a, a) \in R$ (Reflexivität)

b) $\forall a, b, c \in A$ gilt $(a, b) \in R$ und $(b, c) \in R$, so gilt auch $(a, c \in R)$ (Transitivität)

c) $\forall a, b \in A$ mit $(a, b \in R)$ und $(b, a) \in \mathbb{R}$, dann gilt $a = b$. (Antisymmetrie)

Ist R eine partielle Ordnungn auf A so schrieben wir für $(a, b) \in R$ auch $a \leq b$.
Zwei Elemente $a, b \in A$ heißen **vergleichbar**, wenn $a \leq b$ oder $b \leq a$ ist.
Eine Teilmenge $B \subset A$ heißt **Kette**, wenn für alle $a, b \in B$ gilt, dass $a \leq b$ oder $b \leq a$.

Lemma 1.3. *Sei $A \neq \emptyset$ partielle geordnet. Hat jede Kette $B \neq \emptyset$ in A eine obere Schranke in A, d.h. es gibt ein $a \in A$,sodass $b \leq a$ für alle $b \in B$., so besitzt A ein maximales Element.*

Theorem 1.4. *Sei $A \neq 0$ ein Ring, dann besitzt A ein maximales Ideal.*

Beweis. Sei $\Sigma = \{I \subset A \mid I \text{ ist Ideal}\}$. Dann ist $O \in \Sigma$ und Σ ist partielle geordnet durch die mengentheoretische Inklusion.
Sei $(C_i)_{i \in I}$ eine Kette in Σ. Dann ist

$$C = \bigcup_{i \in I} C_i$$

ein Ideal in A. Aus $I \notin C_i$ für alle $i \in I$ folgt, dass $I \notin C$,d.h. $C \in \Sigma$. Somit hat Σ ein maximales Element. □

Korollar 1.5. *Sei A ein Ring und $I \subsetneq A$ ein Ideal, dann ist I in einem maximalen Ideal enthalten.*

Korollar 1.6. *Sei A ein Ring und $a \in A \setminus A^*$. Dann ist a in einem maximalen Ideal enthalten.*

Beweis. Betrachte $(a) = Aa \neq A$. □

1.1 Lokale Ringe

Definition 1.7. Ein Ring A mit nur eine maximalen Ideal $\mathfrak{m}$ heißt **lokaler Ring** und $A/\mathfrak{m}$ heißt **Restklassenkörper** von A.

Satz 1.8. *Sei A ein Ring und $\mathfrak{m} \neq A$ eine Ideal in A.*
Ist jedes $x \in A \setminus +m$ eine Einheit, si ist A ein lokaler Ring mit maximalen Ideal $\mathfrak{m}$.

Beweis. Für jedes Ideal $I \subsetneq A$ gilt $I \cap A^* = \emptyset$, enthält also keine Einheiten und ist somit in $\mathfrak{m}$ enthalten. Somit ist $\mathfrak{m}$ das einzige maximale Ideal. □

Satz 1.9. *Sei A ein Ring und $\mathfrak{m} \subset A$ eine maximales Ideal, sodass jedes Element m eine Einheit in A ist. Dann ist A ein lokaler Ring.*

Beispiel 1.10.1. Jedes Ideal in $\mathbb{Z}$ ist der Form $(m) = \mathbb{Z}m$ mit $m \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$.
Es gilt, dass (m) genau dann Primideal ist, wenn $m = 0$ oder m Primzahl.
Ist $\mathfrak{p}$ Primzahl, so ist (p) maximal.

Sei K ein Körper und $A = K[X_1, ..., X_n]$. Dann ist der Kern des Homomorphismus $\phi : A \to K, f \mapsto f(0)$ ein maximales Ideal in A.

1.2 Radikale

Satz 1.11. *Sei A eine Ring und $N = \{a \in A \mid a \text{ ist nilpotent}\}$. Dann ist N ein Ideal in A und A/N enthält keine nilpotenten Elemente $\neq 0$.*

Beweis.

- Zz: N ist eine additive Untergruppe von A
  Seien $x, y \in N$ mit $x^n = y^m = 0$. Dann ist

  $$(x+y)^{n+m} = \sum_{k=0}^{n+m} \binom{n+m}{k} x^k y^{n+m-k} = 0$$

  denn kann nicht sowohl $k < n$, als auch $n + m - k < m$ sein.

- Z.z. $AN \subset N$.
  Sei $x \in N$ mit $x^n = 0$ und $a \in A$. Dann ist $(ax)^n = a^n x^n = 0$, also $ax \in N$.
  Also ist N Ideal in A.
  Sei nun $a + N \in A/N$ nilpotent. Dann ist $(a+N)^n = 0$ für ein $n > 0$.
  Also ist $a^n + N = 0$, also $a^n \in N$.
  Dann ist $(a^n)^m = 0$ udn somit $a^{nm} = 0$, also nilpotent. Es folgt, dass $a \in N$.

□

Definition 1.12. Das Ideal $N = \{a \in A \mid a \text{ ist Nilpotent}\}$ heißt das **Nilikal** von A.

Definition 1.13. Sei A ein Ring dann nennt man $J = \{x \in A \mid \forall y \in A : 1 - xy \text{ ist Einheit}\}$ das **Jacobsonradikal**.

Satz 1.14. *Sei A eine Ring, dann ist*

a) das Nilradikal von A der Schnitt aller Primideal von A.

b) das Jacobsonradikal von A der Schnitt aller Maximalen Ideale von A.

Definition 1.15. Sei A ein Ring und $\mathfrak{a} \subset A$ ein Ideal in A. Dann wird

$$r(a) := \{x \in A \mid x^n \in \mathfrak{a} \text{ für ein } n > 0\}$$

als **Radikal** von $\mathfrak{a}$ bezeichnet. (auch $\mathrm{Rad}(\mathfrak{a})$, $\sqrt{\mathfrak{a}}$)

Beweis. Sei $\pi : A \to A/\mathfrak{a}$ die Kanonische Projektion. Dann ist $r(a) = \pi^{-1}\left(N_{A/\mathfrak{a}}\right)$. Also ist $r(a)$ ein Ideal. □

Satz 1.16. *Sei $\mathfrak{a}, \mathfrak{b}$ ein Ideal, dann gilt*

a) $\mathfrak{a} \subseteq r(\mathfrak{a})$

b) $r\big(r(\mathfrak{a})\big) = r(\mathfrak{a})$

c) $r(\mathfrak{a}\mathfrak{a}) = r(\mathfrak{a} \cap \mathfrak{b}) = r(\mathfrak{a}) \cap r(\mathfrak{b})$

d) $r(\mathfrak{a}) = A \Leftrightarrow \mathfrak{a} = A$.

e) $r(\mathfrak{a} + \mathfrak{b}) = r\big(r(\mathfrak{a}) + r(\mathfrak{b})\big)$.

1.2.1 Operationen auf Radikalen

Definition 1.17. Sein A ein Ring.

a) Seien $\mathfrak{a}, \mathfrak{b} \subset A$ Ideale in A.
Dann ist
$$a + b =: \{x + y \mid x \in \mathfrak{a}, y \in \mathfrak{b}\}$$
ein Ideal in A.

b) Analog: Sei $(\mathfrak{a}_i)_{i\in I}$ eine Familie von Idealen in A, für eine Indexmenge I.
Dann ist
$$\sum_{i\in I} \mathfrak{a}_i =: \left\{\sum_{i\in I} x_i \mid x_i \in \mathfrak{a}_i \text{ und fast alle } x_i = 0\right\}$$
ein Ideal in A.

c) Sei $(\mathfrak{a}_i)_{i\in I}$ eine Familie von Idealen in A, für eine Indexmenge I. Dann ist der Schnitt
$$\bigcap_{i\in I} \mathfrak{a}_i$$
ein Ideal in A.

d) Seien $\mathfrak{a}, \mathfrak{b} \subset A$ Ideal in A. Dann ist
$$\mathfrak{a}\mathfrak{b} = \left\{\sum_{i=1}^{n} a_i b_i \mid a_i \in \mathfrak{a}, b_i \in \mathfrak{b}, n \in \mathbb{N}\right\}$$
ein Ideal in A.

Satz 1.18. *Die Operationen Summe, Durchschnitt und Produkt auf Idealen sind kommutativ und Assoziativ und es gilt das Distributivgesetz.*

Definition 1.19. Sei A ein Ring. Zwei Ideale $\mathfrak{a}, \mathfrak{b} \subseteq A$ heißen **teilerfremd**, wenn $\mathfrak{a} + \mathfrak{b} = A = (1)$.

Satz 1.20. *Sei A ein Ring, $\mathfrak{a}, \mathfrak{b} \subset A$ Ideale in A. Dann sind äquivalent:*

a) $\mathfrak{a}, \mathfrak{b}$ sind Teilerfremd

b) Es gibt ein $x \in \mathfrak{a}, y \in \mathfrak{b}$, sodass $x + y = 1$.

Beweis. **2)⇒1)** Sei $z \in A$ und $x \in \mathfrak{a}, y \in \mathfrak{b}$, mit $x + y = 1$.
Dann ist $z = zx + zy$, wobei $zx \in \mathfrak{a}, zy \in \mathfrak{b}$, also $z \in \mathfrak{a} + \mathfrak{b}$.

1)⇒2)

□

Satz 1.21. *Sei A ein Ring und seinen $\mathfrak{a}_1, ..., \mathfrak{a}_n$ paarweise teilerfremde Ideal in A. Dann gilt*

a) Jedes $\mathfrak{a}_i$ ist teilerfremd zu $\prod_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} \mathfrak{a}_j$.

b) Es gilt

$$\prod_{i=1}^{n} \mathfrak{a}_i = \bigcap_{i=1}^{n} \mathfrak{a}_i$$

Beweis. a) Sei i fest. Es gibt Elemente $x_j \in \mathfrak{a}_i, y_j \in \mathfrak{a}_j$ mit $1 = x_j + y_j$ für $i \neq j$. Dann ist

$$1 = \prod_{\substack{j=1 \\ j\neq i}} (x_j + y_j) = \underbrace{x}_{\in \mathfrak{a}_i} + \underbrace{\prod_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}}_{\in \prod_{\substack{j=1 \\ j\neq i}} \mathfrak{a}_j} \in \mathfrak{a}_i + \prod_{\substack{j=1 \\ j\neq i}} \mathfrak{a}_j$$

b) Durch Induktion über n.

$n = 2$ Sei $z \in \mathfrak{a} \cap \mathfrak{b}$. Schreieb $1 = x + y$ mit $x \in \mathfrak{a}, y \in \mathfrak{b}$. Dann ist $z = zx + zy \in \mathfrak{a}\mathfrak{b}$.

$n > 2$ Sei

$$\mathfrak{b} = \prod_{i=1}^{n-1} a_i$$

Wir nehmen an es gelte

$$\prod_{i=1}^{n-1} a_i = \prod_{i=1}^{n-1} \mathfrak{a}_i$$

Dann ist aber

$$\prod_{i=1}^{n} \mathfrak{a}_i = \mathfrak{a}_i \mathfrak{b}_i = \mathfrak{a}_i \cap \mathfrak{b} = \bigcap_{i=1}^{n} a_i$$

□

Definition 1.22. Sei A ein Ring und seinen $\mathfrak{a}_i, ..., \mathfrak{a}_n$ Ideale in A. Wir definieren die Abbildung

$$\phi : A \to \prod_{i=1}^{n} (A/\mathfrak{a}_i)$$
$$a \mapsto (a + \mathfrak{a}_1, ..., a + \mathfrak{a}_n)$$

Proposition 1.23. a) ϕ ist ein Ringhomomorphismus und

$$\mathrm{Kern}(\phi) = \bigcap_{i=1}^{n} \mathfrak{a}_i$$

b) ϕ ist genau dann surjektiv, wenn die $\mathfrak{a}_i$ paarweise disjunkt sind. Insbesondere ist

$$A/\prod_{i=1}^{n} \mathfrak{a}_i \simeq \prod_{i=1}^{n} A/\mathfrak{a}_i$$

Beweis. b) $\Rightarrow$ Sei ϕ surjektiv. Wir zeigen, dass $\mathfrak{a}_1$ und $\mathfrak{a}_2$ teilerfremd sind.
Es gibt ein $x \in A$ mit $\phi(x) = (1_{A/\mathfrak{a}_1}, 0, ..., 0)$.
Also ist $x = 1 \mod \mathfrak{a}_i$ und $x = x \mod \mathfrak{a}_2$.
Dann ist

$$1 = \underbrace{(1-x)}_{\in \mathfrak{a}_i} + \underbrace{x}_{\in \mathfrak{a}_2} \in \mathfrak{a}_1 + \mathfrak{a}_2$$

$\Leftarrow$ Seien un die $\mathfrak{a}_i$ paarweise teilerfremd.
Es reicht zu zeigen,dass es Elemente $x_i \in A$ mit

$$\phi(x_i) = (0, ..., 0, 1, 0, ..., 0)$$

(1 an der i-ten Position) gibt.
Wir zeigen für $i = 1$:
Da $\mathfrak{a}_1 + \mathfrak{a}_j = A$ für alle $j > 1$, gibt es $x_j \in \mathfrak{a}_1, y_j \in \mathfrak{a}_j$ mit $x_j + y_j = 1$
Sei nun

$$x := \prod_{i=2}^{n} y_j = \prod_{i=2}^{n} 1 - x_j = 1 \mod \mathfrak{a}_1$$

und $x = 0 \mod \mathfrak{a}_j$ für $j > 1$.

$\square$

1.3 Ringe von Brüchen

Definition 1.24. Sei A ein Ring. Eine Teilmenge $S \subset A$ heißt **multiplikativ abgeschlossen**, wenn

a) Für alle $s, t \in S$ gilt, dass $st \in S$

b) $1 \in S$.

Bemerkung 1.25. Auf $A \times S$ wird durch

$$(a, s) \sim (b, t) \Leftrightarrow (at - bs)u = 0 \text{ für ein } u \in S$$

eine Äquivalenzklasse definiert.
Für die Transitivität wird die multiplikative Abgeschlossenheit von S benötigt.
Die Äquivalenzklassen von (a, s) wird mit a/s bezeichnet.
Die Menge der Äquivalenzklasssen wir als $S^{-1}A$ geschrieben.

Definition 1.26. Seien $a/s, b/t \in S^{-1}A$. Man definiert

- $a/s + b/t := (at + bs)/st$
- $a/s \cdot b/t := ab/st$

Definition 1.27. Diese Verknüpfungen sind wohldefiniert und versehen $S^{-1}A$ mit einer Ringstruktur.
$S^{-1}A$ wird als der **Ring der Brüche** von A bezüglich S bezeichnet.

Beispiel 1.28. Sei $A = \mathbb{Z}$ und $S = \mathbb{Z} \setminus \{0\}$. Dann ist $S^{-1}A$ isomorph zu $\mathbb{Q}$.

Korollar 1.29. *Die Abbildung*

$$\varphi_S : A \to S^{-1}A$$
$$a \mapsto a/1$$

hat folgende Eigenschaften:

a) φ_S *ist ein Ringhomomorphismus. (i.A. nicht injektiv)*

b) Sei $s \in S$*, dann ist* $\varphi_S(s)$ *eine Einheit in* $S^{-1}A$*.*

c) $\mathrm{Kern}(\varphi_S) = \{a \in A \mid as = 0 \text{ für ein } s \in S\}$*.*

d) Jedes Element in $S^{-1}A$ *ist der Form* $\varphi_S(a)\varphi_S(s)^{-1}$ *für ein* $a \in A$*,* $s \in S$*.*

Beweis. b) Sei $s \in S$, dann ist $s/1 \cdot 1/s = s/s = 1/1 = 1_{S^{-1}A}$

c) Sei $a \in \mathrm{Kern}(\varphi_S)$, dann ist $a/1 = 0/1$, also $(a1 - 01)s = 0$ für ein $s \in S$. Also ist $as = 0$ für ein $s \in S$.

d) Sei $a/s \in S^{-1}A$. Dann ist

$$\varphi_S(a) = a/1 \qquad \varphi_S(s) = s/1 \qquad \varphi_S(s)^{-1} = 1/s$$

Es folgt

$$\varphi_S(a)\varphi(s)^{-1} = a/1 \cdot 1/s = a/s$$

□

Satz 1.30. *Seien* A, B *Ringe und* $S \subset A$ *multiplikativ abgeschlossen. Sei* $g : A \to B$ *ein Ringhomomorphismus, der 1)-3) aus erfüllt, dann gibt es einen eindeutigen Isomorphismus* $h : S^{-1}A \to B$ *mit* $h \circ \varphi_S = g$*.*

$$\begin{tikzcd} A \arrow[r, "g"] \arrow[d, "\varphi_S"] & B \\ S^{-1}A \arrow[ur, "h"'] & \end{tikzcd}$$

Definition 1.31. Sei A ein Integritätsbereich und $S = A \setminus \{0\}$. Dann nennt man $S^{-1}A$ den **Quotientenkörper**

Lemma 1.32. *Der Quotientenkörper ist ein Körper,* φ_S *ist injektiv und wir können* A *mit seinem Bild in* $S^{-1}A$ *identifizieren.*

Definition 1.33. Sei A ein Ring. Sei $\mathfrak{p}$ ein Primideal in A. Man schreibt $A_\mathfrak{p}$ für $S^{-1}A$ und nennt $A_\mathfrak{p}$ die **Lokalisierung** von A bezüglich $\mathfrak{p}$.

Lemma 1.34. *Sei* A *ein Ring. Sei* $\mathfrak{p}$ *ein Primideal in* A*.*
Dann ist $S = A \setminus \mathfrak{p}$ *multiplikativ Abgeschlossen.*

Lemma 1.35. *Sei* $A = \mathbb{Z}$ *und* $p \in \mathbb{Z}$ *eine Primzahl. Dann ist* $\mathbb{Z}_{(p)} = \{m/n \mid m/n \in \mathbb{Q}, p \not| n\}$*.*

Satz 1.36. *Sei* A *ein Ring und* $S \subset A$ *multiplikativ abgeschlossen. Dann ist*

a) Ist I *ein Ideal in* A *so ist auch* $S^{-1}I = \{a/s \mid a \in I\}$ *ein Ideal in* $S^{-1}A$

b) Die Ideale in $S^{-1}A$ *sind der Form* $S^{-1}I$*, wobei* I *ein Ideal in* A *ist.*

c) Sind I, J *Ideal in* A*, dann gilt*

$$S^{-1}(I + J) = S^{-1}I + S^{-1}J$$
$$S^{-1}(I \cap J) = S^{-1}I \cap S^{-1}J$$
$$S^{-1}(IJ) = (S^{-1}I)(S^{-1}J)$$

Beweis. Wir beweisen nur 2).
Sei J ein Ideal in $S^{-1}A$. Dann ist $I = \varphi_S^{-1}(J)$ ein Ideal in A und $J = S^{-1}I$:
Sei $a/s \in S^{-1}I$. Aus $I = \varphi_S^{-1}(J)$ folgt, dass $\varphi_S(a) \in J$. Also ist

$$a/s = \underbrace{a/1}_{\varphi_S(a)} \cdot \underbrace{1/s}_{\in S^{-1}A} \in J$$

d.h. $s \in \varphi_S^{-1}(J) = I$ und $a/s \in S^{-1}I$. □

1.4 Integritätsbereiche und Hauptidealringe

Definition 1.37. Sei A ein Ring. Ein Ideal der Form $(a) = Aa$ heißt **Hauptideal**.

Definition 1.38. Ein Ring A heißt **Hauptidealring**, wenn jede Ideal in A Hauptideal ist.

Definition 1.39. Ein Ring A heißt **euklidisch**, wenn es eine Abbildung

$$\lambda : A \setminus \{0\} \to \mathbb{N}_0$$

gibt, sodass zu je zwei Elementen $a, b \in A$ mit $b \neq 0$ Elemente $q, r \in A$ existieren mit $a = qb + r$ wobei $\lambda(r) < \lambda(b)$ oder $r = 0$.

Beispiel 1.40.
a) $\mathbb{Z}$ ist euklidisch unter $\lambda(x) = |x|$.
b) Sei K ein Körper. Dann ist $K[X]$ euklidisch mit $\lambda(f) = \deg(f)$.

Satz 1.41. *Sei A ein euklidischer Ring. Dann ist A ein Hauptidealring.*

Beweis. Sei $\mathfrak{a} \neq 0$ in Ideal in A. Dann hat

$$\lambda(x) \mid x \in a, x \neq 0$$

ein kleinstes Element, d.h. es gibt ein $x \in \mathfrak{a} \setminus \{0\}$ mit $\lambda(x) \leq \lambda(y)$ für alle $y \in \mathfrak{a} \setminus \{0\}$.
Es gilt $\mathfrak{a} = (x)$.
Sei $y \in a \setminus \{0\}$. Schreibe $y = qx + r$ mit $r = 0$ oder $\lambda(r) < \lambda(x)$.
Dann ist $r \in \mathfrak{a}$ und aus der Minimalität von $\lambda(x)$ folgt $r = 0$ und damit $\mathfrak{a} \subset (x)$. □

Definition 1.42. Sei A ein Ring und seinen $a, b \in A$.
$d \in A$ heißt **Größter gemeinsamer Teiler** von a und b, wenn gilt

a) $d|a$ und $d|b$.
b) Wenn es $g \in A$ gibt mit $g|a$ und $g|b$, dann muss $g|d$.

Wir schreiben $d = \gcd(a, b) = (a, b)$

Definition 1.43. Sei A ein Ring und seinen $a, b \in A$.
$d \in A$ heißt **kleinstes gemeinsames Vielfaches** von a und b, wenn gilt

a) $a|v$ und $b|v$.
b) Wenn es $g \in A$ gibt mit $a|g$ und $b|g$, dann muss $v|v$.

Wir schreiben $v = \operatorname{lcm}(a, b) = (a, b)$

Satz 1.44. *Sei A ein Hauptidealring und seien $a, b \in A$.*
Dann existiert ein $d = \gcd(a, b)$ und $v = \operatorname{lcm}(a, b)$ von a, b und es gilt

a) $(a) + (b) = (d)$

b) $(a) \cap (b) = (v)$

Beweis.

- Da A ein Hauptidealring ist, gilt $(a) + (b) = (d)$ für ein $d \in A$.
  Es gilt $a, b \in (d)$, also $d|a$ und $d|b$.
  Sei $g \in A$ mit $g|a$ und $g|b$. Dann ist $(a) \subset (g)$ und $(b) \subset (g)$.
  Daraus folgt, dass $(a) + (b) \subseteq (g)$, also $(d) \subset (g)$. Damit folgt $g|d$.
- Analog für lcm.

□

Definition 1.45. Sei A in Integritätsbereich. Zwei Elemente $a, b \in A$ heißen **assoziiert**, wenn

- $a|b$ und $b|a$.
- (äquivalent) $a = bu$ für ein $u \in A^*$.
- (äquivalent) $(a) = (b)$.

Man schreibt dann $a \sim b$.

Definition 1.46. Sei A in Integritätsbereich. Ein Element $p \in A$ heißt **prim**, **Primelement**, wenn

- $p \notin A^*$, $p \neq 0$ und aus $p|ab$ folgt $p|a$ oder $p|b$.
- (äquivalent) $p \neq 0$ und (p) ist Primideal.

Definition 1.47. Sei A in Integritätsbereich. $c \in A$ heißt **irreduzibel** oder **unzerlegbar**, wenn

a) für $c \notin A^*$ und $c \neq 0$ aus $c = ab$ folgt, dass $a \in A^*$ oder $b \in A^*$.

b) (äquivalent) für $c \neq 0$ für alle $a \in A$ gilt, dass aus $(c) \subset (a)$ folgt, dass $(a) = A$ oder $(a) = (c)$.

Satz 1.48. *Sei A ein Integritätsbereich und $p \in A$ prim. Dann ist p irreduzibel.*

Beweis. Sei $p = ab$, dann gilt $p|ab$. Es folgt $p|a$ oder $p|b$.
Angenommen $p|a$, dann ist $a = px$ für ein $x \in A$ und $p = pxb$. Es folgt, dass $p(1 - bx) = 0$ und da A Integritätsbereich ist $1 - bx = 0$.
Also muss $bx = 1$ also ist $b \in A^*$. □

Satz 1.49. *Sei A ein Hauptidealring und Integritätsbereich. Dann gilt für $c \in A$*

$$c \text{ prim} \Leftrightarrow c \text{ irreduzibel}$$

Beweis. Sei c irreduzibel, also ist (c) maximal. Daraus folgt, dass (c) Primideal ist und somit c prim. □

Definition 1.50. Ein Integritätsbereich heißt **faktoriell**, wenn

a) Jedes $a \in A \backslash A^*$, $a \neq 0$ zerfällt in ein Produkt von irreduziblen Elementen.

b) Die Zerlegung ist bis auf Reihenfolge und Einheiten eindeutig. D.h.

D.h. wenn $a = c_1 \cdot ... \cdot c_m = d_1 \cdot ... \cdot d_n$ mit c_1, d_1 irreduzibel, so folgt $m = n$ und es gibt $\pi \in S_n$ mit $c_1 \sim d_{\pi(i)}$ für alle $i = 1, ..., n$.

Bemerkung 1.51. Die Eindeutigkeit der Faktorisierung impliziert, dass es irreduzibles Element in einem faktoriellen Integritätsbereich prim ist.

Lemma 1.52. *Sei A ein Hauptidealring und S eine nichtleere Menge von Idealen in A. Dann hat S ein maximales Element (bezüglich $\subset$)*

Beweis. Angenommen S hat kein maximales Element. Dann gibt es zu jedem $\mathfrak{a}_1 \in S$ ein $\mathfrak{a}_2 \in S$ mit $\mathfrak{a}_1 \subsetneq \mathfrak{a}_2$. Es gibt also eine unendliche Kette

$$\mathfrak{a}_1 \subsetneq \mathfrak{a}_2 \subsetneq ...$$

von Idealen in S. Sei nun $\mathfrak{a} := \bigcup_{j=1}^{\infty} \mathfrak{a}_i$.
Dann ist a ein Ideal in A, also ist $\mathfrak{a}$ ein Hauptideal und $\mathfrak{a} = (x)$ für ein $x \in A$.
Dann folgt insbesondere, dass $x \in \mathfrak{a}$. Damit folgt, dass es $j_0 \in \mathbb{N}$ gibt, mit $x \in \mathfrak{a}_{j_0}$.
Somit ist $(x) \subset \mathfrak{a}_{j_0}$ und somit $\mathfrak{a} = \mathfrak{a}_{j_0}$.
Dies bedeutet aber, dass die Kette stationär wird, was ein Widerspruch zur Annahme ist. □

Theorem 1.53. *Sei A ein Integritätsbereich. Ist A ein Hauptidealring, so ist A faktoriell.*

Beweis. **Zerlegbarkeit der Elemente** Sei $S = \{(a) \mid a \in A, a \notin A^*, a \neq$ 0a zerfällt nicht in irreduzible Faktoren$\}$.
Angenommen $S \neq \emptyset$. Dann hat S eine maximales Element (a) und a ist nicht irreduzibel.
Dann gibt es $b, c \in A \setminus A^*$, mit $a = bc$.
Also ist $(a) \subsetneqq (b)$ und $(a) \subsetneqq (c)$. Da (a) maximal in S ist folgt daraus, dass $(b), (c) \notin S$.
Somit zerfallen b, c in irreduzible Faktoren und damit gilt $a \in S$. Widerspruch!.

Eindeutigkeit der Zerlegung Sei $a \in A$. Angenommen es gäbe zwei irreduzible Zerlegungen $a = c_1...c_m = d_1...d_n$ mit $m \leq n$.
Dann ist c_1 irreduzibel und somit prim. Also muss $c_1 | d_i$ für ein i gelte.
Nach Umnummerierung gilt $c_1 | d_1$, also $d_1 = u_1 c_1$ für $u_1 \in A^*$.
Also ist

$$\begin{aligned} & c_1...c_m = u_1 c_1 d_2 ... d_n \\ \Rightarrow \quad & c_2...c_m = d_2...d_n \end{aligned}$$

Fortsetzen des Argumentes liefert

$$1 = u_1 ... u_m d_{m+1} ... d_n$$

für geeignete $u_i \in A^*$.
Dann sind aber $d_{m+1}, ..., d_n$ Einheiten und damit Eindeutig bis auf Einheiten und Reihenfolge.

$\square$

1.5 Inverse und direkte Limiten

Definition 1.54. Man nennt I eine unter $\leq$ **partiell geordnete Menge**, wenn für alle $x, y, z \in I$ gilt

a) $x \leq x$.

b) Aus $x \leq y$ und $y \leq z$ folgt $x \leq z$.

c) Aus $x \leq y$ und $y \leq x$ folgt $x = y$.

Definition 1.55. Für jedes $i \in I$sei A_i ein Ring und sei für jedes Paar $i, j \in I$ mit $i \leq j$ die Abbildung $f_{ij} : A_j \to A_i$ ein Ringhomomorphismus, sodass

a) $f_{ii} = \mathrm{id}_{A_i}$ für alle $i \in I$

b) $f_{ik} = f_{ij} \circ f_{jk}$ falls $i \leq j \leq k$.

Dann nennt man das System $(A_i, f_{ij})_{i,j \in I}$ **projektives System** von Ringen.

