

Algebra SS16

Prof Wedhorn, Mitschrift von Daniel Kallendorf

23. November 2016

Inhaltsverzeichnis

3	Tensorprodukte	2
3A	Erinnerung	2
3B	Multilineare Abbildungen	3
3C	3
3D	Basiswechsel von Tensorprodukten	5
4	Lokalisierung	9
4A	Lokalisierung von Ringen und Moduln	9
4B	Lokale Ringe und Restklassenkörper	13
4C	Spektren	14
	4.23 Spielzeugmodell (der Funktionalanalysis)	14
4D	Lemma von Nakagawa???	16
5	Noethersche und Artinsche Ringe	19
5A	Noethersche und Artinsche Moduln	19
5C	Noethersche Ringe	22

Bemerkung 2.1. $A[X_1, \dots, X_n]$ ist ein freier A -Modul, wobei die Monome eine Basis bilden.

Satz 2.2 (Universaleigenschaft des Polynomrings). Sei $\phi : A \rightarrow B$ eine A -Algebra und seine $b_1, \dots, b_n \in B$ Elemente. Dann existiert genau ein A -Algebra-Homomorphismus $\psi : A[X_1, \dots, X_n] \rightarrow B$, so dass $\psi(x_i) = b_i$ für alle $i = 1, \dots, n$, nämlich

$$\psi \left(\underbrace{\sum_{i_1, \dots, i_n \geq 0} a_{i_1, \dots, i_n} X_1^{i_1} \cdot \dots \cdot X_n^{i_n}}_{=: f} \right) = \underbrace{\sum_{i_1, \dots, i_n \geq 0} \phi(a_{i_1, \dots, i_n}) b_1^{i_1} \cdot \dots \cdot b_n^{i_n}}_{= f(b_1, \dots, b_n)}$$

Bemerkung 2.3.

$$\begin{aligned} \text{Im}(\psi) &= \text{kleinste } A\text{-Unteralgebra die } b_1, \dots, b_n \text{ enthält} \\ &= A[b_1, \dots, b_n] \subset B \end{aligned}$$

Beispiel 2.4. Sei $\phi : A \rightarrow B$ eine A -Algebra, $b \in B$. Es existiere ein $g \in A[X]$ mit $g(b) = 0$. Sei g normiert. Dann gilt

$$A[b] = \{f(b) | f \in A[x], \deg(f) < \deg(g)\}$$

Beispiel 2.5. Sei $A = \mathbb{Q} \hookrightarrow \mathbb{C}, i \in \mathbb{C}$.
Dann gilt $g(i) = 0$ wobei $g = X^3 + X = X(X^2 + 1)$. Es folgt:

$$\mathbb{Q}[i] = \{a_0 + q_1 i + a_2 i^2 \mid a_0, a_1, a_2 \in \mathbb{Q}\}$$

$$\mathbb{Q}[i] = \text{Im}(\mathbb{Q}[X] \xrightarrow[X \mapsto i, f \mapsto f(i)]{\psi} \mathbb{C})$$

Dann $\tilde{g} \in \mathbb{Q}[X] : \psi(\tilde{g}) = 0 \Leftrightarrow \tilde{g}(i) = 0$.
Also $g \in \text{Ker}(\psi) \Rightarrow (g) \subseteq \text{Ker}(\psi)$.
In diesem Fall $\text{Ker } \psi = (X^2 + 1)$.

Begründung von 2.8:

$$(g) \subseteq \text{Ker} \left(A[X] \xrightarrow[f \mapsto f(b)]{\psi} B \right)$$

Also ψ faktorisiert:

$$A[X]/(g) \xrightarrow{\bar{\psi}} A[b] \subseteq B$$

mit $\bar{\psi}$ surjektiv.

Proposition 2.6. Sei $g \in A[X]$ normiert. Dann ist

$$\{f \in A[X], \deg(f) < \deg(g)\} \hookrightarrow A[X] \rightarrow A[X]/(g)$$

bijektiv.

Beweis. Gilt, da für alle $f \in A[X]$ genau ein $r \in A[X]$ existiert mit $\deg(r) < \deg(g)$ mit $f \in r + (g)$ \square

3 Tensorprodukte

- (A) Tensorprodukte von Moduln
- (B) Tensorprodukte von Algebren und Basiswechsel
- (C) Exaktheitseigenschaften des Tensorprodukts

3A Erinnerung

Definition 3.1. A -Modul: $(M, +, \cdot)$ wobei $(M, +)$ abelsche Gruppe und $\cdot : A \times M \rightarrow M$ ein Skalarprodukt.

Bemerkung 3.2. \mathbb{Z} -Modul = abelsche Gruppe

Beispiel 3.3. Sei I eine Menge

$$A^{(I)} = \{(a_i)_{i \in I} \mid a_i \in A, a_i = 0 \text{ für fast alle } i \in I\}$$

A -Modul mit Addition und Skalarprodukt.

Für $i \in I : e_i \in A^{(I)}$ mit

$$e_i = \begin{cases} 1 & \text{an der } i\text{-ten Stelle} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Definition 3.4. Ein A -Modul heißt frei, falls $M \cong A^{(I)}$ für eine Menge I

Definition 3.5. Sei M, N A -Modul. Dann heißt $u : M \rightarrow N$ A -linear oder Homomorphismus von A -Moduln, falls

$$u(am + m') = au(m) + u(m') \forall a \in A, m, m' \in M$$

Bemerkung 3.6. Sei I eine Menge, M ein A -Modul $\underline{m} = (m_i)_{i \in I}$ ein Tupel von Elementen $m_i \in M$. Dann Existiert genau eine Abbildung:

$$A^{(I)} \xrightarrow{u_{\underline{m}}} M$$

mit $u_{\underline{m}}(e_i) = m_i$.

$(m_i)_i = \underline{m}$ heißt linear Unabhängig/ Erzeugende-System/ Basis, falls $u_{\underline{m}}$ injektiv/ surjektiv / bijektiv ist.

Bemerkung 3.7. Der A -Modul M ist endlich erzeugt, genau dann wenn ein $n \in \mathbb{N}$ und eine A -lineare Surjektion $A^n \rightarrow M$ existieren.

3B Multilineare Abbildungen

Definition 3.8. Sei $r \in \mathbb{N}_0$, M_1, \dots, M_r, P A -Moduln.

Eine Abbildung $\alpha : M_1 \times \dots \times M_r \rightarrow P$ heißt r -multilinear, falls sie in jeder Komponente linear ist, d.h. Für alle $i = 1, \dots, r$ gilt:

$$\alpha(m_1, \dots, am_i + m'_i, m_{i+1}, \dots, m_r) = a\alpha(m_1, \dots, m_i, \dots, m_r) + \alpha(m_1, \dots, m'_i, \dots, m_r)$$

Für alle $m_j \in M_j, m_i \in M_i, a \in A$. ($r = 1$: linear, $r = 2$: bilinear)

3C ..

Definition 3.9. Sei $r \geq 2$, M_1, \dots, M_r A -Moduln.

Dann existiert ein A -Modul $M_1 \otimes_A M_2 \otimes_A \dots \otimes_A M_r$ und eine r -multilineare Abbildung $\tau : M_1 \times \dots \times M_r \rightarrow M_1 \otimes_A M_2 \otimes_A \dots \otimes_A M_r$, sodass für jede r -multilineare Abbildung:

$$\alpha : M_1 \times \dots \times M_r \rightarrow P$$

wobei P ein A -Modul, genau ein A -lineare Abbildung

$$\bar{\alpha} : M_1 \otimes_A \dots \otimes_A M_r \rightarrow P$$

existiert. $M_1 \times \dots \times M_r \xrightarrow{\forall r\text{-multilinear}} P$

$$M_1 \otimes_A M_2 \otimes_A \dots \otimes_A M_r$$

Satz 3.10 (Eindeutigkeit des Tensorprodukts). Seien $(T, \tau : M_1 \times \dots \times M_r \rightarrow T)$ und (T', τ') Tensorprodukte:

$$\begin{array}{ccc} M_1 \times \dots \times M_r & & \\ \downarrow \tau & \searrow \tau' & \\ T & \xrightarrow{\exists! v} & T' \end{array}$$

u existiert aufgrund der universellen Eigenschaft von (T, τ) .
 v existiert aufgrund der universellen Eigenschaft von (T', τ') .
 Ferner kommutiert

Die Universelle Eigenschaft von (T, τ) zeigt, dass $v \circ u = id_T$, genauso $u \circ v = id_T$.

Satz 3.11 (Existenz des Tensorprodukts). 1. Suche einen A -Modul N und eine Abbildung $c : M_1 \times \dots \times M_r \rightarrow R$, sodass

$$\text{Hom}_A(N, P) \xrightarrow{u \mapsto u \circ \tau} \text{Abb}(M_1 \times \dots \times M_r, P)$$

Für alle A -Moduln P .

