

Zusammenfassung Algebr. Topologie

© Tim Baumann, <http://timbaumann.info/uni-spicker>

Def. Ein **affines n -Simplex** ist die konvexe Hülle von $n + 1$ affin unabhängigen Punkten $p_0, \dots, p_{n+1} \in \mathbb{R}^N$. Die konvexe Hülle von einer Teilmenge dieser Eckpunkte wird **Seite** genannt. Das **Standard- n -Simplex** Δ_n ist das von den $n + 1$ Standard-Basisvektoren im \mathbb{R}^{n+1} aufgespannte Simplex.

Def. Ein (endlicher) **geometrischer Simplicialkomplex** ist eine (endliche) Menge \mathcal{S} endlich vieler affiner Simplizes im \mathbb{R}^N , sodass:

- Ist $K \in \mathcal{S}$ und $T \subset K$ eine Seite von K , dann ist auch $T \in \mathcal{S}$.
- Für alle $K_1, K_2 \in \mathcal{S}$ ist $K_1 \cap K_2$ entweder eine Seite von K_1 und K_2 oder leer.

Def. Jeder Simplicialkomplex \mathcal{S} ist eine **Triangulierung** seines **Polyeders**, dem topologischen Raum $|S| := \bigcup_{K \in \mathcal{S}} K$.

Def. Ein geometrischer Simplicialkomplex mit einer Totalordnung auf der Menge der Eckpunkte heißt **geordnet**.

Notation. Ein n -Simplex mit Eckpunkten v_0, \dots, v_n in einem geordneten geom. Simplicialkomplex wird mit $\langle v_0, \dots, v_n \rangle$ bezeichnet, falls $v_0 < v_1 < \dots < v_n$.

Notation. $\mathcal{S}_n := \{\sigma \in \mathcal{S} \mid \sigma \text{ ist geordneter } n\text{-Simplex}\}$

Def. Eine **simpliciale n -Kette** in einem geordneten geom. Simplicialkomplex ist eine endliche formale Linearkombination

$$\sum_{\sigma \in \mathcal{S}_n} \lambda_\sigma \cdot \sigma,$$

wobei $\lambda_\sigma \in \mathbb{Z}$. Die Menge solcher Linearkombinationen ist $C_n(\mathcal{S})$. Sie ist die freie abelsche Gruppen über der Menge der Simplizes.

Bem. $C_n(\mathcal{S})$ ist eine Gruppe.

Def. Der Rand eines orientierten n -Simplex $\langle v_0, \dots, v_n \rangle \in \mathcal{S}$ ist

$$\delta \langle v_0, \dots, v_n \rangle := \sum_{i=0}^n (-1)^i \langle v_0, \dots, \hat{v}_i, \dots, v_n \rangle.$$

Durch lineare Fortsetzung erhalten wir einen Gruppenhomo $\partial_n : C_n(\mathcal{S}) \rightarrow C_{n-1}(\mathcal{S})$.

Def. Ein **Kettenkomplex** C_\bullet ist eine Folge $(C_n)_{n \in \mathbb{N}}$ von abelschen Gruppen und Gruppenhomomorphismen $\partial_n : C_n \rightarrow C_{n-1}$ mit der Eigenschaft $\partial_{n-1} \circ \partial_n = 0$.

Def. Sei C_\bullet ein Kettenkomplex.

- $Z_n(C_\bullet) := \ker \partial_n \subset C_n(C_\bullet)$ heißt Gruppe der **n -Zykel**,
- $B_n(C_\bullet) := \text{im } \partial_{n+1} \subset C_n(C_\bullet)$ heißt Gruppe der **n -Ränder**,
- $H_n(C_\bullet) := Z_n(C_\bullet) / B_n(C_\bullet)$ heißt **n -te Homologiegruppe**.

Prop. Für $n \geq 1$ gilt $\partial_{n-1} \circ \partial_n = 0$. Die simplicialen n -Ketten bilden also einen Kettenkomplex.

Def. Ein **singuläres n -Simplex** in einem topologischen Raum X ist eine stetige Abbildung $\sigma : \Delta^n \rightarrow X$. Wir bezeichnen mit $\Delta_n(X)$ die Menge der singulären n -Simplizes in X und mit $C_n(X)$ die freie abelsche Gruppe über $\Delta_n(X)$. Wir definieren

$$\partial_n : C_n(X) \rightarrow C_{n-1}(X), \quad \sigma \mapsto \sum_{i=0}^n (-1)^i \sigma_{(e_0, \dots, \hat{e}_i, \dots, e_n)}.$$

Analog zu oben gilt $\partial_{n-1} \circ \partial_n = 0$, man erhält also einen Komplex $C_\bullet(X)$ der singulären Ketten in X . Dessen Homologiegruppen heißen **singuläre Homologiegruppen** $H_n(X)$.

Def. Eine **Kettenabbildung** zwischen Kettenkomplexen C_\bullet und D_\bullet ist eine Familie $(f_n : C_n \rightarrow D_n)_{n \in \mathbb{N}}$ von Gruppenhomomorphismen, welche mit dem Differential verträglich sind, d. h.

$$\forall n \in \mathbb{N} : \partial_n^{(D)} \circ f_n = f_{n-1} \circ \partial_n^{(C)}.$$

Aus einer solchen Abbildung erhält man wiederum eine Abbildung $H_n(f) : H_n(C_\bullet) \rightarrow H_n(D_\bullet)$ für alle $n \in \mathbb{N}$. Somit definiert H_n einen Funktor von der Kategorie der Kettenkomplexe in die Kategorie der abelschen Gruppen.

Def. Für eine Abbildung $f : X \rightarrow Y$ von topologischen Räumen erhalten wir eine Abbildung $f_* : C_\bullet(X) \rightarrow C_\bullet(Y)$ definiert durch $f_*(\sigma) := f \circ \sigma$ für ein n -Simplex $\sigma : \Delta_n \rightarrow X$. Die Zuordnung $f \mapsto f_*$ erfüllt die Funktorialitätsaxiome. Somit definiert H_n für alle $n \in \mathbb{N}$ einen Funktor **Top** \rightarrow **AbGrp**.

Korollar. Homöomorphe Räume haben isomorphe singuläre Homologiegruppen.

Prop. Sei $\pi_0(X)$ die Menge der Wegekomponeanten von X . Die Inklusionen $A \hookrightarrow X$ (für $A \in \pi_0(X)$) induzieren einen Isomorphismus

$$\bigoplus_{A \in \pi_0(X)} H_*(A) \cong H_*(X).$$

Prop. Sei $X \neq \emptyset$ wegzusammenhängend. Dann ist $H_0(X) \cong \mathbb{Z}$.

Def. Eine **Kettenhomotopie** zw. Kettenabb. $\phi_*, \psi_* : C_\bullet \rightarrow D_\bullet$ ist eine Folge von Homomorphismen $P_n : C_n \rightarrow D_{n+1}$ mit

$$\forall n \in \mathbb{N} : \partial_{n+1} \circ P_n + P_{n-1} \circ \partial_n = \phi_n - \psi_n.$$

Prop. Seien $\phi_*, \psi_* : C_\bullet \rightarrow D_\bullet$ kettenhomotop. Dann gilt

$$H_*(\phi_*) = H_*(\psi_*) : H(C_\bullet) \rightarrow H(D_\bullet).$$

Satz. Seien $f, g : X \rightarrow Y$ homotope Abbildungen. Dann sind $f_*, g_* : X_\bullet \rightarrow Y_\bullet$ kettenhomotop.

Korollar. • Seien $f, g : X \rightarrow Y$ homotope Abbildungen. Dann gilt

$$f_* = g_* : H_*(X) \rightarrow H_*(Y).$$

- Homotopieäquivalente Räume haben isomorphe Homologiegruppen.

Def. Ein **Unterkomplex** D_\bullet von C_\bullet ist eine Folge von Untergruppen $D_n \subset C_n$, sodass gilt: $\partial D_n \subset D_{n-1}$ für alle $n \geq 1$.

Def. Ist $D_\bullet \subset C_\bullet$ ein Unterkomplex, so ist der **Quotientenkomplex** C_\bullet / D_\bullet definiert durch

$$(C_\bullet / D_\bullet)_n := C_n / D_n, \quad \partial_n^{C/D}[c] := [\partial_n^C(c)].$$

Def. Sei (X, A) ein Raumpaard. Der **relative singuläre Kettenkomplex** $C_\bullet(X, A)$ ist definiert als Quotientenkomplex X_\bullet / A_\bullet . Dessen Homologiegruppen heißen **relative singuläre Homologiegruppen** $H_n(X, A)$.

Bem. H_n ist ein Funktor **Top**(2) \rightarrow **AbGrp**.