Definition 1.56. Ein Ring A zusammen mit dem Homomorphismus $f_i : A \to A_i$, sodass $f_i = f_{ij} \circ f_j$ für $i \leq j$ heißt **projektiver Limes** oder **inverser Limes** des Systems (A_i, f_{ij}), wenn folgende universelle Eingenschaft erfüllt ist:
Sind $h_u : B \to A_i$ für alle $i \in I$ Ringhomomorphismen mit $h_i = f_{ij} \circ h_j$ für $i \leq j$, so existiert genau ein Ringhomomorphismus $h : B \to A$ mit $h_i = f_i \circ h$ für alle $i \in I$.

$$\begin{tikzcd}
B \arrow[rr, "\exists! h"] \arrow[dr, "h_j"] \arrow[ddr, "h_i"'] & & A \arrow[dl, "f_j"'] \arrow[ddl, "f_i"] \\
& A_j \arrow[d, "f_j"] & \\
& A_i &
\end{tikzcd}$$

Bemerkung 1.57. Falls ein projektiver Limes existiert, so ist er bis auf kanonische Isomorphie eindeutig:
Sind (A, f_i) und (B, h_i) projektive Limiten von (A_i, f_{ij}), so gibt es Homomorphismen $h : B \to A$ und $g : A \to B$, die die oben beschrieben Verträglichkeitsbedingungen erfüllen.
Durch Zusammensetzen dieser Homomorphismen erhalten wir Abbildungen Die Eindeutigkeitsbedingung Impliziert nun, dass $g \circ h = \mathrm{id}_B$ und $h \circ g = \mathrm{id}_A$.
Man schreibt auch $A = \varprojlim_{i \in I} A_i$ für den projektiven Limes des Systems (A_i, f_{ij}).

Existenz des Projektiven Limes. Sei $(A_i, f_{ij})_{i,j \in I}$ ein projektives System von Ringen.
Setze

$$A = \{(x_i)_{i \in I} \mid f_{ij}(x_j) = x_i \text{ für } i \leq j\} \subset \prod_{i \in I} A_i$$

und $h_j : A \to A_j, (x_i)_{i\in I} \mapsto x_j$.
Dann ist $(A, h_i)_{i\in I}$ ein projektiver Limes von (A_i, f_{ij}).
Insebsondere definiert jede Famiele $(x_i)_{i\in I}$ mit $f_{ij}(x_j) = x_i$ ein eindeutiges Element $x \in \varprojlim_{i\in I} A_i$. $\square$

Beispiel 1.58. Ein Beispiel für einen projektiven Limes sind die p-adisches ganzen Zahlen.
Sei $p \in \mathbb{Z}$ eine Primzahl, $I = \mathbb{N}$, mit der Ordnung $\leq$.
Für $n \geq 1$ sei $A_n = \mathbb{Z}/p^n\mathbb{Z}$. Sei

$$\begin{aligned} f_{mn} : A_n = \mathbb{Z}/p^n\mathbb{Z} &\to A_m = \mathbb{Z}/p^m\mathbb{Z} \\ x &\mapsto x \mod p^m \end{aligned}$$

Dann ist $(A_m, f_{mn})_{m,n\geq 1}$ ein projektives System. Der projektive Limes wird als Ring der p-adischen ganzen Zahlen

$$\mathbb{Z}_p = \varprojlim_{n\geq 1} A_n$$

bezeichnet. Also ist

$$\begin{aligned} \mathbb{Z}_p &= \{(x_n)_{n\geq 1} \mid x_n \in \mathbb{Z}/p^n\mathbb{Z}, f_{mn}(x_n) = x_n \text{ für } m \leq n\} \\ &= \{(x_n)_{n\geq 1} \mid x_n \in \mathbb{Z}/p^n\mathbb{Z}, x_n \mod p^{n-1} = x_{n-1}\} \end{aligned}$$

Wir schreiben die Elemente aus $\mathbb{Z}_p$ auch als Folgen

$$x = (x_n)_{n\geq 1} = (..., x_{n+1}, x_n, ..., x_1)$$

mit $x_n \mod p^{n-1} = x_{n-1}$.
Addition und Multiplikation erfolgen komponentenweise.
Sie Abbildung

$$\begin{aligned} &\mathbb{Z} \to \mathbb{Z}_p \\ &m \mapsto (..., m + p^n, ..., m + p) \end{aligned}$$

ist in injektiver Ringhomomorphismus.

Sei $x = (..., x_n, x_{n-1}, ..., x_1)$. Ist $x \neq 0$, so ist x der Form $(..., x_{n+1}, x_n, 0, ..., 0)$ und für $j \leq n$ sind alle Einträge $x_j \neq$.
Weiterhin gilt

$$p|x \Leftrightarrow x|x_n \text{ für alle } n \geq 1$$

Satz 1.59. *Sei $x \in \mathbb{Z}_p$. Dann ist*

a) $x \in \mathbb{Z}_p^* \Leftrightarrow p \not| x$

b) Ist $x \neq 0$, so lässt sich x eindeutig schreiben als $x = p^n u$ mit $u \in \mathbb{Z}_p^*$ und $n \geq 0$.

Beweis. a) $\Rightarrow$ Sei $x = (..., x_n, ..., x_1) \in \mathbb{Z}_p^*$. Dann exitsiert ein $y = (..., y_n, ..., y_1) \in \mathbb{Z}^p$ mit

$$\begin{aligned} xy &= (..., x_n, ..., x_1)(..., y_n, ..., y_1) \\ &= (..., x_n y_n, ..., x_1 y_1) \\ &= (..., 1, ..., 1) = 1 \end{aligned}$$

d.h. jeder Eintrag von x_j von x ist invertierbar, d.h. $p \not| x_n$ für alle $n \geq 1$.

$\Leftarrow$ Angenommen $p \not| x$, dann muss $p \not| x_n$ für ein $n \geq 1$.
Dann muss aber $p \not| x_n$ für alle $n \geq 1$.
d.h. jedes x_n ist invertierbar. Sei

$$y = (..., x_n^{-1}, ..., x_1^{-1}) \in \prod_{n \geq 1} \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$$

dann erfüllt y die Kompatibilitätsbedingungen, d.h. $y \in \mathbb{Z}_p$ und $xy = 1$.

b) Ist klar.

□

Definition 1.60. Sei $x \in \mathbb{Z}_p$, $x \neq 0$. Schreibe $x = p^n u$ mit $u \in \mathbb{Z}_p^*$. Dann heißt

$$n = \nu_p(x)$$

die **p-adische Bewertung** von x.
Man setzt $\nu_p(0) = \infty$.
Man bezeichnet $|x|_p = p^{-\nu_p(x)}$ als den **p-adischen Betrag**.

Lemma 1.61. *Für die p-adische Bewertung gilt:*

a) $\nu_p(xy) = \nu_p(x) + \nu_p(y)$

b) $\nu_p(x + y) \geq \inf\{\nu_p(x), \nu_p(y)\}$

Satz 1.62. *$\mathbb{Z}_p$ ist ein Integritätsbereich.*
Der Quotientenkörper $\mathbb{Q}_p$ von $\mathbb{Z}_p$ wird als Körper der p-adischen Zahlen bezeichnet.
$\mathbb{Q}_p$ kann auch (analytisch) als Vervollständigung von $\mathbb{Q}$ bezüglich des p-adischen Betrage konstruiert werden.

Definition 1.63. Man nennt I eine unter $\leq$ **gerichtete Menge**, wenn für alle $x, yz \in I$ gilt

a) $x \leq x$

b) Aus $x \leq y$ und $y \leq z$ folgt $x \leq z$

c) Für alle x, y exitsiert ein $z \in I$mit $x \leq z$,$y \leq z$

Definition 1.64. Für jedes $i \in I$ sei ein Ring A_i und für jedes Paar $i, j \in I$ mit $i \leq j$ sei ein Ringhomomorphismus $f_{ij} : A_i \to A_j$ gegeben, mit

a) $f_{ii} = \mathrm{id}_{A_i}$ für alle $i \in I$

b) $f_{ik} = f_{jk} \circ f_{ij}$ für alle $i \leq j \leq k$

$$\begin{tikzcd} A_i \arrow[r, "f_{ij}"] \arrow[rr, bend right, "f_{ik}"'] & A_j \arrow[r, "f_{jk}"] & A_k \end{tikzcd}$$

Ein solches System (A_j, f_{ij}) heißt **induktives System** von Ringen.

Definition 1.65. Ein Ring A zusammen mit dem einem Homomorphismus $f_i : A_i \to A$, sodass gilt $f_i = f_j \circ f_{ij}$ für $i \leq j$ heißt **induktiver Limes** oder **direkter Limes** des Systems (A_i, f_{ij}), wenn folgende Universelle Eigenschaft erfüllt ist:
Ist B ein Ring, und sind $h_i : A_i \to B$, $i \in I$ Ringhomomorphismen mit $h_i = h_j \circ f_{ij}$ für $i \leq j$, so existiert genau ein Ringhomomorphismus $h : A \to B$ mit $h_i = h \circ f_i$ für alle $i \in I$.

Lemma 1.66. *Falls ein indktiver Limes existiert, so ist er eindeutig.*

Beweis. Sei
$$\hat{A} = \dot{\bigcup}_{i \in I} A_i = \bigcup_{i \in I} \{(i, x) \mid x \in A_i\}$$

Wir definieren die Äquivalenzrelation $\sim$ auf $\hat{A}$:
Seien $x, y \in \hat{A}$, d.h. $x \in A_i, y \in A_j$.

$$x \sim y \Leftrightarrow \text{ ex gibt ein } k \in I \text{ mit } i \leq k \text{ und } j \leq k \text{ und } f_{ik}(x) = f_{jk}(x)$$

□

2 Polynomringe

2.1 Polynome mit einer Variable

Sei in diesem Abschnitt A ein Ring.

Definition 2.1. Sei $A[X]$ die Menge der Folgen $(a_0, a_1, ...,)$ mit $a_i \in A$ und $a_i = 0$ für fast alle $i \in \mathbb{N}$.
Die Elemente dieser Menge heißen **Polynome**.

Definition 2.2. $A[X]$ ist ein Ring mit

$$(a_0, a_1, ...,) + (b_0, b_1, ...) = (a_0 + b_0, a_1 + b_1, ...)$$
$$(a_0, a_1, ...,) \cdot (b_0, b_1, ...) = (c_0, c_1, ...)$$

mit $c_n = \sum_{k=0}^{n} a_{n-k} b_k$.
Das Nullelement ist $0 = (0, 0, ...)$ und $1 = (1, 0, 0, ...)$ ist das Neutrale Element der Multiplikation.

Definition 2.3. $A[X]$ wird als der **Polynomring** in der **Variablen** X bezeichnet.

Proposition 2.4. a) Die Abbildung $A \to A[X], a \mapsto (a, 0, 0, ...)$ ist ein Injektiver Ringhomomorphismus und A ist Unterring von $A[X]$.

b) Sei $X = (0, 1, 0, ...)$. Dann ist $X^n = (0, 0, ..., 0, 1, 0, ...)$ an n-ter Stelle und $aX^n = (0, ..., 0, a, 0, ...)$.

c) Polynome lassen sich schreiben als

$$(a_0, a_1, ...) = \sum_{i=0}^{n} a_i X^i$$

d) Dann gilt für Addition und Multiplkation:

$$\sum_k a_k X^k + \sum_k b_k X^k = \sum_k (a_k + b_k) X^k \left(\sum_k a_k X^k \right) \left(\sum_k b_k X^k \right) \quad = \sum_k c_k X^k$$

mit $c_k = \sum_{i+j=k} a_i b_j$.

Definition 2.5. a) Für ein Polynom $f = \sum_k a_k X^k$ heißt a_k der k-te **Koeffizient** von f.

b) Für $f \neq 0$ heißt

$$\deg(f) = \max\{i \mid a_i \neq 0\}$$

der **Grad** von f. (Falls $f = 0$, dann ist $\deg f := -\infty$)

c) Der Koeffizient a_n mit $n = \deg(f)$ heißt **Führender Koeffizient** von f.

d) Ist der führende Koeffizient $a_n = 1$, so heißt f **normiert**

Theorem 2.6. *Seien $f, g \in A[X]$.*

a) Dann ist $\deg(f+g) \leq \max(\deg(f), \deg(g))$ *und* $\deg(fg) \leq \deg(f)+\deg(g)$.

b) Sind die führenden Koeffizienten von f oder g keine Nullteiler, so idt $\deg(fg) = \deg(f) + \deg(g)$.

Korollar 2.7. *A ist genau dann Integritätsbereich wenn $A[X]$ Integritätsbereich ist.*
In diesem Fall gilt $A[X]^* = A^*$.

Beweis. $\Leftarrow$ Ist $A[X]$ ein Integritätsbereich, dann ist insbesondere $A \subset A[X]$.

$\Rightarrow$ Sei A ein Integritätsbereich. Dann gilt $\deg(fg) = \deg(f) + \deg(g)$. Sei zusätzlich $f, g \in A[X]$ mit $fg = 0$, dann ist $\deg(fg) = -\infty$.
Also muss $\deg(f) = -\infty$ oder $\deg(g) = -\infty$. Damit $f = 0$ oder $g = 0$. Also ist $A[X]$ Integritätsbereich.

Sei nun $fg = 1$, dann ist $\deg(fg) = 0$, also muss $\deg(f) = \deg(g) = 0$. Dann sind $f, g \in A^*$. □

Satz 2.8. *Sei $f : A \to B$ ein Ringhomomorphismus und $b \in B$.*
Dann gibt es genau einen Homomorphismen $\varphi_A : A[X] \to B$ mit $\varphi_B \mid_A = \varphi$ und $\varphi_b(X) = b$.

Beweis. **Existenz** Für $\varphi = \sum_j a_j X^j$ setze $\varphi_s(f) = \varphi_b(a) = \varphi(a)$ für alle $a \in A$ und $\varphi_b(X) = b$.
Dann ist φ_s ein Homomorphismus.

Eindeutigkeit Sei $\psi : A[X] \to B$ ein zweiter Homomorphismus mit $\psi|_A = \varphi$ und $\psi(X) = b$. Dann ist

$$\begin{aligned}\psi(f) = \psi\left(\sum_j a_j X^j\right) &= \sum_j \psi(a_i)\psi(X)^j \\ &= \sum_j \varphi(a_i) b^j = \varphi_b(f)\end{aligned}$$

□

Beispiel 2.9. Sei I ein Ideal in A. Die Komposition $A \to A/I \to (A/I)[X]$ ist ein Ringhomomorphismus. Dieser induziert einen Ringhomomorphismus $\pi : A[X] \to (A/I)[X]$ mit $\pi(x) = x$.
Diese Abbildung ist die Reduktion der Koeffizienten modulo I.

$$\mathrm{Kern}(\pi) = \{\sum_i a_i X^i \mid a_i \in I\} = I[X]$$

und somit

$$(A/I)[X] \cong A[X/I[X]]$$

Lemma 2.10. *Es gilt I ist Primideal in $A \Leftrightarrow I[X]$ ist Primideal in $A[X]$.*

Theorem 2.11. *Sei $g \in A[X]$, $g \neq 0$ mit führendem Koeffizient $b_n \in A^*$ und sei $f \in A[X]$.*
Dann existieren eindeutige Polynome $q, r \in A[X]$ mit $f = qg + r$ mit $\deg(r) < \deg(g)$.

Beweis. **Existenz** Falls $f = 0$ dann gilt $q, r = 0$. Falls $\deg(f) < \deg(g)$ dann ist $q = 0, r = f$.
Sei als $f \neq 0$, $m = \deg(f)$ $h = \deg(g)$ und $m \geq h$.
f, g lassen sich schreiben als

$$f = \sum_{k=1}^{m} a_k X^k \qquad g = \sum_{j=0}^{n} b_j X^j$$

Dabei ist $b_n \in A^*$.
Durch Induktion:

$m = 0$ Dann gilt $f = a_0$, $g = b_0$. Dann $q = a_0 b_0^{-1}$ und $r = 0$.

$m \geq 1$ Definiere $h := f - X^{m-n} a_m b_n^{-1} g$.
Dann ist $\deg(h) \leq m - 1$. Nach der Induktionshypothese gibt es $q, r \in A[X]$ mit $h = qg + r$ und $\deg(r) < \deg(g)$.
Es folgt

$$f = X^{m-n} a_m b_n^{-1} qg + r = (X^{m-n} a_m b_n^{-1} + q)g + r$$

Eindeutigkeit Angenommen es gibt $q_1, q_2, r_1, r_2 \in A[X]$, sodass $f = gq_1 + r_1 = gq_2 + r_2$ und $\deg(r_1), \deg(r_2) < \deg(g)$.
Dann folgt aber

$$\begin{aligned}
\Rightarrow \quad & (q_1 - q_2)g = r_2 - r_1 \\
\Rightarrow \quad & \deg(q_1 - q_2) + \deg(g) = \underbrace{\deg(r_1 - r_2)}_{<\deg(g)} \\
\Rightarrow \quad & \deg(q_1 - q_2) \leq 0
\end{aligned}$$

daraus folgt $q_1 - q_2 = 0$ und damit $r_1 = r_2$.

□

Korollar 2.12. *Sei K ein Körper. Dann ist $K[X]$ ein euklidischer Ring unter der* deg*-Abbildung und somit ein Hauptidealring.*
Die Einheiten sind die konstruieren Polynome.

Satz 2.13. *Sei A ein Integritätsbereich. Dann ist*

$$A[X] \text{ ist Hauptidealring} \Leftrightarrow A \text{ ist Körper}$$

Beweis. $\Rightarrow$ bereits gezeigt.

$\Leftarrow$ Die Abbildung $\varphi_0 : A[X] \to A, f \mapsto f(0)$ ist ein Ring-Homomorphismus.
Dann ist

$$\text{Kern}(\varphi_0) = \{f = \sum_{k=0}^{n} a_k X^k \in A[X] \mid a_0 = 0\}$$

Dann gilt $\text{Kern}(\varphi_0)$ ist ein Primideal in $A[X]$ und somit ein maximales Ideal.
Also ist $A[X]/\text{Kern}(\varphi_0)$ ist Körper und $A[X]/\text{Kern}(\varphi_0) \cong A$.
Also ist A Körper.

□

2.2 Nullstellen von Polynomen

Definition 2.14. Sei $f \in A[X]$, $f \neq 0$.
$a \in A$ heißt **Nullstelle** von f, wenn $f(a) = 0$.

Satz 2.15. *Sei $f \in A[X]$, $f \neq 0$ und $a \in A$. Dann gilt*

$$a \text{ ist Nullstelle von } f \Leftrightarrow (x - a) | f$$

Beweis. $\Rightarrow$ Sei $f(a) = 0$. Division mit Rest liefert

$$f = q(x - a) + r$$

mit $\deg(r) < 1$. Aus $f(a) = r$ folgt $(x - a)|f$

□

Satz 2.16. *Sei $f \in A[X]$, $f \neq 0$ ein Polynom das eine Nullstelle in A hat. Dann gibt es paarweise verschiedene Elemente $a_1, ..., a_m \in A$ und $n_1, ..., n_m \in \mathbb{N}$ und ein Polynom $g \in A[X]$, welchen keine Nullstellen in A hat, sodass*

$$f = g \prod_{i=1}^{m} (x - a_i)^{n_i}$$

ist.
Es gilt

$$\sum_{i=1}^{m} n_i \leq \deg(f)$$

Beweis. Teilen mit Rest. □

Definition 2.17. Lässt sich $f \in A[X]$, $f \neq 0$ schreiben als

$$f = c\prod_{i=1}^{m}(x - a_i)^{n_i}$$

mit $c, a_1, ..., a_m \in A$ und $n_1, ..., n_m \in \mathbb{N}$, dann sag man f **zerfällt in Linearfaktoren**.

Satz 2.18. *Sei A ein Integritätsbereich. Dann hat $f \in A[X]$ mit $f \neq 0$ höchsten $n = \deg(f)$ verschiedene Nullstellen in A.*

Beweis. Durch Induktion über n:

Induktionanfang: Sei $n = 0$. (Konstantes Polynom $\Rightarrow$ keine Nullstelle)

Induktionsschritt: Sei $n > 0$. Ist $a \in A$ eine Nullstelle von f, so ist $f = g(x - a)$ mit $\deg(q) = n - 1$.
Sei $b \neq a$ eine weitere Nullstelle von f, dass ist $0 = f(b) = q(b)(b - a)$.
Da aber $(b \neq a)$ ist, muss b Nullstelle von q sein.
Nach Induktionsannahme hat q höchstens $n - 1$ verschiedene Nullstellen.

□

Korollar 2.19. *Sei A ein unendlicher Integritätsbereich und $f \in A[X]$, $f \neq 0$. Dann gibt es ein $a \in A$ mit $f(a) \neq 0$.*

Beispiel 2.20. Sei K ein endlicher Körper und sei

$$f = \prod_{a \in K}(x - a)$$

Dann ist $f(a) = 0$ für alle $a \in K$.

Satz 2.21. *Sei G_1 zyklische Gruppe der Ordnung n_1, G_2 zyklische Gruppe der Ordnung n_2.*
Sein n_1, n_2 Teilerfremd, so ist $G_1 \times G_2$ zyklisch.

Beweis. Sei $G_1 =< x_1 >$ und $G_2 =< x_2 >$. Die Abbildung

$$\mathbb{Z} \to G_1 \times G_2$$
$$m \mapsto (mx_1, mx_2)$$

hat den Kern $n_1, n_2 \in \mathbb{Z}$ und ist surjektiv nach **??**.
Dann ist

$$\mathbb{Z}/n_1n_2\mathbb{Z} \cong G_1 \times G_2$$

□

Theorem 2.22. *Sei K ein Körper und $G \subset K^*$ Untergruppe. Ist G endlich, so ist G zyklisch.*

Beweis. Da G einen endliche abelsche Gruppe ist zerfällt G in

$$g = \bigotimes_{p \text{ prim}} G_p$$

Dabei ist $G_p = \{g \in G \mid g^q = 1 \text{ für ein } q = p^n\}$.

Angenommen G_p ist nicht zyklisch. Dann ist $\text{ord}(g) \leq |G_p|$ für alle $g \in G_p$ und es gibt ein $q = p^n < |G_p|$ mit $g^q = 1$ für alle $q \in G_p$.
Dann hat aber das Polynom $X^q - 1$ mehr als q Nullstellen in K. Widerspruch!

Also sind alle G_p zyklisch. Dann folgt nach **??**, dass G zyklisch ist. □

Korollar 2.23. *Ist K endlicher Körper, so ist K^* zyklisch.*

Satz 2.24. *Sie A ein faktorieller Integritätsbereich mit Quotientenkörper K. Sei*

$$f = a_n X^n + a_{n-1} X^{n-1} + ... + a_i X^1 + a_0$$

ein Polynom in $K[X]$.
Ist $b = c/d$ eine Nullstelle von f in K mit teilerfremden c, d, so gilt

$$c | a_0 \text{ und } d | a_n$$

Beweis. Aus $f(b) = 0$ folgt

$$a_n \left(c/d\right)_n + a_{n-1}(c/d)^{n-1} + ... + a_0$$

Dann ist (nach Multiplikation mit d^n)

$$a_n c^n + a_{n-1} c^{n-1} d + ... + a_n d^n = 0$$

Dann ist

$$a_n d^n = c(...)$$
$$a_n c^n = d(...)$$

Also gilt $c|a_0$ und $d|a_n$ □

Definition 2.25. Sei $f \in A[X]$, $f \neq 0$. Ist $a \in A$ eine Nullstelle von f, so gibt es ein $n \in \mathbb{N}$ mit

$$(x - a)^n | f$$
$$(x - a)^{n-1} \not| f$$

Dann heißt n die **Vielfachheit** oder **Multiplizität** von a und man nennt a eine **n-fache Nullstelle** von f.

Definition 2.26. Die Abbildung

$$D : A[X] \to A[X]$$
$$\sum_{j=0}^{n} a_j X^j \mapsto \sum_{j=1}^{n} j a_j X^{j-1}$$

Man schreibt $f' := D(f)$.

Lemma 2.27. *Seien $f, g \in A[X]$, $a, b \in A$ Für die Ableitung D gilt*

a) $D(af + bg) = aD(f) + bD(g)$ *(Linearität)*

b) $D(fg) = (Df)g + f(Dg)$ *(Produktregel)*

Satz 2.28. *Sei $f \in A[X]$, $f \neq 0$. Sei $a \in A$ eine Nullstelle von f. Dann gilt*

$$a \textit{ hat Vielfachheit } 1 \Leftrightarrow f'(a) \neq 0$$

Beweis. Da a eine Nullstelle von f ist gilt

$$f = q(x - a)$$

für ein $q \in A[X]$. Es folgt

$$f' = q + q'(X - a)$$

und a hat genau dann Vielfachheit 1, wenn $(x - a) \not| q$, also $(x - a) \not| f'$, bzw. $f'(a) \neq 0$. □

Definition 2.29. Die Abbildung

$$\begin{aligned} \chi : \mathbb{Z} &\to A \\ n &\mapsto n \cdot 1 \end{aligned}$$

Ist ein Ringhomomorphismus und

$$\text{Kern}(\chi) = (n) = n\mathbb{Z}$$

für ein $n \in \mathbb{Z}$, $n \geq 0$.
n heißt die **Charakteristik** von A und man schreibt $n = \text{char}(A)$.

Lemma 2.30. *Ist A ein Integritätsbereich, so ist $n = 0$ oder n ist prim.*

Satz 2.31. *Sei K ein Körper und $f \in K[X]$ $f \neq$const, dann gilt*

a) Ist $\text{char}(K) = 0$*, so gilt*

$$\deg(f') = \deg(f) - 1$$

b) Ist $\text{char}(K) = p > 0$*, so gilt*

$$\deg(f') \leq \deg(f) - 1$$

Weiterhin gilt

$$f' = 0 \Leftrightarrow f(X) = g(X^p) \textit{ für ein } g \in K[X]$$

2.3 Polynome mehrerer Veränderlicher

Definition 2.32. Sei A ein Ring. Dann ist der Polynomring in mehreren Variablen $A[X_1, ..., X_n]$ induktiv definiert als

$$\begin{aligned} A[X_1, X_2] &:= A[X_1][X_2] \\ A[X_1, ..., X_n] &:= A[X_1, ..., X_{n-1}][X_n] \end{aligned}$$

und ein Polynom $f \in A[X_1, ..., X_n]$ lässt sich schrieben als

$$f = \sum_{i_1,\ldots,i_n} \underbrace{a_{i_1 \ldots i_n}}_{\in A} X_1^{i_1} ... X_n^{i_n}$$

Definition 2.33. Die Elemente $X_1^{i_1}...X_n^{i_n} \in A[X_1, ..., X_n]$ heißen primitve Monome.

Definition 2.34. Der Grad des Polynoms $f \in A[X_1, ..., X_n]$ ist definiert als

$$\deg(f) = \max\left\{\sum_{j=1}^{n} i_j \mid a_{i_1 \dots i_n} \neq 0\right\}$$

falls $f \neq 0$ und sonst $= -\infty$.

Definition 2.35. Ein Polynom $f \in A[X_1, ..., X_n]$ heißt homogen vom Grad m, falls alle Monome in f Grad m haben.

Satz 2.36. *Sei $\varphi : A \to B$ ein Ringhomomorphismus und $b_1, ..., b_n \in B$. Dann existiert genau ein Ringhomomorphismus $\psi : A[X_1, ..., X_n] \to B$ mit $\psi|_A = \varphi$ und $\psi(X_i) = b_i$ für alle i.*

Satz 2.37. *Sei B ein Ring und $A \subset B$ ein Unterring. Seien $b_1, ..., b_n \in B$. Die Inklusion $\iota : A \hookrightarrow B$ lässt sich eindeutig fortsetzen zu einem Homomorphismus $\varphi : A[X_1, ..., X_n] \to B$ mit $\varphi|_A = \iota$ und $\varphi(X_j) = b_j$.*

Korollar 2.38. *Sei B ein Ring und $A \subset B$ ein Unterring. Seien $b_1, ..., b_n \in B$. Dann ist $A[b_1, ..., b_n]$ der Kleinste Unterring von B der A und $b_1, ..., b_n$ enthält.*

Korollar 2.39. *Ist $\varphi : A[X_1, ..., X_n] \to B$ mit $\varphi(X_j) = b_j$ injektiv, so ist $A[b_1, ..., b_n]$ isomorph zu $A[X_1, ..., X_n]$.*

Definition 2.40. Ist $\varphi : A[X_1, ..., X_n] \to B$ mit $\varphi(X_j) = b_j$ injektiv, so nennt man die b_j algebraisch unabhängig.
Ist φ nicht injektiv, so heißen die b_j algebraisch abhängig.

Satz 2.41 (**??** für mehrere Variablen)**.** *Sei A ein Ring*

$$A \text{ ist Integritätsbereich} \Leftrightarrow A[X_1, ..., X_n] \text{ ist Integritätsbereich}$$

Beweis. Korollar **??** iterativ anwenden. □

Satz 2.42. *Sei A Integritätsbereich. Dann gilt*

$$A^* = A[X_1, ..., X_n]^*$$

Satz 2.43. *Es war einmal ein Integritätsbereich A. Der Integritätsbereich A hatte unendliche Teilmengen $T_1, ..., T_n \subset A$ als Freunde.
Dann kam ein nettes $f \in A[X_1, ..., X_n]$ für welches $f(t_1, ..., t_n) = 0$ für alle $t_1 \in T_1, ..., t_n \in T_n$ war.
Der Held wusste sofort, dass $f = 0$ gellten musste.*[1]

Beweis. Induktion über n:

$n = 1$ durch Negation von **??**.

[1]by Sandra

$n > 1$ Schreibe $f \in A[X_1, ..., X_n]$ als

$$f = \sum_{j=0}^{n} \underbrace{\varphi_j(X_1, ..., X_{n-1})}_{\in A[X_1,...,X_n]} X_n^j$$

Angenommen es existieren $t_1, ..., t_{n-1}$, sodass $\varphi_j(t_1, ..., t_{n-1}) \neq 0$ für ein j.
Dann ist f ein Polynom welches unendlich viele verschieden Nullstellen hat aber $\neq 0$ ist. Widerspruch!
Also muss $f = 0$.

