

Auflösung unbeschränkter Komplexe

Christian Merten

31. März 2022

1 Einleitung

2 Grundlagen

2.1 Triangulierte Kategorien

Definition 2.1 (Triangulierte Kategorie). Eine triangulierte Kategorie ist eine additive Kategorie $\mathcal{C}$ mit

- (a) einem Kategorienautomorphismus $T: \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{C}$, dem Verschiebefunktor, und
- (b) einer Klasse von Sextupeln (A, B, C, u, v, w) , den ausgezeichneten Dreiecken von $\mathcal{C}$, wobei $A, B, C \in \mathcal{T}$ und $u: A \rightarrow B$, $v: B \rightarrow C$, $w: C \rightarrow T(A)$.

Ein Morphismus von ausgezeichneten Dreiecken $(A, B, C, u, v, w) \rightarrow (A', B', C', u', v', w')$ ist ein kommutatives Diagramm

$$\begin{array}{ccccccc} A & \xrightarrow{u} & B & \xrightarrow{v} & C & \xrightarrow{w} & T(A) \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ A' & \xrightarrow{u'} & B' & \xrightarrow{v'} & C' & \xrightarrow{w'} & T(A) \end{array} .$$

Weiter unterliegen diese Daten den folgenden Axiomen:

- (TR1) Jedes zu einem ausgezeichneten Dreieck isomorphe Sextupel (A, B, C, u, v, w) wie oben, ist ein ausgezeichnetes Dreieck. Jeder Morphismus $u: A \rightarrow B$ kann in ein ausgezeichnetes Dreieck (A, B, C, u, v, w) eingebettet werden und das Sextupel $(A, A, 0, \text{id}_A, 0, 0)$ ist ein ausgezeichnetes Dreieck für alle $A \in \mathcal{C}$.
- (TR2) (A, B, C, u, v, w) ist ein ausgezeichnetes Dreieck genau dann wenn $(B, C, T(A), v, w, -T(u))$ ein ausgezeichnetes Dreieck ist.
- (TR3) Für zwei ausgezeichnete Dreiecke (A, B, C, u, v, w) und (A', B', C', u', v', w') , und Morphismen $f: X \rightarrow X'$, $g: Y \rightarrow Y'$, die mit u und u' kommutieren, existiert ein nicht notwendig eindeutiger Morphismus $h: Z \rightarrow Z'$, so dass (f, g, h) ein Morphismus von ausgezeichneten Dreiecken ist.

Bemerkung 2.2. Streng genommen ist die hier definierte Triangulierte Kategorie nur eine Pretriangulierte Kategorie. Für eine vollständig triangulierte Kategorie fehlt noch das Oktaheder Axiom, das wir im Folgenden jedoch nicht benötigen.

Definition 2.3 (Triangulierter Funktor). Ein additiver (kovarianter) Funktor $F: \mathcal{T} \rightarrow \mathcal{S}$ zwischen triangulierten Kategorien heißt trianguliert, wenn er ausgezeichnete Dreiecke in ausgezeichnete Dreiecke überführt und mit dem Verschiebefunktor kommutiert.

Definition 2.4 (Kohomologischer Funktor). Ein additiver (kovarianter) Funktor $H: \mathcal{T} \rightarrow \mathcal{A}$ von einer triangulierten Kategorie in eine abelsche Kategorie heißt (kovarianter) kohomologischer Funktor, wenn für jedes ausgezeichnete Dreieck (X, Y, Z, u, v, w) von $\mathcal{T}$ die lange Folge

$$\cdots \longrightarrow H(T^i(X)) \longrightarrow H(T^i Y) \longrightarrow H(T^i Z) \longrightarrow H(T^{i+1} X) \longrightarrow \cdots$$

exakt ist. Wenn H ein kohomologischer Funktor ist, dann schreiben wir auch $H^i(X)$ für $H(T^i(X))$ für $i \in \mathbb{Z}$.

Lemma 2.5. *Sei $\mathcal{T}$ eine triangulierte Kategorie und $A \in \mathcal{T}$. Dann sind $\text{Mor}_{\mathcal{T}}(A, -)$ und $\text{Mor}_{\mathcal{T}}(-, A)$ kohomologische Funktoren.*

2.2 Homotopiekategorie

Das kanonische Beispiel für eine triangulierte Kategorie ist die Homotopiekategorie einer additiven Kategorie.

Definition 2.6 (Homotopiekategorie). Sei $\mathcal{C}$ eine additive Kategorie. Dann bezeichne $\text{Kom}(\mathcal{C})$ die Kategorie der Komplexe mit Objekten aus $\mathcal{C}$ mit Komplexhomomorphismen als Morphismen. Bezeichne mit $\mathcal{K}(\mathcal{C})$ weiter die Homotopiekategorie mit den selben Objekten wie $\text{Kom}(\mathcal{C})$ und mit Komplexhomomorphismen modulo Homotopie als Morphismen.

Definition 2.7 (Abbildungskegel). Seien $A^\bullet, B^\bullet \in \mathcal{K}$ zwei Komplexe und $f: A^\bullet \rightarrow B^\bullet$ ein Komplexhomomorphismus. Dann sei der Abbildungskegel $C_f^\bullet$ definiert durch

$$C_f^n = A^{n+1} \oplus B^n$$

mit Differential

$$d_{C_f^\bullet} = \begin{pmatrix} d_{A^\bullet[1]} & 0 \\ f[1] & d_{B^\bullet} \end{pmatrix}.$$

Satz 2.8 (Homotopiekategorie ist trianguliert). *Sei $\mathcal{C}$ eine additive Kategorie. Dann ist die Homotopiekategorie $\mathcal{K}(\mathcal{C})$ mit den folgenden Daten trianguliert:*

(a) *Der Verschiebefunktor $T: \mathcal{K}(\mathcal{C}) \rightarrow \mathcal{K}(\mathcal{C})$ ist gegeben durch*

$$T(A^\bullet)^i = A^{i+1} \text{ und } d_{T(A^\bullet)} = -d_{A^\bullet}.$$

(b) *Ein Sextupel wie in 2.1 $(X^\bullet, Y^\bullet, Z^\bullet, u, v, w)$ in $\mathcal{K}(\mathcal{C})$ ist ein ausgezeichnetes Dreieck genau dann wenn es im Sinne von ausgezeichneten Dreiecken isomorph ist zu einem Sextupel der Form $(X^\bullet, Y^\bullet, C_u^\bullet, f, i, p)$, wobei $f: X^\bullet \rightarrow Y^\bullet$ ein Morphismus in $\mathcal{K}(\mathcal{C})$ ist und $i: B^\bullet \rightarrow C_f^\bullet$, $p: C_f^\bullet \rightarrow C^\bullet$ die kanonischen Morphismen sind.*

Sei nun $\mathcal{A}$ eine abelsche Kategorie und $\mathcal{K} = \mathcal{K}(\mathcal{A})$ die Homotopiekategorie.

Lemma 2.9. *Der Funktor $H: \mathcal{K} \rightarrow \mathcal{Ab}$ der einen Komplex $A^\bullet$ auf seine nullte Kohomologiegruppe abbildet, ist ein kohomologischer Funktor.*

Daraus erhalten wir insbesondere folgendes Kriterium, ob ein Komplexhomomorphismus ein Quasiisomorphismus ist:

Lemma 2.10. *Seien $A^\bullet, B^\bullet \in \mathcal{K}$ und $f: A^\bullet \rightarrow B^\bullet$ ein Komplexhomomorphismus. Dann ist f ein Quasiisomorphismus genau dann wenn $C_f^\bullet$ exakt ist.*

Beweis. Es ist $(A^\bullet, B^\bullet, C_f^\bullet, f, i, p)$ ein ausgezeichnetes Dreieck in $\mathcal{K}$ mit $i: B^\bullet \rightarrow C_f^\bullet$ und $p: C_f^\bullet \rightarrow A^\bullet[1]$ die natürlichen Abbildungen. Also erhalten wir für $i \in \mathbb{Z}$ eine exakte Folge

$$H^{i-1}(C_f^\bullet) \longrightarrow H^i(A^\bullet) \xrightarrow{H^i(f)} H^i(B^\bullet) \longrightarrow H^i(C_f^\bullet) \longrightarrow H^{i+1}(A^\bullet) \xrightarrow{H^{i+1}(f)} H^{i+1}(B^\bullet).$$

Die Exaktheit liefert nun die Äquivalenz. □

2.3 Lokalisierung von Kategorien

Definition 2.11 (Multiplikatives System). Sei $\mathcal{C}$ eine Kategorie. Eine Klasse $\mathcal{S}$ von Morphismen von $\mathcal{C}$ heißt multiplikatives System, wenn es die folgenden Axiome erfüllt:

- (FR1) Wenn $f, g \in \mathcal{S}$, sodass fg existiert, ist $fg \in \mathcal{S}$. Für alle $X \in \mathcal{C}$ ist $\text{id}_X \in \mathcal{S}$.
 (FR2) Jedes Diagramm in $\mathcal{C}$

$$\begin{array}{ccc} & & Z \\ & & \downarrow s \\ X & \xrightarrow{u} & Y \end{array}$$

mit $s \in \mathcal{S}$ kann zu einem kommutativen Diagramm

$$\begin{array}{ccc} W & \xrightarrow{v} & Z \\ \downarrow t & & \downarrow s \\ X & \xrightarrow{u} & Y \end{array}$$

mit $t \in \mathcal{S}$ ergänzt werden. Analog gilt die selbe Aussage mit allen Pfeilen umgedreht.

- (FR3) Für $f, g: X \rightarrow Y$ Morphismen in $\mathcal{C}$, sind die folgenden Bedingungen äquivalent:

- (i) Es existiert ein $s: Y \rightarrow Y'$ in $\mathcal{S}$, sodass $sf = sg$.
- (ii) Es existiert ein $t: X \rightarrow X'$ in $\mathcal{S}$, sodass $sf = sg$.

Definition 2.12 (Lokalisierung). Seien $\mathcal{C}$ eine Kategorie und $\mathcal{S}$ eine Klasse von Morphismen in $\mathcal{C}$. Dann ist die Lokalisierung von $\mathcal{C}$ in Bezug auf $\mathcal{S}$ eine Kategorie $\mathcal{C}_{\mathcal{S}}$ zusammen mit einem Funktor $Q: \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{C}_{\mathcal{S}}$, sodass

- (a) $Q(s)$ ein Isomorphismus ist für alle $s \in \mathcal{S}$ und
- (b) jeder Funktor $F: \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$, sodass $F(s)$ ein Isomorphismus ist für alle $s \in \mathcal{S}$, eindeutig über Q faktorisiert.

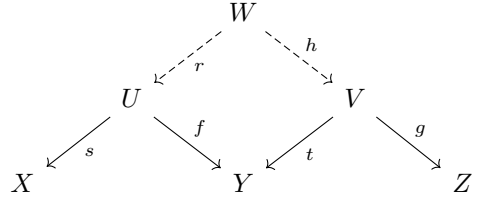
Definition 2.13. Sei $\mathcal{C}$ eine Kategorie und $\mathcal{S}$ ein multiplikatives System in $\mathcal{C}$. Dann definiere die Kategorie $\mathcal{C}_{\mathcal{S}}$ durch

- (a) $\text{ob}(\mathcal{C}) = \text{ob}(\mathcal{C}_{\mathcal{S}})$.
- (b) Für $X, Y \in \mathcal{C}$ setze $\text{Mor}_{\mathcal{C}_{\mathcal{S}}}(X, Y) = \{(f, Z, s) \mid f: Z \rightarrow Y, s: Z \rightarrow X \text{ mit } s \in \mathcal{S}\} / \sim$ wobei $(f, Z, s) \sim (f', Z', s')$ genau dann wenn ein kommutatives Diagramm

$$\begin{array}{ccccc} & & Z & & \\ & \swarrow s & \uparrow g & \searrow f & \\ X & & W & & Y \\ & \swarrow t & \downarrow h & \searrow f' & \\ & & Z' & & \end{array}$$

mit $t \in \mathcal{S}$ in $\mathcal{C}$ existiert.

- (c) Für $(f, U, s) \in \text{Mor}_{\mathcal{C}_S}(X, Y)$, $(g, V, t) \in \text{Mor}_{\mathcal{C}_S}(Y, Z)$ sei die Komposition definiert durch die äußeren Morphismen des kommutativen Diagramms



Die gestrichelten Morphismen existieren wegen FR2.

- (d) Für $X \in \mathcal{C}$ ist die Identität $X \rightarrow X$ in $\mathcal{C}_S$ gegeben durch das Tripel $(\text{id}_X, X, \text{id}_X)$.

