

Algebra 2

Sommersemester 2018

Universität Heidelberg

Dr. Denis Vogel

Letzte Aktualisierung: 7. Juni 2018

Mitschrieb von Jonas Wildberger und Celine Fietz

Dies ist eine inoffizielle Version. Es können daher Fehler vorkommen.

Inhaltsverzeichnis

1	Moduln	3
1.1	Grundlagen über Moduln	3
1.2	Exakte Folgen	11
1.3	Noethersche und Artinsche Moduln	17
2	Homologische Algebra	24
2.4	Kategorien	24
2.5	Abelsche Kategorien	32
2.6	Projektive und Injektive Moduln	43
2.7	Komplexe	53
2.8	Abgeleitete Funktoren	62
2.9	δ -Funktoren	66
2.10	Ext und Erweiterungen	68
	Stichwortverzeichnis	71

1 Moduln

In dieser Vorlesung steht die Bezeichnung “Ring“ stets für einen (nicht notwendig kommutativen) Ring mit 1. In diesem Kapitel sei R ein Ring.

1.1 Grundlagen über Moduln

Definition 1.1.1. Ein R -Linksmodul ist eine abelsche Gruppe $(M, +)$ zusammen mit einer Abbildung $R \times M \rightarrow M$, $(a, x) \mapsto ax$ (skalare Multiplikation), sodass für alle $a, b \in R$, $x, y \in M$ gilt:

$$\text{a) } a(x + y) = ax + ay$$

$$\text{b) } (a + b)x = ax + bx$$

$$\text{c) } a(bx) = (ab)x$$

$$\text{d) } 1x = x$$

Ein R -Rechtsmodul ist eine abelsche Gruppe $(M, +)$ zusammen mit einer Abbildung $M \times R \rightarrow M$, $(x, a) \mapsto xa$, sodass für alle $a, b \in R$, $x, y \in M$ gilt:

$$\text{a') } (x + y)a = xa + ya$$

$$\text{b') } x(a + b) = xa + xb$$

$$\text{c') } x(ab) = (xa)b$$

$$\text{d') } x1 = x$$

Anmerkung. Es bezeichne R^{op} den zu R entgegengesetzten Ring, d.h. eine Menge R mit derselben Addition, sowie der Multiplikation $a \cdot_{\text{op}} b := b \cdot a$. Ist M ein R -Rechtsmodul, dann wird M durch $ax := xa$ zu einem R^{op} -Linksmodul, denn es gilt

$$a(bx) = (bx)a = (xb)a = x(ba) = (ba)x = (a \cdot_{\text{op}} b)x \quad \text{für alle } a, b \in R, x, a \in M$$

Analog anders herum. Im Folgenden betrachten wir in der Regel nur R -Linksmoduln, und unter einem R -Modul verstehen wir einen R -Linksmodul

- Forderung a) impliziert, dass für alle $a \in R$ die Abbildung

$$l_a : M \rightarrow M, \quad x \mapsto ax$$

zum Ring $\text{End}(M)$ aller Gruppenhomomorphismen $M \rightarrow M$ gehört.

$$(\text{mit } (f + g)(x) := f(x) + g(x), (f \cdot g) := (f \circ g)(x) = f(g(x))$$

für $f, g \in \text{End}(M)$, $x \in M$. Nach b) – d) ist die Abbildung $\varphi : R \rightarrow \text{End}(M)$, $a \mapsto l_a$ ein Ringhomomorphismus. Umgekehrt macht jeder Ringhomomorphismus $\varphi : R \rightarrow \text{End}(M)$ eine abelsche Gruppe $(M, +)$ zu einem R -Modul via $ax := \varphi(a)(x)$

- Für alle $x \in M$ ist $0x = 0$, $(-1)x = -x$, und für alle $a \in R$ ist $a0 = 0$

Beispiel 1.1.2. a) Ist K ein Körper, dann sind K -Moduln die K -Vektorräume.

b) Jede abelsche Gruppe G ist ein \mathbb{Z} -Modul via

$$\mathbb{Z} \times G \rightarrow G, \quad (n, x) \mapsto nx := \begin{cases} \underbrace{x + \dots + x}_{n\text{-mal}} & n > 0 \\ 0 & n = 0 \\ -(\underbrace{x + \dots + x}_{(-n)\text{-mal}}) & n < 0 \end{cases}$$

Für jeden Ring R gibt es genau einen Ringhomomorphismus $\mathbb{Z} \rightarrow R$ (analog zur Algebra 1), insbesondere gibt es für jede abelsche Gruppe G genau einen Ringhomomorphismus $\mathbb{Z} \rightarrow \text{End}(G)$, d.h. genau eine Struktur als \mathbb{Z} -Modul, sodass die Moduladdition mit der gegebenen Addition auf G überein stimmt (nämlich obige).

Definition 1.1.3. Seien M, M' R -Moduln, $\varphi : M \rightarrow M'$. Dann heißt φ *R -Modulhomomorphismus* (R -linear), wenn für alle $x, y \in M$, $a, b \in R$ gilt:

a) $\varphi(x + y) = \varphi(x) + \varphi(y)$

b) $\varphi(ax) = a\varphi(x)$

$\text{Hom}_R(M, M')$ bezeichne die Menge der R -Modulhomomorphismen von M nach M' .

Anmerkung. $\text{Hom}_R(M, M')$ ist eine abelsche Gruppe bezüglich $(f + g)(x) := f(x) + g(x)$ für $f, g \in \text{Hom}_R(M, M')$, $x \in M$

Beispiel 1.1.4. Sei M ein R -Modul, $\varphi \in \text{Hom}_R(M, M) =: \text{End}_R(M) \subseteq \text{End}_{\mathbb{Z}}(M) = \text{End}(M)$. Den Polynomring $R[X]$ kann man wie über kommutativen Ringen definieren, allerdings ist die Einsetzungsabbildung

$$R[X] \rightarrow R, \quad \sum_{i=0}^n a_i X^i \mapsto \sum_{i=0}^n a_i b^i, \quad \text{für ein } b \in R$$

im Allgemeinen kein Ringhomomorphismus (“ X vertauscht mit Elementen aus R , b im Allgemeinen nicht“). Die Abbildung

$$\Psi : R[X] \rightarrow \text{End}(M), \quad \sum_{i=0}^n a_i X^i \mapsto \sum_{i=0}^n a_i \varphi^i$$

ist ein Ringhomomorphismus, da φ R -linear ist. Somit wird M zum $R[X]$ -Modul.

Definition 1.1.5. Seien M, M' R -Moduln, $\varphi : M \rightarrow M'$ R -linear. φ heißt

Monomorphismus $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow} \varphi$ ist injektiv (Notation: $M \hookrightarrow M'$)

Epimorphismus $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow} \varphi$ ist surjektiv (Notation: $M \twoheadrightarrow M'$)

Isomorphismus $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow} \varphi$ ist bijektiv (Notation: $M \xrightarrow{\sim} M'$)

Existiert ein Isomorphismus zwischen M, M' , so heißen M, M' “isomorph“ (Notation: $M \cong M'$)

Anmerkung. Ist φ ein Isomorphismus, dann ist φ^{-1} ein Isomorphismus.

Bemerkung 1.1.6. Seien M, M' R -Moduln. Dann gilt:

- a) R kommutativ $\Rightarrow \text{Hom}_R(M, M')$ ist ein R -Modul via $(a\varphi)(x) := a\varphi(x)$ für $a \in R, \varphi \in \text{Hom}_R(M, M'), x \in M$.
- b) $\text{End}_R(M) = \text{Hom}_R(M, M)$ ist ein Unterring von $\text{End}(M) = \text{End}_{\mathbb{Z}}(M)$.
- c) Die Abbildung $\Phi : \text{Hom}_R(R, M) \rightarrow M, \varphi \mapsto \varphi(1)$ ist ein Isomorphismus von abelschen Gruppen (hierbei ist R auf natürliche Weise ein R -Linksmodul). Ist R kommutativ, so ist Φ ein Isomorphismus von R -Moduln.
- d) $\text{End}_R(R) \cong R^{\text{op}}$

Beweis. a) Beachte: Für $a \in R, \varphi \in \text{Hom}_R(M, M')$ ist $a\varphi$ wieder R -linear, denn für $a, b \in R, x \in M$ ist $(a\varphi)(bx) = a\varphi(bx) = ab\varphi(x) = ba\varphi(x) = b(a\varphi)(x)$

b) Nachrechnen.

c) Eine Umkehrabbildung zu Φ ist gegeben durch

$$\Psi : M \rightarrow \text{Hom}_R(R, M), \quad m \mapsto (\varphi : R \rightarrow M, a \mapsto am)$$

- d) Nach Aussage c) haben wir sofort einen Isomorphismus: $\Phi : \text{End}_R(R) \rightarrow R$, $\varphi \mapsto \varphi(1)$ von abelschen Gruppen. Es ist

$$\begin{aligned}\Phi(\varphi\psi) &= (\varphi\psi)(1) = \varphi(\psi(1)) = \varphi(\psi(1) \cdot 1) = \psi(1)\varphi(1) \\ &= \varphi(1) \cdot_{\text{op}} \psi(1) = \Phi(\varphi) \cdot_{\text{op}} \Phi(\psi)\end{aligned}$$

■

Definition 1.1.7. Sei M ein R -Modul, $N \subseteq M$. N heißt R -Untermodul von M , wenn gilt:

- a) $0 \in N$
- b) $x + y \in N$ für alle $x, y \in N$
- c) $ax \in N$ für alle $a \in R, x \in N$

Beispiel 1.1.8. a) Betrachte R als R -Linksmodul. Dann sind die Untermodule von R genau die Linksideale in R (analog: Rechtsideale für R als R -Rechtsmodul).

- b) Ist M ein R -Modul, dann sind $\{0\}$ (meist als 0 geschrieben) und $M \subseteq M$ die trivialen Untermodule. Ist $(M_i)_{i \in I}$ eine Familie von Untermodulen von M , dann ist $\bigcap_{i \in I} M_i \subseteq M$ ein Untermodul, sowie $\sum_{i \in I} M_i = \{\sum_{i \in I} x_i \mid x_i \in M_i, x_i = 0 \text{ für fast alle } i \in I\}$
- c) Sind M, M' R -Moduln, $\varphi \in \text{Hom}_R(M, M')$, $N \subseteq M$ ein Untermodul, $N' \subseteq M'$ ein Untermodul, dann sind $\varphi(N) \subseteq M'$ und $\varphi^{-1}(N') \subseteq M$ Untermodule.

$\text{im } \varphi := \varphi(M)$ heißt das *Bild* von φ

$\ker \varphi := \varphi^{-1}(\{0\})$ heißt der *Kern* von φ

Es gilt: φ ist injektiv $\Leftrightarrow \ker \varphi = 0$ und φ surjektiv $\Leftrightarrow \text{im } \varphi = M'$

Bemerkung + Definition 1.1.9. Sei M ein R -Modul, $N \subseteq M$ ein Untermodul. Dann ist die Faktorgruppe M/N via $a(x+N) = ax+N$, $a \in R$, $x \in M$ ein R -Modul, der *Faktormodul* von M nach N . Die kanonische Abbildung $\pi : M \rightarrow M/N$, $m \mapsto m + N$ ist ein Modulepimorphismus mit $\ker \pi = N$.

Beispiel 1.1.10. Sei $I \subseteq R$ ein Linksideal, M ein R -Modul. Dann ist

$$IM := \left\{ \sum_{i=1}^n a_i x_i \mid n \in \mathbb{N}, a_i \in I, x_i \in M \right\} \subseteq M$$

ein Untermodul von M . Ist I ein zweiseitiges Ideal, dann ist R/I ein Ring (beachte: Die Zweiseitigkeit von I geht ein bei der Wohldefiniertheit der Multiplikation

$$R/I \times R/I \longrightarrow R/I, \quad (a+I, b+I) \mapsto ab+I$$

M/IM ist ein R/I -Modul vermöge

$$(a + I)(x + M) := ax + IM, \quad a \in R, x \in M$$

Die nächsten Sätze zeigt man wie für Gruppen (K-VR,...)

Satz 1.1.11. Seien M, M' R -Moduln, $N \subseteq M$ ein Untermodul, $\pi : M \rightarrow M/N$ die kanonische Projektion, $\varphi : M \rightarrow M'$ R -Modulhomomorphismus. Dann sind äquivalent:

i) $N \subseteq \ker \varphi$

ii) Es ex. genau ein Modulhomomorphismus $\bar{\varphi} : M/N \rightarrow M'$ mit $\bar{\varphi} \circ \pi = \varphi$:

$$\begin{array}{ccc} M & \xrightarrow{\varphi} & M' \\ & \searrow \pi & \nearrow \bar{\varphi} \\ & M/N & \end{array}$$

Satz 1.1.12 (Homomorphiesatz). Seien M, M' R -Moduln, $\varphi : M \rightarrow M'$ ein R -Modulhomomorphismus. Dann existiert ein R -Modulisomorphismus

$$\bar{\varphi} : M/\ker \varphi \xrightarrow{\sim} \operatorname{im} \varphi \quad \text{mit} \quad \bar{\varphi}(x + \ker \varphi) = \varphi(x)$$

für alle $x \in M$.

Satz 1.1.13 (Isomorphiesätze). Sei M ein R -Modul, $N_1, N_2 \subseteq M$ Untermoduln. Dann gilt:

a) Die Abbildung

$$N_1/N_1 \cap N_2 \xrightarrow{\sim} (N_1 + N_2)/N_2 \quad x + N_1 \cap N_2 \mapsto x + N_2$$

ist ein Isomorphismus.

b) Ist $N_2 \subseteq N_1$, so ist

$$M/N_2/M/N_1 \xrightarrow{\sim} M/N_1 \quad (x + N_2) + N_1/N_2 \mapsto x + N_1$$

ein Isomorphismus.

Satz 1.1.14. Sei M ein R -Modul, $N \subseteq M$ ein Untermodul, $\pi : M \rightarrow M/N$ die kanonische Projektion. Dann gibt es eine Bijektion

$$\begin{aligned} \{\text{Untermoduln } M' \text{ von } M \text{ mit } N \subseteq M'\} &\longrightarrow \{\text{Untermoduln von } M/N\} \\ M' &\mapsto \pi(M') \\ \pi^{-1}(L) &\longleftarrow L \end{aligned}$$

die inklusionserhaltend ist.

Bemerkung + Definition 1.1.15. Sei $(M_i)_{i \in I}$ eine Familie von R -Moduln. Dann gilt: $\prod_{i \in I} M_i$ ist ein R -Modul mit komponentenweiser Addition und skalarer Multiplikation und heißt das *direkte Produkt* der M_i . Die Projektionsabbildungen $p_j : \prod_{i \in I} M_i \rightarrow M_j$ mit $(m_i)_{i \in I} \mapsto m_j$ sind R -Modulhomomorphismen.

Satz 1.1.16 (Universelle Eigenschaft des Produkts). Sei $(M_i)_{i \in I}$ eine Familie von R -Moduln. Dann gilt: Für jeden R -Modul M ist die Abbildung

$$\text{Hom}_R(M, \prod_{i \in I} M_i) \rightarrow \prod_{i \in I} \text{Hom}_R(M, M_i) \quad \varphi \mapsto (p_i \circ \varphi)_{i \in I}$$

eine Bijektion, d.h. für jede Familie $(\varphi_i)_{i \in I}$ von R -Modulhomomorphismen $\varphi_i : M \rightarrow M_i$ ex. genau ein R -Modulhomomorphismus $\varphi : M \rightarrow \prod_{i \in I} M_i$ mit $p_i \circ \varphi = \varphi_i$ für alle $i \in I$ (nämlich der durch $\varphi(x) := ((\varphi_i(x))_{i \in I})$).

Definition 1.1.17. Sei $(M_i)_{i \in I}$ eine Familie von R -Moduln. Der Untermodul

$$\bigoplus_{i \in I} M_i := \{(m_i)_{i \in I} \in \prod_{i \in I} M_i \mid \text{fast alle } m_i = 0\} \subseteq \prod_{i \in I} M_i$$

heißt die *direkte Summe* der M_i . Die Inklusionsabbildungen

$$q_j : M_j \rightarrow \bigoplus_{i \in I} M_i, \quad x \mapsto (x_i)_{i \in I} \quad \text{mit} \quad x_i = \begin{cases} x & i = j \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

sind R -Modulhomomorphismen.

Anmerkung. Ist I endlich, dann ist $\bigoplus_{i \in I} M_i = \prod_{i \in I} M_i$.

Satz 1.1.18 (Universelle Eigenschaft der Summe). Sei $(M_i)_{i \in I}$ eine Familie von R -Moduln. Dann gilt: Für jeden R -Modul M ist die Abbildung

$$\text{Hom}_R(\bigoplus_{i \in I} M_i, M) \rightarrow \prod_{i \in I} \text{Hom}_R(M_i, M) \quad \text{mit} \quad \psi \mapsto (\psi \circ q_i)_{i \in I}$$

eine Bijektion, d.h. für jede Familie $(\psi_i)_{i \in I}$ von R -Modulhomomorphismen $\psi_i : M_i \rightarrow M$ ex. genau ein R -Modulhomomorphismus $\psi : \bigoplus_{i \in I} M_i \rightarrow M$ mit $\psi \circ q_i = \psi_i$ für alle $i \in I$ (nämlich der durch $\psi((m_i)_{i \in I}) := \sum_{i \in I} \psi_i(m_i)$ definierte).

Anmerkung. Sei I eine Indexmenge, M ein R -Modul. Dann ist:

$$M^I := \prod_{i \in I} M, \quad M^{(I)} := \bigoplus_{i \in I} M, \quad M^r := M^{\{1, \dots, r\}} = M^{(\{1, \dots, r\})}$$

Bemerkung 1.1.19. Sei M ein R -Modul, $(M_i)_{i \in I}$ eine Familie von Untermoduln von M . Dann erhalten wir (aus der Universellen Eigenschaft von \bigoplus mit $\psi_i : M_i \hookrightarrow M$ Inklusionsabbildung) einen R -Modulhomomorphismus

$$\psi : \bigoplus_{i \in I} M_i \rightarrow M, \quad (m_i)_{i \in I} \mapsto \sum_{i \in I} m_i \quad \text{mit} \quad \text{im } \psi = \sum_{i \in I} M_i$$

Ist ψ injektiv, so heißt die Summe $\sum_{i \in I} M_i$ „direkt“, und wir schreiben auch $\bigoplus_{i \in I} M_i$ für $\sum_{i \in I} M_i$.

Anmerkung. In der Situation von 1.1.19 gilt:

- $\sum_{i \in I} M_i$ direkt $\iff \sum_{i \in J} M_i$ direkt für alle Teilmengen $J \subseteq I$
- $M_1 + M_2 = M_1 \oplus M_2 \iff M_1 \cap M_2 = 0$

Definition 1.1.20. Sei M ein R -Modul und sei $x \in M$. Die Abbildung $f_x : R \rightarrow M, a \mapsto ax$ ist ein R -Modulhomomorphismus, das Linksideal

$$\text{ann}_R(x) := \ker f_x = \{a \in R \mid ax = 0\}$$

heißt der *Annulator* von x . Das Bild $\text{im } f_x = Rx = \{ax \mid a \in R\}$ heißt der von x erzeugte Untermodul von M . Allgemeiner heißt für eine Teilmenge $X \subseteq M$

$$RX := \langle X \rangle_R := \sum_{x \in X} Rx = \text{im}(R^{(X)} \rightarrow M) = \bigcap_{\substack{X \subseteq N \subseteq M \\ N \text{ Untermodul mit } X \subseteq N}} N$$

Der von X erzeugte Untermodul von M .

Definition 1.1.21. Sei M ein R -Modul, $(x_i)_{i \in I}$ Familie von Elementen aus M , $\psi : R^{(I)} \rightarrow M, (a_i)_{i \in I} \mapsto \sum_{i \in I} a_i x_i$. $(x_i)_{i \in I}$ heißt

Erzeugendensystem von M mit $R \xrightarrow{\text{Def}} \psi$ surjektiv $\iff M$ stimmt mit dem von $(x_i)_{i \in I}$ erzeugten Untermodul überein

linear abhängig $\iff \psi$ injektiv

Basis von M über R $\iff \psi$ bijektiv

M heißt

endlich erzeugt $\iff M$ besitzt ein endliches Erzeugendensystem

frei $\iff M$ besitzt eine Basis

Anmerkung. • Ist $R = K$ ein Körper, so sind alle K -Moduln frei (LA1)

- Im allgemeinen ist dies jedoch falsch: $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ ist eine abelsche Gruppe (= \mathbb{Z} -Modul), die nicht frei als \mathbb{Z} -Modul ist.
- Jeder R -Modul M ist Faktormodul eines freien R -Moduls, denn:

$$R^{(M)} \rightarrow M, (a_x)_{x \in M} \mapsto \sum_{x \in M} a_x x \quad \text{ist surjektiv.}$$

- Basen eines freien R -Moduls können unterschiedliche Länge haben.

Satz 1.1.22. Sei A ein kommutativer Ring, $A \neq 0$, $n_1, n_2 \in \mathbb{N}$. Dann gilt:

$$A^{n_1} \simeq A^{n_2} \iff n_1 = n_2$$

Beweis. Vorüberlegung: nach Algebra 1, 4.18 ex in A ein maximales Ideal J . Sei $n \in \mathbb{N}$. Dann ist A^n/JA^n ein A/J -Modul (vgl Beispiel 1.10) und A/J ist ein Körper. Die Abbildung $A^n/JA^n \rightarrow (A/J)^n, (x_1, \dots, x_n) + JA^n \mapsto (x_1 + J, \dots, x_n + J)$ ist ein Isomorphismus von A/J -Moduln, d.h. $A^n/JA^n \simeq (A/J)^n$ ist ein n -dimensionaler A/J -Vektorraum. Aus $A^{n_1} \simeq A^{n_2}$ folgt $A^{n_1}/JA^{n_1} \simeq A^{n_2}/JA^{n_2}$, also $(A/J)^{n_1} \simeq (A/J)^{n_2}$ (als A/J -Vektorraum) ■

Definition 1.1.23. Sei A ein kommutativer Ring, M ein freier A -Modul mit endlicher Basis. Die Kardinalität dieser Basis heißt der *Rang* von M (unabhängig von der Wahl einer endlichen Basis nach 1.1.22)

1.2 Exakte Folgen

Definition 1.2.1. Eine *exakte Folge* (*exakte Sequenz*) von R -Moduln ist eine Familie $(f_i)_{i \in I}$ von R -Modulhomomorphismen $f_i : M_i \rightarrow M_{i+1}$ für ein (endliches oder unendliches) Intervall $I \in \mathbb{Z}$, sodass:

$$\operatorname{im} f_i = \ker f_{i+1} \quad \text{für alle } i \in I \text{ mit } i+1 \in I$$

gilt.

Schreibweise: $\dots \longrightarrow M_{i-1} \xrightarrow{f_{i-1}} M_i \xrightarrow{f_i} M_{i+1} \longrightarrow \dots$

Eine exakte Folge der Form:

$$0 \longrightarrow M' \xrightarrow{f} M \xrightarrow{g} M'' \longrightarrow 0 \quad (*)$$

heißt eine *kurze exakte Folge* (hierbei sind die äußeren Abbildungen die Nullabbildungen). Die Exaktheit von $(*)$ bedeutet explizit:

- f injektiv
- g surjektiv
- $\operatorname{im} f = \ker g$.

Anmerkung. • Seien M, N R -Moduln und $f : M \rightarrow N$ ein R -Modulhomomorphismus.

Falls f injektiv, dann ist $0 \longrightarrow M \xrightarrow{f} N \xrightarrow{g} N/\operatorname{im} f \longrightarrow 0$ exakt.

falls f surjektiv, so ist $0 \longrightarrow \ker f \longrightarrow M \xrightarrow{f} N \longrightarrow 0$ exakt.

- Ist $0 \longrightarrow M' \xrightarrow{f} M \xrightarrow{g} M'' \longrightarrow 0$ eine exakte Folge von R -Moduln, und setzen wir $N := \ker g$, so induziert g einen Isomorphismus $\bar{g} : M/N \xrightarrow{\sim} M''$, und f beschränkt sich zu einem Isomorphismus $f : M' \xrightarrow{\sim} N$. (d.h.

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \longrightarrow & M' & \xrightarrow{f} & M & \xrightarrow{g} & M'' \longrightarrow 0 \\ & & \sim \downarrow f & & \parallel & & \uparrow \sim \\ 0 & \longrightarrow & N & \xrightarrow{e} & M & \xrightarrow{f} & M/N \longrightarrow 0 \end{array}$$

ist ein kommutatives Diagramm mit exakten Zeilen.)

- Ist $0 \longrightarrow M_i \longrightarrow M'_i \longrightarrow M''_i \longrightarrow 0$, $i \in I$ eine Familie exakter Folgen von R -Moduln, dann sind auch die Folgen

$$\prod_{i \in I} M'_i \longrightarrow \prod_{i \in I} M_i \longrightarrow \prod_{i \in I} M''_i$$

sowie

$$\bigoplus_{i \in I} M'_i \longrightarrow \bigoplus_{i \in I} M_i \longrightarrow \bigoplus_{i \in I} M''_i$$

(mit der komponentenweisen Abbildungen) exakt.

Satz 1.2.2. Sei $0 \longrightarrow M' \xrightarrow{f} M \xrightarrow{g} M'' \longrightarrow 0$ eine kurze exakte Sequenz von R -Moduln. Dann sind äquivalent:

- i) Es gibt ein Untermodul $N' \subseteq M$ mit $M = \ker g \oplus N'$
- ii) Es gibt einen R -Modulhomomorphismus $s : M'' \rightarrow M$ mit $g \circ s = \text{id}_{M''}$
- iii) Es existiert ein R -Modulhomomorphismus $t : M \rightarrow M'$ mit $t \circ f = \text{id}_{M'}$

Ist eine dieser äquivalenten Bedingungen erfüllt, sagt man, das die kurze exakte Sequenz “spaltet“. In diesem Fall gilt: $M \cong M' \oplus M''$. Der Homomorphismus s heißt ein “Schnitt“ von g .