$\square$

Definition 2.44. Sei $I \neq \emptyset$ ein Indexmenge. Dann bezeichnet $\mathbb{N}^(I)$ die Menge der Form $(a_i)_{i \in I}$ mit $a \in\in \mathbb{N}_0$ und $a_i = 0$ für fast alle $i \in I$.
Die Addition auf $\mathbb{N}^{(I)}$ ist definiert durch

$$(a_i)_{i \in I} + (b_i)_{i \in I} = (a_i + b_i)_{i \in I}$$

mit neutralem Element $0 = (0)_{i \in I}$.

Definition 2.45. Für Indexmengen I ist $A[(X_i)_{i \in I}]$ definiert als die Menge der Abbildungen $\varphi : \mathbb{N}^{(I)} \to A$ mit $\varphi(\alpha) = 0$ für fast alle $\alpha \in \mathbb{N}^{(I)}$, mit Addition und Multiplikation

$$\begin{aligned}(f+g)(\alpha) &= f(\alpha) + g(\alpha) \\ (fg)(\alpha) &= \sum_{\substack{\beta+\gamma=\alpha \\ \beta,\gamma \in N(I)}} f(\beta)g(\gamma)\end{aligned}$$

Dann ist $A[(X_i)_{i \in I}]$ ein Ring mit neutralem Element der Addition $0 = 0(\alpha)$ und der Multiplikation $e(\alpha) = 1$ falls $\alpha = 0$ und $e(\alpha) = 0$ sonst.

Bemerkung. Einem Element $a \in A$ ordnen wir die Abbildung ζ mit

$$\zeta(\alpha) \begin{cases} a & = \alpha = 0 \\ 0\alpha \neq 0 \end{cases}$$

Dies liefert eine Einbettung von A in $A[(X_i)_{i \in I}]$ mit

$$X^\alpha(\beta) = \begin{cases} 0 & \beta \neq \alpha \\ 1 & \beta = \alpha \end{cases}$$

Für ein beliebiges $f \in A[(X_i)_{i \in I}]$ ist dann

$$\zeta = \sum_{\alpha \in \mathbb{N}^{(I)}} f(\alpha) X^\alpha$$

und es gilt $X^\alpha X^\beta = X^{\alpha+\beta}$ und für $f = \sum f(\alpha)X^\alpha$ $g = \sum g(\alpha)X^\alpha$ ist

$$f + g = \sum \big(f(\alpha) + g(\alpha)\big) X^\alpha \tag{1}$$

$$f \cdot g = \sum h(\alpha) X^\alpha \text{mit } h(\alpha) = \sum_{\beta+\gamma=\alpha} f(\beta)g(\gamma) \tag{2}$$

Bemerkung 2.46. Für jedes $j \in I$ setzen wir $e_j = (b_i)_i$ mit $b_j = 1$, $b_i = 0$ f+r $j \neq i$.
Dann könne wir ein beliebiges $\alpha = (a_i)_i$ schreiben als $\alpha = \sum a_i e_i$.
Wir definieren $X^{e_i} := X_i$. Dann ist

$$X^\alpha = X^{\sum a_i e_i} = \prod X^{a_i e_i} = \prod X_i^{a_i}$$

Die X^α sind die primitiven Monome in den Variablen X_i und die Elemente aus $A[(X_i)_{i\in I}]$ lass sich eindeutig schreiben als

$$\sum_{\alpha \in \mathbb{N}^{(I)}} c_\alpha \prod X_i^{a_i}$$

mit eindeutig bestimmten Koeffizienten c_α die fast alle verschwinden.

2.4 Bewertungen

Definition 2.47. Sei K ein Körper. Ein **Betrag** auf K ist eine Abbildung

$$|\cdot| : K \to \mathbb{R}$$

mit

a) $|x| \geq 0$ und $|x| = 0 \Leftrightarrow x = 0$

b) $|xy| = |x|\,|y|$

c) $|x + y| \leq |x|\,|y|$

Definition 2.48. Ein Betrag $|\cdot|$ heißt **Archimedisch**, wenn es $x, y \in K$ gibt, sodass

$$|x + y| > \max\{|x|\,|y|\}$$

bzw **nicht-archimedisch**, wenn für alle x, y gilt, dass$|x + y| \leq \max\{|x|\,, |y|\}$.

Satz 2.49. *Sei $|\cdot|$ ein nicht-archimedischer Betrag auf K. Ist $|x| \neq |y|$, so gilt*

$$|x + y| = \max\{|x|\,, |y|\}$$

Beweis. Sei $|x| \leq |y|$. Dann ist

$$|x + y| \leq \max\{|x|\,, |y|\} = |x|$$

Andererseits ist $x = (x + y) + (-y)$, sodass

$$|x| = |(x + y) + (-y)| \leq \max\{|x + y|\,, |y|\} = |x + y|$$

also $|x| \leq |x + y|$. $\square$

Definition 2.50. Sei A ein Integritätsbereich. Eine **Bewertung** auf A ist eine Abbildung

$$\nu : A \to \mathbb{R} \cup \{\infty\}$$

mit

a) $\nu(a) = \infty \Leftrightarrow a = 0$

b) $\nu(ab) = \nu(a) + \nu(b)$

c) $\nu(a+b) \geq \min\{\nu(a), \nu(b)\}$

Satz 2.51. *Sei A ein Integritätsbereich und $\nu : A \to \mathbb{R} \cup \{\infty\}$ eine Bewertung auf A.*

a) ν kann zu einer Bewertung auf dem Quotientenkörper K von A fortgesetzt werden, durch
$$\nu(a/b) = \nu(a) - \nu(b)$$

b) Sei $c \in \mathbb{R}$ und $c > 1$. Dann definiert
$$|x| = c^{-\nu(x)}$$
einen nciht-archimedischen Betrag auf K.

Beispiel 2.52.1. Sei A ein faktorieller Integritätsbereich und $p \in A$ prim. Dann lässt sich ein beliebiges $a \in A \setminus \{0\}$ schreiben als
$$a = a' p^{\nu_p(a)}$$
mit $\gcd(a', p) = 1$ und $\nu_p(a) \in \mathbb{N}_0$.
Mit der Bedingung, dass $\nu_p(0) = \infty$, ist die Abbildung
$$\nu : A \to \mathbb{R} \cup \{\infty\}$$
eine Bewertung auf A.
Diese setzt sich zu einer Bewertung auf dem Quotientenkörper fort.

Beispiel 2.52.2. Sei $p \in \mathbb{Z}$ eine positive Primzahl. Dann definiert
$$\nu_p : \mathbb{Z} \to \mathbb{R} \cup \{\infty\}$$
wie Oben einen Bewertung auf $\mathbb{Z}$. Diese setzt sich zu einer Bewertung auf $\mathbb{Q}$ fort. Man definiert für $x \in \mathbb{Q}$
$$|x|_p := p^{-\nu_p(x)}$$
Dies liefert einen Betrag auf Q.

Sei $x \in \mathbb{Q}$. Schreibe $x = a/bp^n$ mit $p \not| ab$. Dann ist $|x|_p = p^{-n}$ und die Folge $1, p, p^2, ...$ ist eine Nullfolge, bzgl $|\cdot|_p$.
Die Vervollständigung von Q bezüglich $|\cdot|_p$ ist isomorph zu $\mathbb{Q}_p$.

Theorem 2.53 (Lemma von Gauß)**.** *Sei A in Integritätsbereich mit Quotientenkörper K und sei $\nu : A \to \mathbb{R} \cup \infty$ eine Bewertung auf A.*
Setze ν fort zu einer Bewertung auf K durch
$$\nu(a/b) = \nu(a) - \nu(b)$$
Für $f = \sum a_j X^j \in K[X]$ definieren wir
$$\nu(f) = \min\{\nu(a_i)\}$$
für $f \neq 0$ und $\nu(0) = \infty$.
Dann ist ν eine Bewertung auf $K[X]$.

Beweis. Wir zeigen
$$\nu(fg) = \nu(f) + \nu(g).$$

- Seien f, g Konstant, dann ist die Aussage klar.

- Sei nun $g = c \in K$. Dann ist

$$\begin{aligned}\nu(gf) &= \nu(cf)\\ &= \min\{\nu(ca_i)\} = \min\{\nu(c) + \nu(a_i)\}\\ &= \nu(c) + \min\{\nu(a_i)\}\\ &= \nu(g) + \nu(f)\end{aligned}$$

- Seien nun f, g nicht Konstant.
  Durch multipliaktion mit geeigenter Konstante können wir erreichen, dass

  $$\nu(f) = \nu(g) = 0$$

  Es ist zu zeigen, dass $\nu(fg) = 0$.
  Sei dazu $f = \sum_{i=0}^{n} a_i X^i$, $g = \sum_{j=0}^{m} b_j x^j$. Dann ist

  $$fg = \sum_{k=0}^{m+n} c_k X^k$$

  mit
  $$c_k = \sum_{i+j=k} a_i b_j$$

  Es gilt
  $$\nu(c_k) \geq \min\{ \underbrace{\nu(a_i b_j)}_{=\nu(a_i)+\nu(b_j)\geq 0} \} \geq 0$$

  sodass $\nu(fg) \geq 0$.

  Aus $c_{s+t} = a_0 b_{s+t} + a_1 b_{s+t-1} + ... + a_s b_t + ... + a_{s+t} b_0$ folgt

  $$a_s b_t = c_{s+t} - a_0 b_{s+t} - a_1 b_{s+t-1} - .... - a_{s+t} b_0$$

  Dann ist also

  $$\nu(a_s b_t) \geq \min\{\nu(c_{s-t}), \underbrace{\nu(a_0 b_{s+t})}_{=\nu(a_0)+\nu(b_{s+t}>0)}, ..., \nu(a_{s+t} b_0)\} > 0$$

  damit $\nu(a_s) + \nu(b_t) > 0$. Widerspruch!

$\square$

2.5 Der Satz von Gauß

Definition 2.54. Sei A ein faktorieller Integritätsbereich mit Quotientenkörper K.
Ein Polynom

$$f = a_n X^n + a_{n-1} X^{n-1} + ... + a_o \in A_[X]$$

heißt **primitiv**, wenn für seine Koeffizienten gilt: $\gcd(a_0, ..., a_n) = 1$.
Äquivalent dazu $\nu_p(f) = 1$ für alle Primelemente $p \in A$.
Ein Polynom $f \in K[X]$, $f \neq 0$ lässt sich schreiben als $f = c\tilde{f}$ mit $\tilde{f} \in A[X]$ primitiv und $c \in K$.

Satz 2.55. *Sei A ein faktorieller Integritätsbereich mit Quotientenkörper K und $f \in A[X]$ primitiv mit* $\deg(f) \geq 1$.
Dann gilt

$$f \textit{ ist irreduzibel in } A[X] \iff f \textit{ ist irreduzibel in } K[X]$$

Beweis. $\Rightarrow$ Sei f irreduzibel in $A[X]$. Sei $f = gh$ eine Zerlegung von f in $K[X]$. Schreibe

$$g = c\tilde{g} \qquad\qquad h = d\tilde{h}$$

mit $\tilde{g}, \tilde{h} \in A[X]$ primitiv. Dann ist

$$f = cd\tilde{g}\tilde{h}$$

und insbesondere

$$\underbrace{\nu_p(f)}_{\geq 0} = \nu_p(cd) + \underbrace{\nu_p(\tilde{g})}_{=0} + \underbrace{\nu_p(\tilde{h})}_{=0}$$

Also $\nu_p(cd) \geq 0$ für alle $p \in A$ prim.
Dann muss aber die Potenz von jedem Primfaktor des Nenners $= 0$ sein.
Also ist $a = cd \in A$. Da $A[X]^* = A^*$ und $f = a\tilde{g}\tilde{h}$ und da f irreduzibel ist muss $a\tilde{g}$ oder $\tilde{h}$ eine Einheit in $A[X]$ sein.
Dann ist $a\tilde{g}$ oder $\tilde{h}$ in A^*, also g oder h Konstant und somit in $K^* = K[X]^*$.

$\Leftarrow$ Sei f irreduzibel in $K[X]$. Sei $f = gh$ in $A[X]$. Dann ist g oder h in $K[X^*]$, also konstant.
Sei $g = c$ für ein $c \in A$, dann ist

$$\nu_p(f) = \nu_p(c) + \nu_p(h)$$

Da f primitiv ist, ist $\nu_p(f) = 0$.
Dann gilt $\nu_p(c) = \nu_p(h) = 0$ für alle $p \in A$ prim.
Also muss $c \in A^* = A[X]^*$.

□

Bemerkung. Sei A wie Oben, $f \in A[X]$, nicht zwingend Primitiv mit $\deg(f) \geq 1$ und f irreduzible in $K[X]$, dann ist $f$irreduzibel in $A[X]$.

Theorem 2.56 (Satz von Gauß)**.** *Sei A ein faktorieller Integritätsbereich. Dann ist auch $A[X]$ ein faktorieller Integritätsbereich.*

Beweis. Sei K der Quotientenkörper von A. Sei $f \in A[X] \setminus (A[X^*] \cup \{0\})$.
Wir zeigen, dass f über $A[X]$ in irreduzible Faktoren zerfällt.
Wir schreiben $f = c\tilde{f}$ mit $\tilde{f} \in A[X]$ primitiv und $c \in A$.
c zerfällt in A in irreduzible Faktoren.
Diese sind auch irreduzibel in $A[X]$.
Da $K[X]$ auch faktoriell ist, zerfällt $\tilde{f}$ in $K[X]$ in irreduzible Faktoren $\tilde{f} = \tilde{f}_1 \cdot ... \cdot \tilde{f}_n$ mit $\deg(\tilde{f}_i) \geq 1$.
Es gibt insbesondere eine Zerlegung

$$\tilde{f} = d\tilde{\tilde{f}}_1 \cdot ... \cdot \tilde{\tilde{f}}_n$$

mit $d \in K$ und $\tilde{\tilde{f}}_i \in A[X]$ primitiv und $\deg(\tilde{\tilde{f}}_i) \geq 1$.
Mit **??** sind die $\tilde{\tilde{f}}_i$ auch irreduzible in $A[X]$.
Aus

$$\underbrace{\nu_p(\tilde{f})}_{=0} = \nu_p(d) + \underbrace{\nu_p(\tilde{\tilde{f}}_1)}_{=0} + ... + \underbrace{\nu_p(\tilde{\tilde{f}}_n)}_{=0}$$

folgt $\nu_p(d) = 0$ für alle $p \in A$ prim.

Jetzt ist noch zu zeigen, dass die gefundenen Zerlegung eindeutig ist. Se

$$\begin{aligned} f &= c_1 \cdot .. \cdot c_m g_1 \cdot ... \cdot g_r \\ &= d_1 \cdot ... \cdot d_n h_1 \cdot ... \cdot h_s \end{aligned}$$

mit $c_i, d_j \in A$ irreduzibel und $g_i.h_j \in A[X]$ irreduzibel mit $\deg \geq 1$.
Dann ist

$$c/d \cdot g_1 \cdot ... \cdot g_r = h_1 \cdot ... \cdot h_s$$

mit $c = c_1 \cdot ... \cdot c_m$, $d = d_1 \cdot ... \cdot d_n$ sind die g_i, h_j irreduzible in $A[X]$ und somit auch in $K[X]$.
Da $K[X]$ faktoriell ist, ist $r = s$ und nach Umsortierung ist

$$\begin{aligned} c/d \cdot g_1 &= x_1 h_1 \\ g_j &= x_j h_j \end{aligned}$$

für alle $j > 1$.
Dann ist

$$\begin{aligned} \nu_p(c/d) + \underbrace{\nu_p(g_1)}_{=0} &= \nu_p(x_1) + \underbrace{\nu_p(h_1)}_{=0} \\ \nu_p(x_i) - \nu_p(c/d) &= 0 \\ \nu_p(x_i \cdot d/c) &= 0 \end{aligned}$$

Wir definieren $\epsilon_1 := x_i \cdot d/c$. Dann ist $\epsilon_1 \in A^*$.
Zusätzlich ist

$$\underbrace{\nu_p(g)}_{\geq 0} = \nu_p(x_j) + \underbrace{\nu_p(h_j)}_{=0}$$

Sei $\epsilon_j = x_j$ für $j \geq 1$. Dann ist $\epsilon_j = x_j \in A^*$.
Also ist

$$g_i = \underbrace{\epsilon_i}_{\in A^*} h_i$$

Weiterhin folgt $c = \epsilon d$ für ein $\epsilon \in A^*$.

Da A faktoriell ist, gilt $m = n$ und nach Umnummerieren $c_i \eta_i d_i$ mit $\eta_i d \in A^*$. □

Korollar 2.57. *Sie K ein Körper, dann ist $K[X_1, ..., X_n]$ ein faktorieller Integritätsbereich.*

Beispiel 2.58.1. $\mathbb{Z}[X]$ ist ein faktorieller Integritätsbereich aber kein Hauptidealring.

Beispiel 2.58.2. Sei K ein Körper. $K[X]$ ist ein Hauptidealring und somit faktorieller. $K[X, Y]$ ist kein Hauptidealring aber faktoriell.

2.6 Der Hilbertsche Basissatz

Theorem 2.59 (Hilbertscher Basissatz)**.** *Sei A ein noetherscher Ring. Dann ist auch $A[X]$ noethersch.*

Beweis. Sei $I \subset A[X]$ ein Ideal. Wr zeigen, dass I endlich erzeugt ist. Für $n \in \mathbb{N}_0$ sei

$$I_n := \{f \in I \mid \deg(f) \leq n\}$$

□

Für $f = \sum_{a_i X^i \in A[X]}$ sei $b_n(f) = a_n$.
Dann gilt

$$b_n(f+g) = n_b(f) + b_n(g)$$
$$b_n(af) = ab_n(f)$$

für alle $f, g \in A[X]$ und $a \in A$.
Die Menge $I(n) := b_n(I_n)$ ist ein Ideal in A und es gilt

$$I(0) \subset I(1) \subset ...$$

den $f \in I_n$ impliziert $Xf \in I_{n+1}$. Dann ist $b_n(f) = b_{n+1}(Xf) \in I(n+1)$.
Da A noethersch ist wird jede Folge stationär. Also gibt es $m \in \mathbb{N}$, mit

$$I(m) = I(m+1) = ...$$

Für jedes$n = 0, 1, ...$ wähle Polynome f_{n_j}, sodass $I(n)$ von den Koeffizienten $b_n(f_{n_j})$ erzeugt wird.
Dann wird I von den f_{n_j} über $A[X]$ erzeugt:
Sei $f \in I$ vom Grad t.

- Ist $t \leq m$, so hat
  $$f - \sum_t a_{t_j} f_{t_j} \in I$$
  Grad $\leq t - 1$.
  Nach endlich vielen Schritten hat man f als Linearkombination der f_{n_j} dargestellt.

- Ist $t > m$, so reduziert man den Grad von f durch
  $$f - \sum a_{t_j} X^{t-m} f_{m_j} \in I$$

2.7 Eigenschaften von Polynomringen

Sei A ein Ring.

a) A Integritätsbereich $\Leftrightarrow A[X_1, ..., X_n]$ Integritätsbereich.
Dann gilt $A[X-1, ..., X_n]^* = A^*$.

b) (Gauss) A faktorieller Integritätsbereich $\Leftrightarrow A[X_1, ..., X_n]$ faktorieller Integritätsbereich.

c) (Hilbert) A noethersch $\Leftrightarrow A[X_1, ..., X_n]$ noethersch.

d) Sei A zusätzlich Integritätsbereich, dann ist
A Körper $\Leftrightarrow A[X]$ Hauptidealring.

2.8 Irreduziblitätskriterien

Theorem 2.60 (Eisenstein)**.** *Sei A ein faktoriell Integritätsbereich mit Quotientenkörper $K = Q(A)$.*
Sei

$$f = a_n X^n + ... + a_0 \in A[X]$$

mit $\deg(f) = n \geq 1$. *Sei $p \in A$ prim mit $p|a_i$ für $i = 0, ..., n-1$ und $a \not| a_n$ und $p^2 \not| a_0$.*
Dann ist f irreduzibel in $K[X]$.
Ist f zusätzlich primitiv, so ist f auch irreduzibel in $A[X]$.

Beweis. Sei $f = c\tilde{f}$ mit $\tilde{f} \in A[X]$ primitiv und $c \in A$.
Es reciht zu ziegen, dass $\tilde{f}$ irreduzibel in $A[X]$ ist.
Angenommen $f = gh$ mit $g, h \in A[X] \setminus A$. Sei

$$\tilde{f} = \sum_{k=0}^{n} \tilde{a}_k X^k$$

$$g = \sum_{k=0}^{s} b_k X^k$$

$$h = \sum_{k=0} a_k X^k$$

Dann folgt aus $p \not| a_n$, dass $p \not| c$ und aus $p|a_0$, dass $p|\tilde{a}_0 = b_0 d_0$.
Wir können annehmen. dass $p|b_0$.
Aus $p^2 \not| a_0$ folgt, das $p \not| d_0$. Es gibt aber j, sodass $p \not| b_j$ (da sonst $p|g$).
Wähle nun j, sodass $p|b_i$ für alle $i < j$ und $p \not| b_j$.
Dann muss $1 \leq j \leq s \leq n$. Aus

$$\tilde{a}_j = b_0 d_j + b_1 d_{j-1} + ... + b_j d_0$$

folgt, (da $p|\tilde{a}_j$), dass $p|b_j d_0$ und $p|d_0$. Widerspruch!. □

Beispiel 2.61. Sei $p \in \mathbb{Z}$ eine positive Primzahl. dann ist das p-te Kreisteilunsgpolynom

$$f = X^{p-1} + X^{p-2} + ... + 1$$

irreduzibel in $Z[X]$.

Satz 2.62 (Reduktionskriterium)**.** *Sei A ein faktorieller Integritätsbereich mit Quotientenkörper K, $p \in A$ prim und $d = a_n X^n + ... + a_0$ ein Polynom in $A[X]$ mit $\deg(f) \geq 1$ und $\neq a_n$.*
Sei

$$\pi : A[X] \to \big(A/(p)\big)[X]$$

und $\pi(f)$ irreduzible in $\big(A/(p)\big)[X]$, dann ist f irreduzibel in $K[X]$.

Beweis. Wir nehmen an, dass f primitiv ist.
Ist f reduzibel über $K[X]$ so auch über $A[X]$.
Sei $f = gh$ mit $g, h \in A[X] \setminus A$. Da p den höchsten Koeffizienten von f nicht teilt, gilt dies auch für g und h dun es gilt

$$\pi(f) = \pi(gh) = \pi(g)\pi(h)$$

d.h. $\pi(f)$ zerfällt in $\big(A/(p)\big)[X]$.
Sei f nun beliebig. Schreibe $f = c\tilde{f}$ mit $x \in A$ und $\tilde{f} \in A[X]$ primitiv.
Angenommen f ist nicht irreduzibel in $K[X]$, dann gilt f reduzibel in $K[X] \Rightarrow$ $\tilde{f}$ ist reduzibel in $K[X] \Rightarrow \tilde{f}$ ist reduzzibel in $A[X] \Rightarrow \tilde{f} = gh$ mit $g, h \in A[X] \setminus A$ $\Rightarrow f = cgh$.
Somit ist

$$\pi(f) = \pi(cg)\pi(h)$$

eine Zerlegung von $\pi(f)$. □

Beispiel 2.63.1. Wir zeigen, dass $F = X^2 + 3X^2$ irreduzibel in $\mathbb{Q}[X]$ ist. Wir fassen f als Polynom über $\mathbb{Z}$ auf und reduzierten die Koeffizienten $\mod 3$.

$$\pi(f) = X^3 - X - 1$$

Da $\pi(f)(t) \neq 0$ für alle $t \in \Pi_3$ ist, ist $\pi(f)$ irreduzibel über Π_3 und somit auch über $\mathbb{Q}$.

Beispiel 2.63.2. Das Polynom $f = X^4 + 1$ ist irreduzibel in $\mathbb{Q}[X]$ und in $Z[X]$. Allerdings ist $\pi(f) \in \Pi_p[X]$ reduzibel für alle positiven Primzahlen p.

2.9 Symmetrische Polynome

Definition 2.64. Für $f \in A[X_1, ..., X_n]$ und $\sigma \in S_n$ sei

$$\sigma(f) = \sigma(f(X_1, ..., X_n)) := f(X_{\sigma(1)}, ..., X_{\sigma(n)})$$

Dies liefert eine Operation von S_n auf $A[X_1, ..., X_n]$.

Bemerkung 2.65. Insbesondere gilt für $\sigma, \tau \in S_n$, dass $(\sigma\tau)(f) = \sigma(\tau(f))$.

Definition 2.66. Die Polynome in $A[X_1, ..., X_n]^{S_n}$ (invariant unter S_n) werden als **symmetrische Polynome** bezeichnet.

Proposition 2.67. Die Gruppenoperationen $\sigma \in S_n$ sind Automorphismen auf $A[X_1, ..., X_n][X]$.

Satz 2.68. *a) $A[X_1, ...X_n]^{S_n}$ enthält A und ist ein Unterring von $A[X_1, ..., X_n]$.*

b) S_n operiert auf $A[X_1,...,X_n][X]$ durch

$$\sigma\left(\sum_{j=0}^{n} a_j X^j\right) = \sum_{j=0}^{n} \sigma(a_j) X^j$$

c) Sei $f = (X - X_1)(X - X_2)...(X - X_n)$. Dann ist

$$f = X^n + \sum_{j=1}^{n} (-1)^j s_j X^{n-j}$$

für eindeutig bestimmte Polynome $s_j \in A[X_1,...,X_n]$

d) $\sigma(f) = f$

Definition 2.69. Sei $f \in [X - 1,...,X_n][X]$, $\sigma \in S_n$.
Dann bezeichnet man die s_j in

$$f = \sigma(f) = \sigma\left(X^n + \sum_{j=1}^{n} (-1)^j s_j X^{n-j}\right)$$

als **elementarsymmetrische Polynome**.

Lemma 2.70. *Die elementarsymmetrischen Polynom sind symmetrisch, d.h. $\sigma(s_j) = s_j$. Sie sind gegeben durch*

$$s_1 = X_1 + X_2 + ... + X_n s_2 \quad = X_1X_1 + X_1X_3 + ... + X_1X_n + X_2X_3 + ... + X_{n-1}X_n$$
$$= \sum_{i \leq j} X_iX_j \vdots$$
$$s_n = X_1...X_n$$

Satz 2.71. *Die Polynome s_j sind homogen vom Grad j.*

Definition 2.72. Das Monom $X_1^{i_1}...X_n^{i_n} \in A[X_1,...,X_n]$ hat Grad $i_1 + ... + i_n$.
Für den **Grad** $\deg(f)$ für $f \in A[X_1,...,X_n]$ ist das Maximum über den Grad der Monome.

Definition 2.73. Das Monom $X_1^{i_1}...X_n^{i_n} \in A[X_1,...,X_n]$ hat Gewicht $i_1 + 2i_2 + ... + ni_n$.
Das Gewicht $\text{gew}(f)$ für $f \in A[X_1,...,X_n]$ ist das Maximum über das Gewicht der Monome.

Theorem 2.74. *a) Sei $f \in A[X_1,..,X_n]^{S_n}$ mit $\deg(f) = d$. Dann gibt es eine Polynom $g \in A[X_1,...,X_n]$ mit $\text{gew}(g) \leq d$, sodass $f = g(s_1,...,s_n)$.*

b) Ist f zusätzlich homogen, so hat jedes Monom Gewicht d.