Def. Eine Homotopie zwischen Abbildungen von Raumpaaren $f, g : (X, A) \rightarrow (Y, B)$ ist eine Homotopie $H : [0, 1] \times X \rightarrow Y$ zwischen f und g mit $H([0, 1] \times A) \subset Y$.

Prop. Homotope Abbildungen von Raumpaaren induzieren dieselbe Abbildung in relativer Homologie.

Def. Ein Kettenkomplex heißt **exakt** (oder **azyklisch**), falls seine Homologiegruppen alle Null sind, d. h. $\forall n \in \mathbb{N} : \text{im } \partial_{n+1} = \ker \partial_n$.

Def. Eine **kurze exakte Sequenz** (k. e. S.) ist ein exakter Kettenkomplex der Gestalt

$$0 \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow 0.$$

Def. Eine **kurze exakte Sequenz von Kettenkomplexen** ist ein Diagramm der Form

$$0 \rightarrow A_\bullet \rightarrow B_\bullet \rightarrow C_\bullet \rightarrow 0,$$

in jedem Grad eine kurze exakte Sequenz

$$0 \rightarrow A_n \rightarrow B_n \rightarrow C_n \rightarrow 0.$$

Bem. Ist (X, A) ein Raumpaard, so erhält man eine kurze exakte Sequenz

$$0 \rightarrow C_\bullet(A) \rightarrow C_\bullet(X) \rightarrow C_\bullet(X, A) \rightarrow 0.$$

Für ein Raumtripel (X, A, U) erhält man eine k. e. S.

$$0 \rightarrow C_\bullet(A, U) \rightarrow C_\bullet(X, U) \rightarrow C_\bullet(X, A) \rightarrow 0.$$

Prop. Die ex. Sequenz $0 \rightarrow A_\bullet \rightarrow B_\bullet \rightarrow C_\bullet \rightarrow 0$ induziert in jedem Grad einen sogenannten **verbindenden Homomorphismus** $\partial_n : H_n(C) \rightarrow H_{n-1}(A)$, sodass die Sequenz

$$\dots \rightarrow H_n(A) \rightarrow H_n(B) \rightarrow H_n(C) \xrightarrow{\partial_n} H_{n-1}(A) \rightarrow H_{n-1}(B) \rightarrow \dots$$

exakt ist. Diese Sequenz wird **lange exakte Sequenz** genannt.

Korollar. Sei (X, A) ein Raumpaard. Dann gibt es Homomorphismen $\partial_n : H_n(X, A) \rightarrow H_{n-1}(A)$, sodass die Sequenz

$$\dots \rightarrow H_n(A) \rightarrow H_n(X) \rightarrow H_n(X, A) \xrightarrow{\partial_n} H_{n-1}(A) \rightarrow \dots \quad \text{exakt ist.}$$

Für ein Raumtripel (X, A, U) erhält man eine l. e. S.

$$\dots \rightarrow H_n(A, U) \rightarrow H_n(X, U) \rightarrow H_n(X, A) \xrightarrow{\partial_n} H_{n-1}(A, U) \rightarrow \dots$$

Def. Die **reduzierte Homologie** $\tilde{H}_*(X)$ eines topologischen Raumes X ist die Homologie des Kettenkomplexes

$$\dots \rightarrow C_2(X) \xrightarrow{\partial_2} C_1(X) \xrightarrow{\partial_1} C_0(X) \xrightarrow{\epsilon} \mathbb{Z} \rightarrow 0,$$

wobei ϵ der sogenannte **Augmentierungshomomorphismus** ist:

$$\epsilon: \sum_{\sigma \in \Delta_0(X)} \lambda_\sigma \cdot \sigma \mapsto \sum_{\sigma} \lambda_\sigma \in \mathbb{Z}.$$

Prop. • $\tilde{H}_n(X) = H_n(X)$ für $n \geq 1$

- Ist $X = \emptyset$, so ist $\tilde{H}_n(X) = 0$ für $n \geq 0$ und $\tilde{H}_{-1}(X) = \mathbb{Z}$.
- Ist $X \neq \emptyset$, so ist $H_n(X) \cong \tilde{H}_n(X) \oplus \mathbb{Z}$, jedoch nicht kanonisch.
- Ist X kontrahierbar, so gilt $\tilde{H}_n(X) = 0$ für alle $n \in \mathbb{N}$.
- Ist (X, A) ein Raumpaard, so gibt es eine lange exakte Sequenz

$$\dots \rightarrow \tilde{H}_0(A) \rightarrow \tilde{H}_0(X) \rightarrow \tilde{H}_0(X, A) \rightarrow \tilde{H}_{-1}(A) \rightarrow \tilde{H}_{-1}(X) \rightarrow 0$$

Satz. Sei (X, A) ein Raumpaard, $U \subset A$ mit $\bar{U} \subset \text{int } A$. Dann induziert die Inklusion $(X - U, A - U) \hookrightarrow (X, A)$ Isomorphismen

$$H_n(X - U, A - U) \rightarrow H_n(X, A) \quad \text{für alle } n \geq 0.$$

Bem. Eine äquivalente Aussage zum Ausschneidungssatz ist: Seien $A, B \subset X$ mit $X = \text{int } A \cup \text{int } B$. Dann induziert die Inklusion $(B, A \cap B) \rightarrow (X, A)$ Isomorphismen in Homologie.

Def (Eilenberg-Steenrod-Axiome). Eine **Homologietheorie** ist eine Folge von Funktoren

$$H_n: \mathbf{Top}(2) \rightarrow \mathbf{AbGrp},$$

und natürlichen Transformationen

$$\delta_n: H_n(X, A) \rightarrow H_{n-1}(A, \emptyset)$$

mit den folgenden Eigenschaften:

- **Homotopieinvarianz:** Seien $f, g: (X, A) \rightarrow (B, Y)$ homotop als Abbildungen von Raumpaaren. Dann gilt $f_* = g_*: H_n(X, A) \rightarrow H_n(Y, B)$.
- **Lange exakte Sequenz:** Die Inklusionen $A \hookrightarrow X$ und $(X, \emptyset) \hookrightarrow (X, A)$ induzieren eine l.e.S.

$$\dots \rightarrow H_n(A) \rightarrow H_n(X) \rightarrow H_n(X, A) \xrightarrow{\partial_n} H_{n-1}(A) \rightarrow \dots$$

- **Ausschneidung:** Ist $U \subset A$ mit $\bar{A} \subset \text{int}(A)$, dann induziert die Inklusion $(X - U, A - U) \hookrightarrow (X, A)$ Isomorphismen

$$H_n(X - U, A - U) \rightarrow H_n(X, A).$$

Def. Die **Koeffizienten** einer Homologietheorie sind die Homologiegruppen $H_n(pt)$ des einpunktigen Raums. Eine Homologietheorie heißt **gewöhnlich**, falls $H_n(pt) = 0$ für $n > 0$.

Bem. Manchmal fordert man auch das Summenaxiom: Für eine Familie $(X_i)_{i \in I}$ von topologischen Räumen induzieren die Inklusionen $X_i \hookrightarrow X$ in die disjunkte Summe X aller X_i einen Iso

$$\bigoplus_{i \in I} H_n(X_i) \xrightarrow{\cong} H_n(X).$$

Bem. Die singuläre Homologie ist eine gewöhnliche Homologietheorie, die das Summenaxiom erfüllt.

Def. Ein Raumpaard (X, A) heißt **gut**, falls A nicht leer, abgeschlossen und starker Deformationsretrakt einer offenen Umgebung ist.

Prop. Sei (X, A) ein gutes Raumpaard. Dann induziert $q: (X, A) \rightarrow (X/A, A/A)$ Isomorphismen

$$H_n(X, A) \rightarrow H_n(X/A, A/A) = \tilde{H}_n(X/A) \quad \text{für alle } n \in \mathbb{N}.$$

Satz. Für $n \geq 0$ ist S^n kein Retrakt von D^{n+1} .

Korollar (Brouwerscher Fixpunktsatz).

Jede stetige Abbildung $f: D^n \rightarrow D^n$ hat einen Fixpunkt.

Satz (Topologische Invarianz der Dimension).

Seien $U \subseteq \mathbb{R}^n$ und $V \subseteq \mathbb{R}^m$ homöomorph. Dann gilt $n = m$.

Def. Sei $f: S^n \rightarrow S^n$ stetig. In Homologie induziert f eine Abbildung $H_n(f): \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}$, die durch Multiplikation mit einer ganzen Zahl gegeben ist. Diese Zahl heißt **Abbildungsgrad** $\deg f$ von f .

Lemma. • $\deg(f \circ g) = (\deg f) \cdot (\deg g)$.

- $H_n(f)$ ist genau dann ein Isomorphismus, wenn $\deg(f) = \pm 1$.

Prop. Sei $f: S^n \rightarrow S^n$ die Spiegelung an einer Hyperebene $H \subset \mathbb{R}^{n+1}$. Dann gilt $\deg f = -1$.