2. Wir wollen, dass $(am_1 + m'_1, m_2, \dots, m_r)$ und $a(m_1, \dots, m_r) + (m'_1, \dots, m_r)$ auf das gleiche Element abgebildet werden.
 Sei $Q \subseteq N$ der von

$$e_{(m_1, \dots, m_{i-1}, am_i + m'_i, m_{i+1}, \dots, m_r)} - (ae_{(m_1, \dots, m_i, \dots, m_r)} + e_{(m_1, \dots, m'_i, \dots, m_r)})$$

für alle $i = 1, \dots, r$ und $m_i, m'_i \in M_i$ und $a \in A$ erzeugt Untermodul.
 Dann setze $T := N/Q$. Dann gilt

$$\begin{aligned} \text{Hom}_A(T, P) &= \{u \in \text{Hom}(N, P) \mid u(Q) = 0\} \\ &= L_A(M_1, \dots, M_r, P) \end{aligned}$$

mit $\tau : M_1 \times \dots \times M_r \rightarrow N \rightarrow N/Q$.

Bemerkung 3.12. 3.4

$e_{(m_1, \dots, m_r)} \in A^{(M_1 \times \dots \times M_r)}$ bilden ein Erzeugendensystem.

Also bilden auch die $\tau(m_1, \dots, m_r) =: m_1 \otimes \dots \otimes m_r$ eine Erzeugenden-System des A -Moduls $M_1 \otimes \dots \otimes M_r$.

Aber: Nicht jedes Element von $M_1 \otimes \dots \otimes M_r$ ist in dieser Form.

Also genügt es eine lineare Abbildung $u : M_1 \otimes \dots \otimes M_r \rightarrow P$ auf den erzeugendnen $m_1 \otimes \dots \otimes m_r$ mit $(m_i \in M_i)$ anzugeben.

Umgekehrt sei P ein A -Modul und es seien elemente $u(m_1 \otimes \dots \otimes m_r) \in P$ gegeben für alle $m_i \in M_i$.

Genau dann existiert eine A -lineare Abbildung $u : M_1 \otimes \dots \otimes M_r \rightarrow P$ mit $m_1 \otimes \dots \otimes m_r \mapsto u(m_1 \otimes \dots \otimes m_r)$, wenn für alle $i = 1, \dots, r$, $a \in A$, $m_j \in M_j$ und $m'_i \in M_i$ gilt:

$$u(m_1 \otimes \dots \otimes am_i + m'_i \otimes \dots \otimes m_r) = au(m_1 \otimes \dots \otimes m_i \otimes \dots \otimes m_r) + u(m_1 \otimes \dots \otimes am'_i \otimes \dots \otimes m_r)$$

Satz 3.13 (Tensorprodukt linearer Abbildungen). Seien M, M', N, N' A -Moduln, $u : M \rightarrow M', v : N \rightarrow N'$ A -lineare Abbildungen.

Dann definiert

$$\begin{aligned} M \otimes_A N &\rightarrow M' \otimes N' \\ m \otimes n &\mapsto u(m) \otimes v(n) \end{aligned}$$

eine A -lineare Abbildung bezüglich $u \otimes v : M \otimes N \rightarrow M' \otimes N$.

Beweis. Zu zeigen: $u(am + m') \otimes v(n) = a(u(m) \otimes v(n)) + u(m') \otimes v(n)$
 Es gilt da das Tensorprodukt r -linear ist.

$$\begin{aligned} u(am + m') \otimes v(n) &= (au(m) + u(m')) \otimes v(n) \\ &= (au(m) \otimes v(n)) + u(m') \otimes v(n) \end{aligned}$$

Außerdem zu zeigen: $u(m) \otimes v(an + n') = a(u(m) \otimes v(n)) + u(m) \otimes v(n')$
 (\rightarrow Genauso.) \square

Bemerkung 3.14. 3.6

1. $A \otimes_A M \cong M$
 $u : a \otimes m \mapsto am$
 $v : 1 \otimes m \dots m$ Dabei ist u wohldefiniert, d.h. $(a, m) \rightarrow am$ ist bilinear.
2. $M \otimes_A N \xrightarrow{\sim} N \otimes_A M, m \otimes n \mapsto n \otimes m$ ist ... von A-Moduln.
 Zu zeigen: Wohldefineirtheit
3. $M \otimes_A N \otimes_A P \simeq (M \otimes_A N) \otimes_A P$
 $m \otimes n \otimes p \mapsto (m \otimes n) \otimes p$
 $m \otimes n \otimes p \mapsto m \otimes (n \otimes p)$

Proposition 3.15. 3.7 Sei $(M_i)_{i \in I}$ eine Familie von A -Moduln, N ein A -Modul:

$$\begin{aligned} \left(\bigotimes_{i \in I} M_i \right) \otimes_A N &\xrightarrow{\sim} \bigotimes_{i \in I} (M_i \otimes_A N) \\ (m_i)_{i \in I} \otimes n &\mapsto (m_i \otimes n)_{i \in I} \end{aligned}$$

Beweis. Umkehrabbildung gegeben durch:

$$\text{Inhalt..} m_i \otimes n \mapsto (m_j)_{j \in I} \otimes n$$

$$\text{mit } m_j := \begin{cases} m_i, & j = i \\ 0 & j \neq i \end{cases}$$

\square

3D Basiswechsel von Tensorprodukten

Satz 3.16. 1. Sei M ein A -Modul. Dann wird

$$\varphi^*(M) := B \otimes_A M$$

zu einem B -Modul mit dem Skalarprodukt

$$\begin{aligned} B \times (B \otimes_A M) &\rightarrow B \otimes_A M \\ (b, b' \otimes m) &\mapsto bb' \otimes m \end{aligned}$$

2. Sei $U : M \rightarrow M'$ ein Homomorphismus von A -Moduln. Dann ist

$$\begin{aligned} id_B \otimes u : B \otimes M &\rightarrow B \otimes_A M' \\ b \otimes m &\mapsto b \otimes u(m) \end{aligned}$$

eine B -lineare Abbildung.S

Proposition 3.17. Sei $\varphi : A \rightarrow B$ eine A-Algebra.
Sei M ein freier A-Modul. Dann ist $B \otimes_A M$ ein freier B-Modul und

$$\vartheta_A(M) = \vartheta_B(B \otimes_A M)$$

Beweis. Sei M ein freier A-Modul. Dazu ist äquivalent, dass $M \simeq A^{(I)}$.
Daraus folgt, dass

$$\begin{aligned} B \otimes_A M &\simeq B \otimes_A A^{(I)} \\ &\simeq B \otimes_A \left(\bigoplus_{i \in I} A \right) \\ &\simeq \left(\bigoplus_{i \in I} B \otimes_A A \right) \\ &\simeq \bigoplus_{i \in I} B \\ &= B^{(I)} \end{aligned}$$

Also ist $B \otimes_A M$ frei. □

Proposition 3.18. Sei $\mathfrak{a} \subseteq A$ ein Ideal, M ein A-Modul. Setze

$$\begin{aligned} \mathfrak{a} \cdot M &= \langle \{am \mid a \in \mathfrak{a}, m \in M\} \rangle \\ &= \left\{ \sum_{i=1}^m a_i m_i \mid n \in \mathbb{N}_0, a_i \in \mathfrak{a}, m_i \in M \right\} \\ &\subseteq M \quad \text{Untermodul} \end{aligned}$$

Dann ist

$$\begin{aligned} A/\mathfrak{a} \otimes_A M &\xrightarrow{\sim} M/\mathfrak{a}M \\ \bar{a} \otimes m &\mapsto \overline{am} \end{aligned}$$

ein Homomorphismus von A/\mathfrak{a} -Moduln.

Beweis. $\bar{a} \otimes m \mapsto \overline{am}$ ist wohldefiniert: Zu zeigen:

1. Sei $a' \in A$ mit $\overline{a'} = \bar{a} \in A/\mathfrak{a}$.
Dann ist $\overline{am} = \overline{a'm} \in M/\mathfrak{a}M$. Es gilt $\overline{a'} = \bar{a}$ genau dann wenn es ein $x \in \mathfrak{a}$ gibt sodass $a' = a + x$.
Daraus folgt, dass $a'm = am + xm$, und da $xm \in \mathfrak{a}M$ folgt $\overline{a'm} = \overline{am}$.
2. \overline{am} ist linear in a , d.h.

$$\overline{(ba + a')m} = b\overline{am} + \overline{a'm} \quad \text{für } a, a' \in A, b \in A$$

3. \overline{am} ist linear in m , d.h.

$$\overline{a(bm + m')} = b\overline{am} + \overline{am'} \quad \text{für } m, m' \in M, b \in A$$

□

Proposition 3.19. Eine Umkehrabbildung ist gegeben durch

$$\begin{aligned} v : M &\rightarrow A/\mathfrak{a} \otimes_A M \\ m &\mapsto 1 \otimes m \end{aligned}$$

Beweis. Zu zeigen: $\mathfrak{a}M \subseteq \text{Ker}(v)$, also für alle $x \in \mathfrak{a}, m \in M$ gilt $v(xm) = 0$.

$$v(xm) = 1 \otimes xm = \bar{x} \otimes m = 0$$

da $\bar{x} = \bar{0} \in A/\mathfrak{a}$.