Beweis. a) Wir beweisen durch vollständige Induktion über n. Für $n = 1$ gilt die Behauptung, da $s_1 = x_1$.
Angenommen die Behauptung gilt für Polynome in $A[X_1, ..., X_{n_1}]^{S_{n-1}}$.
Sei $f \in A[X - 1, ..., X_n]$. Es ist zu zeigen, dass f ein Polynom in $s_1, ..., s_n$ ist.
Setzt man $X_n = 0$ in

$$\prod_{j=1}^{n}(X - X_j) = X^n + \sum_{j=1}^{n}(-1)^j s_j X^{n-j}$$

für $s_j = s_j(X_1, ..., X_n)$, so erhält man

$$(X - X_1)(X - X_2)...(X - X_{n-1})(X) = X^n \sum_{j=1}^{n}(-1)^j (s_j)_0 X^{n-j}$$

mit $(s_j)_0 := s_j(X_1, ..., X_{n-1}, 0)$.
Andererseits ist

$$(X - X_1)(X - X_2)...(X - X_{n-1})(X) = X\left(X^{n-1} \sum_{j=1}^{n-1}(-1)^j \tilde{s}_j X^{n-1-j}\right)$$

Dann muss aber $(s_1)_0 = \tilde{s}_1$,...,$(s_{n-1})_0 = \tilde{s}_{n-1}$ und $(s_n)_0 = 0$.
Wir beweisen die Aussage durch Induktion über $d = \deg(f)$.
Hat f Grad 0, so ist die Behauptung trivial.
Sei also $\deg(f) = d > 0$. Dann gibt es ein Polynom $g_1 \in A[X_1, ..., X_{n-1}]$ mit $\mathrm{gew}(g) \leq d$, sodass

$$f(X_1, ..., X_{n-1}, 0) = g_1\big((s_1)_0, ..., (s_{n-1})_0\big)$$

Grad $\leq d$ in $X_1, ..., X_{n-1}$ hat, da $f(X_1, ..., X_{n-1}, 0)$ symmetrisch unter S_{n-1} ist.
Das Polynom $g_1(s_1, ..., s_{n-1})\big)$ hat Grad $\leq d$ in $X_1, ..., X_n$ weil die s_j homogen sind.
Das Polynom

$$f_1(X_1, ..., X_n) = \underbrace{f(X_1, ..., X_n)}_{\substack{\text{Grad } \leq d \\ \text{in } X_1, ..., X_n}} - \underbrace{g(s_1, ..., s_{n-1})}_{\substack{\text{Grad } \leq d \\ \text{in } X_1, ..., X_n}}$$

hat Grad $\leq d$ in $X_1, ..., X_n$ uns ist symmetrisch.
Aus $f_1(X_1, ..., X_{n-1}, 0) \geq 0$ folgt $X_n | f_1$. Damit auch $X_i | f_1$ und somit $s_n | f_1$.
Dann gibt es f_2, sodass $f_1 = s_n f_2$.
Dabei ist f_2 symmetrisch unter S_n und hat Grad $\leq d - n$.
Nach Induktionshypothese gibt es ein Polynom $g_2 \in A[X_1, ..., X_n]$ mit Gewicht $\leq d - n$, sodass

$$f_2 = g_2(s_1, ..., s_n)$$

Es folgt $f = f_1 + g_1 = s_n g_2 + g_1$.
Dann ist

$$f(X_1, ..., X_n) = g_1(s_1, ..., s_{n-1}) + s_n g_2(s_1, ..., s_n) = g(s_1, ..., s_n)$$

mit

$$g(X_1, ..., X_n) = \underbrace{g_1(X_1, ..., X_n)}_{\text{Gewicht } \leq d} + \underbrace{\underbrace{X_n}_{\text{Gew } n} \underbrace{g_2(X_1, ..., X_n)}_{\text{Gew } \leq d-n}}_{\text{Gew } \leq d}$$

b) Siehe Lang

$\square$

Theorem 2.75. *Sie elementarsymmetrischen Polynome $s_1, ..., s_n \in A[X-1, ..., X_n]$ sind algebraisch unabhängig über A.*

Beweis. Durch Induktion über n.
Für $n = 1$ ist die Behauptung klar.
Sei $n > 1$ und die $s_1, ..., s_n$ seien nicht algebraisch unabhängig.
Wähle $f \in A[X_1, ..., X_n]$ mit kleinstem Grad und $f \neq 0$, sodass

$$f(s_1, ..., s_n) = 0$$

Schreibe f als Polynom in X_n mit Koeffizienten in $A[X_1, ..., X_{n_1}]$.

$$f(X_1, ..., X_n) = f_0(X_1, ..., X_{n-1}) + f_1(X_1, ..., X_{n-1})X_n + ... + f_d(X_1, ..., X_{n-1})X_n^d$$

Angenommen $f = X_n\psi$ für ein $\psi \in A[X-1, ..., X_n]$ und $x_n\psi(s_1, ..., s_n) = 0$, dann muss $\psi(s_1, ..., s_n = 0)$ sein.
Dies ist ein Wiederspruch zu der Annahme, dass f minimalen Grad hat.
Also muss $f_0 \neq 0$ sein.
Wir setzen nun $x_i = s_i$ und erhalten

$$\begin{aligned} 0 &= f(s_1, ..., s_n) \\ &= f_0(s_1, ..., s_n) + ... + f_d(s_1, ..., s_{n-1})s_n^d \end{aligned}$$

Nun setzen wir $X_n = 0$. Dann ist

$$0 = f\big((s_1)_0, ..., (s_{n-1})_0\big) = f_0(\tilde{s}_1, ..., \tilde{s}_{n-1})$$

Nach Induktionshypothese sind die $\tilde{s}_1, ..., \tilde{s}_n$ algebraisch unabhängig. Widerspruch! $\square$

Beispiel 2.76. Sei $n = 3$ Dann ist $X_1^3 + X - 2^3 + X_3^3$ ein symmetrisches Polynom. Es gilt

$$X_1^3 + X_2^3 + X_3^3 = s_1^3 - 3s_1s_2 + 3s_3$$

Definition 2.77. Sei $f \in A[X]$ ein normiertes Polynom vom Grad n.
Dann ist die **Diskriminante** von f definiert als

$$D(f) := d_n(-c_1, c_2, -c_3, ..., (-1)^n c_n) \in A$$

Dabei ist $d_n \in \mathbb{Z}[X-1, ..., X_n]$ mit

$$d_n(s_1, ..., s_n) := \prod_{i \leq j} (X_i - X_j)^2$$

Satz 2.78. *Sei $f \in A[X]$ ein normiertes Polynom. Ist*

$$f = \prod_{i=1}^{n}(X - \alpha i)$$

eien Faktorisierung von f in einem Oberring $B \supset A$, dann ist

$$D(f) = \prod_{i \leq j}(\alpha_i - \alpha_j)^2$$

Beweis. Es ist

$$\prod_{i=1}^{n} = X^n + \sum_{i=1}^{n}(-1^i)s_i X^{n-i}$$

so dass

$$f = \prod_{i=1}^{n}(X - \alpha_i) = X^n + \sum_{i=1}^{n}(-1)^i s_i(\alpha_1, ..., \alpha_n)X^{n-1} = X^n + \sum_{i=1}^{n} x_i X^{n-i}$$

d.h.

$$c_i = (-1)^i s_i(\alpha_1, .., \alpha_n)$$

und

$$\begin{aligned} D(f) &= d_n(-c_1, c_2, ..., (-1)^n c_n) \\ &= d_n\big(s_1(\alpha_1, ..., \alpha_n), ..., s_n(\alpha_1, ..., \alpha_n)\big) \\ &= \prod_{i \leq j}(\alpha_1 - \alpha_j)^2 \end{aligned}$$

□

Satz 2.79. *Ist $B \supset A$ ein Integritätsbereich so gilt*

$$D(f) = 0 \Leftrightarrow \text{ } f \text{ hat Mehrfache Nullstellen in } B$$

Beispiel 2.80.1. Für $f = X^2 + aX + b$ ist $D(f) = a^2 - 4b$ (Wurzel der pq-Formel)

Beispiel 2.80.2. Für $f = X^3 + aX + b$ ist $D(f) = -4a^3 - 27b^2$.

3 Körpererweiterungen

3.1 Grundbegriffe

Definition 3.1. Sei L ein Körper, $K \subset L$ heißt **Teilkörper** von L, wenn K abgeschlossen beglich Addition und Multiplikation ist und unter diesen Operationen selbst wieder Körper ist.

Definition 3.2. Sei K ein Körper. Sei $L \supset K$ selbst wieder Körper, dann bezeichnet man L als **Erweiterungskörper** von K und spricht von der **Körpererweiterung** L/K.

Definition 3.3. Sei L/K eine Körpererweiterung. Dann heißt der Körper M mit $K \subset M \subset L$ **Zwischenkörper** der Erweiterung L/K.

Definition 3.4. Sei L/K eine Körpererweiterung und $M \subset L$. Dann bezeichnet man mit $K(M)$ den **kleinsten Teilkörper** von L, der $K \cup M$ enthält.
Man sagt, dass $K(M)$ durch Adjunktion von M zu K entsteht.

Proposition 3.5. Sei L/K eine Körpererweiterung und $M \subset L$. Dann besteht $K(M)$ aus allen Elementen der Form

$$\frac{f(a_1, ..., a_n)}{g(a_1, ..., a_n)}$$

mit $f, g \in K[X_1, ..., X_n]$, $g(a_1, ..., a_n) \neq 0$ und $a_1, ..., a_n \in M$.

Beweisskizze. Die angegebenen Elemente bilden einen Teilkörper von L, der $K \cup M$ enthält und jeder Teilkörper von L der $K \cup M$ enthält, enthält auch die angegebene Elemente. □

Proposition 3.6. Für jedes $a \in K(M)$ gibt es eine endliche Teilmenge $M' \subset M$, sodass $a \in K(M')$.

Definition 3.7. Sei K ein Körper. Sei

$$\mathbb{Z} \xrightarrow{\phi} K$$
$$n \mapsto n \cdot 1$$

Dann ist $\mathrm{Kern}(\phi) = (n)$ für ein eindeutiges $n \in \mathbb{N}$. n wird als **Charakteristik** von K bezeichnet.

Korollar 3.8. *Sei K ein Körper, dann ist* $\mathrm{char}(K) = 0$ *oder prim.*

Beweis. Da $\mathbb{Z}/(n) = \mathbb{Z}/\mathrm{Kern}(\phi) \overset{\sim}{=} \mathrm{Im}(f) \subset K$ keine Nullteiler hat. □

Beispiel 3.9. a) $\mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$ haben Charakteristik 0.

b) Sei $p \in \mathbb{Z}$ eine positive Primzahl. Dann hat $\mathbb{F}_p = \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ Charakteristik p.

Proposition 3.10. Ist K ein Teilkörper von L, so gilt

$$\mathrm{char}(K) = \mathrm{char}(L)$$

Definition 3.11. Sei K ein Körper. Dann heißt

$$P := \bigcap_{L \text{ Teilkörper von } K} L$$

der **Primkörper** von K.

Satz 3.12. *Sei K ein Körper und P der Primkörper von K. Dann gilt*

a) $\mathrm{char}(K) = p$ *für* $p > 0$, p *prim* $\Leftrightarrow P \overset{\sim}{=} F_p$

b) $\mathrm{char}(K) = 0 \Leftrightarrow P \overset{\sim}{=} \mathbb{Q}$.

Definition 3.13. Ist K ein Teilkörper von L, sokönnen wir L als Vektorraum über K auffassen.
Die Dimension diese Vektorrausm heißt **Grad** von L über K.

$$[L : K] := \dim_K(L)$$

Definition 3.14. Die Erweiterung L/K heißt **endlich**, wenn $[L:K] < \infty$.

Proposition 3.15. Ist L endlich und K kein Teilkörper von L, so gilt

$$|L| = |K|^m$$

mit $m = [L:K]$.

Theorem 3.16 (Gradsatz)**.** *Seien $K \subset L \subset M$ Körpererweiterungen. Dann gilt*

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

Ist $(x_i)_{i\in I}$ eine Basis von L/K und $(y_j)_{j\in J}$ eine Basi von M/L, so ist $(x_i y_j)_{(i,j)\in I\times J}$ eine Basis von M/K.

Beweis. Es reicht die zweite Behauptung zu zeigen.
Sei $z \in M$.Dann ist

$$z = \sum_{j\in J} a_j y_j$$

mit $a_j \in L$ und $a_j = 0$ für fast alle $j \in J$.
Wir können a_j schreibe als

$$a_j = \sum_{i\in I} b_{ji} x_i$$

mit $b_{ij} \in K$ und $j_{ij} = 0$ für fast alle $i \in I$.
Also ist

$$z = \sum_{i\in I, j\in J} b_{ij} x_i y_j$$

d.h. $(x_i, y_j)_{(i,j)\in I\times J}$ ist ein Erzeugendensystem von M/K.
Wir zeigen, dass die Vektoren x_i, y_i linear unabhängig über K sind.
Sei

$$\sum_{i,j} \underbrace{c_{ij}}_{\in K} \underbrace{x_i}_{\in K} \underbrace{y_i}_{\in M} = 0$$

Dann gilt für jedes j, dass

$$\sum_{i\in I} c_{ij} x_i = 0$$

weil die y_i linear unabhängig über L sind.
Aus der linearen Unabhängigkeit der x_i über K folgt $c_{ij} = 0$. □

3.2 Algebraische Körpererweiterungen

Definition 3.17. Sei L/K eine Körpererweiterung. $\alpha \in L$ heißt **algebraische** über K, wenn es ein Polynom $g \in K[X] \setminus 0$ gibt, mit $g(\alpha) = 0$.
Äquivalent:Der Homomorphismus $K[X] \to L$,$f \mapsto f\alpha$ hat nicht trivialen Kern.

Definition 3.18. Ist $\alpha \in L$ nicht algebraisch, so nennt man es transzendent.

Definition 3.19. Der Körper L heißt algebraisch über K, wenn alle $\alpha \in A$ algebraisch sind.

Beispiel 3.20. π und e sind transzendent über $\mathbb{Q}$.

Definition 3.21. Sei L/K eine Körpererweiterung und $\alpha \in L$ algebraisch über K. Sei $m_{\alpha,K} \in K[X]$ normiert und erzeuge den Kern von $\varphi : K[X] \to L, f \mapsto f(\alpha)$.
Man nennt es das Minimalpolynom in α über K.

Korollar 3.22. *$m_{\alpha,K}$ ist eindeutig und irreduzibel.*

Satz 3.23. *Sei L/K eine Körpererweiterung und $a \in L$ algebraisch über K. Sei $\varphi : K[X] \to L, g \mapsto g(\alpha)$ und $\mathrm{Im}(\varphi) = K[\alpha]$.*
Dann induziert φ eine Isomorphismus

$$K[X]/(m_{\alpha,K}) \stackrel{\sim}{=} K[\alpha]$$

Insbesondere ist $K[\alpha]$ Körper und es gilt

$$[K[\alpha] : K] = \deg(m_{\alpha,K})$$

Beweis. Da $m_{\alpha,K}$ irreduzibel ist ist $(m_{\alpha,K})$ ein Maximales Ideal in $K[X]$ und damit $K[X]/(m_{\alpha,K})$ Körper.
Aus der Isomorphie folgt dass $K[\alpha]$ Körper ist.
Sei nun $g \in K[X]$. Dann ist $g = qm_{\alpha,K} + r$ mit $q, r \in K[X]$ und $\deg(r) < \deg(m_{\alpha,K})$.
Somit bilden die Restklassen $(m_{\alpha,K}), X + (m_{\alpha,K}), ..., X^{n-1}(m_{\alpha,K})$ mit $n = \deg(m_{\alpha,K})$ eine Basis von $K[X]/(m_{\alpha,K})$ über K.
Dann bildet auch $1, \alpha, ..., \alpha^{n-1}$ eine Basis von $K[\alpha]$ über K. □

Beispiel 3.24. Sei $n \in \mathbb{Z}$, $n > 0$ und p eine positive Primzahl. Dann ist $\sqrt[n]{p}$ eine Nullstelle von $f = X^n - p$.
D.h. $\sqrt[n]{p}$ ist algebraisch über $\mathbb{Q}$.
Das Eisenstein-Kriterium zeigt, dass f ireduzibel über $\mathbb{Q}$ und $[\mathbb{Q}(\sqrt[n]{p}) : \mathbb{Q}] = n$ ist.

Satz 3.25. *Eine endliche Körpererweiterung L/K ist algebraisch.*

Beweis. Sei $[L : K] = n$, $n < \infty$ und $\alpha \in L$.
Dann sind ie Elemente $\alpha^0, \alpha^1, ...a^n$ linear abhängig über K.
(d.h. es existieren nicht trivial $c_0, ..., c_n \in K$ sodass $c_0\alpha^0 + ... + c_n\alpha^n = 0$.
Also ist α Nullstelle des Polynoms un damit algebraisch.) □

Definition 3.26. Eine Körpererweiterung heißt einfach, wenn es $\alpha \in L$ gibt mit $L = K(\alpha)$.

Definition 3.27. Eine Körpererweiterung heißt endlich erzeugt, wenn es endlich viele Element $\alpha_1, ..., \alpha_n$ gibt sodass $L = K(\alpha_1, ..., \alpha_n)$.

Satz 3.28. *Sei $L = K(\alpha_1, ..., \alpha_n)$ eine endlich erzeugte Körpererweiterung und $\alpha_1, ..., \alpha_n$ algebraisch über K. Dann gilt*

a) $L = K(\alpha_1, ..., a_n))K[\alpha_1, ..., \alpha_n]$

b) *L ist endlich und somit insbesondere algebraische Erweiterung von K.*

Beweis. jeweils durch Induktion über n

a) Angenommen die Aussage gelte für n:

$$K[\alpha_1, ..., \alpha_{n+1}] = K[\alpha_1, ..., \alpha_n][\alpha_{n+1}]$$
$$\underset{IH}{=} K(\alpha_1, ..., \alpha_n)[\alpha_{n+1}]$$

Da α_{n+1} algebraisch über $K \subseteq K(\alpha_1, ..., \alpha_n)$

$$= K(\alpha_1, ..., \alpha_n)(\alpha_{n+1})$$
$$= K(\alpha_1, ..., \alpha_{n+1})$$

b) Es gilt

$$[K(\alpha_1, ..., \alpha_{n+1}) : K] = \underbrace{[K(\alpha_1, ..., \alpha_n) : K(\alpha_1, .., \alpha_n)]}_{<\infty}[K(\alpha_1, ..., \alpha_n) : K] < \infty$$

da α_{n+1} algebraisch über K.

□

Korollar 3.29. *Sei L/K eine Körpererweiterung. Dann sind äquivalent*

a) L/K ist endlich

b) L wird über K von endlich vielen Elementen erzeugt.

c) L ist eine endlich erzeugte algebraische Erweiterung.

Korollar 3.30. *Sei L/K eine Körpererweiterung. Dann sind äquivalent*

a) L/K ist algebraisch.

b) L wird über K von algebraisch Elementen erzeugt.

Beweis. 1) $\Rightarrow$ 2) $K(L) = L$ ist algebraisch

2) $\Rightarrow$ 1) Sei $K = L(m)$ für $m \subset L$ algebraisch über K.
Sei $\alpha \in L$. Dann gibt es $\alpha_1, ..., \alpha_n \in M$ mit $\alpha \in K(\alpha_1, ..., \alpha_n)$. Also ist α algebraisch über K.

□

Satz 3.31. *Seien $K \subset L \subset M$ Körpererweiterungen, sei L/K algebraisch und $\alpha \in M$ algebraisch über L.*
Dann ist α algebraisch über K.
Insbesondere:

$$M/K \textit{ ist algebraisch } \Leftrightarrow L/K \textit{ ist algeraisch über } M/L$$

Beweis. Sei α algebraisch. Dann existiert ein Polynom $G = \sum_{i=0}^{n} a_i X^i \in L[X]$ mit $g(\alpha) = 0$.
Also ist $a \in K(a_0, ..., a_n, \alpha) = K(a_0, ..., a_n)(\alpha)$.
Durch n-faches anwenden des Gradsatzes folgt $[K(a_0, ..., a_n) : K] < \infty$.
Da α algebraisch über $a_1, ..., a_n$ gilt

$$[K(a_0, ..., a_n, \alpha) : K(a_0, ..., a_n)] < \infty$$

Also ist auch $[K(a_0, ..., a_n, \alpha) : K] < \infty$ und daher folgt, dass α algebraisch über K ist. □

Definition 3.32. Sei L/K eine Körpererweiterung. Dann ist

$$L_{alg} := \{a \in L \mid a \text{ algebraisch über } K\}$$

der algebraische Abschluss von L in K.

Korollar 3.33. *Seien $a, b \in L$ algebraisch über K. Dann ist $K(a, b)$ algebraisch über K.*
Also ist auch $a - b \in K(a, b)$ algebraisch über K und falls $b \neq 0$ auch $ab^{-1} \in K(a, b)$.

Beispiel 3.34. Der algebraische Abschluss von $\mathbb{Q}$ in $\mathbb{C}$ ist algebraisch über $\mathbb{Q}$ aber nicht endlich über $\mathbb{Q}$da er u.a. die Teilkörper $\mathbb{Q}(\sqrt[n]{p})$ (p prim) enthält.

3.3 Der algebraische Abschluss eines Körpers

Satz 3.35 (von Kronecker)**.** *Sei K ein Körper $f \in K[X] \setminus K$.*
Dann gibt es eine algebraische Erweiterung L/K sodass f eine Nullstelle in L hat.
Ist f irreduzibel, so kann man $L = K[X]/(f)$ setzen.

Beweis. Sei $f \in K[X] \setminus K$ und sei f irreduzibel.
Dann ist (f) ein maximales Ideal in $K[X]$ und daher $K[X]/(f)$ Körper.
Die Komposition $K \hookrightarrow K[X] \xrightarrow{\Pi} K[X]/(f)$ ist ein Homomorphismus von Körpern und daher injektiv.
Fasse nun K als Teilkörper von L auf und definiere

$$a := \Pi(X) = X + (f)$$

Dann gilt mit $f = \sum_{i=0}^{n} a_i X^i$, dass

$$\begin{aligned} f(a) = \sum_{i=0}^{n} a_i a^i &= \sum_{i=0}^{n} a_i \Pi(X^i) = \Pi\left(\sum_{i=0}^{n} a_i X^i\right) \\ &= \Pi(f) \equiv 0 \end{aligned}$$

D.h. a ist Nullstelle von f.
Sei nun f nicht irreduzibel ist a Nullstelle eines irreduziblen Faktors.
Aus der Polynomdivision folgt, dass $[L : K] = \deg(f) < \infty$ und somit ist L/K algebraisch. □

Definition 3.36. Ein Körper K heißt **algebraisch abgeschlossen** wenn jedes Polynom $f \in K[X] \setminus K$ eine Nullstelle in K hat.
(Äquivalent: f zerfällt in Linearfaktoren)

Satz 3.37. *Ein Körper K ist genau dann algebraisch abgeschlossen wenn es keine echte algebraische Erweiterung L/K zulässt.*

Theorem 3.38. *Sei K ein Körper. Dann gibt es einen algebraische abgeschlossen Körper L mit $K \subseteq L$.*

Artin. Sei $K \hookrightarrow L_i$ eine Einbettung, sodass jedes nicht Konstante Polynome in $K[X]$ eine Nullstelle in L_i hat. Sei$I = K[X] \setminus K$.
Wir betrachten den Polynomring

$$K[(X_i)_{i\in I}]$$

Sei

$$A = \{f(X_f) \mid f \in I\}$$

Dann ist $A \neq K[(X_i)_{i\in I}]$, denn:
Angenommen $A = K[(X_i)_{i\in I}]$, dann ist $1 \in A$, d.h.

$$1 = \sum_{j=1}^{n} g_j f_j(X_{f_j})$$

für geeignete $g_j \in K[(X_i)_{i\in I}]$ und $f_i \in I$.
Es gibt aber einen Erweiterungskörper K' von K, sodass jedes f_j eine Nullstelle $a_j \in K'$ hat.
Definiere

$$K([(X_i)_{i\in I} \to K[(X_i)_{i\in I}]$$

mit $\varphi|_K = \mathrm{id}$.
Dann ist $\varphi(X_i) = X_i$ für $i \in I \setminus \{f_1, ..., f_n\}$ und $f(X_{f_i}) = a_i$ für $i \in \{1, ..., n\}$ und

$$1 = \varphi(1) = \sum_{j=1}^{m} f(g_j) \underbrace{f\big(f(x_{f_j})\big)}_{=0} = 0$$

Widerspruch, da in Körpern $1 \neq 0$ sein muss.
Also ist $A \subsetneq K[(X_i)_{i\in I}]$.

Dann ist A in einem maximalen Ideal M enthalten und es gibt π

$$K \hookrightarrow K[(X_i)_{i\in I}] \xrightarrow{\pi} \underbrace{K[(X_i)_{i\in I}]/M}_{=L_i}$$

Setze $K = L_0$. Dann ist

$$L_0 \xhookrightarrow{\varphi_{01}} L_1$$

Sei $f \in I$. Dann ist

$$\underbrace{\varphi_{01}}_{\in L_1[X]} \big(\pi(X_f)\big) = \pi\big(f(X_f)\big) = 0$$

d.h. $\varphi_{01}(f)$ hat eine Nullstelle in L_1. Durch Fortführung dieser Konstruktion erhalten wir eine Sequenz

$$L_0 \xhookrightarrow{\varphi_{01}} L_1 \xhookrightarrow{\varphi_{12}} ...$$

und die Abbildungen

$$L_i \xhookrightarrow{\varphi_{ij}}$$

Sei nun
$$L = \lim_{\leftarrow} L_i = \bigcup_{i=1}^{\infty} L_i / \sim$$
der Direkten L_i und sein die Abbildungen
$$\varphi_i : L_i \to L$$
die entsprechenden Einbettungen.
Dann ist L ein Ring und die φ_i Ringhomomorphismen.

Seien $a, b \in L$. Dann existieren $a_i, b_i \in L_i$, mit $a\varphi_i(a_i)$, $b = \varphi_i(b_i)$ und
$$a + b = \varphi_i(a_i + b_i)$$
$$ab = \varphi_i(a_i b_i)$$

Somit ist L Körper.

Sei $g \in L[X] \setminus L$. Dann gibt es ein i und ein $g_i \in L[X] \setminus L_i$, sodass
$$g = \varphi_i(g_i)$$
Dei Abbildung $\varphi_{ii+1}(g_i)$ zerfällt über L_{i+1} in Linearfaktoren. Somit zerfällt auch
$$g = \varphi_i(g_i) = \varphi_j\big(f_{ij}(g_i)\big)$$
□

Satz 3.39. *Sei K ein Körper, dann gibt es einen algebraisch abgeschlossenen Körper $\overline{K}$, der K enthält und algebraisch über K ist. $\overline{K}$ wird als der algebraische Abschluss von K bezeichnet.*

Beweis. Es gibt einen algebraisch abgeschlossenen Körper L der K enthält. Setze
$$\overline{K} = \{a \in L \mid a \text{ algebraisch über } K\}$$
Dann ist $\overline{K}$ ein Teilkörper von L der K enthält.

Zz: $\overline{K}$ ist algebraisch abgeschlossen:
Sei $f \in \overline{K}[X] \setminus \overline{K}$. Dann hat f eine Nullstelle α in L. α ist algebraisch über $\overline{K}$. Da $\overline{K}$ algebraisch über K ist ist α auch algebraisch über K. Damit ist $\alpha \in \overline{K}$.
□

Korollar 3.40. *Seien L, L' algebraische Abschlüsse des Körpers K, dann ist $L \cong L'$.*

Beweis. Ist $\sigma : K \to L$ ein Homomorphismus von Körpern, so induziert σ einen Homomorphismus $K[X] \to L[X]$.
Ist α eine Nullstelle von $f \in K[X]$ in K, so ist $\sigma(\alpha)$ eine Nullstelle von $\sigma(f)$ in L. □

Satz 3.41. *Sei K ein Körper und $K' = K(\alpha)$ eine einfache algebraische Körpererweiterung von K und $\sigma : K \to L$ ein Homomorphismus. Dann gilt*

$$\begin{tikzcd}
 & K[X] \arrow[dl, "\varphi"'] \arrow[d, "\pi"] \arrow[dr, "\psi"] & \\
K[\alpha] & K[X]/(m_{\alpha,K}) \arrow[l, "\overline{\varphi}"] \arrow[r, "\overline{\psi}"] & L
\end{tikzcd}$$

Abbildung 1: Kommutierendes Diagramm der Algebraischen Körpererweitungen

a) *Ist $\sigma' : K' \to L$ ein Homomorphismus der σ fortsetzt, so ist $\sigma'(\alpha)$ Nullstelle von*
$$\sigma'(m_{\alpha,K}) = \sigma(m_{\alpha,K})$$

Satz 3.42. *Sei K ei Körper $K' = K(\alpha)$ eine einfache algebraische Erweiterung von K und $\sigma : K \to L$ ein Körperhomomorphismus.*

a) *Ist $\sigma' : K' \to L'$ ein Homomorphismus, der σ Fortsetzt, so ist $\sigma'(\alpha)$ Nullstelle von $\sigma(m_{\alpha,K}) = \sigma'(m_{\alpha,K})$.*

b) *Es gibt zu jeder Nullstelle $\beta \in L$ von $\sigma(m_{\alpha,K})$ genau eine Fortsetzung $\sigma' : K' \to L'$ von σ mit $\sigma'(\alpha) = \beta$.*

Beweis. Wir zeige nur b)

b) Sei $\beta \in L$ Nullstelle von $\sigma(m_{\alpha,K})$ und sei

$$\begin{aligned} \phi : K[X] &\to K[\alpha] & \qquad \psi : K[X] &\to L \\ g &\mapsto g(\alpha) & g &\mapsto \sigma(g)(\beta) \end{aligned}$$

Dann ist $(m_{\alpha,K}) = \mathrm{Kern}(\varphi)$ und $(m_{\alpha,K}) \subset \mathrm{Kern}(\psi)$.
Wir erhalten das kommutierende Diagramm **??** invertierbar. Definiere $\sigma' := \overline{\psi} \circ \overline{\varphi}^{-1}$.
Dann ist $\sigma : K[\alpha] \to L$ und

$$\sigma'(\alpha) = \overline{\psi}\big(X + (m_{\alpha,K})\big) = \psi(X) = \beta$$

Das beweist die Existenz von σ'. Die Eindeutigkeit folgt draus, dass jedes Fortsetzung σ' durch ihren Wert auf α festgelegt ist.

□

Theorem 3.43 (Fortsetzungssatz)**.** *Sei K ein Körper, L ein algebraisch abgeschlossener Körper und $\sigma : K \to L$ ein Körperhomomorphismus. Sei K'/K eine algebraische Körpererweiterung.*
Dann lässt sich σ fortsetzen zu einem Homomorphismus $\sigma' : K' \to L$.
Ist K' zusätzlich abgeschlossen und L algebraisch über $\sigma(K)$, so ist jedes Fortsetzung σ' von σ ein Isomorphismus.

Beweis. Sei M die Menge der Paare (F, τ), wobei $K \subset F \subset K'$ ein Zwischenkörper und $\tau : F \to L$ eine Fortsetzung von σ ist. Dann ist M partiell geordnet durch
$$(F_1, \tau_1) \leq (F_2 \tau_2) \Leftrightarrow F_1 \subset F_2 \text{ und } \tau_2|F_1 = \tau_1$$
Es gilt $M \neq \emptyset$, weil $(K, \sigma) \in M$.
Jede Kette in M hat eine obere Schranke. somit hat M ein maximales Element

(F, τ).
Es gilt $F = K'$, denn:
Angenommen $F \neq K'$. Sei $\alpha \in K' \setminus F$. Dann lässt sich τ fortsetzen zu einem Homomorphismus $\tau : F(\alpha) \to L$. Widerspruch!