Def. Ein **Vektorfeld** über S^n ist eine stetige Abbildung $v: S^n \rightarrow \mathbb{R}^{n+1}$, sodass $v(x) \perp x$ für alle $x \in S^n$.

Satz. Die Sphäre S^n , $n \geq 1$ hat genau dann ein nirgends verschwindendes Vektorfeld, wenn n ungerade ist.

Satz. Sei n gerade und wirke eine Gruppe G frei auf S^n . Dann ist entweder $G = \{e\}$ oder $G \cong \mathbb{Z}_2$.

Def. Sei $f: S^n \rightarrow S^n$ stetig, $x \in S^n$, sodass eine Umgebung U von x existiert mit $U \cap f^{-1}(f(x)) = \{x\}$. Mit Ausschneidung und der l.e.S. erhält man Isomorphismen

$$H_k(U, U - \{x\}) \cong H_k(S^n, S^n - \{x\}) \cong \tilde{H}_k(S^n) \cong \mathbb{Z}.$$

Die induzierte Abb. $f_*: H_n(U, U - \{x\}) \rightarrow H_n(S^n, S^n - \{f(x)\})$ ist gegeben durch Multiplikation mit einer ganzen Zahl. Diese heißt **lokaler Abbildungsgrad** $(\deg f|_x)$ von f bei x .

Prop. Sei $f: S^n \rightarrow S^n$ stetig und $y \in S^n$ mit $f^{-1}(y) = \{x_1, \dots, x_n\}$. Dann ist $\deg f|_{x_i}$ definiert für $i = 1, \dots, n$ und es gilt

$$\deg f = \sum_{i=1}^n \deg f|_{x_i}.$$

Prop. Sei $f: S^n \rightarrow S^n$ stetig. Dann gilt

$$\deg f = \deg(\Sigma f: \Sigma S^n \rightarrow \Sigma S^n).$$

Prop. Seien $A, B \subset X$ mit $X = A \cup B$. Angenommen, es gibt Umgebungen U von A und V von B , sodass die Inklusionen $A \hookrightarrow U$, $B \hookrightarrow V$ und $A \cap B \hookrightarrow U \cap V$ Homotopieäquivalenzen sind. Dann existiert die **Mayer-Vietoris-Sequenz**

$$\dots \rightarrow H_*(A \cap B) \rightarrow H_*(A) \oplus H_*(B) \rightarrow H_*(X, A \cap B) \rightarrow H_{*-1}(A \cap B) \rightarrow \dots$$

Prop (Verallg. Jordanscher Kurvensatz). Sei $S \subset S^n$ ein Teilraum, der zu einer Sphäre $S^k \subset \mathbb{R}^{k+1}$ homöomorph ist. Dann ist $k \leq n$ und

$$\tilde{H}_i(S^n - S) = \begin{cases} \mathbb{Z}, & \text{falls } i = n - k - 1, \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases}$$

Korollar (Jordanscher Kurvensatz). Sei $\phi: S^1 \rightarrow \mathbb{R}^2$ eine stetige Einbettung. Dann besteht $\mathbb{R}^2 - \phi(S^1)$ aus zwei Komponenten, von denen genau eine beschränkt ist.

Satz (Invarianz des Gebietes). Sei $U \subset \mathbb{R}^n$ offen und $\phi: U \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig und ein Homöomorphismus auf das Bild. Dann ist $\phi(U)$ offen.

Def. Ein Δ -Komplex ist ein topologischer Raum X zusammen mit einer Familie $(\sigma_\alpha: \Delta^{n(\alpha)} \rightarrow X)_{\alpha \in I}$ von stetigen Abbildungen (genannt **charakteristische Abbildungen**), sodass:

- Die Restriktionen $\sigma_\alpha|_{\text{int}(\Delta^{n(\alpha)})}: \text{int}(\Delta^{n(\alpha)}) \rightarrow X$ sind injektiv und jeder Punkt $x \in X$ liegt im Bild (genannt **offenes Simplex**) von genau einer solchen Restriktion.
- Ist $\sigma_\alpha: \Delta^{n(\alpha)} \rightarrow X$ eine char. Abb. und $\tau \subset \Delta^{n(\alpha)}$ eine $(n(\alpha) - 1)$ -dimensionale Seite, dann ist $\sigma_\alpha|_\tau: \Delta^{n(\alpha)-1} \rightarrow X$ wieder eine charakteristische Abbildung.
- $A \subset X$ ist offen \iff alle $\sigma_\alpha^{-1}(A)$ sind offen in $\Delta^{n(\alpha)}$.

Bem. Jeder endliche geordnete Simplicialkomplex trägt die Struktur eines Δ -Komplexes.

Bem. Alternativ ist ein Δ -Komplex ein kontravarianter Funktor von der Kategorie Δ der endlichen total geordneten Mengen mit streng monotonen Abbildungen in die Kategorie der Mengen.

Def. Für einen Δ -Komplex X sei $C_n^\Delta(X)$, die freie abelsche Gruppe erzeugt von den Abbildungen $\sigma_\alpha: \Delta^{n(\alpha)} \rightarrow X$ mit $n(\alpha) = n$. Diese Gruppen bilden einen Simplicialkomplex. Die Homologiegruppen dieses Komplexes heißen **simpliziale Homologiegruppen** $H_*^\Delta(X)$.

Def. Ein **Teilkomplex** eines Δ -Komplexes ist eine Teilmenge der charakteristischen Abbildungen (zusammen mit der Vereinigung der Bilder dieser Abbildungen als topologischer Raum), die selbst die Axiome für einen Delta-Komplex erfüllt.

Def. Das **k-Skelett** eines Δ -Komplexes ist der Teilkomplex, der aus den Bildern aller i -Simplizes besteht, wobei $i \leq k$.

Def. Die **relative singuläre Homologie** $H_n^\Delta(X, A)$ des Δ -Komplexes X bzgl. eines Teilkomplexes A ist die Homologie des Quotientenkomplexes $C_n^\Delta(X)/C_n^\Delta(A)$.

Satz. Sei X ein Δ -Komplex und $A \subset X$ ein Unterkomplex. Dann induziert die Inklusion $C_*^\Delta(X) \hookrightarrow C_*(X)$ Isomorphismen von Homologiegruppen.

Lemma. Für $n \geq 0$ gilt

$$H_i^\Delta(\Delta^n, \partial\Delta^n) \cong H_i(\Delta^n, \partial\Delta^n) = \begin{cases} \mathbb{Z}, & \text{für } i = n \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

und die Homologieklassse von $\text{id} : \Delta^n \rightarrow \Delta^n$ erzeugt sowohl $H_n^\Delta(\Delta^n, \partial\Delta^n)$ als auch $H_n(\Delta^n, \partial\Delta^n)$

Lemma (Fünferlemma). Sei folgendes kommutatives Diagramm von R -Modulen mit exakten Zeilen gegeben:

$$\begin{array}{ccccccccc} A & \longrightarrow & B & \longrightarrow & C & \longrightarrow & D & \longrightarrow & E \\ \downarrow \alpha & & \downarrow \beta & & \downarrow \gamma & & \downarrow \delta & & \downarrow \epsilon \\ A' & \longrightarrow & B' & \longrightarrow & C' & \longrightarrow & D' & \longrightarrow & E' \end{array}$$

Angenommen, α, β, δ und ϵ sind Isomorphismen. Dann ist auch γ ein Isomorphismus.

Def. Ein **CW-Komplex** ist ein topologischer Raum X mit einer Folge von abgeschlossenen Unterräumen

$$X^0 \subset X^1 \subset X^2 \subset \dots \subset X, \quad \bigcup_{i \geq 0} X^i = X,$$

genannt **i -Skelette** X^i , sodass gilt:

- X^0 ist eine diskrete Menge von Punkten.
- Für alle $n \geq 1$ gibt es eine Familie von **Anheftungsabb'en** $(\phi_\alpha : \partial D_\alpha^n \rightarrow X^{n-1})_{\alpha \in I(n)}$ (dabei ist D_α^n eine Kopie von D^n), sodass

$$X^n = X^{n-1} \cup_{(\phi_\alpha)_{\alpha \in I(n)}} \coprod_{\alpha \in I(n)} D_\alpha^n.$$

- X trägt die Finaltopologie bzgl. obiger Filtrierung, d. h. $A \subset X$ ist abgeschlossen \iff alle $A \cap X^i$ sind abgeschlossen.

Def. Ein CW-Komplex heißt **endlich-dimensional**, falls $X^i = X$ für ein $i \in \mathbb{N}$. Er heißt **endlich**, falls er insgesamt nur endlich viele Anheftungsabb'en besitzt (dann ist er insbesondere endlich-dim).