Noch zu zeigen: v ist Umkehrabbildung zu $\bar{a} \otimes m \mapsto \overline{am}$. □

Definition 3.20 (Tensorprodukte von Algebren). Sei $A \rightarrow B_1, A \rightarrow B_2$ A -Algebren.

Dann definieren wir auf dem A -Modul $B_1 \otimes_A B_2$ eine Multiplikation:

$$\begin{aligned} (B_1 \otimes B_2) \times (B_1 \otimes B_2) &\rightarrow B_1 \otimes B_1 \otimes B_2 \\ (a_1 \otimes b_2, b'_1 \otimes b'_2) &\mapsto b_1 b'_1 \otimes b_2 b'_2 \end{aligned}$$

und erhalten die A -Algebra $B_1 \otimes_A B_2$.

Beispiel 3.21. Sei $A \xrightarrow{\varphi} B$ eine A -Algebra und sei $C = A[X_1, \dots, X_n]/(f_1, \dots, f_r)$ und $f_i \in A[X_1, \dots, X_n]$. Dann ist

$$B \otimes_A A[X_1, \dots, X_n]/(f_1, \dots, f_r) = B[X_1, \dots, X_n]/(\tilde{f}_1, \dots, \tilde{f}_r)$$

wobei

$$f_i = \sum_{\underline{j} \in \mathbb{N}_0^n} a_{\underline{j}} X^{\underline{j}} \rightarrow \tilde{f}_i = \sum_j \varphi(a_j)$$

1. Sei $A = \mathbb{Q}, C = \mathbb{Q}[i] = \{a + bi | a, b \in \mathbb{Q}\} = \mathbb{Q}[X]/(X^2 + 1)$
2. $\mathbb{R} \otimes_{\mathbb{Q}} \mathbb{Q}[i] = \mathbb{R}[X]/(X^2 + 1) = \mathbb{C}$
3. $C \otimes_{\mathbb{Q}} \mathbb{Q}[i] = C[X]/(X^2 + 1) = \mathbb{C}[X]/(X + i) \times \mathbb{C}[X]/(X - i) \simeq \mathbb{C} \times \mathbb{C}$

Beispiel 3.22. $A[X] \otimes_A A[Y] = (A[X])[Y] = A[X, Y]$ mit $f \otimes g \mapsto fg$.
Dann ist die Umkehrabbildung

C) Exaktheitseigenschaften

Definition 3.23 (Homomorphismen-Funktor). Seien M, P A -Moduln.

Wir Definieren auf $\text{Hom}_A(M, P) := \{u : M \rightarrow P \mid u \text{ ist } A\text{-linear}\}$ die Struktur eines A -Moduls.

$$\begin{aligned} (u + v)(m) &:= u(m) + v(m) & u, v &\in \text{Hom}_A(M, P) \\ (au)(m) &:= au(m) & a &\in A, m \in M \end{aligned}$$

Sei $u : M \rightarrow M'$ eine A -lineare Abbildung. Wir erhalten die A -lineare Abbildung

$$\begin{aligned} \text{Hom}_A(u, P) : \text{Hom}_A(M', P) &\rightarrow \text{Hom}_A(M, P) \\ w' &\mapsto w' \cdot u \end{aligned}$$

Sei $v : P \rightarrow P'$ eine A -lineare Abbildung. Wir erhalten die A -lineare Abbildung

$$\begin{aligned} \text{Hom}_A(M, v) : \text{Hom}_A(M, P) &\rightarrow \text{Hom}_A(M, P') \\ w &\mapsto v \cdot w \end{aligned}$$

Erinnerung 3.24. Eine Sequenz von A -lineare Abbildungen

$$\dots \rightarrow M_{i-1} \xrightarrow{u_{i-1}} M_i \xrightarrow{u_i} M_{i+1} \rightarrow \dots$$

heißt exakt, falls $\text{Ker}(u_i) = \text{Im}(u_{i-1})$

Beispiel 3.25. $0 \rightarrow M \xrightarrow{u} M$ ist exakt genau dann wenn u injektiv ist.

$M \xrightarrow{v} M'' \rightarrow 0$ ist exakt genau dann wenn v surjektiv ist

Satz 3.26. 1. Sei $0 \rightarrow M' \xrightarrow{u} M \xrightarrow{v} M''$ eine Sequenz von A -Moduln.

Dann ist $(*)$ genau dann exakt, wenn für jeden A -Modul P die Sequenz

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Hom}_A(P, (*)) : 0 \rightarrow \text{Hom}_A(P, M') & \rightarrow & \text{Hom}_A(P, M) & \rightarrow & \text{Hom}_A(P, M'') \\ & & w' \mapsto u \circ w' & & w \mapsto v \circ w \end{array}$$

exakt ist.

2.

Beweis. Wir beweisen Schrittweise:

1. “ $(*)$ ist exakt $\Rightarrow \text{Hom}_A(P, (*))$ ist exakt“

(a) $w' \mapsto u \circ w'$ injektiv:

Sei $w \in \text{Hom}_A(P, M')$ mit $u \circ w' = 0$.

Dann ist (da u injektiv) $w' = 0$. Also ist $\text{Ker}(w' \mapsto u \circ w') = 0$.

(b) $\text{Im}(w' \mapsto u \circ w') \subseteq \text{Ker}(w \mapsto v \circ w)$:

Komposition: $w' \mapsto u \circ w' \mapsto \underbrace{(v \circ u) \circ w'}_{=0}$ ist Null.

(c) $\text{Im}(w \mapsto v \circ w) \subseteq \text{Ker}(w' \mapsto u \circ w')$:

Sei $w \in \text{Hom}_A(P, M)$ mit $v \circ w = 0$, sodass $\text{Im}(w) \subseteq \text{Ker}(v) = \text{Im}(u)$.

$$\begin{array}{ccccc} 0 & \longrightarrow & M' & \xrightarrow{u} & M & \xrightarrow{v} & M'' \\ & & \nwarrow w' & & \uparrow w & & \nearrow 0 \\ & & & & P & & \end{array}$$

“ \Leftarrow “

(a) u injektiv: Sei $m' \in M$ mit $u(m') = 0$, $P := \langle m' \rangle = Am' \subseteq M'$, $w' : P \rightarrow M'$ Inklusion.

Dann ist...

□

Bemerkung 3.27. Seien M, N, P A -Moduln. Dann ist

$$\begin{aligned} \text{Hom}_A(M \otimes_A N, P) &= L_A(M, N; P) \\ &= \text{Hom}_A(M, \text{Hom}_A(N, P)) \\ (\alpha : M \times N \rightarrow P) &\mapsto (n \mapsto \alpha(m, n)) \end{aligned} \quad (*)$$

$$\begin{aligned}
\text{Sei } T_N : (\mathbf{A}\text{-Modul}) &\rightarrow (\mathbf{A}\text{-Modul}) \\
M &\mapsto M \otimes_A N \\
(u : M \rightarrow M') &\mapsto u \otimes \text{id}_N \\
N_N : (\mathbf{A}\text{-Modul}) &\rightarrow (\mathbf{A}\text{-Modul}) \\
P &\mapsto \text{Hom}_A(N, P)
\end{aligned}$$

Dann besagt (*):

$$\text{Hom}(T_M(M), P) = \text{Hom}(M, H_N(P))$$

d.h. T_N ist linksadjungiert zu H_N .

Dann ist T_N rechtsexakt und H_N ist linksexakt.

Proposition 3.28. Sei $M' \xrightarrow{u} M \xrightarrow{v} M'' \rightarrow 0$ eine exakte Sequenz von \mathbf{A} -Moduln. Dann ist für jeden \mathbf{A} -Modul N die Sequenz

$$M' \otimes N \xrightarrow{u \otimes \text{id}_N} M \otimes N \xrightarrow{v \otimes \text{id}_N} M'' \otimes N \rightarrow 0$$

exakt.

Beweis. Formal mit 3.27.

Sei $M' \rightarrow M \rightarrow M'' \rightarrow 0$ exakt.

