

Handbuch: Rechnen in Abelschen Kategorien

Long Huynh Huu

Inhaltsverzeichnis

1	Produkte und Coprodukte	1
1.1	Für allgemeine Kategorien	1
1.2	In Abelschen Kategorien	1
1.3	Fork, Join, Parallel	2
2	Faserprodukte (und Fasersummen)	2
3	Kerne, Cokerne, Bilder und Cobilder	3
3.1	Kerne (und Cokerne)	3
3.2	Bilder (und Cobilder)	4
4	2-Komplexe	5
5	Rolands Vierzehn	6

1. Produkte und Coprodukte

1.1. Für allgemeine Kategorien

Anders als im Titel erwähnt werde ich in diesem Abschnitt keine Coprodukte erwähnen – es gelten einfach die dualen Aussagen.

Sei \mathcal{C} eine Kategorie, $(Y_i)_{i \in I}$ eine Familie von Objekten und es existiere ein Produkt $\prod_i Y_i := \prod_{i \in I} Y_i$ mit Projektionen $\pi_j : \prod_i Y_i \rightarrow Y_j$.

Proposition 1.1. *Die Projektionen sind Epis.*

Sei $X \in \mathcal{C}$ und $f_i : X \rightarrow Y_i$ Pfeile. Nach der UniE des Produktes wird ein eindeutiger Pfeil $X \rightarrow \prod_i Y_i$ induziert, den ich mit $\text{fork}_i f_i$ bezeichne, sodass für alle $i \in I$ gilt: $f_i = \pi_j \cdot \text{fork}_i f_i$. Alternativ kann man auch $\text{fork}(f_1, \dots, f_n)$ schreiben.

Im Falle von Coprodukten schreibt man $\text{join}_i f_i$ bzw. $\text{join}(f_1, \dots, f_n)$.

Proposition 1.2. *Sei $u : W \rightarrow X$ ein Pfeil. Dann gilt $(\prod_i f_i) \cdot u = \prod (f_i \cdot u) : W \rightarrow \prod_i Y_i$.*

1.2. In Abelschen Kategorien

Sei nun \mathcal{A} eine abelsche Kategorie, X, X_1, \dots, X_n sowie Y, Y_1, \dots, Y_n Objekte und $f_i : X_i \rightarrow Y_i$ (für $i = 1, \dots, n$) Pfeile. Für die direkten Summen $\bigoplus_i X_i$ bzw. $\bigoplus_i Y_i$ bezeichne die Inklusionen und Projektionen mit $\iota_j^X : X_j \rightarrow \bigoplus_i X_i$ und $\pi_j^X : \bigoplus_i X_i \rightarrow X_j$ bzw. $\iota_j^Y : Y_j \rightarrow \bigoplus_i Y_i$ und $\pi_j^Y : \bigoplus_i Y_i \rightarrow Y_j$.

Proposition 1.3. *Die f_i induzieren eindeutig einen Pfeil $\text{par}_i f_i : \bigoplus_i X_i \rightarrow \bigoplus_i Y_i$ mit $f_j = \pi_j^Y \cdot \text{par}_i f_i \cdot \iota_j^X$ für alle j .*

Proposition 1.4. *Sind die f_i Monos, Epis oder Isos, so entsprechend auch $\text{par}_i f_i$.*

1.3. Fork, Join, Parallel

Fork, Join und Par(allel) von Pfeilen hängen wie folgt zusammen:

Proposition 1.5. *Seien mit $f_i : V \rightarrow W_i, g_i : W_i \rightarrow X_i, h_i : X_i \rightarrow Y_i, k : Y_i \rightarrow Z$ für $i = 1, \dots, n$ Pfeile bezeichnet. Es gelten*

1. $\text{fork}(g_1.f_1, \dots) = \text{par}(g_1, \dots).\text{fork}(f_1, \dots)$
2. $\text{par}(h_1.g_1, \dots) = \text{par}(h_1, \dots).\text{par}(g_1, \dots)$
3. $\text{join}(k_1.h_1, \dots) = \text{join}(k_1, \dots).\text{par}(h_1, \dots)$

2. Faserprodukte (und Fasersummen)

Ein wenig Notation: Ich bezeichne für Pfeile $f : X \rightarrow Z, g : Y \rightarrow Z$ die Projektionen des Faserprodukts als $\text{fib}_1(f, g) : X \times_Z Y \rightarrow X$ und $\text{fib}_2(f, g) : X \times_Z Y \rightarrow Y$. Weiter definiere $\text{fib}(f, g) := f.\text{fib}_1(f, g) = g.\text{fib}_2(f, g)$. Es kommutieren also notwendigerweise die Argumente $\text{fib}(f, g) = \text{fib}(g, f)$. Für Fasersummen ersetze ich fib durch cofib . Um etwas mit dieser Notation vertraut zu werden verwende ich sie gleich in der folgenden Definition.

Definition 2.1 (Universelle Eigenschaft des Faserprodukts). Seien $f : X \rightarrow Z, g : Y \rightarrow Z$ Pfeile, dann heißt das Tripel $(X \times_Z Y, \text{fib}_1(f, g), \text{fib}_2(f, g))$ bestehend aus einem Objekt und zwei Projektionen *Faserprodukt*, falls:

1. $f.\text{fib}_1(f, g) = g.\text{fib}_2(f, g)$
2. Für jedes weitere Paar von Morphismen $\theta_1 : M \rightarrow X, \theta_2 : M \rightarrow Y$ erhalten wir einen eindeutigen Pfeil $\mu : M \rightarrow X \times_Z Y$, sodass $\theta_i = \text{fib}_i(f, g).\mu$ für $i = 1, 2$.

Dies definiert ein Faserprodukt eindeutig bis auf eindeutigen Iso.

