Algebra 2

Sommersemester 2018

Universität Heidelberg

Dr. Denis Vogel

Letzte Aktualisierung: 6. Juni 2018

Mitschrieb von Jonas Wildberger und Celine Fietz

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

Inhaltsverzeichnis

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 $R \times M \to M$, $(a, x) \mapsto ax$ (skalare Multiplikation), sodass für alle $a, b \in R$, $x, y \in M$ gilt:

a) $a(x + y) = ax + ay$

b) $(a + b)x = ax + bx$

c) $a(bx) = (ab)x$

d) $1x = x$

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

a') $(x + y)a = xa + yb$

b') $x(a + b) = xa + xb$

c') $x(ab) = (xa)b$

d') $x1 = x$

Anmerkung. Es bezeichne R^{op} den zu R entgegengesetzten Ring, d.h. eine Menge R mit derselbern 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

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

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

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

für $f, g \in \mathrm{End}(M)$, $x \in M$). Nach $b) - d)$ ist die Abbildung $\varphi : R \to \mathrm{End}(M)$, $a \mapsto l_a$ ein Ringhomomorphismus. Umgekehrt macht jeder Ringhomomorphismus $\varphi : R \to \mathrm{End}(M)$ 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

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

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

Definition 1.1.3. Seien M, M' R-Moduln, $\varphi : M \to M'$. 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) $\varphi(ax) = a\varphi(x)$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Isomorphismus $\overset{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ φ 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 $\Rightarrow$ $Hom_R(M, M')$ ist ein R-Modul via $(a\varphi)(x) := a\varphi(x)$ für $a \in R$, $\varphi \in Hom_R(M, M')$, $x \in M$.

b) $End_R(M) = Hom_R(M, M)$ ist ein Unterring von $End(M) = End_{\mathbb{Z}}(M)$.

c) Die Abbildung $\Phi : Hom_R(R, M) \to M$, $\varphi \mapsto \varphi(1)$ 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) $End_R(R) \cong R^{op}$

Beweis. a) Beachte: Für $a \in R$, $\varphi \in \mathrm{Hom}_R(M, M')$ 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

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

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

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

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 Untermodul 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 Untermoduln. Ist $(M_i)_{i\in I}$ eine Familie von Untermoduln von M, dann ist $\bigcap_{i\in I} M_I \subseteq M$ ein Untermodul, sowie $\sum_{i\in I} M_i = \{\sum_{i\in I} x_i |\, x_i \in M_i,\, x_i = 0$ für fast alle $i \in I\}$

c) Sind M, M' R-Moduln, $\varphi \in \mathrm{Hom}_R(M, M')$, $N \subseteq M$ ein Untermodul, $N' \subseteq M'$ ein Untermodul, dann sind $\varphi(N) \subseteq M'$ und $\varphi^{-1}(N') \subseteq M$ Untermoduln.

   $\mathrm{im}\,\varphi := \varphi(M)$ 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 $\Leftrightarrow \mathrm{im}\,\varphi = M'$

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 $\pi : M \to {}^{M}\!/\!_{N}$, $m \mapsto m + N$ ist ein Modulepimorphismus mit $\ker\pi = N$.

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

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

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, $\pi : M \to {}^{M}/_{N}$ die kanonische Projektion, $\varphi : M \to M'$ R-Modulhomomorphismus. Dann sind äquivalent:*

i) $N \subseteq ker\varphi$

ii) Es ex. genau ein Modulhomomorphismus $\overline{\varphi} : {}^{M}/_{N} \to M'$ *mit* $\overline{\varphi} \circ \pi = \varphi$:

$$\begin{tikzcd} M \arrow[rr, "\varphi"] \arrow[dr, "\pi"'] & & M' \\ & {}^{M}/_{N} \arrow[ur, dashed, "\overline{\varphi}"'] & \end{tikzcd}$$

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

$$\overline{\varphi} : {}^{M}/_{ker\varphi} \xrightarrow{\sim} \operatorname{im}\varphi \quad \textit{mit} \quad \overline{\varphi}(x + ker\varphi) = \varphi(x)$$

für alle $x \in M$.

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

a) Die Abbildung

$$ {}^{N_1}/_{N_1 \cap N_2} \xrightarrow{\sim} {}^{(N_1+N_2)}/_{N_2} \qquad x + N_1 \cap N_2 \mapsto x + N_2$$

ist ein Isomorphismus.

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

$$ {}^{M/N_2}/_{M/N_1} \xrightarrow{\sim} {}^{M}/_{N_1} \qquad (x+N_2) + {}^{N_1}/_{N_2} \mapsto x + N_1$$

ein Isomorphismus.

Satz 1.1.14. *Sei M ein R-Modul, $N \subseteq M$ ein Untermodul, $\pi : M \to {}^{M}/_{N}$ die kanonische Projektion. Dann gibt es eine Bijektion*

$$\begin{array}{rcl} \{\textit{Untermoduln } M' \textit{ von } M \textit{ mit } N \subseteq M'\} & \longrightarrow & \{\textit{Untermoduln von } {}^{M}/_{N}\} \\ M' & \mapsto & \pi(M') \\ \pi^{-1}(L) & \leftarrow\!\shortmid & L \end{array}$$

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 $p_j : \prod_{i\in I} M_i \to M_j$ mit $(m_i)_{i\in I} \mapsto m_j$ sind R-Modulhomomorphismen.

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

$$Hom_R(M, \prod_{i\in I} M_i) \to \prod_{i\in I} Hom_R(M, M_i) \qquad \varphi \mapsto (p_i \circ \varphi)_{i\in I}$$

eine Bijektion, d.h. für jede Familie $(\varphi_i)_{i\in I}$ von R-Modulhomomorphismen $\varphi_i : M \to M_i$ ex. genau ein R-Modulhomomorphismus $\varphi : M \to \prod_{i\in I} M_i$ 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

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

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

$$Hom_R(\bigoplus_{i\in I} M_i, M) \to \prod_{i\in I} Hom_R(M_i, M) \quad \textit{mit} \quad \psi \mapsto (\psi \circ q_i)_{i\in I}$$

eine Bijektion, d.h. für jede Familie $(\psi_i)_{i\in I}$ von R-Modulhomomorphismen $\psi_i : M_i \to M$ ex. genau ein R-Modulhomomorphismus $\psi : \bigoplus_{i\in I} M_i \to M$ 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:

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

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*

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

Ist ψ injekitv, 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 $J \subseteq I$
- $M_1 + M_2 = M_1 \bigoplus M_2 \iff M_1 \cap M_2 = 0$

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

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

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

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

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, $\psi : R^{(I)} \to M, (a_i)_{i \in I} \mapsto \sum_{i \in I} a_i x_i$. $(x_i)_{i \in I}$ heißt

Erzeugendensystem von M mit $R \overset{\text{Def}}{\Leftrightarrow} \psi$ 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 $\Longleftrightarrow$ M besitzt ein endliches Erzeugendensystem

frei $\Longleftrightarrow$ 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:

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

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

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

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

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 $A^n/_{JA^n} \to (A/_J)^n, (x_1, .., x_n) + JA^n \mapsto (x_1 + J, ..., x_n + J)$ 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 $f_i : M_i \to M_{i+1}$ 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: $\ldots \longrightarrow M_{i-1} \xrightarrow{f_{i-1}} M_i \xrightarrow{f_i} M_{i+1} \longrightarrow \ldots .$

Eine exakte Folge der Form:

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

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 $f : M \to N$ 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 $\overline{g} : {}^{M}\!/_{N} \xrightarrow{\sim} M''$, und f beschränkt sich zu einem Isomorphismus $f : M' \xrightarrow{\sim} N$. (d.h.

$$\begin{tikzcd}
0 \arrow[r] & M' \arrow[r, "f"] \arrow[d, "\sim"', "f"] & M \arrow[r, "g"] \arrow[d, equal] & M'' \arrow[r] & 0 \\
0 \arrow[r] & N \arrow[r, hook, "e"] & M \arrow[r, "f"] & {}^{M}\!/_{N} \arrow[r] \arrow[u, "\sim"'] & 0
\end{tikzcd}$$

  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

$$\textstyle\prod_{i\in I} M_i' \longrightarrow \prod_{i\in I} M_i \longrightarrow \prod_{i\in I} M_i''$$

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* $\begin{tikzcd} 0 \arrow[r] & M' \arrow[r, "f"] & M \arrow[r, "g"] \arrow[l, bend right, dashed, "t"'] & M'' \arrow[r] \arrow[l, bend right, dashed, "s"'] & 0 \end{tikzcd}$ *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-Moduolhomomorphismus $s : M'' \to M$ *mit* $g \circ s = \mathrm{id}_{M''}$

iii) Es existiert ein R-Modulhomomorphismus $t : M \to M'$ *mit* $t \circ f = \mathrm{id}_{M'}$

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 $g\big|_{N'} : N' \to M''$ injektiv. Außerdem gilt: $M'' = g(M) = g(N')$, also ist $G\big|_{N'} : N' \xrightarrow{\sim} M''$ ein Isomorphismus. Setze $s : M'' \to N' \hookrightarrow M$. Dann ist s ein R-Modulhomomorphismus mit $g \circ s = \mathrm{id}_{M''}$. Außerdem ist

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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. Dan 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 $s : M'' = \bigoplus_{i \in I} Rv_i \to M$ 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 $g \circ s = \mathrm{id}_{M''}$ ∎

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:

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

Bemerkung 1.2.5. *Sei* $0 \longrightarrow M' \xrightarrow{f} M \xrightarrow{g} M'' \longrightarrow 0$ *ein 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 $\varphi : R^n \to M$. Dann ist $g \circ \varphi : R^n \to M''$ ebenfalls ein Epimorphismus, also ist M'' endlich erzeugt.

b) Sei $(x_1, \ldots, x_r)$ ein Erzeugendensystem von M', $(y_1, \ldots, y_s)$ ein Erzeugendensystem von M''. Da g surjektiv, exitieren $z_1, \ldots, z_s \in M$ mit $g(z_i) = y_i$ für $i = 1, \ldots, s$.
Behauptung: $f(x_1), \ldots, f(x_r), z_1, \ldots, z_s$ ist ein Erzeugendensystem von M, denn sei $m \in M$. Dann exsitieren $a_1, \ldots, a_s \in R$ 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 $m - \sum_{i=1}^s a_i z_i \in \ker g = \operatorname{im} f$. 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, $R = K[X_1, X_2, \ldots]$. 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 ex existieren $f_1, \ldots, f_r \in I$ mit $I = \sum_{i=1}^r R f_i$. Dann existiert ein $n \in \mathbb{N}$, sodass $f_1, \ldots, f_r \in K[X_1, \ldots, X_n] \subseteq R$.
Problem: $X_{n+1} \notin I$, denn andernfalls wäre $X^{n+1} = a_1 f_1 + \ldots + a_r f_r$ mit $a_1, \ldots, a_r \in R$ und setze $X_1 = \ldots = X_n = 0,\ X_{n+1} = 1$, also $1 = 0$ Widerspruch!