Sei nun K' algebraisch abgeschlossen, L algebraisch über $\sigma(K)$ und $\sigma' : K' \to L$ eine Fortsetzung von σ.
L ist algebraisch über $\sigma(K)$ und damit über $\sigma'(K')$.
$\sigma'(K')$ ist aber bereits algebraisch abgeschlossen.
Es folgt $\sigma'(K') = L$. □

Korollar 3.44. *Sei K ein Körper und seien $\overline{K}_1$ und $\overline{K}_2$ algebraische Abschlüsse von K. Dann gibt es einen Isomorphismus $\sigma : \overline{K}_1 \to \overline{K}_2$ der die Identität auf K fortsetzt.*

Beweis. Die Einbettung $\sigma : K \hookrightarrow \overline{K}_2$ lässt sich fortsetzen zu einem Homomorphismus $\sigma : \overline{K}_1 \to \overline{K}_2$. Diese ist ein Isomorphismus.
(Dieser ist i.a. nicht Kanonisch) □

Beispiel 3.45. Der algebraische Abschluss $\overline{\mathbb{Q}} = \{a \in \mathbb{C} \mid a \text{ ist algebraisch über } \mathbb{Q}\}$ von $\mathbb{Q}$ in $\mathbb{C}$ ist ein algebraischer Abschluss von $\mathbb{Q}$.

3.4 Zerfallskörper

Definition 3.46. Seien K/L und L'/K Körpererweiterungenund sien $\sigma : L \to L'$ ein Homomorphismus.
σ wird als K**-Homomorphismus** ($\sigma|_K = \mathrm{id}\,|_K$) bezeichnet, wenn σ eine Fortsetzung der Identität auf K ist.

Definition 3.47. Sei L/K eine Körpererweiterung und $F \subset K[X] \setminus K$eine Menge nicht-konstanter Polynome.
Eine Erweiterung L/K heißt **Zerfällungskörper** von F, über K, wenn

a) Jedes $f \in K$ zerfällt in Linearfaktoren über L

b) Die Körpererweiterung L/K wird con Nullstellen der $f \in F$ erzeugt.

Lemma 3.48. *Sei $\overline{K}$ ein algebraischer Abschluss von K und M die Menge der Nullstellen der Polynome von F in $\overline{K}$. Dann ist $L = K(M) \subset \overline{K}$ ein Zerfällungskörper von F.*

Satz 3.49. *Sei $F \subset K[X] \setminus K$ und seine L_1 und L_2 zwei Zerfällungskörper von F über K. Sei $\sigma : L_1 \to \overline{L}_2$ ein K-Homomorphismus in einen algebraischen Abschluss von L_2.*
Dann gilt $\sigma(L_1) = L_2$.

Beweis. Wir beweisen schrittweise:

- Wir nehmen zuerst an, dass F nur eine Polynom f enthält.
  Seien $a_1, ..., a_n$ die Nulsstelle von f in L_1 und $b_1, ..., b_n$ die Nullstelle von f in L_2. Dann ist
  $$f = \prod_{\rangle=\infty}^{\backslash} (\mathcal{X} - \dashv_{\rangle})$$

mit $c \in K$ und

$$\sigma(f) = c\prod_{i=1}^{n}\big(X - \sigma(a_i)\big) = c\prod_{i=1}^{n}(X - b_i)$$

d.h. nach Umnummerierung also $\sigma(a_i) = b_i$.
Es folgt

$$L_2 = K(b_1, ..., b_n) = K\big(\sigma(a_1), ..., \sigma(a_n)\big) = \sigma\big(K(a_1, ..., a_n)\big) = \sigma(L_1)$$

- Falls f endlich viele Polynome enthält, so argumentiert man anlog mit dem Produkt der Polynome.
- Sei F nun unendlich, M_1 die Menge der Nullstelle von F in L_1, M_2 die Menge der Nullstellen von F in L_2 und sei $a \in L_1$.
  Dann gibt es eine endliche Teilmenge $M_1' \subset M_1$, sodass $a \in K(M_1')$, d.h. es gibt eine endliche Teilmenge $F' \subset F$, sodass a im Zerfällungskörper L_1' von F' über K in L_1 liegt.
  Dann gilt $\sigma(L_1') = L_2'$, d.h. $\sigma(a) \in L_2$ und $\sigma(L_1) \subset L_2$.
  Analog gilt $L_2 \subset \sigma(L_1)$.

□

Korollar 3.50. *Sei $F \in K[X] \setminus K$ und seien L_1 und L_2 Zerfällungskörper von F über K.
Dann gibt es einen K-Isomorphismus $L_1 \to L_2$*

Beweis. Die Inklusion $K \hookrightarrow \overline{L}_2$ lässt sich zu einer K-Homomorphismus $L_1 \xrightarrow{\sigma} \overline{L_2}$ fortsetzen. Für diesen gilt $\sigma(L_1) = L_2$ □

Theorem 3.51. *Sei L/K eine algebraische Körpererweiterung. Dann sind äquivalent:*

a) L ist der Zerfällungskörper einer Menge nicht-konstanter Polynome in $K[X]$.

b) Ist $\sigma : L \to \overline{L}$ ein K-Homomorphismus, so gilt $\sigma(L) = L$.

c) Jedes irreduzible Polynom $f \in K[X]$, das mindestens eine Nullstelle hat zerfällt in L vollständig in Linearfaktoren.

Beweis. 1) ⇒ 2) Folgt aus **??** mit $L_1 = L_2 = L$

2) ⇒ 3) Sei $f \in K[X]$ irreduzibel und $a \in L$ eine Nullstelle von f in L. Dann ist f bis auf eine Konstante das Minimalpolynom $m_{\alpha,K}$. Ist b eine weitere Nullstelle von f in $\overline{L}$, so hat die Einbettung $K \hookrightarrow \overline{L}$ eine Fortsetzung $\sigma : K(\alpha) \to \overline{L}$ mit $\sigma(a) = b$ (**??**). Diese lässt sich Fortsetzen (**??**) zu einm K-Homomorphismus $\sigma : L \to \overline{L}$.
Aus $\sigma(L) = L$ folgt $b \in L$.

3) ⇒ 1) Es ist $L = K(M)$ für eine Teilmenge $M \subset L$ bestehend aus algebraischen Elementen (über K).
Für $a \in M$ ist $m_{a,K}$ irreduzibel über K und hat a als Nullstelle in L.
Somit zerfällt $m_{a,K}$ in Linearfaktoren über L.
Also ist L der Zerfällungskörper der $m_{a,K}$.

□

Definition 3.52. Eine algebraische Körpererweiterung L/K die eine der Bedingungen von **??** erfüllt heißt **normal**.

Satz 3.53. *Sei L/K eine normale Körpererweiterung und $K \subset M \subset L$ ein Zwischenkörper. Dann ist auch L/M normal.*

Beweis. Sei $\sigma \in \mathrm{Hom}_M(L, \overline{L})$, dann ist $\sigma \in \mathrm{Hom}_K(L, \overline{L})$. Dann ist $\sigma(L) = L$. □

Beispiel 3.54.

a) Sei L/K eine Körpererweiterung von Grad 2, dann ist L/K normal.

b) Die Erweiterungen $\mathbb{Q}(\sqrt[4]{2})/(\mathbb{Q}(\sqrt{2}))$ und $\mathbb{Q}(\sqrt{2})/\mathbb{Q}$ sind normal. Die Erweiterung $\mathbb{Q}(\sqrt[4]{2})/\mathbb{Q}$ hingegen nicht.

3.5 Separabel Körpererweiterungen

In diesem Abschnitt bezeichne K ein Körper.

Definition 3.55. Ein Polynom $f \in K[X]$ heißt **separabel**, wenn f nur einfache Nullstellen in einem algebraischen Abschluss $\overline{K}$ von K hat.
(Dies ist unabhängig von der Wahl von $\overline{K}$)

Satz 3.56. *Sei $f \in K[X]$ irreduzible, dann*

$$f \text{ separabel} \Leftrightarrow f' \neq 0$$

Beweis. Sei $\alpha \in K$ eine Nullstelle von f. Dann ist $f = cm_{\alpha,K}$ für ein $c \in K^*$ und es gilt

$$\alpha \text{ ist mehrfache Nullstelle} \Leftrightarrow f(\alpha) = f'(\alpha) = \Leftrightarrow f' = 0 \text{ weil } \deg(f') < \deg(f)$$

□

Definition 3.57. Sei L/K eine algebraische Körpererweiterung. $a \in L$ heißt **separabel** über K, wenn $m_{a,K}$ separabel ist.

Definition 3.58. Sei L/K eine algebraische Körpererweiterung. L heißt **separabel** über K, wenn jedes $a \in L$ separabel über K ist

Satz 3.59. *Sei* $\mathrm{char}(K) = 0$ *und L/K eine algebraische Körpererweiterung. Dann ist L/K separabel.*

Definition 3.60. Sei L/K eine algebraische Körpererweiterung und $\overline{K}$ der algebraische Abschluss von K.
Der **Separabilitätsgrad** $[L : K]_S$ von L über K ist definiert als

$$[L : K]_S := \left|\mathrm{Hom}_K(L, \overline{K})\right|$$

Diese Definition ist unabhängig von $\overline{K}$.

Satz 3.61. *Sei $K(a)/K$ eien einfach algebraische Körpererweiterung. Dann gilt*

a) Der Separabilitätsgrad $[K(a) : K]_S$ ist gleich der Anzahl der verschiedenen Nullstellen von $M_{a,K}$ in einem algebraischen Abschluss $\overline{K}$ von K.

b) a ist genau dann separabel über K, wenn $[K(a):K]_S = [K(a), K]$.

Beweis. a) **??** gibt, dass die Anzahl der verschiedene K-Homomorphismen $\varphi : K(a) \to \overline{K}$ gelilch der Anzahl der verschiedenen Nullstellen von $m_{a,K}$ in $\overline{K}$ ist.

b) Es gilt

$$\begin{aligned} & a \text{ ist separabel über } K \\ \Leftrightarrow\ & m_{a,K} \text{ ist separabel} \\ \Leftrightarrow\ & m_{a,K} \text{ hat nur einfache Nullstellen in } \overline{K} \\ \Leftrightarrow\ & \text{die Anzahl der Nullstellen von } m_{a,K} \text{ ist } \deg(m_{a,K}) \\ \Leftrightarrow\ & [K(a):K]_S = [K(a):K] \end{aligned}$$

□

Theorem 3.62 (Gradsatz der Separabilität)**.** *Sei $K \subset L \subset M$ algebraische Körpererweiterungen. Dann gilt*

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

Beweis. Sei $\overline{K}$ eine algebraischer Abschluss von M. Dann ist $\overline{K}$ auch ein algebraischer Abschluss von K und $K \subset L \subset M \subset \overline{K}$. Sei

$$\begin{aligned} \mathrm{Hom}_K(L, \overline{K}) &= \{\sigma_i \mid i \in I\} \\ \mathrm{Hom}_L(M, \overline{K}) &= \{\tau_i \mid i \in J\} \end{aligned}$$

mit paarweise verschiedenen σ_i und τ_i.
Wir können $\sigma_i : L \to \overline{K}$ zu einerm K-Automorphismus $\overline{\sigma_i} : \overline{K} \to \overline{K}$ fortsetzen. Es gilt

a) Die Abbildung $\overline{\sigma_i} \circ \overline{\tau_j}$ sind paarweise verschiedene, denn:
Sei $\overline{\sigma_i} \circ \tau_j = \overline{\sigma}_{i'} \circ \tau_{j'}$. Die Restriktionen beider Seiten auf L liefert $\sigma_i = \sigma_{i'}$, d.h. $i = i'$. Es folgt $\tau_j = \tau_{j'}$ und $j = j'$.

b) $\mathrm{Hom}_K(M, \overline{K}) = \{\overline{\sigma} \circ \tau_j \mid i \in I, j \in J\}$, denn:
Die Abbildungen $\overline{\sigma}_i \circ \tau_i$ sind K-Homomorphismen. Es beleibt zu zeigen, dass jedes Element in $\mathrm{Hom}_K(M, \overline{K})$ dieser Form ist.
Sei $\tau \in \mathrm{Hom}_K(M, \overline{K})$. Dann ist $\tau|_L = \sigma_i$ für ein i. Die Abbildung $\overline{\sigma}_i^{-1} \circ \tau$ ist in $\mathrm{Hom}_L(M, \overline{K})$. d.h.$\overline{\sigma_i}^{-1} \circ \tau = \tau_j$ für ein $j \in J$. Also ist $\tau = \overline{\sigma_i} \circ \tau_j$.

Es folgt die Behauptung. □

Satz 3.63. *Sei L/K eine endliche Körpererweiterung. Dann gilt*

$$[L:K]_S \leq [L:K]$$

Beweis. L/K ist algebraisch, d.h. $L = K(a_1, ..., a_n)$ für geeigente $a_1, ..., a_n \in L$. Sei $L_0 = K$, $L_1 = K(a_1)$,..., $L_n = K(a_1, ..., a_n)$.

Äquivalent dazu ist $L_i = L_{i-1}(a_i)$ für $1 \leq i \leq n$.
Dann gilt

$$[L_i : L_{i-1}] = [L_{i-1}(a_i) : L_{i-1}] = \deg(m_{a_i, L_{i-1}})$$
$$\geq \text{ Anzahl der verschidenen Nullstellen von } m_{a_i L_{i-1}} \text{ in } \overline{K} \quad = [L_i : L_{i-1}]_S$$

Da aber zusätzlich

$$[L : K] = \prod_{i=1}^{n} [L_i : L_{i-1}]$$
$$[L : K]_S = \prod_{i=1}^{n} [L_i : L_{i-1}]_S$$

folgt $[L : K]_S \leq [L : K]$ □

Theorem 3.64. *Sei L/K eine endliche Körpererweiterung. Dann sin äquivalent*

a) L/K ist separabel.

b) Es gibt über K separabele Elemente $a_1, ..., an \in L$, sodass $L = K(a_1, ...a_n)$.

c) $[L : K]_S = [L : K]$

Beweis. 1) $\Rightarrow$ 2) ist klar.

2) $\Rightarrow$ 3) Setze $L_0 = K$, $L_I = L_{i-1}(a_i)$.
Dann ist a_i separable über K, d.h. $m_{a_i,K}$ hat nur einfache Nullstellen in $\overline{K}$. Es gilt $m_{a_i,L_{i-1}} | m_{a_i,K}$.
Also hat auch $m_{a_i,L_{i-1}}$ nur einfache Nullstellen in $\overline{K}$.
Somit ist a_i separabel über L_{i-1} und daher gilt $[L_i : L_{i-1}]_S = [L_1 : L_{i-1}]$.
Es folgt

$$[L : K]_S = \prod_{i=1}^{n} [L_i : L_{i-1}]_S = \prod_{i=1}^{n} [L_i : L_{i-1}] = [L : K]$$

3) $\Rightarrow$ 1) Sei $a \in L$. Dann ist a algebraisch über K und $K \subset K(a) \subset L$.
Dann gilt mit dem Gradsatz

$$[L : K]_S = [L : K(a)]_S [K(a) : K]_S$$
$$[L : K] = [L : K(a)][K(a) : K]$$

Mit der Annahme dass $[L : K] = [L : K]_S$ und **??**

$$[L : K(a)]_S \leq [L : K(a)]$$
$$[K(a) : K]_S \leq [K(a) : K]$$

folgt, dass

$$[K(a) : K]_S \leq [K(a) : K]$$

d.h. a ist separabel über K.

□

Satz 3.65. *Sei $f \in K[X] \setminus K$ separabel. Dann ist auch der Zerfällungskörper von f über K separabel.*

Beweis. Seien $a_1, ..., a_n$ die Nullstellen von f in $\overline{K}$. Dann ist $K(a_1, ..., a_n)$ ein Zerfällungskörper von f über K. Aus $f(a_i) = 0$ folgt, dass $m_{a_i,K}|f$. Somit hat $m_{a_i,K}$ nur einfache Nullstellen in $\overline{K}$ d.h. a_i ist separabel über K. □

Korollar 3.66. *Sei L/K eine algebraische Körpererweiterung und $M \subset L$, sodass $L = K(M)$. Dann sind äquivalent*

a) L/K ist separabel

b) Alle $a \in M$ sind separabel über K.

Ist ein dieser Bedingungen erfüllt, so gilt

$$[L : K]_S = [L : K]$$

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

2) $\Rightarrow$ 1) Sei $c \in L$. Dann gibt es immer endlich viele $a_1, ..., a_n \in M$, sodass $c \in K(a_1, ..., a_n)$. Nach **??** ist $K(a_1, ..., a_n)$ separabel über K und somit auch c.

Für L/K endlich gilt **??**.

Sei also $[L : K] = \infty$. Da L/K separabel ist, gilt dies auch für jeden Zwischenkörper $K \subset E \subset L$. Falls $[E : K] < \infty$, so gilt

$$[L : K]_S = [L : E]_S[E : K]_S \geq [E : K]_S = [E : K]$$

Es folgt $[L : K]_S = \infty$, weil L/K Zwischenkörper beliebig hohen aber endlichen Grad hat. □

Korollar 3.67. *Seien $K \subset L \subset M$ algebraische Körpererweiterungen. Dann gilt M/K ist genau dann separabel, wenn M/L und L/K separabel sind.*

Beweis. $\Rightarrow$ Sei M/K separabel. Dann ist auch L/K separabel. Sei $a \in M$. Dann gilt $m_{a,L}|m_{a,K}$, d.h. a ist separabel über L.

$\Leftarrow$ Seien M/L und L/K separabel. Sei $a \in M$. Der Erweiterungskörper L' von K der von den Koeffizienten von $m_{a,L}$ erzeugt wird ist endlich über K. Aus $L' \subset L$ folgt $m_{a,L}|m_{a,L'}$. Da $m_{a,L} \in L'[X]$ gilt aber auch $m_{a,L'}|m_{a,L}$. Also ist $m_{a,L} = m_{a,L'}$ und $L'(a)/L'$ ist separabel.

□

Theorem 3.68 (Satz vo primitiven Element)**.** *Sei L/K einen endliche separable Körpererweiterung. Dann gibt es ein $a \in L$, sodass $L = K(a)$*

Beweis. K **endlich** Sei K endlich, so auch L. Sei a ein Erzeuger von L^*, Dann ist $L = K(a)$.

K **unendlich** Sei K unendlich. Da L/K einen endliche Erweiterung ist gibt es Elemente $a_1, ..., a_n \in L$, sodass $L = K(a_1, ..., a_n)$. Durch zusammenfassen $a_i a_j$ zu c reicht es für $n = 2$ zu zeigen:

Sei $L = K(a,b)$ für geeignete $a, b \in L$ gegeben. Sei $m = [L : K]_S$ und seien $\sigma_1, ..., \sigma_m$ die verschiedenen Elemente in $\mathrm{Hom}_K(L, \overline{K})$. Definiere

$$g = \prod_{i \neq j} \left(\left(\sigma_i(a) - \sigma_j(a)\right) + \left(\sigma_i(b) - \sigma_j(b)\right) \right) \in \overline{K}[X]$$

Dann ist g nicht das Nullpolynom, denn für $i \neq j$ ist $\sigma_i(a) \neq \sigma_j(a)$ oder $\sigma_i(b) \neq \sigma_j(b)$. Da K unendlich gibt es ein $c \in K$, sodass mit $g(c) \neq 0$. Es folgt

$$\left(\left(\sigma_i(a) - \sigma_j(a)\right) + \left(\sigma_i(b) - \sigma_j(b)\right) \right) c \neq 0$$

bzw. $\sigma_i(a + bc) \neq \sigma_j(a + bc)$ für alle $i \neq j$.
Die Elemente $\sigma(a + bc)$ si also paarweise verschieden. Sei f das Minimalpolynom von $a + bc$ über K. Es folgt

$$[L : K]_S = m \leq \deg(f) = [K(a + bc) : K] \leq [L : K]$$

Da L/K separabel ist folgt Gleichheit.

□

3.6 Endliche Körper

Definition 3.69. Sei p eine positiv Primzahl. Dann ist $\mathbb{F}_p = \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ ein Körper mit p Elementen und $\mathrm{char}(\mathbb{F}_p) = p$.

Satz 3.70. *Sei F ein endlicher Körper, dann ist $\mathrm{char}(F) = p > 0$ und F enthält $q = p^n$ Elemente, wobei $n = [F : \mathbb{F}_p]$.*
F ist der Zerfällungskörper des Polynoms $X^q - X$ über $\mathbb{F}_p$. Die Erweiterung$F/\mathbb{F}_p$ ist normal.

Beweis. Da F endlich ist hat F einen endlichen Primkörper $\mathbb{F}_p$ und $\mathrm{char}(F) = p$. F ist eine endlich-dimensionaler Vektorraum über $\mathbb{F}_p$, d.h. $F = \mathbb{F}_p^n$ mit $n = [F : \mathbb{F}_p]$ und $|F| ? p^n = q$.
Die multiplikative Gruppe F^* hat $q - 1$ Elemente, d.g. $a^{q-1} = 1$ für alle $a \in F^*$.
Jedes $a \in F$ ist also Nullstelle von $f = X(X^{q-1} - 1) = X^q - X$.
F ist also der Zerfällungskörper von $f = X^q - X$ über $\mathbb{F}_p$. □

Theorem 3.71. *Sei p eine positive Primzahl. Dann gibt es zu jedem positiven $n \in \mathbb{N}$ einen Erweiterungskörper $\mathbb{F}_q/\mathbb{F}_p$ mit $q = p^n$ Elementen. $\mathbb{F}_q$ ist bis auf Isomorphie eindeutig charakterisiert, als der Zerfällungskörper von $X^q - X$ über $\mathbb{F}_p$ und besteht aus den q Nullstellen. dieses Polynoms. Jeder endliche Körper ist isomorph zu genau einem Körper des Typs $\mathbb{F}_q$.*

Beweis. Sei $f = X^q - X \in \mathbb{F}_p[X]$ und $L \subset \overline{\mathbb{F}_p}$ der Zerfällungskörper von f über $\mathbb{F}_p$.
Da $f' = -1$hat f nur einfache Nullstellen in $\overline{\mathbb{F}}_p$.

Seien $a, b \in \overline{\mathbb{F}_p}$ zwei Nullfolge von f. Dann gilt

$$(a+b)^q = \sum_{j=0}^{q} \binom{q}{j} a^{q-j} b^j$$
$$= a^q + \underbrace{\binom{q}{1}}_{=0} a^{q-1}b + ... + b^q$$
$$= q^q + b^q$$
$$= a + b$$

Da heißt $a - b$ ist Nullstelle von f in $\overline{\mathbb{F}_p}$. Für $b \neq 0$ ist

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

D.h. ab^{-1} ist Nullstelle von f.
Die Nullstellen von f in $\overline{\mathbb{F}_p}$ bilden als einen Teilkörper von $\overline{\mathbb{F}_p}$.
Folglich besteht L aus den q Nullstellen von f in $\overline{\mathbb{F}_p}$.
Sei F ein zweiter Körper mit q Elementen, dann ist na**??** F ein Zerfällungskörper von $X^q - X$ über seinem Primkörper $\mathbb{F}_p$. F ist somit isomorph. □

Bemerkung 3.72. Wir können di Körper $\mathbb{F}_q$ auch Konstruieren, indem wir die Nullstellen eines irreduziblen Polynoms zu $\mathbb{F}_p$ adjungiert.

Satz 3.73. *Sei $n \in \mathbb{N}$. Dann gibt es ein irreduzibles Polynom f mit* $\deg_{\mathbb{F}_p}(f) = n$.

Beweis. Sei $q = p^n$. Dann ist $\mathbb{F}_q/\mathbb{F}_p$ eine separable Erweiterung vom Grad n.
Nach dem Satz vom Primitven Element **??** ist $\mathbb{F}_q = \mathbb{F}_p(a)$ für ein $a \in \mathbb{F}_q$.
Dann ist $m_{a,\mathbb{F}_p}$ irreduzibel und vom Grad n. □

Beispiel 3.74. Das Polynom $X^2 + 1$ ist irreduzible über $\mathbb{F}_3$.
Also

$$\mathbb{F}_9 = \mathbb{F}_3(\theta) = \{a + \theta b \mid a, b \in \mathbb{F}_3\})\mathbb{F}_3[X]/(X^2+1)$$

mit $\theta^2 = -1$.

Satz 3.75. *Sei F eine endlicher Körper und K/F eine algebraische Erweiterung. Dann ist K/F normal und separabel.*

Beweis. Sei $\mathbb{F}_p$ der Primkörper von F und $\overline{K}$ ein algebraischer Abschluss von $\mathbb{F}_p$.Dann ist $\overline{K}$ auch ein algebraischer Abschluss von F_p. Schreibe $\overline{K} = \overline{F_p}$ Dann

$$F_p \subset F \subset K \subset \overline{F_p}$$

Falls $|K| \leq \infty$, so ist K isomorph zu $\mathbb{F}_q$ mit $q = p^n$ und K ist als Zerfällungskörper des separablen Polynom $X^q - X$ normal und separabel über F_p und somit über F.
Sei $|K| = \infty$. Wähle $M \subset K$ mit $K = F(M)$.
Dann ist K die Vereinigung von Körper $F(M')$ wobei M' eine endliche Teilmenge von M ist.
$F(M')$ ist eine endliche Erweiterung von F und somit von F_p, d.h. $F(M')$ ist isomorph zu F_q. Somit ist K normal und separabel über F. □

Definition 3.76. Sei F_q mit $q = p^n$ ein endlicher Körper.
Dann ist die Abbildung

$$\begin{aligned} \mathrm{Fr} : F_q &\to F_q \\ x &\mapsto x^p \end{aligned}$$

ein F_p-Automorphismus von F_q. Diese wir als **Frobenius-Automorphismus** bezeichnet.

Theorem 3.77. *Sei$q = p^n$, dann ist die Gruppe* $\mathrm{Aut}_{F_p}(F_q)$ *zyklisch mit Ordnung n. Und* $\mathrm{Aut}_{F_p}(F_q) = \langle \mathrm{Fr} \rangle$ *wird vom Frobenius-Automorphismus erzeugt.*

Beweis. Sei s die Ordnung von Fr, d.h. $s = |\langle \mathrm{Fr} \rangle|$.
Für $a \in F_q$ gilt

$$\mathrm{Fr}^n(a) = a^{p^n} = a^q = a$$

s.h. $s|n$. Andererseits ist $\mathrm{Fr}^s(a) = a^{p^s} = a$ für alle $a \in F_q$.

Das Polynom $X^{p^s} - X$ hat höchsten p^s verschiedene Nullstellen, d.h. $p^s \geq q = p^n$. Also gilt $s = n$.
Die Erweiterungen F_q/F_p ist normal und separabel, sodass

$$\left|\mathrm{Aut}_{F_p}(F_q)\right| = \left|\mathrm{Hom}_{F_p}(F_q, \overline{F}_p)\right|$$

da F_q/F_p normal ist.

$$\begin{aligned} &= [F_q : F_p]_S \\ &= [F_q : F_p] \end{aligned}$$

Da F_q/F_p separabel ist

$$= n$$

d.h. Fr erzeugt $\mathrm{Aut}_{F_p}(F_q)$. □

4 Galois-Erweiterungen

Definition 4.1. Eine algebraische, normale, separabele Körpererweiterung L/K heißt **Galoiserweiterung**.

Definition 4.2. Man bezeichnet $\mathrm{Aut}_K(L)$ als **Galoisgruppen** von L/K und schreibt $G(L/K)$ für $\mathrm{Aut}_K(L)$.

Beispiel 4.3.

Sei F ein endlicher Körper und K/F eine algebraische Körpererweiterung. Dann ist K/F eine Galois-Erweiterung.

Sei p ein positive Primzahl und $q = p^n$. $\mathbb{F}_q/\mathbb{F}_p$ ist eine Galois-Erweiterung. Die Galoisgruppe ist zyklisch der Ordnung n und wird vom Frobenius-Automorphismus erzeugt.

$\mathbb{C}/\mathbb{R}$ ist eine Galois-Erweiterung. Die Galoisgruppe wird von der komplexen Konjugation erzeugt.

Satz 4.4. *Sei L/K eine normale Körpererweiterung und $f \in K[X]$ irreduzible. Dann permutiert $\mathrm{Aut}_K(L)$ die Nullstellen von f transitiv.*

Beweis. Falls f keine Nullstellen in L hat so ist nichts zu zeigen.
Sei $a \in L$ eine Nullstelle von f und $\varphi \in \mathrm{Aut}_K(L)$. Dann gilt

$$f\big(\varphi(a)\big) = \varphi\big(\underbrace{f(a)}_{=0}\big) = 0$$

d.h. $\varphi(a)$ ist Nullstelle von f.
Weiterhin ist $f = cm_{a,K}$ für ein $c \in K$.
Sei nun b eine weitere Nullstelle von f in L. Dann ist b auch Nullstelle von $m_{a,K}$ und die Einbettung

$$K \hookrightarrow \overline{L}$$

lässt sich fortsetzen als

$$K(a) \overset{a}{\hookrightarrow} \overline{L}$$

mit $\sigma(a) = b$zu einem K-Homomorphismus

$$L \xrightarrow{\sigma} \overline{L}$$

Da L/K normal ist gilt $\sigma(L) = L$.
Somit ist $\sigma \in \mathrm{Aut}_K(L)$ mit $\sigma(a) = b$. □

Satz 4.5. *Sei L/K eine normale Körpererweiterung dann gilt*

$$|\mathrm{Aut}_K(L)| = [L : K]_S = \left|\mathrm{Hom}_K(L, \overline{K})\right|$$

Beweis. Sei $\overline{L}$ ein algebraischer Abschluss von L. Dann ist $\overline{L}$ auch ein algebraischer Abschluss von K.
Ist $\varphi : L \to \overline{L}$ ein K-Homomorphismus, so gilt $\varphi(L) = L$. Als ist die Abbildung

$$\mathrm{Hom}_K(L, \overline{K}) \to \mathrm{Aut}_K(L)$$

eine Bijektion. □

Satz 4.6. *Sei L/K eine endliche Galois-Erweiterung. Dann ist*

$$[L : K] = |G(L/K)|$$

Beweis. Nach **??** gilt mit Separabilität

$$|\mathrm{Aut}_K(L)| = [L : K]_S = [L : K]$$

□

Definition 4.7. Sei L ein Körper und G eine Untergruppe von $\mathrm{Aut}_K(L)$. Dann ist

$$L^G := \{x \in L \mid g(x) = x \forall g \in G\}$$

ein Teilkörper von L. Dieser wird als **Fixkörper** von G bezeichnet.