Proposition 2.1. *Sei \mathcal{C} eine Kategorie, $f : X \rightarrow Z, g : Y \rightarrow Z$ Morphismen sowie $X \times_Z Y$ deren Faserprodukt. Ist $g : Y \rightarrow Z$ ein Mono oder Iso, so ist auch die Projektion $\text{fib}_1(f, g) : X \times_Z Y \rightarrow X$ ein Mono bzw. ein Iso.*

Proposition 2.2. *Ein Spezialfall: $\text{fib}_1(f, \text{id}_Y) = f$ und $\text{fib}_2(f, \text{id}_Y) = \text{id}_X$ für $f : X \rightarrow Y$.*

Korollar 2.1. *Sei \mathcal{A} eine abelsche Kategorie und $X_1 \hookrightarrow X$ und $X_2 \hookrightarrow X$ Monos in \mathcal{A} . Dann ist der induzierte Pfeil $X_1 \times_X X_2 \rightarrow X$ auch Mono als Komposition $X_1 \times_X X_2 \hookrightarrow X_2 \hookrightarrow X$ von Monos.*

Proposition 2.3. *Sei \mathcal{A} eine abelsche Kategorie, $f : X \rightarrow Z, g : Y \rightarrow Z$ Morphismen. Ist $g : Y \rightarrow Z$ ein Epi, so ist auch die Projektion $\text{fib}_1(f, g) : X \times_Z Y \rightarrow X$ ein Epi.*

Satz 2.1 (Staffelung). *Seien $f : X \rightarrow Y, g : Y \rightarrow Z, h : W \rightarrow Z$ Pfeile und (bla, Existenzaussage damit alle folgenden Faserprodukte definiert sind...). Dann ist $X \times_{g.f, Z, h} W = X \times_{f, Y, \text{fib}_1(g, h)} (Y \times_{g, Z, h} W)$ und es gelten*

- $\text{fib}_1(g.f, h) = \text{fib}_1(f, \text{fib}_1(g, h))$
- $\text{fib}_2(g.f, h) = \text{fib}_2(g, h).\text{fib}_2(f, \text{fib}_1(g, h))$

Proposition 2.4 (Kommutativität). *Seien $f : X \rightarrow Z, g : Y \rightarrow Z$ Pfeile. Dann gilt*

$$X \times_Z Y = Y \times_Z X$$

mit $\text{fib}_1(f, g) = \text{fib}_2(g, f)$ und $\text{fib}_2(f, g) = \text{fib}_1(g, f)$. An dieser Stelle ist es sinnvoll nochmal zu erwähnen, dass $\text{fib}(f, g) = \text{fib}(g, f)$.

Proposition 2.5 (Assoziativität). Seien $f : W \rightarrow Z, g : X \rightarrow Z, h : Y \rightarrow Z$ Pfeile und $\{\alpha, \beta, \gamma\} = \{f, g, h\}$ eine beliebige Permutation dieser Pfeile. Dann gelten

$$\text{fib}(\text{fib}(f, g), \text{fib}(f, h)) = \text{fib}(\text{fib}(\alpha, \beta), \text{fib}(\alpha, \gamma)).$$

Genauer haben wir sogar

$$\text{fib}_1(\text{fib}_1(f, g), \text{fib}_1(f, h)) = \text{fib}_1(\text{fib}_1(g, f), \text{fib}_1(g, h))$$

und schließlich gilt auch noch

$$\text{fib}(\text{fib}(f, g), h) = \text{fib}(f, \text{fib}(g, h))$$

Korollar 2.2 (Faserproduktwürfel). Im folgenden werden wir etwas Vorstellungskraft brauchen: Mit $E_{000}, E_{001}, \dots, E_{111}$ werden wir Objekte bezeichnen, die auf den Ecken eines Einheitsquadrats $[0, 1]^3$ sitzen, nämlich an den Punkten $(0, 0, 0), (0, 0, 1), \dots, (1, 1, 1)$. Gegeben seien drei Pfeile $f : E_{100} \rightarrow E_{110}, g : E_{111} \rightarrow E_{110}, h : E_{010} \rightarrow E_{110}$ gegeben. Die Behauptung ist nun, dass es möglich ist, jeder verbleibenden Kante genau einen Pfeil und jeder verbleibenden Ecke ein Objekt zuzuordnen, sodass auf jeder Seite des Würfels ein Faserprodukt diagramm steht.

[Hier kommt eine nette Illustration hin]

Proposition 2.6. Für $f : X \rightarrow Z, g : Y \rightarrow Z, h : Z \rightarrow Z'$ existiert ein eindeutiger Pfeil $\kappa : X \times_{f, Z, g} Y \rightarrow X \times_{h, f, Z, h, g} Y$ mit $\text{fib}_i(f, g) = \text{fib}_i(h, f, h, g) \cdot \kappa$ für $i = 1, 2$. Ist auch noch h ein Mono, dann ist κ ein Iso.

Proposition 2.7. Sei $f : X \rightarrow Y$ ein Pfeil.

1. $\text{fib}_1(f, f) = \text{id}_X$
2. $\text{fib}(f, f) = f$

3. Kerne, Cokerne, Bilder und Cobilder

Wir sind nun in einer abelschen Kategorie \mathcal{A} .

3.1. Kerne (und Cokerne)

Proposition 3.1. Ein Pfeil $\beta : Y \hookrightarrow Z$ ist genau dann ein Mono, wenn $\ker(\beta) = 0_{0, Y}$.

Ein Pfeil $\alpha : X \twoheadrightarrow Y$ ist genau dann ein Epi, wenn $\text{coker}(\alpha) = 0_{Y, 0}$.

BEWEIS. Ist β ein Mono, dann gilt für jeden Pfeil u mit $\beta \cdot u = 0$, dass $\beta \cdot u = 0 = \beta \cdot 0$, d.h. $u = 0$, was bedeutet, dass u durch das Nullobjekt faktorisiert. Umgekehrt sei $\ker(\beta) = 0_{0, Y}$ und u, v Pfeile mit $\beta \cdot u = \beta \cdot v$. Dann folgt $0 = \beta \cdot (u - v)$, d.h. $u - v$ faktorisiert durch den Kern, aber der war Null. Damit ist $u - v = 0$ und dementsprechend $u = v$. Der Beweis für Epi's verläuft analog.

Proposition 3.2. Für $X, Y \in \mathcal{A}$ gelten

1. $\ker(\text{id}_Y) = 0_{0, Y}$
2. $\text{coker}(\text{id}_X) = 0_{X, 0}$
3. $\ker(0_{X, Y}) = \text{id}_X$
4. $\text{coker}(0_{X, Y}) = \text{id}_Y$

BEWEIS. id_Y ist ein Mono und id_X ein Epi. Aus Proposition 3.1 folgen die ersten beiden Gleichungen. Die anderen beiden folgen direkt aus den UniEs von Kern und Cokern.

