

# Skript Topologie I.


Mitschrift der Vorlesung „Topologie I.“ von Prof. Dr. Arthur Bartels

Jannes Bantje

10. November 2014

Aktuelle Version verfügbar bei:



 **GitHub** (inklusive Sourcecode)  
<https://github.com/JaMeZ-B/latex-www>



 **Bittorrent Sync**  
B6WH2DISQ5QVYIRYIEZSF4ZR2IDVKPN3I

## Vorwort — Mitarbeit am Skript

Dieses Dokument ist eine Mitschrift aus der Vorlesung „Topologie I., WiSe 2014/2015“, gelesen von Prof. Dr. Arthur Bartels. Der Inhalt entspricht weitestgehend dem Tafelanschrieb. Für die Korrektheit des Inhalts übernehme ich keinerlei Garantie! Für Bemerkungen und Korrekturen – und seien es nur Rechtschreibfehler – bin ich sehr dankbar. Korrekturen lassen sich prinzipiell auf drei Wegen einreichen:

- Persönliches Ansprechen in der Uni, Mails an ✉ [j.bantje@wwu.de](mailto:j.bantje@wwu.de) (gerne auch mit annotieren PDFs)
- *Direktes* Mitarbeiten am Skript: Den Quellcode poste ich auf GitHub (siehe oben), also stehen vielfältige Möglichkeiten der Zusammenarbeit zur Verfügung: Zum Beispiel durch Kommentare am Code über die Website und die Kombination Fork + Pull Request. Wer sich verdient macht oder ein Skript zu einer Vorlesung, die ich nicht besuche, beisteuern will, dem gewähre ich gerne auch Schreibzugriff.

Beachten sollte man dabei, dass dazu ein Account bei [github.com](https://github.com) ✉ notwendig ist, der allerdings ohne Angabe von persönlichen Daten angelegt werden kann. Wer bei GitHub (bzw. dem zugrunde liegenden Open-Source-Programm „git“) – verständlicherweise – Hilfe beim Einstieg braucht, dem helfe ich gerne weiter. Es gibt aber auch zahlreiche empfehlenswerte Tutorials im Internet.<sup>1</sup>

- *Indirektes* Mitarbeiten:  $\text{\TeX}$ -Dateien per Mail verschicken.

Dies ist nur dann sinnvoll, wenn man einen ganzen Abschnitt ändern möchte (zB. einen alternativen Beweis geben), da ich die Änderungen dann per Hand einbauen muss!

## Vorlesungshomepage



<https://wwwmath.uni-muenster.de/reine/u/topos/lehre/WS2014-2015/Topologie1/Topologie1.html> ✉

---

<sup>1</sup>zB. <https://try.github.io/levels/1/challenges/1> ✉, ist auf Englisch, aber dafür interaktives LearningByDoing

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Kategorien, Funktoren und natürliche Transformationen</b>	<b>1</b>
1.1 Definition: Kategorie . . . . .	1
1.2 Beispiele für Kategorien . . . . .	1
1.3 Bemerkungen zu Kategorien . . . . .	2
1.4 Definition: Funktor . . . . .	2
1.5 Beispiele für Funktoren . . . . .	2
1.6 Definition: Natürliche Transformation . . . . .	2
1.7 Ausblick auf Kategorien und Funktoren in der algebraischer Topologie . . . . .	3
<b>2 Kombinatorische Beschreibungen topologischer Räume</b>	<b>4</b>
2.1 Beispiel einer kombinatorischen Beschreibung eines Raumes . . . . .	4
2.2 Definition: Simplicialer Komplex . . . . .	4
2.3 Beispiel für simpliciale Komplexe . . . . .	4
2.4 Definition: Unterkomplex . . . . .	4
2.5 Definition: Simpliciale Abbildung . . . . .	5
2.6 Definition: Geometrische Realisierung . . . . .	5
2.7 Beispiel: Rand des $n$ -Simplizes und der Torus . . . . .	5
2.8 Definition: Polyeder . . . . .	5
2.9 Definition: Euler-Charakteristik . . . . .	5
2.10 Satz über die Euler-Charakteristik . . . . .	6
<b>3 Simpliciale Homologie</b>	<b>7</b>
3.1 Definition: Freier $R$ -Modul mit Basis $S$ . . . . .	7
3.2 Lemma: Universale Eigenschaft von freien Moduln . . . . .	7
3.3 Beispiel für freie und nicht-freie Moduln . . . . .	7
3.4 Definition: $n$ -ter Kettenmodul . . . . .	8
3.5 Definition: Orientierung eines $(n - 1)$ -Simplizes als Teilmenge eines $n$ -Simplizes . . . . .	8
3.6 Definition: $n$ -te Randabbildung . . . . .	8
3.7 Proposition: $\partial_{n-1} \circ \partial_n = 0$ . . . . .	8
3.8 Lemma: Ein $(n - 2)$ -Simplex ist Seite von genau zwei $(n - 1)$ -Simplizes . . . . .	9
3.9 Notation für das Weglassen eines Knotens . . . . .	9
3.10 Definition: $n$ -ter Homologiemodul . . . . .	9
3.11 Beispiele für Homologiemoduln . . . . .	9
3.12 Definition: $R$ -Kettenkomplex, $n$ -te Homologie . . . . .	10
3.13 Bemerkungen zu Kettenkomplexen . . . . .	10
3.14 Definition: Simplicialer Kettenkomplex . . . . .	10
<b>4 Euler-Charakteristik von Kettenkomplexen</b>	<b>11</b>
4.1 Wiederholung: Torsionsgruppe . . . . .	11
4.2 Lemma: Rang einer endlich erzeugten abelschen Gruppe . . . . .	11
4.3 Definition: Kurze exakte Sequenz . . . . .	11
4.4 Beispiele für kurze exakte Folgen . . . . .	12
4.5 Bemerkung: Spaltung einer kurzen exakten Sequenz . . . . .	12
4.6 Bemerkung: Existenz einer Spaltung, wenn $M_2$ frei ist . . . . .	12
4.7 Bemerkung: Der Rang ist additiv . . . . .	12
4.8 Proposition: Der Rang ist für kurze exakte Folgen endl. erz., abelscher Gruppen additiv . . . . .	12
4.9 Definition: Eulercharakteristik von $\mathbb{Z}$ -Kettenkomplexen . . . . .	13
4.10 Satz: Eulercharakteristik eines endlich erzeugten $\mathbb{Z}$ -Kettenkomplexes . . . . .	14
4.11 Korollar: Die Eulercharakteristik eines simplicialen Komplexes . . . . .	14

<b>5 Singuläre Homologie</b>	<b>15</b>
5.1 Definition: Singuläre Simplizes und $n$ -ter singulärer Kettenmodul . . . . .	15
5.2 Definition: Einschränkung eines singulären Simplizes auf eine Seite . . . . .	15
5.3 Bemerkung zur Inklusion der $j$ -ten Seite . . . . .	15
5.4 Definition: $n$ -te singuläre Randabbildung . . . . .	15
5.5 Proposition: Für die Randabbildungen gilt $\partial_{n-1} \circ \partial_n = 0$ . . . . .	15
5.6 Lemma: Hilfslemma für Proposition 5.5 . . . . .	16
5.7 Definition: Singuläre Homologie von $X$ . . . . .	16
5.8 Definition: $n$ -Ketten, $n$ -Ränder und $n$ -Zykel und Homologiekasse . . . . .	16
5.9 Beispiel: Die Homologie des Ein-Punkt-Raumes . . . . .	16
5.10 Proposition: Eigenschaften von $H_0(X)$ für $X \neq \emptyset$ und $X$ wegzusammenhängend . . . . .	17
5.11 Bemerkung . . . . .	17
<b>6 Funktorialität</b>	<b>18</b>
6.1 Definition: $R$ -Kettenabbildung . . . . .	18
6.2 Bemerkung: Induzierte Abbildung einer Kettenabbildung . . . . .	18
6.3 Bemerkung: Homologie definiert einen Funktor . . . . .	18
6.4 Definition . . . . .	18
6.5 Proposition: Der singuläre Kettenkomplex bildet einen Funktor . . . . .	19
6.6 Korollar . . . . .	19
6.7 Bemerkung: Notation und Formel für $H_n(f; R)$ . . . . .	19
6.8 Definition: Summe oder Koprodukt von topologischen Räumen . . . . .	19
6.9 Definition: Summe von $R$ -Moduln . . . . .	20
6.10 Satz . . . . .	20
<b>7 Homotopieinvarianz</b>	<b>21</b>
7.1 Bemerkung: Die induzierte Abbildung eines Homöomorphismus ist ein Isomorphismus . . . . .	21
7.2 Definition: Homotopieäquivalenz . . . . .	21
7.3 Satz: Homotopieinvarianz der Homologie . . . . .	21
7.4 Korollar: Die induzierte Abbildung einer Homotopieäquivalenz ist ein Isomorphismus . . . . .	21
7.5 Korollar: Homologie eines kontrahierbaren Raumes . . . . .	21
7.6 Definition: Kettenhomotopie . . . . .	22
7.7 Proposition: Die induzierten Abbildungen von kettenhomotopen Kettenabbildungen sind gleich . . . . .	22
7.8 Lemma . . . . .	22
<b>Index</b>	<b>A</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>B</b>
<b>Todo list</b>	<b>B</b>

# 1 Kategorien, Funktoren und natürliche Transformationen

## 1.1 Definition

Eine **Kategorie**  $\mathcal{C}$  besteht aus:

- i) Einer Klasse  $\text{Ob}(\mathcal{C})$ . Die Elemente von  $\text{Ob}(\mathcal{C})$  heißen die **Objekte** von  $\mathcal{C}$ .
- ii) Zu je zwei Objekten  $A, B$  aus  $\mathcal{C}$  einer Menge  $\text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B)$ . Die Elemente von  $\text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B)$  heißen **Morphismen** von  $\mathcal{C}$ .
- iii) Zu je drei Objekten  $A, B, C$  aus  $\mathcal{C}$  einer Abbildung:

$$\text{Mor}_{\mathcal{C}}(B, C) \times \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B) \rightarrow \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, C), \quad (f, g) \mapsto f \circ g$$

genannt die **Komposition** in  $\mathcal{C}$ .