Bemerkung 1.2.7. *Seien $M_1, \ldots, M_r$ R-Moduln. Dann sind äquivalent:*

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

ii) $M_1, \ldots, M_r$ *sind endlich erzeugt.*

Beweis. Es genügt, die Behaptung 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*

$$\begin{tikzcd}
M_1 \arrow[r] \arrow[d, "\varphi_1"] & M_2 \arrow[r] \arrow[d, "\varphi_2"] & M_3 \arrow[r] \arrow[d, "\varphi_3"] & M_4 \arrow[r] \arrow[d, "\varphi_4"] & M_5 \arrow[d, "\varphi_5"] \\
N_1 \arrow[r] & N_2 \arrow[r] & N_3 \arrow[r] & N_4 \arrow[r] & N_5
\end{tikzcd}$$

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:*

$$\begin{tikzcd}
 & M' \arrow[r, "f'"] \arrow[d, "\varphi'"] & M \arrow[r, "f"] \arrow[d, "\varphi"] & M'' \arrow[r] \arrow[d, "\varphi''"] & 0 \\
0 \arrow[r] & N' \arrow[r, "g'"] & N \arrow[r, "g"] & N'' &
\end{tikzcd}$$

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

$$
\begin{tikzcd}
 & \ker\varphi' \arrow[r] \arrow[d] & \ker\varphi \arrow[r] \arrow[d] & \ker\varphi'' \arrow[d] \arrow[dddll, red, "\delta"] & \\
 & M' \arrow[r, "f'"] \arrow[d, "\varphi'"] & M \arrow[r, "f"] \arrow[d, "\varphi"] & M'' \arrow[r] \arrow[d, "\varphi''"] & 0 \\
0 \arrow[r] & N' \arrow[r, "g'"] \arrow[d] & N \arrow[r, "g"] \arrow[d] & N'' \arrow[d] & \\
 & \operatorname{coker}\varphi' \arrow[r] & \operatorname{coker}\varphi \arrow[r] & \operatorname{coker}\varphi'' &
\end{tikzcd}
$$

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 $n \in \ker g = \operatorname{im} g'$. Also existiert ein $n' \in N'$ mit $g'(n') = n$ (n' ist eindeutig bestimmt wegen g' injektiv.) Setze $\delta(m'') := n' + \operatorname{im}\varphi'$
Wohldefiniertheit von δ: Sei $\tilde{m} \in M$ mit $m'' = f(\tilde{m})$. Dann ist $(\tilde{m}) = f(m)$, also $\tilde{m} - m \in \ker f = \operatorname{im} f'$. 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 $\tilde{n}' + \operatorname{im}\varphi' = n' + \operatorname{im}\varphi'$, Rest ist Übungsaufgabe. ■

1.3 Noethersche und Artinsche Moduln

Definition 1.3.1. Sei M ein R-Modul. M heißt *noethersch* $\overset{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ 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 $a \in M_i$, $b \in M_j$, Œgilt: $i \leq j \Rightarrow M_i \subseteq M_j$, $a, b \in M_j \Rightarrow a + b \in M_j \subseteq N$). Da M noethersch, ist N endlich erzeugt, d.h. es existiert ein endliches Erzeugendensystem $x_1, \dots x_r$ von N. Für jedes $i \in \{1, \dots r\}$ exsistieren $j_i \in \mathbb{N}_0$ 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 $N \subseteq M$ ei Untermodul. Setze

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

Wegen $0 \in \mathcal{X}$ ist $\mathcal{X} \neq \emptyset \overset{(iii)}{\Rightarrow}$ 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* $0 \longrightarrow M' \longrightarrow M \longrightarrow M'' \longrightarrow 0$ *ein 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 $M \overset{M \text{noet.}}{\Longrightarrow} N'$ endlich erzeugt. Sei $N'' \subseteq {}^{M}\!/_{N}$ Untermodul. Also ist $\pi^{-1}(N'') \twoheadrightarrow N''$ 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. *$M_1, ..., M_r$ R-Moduln. Dann sind äquivalent:*

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

ii) $M_1, ..., M_r$ 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. $R \backslash \{0\}$ ist eine Gruppe bzgl. "."), dann ist R noethersch, denn wegen $Ra = R = aR$ für alle $a \in R \backslash \{0\}$ 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 Vorraussetzung ist R als R-Modul noethersch $\overset{1.3.5}{\Rightarrow}$ R^n noetherscher R-Modul $\overset{1.3.4}{\Rightarrow}$ 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:

$$N \text{ ist } R/I\text{-Modul von } R/I \;\Leftrightarrow\; N \text{ ist } R-\text{Untermodul von } R/I$$
$$(\text{bezüglich } \overline{a} \cdot \overline{x} := \overline{ax}) \qquad (\text{bezüglich } a \cdot \overline{x} := \overline{ax})$$

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 $\overline{1}$). ■

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

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

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 $\varphi : M \bigoplus N \overset{\sim}{\longrightarrow} M \overset{\sim}{\longrightarrow} M'$. 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, $R \neq 0$, $n_1, n_2 \in N$. 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 Bergiff des Ranges freier Moduln auch für endlich erzeugte, freie Modlun 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 $B_1 \subseteq B_2 \subseteq \ldots$ 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 $f - X^{m-n} f_1 \in I_{m-1} \overset{\mathrm{IV}}{\subseteq} R[X]I_n$. 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

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

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, $\varphi : A \to B$ 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 nothersch $\Rightarrow$ B noethersch.

Beweis. a) aus 1.3.12 per Induktion

b) Nach Voraussetzung existiert ein surjektiver Ringhomomorphismus

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

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

Definition 1.3.14. Sei M ein R-Modul. M heißt *artinsch* $\overset{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ 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*) $\overset{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ R ist als Links- bzw. Rechtsmodul über sich selber artinsch. R heißt *artinsch* $\overset{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ 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 vn* 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 Kettte von Untermoduln von M, welche, wegen M artinsch, stationär wird. Es ist $N_n' = \pi(\pi^{-1}(N_n')) = \pi(\pi^{-1}(N_i')) = N_i$ 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 existieen $x' \in M$, $y \in N$ 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* $\overset{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ 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 $N \subseteq N$ ein Untermodul. Dann ist ${}^{M}\!/_{N}$ endlich koerzeugt $\Leftrightarrow$ Für jede Familie $(M_i)_{i\in I}$ von Untermoduln von M mit $\bigcap_{\in I} M_i = N$ existiert eine endliche Teilmenge $J \subseteq U$ 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:*

a) M ist artinsch

b) Jede nichtleere Menge von Untermoduln enthält ein minimales Element

c) 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 $M_1 \supsetneq M_2 \supsetneq \ldots$, die nicht stationär wird.
$ii) \Rightarrow iii)$ Sei $N \subseteq M$ eine Untermodul, $(M_i)_{i\in I}$ eine Familie von Untermoduln von M mit $\bigcap_{i\in I} M_i = N$. Setze $\mathcal{X} := \{\bigcap_{j\in J} M_j \mid J \subseteq I \text{ endlich}\} \overset{(ii)}{\Rightarrow} \mathcal{X}$ 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 $x \notin M_i \Rightarrow x \notin \bigcap\limits_{j\in J\cup\{i\}} M_j =: N_2$. 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 $M_1 \supseteq M_2 \supseteq \ldots$ 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 $J \in I$ 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 $\mathrm{Ob}\,\mathcal{C}$ von *Objekten* einer Menge $Mor_{\mathcal{C}}(A,B)$ von *Morphismen* für alle $A,B \in \mathrm{Ob}\,\mathcal{C}$
- einer Verknüpfung $\circ : \mathrm{Mor}_{\mathcal{C}}(B,C) \times \mathrm{Mor}_{\mathcal{C}}(A,B) \to Mor_{\mathcal{C}}(A,C)$ für alle $A,B,C \in \mathrm{Ob}\,\mathcal{C}$

wobei folgende Axiome gelten:

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

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

$$h \circ (g \circ f) = (h \circ g) \circ f \qquad \textit{(Assoziativität)}$$

$(K3)$ für jedes $A \in \mathrm{Ob}\,\mathcal{C}$ existiert ein Morphismus $id_A \in Mor_{\mathcal{C}}(A,A)$, sodass für alle $B \in \mathrm{Ob}\,\mathcal{C}, f \in Mor_{\mathcal{C}}(A,B), g \in Mor_{\mathcal{C}}(B,A)$ gilt:

$$f \circ id_A = f,\ id_A \circ g = g$$

.

Anmerkung.

- Man sagt *Klasse* statt Menge, um Paradoxa, wie “die Menge aller Mengen“ zu vermeiden.
- Trotzdem schreiben wir $A \in \mathrm{Ob}\,\mathcal{C}$ um zu sagen dass A zu $\mathrm{Ob}\,\mathcal{C}$ gehört (und werden $\mathrm{Ob}\,\mathcal{C}$ 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 $f \in \mathrm{Mor}_{\mathcal{C}}(A,B)$ schreiben wir auch $f : A \to B$. A heißt *Quelle* und B heißt *Ziel* von f; wegen $(K1)$ sind diese eindeutig bestimmt.
- für $A \in \mathrm{Ob}\,\mathcal{C}$ ist id_A eindeutig bestimmt (analoges Argument wie bei Monoiden: $\mathrm{id}_A = \mathrm{id}'_A \circ \mathrm{id}_A = \mathrm{id}'_A$)

Beispiel 2.4.2.
- Mengen: Kategorie der Mengen mit Abbildungen von Mengen als Morphismen
- Ringe: Kategorie der Ringe mit Ringhomomorphismen als Morphismen
- R-Mod: Kategorie der R-(Links)-Moduln mit R-Modulhomomorphismen als Morphismen
- Top: Kategorie der topologischen Räume mit stetigen Abbildungen als Morphismen
- $\mathrm{Ob}\,\mathcal{C} = \{*\}, Mor_{\mathcal{C}}(*, *) := M$, 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:

- $\mathrm{Ob}(\mathcal{C}^{op}) = \mathrm{Ob}\,\mathcal{C}$, $Mor_{\mathcal{C}^{op}}(A, B) := Mor_{\mathcal{C}}(B, A)$ für $A, B \in \mathrm{Ob}(\mathcal{C}^{op}) = \mathrm{Ob}\,\mathcal{C}$
- $\circ_{op} : Mor_{\mathcal{C}^{op}}(A, B) \times Mor_{\mathcal{C}^{op}}(B, C) \to Mor_{\mathcal{C}^{op}}(A, C)$ mit $(f, g) \mapsto f \circ g$ für $A, B, C \in \mathrm{Ob}\,\mathcal{C}$