Satz 2.14. *Sei $\mathcal{C}$ eine Kategorie und $\mathcal{S}$ ein multiplikatives System, dann ist die in 2.13 konstruierte Kategorie $\mathcal{C}_S$ wohldefiniert und eine Lokalisierung von $\mathcal{C}$ bezüglich $\mathcal{S}$. Der kanonische Funktor $Q: \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{C}_S$ ist dann gegeben durch $Q(X) = X$ für $X \in \mathcal{C}$ und $Q(f) = (f, X, \text{id}_X)$ für $f: X \rightarrow Y$ in $\mathcal{C}$.*

Bemerkung 2.15. Die Lokalisierung $\mathcal{C}_S$ einer Kategorie $\mathcal{C}$ kann auch dual, dass heißt durch Umdrehen aller Pfeile, konstruiert werden. Wenn im Folgenden der Kontext klar ist, dann schreiben wir auch einfach X für $Q(X)$ für ein Objekt $X \in \mathcal{C}$. Ebenso schreiben wir für $X, Y \in \mathcal{C}$ auch $s^{-1}f$ bzw. in der dualen Konstruktion fs^{-1} für die Äquivalenzklasse des Tripels $(f, Z, s) \in \text{Mor}_{\mathcal{C}_S}(X, Y)$. In dieser Notation ist dann $Q(f) = \text{id}^{-1}f$ bzw. $Q(f)f\text{id}^{-1}$ für $f: X \rightarrow Y$ in $\mathcal{C}$.

Definition 2.16 (Mit Triangulation kompatibles multiplikatives System). Sei $\mathcal{C}$ eine triangulierte Kategorie mit Verschiebefunktor T und $\mathcal{S}$ ein multiplikatives System von Morphismen. Wir nennen $\mathcal{S}$ kompatibel mit der Triangulation, wenn die folgenden Axiome erfüllt sind:

$$(\text{FR1}) \quad s \in \mathcal{S} \iff T(s) \in \mathcal{S}.$$

- (FR2) TR3 unter der zusätzlichen Annahme, dass $f, g \in \mathcal{S}$ und der zusätzlichen Forderung, dass $h \in \mathcal{S}$ ist.

Satz 2.17. *Sei $\mathcal{C}$ eine triangulierte Kategorie und $\mathcal{S}$ ein mit der Triangulation kompatibles multiplikatives System. Dann hat $\mathcal{C}_S$ eine eindeutige triangulierte Struktur, sodass Q ein triangulierter Funktor ist und die universelle Eigenschaft b) aus 2.12 für triangulierte Funktoren in triangulierte Kategorien erfüllt.*

2.4 Derivierte Kategorie

Sei im Folgenden $\mathcal{A}$ eine feste abelsche Kategorie und $\mathcal{K} = \mathcal{K}(\mathcal{A})$ die Homotopiekategorie.

Lemma 2.18 (Qis ist multiplikativ). *Die Klasse Qis der Quasiisomorphismen in $\mathcal{K}$ ist ein mit der Triangulation von $\mathcal{K}$ kompatibles multiplikatives System.*

Nach 2.14, 2.17 und 2.18 angewendet auf $\mathcal{K}$ und Qis , existiert die triangulierte Kategorie $\mathcal{K}_{Qis}$.

Definition 2.19 (Derivierte Kategorie). Wir bezeichnen die triangulierte Lokalisierung $\mathcal{K}_{Qis}$ als die derivierte Kategorie $\mathcal{D} = \mathcal{D}(\mathcal{A})$ von $\mathcal{A}$.

Bemerkung 2.20. Im Folgenden bezeichne $Q = Q_{\mathcal{A}}: \mathcal{K}(\mathcal{A}) \rightarrow \mathcal{D}(\mathcal{A})$ den kanonischen Lokalisierungsfunktor.

Um zu verstehen, wann zwei Morphismen in $\mathcal{K}$ den selben Morphismus in $\mathcal{D}$ induzieren, hilft das folgende Lemma:

Lemma 2.21. *Seien $A^\bullet, B^\bullet \in \mathcal{K}$ und $f: A^\bullet \rightarrow B^\bullet$. Dann ist $f = 0$ in $\mathcal{D}$ genau dann wenn ein Quasiisomorphismus $s: B^\bullet \rightarrow C^\bullet$ existiert, sodass $sf = 0$ in $\mathcal{K}$.*

Beweis. Es ist $f \text{id}^{-1} = 0$ genau dann wenn ein kommutatives Diagram existiert:

$$\begin{array}{ccccc}
 & & B^\bullet & & \\
 & \nearrow f & \downarrow \text{id} & \nwarrow \text{id} & \\
 A^\bullet & & C^\bullet & \xleftarrow{s} & B^\bullet \\
 & \searrow 0 & \uparrow & \nearrow \text{id} & \\
 & & B^\bullet & &
 \end{array}$$

mit s Quasiisomorphismus. □

Die derivierte Kategorie erlaubt es Ableitungen von Funktoren allgemeiner zu formulieren. Wir führen hier nur die Situation der Rechtsableitung kovarianter Funktoren aus. Seien dafür $\mathcal{A}$ und $\mathcal{B}$ abelsche Kategorien und $F: \mathcal{K}(\mathcal{A}) \rightarrow \mathcal{K}(\mathcal{A})$ ein triangulierter Funktor.

Falls F exakt ist werden Quasiisomorphismen auf Quasiisomorphismen geschickt und F induziert daher einen Funktor von $\mathcal{D}(\mathcal{A})$ nach $\mathcal{D}(\mathcal{B})$. Im Allgemeinen ist das nicht der Fall. Dennoch möchten wir einen Funktor von $\mathcal{D}(\mathcal{A})$ nach $\mathcal{D}(\mathcal{B})$ konstruieren, der F so nahe wie möglich kommt.

Definition 2.22 (Abgeleiteter Funktor). Seien $\mathcal{A}, \mathcal{B}$ abelsche Kategorien. Der rechts abgeleitete Funktor von F ist ein triangulierter Funktor

$$RF: \mathcal{D}(\mathcal{A}) \rightarrow \mathcal{D}(\mathcal{A})$$

zusammen mit einer natürlichen Transformation

$$\xi: Q_{\mathcal{B}} \circ F \rightarrow RF \circ Q_{\mathcal{A}}$$

von Funktoren von $\mathcal{K}(\mathcal{A})$ nach $\mathcal{D}(\mathcal{B})$ mit der folgenden universellen Eigenschaft: Für jeden triangulierten Funktor

$$G: \mathcal{D}(\mathcal{A}) \rightarrow \mathcal{D}(\mathcal{B})$$

und jede natürliche Transformation

$$\zeta: Q_{\mathcal{B}} \circ F \rightarrow G \circ Q_{\mathcal{A}}$$

existiert eine eindeutige natürliche Transformation

$$\eta: RF \rightarrow G$$

von Funktoren von $\mathcal{D}(\mathcal{A})$ nach $\mathcal{D}(\mathcal{B})$, sodass

$$\xi = (\eta \circ Q_{\mathcal{A}}) \circ \xi.$$

Bemerkung 2.23. (1) Falls RF existiert, ist dieser bis auf eindeutige natürliche Transformationen eindeutig.

(2) Wir schreiben $R^i F$ für $H^i(RF)$ und wenn F induziert ist von einem links-exakten Funktor $F: \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ und $\mathcal{A}$ genügend Injektive hat, sind das genau die klassischen abgeleiteten Funktoren von F .

Satz 2.24. Seien $\mathcal{A}, \mathcal{B}$ abelsche Kategorien und $F: \mathcal{K}(\mathcal{A}) \rightarrow \mathcal{K}(\mathcal{B})$ ein triangulierter Funktor. Angenommen es existiert eine triangulierte Unterkategorie $\mathcal{L} \subset \mathcal{K}(\mathcal{A})$, s. d.

- (i) Jeder Komplex in $\mathcal{K}(\mathcal{A})$ besitzt einen Quasiisomorphismus in einen Komplex aus $\mathcal{L}$.
- (ii) $F|_{\mathcal{L}}$ ist exakt.

Dann existiert der Funktor $RF: \mathcal{D}(\mathcal{A}) \rightarrow \mathcal{D}(\mathcal{B})$ und eine natürliche Transformation $\xi: Q_{\mathcal{B}} \circ F \rightarrow RF \circ Q_{\mathcal{A}}$, sodass für alle $I^{\bullet} \in \mathcal{L}$ die Abbildung

$$\xi(I^{\bullet}): Q_{\mathcal{B}}(F(I^{\bullet})) \rightarrow RF(Q_{\mathcal{A}}(I^{\bullet}))$$

ein Isomorphismus in $\mathcal{D}(\mathcal{A})$ ist.

Bemerkung 2.25. Die Voraussetzungen von 2.24 sind im Allgemeinen schwer zu erfüllen. Ziel dieser Arbeit ist es herauszuarbeiten, dass im Falle von $\mathcal{A} = A\text{-Mod}$ für einen kommutativen Ring A , die Bedingungen für die im Folgenden definierten Funktoren $\text{Hom}^{\bullet}(M^{\bullet}, -)$, $\text{Hom}^{\bullet}(-, M^{\bullet})$ und $M^{\bullet} \otimes_A -$ erfüllt sind.

Definition 2.26. Seien $A^{\bullet}, B^{\bullet} \in \mathcal{K}$ zwei Komplexe in einer beliebigen abelschen Kategorie $\mathcal{A}$. Dann sei $\text{Hom}^{\bullet}(A^{\bullet}, B^{\bullet}) \in \mathcal{K}(\mathcal{A})$ definiert durch

$$\text{Hom}^n(A^{\bullet}, B^{\bullet}) = \prod_{i \in \mathbb{Z}} \text{Hom}(A^i, B^{i+n})$$

mit Differentialen

$$d^n(f) = d_{B^{\bullet}} \circ f - (-1)^n f \circ d_{A^{\bullet}}$$

für $f \in \text{Hom}^n(A^{\bullet}, B^{\bullet})$.

Definition 2.27. Seien $M^{\bullet}, N^{\bullet} \in \mathcal{K}(A\text{-Mod})$. Dann sei $M^{\bullet} \otimes_A N^{\bullet} \in \mathcal{K}(A\text{-Mod})$ definiert durch

$$(M^{\bullet} \otimes_A N^{\bullet})^n = \bigoplus_{i \in \mathbb{Z}} M^i \otimes_A N^{n-i}$$

mit Differentialen

$$d^n(m \otimes n) = d_{M^{\bullet}}(m) \otimes n + (-1)^i m \otimes d_{N^{\bullet}}(n)$$

für $m \in M^i, n \in N^{n-i}$.

Lemma 2.28. Seien $A^{\bullet}, B^{\bullet} \in \mathcal{K}$ zwei Komplexe. Dann gilt für $n \in \mathbb{Z}$:

$$H^n(\text{Hom}^{\bullet}(A^{\bullet}, B^{\bullet})) = \text{Mor}_{\mathcal{K}}(A^{\bullet}, B^{\bullet}[n]).$$

Beweis. Sei $(f^i)_{i \in \mathbb{Z}} \in \prod_{i \in \mathbb{Z}} \text{Hom}(A^i, B^{i+n})$. Dann ist:

$$(f^i)_{i \in \mathbb{Z}} \in \ker d^n \iff (-1)^n d_{B^{\bullet}}^{i+n} f^i = f^{i+1} d_{A^{\bullet}}^i \text{ für } i \in \mathbb{Z}.$$

Wegen $d_{B^{\bullet}[n]} = (-1)^n d_{B^{\bullet}}$, induziert $(f^i)_{i \in \mathbb{Z}}$ also genau dann einen Komplexhomomorphismus $A^{\bullet} \rightarrow B^{\bullet}[n]$, wenn $(f^i)_{i \in \mathbb{Z}} \in \ker d^n$.

Weiter ist $(f^i)_{i \in \mathbb{Z}} \in \text{im } d^{n-1}$ genau dann wenn eine Familie $(k^i)_{i \in \mathbb{Z}} \in \prod_{i \in \mathbb{Z}} \text{Hom}(A^i, B^{i+n-1})$ existiert, sodass

$$(-1)^n f^i = (-1)^n d_{B^{\bullet}}^{i+n-1} k^i + k^{i+1} d_{A^{\bullet}}^i.$$

Erneut wegen $d_{B^{\bullet}[n]} = (-1)^n d_{B^{\bullet}}$, ist also für $(f_i)_{i \in \mathbb{Z}} \in \ker d^n$ der induzierte Komplexhomomorphismus $f: A^{\bullet} \rightarrow B^{\bullet}$ genau dann nullhomotop, wenn $(f^i)_{i \in \mathbb{Z}} \in \text{im } d^{n-1}$. $\square$

Lemma 2.29 (Tensorprodukt ist trianguliert). *Sei $M^\bullet \in \mathcal{K}(A\text{-Mod})$. Dann ist $- \otimes_A M^\bullet$ (und $M^\bullet \otimes_A -$) ein triangulierter Funktor von $\mathcal{K}(A\text{-Mod})$ nach $\mathcal{K}(A\text{-Mod})$.*

Satz 2.30 (Adjunktion der Hom- und Tensorproduktkomplexe). *Seien $M^\bullet, N^\bullet, P^\bullet \in \mathcal{K}(A\text{-Mod})$. Dann existiert ein natürlicher Isomorphismus, der funktoriell in allen Variablen ist:*

$$\mathrm{Hom}^\bullet(M^\bullet \otimes_A N^\bullet, P^\bullet) = \mathrm{Hom}^\bullet(M^\bullet, \mathrm{Hom}^\bullet(N^\bullet, P^\bullet)).$$

Beweis.