Satz 4.8. *Sei L/K eine Galois-Erweiterung. Dann sit der Fixkörper von $G(L/K)$ genau K.*

Beweis. Sei $G = G(L/K)$. Dann ist $\subset L^G$.
Sei $a \in L/K$. Dann ist $\deg(m_{a,K}) \geq 2$. Da L/K normal ist, zerfällt $m_{a,K}$ über L in Linearfaktoren. Weil L/K separabel ist, ist a eine einfache Nullstelle von $m_{a,K}$. Es gibt als ein $b \in L$ mit $b \neq a$ mit $m_{a,K}(b) = 0$. Da $G(L/K)$ die Nullstellen von $m_{a,K}$ transitiv permutiert gibt es ein $\varphi \in G(L/K)$ mit $\varphi(a) = b$. □

Satz 4.9. *Sei L ein Körper und H eine endliche Untergruppe von* $\mathrm{Aut}_K(L)$*. Dann ist L/L^H eine endliche Galois-Erweiterung mit Galoisgruppe H und*

$$[L : L^H] = |H|$$

Beweis. Sei $a \in L$ un $Y_a = \{\varphi(a) \mid \varphi \in H\} \subset L$.
seine $a_1, ..., a_n$ die verschiedenen Elemente von Y_a. Sei

$$f_a = \prod_{i=1}^{n}(X - a_i)$$

Dann ist für $\varphi \in H$

$$\varphi(f_a) = \prod_{i=1}^{n}\big(X - \varphi(a_i)\big) = f_a$$

Also ist $f_a \in L^H[X]$. Da a Nullstelle des Polynoms f_a ist ist a separabel.
Die Erweiterung L/L^H ist als separabel.
Dann ist L der Zerfällungskörper der Polynome $F = \{f_a \mid a \in L\}$. Somit ist L/L^H eien Galoiserweiterung.
Aus $m_{a,L^H} | f_a$ folgt

$$\deg(m_{a,L^H}) \leq \deg(f) \leq |H| \tag{$\star$}$$

Ist $|H| < [L : L^H] \leq \infty$, so gibt es eine endliche Teilmenge $S \subset L$, sodass für $M = L^H(S)$ gilt

$$\infty > [M : L^H] > |H|$$

Zusätzlich ist M/L^H separabel, da L/L^H separabel ist.
Nach Satz **??** gibt es ein $c \in L$, sodass $M = L^H(c)$ ist. Dann gilt

$$\deg(m_{c,L^H}) = [M : L^H] > |H|$$

Widerspruch zu $(\star)$.
Also ist $[L : L^H] \leq |H|$.
D.h. L/L^H ist einen endliche Galoiserweiterung.
Aus $H \subset \mathrm{Aut}_{L^H}(L)$ folgt

$$|H| \leq |\mathrm{Aut}_{L^H}(L)| = [L : L^H] \leq |H|$$

Somit gilt $H = \mathrm{Aut}_{L^H}(L)$ □

Bemerkung 4.10. Für $a \in L$ ist $m_{a,L^H} = f_a$ in der Notation des Beweises.

Theorem 4.11 (Hauptsatz der Galoistheorie)**.** *Sei L/K eine endliche Galois-Erweiterung. Sei U die Menge der Untergruppen von $G(L/K)$ und Z die Menge der Zwischenkörper von L/K. Dann sind die Abbildungen*

$$\Phi : Z \to U \qquad \Psi : U \to Z$$
$$M \mapsto G(L/M) \qquad H \mapsto L^H$$

zueienander inverse Bijektionen. Für einen Zwischenkörper M von L/K ist die Erweiterung M/K normal genau dann wenn $G(L/M)$ normal in $G(L/K)$ ist. In diesem Fall ist

$$\begin{aligned} G(L/K) &\to G(M/K) \\ \sigma &\mapsto \sigma|_M \end{aligned}$$

eine surjektiver Gruppenhomomorphismus mit $\mathrm{Kern}() = G^0(L/M)$*.*
Dieser induziert einen Isomorphismus

$$G(M/K) \overset{\sim}{=} G(L/K)/G(L/M)$$

Beweis. Sei M ein Zwischenkörper von L/K. Dann ist L/M eine Galois-Erweiterung und $G(L/M) = \mathrm{Aut}_M(L)$, sowie $c\,\mathrm{Aut}_K(L) = G(L/K)$, weil $L \subset M$.
Somit ist Φ wohldefiniert. Sei $M \in Z$, dann ist

$$\begin{aligned} M &= L^{G(L/M)} = L^{\Phi(M)} \\ &= \Psi(\Phi(M)) \end{aligned}$$

Somit ist $\Psi \circ \Phi = \overset{\sim}{=}_Z$.
Sei $H \in U$. Dann ist L/L^H eine Galois-Erweiterung mit Galoisgruppe H. Also ist

$$\begin{aligned} H &= G(L/L^H) = \Phi(L^H) \\ &= \Phi(\Psi(H)) \end{aligned}$$

d.h. $\Phi \circ \Psi = \mathrm{id}_U$.
Somit sind Φ und Ψ zueinander inverse Bijektionen.

Sei M ein Zwsichenkörper von L/K. Dann ist $M = L^H$ für ein $H \in U$.
Ist die Erweiterung M/K normal, so ist die Abbildung

$$\begin{aligned} \varphi : G(L/K) &\to G(M/K) \\ \sigma &\mapsto \sigma_M \end{aligned}$$

ein surjektiver Gruppenhomomorphismus.
Sei $\overline{L}$ ein algebraischer Abschluss von L. Dann ist $\overline{L}$ auch ein algebraischer Abschluss von K und von M. Sei $\sigma \in G(L/K)$. Dann ist

$$M \xrightarrow{\sigma} \overline{L}$$

Da M normal ist gilt $\sigma(M) = M$ d.h. $\sigma|_M \in G(M/K)$.
Also ist φ wohldefiniert. Weiterhin gilt

$$(\sigma_1\sigma_2)|_M = \sigma_1|_M\sigma_2|_M$$

Sei $\sigma \in G(M/K)$. Dann lässt sich die Abbildung

$$M \xrightarrow{\sigma} \overline{L}$$

fortsetzen zu einem K-Homomorphismus

$$L \xrightarrow{\sigma} \overline{L}$$

weil L/M algebraisch ist. Da L/K normal ist folgt $\sigma(L) = L$. φ ist also surjektiv.
Es gilt $\mathrm{Kern}(\varphi) = G(L/M)$, d.h. $G(L/M)$ ist eine normaler Untergruppe von $G(L/K)$.
Sei nun H eine normale Untergruppe von $G(L/K)$. Wir zeigen, dass die Erweiterung L/L^H normal ist:
Sei $\overline{L}$ ein algebraischer Abschluss von L und $\sigma : L^H \to \overline{L}$ ein K-Homomorphismus. Dann gilt $\sigma(L^H) = L^H$. Da $K \subset L^H \subset L \subset \overline{L}$ können wir σ zu einem K-Homomorphismus $\sigma : L \to \overline{L}$ fortsetzen weil L/L^H algebraisch ist. Da L/K normal ist gilt $\sigma(L) = L$. Wir können σ also auffassen als K-Homomorphismus $\sigma : L^H \to L$.
Sei $b \in \sigma(L^H)$. Dann ist $b = \sigma(a)$ für ein $a \in L^H$.
Sei $\tau \in H$. Da $H\sigma = \sigma H$ ist gibt es $\tau' \in H$, sodass

$$\tau(b) = \tau(\sigma(a)) = \sigma(\underbrace{\tau'(a)}_{=a}) = \sigma(a) = b$$

d.h. $b \in L^H$ und $\sigma(L^H) \subset L^H$.

Zum Beweis der Gleichheit setzen wir den K-Homomorphismus

$$\underbrace{\sigma(L^H)}_{\subset L^H} \xrightarrow{\sigma^{-1}} L^H \to \overline{L}$$

zu einem K-Homomorphismus $\rho : L^H \to \overline{L}$ fort.
Diesen können wir wie oben als K-Homomorphismus $L^H \to L$ auffassen.
Dann ist $\rho(L^H) \subset L^H$ und

$$L^H \xrightarrow{\sigma} L^H \xrightarrow{\rho} L^H$$

ist die Identität auf L^H, d.h. $\rho\sigma = \mathrm{id}_{L^H}$.

Analog konstruieren wir einen K-Homomorphismus $\eta : L^H \to L$ mit $\eta(L^H) \subset L^H$ und $\eta\rho = \mathrm{id}_{L^H}$.
Es folgt

$$\sigma\rho = \mathrm{id}_{L^H}\,\sigma\rho = \eta\rho\sigma\rho = \eta\rho = \mathrm{id}_{L^H}$$

$\square$

Satz 4.12. *Sei L/K eine endliche Galois-Erweiterung. Seien L_1, L_2 Zwischenkörper von L/K die zu Untergruppen H_1 und H_2 von $G(L/K)$ korrespondieren. Dann gilt für $\sigma \in G(L/K)$*

$$\sigma(L_1) = L_2 \Leftrightarrow \sigma H_1 \sigma^{-1} = H_2$$

Satz 4.13 (Translationssatz)**.** *Seien L/K und M/K Körpererweiterungen, sodass L und M in einem Gemeinsamen Erweiterungskörper von K enthalten sind.*
Ist L/K eine endliche Galois-Erweiterung, so ist auch L/K eine endliche Galois-Erweiterung und die Abbildung

$$G(L \cdot M/M) \to G(L/K)$$
$$\sigma \mapsto \sigma|_L$$

definiert einen Isomorphismus

$$G(L \cdot M/M) \overset{\sim}{=} G(L/L \cap M)$$

(Dabei ist $L \cdot M$ das Kompositum $L \cdot M := L(M) = M(L)$)

Beweis. Sei a ein Primelement der Erweiterung L/K und seien $a_1, ..., a_n$ die Nullstelle von $m_{a,K}$ in L. Dann ist

$$L = K(a_1, ..., a_n)$$

und damit

$$L \cdot M = M(L) = M(a_1, ..., a_n)$$

d.h. $L \cdot M/M$ ist eine endliche Galois-Erweiterung.

Wohldefiniertheit Sei $\sigma \in G(L \cdot M/M)$ und $b \in L$. Dann zerfällt $m_{b,K}$ in L, also

$$m_{b,K} = \prod_{j=1}^{n}(X - \underbrace{b_j}_{\in L})$$

und

$$m_{b,K} = \sigma(m_{b,K}) = \prod_{j=1}^{n}(X - \underbrace{\sigma(b_i)}_{\in L})$$

Es folgt $\sigma(b) \in L$.

Injektivität Sei $\sigma \in G(L \cdot M/M)$ mit $\sigma|_L = \mathrm{id}_L$. Aus $L \cdot M = M(L) = M(a_1, ..., a_n)$ und $\sigma(a_i) = a_i$ folgt $\sigma = \mathrm{id}$.

Sei H das Bild der Abbildung. Dann ist

$$L^H = L \cap (L \cdot M)^{G(L \cdot M/M)} = L \cap M$$

Die Erweiterung L/L^H ist eine endliche Galois-Erweiterung mit Galoisgruppe H. Aus der Injektivität der Abbildung folgt

$$G(L \cdot M/M) \overset{\sim}{=} H = H(L/L^H) = G(L/L \cap M)$$

□

Theorem 4.14 (Produktsatz)**.** *Seien L_1/K und L_2/K endliche Galois-Erweiterungen, sodass L_1 und L_2 in einem gemeinsamen Erweiterungskörper enthalten sind. Dann ist $L_1 \cdot L_2/K$ eine endliche Galois-Erweiterung und die Abbildung*

$$G(L_1 \cdot L_2/K) \to G(L_1/K) \times G(L_2/K)$$
$$\sigma \mapsto (\sigma|_{L_1}, \sigma|_{L_2})$$

definiert einen injektiven Gruppenhomomorphismus.
Ist $L_1 \cap L_2 = K$, so ist die Abbildung ein Isomorphismus.

Beweis. Sei $L_1 = K(a)$ und $L_2 = K(b)$. Seien $a_1, ..., a_n$ die Nullstellen von $m_{a,K}$ und $b_1, ..., b_n$ die Nullstellen on $m_{b,K}$. Dann ist

$$\begin{aligned} L_1 &= K(a_1, ..., a_n) \\ L_2 = K(b_1, ..., b_m) & \\ L_1 \cdot L_2 &= L_1(L_2) = L_2(L_1) \\ &= K(a_1, ..., a_n, b_1, ..., n_m) \end{aligned}$$

$L_1 \cdot L_2/K$ ist als einen endliche Galois-Erweiterung.

Wohldefiniertheit wie oben.

Injektivität Sei $\sigma \in G(L_1 \cdot L_2/K)$ mit $\sigma|_{L_1} = \mathrm{id}_1$ und $\sigma|_{L_2} = \mathrm{id}_2$.
Dann folgt, aus $L_1 \cdot L_2 = L_1(L_2)$, dass $\sigma = \mathrm{id}_{l_1 \cdot L_2}$ ist.
Die Gruppen $G(L_1 \cdot L_2/L_1)$ und $G(L_1 \cdot L_2/L_2)$ sind Untergruppen von $G(L_1 \cdot L_2/K)$.
Sei nun $L_1 \cap L_2 = K$. Dann

$$G(L_1 \cdot L_2/L_1) \cap G(L_1 \cdot L_2/L_2) = \{1\}$$

Aus dem Translationssatz folgt dann

$$\begin{aligned} G(L_1 \cdot L_2/L_1) &\cong G(L_2/L_1 \cap L_2) = G(L_2/K) \\ G(L_1 \cdot L_2/L_2) &\cong G(L_1/L_1 \cap L_2) = G(L_1/K) \end{aligned}$$

Die Abbildung ist in diesem Fall also ein Isomorphismus.

□

Theorem 4.15. *Sei L/K eine endliche Galois-Erweiterung und sei a ein primitives Element, d.h. $L = K(a)$. Sei außerdem $H \subset G(L/K)$. Dann ist*

$$L^H = K(a_0, ..., q_1)$$

wobei die a_i die Koeffizienten von

$$f = \prod_{\sigma \in H} (X - \sigma(a)) = \sum_{i=0}^{n} a_i X^i$$

sind.

4.1 Die Galoisgruppe einer Gleichung

In diesem Abschnitt sei K ein Körper

Definition 4.16. Sei f ein separabeles Polynom und L ein Zerfällungskörper von f über K. Dann ist L/K einen endliche Galois-Erweiterung und $G(L/K)$ eird in diesem Falls als **Galoisgruppe von f über K** bezeichnet.

Satz 4.17. *Sei $f \in K[X] \setminus K$ separabel und vom Grad n mit Zerfällungskörper L über K.*
Seien $a_1, ..., a_n$ die Nullstellen von f in L. Dann definiert die Abbildung

$$G(L/K) \to S(\{a_1, ..., a_n\})$$
$$\sigma \mapsto \sigma|_{\{a_1,...,a_n\}}$$

einen injektiven Gruppenhomomorphismus. Insbesondere gilt $|G(L/K)|\,|n!$.
f ist genau dann irreduzible über K wenn $G(L/K)$ transitiv auf dem Nullstellen on f operiert.

Beweis. Sei $\sigma \in G(L/K)$. Da $\sigma(f) = f$ bildet σ Nullstellen von f in Nullstellen von f ab.
Da σ injektiv ist, ist die Einschränkung auf $\{a_1, ..., a_n\}$ eine Bijektion.
Wegen $L = K(a_1, ..., a_n)$ ist $\sigma \in G(L/K)$ eindeutig durch seine Operation auf $\{a_1, ..., a_n\}$ festgelegt.
Somit ist f injektiv.

Wir haben bereits gesehen, dass $G(L/K)$ trasnitiv auf den Nullstellen von f operiert, wenn f irreduzibel ist.
Angenommen $G(L/K)$ permutiert die Nullstellen von f transitiv.
Sei a eine Nullstellen von f. Dann sind die Nullstellen von f gegeben durch $\sigma_1(a), ..., \sigma_n(a)$ für geeignete $\sigma_i \in G(L/K)$ und

$$f = c \prod_{i=1}^{n} \big(X - \sigma(a)\big)$$

Es ist $f = cm_{a,K}$, denn $\sigma_1(a), ..., \sigma_n(a)$ sind auch Nullstellen on $m_{a,K}$. Somit ist f irreduzibel. □

Korollar 4.18. *Sei L/K eine endliche Galoiserweiterung vom Grad n. Dann ist $G(L/K)$ eine Untergruppe von S_n.*

Beispiel 4.19. Sei K ein Körper mit $\mathrm{char}(K) \neq 2$, $f \in K[X]$ ein irreduzibles, separables, normiertes Polynom vom Grad 3 und L ein Zerfällungskörper von f. Dann gilt

$$G(L/K) = \begin{cases} \mathbb{Z}/3\mathbb{Z} & \text{, falls } \Delta f \text{ ein Quadrat in } K \text{ ist} \\ S_3 & \text{, sonst} \end{cases}$$

Beweis. Sei a einen Nullstelle von f in L. Dann ist

$$[L : K] = [L : K(a)] \underbrace{[K(a) : K]}_{=3}$$

weil f irreduzibel und nach **??** muss $[L : K]$ teilt 6.
D.h. $[L : K] = 3$ oder $= 6$. Im ersten Fall ist $G(L/K)$ eine Untergruppe von S_3 mit Index 2. Also muss $G(L/K) \overset{\sim}{=} A_3 \overset{\sim}{=} \mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$.

Seiene a_1, a_2, a_3 die Nullstellen von f in L. Dann ist

$$\delta := (a_1 - a_2)(a_1 - a_3)(a_2 - a_3) \neq 0$$

Dann ist $\Delta(f) = \delta^2$.
Falls $G(L/K) = S_3$ ist, so gilt

$$\tau(\delta) = \operatorname{sgn}(\tau)\delta$$

für alle $\tau \in G(L/K)$.
Ist $G(L/K) = A_3$, so gilt $\tau(\delta) = \delta$ für alle $\tau \in G(L/K)$.
Da $\operatorname{char}(K) \neq 2$ folgt

$$G(L/K) = A_3 \Leftrightarrow \tau(\delta) = \delta \forall \tau \in G(L/K) \Leftrightarrow \delta \in K$$

□

Beispiel 4.20. Für $f = X^3 + aX + b$ ist

$$\Delta(f) = -4a^3 - 27b^2$$

Das Polynom $f = X^3 - x + 1 \in \mathbb{Q}[X]$ ist irreduzibel und hat Diskriminante

$$\Delta(f) = 4 - 27 = -23$$

somit gilt für den Zerfällungskörper L von $\mathbb{Q}$, dass $G(L/\mathbb{Q}) = S_3$.

Beispiel 4.21. Sei $f = X^4 - 2 \in \mathbb{Q}[X]$. Dann gilt

$$f = (X - a)(X + a)(X - ia)(X + ia)$$

mit $a = \sqrt[4]{2}$. Der Zerfällungskörper von f über $\mathbb{Q}$ ist $L = \mathbb{Q}(a, i)$.
Das Eisenstein Kriterium zeigt, dass f irreduzibel über $\mathbb{Q}$ ist. Somit ist $f = m_{a,\mathbb{Q}}$ und $[Q(a), \mathbb{Q}] = 4$.
Weiterhin ist $[L : \mathbb{Q}(a)] = 2$, da $\mathbb{Q}(a)$ keine negativen Quadrate hat und damit nicht i enthält. Es folgt

$$[L : \mathbb{Q}] = 8$$

Wir bestimmen die Galoisgruppe von f. Da f 4 Nullstellen hat und die Galoisgruppe die Nullstellen permutiert muss $G(L/\mathbb{Q}) \subset S_4$ sein.
Jedoch muss zusätzlich für $\sigma \in G(L/K)$ gelte, dass

$$\sigma(-a) = -\sigma(a)$$
$$\sigma(-ia) = -\sigma(ia)$$

Es gibt 8 Permutationen in $S(\{a, -a, ia, -ia\})$ die die Bedingungen erfüllen.
Diese sind somit die Elemente in $G(L/\mathbb{Q})$.
Seien $\sigma, \tau \in G(L/\mathbb{Q})$ durch

$$\sigma(a) = ia$$
$$\sigma(ia) = -a$$

(d.h. $\sigma(i) = i$)

$$\tau(a) = -a$$
$$\tau(ia) = ia$$

(d.h. $\tau(i) = -i$)

Die von σ erzeugt Untergruppe $\langle\sigma\rangle$ hat Ordnung 4 und ist somit normal in $G(L/\mathbb{Q})$.
Weil $Tabelle \notin \langle\sigma\rangle$ gilt

$$\begin{aligned} G(L/\mathbb{Q}) &= \langle\sigma\rangle \cup \langle\sigma\rangle\,\tau \\ &= \langle\sigma\rangle \cup \tau\,\langle\sigma\rangle \\ &= \{1, \sigma, \sigma^2\sigma^3, \tau, \tau\sigma, \tau\sigma^2, \tau\sigma^3\} \end{aligned}$$

τ und σ genügen der Relation $Tabelle\sigma = \sigma^3\tau$.
Für Untergruppen von $G(L/\mathbb{Q})$ erhält man folgendes Schema **??**

$$\begin{tikzcd}
 & & G(L/\mathbb{Q}) \arrow[dll] \arrow[d] \arrow[drr] & & \\
\{1,\sigma,\sigma^2,\tau,\sigma^2\tau\} \arrow[d] \arrow[dr] \arrow[drr] & & \{1,\sigma,\sigma^2\sigma^3\} \arrow[d] & & \{1,\sigma^2,\sigma\tau,\sigma^3\tau\} \arrow[d] \arrow[dl] \arrow[dll] \\
\{1,\tau\} \arrow[drr] & \{1,\sigma^2\tau\} \arrow[dr] & \{1,\sigma^2\} \arrow[d] & \{1,\sigma\tau\} \arrow[dl] & \{1,\sigma^3\tau\} \arrow[dll] \\
 & & \{1\} & &
\end{tikzcd}$$

Abbildung 2: Untergruppen

Definition 4.22. Sei $L = K(X_1, ..., X_n)$ der Quotientenkörper von $K[X_1, ..., X_n]$.
Die Element von L sin die rationalen Funktionen f/g mit $f, g \in K[X_1, ..., X_n]$ und $g \neq 0$.
S_n operiert durch Permutationen der X_i auf L.
$M = L^{S_n}$ wird als Körper der **symetrischen rationalen Funktionen** bezeichnet. Die Erweiterung L/M ist eine endliche Galois-Erweiterung mit Galoisgruppe S_n.

Beweis. Es gilt $M = K(s_1, ..., s_n)$:
Die Inklusionen $K(s_1, ..., s_n) \subset M \subset L$ impliziert

$$L : K(s_1, ..., s_n) = \underbrace{[L : M]}_{=n!}[M : K(s_1, ..., s_n)]$$

Das Polynom

$$f = \prod_{i=1}^{n}(X - X_i) \in K(s_1, ..., s_n)[X] \subset L[X]$$

ist separabel und hat L als Zerfällungskörper. Also ist

$$[L : K(s_1, ..., s_n)] \leq n!$$

Es folgt die Behauptung. □

Satz 4.23. *Sei G eine endliche Gruppe, dann gibt es eine Galois-Erweiterung L/K mit $G(L/K) \cong G$.*

Beweis. Sei $n\,|G|$. Für $a \in G$ definiere

$$\begin{aligned}\tau_a : G &\to G \\ g &\mapsto ag\end{aligned}$$

Dann ist τ_a eine Permutation von G. Weiterhin ist

$$\tau_a \tau_b = \tau_{ab}$$

Wir haben also eine Injektion

$$G \to S_n$$

Wir können G also mit einer Untergruppe von S_n identifizieren.
Dann operiert G auf $L = K(X_1, ..., X_n)$ durch Permutation der X_i.
Sei $M = L^G$ dann ist L/M eine Galoiserweiterung mit Galoisgruppe G. □

4.2 Kreisteilugspolynome

In diesem Abschnitt sei K ein Körper und $\overline{K}$ ein algebraischer Abschluss von K.

Definition 4.24. Die Nullstellen des Polynom $X^n - 1$ $n \geq 0$ werden als n-te **Einheitswurzeln** in $\overline{K}$ bezeichnet.

Proposition 4.25. Die n-ten Einheitswurzeln bilden einer Untergruppe U_n von $\overline{K}^*$.
Ist $\text{char}(K) = 0$ oder $\text{char}(K) \not| n$, so haben $X^n - 1$ und seine Ableitung nX^{n-1} keine gemeinsamen Nullstellen. Also ist $X^n - 1$ separabel.
In diesem Fall ist $|U_n| = n$.
Falls $\text{char}(K) = p > 0$ und $p|n$, so schreibt man $n?mp^r$ mit $(m, p) = 1$.
Dann ist

$$(X^m - 1)^{p^r} = X^n - 1$$

Die Nullstellen von $X^m - 1$ stimmen mit den Nullstellen von $X^n - 1$ überein und $U_m = U_n$.

Satz 4.26. *Sei K ein Körper und $n \in \mathbb{Z}$, $n > 0$ mit $\text{char}(K) \not| n$, dann ist U_n eine zyklische Gruppe der Ordnung n.*

Definition 4.27. $\xi \in U_n$ heißt **primitive** n-te Einheitswurzel, wenn ξ die Gruppe U_n erzeugt.

Satz 4.28. *Seien $m, n \in \mathbb{Z}$, $m, n > 0$ mit $(m, n) = 1$ und K ein Körper mit* $\text{char}(K) \neq |mn$.
Dann ist die Abbildung

$$\begin{aligned}U_m \times U_n &\to U_{mn} \\ (\xi, \eta) &\mapsto \xi\eta\end{aligned}$$

ein Isomorphismus von Gruppen.

Definition 4.29. Für $n \in \mathbb{Z}$, $n > 0$ definiert

$$\varphi(n) = |(Z/n\mathbb{Z})^*|$$

die **Eulersche φ-Funktion**.

Lemma 4.30. *Ist p eine Primzahl, so gilt*

$$\varphi(p^k) = p^k - p^{k-1} = p^k(1 - \frac{1}{p})$$

Satz 4.31. *Seien $m, n \in \mathbb{Z}$ mit $m, n > 0$ und $(m, n) = 1$. Dann ist*

$$\varphi(mn) = \varphi(m)\varphi(n)$$

Beweis. Die aussage folgt aus dem Chinesischen Restsatz:
Der Ring-Isomorphismus

$$\begin{aligned} \mathbb{Z}/mn\mathbb{Z} &\to \mathbb{Z}/m\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \\ (x \mod mn) &\mapsto (x \mod m, x \mod n) \end{aligned}$$

liefert einen Isomorphismus

$$(\mathbb{Z}/mn\mathbb{Z})^* \to (\mathbb{Z}/m\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^* = (\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^* \times (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*$$

Daraus folgt die Multiplikativ der φ Funktion. □

Satz 4.32. *Sei $n \in \mathbb{Z}$, $n > 0$. Ein Element a erzeugt die additive zyklische Gruppe $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ genau dann wenn a eine Einheit in $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ ist.*

Satz 4.33. *Sei K ein Körper und $n \in \mathbb{Z}$, $n \geq 0$ mit $\mathrm{char}(K) \not| n$. Dann enthält U_n genau $\varphi(n)$ primitive n-te Einheitswurzeln.*
Ist ξ primitive n-te Einheitswurzel, so ist ξ^r genau dann primitive n-te Einheitswurzel, wenn $(r, n) = 1$ ist.

Satz 4.34. *Sei $\mathrm{char}(K) \not| n$ und ξ eine primitive Einheitswurzel.*
Dann ist $K(\xi)$ der Zerfällungskörper von $X^n - 1$.
Außerdem ist $K(\xi)/K$ eine endliche Galois-Erweiterung.

Definition 4.35. Falls $K = \mathbb{Q}$ ist so heißt $\mathbb{Q}(\xi)$ der **n-te Kreisteilungskörper**.