Prop. CW-Komplexe sind normal (und damit Hausdorffsch).

Def. Die Anheftungsabb'en $\phi_\alpha : \partial D_\alpha^n \rightarrow X^{n-1}$ lassen sich kanonisch fortsetzen zu **charakteristischen Abb'en** $\Phi_\alpha : D_\alpha^n \rightarrow X^n \subset X$.

Die Bilder dieser Abb'en werden **abgeschlossene Zellen** genannt. Die Bilder der Einschränkungen $\Phi_\alpha|_{\text{int}(D_\alpha^n)}$ heißen **Zellen** von X und werden mit e_α^n bezeichnet.

Prop. • $\Phi_\alpha|_{\text{int}(D_\alpha^n)} : \text{int}(D_\alpha^n) \rightarrow X^n$ ist eine topologische Einbettung (d. h. ein Homöo auf das Bild).

- Jeder Punkt aus X liegt in genau einer Zelle.
- Der Abschluss einer Zelle ist eine abgeschlossene Zelle.
- Jede abgeschlossene Zelle trifft nur endlich viele Zellen.

Def. Ein **Unterkomplex** eines CW-Komplexes ist eine Teilmenge $A \subset X$, die selbst ein CW-Komplex ist, und zwar so, dass alle anheftenden Abb'en von A auch anheftende Abb'en von X sind.

Def. Ein **CW-Paar** ist ein Raumpaard (X, A) , wobei X ein CW-Komplex und A ein Unterkomplex von X ist.

Prop. • X^n ist ein Unterkomplex von X und von X^m für $m \geq n$.

- CW-Raumpaare sind gute Raumpaare.
- Jede Zelle eines CW-Komplexes ist in einem endlichen Unterkomplex enthalten.

Def. Die **Einpunktvereinigung** einer Familie $(X_i, x_i)_{i \in I}$ von punktierten Räumen ist

$$\bigvee_{i \in I} X_i := \left(\bigsqcup_{i \in I} X_i \right) / \{x_i \mid i \in I\}.$$

Man erhält Projektionen $q_j : \bigvee_i X_i \rightarrow X_j$ durch Abbilden aller Punkte aus $X_i, i \neq j$. auf den Basispunkt x_j .

Prop. Sei $(X_i, x_i)_{i \in I}$ eine Familie von punktierten Räumen, sodass alle Raumpaare $(X_i, \{x_i\})$ gut sind. Dann induzieren die Inklusionen $X_i \hookrightarrow \bigvee_i X_i$ einen Isomorphismus

$$\bigoplus_{i \in I} \tilde{H}_n(X_i) \cong \tilde{H}_n(\bigvee_i X_i) \quad \text{für alle } n \geq 0.$$

Lemma. Sei X ein CW-Komplex. Dann gilt

$$X^n / X^{n-1} \approx \bigvee_{i \in I(n)} S^n.$$

Korollar. $H_i(X^n / X^{n-1}) = \begin{cases} \bigoplus_{i \in I(n)} \mathbb{Z}, & \text{falls } i = n, \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases}$

Prop. • $H^k(X^n) = 0$ für $k > n$.

- Für $k < n$ induziert die Inklusion $X^n \hookrightarrow X$ Isomorphismen $H_k(X^n) \cong H_k(X)$.

Def. Der **zelluläre Kettenkomplex** eines CW-Komplexes X ist definiert durch

$$C_n^{\text{cell}}(X) := H_n(X^n, X^{n-1})$$

mit dem verbindenden Homomorphismus

$$\partial_n : H_n(X^n, X^{n-1}) \rightarrow H_{n-1}(X^{n-1}, X^{n-2})$$

aus der l. e. S. des Raumtripels (X^n, X^{n-1}, X^{n-2}) als Randabb. Dabei setzt man $X^{n-2} := \emptyset$ und $\partial_0 = 0$. Die Homologiegruppen dieses Komplexes werden mit $H_*^{\text{cell}}(X)$ bezeichnet.

Prop. Für jeden CW-Komplex X gilt $H_*^{\text{cell}}(X) \cong H_*(X)$.

Korollar. Hat der CW-Komplex X keine n -Zellen so ist $H_n(X) = 0$. Wenn X k -viele n -Zellen besitzt, dann wird $H_n(X)$ von höchstens k Elementen erzeugt.

Bem. Wir wählen Erzeuger t_n von $H_n(D^n, \partial D^n)$ und s_n von $\tilde{H}_n(S^n)$ wie folgt: Für $n = 0$ wählen wir einen beliebigen Erzeuger von $H_0(S^0)$. Angenommen, wir haben einen Erzeuger von $s_i \in H_i(S^i)$ bereits definiert. Der verbindende Homomorphismus $\partial_i : H_{i+1}(D^{i+1}, S^i) \rightarrow H_i(S^i)$ aus der l. e. S. des Raumpaars (D^{i+1}, S^i) ist ein Isomorphismus. Sei der Erzeuger t_{i+1} von $H_{i+1}(S^{i+1})$ das Urbild von s_i unter ∂_i . Wir wählen s_{i+1} als das Bild von t_{i+1} unter dem Isomorphismus

$$H_{i+1}(D^{i+1}, S^i) \cong H_{i+1}(D^{i+1}/S^i) \cong H_{i+1}(S^{i+1})$$

Dabei seien die Homöomorphismen $D^{i+1}/S^i \approx S^{i+1}$ fest gewählt. Wir erhalten Isomorphismen

$$C_n^{\text{cell}}(X) = H_n(X^n, X^{n-1}) \cong \bigoplus_{I(n)} H_n(D^n, S^{n-1}) \cong \bigoplus_{I(n)} \mathbb{Z}.$$

Sei nun e_α^n eine n -Zelle mit anheftender Abb. $\phi_\alpha : S^{n-1} \rightarrow X^{n-1}$ und e_β^{n-1} eine $(n-1)$ -Zelle von X . Sei $d_{\alpha\beta}$ der Abbildungsgrad von

$$S^{n-1} \xrightarrow{\phi_\alpha} X^{n-1} \rightarrow X^{n-1}/X^{n-2} \cong \bigvee_{i \in I(n)} S^{n-1} \xrightarrow{q_\beta} S^{n-1}.$$

Wir bezeichnen den α -ten Erzeuger von $C_n^{\text{cell}}(X)$ (mit $\alpha \in I(n)$) mit e_α^n . Dann haben wir:

Prop. Der zelluläre Randoperator ist gegeben durch

$$\partial_n(e_\alpha^n) = \sum_{\beta \in I(n-1)} d_{\alpha\beta} e_\beta^{n-1}.$$

Die Summe ist dabei endlich.

Def. Der singuläre Kettenkomplex mit Koeffizienten in einer abelschen Gruppe G eines topologischen Raumes X ist def. durch

$$C_n(X; G) := \{ \text{formale endl. Linearkomb. } \sum_{\sigma \in \Delta_n} \lambda_\sigma \cdot \sigma \text{ mit } \lambda_\sigma \in G \}$$

Die Randabbildung ist ganz wie beim gewöhnlichen Kettenkomplex ($G = \mathbb{Z}$) definiert. Die Homologie dieses Komplexes heißt **singuläre Homologie mit Koeffizienten in G** . Sie ist eine gewöhnliche Homologietheorie im Sinne von Eilenberg und Steenrod. Man erhält **reduzierte Homologie mit Koeffizienten in G** , indem man die Komplex von dem mit dem Augmentierungshomomorphismus

$$\epsilon : C_0(X; G) \rightarrow G, \quad \sum_{\sigma \in \Delta_0(X)} \lambda_\sigma \cdot \sigma \mapsto \sum_{\sigma \in \Delta_0(X)} \lambda_\sigma$$

erweiterten Kettenkomplex mit Koeffizienten in G nimmt.

Prop. Ist $f : S^n \rightarrow S^n$ stetig vom Grad n , so ist

$$f_* : \tilde{H}_n(S^n; G) \rightarrow \tilde{H}_n(S^n; G)$$

durch Multiplikation mit n gegeben.

Def. Ist X ein CW-Komplex, so ist der zelluläre Kettenkomplex mit Koeffizienten in G definiert durch

$$C_n^{\text{cell}}(X) := H_n(X^n, X^{n-1}; G).$$

Die Randabbildung ∂_n^{cell} ist der verbindende Homomorphismus in der l. e. S. zum Raumtripel (X^n, X^{n-1}, X^{n-2}) mit Koeffizienten in G . Es gilt nach Wahl von passenden Erzeugern:

$$\partial_n^{\text{cell}}(e_\alpha^n) = \sum_\beta d_{\alpha\beta} e_\beta^{n-1}.$$

Def. Sei $p: \tilde{X} \rightarrow X$ eine endliche Überlagerung mit Blätterzahl k . Sei $\tau_n: C_n(X) \rightarrow C_n(\tilde{X})$ die Abbildung, die jedes n -Simplex auf die Summe seiner k möglichen Lifte abbildet. Dann bildet τ_* eine Kettenabbildung und $p_* \circ \tau_*: C_*(X) \rightarrow C_*(\tilde{X})$ ist durch Multiplikation mit k gegeben. Die von τ induzierte Abbildung $\tau_*: H_n(X) \rightarrow H_n(\tilde{X})$ heißt **Transferhomomorphismus**.