Proposition 3.3. Man kann Kerne als Faserprodukte ausdrücken. Sei $f : X \rightarrow Y$, dann gilt

$$\ker f = \text{fib}_1(f, 0_{0, Y})$$

Ist weiter $g : Y \rightarrow Z$ ein Pfeil, haben wir sogar

$$\ker(g \cdot f) = \text{fib}_1(g, \ker f)$$

BEWEIS. Die UniEs von Kern und Faserprodukt stimmen in diesem Fall überein, daher $\ker(f) = \text{fib}_1(f, 0_{0, Y})$. Aus der Staffelung von Faserprodukten folgt

$$\ker(g \cdot f) = \text{fib}_1(g, \ker f) = \text{fib}_1(g, \text{fib}_1(f, 0_{0, Y})) = \text{fib}_1(g, \ker f)$$

3.2. Bilder (und Cobilder)

Definition 3.1. Sei $f : X \rightarrow Y$ ein Pfeil, dann bezeichnet man den Kern des Cokerns $\ker(\text{coker } f) =: \text{im } f$ als Bild von f und den Cokern des Kerns $\text{coker}(\ker f) =: \text{coim}(f)$ als Cobild von f .

Proposition 3.4. Sei $f : X \rightarrow Y$ ein Pfeil, dann erfüllt jedes Bild $\text{im } f =: g : B \rightarrow Y$ folgende UniE: Es gibt einen Pfeil $h : X \rightarrow B$, sodass $g.h = f$. Weiters gibts für jede Faktorisierung $f = m.e : X \rightarrow B' \rightarrow Y$ mit m Mono einen eindeutigen Pfeil $\gamma : B \rightarrow B'$, sodass $g = m.\gamma$.

Satz 3.1. Seien $\alpha : X \rightarrow Y, \beta : Y \hookrightarrow Z$ Pfeile und β Mono. Dann gelten

$$\text{im}(\beta.\alpha) = \beta.\text{im } \alpha \quad \text{und} \quad \text{coim}(\beta.\alpha) = \text{coim } \alpha.$$

Nun seien $\alpha' : X \rightarrow Y, \beta' : Y \rightarrow Z$ Pfeile und α' Epi. Dann gelten

$$\text{im}(\beta'.\alpha') = \text{im } \beta' \quad \text{und} \quad \text{coim}(\beta'.\alpha') = \text{coim } \beta'.$$

BEWEIS. Wir prüfen die UniE des Bildes (Proposition 3.4). Nach UniE von α existiert ein Pfeil e mit $\text{im } \alpha.e = \alpha$. Dadurch erhalten wir $\beta.\text{im } \alpha.e = \beta.\alpha$. Seien nun a, b Pfeile, b ein Mono, sodass $b.a = \beta.\alpha$.

Die verbleibenden Aussagen sind lediglich die dualen Aussagen des bereits Bewiesenen.

Korollar 3.1. Für $X, Y \in \mathcal{A}$ gelten

1. $\text{im } \text{id}_X = \text{id}_X$
2. $\text{coim } \text{id}_Y = \text{id}_Y$
3. $\text{im } 0_{X,Y} = 0_{0,Y}$
4. $\text{coim } 0_{X,Y} = 0_{X,0}$

BEWEIS. Folgt direkt aus Satz 3.1.

Korollar 3.2. Seien $\alpha : X \twoheadrightarrow Y, \beta : Y \hookrightarrow Z$, α Epi und β Mono, dann gilt $\text{im}(\beta.\alpha) = \beta$. Insbesondere gelten $\text{im } \beta = \beta$ und $\text{im } \alpha = \text{id}_Y$.

Dual dazu: $\text{coim}(\beta.\alpha) = \alpha$, $\text{coim } \alpha = \alpha$, $\text{coim } \beta = \text{id}_Y$.

BEWEIS. $\text{im}(\beta.\alpha) = \text{im } \beta = \beta.\text{im } \text{id} = \beta$. Für die anderen beiden Aussagen setzte jeweils $\alpha = \text{id}_Y, X = Y$ bzw. $\beta = \text{id}_Y, Y = Z$.

Für die duale Aussage dualisiere obigen Beweis.

Bemerkung 3.1. Umgekehrt folgt aus $\text{im } \beta' = \beta'$ für einen Pfeil β' , dass β' ein Mono ist, d.h.: Es ist β genau dann Mono, wenn $\text{im } \beta = \beta$

Korollar 3.3. Monos sind Kerne und Kerne sind Monos.

BEWEIS. Ist β ein Mono, so gilt $\beta = \text{im } \beta = \ker(\text{coker } \beta)$. Jeder Kern $\ker(f)$ ist Mono, denn nach Proposition 3.3 ist $\ker f = \text{fib}_1(f, 0_{0,Y})$. Der Pfeil $0_{0,Y}$ ist ein Mono wegen Proposition 3.1 und Proposition 3.2 und damit folgt aus Proposition 2.1, dass auch $\text{fib}_1(f, 0_{0,Y})$ Mono ist.

Korollar 3.4 (Idempotenz des Bildes/Cobildes). Für jeden Pfeil f gelten

$$\text{im}(\text{im } f) = \text{im } f \quad \text{und} \quad \text{coim}(\text{coim } f) = \text{coim } f$$

BEWEIS. Wende Satz 3.1 an.

Bemerkung 3.2 (Epi-Mono-Faktorisierung). Für jeden Pfeil f einer abelschen Kategorie gibt es per Axiom einen Isomorphismus τ , sodass $f = \text{im } f.\tau.\text{coim } f$. Man kann also im als Projektion eines Pfeils f mit Epi-Mono-Faktorisierung $\mu.\varepsilon$ auf seine Mono-Komponente und coim als Projektion auf seine Epi-Komponente verstehen, denn $\text{im } f = \mu$ und $\text{coim } f = \varepsilon$.

Proposition 3.5. Es gilt $\text{im } \text{join}(\text{im}(g), h) = \text{im } \text{join}(g, h)$ für alle Pfeile $g : X \rightarrow Z, h : Y \rightarrow Z$.