Theorem 4.36. *Sei $\xi \in \overline{\mathbb{Q}}$ eine primitive n-te Einheitswurzel. Dann ist $\mathbb{Q}(\xi)/\mathbb{Q}$ eine endliche Galois-Erweiterung mit*

$$[\mathbb{Q}(\xi) : \mathbb{Q}] = \varphi(n)$$

Beweis. Jedes $\sigma \in G(\mathbb{Q}(\xi)(\mathbb{Q})$ bildet U_n nach U_n (Menge der n-ten Einheitswurzeln).
Insbesondere ist $\sigma(\xi)$ wieder eine primitive n-te Einheitswurzel.
Sei $f = m_{\xi,\mathbb{Q}}$. Da f irreduzibel über $\mathbb{Q}$ ist operiert $G(\mathbb{Q}(\xi)/\mathbb{Q})$ transivit auf den Nullstellen von f, d.h. jede Nullstelle von f ist eine primitive n-te Einheitswurzel.
Also gilt

$$[Q(\xi) : \mathbb{Q}] \leq \varphi(n)$$

Wir zeigen jetzt, dass jede primitive n-te Einheitswurzel Nullstelle von f ist.
Da ξ Nullstelle von $X^n - 1$ ist gilt

$$X^n - 1 = fg$$

für ein normiertes $g \in \mathbb{Q}[X]$.
Sei p Primzahl. Wir betrachten die p-adische Bewertung. Da $X^n - 1$ nicht von p geteilt wird ist

$$\begin{aligned} 0 &= \nu_p(fg) \\ 0 &= \underbrace{\nu_p(f)}_{\geq 0} + \underbrace{\nu_p(g)}_{\geq 0} \end{aligned}$$

Dann muss aber $\nu_p(f) = \nu_p(g) = 0$ für alle Primzahlen p gelten.
Somit ist $f, g \in \mathbb{Z}[X]$.

Sei nun p eine Primzahl mit $p \not| n$. Dann ist ξ^p eine primitive n-te Einheitswurzel.

Angenommen $f(\xi^p) \neq 0$, dann muss $g(\xi^p) = 0$ (da ξ Nullstelle von fg).
D.h. ξ ist Nullstelle von X^p, dann $f | g(X^p)$. Sei $g(X^p) = fh$, dann ist h ein normiertes Polynom in $\mathbb{Z}[X]$.
Reduzieren der Koeffizienten $\mod p$

$$\mathbb{Z}[X] \to (\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})[X]$$

Dann geht

$$g = \sum_{j=0}^{m} a_j X^j$$

über in

$$\overline{g} = \sum_{j=0}^{m} \overline{a}_j X^j$$

In $\mathbb{F}_p$ gilt $a^p = a$, sodass

$$\begin{aligned} \overline{g}^p &= \left(\sum_{j=0}^{m} \overline{a}_j X^j \right)^p \\ &= \sum_{j=0}^{m} \overline{a}_j^p X^{jp} \\ &= \sum_{j=0}^{m} \overline{a}_j X^{jp} \\ &= \overline{g}(X^p) \\ &= \overline{fh} \end{aligned}$$

Aus $\overline{g}^p = \overline{fh}$ folgt, dass $\overline{f}$ und $\overline{g}$ nicht teilerfremd sind in $\mathbb{F}_p$. Somit hat $X^n - 1 = \overline{fg}$ merhfache Nullstellen in $\mathbb{F}_p$. Dies widerspricht $p \not| n$!
Also muss ξ^p eine Nullstelle von f.

Sei nun η eine beliebige primitive n-te Einheitswurzel. Dann ist $\eta = \xi^m$ mit $(m,n) = 1$. Sei $m = p_1 \cdot ... \cdot p_k$ die Zerlegung von m im Primfaktoren, sodass

$$\eta = \xi^m = (...(\xi^{p_1})^{p_2}...)^{p_k}$$

Also ist ξ^{p_1} eine Nullstelle in f. f ist auch das Minimaplolynom von ξ^{p_1}. Analog zeigt man, dass $(\xi^{p_1})^{p_2}$ eine Nullstelle von f ist.
Es folgt schließlich, dass η eine Nullstelle von f ist.

Dann folgt

$$\mathbb{Q}(\xi) : \mathbb{Q}] = \varphi(n)$$

$\square$

Satz 4.37. *Seien $\xi_m, \xi_n \in \overline{\mathbb{Q}}$ primitive m-te bzw n-te Einheitswurzeln mit $(m,n) = 1$.*
Dann ist

$$\mathbb{Q}(\xi_m) \cap \mathbb{Q}(\xi_n) = \mathbb{Q}$$

Beweis. Es ist $\xi_{mn} = \xi_n \xi_m$ auch primitive Einheitswurzel. Es folgt

$$\mathbb{Q}(\xi_{mn}) = \mathbb{Q}(\xi_m, \xi_n)$$

und

$$\underbrace{[\mathbb{Q}(\xi_{mn}) : \mathbb{Q}]}_{=\varphi(mn)} = [\mathbb{Q}(\xi_{mn} : \mathbb{Q}(\xi_m))] \underbrace{[\mathbb{Q}(\xi_m) : \mathbb{Q}]}_{=m}$$

sodass

$$[\mathbb{Q}(\xi_{mn}) : \mathbb{Q}(\xi_m)] = \varphi(m)$$

$$\begin{tikzcd}
 & \mathbb{Q}(\xi_{mn}) \arrow[dl, "\varphi(n)"] \arrow[dr, "\varphi(m)"] & \\
\mathbb{Q}(\xi_m) \arrow[dr, "\varphi(m)"] & & \mathbb{Q}(\xi_n) \arrow[dl, "\varphi(n)"] \\
 & \mathbb{Q} &
\end{tikzcd}$$

Abbildung 3: Körperdiagramm mit Erweiterungsgrad

Sei $L = \mathbb{Q}(\xi_m) \cap \mathbb{Q}(\xi_n)$. Es ist

$$\deg(m_{\xi_m, \mathbb{Q}(\xi_n)}) = \varphi(m)$$
$$\deg(m_{\xi_m, L}) \geq \varphi(m)$$

und

$$\mathbb{Q} \subset L \subset \mathbb{Q}(\xi_m)$$
$$\mathbb{Q}(\xi_m) \subset L(\xi_m) \subset \mathbb{Q}(\xi_m)$$

d.h.

$$L(\xi_m) = \mathbb{Q}(\xi_m)$$

Damit folgt

$$\underbrace{[L(\xi_m) : \mathbb{Q}]}_{=\varphi(n)} = \underbrace{[L(\xi_m) : L]}_{\geq\varphi(m)}[L : Q]$$

Also muss $[L : \mathbb{Q}] = 1$, also $L = \mathbb{Q}$. $\square$

Satz 4.38. *Sei $\xi \in \overline{K}$ eine primitive n-te Einheitswurzel mit* $\operatorname{char}(K) \not| n$. *Dann gilt*

a) $K(\xi)$ ist der Zerfällungskörper des separablen Polynom $X^n - 1$ über K. Und die Erweiterung $K(\xi)/K$ ist eine endliche Galois-Erweiterung mit Grad $\leq \varphi(n)$ und abelscher Galoisgruppe.

b) Zu jedem $\sigma \in G(K(\xi)/K)$ gibt es eine positive ganze Zahl, $r(\sigma)$ mit $\sigma(\xi) = \xi^{r(\sigma)}$, wobei die Restklasse $\overline{r(\sigma)} \in \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ eine Einheit ist, die unabhängig von der Wahl von ξ eindeutig durch σ bestimmt ist.

Und die Abbildung

$$\begin{aligned} G(K(\xi)/K) &\to (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^* \\ \sigma &\mapsto \overline{r(\sigma)} \end{aligned}$$

ist ein injektiver Gruppenhomomorphismus.

Beweis.
Sei $\sigma \in G(K(\xi)/K)$. Dann ist $\sigma(U_n) = U_n$. Also $\sigma(\xi) = \xi^{r(\sigma)}$ für ein positive ganze Zahl $r(\sigma)$.
Da ξ primtive n-te Einheitswurzel ist ist $r(\sigma)$ eundeutig modulo n und $\big(n, r(\sigma)\big) = 1$.
Es gilt

$$\sigma(\xi^s) = \sigma(\xi)^s = (\xi^{r(\sigma)})^s = (\xi^s)^{r(\sigma)}$$

sodass $r(\sigma)$ nicht von der Wahl von ξ abhängt. Die Abbildung

$$\begin{aligned} \Psi : G(K(\xi)/K) &\to (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^* \\ \sigma &\mapsto \overline{r(\sigma)} \end{aligned}$$

ist ein Gruppenhomomorphismus, denn für $\sigma, \tau \in G(K(\xi)/K)$

$$\begin{aligned} (\sigma\tau)(\xi) &= \sigma(\tau(\xi)) \\ &= \sigma(\xi^{r(\tau)}) \\ &= (\xi^{r(\tau)})^{r(\sigma)} \\ &= \xi^{r(\tau)r(\sigma)} \end{aligned}$$

sodass

$$\begin{aligned} \Psi(\sigma\tau) &= \overline{r(\sigma\tau)} \\ &= \overline{r(\sigma)r(\tau)} \\ &= \overline{r(\sigma)r(\tau)} \\ &= \Psi(\sigma)\Psi(\tau) \end{aligned}$$

Aus $\overline{r(\sigma)} = 1$ folgt, dass $\sigma(\xi) = \xi$, also ist σ die Identität auf $K(\xi)$. □

Korollar 4.39. *Sei $\xi \in \overline{\mathbb{Q}}$ eine primitive n-te Einheitswurzel. Dann ist $\mathbb{Q}(\xi)/\mathbb{Q}$ eine endliche Galois-Erweiterung mit Galoisgruppe $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*$.*

Wir zeigen nun, dass sich jede endliche abelsche Gruppe als Galoisgruppe über $\mathbb{Q}$ realisieren lässt.

Theorem 4.40 (Dirichlet)**.** *Sei $a, b \in \mathbb{Z}$ mit $a, b > 0$ und $(a, b) = 1$. Dann enthält $\{a + nb \mid n \in \mathbb{Z}\}$ unendlich viele Primzahlen.*

Theorem 4.41. *Sei G eine endliche abelsche Gruppe.Dann gibt es eine endliche Galoiserweiterung $K/\mathbb{Q}$ mit $G(K/\mathbb{Q}) \cong G$.*

Beweis. G zerfällt in zyklische Gruppen, d.h.

$$G = \bigoplus_{i=1}^{n} \mathbb{Z}/p_i^{l_i}$$

mit p_i prim.
Nach **??** gilt $\{1 + m_i p_i^{l_i}\}$ enthält unendliche viele Primzahlen, d.h. wir können teilerfremde Primzahlen q_i wählen, mit

$$q_i = 1 \mod p_i^{l_i}$$

Schreibe $q_i = 1 - m_i p_i^{l_i}$. Sei $q = \prod_{i=1}^{n} q_i$, $\xi \in \overline{\mathbb{Q}}$ eine primitive q-te Einheitswurzel und wähle $K = \mathbb{Q}(\xi)$. Dann ist

$$\begin{aligned} G(K/\mathbb{Q}) &\cong (\mathbb{Z}/q\mathbb{Z})^* \\ &= \bigoplus_{i=1}^{n} (\mathbb{Z}/q_i\mathbb{Z})^* \\ &= \bigoplus_{i=1}^{n} \mathbb{Z}/m_i p_i^{l_i}\mathbb{Z} \end{aligned}$$

Wähle nun

$$H_i = p_i^{l_i}\mathbb{Z}/m_i p_i^{l_i}\mathbb{Z}$$

dann ist H_i eine Untergruppe von $\mathbb{Z}/m_i p_i 1^{l_i}\mathbb{Z}$ mit

$$\frac{\mathbb{Z}/m_i p_i^{l_i}\mathbb{Z}}{H_i} = \mathbb{Z}/p_i^{l_i}\mathbb{Z}$$

Definiere nun $H = \bigoplus_{i=1}^{n} H_i$. Dann ist

$$G(K/\mathbb{Q})/H \cong G$$

d.h. $K^H/\mathbb{Q}$ ist eine Galoiserweiterung mit Galoisgruppe

$$G(K^H/\mathbb{Q}) = \frac{G(K/\mathbb{Q})}{G(K/K^H)} = \frac{G(K/\mathbb{Q})}{H} = G$$

□

Theorem 4.42 (Kronecker-Weber)**.** *Sei $K/\mathbb{Q}$ eine endliche Galoiserweiterung mit abelscher Galoisgruppe. Dann ist K in einem Kreisteilungskörper enthalten.*

Definition 4.43. Sei $n \in \mathbb{Z}$, $n > 0$ und $\mathrm{char}(K) \not| n$. Seien $\xi_1, ..., \xi_m$ mit $m = \varphi(n)$ die primitiven n-ten Einheitswurzeln in $\overline{K}$.
Dann heißt

$$\Phi_{n,K} = \prod_{i=1}^{m} (X - \xi_i)$$

das n-te **Kreisteilungspolynom** über K.
Im Fall $K = \mathbb{Q}$schreiben wir Φ_n für $\Phi_{n,K}$.

Satz 4.44. *a) $\Phi_{n,K}$ ist ein normiertes separables POlynom über K vom Grad $\phi(n)$*

b) Für $K = \mathbb{Q}$ gilt $\Phi_n \in \mathbb{Z}[X]$ und Φ_n ist irreduzibel in $\mathbb{Z}[X]$ und in $\mathbb{Q}[X]$.

c) $X^n - 1 = \prod_{d|n} \Phi_{d,K}$

Beweis. a) Sei $L = K(\xi_i)$. Dann ist L/K eine Galoiserweiterung un $L^{G(L/K)} = K$. Sei $\sigma \in G(L/K)$.
Dann permutiert σ die Primitiven Einheitswurzeln, d.h. $\Phi_{n,K} = \Phi_{n,K}$.
Somit liegen die Koeffizienten von $\Phi_{n,K}$ in K.

b) Sei $\xi \in \overline{\mathbb{Q}}$ primitive n-te Einheitswurzel. Dann hat $m_{\xi,\mathbb{Q}}$ Grad $\varphi(n)$. Da $\Phi_n(\xi) = 0$ ist und Φ_n Grad $\varphi(n)$ hat ist $\Phi_n = m_{\xi,\mathbb{Q}}$.
Somit ist Φ_n irreduzibel über $\mathbb{Q}$. Aus $\Phi_n|(X^n - 1)$ und der Normiertheit von Φ_n folgt $\Phi_n \in \mathbb{Z}[X]$.

c) Es ist

$$X^n - 1 = \prod_{\xi \in U_n} (X - \xi) = \prod_{d|n} \prod_{\xi \in P_d} (X - \xi)$$
$$= \prod_{d|n} \Phi_{d,K}$$

wobei P_d die Menge der d-ten Einheitswurzeln in U_n ist.

□

Satz 4.45. *Sei $n \in \mathbb{Z}$, $n > 0$ und p prim mit $p \not| n$. Sei e die Ordnung von p in $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*$. Dann zerfällt $\Phi_{n,\mathbb{F}_p}$ in $\varphi(n)/e$ verschiedene Faktoren vom Grad e über $\mathbb{F}_p$.*

Beweis. Sei f ein irreduzibler normierter Faktor von $\Phi_{n,\mathbb{F}_p}$. Dann ist f das Minimalpolynom einer primitiven n-te Einheitswurzel $\xi \in \overline{\mathbb{F}_p}$ über $\mathbb{F}_p$. Sei $K = \mathbb{F}_p(\xi)$ und $m = [K : \mathbb{F}_p]$. Dann ist $m = \deg(f)$.
Wir zeigen $m = e$:
ξ hat Ordnung n in U_n, K^* ist zyklisch der Ordnung P^{m-1}. Es folgt

$$\begin{aligned} n&|p^m - 1 \\ p^m &= 1 \mod n \\ e&|m \\ e &\leq m \end{aligned}$$

Andererseits folgt aus $p^e = 1 \mod n$, dass

$$\xi^{p^e} = \xi^1 = \xi$$

so dass di Abbildung

$$\begin{aligned} k &\to K \\ x &\mapsto x^{p^e} \end{aligned}$$

trivial auf K ist, da das Polynom $X^{p^e} - X$ höchsten p^e Nullstellen hat, ist

$$\begin{aligned} |K| &\leq p^e \\ p^m &\leq p^e \\ m &\leq e \end{aligned}$$

Es folgt $m = e$. $\square$

Beispiel 4.46. Sei p eine ungerade Primzahl und $\xi \in \overline{F_p}$ eine primitive 8-te Einheitswurzel. Dann ist

$$G\left(\mathbb{F}_p(\xi)/\mathbb{F}_p\right) \hookrightarrow (\mathbb{Z}/8\mathbb{Z})^*$$

$= \{1, 3, 5, 7\} = \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$.
Somit ist

$$G(\mathbb{F}_p(\xi)/\mathbb{F}_p) = \begin{cases} 1 & \text{, falls } p = 1 \mod 8 \\ \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}, \text{ sonst} \end{cases}$$

Bemerkung 4.47. Sei p eine ungerade Primzahl. Dann ist $(\mathbb{Z}/p^n\mathbb{Z})^*$ zyklisch der Ordnung $p^n - p^{n-1}$.
Für $p = 2$ ist

$$\begin{aligned} (\mathbb{Z}/2\mathbb{Z})^* &= 1 \\ (\mathbb{Z}/4\mathbb{Z})^* &= \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \\ (\mathbb{Z}/2^n\mathbb{Z})^* &= \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/2^{n-2}\mathbb{Z} \text{ für } n \geq 3 \end{aligned}$$

5 Moduln

5.1 Definitionen

Definition 5.1. Sei R ein Ring. Ein **Linksmodul** über R ist eine abelsche Gruppe M mit einer Abbildung

$$R \times M \to M$$

sodass

$$\begin{aligned} a(x + y) &= ax + ay \\ (a + b)x &= ax + bx \\ a(bx) &= (ab)x \\ 1x &= x \end{aligned}$$

für alle $a, b \in R$ und $x, y \in M$.

Definition 5.2. Seien M', M R-Moduln. Eine Abbildung

$$f : M \to M'$$

heißt $R-$**linear** oder **Modulhomomorphismus**, wenn

$$f(x+y) = f(x) + f(y)$$
$$f(ax) = af(x)$$

für alle $a \in R$ und $x, y \in M$.

Beispiel 5.3. a) Sei G eine abelsche Gruppe. Dann ist G ein $\mathbb{Z}$-Modul unter

$$ng = \begin{cases} \underbrace{g + ... + g}_{n \text{ Summanden}} & n > 0 \\ 0 & n = 0 \\ \underbrace{(-g) + ... + (-g)}_{n \text{ Summanden}} & n < 0 \end{cases}$$

b) Jeder $\mathbb{Z}$-Modul ist eine abelsche Gruppe (indem man die Modul-Struktur vergisst)

c) Zwei $\mathbb{Z}$-Moduln sind genau dann isomorph, wenn sie als abelsche Gruppen isomorph sind.

d) Sei R ein Ring und M ein R-Modul und $f : M \to M$ ein Modulhomomorphismus. Dann ist M ein $R[X]$-Modul unter

$$R[X] \times M \to M$$
$$\left(a_i X^i, v\right) \mapsto \sum a_i f^i(v)$$

e) Für zwei R-Moduln M und M' ist die Menge der R-linearen Abbildungen unter

$$(af)(v) = af(v)$$

ein R-Modul

Definition 5.4. Sei ; ein R-Modul. Ein Untermodul von M ist eine Untergruppe N von M, die Invariant unter Operstionen von R ist, d.h. $ax \in N$ für alle $a \in R$, $x \in N$.

Beispiel 5.5. Sei M ein R-Modul und $(M_i)_{i \in I}$ eine Familie von Untermoduln. Dann sind

$$\bigcap_{i \in I} M_i \quad \text{und} \quad \sum_{i \in I} M_i = \{\sum_{i \in I} x_i \mid x_i \in M_i, \text{ fast allle } x_i = 0\}$$

Untermoduln von M.

5.2 Faktormoduln

Definition 5.6. Sei M ein R-Modul und $N \subset M$ ein Untermodul, so erhält man auf der **Faktorgruppe** M/N eine R-Modulstruktur. Mit $a(x+N) = ax + N$ für $x \in M$, $a \in R$ wird M/N als **Faktormodul** bezeichnet.
Die Abbildung $\pi : M \to M/N$, $x \mapsto x + N$ ist ein Modulhomomorphismus.

Theorem 5.7. *Seien M, M' R-Moduln, $f : M \to M'$ ein Modulhomomorphismus und $N \subset \operatorname{Kern}(f)$ ein Untermodul von M. Dann gibt es eine eindeutigen Homomorphismus $\overline{f} : M/N \to M'$, sodass*

$$\begin{tikzcd}
M \arrow[r, "f"] \arrow[d] & M' \\
M/N \arrow[ur, "\overline{f}"] &
\end{tikzcd}$$

Satz 5.8. *Sei M ein R-Modul und N ein Untermodul. Dann insuziert die Projektion $\pi : M \to M/N$ eine Bijektion zwischen den Untermoduln von M die N enthalten und den Untermoduln von M/N.*

5.3 Direkte Summen und Produkte

Definition 5.9. Sei $(M_i)_{i\in I}$ eine Familie von R-Moduln.
Dann ist das **Modul-Produkt**

$$\prod_{i\in I} M_i = \{(x_i)_{i\in I} \mid x_i \in M_i\}$$

ein R-Modul und

$$\bigoplus_{i\in I} M_i = \{(x_i)_{i\in I} \mid x_i \in M_i \text{ und fast alle } x_i = 0\}$$

ein Untermodul. Dieser wird als direkte Summe bezeichnet.

5.4 Erzeugendensysteme und Basen

Definition 5.10. Sei M ein R-Modul. Eine Familie $(x_i)_{i\in I}$ von Element in M heißt **Erzeugendensystem** von M über R, wenn

$$m = \sum_{i\in I} Rx_i$$

ist.
Besitzt M ein endliches Erzeugendensystem, so heißt M **endliche erzeugt** oder **endlich**er R-Modul.
Ein Familie $(x_i)_{i\in I}$ heißt **linear unabhängig**, wenn aus

$$\sum_{i\in I} a_i x_i = 0$$

(mit fast alle $a_i = 0$) folgt, dass alle $a_i = 0$ sind.

Definition 5.11. Ein linear unabhängiges Erzeugendensystem wird als **Basis** bezeichnet.
In diesem Falls lässt sich jedes $x \in M$ schreiben als

$$x = \sum_{i \in I} a_i x_i$$

mit eindeutig bestimmtem $a_i \in R$. In diesem Fall heißt M **frei**.

Satz 5.12. *Sei R ein Ring mit $1 \neq 0$ und M ein R-Modul.*
Sind $(v_,...,v_m)$ und $(w_1,...,w_n)$ zwei R-Basen von M, so ist $m = n$.

5.5 Exakte Sequenzen

Definition 5.13. Eine Folge von R-Moduln und R-linearen Abbildungen

$$... \to M_{i-1} \xrightarrow{f_i} M_i \xrightarrow{f_{i+1}} M_{i+1} \to ...$$

heißt **exakt bei** M_i, wenn $\mathrm{Im}(f_i) = \mathrm{Kern}(f_{i+1})$.

Definition 5.14. Eine Sequenz heißt **exakte Sequenz**, wenn sie an jedem M_i exakt ist.

Definition 5.15. Ein **kurze exakte Sequenz** ist eine Sequenz der Form

$$0 \to M' \xrightarrow{f} M \xrightarrow{g} M'' \to 0$$

Exakheit bedeuet hierbei, dass f injektiv, g surjektiv und $\mathrm{Im}(f) = \mathrm{Kern}(g)$.

Beispiel 5.16. Sei M ein R-Modul und $N \subset M$ ein Untermodul. Dann ist

$$0 \to N \hookrightarrow M \to M/N \to 0$$

eine kurze exakte Sequenz.

Definition 5.17. Sei

$$0 \to M' \xrightarrow{f} M \xrightarrow{g} M'' \to 0$$

eine kurze exakte Sequenz von R-Moduln.
Die Sequenz <u>spaltet</u>, wenn es einen Untermodul $N \subset M$ mit $M = N \oplus \mathrm{Kern}(g)$ gibt.

Satz 5.18. *Sei*

$$0 \to M' \xrightarrow{f} M \xrightarrow{g} M'' \to 0$$

eine kurze exakte Sequenz von R-Moduln.
Dann sind äquivalent:

a) Die Sequenz spaltet (Es gibt einen Untermodul $N \subset M$ mit $M = N \oplus \mathrm{Kern}(g)$)

b) Es gibt eine R-lineare Abbildung $s : M'' \to M$ mit $g \circ s = \mathrm{id}_{M'}$

c) Es gibt eine R-lineare Abbildung $t : M \to M'$ mit $t \circ f = \mathrm{id}_{M'}$

Beweis. 1) $\Rightarrow$ 2) $g|_N'$ ist injektiv und $g(N') = g(M) + g(\operatorname{Kern} g) = M''$ sodass $g : N \to M''$ einen Isomorphismus liefert.

Wir erhalte die Abbildung $M'' \xrightarrow{g^{-1}} N \hookrightarrow M$.
Sei s die Komposition dieser Abbildungen, dann isz $g \circ s = \mathrm{id}_{M''}$.

1) $\Rightarrow$ 3) Es ist $M = \operatorname{Kern}(g) \oplus N' = f(M') \oplus N'$ und $f : M' \to M$ ist injektiv, also ist $M' \cong M'$, sodass wir die Abbildung $M \to f(M') \xrightarrow{f^{-1}} M'$ erhalten.
Die Komposition erfüllt $f \circ f = \mathrm{id}_{M'}$.

2) $\Rightarrow$ 1) Setze $N' = s(M'')$ und sei $x \in M$. Dann ist

$$x = \underbrace{x - s\big(g(x)\big)}_{\in \operatorname{Kern}(g)} + \underbrace{s\big(g(x)\big)}_{\in N'}$$

denn

$$g\big(x - s(g(x))\big) = g(x) - gs\big(g(x)\big) = g(x) - \operatorname{id} g(x) = 0$$

Sei nun $y \in M''$ und $s(y) \in \operatorname{Kern}(g)$, dann ist $y = g\big(s(y)\big) = 0$.

3) $\Rightarrow$ 1)

□

Satz 5.19. *Sei* $0 \to M' \xrightarrow{f} M \xrightarrow{g} M'' \to 0$ *eine kurze exakte Sequenz von* R*-Moduln.*
Ist M'' *frei, so spaltet die Sequenz* $M \cong M' \oplus M''$.

Beweis. Sei (v_i) eine R-Basis von M'', $x_i \in M$ mit $g(x_i) = v_i$ für alle $i \in I$ und $s : M'' \to M$ definiert durch $s(v_i) = x_i$.
Dann gilt $g \circ s = \mathrm{id}_M$, d.h. die Folge spaltet.
Außerdem gilt

$$\begin{aligned} N &\cong \operatorname{Kern}(g) \oplus s(M'') \\ &\cong \operatorname{Im}(f) \oplus M'' \\ &\cong M' \oplus M'' \end{aligned}$$

□

Korollar 5.20. *Sei*

$$0 \to M' \xrightarrow{f} M \xrightarrow{g} M'' \to 0$$

eine kurze exakte Sequenz von R*-Moduln. Sind* M' *und* M'' *frei, so ist* M *frei.*

Beweis. Da M'' frei ist gilt $M \cong M' \oplus M''$. □

5.6 Endlich erzeugbare Moduln

Definition 5.21. Ein R-Modul M heißt **endlich erzeugbar**, wenn M ein endliches Erzeugendensystem hat.
Äquivalent: Es gibt einen surjektiven Homomorphismus $R^n \to M$.

Beispiel 5.22. Sei K ein Körper und $R = K[X_1, X_2, ...]$ der Polynomring über K in abzählbar vielen Variablen und sei

$$I = \{f \in R \mid \text{Konstanter Term } a_0 = 0\}$$

Dann ist I ein Ideal in R, d.h. I ist ein R-Untermodul von R.
Dann ist zwar R endlich erzeugbar ($R^1 \to R$) aber I ist nicht endlich erzeugt als R-Modul.

Satz 5.23. *Sei*

$$0 \to M'' \xrightarrow{f} M \xrightarrow{g}\!\!\to 0$$

eine kurze Exakte Sequenz von R-Moduln. Dann gilt

a) Ist M endlich erzeugt, so auch M''.

b) Sind M' und M'' endlich erzeugt, so auch M.

Beweis. a) Ist $(v_1, ..., v_n)$ ein Erzeugendensystem von M, so ist $\big(g(v_1), ..., v(v_n)\big)$ ein Erzeugendensystem von M''.

b) Sei $(v_1, ..., v_N)$ ein Erzeugendensystem von M' und $(x_1, ..., w_m)$ ein Erzeugendensystem von M''. Setze

$$s_i = f(v_i) \quad w_i = g(t_i)$$

Dann ist $(s_1, ..., s_n, t_1, ..., t_m)$ ein Erzeugendensystem von M, denn:
Sei $x \in M$. Dann gilt

$$g(x) = \sum_{i=1}^{n} a_i w_i = \sum_{i=1}^{n} a_i g(t_i)$$

Dann folgt, dass insbesondere

$$g\left(x - \sum_{i=1}^{n} a_i t_i\right) = 0$$

also ist

$$x - \sum_{i=1}^{n} a_i t_i \in \text{Kern}(g) = \text{Im}(f)$$

$$x - \sum_{i=1}^{n} a_i t_i = \sum_{j=1}^{m} b_j s_j$$

Sodass abschließend gilt

$$x = \sum_{j=1}^{m} b_j s_j + \sum_{i=1}^{n} a_i t_i$$

□

Satz 5.24. *Seien $M_1, ..., M_n$ R-Moduln und sei $M = \bigoplus_{i=1}^{n} M_i$.*
Dann ist M genau dann endlich erzeugt, wenn alle M_i endlich erzeugt sind.

Beweis. **„⇐“** Klar: Endliche Menge von endlichen Erzeugendensystemen.

„⇒“ Setze $M' = \bigoplus_{i \neq j} M_i$. Dann ist für jedes j

$$0 \to M' \to M \to M_j \to 0$$

eine exakte Sequenz.
Dann ist M_j endlich nach **??**.

□

Definition 5.25. Ein R-Modul heißt **noethersch**, wenn jeder Untermodul von M endlich erzeugbar ist.

