



WESTFÄLISCHE
WILHELMS-UNIVERSITÄT
MÜNSTER



FACHBEREICH 10
MATHEMATIK UND
INFORMATIK

Skript Topologie I.

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

Jannes Bantje

28. Oktober 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 (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 ✉ 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.¹

- *Indirektes* Mitarbeiten: \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> ✉

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

Inhaltsverzeichnis

1 Kategorien, Funktoren und natürliche Transformationen	1
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
2 Kombinatorische Beschreibungen topologischer Räume	4
2.1 Beispiel einer kombinatorischen Beschreibung eines Raumes	4
2.2 Definition: Simplizialer Komplex	4
2.3 Beispiel für simpliziale Komplexe	4
2.4 Definition: Unterkomplex	4
2.5 Definition: Simpliziale 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
3 Simpliziale Homologie	7
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: Simplizialer Kettenkomplex	10
4 Euler-Charakteristik von Kettenkomplexen	11
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
Index	A
Abbildungsverzeichnis	B

Todo list

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^∞ -Mannigfaltigkeiten C^∞ -MAN: Objekte sind C^∞ -Mannigfaltigkeiten und Morphismen sind C^∞ -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_\bullet : 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_\bullet : 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}^{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“-Funktores:

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

- (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 Funktores bilden die Kategorie KAT.

1.6 Definition

Seien $F, G : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$ zwei Funktores. 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 algebraische Kategorie, z.B. $\text{GRUPPEN}, K\text{-VR}, \text{ABEL. GRUPPEN}, R\text{-MOD}$. Ein Beispiel für einen solchen Funktor ist die Fundamentalgruppe π_1 . Ein Nachteil der Fundamentalgruppe ist, dass diese oft schwierig zu berechnen ist. Wir werden in dieser Vorlesung weitere Funktoren und Methoden für ihre 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 Σ von nichtleeren, endlichen Teilmengen von V , sodass gilt

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

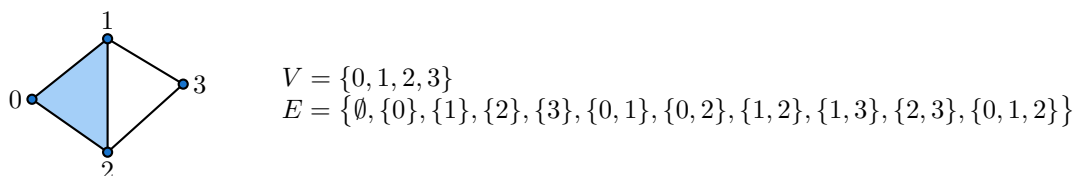
(ii) $\sigma \in \Sigma, \emptyset \neq \tau \subseteq \sigma \implies \tau \in \Sigma$.

(Abgeschlossen bzgl. Teilmengenbildung)

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

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

2.3 Beispiel



Ist σ eine endliche Menge, so heißt $\Delta^\sigma := (\sigma, \mathcal{P}(\sigma) \setminus \{\emptyset\})$ der σ -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 Δ^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 σ 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 $|\partial\Delta^n| \cong S^{n-1}$.

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

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:

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

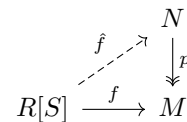
Bemerkung

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 φ' 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 τ ein $(n-1)$ -Simplex von K . Definiere

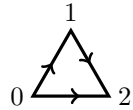
$$\varepsilon_\sigma^\tau := \begin{cases} (-1)^i, & \text{falls } \tau = \{v_0, \dots, v_{i-1}, v_{i+1}, \dots, v_n\} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Bemerkung

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

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**

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

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

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 σ 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 σ ein n -Simplex. Sei $\eta \subseteq \sigma$ ein $(n-2)$ -Simplex. Dann gibt es genau zwei $(n-1)$ -Simplizes τ, τ' von K , die eine Seite von σ sind und η 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 ∂_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: φ_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)

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

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


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

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 $\dim_{\mathbb{Q}}(V \oplus W) = \dim_{\mathbb{Q}}(V) + \dim_{\mathbb{Q}}(W)$.

Index

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

assoziativ, 1

Ecken, 4

Euler-Charakteristik, 5

freier Modul, 7

Funktor, 2

dargestellter, 2

geometrische Realisierung, 5

Graphen, 4

Kategorie, 1

klein, 2

Kettenmoduln, 10

Komposition, 1

kurze exakte Sequenz, 11

Morphismen, 1

n -Simplex, 4

n -te Homologie, 10

natürliche Transformation, 2

n -te Randabbildung, 8

n -ter Homologiemodul, 9

n -ter Kettenmodul, 8

Objekte, 1

Polyeder, 5

R -Kettenkomplex, 10

Rand des n -Simplizes, 5

Randabbildungen, 10

Seite, 4

Simplizes, 4

simpliciale Abbildung, 5

simpliciale Kettenkomplex, 10

simplicialer Komplex, 4

Spaltung, 12

Torsionsgruppe, 11

unital, 1

Unterkomplex, 4

Vertices, 4

Abbildungsverzeichnis

Todo's und andere Baustellen

RevChap3

9