Def. Ist nun $k = 2$ so gibt es eine kurze exakte Sequenz

$$0 \rightarrow C_*(X; \mathbb{Z}_2) \xrightarrow{\tau_*} C_*(\tilde{X}, \mathbb{Z}_2) \xrightarrow{p_*} C_*(X, \mathbb{Z}_2) \rightarrow 0.$$

Die davon induzierte lange exakte Sequenz

$$\dots \rightarrow H_*(X; \mathbb{Z}_2) \xrightarrow{\tau_*} H_*(\tilde{X}, \mathbb{Z}_2) \xrightarrow{p_*} H_*(X, \mathbb{Z}_2) \rightarrow H_{*-1}(X; \mathbb{Z}_2) \rightarrow \dots$$

heißt **Transfersequenz**.

Def. Eine Abbildung $f: S^n \rightarrow S^n$ heißt **ungerade**, falls

$$\forall x \in S^n : f(-x) = -f(x).$$

Prop. Jede ungerade Abbildung hat ungeraden Abbildungsgrad.

Satz (Borsuk-Ulam). Sei $f: S^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ stetig. Dann gibt es $x \in S^n$ mit $f(x) = f(-x)$.

Satz (Ham-Sandwich-Theorem). Seien $K_1, \dots, K_n \subset \mathbb{R}^n$ Lebesguemessbar und beschränkt. Dann gibt es eine Hyperebene $H \subset \mathbb{R}^n$, die jeden Teilraum genau halbiert.

Def. Die n -te **Bettizahl** $b_n(X)$ eines topologischen Raumes X ist der Rang von $H_n(X)$ (falls dieser endlich ist).

Def. Sei X ein CW-Komplex. Für $n \geq 0$ sei c_n die Anzahl der n -Zellen in X . Dann heißt

$$\chi(X) := \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n c_n \quad \text{Eulercharakteristik von } X.$$

Satz. Es gilt $\chi(X) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n b_n(X)$.

Bsp. Die **orientierte Fläche vom Geschlecht g** , Σ_g , entsteht durch Verkleben der Randsegmente

$$\alpha_1, \beta_1, \alpha_1^{-1}, \beta_1^{-1}, \dots, \alpha_g, \beta_g, \alpha_g^{-1}, \beta_g^{-1}$$

eines $4g$ -Eckes. Es gilt $\chi(\Sigma_g) = 2 - 2g$.

Korollar (Eulersche Polyederformel). Sei $P \subset \mathbb{R}^3$ ein konvexes Polyeder. Sei e die Anzahl der Ecken, k die Anzahl der Kanten und f die Anzahl der Flächen. Dann ist $e - k + f = 2$.

Bem. Sind X und Y endlich-dim. CW-Komplexe. Dann ist auch $X \times Y$ ein endlich-dimensionaler CW-Komplex. Ist X oder Y ∞ -dimensional, so gibt es auch einen Produktkomplex, doch dieser trägt eine i. A. feinere Topologie als der Produktraum $X \times Y$.

Prop. Seien X und Y endliche CW-Komplexe. Dann gilt

$$\chi(X \times Y) = \chi(X) \cdot \chi(Y).$$

Def. Sei X ein endlicher Simplicialkomplex und $f: X \rightarrow X$ stetig. Wir erhalten für alle $n \geq 0$ eine induzierte Abbildung

$$f_n: H_n(X)/\text{Torsion} \rightarrow H_n(X)/\text{Torsion}.$$

Die **Lefschetzzahl** von f ist definiert als Summe

$$L(f) := \sum (-1)^n \text{tr } f_n.$$

Bsp. $L(\text{id}_X) = \chi(X)$

Satz (Lefschetzer Fixpunktsatz).

Wenn $L(f) \neq 0$, dann hat f einen Fixpunkt.

Def. Eine n -dimensionale topologische **Mannigfaltigkeit** ist ein Hausdorffraum M , sodass jeder Punkt in M eine offene Umgebung besitzt, die homöomorph zum \mathbb{R}^n ist.

Bem. Man fordert oft zusätzlich, dass M das zweite Abzählbarkeitsaxiom erfüllt.

Def. Eine kompakte (randlose) Mft heißt **geschlossen**.

Def. Sei X ein topologischer Raum und $A \subset X$. Dann heißt

$$H_n(X|A) := H_n(X, X - A)$$

lokale Homologie von X bei A .

Def. Sei M eine n -Mannigfaltigkeit. Eine **lokale Orientierung** von M bei $x \in M$ ist gegeben durch Wahl eines Erzeugers

$$\mu_x \in H_n(M|x) \cong \mathbb{Z}.$$

Lemma. Eine Wahl einer lokalen Orientierung bei $x \in \mathbb{R}^n$ legt eindeutig eine lokale Orientierung für alle $y \in \mathbb{R}^n$ fest.

Def. Sei M eine Mft. Eine **Orientierung** von M ist eine Abbildung

$$x \in M \mapsto \mu_x \in H_n(M|x),$$

sodass für alle $x \in M$ eine offene Kugel U um x und ein Erzeuger $\mu_U \in H_n(X|U)$ existiert, sodass für alle $y \in U$ die lokale Orientierung μ_y durch Einschränkung von μ_U gegeben ist.

Def. Falls eine Orientierung von M existiert, so heißt M **orientierbar**.

Prop. Sei M eine zshgde orientierbare Mft. Dann existieren genau zwei Orientierungen von M .

Def. Sei M eine n -Mft. Setze

$$\tilde{M} := \{\mu_x \mid x \in M \text{ und } \mu_x \in H_n(M|x) \text{ ist lokale Orientierung an } x.\}$$

Die Topologie auf M wird erzeugt von folgenden Mengen: Sei $U \subset M$ offen, $\mu_U \in H_n(M|U)$. Dann ist die Menge

$$\{\mu_U|_y \mid y \in U\} \subset \tilde{M}$$

offen. Dies definiert eine zweiblättrige Überlagerung \tilde{M} von M .

Prop. \tilde{M} ist orientierbar.

Prop. Sei M eine Mft. Dann ist M genau dann orientierbar, wenn $\tilde{M} \rightarrow M$ eine triviale Überlagerung ist.

Korollar. Ist M eine zshgde Mft und besitzt $\pi_1(M)$ keine Untergruppe vom Index 2, so ist M orientierbar.

Prop. Sei M eine kompakte zshgde n -Mft.

- Falls M orientierbar ist, dann ist für alle $x \in M$ die kanonische Abbildung $H_n(M) \rightarrow H_n(M|x)$ ein Isomorphismus. Insbesondere gilt $H_n(M) \cong \mathbb{Z}$.
- Falls M nicht orientierbar ist, gilt $H_n(M) = 0$.
- $H_n(M, \mathbb{Z}_2) = \mathbb{Z}_2$ unabhängig von Orientierbarkeit.
- $H_i(M) = 0$ für $i > n$.

Def. Sei M ein n -Mft und G eine abelsche Gruppe. Eine **verallgemeinerte G -Orientierung** ist eine Zuordnung

$$x \in M \mapsto \mu_x \in H_n(M|x; G),$$

sodass für alle $x \in M$ eine offene Kugel U um x und ein Element $\mu_U \in H_n(X|U)$ existiert, sodass für alle $y \in U$ die lokale Orientierung μ_y durch Einschränkung von μ_U gegeben ist.

Prop. Sei M eine zshgde n -Mft. Dann ist M genau dann orientierbar, wenn es eine verallgemeinerte \mathbb{Z} -Orientierung von M gibt, die an einem Punkt von 0 verschieden ist.

Lemma. Sei M eine n -Mft, G eine ab. Gruppe und $A \subset M$ kompakt.

- Ist $x \mapsto \mu_x$ eine verallgemeinerte G -Orientierung von M , so gibt es genau eine Klasse $\alpha_A \in H_n(M|A; G)$, deren Bild in $H_n(M|x; G)$ für alle $x \in M$ mit μ_x übereinstimmt.
- $H_i(M|A; G) = 0$ für $i > n$.

Korollar. Sei M eine zshgde kompakte n -Mft. Dann ist M genau dann orientierbar, wenn $H_n(M) \cong \mathbb{Z}$. Dann entspricht jeder Erzeuger von $H_n(M)$ einer Orientierung von M . Andernfalls gilt $H_n(M) = 0$.