Beweis. i) \Rightarrow ii) Sei $N' \subseteq M$ ein Untermodul mit $M = \ker g \oplus N'$. Dann ist $N' \cap \ker g = 0$. Dann ist $g|_{N'} : N' \rightarrow M''$ injektiv. Außerdem gilt: $M'' = g(M) = g(N')$, also ist $g|_{N'} : N' \xrightarrow{\sim} M''$ ein Isomorphismus. Setze $s : M'' \rightarrow N' \hookrightarrow M$. Dann ist s ein R -Modulhomomorphismus mit $g \circ s = \text{id}_{M''}$. Außerdem ist

$$M = \ker g \oplus N' = \ker g \oplus \text{im } s = \text{im } f \oplus \text{im } s = f(M') \oplus s(M'') \underset{f, s \text{ inj}}{\cong} M' \oplus M''$$

ii) \Rightarrow iii) Sei $s : M'' \rightarrow M$ ein Modulhomomorphismus mit $g \circ s = \text{id}_{M''}$. Sei $h : f(M') \rightarrow M'$ invers zu $f|_{f(M')} : M' \xrightarrow{\sim} f(M')$. Für $m \in M$ ist

$$g \circ (\text{id}_M - s \circ g)(m) = g(m) - g \circ (s \circ g)(m) = g(m) - \underbrace{(g \circ s) \circ g(m)}_{=\text{id}_{M''}} = 0$$

Also ist $(\text{id}_M - s \circ g)(m) \in \ker g = \text{im } f$. Wir setzen $t : M \xrightarrow{\text{id}_M - s \circ g} f(M') \xrightarrow{h} M'$, welcher ein R -Modulhomomorphismus ist mit

$$t \circ f = h \circ (\text{id}_M - s \circ g) \circ f = \underbrace{h \circ \text{id}_M \circ f}_{=\text{id}_{M'}} - \underbrace{h \circ s \circ g \circ f}_{=0} = \text{id}_{M'}$$

iii) \Rightarrow i) Setze $t : M \rightarrow M'$ ein Modulhomomorphismus mit $t \circ f = \text{id}_{M'}$. Setze $N' := \ker t$. Für $m \in M$ ist $m = \text{id}_M(m) = \underbrace{(\text{id}_M - f \circ t)(m)}_{\in \ker t} + \underbrace{(f \circ t)(m)}_{\in \text{im } f}$, also ist

$M = N' + \text{im } f$. Sei außerdem $m \in N' \cap \text{im } f$. Dann existiert ein $m' \in M'$ mit $m = f(m')$, somit ist

$$0 = t(m) = (t \circ f)(m') = \text{id}_{M'}(m') = m'$$

also auch $m = 0$. Damit ist $M = N' \oplus \text{im } f$. ■

Satz 1.2.3. Sei $0 \longrightarrow M' \xrightarrow{f} M \xrightarrow{g} M'' \longrightarrow 0$ eine exakte Sequenz von R -Moduln, M'' ein freier R -Modul. Dann spaltet die obige Folge.

Beweis. Sei also $(v_i)_{i \in I}$ eine Basis von M'' . Wähle für alle $i \in I$ ein $m_i \in M$ mit $g(m_i) = v_i$ (beachte: g ist surjektiv). Sei $s : M'' = \bigoplus_{i \in I} Rv_i \rightarrow M$ der durch die Vorgabe $s(v_i) = m_i$ induzierte Modulhomomorphismus (existiert nach der UE von \bigoplus). Es ist

$$(g \circ s)(v_i) = g(m_i) = v_i, \quad \forall i \in I$$

Also ist $g \circ s = \text{id}_{M''}$ ■

Folgerung 1.2.4. Sei $0 \longrightarrow M' \longrightarrow M \longrightarrow M'' \longrightarrow 0$ eine kurze exakte Sequenz von R -Moduln, M', M'' freie R -Moduln. Dann ist auch M frei.

Beweis. Nach Voraussetzung ist $M' \cong R^{(I)}$, $M'' \cong R^{(J)}$. Nach 1.2.3 spaltet die Folge, also ist

$$M \cong M' \oplus M'' \cong R^{(I)} \oplus R^{(J)} \cong R^{(I \dot{\cup} J)}$$

und damit auch frei. ■

Anmerkung. Ist R kommutativ, und haben M, M' endliche Basen, dann zeigt der Beweis:

$$\text{rang}(M) = \text{rang}(M') + \text{rang}(M'')$$

Bemerkung 1.2.5. Sei $0 \longrightarrow M' \xrightarrow{f} M \xrightarrow{g} M'' \longrightarrow 0$ eine kurze exakte Sequenz von R -Moduln. Dann gilt:

- a) Ist M endlich erzeugt, dann ist M'' endlich erzeugt.
- b) Sind M', M'' endlich erzeugt, dann ist M endlich erzeugt.

Beweis. a) Ist M endlich erzeugt, dann existiert ein $n \in \mathbb{N}$ und ein Epimorphismus $\varphi : R^n \rightarrow M$. Dann ist $g \circ \varphi : R^n \rightarrow M''$ ebenfalls ein Epimorphismus, also ist M'' endlich erzeugt.

- b) Sei (x_1, \dots, x_r) ein Erzeugendensystem von M' , (y_1, \dots, y_s) ein Erzeugendensystem von M'' . Da g surjektiv, existieren $z_1, \dots, z_s \in M$ mit $g(z_i) = y_i$ für $i = 1, \dots, s$.

Behauptung: $f(x_1), \dots, f(x_r), z_1, \dots, z_s$ ist ein Erzeugendensystem von M , denn sei $m \in M$. Dann existieren $a_1, \dots, a_s \in R$ mit $g(m) = \sum_{i=1}^s a_i y_i = \sum_{i=1}^s a_i g(z_i) = g(\sum_{i=1}^s a_i z_i)$. Damit ist $m - \sum_{i=1}^s a_i z_i \in \ker g = \text{im } f$. Also existiert ein $v \in M'$, etwa $v = \sum_{i=1}^r b_i x_i$ mit $f(v) = m - \sum_{i=1}^s a_i z_i$. Also ist

$$m = f(v) + \sum_{i=1}^s a_i z_i = \sum_{i=1}^r b_i f(x_i) + \sum_{i=1}^s a_i z_i$$

Anmerkung. Aus M endlich erzeugt, folgt im Allgemeinen nicht, dass M' endlich erzeugt ist.

Beispiel 1.2.6. Sei K ein Körper, $R = K[X_1, X_2, \dots]$. Dann ist R als R -Modul offensichtlich endlich erzeugt (von 1). Setze

$$I := \{f \in R \mid \text{konstanter Term von } f \text{ ist } = 0\}$$

Dann ist I ein Ideal in R , aber I ist nicht endlich erzeugt als R -Modul, denn angenommen es existieren $f_1, \dots, f_r \in I$ mit $I = \sum_{i=1}^r R f_i$. Dann existiert ein $n \in \mathbb{N}$, sodass $f_1, \dots, f_r \in K[X_1, \dots, X_n] \subseteq R$.

Problem: $X_{n+1} \notin I$, denn andernfalls wäre $X_{n+1} = a_1 f_1 + \dots + a_r f_r$ mit $a_1, \dots, a_r \in R$ und setze $X_1 = \dots = X_n = 0$, $X_{n+1} = 1$, also $1 = 0$ Widerspruch!

Bemerkung 1.2.7. Seien M_1, \dots, M_r R -Moduln. Dann sind äquivalent:

i) $M = \bigoplus_{i=1}^r M_i$ ist endlich erzeugt.

ii) M_1, \dots, M_r sind endlich erzeugt.

Beweis. Es genügt, die Behauptung für $r = 2$ zu zeigen (Rest induktiv). Wir haben kurze exakte Folgen

$$0 \longrightarrow M_1 \xrightarrow{f} M_1 \oplus M_2 \xrightarrow{g} M_2 \longrightarrow 0$$

und

$$0 \longrightarrow M_2 \xrightarrow{f} M_1 \oplus M_2 \xrightarrow{g} M_1 \longrightarrow 0$$

Damit folgt die Behauptung aus 1.2.5 ■

Anmerkung. Ist $M = \bigoplus_{i \in I} M_i$ mit $|I| = \infty$, $M_i \neq 0$ für alle $i \in I$, dann ist M nicht endlich erzeugt, dann für $x_1, \dots, x_s \in M$ existiert ein $J \subsetneq I$ mit $x_1, \dots, x_s \in \bigoplus_{j \in J} M_j$, also

$$\sum_{i=1}^s R_i \subseteq \bigoplus_{j \in J} M_j \subsetneq \bigoplus_{i \in I} M_i$$

Bemerkung 1.2.8 (Fünferlemma). Ist ein kommutatives Diagramm von R -Modulhomomorphismen mit exakten Zeilen

$$\begin{array}{ccccccccc} M_1 & \longrightarrow & M_2 & \longrightarrow & M_3 & \longrightarrow & M_4 & \longrightarrow & M_5 \\ \downarrow \varphi_1 & & \downarrow \varphi_2 & & \downarrow \varphi_3 & & \downarrow \varphi_4 & & \downarrow \varphi_5 \\ N_1 & \longrightarrow & N_2 & \longrightarrow & N_3 & \longrightarrow & N_4 & \longrightarrow & N_5 \end{array}$$

gegeben und φ_1 surjektiv, φ_2, φ_4 Isomorphismen, φ_5 injektiv. Dann ist φ_3 ein Isomorphismus.

Beweis. Diagrammjagd (Übungen). ■

Anmerkung. Wir meist in der Situation $M_1 = N_1 = M_5 = N_5$ angewandt.

Bemerkung 1.2.9 (Schlangenlemma). Sei folgendes kommutatives Diagramm von R Modulhomomorphismen mit exakten Zeilen gegeben:

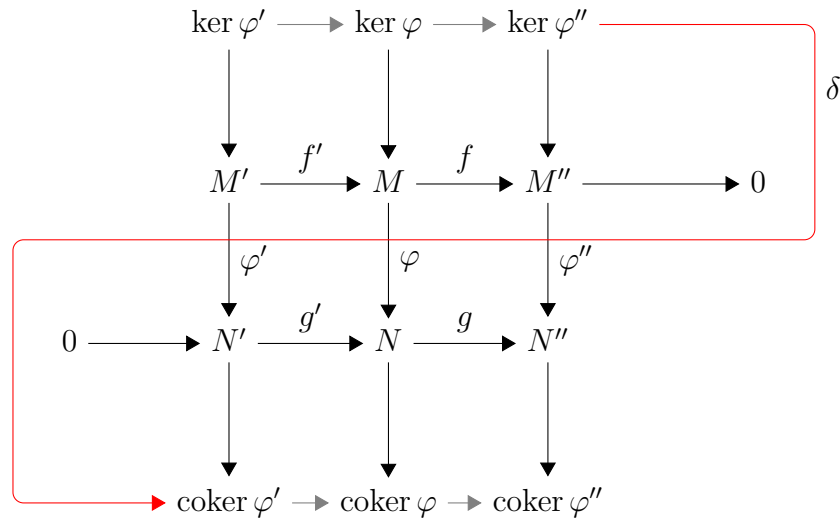
$$\begin{array}{ccccccc} M' & \xrightarrow{f'} & M & \xrightarrow{f} & M'' & \longrightarrow & 0 \\ \downarrow \varphi' & & \downarrow \varphi & & \downarrow \varphi'' & & \\ 0 & \longrightarrow & N' & \xrightarrow{g'} & N & \xrightarrow{g} & N'' \end{array}$$

Dann existiert eine exakte Sequenz von R -Moduln

$$\ker \varphi' \longrightarrow \ker \varphi \xrightarrow{f} \ker \varphi'' \xrightarrow{\delta} \operatorname{coker} \varphi' \longrightarrow \operatorname{coker} \varphi \longrightarrow \operatorname{coker} \varphi''$$

wobei δ die sogenannte Übergangabbildung ist (Konstruktion siehe Beweis) und f', f, g', g induziert sind. Ist f' injektiv, dann ist auch $\ker \varphi' \longrightarrow \ker \varphi$ injektiv. Ist g surjektiv, dann auch $\operatorname{coker} \varphi \longrightarrow \operatorname{coker} \varphi''$

Beweis. Betrachte



Konstruktion von δ : Sei $m'' \in \ker \varphi'' \subseteq M''$. Da f surjektiv, existiert ein $m \in M$ mit $m'' = f(m)$. Setze $n := \varphi(m)$. Dann ist $g(n) = g(\varphi(m)) = \varphi''(f(m)) = \varphi''(m'') = 0$. Dann ist $n \in \ker g = \text{im } g'$. Also existiert ein $n' \in N'$ mit $g'(n') = n$ (n' ist eindeutig bestimmt wegen g' injektiv.) Setze $\delta(m'') := n' + \text{im } \varphi'$

Wohldefiniertheit von δ : Sei $\tilde{m} \in M$ mit $m'' = f(\tilde{m})$. Dann ist $f(\tilde{m}) = f(m)$, also $\tilde{m} - m \in \ker f = \text{im } f'$. Damit existiert ein $m' \in M'$ mit $\tilde{m} - m = f'(m')$. Also ist

$$\tilde{n} := \varphi(\tilde{m}) = \varphi(m + f'(m')) = \underbrace{\varphi(m)}_{=n} + \varphi(f'(m')) = g'(n') + g'(\varphi'(m')) = g'(\underbrace{n' + \varphi'(m')}_{:=\tilde{n}'})$$

Damit ist $\tilde{n}' + \text{im } \varphi' = n' + \text{im } \varphi'$, Rest ist Übungsaufgabe. ■

1.3 Noethersche und Artinsche Moduln

Definition 1.3.1. Sei M ein R -Modul. M heißt *noethersch* $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ jeder Untermodul von M ist endlich erzeugt.

Anmerkung. M noethersch $\Rightarrow M$ ist endlich erzeugt.

Beispiel 1.3.2. Sei K ein Körper, V ein K -VR. Dann gilt: V noethersch $\Leftrightarrow V$ ist endlich dimensional

Satz 1.3.3. Sei M ein R -Modul. Dann sind äquivalent:

- i) M ist noethersch
- ii) Jede aufsteigende Kette $M_0 \subseteq M_1 \subseteq M_2 \subseteq \dots$ von Untermoduln wird stationär, d.h. es existiert ein $n \in \mathbb{N}_0$, sodass $M_i = M_n$ für alle $i \geq n$.
- iii) Jede nichtleere Menge von Untermoduln von M enthält ein maximales Element.

Man sagt in diesem Fall auch: die Untermoduln von M erfüllen die aufsteigende Kettenbedingung.

Beweis. i) \Rightarrow ii) Sei $M_0 \subseteq M_1 \subseteq M_2 \subseteq \dots$ eine Kette von Untermoduln von M . Setze $N := \bigcup_{i \in \mathbb{N}_0} M_i \subseteq M$. N ist Untermodul von M (beachte: $a, b \in N \Rightarrow$ Es existieren $i, j \in \mathbb{N}_0$ mit $a \in M_i, b \in M_j$, (Es gilt: $i \leq j \Rightarrow M_i \subseteq M_j, a, b \in M_j \Rightarrow a + b \in M_j \subseteq N$). Da M noethersch, ist N endlich erzeugt, d.h. es existiert ein endliches Erzeugendensystem x_1, \dots, x_r von N . Für jedes $i \in \{1, \dots, r\}$ existieren $j_i \in \mathbb{N}_0$ mit $x_i \in M_{j_i}$. Setze $n := \max\{j_i \mid i = 1, \dots, r\} \Rightarrow x_1, \dots, x_r \in M_n \Rightarrow N \subseteq M_n \subseteq N \Rightarrow N = M_n \Rightarrow$ für alle $i \geq n$ ist $M_i = M_n$.

ii) \Rightarrow iii) Sei \mathcal{X} eine nichtleere Menge von Untermoduln von M , die kein maximales Element hat. Insbesondere existiert zu jedem $M' \in \mathcal{X}$ ein $M'' \in \mathcal{X}$ mit $M' \subsetneq M''$. \Rightarrow Es existiert eine Kette von Untermoduln $M_0 \subsetneq M_1 \subsetneq M_2 \subsetneq \dots$ von M , die nicht stationär wird.

iii) \Rightarrow i) Sei $N \subseteq M$ ein Untermodul. Setze

$$\mathcal{X} := \{M' \subseteq M \text{ Untermodul} \mid M' \text{ endlich erzeugt, } M' \subseteq N\}$$

Wegen $0 \in \mathcal{X}$ ist $\mathcal{X} \neq \emptyset \stackrel{(iii)}{\Rightarrow}$ Es existiert ein maximales Element \tilde{M} in \mathcal{X} .

Behauptung: $\tilde{M} = N$, denn: Sei $x \in N \Rightarrow Rx + \tilde{M} \in \mathcal{X}$ und $\tilde{M} \subseteq Rx + \tilde{M}$. Aufgrund der Maximalität von \tilde{M} , folgt $Rx + \tilde{M} = \tilde{M}$, als $x \in \tilde{M}$. ■

Bemerkung 1.3.4. Sei $0 \longrightarrow M' \longrightarrow M \longrightarrow M'' \longrightarrow 0$ eine kurze exakte Sequenz von R -Moduln. Dann sind äquivalent:

i) M ist noethersch

ii) M' und M'' sind noethersch

Beweis. Es genügt den Fall der Folge $0 \longrightarrow M' \longrightarrow M \longrightarrow M'' \longrightarrow 0$ für einen Untermodul $N \subseteq M$ zu betrachten. (Vgl. Anmerkung nach 1.2.1)

i) \Rightarrow ii) Sei $N' \subseteq N$ Untermodul $\Rightarrow N'$ Untermodul von $M \xrightarrow{M_{\text{noet.}}} N'$ endlich erzeugt. Sei $N'' \subseteq M/N$ Untermodul. Also ist $\pi^{-1}(N'') \rightarrow N''$ ein Epimorphismus und damit N'' endlich erzeugt nach 2.5 (a).

ii) \Rightarrow i) Seien $N, M/N$ noethersch, und sei $M' \subseteq M$ Untermodul. Wir erhalten eine kurze exakte Sequenz von R -Moduln

$$0 \longrightarrow M' \cap N \longrightarrow M' \longrightarrow M'/M' \cap N \longrightarrow 0$$

wobei $M' \cap N$ endlich erzeugt, da N noethersch. Außerdem ist

$$M'/M' \cap N \simeq (M' + N)/N \subseteq M/N$$

endlich erzeugt, da M/N noethersch. $\Rightarrow M'$ ist endlich erzeugt nach 1.2.5 ■

Bemerkung 1.3.5. M_1, \dots, M_r R -Moduln. Dann sind äquivalent:

i) $\bigoplus_{i=1}^r M_i$ noethersch

ii) M_1, \dots, M_r noethersch.

Beweis. Analog zum Beweis von 1.2.7 unter Verwendung von 1.3.4 ■

Definition 1.3.6. R heißt *linksnoethersch* (bzw. *rechtsnoethersch*), wenn R als Links- (bzw. Rechts-) Modul über sich selbst noethersch ist. R heißt *noethersch*, wenn R links- und rechtsnoethersch ist.

Anmerkung. Es gibt Ringe, die rechtsnoethersch, aber nicht linksnoethersch sind (und umgekehrt)

Beispiel 1.3.7. a) Ist R ein Schiefkörper (Divisionsring) (d.h. $R \setminus \{0\}$ ist eine Gruppe bzgl. \cdot), dann ist R noethersch, denn wegen $Ra = R = aR$ für alle $a \in R \setminus \{0\}$ sind die einzigen Linksideale (Rechtsideale) in R durch $0, R$ gegeben, diese sind endlich erzeugt.

b) Sei K ein Körper, $R = K[X_1, X_2, \dots]$ ist nicht noethersch nach Beispiel 1.2.6.

Bemerkung 1.3.8. Sei R ein linksnoetherscher Ring, M ein endlich erzeugtes R -Modul. Dann ist M noethersch.

Beweis. Wegen M endlich erzeugt, existiert ein Epimorphismus $R^n \twoheadrightarrow M$ für geeignetes n . Nach Voraussetzung ist R als R -Modul noethersch $\stackrel{1.3.5}{\Rightarrow} R^n$ noetherscher R -Modul $\stackrel{1.3.4}{\Rightarrow} M$ noethersch. ■

Bemerkung 1.3.9. Sei R linksnoetherscher Ring, $I \subseteq R$ zweiseitiges Ideal. Dann ist R/I linksnoethersch.

Beweis. Es ist zu zeigen: R/I ist noethersch als R/I -Modul.
Vorüberlegungen:

1. Für $N \subseteq R/I$ gilt:

$$\begin{aligned} N \text{ ist } R/I\text{-Modul von } R/I &\Leftrightarrow N \text{ ist } R\text{-Untermodul von } R/I \\ (\text{bezüglich } \bar{a} \cdot \bar{x} := \overline{ax}) &\quad (\text{bezüglich } a \cdot \bar{x} := \overline{ax}) \end{aligned}$$

2. Für jeden R/I -Untermodul N von R/I gilt:

$$N \text{ ist endlich erzeugt über } R/I \Leftrightarrow N \text{ ist endlich erzeugt über } R$$

Nach den Vorüberlegungen genügt es zu zeigen, dass R/I noethersch ist als R -Modul. Dies folgt aus 3.8, denn R/I ist endlich erzeugt als R -Modul (erzeugt von $\bar{1}$). ■

Anmerkung. Unterringe noetherscher Ringe sind im Allgemeinen nicht noethersch (siehe Übungsaufgaben)

Bemerkung 1.3.10. Seien M, N R -Moduln mit $M \cong M \oplus N, N \neq 0$. Dann ist M nicht noethersch.

Beweis. Setze

$$\mathcal{X} := \{N' \subseteq M \text{ Untermodul} \mid \exists M' \subseteq M, \text{ s.d. } M = M' \oplus N' \text{ und } M' \cong M\}$$

Offenbar ist $0 \in \mathcal{X}$, denn $M = M \oplus 0$, also $\mathcal{X} \neq \emptyset$.

Angenommen M ist noethersch. Dann enthält \mathcal{X} ein maximales Element N' , also existiert ein $M' \subseteq M$ mit $M = M' \oplus N'$ und $M' \cong M$. Nach Voraussetzung existiert ein $\varphi : M \oplus N \xrightarrow{\sim} M \xrightarrow{\sim} M'$. Also ist

$$M' = \varphi(M) \oplus \varphi(N) \Rightarrow M = M' \oplus N' = \underbrace{\varphi(M)}_{=: M''} \oplus \underbrace{\varphi(N) \oplus N'}_{=: N''}$$

Es ist $M \cong \varphi(M) = M''$, somit $N'' \in \mathcal{X}$. Außerdem ist $\varphi(N) \neq 0$ wegen $N \neq 0$ und φ injektiv. Damit folgt $N' \subsetneq N''$ im Widerspruch zur Maximalität von N' . ■

Satz 1.3.11. *Sei R linksnoetherscher Ring, $R \neq 0$, $n_1, n_2 \in \mathbb{N}$. Dann gilt: $R^{n_1} \simeq R^{n_2} \Rightarrow n_1 = n_2$.*

Beweis. ohne Einschränkung gelte $n_1 \geq n_2 \Rightarrow R^{n_2} \simeq R^{n_1} \simeq R^{n_2} \simeq R^{n_1-n_2}$. Wegen R^{n_2} noethersch, folgt mit 1.3.10 : $R^{n_1-n_2} = 0$, also $n_1 = n_2$ ■

Anmerkung. • Obiger Satz zeigt, dass der Begriff des Ranges freier Moduln auch für endlich erzeugte, freie Moduln über linksnoetherschen Ringen wohldefiniert ist.

- Jeder Körper ist linksnoethersch \Rightarrow So erhält man einen neuen Beweis für Ergebnis aus LA1

Satz 1.3.12 (Hilbertscher Basissatz). *Sei R ein linksnoetherscher Ring. Dann ist $R[X]$ linksnoethersch.*

Beweis. Sei $I \subseteq R$ ein Linksideal. Es ist zu zeigen, dass I als $R[X]$ -Modul endlich erzeugt ist.

1. Für $n \in \mathbb{N}$ setze $I_n := \{f \in I \mid \deg f \leq n\}$, was offenbar ein R -Modul ist. Wir betrachten die R -lineare Abbildung

$$b_n : I_n \longrightarrow R, \quad \sum_{i=0}^n a_i X^i \mapsto a_n$$

also ist $B_n := b_n(I_n) \subseteq R$ ein Linksideal. Für $f \in I_n$ ist $Xf \in I_{n+1}$, also $b_n(f) = b_{n+1}(Xf) \in B_{n+1} = b_{n+1}(I_{n+1})$, woraus wir eine Kette von Linksidealen $B_1 \subseteq B_2 \subseteq \dots$ erhalten, welche, da R linksnoethersch ist, stationär ist, also existiert ein $n \in \mathbb{N}$ mit $B_m = B_n$ für alle $m \geq n$.

2. Behauptung: $I = R[X]I_n$, denn:

“ \supseteq “ klar, wegen $I_n \subseteq I$, wobei I ein Linksideal ist.

“ \subseteq “ Es ist $I = \bigcup_{m \in \mathbb{N}} I_m$, d.h. es genügt zu zeigen, dass $I_m \subseteq R[X]I_n$ für alle $m \in \mathbb{N}$, was wir per Induktion nach m zeigen.

$m \leq n$: klar.

$m > n$: Sei $f \in I_m$. Dann ist $b_m(f) \in B_m = B_n = b_n(I_n)$, also existiert ein Polynom $f_1 \in I_n$ mit $b_m(f) = b_n(f_1) = b_m(X^{m-n}f_1)$. Also ist $f - X^{m-n}f_1 \in I_{m-1}$

$\stackrel{\text{IV}}{\subseteq} I_{m-1} \subseteq R[X]I_n$. Wegen $X^{m-n}f_1 \in R[X]I_n$, folgt $f \in R[X]I_n$

3. I_n ist endlich erzeugt als R -Modul, denn: $I_n \subseteq \sum_{i=0}^n RX^i$, und $\sum_{i=0}^n RX^i$ ist ein endlich erzeugter R -Modul, also insbesondere noethersch nach 1.3.8,

weshalb I_n als Untermodul endlich erzeugt ist, d.h. es existieren $g_1, \dots, g_r \in I_n$ mit $I_n = \sum_{i=1}^r Rg_i$, also

$$I \stackrel{2.}{=} R[X]I_n = \sum_{i=1}^r R[X]g_i$$

d.h. I ist endlich erzeugt als $R[X]$ -Modul. ■

Folgerung 1.3.13. a) Ist R ein linksnoetherscher Ring, dann ist $R[X_1, \dots, X_n]$ linksnoethersch

b) Sind A, B kommutative Ring, $\varphi : A \rightarrow B$ ein Ringhomomorphismus, sodass B von $\varphi(A)$ und einer endlichen Menge $\{x_1, \dots, x_r\} \subseteq B$ als Ring erzeugt wird. Dann gilt: A ist noethersch $\Rightarrow B$ noethersch.