□

3 K-injektive und K-projektive Auflösungen

In diesem Abschnitt möchten wir, in der Notation von 2.24, jeweils eine Unterkategorie $\mathcal{L}$ finden, die die Bedingungen von 2.24 für die Funktoren $\text{Hom}^\bullet(A^\bullet, -)$ bzw. $\text{Hom}^\bullet(-, A^\bullet)$ erfüllt. Dazu definieren wir folgende Klasse von Komplexen:

Definition 3.1 (K-injektiv bzw. K-projektiv). Ein Komplex $X^\bullet \in \mathcal{K}$ heißt K-injektiv (bzw. K-projektiv), wenn für alle $S^\bullet \in \mathcal{K}$, der Komplex $\text{Hom}^\bullet(S^\bullet, X^\bullet)$ (bzw. $\text{Hom}^\bullet(X^\bullet, S^\bullet)$) exakt ist.

Bemerkung 3.2. Mit 2.28 ist $X^\bullet$ genau dann K-injektiv (bzw. K-projektiv), wenn $\forall S^\bullet \in \mathcal{K}$ exakt: $\text{Mor}_{\mathcal{K}}(S^\bullet[i], X^\bullet) = 0$ (bzw. $\text{Mor}_{\mathcal{K}}(X^\bullet, S^\bullet[i]) = 0$) $\forall i \in \mathbb{Z}$. Da Verschieben Exaktheit erhält folgt also

$$\begin{aligned} X^\bullet \text{ K-projektiv} &\iff \text{Mor}_{\mathcal{K}}(X^\bullet, S^\bullet) = 0 \quad \forall S^\bullet \text{ exakt} \\ X^\bullet \text{ K-injektiv} &\iff \text{Mor}_{\mathcal{K}}(S^\bullet, X^\bullet) = 0 \quad \forall S^\bullet \text{ exakt.} \end{aligned}$$

3.1 Elementare Eigenschaften von K-injektiven und K-projektiven Komplexen

Bemerkung 3.3. Ein exakter K-projektiver oder K-injektiver Komplex $X^\bullet$ ist zusammenziehbar, d.h. ist nullhomotop.

Beweis. Betrachte $\text{id}_{X^\bullet} \in \text{Hom}^0(X^\bullet, X^\bullet) = \text{Mor}_{\mathcal{K}}(X^\bullet, X^\bullet) = H^0 \text{Hom}^\bullet(X^\bullet, X^\bullet) = 0$. Also ist $\text{id}_{X^\bullet} = 0$ und damit $X^\bullet = 0$ in $\mathcal{K}$. $\square$

Satz 3.4. Sei $X^\bullet \in \mathcal{K}$ mit $X^i = 0 \quad \forall i \neq 0$. Dann ist $X^\bullet$ K-injektiv (bzw. K-projektiv) genau dann wenn A^0 injektiv (bzw. projektiv) in $\mathcal{A}$ ist.

Beweis. „ $\implies$ “: Sei $X^\bullet$ K-projektiv und $S^\bullet = 0 \rightarrow M \rightarrow N \rightarrow P \rightarrow 0$ kurze exakte Folge in $\mathcal{A}$. Sei $f: X^0 \rightarrow P$. Das induziert einen Komplexhomomorphismus $X^\bullet \rightarrow S^\bullet$

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \longrightarrow & 0 & \longrightarrow & X^0 & \longrightarrow & 0 \\ & & \downarrow & & \downarrow f & & \downarrow \\ & & M & \longrightarrow & N & \xrightarrow{v} & P \longrightarrow 0 \end{array}$$

(Note: The diagram in the image shows a dashed arrow from X^0 to N labeled k , and a dashed arrow from X^0 to P labeled f . The solid arrow from N to P is labeled v .)

Nach Voraussetzung ist dieser nullhomotop, d.h. es existiert $k: X^0 \rightarrow N$, s.d. $f = vk$. Also ist $\text{Hom}(X^0, N) \rightarrow \text{Hom}(X^0, P)$ surjektiv und damit X^0 projektiv.

„ $\impliedby$ “: Sei nun X^0 projektiv, $S^\bullet \in \mathcal{K}$ exakt und $f: X^\bullet \rightarrow S^\bullet$ Komplexhomomorphismus. Dann betrachte

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \longrightarrow & & \longrightarrow & X^0 & \longrightarrow & 0 \\ & & \downarrow & & \downarrow f^0 & & \downarrow \\ S^{-1} & \xrightarrow{d^{-1}} & \text{im } d^{-1} & \longrightarrow & S^0 & \xrightarrow{d^0} & S^1 \end{array}$$

(Note: The diagram in the image shows a dashed arrow from X^0 to S^{-1} labeled k^0 , and a dashed arrow from X^0 to S^0 labeled f^0 . The solid arrow from S^{-1} to $\text{im } d^{-1}$ is labeled d^{-1} , and the solid arrow from $\text{im } d^{-1}$ to S^0 is labeled d^0 .)

Da $d^0 f^0 = 0$ faktorisiert f^0 über $\ker d^0 = \text{im } d^{-1}$. Weil X^0 projektiv, existiert $k^0: A^0 \rightarrow S^{-1}$, s.d. $f^0 = d^{-1} k^0$. $\square$

Satz 3.5. (i) $X^\bullet \in \mathcal{K}$ ist K-projektiv (bzw. K-injektiv) genau dann wenn $X^\bullet[1]$ dies ist.

(ii) Falls zwei Punkte eines ausgezeichneten Dreiecks in $\mathcal{K}$ K-projektiv (bzw. K-injektiv) sind, dann auch der dritte.

Beweis. (i) Das folgt, daraus dass für $X^\bullet, S^\bullet \in \mathcal{K}$ gilt: $S^\bullet$ exakt $\iff S^\bullet[-1]$ exakt und

$$\text{Mor}_{\mathcal{K}}(X^\bullet, S^\bullet[-1]) = \text{Mor}_{\mathcal{K}}(X^\bullet[1], S^\bullet).$$

(ii) Sei $(X^\bullet, Y^\bullet, Z^\bullet, u, v, w)$ ein ausgezeichnetes Dreieck mit $X^\bullet, Y^\bullet$ K-projektiv und $S^\bullet$ exakt. Nach Anwenden von $\text{Mor}_{\mathcal{K}}(-, S^\bullet)$ ist dann mit 2.5

$$\underbrace{\text{Mor}_{\mathcal{K}}(X^\bullet[1], S^\bullet)}_{=0} \rightarrow \text{Mor}_{\mathcal{K}}(Z^\bullet, S^\bullet) \rightarrow \underbrace{\text{Mor}_{\mathcal{K}}(Y^\bullet, S^\bullet)}_{=0}$$

exakt und die äußeren Terme 0 nach Voraussetzung und (i). Also folgt $\text{Mor}_{\mathcal{K}}(Z^\bullet, S^\bullet) = 0$, also $Z^\bullet$ K-projektiv. Der allgemeine Fall folgt nun mit TR2. □

Satz 3.6. Sei $P^\bullet \in \mathcal{K}$. Dann sind äquivalent

(i) $P^\bullet$ K-projektiv

(ii) Für $X^\bullet \rightarrow Y^\bullet$ Quasiisomorphismus in $\mathcal{K}$ ist der natürliche Homomorphismus

$$\text{Mor}_{\mathcal{K}}(P^\bullet, X^\bullet) \rightarrow \text{Mor}_{\mathcal{K}}(P^\bullet, Y^\bullet)$$

ein Isomorphismus.

(iii) Für $S^\bullet \in \mathcal{K}$ ist der natürliche Homomorphismus

$$\text{Mor}_{\mathcal{K}}(P^\bullet, S^\bullet) \rightarrow \text{Mor}_{\mathcal{D}}(P^\bullet, S^\bullet)$$

ein Isomorphismus.

Beweis. (i) $\implies$ (ii): Sei $f: X^\bullet \rightarrow Y^\bullet$ ein Quasiisomorphismus. Dann ist

$$X^\bullet \xrightarrow{f} Y^\bullet \longrightarrow C_f^\bullet \longrightarrow X^\bullet[1]$$

ein ausgezeichnetes Dreieck und $C_f^\bullet$ ist nach 2.10 exakt. Anwenden von $\text{Mor}_{\mathcal{K}}(P^\bullet, -)$ liefert mit 2.5 eine exakte Folge:

$$\underbrace{\text{Mor}_{\mathcal{K}}(P^\bullet, C_f^\bullet[-1])}_{=0} \longrightarrow \text{Mor}_{\mathcal{K}}(P^\bullet, X^\bullet) \longrightarrow \text{Mor}_{\mathcal{K}}(P^\bullet, Y^\bullet) \longrightarrow \underbrace{\text{Mor}_{\mathcal{K}}(P^\bullet, C_f^\bullet)}_{=0}.$$

Die äußeren Terme sind 0, da $P^\bullet$ K-projektiv, also folgt der behauptete Isomorphismus.

(ii) $\implies$ (iii): Injektivität: Sei $f: P^\bullet \rightarrow S^\bullet$, s.d. $\text{id}^{-1}f = 0$. Nach 2.21 existiert ein $t: S^\bullet \rightarrow T^\bullet$ Quasiisomorphismus, s.d. $tf = 0$. Nach (ii) ist $t_*: \text{Mor}_{\mathcal{K}}(P^\bullet, S^\bullet) \rightarrow \text{Mor}_{\mathcal{K}}(P^\bullet, T^\bullet)$ injektiv, also folgt $f = 0$. Surjektivität: Sei $a \in \text{Mor}_{\mathcal{D}}(P^\bullet, S^\bullet)$. Dann ist a ein Diagramm in $\mathcal{K}$

$$\begin{array}{ccc} & M^\bullet & \\ f \nearrow & & \nwarrow s \\ P^\bullet & & S^\bullet \end{array}$$

mit s Quasiisomorphismus. Nach (ii) ist $s_*: \text{Mor}_{\mathcal{K}}(P^\bullet, S^\bullet) \rightarrow \text{Mor}_{\mathcal{K}}(P^\bullet, M^\bullet)$ surjektiv, also existiert ein $g: P^\bullet \rightarrow S^\bullet$, s.d. $sg = f$. Also kommutiert

$$\begin{array}{ccccc}
& & S^\bullet & & \\
& \nearrow g & \downarrow s & \nwarrow \text{id} & \\
P^\bullet & & M^\bullet & & S^\bullet \\
& \searrow f & \uparrow \text{id} & \swarrow s & \\
& & M^\bullet & &
\end{array}$$

Damit folgt $a = g \operatorname{id}^{-1}$.

(iii) $\implies$ (i): Sei $S^\bullet$ exakt. Dann ist $S^\bullet \rightarrow 0$ ein Quasiisomorphismus, also $S^\bullet \cong 0$ in $\mathcal{D}$, also

$$\mathrm{Mor}_{\mathcal{K}}(X^{\bullet}, S^{\bullet}) \stackrel{\text{(ii)}}{=} \mathrm{Mor}_{\mathcal{D}}(X^{\bullet}, S^{\bullet}) = \mathrm{Mor}_{\mathcal{D}}(X^{\bullet}, 0^{\bullet}) = 0.$$

☐

Satz 3.7. *Sei $P^\bullet \in \mathcal{K}$. Dann sind äquivalent*

- (i) $P^\bullet$ K -projektiv.
- (ii) Für alle Diagramme in $\mathcal{K}$

$$\begin{array}{ccc} & & M^\bullet \\ & & \downarrow s \\ P^\bullet & \xrightarrow{f} & N^\bullet \end{array}$$

mit s Quasiisomorphismus, existiert genau ein $g: P^\bullet \rightarrow M^\bullet$, s.d. $sg = f$ in $\mathcal{K}$.

- (iii) Für alle Quasiisomorphismen $u: S^\bullet \rightarrow P^\bullet$ in $\mathcal{K}$ existiert ein $v: P^\bullet \rightarrow S^\bullet$, s.d. $uv = id_{P^\bullet}$ in $\mathcal{K}$.