Anmerkung.
- Anschaulich: Übergang von $\mathcal{C}$ zu $\mathcal{C}^{op}$ $\widehat{=}$ Pfeile umdrehen
- $(\mathcal{C}^{op})^{op} = \mathcal{C}$

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

$$\mathrm{Ob}\,\mathcal{C} \to \mathrm{Ob}(\mathcal{D}), \quad A \mapsto FA$$

und Abbildungen:

$$Mor_{\mathcal{C}}(A, B) \to Mor_{\mathcal{D}}(FA, FB), \quad f \mapsto F(f)$$

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

(F1) $F(g \circ f) = F(g) \circ F(f)$ für alle $f \in Mor_{\mathcal{C}}(A, B), g \in Mor_{\mathcal{C}}(B, C),\ A, B, C \in \mathrm{Ob}\,\mathcal{C}$

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

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

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

$$Mor_{\mathcal{C}}(X,-): \mathcal{C} \to \text{Mengen}, \quad A \mapsto Mor_{\mathcal{C}}(X,A)$$

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

$$f_*^X : Mor_{\mathcal{C}}(X,A) \to Mor_{\mathcal{C}}(X,B), \quad g \mapsto f \circ g \qquad \begin{tikzcd} X \arrow[r, "g"] \arrow[dr, "f_*^X(g)"'] & A \arrow[d, "f"] \\ & B \end{tikzcd}$$

c) Sei $M \in R$-Mod $\Rightarrow Hom_R(M,-) : R$-Mod $\to \mathbb{Z}$-Mod, $N \mapsto Hom_R(M,N)$ 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 $F : \mathcal{C}^{op} \to \mathcal{D}$, das heißt besteht aus einer Abbildung

$$\operatorname{Ob}\mathcal{C} \to \operatorname{Ob}(\mathcal{D}), \quad A \mapsto FA$$

und Abbildungen:

$$Mor_{\mathcal{C}}(A,B) \to Mor_{\mathcal{D}}(FB,FA), \quad f \mapsto F(f)$$

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

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

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

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

$$Mor_{\mathcal{C}}(-,Y): \mathcal{C} \to \text{Mengen}, \quad A \mapsto Mor_{\mathcal{C}}(A,Y)$$

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

$$f_Y^* : Mor_{\mathcal{C}}(B,Y) \to Mor_{\mathcal{C}}(A,Y), \quad g \mapsto g \circ f \qquad \begin{tikzcd} A \arrow[r, "f_Y^*(g)"] \arrow[d, "f"'] & Y \\ B \arrow[ur, "g"'] & \end{tikzcd}$$

b) Sei $N \in R$-Mod $\Rightarrow Hom_R(-,N) : R$-Mod $\to \mathbb{Z}$-Mod, $M \mapsto Hom_R(M,N)$ ist ein kontavarianter Funktor.

Anmerkung.

- Sind $F : \mathcal{C} \to \mathcal{D}, G : \mathcal{D} \to \mathcal{E}$ Funktoren, so ist auf naheliegende Weise der Funktor $G \circ F : \mathcal{C} \to \mathcal{E}$ 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 $Ob(\mathcal{C} \times \mathcal{D}) = Ob(\mathcal{C}) \times \mathrm{Ob}(\mathcal{D})$ 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 $F : \mathcal{C} \times \mathcal{D} \to \mathcal{E}$

Beispiel 2.4.10.

a) $\bigoplus$: R-Mod $\times R$-Mod $\to R$-Mod, $(M, N) \to M \bigoplus N$ ist ein Bifunktor

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

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

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

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

Isomorphismus $\overset{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ Es existiert ein $g : B \to A$ 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 $g : B \to A$ mit $f \circ g = id_B$ und $g \circ f = id_A$, dann ist g ein eindeutig bestimmt (und wird mit f^{-1} bezeichnet), denn sind $g_1, g_2 : B \to A$ 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 $\Leftrightarrow f$ injektv, f Epimorphismus $Lraf$ 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, $A, B \in Ob\mathcal{C}, f : A \to B$ ein Isomorphismus. Dann ist f ein Monomorphismus und ein Epimorphismus.*

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

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

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

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

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

b) Sei $\mathcal{C} = Ringe, f : \mathbb{Z} \to \mathbb{Q}$ Inklusion. f ist ein Monomorphismus und ein Epimorphimus (Achtung, denn: Für $g_1, g_2 : \mathbb{Q} \to R$ Ringhomomorphismus ist ein Ring R mit $g_1 \circ f = g_2 \circ f$, das heißt $g_1\big|_{\mathbb{Z}} = g_2\big|_{\mathbb{Z}}$ 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.

$$\begin{tikzcd} \mathbb{Z} \arrow[r, hook, "f"] & \mathbb{Q} \arrow[d, shift right, "g_1"'] \arrow[d, shift left, "g_2"] \\ & R \end{tikzcd}$$

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

$$\begin{tikzcd} FA \arrow[r, "t_a"] \arrow[d, "F(f)"'] & GA \arrow[d, "G(f)"] \\ FB \arrow[r, "t_B"] & GB \end{tikzcd}$$

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

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

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

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

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

denn: Für $\varphi : B \to Y_1$ 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-VR die Kategorie der K-Vektorräume über einem festen Körper K (mit linearen Abbildungen als Morphismen). Für $V \in K$-VR sei $V^* := \operatorname{Hom}_K(V, K)$ der Dualraum. Die kanonische Abbildung $\varphi_v : V \to V^{**},\ w \mapsto \varphi_v(w) : V^* \to K$, $\psi \mapsto \psi(w)$ ist natürlich in V, denn für $V, W \in K$-VR, eine lineare Abbildung $f : V \to W$ kommutiert das Diagramm

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

mit $f^{**} : V^{**} \to W^{**}$, $(\varphi : V^* \to K) \mapsto f^{**}(\varphi) : W^* \to K$, $\psi \mapsto \varphi(\underbrace{\psi \circ f}_{\in V^*})$, d.h. $\varphi : id_V \Rightarrow \_^{**}$ ist eine natürliche Transformation von $id : K$-VR$\to K$-VR nach $\_^{**} : K$-VR$\to K$-VR.

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

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

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

Definition 2.4.18. Seien $\mathcal{C}, \mathcal{D}$ Kategorien, $F : \mathcal{C} \to \mathcal{D}$ ein Funktor. F heißt *Kategorienäquivalenz* $\overset{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ Es existiert ein Funktor $G : \mathcal{D} \to \mathcal{C}$ und natürliche Äquivalenzen $F \circ G \overset{\sim}{\Rightarrow} \mathrm{id}_{\mathcal{D}}$, $G \circ F \overset{\sim}{\Rightarrow} \mathrm{id}_{\mathcal{C}}$

Beispiel 2.4.19. Der Funktor $\_^* : K\text{-VR}_{<\infty} \to (K\text{-VR}_{<\infty})^{\text{op}}$, $v \mapsto V^*$ ist eine Kategorienäquivalenz, denn mit $\widetilde{\_^*} : (K\text{-VR}_{<\infty})^{\text{op}} \to K\text{-VR}_{<\infty}$, $W \mapsto W^*$ gilt offenbar $\widetilde{\_^*} \circ \_^* = \_^{**}$, und $\varphi : \text{id} \overset{\sim}{\Rightarrow} \_^{**}$ 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, $A \in Ob\,\mathcal{C}$, $F : \mathcal{C} \to$ Mengen ein Funktor. Dann gibt es eine Bijektion*

$$\begin{array}{rcl} \Phi : \{\textit{natürliche Transformationen } t : Mor_{\mathcal{C}}(A, -) \Rightarrow F\} & \to & F(A) \\ t & \mapsto & t_a(\text{id}_A) \end{array}$$

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

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

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

$$\begin{array}{ccc} \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B) & \xrightarrow{s^a_B} & F(B) \\ {\scriptstyle f^A_*}\downarrow & & \downarrow{\scriptstyle F(f)} \\ \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, C) & \xrightarrow{s^a_C} & F(C) \end{array}$$

denn:

$$\begin{aligned} (F(f) \circ s^a_B)(\varphi) &= F(f)(s^a_B(\varphi)) = F(f)(F(\varphi)(a)) = F(f \circ \varphi)(a) \\ &= F(f^A_*(\varphi))(a) = s^a_C(f^A_*(\varphi)) \end{aligned}$$

2. Setze

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

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

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

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

d.h. $(\Psi \circ \Phi)(t) = t$ ■

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

$$\begin{array}{rcl} \Psi : Mor_{\mathcal{C}}(B, A) & \longrightarrow & \{\textit{natürliche Transformationen } Mor_{\mathcal{C}}(A, -) \Rightarrow Mor_{\mathcal{C}}(B, -)\} \\ \psi : B \to A & \mapsto & \psi^* : Mor_{\mathcal{C}}(A, -) \to Mor_{\mathcal{C}}(B, -) \end{array}$$

bijektiv.

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

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

d.h. $\Psi(\psi) = \psi^*$. ■

Anmerkung.

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

- Folgerung 2.4.21 liefert insbesondere eine Verallgemeinerung des Satzes von Caley aus der Gruppentheorie: Für eine Gruppe G ist $G \hookrightarrow S(G),\ g \mapsto \tau_G$ (Linkstranslation mit $g \in G$) ein injektiver Gruppehomomorphismus. Wende 2.4.21 an auf:
  - $\mathcal{C}$ = Kategorie mit $\mathrm{Ob}\,\mathcal{C} = \{\cdot\}$, $\mathrm{Mor}_{\mathcal{C}}(\cdot, \cdot) = G$
  - $A = B = \cdot$

  und erhalte eine Bijektion

$$\begin{array}{rcl} G = \mathrm{Mor}_{\mathcal{C}}(\cdot, \cdot) & \longrightarrow & \{\text{natürliche Transformationen } \mathrm{Mor}_{\mathcal{C}}(\cdot, -) \Rightarrow \mathrm{Mor}_{\mathcal{C}}(\cdot, -)\} \\ g & \mapsto & g^* : \mathrm{Mor}_{\mathcal{C}}(\cdot, -) \Rightarrow \mathrm{Mor}_{\mathcal{C}}(\cdot, -) \mathrel{\widehat{=}} \tau_G \end{array}$$

2.5 Abelsche Kategorien

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

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

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

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

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

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

$$\begin{tikzcd}
A \arrow[r] \arrow[dr] & 0 \arrow[r] \arrow[d] & B \\
 & \tilde{0} \arrow[ur] &
\end{tikzcd}$$

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-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 $p_i : A \to A_i$, sodass für alle $B \in \operatorname{Ob}\mathcal{C}$die Abbildung

$$Mor_C(B, A) \to \prod_{i \in I} Mor_C(B, A_i), \quad f \mapsto (p_i \circ f)_{i \in I}$$

bijektiv ist, das heißt für jede Familie $(f_i)_{i \in I}$ von Morphismen $f_i : B \to A_i$ existiert ein eindeutig bestimmtes $f : B \to A$ 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 $f : A \to A'$, sodass für alle $i \in I$ gilt: $p'_i \circ f = p_i$*

$$\begin{tikzcd} A \arrow[rr, "f"] \arrow[dr, "p_i"'] & & A' \arrow[dl, "p'_i"] \\ & A_i & \end{tikzcd}$$

(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 $f : A \to A'$ 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 $g : A' \to A$ 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 $h : A \to A$ 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-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 $A \in \mathrm{Ob}\,\mathcal{C}$ zusammen mit Morphismen $q_i : A_i \to A$, sodass $(A, (q_i)_{i\in I})$ Ein Produkt von $(A_i)_{i\in I}$ in $\mathcal{C}^{op}$ ist, das heißt für alle $B \in \mathrm{Ob}\,\mathcal{C}$ ist die Abbildung

$$Mor_C(A, B) \to \prod_{i\in I} Mor_C(A_i, B), \quad f \mapsto (f \circ q_i)_{i\in I}$$

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 dan 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-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 $A, B \in \operatorname{Ob} \mathcal{A}$ trägt $Mor_{\mathcal{A}}(A, B)$ die Struktur einer abelschen Gruppe mit dem Nullmorphismus als neutrales Element, sodass für alle $A, B, C \in \operatorname{Ob} \mathcal{A}$ die Verknüpfung:

$$Mor_{\mathcal{A}}(B, C) \times Mor_{\mathcal{A}}(A, B) \xrightarrow{\circ} Mor_{\mathcal{A}}(A, C)$$

bilinear ist.

