Algebraische Topologie[1]

Dozent: Dr. Vadim Alekseev
LaTeX: rydval.jakub@gmail.com
Version: 23. November 2016
Technische Universität Dresden

[1] Math Ma ALGTOP: Algebraische Topologie, WS 2016/17

Inhaltsverzeichnis

1. Vorlesung, 12.10.2016

0 Einführung

Algebraische Topologie dient dazu, mittels algebraischen Methoden (Zuordnung von algebraischen Objekten) topologische Räume zu verstehen (Klassifizierung). Beispiele von algebraischen Objekten:

- $S_2 = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x^2 + y^2 + z^2 = 1\}$ *Einheitssphäre*,
- Π_2 *Torus*.

Ein Merkmal der Sphäre: jede Schleife $\gamma : [0, 1] \to S^2$ (stetig) ist zusammenziehbar. Auf dem Torus gibt es sogar zwei Arten nicht zusammenziehbarer Schleifen, die man ineinander nicht überführen Kann.

Literaturempfehlung:

- A. Hatcher: Algebraic Topology (`https://www.math.cornell.edu/~hatcher/AT/AT.pdf`),
- C. Kosniowski: A First Course in Algebraic Topology,
- A. Fomenko, D. B. Fuchs: Homotopic Topology.

1 Topologische Räume

1.1 Grundlagen

1.1.1 Definition. $(X, \mathcal{T})$ ist ein topologischer Raum, wenn $\mathcal{T}$ ein System von Teilmengen von X ist, das folgende Eigenschaften hat:

(1) $\emptyset, X \in \mathcal{T}$,
(2) $(U_i)_{i \in I} \subset \mathcal{T} \implies \bigcup_{i \in I} U_i \in \mathcal{T}$,
(3) $U_1, ..., U_n \in \mathcal{T} \implies \bigcup_{i=1}^{n} U_i \in \mathcal{T}$.

$\mathcal{T}$ heißt *Topologie*, Elemente von $\mathcal{T}$ heißen *offene Teilmengen* von X, $U_t \subset X$ heißt *Umgebung* von einem $t \in X$ wenn $\exists O \in \mathcal{T}$ s.d. $t \in O \subset U_t$. $\{O_i\}_{i \in I} \subset \mathcal{T}$ heißt *Basis* von $\mathcal{T}$, falls $\forall O \in \mathcal{T} \exists J \subset I$ s.d. $O = \bigcup_{j \in J} O_j$. $A \subset X$ heißt *abgeschlossen* gdw. $X \backslash A$ offen ist. Sei $(X, \mathcal{T}')$ ein weiterer topologischer Raum, dann ist $\mathcal{T}'$ *stärker* als $\mathcal{T}$, wenn $\mathcal{T} \subseteq \mathcal{T}'$ ($\iff \mathcal{T}$ *schwächer* als $\mathcal{T}'$)

1.1.2 Beispiel. • X beliebige Menge;

- $\mathcal{T}_{\text{disc}} = \{\text{alle Teilmengen von X}\}$ *diskrete Topologie*,
- $\mathcal{T}_{\text{triv}} = \{\emptyset, X\}$ *antidiskrete Toplogie*.

- (X, d) metrischer Raum;
  - $\mathcal{T}_d := \{U \subset X \mid \forall x \in U \exists \varepsilon > 0 \text{ s.d. } B(x, \varepsilon) \subset U\}$.

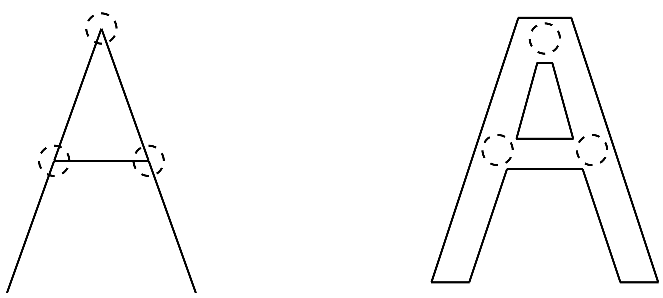
1.1.3 Definition. $(X, \mathcal{T}_X)$, $(Y, \mathcal{T}_Y)$ topologische Räume, Abb. $f : X \to Y$ heißt

- *stetig in* $x \in X$ falls $\forall$ Umgeb. $U_{f(x)} \exists$ Umgeb. $U_x : f(U_x) \subset U_{f(x)}$,
- *stetig*, wenn $\forall U \in \mathcal{T}_Y$ gilt: $f^{-1}(U) \in \mathcal{T}_X$,
- *Homöomorphismus*, falls f stetig ist und $\exists g : Y \to X$ stetig mit $f \circ g = \mathrm{id}_Y$, $g \circ f = \mathrm{id}_X$ (insbesondere sind Homöomorphismen stets Bijektionen).