Dabei müssen folgende Axiome erfüllt sein:

- (i) Die Komposition ist **assoziativ**:  
Für Objekte  $A, B, C, D$  von  $\mathcal{C}$  und  $f \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(C, D), g \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(B, C), h \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B)$  gilt immer

$$f \circ (g \circ h) = (f \circ g) \circ h$$

- (ii) Die Komposition ist **unital**: Für jedes Objekt  $A$  von  $\mathcal{C}$  gibt es einen Morphismus  $\text{id}_A \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, A)$  so, dass

$$\forall f \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(B, A) : \text{id}_A \circ f = f \quad \text{und} \quad \forall f \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B) : f \circ \text{id}_A = f$$

## 1.2 Beispiele

- (1) Die Kategorie der Mengen **MENGEN**: Objekte sind Mengen und Morphismen sind Abbildungen.
- (2) Die Kategorie der Gruppen **GRUPPEN**: Objekte sind Gruppen und Morphismen sind Gruppenhomomorphismen.
- (3) Die Kategorie der  $K$ -Vektorräume  **$K$ -VR**: Objekte sind  $K$ -Vektorräume und die Morphismen sind  $K$ -lineare Abbildungen.
- (4) Die Kategorie der  $R$ -Moduln  **$R$ -MOD**: Objekte sind  $R$ -Moduln und Morphismen sind  $R$ -lineare Abbildungen.
- (5) Die Kategorie der  $C^\infty$ -Mannigfaltigkeiten  **$C^\infty$ -MAN**: Objekte sind  $C^\infty$ -Mannigfaltigkeiten und Morphismen sind  $C^\infty$ -Abbildungen.
- (6) Die Kategorie der topologischen Räume **TOP**: Objekte sind topologische Räume und Morphismen sind stetige Abbildungen.
- (7) Die Kategorie der punktierten topologischen Räume **TOP<sub>\*</sub>**: Objekte sind punktiert-topologische Räume und Morphismen sind punktiert-stetige Abbildungen.
- (8) Die Kategorie **HTOP**: Objekte sind topologische Räume und Morphismen sind Homotopieklassen von stetigen Abbildungen.
- (9) Die Kategorie **HTOP<sub>\*</sub>**: Objekte sind punktiert-topologische Räume und Morphismen sind Homotopieklassen von punktiert-stetigen Abbildungen.
- (10) Sei  $G$  eine Gruppe. Wir erhalten eine Kategorie  $\mathcal{C}_G$  mit genau einem Objekt  $*$  und  $\text{Mor}_{\mathcal{C}_G}(*, *) = G$ . Die Komposition wird durch die Verknüpfung in der Gruppe festgelegt.
- (11) Ist  $\mathcal{C}$  eine Kategorie, so ist  $\mathcal{C}^{\text{op}}$  eine Kategorie, wobei  $\text{Ob}(\mathcal{C}^{\text{op}}) = \text{Ob}(\mathcal{C})$  und  $\text{Mor}_{\mathcal{C}^{\text{op}}}(A, B) := \text{Mor}_{\mathcal{C}}(B, A)$ . Die Komposition ist gegeben durch  $f \circ^{\text{op}} g := g \circ f$ .

### 1.3 Bemerkung

- (i) Eine Kategorie heißt **klein**, wenn ihre Objekte eine Menge bilden.
- (ii) Statt  $f \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(A, B)$  schreiben wir oft  $f : A \rightarrow B$  oder  $A \xrightarrow{f} B$ .

### 1.4 Definition

Seien  $\mathcal{C}$  und  $\mathcal{D}$  Kategorien: Ein **Funktor**  $F : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$  ordnet jedem Objekt  $C$  von  $\mathcal{C}$  ein Objekt  $F(C)$  von  $\mathcal{D}$  und ordnet jedem Morphismus  $f : C \rightarrow C'$  in  $\mathcal{C}$  einen Morphismus  $F(f) : F(C) \rightarrow F(C')$  in  $\mathcal{D}$  zu. Dabei muss gelten:

$$F(f \circ g) = F(f) \circ F(g) \quad \text{und} \quad F(\text{id}_C) = \text{id}_{F(C)}$$

### 1.5 Beispiele

- (1) Es gibt offensichtliche „Vergiss“-Funktoen:

$$\begin{aligned} K\text{-VR} &\longrightarrow \text{MENGEN} \\ R\text{-MOD} &\longrightarrow \text{MENGEN} \\ \text{TOP} &\longrightarrow \text{MENGEN} \\ \text{TOP}_{\bullet} &\longrightarrow \text{MENGEN} \\ \text{TOP}_{\bullet} &\longrightarrow \text{TOP} \end{aligned}$$

- (2) Sei  $\mathcal{C}$  eine Kategorie und  $C$  ein Objekt von  $\mathcal{C}$ . Der durch  $C$  **dargestellte Funktor**  $F_C : \mathcal{C} \rightarrow \text{MENGEN}$  ist definiert durch

$$\begin{aligned} F_C(A) &= \text{Mor}_{\mathcal{C}}(C, A) && \text{für } A \in \text{Ob}(\mathcal{C}) \\ F_C(f) : \text{Mor}_{\mathcal{C}}(C, A) &\rightarrow \text{Mor}_{\mathcal{C}}(C, A'), g \mapsto f \circ g && \text{für } f : A \rightarrow A' \text{ in } \mathcal{C} \end{aligned}$$

- (3) Die Fundamentalgruppe definiert einen Funktor

$$\pi_1 : \text{HTOP}_{\bullet} \longrightarrow \text{GRUPPEN}$$

#### Bemerkung

- Ist  $F : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$  ein Funktor so schreiben wir oft kürzer und ungenauer  $f_* := F(f)$ .
- Kleine Kategorien und Funktoren bilden die Kategorie  $\text{KAT}$ .

### 1.6 Definition

Seien  $F, G : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$  zwei Funktoren. Eine **natürliche Transformation**  $\tau : F \rightarrow G$  ordnet jedem  $C \in \text{Ob}(\mathcal{C})$  einen Morphismus  $\tau_C : F(C) \rightarrow G(C)$  in  $\mathcal{D}$  zu, sodass für jedes  $f : C \rightarrow C'$  in  $\mathcal{C}$

$$\begin{array}{ccc} F(C) & \xrightarrow{F(f)} & F(C') \\ \downarrow \tau_C & & \downarrow \tau_{C'} \\ G(C) & \xrightarrow{G(f)} & G(C') \end{array}$$

kommutiert.

**Bemerkung**

Natürliche Transformationen lassen sich komponieren. Für  $\tau : F \rightarrow G$ ,  $\eta : G \rightarrow H$  ist  $\eta \circ \tau : F \rightarrow H$  gegeben durch

$$(\eta \circ \tau)_C := \eta_C \circ \tau_C : F(C) \rightarrow H(C)$$

$$F, G, H : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$$

Genauer: Für eine feste kleine Kategorie  $\mathcal{C}$  und  $\mathcal{D}$  bilden die Funktoren  $\mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$  mit den natürlichen Transformationen eine Kategorie  $\text{FUN}(\mathcal{C}, \mathcal{D})$ .

**1.7 Ausblick**

In der algebraischen Topologie werden topologische Fragen, wie zum Beispiel, wann  $\mathbb{R}^n$  und  $\mathbb{R}^m$  homöomorph sind, in algebraische Fragen übersetzt. Eine Möglichkeit für eine solche Übersetzung sind Funktoren von einer Kategorie von topologischen Räumen, z.B.  $\text{TOP}$ ,  $\text{TOP}_\bullet$ ,  $\text{HTOP}_\bullet$ , in eine algebraisch Kategorie, z.B.  $\text{GRUPPEN}$ ,  $K\text{-VR}$ ,  $\text{ABEL.GRUPPEN}$ ,  $R\text{-MOD}$ . Ein Beispiel für einen solchen Funktor ist die Fundamentalgruppe  $\pi_1$ . Ein Nachteil der Fundamentalgruppe ist, dass diese oft schwierig zu berechnen ist. Wir werden in dieser Vorlesung weitere Funktoren und Methoden für ihr Berechnung kennenlernen.

## 2 Kombinatorische Beschreibungen topologischer Räume

### 2.1 Beispiel

**Graphen** sind einerseits topologische Räume und andererseits kombinatorische Objekte:



### 2.2 Definition

Ein **simplicialer Komplex**  $K = (V, \Sigma)$  besteht aus einer Menge  $V$  und einer Menge  $\Sigma$  von nichtleeren, endlichen Teilmengen von  $V$ , sodass gilt

(i)  $\{v\} \in \Sigma$  für alle  $v \in V$

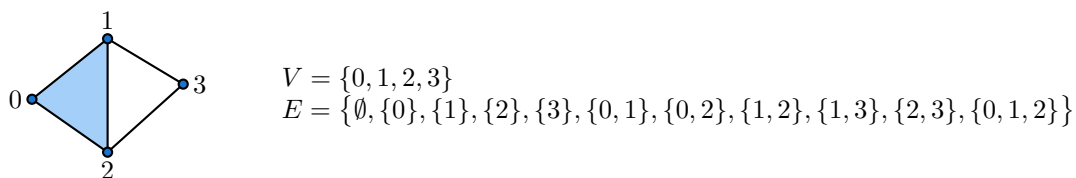
(ii)  $\sigma \in \Sigma, \emptyset \neq \tau \subseteq \sigma \implies \tau \in \Sigma$ .

(Abgeschlossen bzgl. Teilmengenbildung)

Die Elemente von  $V$  heißen die **Ecken** oder **Vertices** von  $K$ . Die Elemente von  $\Sigma$  heißen die **Simplizes** von  $K$ . Enthält  $\sigma \in \Sigma$  genau  $n + 1$  Elemente, so heißt  $\sigma$  ein **n-Simplex**. Ist  $\tau \subseteq \sigma$  mit  $\sigma$  ein  $n$ -Simplex und  $\tau$  ein  $n - 1$ -Simplex, so heißt  $\tau$  eine **Seite** von  $\sigma$ .

Ist  $V$  geordnet, so heißt  $K$  geordnet. Ist  $V$  endlich, so heißt  $K$  endlich.

### 2.3 Beispiel



Ist  $\sigma$  eine endliche Menge, so heißt  $\Delta^\sigma := (\sigma, \mathcal{P}(\sigma) \setminus \{\emptyset\})$  der  $\sigma$ -Simplex. Für  $\sigma = \{0, \dots, n\}$  schreiben wir  $\Delta^n := \Delta^{\{0, \dots, n\}}$ . Es ist



### 2.4 Definition

Sei  $K = (V, \Sigma)$  ein simplicialer Komplex. Ein **Unterkomplex** von  $K$  ist ein simplicialer Komplex  $K_0 = (V_0, \Sigma_0)$  mit  $V_0 \subseteq V$  und  $\Sigma_0 \subseteq \Sigma$ .

#### Beispiel

Sei  $K = (V, \Sigma)$  ein endlicher simplicialer Komplex. Dann ist  $K$  ein Unterkomplex von  $\Delta^V$ .



## 2.5 Definition

Eine **simpliciale Abbildung**  $f : K_1 = (V_1, \Sigma_1) \rightarrow K_2 = (V_2, \Sigma_2)$  zwischen simplizialen Komplexen ist eine Abbildung  $f : V_1 \rightarrow V_2$ , sodass  $f(\sigma_1) \in \Sigma_2$  für alle  $\sigma_1 \in \Sigma_1$ .