Anmerkung. In einer additiven Kategorie $\mathcal{A}$ schreiben wir auch $Hom_{\mathcal{A}}$ für $Mor_{\mathcal{A}}$.

Beispiel 2.5.10. a) R-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, $A_1, A_2 \in Ob\, \mathcal{A}$,$(A_1 \times A_2, (p_1, p_2))$ Produkt von $A_1 \times A_2$, $i_1 : A_1 \to A_1 \times A_2$ sei via der Univesellen Eigenschaft gegeben durch $id_{A_1} : A_1 \to A_1, 0 : A_1 \to A_2$. Analog sei $i_2 : A_2 \to A_1 \times A_2$ sei via der Univesellen Eigenschaft gegeben durch $0 : A_2 \to A_1, id : A_2 \to A_2$. Dann ist $(A_1 \times A_2, (i_1, i_2))$ ein Koprodukt von A_1, A_2 in $\mathcal{A}$.*

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

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

Analog:

$$p_2 \circ (\iota_1 \circ p_1 + \iota_2 \circ p_2) = p_2 = p_2 \circ id_{A_1 \times A_2} \overset{UE}{\Rightarrow} \iota_1 \circ p_1 + \iota_2 \circ p_2 = id_{A_1 \times A_2}$$

2. Universelle Eigenschaft des Koprodukts: Sei $B \in \operatorname{Ob}\mathcal{A}$, $f_1 : A_1 \to B, f_2 : A_2 \to B$
   Existenz: Wir setzen $f := f_1 \circ p_1 + f_2 \circ p_2 : A_1 \times A_2 \to B$. DAnn ist
   $$f \circ \iota_1 = f_1 \circ \underbrace{p_1 \circ \iota_1}_{=\mathrm{id}_{A_1}} + f_2 \circ \underbrace{p_2 \circ \iota_1}_{=0:A_1\to A_2} = f_1.$$
   Analog: $f \circ i_2 = f_2$.
   Eindeutigkeit: Sei $f' : A_1 \times A_2 \to B$ mit $f' \circ \iota_1 = f_1, f' \circ \iota_1 = f_2$.. 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 $\mathcal{A}, \mathcal{B}$ additve Kategorien, $F : \mathcal{A} \to \mathcal{B}$ Funktor. F heißt *additiv* " $\overset{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ für alle $A, A' \in \operatorname{Ob}\mathcal{A}$ ist eine Abbildung:
$$Mor_{\mathcal{A}}(A, A') \to Mor_{\mathcal{B}}(FA, FA'), \quad f \mapsto F(f)$$
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, $A, A' \in \operatorname{Ob}\mathcal{A}, f : A \to A'$. Ein *Kern* (B, ι) von f ist ein Objekt $B \in \operatorname{Ob}\mathcal{A}$ zusammen mit einem Morphismus $\iota : B \to A$, sodass $f \circ \iota = 0$ ist und für alle $C \in \operatorname{Ob}\mathcal{A}$ die Abbildung:
$$Hom_{\mathcal{A}}(C, B) \longrightarrow \{g \in Hom_{\mathcal{A}}(C, A) | f \circ g = 0\}, \quad h \mapsto \iota \circ h$$
bijektiv ist, das heißt für alle $g : C \to A$ mit $f \circ g = 0$ existiert ein eindeutig bestimmter Morphismus $h : C \to B$ mit $g = \iota \circ h$:
$$\begin{tikzcd} B \arrow[r, "\iota"] & A \arrow[r, "f"] & A' \\ C \arrow[u, dashed, "h"] \arrow[ur, "g"'] & & \end{tikzcd}$$
Ist (B', ι') ein weiterer Kern von f, dann existiert ein eindeutig bestimmte Isomorphismus $\alpha : B \to B'$ mit $\iota = \iota' \circ \alpha$:
$$\begin{tikzcd} B \arrow[rr, "\alpha"] \arrow[dr, "\iota"'] & & B' \arrow[dl, "\iota'"] \\ & A & \end{tikzcd}$$
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-Mod ist der kategorielle Kern gegeben durch die Inklusion des gewöhnlichen Kerns:

$$\begin{tikzcd} \ker f \arrow[r, hook, "\iota"] & A \arrow[r, "f"] & A' \\ C \arrow[u, dashed, "h"] \arrow[ur, "g"'] & & \end{tikzcd}$$

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

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

Beweis. Seien $h_1, h_2 : C \to \ker f$ 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 $h : C \to \ker f$ mit $g = \iota \circ h \Rightarrow h = h_1 = h_2$. ■

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

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

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

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

Anmerkung. $\operatorname{im} f$ kommt mit einem Monomorphisus $\iota' : \operatorname{im} f \to A'$, $\operatorname{coim} f$ mit einem Epimorphismus $q' : A \to \operatorname{coim} f$.

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

$$\operatorname{im} f = \ker\left({}^{A'}\!/_{\operatorname{im} f},\quad A' \to {}^{A'}\!/_{\operatorname{im} f}\right) = (\operatorname{im} f,\ \operatorname{im} f \hookrightarrow A')$$

$$\operatorname{coim} f = \operatorname{coker}(\ker f,\ \ker f \to A) = \left({}^{A}\!/_{\ker f},\quad A \to {}^{A}\!/_{\ker f}\right)$$

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

$$\begin{tikzcd} A \arrow[r, "f"] \arrow[d, "q'"] & B \\ \operatorname{coim} f \arrow[r, dashed, "\overline{f}"] & \operatorname{im} f \arrow[u, "\iota'"'] \end{tikzcd}$$

Beweis.

$$\begin{tikzcd}
\ker f \arrow[r, "\iota"] & A \arrow[rr, "f"] \arrow[d, "q'"] & & B \arrow[r, "q"] & \operatorname{coker} f \\
& \operatorname{coim} f = \operatorname{coker} \iota \arrow[rru, dashed, "f'"] \arrow[rr, dashed, "\overline{f}"'] & & \ker q = \operatorname{im} f \arrow[u, "\iota'"] &
\end{tikzcd}$$

1. Existenz: Wegen $f \circ \iota = 0$ existiert nach der Universellen Eigenschaft von coker ein $f' : \operatorname{coim} f \to B$ 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 $\overline{f} : \operatorname{coim} f \to \operatorname{im} f$ mit $\iota' \circ \overline{f} = f'$, also $\iota' \circ \overline{f} \circ q' = f' \circ q' = f$.

2. Eindeutigkeit: Sei $\tilde{f} : \operatorname{coim} f \to \operatorname{im} f$ mit $\iota' \circ \overline{f} \circ q' = f = \iota' \circ \tilde{f} \circ q'$, woraus, wegen ι' Monomorphismus zunächst $\overline{f} \circ q' = \tilde{f} \circ q'$ folgt und dann, wegen q' Epimorphismus, $\overline{f} = \tilde{f}$. ■

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 $f : A \to A'$ in $\mathcal{A}$ ist der induzierte Morphismus

$$\overline{f} : \operatorname{coim} f \to \operatorname{im} f$$

ein Isomorphismus

Beispiel 2.5.22. a) R-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): $\mathrm{id} : (\mathbb{R}, +) \to (\mathbb{R}, +)$ (links mit der diskreten Topologie und rechts mit der Standardtopologie) $\overline{\mathrm{id}} = \mathrm{id}$ ist kein Isomorphismus.

Anmerkung. Ist $\mathcal{A}$ eine abelsche Kategorie, dann ist auch $\mathcal{A}^{\mathrm{op}}$ 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, $A, A' \in \mathrm{Ob}\,\mathcal{A}$, $f : A \to A'$ Mono- und Epimorphsimus. Dann ist f ein Isomorphismus.*

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

$$\begin{tikzcd} 0 \arrow[r] & A \arrow[r, "f"] & A' \\ C \arrow[u, dashed] \arrow[ur, "g"] \arrow[ur, shift right=2, "0"'] & & \end{tikzcd} \qquad f \circ g = 0 = f \circ 0 \overset{f \text{ Mono}}{\Longrightarrow} g = 0$$

- $\operatorname{coim} f = \operatorname{coker}(0 \to A) = (A, \mathrm{id}_A)$, denn

$$\begin{tikzcd} 0 \arrow[r] & A \arrow[r, "\mathrm{id}_A"] \arrow[dr, "g"] & A \arrow[d, dashed, "g"] \\ & & C \end{tikzcd}$$

Analog ist $\operatorname{im} f = (A', \mathrm{id}_{A'})$, also ist $\overline{f} = f$ ein Isomorphismus nach (Ab2). ∎

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

a) *f Monomorphismus* $\Leftrightarrow \ker f = 0$

b) *f Epimorphismus* $\Leftrightarrow \operatorname{coker} f = 0$

Beweis. Übungsaufgabe. ∎

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

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

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

$$\begin{tikzcd} & A & \\ \operatorname{im} f \arrow[ur, "\iota'"] \arrow[rr, "\alpha"] & & \ker g \arrow[ul, "\iota"'] \end{tikzcd}$$

kommutiert (wobei $(\ker g, \iota)$ Kern von g, $(\operatorname{im} f, \iota')$ 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* $N \in \operatorname{Ob}\mathcal{A}$ *die Folge abelscher Gruppen*

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

exakte ist.

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

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

exakt ist.