Beweis. (i) $\implies$ (ii): Betrachte das gegebene Diagramm in $\mathcal{D}$:

$$\begin{array}{ccc} & & X^\bullet \\ & \nearrow g & \downarrow \text{id}^{-1}s \cdot \\ P^\bullet & \xrightarrow{\text{id}^{-1}f} & Y^\bullet \end{array}$$

Da s Quasiisomorphismus, ist s Isomorphismus in $\mathcal{D}$, also existiert ein $g: P^\bullet \rightarrow X^\bullet$ in $\mathcal{D}$, sodass das Diagramm kommutiert. 3.6 (iii) liefert das gewünschte Diagramm in $\mathcal{K}$.

(ii) $\implies$ (iii): Betrachte

$$\begin{array}{ccc} & S^\bullet & \\ & \downarrow s & \\ P^\bullet & \xrightarrow{\text{id}} & P^\bullet \end{array}$$

Da s Quasiisomorphismus existiert mit (ii) ein $f: P^\bullet \rightarrow S^\bullet$, s.d. $sf = \text{id}_{P^\bullet}$.

(iii) $\implies$ (ii): Erneut mit 3.6 genügt es zu zeigen, dass für $S^\bullet \in \mathcal{K} \operatorname{Mor}_{\mathcal{K}}(P^\bullet, S^\bullet) \rightarrow \operatorname{Mor}_{\mathcal{D}}(P^\bullet, S^\bullet)$ bijektiv ist. Injektivität: Sei $f: P^\bullet \rightarrow S^\bullet$ mit $\operatorname{id}^{-1}f = 0$ in $\mathcal{D}$. Dann existiert nach 2.21 ein

$t: T^\bullet \rightarrow P^\bullet$ Quasiisomorphismus mit $ft = 0$. Also existiert mit (iii) ein $s: P^\bullet \rightarrow T^\bullet$, s.d. $ts = \text{id}_{P^\bullet}$, also

$$f = f \text{id}_{P^\bullet} = \underbrace{ft}_{=0} s = 0.$$

Surjektivität: Sei $a: P^\bullet \rightarrow S^\bullet$ in $\mathcal{D}$. Dann ist a gegeben durch ein Diagramm

$$\begin{array}{ccc} & Q^\bullet & \\ s \swarrow & & \searrow f \\ P^\bullet & & S^\bullet \end{array}$$

in $\mathcal{K}$ mit s Quasiisomorphismus. Nach (iii) existiert ein $t: P^\bullet \rightarrow Q^\bullet$ mit $st = \text{id}_{P^\bullet}$. Dann ist

$$\begin{array}{ccccc} & & Q^\bullet & & \\ & s \swarrow & \uparrow t & \searrow f & \\ P^\bullet & \xleftarrow{\text{id}} & P^\bullet & & S^\bullet \\ & \nwarrow \text{id} & \downarrow \text{id} & \nearrow ft & \\ & & P^\bullet & & \end{array}$$

ein kommutatives Diagramm in $\mathcal{K}$, also folgt $s^{-1}f = \text{id}^{-1}(ft)$ in $\mathcal{D}$. □

Durch Umdrehen aller Pfeile erhalten wir analog:

Satz 3.8. Für jeden Komplex $I^\bullet \in \mathcal{K}$ sind äquivalent:

- (i) $I^\bullet$ K -injektiv
- (ii) Für $S^\bullet \in \mathcal{K}$ ist der natürliche Homomorphismus

$$\text{Mor}_{\mathcal{K}}(S^\bullet, I^\bullet) \rightarrow \text{Mor}_{\mathcal{D}}(S^\bullet, I^\bullet)$$

ein Isomorphismus.

- (iii) Für jedes Diagramm in $\mathcal{K}$

$$\begin{array}{ccc} Y^\bullet & \xrightarrow{f} & I^\bullet \\ \downarrow s & & \\ X^\bullet & & \end{array}$$

mit s Quasiisomorphismus, existiert genau ein $g: X^\bullet \rightarrow I^\bullet$, s.d. das Diagramm kommutiert.

- (iv) Für jeden Quasiisomorphismus $u: I^\bullet \rightarrow S^\bullet$ in $\mathcal{K}$ existiert ein $v: S^\bullet \rightarrow I^\bullet$, s.d. $vu = \text{id}_{I^\bullet}$ in $\mathcal{K}$.

3.2 Spezielle inverse und direkte Systeme

In der Notation von 2.24 möchten wir die Klasse der K-injektiven bzw. K-projektiven Komplexe als $\mathcal{L}$ für die Funktoren $\text{Hom}^\bullet(M^\bullet, -)$ bzw. $\text{Hom}^\bullet(-, M^\bullet)$ für $M^\bullet \in \mathcal{K}$ verwenden.

Nun stellt sich die Aufgabe für jeden Komplex $A^\bullet \in \mathcal{K}$ eine K-injektive bzw. eine K-projektive Auflösung zu konstruieren. Dies machen wir mit sogenannten speziellen inversen bzw. direkten Systemen.

Definition 3.9 (Spezielles inverses System). Sei $\mathcal{J} \subset \mathcal{K}$ eine Klasse von Komplexen.

- (a) Ein inverses System $(I_n^\bullet)_{n \in \mathbb{N}}$ in $\mathcal{K}$ heißt $\mathcal{J}$ -spezielles inverses System, falls folgende Bedingungen erfüllt sind:
 - (i) Falls $n = 1$, dann ist $I_n^\bullet = 0$.
 - (ii) Falls $n > 1$, dann sei $C_n^\bullet$ der Kern der natürlichen Abbildung $I_n^\bullet \rightarrow I_{n-1}^\bullet$. Dann ist $C_n^\bullet \in \mathcal{J}$ und die kurze exakte Folge

$$0 \rightarrow C_n^\bullet \rightarrow I_n^\bullet \rightarrow I_{n-1}^\bullet \rightarrow 0$$

zerfällt stufenweise.

- (b) Die Klasse $\mathcal{J}$ heißt abgeschlossen unter speziellen inversen Limites, falls jedes $\mathcal{J}$ -spezielle inverse System in $\mathcal{K}$ einen Limes in $\mathcal{J}$ besitzt und jeder Komplex in $\mathcal{K}$, der isomorph ist zu einem Komplex in $\mathcal{J}$, bereits in $\mathcal{J}$ ist.

Im Folgenden möchten wir zeigen, dass die Klasse der K-projektiven Komplexe abgeschlossen unter speziellen inversen Limites ist. Dazu benötigen wir die folgenden Lemmata:

Lemma 3.10. Sei $\mathcal{J}_0$ eine Klasse von Objekten von $\mathcal{A}$. Sei weiter $\mathcal{J}$ eine unter speziellen inversen Limites abgeschlossene Klasse von Objekten in $\mathcal{K}$, so dass jeder Komplex $A^\bullet \in \mathcal{K}$ mit nur einem nicht-null Term und mit $A^i \in \mathcal{J}_0$ für $i \in \mathbb{Z}$, in $\mathcal{J}$ enthalten ist. Dann ist jeder nach unten beschränkte Komplex $A^\bullet \in \mathcal{K}$ mit $A^i \in \mathcal{J}_0$ für $i \in \mathbb{Z}$ in $\mathcal{J}$ enthalten.

Beweis. Sei $A^\bullet \in \mathcal{K}^+$ mit $A^i \in \mathcal{J}_0$ für alle $i \in \mathbb{Z}$. Ohne Einschränkung sei $A^i = 0$ für alle $i < 0$. Dann sind die Spalten des nachstehenden Diagramms ein $\mathcal{J}$ -spezielles inverses System $(S_n^\bullet)_{n \geq 0}$ mit Übergangsabbildungen p_n ,

$$\begin{array}{ccccccc}
 \cdots & \longrightarrow & 0 & \longrightarrow & 0 & \longrightarrow & 0 & \longrightarrow & 0 \\
 & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 \cdots & \longrightarrow & A^0 & \longrightarrow & A^0 & \longrightarrow & A^0 & \longrightarrow & 0 \\
 & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 \cdots & \longrightarrow & A^1 & \longrightarrow & A^1 & \longrightarrow & 0 & \longrightarrow & 0 \\
 & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 \cdots & \longrightarrow & A^2 & \longrightarrow & 0 & \longrightarrow & 0 & \longrightarrow & 0 \\
 & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots
 \end{array}$$

denn für $n > 0$ ist $\ker p_n^\bullet = [\cdots \rightarrow 0 \rightarrow \underbrace{A^{n-1}}_{\in \mathcal{J}_0} \rightarrow 0 \rightarrow \cdots]$. Nach Voraussetzung ist also $\ker p_n$ in $\mathcal{J}$ und die kurze exakte Folge $0 \rightarrow \ker p_n^\bullet \rightarrow S_n^\bullet \rightarrow S_{n-1}^\bullet \rightarrow 0$ zerfällt gradweise. Also folgt $A^\bullet = \varprojlim S_n^\bullet \in \mathcal{J}$. $\square$

Unser Ziel ist nun zu zeigen, dass die Klasse der exakten Komplexe abgeschlossen ist bezüglich spezieller inverser Limes. Da der inverse Limes im Allgemeinen nicht exakt ist, benötigen wir ein technisches Hilfswerkzeug.

Wir benötigen im Folgenden mehrmals eine bestimmte Bedingung an inverse Systeme in $\mathcal{A}b$.

Definition 3.11. Wir sagen eine totalgeordnete Indexmenge $(I, \leq)$ genüge der Bedingung (S), wenn eine ordnungserhaltende Bijektion $\iota: I \rightarrow \mathbb{N}$ existiert. Für $i \in I$ bezeichne, falls dieser existiert, mit $i + 1$ bzw. $i - 1$, den von ι induzierten Vorgänger bzw. Nachfolger von i .

Weiter sagen wir ein inverses System $(M_i)_{i \in I}$ in $\mathcal{A}b$ genüge der Bedingung (R), wenn folgende Eigenschaften erfüllt sind:

- (i) I genügt Bedingung (S).
- (ii) $M_1 = 0$.
- (iii) Für $i > I_{\min}$ ist die Abbildung $M_i \rightarrow M_{i-1}$ surjektiv.

Lemma 3.12. Sei I eine Indexmenge, die Bedingung (S) genügt und seien $(A_i)_{i \in I}$, $(B_i)_{i \in I}$, $(C_i)_{i \in I}$ und $(D_i)_{i \in I}$ inverse Systeme in $\mathcal{A}b$, die (R) erfüllen und seien

$$(A_i)_{i \in I} \xrightarrow{f_i} (B_i)_{i \in I} \xrightarrow{g_i} (C_i)_{i \in I} \xrightarrow{h_i} (D_i)_{i \in I} \quad (1)$$

Morphismen von inversen Systemen mit $g_i \circ f_i = 0 = h_i \circ g_i$ für $i \in I$ und sei

$$A \xrightarrow{f} B \xrightarrow{g} C \xrightarrow{h} D$$

der Limes von (1). Für $i \in I$ mit $i > I_{\min}$ seien A'_i , B'_i , C'_i und D'_i die jeweiligen Kerne der Übergangsabbildungen $A_i \rightarrow A_{i-1}$, $B_i \rightarrow B_{i-1}$, $C_i \rightarrow C_{i-1}$ und $D_i \rightarrow D_{i-1}$.

Sei weiter $j \in I$, s.d. für alle $i > j$ die Folge

$$A'_i \longrightarrow B'_i \longrightarrow C'_i \longrightarrow D'_i$$

exakt ist.

Dann ist die natürliche Abbildung

$$\ker g / \text{im } f \longrightarrow \ker g_j / \text{im } f_j$$

ein Isomorphismus.