Beweis. a) aus 1.3.12 per Induktion

b) Nach Voraussetzung existiert ein surjektiver Ringhomomorphismus

$$\psi : A[X_1, \dots, X_r] \twoheadrightarrow B, \quad X_i \mapsto x_i, \quad \text{und} \quad \psi|_A = \varphi$$

Ist A noethersch, dann ist $A[X_1, \dots, X_r]$ noethersch nach a) und nach 3.9 ist B noethersch. ■

Definition 1.3.14. Sei M ein R -Modul. M heißt *artinsch* $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ für jede absteigende Kette $M_1 \supseteq M_2 \supseteq \dots$ von Untermoduln von M gibt es ein $n \in \mathbb{N}$ mit $M_i = M_n$ für alle $i \geq n$ ("absteigende Kettenbedingung").

Definition 1.3.15. R heißt *linksartinsch* (bzw. *rechtsartinsch*) $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ R ist als Links- bzw. Rechtsmodul über sich selber artinsch. R heißt *artinsch* $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ R ist links- und rechtsartinsch.

Beispiel 1.3.16. a) Jeder endliche Ring ist artinsch (und noethersch).

b) \mathbb{Z} ist kein artinscher Ring, denn $\mathbb{Z} \supsetneq 2\mathbb{Z} \supsetneq 4\mathbb{Z} \supsetneq 8\mathbb{Z} \supsetneq \dots$

c) Sei M ein endliches Monoid, K ein Körper, $R = K[M]$ sei der Monoidring (vgl. Algebra 1-Übungen). Dann ist R linksartinsch, denn: $K[M]$ ist ein endlichdimensionaler K -Vektorraum, jeder $K[M]$ -Untermodul von $K[M]$ ist ein K -Untervektorraum von $K[M]$, also ist jede absteigende Kette von Untermoduln eine absteigende Kette von Untervektorräumen, die stationär ist. Ebenso ist $K[M]$ rechtsartinsch, $K[M]$ also artinsch.

Bemerkung 1.3.17. Sei $0 \longrightarrow M' \longrightarrow M \longrightarrow M'' \longrightarrow 0$ eine exakte Folge von R -Moduln. Dann sind äquivalent:

- i) M ist artinsch.
- ii) M', M'' ist artinsch.

Beweis. Es genügt, den Fall $0 \longrightarrow N \longrightarrow M \longrightarrow M/N \longrightarrow 0$ zu betrachten.

i) \Rightarrow ii) Sei M artinsch. Sei $N_1 \supseteq N_2 \supseteq \dots$ eine Kette von Untermoduln von N . Dann ist N_i ein Untermodul von M für alle $i \in \mathbb{N}$ und, da M artinsch ist, existiert ein $n \in \mathbb{N}$ mit $N_i = N_n$ für alle $i \geq n$, weshalb N artinsch ist. Sei $N'_1 \supseteq N'_2 \supseteq \dots$ eine Kette von Untermoduln von M/N . Dann ist $\pi^{-1}(N'_1) \supseteq \pi^{-1}(N'_2) \supseteq \dots$ eine Kette von Untermoduln von M , welche, wegen M artinsch, stationär wird. Es ist $N'_n = \pi(\pi^{-1}(N'_n)) = \pi(\pi^{-1}(N'_n)) = N_i$ für alle $i \geq n$, also ist M/N artinsch.

ii) \Rightarrow i) Seien $N, M/N$ artinsch. Sei $M_1 \supseteq M_2 \supseteq \dots$ eine absteigende Kette von Untermoduln von M . Dann ist $M_1 \cap N \supseteq M_2 \cap N \supseteq \dots$ eine absteigende Kette von Untermoduln von N . Damit ist

$$(M_1 + N)/N \supseteq (M_2 + N)/N \supseteq \dots$$

eine absteigende Kette von Untermoduln von M/N , also existiert ein $n \in \mathbb{N}$ mit $M_i \cap N = M_n \cap N$ und $M_i + N/N = M_n + N/N$ für alle $i \geq n$, also ist $M_i + N = M_n + N$ für alle $i \geq n$,

Behauptung: $M_i = M_n$ für alle $i \geq n$, denn sei $i \geq n$ fest.

“ \subseteq “ klar

“ \supseteq “ Sei $x \in M_n$. Dann existieren $x' \in M, y \in N$ mit $x = x' + y$ (wegen $M_i + N = M_n + N$), also $y = \underbrace{x}_{\in M_n} - \underbrace{x'}_{\in M_i \subseteq M_n} \in M_n \cap N = M_i \cap N \Rightarrow x = \underbrace{x'}_{\in M_i} + \underbrace{y}_{\in M_i} \in M_i$

■

Folgerung 1.3.18. Seien M_1, \dots, M_n R -Moduln. Dann sind äquivalent:

- i) $\bigoplus_{i=1}^n M_i$ ist artinsch
- ii) M_1, \dots, M_n sind artinsch.

Folgerung 1.3.19. Sei R linksartinsch, M ein endlich erzeugter R -Modul. Dann ist M artinsch.

Definition 1.3.20. Sei M ein R -Modul. Dann heißt M *endlich koerzeugt* $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ für jede Familie $(M_i)_{i \in I}$ von Untermoduln von M mit $\bigcap_{i \in I} M_i = 0$ existiert eine endliche Teilmenge $J \subseteq I$ mit $\bigcap_{j \in J} M_j = 0$

Anmerkung. • Sei $N \subseteq M$ ein Untermodul. Dann ist M/N endlich koerzeugt \Leftrightarrow Für jede Familie $(M_i)_{i \in I}$ von Untermoduln von M mit $\bigcap_{i \in I} M_i = N$ existiert eine endliche Teilmenge $J \subseteq I$ mit $\bigcap_{j \in J} M_j = N$.

- N ist endlich erzeugt \Leftrightarrow Für jede Familie $(M_i)_{i \in I}$ von Untermoduln von M mit $\sum_{i \in I} M_i = N$ existiert eine endliche Teilmenge $J \subseteq I$ mit $\sum_{j \in J} M_j = N$.

Satz 1.3.21. Sei M ein R -Modul. Dann sind äquivalent:

- M ist artinsch
- Jede nichtleere Menge von Untermoduln enthält ein minimales Element
- Jeder Faktormodul von M ist endlich koerzeugt.

Beweis. $i) \Rightarrow ii)$ Sei \mathcal{X} eine nichtleere Menge von Untermoduln von M , die kein minimales Element besitzt. Insbesondere existiert zu jedem $M' \in \mathcal{X}$ ein $M'' \in \mathcal{X}$ mit $M'' \subsetneq M'$, also existiert eine Kette von Untermoduln $M_1 \supsetneq M_2 \supsetneq \dots$, die nicht stationär wird.

$ii) \Rightarrow iii)$ Sei $N \subseteq M$ ein Untermodul, $(M_i)_{i \in I}$ eine Familie von Untermoduln von M mit $\bigcap_{i \in I} M_i = N$. Setze $\mathcal{X} := \{\bigcap_{j \in J} M_j \mid J \subseteq I \text{ endlich}\} \stackrel{(ii)}{\Rightarrow} \mathcal{X}$ enthält ein minimales Element $N_1 = \bigcap_{j \in J} M_j$ für eine endliche Teilmenge $J \subseteq I$.

Behauptung: $N_1 = N$, denn

“ \supseteq “ klar

“ \subseteq “ Angenommen $N_1 \supsetneq N$. Dann existiert ein $x \in N_1$ mit $x \notin N$. Da $N = \bigcap_{i \in I} M_i$ existiert ein $i \in I$ mit $x \notin M_i \Rightarrow x \notin \bigcap_{j \in J \cup \{i\}} M_j =: N_2$. Somit ist $N_2 \in \mathcal{X}$,

$N_2 \subsetneq N_1$ im Widerspruch zur Minimalität von N_1 .

Somit $N_1 = N$, also ist M/N endlich koerzeugt.

$iii) \Rightarrow i)$ Sei $M_1 \supseteq M_2 \supseteq \dots$ eine absteigende Kette von Untermoduln von M . Setze $N := \bigcap_{i \in \mathbb{N}} M_i$. M/N ist endlich koerzeugt, weshalb eine endliche Teilmenge $J \subseteq \mathbb{N}$ existiert mit $N = \bigcap_{j \in J} M_j$. Setze $n := \max J$, dann ist $N = M_n$, also ist $M_i = M_n$ für alle $i \geq n$. ■

2 Homologische Algebra

In diesem Kapitel sei R stets ein Ring

2.4 Kategorien

Definition 2.4.1. Eine *Kategorie* \mathcal{C} besteht aus

- einer Klasse $\text{Ob } \mathcal{C}$ von *Objekten* einer Menge $\text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B)$ von *Morphismen* für alle $A, B \in \text{Ob } \mathcal{C}$
- einer Verknüpfung $\circ : \text{Mor}_{\mathcal{C}}(B, C) \times \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B) \rightarrow \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, C)$ für alle $A, B, C \in \text{Ob } \mathcal{C}$

wobei folgende Axiome gelten:

(K1) $\text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B) \cap \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A', B') = \emptyset$, falls $A \neq A'$ oder $B \neq B'$

(K2) Für alle $A, B, C, D \in \text{Ob } \mathcal{C}, f \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B), g \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(B, C), h \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(C, D)$ gilt:

$$h \circ (g \circ f) = (h \circ g) \circ f \quad (\text{Assoziativität})$$

(K3) für jedes $A \in \text{Ob } \mathcal{C}$ existiert ein Morphismus $\text{id}_A \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, A)$, sodass für alle $B \in \text{Ob } \mathcal{C}, f \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B), g \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(B, A)$ gilt:

$$f \circ \text{id}_A = f, \text{id}_A \circ g = g$$

Anmerkung. • Man sagt *Klasse* statt Menge, um Paradoxa, wie “die Menge aller Mengen“ zu vermeiden.

- Trotzdem schreiben wir $A \in \text{Ob } \mathcal{C}$ um zu sagen dass A zu $\text{Ob } \mathcal{C}$ gehört (und werden $\text{Ob } \mathcal{C}$ im Folgenden wie eine Menge behandeln).
- In den folgenden Abschnitten werden wir mengentheoretische Probleme ignorieren und häufig von Mengen sprechen auch wenn es sich nur um Klassen handelt.
- Für $f \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B)$ schreiben wir auch $f : A \rightarrow B$. A heißt *Quelle* und B heißt *Ziel* von f ; wegen (K1) sind diese eindeutig bestimmt.
- für $A \in \text{Ob } \mathcal{C}$ ist id_A eindeutig bestimmt (analoges Argument wie bei Monoiden: $\text{id}_A = \text{id}'_A \circ \text{id}_A = \text{id}_A$)

Beispiel 2.4.2. • Mengen: Kategorie der Mengen mit Abbildungen von Mengen als Morphismen

- Ringe: Kategorie der Ringe mit Ringhomomorphismen als Morphismen
- $R\text{-Mod}$: Kategorie der R -(Links)-Moduln mit R -Modulhomomorphismen als Morphismen
- Top: Kategorie der topologischen Räume mit stetigen Abbildungen als Morphismen
- $\text{Ob } \mathcal{C} = \{*\}$, $\text{Mor}_{\mathcal{C}}(*, *) := M$, wobei M Monoid, \circ = Verknüpfung in M .

Definition 2.4.3. Sei \mathcal{C} eine Kategorie. Die zu \mathcal{C} *duale Kategorie* (\mathcal{C}^{op}) ist die Kategorie mit:

- $\text{Ob}(\mathcal{C}^{op}) = \text{Ob } \mathcal{C}$, $\text{Mor}_{\mathcal{C}^{op}}(A, B) := \text{Mor}_{\mathcal{C}}(B, A)$ für $A, B \in \text{Ob}(\mathcal{C}^{op}) = \text{Ob } \mathcal{C}$
- $\circ_{op} : \text{Mor}_{\mathcal{C}^{op}}(A, B) \times \text{Mor}_{\mathcal{C}^{op}}(B, C) \rightarrow \text{Mor}_{\mathcal{C}^{op}}(A, C)$ mit $(f, g) \mapsto f \circ g$ für $A, B, C \in \text{Ob } \mathcal{C}$

Anmerkung. • Anschaulich: Übergang von \mathcal{C} zu $\mathcal{C}^{op} \hat{=}$ Pfeile umdrehen

- $(\mathcal{C}^{op})^{op} = \mathcal{C}$

Definition 2.4.4. Seien \mathcal{C}, \mathcal{D} Kategorien. Ein (*kovarianter*) *Funktor* $F : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$ besteht aus einer Abbildung

$$\text{Ob } \mathcal{C} \rightarrow \text{Ob}(\mathcal{D}), \quad A \mapsto FA$$

und Abbildungen:

$$\text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B) \rightarrow \text{Mor}_{\mathcal{D}}(FA, FB), \quad f \mapsto F(f)$$

für alle $A, B \in \text{Ob } \mathcal{C}$, sodass gilt:

$$(F1) \quad F(g \circ f) = F(g) \circ F(f) \text{ für alle } f \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B), g \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(B, C), A, B, C \in \text{Ob } \mathcal{C}$$

$$(F2) \quad F(id_A) = id_{FA} \text{ für alle } A \in \text{Ob } \mathcal{C}.$$

Beispiel 2.4.5. a) Vergiss-Funktoren, zum Beispiel: $R\text{-Mod} \rightarrow \text{Mengen}$, $R\text{-Mod} \rightarrow \mathbb{Z}\text{-Mod}$, ...

b) Sei \mathcal{C} eine Kategorie \Rightarrow Jedes Objekt $X \in \text{Ob } \mathcal{C}$ induziert einen Funktor

$$\text{Mor}_{\mathcal{C}}(X, -) : \mathcal{C} \rightarrow \text{Mengen}, \quad A \mapsto \text{Mor}_{\mathcal{C}}(X, A)$$

Für $f \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B)$ ist hierbei $f_*^X := \text{Mor}_{\mathcal{C}}(X, -)(f)$ gegeben durch

$$f_*^X : \text{Mor}_{\mathcal{C}}(X, A) \rightarrow \text{Mor}_{\mathcal{C}}(X, B), \quad g \mapsto f \circ g$$

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{g} & A \\ & \searrow f_*^X(g) & \downarrow f \\ & & B \end{array}$$

c) Sei $M \in R\text{-Mod} \Rightarrow \text{Hom}_R(M, -) : R\text{-Mod} \rightarrow \mathbb{Z}\text{-Mod}$, $N \mapsto \text{Hom}_R(M, N)$ ist ein Funktor.

Definition 2.4.6. Seien \mathcal{C}, \mathcal{D} Kategorien. Ein (kontavarianter) Funktor F von \mathcal{C} nach \mathcal{D} ist ein Funktor $F : \mathcal{C}^{op} \rightarrow \mathcal{D}$, das heißt besteht aus einer Abbildung

$$\text{Ob } \mathcal{C} \rightarrow \text{Ob } (\mathcal{D}), \quad A \mapsto FA$$

und Abbildungen:

$$\text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B) \rightarrow \text{Mor}_{\mathcal{D}}(FB, FA), \quad f \mapsto F(f)$$

für alle $A, B \in \text{Ob } \mathcal{C}$, sodass gilt:

(F1') $F(g \circ f) = F(f) \circ F(g)$ für alle $f \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B), g \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(B, C)$, $A, B, C \in \text{Ob } \mathcal{C}$

(F2') $F(id_A) = id_{FA}$ für alle $A \in \text{Ob } \mathcal{C}$.

Beispiel 2.4.7. a) Sei \mathcal{C} eine Kategorie \Rightarrow Jedes Objekt $Y \in \text{Ob } \mathcal{C}$ induziert einen kontravarianten Funktor

$$\text{Mor}_{\mathcal{C}}(-, Y) : \mathcal{C} \rightarrow \text{Mengen}, \quad A \mapsto \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, Y)$$

Für $f \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B)$ ist hierbei $f_Y^* := \text{Mor}_{\mathcal{C}}(-, Y)(f)$ gegeben durch

$$f_Y^* : \text{Mor}_{\mathcal{C}}(B, Y) \rightarrow \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, Y), \quad g \mapsto g \circ f$$

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{f_Y^*(g)} & Y \\ f \downarrow & \nearrow g & \\ B & & \end{array}$$

b) Sei $N \in R\text{-Mod} \Rightarrow \text{Hom}_R(-, N) : R\text{-Mod} \rightarrow \mathbb{Z}\text{-Mod}$, $M \mapsto \text{Hom}_R(M, N)$ ist ein kontravarianter Funktor.

Anmerkung. • Sind $F : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}, G : \mathcal{D} \rightarrow \mathcal{E}$ Funktoren, so ist auf naheliegende Weise der Funktor $G \circ F : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{E}$ definiert.

- Unter Funktoren werden kommutative Diagramme auf kommutative Diagramme abgebildet.

Definition 2.4.8. Seien \mathcal{C}, \mathcal{D} Kategorien. Das *Produkt* $\mathcal{C} \times \mathcal{D}$ ist diejenige Kategorie mit $Ob(\mathcal{C} \times \mathcal{D}) = Ob(\mathcal{C}) \times Ob(\mathcal{D})$ und $Mor_{\mathcal{C} \times \mathcal{D}}((A_1, B_1), (A_2, B_2)) = Mor_{\mathcal{C}}(A_1, A_2) \times Mor_{\mathcal{D}}(B_1, B_2)$ und "komponentenweisen \circ ".

Definition 2.4.9. Seien $\mathcal{C}, \mathcal{D}, \mathcal{E}$ Kategorien. Ein *Bifunktor* F "von \mathcal{C} kreuz \mathcal{D} nach \mathcal{E} " ist ein Funktor $F : \mathcal{C} \times \mathcal{D} \rightarrow \mathcal{E}$

Beispiel 2.4.10. a) $\oplus : R\text{-Mod} \times R\text{-Mod} \rightarrow R\text{-Mod}, (M, N) \rightarrow M \oplus N$ ist ein Bifunktor

- b) Sei \mathcal{C} eine Kategorie $\Rightarrow \mathcal{C}^{op} \times \mathcal{C} \rightarrow \text{Mengen}, (M, N) \mapsto Mor_{\mathcal{C}}(M, N)$ ist ein Bifunktor.

Definition 2.4.11. Sei \mathcal{C} eine Kategorie, $A, B \in Ob \mathcal{C}, f : A \rightarrow B$ f heißt

Monomorphismus $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ Für alle $C \in Ob \mathcal{C}, g_1, g_2 : C \rightarrow A$ gilt: $f \circ g_1 = f \circ g_2 \Rightarrow g_1 = g_2 \Leftrightarrow$ Für alle $C \in Ob \mathcal{C}$ ist $f_*^C : Mor_{\mathcal{C}}(C, A) \rightarrow Mor_{\mathcal{C}}(C, B)$ injektiv.

Epimorphismus $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ Für alle $C \in Ob \mathcal{C}, g_1, g_2 : B \rightarrow C$ gilt: $g_1 \circ f = g_2 \circ f \Rightarrow g_1 = g_2 \Leftrightarrow$ Für alle $C \in Ob \mathcal{C}$ ist $f_*^C : Mor_{\mathcal{C}}(B, C) \rightarrow Mor_{\mathcal{C}}(A, C)$ injektiv.

Isomorphismus $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ Es existiert ein $g : B \rightarrow A$ mit $f \circ g = id_B$ und $g \circ f = id_A$.

Anmerkung. In der Situation von 2.4.11 gilt:

- f Monomorphismus in $\mathcal{C} \Leftrightarrow f$ Epimorphismus in \mathcal{C}^{op} .
- f Isomorphismus in $\mathcal{C} \Leftrightarrow f$ ist Isomorphismus in \mathcal{C}^{op} .
- Ist f ein Isomorphismus und $g : B \rightarrow A$ mit $f \circ g = id_B$ und $g \circ f = id_A$, dann ist g eindeutig bestimmt (und wird mit f^{-1} bezeichnet), denn sind $g_1, g_2 : B \rightarrow A$ mit dieser Eigenschaft $\Rightarrow g_1 = g_1 \circ id_B = g_1 \circ (f \circ g_2) = (g_1 \circ f) \circ g_2 = id_A \circ g_2 = g_2$.
- In Mengen ist f Monomorphismus $\Leftrightarrow f$ injektiv, f Epimorphismus $\Leftrightarrow f$ surjektiv, f Isomorphismus $\Leftrightarrow f$ bijektiv. Im Allgemeinen ist dies für Kategorien, in denen die Morphismen Abbildungen sind, jedoch falsch (vgl. Bsp. 4.13)

Bemerkung 2.4.12. Sei \mathcal{C} eine Kategorie, $A, B \in \text{Ob}\mathcal{C}$, $f : A \rightarrow B$ ein Isomorphismus. Dann ist f ein Monomorphismus und ein Epimorphismus.

Beweis. Seien $C \in \text{Ob}\mathcal{C}$, $g_1, g_2 : C \rightarrow A$ mit $f \circ g_1 = f \circ g_2 \Rightarrow f^{-1} \circ (f \circ g_1) = f^{-1} \circ (f \circ g_2) \Rightarrow (f^{-1} \circ f) \circ g_1 = (f^{-1} \circ f) \circ g_2 \Rightarrow g_1 = g_2 \Rightarrow f$ Monomorphismus. Analog wird gezeigt dass f ein Epimorphismus. ■

Anmerkung. Die Umkehrung von 2.4.12 ist im Allgemeinen falsch, siehe nächstes Beispiel.

Beispiel 2.4.13. a) Sei $\mathcal{C} = \text{Top}$ die Kategorie der Topologischen Räume mit stetigen Abbildungen. Wir betrachten

$$\text{id} : (\mathbb{R}, \text{diskrete Topologie}) \rightarrow (\mathbb{R}, \text{Standardtopologie})$$

Diese ist eine stetige Abbildung, ein Monomorphismus sowie ein Epimorphismus, jedoch kein Isomorphismus (Nicht hömöomorph, da kein stetiges Inverses)

b) Sei $\mathcal{C} = \text{Ringe}$, $f : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Q}$ Inklusion. f ist ein Monomorphismus und ein Epimorphismus (Achtung, denn: Für $g_1, g_2 : \mathbb{Q} \rightarrow R$ Ringhomomorphismus ist ein Ring R mit $g_1 \circ f = g_2 \circ f$, das heißt $g_1|_{\mathbb{Z}} = g_2|_{\mathbb{Z}}$ folgt $g_1 = g_2$ wegen der Universellen Eigenschaft von \mathbb{Q} als Quotientenkörper von \mathbb{Z}), aber kein Isomorphismus. Insbesondere ist ein Epimorphismus in \mathcal{C} im obigen Sinne ("kategorieller Epimorphismus") nicht dasselbe wie ein surjektiver Ringhomomorphismus.

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{Z} & \xrightarrow{f} & \mathbb{Q} \\ & & \downarrow g_1 \quad \downarrow g_2 \\ & & R \end{array}$$

Definition 2.4.14. Seien \mathcal{C}, \mathcal{D} Kategorien, $F, G : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$ Funktoren. Eine *natürliche Transformation* t von F nach G ($t : F \Rightarrow G$) ist eine Familie $(t_A)_{A \in \text{Ob}\mathcal{C}}$ von Morphismen $t_A \in \text{Mor}_{\mathcal{D}}(FA, GA)$, sodass

$$\begin{array}{ccc} FA & \xrightarrow{t_A} & GA \\ F(f) \downarrow & & \downarrow G(f) \\ FB & \xrightarrow{t_B} & GB \end{array}$$

für alle $A, B \in \text{Ob}\mathcal{C}$, $f : A \rightarrow B$ kommutiert. Man sagt häufig auch $t_A : FA \rightarrow GA$ ist natürlich in A .

Beispiel 2.4.15. a) Sei \mathcal{C} eine Kategorie, $A, B \in \text{Ob}\mathcal{C}$, $f : A \rightarrow B$. Dann ist

$$f^* = (f_Y^*)_{Y \in \text{Ob}\mathcal{C}} : \text{Mor}_{\mathcal{C}}(B, -) \Rightarrow \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, -)$$

eine natürliche Transformation von Funktoren $\mathcal{C} \rightarrow \text{Mengen}$, denn für $Y_1, Y_2 \in \text{Ob } \mathcal{C}$, $g : Y_1 \rightarrow Y_2$ kommutiert das Diagramm:

$$\begin{array}{ccc} \text{Mor}_{\mathcal{C}}(B, Y_1) & \xrightarrow{f_{Y_1}^*} & \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, Y_1) \\ g_*^B \downarrow & & \downarrow g_*^A \\ \text{Mor}_{\mathcal{C}}(B, Y_2) & \xrightarrow{f_{Y_2}^*} & \text{Mor}_{\mathcal{C}}(B, Y_2) \end{array}$$

denn: Für $\varphi : B \rightarrow Y_1$ ist

$$(g_*^A \circ f_{Y_1}^*)(\varphi) = g_*^A(\varphi \circ f) = g \circ \varphi \circ f = f_{Y_2}^*(g \circ \varphi) = (f_{Y_2}^* \circ g_*^B)(\varphi)$$

- b) Sei $K\text{-VR}$ die Kategorie der K -Vektorräume über einem festen Körper K (mit linearen Abbildungen als Morphismen). Für $V \in K\text{-VR}$ sei $V^* := \text{Hom}_K(V, K)$ der Dualraum. Die kanonische Abbildung $\varphi_v : V \rightarrow V^{**}$, $w \mapsto \varphi_v(w) : V^* \rightarrow K$, $\psi \mapsto \psi(w)$ ist natürlich in V , denn für $V, W \in K\text{-VR}$, eine lineare Abbildung $f : V \rightarrow W$ kommutiert das Diagramm

$$\begin{array}{ccc} V & \xrightarrow{\varphi_v} & V^{**} \\ \downarrow f & & \downarrow f^{**} \\ W & \xrightarrow{\varphi_w} & W^{**} \end{array}$$

mit $f^{**} : V^{**} \rightarrow W^{**}$, $(\varphi : V^* \rightarrow K) \mapsto f^{**}(\varphi) : W^* \rightarrow K$, $\psi \mapsto \varphi(\underbrace{\psi \circ f}_{\in V^*})$, d.h.