Beweis. *a*) Stacks-Project: 12.5.17, *b*) 12.5.20
c), *d*) werden in 2.6 für R-Mod bewiesen. ■

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

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

liksexakt $\overset{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ 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

rechtsexakt $\overset{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ 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 $\overset{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ F ist links- und rechtsexakt $\Leftrightarrow$ 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, $I, P \in \operatorname{Ob}\mathcal{A}$. I heißt

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

$$\begin{tikzcd} A \arrow[r, hook, "\iota"] \arrow[d, "f"'] & B \arrow[dl, dashed, "g"] \\ I & \end{tikzcd}$$

P heißt

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

$$\begin{tikzcd} & P \arrow[dl, dashed, "g"'] \arrow[d, "f"] \\ B \arrow[r, "p"'] & A \end{tikzcd}$$

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

i) I ist injektiv

ii) Der Funktor $\text{Hom}_{\mathcal{A}}(-, I) : \mathcal{A}^{op} \to \mathbb{Z}$*-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 $0 \longrightarrow A' \xrightarrow{\iota} A$ in $\mathcal{A}$ ist

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

eine exakte Folge in $\mathbb{Z}$-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, $P \in Ob\,\mathcal{A}$. Dann sind äquivalent:*

i) P ist projektiv

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

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

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

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

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

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

für alle Mengen M und K-VR, wobei die naheliegenden Diagramme kommutieren, d.h. wir haben eine natürliche Äquvalent.

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

also $F \dashv G$.

Satz 2.5.33. *Seien $\mathcal{A}, \mathcal{B}$ abelsche Kategorien, $F : \mathcal{A} \to \mathcal{B}$, $G : \mathcal{B} \to \mathcal{A}$ 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

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

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

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

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

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

exakt.

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

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

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

Anmerkung.

- F induziert eine Äquivalenz zwischen $\mathcal{A}$ und einer vollen Unterkategorie von $R - Mod$ (das heißt $\mathcal{C}$ ist eine Unterkategorie von $R - Mod$ mit $Hom_{\mathcal{C}}(A, B) = Hom_{R-Mod}(A, B)$ für alle $A, B \in \text{Ob}\,\mathcal{C}$)
- In $\mathcal{A}$ berechnete Kerne und Kokerne entsprechen über diese Äquivalenz Kernen und Kokernen in $R - Mod$. (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

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

ist exakt.

insbesondere ist der kovariante Funktor $Hom_R(M,-) : R-Mod \to \mathbb{Z}\text{-}Mod$ *linksexakt*

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

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

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

1. f injektiv: Setze $M := \ker f$, $\iota : \ker f \to N'$ Inklusion. Dann ist $f_*^M(\iota) = f \circ \iota = 0$. Und, da f_*^M injektiv, ist $\iota = 0 \Rightarrow \ker f = 0$
2. $\operatorname{im} f = \ker g$:
   "$\subseteq$" Setze $M := N' \Rightarrow 0 = 0_*^M(id_{N'}) = (g_*^M \circ f_*^M)(id_{N'}) = ((g \circ f)_*^M)(id_{N'}) = g \circ f \circ id_{N'} = g \circ f$
   "$\supseteq$ "Setze $M := \ker g$, $\iota : \ker g \to N \Rightarrow g_*^M(\iota) = g \circ \iota = 0 \Rightarrow i \in \operatorname{im} f_*^M$ Dann existiert ein $\varphi : \ker g \to N'$ 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 $f : \mathbb{Z} \to \mathbb{Z}, x \mapsto 2x, \pi$ kanonische projektion. Die Abbildung $\pi_*^M : Hom_{\mathbb{Z}}\left({}^{\mathbb{Z}}\!/_{2\mathbb{Z}}, \mathbb{Z}\right) \to Hom_{\mathbb{Z}}\left({}^{\mathbb{Z}}\!/_{2\mathbb{Z}}, {}^{\mathbb{Z}}\!/_{2\mathbb{Z}}\right)$ ist nicht surjektiv, denn: Für $\varphi \in Hom_{\mathbb{Z}}({}^{\mathbb{Z}}\!/_{2\mathbb{Z}}, \mathbb{Z})$ gilt:

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

, also $\varphi(1) = 0$, das heißt $\varphi = 0$. Insbesondere ist $\pi_*^M(\varphi) = \pi_*^M(0) = 0 \neq \mathrm{id}_{{}^{\mathbb{Z}}\!/_{2\mathbb{Z}}}$. 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) $\mathrm{Hom}_R(P, -) : R$*-Mod* $\to \mathbb{Z}$*-Mod ist exakt.*

iii) *Für jeden Epimorphisumus $\pi : M \to N$ von R-Moduln und jeden Hom $\varphi : P \to N$ existiert ein Homomorphismus $\psi : P \to M$ mit $\pi \circ \psi = \varphi$*

$$\begin{tikzcd} & P \arrow[d, "\varphi"] \arrow[dl, dashed, "\psi"'] \\ M \arrow[r, "\pi"] & N \end{tikzcd}$$

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. $(i) \overset{\text{Def}}{\Leftrightarrow} (ii) \overset{\text{Def}}{\Leftrightarrow} (iii)$ 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 $g : M \to P$ und dem Homomorphismus $\mathrm{id}_P : P \to P$ ein Homomorphismus $\psi : P \to M$ mit $g \circ \psi = \mathrm{id}_P$, das heißt die Sequenz spaltet.

$$\begin{tikzcd} 0 \arrow[r] & L \arrow[r, "f"] & M \arrow[r, "g"] & P \arrow[r] & 0 \\ & & & P \arrow[u, "\mathrm{id}"'] \arrow[ul, dashed, "\psi"] & \end{tikzcd}$$

(iv) $\Rightarrow$ *(v)* Es existiert ein freier R-Modul F und ein Epimorphismus $f : F \to P$. 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 $\pi : M \to N$ ein Epimorphismus von R-Moduln, $\varphi : P \to N$ ein Homomorphimus. Wegen *(v)* existiert ein R-Modul P' sodass $F := P \oplus P'$ frei ist, Setze

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

$$\begin{tikzcd}
P \oplus P' = F \arrow[r] \arrow[d, "\psi'"'] \arrow[dr, "\varphi'"] & P \arrow[d, "\varphi"] \arrow[l, bend right, dashed] \\
M \arrow[r, "\pi"] & N
\end{tikzcd}$$

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 $\psi' : F \to M, b_i \mapsto z_i$ wird ein Homomorphismus definiert mit $\pi \circ \psi' = \varphi'$. Setze

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

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:

$$0 \longrightarrow Hom_R(M'', N) \xrightarrow{g_N^*} Hom_R(M, N) \xrightarrow{f_N^*} Hom_R(M', N) \quad \textit{exakt.}$$

Insbesondere ist der kontravariante Funktor: $Hom_R(-, N) : R - Mod^{op} \to \mathbb{Z}\text{-}Mod$ *linksexakt.*

Beweis. Übungsaufgabe. ■

Anmerkung. Der kontravariante Funktor $Hom_R(-, N)$ 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 $f : \mathbb{Z} \to \mathbb{Z},\ x \mapsto 2x$ und π der kanonischen Projektion. Die Abbildung $f_{\mathbb{Z}}^* : Hom_{\mathbb{Z}}(\mathbb{Z}, \mathbb{Z}) \to Hom_{\mathbb{Z}}(\mathbb{Z}, \mathbb{Z})$ ist nicht surjektiv, denn für alle $\varphi \in Hom_{\mathbb{Z}}(\mathbb{Z}, \mathbb{Z})$ ist

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

insbesondere ist $f_{\mathbb{Z}}^*(\varphi) \neq id_{\mathbb{Z}}$. 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) *$Hom_R(-, Q) : R{-}Mod \to \mathbb{Z}{-}Mod$ ist exakt.*

iii) *Für jeden Monomorphismus $\iota : L \to M$ von R-Moduln und jedem Homomorphismus $\varphi : L \to Q$ exsistiert ein Homomorphismus $\psi : M \to Q$ von R-Moduln mit $\psi \circ \iota = \varphi$*

$$\begin{tikzcd} L \arrow[r, "\iota"] \arrow[d] & M \arrow[dl, dashed, "\psi"] \\ Q' & \end{tikzcd}$$

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 $f : Q \to M$ von R-Moduln und zum Homomorphismus $id_Q : Q \to Q$ ein Homomorphismus $\psi : M \to Q$ mit $\psi \circ f = id_Q$. das heißt die Sequenz spaltet.

$$\begin{tikzcd} 0 \arrow[r] & Q \arrow[r, "f"] \arrow[d, "\mathrm{id}_Q"'] & M \arrow[r, "g"] \arrow[dl, dashed, "\psi"] & N \arrow[r] & 0 \\ & Q & & & \end{tikzcd}$$

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

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

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

1. Wir erhalten eine exakte Sequenz

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

   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
   - $\operatorname{im} f = \ker g$:
     "$\subseteq$" klar, wegen $g \circ f = 0$
     "$\subseteq$" Sei $\overline{(y,z)} \in \ker g \Rightarrow \pi(z) = 0 \Rightarrow z \in \operatorname{im} \iota$, das heißt es existiert ein $x \in L$ mit $z = \iota(x) = -\iota(-x)$Dann gilt

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

2. Wegen (iv) spaltet die Sequenz, das heißt es existiert ein R-Modulhomomorphisumus $h : M' \to Q$ mit $h \circ f = id_Q$. Setze

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

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

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

   ■

   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 $\varphi : I \to Q$ existiert eine R-lineare Abbildung $\psi : R \to Q$ mit $\psi\big|_I = \varphi$.

$$\begin{tikzcd} I \arrow[r, hook] \arrow[d, "\varphi"'] & R \arrow[dl, dashed, "\psi"] \\ Q & \end{tikzcd}$$

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

$$\begin{tikzcd} I \arrow[r, hook, "\iota"] \arrow[d, "\varphi"'] & R \arrow[dl, dashed, "\psi"] \\ Q & \end{tikzcd}$$

Da Q injektiv, Exsistert ein R-Modulhomomorphismus $\psi : R \to Q$ mit $\varphi = \psi \circ \iota = \psi$.
$(ii) \Rightarrow (i)$ Sei $\iota : L \to M$ ein Monomorphismus von R-Moduln, $\varphi : L \to Q$.

$$\begin{tikzcd} L \arrow[r, "\iota"] \arrow[d, "\varphi"'] & M \arrow[dl, dashed, "?"] \\ Q & \end{tikzcd}$$

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

1. Setze $\mathcal{X} := \{(L', \varphi') |\, L' \subseteq M$ Untermodul mit $L \subseteq L', \varphi' : L' \to Q$ R-linear mit $\varphi'\big|_L = \varphi\}$. Dann ist $\mathcal{X} \neq \emptyset$, denn: $(L, \varphi) \in \mathcal{X}$. Auf $\mathcal{X}$ ist die Halbordung "$\leq$" durch
$$(L', \varphi') \leq (L'', \varphi'') \Leftrightarrow L' \subseteq L'',\ \varphi''\big|_{L'} = \varphi'$$
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 $\varphi' : L' \to Q$ 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 Zornshen Lemma folgt, dass ein maximales Element (L', φ') in $\mathcal{X}$ exsitiert.