BEWEIS. $\text{im } \text{join}(\text{im } g, h) = \text{im}(\text{join}(\text{im } g, h).\text{par}(\text{coim } g, \text{id}_Y)) = \text{im } \text{join}(g, h)$

4. 2-Komplexe

Definition 4.1. Sei \mathcal{C} eine Kategorie und $p : X_2 \rightarrow X_1, q : Y_2 \rightarrow Y_1$ Pfeile, welche wir im folgenden als Paare bezeichnen und $p =: (X_1, X_2), q =: (Y_1, Y_2)$ schreiben. Wir nennen jedes Paar von Pfeilen $f_1 : X_1 \rightarrow Y_1, f_2 : X_2 \rightarrow Y_2$ einen *Pfeil von Paaren* $(X_1, X_2), (Y_1, Y_2)$ und schreiben $(f_1, f_2) : (X_1, X_2) \rightarrow (Y_1, Y_2)$, falls gilt folgende Verträglichkeit erfüllt ist:

$$f_1 \cdot p = q \cdot f_2$$

Proposition 4.1. Sind $(f_1, f_2) : (X_1, X_2) \rightarrow (Y_1, Y_2)$ und $(g_1, g_2) : (Y_1, Y_2) \rightarrow (Z_1, Z_2)$ Pfeile von Paaren, dann auch $(g_1 \cdot f_1, g_2 \cdot f_2) =: (g_1, g_2) \cdot (f_1, f_2)$. Insbesondere gilt $(f_1, f_2) \cdot (\text{id}_{X_1}, \text{id}_{X_2}) = (f_1, f_2) = (\text{id}_{Y_1}, \text{id}_{Y_2}) \cdot (f_1, f_2)$.

BEWEIS. Seien $x : X_2 \rightarrow X_1, y : Y_2 \rightarrow Y_1, z : Z_2 \rightarrow Z_1$ die zu den Paaren assoziierten Pfeile. Dann gilt $g_1 \cdot f_1 \cdot x = g_1 \cdot y \cdot f_2 = z \cdot g_2 \cdot f_2$.

Bemerkung 4.1. Damit erhalten wir für eine Kategorie \mathcal{C} eine Kategorie $\text{Paar}(\mathcal{C})$ mit Paaren (also Elementen aus $\text{Mor}(\mathcal{C})$) als Objekte und Pfeile von Paaren als Pfeile. Weiter können wir die vollen Unterkategorien $\text{MonoPaar}(\mathcal{C})$, deren Objekte die Monos von $\text{Mor}(\mathcal{C})$ sind, und $\text{EpiPaar}(\mathcal{C})$, deren Objekte die Epis von $\text{Mor}(\mathcal{C})$ sind, definieren.

Proposition 4.2. Sei \mathcal{A} eine abelsche Kategorie und $x' : X' \hookrightarrow X$ sowie $y' : Y' \hookrightarrow Y$ Monos. Sei nun $(f, f') : (X, X') \rightarrow (Y, Y')$ ein Pfeil von Paaren. Dann existiert genau ein Pfeil $\bar{f} : X/X' \rightarrow Y/Y'$, sodass $\bar{f} \cdot \text{coker}(x') = \text{coker}(y') \cdot f$, d.h. $(\bar{f}, f) : (X/X', X) \rightarrow (Y/Y', Y)$ ist ein Pfeil von Paaren.

Sind umgekehrt $\bar{x} : X \twoheadrightarrow \bar{X}, \bar{y} : Y \twoheadrightarrow \bar{Y}$ Epis und ein Pfeil von Paaren $(\bar{f}, f) : (\bar{X}, X) \rightarrow (\bar{Y}, Y)$ gegeben, so erhalten wir eindeutig einen Pfeil von Paaren $(f, f') : (X, \text{Kern}(\bar{x})) \rightarrow (Y, \text{Kern}(\bar{y}))$.

BEWEIS. Es gilt $(\text{coker}(y') \cdot f) \cdot x' = 0_{X, Y/Y'} \cdot x'$:

$$\text{coker}(y') \cdot f \cdot x' = \text{coker}(y') \cdot y' \cdot f' = 0_{X', Y/Y'}$$

Nach UniE von $\text{coker}(x')$ gibt es genau einen Pfeil $\bar{f} : X/X' \rightarrow Y/Y'$ mit

$$\bar{f} \cdot \text{coker}(x') = \text{coker}(y') \cdot f$$

Für die Umkehrung betrachte $\bar{y} \cdot (f \cdot \text{ker}(\bar{x})) = \bar{f} \cdot \bar{x} \cdot \text{ker}(\bar{x}) = 0_{X', \bar{Y}}$, daher existiert nach UniE von $\text{ker}(\bar{y})$ genau ein Pfeil $f' : \text{Kern}(\bar{x}) \rightarrow \text{Kern}(\bar{y})$ mit

$$f \cdot \text{ker}(\bar{x}) = \text{ker}(\bar{y}) \cdot f'$$

Bemerkung 4.2. Erinnern wir uns mal daran, dass in abelschen Kategorien Monos genau die Kerne und Epis genau die Cokerne sind. Daher gibt uns die obige Proposition eine Äquivalenz der Kategorien $\text{MonoPaar}(\mathcal{A})$ und $\text{EpiPaar}(\mathcal{A})$ für eine abelsche Kategorie \mathcal{A} .

Definition 4.2 (Objektordnung). Sei \mathcal{C} eine Kategorie. Wir definieren eine Relation \leq auf Unterobjekten von einem festen $X \in \mathcal{C}$ wie folgt: Für Unterobjekte $x_1 : X_1 \hookrightarrow X, x_2 : X_2 \hookrightarrow X$ sei

$$x_1 \leq x_2 \Leftrightarrow \exists (j : X_1 \rightarrow X_2) : x_1 = x_2 \cdot j$$

Existiert solch ein j , so ist es notwendigerweise ein Mono.

Auf Quotientenobjekten können wir eine Relation \leq^{op} definieren: Für Quotientenobjekte $x^1 : X \twoheadrightarrow X^1, x^2 : X \twoheadrightarrow X^2$ sei

$$x^1 \leq^{op} x^2 \Leftrightarrow \exists (k : X^2 \rightarrow X^1) : x^1 = k \cdot x^2$$

Jedes solche k muss ein Epi sein.

Lemma 4.1. Mit \leq und \leq^{op} haben wir eine Ordnungsrelationen auf der Menge der Unterobjekte, bzw. Quotientenobjekte von X definiert.

BEWEIS. Ich führe den Beweis nur für \leq : Es seien $x_i : X_i \hookrightarrow X_i, i = 1, 2, 3$ Unterobjekte. Die Relation ist reflexiv, denn $x_1 = x_1 \cdot \text{id}_{X_1}$; sie ist transitiv, denn für $x_1 \leq x_2 \leq x_3$ erhalten wir Pfeile j, j' mit $x_1 = x_2 \cdot j$ und $x_2 = x_3 \cdot j'$, also insgesamt $x_1 = x_3 \cdot (j' \cdot j)$. Für Antisymmetrie nehmen $x_1 \leq x_2$ und $x_2 \leq x_1$ an und erhalte Pfeile j, j' mit $x_1 = x_2 \cdot j$ sowie $x_2 = x_1 \cdot j'$. Da x_1, x_2 Monos sind folgt dass j ein Iso ist:

$$x_1 \cdot \text{id}_{X_1} = x_1 \cdot (j' \cdot j) \implies j' \cdot j = \text{id}_{X_1}$$

$$x_2 \cdot \text{id}_{X_2} = x_2 \cdot (j \cdot j') \implies j \cdot j' = \text{id}_{X_2}$$

Damit definieren x_1 und x_2 das gleiche Unterobjekt.