Dann gilt mit ??, dass für alle \mathbf{A} -Moduln P :

$$0 \rightarrow \text{Hom}_A(M'', H_N(P)) \rightarrow \text{Hom}_A(M, H_N(P)) \rightarrow \text{Hom}_A(M', H_N(P))$$

Ist jeweils gleich (3.27)

$$0 \rightarrow \text{Hom}_A(T_N(M''), P) \rightarrow \text{Hom}_A(T_N(M), P) \rightarrow \text{Hom}_A(T_N(M'), P)$$

exakt, sodass mit ??

$$T_N(M') \rightarrow \underbrace{T_N(M)}_{=M \otimes_A N} \rightarrow T_N(M'') \rightarrow 0$$

exakt ist. □

Beispiel 3.29. Sei $A = \mathbb{Z}$, $u : \mathbb{Z} \xrightarrow{x \mapsto 2x} \mathbb{Z}$.

Dann ist $0 \rightarrow \mathbb{Z} \xrightarrow{u} \mathbb{Z}$ exakte und $A \otimes_A M = M$.

Aber

$$\begin{aligned}
0 \rightarrow \mathbb{Z} \otimes \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} &\xrightarrow{u \otimes \text{id}_{\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}}} \mathbb{Z} \otimes \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \\
&\xrightarrow{\cdot 2} \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}
\end{aligned}$$

ist nicht injektiv.

4 Lokalisierung

4A Lokalisierung von Ringen und Moduln

Definition 4.1. Eine Teilmenge $S \subseteq A$ heißt multiplikativ, falls $1 \in S$ und $s, t \in S \Rightarrow st \in S$.

Beispiel 4.2. 1. $S = \mathbb{Z} \setminus \{0\} \subseteq A = \mathbb{Z}$

2. Sei $f \in A$, dann ist $S_f = \{1, f, f^2, \dots\}$ eine multiplikative Teilmenge.

3. Sei $y \in A$ Primideal. Dann ist $A \setminus y \subseteq A$ eine multiplikative Teilmenge.

Definition 4.3. Sei A ein Ring, $S \subseteq A$ eine multiplikative Teilmenge. Definiere auf $A \times S$ eine Äquivalenzrelation durch

$$(a, s) \sim (b, t) :\Leftrightarrow at = bs$$

Beweis. Dies ist eine Äquivalenzrelation:

- Reflexivität
- Symmetrie
- Transitiv: $(a, s) \sim (b, t), (b, t) \sim (c, u)$

$$\exists v, w \in S : \quad vat = bvs \quad , \quad wba = wtc$$

Dann ist $vbsw =!$

□

Satz 4.4 (Universelle Eigenschaft). Sei $S \subseteq A$ eine multiplikative Teilmenge und sei $1 : A \rightarrow S^{-1}$ kanonisch. Sei B ein Ring, $\varphi : A \rightarrow B$ ein Ring-Homomorphismus mit $\varphi(s) \in B^\times = \{b \in B \mid \exists c \in B : bc = 1\}$ für alle $s \in S$. Dann existiert ein eindeutiger Ring-Homomorphismus $\tilde{\varphi} : S^{-1}A \rightarrow B$ mit $\tilde{\varphi} \circ 1 = \varphi$.

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\forall \varphi: \varphi(s) \in B^\times} & B \\ \downarrow 1 & \nearrow \exists! \tilde{\varphi} & \\ S^{-1}A & & \end{array}$$

Beweis. Eindeutigkeit Für $\frac{a}{s} \in S^{-1}A$ muss für $\tilde{\varphi}$ gilt:

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}\left(\frac{a}{s}\right) &= \tilde{\varphi}\left(\frac{a}{1} \left(\frac{s}{1}\right)^{-1}\right) = \tilde{\varphi}\left(\frac{a}{1}\right) \tilde{\varphi}\left(\frac{s}{1}\right)^{-1} \\ &= \varphi(a)\varphi(s)^{-1} \end{aligned} \quad (*)$$

Eindeutigkeit Definiere $\tilde{\varphi}$ durch (*)

Z.z: $\tilde{\varphi}$ ist wohldefiniert.

□

Bemerkung 4.5. Sei $S \subseteq A$ eine multilineare Teilmenge.

Dann gilt: $1 : A \rightarrow S^{-1}A$ ist injektiv $\Leftrightarrow S$ enthält keinen Nullteiler.

Beweis.

1 ist injektiv

$$\Leftrightarrow \text{Ker}(1) = 0$$

$$\Leftrightarrow (\forall a \in A : \frac{a}{1} = 1 \Rightarrow a = 0) \Leftrightarrow (\forall a \in A : \exists s \in S : as = 0 \Rightarrow a = 0) \Leftrightarrow S \text{ enthält einen Nullteiler}$$

□

Satz 4.6 (Lokalisierung von Moduln). Sei $S \subseteq A$ eine multiplikative Teilmenge, M ein A -Modul. Definiere auf $M \times S$ eine Äquivalenz Relation:

$$(m, s) \sim (n, t) \Leftrightarrow \exists v \in S : vtm = vsm$$

Man erhält den $S^{-1}A$ -Modul $S^{-1}M = (M \times S) / \sim$:

- Mit Addition: $\frac{m}{s} + \frac{n}{t} := \frac{tm+sn}{st}$
- Mit Skalarmultiplikation: $\frac{a}{s} \cdot \frac{m}{t} := \frac{am}{st}$

Satz 4.7 (Lokalisierung als Funktor). Sei $u : M \rightarrow N$ eine A -lineare Abbildung, $S \subseteq A$ eine multiplikative Teilgruppe. Dann ist

$$S^{-1}u : S^{-1}M \rightarrow S^{-1}N$$

$$\frac{m}{s} \mapsto \frac{u(m)}{s}$$

eine $S^{-1}A$ lineare Abbildung.

Satz 4.8 (Lokalisierung ist exakt). Inhalt Sei $M' \xrightarrow{u} M \xrightarrow{v} M''$ eine exakte Sequenz von A -Moduln, $S \subseteq A$ eine multiplikative Teilmenge. Dann ist

$$S^{-1}M' \xrightarrow{S^{-1}u} S^{-1}M \xrightarrow{S^{-1}v} S^{-1}M''$$

eine exakte Sequenz von $S^{-1}A$ Moduln.

Beweis. $v \circ u = 0$. Also ist $S^{-1}v \circ S^{-1}u = 0$.

Noch zu zeigen: $\text{Ker}(S^{-1}v) \subseteq \text{Im}(S^{-1}u)$.

Sei $\frac{m}{s} \in S^{-1}M$ mit $S^{-1}v \frac{m}{s} = \frac{v(m)}{s} = 0$.

Also gibt es $t \in S : tv(m) = v(tm) = 0$.

Damit liegt $tm \in \text{Ker}(v) = \mathfrak{Z}(u)$.

Also existiert $m' \in M : u(m') = tm$. Dann ist $S^{-1}u \left(\frac{m'}{st} \right) = \frac{u(m')}{st} = \frac{m}{s}$ und damit $\frac{m}{s} \in \text{Im}(S^{-1}u)$ \square

Proposition 4.9. Sei M ein A -Modul, $S \subseteq A$ eine multiplikative Teilmenge, dann ist

$$u : S^{-1}A \otimes_A M \xrightarrow{\sim} S^{-1}M$$

$$\frac{a}{s} \otimes m \mapsto \frac{am}{s}$$

ist Homomorphismus von $S^{-1}A$ -Moduln.

Beweis. 1. u ist wohldefiniert: z.Z:

- (a) $\frac{a}{s} = \frac{b}{t} \Rightarrow \frac{am}{s} = \frac{bm}{t}$.
- (b) $\frac{am}{s}$ ist linear in $\frac{a}{s}$ und in m .

2.

\square

Satz 4.10 (Ideal in $S^{-1}A$). Sei $S \subseteq A$ eine multilineare Teilmenge.

$$\{\text{Ideale in } A\} \begin{array}{c} \xrightarrow{a \mapsto S^{-1}a} \\ \xleftarrow{b \mapsto \iota^{-1}(b)} \end{array} \{\text{Ideale in } S^{-1}A\}$$

$$1 : A \rightarrow S^{-1}A, a \mapsto \frac{a}{1}$$

Nicht zu einander invers.

1. Sei $\mathfrak{a} \subseteq A$ ein Ideal. Dann ist $S^{-1}\mathfrak{a} = S^{-1}A$ genau dann wenn $\mathfrak{a} \cap S \neq \emptyset$.
Dann folgt auch, dass $\mapsto S^{-1}\mathfrak{a}$ ist nur invertierbar, falls $S \subseteq A^\times$.
2. Für $b \subseteq S^{-1}A$ Ideal gilt:

$$S^{-1}(\iota^{-1}(b)) = b$$

Dann folgt $b \mapsto \iota^{-1}(b)$ ist injektiv und jedes Ideal von $S^{-1}A$ ist von der Form $S^{-1}\mathfrak{a}$ für ein Ideal $\mathfrak{a} \subseteq A$.