Prop. Sei M eine zshgde nichtkompakte n -Mft. Dann ist $H_{\geq n}(M; G) = 0$ für beliebige Koeffizienten G .

Satz. Sei M eine kompakte n -Mft. Dann ist $H_*(M; \mathbb{Z})$ in allen Graden endlich erzeugt und $H_{>n}(M; \mathbb{Z}) = 0$.

Def. Die **Eulercharakteristik** einer kompakten n -Mft ist

$$\chi(M) := \sum_{i=0}^n \text{rk } H_i(M; \mathbb{Z}) = \sum_{i=0}^n b_i.$$

Def. Ein topol. Raum X heißt **lokal zusammenziehbar**, falls für jede Umgebung $U \subset X$ eines beliebigen Punktes $x \in U$ eine weitere Umgebung $V \subset U$ von x existiert, sodass die Inklusion $V \hookrightarrow U$ homotop zu einer konstanten Abbildung ist.

Lemma. Mannigfaltigkeiten sind lokal zusammenziehbar.

Satz. Sei $K \subset \mathbb{R}^n$ lokal zusammenziehbar und abgeschlossen. Dann gibt es eine Umgebung $U \supset K$ von K , sodass die Inklusion $K \hookrightarrow U$ ein Retrakt ist.

Def. Ein topol. Raum X ist ein **Euklidischer Umgebungsretrakt**, falls eine topol. Einbettung $X \hookrightarrow \mathbb{R}^n$ existiert und für jede solche Einbettung das Bild Retrakt einer offenen Umgebung ist.

Korollar. Kompakte topologische Mfden sind Euklidische Umgebungsretrakte.

Prop. Sei X ein CW-Komplex und Y ein topologischer Raum. Sei $f : X^{n-1} \rightarrow Y$ stetig. Dann sind äquivalent:

- f lässt sich zu einer stetigen Abbildung $X^n \rightarrow Y$ fortsetzen.
- Alle Kompositionen $f \circ \phi_\alpha : \partial D_\alpha^n \rightarrow Y$ sind homotop zu konstanten Abbildungen. Hierbei sind $\phi_\alpha : \partial D_\alpha \rightarrow X^{n-1}$ die anklebenden Abbildung der n -Zellen.

Prop. Es gibt einen kanonischen Morphismus $h : \pi_1(X) \rightarrow H_1(X)$. Wenn X wegzusammenhängend ist, so ist X surjektiv und der Kern von h ist die Kommutator-Untergruppe $K(\pi_1(X, x_0))$. Wir erhalten dann einen Iso $\pi_1(X)_{\text{ab}} \rightarrow H_1(X)$.

Def. Ein **Kokettenkomplex** C^* ist eine Folge $(C^n)_{n \in \mathbb{N}}$ von abelschen Gruppen und Gruppenhomomorphismen $\delta^n : C^n \rightarrow C^{n+1}$ mit der Eigenschaft $\delta^{n+1} \circ \delta^n = 0$. Analog zu Kettenkomplexen sind **Kozykel**, **Koränder** und **Kohomologiegruppen** $H^n(C^*) := \ker \delta_n / \text{im } \delta_{n-1}$ des Kokettenkomplex definiert.

Def. Sei (X, A) ein Raumpaard und G eine abelsche Gruppe. Dann heißt $(C^*(X, A; G), \delta^*)$ mit

$$C^n(X, A; G) := \text{Hom}(C_n(X, A), G), \quad \delta^n := \text{Hom}(\partial_{n+1}, G)$$

singulärer (rel.) Kokettenkomplex von X mit Koeffizienten in G . Die n -te **singuläre Kohomologie** mit Koeffizienten in G ist

$$H^n(X, A; G) := H^n(C^*(X, A; G)).$$

Notation. • $H^n(X; G) := H^n(X, \emptyset; G)$

- $H^n(X, A) := H^n(X, A; \mathbb{Z})$

Bem. $H^n(-; G)$ ist ein kontravarianter Funktor von der Kategorie der Raumpaare in die Kategorie der abelschen Gruppen.

Lemma. Für jede abelsche Gruppe G ist $\text{Hom}(-, G)$ linksexakt: Sei $0 \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow 0$ eine k. e. S. von abelschen Gruppen. Dann ist

$$0 \rightarrow \text{Hom}(C, G) \rightarrow \text{Hom}(B, G) \rightarrow \text{Hom}(A, G) \quad \text{exakt.}$$

Def. Sei $0 \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow 0$ eine k. e. S. in einer abelschen Kategorie \mathcal{A} . Die Sequenz heißt **spaltend**, falls sie isomorph zur k. e. S. $0 \rightarrow A \rightarrow A \oplus C \rightarrow C$ ist.

Prop. Für eine Sequenz $0 \rightarrow A \xrightarrow{f} B \xrightarrow{g} C \rightarrow 0$ sind äquivalent:

- Die Sequenz spaltet.
- Es existiert eine Retraktion $r : B \rightarrow A$ mit $r \circ f = \text{id}_A$.
- Es existiert ein Schnitt $s : C \rightarrow B$ mit $g \circ s = \text{id}_C$.

Prop. Seien \mathcal{A} und \mathcal{B} abelsche Kategorien, $F : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ ein additiver Funktor und $0 \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow 0$ eine spaltende k. e. S. in \mathcal{A} . Dann ist auch $0 \rightarrow F(A) \rightarrow F(B) \rightarrow F(C) \rightarrow 0$ spaltend exakt.

Bem. Sei (X, A) ein Raumpaard. Man erhält aus der k. e. Sequenz

$$0 \rightarrow C^n(A) \rightarrow C^n(X) \rightarrow C^n(X, A) \rightarrow 0$$

durch Anwenden von $\text{Hom}(-, G)$ eine kurze exakte Sequenz

$$0 \rightarrow C^n(X, A; G) \rightarrow C^n(X; G) \rightarrow C^n(A; G) \rightarrow 0.$$

Daraus erhält man wiederum eine lange exakte Sequenz

$$\dots \rightarrow H^*(X, A; G) \rightarrow H^*(X; G) \rightarrow H^*(A; G) \rightarrow H^{*+1}(X, A; G) \rightarrow \dots$$

Prop. Seien $f, g : (X, A) \rightarrow (Y, B)$ homotope Abbildungen von Raumpaaren. Dann gilt $f^* = g^* : H^*(Y, B; G) \rightarrow H^*(X, A; G)$.

Satz. Sei (X, A) ein Raumpaard, $U \subset A$ mit $\bar{U} \subset \text{int } A$. Dann induziert die Inklusion $(X - U, A - U) \hookrightarrow (X, A)$ Isomorphismen

$$H^n(X, A; G) \rightarrow H^n(X - U, A - U; G) \quad \text{für alle } n \geq 0.$$

Bem. Die kontravarianten Funktoren $H^n(-; G) : \mathbf{Top}(2) \rightarrow \mathbf{AbGrp}$, $n \in \mathbb{Z}$ definieren eine **Kohomologietheorie** im Sinne von Eilenberg und Steenrod.

Def. Die **reduzierte Kohomologie** $\tilde{H}^n(X; G)$ mit Koeff. in G eines topol. Raumes X ist die Homologie des Kokettenkomplexes, der durch Anwenden von $\text{Hom}(-, G)$ aus dem augmentierten Komplex

$$\dots \rightarrow C_2(X) \rightarrow C_1(X) \rightarrow C_0(X) \rightarrow \mathbb{Z} \rightarrow 0 \quad \text{entsteht.}$$

Prop. Sei $X = \cup_{i \in I} U_i$ die Zerlegung von X in Wegzshgskmpnnten. Dann induzieren die Inklusionen $U_i \hookrightarrow X$ einen kanonischen Iso

$$G^*(X; G) \cong \prod_{i \in I} H^*(X; G).$$

Satz. Seien $A, B \subset X$ mit $\text{int}(A) \cup \text{int}(B) = X$. Dann gibt es in Kohomologie eine Mayer-Vietoris-Sequenz

$$\dots \rightarrow H^*(X; G) \rightarrow H^*(A; G) \oplus H^*(B; G) \rightarrow H^*(A \cap B; G) \rightarrow H^{*+1}(X; G) \rightarrow \dots$$

Def. Sei X ein Δ -Komplex und $A \subset X$ ein Unterkomplex. Dann ist $(C_\Delta^*(X, A; G), \delta^*)$ der Unterkomplex von $C^*(X, A; G)$ mit

$$C_\Delta^n(X, A; G) := \text{Hom}(C_\Delta^n(X, A), G).$$

Die Homologie dieses Komplexes wird mit $H_\Delta^*(X, A; G)$ bezeichnet.