Bemerkung: Falls nicht explizit gesagt, wird ab jetzt Stetigkeit aller Abb. vorausgesetzt.

1.1.4 Beispiel. • Eine "stetige Deformation" des Einheitskreises S_2 liefert einen Homöomorphismus zwischen den Parametrisierungen, die S_2 und das Endprodukt der Deformation beschreiben.

- Die Buchstaben



sind nicht homöomorph—die eindimensionale/“dünne” Version von A” verliert durch Wegname von kleiner Umgebung geschickt gewählter Punkten den Zusammenhang, die zweidimensionale/“dicke” Version nicht.

1.1.5 Definition. topologischer Raum $(X, \mathcal{T}_X)$ heißt:

- *zusammenhängend*, wenn es keine Zerlegung $X = X_1 \sqcup X_2$ in zwei disjunkte, nichtleere, offene Mengen gibt,
- *wegzusammenhängend*, wenn $\forall x, y \in X \exists \gamma : [0,1] \to X$ stetig mit $\gamma(0) = x$, $\gamma(1) = y$.

1.1.6 Proposition. *Wegzusammenhängende Räume sind zusammenhängend.*

Beweis. (Beruhrt an der Tatsache, dass $[0,1]$ zusammenhängend ist.) $(X, \mathcal{T}_X)$ topologischer Raum, $X = X_1 \sqcup X_2$, X_1, X_2 offen, nichtleer $\implies \exists x \in X_1, y \in X_2$. Da X wegzusammenhängend ist: $\exists \gamma : [0,1] \to X$, $\gamma(0) = x$, $\gamma(1) = y$. Es folgt $[0,1] = \gamma^{-1}(X) = \gamma^{-1}(X_1 \sqcup X_2) = \gamma^{-1}(X_1) \sqcup \gamma^{-1}(X_2)$. Die Tatsache, dass $\gamma^{-1}(X_1)$, $\gamma^{-1}(X_2)$ offen sind liefert einen Widerspruch. ∎

1.1.7 Definition. $(X, \mathcal{T})$ topologischer Raum, $A \subset X$.

$$\overline{A} := \bigcap_{\substack{A \subset F \subset X \\ \text{abgeschl.}}} F$$

ist der *Abschluss* von A. A liegt *dicht* in $X :\iff \overline{A} = X$.

1.1.8 Lemma. $\overline{A} = \{x \in X \mid \forall U \ni x$ *offen gilt* $U \cap A \neq \emptyset\}$.

Beweis. Übung. ∎

1.1.9 Definition. $(X, \mathcal{T})$ topologischer Raum heißt *Hausdorffraum*, wenn

$$\forall x \neq y \in X \exists U_x, U_y \text{ offen mit } x \in U_x,\ y \in U_y,\ U_x \cap U_y = \emptyset.$$

Bemerkung: Metrische Räume sind Hausdorffräume.

1.1.10 Definition. $(X, \mathcal{T})$ topologischer Raum heißt *kompakt*, wenn es für jede offene Überdeckung $\{U_i\}_{i \in I}$ von X (also U_i offen, $\bigcup_{i \in I} U_i = X$) eine endliche Teilüberdeckung $U_{i_1}, ..., U_{i_n}$ gibt ($\exists i_1, ..., i_n \in I$ s.d. U_i offen, $\bigcup_{k=1}^{n} U_{i_k} = X$).

Bemerkung: Es ist sinnvoll, Kompaktheit nur auf Hausdorffräumen zu betrachten. Im Weiteren werden topologische Räume/ Hausdorffräume einfach mit X bezeichnet.

1.1.11 Definition. $(X, \mathcal{T}_X)$ topologischer Raum, $Y \subset X \implies (Y, \mathcal{T}_Y)$ ist topologischer Raum mit *induzierter Topologie* (*Teilraumtopologie*) $\mathcal{T}_Y := \{U \cap Y \mid U \in \mathcal{T}_X\}$.