3. Sei $\mathfrak{a} \subseteq A$ ein Ideal. Dann gilt: Es gibt ein Ideal $b \subseteq S^{-1}A$ mit $\mathfrak{a} = \iota^{-1}(b)$.
Dies ist Äquivalent dazu, dass kein $s \in S$ in A/\mathfrak{a} Nullteiler ist.
4. Man hat zueinander inverse Bijektionen:

$$\begin{array}{c} \{q \subset S^{-1}A \mid \text{Primideal}\} \xrightarrow{q \mapsto \iota^{-1}(q)} \\ \xleftarrow{\mathfrak{p} \mapsto S^{-1}\mathfrak{p}} \{\text{Primideale } \mathfrak{p} \subset A \text{ mit } \mathfrak{p} \cap S = \emptyset\} \end{array}$$

Beweis. 1. $\frac{1}{s} \in S^{-1}A$ ist genau dann wenn es ein $a \in \mathfrak{a}, s \in S$ gibt, sodass $\frac{a}{s} = \frac{1}{1}$.

$$\begin{aligned} &\Leftrightarrow \exists a \in \mathfrak{a}, s, t \in S : ta = ts \\ &\Leftrightarrow \mathfrak{a} \cap S \neq \emptyset \end{aligned}$$

2. Sei $\frac{a}{s} \in S^{-1}(\iota^{-1}(b))$.
Ist äquivalent zu $\exists t \in S$ und $b \in A$ mit $\frac{b}{1} \in b$, so dass

$$\frac{a}{s} = \frac{b}{t} = \frac{b}{1} \frac{1}{t}$$

$$\Leftrightarrow \frac{a}{s} \in b$$

3. Sei $\mathfrak{a} = \iota^{-1}(b)$ für ein Ideal $b \subseteq S^{-1}A$.

$$\begin{aligned} &\Leftrightarrow \mathfrak{a} = \iota^{-1}(S^{-1}\mathfrak{a}) \\ &\Leftrightarrow A/\mathfrak{a} \xrightarrow{\bar{a} \mapsto \overline{\left(\frac{a}{1}\right)}} S^{-1}A/S^{-1}\mathfrak{a} \stackrel{??}{=} S^{-1}A/\mathfrak{a} \quad \text{injektiv} \end{aligned}$$

(Wende ?? an auf die exakte Sequenz

$$0 \rightarrow \mathfrak{a} \rightarrow A \rightarrow A/\mathfrak{a} \rightarrow 0$$

Dann ist auch

$$0 \rightarrow S^{-1}\mathfrak{a} \rightarrow S^{-1}A \rightarrow S^{-1}(A/\mathfrak{a}) \rightarrow 0$$

exakt.) Mit ?? gilt äquivalenz dazu, dass kein $s \in S$ ist Nullteiler in A/\mathfrak{a} .

4.

□

Satz 4.11 (Universelle Eigenschaft des Quotientenkörpers). Sei $\iota : A \rightarrow \text{Qud}(A)$ kanonisch und sei $\varphi : A \rightarrow K$ ein injektiver Ring-Homomorphismus wobei K ein Körper.

Dann existiert genau ein Homomorphismus von Körpern $\tilde{\varphi} : \text{Qud}(A) \rightarrow K$.

4B Lokale Ringe und Restklassenkörper

Definition 4.12. Ein Ring A heißt lokal wenn er genau ein Maximales Ideal besitzt.

Dann bezeichnet \mathfrak{m}_A dieses Maximales Ideal.

Der Körper $\kappa(A) := A/\mathfrak{m}_A$ heißt Restklassenkörper von A .

Beispiel 4.13. • Jeder Körper ist ein lokaler Ring.

- Ein Hauptidealring A ist genau dann lokal, wenn bis auf Multiplikation mit Einheiten genau ein irreduzibles Element existiert.
Oder wenn A Körper ist

Definition 4.14. Ein lokaler Hauptideal Ring der kein Körper ist, heißt diskreter Bewertungsring.

Beispiel 4.15. Sei $\mathfrak{p} \subset A$ Primideal, $S := A \setminus \mathfrak{p}$ multiplikative Teilmenge, $A_{\mathfrak{p}} := S^{-1}A$.

$$\{\text{Primideale in } A - \mathfrak{p}\} \leftrightarrow \{\text{Primideale } q \subset A \text{ mit } q \subseteq \mathfrak{p}\}$$

(mit 4).

Also ist $A_{\mathfrak{p}}$ ein lokaler Ring mit maximalem Ideal $S^{-1}\mathfrak{p}$.

Der Körper $\kappa(\mathfrak{p}) := A/S^{-1}\mathfrak{p}$ heißt Restklassenkörper in \mathfrak{p} .

Bemerkung 4.16. Seien $q \subseteq \mathfrak{p} \subset A$ Primideale.

1.

$$\begin{aligned} \{\text{Primideale in } A_{\mathfrak{p}}\} &= \{\text{Primideale in } A, \text{ die in } \mathfrak{p} \text{ enthalten sind}\} \\ \{\text{Primideal in } A/q\} &= \{\text{Primideal in } A, \text{ die } q \text{ enthalten.}\} \end{aligned}$$

2. Sei $S := S \setminus \mathfrak{p}$. Dann ist $S^{-1}(A/q) = S^{-1}A/S^{-1}q$ und

$$\{\text{Primideal in } S^{-1}(A/q)\} = \{\text{Primideale in } A \text{ die zwischen } q \text{ und } \mathfrak{p} \text{ liegen}\}$$

3. Speziell für $q = \mathfrak{p}$:

$$\begin{aligned} S^{-1}(A/\mathfrak{p}) &= \kappa(\mathfrak{p}) \\ &= \text{Qud}(A/\mathfrak{p}) \end{aligned}$$

4C Spektren

Erinnerung 4.17. Ein Topologischer Raum ist ein Paar $(X; \mathfrak{T})$ wobei X eine Menge, $\mathfrak{T} \subseteq \mathcal{P}(X)$, sodass gilt:

1. $\emptyset \in \mathfrak{T}, X \in \mathfrak{T}$
2. Sei $(U_i)_{i \in I}$ eine Familie von Mengen $U_i \in \mathfrak{T}$ dann gilt $\forall i \in I : \bigcup_{i \in I} U_i \in \mathfrak{T}$
3. $U, V \in \mathfrak{T}$, dann $U \cap V \in \mathfrak{T}$

Die Mengen in \mathfrak{T} heißen offen.

Erinnerung 4.18. Seien X, Y topologische Räume. Eine Abbildung $f : X \rightarrow Y$ heißt stetig, falls $f^{-1}(V) \subseteq X$ ist offen für alle offenen $V \subseteq Y$.

Erinnerung 4.19. Sei (X, \mathfrak{T}) ein topologischer Raum $B \subseteq \mathfrak{T}$ heißt Basis der Topologie, falls jeder offenen Teilmenge Vereinigung von Menge aus B ist.

Beispiel 4.20. Sei (X, d) ein metrischer Raum, dann heißt $U \subseteq X$ offen, falls

$$\forall x \in U \exists \epsilon > 0 : B_\epsilon(x) \{y \in X \mid M(x, y) < \epsilon\} \subseteq U$$

Basis der Topologie: $\{B_\epsilon(x) \mid \epsilon \in \mathbb{R}^{>0}, x \in X\}$

Definition 4.21. Ein topologischer Raum X heißt Hausdorffsch, falls $\forall x, y \in X$ mit $x \neq y$ existieren $U \subseteq X, V \subseteq X$ offen, sodass $U \cap V = \emptyset$. Metrische Räume sind Hausdorffsch.

Definition 4.22. Ein topologischer Raum X heißt quasikompakt, falls jede offene Überdeckung $(U_i)_{i \in I}$ von X (d.h. $U_i \subseteq X$ offen für alle $i \in I$ mit $\bigcup_{i \in I} U_i = X$) eine endliche Teilüberdeckung besitzt. (d.h. $\exists J \subseteq I$ endliche Teilmenge, sodass $\bigcup_{i \in J} U_i = X$.)

4.23 Spielzeugmodell (der Funktionalanalysis)

Sei X ein kompakter topologischer Raum,

$$A := A_X := \xi(X, \mathbb{C}) := \{f : X \rightarrow \mathbb{C} \text{ stetig}\}$$

Sei $x \in X$, dann betrachte

$$\mathfrak{M}_x := \{f \in A \mid f(x) = 0\} \subseteq A$$

Dies ist ein Minimales Ideal, denn

$$A/\mathfrak{M}_x \xrightarrow{\sim} \mathbb{C}, \bar{f} \mapsto f(x)$$

Satz 4.24. Die Abbildung

$$\begin{aligned} X &\rightarrow \text{Max}(A) := \{\mathfrak{M} \subset A \mid \text{maximales Ideal}\} \\ x &\mapsto \mathfrak{M}_x \end{aligned}$$

ist bijektiv.