2. Behauptung: $L' = M$, denn:
Sei $x \in M$. Setze $I := \{a \in R |\, ax \in L'\} \subseteq R \cdot I$ ist Linksideal in R, und die Abbildung $f : I \to Q, a \mapsto \varphi'(ax)$ ist R-linear. Mit (ii) folgt, dass eine R-lineare Abbildung $g : R \to Q$ mit $g|_I = f$. Setze:
$$\begin{tikzcd} I \arrow[r, hook] \arrow[d, "f"] & R \arrow[dl, dashed, "g"] \\ Q & \end{tikzcd}$$
$$\psi' : L' \oplus R \to Q, \quad (y, a) \mapsto \varphi'(y) + g(a)$$

und
$$\pi : L' \oplus R \to M, \quad (y,a) \mapsto y + ax$$
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
$$L' \oplus R / _{\ker \pi} \to Q, \quad (y,a) \mapsto \varphi'(y) + g(a)$$
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
$$\psi : L' + Rx \to Q \quad \text{mit} \quad \psi(y + ax) = \varphi'(y) + g(a)$$
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* $\overset{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ Für alle $a \in A \backslash \{0\}$ ist $aM = M$. $\Leftrightarrow$ Für alle $x \in M, a \in A\backslash\{0\}$ 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 $x \in M, a \in A\backslash\{0\}$. Wir betrachten die Abbildung
$$\varphi : Aa \to M, \quad ra \mapsto rx$$
φ ist wohldefiniert, denn: $r_1 a = r_2 a \Rightarrow (r_1 - r_2)a = 0$ Da A nullterilerfrei ist folgt $r_1 = r_2$. φ ist A-linear, so folgt mit Satz 2.6.9, dass eine A-lineare Abbildung $\psi : A \to M$ 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, $\varphi : I \to M$ A linear. Falls $I = 0$, dann wird φ durch die Nullabbildung nach A fortgesetzt. Im Folgendem 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

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

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 $\operatorname{char} K = 0$ dann ist V teilbarer $\mathbb{Z}$-Modul, also injektiver $\mathbb{Z}$-Modul.

b) Faktormoduln teilbarer $\mathbb{Z}$-Moduln sind teilbar, somit sind Faktormoduln inketiver $\mathbb{Z}$-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 dierekte Faktoren von kofreien R-Moduln

Anmerkung. M ein $\mathbb{Z}$-Modul. Dann ist $Hom_{\mathbb{Z}}(R, M)$ 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 $Hom_{\mathbb{Z}}(R, M)$ ein injektiver R-Modul. Insbesondere ist $R^v := Hom_{\mathbb{Z}}(R, \mathbb{Q}/\mathbb{Z})$ ein injektiver R-Modul.*

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

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

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 $g : R \to M$ mit $g\big|_I = f$. Wir setzen $\psi : R \to Hom_{\mathbb{Z}}(R, M), a \mapsto ag$. 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 $\psi\big|_I = \varphi$. ■

Definition 2.6.15. Sei M ein R-Modul. M heißt *kofrei* $\overset{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ 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-Modulhomomorphimus $\varphi : M \to R^v$ mit $\varphi(m) \neq 0$.*

Beweis. 1. Die Abbildung

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

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

2. Ist $\psi : M \to \mathbb{Q}/\mathbb{Z}$ 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: $\theta(\psi) : M \to R^v$ ist ein R-Modulhomomorphismus mit $\theta(\psi)(m) \neq 0$

3. Nach 2 genügt es zu zeigen: Es existiert ein $\mathbb{Z}$-Modulhomomorphimus $\psi : M \to \mathbb{Q}/\mathbb{Z}$ mit $\psi(m) \neq 0$. Setze $N := \langle m \rangle_{\mathbb{Z}}$.
1.Fall: $N \simeq \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ für ein $n \in N$. Setze

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

Dann ist $\psi\ (m) \neq 0$ 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

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

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 $\varphi_m : M \to R^v$ 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 injekitv, 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:*

i) Q ist injektiv

ii) 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 $A^i \in \operatorname{Ob}\mathcal{A}$ und Morphismen $d_i : A^i \to A^{i+1}$ (*Differentiale*)

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

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

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

d.h. das Diagramm

$$\begin{tikzcd}
\ldots \arrow[r] & A^{i-1} \arrow[r, "d_{i-1}"] \arrow[d, "f_{i-1}"] & A^i \arrow[r, "d_i"] \arrow[d, "f_i"] & A^{i+1} \arrow[r, "d_{i+1}"] \arrow[d, "f_{i+1}"] & \ldots \\
\ldots \arrow[r] & B^{i-1} \arrow[r, "d_{i-1}"'] & B^i \arrow[r, "d_i"'] & B^{i+1} \arrow[r] & \ldots
\end{tikzcd}$$

kommutiert.

Anmerkung. Komplexe in $\mathcal{A}$ zusammen mit Komplexhomomorphismenbilden 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* $\operatorname{im} d_{i-1} \longrightarrow \ker d_i$ *für $i \in \mathbb{Z}$.*

Beweis. Wir betrachten das Diagramm

$$\begin{tikzcd}
A^{i-1} \arrow[rr, "d_{i-1}"] \arrow[d, "q_{i-1}"'] & & A^i \arrow[r, "d_i"] & A^{i+1} \\
\operatorname{coim} d_{i-1} \arrow[r, "\overline{d}_{i-1}"'] & \operatorname{im} d_{i-1} \arrow[ur, "k_{i-1}"] \arrow[rr, dashed, "l_i"] & & \ker d_i \arrow[ul, "j_i"']
\end{tikzcd}$$

(Es ist k_{i-1} ein Mono-, q_{i-1} ein Epi- und der durch den Homomorphiesatz induzierte Pfeil $\overline{d}_{i-1}$ ein Isomorphismus). Damit ist $0 = d_i \circ d_{i-1} = d_i \circ k_{i-1} \circ \overline{d}_{i-1} \circ q_{i-1}$ 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 $l_i : \operatorname{im} d_{i-1} \to \ker d_i$ 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 $\mathcal{A}$.

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

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

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

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

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

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 Morphisemen 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

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

Beweis (Beweisskizze).

1. $M^\bullet$ ein Komplex in $\mathcal{A}$. Setze

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

   Dann induzieren die Differentiale natürliche Morphismen

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

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

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

$$\begin{tikzcd}
 & Q^i(A^\bullet) \arrow[r] \arrow[d, "\overline{d}_i"] & Q^i(B^\bullet) \arrow[r] \arrow[d, "\overline{d}_i"] & Q^i(C^\bullet) \arrow[r] \arrow[d, "\overline{d}_i"] & 0 \\
0 \arrow[r] & \mathcal{Z}^{i+1}(A^\bullet) \arrow[r] & \mathcal{Z}^{i+1}(B^\bullet) \arrow[r] & \mathcal{Z}^{i+1}(C^\bullet) &
\end{tikzcd}$$

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

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

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

Definition 2.7.5. Sei $A \in \operatorname{Ob} \mathcal{A}$. Eine *injektive Auflösung* 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 $\varepsilon : A \longrightarrow I^0$, 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: $A \longrightarrow I^\bullet$ injektive Auflösung von A).
Eine *projektive Auflösung* von A ist eine injektive Auflösung von A in $\mathcal{A}^{\mathrm{op}}$, 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 $\varepsilon : P^0 \to A$, sodass der augmentierte Komplex

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

exakt ist (Notation: $P^\bullet \longrightarrow A$ projektive Auflösung).

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" $\overset{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ Für jedes $A \in \operatorname{Ob} \mathcal{A}$ existiert ein injektives Objekt $I \in \operatorname{Ob} \mathcal{A}$ und ein Monomorphismus $\iota : A \to I$.

genügend viele Projektive $\overset{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ $\mathcal{A}^{\mathrm{op}}$ hat genügend viele Injektive

Beispiel 2.7.7. R-Mod hat nach 6.19 genügend viele Injektive und nach 6.4 genügend viele Projektive.

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

a) Hat $\mathcal{A}$ genügend viele Injektive, dann hat A eine injektive Auflösung *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:

$$\begin{tikzcd}
0 \arrow[r] & A \arrow[r, "\varepsilon"] & I^0 \arrow[rr, "d_0"] \arrow[dr, "\pi_0"'] & & I^1 \arrow[rr, "d_1"] \arrow[dr, "\pi_1"'] & & I^2 \\
& & & M^0 \arrow[ur, hook, "\iota_0"'] & & M^1 \arrow[ur, "\iota_1"'] &
\end{tikzcd}$$

   Nach Voraussetzung existiert ein injektives Objekt $I^0 \in \operatorname{Ob}\mathcal{A}$ und ein Monomorphismus $\varepsilon : A \to I^0$. Sei $\operatorname{coker}\varepsilon = (M^0, \pi_0)$. Es existiert ein injektives Objekt I^1 und ein Monomorphismus $\iota_0 : M^0 \hookrightarrow I_1$. Iteriere dieses Verfahren: $\operatorname{coker}(d_0) = (M^1, \pi_1)$, 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:

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

   analog bei den anderen Stellen ■

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

$$\begin{tikzcd}
& 0 \arrow[d] & 0 \arrow[d] & 0 \arrow[d] & \\
0 \arrow[r] & A' \arrow[r] \arrow[d] & I'^0 \arrow[r] \arrow[d] & I'^1 \arrow[r] \arrow[d] & \dots \\
0 \arrow[r] & A \arrow[r] \arrow[d] & I^0 \arrow[r] \arrow[d] & I^1 \arrow[r] \arrow[d] & \dots \\
0 \arrow[r] & A'' \arrow[r] \arrow[d] & I''^0 \arrow[r] \arrow[d] & I''^1 \arrow[r] \arrow[d] & \dots \\
& 0 & 0 & 0 &
\end{tikzcd}$$

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

Beweis. in den Standardwerken über homologische Algebra (zumindest für R-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 $\mathcal{A}$, $f, g : A^\bullet \to B^\bullet$ Komplexhomomorphismen. f, g heißen *homotop* $\overset{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ es existieren Homomorphismen $s^i : A^{i+1} \to B^i$ für alle $i \in \mathbb{Z}$ mit

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

(Notation: $f \sim g$)

$$\begin{tikzcd}
\dots \arrow[r] & A^{i-1} \arrow[r] \arrow[d, shift right] \arrow[d, shift left] & A^i \arrow[r, "d_i"] \arrow[d, shift right, "f_i"'] \arrow[d, shift left, "g_i"] \arrow[dl, "s^{i-1}"] & A^{i+1} \arrow[r] \arrow[d, shift right] \arrow[d, shift left] \arrow[dl, "s^i"] & \dots \\
\dots \arrow[r] & B^{i-1} \arrow[r, "d_{i-1}"'] & B^i \arrow[r] & B^{i+1} \arrow[r] & \dots
\end{tikzcd}$$

Anmerkung.