1.1.12 Proposition. *X Hausdorffraum, $Y \subset X$ kompakt $\implies$ Y abgeschlossen.*

Beweis. X ist Hausdorffraum $\implies$ $\forall x \in X\backslash Y \forall y \in Y \exists V_{x,y} \ni y$, $U_{x,y} \ni x$ offen mit $V_{x,y} \cap U_{x,y} = \emptyset$. Wenn $x \in X\backslash Y$ $\implies$ $\bigcup_{y \in Y}(V_{x,y} \cap Y) = Y$, $V_{x,y} \cap Y$ offen in Y. Y ist kompakt $\implies$ $\exists y_1, ..., y_n \in Y$ s.d. $\bigcup_{k=1}^n (V_{x,y} \cap Y) = Y$, $V_{x,y_k} \cap U_{x,y_k}$ $\implies$ $U_{x,y_k} \cap Y = \emptyset$ $\implies$ für $U_x := \bigcap_{k=1}^n U_{x,y_k}$ gilt $U_x \cap Y = \emptyset$. Nun ist $X\backslash Y = \bigcup_{x \in X\backslash Y} U_x$ offen $\implies$ Y ist abgeschlossen. ∎

1.1.13 Proposition. *X kompakt, Y Hausdorffraum, Abb. $f : X \to Y$ stetig, injektiv $\implies$ $f : X \to Y$ ist ein Homöomorphismus.*

Beweis. $f : X \to f(X)$ ist stetig und bijektiv $\implies$ man braucht zu zeigen, dass die inverse Abb. stetig ist, oder, dass f abgeschlossene Teilmengen von X auf abgeschlossene Teilmengen von $f(X)$ abbildet. Nun, wenn $X' \subset X$ abgeschlossen, dann auch kompakt $\implies$ $f(X')$ kompakt, da Kompaktheit unter stetigen Abbildungen erhalten bleibt $(f(X') = \bigcup_{i \in I} U_i \implies X' = \bigcup_{i \in I} f^{-1} U_i \overset{X' \text{ komp.}}{=} \bigcup_{k=1}^n f^{-1} U_{i_k} \implies f(X') = \bigcup_{k=1}^n U_{i_k})$ $\implies$ $f(X') \subset Y$ abgeschlossen nach obiger Proposition. ∎

1. Vorlesung, 12.10.2016

2. Vorlesung, 13.10.2016

2 Homotopie

2.1 Motivation

Das X :="dickes A" und Y :="dünnes A" aus Beispiel 1.4 sind nicht homöomorph aber doch irgendwie ähnlich. Manchmal ist Hömöomorphie eine zu strenge Forderung. Man hat eine Einbettung $\iota : X \to Y$ mit einer Familie von Abbildungen $f_t : X \to Y$, $t \in [0,1]$, s.d.

- $f_0 = \mathrm{id}_Y$,
- $f_1(Y) \subset \iota(X)$,
- die Abb. $F : Y \times [0,1] \to Y$, $(y,t) \mapsto f_t(y)$ ist stetig,
- $f_t|_{\iota(X)} = \mathrm{id}|_{\iota(X)}$.

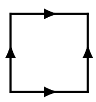
2.1.1 Definition. Sei Y ein topologischer Raum, $A \subset Y$ ein Teilraum. A heißt *Deformationsretrakt* von Y, wenn $\exists F : Y \times [0,1] \to Y$ stetig, s.d.

- $F(\,\cdot\,, 0) = \mathrm{id}_Y$,
- $F(y,1) \in A \forall y \in Y$,
- $F(a,t) = a \forall t \in [0,1] \forall a \in A$.

2.1.2 Beispiel. Einheitssphäre S_1 ist kein Deformationsretrakt von $\overline{B(0,1)} \subset \mathbb{R}^2$.

2.1.3 Definition. Sei X ein topologischer Raum, $f : X \twoheadrightarrow Y$ (d.h. f surjektiv), dann kann man eine Topologie $\mathcal{T}_f := \{U \subset Y \mid f^{-1}(U) \subset X \text{ offen}\}$ auf Y definieren. Diese heißt *Quotiententopologie*.

2.1.4 Beispiel. $R \subset X \times X$ eine Äquivalenzrelation, $q : X \to X/_R$ kanonische Abbildung liefern eine Quotiententopologie auf $X/_R$. Z.B. $X := [0,1]^2$, $\sim$ gegeben durch Identifizierung der Strecken $\{0\} \times [0,1]$ mit $\{1\} \times [0,1]$ und $[0,1] \times \{0\}$ mit $[0,1] \times \{1\}$. Die Menge $X/_\sim$ ist homöomorph zu dem Torus Π_2. Anschaulich:

 $\cong$ Torus.