Korollar 4.25. Sei $f \in A$ und für $\mathfrak{M}_x \in \text{Max}(A)$ sei $f(x) = \text{Bild von } f \text{ in } A/\mathfrak{M}_x = \mathbb{C}$.

$$\begin{aligned} D(f) &= \{\mathfrak{M} \in \text{Max}(A) \mid \bar{f} \text{ in } A/\mathfrak{M} \text{ ist } \neq 0\} \\ &= \{\mathfrak{M} \in \text{Max}(A) \mid f \notin \mathfrak{M}\} \\ &= \sigma(\{x \in X \mid f(x) \neq 0\}) \end{aligned}$$

Definition 4.26. $U \subseteq \text{Max}(A)$ heißt **offen**, falls $\exists F \subseteq \text{Max}(A)$ mit

$$U = \bigcup_{f \in F} D(f)$$

Dies ist die Topologie auf $\text{Max}(A)$.
(Bemerkung: $D(f) \cap D(g) = D(fg)$)

Satz 4.27. σ ist Homomorphismus

Seien X, Y kompakte topologische Räume, $F : X \rightarrow Y$ stetig.
Mann erhält den \mathbb{C} -Algebra-Homomorphismus:

$$\begin{aligned} \varphi : A_Y &\rightarrow A_x \\ f &\mapsto f \circ F \end{aligned}$$

Habe Kommutierendes Diagramm

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{F} & Y \\ \sigma \downarrow \sim & & \sigma \downarrow \sim \\ \text{Max}(A_x) & \xrightarrow[\mathfrak{M} \mapsto \varphi^{-1}(\mathfrak{M})]{} & \text{Max}(A_Y) \end{array}$$

Es folgt $\forall \mathfrak{M} \subset A_x$ maximal, sodass $\varphi^{-1}(\mathfrak{M}) \subset A$ maximal ist.

Sei A ein Ring. Setze $X = \text{Spec}(A) := \{y \subset A \mid \text{Primideal con } A\}$ als das **Spektrum von } A**.

Für $x \in X$ bezeichne $y_x \subset A$ das korrespondierende Primideal. Sei $f \in A$, $x \in X$.
Dann definiere

$$f(x) := \text{Bild von } f \text{ unter } A \rightarrow A/y_x \hookrightarrow \text{Qud}(A/y_x) = \kappa(x)$$

Bemerkung 4.28. f ist keine Funktion $X \rightarrow ?$.
Setze

$$\begin{aligned} D(f) &:= \{x \in X \mid f(x) \neq 0\} \\ &= \{x \in X \mid f \notin y_x\} \end{aligned}$$

Definition 4.29. Eine Teilmenge $U \subseteq X = \text{Spec}(A)$ heißt **offen**, falls $F \subseteq A$ Teilmenge existiert, sodass $U = \bigcup_{f \in F} D(f)$.

Wir erhalten die sogenannte **Zanski-Topologie**. Dabie

$$\begin{aligned} D(f) \cap D(g) &= D(fg) \\ \emptyset &= D(0) \\ x &= D(x) \end{aligned}$$

Korollar 4.30 ($D(f)$ als Spektrum). Sei $f \in A$ und sei $S_f := \{1, f, f^2, \dots\}$. Dann ist

$$\begin{aligned}\operatorname{Spec}(S_f^{-1}A) &= \{y \in \operatorname{Spec}(A) \mid y \cap S_f = \emptyset\} \\ &= \{y \in \operatorname{Spec}(A) \mid f \notin y\} \\ &= D(f)\end{aligned}$$

Satz 4.31 (Abgeschlossenen Teilmengen). Sei $X = \operatorname{Spec}(A)$, $Y \subseteq X$ Teilmenge. Dann

$$Y \subseteq X \text{ abgeschlossen} \Leftrightarrow X \setminus Y \subseteq X \text{ offen} \Leftrightarrow \exists F \subseteq A : X \setminus Y = \bigcup_{f \in F} D(f)$$

Genau dann wenn

$$\begin{aligned}\exists F \subseteq A \quad Y &= \bigcap_{f \in F} (X \setminus D(f)) \\ &= \bigcap_{f \in F} \{y \in A \mid f \in y\} \\ &= \{y \in A \text{ Primideal} \mid (F) \subseteq y\} \\ \Leftrightarrow \exists \mathfrak{a} \subseteq A \text{ Ideal} \quad Y &= \{y \in A \text{ Primideal} \mid \mathfrak{a} \subseteq y\} \\ &= \operatorname{Spec}(A/\mathfrak{a})\end{aligned}$$

Satz 4.32 (Funktorialität). Sei $\varphi: A \rightarrow B$ ein Homomorphismus von Ringen. Dann ist $\varphi: \operatorname{Spec} B \rightarrow \operatorname{Spec}(A), q \mapsto \varphi^{-1}(q)$ stetig.

Beweis. Für $f \in A$ gilt

$$\begin{aligned}\varphi^{-1}(D(f)) &= \{y \in \operatorname{Spec}(B) \mid \varphi(y) \in D(f)\} \\ &= \{q \subset B \text{ Primideal} \mid \varphi^{-1}(q) \in D(f)\} \\ &= \{q \subset B \text{ Primideal} \mid f \in \varphi^{-1}(q)\} \\ &= \{q \subset B \text{ Primideal} \mid \varphi(f) \notin q\} \\ &= D(\varphi(f)) \subseteq \operatorname{Spec}(B) \text{ offen.}\end{aligned}$$

□

4D Lemma von Nakagawa???

Definition 4.33. Sei $u: M \rightarrow N$ ein Homomorphismus von A -Moduln und sei (m_1, \dots, m_r) ein Erzeugendensystem von M und (n_1, \dots, n_s) von N . Dann existiert

$$T = (t_{ij})_{\substack{1 \leq i \leq s \\ 1 \leq j \leq r}} \in M_{s \times r}(A)$$

sodass

$$u(m_j) = \sum_{i=1}^s t_{ij} n_i$$

Dann heißt T eine **Matrix von u bezüglich (m_1, \dots, m_r) und (n_1, \dots, n_s)** .

Bemerkung 4.34. 1. T ist nicht eindeutig durch u bestimmt (es sei denn (n_1, \dots, n_s) ist Basis)

2. Nicht jede Matrix in $M_{s \times r}(A)$ ist eine Matrix von u bezüglich (m_1, \dots, m_r) und (n_1, \dots, n_s) .

(Es sei denn m_1, \dots, m_r ist Basis von M)

Erinnerung 4.35. Sei $T \in M_n(A) = A^{n \times n}$, $n \in \mathbb{N}$.

Dann existiert $S \in M_n(A)$, sodass $TS = ST = \det T I_n$. Dann ist $S = (s_{ij})$

$$s_{ij} = (-1)^{i+j} \det(T_{ji})$$

(T mit j -ter Spalte und i -ter Spalte gestrichen.)

S heißt die Adjunkte von T .

Satz 4.36 (Cayley-Hamilton). Sei M ein A -Modul, (m_1, \dots, m_n) ein Erzeugendensystem und sei $u : m \rightarrow M$ eine A -Lineare Abbildung. Sei $T \in M_r(A)$ eine Matrix von u bezüglich (m_1, \dots, m_r) .

Setze

$$\chi_T := \det \underbrace{(XI_r - A)}_{\in M_r(A[x])} = X^r + a_1 X^{r-1} + \dots + a_{r-1} X + a_r$$

Dann gilt

$$\chi_T(u) = u^r + a_1 u^{r-1} + \dots + a_{r-1} u + a_r \text{Id}_M = 0 \in \text{End}_A(M)$$

1. Sei $\mathfrak{a} \subseteq A$ Idela, sodass $u(M) \subseteq \mathfrak{a}M$. Dann $a_i \in \mathfrak{a} \forall i = 1, \dots, r$.

Beweis. $u(M) \subseteq \mathfrak{a}M$. Es folgt, dass die Koeffizienten von T in \mathfrak{a} liegen.

a_i ist Summe von i -fachen Produkten von Koeffizienten von T .

Also $a_i \in \mathfrak{a} \forall i = 1, \dots, r$.

Sei nun $T^T = (t_{ji})_{i \leq j \leq r}$ aber $u(m_j) = \sum_i t_{ji} m_i$.

Dann gilt

$$\sum_i (u \delta_{ji} - t_{ji} m_i) = 0$$

Sei nun

$$C := (X \delta_{ji} - t_{ji})_{ji} \in M_r(A[X])$$

wobei $\chi_T = \det(C)$.