Prop. Die Inklusion $C_\Delta^*(X, A) \hookrightarrow C_*(X, A)$ induziert einen Iso

$$H^*(X, A; G) \rightarrow H_\Delta^*(X, A; G).$$

Def. Sei X ein CW-Komplex. Der **zelluläre Kokettenkomplex** $(C_{\text{cell}}^*(X; G), \delta_{\text{cell}})$ ist definiert durch

$$C_{\text{cell}}^n(X, G) := H^n(X^n, X^{n-1}; G)$$

mit δ_n dem verbindenden Homomorphismus in der l. e. Kohomologiesequenz des Raumtripels (X^{n+1}, X^n, X^{n-1}) .

Prop. $H^*(C_{\text{cell}}^*(X; G)) \cong H^*(X; G)$

Bem. $C_n(X; G) \cong C_n(X) \otimes G$

Prop. Für jede ab. Gruppe G ist der Funktor $-\otimes G$ rechtsexakt: Sei $0 \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow 0$ eine k. e. S. abelscher Gruppen. Dann ist

$$A \otimes G \rightarrow B \otimes G \rightarrow C \otimes G \rightarrow 0 \quad \text{exakt.}$$

Def. Sei H eine ab. Gruppe. Eine **freie Auflösung** von H ist ein azyklischer Kettenkomplex

$$\dots \rightarrow F_3 \rightarrow F_2 \rightarrow F_1 \rightarrow F_1 \rightarrow H \rightarrow 0 \quad (\text{kurz: } F_* \rightarrow H),$$

bestehend aus freien abelschen Gruppen F_i , $i \geq 0$.

Prop. Seien $F_* \rightarrow J$ und $G_* \rightarrow K$ freie Auflösungen. Dann existiert zu jedem Homomorphismus $\alpha : J \rightarrow K$ eine Kettenabbildung $\alpha_* : F_* \rightarrow K_*$, sodass $(F_0 \rightarrow K \xrightarrow{\alpha} J) = (F_0 \xrightarrow{\alpha_0} G_0 \rightarrow K)$. Die Kettenabbildung α_* ist eindeutig bis auf Kettenhomotopie.

Def. Seien G und H ab. Gruppen und $F_* \rightarrow H$ eine freie Auflösung.

$$\mathbf{Tor}_n(H, G) := H_n(F_* \otimes G), \quad \mathbf{Ext}^n(H, G) := H^n(\text{Hom}(F_*, G)).$$

Prop. Die Definition von Tor_n und Ext^n hängt nicht von der Wahl der Auflösung ab (bis auf Isomorphie).

Prop. Tor_n und Ext^n definieren Funktoren

$$\begin{aligned} \text{Tor}_n : \mathbf{AbGrp} \times \mathbf{AbGrp} &\rightarrow \mathbf{AbGrp}, \\ \text{Ext}^n : \mathbf{AbGrp}^{\text{op}} \times \mathbf{AbGrp} &\rightarrow \mathbf{AbGrp}. \end{aligned}$$

Prop. Jede abelsche Gruppe besitzt eine Auflösung der Länge ≤ 2 .

Korollar. $\text{Tor}_{\geq 2}(G, H) = 0 = \text{Ext}^{\geq 2}(G, H)$ für ab. Gruppen G, H

Notation. $\text{Tor}(G, H) := \text{Tor}_1(G, H)$, $\text{Ext}(G, H) := \text{Ext}^1(G, H)$

Prop (Ext-Rechenregeln). • $\text{Ext}^0(G, H) \cong \text{Hom}(G, H)$

- $\text{Ext}(\oplus_i H_i, G) \cong \prod_i \text{Ext}(H_i, G)$ • $\text{Ext}(\mathbb{Z}_n, G) = G/nG$
- Ist $0 \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow 0$ eine k. e. S. ab. Gruppen und H eine ab. Gruppe, so erhalten wir eine induzierte exakte Sequenz

$$\begin{aligned} 0 \rightarrow \text{Hom}(H, A) \rightarrow \text{Hom}(H, B) \rightarrow \text{Hom}(H, C) \rightarrow \\ \rightarrow \text{Ext}(H, A) \rightarrow \text{Ext}(H, B) \rightarrow \text{Ext}(H, C) \rightarrow 0. \end{aligned}$$

Prop (Tor-Rechenregeln). • $\text{Tor}_0(A, B) \cong A \otimes B$

- $\text{Tor}_0(A, B) \cong A \otimes B$ • $\text{Tor}(A, B) \cong \text{Tor}(B, A)$
- $\text{Tor}(\oplus_i A_i, B) \cong \oplus_i \text{Tor}(A_i, B)$
- $\text{Tor}(A, B) \cong \text{Tor}(T(A), B)$ mit $T(A) < A$ Torsionsuntergruppe

- $\text{Tor}(A, B) = 0$, falls A torsionsfrei • $\text{Tor}(\mathbb{Z}_n) \cong \ker(A \xrightarrow{n} A)$
- Ist $0 \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow 0$ eine k. e. S. ab. Gruppen und H eine ab. Gruppe, so erhalten wir eine induzierte exakte Sequenz

$$\begin{aligned} 0 \rightarrow \text{Tor}(A, D) \rightarrow \text{Tor}(B, D) \rightarrow \text{Tor}(C, D) \rightarrow \\ \rightarrow A \otimes D \rightarrow B \otimes D \rightarrow C \otimes D \rightarrow 0. \end{aligned}$$

Satz (Universelles Koeffiziententheorem für Homologie). Für jeden Raum X und für jede ab. Gruppe G existiert eine k. e. S.

$$0 \rightarrow H_n(X) \otimes G \rightarrow H_n(X; G) \rightarrow \text{Tor}(H_{n-1}(X), G) \rightarrow 0.$$

Diese ist natürlich in X und G . Die Sequenz spaltet, der Spalt ist allerdings nur natürlich in G , nicht in X .

Satz (Universelles Koeffiziententheorem für Kohomologie). Für jeden Raum X und für jede ab. Gruppe G existiert eine k. e. S.

$$0 \rightarrow \text{Ext}(H_{n-1}(X), G) \rightarrow H^n(X; G) \rightarrow \text{Hom}(H_n(X), G) \rightarrow 0.$$

Diese ist natürlich in X und G . Die Sequenz spaltet, der Spalt ist allerdings nur natürlich in G , nicht in X .

Korollar. Sei $f : X \rightarrow Y$ eine stetige Abbildung, die in Homologie mit \mathbb{Z} -Koeffizienten in jedem Grad Isomorphismen induziert. Dann gilt Gleiches für Homologie und Kohomologie mit beliebigen Koeffizienten G .

Satz. Für jeden Raum X und für jede endlich erzeugte abelsche Gruppe G existiert eine kurze exakte Sequenz

$$0 \rightarrow H^n(X; \mathbb{Z}) \otimes G \rightarrow H^n(X; G) \rightarrow \text{Tor}(H^{n+1}(X; \mathbb{Z}), G) \rightarrow 0.$$

Def. Sei R ein kommutativer Ring mit Eins und X ein topol. Raum. Das **Cup-Produkt** $\phi \cup \psi \in H^{k+l}(X; R)$ von Koketten $\phi \in H^k(X; R)$ und $\psi \in H^l(X; R)$ ist definiert durch

$$(\phi \cup \psi)(\sigma) := \phi(\sigma|_{\langle v_0, \dots, v_k \rangle}) \cdot \psi(\sigma|_{\langle v_{k+1}, \dots, v_{k+l} \rangle}).$$

Lemma. • $\partial(\phi \cup \psi) = (\partial\phi) \cup \psi + (-1)^k \phi \cup \partial\psi$

- Assoziativität: $(\phi \cup \psi) \cup \omega = \phi \cup (\psi \cup \omega)$
- Natürlichkeit: $f^*(\phi \cup \psi) = f^*(\phi) \cup f^*(\psi)$ für $f : X \rightarrow Y$ stetig
- Das Tensorprodukt induziert eine R -bilineare Abbildung

$$C^k(X; R) \times C^l(X; R) \rightarrow C^{k+l}(X; R)$$

und somit eine Kettenabbildung ausgehend von dem Tensorproduktkomplex $C^*(X; R) \otimes_R C^*(X; R) \rightarrow C^*(X; R)$.

Korollar. Das Cup-Produkt induziert eine bilineare Abbildung

$$\cup : H^k(X; R) \times H^l(X; R) \rightarrow H^{k+l}(X; R).$$

Diese macht $H^*(X; R)$ zu einer graduierten, assoziativen R -Algebra mit Einselement $[\sum \sigma \lambda_\sigma \sigma \mapsto \sum \sigma \lambda_\sigma] \in H^0(X; R)$

Bem. Seien $A, B \subset X$ offene Teilmengen oder Unterkomplexe. Dann gibt es ein **relatives Cup-Produkt**

$$C^k(X, A; R) \times C^l(X, B; R) \rightarrow C^{k+l}(X, A+B; R).$$

Satz. Sei R kommutativ. Dann ist $H^*(X; R)$ graduiert kommutativ, d. h. $\forall \alpha \in H^k(X; R) : \forall \beta \in H^l(X; R) : \alpha \cup \beta = (-1)^{kl} \beta \cup \alpha$.