$\varphi : id_V \Rightarrow _^{**}$ ist eine natürliche Transformation von $id : K\text{-VR} \rightarrow K\text{-VR}$ nach $_^{**} : K\text{-VR} \rightarrow K\text{-VR}$.

Definition 2.4.16. Seien \mathcal{C}, \mathcal{D} Kategorien, $F, G : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$ Funktoren, $t : F \Rightarrow G$ eine natürliche Transformation. t heißt *natürliche Äquivalenz* $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ Für alle $A \in \text{Ob } \mathcal{C}$ ist $t_A : FA \rightarrow GA$ ein Isomorphismus. (Notation $t : F \xrightarrow{\sim} G$)

Anmerkung. Ist $t : F \rightarrow G$ eine natürliche Äquivalenz, dann existiert eine natürliche Äquivalenz $t^{-1} : G \xrightarrow{\sim} F$ via $t_A^{-1} = (t_A)^{-1} : GA \rightarrow FA$

Beispiel 2.4.17. Bezeichne $K\text{-VR}_{<\infty}$ die Kategorie der endlichdimensionalen K -VR. Dann ist die natürliche Transformation $\varphi : id \Rightarrow _^{**}$ aus Beispiel 4.15 eine natürliche Äquivalenz.

Definition 2.4.18. Seien \mathcal{C}, \mathcal{D} Kategorien, $F : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$ ein Funktor. F heißt *Kategorienäquivalenz* $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ Es existiert ein Funktor $G : \mathcal{D} \rightarrow \mathcal{C}$ und natürliche Äquivalenzen $F \circ G \xrightarrow{\sim} id_{\mathcal{D}}$, $G \circ F \xrightarrow{\sim} id_{\mathcal{C}}$

Beispiel 2.4.19. Der Funktor $_{-}^* : K\text{-VR}_{<\infty} \rightarrow (K\text{-VR}_{<\infty})^{\text{op}}$, $v \mapsto V^*$ ist eine Kategorienäquivalenz, denn mit $_{-}^{\sim*} : (K\text{-VR}_{<\infty})^{\text{op}} \rightarrow K\text{-VR}_{<\infty}$, $W \mapsto W^*$ gilt offenbar $_{-}^{\sim*} \circ _{-}^* = _{-}^{**}$, und $\varphi : \text{id} \xrightarrow{\sim} _{-}^{**}$ ist eine natürliche Äquivalenz, analog andersherum (d.h. die Kategorie $K\text{-VR}_{<\infty}$ ist selbstdual).

Satz 2.4.20 (Yoneda-Lemma). Sei \mathcal{C} eine Kategorie, $A \in \text{Ob } \mathcal{C}$, $F : \mathcal{C} \rightarrow \text{Mengen}$ ein Funktor. Dann gibt es eine Bijektion

$$\begin{aligned} \Phi : \{ \text{natürliche Transformationen } t : \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, -) \Rightarrow F \} &\rightarrow F(A) \\ t &\mapsto t_a(\text{id}_A) \end{aligned}$$

Beweis. 1. Sei $a \in F(A)$. Wir definieren $S^a : \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, -) \Rightarrow F$ als $s^a = (s_B^a)_{B \in \text{Ob } \mathcal{C}}$ mit

$$s_B^a := F(\varphi)(a) \quad \text{für } \varphi \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B)$$

s^a ist eine natürliche Transformation, denn für $B, C \in \text{Ob } \mathcal{C}$, $f : B \rightarrow C$ kommutiert

$$\begin{array}{ccc} \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B) & \xrightarrow{s_B^a} & F(B) \\ f_*^A \downarrow & & \downarrow F(f) \\ \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, C) & \xrightarrow{s_C^a} & F(C) \end{array}$$

denn:

$$\begin{aligned} (F(f) \circ s_B^a)(\varphi) &= F(f)(s_B^a(\varphi)) = F(f)(F(\varphi)(a)) = F(f \circ \varphi)(a) \\ &= F(f_*^A(\varphi))(a) = s_C^a(f_*^A(\varphi)) \end{aligned}$$

2. Setze

$$\begin{aligned} \Psi : F(A) &\rightarrow \{ \text{natürliche Transformationen } t : \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, -) \Rightarrow F \} \\ a &\mapsto s^a \end{aligned}$$

Dann sind Φ, Ψ invers zueinander, denn: Für $a \in F(A)$, $t : \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, -) \Rightarrow F$ gilt

$$(\Phi \circ \Psi)(a) = \Phi(s^a) = s_A^a(\text{id}_A) = F(\text{id}_A)(a) = \text{id}_{FA}(a) = a$$

und

$$(\Psi \circ \Phi)(t) = \Psi(t_A(\text{id}_A))$$

und für $B \in \text{Ob } \mathcal{C}$, $\varphi \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B)$ gilt wegen der Kommutativität von

$$\begin{array}{ccc} \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, A) & \xrightarrow{t_A} & F(A) \\ \varphi_*^A \downarrow & & \downarrow F(\varphi) \\ \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B) & \xrightarrow{t_B} & F(B) \end{array}$$

$$(\Psi(t_A(\text{id}_A)))_B(\varphi) = s_B^{t_A(\text{id}_A)}(\varphi) = F(\varphi)(t_A(\text{id}_A)) = t_B(\varphi^A(\text{id}_A)) = t_B(\varphi)$$

d.h. $(\Psi \circ \Phi)(t) = t$ ■

Folgerung 2.4.21. Sei \mathcal{C} eine Kategorie, $A, B \in \text{Ob}\mathcal{C}$. Dann ist die Abbildung

$$\begin{aligned} \Psi : \text{Mor}_{\mathcal{C}}(B, A) &\longrightarrow \{\text{natürliche Transformationen } \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, -) \Rightarrow \text{Mor}_{\mathcal{C}}(B, -)\} \\ \psi : B \rightarrow A &\mapsto \psi^* : \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, -) \rightarrow \text{Mor}_{\mathcal{C}}(B, -) \end{aligned}$$

bijektiv.

Beweis. Wende 2.4.20 auf $F = \text{Mor}_{\mathcal{C}}(B, -)$ and. In der Notation des Beweises von 4.20 ist $\Psi(\psi) = s^\psi = (s_C^\psi)_{C \in \text{Ob}\mathcal{C}}$, wobei für $C \in \text{Ob}\mathcal{C}$, $\varphi \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, C)$ gilt:

$$(s_C^\psi)(\varphi) = \text{Mor}_{\mathcal{C}}(B, -)(\varphi)(\psi) = \varphi_*^B(\psi) = \varphi \circ \psi = \psi_C^*(\varphi)$$

d.h. $\Psi(\psi) = \psi^*$. ■

Anmerkung. • Folgerung 2.4.21 liefert einen sogenannten volltreuen Funktor $\mathcal{C}^{\text{op}} \rightarrow \text{Funk}(\mathcal{C}, \text{Mengen})$, wobei $A \mapsto \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, -)$, wobei $\text{Funk}(\mathcal{C}, \text{Mengen})$ die Funktorkategorie von \mathcal{C} nach Mengen bezeichnet (Objekte sind Funktoren: $\mathcal{C} \rightarrow \text{Mengen}$, und Morphismen die natürlichen Transformationen) (*Yoneda-Einbettung*)

- Folgerung 2.4.21 liefert insbesondere eine Verallgemeinerung des Satzes von Cayley aus der Gruppentheorie: Für eine Gruppe G ist $G \hookrightarrow S(G)$, $g \mapsto \tau_g$ (Linkstranslation mit $g \in G$) ein injektiver Grupphomomorphismus. Wende 2.4.21 an auf:

- $\mathcal{C} = \text{Kategorie mit } \text{Ob}\mathcal{C} = \{\cdot\}, \text{Mor}_{\mathcal{C}}(\cdot, \cdot) = G$
- $A = B = \cdot$

und erhalte eine Bijektion

$$\begin{aligned} G = \text{Mor}_{\mathcal{C}}(\cdot, \cdot) &\longrightarrow \{\text{natürliche Transformationen } \text{Mor}_{\mathcal{C}}(\cdot, -) \Rightarrow \text{Mor}_{\mathcal{C}}(\cdot, -)\} \\ g &\mapsto g^* : \text{Mor}_{\mathcal{C}}(\cdot, -) \Rightarrow \text{Mor}_{\mathcal{C}}(\cdot, -) \hat{=} \tau_g \end{aligned}$$

2.5 Abelsche Kategorien

Definition 2.5.1. Sei \mathcal{C} eine Kategorie, $A \in \text{Ob } \mathcal{C}$. A heißt

Anfangsobjekt $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ Für alle $M \in \text{Ob } \mathcal{C}$ ist $\text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, M)$ einelementig

Endobjekt $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ Für alle $M \in \text{Ob } \mathcal{C}$ ist $\text{Mor}_{\mathcal{C}}(M, A)$ einelementig

Anmerkung. Falls sie existieren, sind Anfangs- und Endobjekte eindeutig bestimmt bis auf eindeutigen Isomorphismus (denn: Sind A_1, A_2 Anfangsobjekte, dann ist $\text{Mor}_{\mathcal{C}}(A_1, A_2) = \{\alpha\}$, $\text{Mor}_{\mathcal{C}}(A_2, A_1) = \{\beta\}$, $\text{Mor}_{\mathcal{C}}(A_1, A_1) = \{\text{id}_{A_1}\}$ und analog $\text{Mor}_{\mathcal{C}}(A_2, A_2) = \{\text{id}_{A_2}\}$, insbesondere ist $\beta \circ \alpha = \text{id}_{A_1}$, $\alpha \circ \beta = \text{id}_{A_2}$).

Definition 2.5.2. Sei \mathcal{C} eine Kategorie. $0 \in \text{Ob } \mathcal{C}$ heißt *Nullobjekt* $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ 0 ist sowohl Anfangs- als auch Endobjekt. Existiert in \mathcal{C} ein Nullobjekt 0 , so enthält $\text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B)$ für alle $A, B \in \text{Ob } \mathcal{C}$ ein ausgezeichnetes Element, den “Nullmorphismus“ $A \rightarrow 0 \rightarrow B$

Anmerkung. Der Nullmorphismus in $\text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B)$ ist unabhängig von der Wahl des Nullobjekts:

$$\begin{array}{ccccc} A & \longrightarrow & 0 & \longrightarrow & B \\ & \searrow & \downarrow & \nearrow & \\ & & \tilde{0} & & \end{array}$$

Beispiel 2.5.3. a) In Mengen ist \emptyset ein Anfangsobjekt, jede einelementige Menge ist ein Endobjekt, insbesondere existiert in Mengen kein Nullobjekt

b) in Ringe ist \mathbb{Z} ein Anfangsobjekt, und der Nullring ist ein Endobjekt. In Ringe existiert ebenfalls ein Nullobjekt

c) In $R\text{-Mod}$ ist der Nullmodul ein Nullobjekt.

Definition 2.5.4. Sei \mathcal{C} eine Kategorie. $(A_i)_{i \in I}$ eine Familie von Objekten aus \mathcal{C} . Ein *Produkt* $(A, (p_i)_{i \in I})$ von $(A_i)_{i \in I}$ ist ein Objekt $A \in \mathcal{C}$ zusammen mit Morphismen $p_i : A \rightarrow A_i$, sodass für alle $B \in \text{Ob } \mathcal{C}$ die Abbildung

$$\text{Mor}_{\mathcal{C}}(B, A) \rightarrow \prod_{i \in I} \text{Mor}_{\mathcal{C}}(B, A_i), \quad f \mapsto (p_i \circ f)_{i \in I}$$

bijektiv ist, das heißt für jede Familie $(f_i)_{i \in I}$ von Morphismen $f_i : B \rightarrow A_i$ existiert ein eindeutig bestimmtes $f : B \rightarrow A$ mit $f_i = p_i \circ f$ für alle $i \in I$.

Bemerkung 2.5.5. Sei \mathcal{C} eine Kategorie, $(A_i)_{i \in I}$ eine Familie von Objekten aus \mathcal{C} , $(A, (p_i)_{i \in I})$, $(A', (p'_i)_{i \in I})$, Produkte von $(A_i)_{i \in I}$. Dann existiert ein eindeutig bestimmter Isomorphismus $f : A \rightarrow A'$, sodass für alle $i \in I$ gilt: $p'_i \circ f = p_i$

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{f} & A' \\ & \searrow p_i & \swarrow p'_i \\ & A_i & \end{array}$$

(kurz: A, A' sind kanonisch isomorph. Wir sprechen daher oft von “dem Produkt” und schreiben $A = \prod_{i \in I} A_i$)

- Beweis.* 1. Wir wenden die Universelle Eigenschaft auf das Produkt $(A', (p'_i)_{i \in I})$, $B = A$, $f_i = p_i \Rightarrow$ Wir erhalten einen eindeutig bestimmten Morphismus $f : A \rightarrow A'$ mit $p'_i \circ f = p_i$ für alle $i \in I$. Analog: Wende die Universelle Eigenschaft auf das Produkt $(A, (p_i)_{i \in I})$, $B = A'$, $f_i = p'_i \Rightarrow$ Es existiert genau ein $g : A' \rightarrow A$ mit $p_i \circ g = p'_i$ für alle $i \in I$.
2. Es gilt $g \circ f = id_A$, $f \circ g = id_{A'}$ (d.h. f ist ein Isomorphismus), denn: Für alle $i \in I$ ist $p_i \circ (g \circ f) = (p_i \circ g) \circ f = p'_i \circ f = p_i$. Wende die Universelle Eigenschaft auf das Produkt $(A, (p_i)_{i \in I})$, $B = A$, $f_i = p_i$ an: Es existiert genau ein $h : A \rightarrow A$ mit $p_i \circ h = p_i$ für alle $i \in I$ (nämlich $h = id_A$). Somit ist $id_A = g \circ f$. Analog: $f \circ g = id_{A'}$. ■

Beispiel 2.5.6. a) In Mengen ist das Produkt das kartesische Produkt.

b) In $R\text{-Mod}$ ist das Produkt das direkte Produkt.

c) In der Kategorie der endlichen abelschen Gruppen existiert kein Produkt der Familie $\left(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}\right)_{n \in \mathbb{N}}$ (Übung)

Bemerkung + Definition 2.5.7. Sei \mathcal{C} eine Kategorie, $(A_i)_{i \in I}$ eine Familie von Objekten aus \mathcal{C} . Ein *Koprodukt* $(A, (q_i)_{i \in I})$ von $(A_i)_{i \in I}$ ist ein Objekt $A \in \text{Ob } \mathcal{C}$ zusammen mit Morphismen $q_i : A_i \rightarrow A$, sodass $(A, (q_i)_{i \in I})$ Ein Produkt von $(A_i)_{i \in I}$ in \mathcal{C}^{op} ist, das heißt für alle $B \in \text{Ob } \mathcal{C}$ ist die Abbildung

$$\text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B) \rightarrow \prod_{i \in I} \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A_i, B), \quad f \mapsto (f \circ q_i)_{i \in I}$$

bijektiv. Falls es existiert ist ein Koprodukt von $(A_i)_{i \in I}$ eindeutig bestimmt bis auf Isomorphie (analog zu 2.5.5). Wir sprechen dann von dem *Koprodukt* und schreiben $A = \bigoplus_{i \in I} A_i$ ($= \coprod_{i \in I} A_i$)

Beispiel 2.5.8. a) In Mengen ist das Koprodukt die disjunkte Vereinigung.

b) in $R\text{-Mod}$ ist das Koprodukt die direkte Summe.

c) In der Kategorie der Gruppen existiert ein Koprodukt, das sogenannte freie Produkt (siehe Zettel Algebra 1)

Definition 2.5.9. Sei \mathcal{A} eine Kategorie. \mathcal{A} heißt *additiv*, wenn gilt:

(K1) \mathcal{A} hat ein Nullobjekt,

(K2) In \mathcal{A} existieren endliche Produkte

(K3) Für alle $A, B \in \text{Ob } \mathcal{A}$ trägt $\text{Mor}_{\mathcal{A}}(A, B)$ die Struktur einer abelschen Gruppe mit dem Nullmorphimus als neutrales Element, sodass für alle $A, B, C \in \text{Ob } \mathcal{A}$ die Verknüpfung:

$$\text{Mor}_{\mathcal{A}}(B, C) \times \text{Mor}_{\mathcal{A}}(A, B) \xrightarrow{\circ} \text{Mor}_{\mathcal{A}}(A, C)$$

bilinear ist.

Anmerkung. In einer additiven Kategorie \mathcal{A} schreiben wir auch $\text{Hom}_{\mathcal{A}}$ für $\text{Mor}_{\mathcal{A}}$.

Beispiel 2.5.10. a) $R\text{-Mod}$ ist eine additive Kategorie

b) Ringe sind keine additive Kategorie (kein Nullobjekt, vgl 2.5.3(b)).

Satz 2.5.11. Sei \mathcal{A} eine additive Kategorie, $A_1, A_2 \in \text{Ob } \mathcal{A}$, $(A_1 \times A_2, (p_1, p_2))$ Produkt von $A_1 \times A_2$, $i_1 : A_1 \rightarrow A_1 \times A_2$ sei via der Univesellen Eigenschaft gegeben durch $\text{id}_{A_1} : A_1 \rightarrow A_1, 0 : A_1 \rightarrow A_2$. Analog sei $i_2 : A_2 \rightarrow A_1 \times A_2$ sei via der Univesellen Eigenschaft gegeben durch $0 : A_2 \rightarrow A_1, \text{id} : A_2 \rightarrow A_2$. Dann ist $(A_1 \times A_2, (i_1, i_2))$ ein Koprodukt von A_1, A_2 in \mathcal{A} .

Beweis. 1. Behauptung: $\iota_1 \circ p_1 + \iota_2 \circ p_2 : A_1 \times A_2 \rightarrow A_1 \times A_2$ stimmt mit $\text{id}_{A_1 \times A_2}$ überein. Denn: Es ist

$$p_1 \circ (\iota_1 \circ p_1 + \iota_2 \circ p_2) = \underbrace{p_1 \circ \iota_1}_{=\text{id}_{A_1}} \circ p_1 + \underbrace{p_1 \circ \iota_2}_{=0: A_2 \rightarrow A_1} \circ p_2 = p_1 = p_1 \circ \text{id}_{A_1 \times A_2}$$

Analog:

$$p_2 \circ (\iota_1 \circ p_1 + \iota_2 \circ p_2) = p_2 = p_2 \circ \text{id}_{A_1 \times A_2} \xrightarrow{UE} \iota_1 \circ p_1 + \iota_2 \circ p_2 = \text{id}_{A_1 \times A_2}$$

2. Universelle Eigenschaft des Koprodukts: Sei $B \in \text{Ob } \mathcal{A}$, $f_1 : A_1 \rightarrow B$, $f_2 : A_2 \rightarrow B$

Existenz: Wir setzen $f := f_1 \circ p_1 + f_2 \circ p_2 : A_1 \times A_2 \rightarrow B$. Dann ist

$$f \circ \iota_1 = f_1 \circ \underbrace{p_1 \circ \iota_1}_{=\text{id}_{A_1}} + f_2 \circ \underbrace{p_2 \circ \iota_1}_{=0: A_1 \rightarrow A_2} = f_1.$$

Analog: $f \circ \iota_2 = f_2$.

Eindeutigkeit: Sei $f' : A_1 \times A_2 \rightarrow B$ mit $f' \circ \iota_1 = f_1$, $f' \circ \iota_2 = f_2$. Dann folgt

$$f' = f' \circ (\iota_1 \circ p_1 + \iota_2 \circ p_2) = \underbrace{f' \circ \iota_1}_{=f_1} \circ p_1 + \underbrace{f' \circ \iota_2}_{=f_2} \circ p_2 = f_1 \circ p_1 + f_2 \circ p_2 = f$$

Folgerung 2.5.12. Sei \mathcal{A} eine Additive Kategorie. Dann existieren in \mathcal{A} endliche Koprodukte.

Definition 2.5.13. Seien \mathcal{A}, \mathcal{B} additive Kategorien, $F : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ Funktor. F heißt *additiv* “ $\stackrel{\text{Def}}{\Rightarrow}$ für alle $A, A' \in \text{Ob } \mathcal{A}$ ist eine Abbildung:

$$\text{Mor}_{\mathcal{A}}(A, A') \rightarrow \text{Mor}_{\mathcal{B}}(FA, FA'), \quad f \mapsto F(f)$$

ein Homomorphismus abelscher Gruppen.

Anmerkung. F additiv $\Rightarrow F(A \oplus A') = F(A) \oplus F(A')$ (Übungen)

Bemerkung + Definition 2.5.14. Sei \mathcal{A} eine additive Kategorie, $A, A' \in \text{Ob } \mathcal{A}$, $f : A \rightarrow A'$. Ein *Kern* (B, ι) von f ist ein Objekt $B \in \text{Ob } \mathcal{A}$ zusammen mit einem Morphismus $\iota : B \rightarrow A$, sodass $f \circ \iota = 0$ ist und für alle $C \in \text{Ob } \mathcal{A}$ die Abbildung:

$$\text{Hom}_{\mathcal{A}}(C, B) \longrightarrow \{g \in \text{Hom}_{\mathcal{A}}(C, A) \mid f \circ g = 0\}, \quad h \mapsto \iota \circ h$$

bijektiv ist, das heißt für alle $g : C \rightarrow A$ mit $f \circ g = 0$ existiert ein eindeutig bestimmter Morphismus $h : C \rightarrow B$ mit $g = \iota \circ h$:

$$\begin{array}{ccccc} B & \xrightarrow{\iota} & A & \xrightarrow{f} & A' \\ \uparrow h & \nearrow g & & & \\ C & & & & \end{array}$$

Ist (B', ι') ein weiterer Kern von f , dann existiert ein eindeutig bestimmte Isomorphismus $\alpha : B \rightarrow B'$ mit $\iota = \iota' \circ \alpha$:

$$\begin{array}{ccc} B & \xrightarrow{\alpha} & B' \\ & \searrow \iota & \swarrow \iota' \\ & A & \end{array}$$

Wir nennen (B, ι) daher auch “den Kern“ von f und schreiben $\ker f = (B, \iota)$ beziehungsweise kürzer: $\ker f = B$ oder auch $\ker f = \iota$

Anmerkung. Die Existenz von Kernen ist im Allgemeinen nicht gegeben

Beispiel 2.5.15. In $R\text{-Mod}$ ist der kategorielle Kern gegeben durch die Inklusion des gewöhnlichen Kerns:

$$\begin{array}{ccc} \ker f & \xhookrightarrow{\iota} & A \xrightarrow{f} A' \\ \uparrow h & \nearrow g & \\ C & & \end{array}$$

$f \circ g = 0 \Rightarrow \text{im } g \subseteq \ker f$ setze $h := g|_{\ker f} : C \in \ker f$, dann ist $\iota \circ h = g$ und h ist eindeutig mit dieser Bedingung.

Bemerkung 2.5.16. Sei \mathcal{A} eine additive Kategorie, $A, A' \in \text{Ob } \mathcal{A}$, $f : A \rightarrow A'$, $(\ker f, \iota)$ Kern von f . Dann ist ι ein Monomorphismus.

Beweis. Seien $h_1, h_2 : C \rightarrow \ker f$ mit $\iota \circ h_1 = \iota \circ h_2 =: g \Rightarrow f \circ g = f \circ \iota \circ h_1 = 0$ Dann existiert ein eindeutig bestimmtes $h : C \rightarrow \ker f$ mit $g = \iota \circ h \Rightarrow h = h_1 = h_2$. ■

Bemerkung + Definition 2.5.17. Dual zum Kern definiert man den Kokern (Notation: $\text{coker } f$). Die Aussagen 2.5.14, 2.5.16 gelten dual.

Definition 2.5.18. Sei \mathcal{A} eine additive Kategorie, $A, A' \in \text{Ob } \mathcal{A}$, $f : A \rightarrow A'$

$\text{im } f := \ker(\text{coker } f)$ heißt das *Bild* von f

$\text{coim } f := \text{coker}(\ker f)$ heißt das *Kobild* von f .

Anmerkung. $\text{im } f$ kommt mit einem Monomorphismus $\iota' : \text{im } f \rightarrow A'$, $\text{coim } f$ mit einem Epimorphismus $q' : A \rightarrow \text{coim } f$.