## 2.6 Definition

Sei  $\sigma$  eine endliche Menge. Sei  $\mathbb{R}^\sigma = \prod_{v \in \sigma} \mathbb{R}$  mit der Produkttopologie. Sei nun

$$|\Delta^\sigma| := \left\{ x = (x_v)_{v \in \sigma} \in \mathbb{R}^\sigma \mid \sum_{v \in \sigma} x_v = 1, x_v \in [0, 1] \forall v \in \sigma \right\}$$

Ist  $\tau \subseteq \sigma$ , so erhalten wir eine Abbildung  $\iota_\tau^\sigma : |\Delta^\tau| \rightarrow |\Delta^\sigma|$  indem wir  $(x_v)_{v \in \tau} \in |\Delta^\tau|$  durch  $x_v = 0$  für  $v \in \sigma \setminus \tau$  zu  $(x_v)_{v \in \sigma}$  auffüllen. Ist  $\eta \subseteq \tau \subseteq \sigma$  so gilt  $\iota_\eta^\sigma = \iota_\tau^\sigma \circ \iota_\eta^\tau$ .

Sei  $K = (V, \Sigma)$  ein simplizialer Komplex. Die **geometrische Realisierung**  $|K|$  von  $K$  ist definiert als

$$|K| := \coprod_{\sigma \in \Sigma} \{\sigma\} \times |\Delta^\sigma| / \sim$$

wobei  $\sim$  die durch  $(\tau, x) \sim (\sigma, \iota_\tau^\sigma(x))$  für  $\tau \subseteq \sigma$  erzeugte Äquivalenzrelation ist. Versehen mit der Quotiententopologie ist  $|K|$  ein topologischer Raum.

## 2.7 Beispiel

- Sei  $\partial\Delta^n := (\{0, \dots, n\}, \mathcal{P}(\{0, \dots, n\}) \setminus \{\emptyset, \{0, \dots, n\}\}) = \Delta^n \setminus \{0, \dots, n\}$ .  $\partial\Delta^n$  heißt der **Rand des  $n$ -Simplexes**. Es gilt

$$\begin{aligned} |\partial\Delta^1| &= \bullet \bullet \cong S^0 \\ |\partial\Delta^2| &= \triangle \cong S^1 \\ |\partial\Delta^3| &= \text{Dreieck} \cong S^2 \end{aligned}$$

Allgemein gilt  $|\partial\Delta^n| \cong S^{n-1}$ .

$$\bullet \quad T^2 = S^1 \times S^1 \cong \text{Torus} \cong \left| \begin{array}{c} \text{3x3 Gitter mit Diagonalen} \end{array} \right|$$

## 2.8 Definition

Ein topologischer Raum  $X$  heißt ein **Polyeder**, falls er homöomorph zur Realisierung eines simplizialen Komplexes ist.

## 2.9 Definition

Sei  $K = (V, \Sigma)$  ein endlicher simplizialer Komplex. Sei  $a_n := \#\{\sigma \in \Sigma \mid \sigma \text{ ist ein } n\text{-Simplex von } K\}$ . Dann heißt  $\chi(K) := \sum_{n \in \mathbb{N}} (-1)^n a_n$  die **Euler-Charakteristik** von  $K$ .

### Beispiel

$$\chi(\triangle) = 3 - 3 = 0$$

$$\chi(\square) = 4 - 4 = 0$$

$$\chi([n\text{-Eck}]) = n - n = 0$$

$$\chi(\partial\Delta^3 = \text{tetrahedron}) = 4 - 6 + 4 = 2$$

$$\chi(\text{cube}) = 8 - 12 + 6 = 2$$

$$\chi(\text{octahedron}) = 6 - 12 + 8 = 2$$

### 2.10 Satz

Seien  $K$  und  $K'$  endliche simpliziale Komplexe. Gilt  $|K| \cong |K'|$ , so gilt

$$\chi(K) = \chi(K').$$

### Bemerkung

Die Euler-Charakteristik ist also eine topologische Invariante von simplizialen Komplexen. Sie hängt nur von der topologischen Struktur von  $|K|$  und nicht von der kombinatorischen Struktur von  $K$  ab.

### 3 Simpliciale Homologie

#### 3.1 Definition

Sei  $S$  eine Menge. Sei  $R$  ein Ring. Der **freie  $R$ -Modul mit Basis  $S$** ,  $R[S]$ , besteht aus allen endlichen formalen  $R$ -Linearkombinationen Ring mit Eins

$$\sum_{s \in S} r_s \cdot s, \quad r_s \in R, r_s \neq 0 \text{ für endliche viele } s \in S$$

Die  $R$ -Modulstruktur auf  $R[S]$  ist definiert durch:

$$r \cdot \left( \sum_{s \in S} r_s \cdot s \right) := \sum_{s \in S} (r \cdot r_s) \cdot s \quad \left( \sum_{s \in S} r_s \cdot s \right) + \left( \sum_{s \in S} r'_s \cdot s \right) := \sum_{s \in S} (r_s + r'_s) \cdot s$$

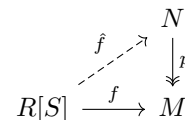
#### Bemerkung

Mittels  $s = \sum_{s' \in S} \delta_{s,s'} \cdot s'$  fassen wir  $S$  als Teilmenge von  $R[S]$  auf.

#### 3.2 Lemma

Sei  $S$  eine Menge,  $R$  ein Ring. Es gilt

- 1) Ist  $M$  ein  $R$ -Modul und  $i : S \rightarrow M$  eine Abbildung, so gibt es genau eine  $R$ -lineare Abbildung  $\varphi : R[S] \rightarrow M$ , die  $i$  fortsetzt.
- 2) Sei  $f : R[S] \rightarrow M$   $R$ -linear und  $p : N \rightarrow M$   $R$ -linear und surjektiv. Dann gibt es  $\hat{f} : R[S] \rightarrow N$  mit  $p \circ \hat{f} = f$ .



#### Beweis

- 1) Eine solche Abbildung ist gegeben durch  $\varphi(\sum_{s \in S} r_s \cdot s) = \sum_{s \in S} r_s \cdot i(s)$ . Ist  $\varphi'$  eine zweite, so gilt

$$\hat{\varphi} \left( \sum_{s \in S} r_s \cdot s \right) = \sum_{s \in S} r_s \cdot \hat{\varphi}(s) = \sum_{s \in S} r_s \cdot i(s)$$

- 2) Wähle für jedes  $s \in S$  ein Urbild  $j(s) \in N$  für  $f(s) \in M$  unter  $p : N \rightarrow M$ . Nun wende 1) auf  $j : S \rightarrow N$  an, um  $\hat{f} : R[S] \rightarrow N$  mit  $\hat{f}(s) = j(s)$  zu erhalten. Nun ist  $p \circ \hat{f}(s) = f(s)$  für alle  $s \in S$ . Mit der Eindeutigkeit aus 1) folgt  $p \circ \hat{f} = f$ . □

#### 3.3 Beispiel

- (i) Sei  $K$  ein Körper und  $V, M, N$  seien  $K$ -Vektorräume,  $f : V \rightarrow M$ ,  $p : N \rightarrow M$  seien  $K$ -linear,  $p$  surjektiv. Dann gibt es  $\hat{f} : V \rightarrow N$  mit  $p \circ \hat{f} = f$ . Wir können Lemma 3.2 benutzen, da  $V$  eine Basis  $B$  hat, also  $V \cong K[B]$ .
- (ii) Sei  $R = \mathbb{Z}$ , sei  $V = \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$  und  $M = \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ , sowie  $f = \text{id} : V \rightarrow M$ ,  $N = \mathbb{Z}$  und  $p : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$  die Projektion mit  $p(n) = n + 2\mathbb{Z}$ . Dann gibt es keine  $\mathbb{Z}$ -lineare Abbildung  $\hat{f} : \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}$  mit  $p \circ \hat{f} = f$ . Ist  $\hat{f}(1 + 2\mathbb{Z}) = n \in \mathbb{Z}$ , so folgt

$$2n = 2 \cdot \hat{f}(1 + 2\mathbb{Z}) = \hat{f}(2 \cdot (1 + 2\mathbb{Z})) = \hat{f}(0 + 2\mathbb{Z}) = 0$$

also  $n = 0$ .

### 3.4 Definition

Sei  $K = (V, \Sigma)$  ein simplizialer Komplex. Sei  $\Sigma_n := \{\sigma \in \Sigma \mid \sigma \text{ ist ein } n\text{-Simplex}\}$ . Sei  $R$  ein Ring. Der  **$n$ -te Kettenmodul** von  $K$  über  $R$  ist definiert als

$$C_n(K; R) := R[\Sigma_n]$$

Ist  $R = \mathbb{Z}$ , so schreiben wir auch kurz  $C_n(K) := C_n(K; \mathbb{Z})$ .

### 3.5 Definition

Sei  $K = (V, \Sigma)$  ein geordneter simplizialer Komplex. Sei  $\sigma = \{v_0, \dots, v_n\}$  ein  $n$ -Simplex von  $K$ . Bezüglich der Ordnung von  $K$  sei dabei  $v_0 < v_1 < \dots < v_n$ . Sei  $\tau$  ein  $(n-1)$ -Simplex von  $K$ . Definiere

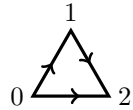
$$\varepsilon_\sigma^\tau := \begin{cases} (-1)^i, & \text{falls } \tau = \{v_0, \dots, v_{i-1}, v_{i+1}, \dots, v_n\} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

#### Bemerkung

$\varepsilon_\sigma^\tau \neq 0 \iff \tau$  ist eine Seite von  $\sigma$ .

#### Beispiel

Für den folgenden geordneten simplizialen Komplex gilt



$$\varepsilon_{\{0,1,2\}}^{\{0,1\}} = 1, \quad \varepsilon_{\{0,1,2\}}^{\{0,2\}} = -1, \quad \varepsilon_{\{0,1,2\}}^{\{1,2\}} = 1$$

### 3.6 Definition

Sei  $K = (V, \Sigma)$  ein geordneter simplizialer Komplex. Die  **$n$ -te Randabbildung**

$$\partial_n : C_n(K; R) \longrightarrow C_{n-1}(K; R)$$

$= R[\Sigma_n] \qquad \qquad \qquad = R[\Sigma_{n-1}]$

ist definiert durch

$$\partial_n(\sigma) = \sum_{\tau \in \Sigma_{n-1}} \varepsilon_\sigma^\tau \cdot \tau \quad \text{für } \sigma \in \Sigma_n$$

### 3.7 Proposition

$$\partial_{n-1} \circ \partial_n = 0$$

Damit folgt  $\text{Im } \partial_n \subseteq \ker \partial_{n-1}$ .