Def. Seien X und Y topol. Räume. Das **Kreuzprodukt** (auch: externes Cup-Produkt) ist die Abbildung

$$\begin{aligned} \times : H^k(X; R) \times H^l(Y; R) &\rightarrow H^{k+l}(X \times Y; R), \\ ([c], [d]) &\mapsto [p_X^*(c) \cup p_Y^*(d)]. \end{aligned}$$

Für offene Teilmengen oder Unterkomplexe $A \subset X$ und $B \subset X$ gibt es ein relatives Kreuzprodukt

$$\times : H^k(X, A; R) \times H^l(Y, B; R) \rightarrow H^{k+l}(X \times Y, A \times Y \cup X \times B; R).$$

Satz. Seien $k, l \geq 0$, $I^n := [0, 1]^n$ der n -dimensionale Würfel. Seien $c^k \in H^k(I^k, \partial I^k; R) \cong R$ und $c^l \in H^l(I^l, \partial I^l; R) \cong R$ Erzeuger (als R -Modul). Dann bildet das Kreuzprodukt

$$\times : H^k(I^k, \partial I^k; R) \times H^l(I^l, \partial I^l; R) \rightarrow H^{k+l}(I^{k+l}, \partial I^{k+l}; R)$$

das Element (c^k, c^l) auf einen Erzeuger ab.

Satz. Seien $c \in H^k(\mathbb{R}^k | 0; R)$ und $d \in H^l(\mathbb{R}^l | 0; R)$ Erzeuger. Dann ist $c \times d$ ein Erzeuger von $H^{k+l}(\mathbb{R}^{k+l} | 0; R)$.

Satz. Sei $\alpha \in H^1(\mathbb{R}P^n; \mathbb{Z}_2)$ (bzw. $\alpha \in H^2(\mathbb{C}P^n; \mathbb{Z})$) ein Erzeuger. Da $H^{n+1}(\mathbb{R}P^n; \mathbb{Z}_2) = 0$ (bzw. $H^{2n+2}(\mathbb{C}P^n; \mathbb{Z}) = 0$), erhalten wir eine induzierte Abbildung

$$\mathbb{Z}_2[\alpha]/(\alpha^{n+1}) \rightarrow H^*(\mathbb{R}P^n; \mathbb{Z}_2) \quad / \quad \mathbb{Z}[\alpha]/(\alpha^{n+1}) \rightarrow H^*(\mathbb{C}P^n; \mathbb{Z}).$$

Diese ist ein Isomorphismus von graduierten Ringen.

Def. Sei X ein topol. Raum und R ein kommutativer Ring. Für $k \geq l$ ist das **Cap-Produkt** die R -bilineare Abbildung

$$\begin{aligned} \cap : C_k(X; R) \times C^l(X; R) &\rightarrow C_{k-l}(X; R) \\ (\sigma, \phi) &\mapsto \phi(\sigma|_{\langle v_0, \dots, v_l \rangle}) \cdot \sigma|_{\langle v_{l+1}, \dots, v_{k+l} \rangle}. \end{aligned}$$

Diese induziert in (Ko-)Homologie eine Abbildung

$$\cap : H_k(X; R) \otimes H^l(X; R) \rightarrow H_k(X; R).$$

Relative Version: Seien $A, B \subset X$ offen, dann gibt es

$$\cap : H_k(X, A \cup B; R) \times H^l(X, A; R) \rightarrow H_{k-l}(X, B; R).$$

Def. Das Tensorprodukt zweier Kettenkomplexe (C_*, ∂_*^C) und (D_*, ∂_*^D) ist definiert durch

$$\begin{aligned} (C \otimes D)_n &:= \bigoplus_{k+l=n} C_k \otimes D_l \\ \delta_n^{C \otimes C'} &:= \bigoplus_{k+l=n} (\partial_k^C \otimes \text{id}_{D_l} + (-1)^k \text{id}_{C_k} \otimes \partial_l^{D'}) \end{aligned}$$

Satz (Eilenberg-Zilber). Seien X und Y topologische Räume. Es existiert eine natürliche (in X und Y) Kettenhomotopieäquivalenz

$$C_*(X) \otimes C_*(Y) \xrightleftharpoons[\theta]{\times} C_*(X \times Y).$$

Die Abbildungen \times und θ sind im Grad 0 die kanonischen Abb.

Def. Seien A und B graduierte kommutative R -Algebren, R ein kommutativer Ring. Dann ist die graduiert kommutative Tensoralgebra $A \otimes_R B$ definiert durch

$$(A \otimes B)_n = \bigoplus_{k+l=n} A_k \otimes B_l, \quad (a \otimes b)(c \otimes d) := (-1)^{|b||c|} ac \otimes bd.$$

Satz (Künneth-Thm für Homologie). Es gibt eine natürliche k. e. S.

$$0 \rightarrow (H_*(X) \otimes H_*(Y))_n \rightarrow H_n(X \times Y) \rightarrow \text{Tor}(H_*(X), H_*(Y))_{n-1} \rightarrow 0$$

Die zweite Abbildung wird durch das Kreuzprodukt induziert. Die Sequenz spaltet, aber nicht natürlich.

Satz (Künneth-Thm für Kohomologie). Sei R ein kommutativer Hauptidealring mit 1. Falls $H_*(X; R)$ oder $H_*(Y; R)$ in jedem Grad ein endlich erzeugter R -Modul ist, so gibt es eine natürliche k. e. S.

$$0 \rightarrow (H^*(X; R) \otimes H^*(Y; R))^n \rightarrow H^n(X \times Y; R) \rightarrow \text{Tor}(H^*(X; R), H^*(Y; R))^n \rightarrow 0$$

Dabei ist die zweite Abbildung das kohomologische Kreuzprodukt.

Def. Die **Kohomologie mit kompakten Träger** $H_c^*(X)$ mit Koeffizienten R eines topologischen Raumes X ist die Kohomologie des Kokettenkomplexes (C_c^*, δ_c^*) mit

$$C_c^i(X) := \varinjlim_{K \subset X} C^i(X, X - K; R),$$

$$\delta_c^i := \varinjlim_{K \subset X} (\delta^i : C^i(X, X - K; R) \rightarrow C^{i+1}(X, X - K; R))$$

Der direkte Limes läuft dabei über alle kompakten Teilmengen K .

Satz (Poincaré-Dualität). Sei R ein kommutativer Ring mit Eins und M eine geschlossene orientierte n -Mft mit Orientierungsklasse $[M] \in H_n(M; R)$. Dann ist die Abbildung

$$D : H^k(M; R) \rightarrow H_{n-k}(M; R), \quad \alpha \mapsto [M] \cap \alpha$$

ein Isomorphismus für alle k .

Satz (Poincaré-Dualität, allg.). Sei R ein komm. Ring mit 1 und M eine orientierte n -Mft. Dann gibt es für alle kompakten Teilmengen $K \subset X$ einen Erzeuger $\mu_K \in H_n(M, M - K; R)$ der lokal zur gewählten Orientierung einschränkt. Die Abbildungen

$$H^k(M, M - K; R) \rightarrow H_{n-k}(M, M; R), \quad x \mapsto \mu_K \cap x$$

induzieren im direkten Limes eine Dualitäts-Abbildung

$$D_M : H_c^k(M; R) \rightarrow H_{n-k}(M; R).$$

Diese ist ein Isomorphismus für alle k .

Bsp (Homologie von wichtigen Räumen).

$$\tilde{H}_i(S^n) = \tilde{H}_i(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n - \{0\}; R) = \begin{cases} R, & \text{wenn } i = 0, n \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$H_i(\mathbb{R}P^n) = \begin{cases} \mathbb{Z}, & \text{wenn } i = 0 \\ \mathbb{Z}_2, & \text{wenn } i < n \text{ ungerade} \\ \mathbb{Z}, & \text{wenn } i = n \text{ ungerade} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$H_i(\mathbb{R}P^n; \mathbb{Z}_2) = \begin{cases} \mathbb{Z}_2, & \text{wenn } i \leq n \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$H_i(\mathbb{C}P^n) = \begin{cases} \mathbb{Z}, & \text{wenn } i \leq 2n \text{ und } i \text{ gerade} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$H_i(T^n) = H_i(S^{n-1}) = \mathbb{Z} \binom{n}{i}$$

$$\tilde{H}_i(\text{Kleinsche Flasche}) = \begin{cases} \mathbb{Z} \oplus \mathbb{Z}_2, & \text{wenn } i = 1 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$