Beispiel 2.5.19. Seien $\mathcal{A} = R\text{-Mod}$, $f : A \rightarrow A'$ R -Modulhomomorphismus. Dann ist

$$\text{im } f = \ker \left(A' / \text{im } f, \quad A' \rightarrow A' / \text{im } f \right) = (\text{im } f, \text{im } f \hookrightarrow A')$$

$$\text{coim } f = \text{coker}(\ker f, \ker f \rightarrow A) = \left(A / \ker f, \quad A \rightarrow A / \ker f \right)$$

Bemerkung 2.5.20. Sei \mathcal{A} eine additive Kategorie, $A, B \in \text{Ob } \mathcal{A}$, $f : A \rightarrow B$, sodass $\ker f, \text{coker } f, \text{im } f, \text{coim } f$ existieren $(\text{im } f, \iota')$ Bild von f , $(\text{coim } f, q')$ Kobild von f . Dann existiert ein eindeutig bestimmter Morphismus $\bar{f} : \text{coim } f \rightarrow \text{im } f$ mit $f = \iota' \circ \bar{f} \circ q'$

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{f} & B \\ \downarrow q' & & \uparrow \iota' \\ \text{coim } f & \xrightarrow{\bar{f}} & \text{im } f \end{array}$$

Beweis.

$$\begin{array}{ccccccc}
 \ker f & \xrightarrow{\iota} & A & \xrightarrow{f} & B & \xrightarrow{q} & \operatorname{coker} f \\
 & & \downarrow q' & & \uparrow \iota' & & \\
 & & \operatorname{coim} f = \operatorname{coker} \iota & \xrightarrow{\bar{f}} & \ker q = \operatorname{im} f & &
 \end{array}$$

1. Existenz: Wegen $f \circ \iota = 0$ existiert nach der Universellen Eigenschaft von coker ein $f' : \operatorname{coim} f \rightarrow B$ mit $f = f' \circ q'$. Es ist $q \circ f = 0$, also $q \circ f' \circ q' = q \circ f = 0 = 0 \circ q'$. Da q' ein Epimorphismus ist, folgt $q \circ f' = 0$. Nach der Universellen Eigenschaft des Kerns, existiert ein $\bar{f} : \operatorname{coim} f \rightarrow \operatorname{im} f$ mit $\iota' \circ \bar{f} = f'$, also $\iota' \circ \bar{f} \circ q' = f' \circ q' = f$.
2. Eindeutigkeit: Sei $\tilde{f} : \operatorname{coim} f \rightarrow \operatorname{im} f$ mit $\iota' \circ \tilde{f} \circ q' = f = \iota' \circ \bar{f} \circ q'$, woraus, wegen ι' Monomorphismus zunächst $\tilde{f} \circ q' = \bar{f} \circ q'$ folgt und dann, wegen q' Epimorphismus, $\tilde{f} = \bar{f}$. ■

Definition 2.5.21. Sei \mathcal{A} eine additive Kategorie. \mathcal{A} heißt *abelsche Kategorie*, wenn gilt:

(Ab1) Jeder Morphismus in \mathcal{A} hat Kern und Kokern

(Ab2) (*Homomorphiesatz*). Für jeden Morphismus $f : A \rightarrow A'$ in \mathcal{A} ist der induzierte Morphismus

$$\bar{f} : \operatorname{coim} f \rightarrow \operatorname{im} f$$

ein Isomorphismus

Beispiel 2.5.22. a) $R\text{-Mod}$ ist eine abelsche Kategorie

b) Die Kategorie der freien \mathbb{Z} -Moduln ist additiv, aber nicht abelsch: (Ab1) ist nicht erfüllt.

c) Die Kategorie der abelschen topologischen Gruppen ist eine additive Kategorie, die (Ab1) erfüllt, aber nicht (Ab2): $\operatorname{id} : (\mathbb{R}, +) \rightarrow (\mathbb{R}, +)$ (links mit der diskreten Topologie und rechts mit der Standardtopologie) $\bar{\operatorname{id}} = \operatorname{id}$ ist kein Isomorphismus.

Anmerkung. Ist \mathcal{A} eine abelsche Kategorie, dann ist auch $\mathcal{A}^{\operatorname{op}}$ abelsche Kategorie (einziger nichttrivialer Punkt: Existenz endlicher Produkte, was jedoch aus 2.5.11 folgt).

Satz 2.5.23. Sei \mathcal{A} eine abelsche Kategorie, $A, A' \in \operatorname{Ob} \mathcal{A}$, $f : A \rightarrow A'$ Mono- und Epimorphismus. Dann ist \bar{f} ein Isomorphismus.

Beweis. • Da f ein Monomorphismus ist, ist $(0, 0 \rightarrow A)$ ein Kern von f , denn:

$$\begin{array}{ccc} 0 & \longrightarrow & A \xrightarrow{f} A' \\ \uparrow \text{red dashed} & \nearrow g & \\ C & \xrightarrow{\text{red } 0} & \end{array} \quad f \circ g = 0 = f \circ 0 \xrightarrow{f \text{ Mono}} g = 0$$

- $\text{coim } f = \text{coker}(0 \rightarrow A) = (A, \text{id}_A)$, denn

$$\begin{array}{ccc} 0 & \longrightarrow & A \xrightarrow{\text{id}_A} A \\ & & \searrow g \\ & & C \end{array} \quad \text{red dashed } g \downarrow$$

Analog ist $\text{im } f = (A', \text{id}_{A'})$, also ist $\bar{f} = f$ ein Isomorphismus nach (Ab2). ■

Bemerkung 2.5.24. Sei \mathcal{A} eine abelsche Kategorie, $A, A' \in \text{Ob } \mathcal{A}$, $f : A \rightarrow A'$. Dann gilt:

- a) f Monomorphismus $\Leftrightarrow \ker f = 0$
- b) f Epimorphismus $\Leftrightarrow \text{coker } f = 0$

Beweis. Übungsaufgabe. ■

Definition 2.5.25. Sei \mathcal{A} eine abelsche Kategorie, $A, A', A'' \in \text{Ob } \mathcal{A}$.

$$A' \xrightarrow{f} A \xrightarrow{g} A''$$

heißt eine *exakte Folge* $\Leftrightarrow \text{im } f \cong \ker g$ in dem Sinne, dass es einen Isomorphismus $\text{im } f \xrightarrow{\alpha} \ker g$ gibt, sodass das Diagramm

$$\begin{array}{ccc} & A & \\ \iota' \nearrow & & \nwarrow \iota \\ \text{im } f & \xrightarrow{\alpha} & \ker g \end{array}$$

kommutiert (wobei $(\ker g, \iota)$ Kern von g , $(\text{im } f, \iota')$ Bild von f)

Satz 2.5.26. Sei \mathcal{A} eine abelsche Kategorie. Dann gilt:

- a) In \mathcal{A} gilt das Fünferlemma
- b) In \mathcal{A} gilt das Schlangenlemma

- c) Eine Folge $M' \xrightarrow{f} M \xrightarrow{g} M'' \longrightarrow 0$ in \mathcal{A} ist genau dann exakte, wenn für jedes Objekt $N \in \text{Ob } \mathcal{A}$ die Folge abelscher Gruppen

$$0 \longrightarrow \text{Hom}_{\mathcal{A}}(M'', N) \longrightarrow \text{Hom}_{\mathcal{A}}(M, N) \longrightarrow \text{Hom}_{\mathcal{A}}(M', N)$$

exakte ist.

- d) Eine Folge $0 \longrightarrow N' \longrightarrow N \longrightarrow N''$ in \mathcal{A} ist genau dann exakte, wenn für jedes $M \in \text{Ob } \mathcal{A}$ die Folge abelscher Gruppen

$$0 \longrightarrow \text{Hom}_{\mathcal{A}}(M, N') \longrightarrow \text{Hom}_{\mathcal{A}}(M, N) \longrightarrow \text{Hom}_{\mathcal{A}}(M, N'')$$

exakt ist.

Beweis. a) Stacks-Project: 12.5.17, b) 12.5.20

c), d) werden in 2.6 für $R\text{-Mod}$ bewiesen. ■

Definition 2.5.27. Seien \mathcal{A}, \mathcal{B} abelsche Kategorien, $F : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ ein additiver Funktor. F heißt

exakt $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ F überführt kurze exakte Folgen in \mathcal{A} in kurze exakte Folgen in \mathcal{B}

links-exakt $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ Für jede exakte Folge $0 \longrightarrow M' \longrightarrow M \longrightarrow M''$ in \mathcal{A} ist die Folge

$$0 \longrightarrow FM' \longrightarrow FM \longrightarrow FM''$$

exakt

rechts-exakt $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ Für jede exakte Folge $M' \longrightarrow M \longrightarrow M'' \longrightarrow 0$ in \mathcal{A} ist die Folge

$$FM' \longrightarrow FM \longrightarrow FM'' \longrightarrow 0$$

exakt.

Anmerkung. F ist exakt $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ F ist links- und rechts-exakt \Leftrightarrow Für alle exakten Folgen $A' \longrightarrow A \longrightarrow A''$ in \mathcal{A} ist $FA' \longrightarrow FA \longrightarrow FA''$ exakt (Übung)

Definition 2.5.28. Sei \mathcal{A} eine abelsche Kategorie, $I, P \in \text{Ob } \mathcal{A}$. I heißt

injektiv $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ Für jeden Monomorphismus $\iota : A \hookrightarrow B$ und jeden Morphismus $f : A \rightarrow I$ existiert ein Morphismus $g : B \rightarrow I$ mit $g \circ \iota = f$, d.h. $\iota_I^* : \text{Hom}_{\mathcal{A}}(B, I) \rightarrow \text{Hom}_{\mathcal{A}}(A, I)$ ist surjektiv.

$$\begin{array}{ccc} A & \xhookrightarrow{\iota} & B \\ \downarrow f & \swarrow g & \\ I & & \end{array}$$

P heißt

projektiv $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow} P$ ist injektiv in \mathcal{A}^{op} , d.h. für jeden Epimorphismus $p : B \twoheadrightarrow A$ und jeden Morphismus $f : P \rightarrow A$ existiert ein Morphismus $g : P \rightarrow B$ mit $p \circ g = f$

$$\begin{array}{ccc} & P & \\ g \swarrow & & \downarrow f \\ B & \xrightarrow{p} & A \end{array}$$

Bemerkung 2.5.29. Sei \mathcal{A} eine abelsche Kategorie, $I \in \text{Ob } \mathcal{A}$. Dann sind äquivalent:

- i) I ist injektiv
- ii) Der Funktor $\text{Hom}_{\mathcal{A}}(-, I) : \mathcal{A}^{\text{op}} \rightarrow \mathbb{Z}\text{-Mod}$ ist exakt

Beweis. Nach 2.5.26 c) ist für alle exakten Folgen $A' \longrightarrow A \longrightarrow A'' \longrightarrow 0$ in \mathcal{A} ist auch die Folge

$$0 \longrightarrow \text{Hom}_{\mathcal{A}}(A'', I) \longrightarrow \text{Hom}_{\mathcal{A}}(A, I) \longrightarrow \text{Hom}_{\mathcal{A}}(A', I)$$

exakt. Somit genügt es zu zeigen, dass I injektiv \Leftrightarrow Für alle exakten Folgen

$$0 \longrightarrow A' \xrightarrow{\iota} A \quad \text{in } \mathcal{A} \text{ ist}$$

$$\text{Hom}_{\mathcal{A}}(A, I) \xrightarrow{\iota_I^*} \text{Hom}_{\mathcal{A}}(A', I) \longrightarrow 0$$

eine exakte Folge in $\mathbb{Z}\text{-Mod}$, d.h. $\iota_I^* : \text{Hom}_{\mathcal{A}}(A, I) \longrightarrow \text{Hom}_{\mathcal{A}}(A', I)$ ist surjektiv. Die Exaktheit von $0 \longrightarrow A' \xrightarrow{\iota} A$ ist äquivalent dazu, dass ι ein Monomorphismus ist. ■

Bemerkung 2.5.30. Sei \mathcal{A} eine abelsche Kategorie, $P \in \text{Ob } \mathcal{A}$. Dann sind äquivalent:

- i) P ist projektiv
- ii) Der Funktor $\text{Hom}_{\mathcal{A}}(P, -) : \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{Z}\text{-Mod}$ ist exakt.

Definition 2.5.31. Seien \mathcal{C}, \mathcal{D} (additive) Kategorien, $F : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$, $G : \mathcal{D} \rightarrow \mathcal{C}$ (additive) Funktoren. Dann heißt F *linksadjungiert* zu G (und G *rechtsadjungiert* zu F) $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ Es gibt eine natürliche Äquivalenz

$$\text{Mor}_{\mathcal{C}}(-, G-) \xrightarrow{\sim} \text{Mor}_{\mathcal{D}}(F-, -)$$

von Bifunktoren $\mathcal{C}^{\text{op}} \times \mathcal{D} \rightarrow \text{Mengen}$ (bzw. $\mathcal{C}^{\text{op}} \times \mathcal{D} \rightarrow \mathbb{Z}\text{-Mod}$ im additiven Fall).
Notation: $F \dashv G$

Beispiel 2.5.32. $F : \text{Mengen} \rightarrow K\text{-VR}$, $M \mapsto K^{(M)}$, $G : K\text{-VR} \rightarrow \text{Mengen}$ der Vergissfunktors. Es ist

$$\text{Mor}_{\text{Mengen}}(M, V) \xrightarrow[\text{Bij.}]{\sim} \text{Mor}_{K\text{-VR}}(K^{(M)}, V)$$

für alle Mengen M und $K\text{-VR}$, wobei die naheliegenden Diagramme kommutieren, d.h. wir haben eine natürliche Äquivalenz.

$$\text{Mor}_{\text{Mengen}}(-, G-) \xrightarrow{\sim} \text{Mor}_{K\text{-VR}}(F-, -)$$

also $F \dashv G$.

Satz 2.5.33. Seien \mathcal{A}, \mathcal{B} abelsche Kategorien, $F : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$, $G : \mathcal{B} \rightarrow \mathcal{A}$ additive Funktoren mit $F \dashv G$. Dann gilt:

- a) F ist rechtsexakt
- b) Ist F exakt, dann überführt G injektive Objekte aus \mathcal{B} in injektive Objekte aus \mathcal{A} .
- c) G ist linksexakt
- d) Ist G exakt, dann überführt F projektive Objekte aus \mathcal{A} in projektive Objekte aus \mathcal{B} .

Beweis. a) Sei $A' \longrightarrow A \longrightarrow A'' \longrightarrow 0$ eine exakte Folge in \mathcal{A} . Nach 2.5.26 c) ist

$$0 \longrightarrow \text{Hom}_{\mathcal{A}}(A'', GB) \longrightarrow \text{Hom}_{\mathcal{A}}(A, GB) \longrightarrow \text{Hom}_{\mathcal{A}}(A', GB)$$

exakt für alle $B \in \text{Ob } \mathcal{B}$ und, da $F \dashv G$ ist

$$0 \longrightarrow \text{Hom}_{\mathcal{B}}(FA'', B) \longrightarrow \text{Hom}_{\mathcal{B}}(FA, B) \longrightarrow \text{Hom}_{\mathcal{B}}(FA', B)$$

exakt für alle $B \in \text{Ob } \mathcal{B}$. Damit ist nach 2.5.26 c)

$$FA' \longrightarrow FA \longrightarrow FA'' \longrightarrow 0$$

exakt.

- b) Sei $I \in \text{Ob } \mathcal{B}$ injektiv. Es ist zu zeigen, dass $GI \in \text{Ob } \mathcal{A}$ injektiv ist, d.h. der Funktor $\text{Hom}_{\mathcal{A}}(-, GI) : \mathcal{A}^{\text{op}} \rightarrow \mathbb{Z}\text{-Mod}$ ist exakt. Allerdings gilt $\text{Hom}_{\mathcal{A}}(-, GI) \xrightarrow{\sim} \text{Hom}_{\mathcal{B}}(F-, I)$ und letzterer ist exakt, da F exakt und I injektiv.

Definition 2.5.34. Seien \mathcal{C}, \mathcal{D} Kategorien, $F : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$ ein Funktor. F heißt *volltreu*
 $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ Für alle $A, B \in \text{Ob } \mathcal{C}$ ist die Abb $\text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B) \rightarrow \text{Mor}_{\mathcal{D}}(FA, FB), f \mapsto F(f)$
 bijektiv.

Satz 2.5.35 (Einbettungssatz von Freyd-Mitchell). *Sei \mathcal{A} eine abelsche Kategorie (dh. $\text{Ob } \mathcal{A}$ ist eine Menge) Dann existiert ein Ring R und ein volltreuer exakter Funktor $F : \mathcal{A} \rightarrow R\text{-Mod}$*

Anmerkung. • F induziert eine Äquivalenz zwischen \mathcal{A} und einer vollen Unterkategorie von $R\text{-Mod}$ (das heißt \mathcal{C} ist eine Unterkategorie von $R\text{-Mod}$ mit $\text{Hom}_{\mathcal{C}}(A, B) = \text{Hom}_{R\text{-Mod}}(A, B)$ für alle $A, B \in \text{Ob } \mathcal{C}$)

• In \mathcal{A} berechnete Kerne und Kokerne entsprechen über diese Äquivalenz Kernen und Kokernen in $R\text{-Mod}$. (Achtung: injektive/projektive Objekte korrespondieren im Allgemeinen nicht zu injektiven/projektiven R -Moduln)

2.6 Projektive und Injektive Moduln

Satz 2.6.1. Sei $0 \longrightarrow N' \xrightarrow{f} N \xrightarrow{g} N''$ eine Folge von R -Moduln. Dann sind äquivalent:

- i) $0 \longrightarrow N' \xrightarrow{f} N \xrightarrow{g} N''$ ist exakt
- ii) Für jeden R -Modul M ist die Sequenz abelscher Gruppen

$$0 \longrightarrow \operatorname{Hom}_R(M, N') \xrightarrow{f_*^M} \operatorname{Hom}_R(M, N) \xrightarrow{g_*^M} \operatorname{Hom}_R(M, N'')$$

ist exakt.

insbesondere ist der kovariante Funktor $\operatorname{Hom}_R(M, -) : R\text{-Mod} \rightarrow \mathbb{Z}\text{-Mod}$ linksexakt

Beweis. (i) \Rightarrow (ii) Sei $0 \longrightarrow N' \xrightarrow{f} N \xrightarrow{g} N''$ exakt.

1. Injektivität von f_*^M : Sei $\varphi \in \operatorname{Hom}_R(M, N')$ mit $f_*^M(\varphi) = 0 \Rightarrow f \circ \varphi = 0$
Wegen f injektiv, folgt $\varphi = 0$, also $\ker f_*^M = 0$
2. $\operatorname{im} f_*^M = \ker g_*^M$,
 \supseteq " Es ist $g_*^M \circ f_*^M = (g \circ f)_*^M = 0_*^M = 0$, also $\operatorname{im} f_*^M \subseteq \ker g_*^M$,
 \supseteq " Sei $\varphi : M \rightarrow N$ mit $\varphi \in \ker g_*^M \Rightarrow g \circ \varphi = 0 \Rightarrow \operatorname{im} \varphi \subseteq \ker g = \operatorname{im} f$. Setze $\varphi' : M \rightarrow \operatorname{im} \varphi \rightarrow \operatorname{im} f \rightarrow N' \Rightarrow \varphi' \in \operatorname{Hom}_R(M, N')$ mit $f \circ \varphi' = \varphi \Rightarrow \varphi \in \operatorname{im} f_*^M$.

(ii) \Rightarrow (i) Sei $0 \longrightarrow \operatorname{Hom}_R(M, N') \xrightarrow{f_*^M} \operatorname{Hom}_R(M, N) \xrightarrow{g_*^M} \operatorname{Hom}_R(M, N'') \longrightarrow 0$ exakt für alle R -Moduln M .

1. f injektiv: Setze $M := \ker f$, $\iota : \ker f \rightarrow N'$ Inklusion. Dann ist $f_*^M(\iota) = f \circ \iota = 0$. Und, da f_*^M injektiv, ist $\iota = 0 \Rightarrow \ker f = 0$
2. $\operatorname{im} f = \ker g$:
 \supseteq " Setze $M := N' \Rightarrow 0 = 0_*^M(\operatorname{id}_{N'}) = (g_*^M \circ f_*^M)(\operatorname{id}_{N'}) = ((g \circ f)_*^M)(\operatorname{id}_{N'}) = g \circ f \circ \operatorname{id}_{N'} = g \circ f$
 \supseteq " Setze $M := \ker g$, $\iota : \ker g \rightarrow N \Rightarrow g_*^M(\iota) = g \circ \iota = 0 \Rightarrow \iota \in \operatorname{im} f_*^M$ Dann existiert ein $\varphi : \ker g \rightarrow N'$ mit $f \circ \varphi = \iota$. Somit: $x \in \ker g \Rightarrow x = \iota(x) = f(\varphi(x)) \in \operatorname{im} f$. ■

Anmerkung. Der kovariante Funktor $\operatorname{Hom}_R(M, -)$ ist im Allgemeinen nicht exakt.

Beispiel 2.6.2. Sei $R = \mathbb{Z}$, $M = \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$. Wir betrachten die exakte Sequenz

$$0 \longrightarrow \mathbb{Z} \longrightarrow \mathbb{Z} \longrightarrow \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \longrightarrow 0$$

von \mathbb{Z} -Moduln mit $f : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}, x \mapsto 2x, \pi$ kanonische Projektion. Die Abbildung $\pi_*^M : \text{Hom}_{\mathbb{Z}}(\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}, \mathbb{Z}) \rightarrow \text{Hom}_{\mathbb{Z}}(\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}, \mathbb{Z}/2\mathbb{Z})$ ist nicht surjektiv, denn: Für $\varphi \in \text{Hom}_{\mathbb{Z}}(\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}, \mathbb{Z})$ gilt:

$$0 = \varphi(0) = \varphi(1 + 1) = \varphi(2 \cdot 1) = 2\varphi(1)$$

, also $\varphi(1) = 0$, das heißt $\varphi = 0$. Insbesondere ist $\pi_*^M(\varphi) = \pi_*^M(0) = 0 \neq \text{id}_{\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}}$.

Mit anderen Worten $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ ist kein projektiver \mathbb{Z} -Modul.

Satz 2.6.3. Sei P ein R -Modul. Dann sind äquivalent:

- i) P ist ein projektiver R -Modul
- ii) $\text{Hom}_R(P, -) : R\text{-Mod} \rightarrow \mathbb{Z}\text{-Mod}$ ist exakt.
- iii) Für jeden Epimorphismus $\pi : M \rightarrow N$ von R -Moduln und jeden Hom $\varphi : P \rightarrow N$ existiert ein Homomorphismus $\psi : P \rightarrow M$ mit $\pi \circ \psi = \varphi$

$$\begin{array}{ccc} & P & \\ \psi \swarrow & & \downarrow \varphi \\ M & \xrightarrow{\pi} & N \end{array}$$

- iv) Jede kurze exakte Sequenz $0 \longrightarrow L \xrightarrow{f} M \xrightarrow{g} P \longrightarrow 0$ von R -Moduln spaltet.
- v) Es gibt einen R -Modul P' , sodass $P \oplus P'$ ein freier R -Modul ist (das heißt P ist direkter Summand eines freien R -Moduls)

Beweis. (i) $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ (ii) $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ (iii) folgt aus Definition 5.30.

(iii) \Rightarrow (iv) Sei $0 \longrightarrow L \longrightarrow M \longrightarrow P \longrightarrow 0$ eine kurze exakte Sequenz von R -Moduln. Nach (iii) existiert zu dem Epimorphismus $g : M \rightarrow P$ und dem Homomorphismus $\text{id}_P : P \rightarrow P$ ein Homomorphismus $\psi : P \rightarrow M$ mit $g \circ \psi = \text{id}_P$, das heißt die Sequenz spaltet.

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \longrightarrow & L & \xrightarrow{f} & M & \xrightarrow{g} & P \longrightarrow 0 \\ & & & & & \nwarrow \psi & \uparrow \text{id} \\ & & & & & & P \end{array}$$

(iv) \Rightarrow (v) Es existiert ein freier R -Modul F und ein Epimorphismus $f : F \rightarrow P$. Wir erhalten eine exakte Sequenz $0 \longrightarrow \ker f \longrightarrow F \longrightarrow P \longrightarrow 0$, diese spaltet nach (iv), das heißt $F \simeq P \oplus \ker f$

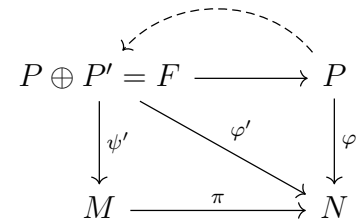
(v) \Rightarrow (iii) Sei $\pi : M \rightarrow N$ ein Epimorphismus von R -Moduln, $\varphi : P \rightarrow N$ ein Homomorphismus. Wegen (v) existiert ein R -Modul P' sodass $F := P \oplus P'$ frei ist, Setze

$$\varphi' : F \rightarrow N, \quad (x, y) \mapsto \varphi(x)$$

Sei $(b_i)_{i \in I}$ eine Basis von F , wähle für $i \in I$ jeweils ein $z_i \in \pi^{-1}(\varphi'(b_i))$. Durch $\psi' : F \rightarrow M, b_i \mapsto z_i$ wird ein Homomorphismus definiert mit $\pi \circ \psi' = \varphi'$. Setze

$$\psi : P \rightarrow M, \quad x \mapsto \psi'((x, 0))$$

dann gilt für $x \in P : \pi(\psi(x)) = \pi(\psi'((x, 0))) = \varphi'((x, 0)) = \varphi(x)$ das heißt $\pi \circ \psi = \varphi$. ■



Folgerung 2.6.4. a) Jeder freie R -Modul ist ein projektiver R -Modul

b) Jeder R -Modul ist ein Faktormodul eines projektiven R -Moduls.

Beweis. a) klar nach 2.6.3.

b) da jeder R -Modul Faktormodul eines freien R -Moduls ist. ■

Satz 2.6.5. Sei $M' \xrightarrow{f} M \xrightarrow{g} M'' \longrightarrow 0$ eine Sequenz von R -Moduln. Dann sind äquivalent:

i) $M' \xrightarrow{f} M \xrightarrow{g} M'' \longrightarrow 0$ ist exakt.

ii) Für jeden R -Modul N ist die Sequenz abelscher Gruppen:

$$0 \longrightarrow \operatorname{Hom}_R(M'', N) \xrightarrow{g_N^*} \operatorname{Hom}_R(M, N) \xrightarrow{f_N^*} \operatorname{Hom}_R(M', N) \text{ exakt.}$$

Insbesondere ist der kontravariante Funktor: $\operatorname{Hom}_R(-, N) : R\text{-Mod}^{\text{op}} \rightarrow \mathbb{Z}\text{-Mod}$ linksexakt.

Beweis. Übungsaufgabe. ■

Anmerkung. Der kontravariante Funktor $\operatorname{Hom}_R(-, N)$ ist im Allgemeinen nicht exakt.