#### Beweis (mit Lemma 3.8)

Sei  $\sigma$  ein  $n$ -Simplex von  $K$ . Dann gilt

$$\begin{aligned} \partial_{n-1}(\partial_n(\sigma)) &= \partial_{n-1}\left(\sum_{\tau \in \Sigma_{n-1}} \varepsilon_\sigma^\tau \cdot \tau\right) = \sum_{\tau \in \Sigma_{n-1}} \varepsilon_\sigma^\tau \cdot \partial_{n-1}(\tau) = \sum_{\tau \in \Sigma_{n-1}} \varepsilon_\sigma^\tau \left(\sum_{\eta \in \Sigma_{n-2}} \varepsilon_\tau^\eta \cdot \eta\right) \\ &= \sum_{\eta \in \Sigma_{n-2}} \left(\sum_{\tau \in \Sigma_{n-1}, \eta \subseteq \tau \subseteq \sigma} \varepsilon_\tau^\eta \cdot \varepsilon_\sigma^\tau\right) \eta \\ &\stackrel{\text{Lemma 3.8}}{=} 0 \end{aligned} \quad \square$$

### 3.8 Lemma

Sei  $\sigma$  ein  $n$ -Simplex. Sei  $\eta \subseteq \sigma$  ein  $(n-2)$ -Simplex. Dann gibt es genau zwei  $(n-1)$ -Simplizes  $\tau, \tau'$  von  $K$ , die eine Seite von  $\sigma$  sind und  $\eta$  als Seite enthalten. Es gilt

$$\varepsilon_{\tau}^{\eta} \cdot \varepsilon_{\sigma}^{\tau} = -\varepsilon_{\tau'}^{\eta} \cdot \varepsilon_{\sigma}^{\tau'}$$

#### Beweis

Sei  $\sigma = \{v_0, \dots, v_n\}$  mit  $v_0 < v_1 < \dots < v_n$ . Dann ist  $\eta = \{v_0, \dots, v_n\} \setminus \{v_i, v_j\}$  mit  $i < j$ . Dann sind  $\tau = \{v_0, \dots, v_{i-1}, v_{i+1}, \dots, v_n\}$  und  $\tau' = \{v_0, \dots, v_{j-1}, v_{j+1}, \dots, v_n\}$  die gesuchten  $(n-1)$ -Simplizes und es gilt

$$\varepsilon_{\sigma}^{\tau} = (-1)^i, \quad \varepsilon_{\sigma}^{\tau'} = (-1)^j, \quad \varepsilon_{\tau}^{\eta} = (-1)^{j-1}, \quad \varepsilon_{\tau'}^{\eta} = (-1)^i \quad \square$$

### 3.9 Notation

Für  $\sigma \in \Sigma_n$ ,  $\sigma = \{v_0, \dots, v_n\}$  mit  $v_0 < \dots < v_n$  schreiben wir

$$\delta^j \sigma := \{v_0, \dots, v_{j-1}, v_{j+1}, \dots, v_n\} \in \Sigma_{n-1}$$

Dann ist  $\partial_n(\sigma) = \sum_{j=0}^n (-1)^j \cdot \delta^j \sigma$ .

RevChap3

### 3.10 Definition

Sei  $K$  ein geordneter simplizialer Komplex. Der  **$n$ -te Homologiemodul** von  $K$  über  $R$  ist definiert als

$$H_n(K; R) := \frac{\ker \partial_n : C_n(K; R) \rightarrow C_{n-1}(K; R)}{\operatorname{Im} \partial_{n+1} : C_{n+1}(K; R) \rightarrow C_n(K; R)}$$

Für  $n = 0$  interpretieren wir  $\partial_0$  als die Nullabbildung. Daher gilt

$$H_0(K; R) = \frac{C_0(K; R)}{\operatorname{Im} \partial_1 : C_1(K; R) \rightarrow C_0(K; R)}$$

### 3.11 Beispiele

- (1) Sei  $K = \bullet$ . Dann ist  $C_0(K; R) \cong R$  und  $C_i(K; R) = 0$  für  $i > 0$ . Weiter ist  $H_0(K; R) = C_0(K; R) \cong R$  und  $H_i(K; R) = 0$  für  $i > 0$ .
- (2) Seien nun  $K = K_n$  das  $n$ -Eck, wobei  $n \geq 3$ . Also

$$\begin{aligned} \Sigma_0 &= \{\tau_1 = \{1\}, \tau_2 = \{2\}, \dots, \tau_n = \{n\}\} \\ \Sigma_1 &= \{\sigma_1 = \{1, 2\}, \dots, \sigma_{n-1} = \{n_1, n\}, \sigma_n = \{n, 1\}\} \end{aligned}$$

Dann gilt

$$\begin{aligned} C_0(K; R) &= R[\Sigma_0] \cong R^n \\ C_1(K; R) &= R[\Sigma_1] \cong R^n \\ C_i(K; R) &= 0 \text{ für } i > 1, \text{ insbesondere } H_i(K; R) = 0 \text{ für } i > 1 \end{aligned}$$

Es ist dann  $\partial_2 = \partial_3 = \dots = 0$ . Interessant ist  $\partial_1 : C_1(K; R) \rightarrow C_0(K; R)$ , denn es gilt

$$\partial_1(\sigma_i) = \begin{cases} \tau_{i+1} - \tau_i, & \text{falls } i = 1, \dots, n-1 \\ \tau_n - \tau_1, & \text{falls } i = n \end{cases}$$

Mit  $\sigma'_1 := \sigma_1, \sigma'_2 = \sigma_2, \dots, \sigma'_{n-1} := \sigma_{n-1}, \sigma'_n := -\sigma_n$  gilt dann

$$\partial_1(\sigma'_i) = \tau_{i+1} - \tau_i$$

mit der Konvention  $\tau_{n+1} = \tau_1$ . Also gilt

$$\partial_1\left(\sum_{i=1}^n r_i \sigma'_i\right) = \sum_{i=1}^n r_i (\tau_{i+1} - \tau_i) = \sum_{i=1}^n (r_{i-1} - r_i) \tau_i$$

Es folgt

$$\begin{aligned} \ker \partial_1 &= \left\{ \sum_{i=1}^n r_i \sigma'_i \mid r_1 = r_2 = \dots = r_n \right\} \subseteq C_1(K; R) \\ \operatorname{Im} \partial_1 &= \left\{ \sum_{i=1}^n s_i \tau_i \mid \sum_{i=1}^n s_i = 0 \right\} \subseteq C_0(K; R) \end{aligned}$$

Ist  $\sum_{i=1}^n s_i = 0$ , so folgt für  $r_n = 0, r_1 = -s_1, r_2 = -s_1 - s_2, \dots, r_{n-1} = -s_1 - s_2 - \dots - s_{n-1}$

$$\partial_1\left(\sum_{i=1}^n r_i \sigma'_i\right) = \sum_{i=1}^n s_i \tau_i$$

Es folgt  $[K] \in H_1(K; R) = \ker \partial_1 / \operatorname{Im} \partial_2 = \ker \partial_1 \cong R \ni 1$  und

$$[\tau_i] = [p] \in H_0(K; R) = \ker \partial_0 / \operatorname{Im} \partial_1 = R[\Sigma_0] / \{\sum_{i=1}^n s_i \tau_i \mid \sum_{i=1}^n s_i = 0\} \cong R \ni 1$$

(via  $\sum_{i=1}^n s_i \tau_i \mapsto \sum_{i=1}^n s_i$ )

### 3.12 Definition

Sei  $R$  ein Ring. Ein **R-Kettenkomplex**  $(C_*, d_*)$  ist eine Folge von  $R$ -Moduln  $(C_n)_{n \in \mathbb{N}}$  zusammen mit  $R$ -linearen Abbildungen  $(d_n : C_n \rightarrow C_{n-1})_{n \geq 1}$ , so dass  $d_n \circ d_{n+1} = 0$ . Die  $d_n$  heißen die **Randabbildungen** von  $(C_*, d_*)$ , die  $C_n$  die **Kettenmoduln**. Die **n-te Homologie** eines Kettenkomplexes  $(C_*, d_*)$  ist definiert als

$$H_n(C_*, d_*) := \frac{\ker d_n : C_n \rightarrow C_{n-1}}{\operatorname{Im} d_{n+1} : C_{n+1} \rightarrow C_n}$$

### 3.13 Bemerkung

- (i) Oft werden auch Kettenkomplexe betrachtet, die  $\mathbb{Z}$  statt  $\mathbb{N}$  verwenden.
- (ii) Ein Kettenkomplex  $(C_*, d_*)$  heißt endlich erzeugt, wenn alle  $C_n$  endlich erzeugte  $R$ -Moduln sind und  $C_n \neq 0$  nur für endlich viele  $n$  ist.

### 3.14 Definition

Zu einem geordneten simplizialen Komplex  $K$  heißt  $(C_*(K; R), \partial_*)$  der **simpliziale Kettenkomplex** von  $K$  über  $R$ .

#### Bemerkung

Ist  $K$  endlich, so ist  $(C_*(K; R), \partial_*)$  endlich erzeugt.

## 4 Euler-Charakteristik von Kettenkomplexen

### 4.1 Wiederholung

Sei  $A$  eine abelsche Gruppe. Dann ist

$$TA := \left\{ a \in A \mid \exists n \geq 1 : na = \underbrace{a + \dots + a}_{n\text{-mal}} = 0 \right\}$$

die **Torsionsgruppe** von  $A$ . Ist  $A$  endlich erzeugt, so ist auch  $TA$  endlich erzeugt und es gibt Primzahlpotenzen  $p_1^{n_1}, \dots, p_k^{n_k}$  mit

$$TA \cong \mathbb{Z}/(p_1^{n_1}) \oplus \dots \oplus \mathbb{Z}/(p_k^{n_k})$$

Weiter gibt es dann  $n$  mit  $A \cong \mathbb{Z}^n \oplus TA$ .  $\text{Rg } A := n$  ist der Rang von  $A$ .

### 4.2 Lemma

Sei  $A$  eine endlich erzeugte abelsche Gruppe. Dann gilt  $\text{Rg } A = \max\{m \mid \exists C \leq A, C \cong \mathbb{Z}^m\}$ .

#### Beweis

Da  $A \cong \mathbb{Z}^n \oplus TA$  genügt zu zeigen: Ist  $\varphi : \mathbb{Z}^m \rightarrow \mathbb{Z}^n \oplus TA$  ein injektiver Gruppenhomomorphismus, so ist  $m \leq n$ . Schreibe  $\varphi = \varphi_0 \oplus \varphi_1$ , also  $\varphi(a) = \varphi_0(a) + \varphi_1(a)$  mit  $\varphi_0 : \mathbb{Z}^m \rightarrow \mathbb{Z}^n$ ,  $\varphi_1 : \mathbb{Z}^m \rightarrow TA$ .

Behauptung:  $\varphi_0$  ist injektiv. Zu  $v \in \mathbb{Z}^m$  wähle  $k \geq 1$  mit  $k \cdot \varphi_1(v) = 0 \in TA$ . Dann ist  $\varphi_1(kv) = k\varphi_1(v) = 0$ . Ist  $v \neq 0$ , so ist  $k \cdot v \neq 0 \in \mathbb{Z}^m$ , also ist  $\varphi(kv) \neq 0$  und damit  $\varphi_0(kv) \neq 0$ . Es folgt  $\varphi_0(v) \neq 0$ , da sonst  $\varphi_0(k \cdot v) = k \cdot \varphi_0(v) = 0$ . Damit ist die Behauptung gezeigt.