Sei

$$D := (d_{jk})_{jk}$$

Die Adjunkte von C , also

$$CD = \chi_T I_r \in M_r(A[X]) \quad (\star\star)$$

Betrachte den Homomorphismus $u \in \text{Hom}_A(A)$

$$A[X] \xrightarrow{f \mapsto f(u)} A[u] = \{f(u) \mid f \in A[X]\}$$

$A[u]$ ist nun eine kommutative A -Algebra. Erhalte

$$C(u) = (u \delta_{ij} - t_{ji})_{i,j} \in M_r(A[u])$$

$$C(u) = (\delta_{kj}(u))_{k,j}$$

Multipliziere (\star) mit $\delta_{kj}(u)$.

$$0 = \sum_{i=1}^r \underbrace{\sum_{j=1}^r \delta_{kj}(u)(u\delta_{ji} - t_{ji})}_{\text{k-te Koeffizienten von } DC(u)=\chi_T(u)\delta_{ki}} m_i$$

Also ... □

Lemma 4.37 (Lemma von Nakogama (1. Version)). *Sei M eine endlich erzeugter A -Modul, $\mathfrak{a} \subseteq A$ ein Ideal, sodass $M = \mathfrak{a}M$.*

Dann existiert $f \in 1 + \mathfrak{a} = \{1 + x \mid x \in \mathfrak{a}\}$, sodass $fM = 0$

Beweis. Wende 4.36 auf $u = \text{id}_M$: Mit 4.36.1 Gilt

$$u^r + a_1 u^{r-1} + \dots + a_{r-1} u + a_r \text{id} = 0$$

mit $a_i \in \mathfrak{a}^i = \mathfrak{a}$.

Also ist $f \text{id}_M = 0$, wobei

$$f = 1 + a_1 + a_2 + \dots + a_r \in 1 + \mathfrak{a}$$

sodass $fM = 0$ □

Bemerkung 4.38. (Einschränkung von A auf $\text{Spec}(A/\mathfrak{a})$)

$$\dots = A/\mathfrak{a} \otimes_A M = M/\mathfrak{a}M = 0$$

Da $f \in 1 + \mathfrak{a}$ folgt

$$\text{Spec}(A/\mathfrak{a}) \subseteq^{(\star)} D(f) = \text{Spec}(S_f^{-1}A)$$

wobei $S_f = \{1, f, f^2, \dots\}$, sodass

$$(\text{Einschränkung von } M \text{ aus } D_f) = S_f^{-1}A \otimes_A M = S_f^{-1}M \stackrel{(\star\star)}{=} 0$$

Zu (\star) : Sei $x \in \text{Spec}(A)$.

$$x \in \text{Spec}(A/\mathfrak{a}) \Leftrightarrow g(\lambda) = 0 \forall g \in \mathfrak{a}$$

Also gilt für $f = 1 + g, g \in \mathfrak{a}$ und $x \in \text{Spec}(A/\mathfrak{a})$:

$$f(x) = 1 + g(x) = 1 \neq 0$$

$$\Rightarrow \text{Spec}(A/\mathfrak{a}) \subseteq \{x \mid f(x) \neq 0\} = D(f)$$

Zu $(\star\star)$: Sei M endlich erzeugt.

Dann $S_f^{-1}M = 0$ genau dann wenn $\exists g \in S_f : gM = 0$.

$$\Leftrightarrow \exists n \in \mathbb{N} : f^n M = 0 \Leftrightarrow fM = 0$$

Lemma 4.39 (Lemma von Nakagana (2.Version)). *Sei M ein endlich erzeugter A -Modul, $\mathfrak{a} \subseteq \text{Jac}(A)$ ein Ideal mit $M = \mathfrak{a}M$. Dann $M = 0$.*

Beweis. Sei $\mathfrak{a} \subseteq \text{Jac}(A) \xrightarrow{??} 1\mathfrak{a} \subseteq A^\times \xrightarrow{4.37} \dots$ □

...

Beispiel 4.40. Sei $A = \mathbb{Z}$, $M = \mathbb{Z}$. Dann ist die \mathbb{Z} -lineare Abbildung $M \xrightarrow{2} \mathbb{Z}$ injektiv aber nicht bijektiv.

Satz 4.41. Sei M ein endlich erzeugter A -Modul und sein $U : M \rightarrow M$ eine surjektive A -lineare Abbildung.
Dann ist u ein Isomorphismus.

Beweis. Fass (M, u) als $A[X]$ Modul auf durch $X \cdot m := u(m)$ für $m \in M$.
Dann ist u genau dann surjektiv, wenn $X \cdot M = M$ ist.
Es folgt durch 4.37 mit $\mathfrak{a} = (X)$, dass es ein $g \in A[X]$ gibt, sodass $(a+gX)(M) = 0$.
Sei $m \in \text{Ker}(u)$, dann

$$u = (1 + gX)(m) = m + \underbrace{g(u)(m)u(m)}_{=0} = m$$

Also ist u injektiv. □

5 Noethersche und Artinsche Ringe

5A Noethersche und Artinsche Moduln

Lemma 5.1. ...

Beweis. ... □

Definition 5.2. Ein A -Modul heißt **noethersch**, falls die folgenden äquivalenten Bedingungen erfüllt sind:

1. Jede Aufsteigende Kette von Untermoduln von M

$$N_1 \subseteq N_2 \subseteq \dots \subseteq M$$

wird stationär

2. Jede Nichtleere Menge von Untermoduln von M besitzt ein Maximales Element

Ein A -Modul heißt **artinsch**, falls die folgenden äquivalenten Bedingungen erfüllt sind:

1. Jede absteigende Kette von Untermoduln von M

$$N_1 \supseteq N_2 \supseteq \dots$$

wird stationär.

2. Jede Nichtleere Menge von Untermoduln von M besitzt ein minimales Element.

Definition 5.3. Der Ring A heißt **noethersch**, wenn er als A -Modul noethersch ist. Äquivalent dazu sind:

1. Jede aufsteigende Kette von Idealen in A wird stationär.
2. Jede nichtleere Menge von Idealen in A besitzt ein maximales Element.

Der Ring A heißt **artinsch**, wenn er als A -Modul artinsch ist. Äquivalent dazu sind:

1. Jede absteigende Kette von Idealen in A wird stationär
2. Jede nichtleere Menge von Idealen in A besitzt ein minimales Element.

Beispiel 5.4. -1. 0 ist noethersch und artinsch.

0. Jeder Körper ist noethersch und artinsch.

1. \mathbb{Z} ist noethersch:

Sei $\mathfrak{a}_1 \subseteq \mathfrak{a}_2 \subseteq \dots$ (\star) eine aufsteigende Kette.

Dann $\mathfrak{a}_1 = (x_1)$, $x_1 = p_1^{l_1} \cdot \dots \cdot p_r^{l_r}$.

$$\{\text{Ideale die } \mathfrak{a}_1 \text{ enthalten}\} \xleftrightarrow{1:1} \{\text{Teiler von } x_1\} / \{\text{Einheiten}\}$$

Diese Mengen sind endlich also wird (\star) stationär.

\mathbb{Z} ist nicht artinsch:

Sei $x \in \mathbb{Z}$ $x \neq 0, 1, -1$. Dann

$$(x) \supsetneq (x^2) \supsetneq (xs) \supsetneq \dots$$

ist absteigende Kette die nicht stationär wird.

2. Sei $p \in \mathbb{Z}$ eine Primzahl. Dann ist der \mathbb{Z} -Modul

$$\{x \in \mathbb{Q}/\mathbb{Z} \mid \exists n \in \mathbb{N} : p^n x = 0\}$$

artinsch aber nicht noethersch. (Wir werden zeigen: A artinscher Ring \Rightarrow noethersch)

3. Sei κ Körper, dann ist $\kappa[T_1, T_2, \dots]$ nicht noethersch:

$$(T_1) \subsetneq (T_1, T_2) \subsetneq (T_1, T_2, T_3) \subsetneq \dots$$

$$M = M_0 \supsetneq M_1 \supsetneq \dots \supsetneq M_r = 0.$$

Dann ist r die Länge der Jordan-Hölder Reihe, falls M_{i-1}/M_i einfach ist.

Satz 5.15. Je zwei JH-Reihen haben die selbe Länge.

$l(M) :=$ Länge einer JH-Reihe. $= \infty$, falls keine JH-Reihe existiert.

Falls $l(M) < \infty$, so kann jede Kompositions-Reihe zu einer JH-Reihe ergänzt werden.

Beweis. (für Moduln, für Gruppen analog)

Sei M ein R -Modul. Setze $l(M) := \inf\{\text{Längen von JH-Reihen von } M\} \in \mathbb{N}_0 \cup \{\infty\}$

1. $N \subseteq M$ Untermodul $\Rightarrow l(N) \leq l(M)$.

Falls $l(M) = \infty$.