Beweis. Durch Umbenennung können wir ohne Einschränkung annehmen, dass $I = \mathbb{N}$. Sei $j \in \mathbb{N}$ mit der beschriebenen Eigenschaft. Dann betrachte das kommutative Diagramm:

$$\begin{array}{ccccccccccc}
 A & \xrightarrow{f} & \text{im } f & \longrightarrow & \ker g & \longrightarrow & B & \xrightarrow{g} & C & \xrightarrow{h} & D \\
 \downarrow & & & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 A_j & \xrightarrow{f_j} & \text{im } f_j & \longrightarrow & \ker g_j & \longrightarrow & B_j & \xrightarrow{g_j} & C_j & \xrightarrow{h_j} & D_j \\
 p_A \uparrow & & \uparrow & & \uparrow & & p_B \uparrow & & p_C \uparrow & & p_D \uparrow \\
 A_{j+1} & \xrightarrow{f_{j+1}} & \text{im } f_{j+1} & \longrightarrow & \ker g_{j+1} & \longrightarrow & B_{j+1} & \xrightarrow{g_{j+1}} & C_{j+1} & \xrightarrow{h_{j+1}} & D_{j+1} \\
 \uparrow & & & & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow \\
 \ker p_{A_{j+1}} & \longrightarrow & & \longrightarrow & \ker p_{B_{j+1}} & \longrightarrow & \ker p_{C_{j+1}} & \longrightarrow & \ker p_{D_{j+1}} & &
 \end{array} \quad (2)$$

Injektivität: Sei $(b_i)_{i \in \mathbb{N}} \in \ker g$, sodass $b_j \in \text{im } f_j$. Dann existiert ein $a_j \in A_j$, sodass $f_j(a_j) = b_j$. Da p_A surjektiv, existiert ein $x \in A_{j+1}$, sodass $p_A(x) = a_j$. Sei $y = f_{j+1}(x)$. Weil (2) kommutativ, ist $p_B(y) = b_j$. Da $(b_i)_{i \in \mathbb{N}}$ ein kompatibles System ist, gilt zudem $p_B(b_{j+1}) = b_j$. Also ist $b_{j+1} - y \in \ker p_B$. Weil $y, b_{j+1} \in \ker g_{j+1}$, existiert aufgrund der Exaktheit der unteren Zeile ein $\tilde{x} \in \ker p_A$, sodass $f_{j+1}(\tilde{x}) = b_{j+1} - y$. Nun setze $a_{j+1} := \tilde{x} + x$. Dann ist $f_{j+1}(a_{j+1}) = b_{j+1}$ und $p_A(a_{j+1}) = a_j$, denn $\tilde{x} \in \ker p_A$. Konstruiere so induktiv eine kompatible Familie $(a_i)_{i \geq j}$ mit $f(a_i) = (b_i)_{i \geq j}$. Für $i < j$ setze $a_i := p_{A_{i+1}}(a_{i+1})$. Die Kommutativität von (2) liefert dann ein kompatibles System $(a_i)_{i \in \mathbb{N}}$ mit $f(a_i) = (b_i)_{i \in \mathbb{N}}$.

Surjektivität: Sei $b \in \ker g_j$. Weil p_B surjektiv, existiert dann ein $y \in B_{j+1}$, sodass $p_B(y) = b$. Sei $z = g_{j+1}(y)$. Aufgrund der Kommutativität von (2) ist dann $p_C(z) = p_C(g_{j+1}(y)) = g_j(p_B(y)) = g_j(b) = 0$, also folgt $z \in \ker p_C$. Da $h_{j+1} \circ g_{j+1} = 0$ folgt $h_{j+1}(z) = h_{j+1}(g_{j+1}(z)) = 0$. Da die untere Zeile exakt ist, existiert nun ein $\tilde{y} \in \ker p_B$, s.d. $g_{j+1}(\tilde{y}) = z$. Also ist $y - \tilde{y} \in \ker g_{j+1}$ und $p_B(y - \tilde{y}) = p_B(y) = b$. Setze $b_{j+1} := y - \tilde{y}$ und $b_j := b$. Dann konstruiere induktiv eine kompatible Familie $(b_i)_{i \geq j}$ mit $b_i \in \ker g_i$. Für $i < j$ setze wie oben $b_i := p_{B_{i+1}}(b_{i+1})$. Erneut liefert die Kommutativität von (2) ein kompatibles System $(b_i)_{i \in \mathbb{N}} \in \ker g$ mit $b_j = b$. $\square$

Lemma 3.13. *Die Klasse der exakten Komplexe in $\mathcal{K}(\mathcal{A}b)$ ist abgeschlossen unter speziellen inversen Limites.*

Beweis. Sei $(S_n^\bullet)_{n \in \mathbb{N}}$ ein spezielles inverses System in $\mathcal{K}(\mathcal{A}b)$. Für $i \in \mathbb{Z}$ erfüllt $(S_n^i)_{n \in \mathbb{N}}$ die Bedingung (R) aus 3.12. Sei also $i \in \mathbb{Z}$ beliebig. Dann erfüllt

$$(S_n^{i-1})_{n \in \mathbb{N}} \rightarrow (S_n^i)_{n \in \mathbb{N}} \rightarrow (S_n^{i+1})_{n \in \mathbb{N}} \rightarrow (S_n^{i+2})_{n \in \mathbb{N}}$$

die Bedingungen von 3.12, da nach Voraussetzung für alle $n > 1$ $\ker(S_n^\bullet \rightarrow S_{n-1}^\bullet)$ exakt ist. Also ist

$$\begin{array}{ccccc} \varprojlim S_n^{i-1} & \longrightarrow & \varprojlim S_n^i & \longrightarrow & \varprojlim S_n^{i+1} \\ \downarrow = & & \downarrow = & & \downarrow = \\ (\varprojlim S_n)^{i-1} & \longrightarrow & (\varprojlim S_n)^i & \longrightarrow & (\varprojlim S_n)^{i+1} \end{array}$$

exakt. Da $i \in \mathbb{Z}$ beliebig, folgt $\varprojlim S_n$ exakt. $\square$

Satz 3.14. *Sei $\mathcal{B}$ eine weitere abelsche Kategorie und $\mathcal{J} \subset \mathcal{K}(\mathcal{B})$ abgeschlossen unter speziellen inversen Limites. Angenommen inverse Limites existieren in $\mathcal{A}$ und sei $F: \mathcal{K}(\mathcal{A}) \rightarrow \mathcal{K}(\mathcal{B})$ ein kovarianter Funktor, der mit inversen Limites vertauscht und gradweise zerfallende kurze exakte Folgen erhält.*

Dann ist $F^{-1}(\mathcal{J}) \subset \mathcal{K}(\mathcal{A})$ abgeschlossen unter speziellen inversen Limites.

Beweis. Sei $(S_n^\bullet)_{n \in \mathbb{N}}$ ein $F^{-1}(\mathcal{J})$ -spezielles inverses System. Dann ist $(F(S_n^\bullet))_{n \in \mathbb{N}}$ ein $\mathcal{J}$ -spezielles System, denn

- (i) $F(S_1) = F(1) = 0$, da F mit inversen Limites vertauscht und die Null der Limes des leeren Diagramms ist.
- (ii) Für $n > 1$ ist nach Voraussetzung

$$0 \longrightarrow \ker p_n \longrightarrow S_n^\bullet \xrightarrow{p_n} S_{n-1}^\bullet \longrightarrow 0$$

exakt, zerfällt gradweise und $\ker p_n$ ist in $F^{-1}(\mathcal{J})$. Nach Voraussetzung ist damit

$$0 \longrightarrow F(\ker p_n) \longrightarrow F(S_n^\bullet) \xrightarrow{F(p_n)} F(S_{n-1}^\bullet) \longrightarrow 0$$

exakt und zerfällt gradweise. Aus der Exaktheit folgt damit auch $\ker F(p_n) = F(\ker p_n)$, also $\ker F(p_n) \in \mathcal{J}$.

Also $F(\varprojlim S_n^\bullet) = \varprojlim F(S_n^\bullet) \in \mathcal{J}$ und damit $\varprojlim S_n^\bullet \in F^{-1}(\mathcal{J})$. □

Korollar 3.15. *Sei $\mathcal{I}$ eine Klasse von Komplexen und angenommen in $\mathcal{A}$ existieren inverse Limites.*

Dann ist die Klasse aller Komplexe $A^\bullet \in \mathcal{K}$, sodass $\text{Hom}^\bullet(T^\bullet, A^\bullet)$ exakt ist für alle $T^\bullet \in \mathcal{I}$, abgeschlossen unter speziellen inversen Limites. Insbesondere ist die Klasse der K-injektiven Komplexe abgeschlossen unter speziellen inversen Limites.

Beweis. Sei $\mathcal{J}$ die Klasse der exakten Komplexe und für $T^\bullet \in \mathcal{I}$ sei $\mathcal{E}_{T^\bullet}$ die Klasse der Komplexe $A^\bullet$, sodass $\text{Hom}^\bullet(T^\bullet, A^\bullet)$ exakt ist. Dann ist $\mathcal{E}_{T^\bullet} = \text{Hom}^\bullet(T^\bullet, -)^{-1}(\mathcal{J})$. $\text{Hom}^\bullet(T^\bullet, -)$ erfüllt die Voraussetzungen von 3.14, denn:

- (i) Nach 3.13 ist $\mathcal{J}$ abgeschlossen unter speziellen inversen Limites.
- (ii) Wegen 2.30 ist $\text{Hom}^\bullet(T^\bullet, -)$ rechtsadjungiert und vertauscht daher mit Limites. Außerdem ist $\text{Hom}^\bullet(T^\bullet, -)$ gradweise additiv, erhält also gradweise zerfallende Folgen.

Also ist $\mathcal{E}_{T^\bullet}$ und damit $\bigcap_{T^\bullet \in \mathcal{I}} \mathcal{E}_{T^\bullet}$ abgeschlossen unter speziellen inversen Limites.

Das Insbesondere folgt wenn $\mathcal{I} = \mathcal{J}$ gesetzt wird. □

Wenn wir alle Pfeile umdrehen erhalten wir die folgende Definition und Ergebnisse:

Definition 3.16 (Spezielles direktes System). Sei $\mathcal{P} \subset \mathcal{K}$ eine Klasse von Komplexen.

- (a) Ein direktes System $(P_n^\bullet)_{n \in \mathbb{N}}$ in $\mathcal{K}$ heißt $\mathcal{P}$ -spezielles direktes System, falls folgende Bedingungen erfüllt sind:
 - (i) Falls $n = 1$, dann ist $P_n^\bullet = 0$.
 - (ii) Falls $n > 1$, dann sei $C_n^\bullet$ der Kokern der natürlichen Abbildung $P_{n-1}^\bullet \rightarrow P_n^\bullet$. Dann ist $C_n^\bullet \in \mathcal{P}$ und die kurze exakte Folge

$$0 \rightarrow P_{n-1}^\bullet \rightarrow P_n^\bullet \rightarrow C_n^\bullet \rightarrow 0$$

zerfällt stufenweise.

- (b) Die Klasse $\mathcal{P}$ heißt abgeschlossen unter speziellen direkten Colimites, falls jedes $\mathcal{P}$ -spezielle direkte System in $\mathcal{K}$ einen Colimes in $\mathcal{P}$ besitzt und jeder Komplex in $\mathcal{K}$, der isomorph ist zu einem Komplex in $\mathcal{P}$, bereits in $\mathcal{P}$ ist.

Durch Umdrehen aller Pfeile, erhalten wir auch eine duale Version von 3.10. Ebenfalls analog gilt:

Satz 3.17. *Sei $\mathcal{B}$ eine weitere abelsche Kategorie und $\mathcal{J} \subset \mathcal{K}(\mathcal{B})$ abgeschlossen unter speziellen inversen Limites. Angenommen direkte Colimites existieren in $\mathcal{A}$ und sei $F: \mathcal{K}(\mathcal{A}) \rightarrow \mathcal{K}(\mathcal{B})$ ein kontravarianter Funktor, der direkte Colimites in inverse Limites überführt und gradweise zerfallende kurze exakte Folgen erhält.*

Dann ist $F^{-1}(\mathcal{J}) \subset \mathcal{K}(\mathcal{A})$ abgeschlossen unter speziellen direkten Colimites.

Korollar 3.18. Sei $\mathcal{I}$ eine Klasse von Komplexen und angenommen in $\mathcal{A}$ existieren direkte Colimites.

Dann ist die Klasse aller Komplexe $A^\bullet \in \mathcal{K}$, sodass $\text{Hom}^\bullet(A^\bullet, T^\bullet)$ exakt ist für alle $T^\bullet \in \mathcal{I}$, abgeschlossen unter speziellen direkten Colimites. Insbesondere ist die Klasse der K-projektiven Komplexe abgeschlossen unter speziellen direkten Colimites.

Definition 3.19. Angenommen inverse (bzw. direkte) Limites existieren in $\mathcal{K}$ und sei $\mathcal{G}$ eine Klasse von Komplexen in $\mathcal{K}$. Dann nennen wir $\mathcal{G}$ (bzw. $\overleftarrow{\mathcal{G}}$) die kleinste Klasse von Komplexen in $\mathcal{K}$, die abgeschlossen unter speziellen inversen (bzw. direkten) Limites ist und $\mathcal{G}$ enthält.

3.3 Existenz von K-projektiven und K-injektiven Auflösungen

3.3.1 Linksaufösungen

Sei $\mathcal{P}$ eine Klasse von Komplexen in $\mathcal{K}$. Die folgenden Bedingungen an $\mathcal{P}$ sind äquivalent:

- (1) Jeder nach oben beschränkte Komplex $A^\bullet \in \mathcal{K}$ hat eine Auflösung $P^\bullet \rightarrow A^\bullet$ nach links mit $P^\bullet \in \mathcal{P}$ und $P^\bullet$ nach oben beschränkt.
- (2) Für alle $A^\bullet \in \mathcal{K}$ und $n \in \mathbb{Z}$, existiert ein $P^\bullet \in \mathcal{P}$ mit $H^i(P^\bullet) = 0$ für $i > n$ und ein Komplexhomomorphismus $f: P^\bullet \rightarrow A^\bullet$, der einen Isomorphismus $H^i(P^\bullet) \rightarrow H^i(A^\bullet)$ induziert für $i \leq n$.