Beispiel 2.6.6. Sei $R = \mathbb{Z}, N = \mathbb{Z}$. Wir betrachten die exakte Sequenz

$$0 \longrightarrow \mathbb{Z} \xrightarrow{f} \mathbb{Z} \xrightarrow{\pi} \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \longrightarrow 0$$

von \mathbb{Z} -Moduln mit $f : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}, x \mapsto 2x$ und π der kanonischen Projektion. Die Abbildung $f_{\mathbb{Z}}^* : \text{Hom}_{\mathbb{Z}}(\mathbb{Z}, \mathbb{Z}) \rightarrow \text{Hom}_{\mathbb{Z}}(\mathbb{Z}, \mathbb{Z})$ ist nicht surjektiv, denn für alle $\varphi \in \text{Hom}_{\mathbb{Z}}(\mathbb{Z}, \mathbb{Z})$ ist

$$(f_{\mathbb{Z}}^*(\varphi))(x) = (\varphi \circ f)(x) = \varphi(2x) = 2\varphi(x) \in 2\mathbb{Z}$$

insbesondere ist $f_{\mathbb{Z}}^*(\varphi) \neq \text{id}_{\mathbb{Z}}$. Mit anderen Worten: \mathbb{Z} ist kein injektiver \mathbb{Z} -Modul.

Satz 2.6.7. Sei Q ein R -Modul. Dann sind äquivalent:

- i) Q ist ein injektiver R -Modul
- ii) $\text{Hom}_R(-, Q) : R\text{-Mod} \rightarrow \mathbb{Z}\text{-Mod}$ ist exakt.
- iii) Für jeden Monomorphismus $\iota : L \rightarrow M$ von R -Moduln und jedem Homomorphismus $\varphi : L \rightarrow Q$ existiert ein Homomorphismus $\psi : M \rightarrow Q$ von R -Moduln mit $\psi \circ \iota = \varphi$

$$\begin{array}{ccc} L & \xrightarrow{\iota} & M \\ \downarrow & \swarrow \psi & \\ Q' & & \end{array}$$

- iv) Jede kurze exakte Sequenz $0 \longrightarrow Q \longrightarrow M \longrightarrow N \longrightarrow 0$ von R -Moduln spaltet.

Beweis. (i) \Leftrightarrow (ii) \Leftrightarrow (iii) folgt aus 2.5.29

(iii) \Rightarrow (iv) Sei $0 \longrightarrow L \longrightarrow M \longrightarrow P \longrightarrow 0$ eine exakte Sequenz von R -Moduln. Nach (iii) existiert zum Monomorphismus $f : L \rightarrow M$ von R -Moduln und zum Homomorphismus $\text{id}_L : L \rightarrow L$ ein Homomorphismus $\psi : M \rightarrow L$ mit $\psi \circ f = \text{id}_L$. das heißt die Sequenz spaltet.

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \longrightarrow & Q & \xrightarrow{f} & M & \xrightarrow{g} & N \longrightarrow 0 \\ & & \downarrow \text{id}_Q & \swarrow \psi & & & \\ & & Q & & & & \end{array}$$

(iv) \Rightarrow (iii) Sei $\iota : L \rightarrow M$ ein Monomorphismus, $\varphi : L \rightarrow Q$ ein Homomorphismus von R -Moduln. Setze

$$S := \{(\varphi(x), -\iota(x)) \mid x \in L\} \subseteq Q \oplus M \quad M' := (Q \oplus M)/S, \quad N := M/\text{im } \iota$$

$\pi : M \rightarrow N$ kanonische Projektion.

1. Wir erhalten eine exakte Sequenz

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \longrightarrow & Q & \xrightarrow{f} & M' & \xrightarrow{g} & N \longrightarrow 0 \\ & & y & \longmapsto & \overline{(y, 0)} & & \\ & & & & \overline{(y, z)} & \longmapsto & \pi(z) \end{array}$$

von R -Moduln. denn:

- g ist wohldefiniert, denn: $\pi \circ \iota = 0$
- f ist injektiv, denn $(y, 0) = (0, 0) \Rightarrow$ Es existiert ein $x \in L$ mit $y = \varphi(x), 0 = -\iota(x)$. Wegen ι injektiv, folgt $x = 0 \Rightarrow y = \varphi(0) = 0$
- g surjektiv, klar
- $\text{im } f = \ker g$:
 “ \subseteq “ klar, wegen $g \circ f = 0$
 “ \supseteq “ Sei $(y, z) \in \ker g \Rightarrow \pi(z) = 0 \Rightarrow z \in \text{im } \iota$, das heißt es existiert ein $x \in L$ mit $z = \iota(x) = -\iota(-x)$ Dann gilt

$$\begin{aligned} \overline{(y, z)} &= \overline{(y, -\iota(-x))} = \overline{(y + \varphi(x), 0)} + \overline{(\varphi(-x), -\iota(-x))} \\ &= \overline{(y + \varphi(x), 0)} = f(y + \varphi(x)) \in \text{im } f. \end{aligned}$$

2. Wegen (iv) spaltet die Sequenz, das heißt es existiert ein R -Modulhomomorphismus $h : M' \rightarrow Q$ mit $h \circ f = \text{id}_Q$. Setze

$$\psi : M \rightarrow Q, z \mapsto h((0, z))$$

ψ ist ein R -Modulhomomorphismus. Für $x \in L$ ist

$$\begin{aligned} (\psi \circ \iota)(x) &= h((0, \iota(x))) = h((0, \iota(x))) + h(\varphi(x), -\iota(x)) \\ &= h((\varphi(x), 0)) = h(f(\varphi(x))) = \varphi(x) \end{aligned} \quad \blacksquare$$

Also ist $\psi \circ \iota = \varphi$

Beispiel 2.6.8. Sei K ein Körper und V ein K -Vektorraum. Dann ist V ein injektiver K -Modul, denn für jede exakte Folge $0 \longrightarrow V \xrightarrow{f} M \xrightarrow{g} N \longrightarrow 0$ von K -Moduln, ist N ein freier K -Modul, d.h. die Folge spaltet.

Satz 2.6.9 (Baer-Kriterium). Sei Q ein R -Modul. Dann sind äquivalent:

i) Q ist ein injektiver R -Modul

- ii) Für jedes Linksideal $I \subseteq R$ und jede R -lineare Abbildung $\varphi : I \rightarrow Q$ existiert eine R -lineare Abbildung $\psi : R \rightarrow Q$ mit $\psi|_I = \varphi$.

$$\begin{array}{ccc} I & \hookrightarrow & R \\ \varphi \downarrow & \swarrow \psi & \\ Q & & \end{array}$$

Beweis. (i) \Rightarrow (ii) Betrachte Diagramm

$$\begin{array}{ccc} I & \xhookrightarrow{\iota} & R \\ \varphi \downarrow & \swarrow \psi & \\ Q & & \end{array}$$

Da Q injektiv, existiert ein R -Modulhomomorphismus $\psi : R \rightarrow Q$ mit $\varphi = \psi \circ \iota = \psi$.

(ii) \Rightarrow (i) Sei $\iota : L \rightarrow M$ ein Monomorphismus von R -Moduln, $\varphi : L \rightarrow Q$.

$$\begin{array}{ccc} L & \xhookrightarrow{\iota} & M \\ \varphi \downarrow & \swarrow ? & \\ Q & & \end{array}$$

Ohne Einschränkung sei $L \subseteq M$ ein Untermodul, ι Inklusionsabbildung.

1. Setze $\mathcal{X} := \{(L', \varphi') \mid L' \subseteq M \text{ Untermodul mit } L \subseteq L', \varphi' : L' \rightarrow Q \text{ } R\text{-linear mit } \varphi'|_L = \varphi\}$. Dann ist $\mathcal{X} \neq \emptyset$, denn: $(L, \varphi) \in \mathcal{X}$. Auf \mathcal{X} ist die Halbordnung " \leq " durch

$$(L', \varphi') \leq (L'', \varphi'') \Leftrightarrow L' \subseteq L'', \varphi'|_{L'} = \varphi''|_{L'}$$

erklärt. \mathcal{X} ist induktiv geordnet bzgl. " \leq ", denn: Sei $(L_i, \varphi_i)_{i \in I}$ eine totalgeordnete Familie von Elementen aus \mathcal{X} . Setze $L' := \bigcup_{i \in I} L_i$. L' ist Untermodul von M (beachte: $a, b \in L' \Rightarrow$ Es existieren i, j mit $a \in L_i, b \in L_j$, ohne Einschränkung: $L_i \subseteq L_j \Rightarrow a + b \in L_j \subseteq L'$) und es ist $L \subseteq L'$. Außerdem kann die R -lineare Abbildung $\varphi' : L' \rightarrow Q$ mit $\varphi'|_{L_i} := \varphi_i$ für alle $i \in I$ definieren. (wohldefiniert, denn: Für $i, j \in I$, ohne Einschränkung: $(L_i, \varphi_i) \subseteq (L_j, \varphi_j)$ ist $\varphi_j|_{L_i} = \varphi_i \Rightarrow (L', \varphi')$ ist obere Schranke für die Familie $(L_i, \varphi_i)_{i \in I}$. Mit dem Zornschen Lemma folgt, dass ein maximales Element (L', φ') in \mathcal{X} existiert.

2. Behauptung: $L' = M$, denn:

Sei $x \in M$. Setze $I := \{a \in R \mid ax \in L'\} \subseteq R \cdot I$ ist Linksideal in R , und die Abbildung $f : I \rightarrow Q, a \mapsto \varphi'(ax)$ ist R -linear. Mit (ii) folgt, dass eine R -lineare Abbildung $g : R \rightarrow Q$ mit $g|_I = f$. Setze:

$$\begin{array}{ccc} I & \hookrightarrow & R \\ \downarrow f & \swarrow g & \\ Q & & \end{array}$$

$$\psi' : L' \oplus R \rightarrow Q, \quad (y, a) \mapsto \varphi'(y) + g(a)$$

und

$$\pi : L' \oplus R \rightarrow M, \quad (y, a) \mapsto y + ax$$

welche beide r -Modulhomomorphismen sind. Es ist $\psi'(\ker \pi) = 0$, denn für $(y, a) \in \ker \pi$ ist $y + ax = 0$, also $ax = -y \in L'$, das heißt $a \in I$, also $g(a) = f(a) = \varphi'(ax) = \varphi'(-y) = -\varphi'(y)$ und somit $\psi'(y, a) = \varphi'(y) + g(a) = 0 \Rightarrow \psi'$ induziert R -Modulhomomorphismus

$$L' \oplus R /_{\ker \pi} \rightarrow Q, \quad (y, a) \mapsto \varphi'(y) + g(a)$$

Außerdem ist

$$L' + Rx = \operatorname{im} \pi \simeq L' \oplus R /_{\ker \pi} \quad \text{via} \quad y + ax \mapsto (y, a)$$

Wir erhalten den Homomorphismus

$$\psi : L' + Rx \rightarrow Q \quad \text{mit} \quad \psi(y + ax) = \varphi'(y) + g(a)$$

für alle $a \in R, y \in L'$, das heißt $\psi|_{L'} = \varphi' \Rightarrow (L', \varphi') \leq (L' + Rx, \psi)$ Wegen (L', φ') maximal folgt dass $L' = L' + Rx \Rightarrow x \in L'$. Somit $M \subseteq L' \subseteq M$, also $M = L'$. ■

Definition 2.6.10. Sei A ein Integritätsbereich (kommutativer nullteilerfreier Ring), M ein A -Modul. M heißt *teilbar* $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ Für alle $a \in A \setminus \{0\}$ ist $aM = M$. \Leftrightarrow Für alle $x \in M, a \in A \setminus \{0\}$ existiert ein $y \in M$ mit $x = ay$.

Bemerkung 2.6.11. Sei A ein Integritätsbereich, M ein injektiver A -Modul. Dann ist M teilbar.

Beweis. Sei $x \in M, a \in A \setminus \{0\}$. Wir betrachten die Abbildung

$$\varphi : Aa \rightarrow M, \quad ra \mapsto rx$$

φ ist wohldefiniert, denn: $r_1a = r_2a \Rightarrow (r_1 - r_2)a = 0$ Da A nullteilerfrei ist folgt $r_1 = r_2$. φ ist A -linear, so folgt mit Satz 2.6.9, dass eine A -lineare Abbildung $\psi : A \rightarrow M$ mit $\psi|_{Aa} = \varphi$. Setze $y := \psi(1)$, dann ist $x = \varphi(a) = \psi(a) = \psi(a1) = a\psi(1) = ay$. ■

Bemerkung 2.6.12. Sei A ein Hauptidealring, M ein A -Modul. Dann sind äquivalent:

- i) M injektiv
- ii) M teilbar

Beweis. (i) \Rightarrow (ii) aus 2.6.11

(ii) \Rightarrow (i) Sei $I \subseteq A$ ein Ideal, $\varphi : I \rightarrow M$ A -linear. Falls $I = 0$, dann wird φ durch die Nullabbildung nach A fortgesetzt. Im Folgenden sein $I \neq 0$. Da A ein Hauptidealring ist, existieren $a \in A, a \neq 0$ mit $I = Aa$. Setze $x := \varphi(a) \Rightarrow \varphi(ra) = r\varphi(a) = rx$ für alle $r \in A$. Wegen (ii) existiert ein $y \in M$ mit $x = ay$. Setze

$$\psi : A \rightarrow M, \quad r \mapsto ry$$

Dann ist ψ A -linear und $\psi(ra) = ray = rx = \varphi(ra)$ für alle $r \in A$ das heißt $\psi|_{Aa} = \varphi$. Dann folgt aus 6.9 M ist injektiv. ■

Beispiel 2.6.13. a) Sei K ein Körper, V ein K -VR $\Rightarrow V$ ist teilbarer K -Modul, also injektiver K -Modul. Ist $\text{char } K = 0$ dann ist V teilbarer \mathbb{Z} -Modul, also injektiver \mathbb{Z} -Modul.

b) Faktormoduln teilbarer \mathbb{Z} -Moduln sind teilbar, somit sind Faktormoduln injektiver \mathbb{Z} -Moduln wieder injektive \mathbb{Z} -Moduln.

c) Nach (a) sind \mathbb{Q}, \mathbb{R} injektive \mathbb{Z} -Moduln, nach (b) also auch $\mathbb{Q}/\mathbb{Z}, \mathbb{R}/\mathbb{Z}$

Ziel injektive R -Moduln sind direkte Faktoren von kofreien R -Moduln

Anmerkung. M ein \mathbb{Z} -Modul. Dann ist $\text{Hom}_{\mathbb{Z}}(R, M)$ via $(a\varphi)(r) = \varphi(ra)$ ein R -Modul. (beachte: $b(a\varphi)(r) = (a\varphi)(rb) = \varphi(rba) = ((ba)\varphi)(r)$)

Bemerkung 2.6.14. Sei M ein injektiver \mathbb{Z} -Modul. Dann ist $\text{Hom}_{\mathbb{Z}}(R, M)$ ein injektiver R -Modul. Insbesondere ist $R^v := \text{Hom}_{\mathbb{Z}}(R, \mathbb{Q}/\mathbb{Z})$ ein injektiver R -Modul.

Beweis. Sei $I \subseteq R$ ein Linksideal, $\varphi : I \rightarrow \text{Hom}_{\mathbb{Z}}(R, M)$ R -linear. Nach 2.6.9, genügt es zu zeigen: φ lässt sich auf R fortsetzen. Setze

$$f : I \rightarrow M, \quad a \mapsto \varphi(a)(1)$$

Dann ist f ist \mathbb{Z} -linear und für $r \in R, a \in I$ gilt: $f(ra) = \varphi(ra)(1) = (r\varphi(a))(1) = \varphi(a)(1r) = \varphi(a)(r)$. Da M ein injektiver \mathbb{Z} -Modul, existiert eine \mathbb{Z} -lineare Abbildung $g : R \rightarrow M$ mit $g|_I = f$. Wir setzen $\psi : R \rightarrow \text{Hom}_{\mathbb{Z}}(R, M), a \mapsto ag$. ψ ist R -linear, und für $a \in I, r \in R$ ist $\psi(a)(r) = (ag)(r) = g(ra) = f(ra) = \varphi(a)(r)$, das heißt $\psi|_I = \varphi$. ■

Definition 2.6.15. Sei M ein R -Modul. M heißt *kofrei* $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ Es existiert eine Menge I mit $M \simeq (R^v)^I = \prod_{i \in I} R^v$.

Bemerkung 2.6.16. Sei $(M_i)_{i \in I}$ eine Familie von R -Moduln. Dann gilt:

- a) $\bigoplus_{i \in I} M_i$ ist ein projektiver R -Modul $\Leftrightarrow M_i$ projektive R -Moduln für alle $i \in I$.
- b) $\prod_{i \in I} M_i$ ist ein injektiver R -Modul $\Leftrightarrow M_i$ ist injektiver R -Modul für alle $i \in I$.

Beweis. Übungsaufgaben. ■

Satz 2.6.17. Sei M ein kofreier R -Modul. dann ist M ein injektiver R -Modul.

Beweis. folgt direkt aus 2.6.16 und 2.6.14 ■

Bemerkung 2.6.18. Sei M ein R -Modul, $m \in M, m \neq 0$. Dann existiert ein R -Modulhomomorphismus $\varphi : M \rightarrow R^v$ mit $\varphi(m) \neq 0$.

Beweis. 1. Die Abbildung

$$\theta : \text{Hom}_{\mathbb{Z}}(M, \mathbb{Q}/\mathbb{Z}) \rightarrow \text{Hom}_R(M, R^v), \psi \mapsto (m \mapsto \varphi_m : R \rightarrow \mathbb{Q}/\mathbb{Z}, r \mapsto \psi(rm))$$

ist ein Homomorphismus von \mathbb{Z} -Moduln (tatsächlich sogar ein Isomorphismus).

- 2. Ist $\psi : M \rightarrow \mathbb{Q}/\mathbb{Z}$ ein \mathbb{Z} -Modulhomomorphismus mit $\psi(m) \neq 0$ dann ist $\theta(\psi)(m) = \varphi_m \neq 0$ wegen $\varphi_m(1) = \psi(m) \neq 0$, das heißt: $\theta(\psi) : M \rightarrow R^v$ ist ein R -Modulhomomorphismus mit $\theta(\psi)(m) \neq 0$
- 3. Nach 2 genügt es zu zeigen: Es existiert ein \mathbb{Z} -Modulhomomorphismus $\psi : M \rightarrow \mathbb{Q}/\mathbb{Z}$ mit $\psi(m) \neq 0$. Setze $N := \langle m \rangle_{\mathbb{Z}}$.
1. Fall: $N \simeq \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ für ein $n \in \mathbb{N}$. Setze

$$\begin{aligned} \tilde{\psi} : N &\xrightarrow{\sim} \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \longrightarrow \mathbb{Q}/\mathbb{Z} \\ 1 &\longmapsto \frac{1}{n} + \mathbb{Z} \end{aligned}$$

Dann ist $\tilde{\psi}(m) \neq 0$ und, da \mathbb{Q}/\mathbb{Z} injektiver \mathbb{Z} -Modul ist, setzt sich $\tilde{\psi}$ auf M fort.

2. Fall: $N \cong \mathbb{Z}$. Setze dann

$$\begin{aligned} \tilde{\psi} : N &\xrightarrow{\sim} \mathbb{Z} \longrightarrow \mathbb{Q}/\mathbb{Z} \\ 1 &\longmapsto \frac{1}{2} + \mathbb{Z} \end{aligned}$$

Dann ist $\tilde{\psi}(m) \neq 0$, also weiter wie in Fall 1. ■

Satz 2.6.19. *Jeder R -Modul ist Untermodul eines kofreien, also insbesondere eines injektiven, R -Moduls.*

Beweis. Sei $0 \neq M$ ein R -Modul. Nach 6.18 existiert zu jedem $m \in M$ ein R -Modulhomomorphismus $\varphi_m : M \rightarrow R^v$ mit $\varphi_m(m) \neq 0$. Wir setzen

$$f : M \longrightarrow \prod_{m \in M \setminus \{0\}} R^v, \quad x \mapsto ((\varphi_m(x))_{m \in M \setminus \{0\}})$$

Dann gilt

- f ist ein R -Modulhomomorphismus
- f ist injektiv, denn: Sei $x \in M$ mit $f(x) = 0$. Dann ist $\varphi_m(x) = 0$ für alle $m \in M \setminus \{0\}$. Wäre $x \neq 0$, dann wäre $\varphi_x(x) = 0$, Widerspruch! ■

Folgerung 2.6.20. *Sei Q ein R -Modul. Dann sind äquivalent:*

- Q ist injektiv
- Es gibt einen R -Modul Q' , sodass $Q \times Q'$ ein kofreier R -Modul ist (d.h. Q ist direkter Faktor eines kofreien R -Moduls)

Beweis. $i) \Rightarrow ii)$ Nach 2.6.19 existiert ein kofreier R -Modul N , sodass Q Untermodul von N ist. Die exakte Folge

$$0 \longrightarrow Q \longrightarrow N \longrightarrow N/Q \longrightarrow 0$$

spaltet nach 2.6.7, da Q injektiv ist, d.h. $N \cong Q \oplus N/Q = Q \times N/Q$

$ii) \Rightarrow i)$ Ist $Q \times Q'$ kofrei, dann ist nach 6.17 $Q \times Q'$ injektiv und nach 6.16 Q injektiv. ■

2.7 Komplexe

In diesem Abschnitt sei \mathcal{A} stets eine abelsche Kategorie

Definition 2.7.1. Ein *Komplex* A^\bullet in \mathcal{A} ist eine Familie $(A^i, d_i)_{i \in \mathbb{Z}}$ von Objekten $A^i \in \text{Ob } \mathcal{A}$ und Morphismen $d_i : A^i \rightarrow A^{i+1}$ (*Differentiale*)

$$\dots \longrightarrow A^{-1} \xrightarrow{d_{-1}} A^0 \xrightarrow{d_0} A^1 \xrightarrow{d_1} A^2 \longrightarrow \dots$$

sodass $d_i \circ d_{i-1} = 0$ für alle $i \in \mathbb{Z}$ gilt. Ein *Komplexhomomorphismus* $f : A^\bullet \rightarrow B^\bullet$ in einem Komplex B^\bullet in \mathcal{A} ist eine Familie $f = (f_i)_{i \in \mathbb{Z}}$ von Homomorphismen $f_i : A^i \rightarrow B^i$, sodass für alle $i \in \mathbb{Z}$ gilt:

$$d_i \circ f_i = f_{i+1} \circ d_i$$

d.h. das Diagramm

$$\begin{array}{ccccccc} \dots & \longrightarrow & A^{i-1} & \xrightarrow{d_{i-1}} & A^i & \xrightarrow{d_i} & A^{i+1} \xrightarrow{d_{i+1}} \dots \\ & & \downarrow f_{i-1} & & \downarrow f_i & & \downarrow f_{i+1} \\ \dots & \longrightarrow & B^{i-1} & \xrightarrow{d_{i-1}} & B^i & \xrightarrow{d_i} & B^{i+1} \longrightarrow \dots \end{array}$$

kommutiert.

Anmerkung. Komplexe in \mathcal{A} zusammen mit Komplexhomomorphismen bilden eine abelsche Kategorie (Kerne, Kokerne, endliche Produkte separat an jeder Stelle bilden).

Bemerkung 2.7.2. Sei A^\bullet ein Komplex in \mathcal{A} . Dann induzieren die Differentiale in natürlicher Weise Monomorphismen $\text{im } d_{i-1} \longrightarrow \ker d_i$ für $i \in \mathbb{Z}$.

Beweis. Wir betrachten das Diagramm

$$\begin{array}{ccccc} A^{i-1} & \xrightarrow{d_{i-1}} & A^i & \xrightarrow{d_i} & A^{i+1} \\ q_{i-1} \downarrow & & k_{i-1} \uparrow & \swarrow j_i & \\ \text{coim } d_{i-1} & \xrightarrow{\bar{d}_{i-1}} & \text{im } d_{i-1} & \xrightarrow{l_i} & \ker d_i \end{array}$$

(Es ist k_{i-1} ein Mono-, q_{i-1} ein Epi- und der durch den Homomorphiesatz induzierte Pfeil \bar{d}_{i-1} ein Isomorphismus). Damit ist $0 = d_i \circ d_{i-1} = d_i \circ k_{i-1} \circ \bar{d}_{i-1} \circ q_{i-1}$ und, da q_{i-1} Epi, d_{i-1} Iso, folgt $d_i \circ k_{i-1} = 0$. Nach der Universellen Eigenschaft des Kerns existiert ein $l_i : \text{im } d_{i-1} \rightarrow \ker d_i$ mit $k_{i-1} = j_i \circ l_i$. Nun ist l_i ein Monomorphismus, da $k_{i-1} = j_i \circ l_i$ Monomorphismus. ■

Definition 2.7.3. Sei A^\bullet ein Komplex in \mathcal{A} .

$$\mathcal{Z}^i(A^\bullet) := \ker d_i \quad (i\text{-Kozykel})$$

$$\mathcal{B}^i(A^\bullet) := \operatorname{im} d_{i-1} \quad (i\text{-Koränder})$$

$$\begin{aligned} \mathcal{H}^i(A^\bullet) &:= \operatorname{coker}(\operatorname{im} d_{i-1} \rightarrow \ker d_i) \\ &= \operatorname{coker}(\mathcal{B}^i(A^\bullet) \rightarrow \mathcal{Z}^i(A^\bullet)) \end{aligned} \quad (i\text{-te Kohomologie})$$

Anmerkung. Ein Komplexhomomorphismus $f : A^\bullet \rightarrow B^\bullet$ induziert Homomorphismen

$$\mathcal{Z}^i(f) : \mathcal{Z}^i(A^\bullet) \rightarrow \mathcal{Z}^i(B^\bullet), \quad \mathcal{B}^i(f) : \mathcal{B}^i(A^\bullet) \rightarrow \mathcal{B}^i(B^\bullet), \quad \mathcal{H}^i(f) : \mathcal{H}^i(A^\bullet) \rightarrow \mathcal{H}^i(B^\bullet)$$

Satz 2.7.4 (Lange exakte Kohomologiefolge). Sei

$$0 \longrightarrow A^\bullet \longrightarrow B^\bullet \longrightarrow C^\bullet \longrightarrow 0$$

eine kurze exakte Folge von Komplexen in \mathcal{A} (d.h. die Morphismen sind Komplexhomomorphismen und für jedes $i \in \mathbb{Z}$ ist

$$0 \longrightarrow A^i \longrightarrow B^i \longrightarrow C^i \longrightarrow 0$$

exakt). Dann existiert eine natürliche lange exakte Folge

$$\dots \rightarrow \mathcal{H}^i(A^\bullet) \rightarrow \mathcal{H}^i(B^\bullet) \rightarrow \mathcal{H}^i(C^\bullet) \rightarrow \mathcal{H}^{i+1}(A^\bullet) \rightarrow \mathcal{H}^{i+1}(B^\bullet) \rightarrow \mathcal{H}^{i+1}(C^\bullet) \rightarrow \dots$$

Beweis (Beweisskizze). 1. M^\bullet ein Komplex in \mathcal{A} . Setze

$$Q^i(M^\bullet) := \operatorname{coker}(\operatorname{im} d_{i-1} \rightarrow M^i) \quad \text{für } i \in \mathbb{Z}$$

Dann induzieren die Differentiale natürliche Morphismen

$$\bar{d}_i : Q^i(M^\bullet) \longrightarrow Q^{i+1}(M^\bullet)$$

mit $\ker \bar{d}_i = \mathcal{H}^i(M^\bullet)$ und $\operatorname{coker}(\bar{d}_i) = \mathcal{H}^{i+1}(M^\bullet)$

2. Wir erhalten für $i \in \mathbb{Z}$ ein kommutatives Diagramm mit exakten Zeilen:

$$\begin{array}{ccccccc} Q^i(A^\bullet) & \longrightarrow & Q^i(B^\bullet) & \longrightarrow & Q^i(C^\bullet) & \longrightarrow & 0 \\ \downarrow \bar{d}_i & & \downarrow \bar{d}_i & & \downarrow \bar{d}_i & & \\ 0 & \longrightarrow & \mathcal{Z}^{i+1}(A^\bullet) & \longrightarrow & \mathcal{Z}^{i+1}(B^\bullet) & \longrightarrow & \mathcal{Z}^{i+1}(C^\bullet) \end{array}$$

3. Das Schlangenlemma liefert nach 1. für jedes $i \in \mathbb{Z}$ eine exakte Folge

$$\mathcal{H}^i(A^\bullet) \rightarrow \mathcal{H}^i(B^\bullet) \rightarrow \mathcal{H}^i(C^\bullet) \rightarrow \mathcal{H}^{i+1}(A^\bullet) \rightarrow \mathcal{H}^{i+1}(B^\bullet) \rightarrow \mathcal{H}^{i+1}(C^\bullet)$$

Diese setzen sich zu einer langen exakten Folge aus der Behauptung zusammen.