Korollar 4.1. *Obige Äquivalenz von Kategorien ist ordnungserhaltend, womit folgendes gemeint ist: Sind $X_1 \hookrightarrow X, X_2 \hookrightarrow X$ Unterobjekte von X , dann gilt*

$$X_1 \leq X_2 \Leftrightarrow X/X_2 \leq^{op} X/X_1,$$

BEWEIS.

$$\begin{aligned} X_1 &\leq X_2 \\ \Leftrightarrow \exists j : (\text{id}_X, j) : (X, X_1) &\rightarrow (X, X_2) \text{ ist Pfeil von 2-Komplexen} \\ \Leftrightarrow \exists k : (k, \text{id}_X) : (X/X_1, X) &\rightarrow (X/X_2, X) \text{ ist Pfeil von 2-Komplexen} \\ \Leftrightarrow X/X_2 &\leq^{op} X/X_1 \end{aligned}$$

Proposition 4.3. *Seien 2-Komplexe $X' \hookrightarrow X$ und $Y' \hookrightarrow Y$ sowie $f : X \rightarrow Y$ gegeben. Dann existiert genau ein $f' : X' \rightarrow Y'$, sodass $(f, f') : (X, X') \rightarrow (Y, Y')$ ein Pfeil von 2-Komplexen ist, falls $f(X') \leq Y'$.*

Dual dazu: Sind 2-Komplexe $X \twoheadrightarrow X/X'$ und $Y \twoheadrightarrow Y/Y'$ sowie $f : X \rightarrow Y$ gegeben. Dann existiert genau ein $\bar{f} : X/X' \rightarrow Y/Y'$, sodass $(\bar{f}, f) : (X/X', X) \rightarrow (Y/Y', Y)$ ein Pfeil von 2-Komplexen ist, falls $X' \leq f^{-1}(Y')$.

5. Rolands Vierzehn

Hier sind die 14 Rechenregeln, die uns der Prophet Roland L. auf Steintafeln gebracht hat. Das Studium dieser Aussagen über abelsche Kategorien hat dieses Handbuch motiviert.

Im folgenden sei \mathcal{A} eine abelsche Kategorie und mit $X, X_1 \xrightarrow{x_1} X, X_2 \xrightarrow{x_2} X, X' \xrightarrow{x'} X, Y, Y_1 \xrightarrow{y_1} Y, Y_2 \xrightarrow{y_2} Y, Y' \xrightarrow{y'} Y, Z, Z' \xrightarrow{z'} Z$ seien Objekte und Unterobjekte dieser Kategorie gemeint. Weiter seien $f : X \rightarrow Y, g : Y \rightarrow Z$ Pfeile.

Definition 5.1 (Objektnotation). Wir definieren

- $X_1 \cap X_2 := X_1 \times_Z X_2$ als Unterobjekt von X via $\text{fib}(x_1, x_2)$.
- $X_1 + X_2 = \text{Bild}(X_1 \oplus X_2 \rightarrow X)$ als Unterobjekt von X via $\text{im}(\text{join}(x_1, x_2))$.
- $f^{-1}(Y') = X \times_{f, Y, y'} Y'$ als Unterobjekt von X via $\text{fib}_1(f, y')$
- $f(X') = \text{Bild}(f \cdot x')$ als Unterobjekt von Y via $\text{im}(f \cdot x')$.

Bemerkung 5.1. Ohne Beweis habe ich oben angenommen, dass die vorkommenden Inklusionspfeile Monos sind, hier eine kurze Begründung: etc.pp.

Proposition 5.1 (Reflexionsprinzip). *Unterobjekte und Quotientenobjekte stehen in enger Beziehung zueinander:*

- | | |
|--|--|
| 1. $\text{cofib}(\text{coker}(x_1), \text{coker}(x_2)) = \text{coker}(\text{im}(\text{join}(x_1, x_2)))$ | $X/X_1 \cap X/X_2 = X/(X_1 + X_2)$ mit Schnitt in \mathcal{A}^{op} |
| 2. $\text{coim}(\text{fork}(\text{coker}(x_1), \text{coker}(x_2))) = \text{coker}(\text{fib}(x_1, x_2))$ | $X/X_1 + X/X_2 = X/(X_1 \cap X_2)$ mit Summe in \mathcal{A}^{op} |
| 3. $\text{coim}(\text{coker}(y') \cdot f) = \text{coker}(\text{fib}_1(f, y'))$ | $f^{op}(Y/Y') = X/f^{-1}(Y')$ mit Bild in \mathcal{A}^{op} |
| 4. $\text{cofib}_1(f, \text{coker}(x')) = \text{coker}(\text{im}(f \cdot x'))$ | $(f^{op})^{-1}(X/X') = Y/f(X')$ mit Urbild in \mathcal{A}^{op} |

Insbesondere können wir die Summe schreiben als $\text{im} \cdot \text{join}(x_1, x_2) = \text{ker} \text{cofib}(\text{coker } x_1, \text{coker } x_2)$.

BEWEIS. Beweise mich, ich bin nicht schwierig! (nur nervig!)

Lemma 5.1 (Regel (a)).

1. $\text{im}(0_{0,X}) = 0_{0,X}$ $f(0) = 0$
2. $\text{im}(f \cdot \text{id}_X) = \text{im}(f)$ $f(X) = X$
3. $\text{fib}_1(f, 0_{0,Y}) = \ker(f)$ $f^{-1}(0) = \text{Kern}(f)$
4. $\text{fib}_1(f, \text{id}_Y) = \text{id}_X$ $f^{-1}(Y) = X$

BEWEIS. Siehe Proposition 3.2.

Lemma 5.2 (Regel (b)).