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

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

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

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

$$\begin{tikzcd}
\ker d_i = Z^i A^\bullet \arrow[r, hook, "\alpha_i"] \arrow[d, dashed, "\mathcal{Z}^i h"] \arrow[dd, dashed, bend right, "\lambda_i"'] & A^i \arrow[r, "d_i"] \arrow[d, "h_i"] & A^{i+1} \arrow[d, "h_{i+1}"] \\
\ker d_i = \mathcal{Z}^i B^\bullet \arrow[r, hook] & B^i \arrow[r, "d_i"'] \arrow[dr, two heads, "\gamma_i"] & B^{i+1} \\
\operatorname{im} d_{i-1} = \mathcal{B}^i B^\bullet = \ker \gamma_i \arrow[u, "\theta_i"] \arrow[ur, hook, "\delta_i"'] & & \operatorname{coker} d_{i-1}
\end{tikzcd}$$

$Z^i(h)$ ist der eindutig bestimmte Morphismus $\mathcal{Z}^i A^\bullet \to \mathcal{Z}^i B^\bullet$ 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 Famillie $(si)_{i\in\mathbb{Z}}$ von Homomorphismen $s_i : A^{i+1} \to B^i$ 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 $\overbrace{\gamma_i \circ d_{i-1}}^{=0} \circ s^{i-1} \circ \alpha_i = 0$, also $\gamma_i \circ h_i\alpha_i = 0$ Aus der Univesellen Eigenschaft des Kerns von γ_i, existiert ein eindeutig bestimmtes $\lambda_i : \mathcal{Z}^i A^\bullet \to \mathcal{B}^i B^\bullet = \ker \gamma_i$ 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:

$$\begin{tikzcd}
\mathcal{B}^i A^\bullet \arrow[r, "\theta_i'"] \arrow[d, "\mathcal{B}^i h"] & \mathcal{Z}^i A^\bullet \arrow[r, two heads, "\varepsilon_i'"] \arrow[d, "\mathcal{Z}^i h"] \arrow[dl, "\lambda_i"'] & \mathcal{H}^i A^\bullet = \operatorname{coker} \theta_i' \arrow[d, "\mathcal{H}^i h"] \\
B^i B^\bullet \arrow[r, "\theta_i"] & Z^i B^\bullet \arrow[r, two heads, "\varepsilon_i"'] & \mathcal{H}^i B^\bullet = \operatorname{coker} \theta_i
\end{tikzcd}$$

$\mathcal{H}^i h$ ist der eindeutig bestimmte Morphismus $\mathcal{H}^i A^\bullet \to \mathcal{H}^i B^\bullet$ 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 $\mathcal{A}, f, g : A^\bullet \to B^\bullet$ Komplexhomomorphismen. f heißt

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

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

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

Beweis. Nach Vorraussetzung existiert ein $g : B^\bullet \to A^\bullet$ 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 $\mathcal{A}$:*

$$\begin{tikzcd}
0 \arrow[r] & A \arrow[r, "\varepsilon"] \arrow[d, "\varphi"] & E^0 \arrow[r] \arrow[d, dashed, red, "f_0"] & E^1 \arrow[r] \arrow[d, dashed, red, "f_1"] & \dots \\
0 \arrow[r] & B \arrow[r, "\eta"'] & I^0 \arrow[r] & I^1 \arrow[r] & \dots
\end{tikzcd}$$

sodass gilt:

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

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

Beweis (Beweisskizze für die Existenz von f:).

1. Wir konstruieren zunächst f_0. Situation:

$$\begin{tikzcd}
A \arrow[r, "\varepsilon"] \arrow[d, "\varphi"] & E^0 \arrow[d, dashed, red, "f_0"] \\
B \arrow[r, "\eta"'] & I^0
\end{tikzcd}$$

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

2. Konstruktion von f_1: Situation:

$$\begin{tikzcd}
A \arrow[r, "\varepsilon"] \arrow[ddd, "\varphi"] & E^0 \arrow[rr, "d_0"] \arrow[dr, two heads, "\pi_0"] \arrow[ddd, "f_0"] & & E^1 \arrow[ddd, dashed, red, "f_1"] \\
& & \operatorname{coker} \varepsilon \arrow[ur, dashed, blue, hook, "\iota_0"'] \arrow[d, dashed, blue, "\tilde{f}_0"] & \\
& & \operatorname{coker} \eta \arrow[dr, dashed, blue, hook, "\iota_0{}'"] & \\
B \arrow[r, "\eta"] & I^0 \arrow[rr, "d_0{}'"'] \arrow[ur, two heads, "\pi_0{}'"] & & I^1
\end{tikzcd}$$

   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 $\tilde{f}_0 : \operatorname{coker}\varepsilon \to \operatorname{coker}\eta$, 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 $\iota_0 : \operatorname{coker}\varepsilon \to E^1$, $\iota_0' : \operatorname{coker}\eta \to I^1$, sodass das obere und untere Dreieck kommutieren.
Behauptung: ι_0 ist ein Monomorphismus, denn:

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

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

$$\begin{tikzcd} \operatorname{coker}\varepsilon \arrow[rr, "\sim"] \arrow[dr, "\iota_0"'] & & \operatorname{im} d_0 \arrow[dl, hook] \\ & E^1 & \end{tikzcd}$$

kommutiert, das heißt, dass ι_0 ein Monomorphismus ist. Da I^1 injektiv und ι_0 ein Monomorphismus, existiert ein $f_1 : E^1 \to I^1$, 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 $A \in Ob\,\mathcal{A}$, $\varepsilon : A \to I^\bullet$, $\eta : A \to J^\bullet$ injektive Auflösungen von A. Dann existiert eine Homotopieäquivalenz $f : I^\bullet \to J^\bullet$ mit $f_0 \circ \varepsilon = \eta$. Diese ist eindeutig bestimmt bis auf Homotopie.*

Beweis. Wir betrachten das Diagramm von Komplexen:

$$\begin{tikzcd} \tilde{I}^\bullet : & 0 \arrow[r] & A \arrow[r, "\varepsilon"] \arrow[d, shift right, "\mathrm{id}_A"'] & I^0 \arrow[r] \arrow[d, dashed, shift right, "f_0"'] & I^1 \arrow[r] \arrow[d, dashed, shift right, "f_1"'] & \dots \\ \tilde{J}^\bullet : & 0 \arrow[r] & A \arrow[r, "\eta"'] \arrow[u, shift right] & J^0 \arrow[r] \arrow[u, dashed, shift right, "g_0"'] & J^1 \arrow[r] \arrow[u, dashed, shift right, "g_1"'] & \dots \end{tikzcd}$$

mit exakten Zeilen. Nach 2.7.14 existiert ein Komplexhomomorphismus $f : I^\bullet \to J^\bullet$, der id_A fortsetzt und es existiert ein Komplexhomomorphismus $g : J^\bullet \to I^\bullet$, der id_A fortsetzt. Dann ist aber auch $g \circ f : I^\bullet \to I^\bullet$ eine Fortsetzung von id_A, ebenso wie $id_{J^\bullet}$. Aus der Eindeutigkeit in 2.7.14 ist $g \circ f \sim id_{I^\bullet}$. Analog ist $f \circ g \sim id_{J^\bullet}$. 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 $0^\bullet \to I^\bullet$ 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: $0^\bullet \to I^\bullet$ist eine Homotopieäquivalenz. ■

2.8 Abgeleitete Funktoren

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

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

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

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

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

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

Beweis.

- Wohldefiniertheit von $R^i F(\varphi)$: Ist $g : I^\bullet \to I'^\bullet$ 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 $\varphi : A \to A'$, $\psi : A' \to A''$ mit Fortsetzungen $f : I^\bullet \to I'^\bullet$, $g : I'^\bullet \to I''^\bullet$ auf injektiven Auflösungen $A \to I^\bullet$, $A' \to I^\bullet$, $A'' \to I''^\bullet$ von A, A', A''' ist $g \circ f : I^\bullet \to I''^\bullet$ ein Fortsetzung von $\psi \circ \varphi : A \to A''$, 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 $\varphi : A \to A'$, $\psi : A \to A'$ mit Fortsetzungen $f : I \to I'^\bullet$, $g : I^\bullet \to I'^\bullet$ auf injektiven Auflösungen $A \to I^\bullet$, $A' \to I'^\bullet$ von A, A', so ist $f - g : I^\bullet \to I'^\bullet$ eine Fortsetzung von $\varphi + \psi : A \to A'$. Der Rest ist klar, da F, $\mathcal{H}^i$ additiv.

- Unabhängigkeit von der Wahl der Auflösungen im obigen Sinne: Für $A \in \operatorname{Ob} \mathcal{A}$ 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. Da nach 2.7.15 eine Homotopieäquivalenz $h_A : I_A^\bullet \to J_A^\bullet$ 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^i_A nach 2.7.13 ein Isomorphismus, da Fh_A eine Homotopieäquivalenz ist. Durch $t^i = (t^i_A)_{A \in \operatorname{Ob}\mathcal{A}} : R^iF \Rightarrow \hat{R}^iF$ ist eine natürliche Äquivalenz gegeben, denn für alle $A, A' \in \operatorname{Ob}\mathcal{A}$, $\varphi : A \to A'$ kommutiert das Diagramm

$$\begin{tikzcd} R^iF(A) \arrow[r, "t^i_A"] \arrow[d, "\mathcal{H}^iFf_I"'] & \hat{R}^iF(A) \arrow[d, "\mathcal{H}^iFf_J"] \\ R^iF(A') \arrow[r, "t^i_{A'}"'] & \hat{R}^iF(A') \end{tikzcd}$$

wobei $f_I : I^\bullet_A \to J^\bullet_A$, $f_J : J^\bullet_A \to J'^\bullet_A$ Fortsetzungen von φ sind), denn $f_J \circ h_A$, $h_{A'} \circ f_I : I^\bullet_A \to J'^\bullet_A$ sind beides Fortsetzungen von $\varphi = \varphi \circ \mathrm{id}_A = \mathrm{id}_{A'} \circ \varphi$, 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 $\mathcal{H}^iFf_J \circ t^i_A = t^i_{A'} \circ \mathcal{H}^iFf_I$. ■

Bemerkung 2.8.2. *Es gilt:*

a) $R^0F = F$

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

Beweis. Für $A \in \operatorname{Ob}\mathcal{A}$ ist $R^iF(A) = \mathcal{H}^i(FI^\bullet)$, 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.