■

Definition 2.7.5. Sei $A \in \text{Ob } \mathcal{A}$. Eine *injektive Auflöser* von A ist ein Komplex

$$I^\bullet : I^0 \xrightarrow{d_0} I^1 \xrightarrow{d_1} I^2 \longrightarrow \dots$$

bestehend aus injektiven Objekten I^i aus \mathcal{A} mit $I^i = 0$ für $i < 0$ zusammen mit einem Morphismus $\varepsilon : A \rightarrow I^0$, so dass der *augmentierte Komplex*

$$0 \longrightarrow A \xrightarrow{\varepsilon} I^0 \xrightarrow{d_0} I^1 \xrightarrow{d_1} I^2 \longrightarrow \dots$$

exakt ist (Notation: $A \rightarrow I^\bullet$ injektive Auflöser von A).

Eine *projektive Auflöser* von A ist eine injektive Auflöser von A in \mathcal{A}^{op} , d.h. ein Komplex

$$P^\bullet : \dots \longrightarrow P^{-2} \longrightarrow P^{-1} \longrightarrow P^0$$

aus projektiven Objekten P^i aus \mathcal{A} mit $P^i = 0$ für $i > 0$ zusammen mit einem Morphismus $\varepsilon : P^0 \rightarrow A$, sodass der augmentierte Komplex

$$\dots \longrightarrow P^{-2} \longrightarrow P^{-1} \longrightarrow P^0 \xrightarrow{\varepsilon} A \longrightarrow 0$$

exakt ist (Notation: $P^\bullet \rightarrow A$ projektive Auflöser).

Anmerkung. Man schreibt in obiger Situation auch $P_i = P^{-i}$ und $\mathcal{H}_i(-) = \mathcal{H}^{-i}(-)$.

Definition 2.7.6. \mathcal{A} hat

genügend viele Injektive $\stackrel{\text{Def}}{\iff}$ Für jedes $A \in \text{Ob } \mathcal{A}$ existiert ein injektives Objekt $I \in \text{Ob } \mathcal{A}$ und ein Monomorphismus $\iota : A \rightarrow I$.

genügend viele Projektive $\stackrel{\text{Def}}{\iff}$ \mathcal{A}^{op} hat genügend viele Injektive

Beispiel 2.7.7. $R\text{-Mod}$ hat nach 6.19 genügend viele Injektive und nach 6.4 genügend viele Projektive.

Bemerkung 2.7.8. Sei $A \in \text{Ob } \mathcal{A}$. Dann gilt:

a) Hat \mathcal{A} genügend viele Injektive, dann hat A eine injektive Auflöser

b) Hat \mathcal{A} genügend viele Projektive, dann hat A eine projektive Auflösung

Beweis. Es genüge a) zu zeigen, b) folgt dual.

1. Die Situation ist:

$$\begin{array}{ccccccc}
 0 & \longrightarrow & A & \xrightarrow{\varepsilon} & I^0 & \xrightarrow{d_0} & I^1 & \xrightarrow{d_1} & I^2 \\
 & & & & \searrow \pi_0 & & \swarrow \iota_0 & & \searrow \pi_1 & & \swarrow \iota_1 \\
 & & & & & & M^0 & & & & M^1
 \end{array}$$

Nach Voraussetzung existiert ein injektives Objekt $I^0 \in \text{Ob } \mathcal{A}$ und ein Monomorphismus $\varepsilon : A \rightarrow I^0$. Sei $\text{coker } \varepsilon = (M^0, \pi_0)$. Es existiert ein injektives Objekt I^1 und ein Monomorphismus $\iota_0 : M^0 \hookrightarrow I^1$. Iteriere dieses Verfahren: $\text{coker}(d_0) = (M^1, \pi_1)$, es existiert ein injektives Objekt I^2 und ein Monomorphismus $\iota_1 : M^1 \hookrightarrow I^2$, setze $d_1 := \iota_1 \circ \pi_1$.

2. Exaktheit: bei I^0 gilt:

$$\text{im } \varepsilon = \ker(\text{coker } \varepsilon) = \ker \pi_0 \stackrel{\iota_0}{\underset{\text{Mono}}{=}} \ker(\iota_0 \circ \pi_0) = \ker d_0$$

analog bei den anderen Stellen ■

Satz 2.7.9 (Hufeisenlemma). \mathcal{A} habe genügend viele Injektive. Gegeben sei ein Diagramm (Schwarz)

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & 0 & & 0 & & 0 \\
 & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 0 & \longrightarrow & A' & \longrightarrow & I'^0 & \longrightarrow & I'^1 & \longrightarrow & \dots \\
 & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 0 & \longrightarrow & A & \longrightarrow & I^0 & \longrightarrow & I^1 & \longrightarrow & \dots \\
 & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 0 & \longrightarrow & A'' & \longrightarrow & I''^0 & \longrightarrow & I''^1 & \longrightarrow & \dots \\
 & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 & & 0 & & 0 & & 0
 \end{array}$$

in \mathcal{A} , wobei die linke Spalte exakt sei, $A' \rightarrow I'^{\bullet}$ eine injektive Auflösung von A' , $A'' \rightarrow I''^{\bullet}$ eine injektive Auflösung von A'' . Dann lässt sich das Diagramm so zu einem kommutativen Diagramm ergänzen (rot), dass $A \rightarrow I^{\bullet}$ eine injektive Auflösung von A ist und die Spalten alle exakt sind.

Beweis. in den Standardwerken über homologische Algebra (zumindest für $R\text{-Mod}$). Für den Beweis einer Verallgemeinerung in Kontext abelsche Kategorien siehe Stacks-Project 013P. ■

Frage: in welchem Verhältnis stehen zwei injektive Auflösungen eines Objekts?

Definition 2.7.10. Seien A^\bullet, B^\bullet Komplexe in \mathcal{A} , $f, g : A^\bullet \rightarrow B^\bullet$ Komplexhomomorphismen. f, g heißen *homotop* $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ es existieren Homomorphismen $s^i : A^{i+1} \rightarrow B^i$ für alle $i \in \mathbb{Z}$ mit

$$f_i - g_i = d_{i-1} \circ s^{i-1} + s^i \circ d_i$$

(Notation: $f \sim g$)

$$\begin{array}{ccccccc} \dots & \longrightarrow & A^{i-1} & \longrightarrow & A^i & \xrightarrow{d_i} & A^{i+1} & \longrightarrow & \dots \\ & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \\ & & B^{i-1} & \xrightarrow{d_{i-1}} & B^i & \longrightarrow & B^{i+1} & \longrightarrow & \dots \end{array}$$

(Red arrows in the original image represent $s^{i-1} : A^i \rightarrow B^{i-1}$ and $s^i : A^{i+1} \rightarrow B^i$.)

Anmerkung. • Homotopie von Komplexhomomorphismen ist eine Äquivalenzrelation.

- Sind $f, g : A^\bullet \rightarrow B^\bullet$ Komplexhomomorphismen mit $f \sim g$ und $F : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ ein additiver Funktor von \mathcal{A} in eine abelsche Kategorie \mathcal{B} , dann erhalten wir einen Komplexhomomorphismus $Ff, Fg : FA^\bullet \rightarrow FB^\bullet$ mit $Ff \sim Fg$.

Bemerkung 2.7.11. Seien A^\bullet, B^\bullet Komplexe in \mathcal{A} , $f, g : A^\bullet \rightarrow B^\bullet$ Komplexhomomorphismen mit $f \sim g$. Dann gilt: $\mathcal{H}^i(f) = \mathcal{H}^i(g) : \mathcal{H}^i(A^\bullet) \rightarrow \mathcal{H}^i(B^\bullet)$

Beweis. Wir setzen $h := f - g : A^\bullet \rightarrow B^\bullet$. Offenbar genügt es zu zeigen: $\mathcal{H}^i(h) = 0$ für alle $i \in \mathbb{Z}$.

1. Der Morphismus $\mathcal{Z}^i(h) : \mathcal{Z}^i A^\bullet \rightarrow \mathcal{Z}^i B^\bullet$ faktorisiert über $\mathcal{B}^i B^\bullet$, denn:

$$\begin{array}{ccccc} \ker d_i = \mathcal{Z}^i A^\bullet & \xrightarrow{\alpha_i} & A^i & \xrightarrow{d_i} & A^{i+1} \\ & & \downarrow h_i & & \downarrow h_{i+1} \\ \ker d_i = \mathcal{Z}^i B^\bullet & \xrightarrow{\beta_i} & B^i & \xrightarrow{d_i} & B^{i+1} \\ & \nearrow \delta_i & \searrow \gamma_i & & \\ \text{im } d_{i-1} = \mathcal{B}^i B^\bullet = \ker \gamma_i & & & & \text{coker } d_{i-1} \end{array}$$

(A dashed red arrow labeled λ_i points from $\ker d_i = \mathcal{Z}^i B^\bullet$ to $\text{im } d_{i-1} = \mathcal{B}^i B^\bullet$. A dashed blue arrow labeled $\mathcal{Z}^i h$ points from $\ker d_i = \mathcal{Z}^i A^\bullet$ to $\ker d_i = \mathcal{Z}^i B^\bullet$.)

$\mathcal{Z}^i(h)$ ist der eindeutig bestimmte Morphismus $\mathcal{Z}^i A^\bullet \rightarrow \mathcal{Z}^i B^\bullet$ mit $h_i \circ \alpha_i = \beta_i \circ \mathcal{Z}^i h$ (beachte: $d_i \circ h_i \circ \alpha_i = h_{i+1} \circ d_i \circ \alpha_i = 0$). Wegen $f \sim g$ existiert

eine Familie $(s_i)_{i \in \mathbb{Z}}$ von Homomorphismen $s_i : A^{i+1} \rightarrow B^i$ mit $h_i = f_i - g_i = d_{i-1} \circ s^{i-1} + s_i \circ d_i$ für alle $i \in \mathbb{Z}$. Dann ist

$$h_i \circ \alpha_i = d_{i-1} \circ s^{i-1} \circ \alpha_i + s_i \circ \underbrace{d_i \circ \alpha_i}_{=0} = d_{i-1} \circ s^{i-1} \circ \alpha_i$$

Wegen $\gamma_i \circ d_{i-1} = 0$ ist $\overbrace{\gamma_i \circ d_{i-1} \circ s^{i-1}}^{=0} \circ \alpha_i = 0$, also $\gamma_i \circ h_i \alpha_i = 0$. Aus der Univesellen Eigenschaft des Kerns von γ_i , existiert ein eindeutig bestimmtes $\lambda_i : \mathcal{Z}^i A^\bullet \rightarrow \mathcal{B}^i B^\bullet = \ker \gamma_i$ mit $h_i \circ \alpha_i = \delta_i \circ \lambda_i$ und mit $\delta_i = \beta_i \circ \theta_i \Rightarrow \beta_i \circ \theta_i \circ \lambda_i = h_i \circ \alpha_i = \beta_i \circ \mathcal{Z}^i h$ da β_i ein Monomorphismus folgt: $\theta_i \circ \lambda_i = \mathcal{Z}^i h$.

2. $\mathcal{H}^i h = 0$, denn betrachte die Situation:

$$\begin{array}{ccccc} \mathcal{B}^i A^\bullet & \xrightarrow{\theta'_i} & \mathcal{Z}^i A^\bullet & \xrightarrow{\varepsilon'_i} & \mathcal{H}^i A^\bullet = \text{coker } \theta'_i \\ \downarrow \mathcal{B}^i h & \swarrow \lambda_i & \downarrow \mathcal{Z}^i h & & \downarrow \mathcal{H}^i h \\ \mathcal{B}^i B^\bullet & \xrightarrow{\theta_i} & \mathcal{Z}^i B^\bullet & \xrightarrow{\varepsilon_i} & \mathcal{H}^i B^\bullet = \text{coker } \theta_i \end{array}$$

$\mathcal{H}^i h$ ist der eindeutig bestimmte Morphismus $\mathcal{H}^i A^\bullet \rightarrow \mathcal{H}^i B^\bullet$ mit $\mathcal{H}^i h \circ \varepsilon'_i = \varepsilon_i \circ \mathcal{Z}^i h = \varepsilon_i \circ \theta_i \circ \lambda_i = 0$, denn $\varepsilon_i \circ \theta_i = 0$, somit $\mathcal{H}^i h = 0$. ■

Definition 2.7.12. Seien A^\bullet, B^\bullet Komplexe in \mathcal{A} , $f, g : A^\bullet \rightarrow B^\bullet$ Komplexhomomorphismen. f heißt

Homotopieäquivalenz $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ es existiert ein $g : B^\bullet \rightarrow A^\bullet$ Komplexhomomorphismus mit $g \circ f \sim id_{A^\bullet}$ und $f \circ g \sim id_{B^\bullet}$.

Quasiisomorphismus $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ Für alle $i \in \mathbb{Z}$ ist $\mathcal{H}^i f : \mathcal{H}^i A^\bullet \rightarrow \mathcal{H}^i B^\bullet$ ein Isomorphismus.

Bemerkung 2.7.13. Seien A^\bullet, B^\bullet Komplexe in \mathcal{A} , $f : A^\bullet \rightarrow B^\bullet$ Homotopieäquivalenz. Dann ist f ein Quasiisomorphismus.

Beweis. Nach Voraussetzung existiert ein $g : B^\bullet \rightarrow A^\bullet$ Komplexhomomorphismus mit $g \circ f \sim id_{A^\bullet}$ und $f \circ g \sim id_{B^\bullet}$. Dann ist

$$\mathcal{H}^i(g) \circ \mathcal{H}^i(f) = \mathcal{H}^i(g \circ f) = \mathcal{H}^i(id_{A^\bullet}) = id_{\mathcal{H}^i A^\bullet}$$

analog: $\mathcal{H}^i(f) \circ \mathcal{H}^i(g) = id_{\mathcal{H}^i B^\bullet}$. Also ist $\mathcal{H}^i(f)$ ein Isomorphismus. ■

Anmerkung. Nicht jeder Quasiisomorphismus ist eine Homotopieäquivalenz.

Satz 2.7.14. *Gegeben sei folgendes Diagramm von Komplexen in \mathcal{A} :*

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \longrightarrow & A & \xrightarrow{\varepsilon} & E^0 & \longrightarrow & E^1 \longrightarrow \dots \\ & & \downarrow \varphi & & \downarrow f_0 & & \downarrow f_1 \\ 0 & \longrightarrow & B & \xrightarrow{\eta} & I^0 & \longrightarrow & I^1 \longrightarrow \dots \end{array}$$

sodass gilt:

- die obere Zeile ist exakt
- Alle $I^i, i \geq 0$, sind injektiv.

Dann existiert ein Komplexhomomorphismus $f : E^\bullet \rightarrow I^\bullet$, der φ fortsetzt, in dem Sinne, dass $f_0 \circ \varepsilon = \eta \circ \varphi$ ist. Ist $g : E^\bullet \rightarrow I^\bullet$ ein weiterer solcher Komplexhomomorphismus, dann ist $g \sim f$.

Beweis (Beweisskizze für die Existenz von f): 1. Wir konstruieren zunächst f_0 .
Situation:

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\varepsilon} & E^0 \\ \downarrow \varphi & & \downarrow f_0 \\ B & \xrightarrow{\eta} & I^0 \end{array}$$

Da I^0 injektiv und ε ein Monomorphismus, existiert ein $f_0 : E^0 \rightarrow I^0$, sodass $\eta \circ \varphi = f_0 \circ \varepsilon$.

2. Konstruktion von f_1 : Situation:

$$\begin{array}{ccccc} A & \xrightarrow{\varepsilon} & E^0 & \xrightarrow{d_0} & E^1 \\ \downarrow \varphi & & \downarrow f_0 & \searrow \pi_0 & \downarrow f_1 \\ & & & \text{coker } \varepsilon & \\ & & & \downarrow \tilde{f}_0 & \\ & & & \text{coker } \eta & \\ & \nearrow \pi_0' & & & \\ B & \xrightarrow{\eta} & I^0 & \xrightarrow{d_0'} & I^1 \end{array}$$

Additional dashed arrows in the diagram: $\iota_0 : \text{coker } \varepsilon \rightarrow E^1$ (blue), $\iota_0' : \text{coker } \eta \rightarrow I^1$ (blue), and $f_1 : E^1 \rightarrow I^1$ (red).

Wegen der Kommutativität vom linken Rechteck, also

$$\pi_0' \circ f_0 \circ \varepsilon = \pi_0' \circ \eta \circ \varphi = 0$$

existiert ein eindeutig bestimmtes $\tilde{f}_0 : \text{coker } \varepsilon \rightarrow \text{coker } \eta$, sodass das linke Trapez kommutiert. Da $d_0 \circ \varepsilon = 0$ und $d'_0 \circ \eta = 0$, existieren nach der Universellen Eigenschaft des Kokerns eindeutig bestimmte $\iota_0 : \text{coker } \varepsilon \rightarrow E^1$, $\iota'_0 : \text{coker } \eta \rightarrow I^1$, sodass das obere und untere Dreieck kommutieren.

Behauptung: ι_0 ist ein Monomorphismus, denn:

$$\begin{aligned} \text{coker } \varepsilon &= \text{im } \pi_0 \simeq \text{coim } \pi_0 = \text{coker}(\underbrace{\ker \pi_0}_{=\text{im } \varepsilon}) = \text{coker}(\text{im } \varepsilon) \\ &\simeq \text{coker}(\ker d_0) = \text{coim}(d_0) \simeq \text{im } d_0 \end{aligned}$$

was aus dem Homomorphiesatz und der Exaktheit bei E^0 folgt. Nun verifiziert man, dass

$$\begin{array}{ccc} \text{coker } \varepsilon & \xrightarrow{\sim} & \text{im } d_0 \\ & \searrow \iota_0 & \swarrow \\ & E^1 & \end{array}$$

kommutiert, das heißt, dass ι_0 ein Monomorphismus ist. Da I^1 injektiv und ι_0 ein Monomorphismus, existiert ein $f_1 : E^1 \rightarrow I^1$, sodass auch das rechte Trapez kommutiert. Also ist $f_1 \circ d_0 = d'_0 \circ f_0$.

3. Iteriere das Verfahren. ■

Folgerung 2.7.15. Sei $A \in \text{Ob } \mathcal{A}$, $\varepsilon : A \rightarrow I^\bullet$, $\eta : A \rightarrow J^\bullet$ injektive Auflösungen von A . Dann existiert eine Homotopieäquivalenz $f : I^\bullet \rightarrow J^\bullet$ mit $f_0 \circ \varepsilon = \eta$. Diese ist eindeutig bestimmt bis auf Homotopie.

Beweis. Wir betrachten das Diagramm von Komplexen:

$$\begin{array}{ccccccc} \tilde{I}^\bullet : & 0 & \longrightarrow & A & \xrightarrow{\varepsilon} & I^0 & \longrightarrow & I^1 & \longrightarrow & \dots \\ & & & \uparrow \text{id}_A & & \uparrow f_0 & & \uparrow g_0 & & \\ \tilde{J}^\bullet : & 0 & \longrightarrow & A & \xrightarrow{\eta} & J^0 & \longrightarrow & J^1 & \longrightarrow & \dots \end{array}$$

mit exakten Zeilen. Nach 2.7.14 existiert ein Komplexhomomorphismus $f : I^\bullet \rightarrow J^\bullet$, der id_A fortsetzt und es existiert ein Komplexhomomorphismus $g : J^\bullet \rightarrow I^\bullet$, der id_A fortsetzt. Dann ist aber auch $g \circ f : I^\bullet \rightarrow I^\bullet$ eine Fortsetzung von id_A , ebenso wie id_{J^\bullet} . Aus der Eindeutigkeit in 2.7.14 ist $g \circ f \sim \text{id}_{I^\bullet}$. Analog ist $f \circ g \sim \text{id}_{J^\bullet}$. Somit folgt, dass f eine Homotopieäquivalenz ist. Die Eindeutigkeitsaussage folgt aus 2.7.14. ■

Folgerung 2.7.16. Sei I^\bullet ein exakter Komplex von injektiven Objekten in \mathcal{A} mit $I^i = 0$ für $i \ll 0$. Dann ist $0^\bullet \rightarrow I^\bullet$ eine Homotopieäquivalenz.

Beweis. Ohne Einschränkung ist $I^i = 0$ für $i < 0$ (durch Verschiebung des Komplexes) Dann sind $0^\bullet, I^\bullet$ injektive Auflösungen von 0. Aus 2.7.15 folgt: $0^\bullet \rightarrow I^\bullet$ ist eine Homotopieäquivalenz. ■

2.8 Abgeleitete Funktoren

In diesem Abschnitt sei \mathcal{A} eine abelsche Kategorie mit genügend vielen Injektiven, \mathcal{B} eine abelsche Kategorie und $F : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ ein linksexakter Funktor

Bemerkung + Definition 2.8.1. Für $i \in \mathbb{N}_0$ und jedes Objekt $A \in \text{Ob } \mathcal{A}$ fixieren wir eine injektive Auflösung $A \rightarrow I^\bullet$ von A und setzen

$$R^i F(A) := \mathcal{H}^i(FI^\bullet)$$

Ist $\varphi : A \rightarrow A'$ ein Morphismus in \mathcal{A} und sind $A \rightarrow I^\bullet$, $A' \rightarrow I'^\bullet$ injektive Auflösungen von A, A' , dann existiert ein bis auf Homotopie eindeutiger Komplexhomomorphismus $f : I^\bullet \rightarrow I'^\bullet$, der φ fortsetzt. Wir setzen

$$R^i F(\varphi) := \mathcal{H}^i(Ff).$$

Auf diese Weise wird $R^i F : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ zu einem additiven Funktor. Wird auf dieselbe Art und Weise mit einer anderen Wahl von injektiven Auflösungen ein Funktor $\hat{R}^i F : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ konstruiert, dann sind $R^i F(A)$ und $\hat{R}^i F(A)$ kanonisch isomorph für alle $A \in \text{Ob } \mathcal{A}$, und es gibt eine natürliche Äquivalenz $R^i F \xrightarrow{\sim} \hat{R}^i F$. $R^i F$ heißt der i -te rechtsabgeleitete Funktor

Beweis. • Wohldefiniertheit von $R^i F(\varphi)$: Ist $g : I^\bullet \rightarrow I'^\bullet$ eine weitere Fortsetzung von φ , dann ist $f \sim g$ nach 2.7.14 und somit $Ff \sim Fg$. Mit 2.7.11 folgt $\mathcal{H}^i(Ff) = \mathcal{H}^i(Fg)$ für alle $i \geq 0$.