1. $\text{fib}(x_1, x_2) = \text{fib}(x_2, x_1)$ $X_1 \cap X_2 = X_2 \cap X_1$
2. $\text{im join}(x_1, x_2) = \text{im join}(x_2, x_1)$ $X_1 + X_2 = X_2 + X_1$

BEWEIS. Die erste Aussage folgt aus der Kommutativität des Faserprodukts, die zweite aus der ersten via Reflexionsprinzip:

$$\begin{aligned} & \text{im}(\text{join}(x_1, x_2)) \\ &= \ker(\text{cofib}(\text{coker}(x_1), \text{coker}(x_2))) \\ &= \ker(\text{cofib}(\text{coker}(x_2), \text{coker}(x_1))) \\ &= \text{im}(\text{join}(x_2, x_1)) \end{aligned}$$

Lemma 5.3 (Regel (c)).

1. $\text{fib}(x', \text{fib}(x_1, x_2)) = \text{fib}(\text{fib}(x', x_1), x_2)$ $X' \cap (X_1 \cap X_2) = (X' \cap X_1) \cap X_2$
2. $\text{im}(\text{join}(x', \text{im}(\text{join}(x_1, x_2)))) = \text{im}(\text{join}(\text{im}(\text{join}(x', x_1)), x_2))$ $X' + (X_1 + X_2) = (X' + X_1) + X_2$

BEWEIS. Die erste Aussage folgt aus der Assoziativität des Faserprodukts und die zweite folgt aus der ersten via Reflexionsprinzip.

Lemma 5.4 (Regel (d)).

1. $\text{fib}_1(g \cdot f, z') = \text{fib}_1(f, \text{fib}_1(g, z'))$ $(g \cdot f)^{-1}(Z') = f^{-1}(g^{-1}(Z'))$
2. $\text{im}(g \cdot f \cdot x') = \text{im}(g \cdot \text{im}(f \cdot x'))$ $(g \cdot f)(X') = g(f(X'))$

BEWEIS. Die erste Gleichung ist nur ein Spezialfall der Staffellung von Faserprodukten.

Die zweite Gleichung folgt unmittelbar, wenn wir die Epi-Mono-Zerlegung $f \cdot x' = \text{im}(f \cdot x') \cdot \varepsilon$ einsetzen:

$$\text{im}(g \cdot f \cdot x') = \text{im}(g \cdot \text{im}(f \cdot x') \cdot \varepsilon) = \text{im}(g \cdot \text{im}(f \cdot x'))$$

Lemma 5.5 (Regel (e)).

1. $\text{im}(\text{fib}(f, y')) = \text{fib}(\text{im}(f), y')$ $f(f^{-1}(Y')) = Y' \cap \text{Bild}(f)$
2. $\text{fib}_1(f, \text{im}(f \cdot x')) = \text{im}(\text{join}(x', \ker(f)))$ $f^{-1}(f(X')) = X' + \text{Kern}(f)$

BEWEIS. Zur ersten Gleichung: Sei eine Epi-Mono-Zerlegung $f = \text{im}(f) \cdot \varepsilon$ gegeben. Dann steht auf der linken Seite $\text{im}(f \cdot \text{fib}_1(f, y')) = \text{im}(\text{im}(f) \cdot \varepsilon \cdot \text{fib}_1(f, y')) = \text{im}(f) \cdot \text{im}(\varepsilon \cdot \text{fib}_1(f, y'))$ und auf der rechten Seite $\text{im}(f) \cdot \text{fib}_1(\text{im}(f), y')$. Es reicht also, zu zeigen, dass

$$\text{im}(\varepsilon \cdot \text{fib}_1(f, y')) = \text{fib}_1(\text{im}(f), y').$$

Dazu schreiben wir erst $\varepsilon.\text{fib}_1(f, y')$ um:

$$\begin{aligned} & \varepsilon.\text{fib}_1(f, y') \\ &= \varepsilon.\text{fib}_1(\text{im}(f).\varepsilon, y') \\ &= \varepsilon.\text{fib}_1(\varepsilon, \text{fib}_1(\text{im}(f), y')) \\ &= \text{fib}_1(\text{im}(f), y').\text{fib}_2(\varepsilon, \text{fib}_1(\text{im}(f), y')) \end{aligned}$$

Der letzte Term ist eine Komposition eines Monos mit einem Epi, d.h. nach Anwendung von im überlebt nur der Mono:

$$\text{im}(\varepsilon.\text{fib}_1(f, y')) = \text{fib}_1(\text{im}(f), y')$$

was zu zeigen war.

Nun zur zweiten Gleichung: Sei $f = \mu.\varepsilon$ eine Epi-Mono-Zerlegung. Dann haben wir für die linke Seite

$$\text{fib}_1(\mu.\varepsilon, \text{im}(\mu.\varepsilon.x')) = \text{fib}_1(\mu.\varepsilon, \mu.\text{im}(\varepsilon.x')) = \text{fib}_1(\varepsilon, \text{im}(\varepsilon.x'))$$

und für die rechte Seite

$$\text{im}(\text{join}(x', \ker(\mu.\varepsilon))) = \text{im}(\text{join}(x', \text{im}(\ker(\mu.\varepsilon)))) = \text{im}(\text{join}(x', \ker(\varepsilon)))$$

Das bedeutet, dass wir oBdA annehmen können, dass f ein Epi ist. Nach zweimaliger Anwendung des Reflexionsprinzips sind wir auch schon fertig:

$$\begin{aligned} & \text{im}(\text{join}(x', \ker f)) \\ &= \ker(\text{cofib}(\text{coker } x', (\text{coker} \cdot \ker)f)) \quad (\text{Reflexionsprinzip}) \\ &= \ker(\text{cofib}(\text{coker } x', f)) \quad (f \text{ ist Epi, d.h. } \text{coim}(f) = f) \\ &= \ker(\text{cofib}_2(\text{coker } x', f).f) \\ &= \ker(\text{coker}(\text{im}(f.x').f)) \quad (\text{Reflexionsprinzip}) \\ &= \text{fib}_1(f, (\ker \cdot \text{coker} \cdot \text{im})(f.x')) \quad (\text{Regel (d).1}) \\ &= \text{fib}_1(f, \text{im}(f.x')) \end{aligned}$$

(Übung: Zeichne zum Beweis der ersten Aussage ein passendes kommutatives Diagramm.)

Lemma 5.6 (Regel (f)).