Beweis. (1) $\implies$ (2): Sei $A^\bullet \in \mathcal{K}$ und $n \in \mathbb{Z}$. Dann ist $\tau_{\leq n} A^\bullet$ nach oben beschränkt, also existiert ein $P^\bullet \in \mathcal{P}$ und ein Quasiisomorphismus $s: P^\bullet \rightarrow \tau_{\leq n} A^\bullet$. Durch Komposition mit dem natürlichen Komplexhomomorphismus $\tau_{\leq n} A^\bullet \rightarrow A^\bullet$ erhalten wir ein $f: P^\bullet \rightarrow A^\bullet$. Für $i > n$ ist nun $H^i(P^\bullet) = H^i(\tau_{\leq n} A^\bullet) = 0$. Für $i \leq n$ ist $H^i(\tau_{\leq n} A^\bullet) = H^i(A^\bullet)$, also induziert f den gewünschten Isomorphismus.

(2) $\implies$ (1): Sei $A^\bullet \in \mathcal{K}^-$. Ohne Einschränkung ist $A^i = 0$ für alle $i > 0$. Dann existiert für $n = 0$ ein $f: P^\bullet \rightarrow A^\bullet$ mit $P^\bullet \in \mathcal{P}$ und f induziert $H^i(P^\bullet) \xrightarrow[0=H^i(f)]{\sim} 0 = H^i(A^\bullet)$ für $i > 0$ und $H^i(P^\bullet) \xrightarrow[\sim]{H^i(f)} H^i(A^\bullet)$ für $i \leq 0$. Also ist f ein Quasiisomorphismus. $\square$

Im Folgenden nehmen wir an, dass $\mathcal{P}$ die Eigenschaft (1) erfüllt.

Beispiel 3.20. Falls $\mathcal{A}$ genügend Projektive hat, können wir $\mathcal{P}$ als die Klasse der nach oben beschränkten Komplexe $P^\bullet \in \mathcal{K}$ mit P^i projektiv für alle $i \in \mathbb{Z}$ wählen.

Ein solches $P^\bullet$ ist K-projektiv, denn: Für alle eingradigen Komplexe $Q^\bullet$ mit Q^i projektiv für alle $i \in \mathbb{Z}$ ist $Q^\bullet$ nach 3.4 K-projektiv. Da nach 3.18 die Klasse der K-projektiven abgeschlossen unter speziellen direkten Colimites ist, folgt mit dem Dual von 3.10, dass $P^\bullet$ K-projektiv ist.

Erneut nach 3.18 sind die Komplexe in $\mathcal{P}$ damit ebenfalls K-projektiv.

Unser Ziel ist nun für einen gegebenen Komplex $A^\bullet$ eine Auflösung nach Links durch einen Komplex aus $\mathcal{P}$ zu konstruieren. Dazu schneiden wir den Komplex nach oben ab und lösen schrittweise auf. Das folgende Lemma führt diese Konstruktion aus.

Lemma 3.21. Sei $A^\bullet \in \mathcal{K}$. Dann existiert ein $\mathcal{P}$ -spezielles direktes System $(P_n^\bullet)_{n \geq -1}$ und ein direktes System von Kettenhomomorphismen $f_n: P_n^\bullet \rightarrow \tau_{\leq n} A^\bullet$, sodass f_n ein Quasiisomorphismus ist für alle $n \geq 0$.

Beweis. Wir gehen induktiv vor. Setze $P_{-1}^\bullet = 0$ und $f_{-1} = 0$. Nach (1) existiert ein Quasiisomorphismus $f_0: P_0^\bullet \rightarrow \tau_{\leq 0} A^\bullet$ mit $P_0^\bullet \in \mathcal{P}$.

Sei nun $n \geq 1$ und seien $P_{-1}^\bullet, \dots, P_{n-1}^\bullet$ und $f_{-1}, \dots, f_{n-1}$ konstruiert mit $P_i^\bullet \in \mathcal{K}^-$. Dann setze $P^\bullet = P_{n-1}^\bullet$, $B^\bullet = \tau_{\leq n} A^\bullet$. Es sei $a_{n-1}: \tau_{\leq n-1} A^\bullet \rightarrow \tau_{\leq n} A^\bullet$ der natürliche Komplexhomomorphismus und $f = a_{n-1} f_{n-1}: P^\bullet \rightarrow B^\bullet$. Es gilt dann

$$f d_P = d_B f \quad (3)$$

Da $B^\bullet = \tau_{\leq n} A^\bullet$ und $P^\bullet$ nach oben beschränkt sind und $C_f^i = P^{i+1} \oplus B^i$, existiert mit (1) ein Quasiisomorphismus $g: Q^\bullet \rightarrow C_f^\bullet[-1]$ mit $Q^\bullet[1] \in \mathcal{P}$ und $Q^\bullet$ nach oben beschränkt. Da gradweise $C_f^i[-1] = P^i \oplus B^{i-1}$ ist $g = (g_i)_{i \in \mathbb{Z}}$ ist g gradweise gegeben durch $g'_i: Q^i \rightarrow P^i$ und $g''_i: Q^i \rightarrow B^{i-1}$.

Betrachte für $i \in \mathbb{Z}$ das folgende kommutative Diagramm:

$$\begin{array}{ccccccc} \dots & \longrightarrow & Q^i & \xrightarrow{d_Q} & Q^{i+1} & \longrightarrow & \dots \\ & & \downarrow (g', g'') & & \downarrow (g', g'') & & \\ \dots & \longrightarrow & P^i \oplus B^{i-1} & \xrightarrow{d_{C_f[-1]}} & P^{i+1} \oplus B^i & \longrightarrow & \dots \end{array} \quad (4)$$

In Matrixnotation ist

$$d_{C_f} = \begin{pmatrix} d_P[1] & 0 \\ f[1] & d_B \end{pmatrix}$$

Also folgt

$$d_{C_f}[-1] = -d_{C_f} = \begin{pmatrix} -d_P[1] & 0 \\ -f[1] & -d_B \end{pmatrix}.$$

Auswerten von (4) in beiden Summanden liefert nun

$$d_P g' = g' d_Q \quad (5)$$

$$g'' d_Q = -f g' - d_B g''. \quad (6)$$

Aus (5) folgt, dass $g': Q^\bullet \rightarrow P^\bullet$ ein Komplexhomomorphismus ist. Setze nun $h: C_{-g'}^\bullet \rightarrow B^\bullet$ durch

$$h(x, y) = g''[1](x) + f(y).$$

Betrachte nun für $i \in \mathbb{Z}$ das folgende Diagramm:

$$\begin{array}{ccccccc} \dots & \longrightarrow & Q^{i+1} \oplus P^i & \xrightarrow{d_{C_{-g'}}} & Q^{i+2} \oplus P^{i+1} & \longrightarrow & \dots \\ & & \downarrow h & & \downarrow h & & \\ \dots & \longrightarrow & B^i & \xrightarrow{d_B} & B^{i+1} & \longrightarrow & \dots \end{array}.$$

In Matrixnotation ist

$$\begin{aligned} h d_{C_{-g'}} &= (g''[1] \quad f) \begin{pmatrix} d_Q[1] & 0 \\ -g'[1] & d_P \end{pmatrix} \\ &= (g''[1] d_Q[1] - f g'[1] \quad f d_P) \\ &\stackrel{(6)}{=} (d_B g'' \quad f d_P) \\ &\stackrel{(3)}{=} (d_B g'' \quad d_B f) \\ &= d_B h. \end{aligned}$$

Also ist h Komplexhomomorphismus. Bleibt zu zeigen, dass h ein Quasiisomorphismus ist. Dafür genügt es nach 2.10 zu zeigen, dass $C_h^\bullet$ exakt ist. Behauptung: $C_h^\bullet = C_{-g}^\bullet[1]$.

Es ist gradweise für $i \in \mathbb{Z}$

$$C_h^i = C_{-g}^{i+1} \oplus B^i = (Q^{i+2} \oplus P^{i+1}) \oplus B^i = Q^{i+2} \oplus (P^{i+1} \oplus B^i) = Q^{i+2} \oplus C_f^i = C_{-g}^i[1].$$

Für die Differentiale gilt, wieder in Matrixnotation:

$$d_{C_h} = \begin{pmatrix} d_{C_{-g'}[1]} & 0 \\ h[1] & d_B \end{pmatrix} [1] = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} d_Q[1] & 0 \\ -g'[1] & d_P \end{pmatrix} [1] & 0 \\ (g''[1] & f) [1] & d_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -d_Q & 0 & 0 \\ g' & -d_P & 0 \\ g'' & f & d_B \end{pmatrix}.$$

Analog folgt

$$d_{C_{-g}[1]} = \begin{pmatrix} d_Q[1] & 0 \\ -g & d_{C_f[-1]} \end{pmatrix} [1] = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} d_Q[1] & 0 \\ -g' & d_P \end{pmatrix} [1] & \begin{pmatrix} d_P[1] & 0 \\ f[1] & d_B \end{pmatrix} [-1] \\ \begin{pmatrix} -g'' & f \end{pmatrix} [1] & d_B \end{pmatrix} [1] = \begin{pmatrix} -d_Q & 0 & 0 \\ g' & -d_P & 0 \\ g'' & f & d_B \end{pmatrix}.$$

Also folgt die Behauptung. Da g und demnach $-g$ ein Quasiisomorphismus ist und Verschieben Exaktheit erhält, folgt damit mit 2.10 die Exaktheit von $C_{-g}^\bullet[1]$.

Setze nun $P_n^\bullet := C_{-g'}^\bullet$ und $f_n := h$. Da nach Voraussetzung $P^\bullet$ und $Q^\bullet$ nach oben beschränkt sind, ist auch $C_{-g'}^\bullet$ nach oben beschränkt.

Sei $p_{n-1}: P_{n-1}^\bullet = P^\bullet \rightarrow P_n^\bullet$ die natürliche Abbildung. Dann ist p_{n-1} gradweise gegeben durch die natürliche Inklusion $P^i \rightarrow Q^{i+1} \oplus P^i$. Also folgt $\text{coker } p_{n-1} = Q^\bullet[1] \in \mathcal{P}$ und wir haben gradweise zerfallende exakte Folgen:

$$0 \longrightarrow P^i \xrightarrow{p_{n-1}} Q^{i+1} \oplus P^i \longrightarrow Q^{i+1} \longrightarrow 0.$$

Also ist $(P_n^\bullet)_{n \geq -1}$ ein $\mathcal{P}$ -spezielles direktes System. Außerdem ist nach Definition von h : $f_n p_{n-1} = h p_{n-1} = f = a_{n-1} f_{n-1}$, also kommutiert

$$\begin{array}{ccc} P_{n-1}^\bullet & \xrightarrow{p_{n-1}} & P_n^\bullet \\ \downarrow f_{n-1} & & \downarrow f_n = h \\ \tau_{\leq n-1} A^\bullet & \xrightarrow{a_{n-1}} & \tau_{\leq n} A^\bullet \end{array}$$

und $(f_n)_{n \geq -1}$ ist ein direktes System. □

Dieses Lemma können wir nun anwenden, um das zentrale Ergebnis zu zeigen:

Satz 3.22. *Angenommen direkte Colimites existieren in $\mathcal{A}$ und $\text{colim} \xrightarrow{\quad}$ ist exakt.*

Dann hat jeder Komplex in $\mathcal{K}$ eine $\mathcal{P}$ -Linksauflösung.

Beweis. Sei $A^\bullet \in \mathcal{K}$ und $(P_n^\bullet)_{n \geq -1}, (f_n)_{n \geq -1}$ wie in 3.21. Da direkte Colimites in $\mathcal{A}$ existieren und sich diese in $\mathcal{K}$ gradweise bilden, existieren direkte Colimites in $\mathcal{K}$. Nach der Definition von $\mathcal{P}$ ist dann $P^\bullet := \text{colim}_{\rightarrow} P_n^\bullet$ in $\mathcal{P}$.

Wir erhalten ebenfalls

$$f := \text{colim}_{\rightarrow} f_n: P^\bullet \longrightarrow \text{colim}_{\rightarrow} \tau_{\leq n} A^\bullet = A^\bullet.$$

Da $\text{colim}_{\rightarrow}$ exakt, folgt für $i \in \mathbb{Z}$:

$$H^i(f) = H^i(\text{colim}_{\rightarrow} f_n) = \text{colim}_{\rightarrow} \underbrace{H^i(f_n)}_{\text{Isomorphismus}}.$$

Also ist f ein Quasiisomorphismus. □

Korollar 3.23. Angenommen direkte Colimites existieren in $\mathcal{A}$ und $\varinjlim$ ist exakt.

Dann hat jeder Komplex in $\mathcal{K}$ eine K -projektive Linksauflösung.