Gruppenhomomorphismen  $\varphi_0 : \mathbb{Z}^m \rightarrow \mathbb{Z}^n$  werden durch  $n \times m$ -Matrizen beschrieben: Es gibt  $A = (a_{ij}) \in \mathbb{Z}^{n \times m}$  mit

$$\varphi_0 \begin{pmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^m a_{1j} z_j \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^m a_{nj} z_j \end{pmatrix}$$

Ist  $m > n$ , so hat  $A$ , aufgefasst als Matrix über  $\mathbb{Q}$ , einen Kern. Es gibt also einen Vektor  $w = \begin{pmatrix} a_1/b_1 \\ \vdots \\ a_m/b_m \end{pmatrix}$  mit  $Aw = 0$ ,  $w \neq 0$ . Dann ist  $(b_1, \dots, b_m) \cdot w \in \mathbb{Z}^m$  und

$$\varphi_0((b_1, \dots, b_m) \cdot w) = A \cdot ((b_1, \dots, b_m) \cdot w) = (b_1, \dots, b_m) \cdot A \cdot w = 0$$

Also gilt  $m \leq n$ . □

### 4.3 Definition

Seien  $M_0, M_1, M_2$   $R$ -Moduln und  $f_0 : M_0 \rightarrow M_1$ ,  $f_1 : M_1 \rightarrow M_2$   $R$ -lineare Abbildungen. Dann heißt

$$M_0 \xrightarrow{f_0} M_1 \xrightarrow{f_1} M_2 \quad (\star)$$

eine **kurze exakte Sequenz**, wenn gilt:

- (i)  $f_0$  ist injektiv, (ii)  $\text{Im } f_0 = \ker f_1$ , (iii)  $f_1$  ist surjektiv.

#### Bemerkung

Oft sagt man  $M_0 \xrightarrow{f_0} M_1 \xrightarrow{f_1} M_2$  ist exakt in  $M_1$ , wenn  $\text{Im } f_0 = \ker f_1$  ist. Dann ist  $(\star)$  eine kurze exakte Folge, wenn

$$0 \longrightarrow M_0 \xrightarrow{f_0} M_1 \xrightarrow{f_1} M_2 \longrightarrow 0$$

exakt in  $M_0, M_1$  und  $M_2$  ist.

## 4.4 Beispiele

1)

$$\begin{aligned} M_0 &\xrightarrow{i} M_0 \oplus M_1 \xrightarrow{p} M_1 \\ v_0 &\xrightarrow{i} (v_0, 0) \quad (v_0, v_1) \xrightarrow{p} v_1 \end{aligned}$$

ist eine kurze exakte Folge.

2)  $\mathbb{Z} \xrightarrow{n\cdot} \mathbb{Z} \twoheadrightarrow \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$  ist eine kurze exakte Folge.

## 4.5 Bemerkung

Eine **Spaltung** für eine kurze exakte Folge  $M_0 \xrightarrow{f_0} M_1 \xrightarrow{f_1} M_2$  ist eine  $R$ -lineare Abbildung  $s : M_2 \rightarrow M_1$  mit  $f_1 \circ s = \text{id}_{M_2}$ . In diesem Fall erhalten wir einen Isomorphismus  $M_0 \oplus M_2 \rightarrow M_1$ ,  $(v_0, v_2) \mapsto f_0(v_0) + s(v_2)$ .

**Injektivität:** Sei  $(v_0, v_2) \in M_0 \oplus M_2$  mit  $f_0(v_0) + s(v_2) = 0$ . Dann gilt

$$0 = f_1(f_0(v_0) + s(v_2)) = v_2 \implies f_0(v_0) = 0 \implies v_0 = 0$$

**Surjektivität:** Sei  $v_1 \in M_1$ . Betrachte  $v_2 := f_1(v_1)$ . Dann ist  $v_1 - s(v_2) \in \ker f_1 = \text{Im } f_0$ , also gibt es  $v_0$  in  $M_0$  mit  $f_0(v_0) = v_1 - s(v_2)$ . Damit ist  $v_1 = f_0(v_0) + s(v_2)$ .

## 4.6 Bemerkung

1)  $\mathbb{Z} \xrightarrow{n\cdot} \mathbb{Z} \twoheadrightarrow \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$  spaltet nicht.

2) Ist  $(\star) M_0 \xrightarrow{f_0} M_1 \xrightarrow{f_1} M_2$  eine kurze exakte Folge mit  $M_2$  frei, also  $M_2 \cong R[S]$ , so spaltet  $(\star)$ .  
Siehe Lemma 3.2. Insbesondere ist  $M_1 \cong M_0 \oplus M_2$ .

## 4.7 Bemerkung

Der Rang für alle endlich erzeugten abelschen Gruppen ist additiv:

$$\text{Rg}(A \oplus B) = \text{Rg } A + \text{Rg } B,$$

da  $A \cong \mathbb{Z}^{\text{Rg } A} \oplus TA$ ,  $B \cong \mathbb{Z}^{\text{Rg } B} \oplus TB$ , also

$$A \oplus B \cong \mathbb{Z}^{\text{Rg } A + \text{Rg } B} \oplus \underbrace{TA \oplus TB}_{=T(A \oplus B)}$$

## 4.8 Proposition

Der Rang von endlich erzeugten abelschen Gruppen ist additiv für kurze exakte Folgen: Ist  $(\star) A \xrightarrow{i} B \xrightarrow{p} C$  eine kurze exakte Folge von endlich erzeugten abelschen Gruppen, so gilt  $\text{Rg } B = \text{Rg } A + \text{Rg } C$ .

**Beispiel**  
mit  $\mathbb{Z}$

**Beweis**

Spaltet  $(\star)$ , so ist  $B \cong A \oplus C$  und die Behauptung folgt aus der Bemerkung 4.7.



Wir können annehmen:  $C = \mathbb{Z}^n \oplus TC$ . Wir erhalten:

$$\begin{array}{ccccc}
 A & \xhookrightarrow{i} & p^{-1}(\mathbb{Z}^n) & \xrightarrow{p} & \mathbb{Z}^n \\
 \parallel & & \downarrow i'' & & \downarrow i' \\
 A & \xrightarrow{i} & B & \xrightarrow{p} & C \\
 & & \downarrow p'' & & \downarrow p' \\
 & & B/p^{-1}(\mathbb{Z}^n) & \xrightarrow{p' \circ p} & TC
 \end{array} \quad (*)$$

Ist  $p' \circ p(b) = 0$ , so gibt es  $v \in \mathbb{Z}^n$  mit  $i'(v) = p(b)$ . Nun gibt es  $v' \in p^{-1}(\mathbb{Z}^n)$  mit  $p(v') = v$ . Es folgt

$$p(i''(v')) = p(b)$$

also  $i''(v') - b \in \ker p = i(A)$ . Da  $i(A) \subseteq i''(p^{-1}(\mathbb{Z}^n))$  folgt  $b \in i''(p^{-1}(\mathbb{Z}^n))$ . In  $(*)$  sind die Spalten und Zeilen exakt. Da  $\mathbb{Z}^n$  frei ist, spaltet  $A \rightarrow p^{-1}(\mathbb{Z}^n) \rightarrow \mathbb{Z}^n$  und es gilt

$$\operatorname{Rg} A + \operatorname{Rg} C = \operatorname{Rg} A + n = \operatorname{Rg}(p^{-1}(\mathbb{Z}^n))$$

Es bleibt zu zeigen:  $\operatorname{Rg} B = \operatorname{Rg}(p^{-1}(\mathbb{Z}^n))$ .

Nebenbei: Ist  $A' \subseteq B'$ , so gilt  $\operatorname{Rg} A' \leq \operatorname{Rg} B'$ , denn

$$\operatorname{Rg} A' = \max \left\{ n' \mid \mathbb{Z}^{n'} \cong C' \leq A' \right\} \leq \max \left\{ n' \mid \mathbb{Z}^{n'} \cong C' \leq B' \right\} = \operatorname{Rg} B'.$$

Betrachte die kurze exakte Folge  $p^{-1}(\mathbb{Z}^n) \rightarrow B \rightarrow B/p^{-1}(\mathbb{Z}^n)$ . Wegen  $B/p^{-1}(\mathbb{Z}^n) \cong TC$  gibt es ein  $k$  mit  $k(b + p^{-1}(\mathbb{Z}^n)) = 0$  für alle  $b \in B$ . Also  $kb \in p^{-1}(\mathbb{Z}^n)$ . Es folgt  $kB \leq p^{-1}(\mathbb{Z}^n) \leq B$ . Ist  $B \cong \mathbb{Z}^{\operatorname{Rg} B} + TB$ , so ist  $kB \cong (k\mathbb{Z})^{\operatorname{Rg} B} + T(kB)$  und  $\operatorname{Rg} kB = n = \operatorname{Rg} B$ . Mit der Nebenbemerkung folgt  $\operatorname{Rg} p^{-1}(\mathbb{Z}^n) = \operatorname{Rg} B$ .  $\square$

#### Beweis mit Tensorprodukten (Skizze)

- $\mathbb{Q} \otimes_{\mathbb{Z}} : \mathbb{Z}\text{-Mod} \rightarrow \mathbb{Q}\text{-VR}$  ist ein Funktor.
- $\operatorname{Rg} A = \dim_{\mathbb{Q}} \mathbb{Q} \otimes_{\mathbb{Z}} A$ 
  - (a)  $\mathbb{Q} \otimes_{\mathbb{Z}} (X \oplus Y) = \mathbb{Q} \otimes_{\mathbb{Z}} X \oplus \mathbb{Q} \otimes_{\mathbb{Z}} Y$
  - (b)  $\mathbb{Q} \otimes_{\mathbb{Z}} \mathbb{Z}^n \cong \mathbb{Q}^n$
  - (c)  $\mathbb{Q} \otimes_{\mathbb{Z}} T \cong 0$  für  $T$  ein Torsionsmodul.
- Ist  $A \rightarrow B \rightarrow C$  eine kurze exakte Folge, so ist auch  $\mathbb{Q} \otimes_{\mathbb{Z}} A \rightarrow \mathbb{Q} \otimes_{\mathbb{Z}} B \rightarrow \mathbb{Q} \otimes_{\mathbb{Z}} C$  eine kurze exakte Folge.
- Jede kurze exakte Folge von  $\mathbb{Q}$ -Vektorräumen spaltet und es gilt  $\dim_{\mathbb{Q}}(V \oplus W) = \dim_{\mathbb{Q}}(V) + \dim_{\mathbb{Q}}(W)$ .