1. $\text{im}(f.\text{im join}(x_1, x_2)) = \text{im join}(\text{im}(f.x_1), \text{im}(f.x_2)) \quad f(X_1 + X_2) = f(X_1) + f(X_2)$
2. $\text{fib}_1(f, \text{fib}(y_1, y_2)) = \text{fib}(\text{fib}_1(f, y_1), \text{fib}_1(f, y_2)) \quad f^{-1}(X_1 \cap X_2) = f^{-1}(X_1) \cap f^{-1}(X_2)$

BEWEIS. Zur ersten Gleichung: Seien $f.x_i = \text{im}(f.x_i).\varepsilon_i$ ($i = 1, 2$) Epi-Mono-Zerlegungen. Dann haben wir

$$\begin{aligned} & \text{im}(f.\text{im join}(x_1, x_2)) \\ &= \text{im}(f.\text{join}(x_1, x_2)) \quad (\text{nach (d)}) \\ &= \text{im join}(f.x_1, f.x_2) \\ &= \text{im join}(\text{im}(f.x_1).\varepsilon_1, \text{im}(f.x_2).\varepsilon_2) \\ &= \text{im join}(\text{im}(f.x_1), \text{im}(f.x_2)).\text{par}(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \\ &= \text{im join}(\text{im}(f.x_1), \text{im}(f.x_2)) \quad (\text{eliminiere den Epi}) \end{aligned}$$

Zur zweiten Gleichung: Vergleichen wir die linke Seite

$$\begin{aligned} & \text{fib}_1(f, \text{fib}(y_1, y_2)) \\ &= \text{fib}_1(f, y_1.\text{fib}_1(y_1, y_2)) \\ &= \text{fib}_1(f, y_1).\text{fib}_1(\text{fib}_2(f, y_1), \text{fib}_1(y_1, y_2)) \end{aligned}$$

mit der rechten

$$\begin{aligned} & \text{fib}(\text{fib}_1(f, y_1), \text{fib}_1(f, y_2)) \\ &= \text{fib}_1(f, y_1) \cdot \text{fib}_1(\text{fib}_1(f, y_1), \text{fib}_1(f, y_2)), \end{aligned}$$

so stellt sich heraus, dass wir nur

$$\text{fib}_1(\text{fib}_2(f, y_1), \text{fib}_1(y_1, y_2)) = \text{fib}_1(\text{fib}_1(f, y_1), \text{fib}_1(f, y_2))$$

zeigen müssen. Wegen $\text{fib}_2(f, y_1) = \text{fib}_1(y_1, f)$ folgt das aber aus der Assoziativität von Faserprodukten.

Lemma 5.7 (Regel (g), Projektionsformel).

$$\begin{aligned} 1. \quad & \text{fib}_1(f, \text{im}(\text{join}(\text{im}(f.x'), y'))) = \text{im}(\text{join}(x', \text{fib}_1(f, y'))) & f^{-1}(f(X') + Y') = X' + f^{-1}(Y') \\ 2. \quad & \text{im}(f. \text{fib}(\text{fib}_1(f, y'), x')) = \text{fib}(y', \text{im}(f.x')) & f(f^{-1}(Y') \cap X) = Y' \cap f(X') \end{aligned}$$

BEWEIS. Zur ersten Gleichung: Definiere $q = \text{coker}(y') : Y \rightarrow Y/Y'$, dann haben wir

$$\begin{aligned} & f^{-1}(f(X') + Y') \\ &= f^{-1}(q^{-1}(q(f(X')))) \quad (\text{Regel (e)}) \\ &= (q.f)^{-1}((q.f)(X')) \quad (\text{Regel (d)}) \\ &= X' + \text{Kern}(q.f) \quad (\text{Regel (e)}) \\ &= X' + f^{-1}(Y') \quad (\text{Regel (d) und } \text{Kern}(q) = Y') \end{aligned}$$

Ein Beweis im hier üblichen Kalkül möchte ich auch noch angeben:

$$\begin{aligned} & \text{fib}_1(f, \text{im}(\text{join}(\text{im}(f.x'), y'))) \\ &= \text{fib}_1(f, \text{im}(\text{join}(\text{im}(f.x'), \text{ker}(q)))) \\ &= \text{fib}_1(f, \text{fib}_1(q, \text{im}(q. \text{im}(f.x')))) \\ &= \text{fib}_1(f, \text{fib}_1(q, \text{im}(q.f.x'))) \\ &= \text{fib}_1(q.f, \text{im}(q.f.x')) \\ &= \text{im}(\text{join}(x', \text{ker}(q.f))) \\ &= \text{im}(\text{join}(x', \text{fib}_1(f, y'))) \end{aligned}$$

Zur zweiten Gleichung: Zunächst können wir den inneren Term $f. \text{fib}(\text{fib}_1(f, y'), y')$ als Faserprodukt auffassen:

$$\begin{aligned} & f. \text{fib}(\text{fib}_1(f, y'), x') \\ &= f. \text{fib}_1(f, y'). \text{fib}_2(x', \text{fib}_1(f, y')) \\ &= y'. \text{fib}_2(f, y'). \text{fib}_2(x', \text{fib}_1(f, y')) \\ &= y'. \text{fib}_2(f.x', y') \\ &= \text{fib}(y', f.x') \end{aligned}$$

Nun folgt $\text{im}(\text{fib}(y', f.x')) = \text{fib}(y', \text{im}(f.x'))$ aus Regel (e), und wir sind fertig.

Alternativ definiere mit $f' = f.x' : X' \rightarrow Y$ die Einschränkung von f auf X' .

$$\begin{aligned} & f(f^{-1}(Y') \cap X') \\ &= f(x'(f'^{-1}(Y'))) \quad (\text{Regel (d) mit } x'^{-1}(X'_1) = X' \cap X'_1) \\ &= f'(f'^{-1}(Y')) \\ &= Y' \cap \text{Bild}(f') \quad (\text{Regel (e)}) \\ &= Y' \cap f(X') \end{aligned}$$

Lemma 5.8 (Regel (h)).

$$\text{im}(f.x') \leq y' \Leftrightarrow x' \leq \text{fib}_1(f, y') \quad f(X') \leq Y' \Leftrightarrow X' \leq f^{-1}(Y')$$

BEWEIS.

$$\text{im join}(x', 0_{0,X}) = \ker \text{cofib}(\text{coker } x', \text{coker } 0_{0,X}) = \ker \text{cofib}(\text{coker } x', \text{id}_X) = \ker \text{coker } x' = \text{im } x' = x'$$

Woraus wir $X' + 0 = X'$ erhalten.