Beweis. Wähle $\mathcal{P}$ wie in Beispiel 3.20 und wende 3.22 an. $\square$

3.3.2 Rechtsauflösungen

Sei $\mathcal{J}$ eine Klasse von Komplexen in $\mathcal{K}$. Im Folgenden nehmen wir an, dass $\mathcal{J}$ die folgende Eigenschaft erfüllt:

- (1) Jeder nach unten beschränkte Komplex $A^\bullet \in \mathcal{K}$ hat eine Auflösung $A^\bullet \rightarrow I^\bullet$ nach rechts mit $I^\bullet \in \mathcal{J}$ und $I^\bullet$ nach unten beschränkt.

Beispiel 3.24. Falls $\mathcal{A}$ genügend Injektive hat, können wir dual zu Beispiel 3.20 $\mathcal{J}$ als die Klasse der nach unten beschränkten Komplexe mit in $\mathcal{A}$ injektiven Objekten wählen.

Durch Umdrehen der Pfeile erhalten wir die duale Aussagen von 3.21 und 3.22:

Lemma 3.25. Sei $A^\bullet \in \mathcal{K}$. Dann existiert ein $\mathcal{J}$ -spezielles inverses System $(I_n^\bullet)_{n \geq -1}$ und ein inverses System von Kettenhomomorphismen $f_n: \tau^{\geq -n} A^\bullet \rightarrow I_n^\bullet$, sodass f_n ein Quasiisomorphismus ist.

Satz 3.26. Angenommen inverse Limites existieren in $\mathcal{A}$ und $\varprojlim$ ist exakt.

Dann hat jeder Komplex in $\mathcal{K}$ eine $\mathcal{P}$ -Rechtsauflösung.

Bemerkung 3.27. Leider findet 3.26 in $\mathcal{A} = R\text{-Mod}$ für R ein Ring keine Anwendung, da hier $\varprojlim$ nicht exakt ist.

Diese Voraussetzung wird jedoch nur verwendet, um zu zeigen, dass $f = \varprojlim f_n: A^\bullet \rightarrow \varprojlim I_n^\bullet$ ein Quasiisomorphismus ist. Wir können uns der speziellen Struktur des inversen Systems $(I_n^\bullet)_{n \geq -1}$ bedienen, um für $\mathcal{A} = R\text{-Mod}$ zu zeigen, dass f dennoch ein Quasiisomorphismus ist.

Satz 3.28. Sei R ein Ring und $\mathcal{A}$ die Kategorie der R -links-Moduln. Dann hat jeder Komplex in $\mathcal{K}$ eine K -injektive Rechtsauflösung.

Beweis. Seien $(I_n^\bullet)_{n \geq -1}$ und $(f_n)_{n \geq -1}$ wie in 3.25. Seien $I^\bullet = \varprojlim I_n^\bullet$ und $f = \varprojlim f_n$. Es genügt zu zeigen, dass f ein Quasiisomorphismus ist.

Sei $i \in \mathbb{Z}$ beliebig. Für $n > 1$ haben wir folgendes kommutative Diagramm:

$$\begin{array}{ccccc} I^\bullet & \longrightarrow & I_n^\bullet & \xrightarrow{p_n} & I_{n-1}^\bullet \\ \downarrow f & & \downarrow f_n & & \downarrow f_{n-1} \\ A^\bullet & \longrightarrow & \tau^{\geq -n} A^\bullet & \longrightarrow & \tau^{\geq -(n-1)} A^\bullet \end{array}$$

Wende nun $H^i(-)$ auf dieses Diagramm an:

$$\begin{array}{ccccc} H^i(I^\bullet) & \longrightarrow & H^i(I_n^\bullet) & \xrightarrow{H^i(p_n)} & H^i(I_{n-1}^\bullet) \\ \downarrow H^i(f) & & \sim \downarrow H^i(f_n) & & \sim \downarrow H^i(f_{n-1}) \\ H^i(A^\bullet) & \longrightarrow & H^i(\tau^{\geq -n} A^\bullet) & \longrightarrow & H^i(\tau^{\geq -(n-1)} A^\bullet) \end{array} \quad (7)$$

Die rechten beiden vertikalen Pfeile sind Isomorphismen, da f_k ein Quasiisomorphismus ist für alle $k \geq -1$.

Sei nun $n \geq -i+1$. Dann ist $i \geq -n+1 \geq -n$, also ist $H^i(A^\bullet) = H^i(\tau^{\geq -n} A^\bullet) = H^i(\tau^{\geq -(n-1)} A^\bullet)$. Also sind die Abbildungen in der unteren Zeile in (7) Isomorphismen und damit ist $H^i(p_n): H^i(I_n^\bullet) \rightarrow H^i(I_{n-1}^\bullet)$ ein Isomorphismus.

Betrachte nun die kurze exakte Folge

$$0 \longrightarrow \ker p_n \longrightarrow I_n^\bullet \xrightarrow{p_n} I_{n-1}^\bullet \longrightarrow 0 .$$

Das liefert eine lange exakte Kohomologiefolge:

$$H^{i-1}(I_n^\bullet) \xrightarrow{H^{i-1}(p_n)} H^{i-1}(I_{n-1}^\bullet) \longrightarrow H^i(\ker p_n) \longrightarrow H^i(I_n^\bullet) \xrightarrow{H^i(p_n)} H^i(I_{n-1}^\bullet) \quad (8)$$

Anwenden des obigen Arguments auf $i-1$ liefert für $n \geq -(i-1)+1 = -i+2 \geq -i+1$ Isomorphismen $H^i(p_n)$ und $H^{i-1}(p_n)$. Aufgrund der Exaktheit von (8) folgt, dass $H^i(\ker p_n) = 0$ für alle $n \geq -i+2$.

Sei nun $m \in \mathbb{Z}$ beliebig. Dann setze $N := -m+1$. Dann ist für alle $n > N$:

$$H^m(\ker p_n) = 0 = H^{m+1}(\ker p_n).$$

Also ist die Folge

$$\ker p_n^{m-1} \longrightarrow \ker p_n^m \longrightarrow \ker p_n^{m+1} \longrightarrow \ker p_n^{m+2} \quad (9)$$

für $n > N$ exakt. Das System

$$(I_n^{m-1})_{n \geq -1} \longrightarrow (I_n^m)_{n \geq -1} \longrightarrow (I_n^{m+1})_{n \geq -1} \longrightarrow (I_n^{m+2})_{n \geq -1}$$

erfüllt damit die Bedingungen von 3.12. Also ist die natürliche Abbildung

$$H^m(I^\bullet) \longrightarrow H^m(I_N^\bullet)$$

ein Isomorphismus. Erneute Betrachtung von (7) für $i = m$ und $n = N$ liefert nun, dass $H^i(f)$ ein Isomorphismus ist. $\square$

4 Adjunktion von abgeleitetem Hom und Tensorprodukt

Sei A ein kommutativer Ring und im Folgenden $\mathcal{A}$ die Kategorie der A -Moduln.

4.1 K-flache Komplexe

Um das Tensorprodukt abzuleiten, benötigen wir noch eine weitere Klasse von Komplexen.

Definition 4.1 (K-flacher Komplex). Ein Komplex $M^\bullet \in \mathcal{K}$ heißt K-flach, wenn für jeden exakten Komplex $S^\bullet \in \mathcal{K}$ auch $M^\bullet \otimes_A S^\bullet$ exakt ist.

Satz 4.2. Sei $M^\bullet \in \mathcal{K}$ mit $M^i = 0$ für $i \neq 0$. Dann ist $M^\bullet$ genau dann K-flach, wenn M^0 flacher A -Modul ist.

Beweis. Sei $M^\bullet \in \mathcal{K}$ wie im Satz. Dann ist für $S^\bullet \in \mathcal{K}$ und $n \in \mathbb{Z}$:

$$(M^\bullet \otimes_A S^\bullet)^n = \bigoplus_{i+j=n} M^i \otimes_A S^j = M^0 \otimes S^n = (M^0 \otimes S^\bullet)^n$$

und für $m \in M^0$, $s \in S^n$:

$$d_{M^\bullet \otimes_A S^\bullet}^n(m \otimes s) = \underbrace{d_M^0(m)}_{=0} \otimes_A s + (-1)^0 m \otimes_A d_S(s) = m \otimes_A d_S(s) = d_{M^0 \otimes_A S^\bullet}.$$

Also ist $M^\bullet \otimes_A S^\bullet = M^0 \otimes_A S^\bullet$. Damit folgt die Behauptung aus den Definitionen. $\square$

Im Folgenden benötigen wir folgendes Kriterium für die Exaktheit von Komplexen:

Lemma 4.3. Sei $A^\bullet \in \mathcal{K}$. Angenommen für jeden K-injektiven Komplex $I^\bullet \in \mathcal{K}$ ist $\text{Hom}^\bullet(A^\bullet, I^\bullet)$ exakt. Dann ist $A^\bullet$ exakt.

Beweis. Sei $B^\bullet \in \mathcal{K}$ beliebig. Dann existiert nach 3.28 ein K-injektiver Komplex $I^\bullet \in \mathcal{K}$ und ein Quasiisomorphismus $B^\bullet \rightarrow I^\bullet$. Dann gilt $B^\bullet \cong I^\bullet$ in $\mathcal{D}$ und wir erhalten

$$\text{Mor}_{\mathcal{D}}(A^\bullet, B^\bullet) \cong \text{Mor}_{\mathcal{D}}(A^\bullet, I^\bullet) \stackrel{3.8}{=} \text{Mor}_{\mathcal{K}}(A^\bullet, I^\bullet) = 0.$$

Mit Yoneda folgt nun, dass $A^\bullet \cong 0$ in $\mathcal{D}$. Da per Definition $H^i(-): \mathcal{K} \rightarrow \mathcal{A}b$ über den kanonischen Funktor $Q: \mathcal{K} \rightarrow \mathcal{D}$ faktorisiert, folgt $H^i(A^\bullet) = 0$ für $i \in \mathbb{Z}$, also $A^\bullet$ exakt. $\square$

Satz 4.4. Sei $M^\bullet \in \mathcal{K}$. Dann sind äquivalent:

- (i) $M^\bullet$ ist K-flach.
- (ii) $\text{Hom}^\bullet(M^\bullet, I^\bullet)$ ist K-injektiv für jeden K-injektiven Komplex $I^\bullet \in \mathcal{K}$.

Beweis. (i) $\implies$ (ii): Sei $I^\bullet$ K-injektiv und $S^\bullet$ exakt. Dann ist

$$\text{Hom}^\bullet(S^\bullet, \text{Hom}^\bullet(M^\bullet, I^\bullet)) \stackrel{2.30}{=} \text{Hom}^\bullet(\underbrace{S^\bullet \otimes_A M^\bullet}_{\text{exakt}}, \underbrace{I^\bullet}_{\text{K-injektiv}}).$$

Weil $M^\bullet$ K-flach ist, folgt $S^\bullet \otimes_A M^\bullet$ exakt, also wegen $I^\bullet$ K-injektiv, die Behauptung.

(ii) $\implies$ (i): Sei $S^\bullet$ azyklisch. A -Mod hat genügend Injektive, also genügt es wegen 4.3 zu zeigen, dass für jeden injektiven A -Modul I , $\text{Hom}^\bullet(S^\bullet \otimes_A M^\bullet, I)$ exakt ist. Dazu sei I injektiver A -Modul und $I^\bullet = [\cdots \rightarrow 0 \rightarrow I \rightarrow 0 \cdots]$. Dann ist nach 3.4 $I^\bullet$ K-injektiv und damit

$$\text{Hom}^\bullet(S^\bullet \otimes_A M^\bullet, I) = \text{Hom}^\bullet(S^\bullet \otimes_A M^\bullet, I^\bullet) \stackrel{2.30}{=} \text{Hom}^\bullet(\underbrace{S^\bullet}_{\text{exakt}}, \underbrace{\text{Hom}^\bullet(M^\bullet, I^\bullet)}_{\text{K-injektiv}})$$

exakt. $\square$

Satz 4.5. (a) Falls $M^\bullet, N^\bullet \in \mathcal{K}$ K-flach sind, dann ist auch $A^\bullet \otimes_A B^\bullet$ K-flach.

(b) $M^\bullet \in \mathcal{K}$ ist K-flach genau dann wenn $M^\bullet[1]$ K-flach ist.

(c) Falls zwei Punkte eines ausgezeichneten Dreiecks in $\mathcal{K}$ K-flach sind, dann auch der dritte.

Insbesondere ist die volle Unterkategorie der K-flachen Komplexe in $\mathcal{K}$ eine triangulierte Unterkategorie.