## 4.9 Definition

Sei  $(C_*, d_*)$  ein endlich erzeugter  $\mathbb{Z}$ -Kettenkomplex.

$$\chi(C_*, d_*) := \sum_{i=0}^{\infty} \operatorname{Rg}(C_i) = \sum_{i=0}^{n_0} \operatorname{Rg}(C_i)$$

heißt die **Eulercharakteristik** von  $(C_*, d_*)$ . Dabei ist  $n_0$  so gewählt, dass  $C_n = 0$  für alle  $n > n_0$ .

#### 4.10 Satz

Sei  $(C_*, d_*)$  ein endlich erzeugter  $\mathbb{Z}$ -Kettenkomplex. Dann gilt

$$\chi(C_*) = \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^i \operatorname{Rg} H_i(C_*, d_*).$$

##### Beweis

Sei  $B_{n+1} := \operatorname{Im} \partial_{n+1} : C_{n+1} \rightarrow C_n$  und  $Z_n := \ker \partial_n : C_n \rightarrow C_{n-1}$ . Also  $H_n(C_*, d_*) = Z_n / B_{n+1}$ . Als Untermoduln von  $C_n$  sind  $Z_n$  und  $B_n$  endlich erzeugt (LA2). Insbesondere ist auch  $H_n(C_*, d_*)$  endlich erzeugt und der Rang somit definiert. Auch  $B_{n+1}$  ist Untermodul des endlich erzeugten  $\mathbb{Z}$ -Moduls  $C_n$  und somit endlich erzeugt. Wir erhalten kurze exakte Folgen:

$$\begin{aligned} B_{n+1} &\longrightarrow Z_n \longrightarrow H_n(C_*, d_*) \\ Z_n &\hookrightarrow C_n \twoheadrightarrow B_n \end{aligned}$$

Folglich gilt  $\operatorname{Rg} Z_n = \operatorname{Rg} B_{n+1} + \operatorname{Rg} H_n(C_*, d_*)$  und  $\operatorname{Rg} C_n = \operatorname{Rg} Z_n + \operatorname{Rg} B_n$ . Also gilt

$$\begin{aligned} \chi(C_*) &= \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i \operatorname{Rg} C_i = \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i (\operatorname{Rg} Z_i + \operatorname{Rg} B_i) \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i (\operatorname{Rg} H_i(C_*, d_*) + \operatorname{Rg} B_{i+1} + \operatorname{Rg} B_i) \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i \operatorname{Rg} H_i(C_*, d_*) + \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i \operatorname{Rg} B_{i+1} + \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i \operatorname{Rg} B_i \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i \operatorname{Rg} H_i(C_*, d_*) \quad \square \end{aligned}$$

#### 4.11 Korollar

Sei  $K$  ein endlicher, geordneter simplizialer Kettenkomplex. Dann gilt

$$\chi(K) = \sum_{i=1}^{\dim K} (-1)^i \operatorname{Rg} H_i(K; \mathbb{Z})$$

##### Beweis

Wende den Satz 4.10 auf den simplizialen Kettenkomplex von  $K$  an. Da

$$\operatorname{Rg} C_n(K; \mathbb{Z}) = \operatorname{Rg} \mathbb{Z}[\Sigma_n] = \# \text{ } n\text{-Simplizes in } K$$

ist

$$\chi(K) = \chi(C_*(K; \mathbb{Z}), \partial_*) = \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i \operatorname{Rg} H_i(C_*(K; \mathbb{Z}), \partial_*) = \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i \operatorname{Rg} H_i(K; \mathbb{Z}) \quad \square$$

## 5 Singuläre Homologie

### 5.1 Definition

Sei  $X$  ein topologischer Raum. Sei  $S_n(X)$  die Menge aller stetigen Abbildungen  $\sigma : |\Delta^n| \rightarrow X$ . Elemente von  $S_n(X)$  heißen **singuläre Simplices** in  $X$ . Sei  $R$  ein Ring. Der  **$n$ -te (singuläre) Kettenmodul** von  $X$  über  $R$  ist

$$C_n(X; R) := R[S_n(X)]$$

### 5.2 Definition

Für  $\sigma \in S_n(X)$  und  $j \in \{0, \dots, n\}$  sei  $\delta_j \sigma \in S_{n-1}(X)$  die Einschränkung von  $\sigma$  auf die  $j$ -te Seite von  $|\Delta^n|$ , also  $\delta_j(\sigma) = \sigma \circ \iota_{n,j}$ , wobei  $\iota_{n,j} : |\Delta^{n-1}| \rightarrow |\Delta^n|$  die Inklusion der  $j$ -ten Seite ist:

$$\iota_{n,j}(x_0, \dots, x_{n-1}) = (x_0, \dots, x_{j-1}, 0, x_j, \dots, x_{n-1})$$

### 5.3 Bemerkung

Es gilt  $\iota_{n,j} = |i_{n,j}|$  wobei  $i_{n,j} : \Delta^{n-1} \rightarrow \Delta^n$  gegeben ist durch

$$i_{n,j}(k) = \begin{cases} k, & \text{falls } k < j \\ k+1, & \text{falls } k \geq j \end{cases}$$

vergleiche Blatt 2,  
Aufgabe 2

### 5.4 Definition

Die  **$n$ -te singuläre Randabbildung**  $\partial_n : C_n(X; R) \rightarrow C_{n-1}(X; R)$  ist definiert durch

$$\partial_n(\sigma) = \sum_{j=0}^n (-1)^j \cdot \delta_j(\sigma).$$

### 5.5 Proposition

$$\partial_{n-1} \circ \partial_n = 0$$

**Beweis (mit Lemma 5.6)**

$$\begin{aligned} \partial_{n-1} \partial_n(\sigma) &= \partial_{n-1} \left( \sum_{j=0}^n (-1)^j \delta_j(\sigma) \right) = \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{j=0}^n (-1)^{j+k} \delta_k \delta_j(\sigma) \\ &= \sum_{0 \leq k < j \leq n} (-1)^{k+j} \delta_k \delta_j(\sigma) + \sum_{0 \leq j \leq k \leq n-1} (-1)^{k+j} \delta_k \delta_j(\sigma) \\ &\stackrel{\text{Lemma 5.6}}{=} \sum_{0 \leq k < j \leq n} (-1)^{k+j} \delta_k \delta_j(\sigma) + \sum_{0 \leq j \leq k \leq n-1} (-1)^{k+j} \delta_j \delta_{k+1}(\sigma) \\ &= \sum_{0 \leq k < j \leq n} (-1)^{k+j} \delta_k \delta_j(\sigma) + \sum_{0 \leq j < k \leq n} (-1)^{k-1+j} \delta_j \delta_k(\sigma) \\ &= 0 \end{aligned} \quad \square$$

## 5.6 Lemma

Für  $0 \leq j \leq k \leq n-1$  und  $\sigma \in S_n(X)$  ist  $\delta_k \delta_j(\sigma) = \delta_j \delta_{k+1}(\sigma)$ .

### Beweis

Es ist

$$\begin{aligned}\delta_k(\delta_j(\sigma))(x_0, \dots, x_{n-2}) &= \delta_j(\sigma)(x_0, \dots, x_{k-1}, 0, x_k, \dots, x_{n-2}) \\ &= (x_0, \dots, x_{j-1}, 0, x_j, \dots, x_{k-1}, 0, x_k, \dots, x_{n-2})\end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned}\delta_j \delta_{k+1}(\sigma)(x_0, \dots, x_{n-2}) &= \delta_{k+1}(\sigma)(x_0, \dots, x_{j-1}, 0, x_j, \dots, x_{n-2}) \\ &= (x_0, \dots, x_{j-1}, 0, x_j, \dots, x_{k-1}, 0, x_k, \dots, x_{n-2})\end{aligned}$$

□

## 5.7 Definition

Sei  $X$  ein topologischer Raum. Die Homologie des **singulären Kettenkomplex** über  $R$ ,  $(C_*(X; R), \partial_*)$ , heißt die **singuläre Homologie von  $X$**  mit Koeffizienten in  $R$ :

$$H_n(X; R) := H_n(C_*(X; R), \partial_*)$$

Für  $R = \mathbb{Z}$  schreiben wir kürzer  $C_*(X) := C_*(X; \mathbb{Z})$  und  $H_n(X) := H_n(X; \mathbb{Z})$ .

## 5.8 Definition

- Die Elemente von  $C_n(X; R)$  heißen **n-Ketten**.
- Die Elemente von  $\text{Im } \partial_{n+1} \subseteq C_n(X; R)$  heißen **n-Ränder**.
- Die Elemente von  $\ker \partial_n \subseteq C_n(X; R)$  heißen **n-Zykel**.

Jeder  $n$ -Zykel  $\sigma \in C_n(X; R)$  bestimmt eine **Homologieklass**  $[\sigma] := \sigma + \text{Im } \partial_{n+1} \in H_n(X; R)$ .

## 5.9 Beispiel

Ist  $X = \{x_0\}$  der Ein-Punkt-Raum, so ist

$$H_*(\{x_0\}; R) \cong \begin{cases} R, & \text{falls } * = 0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

### Beweis

Es gibt für jedes  $n$  genau eine Abbildung, nämlich die konstante,  $\sigma_n : |\Delta^n| \rightarrow \{x_0\}$  und diese ist stetig. Also  $C_n(\{x_0\}; R) = R[\sigma_n]$ . Für alle  $j$  ist  $\delta_j \sigma_n = \sigma_{n-1}$ . Daher ist

$$\partial_n(\sigma_n) = \begin{cases} 0, & \text{falls } n \text{ ungerade} \\ \sigma_{n-1}, & \text{falls } n \text{ gerade} \end{cases}$$

Der singuläre Kettenkomplex von  $\{x_0\}$  hat also folgende Gestalt:

$$\begin{array}{ccccccc} C_0(\{x_0\}; R) & \xleftarrow{0} & C_1(\{x_0\}; R) & \xleftarrow{\cong} & C_2(\{x_0\}; R) & \xleftarrow{0} & C_3(\{x_0\}; R) & \xleftarrow{\cong} & \dots \\ R & \xleftarrow{0} & R & \xleftarrow{\text{id}} & R & \xleftarrow{0} & R & \end{array}$$

Es folgt

$$H_n(\{x_0\}; R) \cong \begin{cases} R, & \text{falls } n = 0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

□

## 5.10 Proposition

- 1) Ist  $X \neq \emptyset$ , so ist  $H_0(X) \neq 0$ .
- 2) Ist  $X$  wegzusammenhängend, so gilt  $H_0(X) \cong \mathbb{Z}$