Mit Regel (i) und Regel (l) (die ich noch zeigen werde) folgern wir $X' = X' + 0 \leq X' + \text{Kern } f = f^{-1}(f(X')) \leq f^{-1}(Y')$

Die Umkehrrichtung beweisen wir durch Übergang in die Quotienten, wobei wir die Ordnungserhaltung (Proposition 4.1) ausschöpfen:

$$\begin{aligned} X' &\leq f^{-1}(Y') \\ &\Leftrightarrow f^{op}(Y/Y') \leq X/X' \\ &\Rightarrow Y/Y' \leq (f^{op})^{-1}(X/X') = Y/f(X') \quad (\text{Reflexionsprinzip und obige Implikation}) \\ &\Leftrightarrow f(X') \leq Y' \end{aligned}$$

Lemma 5.9 (Regel (i)). Angenommen $x_1 \leq x_2$. Dann gelten

1. $\text{fib}(x_1, x') \leq \text{fib}(x_2, x') \quad X_1 \cap X' \leq X_2 \cap X'$
2. $\text{im join}(x_1, x') \leq \text{im join}(x_2, x') \quad X_1 + X' \leq X_2 + X'$
3. $\text{im}(f.x_1) \leq \text{im}(f.x_2) \quad f(X_1) \leq f(X_2)$

BEWEIS. Seien j ein Mono mit $x_1 = x_2.j$ sowie $f.x_2 = \text{im}(f.x_2).\varepsilon$ und $\text{join}(x_2, x') = \text{im join}(x_2, x').\varepsilon'$ Epi-Mono-Faktorisierungen.

1.

$$\text{fib}(x_1, x') = \text{fib}(x_2.j, x') = \text{fib}(x_2, x').\text{fib}_2(j, \text{fib}_1(x_2, x'))$$

2.

$$\begin{aligned} \text{im join}(x_1, x') &= \text{im join}(x_2.j, x') = \text{im}(\text{join}(x_2, x').\text{par}(j, \text{id}_{X'})) \\ &= \text{im join}(x_2, x').\text{im}(\varepsilon'.\text{par}(j, \text{id}_{X'})) \end{aligned}$$

3.

$$\text{im}(f.x_1) = \text{im}(f.x_2.j) = \text{im}(f.x_2).\text{im}(\varepsilon.j)$$

Da $\text{fib}_2(j, \text{fib}_1(x_2, x'))$, $\text{im}(\varepsilon'.\text{par}(j, \text{id}_{X'}))$, $\text{im}(\varepsilon.j)$ Monos sind, folgt die Behauptung.

Lemma 5.10 (Regel (j)).

1. $x_1 \leq x' \wedge x_2 \leq x' \Leftrightarrow \text{im join}(x_1, x_2) \leq x' \quad X_1 \leq X' \wedge X_2 \leq X' \Leftrightarrow X_1 + X_2 \leq X'$
2. $x_1 \leq x_2 \Rightarrow \text{im join}(x_1, x_2) \leq x_2 \quad X_1 \leq X_2 \Rightarrow X_1 + X_2 = X_2$

BEWEIS. Siehe Beweis von Regel (k).

Lemma 5.11 (Regel (k)).

1. $x' \leq x_1 \wedge x' \leq x_2 \Leftrightarrow x' \leq \text{fib}(x_1, x_2) \quad X' \leq X_1 \wedge X' \leq X_2 \Leftrightarrow X' \leq X_1 \cap X_2$
2. $x_1 \leq x_2 \Rightarrow \text{fib}(x_1, x_2) = x_1 \quad X_1 \leq X_2 \Rightarrow X_1 \cap X_2 = X_1$

BEWEIS. Ich beweise die Regeln (j) und (k) in einem Rutsch.

Zu (j).1 „ \Rightarrow “: Seien j_1, j_2 Monos mit $x_1 = x'.j_1$ und $x_2 = x'.j_2$.

$$\text{im join}(x_1, x_2) = \text{im join}(x'.j_1, x'.j_2) = x'.\text{im join}(j_1, j_2)$$

Zu (k).1 „ \Rightarrow “: Seien j_1, j_2 Monos mit $x' = x_1.j_1 = x_2.j_2$. Wegen Proposition 2.7 gilt Definiere nun Monos

$$k_1 := \text{fib}_2(j_1, \text{fib}_1(x_1, x')) \quad k_2 := \text{fib}_2(j_2, \text{fib}_1(x_1, x_2))$$

Diese erfüllen nun, wie sich leicht nachrechnen lässt,

$$\text{fib}(x_1, x_2).(k_2.k_1) = \text{fib}(x_1, x').k_1 = \text{fib}(x', x')$$

Zu (j).1 „ \Leftarrow “: Folgt aus (k).1 „ \Rightarrow “ (gehe in Quotientenobjekte über)

Zu (k).1 „ \Leftarrow “: Folgt aus (j).1 „ \Rightarrow “ (gehe in Quotientenobjekte über)

Die restlichen Aussagen (j).2, (k).2 folgen nun einfach aus (j).1 bzw. (k).2 zusammen mit den Ordnungsaxiomen.

Lemma 5.12 (Regel (l)).

$$y_1 \leq y_2 \implies \text{fib}_1(f, y_1) \leq \text{fib}_1(f, y_2) \quad Y_1 \leq Y_2 \implies f^{-1}(Y_1) \leq f^{-1}(Y_2)$$

BEWEIS. Folgt aus Regel (i) durch Übergang in Quotientenobjekte.

Lemma 5.13 (Regel (m)).

1. $x_2 \leq x_1 \implies \text{fib}(x-1, \text{im join}(x' + x_2)) = \text{im join}(\text{fib}(x_1, x'), x_2)$ $X_2 \leq X_1 \implies X_1 \cap (X' + X_2) = (X_1 \cap X') + X_2$
2. $\text{fib}(x', \text{im join}(x_1, x_2)) \leq \text{im join}(\text{fib}(x_1, \text{im join}(x', x_2)), x_2)$ $X' \cap (X_1 + X_2) \leq X_1 \cap (X' + X_2) + X_2$
3. Die Aussagen 1 und 2 sind äquivalent.

Lemma 5.14 (Regel (n)). Ist $(f, f') : (X, X') \rightarrow (Y, Y')$ ein Pfeil von 2-Komplexen, und sind $y'' : Y'' \hookrightarrow Y'$, $x'' : X'' \hookrightarrow X'$ Monos, so gilt

1. $y'.\text{im}(f'.x'') = \text{im}(f.x'.x'')$ $f'(X'') = f(X'')$
2. $y'.\text{im}(f') \leq \text{im}(f)$ $\text{Bild}(f') \leq \text{Bild}(f)$
3. $x'.\text{fib}_1(f', y'') = \text{fib}_1(f, x'.x''), x'$ $(f')^{-1}(Y'') = f^{-1}(X'') \cap X'$