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

mit

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

Falls F exakt, dann ist

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

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

Satz 2.8.3. *Sei* $0 \longrightarrow A' \longrightarrow A \longrightarrow A'' \longrightarrow 0$ *eine exakte Folge in Å. Dann existieren natürliche Morphismen*

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

sodass die Folge

$$\begin{array}{cccc}
0 \longrightarrow FA' & \longrightarrow FA & \longrightarrow FA'' & \\
\longrightarrow R^1FA' & \longrightarrow R^1FA & \longrightarrow R^1FA'' & \\
\longrightarrow \dots & & & \\
\vdots \quad \vdots & \vdots & \vdots & \\
\xrightarrow{\delta^i} R^{i+1}FA' & \longrightarrow R^{i+1}FA & \longrightarrow R^{i+1}FA'' &
\end{array}$$

exakte ist. Ist

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

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

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

Beweis (Beweisskizze). Nach dem Hufeisenlemma existieren kompatible injektive Auflösungen $A' \to I'^{\bullet}$, $A \to I^{\bullet}$, $A'' \to I''^{\bullet}$ 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-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 ein 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 $A \in \operatorname{Ob} \mathcal{A}$. Dann heißt A *F-azylisch* $\overset{\text{Def}}{\Leftrightarrow} R^iF(A) = 0$ für alle $i > 1$.

Bemerkung 2.8.5. *Ist $A \in Ob\,\mathcal{A}$ 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

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

woraus die Behauptung folgt. ■

Satz 2.8.6. *Sei $A \to J^\bullet$ 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 $R^iF(A) \cong \mathcal{H}^i(FJ^\bullet)$ für alle $i \geq 0$.

Beweis. (für R-Mod in S.Lang "Algebra") ■

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

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

Rest analog.

2.9 δ-Funktoren

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

Definition 2.9.1. Ein *δ-Funktor* $H = (H^n)_{n\geq 0}$ ist eine Familie additiver Funktoren $H^n : \mathcal{A} \to \mathcal{B}$ zusammen mit Homomorphismen $\delta : H^n(C) \to H^{n+1}(A)$ 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

$$\begin{tikzcd} 0 \arrow[r] & A \arrow[r] \arrow[d] & B \arrow[r] \arrow[d] & C \arrow[r] \arrow[d] & 0 \\ 0 \arrow[r] & A' \arrow[r] & B' \arrow[r] & C' \arrow[r] & 0 \end{tikzcd}$$

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

$$\begin{tikzcd} H^n(C) \arrow[r, "\delta"] \arrow[d] & H^{n+1}(A) \arrow[d] \\ H^n(C') \arrow[r, "\delta"] & H^{n+1}(A') \end{tikzcd}$$

in $\mathcal{B}$ für alle $n \geq 0$

(D2) Für jede kurze exakte Folge $0 \longrightarrow A \longrightarrow B \longrightarrow C \longrightarrow 0$ in $\mathring{A}$ 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, $F : \mathcal{A} \to \mathcal{B}$ linksexakt. Dann ist $H := (R^n F)_{n\geq 0}$ ein δ-Funktor nach 2.8.3

Definition 2.9.3. Sei $H = (H^n)_{n\geq 0} : \mathcal{A} \to \mathcal{B}$ ein δ-Funktor. H heißt *universell* $\overset{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ Für jeden δ-Funktor $H' = (H'^n)_{n\geq 0} : \mathcal{A} \to \mathcal{B}$ setzt sich jede natürliche Transformation $f^\circ : H^\circ \Rightarrow H'^\circ$ eindeutig zueinem 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 $F \overset{\sim}{\Rightarrow} G$.*

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

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

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

Beweis. (Beweisskizze)
Sei $H' = (H'^n)_{n\geq 0} : \mathcal{A} \to \mathcal{B}$ ein δ-Funktor, $f^0 : H^0 \Rightarrow H'^n$ 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 $A \in \operatorname{Ob}\mathcal{A}$. Da H^{n+1} auslöschbar, 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:

$$\begin{tikzcd}
H^nA' \arrow[r] \arrow[d] & H^nB \arrow[r, "\delta"] \arrow[d] & H^{n+1}A \arrow[r] \arrow[d, dashed] & 0 \\
H'^nA' \arrow[r] & h'^nB \arrow[r, "\delta'"] & H'^{n+1}A &
\end{tikzcd}$$

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

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

Beweis. Nach 2.9.6 genügt es zu zeigen: R^nF ist auslöschbar für alle $n \geq 1$. Sein $n \geq 1, A \in \operatorname{Ob}\mathcal{A}$. Dann esistiert ein injektives Objekt $I \in \operatorname{Ob}\mathcal{A}$ und ein Monomorphismus $u : A \hookrightarrow I$. $\Rightarrow R^nF(u) : R^nF(A) \to R^nF(I) = 0$nach 2.8.5 ist der Nullmorphismus für $n \geq 1$. ∎

2.10 Ext und Erweiterungen

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

$$Ext_R^n(M,N) := R^n Hom_R(M,-)(N)$$

für $n \geq 0$. Explizit: wähle eine injektive Auflösung $N \to I^\bullet$ von N, dann ist

$$Ext_R^n(M,N) = H^n(Hom_R(M, I^\bullet))$$

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

$$Ext_R^n(M,N) \simeq R^n Hom_R(-,N)(M)$$

für alle $n \geq 0$, insbesondere kann $Ext_R^n(M,N)$ auch über eine projektive Auflösung $P_\bullet \to M$ von M betrachtet werden via $Ext_R^n(M,N) = H^n(Hom_R(P_\bullet, N))$.

Beweis. Sei N fixiert.

1. Die Familie kontravarianter Funktoren $(R^n Hom_R(-,N))_{n\geq 0}$ ist ein kontravarianter universeller δ-Funktor mit $R^0 Hom_R(-,N) = Hom_R(-,N)$ (analoge Aussage zu 2.9.7). Denn: $(R^n Hom_R(-,N))_{n\geq 0}$ ist ein kontravarianter δ-Funktor nach der kontravaritanten version von 2.8.3. Es bleibt noch zu zeigen: $(R^n Hom_R(N,-))_{n\geq 0}$ ist universell. Dafür genügt es nach 2.9.6 zu zeigen, dass $R^n Hom_R(-,N)$ koauslöschbar für alle $n \geq 1$. Sei M ein R-Modul. Dann existiert ein projektiver R-Modul P und ein Epimorphismus $u : P \to M$ So erhält man: $R^n Hom_R(-,N)(u) : R^n Hom_R(-,N)(M) \to R^n Hom_R(-,N)(P).P$ ist $Hom_R(-,N)$-zyklisch, da $(\ \dots 0 \to 0 \to P) \overset{id_P}{\to} P$ eine projektive Auflösung von P ist und $R^n Hom_R(-,N)(P) = H^n(Hom_R(P,N) \to 0 \to 0 \to \dots) = 0$ für $n \geq 1$ ist. Daraus folgt: $R^n Hom_R(-,N)(n) = 0$, das heißt $R^n Hom_R(-,N)$ ist koauslöschbar für $n \geq 1$.

2. Wir setzen:

   $$F^n : R - Mod \to \mathbb{Z} - Mod, M \mapsto R^n Hom_R(M,-)(N) = H^n(Hom_R(M, I^\bullet))$$

   wobei $N \to I^\bullet$ eine injektive Auflösung von N ist. Dann ist $(F^n)_{n\geq 0}$ ebenfalls ein kontravarianter universeller δ-Funktor mit $F^0 = Hom_R(-,N)$, da: $(F_n)_{n\geq 0}$ ist ein kontravarianter δ-Funktor, denn:

   - F^n ist kontravarianter additver 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:

$$0 \longrightarrow Hom_R(M'', I^\bullet) \longrightarrow Hom_R(M, I^\bullet) \longrightarrow Hom_R(M', I^\bullet) \longrightarrow 0$$

(beachte: $Hom_R(-, I)$ exakt für injektive R-Moduln I). Die lange exakte Kohomologiefolge liefert die Behauptung. ■

$(F_n)_{n\geq 0}$ ist ein universell: nach 2.9.6 genpgt zu zeigen, dass F_n koauslöschbar für alle $n \geq 1$. sei M ein R-Modul. Dann existiert ein projektiver R-Modul P und ein Epimorphismus $u : P \to M$ Damit erhält man $F^n(u) : F^n(M) = R^n Hom_R(m, -)(N) \to R^n Hom_R(P, -)(N) = F^n(P)$. Wegen der Projektivität von P ist $Hom_R(p, -)$exakt und deshalb ist $R^n Hom_R(P, -) = 0$ für $n \geq 1$ Daraus folgt $F^n(u) = 0$, das heißt F_n ist koauslöschbar für $n \geq 1$.

3. nach 1 und 2 sind $(R^n Hom_R(-, N))_{n\geq 0}$ und $(F^n)_{n\geq 0}$ beides kontravariante δ-Funktoren, mit $R^0 Hom_R(-, N) = Hom_R(-, N) = F^0$. Mit 2.9.4 folgt, dass es für alle R-Moduln M eine kanonische Isomorphie:

$$R^n Hom_R(-, N)(M) \simeq F(M) = R^n Hom_R(M, -)(N) = Ext^n_R(M, N)$$

Satz 2.10.3. *Sei A ein Hauptidealring, M, N, seinen R-Moduln. Dann gilt: $Ext^n_A(M, N) = 0$ 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 $\varepsilon : N \hookrightarrow I^0$. I^0 injektiv, dann folgt mit 2.6.11 I^0 ist teilbar $\Rightarrow$ $\operatorname{coker} \varepsilon = {}^{I^0}\!/_{im\varepsilon}$ teilbar, damit folt aus 2.6.12 und da A ein HIR, dass der $\operatorname{coker} \varepsilon$ injektiv ist. Setze ..

2. Für -...

Bemerkung + Definition 2.10.4. Seien M, N R-Moduln.
$\mathcal{E}(M, N) = \{exakteSequenzen\ 0 \longrightarrow N \longrightarrow E \longrightarrow M \longrightarrow 0\ vonR{-}Moduln\}$.
Wir definieren auf $\mathcal{E}(M, N)$ eine Relation "$\sim$"wie folgt:

$$0 \longrightarrow N \longrightarrow E \longrightarrow M \longrightarrow 0 \ \sim\ 0 \longrightarrow N \longrightarrow E' \longrightarrow M \longrightarrow 0$$

$\overset{\text{Def}}{\Leftrightarrow}$ Es exsistiert ein Homomorphismus $\alpha : E \to E'$, sodass:

$$\begin{tikzcd} 0 \arrow[r] & N \arrow[r] \arrow[d, "id"] & E \arrow[r] \arrow[d, "\alpha"] & M \arrow[r] \arrow[d, "id"] & 0 \\ 0 \arrow[r] & N \arrow[r] & E' \arrow[r] & M \arrow[r] & 0 \end{tikzcd}$$

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 ausgezeichentes Element, die Äquivalenzklasse der spaletenden exakten Sequenzen $0 \longrightarrow N \longrightarrow N \oplus M \longrightarrow M \longrightarrow 0$.