### Beweis

- 1) Sei  $\varepsilon : C_0(X) \rightarrow \mathbb{Z}$  definiert durch  $\varepsilon\left(\sum_{\sigma \in S_0(X)} r_\sigma \cdot \sigma\right) := \sum_{\sigma} r_\sigma$ . Dann ist  $\varepsilon \circ \partial_1 : C_1(X) \rightarrow \mathbb{Z}$  trivial, denn für  $\sigma \in S_1(X)$  ist  $\varepsilon \circ \partial_1(\sigma) = \varepsilon(\delta_0\sigma - \delta_1\sigma) = 0$ . Daher induziert  $\varepsilon$  eine Abbildung  $\bar{\varepsilon} : H_0(X) \rightarrow \mathbb{Z}$ . Da  $X \neq \emptyset$  ist, gibt es einen singulären 0-Simplex  $\sigma : |\Delta^0| \rightarrow X$ . Für  $\sigma$  gilt  $\bar{\varepsilon}([\sigma]) = 1$  und daher ist  $\bar{\varepsilon}$  surjektiv und  $H_0(X) \neq 0$ .
- 2) Wir zeigen:  $\bar{\varepsilon} : H_0(X) \rightarrow \mathbb{Z}$  ist ein Isomorphismus, falls  $X$  wegzusammenhängend ist. Dazu zeigen wir  $\ker \varepsilon = \text{Im } \partial_1$ . Dazu definieren wir  $s : C_0(X) \rightarrow C_1(X)$  wie folgt: Sei  $\sigma_0$  ein fest gewählter singulärer 0-Simplex. Zu  $\sigma \in S_0(X)$  gibt es, da  $X$  wegzusammenhängend ist,  $s(\sigma) \in S_1(X)$  mit  $\delta_0 s(\sigma) = \sigma$ ,  $\delta_1 s(\sigma) = \sigma_0$ . Es gilt nun

$$\partial_1 \circ s(\sigma) = \sigma - \sigma_0 = \text{id}_{C_0(X)} - i \circ \varepsilon$$

wobei  $i : \mathbb{Z} \rightarrow C_0(X)$ ,  $n \mapsto n \cdot \sigma_0$ . Ist nun  $v \in \ker \varepsilon$ , so folgt

$$\partial_1 \circ s(v) = v - \underbrace{i \circ \varepsilon(v)}_{=0} = v$$

also  $v \in \text{Im } \partial_1$ . □

## 5.11 Bemerkung

Sei  $K = (V, \Sigma)$  ein geordneter simplizialer Komplex. Sei  $\sigma = \{v_0, \dots, v_n\} \in \Sigma_n$  ein  $n$ -Simplex von  $K$  mit  $v_0 < v_1 < \dots < v_n$ . Wir ordnen  $\sigma$  den singulären  $n$ -Simplex  $f_\sigma : |\Delta^n| \rightarrow |K|$  zu, wobei

$$f_\sigma\left(\sum_{i=0}^n t_i e_i\right) = \sum_{i=0}^n t_i v_i.$$

Nun erhalten wir eine Abbildung

$$C_*(K; R) \rightarrow C_*(|K|, R) \quad , \quad \sum_{\sigma \in \Sigma_n} r_\sigma \cdot \sigma \mapsto \sum_{\sigma \in \Sigma_n} r_\sigma \cdot f_\sigma.$$

Diese Abbildung induziert(!) eine weitere Abbildung  $H_*(K; R) \xrightarrow{\cong} H_*(|K|; R)$  von der wir später zeigen werden, dass sie ein Isomorphismus ist.

## 6 Funktorialität

### 6.1 Definition

Seien  $(C_*, d_*)$  und  $(C'_*, d'_*)$  zwei  $R$ -Kettenkomplexe. Eine  **$R$ -Kettenabbildung**  $f_* : (C_*, d_*) \rightarrow (C'_*, d'_*)$  ist eine Folge von  $R$ -linearen Abbildungen  $f_n : C_n \rightarrow C'_n$ , sodass

$$d'_n \circ f_n = f_{n-1} \circ d_n$$

für alle  $n \geq 1$  ist.

$$\begin{array}{ccccccc} C_0 & \xleftarrow{d_1} & C_1 & \xleftarrow{d_2} & C_2 & \xleftarrow{d_3} & C_3 \xleftarrow{\quad} \dots \\ \downarrow f_0 & & \downarrow f_1 & & \downarrow f_2 & & \downarrow f_3 \\ C'_0 & \xleftarrow{d'_1} & C'_1 & \xleftarrow{d'_2} & C'_2 & \xleftarrow{d'_3} & C'_3 \xleftarrow{\quad} \dots \end{array}$$

### 6.2 Bemerkung

Ist  $f_* : (C_*, d_*) \rightarrow (C'_*, d'_*)$  eine Kettenabbildung, so erhalten wir eine induzierte Abbildung  $H_n(f_*) : H_n(C_*, d_*) \rightarrow H_n(C'_*, d'_*)$  durch

$$H_n(f_*)([v]) := [f_n(v)]$$

für  $v \in \ker d_n$ , denn:

- $d'_n(f_n(v)) = f_{n-1}(d_n(v)) = 0$ , also  $f_n(v) \in \ker d'_n$  für  $v \in \ker d_n$ .
- Ist  $[v] = [w]$ , mit  $v, w \in \ker d_n$ , so gibt es  $x \in C_{n+1}$  mit  $d_{n+1}(x) = v - w$ . Dann ist

$$d'_{n+1}(f_{n+1}(x)) = f_n(d_{n+1}(x)) = f_n(v) - f_n(w)$$

also  $[f_n(v)] = [f_n(w)] \in H_n(C'_*, d'_*)$ .

### 6.3 Bemerkung

a)  $R$ -Kettenkomplexe mit Kettenabbildungen bilden die Kategorie  $R\text{-KETTEN}$ .

b) Homologie definiert nun einen Funktor:  $H_n : R\text{-KETTEN} \rightarrow R\text{-MOD}$ .

Es gilt  $H_n(\text{id}_{(C_*, d_*)}) = \text{id}_{H_n(C_*, d_*)}$  und  $H_n(f \circ g) = H_n(f) \circ H_n(g)$ , da

$$H_n(f \circ g)([v]) = [f_n \circ g_n(v)] = [f_n(g_n(v))] = H_n(f)[g_n(v)] = H_n(f)(H_n(g)(v))$$

c) Definiert man die Kategorie der **graduerten**  $R$ -Moduln als die Kategorie deren Objekte Folgen  $(V_n)_n$  von  $\mathbb{R}$ -Moduln sind und deren Morphismen Folgen von  $R$ -linearen Abbildungen  $(f_n)_n$  sind, so kann man die  $H_n$ ,  $n \in \mathbb{N}$  zu einem Funktor

$$H_* : R\text{-KETTEN} \longrightarrow \text{GR-}R\text{-MOD} \quad , \quad (C_*, d_*) \longmapsto (H_n(C_*, d_*))_n$$

zusammensetzen.

### 6.4 Definition

Sei  $f : X \rightarrow Y$  stetig. Wir definieren  $C_n(f; R) : C_n(X; R) \rightarrow C_n(Y; R)$  durch

$$C_n(f; R) \left( \sum_{\sigma \in S_n(X)} r_\sigma \cdot \sigma \right) := \sum_{\sigma \in S_n(X)} r_\sigma \cdot (f \circ \sigma)$$

(Für  $\sigma \in S_n(X)$  ist  $f \circ \sigma \in S_n(Y)$ .)

## 6.5 Proposition

Mit dieser Definition von  $C_*(f; R)$  wird der singuläre Kettenkomplex über  $R$  zu einem Funktor

$$C_*(-; R) : \text{TOP} \rightarrow R\text{-KETTEN}$$

### Beweis

(i)  $C_*(f; R)$  ist eine  $R$ -Kettenabbildung:

$$\begin{aligned} C_{n-1}(f; R) \circ \partial_n(\sigma) &= C_{n-1}(f; R) \left( \sum_{l=0}^n (-1)^l \sigma \circ \iota_{n,l} \right) = \sum_{l=0}^n (-1)^l (f \circ \sigma) \circ \iota_{n,l} \\ &= \partial_n(f \circ \sigma) = \partial(C_n(f; R)(\sigma)) \end{aligned}$$

(ii) Zu zeigen:  $C_*(f \circ g; R) = C_*(f; R) \circ C_*(g; R)$ :

$$C_n(f \circ g; R)(\sigma) = f \circ (g \circ \sigma) = C_n(f; R)(g \circ \sigma) = C_n(f; R)(C_n(g; R)(\sigma))$$

(iii) Zu zeigen:  $C_*(\text{id}_X; R) = \text{id}_{C_*(X; R)}$ :

$$C_n(\text{id}_X; R)(\sigma) = \text{id}_X \circ \sigma = \sigma$$

## 6.6 Korollar

Mit  $H_n(f; R) := H_n(C_*(f; R))$  wird  $H_n(-; R)$  zu einem Funktor:  $H_n(-; R) : \text{TOP} \rightarrow R\text{-MOD}$ .

### Beweis

$H_n(-; R)$  ist die Komposition der Funktoren  $C_*(-; R) : \text{TOP} \rightarrow R\text{-KETTEN}$  und  $H_* : R\text{-KETTEN} \rightarrow R\text{-MOD}$ .  $\square$

## 6.7 Bemerkung

- Oft schreiben wir  $f_* = H_n(f; R)$ .
- Es gilt für  $\left[ \sum_{\sigma \in S_n(X)} r_\sigma \cdot \sigma \right] \in H_n(X; R)$

$$f_* \left( \left[ \sum_{\sigma \in S_n(X)} r_\sigma \cdot \sigma \right] \right) = \left[ \sum_{\sigma \in S_n(X)} r_\sigma \cdot f \circ \sigma \right] \in H_n(Y; R)$$

## 6.8 Definition

Seien  $X_i, i \in I$  topologische Räume. Mit

$$X := \coprod_{i \in I} X_i$$

bezeichnen wir die **Summe** (oder auch das **Koprodukt**) der  $X_i$ . Als Menge ist  $X$  die disjunkte Vereinigung der  $X_i$ .  $U \subseteq X$  ist offen genau dann, wenn  $X_i \cap U \subseteq X_i$  offen ist für jedes  $i \in I$ . Für jedes  $i_o$  erhalten wir eine stetige Inklusion  $j_{i_o} : X_{i_o} \rightarrow \coprod_i X_i$ .

### Bemerkung

Für jedes  $i_o$  mit  $X_{i_o} \subseteq \coprod_i X_i$  offen und abgeschlossen.