Man kann also annehmen, dass M eine JH-Reihe $M = M_0 \supsetneq M_1 \supsetneq \dots \supsetneq M_r = 0$ besitzt mit $r = l(M)$.

Sei $N_i := N \cap M_i$, $\forall i = 0, \dots, r$.

Die Einbettung $N_{i-1}/N_i \hookrightarrow M_{i-1}/M_i$ ist injektiv, da $M_i \cap N_{i-1} = N_i$.

Daraus folgt (da M_{i-1}/M_i einfach ist), dass N_{i-1}/N_i entweder einfach oder $= 0$ ist.

Dann kann die Reihe $N = N_0 \supseteq N_1 \supseteq \dots \supseteq N_r = 0$ durch weglassen einiger Terme zu einer JH-Reihe werden.

Dann gilt $l(N) \leq l(M)$.

2. Aus $N \subseteq M$ Untermodul mit $l(N) = l(M) < \infty$ folgt $N = M$:

Wie in 1) gilt $M_{i-1}/M_i \cong N_{i-1}/N_i$, da $l(N) = l(M)$.

Aus $M_r = N_r = 0$ folgt $M_{r-1} = N_{r-1}$ und da $N_{r-2}/N_{r-1} = M_{r-2}/M_{r-1}$ folgt auch $N_{r-2} = M_{r-2}$.

Induktiv gilt damit $N_0 = N = M_0 = M$

3. Jede Kompositions Reihe von M besitzt Länge $\leq l(M)$:

(\Rightarrow Alle JH-Reihen haben die selbe Länge)

Sei $M = M_0 \supsetneq M_1 \supsetneq \dots \supsetneq M_r = 0$ eine Kompositions-Reihe.

Aus 1), 2) folgt $l(M_i) \leq l(M_{i-1})$ für alle $i = 1, \dots, r$. Daraus folgt $s \leq l(M)$.

4. Sei $M = M_0 \supsetneq M_1 \supsetneq \dots \supsetneq M_s = 0$ eine Kompositions-Reihe, $l(M) < \infty$:
Wenn $s = l(M)$, dann ist (M_i) JH-Reihe. Wenn $s < l(M)$, dann ist (M_i) keine JH-Reihe und die Kompositions-Reihe kann ergänzt werden.

□

Satz 5.16. Sei $0 \rightarrow M' \xrightarrow{u} M \xrightarrow{v} M'' \rightarrow 0$ eine exakte Sequenz von R -Moduln.
(Dabei ist R nicht notwendiger weise kommutativ) Dann ist $l(M) = l(M') + l(M'')$.

(Insbesondere ist $l(M) < \infty$ genau dann wenn $l(M'), l(M'') < \infty$)

Für Gruppen ergibt sich ein anderes Resultat.

Beweis. Sei $M = M_0 \supsetneq M_1 \supsetneq \dots \supsetneq M_r = 0$ eine Kompositions-Reihe von M' .

Dann ist $M \supsetneq u(M') = u(M'_0) \supsetneq \dots \supsetneq u(M'_r) = 0$ eine Kompositions-Reihe und (M'_i) ist eine Kompositionsreihe von M'' . Dann folgt durch v^{-1} , dass es auch eine Kompositionsreihe von M .

Insbesondere folgt aus $l(M') = \infty$ oder $l(M'') = 0$, dass $l(M) = \infty$.

Sei $l(M'), l(M'') < \infty$ und sei $M' = M'_0 \supsetneq M'_1 \supsetneq \dots \supsetneq M'_r = 0$ die JH-Reihe von M' und $M'' = M''_0 \supsetneq M''_1 \supsetneq \dots \supsetneq M''_s = 0$ von M'' .

Dann ist

$$M = v^{-1}(M''_0) \supsetneq \dots \supsetneq v^{-1}(M''_s) = \text{Ker}(v) = u(M') \supsetneq u(M'_1) \supsetneq \dots \supsetneq u(M'_r) = 0$$

eine Kompositions-Reihe mit einfachen Subquotienten, also eine JH-Reihe.

Diese hat Länge $r + s = l(M') + l(M'')$. □

Satz 5.17. Sei M ein A -Modul (A ist kommutativer Ring). Dann ist äquivalent:

1. $l(M) < \infty$
2. M ist artinsch und noethersch.

Beweis. $1 \Rightarrow 2$:

$\text{Ausl}(M) < \infty$ folgt, dass jede nicht stationäre Kette endlich ist und damit 2.

$2 \Rightarrow 1$:

Sei o.E. $M \neq 0$, M noethersch.

Dann folgt, dass $\{N \subsetneq M \text{ Untermodul}\}$ besitzt maximale Elemente, etwas M_1 .

Induktiv gilt $M = M_0 \subsetneq M_1 \subsetneq M_2 \subsetneq \dots$, wobei M_{i-1}/M ist einfach.

Da M artinsch ist folgt, dass es ein $r \in \mathbb{N}_0$ gibt, sodass $M_r = 0$. \square

Beispiel 5.18. Sei K Körper, V ein K -Vektorraum. Dann sind äquivalent:

1. $\dim_K(V) < \infty$
2. $l_k(V) < \infty$
3. V ist noethersch
4. V ist artinsch

Es folgt auch, dass $\dim V = l(V)$.

5C Noethersche Ringe

Wenn A noethersch, so ist auch A/\mathfrak{a} noethersch für alle $\mathfrak{a} \subseteq A$ Ideal und es auch $S^{-1}A$ noethersch für alle $S \subseteq A$ multiplikativ.

Definition 5.19. Sei $\varphi : A \rightarrow B$ eine A -Algebra.

1. Die A -Algebra B heißt **endlich erzeugt** oder **von endlichem Typ** (v.e.T.), wenn $b_1, \dots, b_n \in B$ existieren, die B erzeugen.
(Äquivalent: $B \cong A[X_1, \dots, X_n]/\mathfrak{a}$ für $\mathfrak{a} \subseteq A[X_1, \dots, X_n]$ Ideal.)
2. Die A -Algebra B heißt **endlich**, falls B als A -Modul endlich erzeugt ist.

Bemerkung 5.20. Sei $\varphi : A \rightarrow B$ eine A -Algebra

1. B endliche A -Algebra, so folgt, dass B eine A -Algebra v.e.T.
2. Sei $A = K$ Körper, dann ist $K[X]$ eine K -Algebra v.e.T., aber $K[X]$ ist nicht endliche K -Algebra, da $\dim_K(K[X]) = \infty$.

Satz 5.21 (Hilbertscher Basissatz). Sei $\varphi : A \rightarrow B$ eine A -Algebra v.e.T. und sei A noethersch.

Dann ist B noethersch.

Beweis. 1. Es gilt B ist genau dann v.e.T. wenn $B \cong A[X_1, \dots, X_n]/\mathfrak{a}$.

Also ist o.E. $B = A[X_1, \dots, X_n] = (A[X_1, \dots, X_{n-1}])[X_n]$.

Induktiv folgt o.E. $B = A[X]$.

2. Sei $\mathfrak{a} \subseteq A[X]$ Ideal und sei

$I = \{a \in A \mid \exists f \in \mathfrak{a} \text{ mit } f = aX^d + (\text{Terme niederen Grades})\}$.

Da \mathfrak{a} Ideal folgt, dass I Ideal und da A noethersch auch, dass I endlich erzeugt (etwa von a_1, \dots, a_n).

Wähle nun $f_1, \dots, f_n \in \mathfrak{a}$, sodass $f_i = a_i X^{r_i} + (\text{Terme niederer Ordnung})$.

Sei nun $\mathfrak{a}' := (f_1, \dots, f_n) \subseteq \mathfrak{a}$ und $r := \max\{r_i \mid i = 1, \dots, n\}$

3. Für alle $f \in \mathfrak{a}$ existiert $g \in \mathfrak{a}'$, so dass $\deg(f - g) < r$:
 Sei $f = aX^m + (\text{Terme niedere Ordnung})$, $s \in I$.
 Im Fall $m < r$ folgt die Behauptung.
 Falls $m \geq r$ Setze $a = b_1a_+ \dots + b_na_n$ mit $b_i \in A$. Dann hat

$$f - \underbrace{\sum_{i=1}^n b_i f_i X^{m-r_r}}_{\in \mathfrak{a}}$$

Grad $< m$.

Induktiv folgt die Behauptung.

4. Sei $M = A + AX + \dots + AX^{n-1}$ eine endlich erzeugter A -Modul.
 3 bedeutet, dass $\mathfrak{a} = \mathfrak{a}' + (\mathfrak{a} \cap M)$, sodass (da A noethersch) $\mathfrak{a} \cap M$ als A -Modul endlich erzeugt von g_1, \dots, g_r .
 Dann ist $\mathfrak{a} = (f_1, \dots, f_n, g_1, \dots, g_r)$.

□