Beweis. (a) Seien $M^\bullet, N^\bullet \in \mathcal{K}$ K-flach und $S^\bullet$ exakt. Dann ist

$$(M^\bullet \otimes_A N^\bullet) \otimes S^\bullet = M^\bullet \otimes_A (N^\bullet \otimes_A S^\bullet)$$

und die rechte Seite ist exakt.

(b) Seien $S^\bullet, M^\bullet \in \mathcal{K}$. Dann sind $-\otimes_A S^\bullet$ und $M^\bullet \otimes_A -$ nach 2.29 ein triangulierter Funktor, also folgt

$$M^\bullet[1] \otimes_A S^\bullet = (M^\bullet \otimes_A S^\bullet)[1] = M^\bullet \otimes_A S^\bullet[1].$$

Da Verschieben Exaktheit erhält folgt daraus die Äquivalenz.

(c) Sei $(M^\bullet, N^\bullet, P^\bullet, u, v, w)$ ein ausgezeichnetes Dreieck in $\mathcal{K}$ mit $M^\bullet$ und $N^\bullet$ K-flach. Sei weiter $S^\bullet$ exakt. Da $-\otimes_A S^\bullet$ nach 2.29 ein triangulierter Funktor ist, erhalten wir das ausgezeichnete Dreieck $(M^\bullet \otimes_A S^\bullet, N^\bullet \otimes_A S^\bullet, P^\bullet \otimes_A S^\bullet, u \otimes \text{id}_{S^\bullet}, v \otimes \text{id}_{S^\bullet}, w \otimes \text{id}_{S^\bullet})$ und damit für $i \in \mathbb{Z}$ die exakte Folge

$$H^i(N^\bullet \otimes_A S^\bullet) \longrightarrow H^i(P^\bullet \otimes_A S^\bullet) \longrightarrow H^{i+1}(M^\bullet \otimes_A S^\bullet).$$

Da die äußeren Terme nach Voraussetzung 0 sind, folgt die Exaktheit von $P^\bullet \otimes_A S^\bullet$ und damit, dass $P^\bullet$ K-flach ist. Der allgemeine Fall folgt nun mit 2.1. $\square$

Satz 4.6. Sei $M^\bullet \in \mathcal{K}$ K-projektiv. Dann ist $M^\bullet$ K-flach.

Beweis. Sei $M^\bullet$ K-projektiv und $S^\bullet$ exakt. Sei weiter $I^\bullet$ K-injektiv. Dann folgt

$$\text{Hom}^\bullet(M^\bullet \otimes_A S^\bullet, I^\bullet) \stackrel{2.30}{=} \text{Hom}^\bullet(M^\bullet, \text{Hom}^\bullet(S^\bullet, I^\bullet)).$$

Es ist $\text{Hom}^\bullet(S^\bullet, I^\bullet)$ exakt, da $I^\bullet$ K-injektiv und damit die rechte Seite, da $M^\bullet$ K-projektiv ist. Also folgt die Behauptung mit 4.3. $\square$

Satz 4.7. Sei $M^\bullet \in \mathcal{K}$ K-flach und exakt. Dann ist $M^\bullet \otimes_A N^\bullet$ exakt für alle $N^\bullet \in \mathcal{K}$.

Beweis. Sei $M^\bullet \in \mathcal{K}$ K-flach und exakt und sei $N^\bullet \in \mathcal{K}$ beliebig. Dann existiert nach 3.23 ein $P^\bullet \in \mathcal{K}$ K-projektiv und ein Quasiisomorphismus $P^\bullet \rightarrow N^\bullet$. Da $M^\bullet$ K-flach, ist $M^\bullet \otimes_A -$ ein exakter Funktor also folgt

$$H^i(M^\bullet \otimes_A N^\bullet) = M^\bullet \otimes_A H^i(N^\bullet) = M^\bullet \otimes_A H^i(P^\bullet) = H^i(M^\bullet \otimes_A P^\bullet). \quad (10)$$

Wegen 4.6 ist $P^\bullet$ K-flach, also folgt mit der Exaktheit von $M^\bullet$, dass $M^\bullet \otimes_A P^\bullet$ exakt ist. Damit folgt die Behauptung aus (10). $\square$

Satz 4.8. Sei $I^\bullet \in \mathcal{K}$ K -injektiv und exakt. Dann ist $\text{Hom}^\bullet(M^\bullet, I^\bullet)$ exakt für alle $M^\bullet \in \mathcal{K}$.

Beweis. Sei $M^\bullet \in \mathcal{K}$ beliebig. Dann existiert nach 3.23 ein $P^\bullet \in \mathcal{K}$ K -projektiv und ein Quasiisomorphismus $P^\bullet \rightarrow M^\bullet$. Da $I^\bullet$ K -injektiv, ist $\text{Hom}^\bullet(-, I^\bullet)$ ein exakter Funktor, also folgt

$$H^i(\text{Hom}^\bullet(M^\bullet, I^\bullet)) = \text{Hom}^\bullet(H^i(M^\bullet), I^\bullet) = \text{Hom}^\bullet(H^i(P^\bullet), I^\bullet) = H^i(\text{Hom}^\bullet(P^\bullet, I^\bullet)). \quad (11)$$

Da $P^\bullet$ K -projektiv und $I^\bullet$ exakt, folgt die Exaktheit der rechten Seite und damit die Behauptung. $\square$

Umdrehen der Pfeile liefert

Satz 4.9. Sei $P^\bullet \in \mathcal{K}$ K -projektiv und exakt. Dann ist $\text{Hom}^\bullet(P^\bullet, M^\bullet)$ exakt für alle $M^\bullet \in \mathcal{K}$.

4.2 Abgeleitete Hom[•] Funktoren

Satz 4.10. Seien $M^\bullet, N^\bullet \in \mathcal{D}$. Dann ist $\text{RHom}^\bullet(M^\bullet, N^\bullet)$ wohldefiniert und kann mithilfe einer K -projektiven Auflösung von $M^\bullet$ oder einer K -injektiven Auflösung von $N^\bullet$ berechnet werden.

Beweis. In der Notation von 2.24 wähle $\mathcal{L}$ als die volle Unterkategorie der K -injektiven Komplexe von $\mathcal{K}$. Dann ist für $M^\bullet$ beliebig:

- (i) $\mathcal{L}$ ist trianguliert nach 3.5.
- (ii) Für alle $N^\bullet \in \mathcal{K}$ existiert ein Quasiisomorphismus $N^\bullet \rightarrow I^\bullet$ wegen 3.28 mit $I^\bullet \in \mathcal{L}$.
- (iii) Nach 4.8 ist $\text{Hom}^\bullet(M^\bullet, -)|_{\mathcal{L}}$ exakt.

Also existiert $\text{RHom}^\bullet(M^\bullet, -)$. Analog berechnet sich $\text{RHom}^\bullet(-, N^\bullet)$ für $N^\bullet \in \mathcal{K}$ unter Wahl von $\mathcal{L}$ als die volle Unterkategorie der K -projektiven Komplexe von $\mathcal{K}$. Beide Ableitungen stimmen überein, denn für $M^\bullet, N^\bullet \in \mathcal{K}$ beliebig und $P^\bullet \rightarrow M^\bullet$ und $N^\bullet \rightarrow I^\bullet$ K -projektive bzw. K -injektive Auflösungen gilt mit wiederholter Anwendung von 2.24 und wegen $P^\bullet \cong M^\bullet$ und $N^\bullet \cong I^\bullet$ in $\mathcal{D}$:

$$\begin{aligned} \text{RHom}^\bullet(M^\bullet, -)(N^\bullet) &= \text{RHom}^\bullet(P^\bullet, -)(I^\bullet) \\ &= \text{Hom}^\bullet(P^\bullet, I^\bullet) \\ &= \text{RHom}^\bullet(-, I^\bullet)(P^\bullet) \\ &= \text{RHom}^\bullet(-, N^\bullet)(M^\bullet). \end{aligned}$$

$\square$

4.3 Abgeleitetes Tensorprodukt

Satz 4.11. *Seien $M^\bullet, N^\bullet \in \mathcal{D}$. Dann ist $M^\bullet \otimes_A^L N^\bullet$ wohldefiniert und kann mithilfe einer K-flachen Auflösung einer der Faktoren berechnet werden.*

Beweis. Erneut in der Notation von 2.24 wähle $\mathcal{L}$ als die volle Unterkategorie der K-flachen Komplexe von $\mathcal{K}$. Dann ist für $N^\bullet$ beliebig:

- (i) $\mathcal{L}$ ist trianguliert nach 4.5.
- (ii) Für alle $M^\bullet \in \mathcal{K}$ existiert nach 3.23 und 4.6 ein Quasiisomorphismus $P^\bullet \rightarrow M^\bullet$ mit $P^\bullet \in \mathcal{L}$.
- (iii) Nach 4.7 ist $N^\bullet \otimes_A -|_{\mathcal{L}}$ exakt.

Also existiert $N^\bullet \otimes_A^L -$ und analog für $- \otimes_A^L N^\bullet$. □

4.4 Adjunktion

Jetzt können wir alles zusammentragen und erhalten:

Satz 4.12. *Seien $M^\bullet, N^\bullet, P^\bullet \in \mathcal{D}$. Dann existiert ein natürlicher Isomorphismus, der funktoriell in allen Variablen ist:*

$$RHom^\bullet(M^\bullet \otimes_A^L N^\bullet, P^\bullet) = RHom^\bullet(M^\bullet, RHom^\bullet(N^\bullet, P^\bullet)).$$

Beweis. Nach 4.10 und 4.11 sind alle Terme wohldefiniert und wir können mit 3.23 und 4.6 ohne Einschränkung annehmen, dass $N^\bullet$ K-flach ist, und mit 3.28, dass $P^\bullet$ K-injektiv ist.

Dann folgt

$$\begin{aligned} RHom^\bullet(M^\bullet \otimes_A^L N^\bullet, P^\bullet) &= RHom^\bullet(M^\bullet \otimes_A N^\bullet, P^\bullet) \\ &= Hom^\bullet(M^\bullet \otimes_A N^\bullet, P^\bullet) \\ &\stackrel{2.30}{=} Hom^\bullet(M^\bullet, Hom^\bullet(N^\bullet, P^\bullet)) \\ &= RHom^\bullet(M^\bullet, Hom^\bullet(N^\bullet, P^\bullet)) \\ &= RHom^\bullet(M^\bullet, RHom^\bullet(N^\bullet, P^\bullet)). \end{aligned}$$

Das letzte Gleichheitszeichen gilt, weil nach 4.4 $Hom^\bullet(N^\bullet, P^\bullet)$ K-injektiv ist. □

Korollar 4.13. *Seien $M^\bullet, N^\bullet, P^\bullet \in \mathcal{D}$. Dann existiert ein natürlicher Isomorphismus, der funktoriell in allen Variablen ist:*

$$Mor_{\mathcal{D}}(M^\bullet \otimes_A^L N^\bullet, P^\bullet) = Mor_{\mathcal{D}}(M^\bullet, RHom^\bullet(N^\bullet, P^\bullet)).$$

Insbesondere gilt folgende Funktoradjunktion in $\mathcal{D}$:

$$- \otimes_A^L N \dashv RHom^\bullet(N^\bullet, -).$$

Beweis. Wir können wieder annehmen, dass $N^\bullet$ K-flach und $P^\bullet$ K-injektiv ist. Dann betrachte:

$$\begin{aligned}
 \mathrm{Mor}_{\mathcal{D}}(M^\bullet \otimes_A^{\mathrm{L}} N^\bullet, P^\bullet) &\stackrel{3.8}{=} \mathrm{Mor}_{\mathcal{K}}(M^\bullet \otimes_A^{\mathrm{L}} N^\bullet, P^\bullet) \\
 &\stackrel{2.28}{=} H^0 \mathrm{Hom}^\bullet(M^\bullet \otimes_A^{\mathrm{L}} N^\bullet, P^\bullet) \\
 &= H^0 \mathrm{Hom}^\bullet(M^\bullet \otimes_A N^\bullet, P^\bullet) \\
 &\stackrel{2.30}{=} H^0 \mathrm{Hom}^\bullet(M^\bullet, \mathrm{Hom}^\bullet(N^\bullet, P^\bullet)) \\
 &\stackrel{2.28}{=} \mathrm{Mor}_{\mathcal{K}}(M^\bullet, \mathrm{Hom}^\bullet(N^\bullet, P^\bullet)) \\
 &\stackrel{3.8}{=} \mathrm{Mor}_{\mathcal{D}}(M^\bullet, \mathrm{Hom}^\bullet(N^\bullet, P^\bullet)) \\
 &= \mathrm{Mor}_{\mathcal{D}}(M^\bullet, \mathrm{RHom}^\bullet(N^\bullet, P^\bullet)).
 \end{aligned}$$

Das letzte Gleichheitszeichen gilt erneut, weil nach 4.4 $\mathrm{Hom}^\bullet(N^\bullet, P^\bullet)$ K-injektiv ist. $\square$