Satz 5.26. *Sei M ein R-Modul. Dann sind äquivalent:*

a) M ist noethersch.

b) Jede aufsteigende Kette von Untermoduln wird stationär.

c) Jede nichtleere Teilmenge von Untermoduln von M hat ein maximales Element

Satz 5.27. *Sei*

$$0 \to M' \xrightarrow{f} M \xrightarrow{g} M'' \to 0$$

eine kurze exakte Sequenz von R-Moduln. Dann ist M genau dann noethersch, wenn M' und M'' noethersch sind.

Beweis. **„⇒“** Sei M noethersch. Dann ist M' noethersch weil Untermoduln von M' isomorph unter f zu einem Untermodul von M ist.
Jeder Untermodul von M'' ist das homomorphe Bild eines Untermoduls von M unter g und somit endlich erzeugbar.

„⇐“ Seiene nun M' und M'' noethersch. Sei N ein Untermodul von M. Dann ist

$$0 \to f^{-1} \xrightarrow{f} N \xrightarrow{g} g(N) \to 0$$

exakte Sequenz. Da$f^{-1}(N)$ und $g(N)$ endlich erzeugt sind ist auch N endlich erzeugt.

□

Satz 5.28. *Seien $M_1, ..., M_n$ R-Moduln und sei $M = \bigoplus_{i=1}^{n} M_i$.*
Dann ist M genau dann noethersch, wenn jedes M_i noethersch ist.

Beweis. **„⇔“** Durch Induktion über n.
Für $n = 1$ ist $M = M_1$.
Sei $n > 1$. Definiere $M' = \bigoplus_{i=1}^{n-1} M_i$. Dann definiert

$$0 \to M' \to M \to M_n \to 0$$

eine kurze exakte Sequenz bei der M' und M_n noethersch sind.
Somit ist M noethersch.

„⇒" Sei $M' = \bigoplus_{i \neq j}$. Dann ist für jedes j

$$0 \to M' \to M \to M_j \to 0$$

eine kurze exakte Sequenz. Da M noethersch ist auch M_j noethersch. □

Satz 5.29. *Sei R ein noetherscher Ring und M ein endlich erzeugbarer R-Modul. Dann ist M noethersch.*

Beweis. Es gibt einen subjektiven Homomorphismus $g : R^n \to M$ und eine exakte Sequenz

$$0 \to \mathrm{Kern}(g) \to R^n \xrightarrow{g} M \to 0$$

Somit ist M noethersch. □

6 Ganze Ringerweiterungen

6.1 Definitionen und Eigenschaften

Definition 6.1. Sei B ein Ring und $A \subset B$ ein Unterring.
$x \in B$ heißt **ganz** über A, wenn es ein normiertes $f \in A[X]$ mit $f(x) = 0$ gibt.

Satz 6.2. *Sei B ein Ring, $A \subset B$ ein Unterring und $x \in B$.*
Dann sind äquivalent:

a) x ist ganz über A.

b) Der Ring $A[x]$ ist ein endlich erzeugter A-Modul.

c) Der Ring $A[x]$ ist ein einem Unterring $C \subset B$ enthalten, sodass C ein endlich erzeugter A-Modul ist.

Beweis. **„1) ⇒ 2)"** Ist $x \in B$ ganz, so gibt es ein normiertes $f \in A[X]$ mit $f(x) = 0$, d.h.

$$x^n + a_{n-1}x^{n-1} + ... + a_0 = 0$$

für geeignete $a_i \in A$.
Es folgt, dass

$$x^n = -a_{n-1}x^{n-1} - ... - a_0$$

D.h. $A[x]$ wird von $1, x, x^2, ..., x^{n-1}$ als A-Modul erzeugt.

„2) ⇒ 3)" Wähle $C = A[x]$.

„3) ⇒ 1)" Sei $C = \sum_{i=1}^{n} Ac_i$.
Weil $A[x] \subset C$ gilt $xc_i \in C$.
Es gibt also $\gamma_{ij} \in A$ mit

$$xc_i = \sum_{j=1}^{n} \gamma_{ij} c_i$$

Wir können diese Gleichung schreiben als

$$\sum_{j=1}^{n}(xc_j\delta_{ij} - \gamma_{ij}c_j) = 0$$

$$\sum_{j=1}^{n}\underbrace{(x\delta_{ij} - \gamma_{ij})}_{:=m_{ij}}c_j = 0$$

$$Mu = 0$$

Definiere nun $M = (m_{ij})$ und $u = (c_1, ..., c_n)^T$. Sei M^{ad} die zu M adjungierte Matrix. Dann ist

$$M^{ad}Mu = \det(M)u$$

Es folgt

$$\det(M)c_i = 0$$

und damit

$$\det(M)c = 0$$

für alle $c \in C$. Da $1 \in C$ ist $\det(M) = 0$.
Da $\det(M)$ ein normiertes Polynom in X mit Koeffizienten in A ist, ist X ganz.

□

Korollar 6.3. *Sei B ein Ring und A ein Unterring.*

a) Sind $x_1, ..., x_n \in B$ ganz über A, so ist $A[x_1, ..., x_n]$ ein endlich erzeugter A-Modul.

b) Sei B ein Unterring eines Rings C. Ist B ein endlich erzeugter A-Modul und $y \in C$ ganz über B, so ist y ganz über A.

Beweis. a) Durch Induktion über n. Im Fall $n = 1$ gilt **??**.
Sei $n > 1$. Nach Induktionsvoraussetzung ist $A[x_1, ..., a_{n-1}]$ ein endlich erzeugter A-Modul.
x_n ist ganz über A, somit ist x_n auch ganz über $A[x_1, ..., x_{n-1}]$. Somit ist $A[x_1, ..., x_{n-1}][x_n]$ ein endlich erzeugter $A[x_1, ..., x_{n-1}]$-Modul.

$$A[x_1, ..., x_{n-1}] = \sum_{i=1}^{k} Af_i$$

mit $f_i \in A[x_1, ..., x_{n-1}]$

$$A[x_1, ..., x_n] = \sum_{j=1}^{l} A[x_1, ..., x_{n-1}]g_j$$

mit $g_j \in A[x_1, ..., x_n]$

$$= \sum_{j=1}^{l}\sum_{i=1}^{k} Af_ig_j$$

Dann ist auch $A[x_1, ..., x_n]$ ein endlich erzeugter A-Modul.

b) $B[y]$ ist ein endlich erzeugter B-Modul. Da B ein endlich erzeugter A-Modul ist gilt $A[y] \subset B[y]$ un dann mit **??**, dass y ganz über A ist.

$\square$

Definition 6.4. Sei B ein Ring und $A \subset B$ ein Unterring. Dann nennt man

$$\overline{A} := \{x \in B \mid x \text{ ist ganz über } A\}$$

die **ganze Hülle** von A in B.

Satz 6.5. *Sei B ein Ring und $A \subset B$ ein Unterring. Dann ist die ganze Hülle $\overline{A}$ von A über B ein Unterring von B.*

Beweis. Sind $x, y \in B$ ganz über A, so ist $A[x, y]$ ein endlich erzeugter A-Modul. Dieser enthält $x - y$, $x + y$ und xy. Somit sind diese Elemente ganz über $A[x, y]$ und somit auch über A. $\square$

Definition 6.6. Ist $\overline{A} = B$, so heißt B **ganz** über A.

Satz 6.7. *Seien $A \subset B \subset C$ Ringerweiterungen.*
Ist C ganz über B und B ganz über A, so ist auch B ganz über A.

Beweis. Sei $c \in C$. Dann ist

$$x^n + b_{n-1}c^{n-1} + ... + b_0 = 0$$

für geeigente $b_i \in B$.
Sei $R = A[b_0, ..., b_{n-1}]$. Dann ist $R[c]$ ein endlcih erzeugter R-Modul
Da die b_i ganz sind ist R ein endlich erzeugter A-Modul. Somit ist R ein endlich erzeugter A-Modul.
Es folgt, dass $\overline{A}$ ganz abgeschlossen ist (also $x \in B$ ist ganz über $\overline{A}$ und $\overline{A}$ ist ganz über A. Also ist x ganz über A). $\square$

Definition 6.8. Ein Integritätsbereich heißt **ganz abgeschlossen**, wenn er ganz abgeschlossen in seinem Quotientenkörper ist.

Satz 6.9. *Sei A ein faktorieller Integritätsbereich.*
Dann ist A ganz abgeschlossen.

Beweis. Sei K der Quotientenkörper von A.
Sei $\frac{a}{b} \in K$ mit $a, b \in A$,$(a, b) = 1$ und ganz über A. Dann ist

$$(\frac{a}{b})^n + c_{n-1}(\frac{a}{b})^{n-1} + ... + c_0 = 0$$

für geeignete $c_i \in A$. Multiplikation mit b^n liefert

$$a^n + c_{n-1}a^{n-1}b + ... + c_0b^n = 0$$

d.h. $b|a^n$.
Somit muss b eine Einheit sein, also $\frac{a}{b} \in A$. $\square$

Satz 6.10. *Sei A ein Integritätsbereich mit Quotientenkörper K und sei A ganz abgeschlossen in K. Sei L/K ein algebraisch Körpererweiterung.*
Dann ist $\alpha \in L$ genau dann ganz über A, wenn $m_{\alpha,K} \in A[X]$ liegt.

Beweis. „$\Leftarrow$“ Klar weil $m_{\alpha,K}$ normiert ist.

„$\Rightarrow$“ Sei $\alpha \in L$ ganz über A. Es gibt als eine normiertes Polynom $f \in A[X]$ mit $f(\alpha) = 0$.
In $K[X]$ gilt $m_{\alpha,K}|f$
Über einem geeigneten algebraisch Abschluss $\overline{L}$ von L zerfällt $m_{\alpha,K}$ d.h.

$$m_{\alpha,K} = \prod_{i=1}^{n}(X - \alpha_i)$$

Aus $m_{\alpha,K}|f$ folgt, dass $f(\alpha_i) = 0$ für alle α_i.
Somit ist jedes α_i ganz über A.
Dann sind auch die Koeffizienten von $m_{\alpha,K}$ ganz über A.
Da A ganz abgeschlossen in K ist gilt $m_{\alpha,K} \in A[X]$.

□

6.2 Dedekindringe

Definition 6.11. Ein Integritätsbereich A heißt **Dedekindring**, wenn

a) A noethersch

b) A ist ganz abgeschlossen

c) Jedes Primideal $\neq 0$ ist maximal.

Definition 6.12. Ein **algebraischer Zahlkörper** K ist eine endliche Erweiterung von $\mathbb{Q}$.

Definition 6.13. Die ganze Hülle von $\mathbb{Z}$ in K wird als **Ring der ganzen Zahlen** in K bezeichnet. Man schreibt diesen als

$$O_K := \{a \in K | \exists f \in \mathbb{Z}[X] \text{ normiert mit } f(a) = 0\}$$

Theorem 6.14. *Sei K ein algebraischer Zahlkörper. Dann ist O_K ein Dedekindring.*

Beispiel 6.15. Sei $d \in \mathbb{Z}$, $n \neq 1$ und quadratfrei.
Wähle $K = \mathbb{Q}(\sqrt{d})$ und

$$\omega_d = \begin{cases} \sqrt{d} & \text{, falls } d = 2,3 \mod 4 \\ \frac{1}{2}(1+\sqrt{d}) & \text{, falls } d = 1 \mod 4 \end{cases}$$

Dann ist

$$O_K = \mathbb{Z} + \mathbb{Z}\omega_d$$

Betrachte nun $\mathbb{Q}(\sqrt{-5})$. Dann ist in O_K

$$21 = 3 \cdot 7 = (1 - 2\sqrt{-5})(1 + 2\sqrt{-5})$$

D.h. man erhält Faktorisierungen in Primafaktoren von 21, die nicht zueinander assoziiert sind.

Theorem 6.16. *Sei A ein Dedekindring, $I \neq 0$ und $I \neq A$ ein Ideal in A. Dann gilt*

$$I = P_1 ... P_n$$

mit eindeutigen Primidealen P_i.

6.3 Der Noethersche Normalisierungssatz

Der Noethersche Normalisierungssatz impliziert den Hilbertschen Nullstellensatz und ist daher für die algebraische Geometrie von großer Bedeutung.

Theorem 6.17. *Sei K ein Körper und $B = [b_1, ..., b_n]$ endlich erzeugter Ring. Dann existieren Elemente $x_1, ..., x_r \in B$, die algebraisch unabhängig über K sind, sodass B als Modul endlich erzeugt über $K[x_1, ..., x_r]$ ist.*

Beweis. Sind $b_1, ..., b_n$ algebraisch unabhängig über K so kann man $x_1, ..., x_r \in B$ finden, die algebraisch unabhängig sind.
Angenommen $b_1, ..., b_n$ sind algebraisch abhängig über K. Dann existiert eine Relation

$$\sum_{(\nu_1,...,\nu_n)\in I} a_{\nu_1,...,\nu_n} b_1^{\nu_i} ... b_n^{\nu_n} = 0 \qquad \text{(Gl. 6.1)}$$

mit $a_{\nu_1,...,\nu_n} \in K \setminus \{0\}$ und endlichem I.
Sei

$$\begin{aligned} x_1 &= b_1 - b_n^s \\ &\vdots \\ x_{n-1} &= b_{n-1} - b_n^{s_n - 1} \end{aligned}$$

mit $s_1, ..., s_{n-1} \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$. Dann ist

$$\begin{aligned} B = K[b_1, ..., b_n] \\ &= K[x_1, ..., x_{n-1}, b_n] \\ &= K[x_1, ..., x_{n-1}][b_n] \end{aligned}$$

Setzt man $b_i = x_i + b_n^{s_i}$ in **??** und spaltet

$$b_i^{\nu_i} = (x_i + b_n^{s_i})^{\nu_i} = b_n^{s_i \nu_i} + ...$$

so erhält man

$$\sum_{(\nu_1,...,\nu_n)\in I} a_{\nu_1,...,\nu_n} b_n^{s_1\nu_1 + s_2\nu_2 + ... + s_{n-1}\nu_{n-1} + \nu_n} + \underbrace{f(x_1, ..., c_{n-1}, b_n)}_{\in K[x_1,...,x_{n-1},b_n]} = 0 \quad \text{(Gl. 6.2)}$$

Dabei ist $f(x_1, ..., x_{n-1}, b_n)$ ein Polynom in b_n mit Koeffizient in $K[x_1, ..., x_{n-1}]$ wobei der Grad in b_n echt kleiner ist als das Maximum der Summe $s_1\nu_1 + ... + s_{n-1}\nu_{n-1} + \nu_n$ mit $(\nu_1, ..., \nu_n) \in I$.
Wir können nun die Exponenten $s_1, ..., s_{n-1}$ so wählen, dass die Summen $x_1\nu_1 + ... + s_{n-1}\nu_{n_1} + \nu_n$ für alle $(\nu_1, ..., \nu_n) \in I$ paarweise verschieden sind.
($\mathbb{Q}^n$ wird nicht durch endlich viele Hyperebenen ausgeschöpft)
Dann ist **??** eine Gleichung der Form

$$\underbrace{ab_n^N}_{\in K\setminus\{0\}} + \underbrace{g(x_1, ..., x_{n-1,b_n})}_{\in K[x_1,...,x_{n-1}][b_n]} = 0$$

wobei b_n^N die höchste Auftretenden Potenz von b_n ist. Multiplikation mit $a^{-1} \in K$ zeigt, dass b_n ganz über $K[x_1, ..., x_{n-1}]$ ist.
Somit ist

$$B = K[x_1, ..., x_{n-1}][b_n]$$

ein endlich erzeugter $K[x_1, ..., x_{n-1}]$-Modul.
Sind $x_1, ..., x_{n-1}$ algebraisch unabhängig über K gilt die Behauptung. Ansonsten wenden wir das Verfahren auf den RIng $K[x_1, ..., x_{n-1}]$ an und finden $y_1, ..., y_{n-1}$, sodass $K[x_1, ..., x_{n-1}]$ ein endlich erzeugter $K[y_1, ..., y_{n-2}]$-Modul ist.
Auf diese weise fährt man fort, bis man ein eine über K algebraisch unabhängigen System gelangt ist. □

Satz 6.18. *Sei $A \subset B$ eine Ringerweiterungen, B ganz über A und seien A und B Integritätsbereiche.*
Dann ist A genau dann Körper, wenn B Körper ist.

Beweis. Sei A ein Körper und $b \in B \setminus \{0\}$. Wähle $f \in A[X]$ normiert udn minimalen Grades, sodass $f(b) = 0$. Dann ist

$$f = X^n + a_1 X^{n-1} + ... + a_n$$

mit $a_n \neq 0$ und

$$b(b^{n-1} + a_{n-1} b^{n-1} + ... + a_{n-1}) = 0$$
$$\underbrace{b\left(-\frac{1}{a_n}\right)}_{\in A} \underbrace{(b^{n-1} + a_{n-1} b^{n-2} + ... + a_{n-1})}_{\in B} = 1$$

Also ist $b \in B^*$.
Sei B ein Körper und $a \in A \setminus \{0\}$. Dann ist $a^{-1} \in B$ und a^{-1} ist ganz über A, d.h.

$$(a^{-1})^n + a_i (a^{-1})^{n-1} + ... + a_n = 0$$

für geeignete $a_i \in A$.
Es folgt

$$a^{-n} = -a_1 a^{-n+1} - ... - a_n$$
$$a^{-1} = \underbrace{-a_1 - ... - a_n a^{n-1}}_{\in A}$$

Also ist A ein Körper. □

Theorem 6.19. *Sei L/K eine Körpererweiterung und $L = K[x_1, ..., x_n]$ für geeignete $x_1, ..., x_n \in L$. Dann ist L/K endlich.*

Beweis. Nach dem Noetherschen Normalisierungssatz **??** gibt es über K algebraisch unabhängige Elemente $y_1, ..., y_r \in L$, sodass L ein endlich erzeugter $K[y_1, ..., y_r]$-Modul ist. Aus

$$K[y_1, ..., y_r] \subset L$$

folgt, dass $K[y_1, ..., y_r]$ ein Körper ist. Also ist $r = 0$. □

Satz 6.20. *Sei K ein Körper und $\mathfrak{m} \subset K[X_1, ..., X_n]$ ein maximales Ideal.*
Dann ist L/K mit $L = K[X_1, ..., X_n]/\mathfrak{m}$ eine endliche Körpererweiterung.

Beweis. Es gilt $L = K[x_1, ..., x_n]$ mit $x_i = X_i + m$. □

6.4 Anfänge der algebraischen Geometrie

Definition 6.21. Sei K ein beliebiger Körper.

$$A^n = A^n_K := \{(a_1, ..., a_n) \mid a_i \in K\}$$

A^n wird als **n-dimensionaler affiner Raum** bezeichnet.

Definition 6.22. Für $F \in K[x_1, ..., x_n]$ definiert man

$$V(F) := \{p \in A^n \mid F(p) = 0\}$$

die **V???-Menge**.
Für $S \subset K[X_1, ..., X_n]$ sei

$$V(S) := \{p \in A^n \mid F(p) = 0 \forall_{F \in S}\} = \bigcap_{F \in S} V(F)$$

Beispiel 6.23. Sei $n = 2$, $K = \mathbb{R}$, $F = X_1^2 - X_2$.

Definition 6.24. Eine Teilmenge $Y \subset A_n$ heißt algebraisch, wenn $y = V(S)$ für ein $S \subset K[X_1, ..., X_n]$ ist.

Satz 6.25. *Sei $S \subset K[X_1, ..., X_n]$ und $I = (S)$ das erzeugte Ideal. Dann gilt*

$$V(S) = V(I)$$

Beweis. $\supset$ Ist klar.

$\subset$ Sei $p \in V(S)$ und $F \in I$. Dann ist $F = \sum c_i F_i$ mit $c_i \in K[X_1, ..., X_n]$, $F_i \in S$ und

$$F(p) = \sum c_i(p) \underbrace{F_i(p)}_{=0} = 0$$

Da $K[X_1, ..., X_n]$ noethersch ist (Hilbertscher Basissatz **??**) ist

$$I = (F_1, ..., F_m) = \sum_i K[X_1, ..., X_n] F_i$$

für geeignete $F_i \in I$.
Wie eben sieht man

$$V(I) = V\big((F_1, ..., F_m)\big) = V(F_1, ..., F_m)$$

□

Definition 6.26. Sei K ein Körper und $n \in \mathbb{N}$, dann ist $\mathbb{A}^n_K$ die Menge der Algebraischen Mengen in K^n.

Beispiel 6.27. Betrachte $V\big(Y^2 - X(X^2 - 1)\big) \subset \mathbb{A}^2_{\mathbb{R}}$.

Satz 6.28. *Die Abbildung*

$$V : \left\{ \begin{matrix} \textit{Ideale in} \\ K[X_1, ..., X_n] \end{matrix} \right\} \to \{\textit{Algebraische Teilmengen von } \mathbb{A}^n_K\}$$

hat folgende Eigenschaften

a) $V(0) = \mathbb{A}_K^n$, $V\big(K[X_1, ..., X_n]\big) = \emptyset$

b) *Wenn* $I \subset J$, *dann gilt* $V(J) \subset V(I)$.

c) *Für das Produkt gilt:* $V(IJ) = V(I \cap J) = V(I) \cup V(J)$

d) *Für die Summe gilt:* $V(\sum_i J_i) = \bigcap_i V(J_i)$

Beweis. Wir zeigen nur
Es gilt

$$IJ \subset I \cap J \subset I$$
$$IJ \subset I \cap J \subset J$$

dann mit 2):

$$V(IJ) \supset V(I \cap J) \supset V(I)$$
$$V(IJ) \supset V(I \cap J) \supset V(J)$$

es folgt, dass
$$V(IJ) \supset V(I \cap J) \supset V(I) \cup V(J)$$
Sei nun $p \in \mathbb{A}_K^n \setminus (V(I) \cup V(J))$.
Dann gibt es ein $f \in I$ mit $f(p) \neq 0$ und ein $g \in J$ mit $g(p) \neq 0$. Also ist

$$0 \neq \underbrace{(fg)}_{\in IJ}(p)$$

d.h. $p \notin V(IJ)$. Also ist $V(IJ) \subset V(I) \cup V(J)$ und es gilt Gleichheit. □

Satz 6.29. *Die Abbildung* I

$$I : \{\textit{Algebraische Teilmengen von } \mathbb{A}_K^n\} \to \left\{ \begin{matrix} \textit{Ideale in} \\ K[X_1, ..., X_n] \end{matrix} \right\}$$
$$M \mapsto \{f \in K[x_1, ..., x_n] \mid f(p) = 0 \forall p \in M\}$$

hat folgende Eigenschaften:

a) *Sei* $M \subset N$, *dann gilt* $I(M) \supset I(N)$

b) *Für eine beliebige Teilmenge* $M \subset \mathbb{A}_K^n$ *gilt*

$$M \subset V\big(I(M)\big)$$

Gleichheit gilt genau dann wenn M *algebraisch ist.*

c) *Für ein Ideal* $J \subset K[X_1, ..., X_n]$ *gilt*

$$J \subset I\big(V(J)\big)$$

Beweis. Wir zeigen:

b) **„⇒“** Sei $M = V\big(I(M)\big)$, so ist M algebraisch.

„⇐“ Sei M algebraisch, dann ist $M = V(J)$ für ein Ideal J. Dann ist

$$J \subset I(M) \tag{3}$$
$$V(J) \supset V\big(I(M)\big) \tag{4}$$

Es folgt Gleichheit.

□

Definition 6.30. Sei eine Menge $\mathbb{A}^n_K$ abgeschlossen wenn sie algebraisch ist und deren Komplemente offen.
Die erzeugte Topologie wird als **Zariski-Topologie** bezeichnet.

Beispiel 6.31. Sei K algebraisch abgeschlossen. Dann sind in $\mathbb{A}^1_K$ die Menge $\mathbb{A}^1_K$ und $\{\}$ offen und abgeschlossen.
Sei $M \subsetneqq \mathbb{A}^1_K$ abgeschlossen. Dann ist

$$\begin{aligned} M &\overset{M \text{ alg.}}{=} V(I) \overset{K[X] \text{ HIR}}{=} V(f) \\ &= V\big((X-a_1)...(X-a_n)\big) \\ &\overset{K \text{ alg. abg.}}{=} \{a_1, ..., a_n\} \end{aligned}$$

d.h. M ist endlich. Die nicht-leeren offenen Teilmengen von $\mathbb{A}^1_K$ sind dicht in A^1_K.
Die nicht-leere offenen Teilmenge von A^1_K sind dicht in A^1_K.

Satz 6.32. *Seien $a_1, ..., a_n \in K$. Dann ist*

$$J = (X_1, a_1, x_2 - a_2, ..., X_n - a_n)$$

maximal in $K[X_1, ..., X_n]$ und K ist isomorph zu $K[X_1, ..., X_N]/J$

Beweis. Sei $f \in K[X_1, ..., X_n] = K[X_1, ..., X_{n-1}][X_n]$. Dann ist

$$f = (X_n - a_n)g_n + c_n$$

wobei $(X_n - a_n)$ Grad 1 in X_n hat, $g_n \in K[X_1, ..., X_{n-1}][X_n]$ ist und c_n Grad 0 in X_n hat, d.h. $c_n \in K[X_1, ..., X_{n-1}]$. Dann folgt

$$\begin{aligned} f &= (X_n - a_n)g_n + (X_{n-1}a_{n-1})g_{n-1} + c_{n-1} \\ &\vdots \\ &= (X_n - a_n)g_n + ... + (X_1 - a_1)g_1 + \underbrace{c_1}_{\in K} \end{aligned}$$

Also ist $K[X_1, ..., X_n]/J = K$ und J ist maximal. □

Theorem 6.33 (Schwacher Nullteilersatz)**.** *Sei K algebraisch abgeschlossen und*

$$J \subsetneqq K[X_1, ..., X_n]$$

Dann ist $V(J) \neq \emptyset$.

Beweis. J ist in einem maximalen Ideal $\mathfrak{m}$ enthalten und $V(\mathfrak{m}) \subset V(J)$.
Die Abbildung

$$K \hookrightarrow K[X_1, ..., X_n] \xrightarrow{\pi} L := K[X_1, ..., X_n]/\mathfrak{m}$$

Liefert eine Einbettung $K \hookrightarrow L$.
Sei $a_i = \pi(X_i) \in L$. Dann folgt aus dem Noethersche Normalisierungssatz **??**, dass $L = K[a_1, ..., a_n]$ und dass L/K algebraisch ist.
Da K algebraisch abgeschlossen ist folgt $K = L$.
Weiterhin ist $X_i - a_i \in \mathfrak{m}$ und $(X_1 - a_1, ..., X_n - a_n) \subset \mathfrak{m}$. Da $(X_1 - a_1, ..., X_n - a_n)$ maximal ist folgt

$$(X_1 - a_1, ..., X_n - a_n) = \mathfrak{m}$$

Es folgt, dass

$$V(\mathfrak{m}) = \{(a_1, ..., a_n)\}$$

□

Theorem 6.34 (Hilbertscher Nullstellensatz)**.** *Sei K algebraisch abgeschlossen und J ein Ideal in $K[X_1, ..., X_n]$. Dann gilt*

$$I\big(V(J)\big) = \mathrm{rad}(J) = \{f \in K[X_1, ..., X_n] \exists n > 0 : \mathrm{id}\, f^n \in J\}$$

Rabinowitsch. $\mathrm{rad}(J) \subset I\big(V(J)\big)$: Sei $f \in \mathrm{rad}(J)$, dann ist f^n in J. Dann $f^n \in I\big(V(J)\big)$, dann $f^n(p) = 0 \forall p \in V(J)$, dann $f(p) = 0 \forall p \in V(J)$ und damit $f \in I\big(V(J)\big)$.

$\mathrm{rad}(J) \supset I\big(V(J)\big)$ Sei $g \in I\big(V(J)\big)$. Schreibe $J = (f_1, ..., f_t)$ und definiere

$$I = (f_1, ..., f_t X_{n+1} g - 1) \subset K[X_1, ..., X_n, X_{n+1}]$$

Dann ist

$$\begin{aligned} f_1(x_1, ..., x_n) &= 0 \\ &\vdots \\ f_t(x_1, ..., x_n) &= 0 \\ x_{n+1} f(x_1, ..., x_n) - 1 &= 0 \end{aligned}$$

Dann ist $V(I) \subset A_K^{n+1}$ leer.
(Denn: Sei $f_1(x_1, ..., x_n) = 0$,...,$f_t(x_1, ..., x_n) = 0$, dann ist $(x_1, ..., x_n) \in V(J)$.
Außerdem ist $x_{n+1} g(x_1, ..., x_n) - 1 = 0$ mit $g(x_1, ..., x_n) = 0$ auf $V(J)$. Widerspruch!)
Aus dem Schwartzschen Nullstellensatz folgt $I = K[X_1, ..., X_n]$.
Schreibe nun

$$\sum_{i=1}^{t} A_i(x_1, ..., x_{n+1}) f_i + B(x_1, ..., x_{n+1})(x_{n+1} g - 1) = 1$$

Sei $x_{n+1} = \frac{1}{y}$.
Multipliziert man mit einer genügend hohen Potenz von Y, so erhält man

$$\sum_{i=1}^{t} C_i(X_1, ..., X_n, Y) f_i + D(X_1, ...X_n, Y)(g - Y) = Y$$

dabei sind $C_i(X_1, ..., X_n, Y), D(X_1, ..., X_n, Y) \in K[X_1, ..., X_n, Y]$.
Setze $Y = g$, dann ist

$$g^n = \sum_{i=1}^{t} \underbrace{C_i(X_1, ..., X_n, g)}_{\in K[X_1, ..., X_n]} f_i \in J$$

Also ist $g \in \mathrm{rad}(J)$.

$\square$