- $R^i F$ ist ein Funktor, denn für $\varphi : A \rightarrow A'$, $\psi : A' \rightarrow A''$ mit Fortsetzungen $f : I^\bullet \rightarrow I'^\bullet$, $g : I'^\bullet \rightarrow I''^\bullet$ auf injektiven Auflösungen $A \rightarrow I^\bullet$, $A' \rightarrow I'^\bullet$, $A'' \rightarrow I''^\bullet$ von A, A', A'' ist $g \circ f : I^\bullet \rightarrow I''^\bullet$ ein Fortsetzung von $\psi \circ \varphi : A \rightarrow A''$, also

$$\begin{aligned} (R^i F)(\psi \circ \varphi) &= \mathcal{H}^i(F(g \circ f)) = \mathcal{H}^i(Fg \circ Ff) = \mathcal{H}^i Fg \circ \mathcal{H}^i Ff \\ &= R^i F(\psi) \circ R^i F(\varphi) \end{aligned}$$

- $R^i F$ ist additiv, denn sind $\varphi : A \rightarrow A'$, $\psi : A \rightarrow A'$ mit Fortsetzungen $f : I \rightarrow I'^\bullet$, $g : I^\bullet \rightarrow I'^\bullet$ auf injektiven Auflösungen $A \rightarrow I^\bullet$, $A' \rightarrow I'^\bullet$ von A, A' , so ist $f + g : I^\bullet \rightarrow I'^\bullet$ eine Fortsetzung von $\varphi + \psi : A \rightarrow A'$. Der Rest ist klar, da F, \mathcal{H}^i additiv.
- Unabhängigkeit von der Wahl der Auflösungen im obigen Sinne: Für $A \in \text{Ob } \mathcal{A}$ sei $A \xrightarrow{\varepsilon} I_A^\bullet$ die injektive Auflösung, mit der $R^i F$ berechnet wird und $A \xrightarrow{\eta} J_A^\bullet$ die injektive Auflösung von A , mit der $\hat{R}^i F$ berechnet wird. Nach 2.7.15

existiert eine Homotopieäquivalenz $h_A : I_A^\bullet \rightarrow J_A^\bullet$ existiert mit $h_A^0 \circ \varepsilon = \eta$. Wir definieren

$$t_A^i : R^i F(A) = \mathcal{H}^i(FI_A^\bullet) \longrightarrow \hat{R}^i F(A) = \mathcal{H}^i(FJ_A^\bullet) \quad \text{mit} \quad t_A^i := \mathcal{H}^i F h_A$$

Dann ist t_A^i nach 2.7.13 ein Isomorphismus, da Fh_A eine Homotopieäquivalenz ist. Durch $t^i = (t_A^i)_{A \in \text{Ob } \mathcal{A}} : R^i F \Rightarrow \hat{R}^i F$ ist eine natürliche Äquivalenz gegeben, denn für alle $A, A' \in \text{Ob } \mathcal{A}$, $\varphi : A \rightarrow A'$ kommutiert das Diagramm

$$\begin{array}{ccc} R^i F(A) & \xrightarrow{t_A^i} & \hat{R}^i F(A) \\ \mathcal{H}^i F f_I \downarrow & & \downarrow \mathcal{H}^i F f_J \\ R^i F(A') & \xrightarrow{t_{A'}^i} & \hat{R}^i F(A') \end{array}$$

(wobei $f_I : I_A^\bullet \rightarrow J_A^\bullet$, $f_J : J_A^\bullet \rightarrow J_{A'}^\bullet$ Fortsetzungen von φ sind), denn $f_J \circ h_A$, $h_{A'} \circ f_I : I_A^\bullet \rightarrow J_{A'}^\bullet$ sind beides Fortsetzungen von $\varphi = \varphi \circ \text{id}_A = \text{id}_{A'} \circ \varphi$, somit $f_J \circ h_A \sim h_{A'} \circ f_I$, also $Ff_J \circ Fh_A \sim Fh_{A'} \circ Ff_I$ und damit $\mathcal{H}^i F f_J \circ t_A^i = t_{A'}^i \circ \mathcal{H}^i F f_I$. ■

Bemerkung 2.8.2. *Es gilt:*

a) $R^0 F = F$

b) *Ist F exakt, dann ist $R^i F = 0$ für alle $i > 0$.*

Beweis. Für $A \in \text{Ob } \mathcal{A}$ ist $R^i F(A) = \mathcal{H}^i(FI^\bullet)$, wobei $A \xrightarrow{\varepsilon} I^\bullet$ eine injektive Auflösung von A ist. Wir wissen: Ist $0 \longrightarrow A \xrightarrow{\varepsilon} I^0 \xrightarrow{d_0} I^1$ exakt, dann ist ohnehin $0 \longrightarrow FA \xrightarrow{F\varepsilon} FI^0 \xrightarrow{Fd_0} FI^1$ exakt.

$$FI^\bullet : \quad \dots \longrightarrow 0 \longrightarrow 0 \longrightarrow FI^0 \xrightarrow{Fd_0} FI^1 \xrightarrow{Fd_1} FI^2 \longrightarrow \dots$$

mit

$$\begin{aligned} R^0 F(A) &= \mathcal{H}^0(FI^\bullet) = \text{coker}(0 \rightarrow \ker Fd_0) = \ker Fd_0 = \text{im } F\varepsilon \\ &= \text{coim } F\varepsilon = FA \end{aligned}$$

Falls F exakt, dann ist

$$0 \longrightarrow FA \xrightarrow{F\varepsilon} FI^0 \xrightarrow{Fd_0} FI^1 \xrightarrow{Fd_1} \dots$$

exakt, also $R^i F(A) = \mathcal{H}^i(FI^\bullet) = 0$ für $i > 0$. ■

Satz 2.8.3. Sei $0 \longrightarrow A' \longrightarrow A \longrightarrow A'' \longrightarrow 0$ eine exakte Folge in \mathcal{A} . Dann existieren natürliche Morphismen

$$\delta^i : R^i F(A'') \longrightarrow R^{i+1} F(A') \quad \text{für alle } i \geq 0$$

sodass die Folge

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \longrightarrow & F A' & \longrightarrow & F A & \longrightarrow & F A'' \\ & & & & & & \\ & & \longrightarrow & R^1 F A' & \longrightarrow & R^1 F A & \longrightarrow R^1 F A'' \\ & & & & & & \\ & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ & & & \longrightarrow & R^i F A' & \longrightarrow & R^i F A & \longrightarrow R^i F A'' \\ & & & \xrightarrow{\delta^i} & R^{i+1} F A' & \longrightarrow & R^{i+1} F A & \longrightarrow R^{i+1} F A'' \\ & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \end{array}$$

exakt ist. Ist

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \longrightarrow & A' & \longrightarrow & A & \longrightarrow & A'' \longrightarrow 0 \\ & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ 0 & \longrightarrow & B' & \longrightarrow & B & \longrightarrow & B'' \longrightarrow 0 \end{array}$$

ein kommutatives Diagramm, wobei die untere Zeile exakt ist, so kommutiert für alle $i \geq 0$ das Diagramm

$$\begin{array}{ccc} R^i F(A'') & \xrightarrow{\delta^i} & R^{i+1} F(A') \\ \downarrow & & \downarrow \\ R^i F(B'') & \xrightarrow{\delta^i} & R^{i+1} F(B') \end{array}$$

Beweis (Beweisskizze). Nach dem Hufeisenlemma existieren kompatible injektive Auflösungen $A' \rightarrow I'^\bullet$, $A \rightarrow I^\bullet$, $A'' \rightarrow I''^\bullet$ in dem Sinne, dass

$$0 \longrightarrow I'^\bullet \longrightarrow I^\bullet \longrightarrow I''^\bullet \longrightarrow 0$$

eine exakte Folge von Komplexen ist. I^i ist injektiv für alle $i \geq 0$, also spaltet die Folge

$$0 \longrightarrow I^i \longrightarrow I^i \longrightarrow I''^i \longrightarrow 0$$

(wobei Spaltung in abelschen Kategorien analog zu $R\text{-Mod}$ definiert ist und analoge Resultate gelten). Dann ist $I^i = I^i \oplus I''^i$ und, da F additiv, $F(I^i) = F(I^i) \oplus F(I''^i)$, womit

$$0 \longrightarrow FI^i \longrightarrow FI^i \longrightarrow FI''^i \longrightarrow 0$$

exakt ist. Insbesondere existiert eine exakte Folge von Komplexen

$$0 \longrightarrow FI'^\bullet \longrightarrow FI^\bullet \longrightarrow FI''^\bullet \longrightarrow 0$$

woraus wir eine lange exakte Kohomologiefolge erhalten, was die Behauptung liefert. ■

Definition 2.8.4. Sei $A \in \text{Ob } \mathcal{A}$. Dann heißt A *F-azyklisch* $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow} R^i F(A) = 0$ für alle $i \geq 1$.

Bemerkung 2.8.5. Ist $A \in \text{Ob } \mathcal{A}$ injektiv, dann ist A *F-azyklisch*.

Beweis. Offenbar ist $A \xrightarrow{\text{id}} (A \longrightarrow 0 \longrightarrow 0 \longrightarrow \dots)$ eine injektive Auflösung von A . Damit ist

$$R^i F(A) = \mathcal{H}^i(FA \longrightarrow 0 \longrightarrow 0 \longrightarrow \dots) = 0 \quad \text{für } i \geq 1$$

woraus die Behauptung folgt. ■

Satz 2.8.6. Sei $A \rightarrow J^\bullet$ eine injektive Auflösung von A durch *F-azyklische* Objekte, d.h. J^\bullet ist ein Komplex mit $J^i = 0$ für $i < 0$ und J^i *F-azyklisch* für $i \geq 0$, sodass der augmentierte Komplex

$$0 \longrightarrow A \longrightarrow J^1 \longrightarrow J^2 \longrightarrow \dots$$

exakt ist. Dann gibt es einen kanonischen Isomorphismus $R^i F(A) \cong \mathcal{H}^i(FJ^\bullet)$ für alle $i \geq 0$.

Beweis. (für $R\text{-Mod}$ in S.Lang “Algebra“) ■

Anmerkung. Die Theorie der Linksableitung rechtsexakter Funktoren lässt sich analog entwickeln: Sei \mathcal{A} eine abelsche Kategorie mit genügend vielen Projektiven, \mathcal{B} eine abelsche Kategorie, $F : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ ein rechtsexakter Funktor. Wir wählen für jedes $A \in \text{Ob } \mathcal{A}$ eine projektive Auflösung $P_\bullet \rightarrow A$ und setzen

$$L_i F(A) := \mathcal{H}_i(FP_\bullet)$$

Rest analog.

2.9 δ -Funktoren

In Folgenden seien \mathcal{A}, \mathcal{B} abelsche Kategorien

Definition 2.9.1. Ein δ -Funktork $H = (H^n)_{n \geq 0}$ ist eine Familie additiver Funktoren $H^n : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ zusammen mit Homomorphismen $\delta : H^n(C) \rightarrow H^{n+1}(A)$ für alle $n \geq 0$ und jede kurze exakte Folge $0 \longrightarrow A \longrightarrow B \longrightarrow C \longrightarrow 0$, sodass gilt:

(D1) δ ist funktoriell, d.h. ist

$$\begin{array}{ccccccccc} 0 & \longrightarrow & A & \longrightarrow & B & \longrightarrow & C & \longrightarrow & 0 \\ & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \\ 0 & \longrightarrow & A' & \longrightarrow & B' & \longrightarrow & C' & \longrightarrow & 0 \end{array}$$

ein kommutatives Diagramm in \mathcal{A} mit exakten Zeilen, dann kommutiert

$$\begin{array}{ccc} H^n(C) & \xrightarrow{\delta} & H^{n+1}(A) \\ \downarrow & & \downarrow \\ H^n(C') & \xrightarrow{\delta} & H^{n+1}(A') \end{array}$$

in \mathcal{B} für alle $n \geq 0$

(D2) Für jede kurze exakte Folge $0 \longrightarrow A \longrightarrow B \longrightarrow C \longrightarrow 0$ in \mathcal{A} ist die lange exakte Folge

$$\dots \longrightarrow H^n(A) \longrightarrow H^n(B) \longrightarrow H^n(C) \xrightarrow{\delta} H^{n+1}(A) \longrightarrow \dots$$

exakt in \mathcal{B} .

Beispiel 2.9.2. \mathcal{A} habe genügend viele Injektive, $F : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ linksexakt. Dann ist $H := (R^n F)_{n \geq 0}$ ein δ -Funktork nach 2.8.3

Definition 2.9.3. Sei $H = (H^n)_{n \geq 0} : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ ein δ -Funktork. H heißt *universell* $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ Für jeden δ -Funktork $H' = (H'^n)_{n \geq 0} : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ setzt sich jede natürliche Transformation $f^\circ : H^\circ \Rightarrow H'^\circ$ eindeutig zu einem Homomorphismus von δ -Funktoren fort, d.h. zu einer Familie $f = (f^n)_{n \geq 0}$ von natürlichen Transformationen $f^n : H^n \Rightarrow H'^n$ die auf naheliegende Weise mit den δ' verträglich sind.

Bemerkung 2.9.4. Sind F, G universelle δ -Funktoren mit $F^0 = G^0$, dann gibt es eine kanonische natürliche Äquivalenz von δ -Funktoren $F \xrightarrow{\sim} G$.

Beweis. $id : F^0 \Rightarrow G^0$ setzt sich fort zu einem Homomorphismus $\Phi : (\Phi_n)_{n \geq 0}, \Phi_n : F_n \Rightarrow G_n$ von δ -Funktor. $id : G^0 \Rightarrow F^0$ setzt sich fort zu einem Homomorphismus $\Psi = (\Psi_n)_{n \geq 0}, \Psi_n : G_n \Rightarrow F_n$ von δ -Funktor. $\Psi \circ \Phi := (\Psi_n \circ \Phi_n)_{n \geq 0}$ ist eine Fortsetzung von $id : F^0 \Rightarrow F^0$. Aus der Eindeutigkeit in der Universellen Eigenschaft folgt $\Psi \circ \Phi = id_F$. Analog $\Phi \circ \Psi = id_G$ ■

Definition 2.9.5. Sei $F : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ ein additiver Funktor. F heißt *auslöschar* $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ Für jedes $A \in \text{Ob } \mathcal{A}$ existiert ein $A' \in \text{Ob } \mathcal{A}$ und ein Monomorphismus $u : A \hookrightarrow A'$ mit $F(u) = 0$.

Satz 2.9.6. Sei $H = (H^n)_{n \geq 0} : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ ein δ -Funktor, sodass H^n auslöschar für alle $n \geq 1$. Dann ist H universell.

Beweis (Beweisskizze). Sei $H' = (H'^n)_{n \geq 0} : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ ein δ -Funktor, $f^0 : H^0 \Rightarrow H'^0$ eine natürliche Transformation. Wir konstruieren die natürliche Transformation $f^n : H^n \Rightarrow H'^n$ die mit δ kommutieren, per Induktion nach n . Seien f^0, \dots, f^n bereits konstruiert. Sei $A \in \text{Ob } \mathcal{A}$. Da H^{n+1} auslöschar, gibt es eine exakte Folge:

$0 \longrightarrow A \xrightarrow{u} A' \longrightarrow B \longrightarrow 0$ mit $H^{n+1}(n) = 0$. So erhalten wir Diagramm:

$$\begin{array}{ccccccc} H^n A' & \longrightarrow & H^n B & \xrightarrow{\delta} & H^{n+1} A & \longrightarrow & 0 \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \\ H'^n A' & \longrightarrow & H'^n B & \xrightarrow{\delta'} & H'^{n+1} A & & \end{array}$$

konstruiere mit den üblichen Argumenten einen Morphismus $f_A^{n+1} : H^{n+1} A \rightarrow H'^{n+1} A$, der mit den δ 's vertauscht, und so dass $f^{n+1} = (f_A^{n+1})_{A \in \text{Ob } \mathcal{A}} : H^{n+1} \Rightarrow H'^{n+1}$ eine natürliche Transformation ist. ■

Folgerung 2.9.7. Habe \mathcal{A} genügend viele Injektive, $F : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ linksexakter Funktor. Dann ist $(R^n F)_{n \geq 0}$ ein universeller δ -Funktor.

Beweis. Nach 2.9.6 genügt es zu zeigen: $R^n F$ ist auslöschar für alle $n \geq 1$. Sei $n \geq 1, A \in \text{Ob } \mathcal{A}$. Dann existiert ein injektives Objekt $I \in \text{Ob } \mathcal{A}$ und ein Monomorphismus $u : A \hookrightarrow I$. $\Rightarrow R^n F(u) : R^n F(A) \rightarrow R^n F(I) = 0$ nach 2.8.5 ist der Nullmorphimus für $n \geq 1$. ■

2.10 Ext und Erweiterungen

Definition 2.10.1. Seien M, N R -Moduln. Wir setzen:

$$\operatorname{Ext}_R^n(M, N) := R^n \operatorname{Hom}_R(M, -)(N), \quad \text{für } n \geq 0$$

Explizit: wähle eine injektive Auflösung $N \rightarrow I^\bullet$ von N , dann ist

$$\operatorname{Ext}_R^n(M, N) = H^n(\operatorname{Hom}_R(M, I^\bullet))$$

Satz 2.10.2. Seien M, N R -Moduln. Dann gibt es kanonische Isomorphismen

$$\operatorname{Ext}_R^n(M, N) \simeq R^n \operatorname{Hom}_R(-, N)(M)$$

für alle $n \geq 0$, insbesondere kann $\operatorname{Ext}_R^n(M, N)$ auch über eine projektive Auflösung $P_\bullet \rightarrow M$ von M betrachtet werden via $\operatorname{Ext}_R^n(M, N) = H^n(\operatorname{Hom}_R(P_\bullet, N))$.

Beweis. Sei N fixiert.

1. Die Familie kontravarianter Funktoren $(R^n \operatorname{Hom}_R(-, N))_{n \geq 0}$ ist ein kontravarianter universeller δ -Funktorkomplex mit $R^0 \operatorname{Hom}_R(-, N) = \operatorname{Hom}_R(-, N)$ (analoge Aussage zu 2.9.7). Denn: $(R^n \operatorname{Hom}_R(-, N))_{n \geq 0}$ ist ein kontravarianter δ -Funktorkomplex nach der kontravarianten Version von 2.8.3. Es bleibt noch zu zeigen: $(R^n \operatorname{Hom}_R(N, -))_{n \geq 0}$ ist universell. Dafür genügt es nach 2.9.6 zu zeigen, dass $R^n \operatorname{Hom}_R(-, N)$ koauslöschar für alle $n \geq 1$. Sei M ein R -Modul. Dann existiert ein projektiver R -Modul P und ein Epimorphismus $u : P \rightarrow M$. So erhält man: $R^n \operatorname{Hom}_R(-, N)(u) : R^n \operatorname{Hom}_R(-, N)(M) \rightarrow R^n \operatorname{Hom}_R(-, N)(P)$. P ist $\operatorname{Hom}_R(-, N)$ -zyklisch, da $(\dots \rightarrow 0 \rightarrow P) \xrightarrow{id_P} P$ eine projektive Auflösung von P ist und $R^n \operatorname{Hom}_R(-, N)(P) = H^n(\operatorname{Hom}_R(P, N) \rightarrow 0 \rightarrow 0 \rightarrow \dots) = 0$ für $n \geq 1$ ist. Daraus folgt: $R^n \operatorname{Hom}_R(-, N)(n) = 0$, das heißt $R^n \operatorname{Hom}_R(-, N)$ ist koauslöschar für $n \geq 1$.

2. Wir setzen:

$$F^n : R\text{-Mod} \rightarrow \mathbb{Z}\text{-Mod}, M \mapsto R^n \operatorname{Hom}_R(M, -)(N) = H^n(\operatorname{Hom}_R(M, I^\bullet))$$

wobei $N \rightarrow I^\bullet$ eine injektive Auflösung von N ist. Dann ist $(F^n)_{n \geq 0}$ ebenfalls ein kontravarianter universeller δ -Funktorkomplex mit $F^0 = \operatorname{Hom}_R(-, N)$, da: $(F^n)_{n \geq 0}$ ist ein kontravarianter δ -Funktorkomplex, denn:

- F^n ist kontravarianter additiver Funktor: klar

- Sei $0 \longrightarrow M' \longrightarrow M \longrightarrow M'' \longrightarrow 0$ eine exakte Sequenz von R -Moduln, so erhält man eine Sequenz von Komplexen:

$$0 \longrightarrow \operatorname{Hom}_R(M'', I^\bullet) \longrightarrow \operatorname{Hom}_R(M, I^\bullet) \longrightarrow \operatorname{Hom}_R(M', I^\bullet) \longrightarrow 0$$

(beachte: $\operatorname{Hom}_R(-, I)$ exakt für injektive R -Moduln I). Die lange exakte Kohomologiefolge liefert die Behauptung. ■

$(F_n)_{n \geq 0}$ ist universell: nach 2.9.6 genügt zu zeigen, dass F_n koauslöschar für alle $n \geq 1$. Sei M ein R -Modul. Dann existiert ein projektiver R -Modul P und ein Epimorphismus $u : P \rightarrow M$. Damit erhält man $F^n(u) : F^n(M) = R^n \operatorname{Hom}_R(m, -)(N) \rightarrow R^n \operatorname{Hom}_R(P, -)(N) = F^n(P)$. Wegen der Projektivität von P ist $\operatorname{Hom}_R(p, -)$ exakt und deshalb ist $R^n \operatorname{Hom}_R(P, -) = 0$ für $n \geq 1$. Daraus folgt $F^n(u) = 0$, das heißt F_n ist koauslöschar für $n \geq 1$.

3. nach 1 und 2 sind $(R^n \operatorname{Hom}_R(-, N))_{n \geq 0}$ und $(F^n)_{n \geq 0}$ beides kontravariante δ -Funktoren, mit $R^0 \operatorname{Hom}_R(-, N) = \operatorname{Hom}_R(-, N) = F^0$. Mit 2.9.4 folgt, dass es für alle R -Moduln M eine kanonische Isomorphie:

$$R^n \operatorname{Hom}_R(-, N)(M) \simeq F(M) = R^n \operatorname{Hom}_R(M, -)(N) = \operatorname{Ext}_R^n(M, N)$$

Satz 2.10.3. Sei A ein Hauptidealring, M, N seinen R -Moduln. Dann gilt: $\operatorname{Ext}_A^n(M, N) = 0$ für alle $n \geq 2$.

Beweis. 1. Wir konstruieren eine injektive Auflösung von N . Es existiert ein injektiver A -Modul I^0 , und ein Monomorphismus $\varepsilon : N \hookrightarrow I^0$.

$$0 \longrightarrow N \xrightarrow{\varepsilon} I^0 \longrightarrow I^1 \longrightarrow 0$$

I^0 injektiv, dann folgt mit 2.6.11 I^0 ist teilbar $\Rightarrow \operatorname{coker} \varepsilon = I^0 / \operatorname{im} \varepsilon$ teilbar, damit folgt aus 2.6.12 und da A ein HIR, dass der $\operatorname{coker} \varepsilon$ injektiv ist. Setze $I^1 := \operatorname{coker} \varepsilon$, dann ist $N \xrightarrow{\varepsilon} I^0 \longrightarrow I^1 \longrightarrow 0 \longrightarrow 0 \dots$ eine injektive Auflösung von N .

2. Für $n \geq 2$ ist $\operatorname{Ext}_A^n(M, N) = H^n(\operatorname{Hom}_R(M, I^\bullet)) = 0$.

Bemerkung + Definition 2.10.4. Seien M, N R -Moduln.

$\mathcal{E}(M, N) = \{\text{exakte Sequenzen } 0 \longrightarrow N \longrightarrow E \longrightarrow M \longrightarrow 0 \text{ von } R\text{-Moduln}\}.$

Wir definieren auf $\mathcal{E}(M, N)$ eine Relation " \sim " wie folgt:

$0 \longrightarrow N \longrightarrow E \longrightarrow M \longrightarrow 0 \sim 0 \longrightarrow N \longrightarrow E' \longrightarrow M \longrightarrow 0$
 $\stackrel{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ Es existiert ein Homomorphismus $\alpha : E \rightarrow E'$, sodass:

$$\begin{array}{ccccccccc}
 0 & \longrightarrow & N & \longrightarrow & E & \longrightarrow & M & \longrightarrow & 0 \\
 & & \downarrow id & & \downarrow \alpha & & \downarrow id & & \\
 0 & \longrightarrow & N & \longrightarrow & E' & \longrightarrow & M & \longrightarrow & 0
 \end{array}$$

kommutiert (nach Fünferlemma ist α ein Isomorphismus). ” \sim ” ist eine Äquivalenzrelation auf $\mathcal{E}(M, N)$, wir setzen: $E(M, N) := \mathcal{E}(M, N) / \sim$.

$E(M, N)$ enthält ein ausgezeichnetes Element, die Äquivalenzklasse der spaltenden exakten Sequenzen $0 \longrightarrow N \longrightarrow N \oplus M \longrightarrow M \longrightarrow 0$.

Index

- abelsche Kategorie, 37
- additive Kategorie, 34, 35
- adjungierter Funktor, 40
- Anfangsobjekt, 32
- Annulator, 9
- artinsch, 21
- artinscher Ring, 21
- Auflösung von Objekten, 55
- aufsteigende Kettenbedingung, 17
- augmentierte Komplex, 55

- Baer-Kriterium, 47
- Basis, 9
- Bild, 6

- Differential, 53
- direkte Summe, 8
- direktes Produkt, 8
- Duale Kategorie, 25

- Einbettungssatz von Freyd-Mitchell, 42
- endlich erzeugter Modul, 10
- endlich koerzeugt, 23
- Endobjekt, 32
- Epimorphismus, 5
- Erzeugendensystem, 9
- erzeugter Untermodul, 9
- exakte Sequent, 11
- exakter Funktor, 39

- Fünferlemma, 15
- Faktormodul, 6
- freier Modul, 10

- genügend viele Injektive, 55
- genügend viele Projektive, 55

- Hilbertscher Basissatz, 20
- homotope Komplexhomomorphismen, 57

- Homotopieäquivalenz, 58
- Hufeisenlemma, 56

- injektives Objekt, 39
- Isomorphismus, 5

- Kategorie, 24
- kategorielle exakte Folge, 38
- kategorieller Epimorphismus, 27
- kategorieller Isomorphismus, 27
- kategorieller Kern, 35
- kategorieller Monomorphismus, 27
- kategorielles Bile, 36
- kategorielles Kobild, 36
- kategorielles Koprodukt, 33
- Kategorienäquivalenz, 29
- Kern, 6
- Klasse, 24
- kofreier Modul, 50
- Kohomologie, 54
- Komplex, 53
- Komplexhomomorphismus, 53
- kontravarianter Funktor, 26
- Koprodukt, 33
- Korand, 54
- kovarianter Funktor, 25
- Kozykel, 54
- kurze exakte Sequenz, 11

- Lange exakte Kohomologiefolge, 54
- linear abhängig, 9
- linksexakter Funktor, 39
- Linksmodul, 3

- Modulhomomorphismus, 4
- Monomorphismus, 5
- Morphismus, 24

- natürliche Äquivalenz, 29
- natürliche Transformation, 28

Index

noetherscher Modul, 17
noetherscher Ring, 18
Nullobjekt, 32

Objekt, 24

Produkt, 32
Produkt von Kategorien, 27
projektives Objekt, 40

Quasiisomorphismus, 58

Rang eines Moduls, 10
rechtsexakter Funktor, 39
Rechtsmodul, 3

Schlangenlemma, 15
Schnitt einer exakten Sequenz, 12

teilbarer Modul, 49

Unterm modul, 6

volltreuer Funktor, 42

Yoneda-Einbettung, 31
Yoneda-Lemma, 30