## 6.9 Definition

Seien  $V_i, i \in I$   $R$ -Moduln. Mit

$$V := \bigoplus_{i \in I} V_i$$

bezeichnen wir die **Summe** (oder auch das **Koprodukt**) der  $V_i$ . Elemente von  $V$  sind  $I$ -Folgen  $(v_i)_{i \in I}$  mit  $v_i \in V_i$  und  $v_i = 0$  für alle bis auf endlich viele  $i$ . Die  $R$ -Modulstruktur ist erklärt durch:

$$(v_i)_{i \in I} + (w_i)_{i \in I} := (v_i + w_i)_{i \in I}, \quad r \cdot (v_i)_{i \in I} := (r \cdot v_i)_{i \in I}$$

Für jedes  $i_0 \in I$  erhalten wir eine  $R$ -lineare Abbildung  $j_{i_0} : V_{i_0} \rightarrow V$  mit

$$(j_{i_0}(v))_i = \begin{cases} v, & \text{falls } i = i_0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

### Bemerkung

Seien  $V_i, i \in I$   $R$ -Moduln. Sei  $W$  ein weiterer  $R$ -Modul. Dann gibt es zu jeder Folge  $f_i : V_i \rightarrow W$  von  $R$ -linearen Abbildungen eine  $R$ -lineare Abbildung  $\bigoplus_{i \in I} f_i : \bigoplus_{i \in I} V_i \rightarrow W$  mit

$$(\bigoplus_{i \in I} f_i)((v_i)_{i \in I}) = \sum_{i \in I} f_i(v_i)$$

Ist umgekehrt  $f : \bigoplus_{i \in I} V_i \rightarrow W$  eine  $R$ -lineare Abbildung, so ist  $f_i := f \circ j_i$  eine Folge von  $R$ -linearen Abbildungen mit  $f = \bigoplus_{i \in I} f_i$

## 6.10 Satz

Sei  $X = \coprod_{i \in I} X_i$ . Dann induzieren die  $j_i : X_i \rightarrow X$  einen Isomorphismus

$$\bigoplus_{i \in I} H_n(X_i; R) \xrightarrow{\bigoplus_{i \in I} (j_i)_*} H_n(X; R)$$

### Beweis

Da die  $X_i \subseteq X$  offen und abgeschlossen sind und  $|\Delta^n|$  zusammenhängend ist (sogar wegzusammenhängend), gibt es für jedes  $\sigma : |\Delta^n| \rightarrow X$  ein eindeutiges  $i$  mit  $\text{Im } \sigma \subseteq X_i$ . Es gilt also  $S_n(X) = \bigcup S_n(X_i)$ . Daher induzieren die  $j_i$  einen Isomorphismus

$$\bigoplus_{i \in I} C_n(j_i; R) : \bigoplus_{i \in I} C_n(X_i; R) \xrightarrow{\cong} C_n(X; R)$$

Da diese Isomorphismen mit den Randabbildungen vertauschen, erhalten wir einen Isomorphismus von  $R$ -Kettenkomplexen

$$\varphi := \bigoplus_{i \in I} C_*(j_i; R) : \bigoplus_{i \in I} C_*(X_i; R) \rightarrow C_*(X; R)$$

Da  $\bigoplus H_n(C_*(X_i; R), \partial_*) \cong H_n(\bigoplus_{i \in I} C_*(X_i; R), \partial_*)$  induzieren dann auch die  $(j_i)_*$  einen Isomorphismus

$$\bigoplus_{i \in I} (j_i)_* : \bigoplus_{i \in I} H_n(X_i; R) \longrightarrow H_n(X; R) \quad \square$$



## 7 Homotopieinvarianz

### 7.1 Bemerkung

Sei  $f : X \rightarrow Y$  eine Homöomorphismus. Dann ist

$$f_* : H_n(X; R) \longrightarrow H_n(Y; R)$$

ein Isomorphismus.

#### Beweis

Da Homologie ein Funktor ist, gilt

$$\begin{aligned} f_* \circ (f^{-1})_* &= (f \circ f^{-1})_* = (\text{id}_Y)_* = \text{id}_{H_n(Y; R)} & \text{und} \\ (f^{-1})_* \circ f_* &= (f^{-1} \circ f)_* = (\text{id}_X)_* = \text{id}_{H_n(X; R)} \end{aligned}$$

Also  $(f_*)^{-1} = (f^{-1})_*$ . Insbesondere ist  $f_*$  ein Isomorphismus. □

### 7.2 Definition

Eine stetige Abbildung  $f : X \rightarrow Y$  heißt eine **Homotopieäquivalenz**, falls es eine stetige Abbildung  $g : Y \rightarrow X$  gibt, so dass  $g \circ f$  homotop zu  $\text{id}_X$  ist und  $f \circ g$  homotop zu  $\text{id}_Y$  ist.  $g$  heißt dann eine **Homotopieinverse** zu  $f$ .

#### Bemerkung

- (i)  $f$  ist genau dann eine Homotopieäquivalenz, wenn  $[f]$  in  $\text{HTop}$  invertierbar ist. In  $\text{HTop}$  ist dann  $[f]^{-1} = [g]$ .
- (ii) Die Homotopieinverse ist eindeutig bis auf Homotopie.

### 7.3 Satz

Seien  $f, g : X \rightarrow Y$  stetige Abbildungen. Sind  $f$  und  $g$  homotop, so gilt  $H_n(f; R) = H_n(g; R)$  für alle  $n \in \mathbb{N}$ .

#### Beweis

siehe ...



hinzufügen

### 7.4 Korollar

Ist  $f : X \rightarrow Y$  eine Homotopieäquivalenz, so ist  $f_* : H_n(X; R) \rightarrow H_n(Y; R)$  ein Isomorphismus.

#### Beweis

Sei  $g : Y \rightarrow X$  ein Homotopieinverses zu  $f$ . Es folgt

$$\begin{aligned} f_* \circ g_* &\stackrel{\text{Funktor}}{=} (f \circ g)_* \stackrel{\text{Homotopieinvarianz}}{=} (\text{id}_Y)_* \stackrel{\text{Funktor}}{=} \text{id}_{H_n(Y; R)} \\ g_* \circ f_* &\stackrel{\text{Funktor}}{=} (g \circ f)_* \stackrel{\text{Homotopieinvarianz}}{=} (\text{id}_X)_* \stackrel{\text{Funktor}}{=} \text{id}_{H_n(X; R)} \end{aligned}$$

### 7.5 Korollar

Ist  $X$  **kontrahierbar**, d.h. es gibt eine Homotopie  $H : X \times [0, 1] \rightarrow X$  mit  $H_0 = \text{id}_X$  und  $H_1$  konstant, so gilt

$$H_n(X; R) \cong \begin{cases} R, & \text{falls } n = 0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

### Beweis

Sei  $\{x_0\} = \text{Im } H_1$ . Dann ist die Inklusion  $\{x_0\} \rightarrow X$  eine Homotopieäquivalenz. Also gilt nach 7.4

$$H_n(X; R) \cong H_n(\{x_0\}; R) = \begin{cases} R, & \text{falls } n = 0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad \square$$

### Beispiel

$$H_n(\mathbb{R}^k; R) \cong \begin{cases} R, & \text{falls } n = 0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{und} \quad H_n(D^k; R) \cong \begin{cases} R, & \text{falls } n = 0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

## 7.6 Definition

Seien  $(C_*, D_*)$  und  $(C'_*, d'_*)$   $R$ -Kettenkomplexe. Seien  $f_*, g_* : (C_*, d_*) \rightarrow (C'_*, d'_*)$   $R$ -Kettenabbildungen. Eine **Kettenhomotopie** von  $f_*$  nach  $g_*$  ist eine Folge von  $R$ -linearen Abbildungen  $h_n : C_n \rightarrow C'_{n+1}$ ,  $n \in \mathbb{N}$ , sodass für alle  $n$  gilt:

$$d'_{n+1} \circ h_n + h_{n-1} \circ d_n = f_n - g_n$$

In diesem Fall heißen  $f_*$  und  $g_*$  **kettenhomotop**.

## 7.7 Proposition

Seien  $f_*, g_* : (C_*, d_*) \rightarrow (C'_*, d'_*)$  Kettenabbildungen. Sind  $f_*$  und  $g_*$  kettenhomotop, so gilt  $H_n(f_*) = H_n(g_*)$  für alle  $n$ .

### Beweis

Sei  $x \in H_n(C_*, d_*)$ . Also  $x = [v]$  mit  $v \in \ker d_n : C_n \rightarrow C_{n-1}$ . Dann gilt, da  $v \in \ker d_n$

$$\begin{aligned} H_n(f_*)(x) &= H_n(f_*)([v]) = [f_n(v)] = \left[ g_n(v) + \underbrace{d'_{n+1} \circ h_n(v)}_{\in \text{Im } d'_{n+1}} + \underbrace{h_{n-1} \circ d_n(v)}_{=0} \right] \\ &= [g_n(v)] = H_n(g_*)([v]) = H_n(g_*)(x) \end{aligned} \quad \square$$

## 7.8 Lemma

Die Homotopieinvarianz von  $H_n(-; R)$  folgt aus:


Seien  $i_0, i_1 : X \hookrightarrow X \times [0, 1]$  Inklusionen mit  $i_0(x) = (x, 0)$ ,  $i_1(x) = (x, 1)$ . Dann gilt  $(i_0)_* = (i_1)_*$  [#]

### Beweis

Sei  $H : X \times [0, 1] \rightarrow Y$  eine Homotopie zwischen  $f, g : X \rightarrow Y$ , also  $f = H \circ i_0$  und  $g = H \circ i_1$ . Dann folgt [#]

$$f_* = (H \circ i_0)_* = H_* \circ (i_0)_* = H_* \circ (i_1)_* = (H \circ i_1)_* = g_* \quad \square$$

## Index

Die Seitenzahlen sind mit Hyperlinks zu den entsprechenden Seiten versehen, also anklickbar 

assoziativ, 1

Ecken, 4

Euler-Charakteristik, 5

Eulercharakteristik

von  $\mathbb{Z}$ -Kettenkomplexen, 13

freier Modul, 7

Funktor, 2

dargestellter, 2

geometrische Realisierung, 5

graduerten, 18

Graphen, 4

Homologiekategorie, 16

Homotopieinverse, 21

Homotopieäquivalenz, 21

Kategorie, 1

klein, 2

kettenhomotop, 22

Kettenhomotopie, 22

Kettenmoduln, 10

Komposition, 1

kontrahierbar, 21

Koprodukt, 19, 20

kurze exakte Sequenz, 11

Morphismen, 1

$n$ -Ketten, 16

$n$ -Ränder, 16

$n$ -Simplex, 4

$n$ -te Homologie, 10

$n$ -te singuläre Randabbildung, 15

$n$ -ter (singulärer) Kettenmodul, 15

$n$ -Zykel, 16

natürliche Transformation, 2

$n$ -te Randabbildung, 8

$n$ -ter Homologiemodul, 9

$n$ -ter Kettenmodul, 8

Objekte, 1

Polyeder, 5

$R$ -Kettenabbildung, 18

$R$ -Kettenkomplex, 10

Rand des  $n$ -Simplizes, 5

Randabbildungen, 10

Seite, 4

Simplizes, 4

simpliciale Abbildung, 5

simpliciale Kettenkomplex, 10

simplicialer Komplex, 4

singuläre Homologie von  $X$ , 16

singuläre Simplizes, 15

singulären Kettenkomplex, 16

Spaltung, 12

Summe, 19, 20

Torsionsgruppe, 11

unital, 1

Unterkomplex, 4

Vertices, 4

## Abbildungsverzeichnis

### Todo's und andere Baustellen

RevChap3	9
hinzufügen	21