2.1.5 Proposition (universelle Eigenschaft der Quotiententopologie). *Sei Y eine Menge, X ein topologischer Raum, $f : X \twoheadrightarrow Y$ (surjektive) Abbildung. Betrachte $(Y, \mathcal{T}_f)$. Dann gilt für alle topologische Räume Z: eine Abb. $g : Y \to Z$ ist stetig $\iff$ $g \circ f : X \to Z$ ist stetig.*

$$\begin{tikzcd} X \arrow[r, "g \circ f"] \arrow[d, two heads, "f"'] & Z \\ Y \arrow[ur, "g"'] & \end{tikzcd}$$

Beweis. "$\Longrightarrow$" $U \subset Z$ offen $\Longrightarrow$ $g^{-1}(U)$ offen $\Longrightarrow$ $f^{-1}(g^{-1}(U)) = (g \circ f)^{-1}(U)$ offen, d.h. $g \circ f$ stetig.

"$\Longleftarrow$" $U \subset Z$ offen, $g \circ f$ stetig $\Longrightarrow$ $(g \circ f)^{-1}(U) = f^{-1}(g^{-1}(U))$ offen $\Longrightarrow$ $g^{-1}(U)$ ist offen wegen $\mathcal{T}_f$.

$\blacksquare$

2.1.6 Beispiel. Sei $f : X \to Y$ stetig, Zylinder $Z_f := X \times [0,1] \sqcup Y \big/ \sim$, wobei $\sim$ Punkte $(x,1) \in X \times [0,1]$ mit $f(x) \in Y$ identifiziert. Übung: $Y \subset Z_f$ ist ein Deformationsretrakt.

2.2 Homotopie zwischen Abbildungen

2.2.1 Definition. Seien X, Y topologische Räume, $f_0, f_1 : X \to Y$ (stetig). Eine *Homotopie* zwischen f_0 und f_1 ist eine stetige Abbildung $F : X \times [0,1] \to Y$ mit $F(\,\cdot\,, 0) = f_0$, $F(\,\cdot\,, 1) = f_1$.

2.2.2 Definition. Sei $A \subset X$ ein Teilraum. Dann heißt eine Abbildung $r : X \to A$ mit $r|_A = \mathrm{id}_A$ eine *Retraktion* von X auf A.

2.2.3 Definition. Seien X, Y topologische Räume, $f_0,\ f_1 : X \to Y$ stetig, $A \subset X$ Teilraum mit $f_0|_A = f_1|_A$, f_0 und f_1 heißen *homotop relativ* zu A, wenn $\exists F : X \times [0,1] \to Y$ Homotopie zwischen f_0 und f_1, sodass $F(a,t) = f_0(a) = f_1(a) \forall a \in A \forall t \in [0,1]$.

2.2.4 Beispiel. Aus der Funktionentheorie ist Bekannt: $\gamma_1 : [0,1] \to B(0,1)\backslash\{0\}$, $t \mapsto 1/2e^{i\pi t}$ ist homotop zu $\gamma_2 : [0,1] \to B(0,1)\backslash\{0\}$, $t \mapsto 1/2e^{-i\pi t}$, sie sind allerdings nicht homotop relativ zu $\{-1/2, 1/2\}$.

2.2.5 Definition. Zwei topologische Räume X, Y heißen *homotopieäquivalent*, wenn $\exists f : X \to Y$, $g : Y \to X$, sodass $f \circ g$ homotop zu id_Y und $g \circ f$ homotop zu id_X.

Notation: $X \simeq Y$ (X homotopieäquivalent zu Y), $X \cong Y$ (X homöomorph zu Y).

2.2.6 Proposition. *Sei Y ein topologischer Raum, $A \subset Y$ Teilraum. Wenn A ein Deformationsretrakt von Y ist, dann gilt $A \simeq Y$.*

Beweis. Die Abb. $F : Y \times [0,1] \to Y$ ist eine Homotopie zwischen id_Y und $r : Y \to A$, $r(y) := F(y,1)$, die eine Retraktion ist, weil $r(a) = F(a,1) = a \forall a \in A$. Betrachte $\iota : A \hookrightarrow Y$ Inklusion; $\iota \circ r \simeq \mathrm{id}_Y$ durch F, $r \circ \iota = \mathrm{id}_A$. $\blacksquare$

2.2.7 Definition. Ein topologischer Raum heißt *kontrahierbar*, wenn $X \simeq \{*\}$.

2.2.8 Beispiel. • $B(0,1) \subset \mathbb{R}^n$ ist zusammenziehbar: $\{0\} \subset B(0,1)$ ist Deformationsretrakt via $F : B(0,1) \times [0,1] \to B(0,1)$, $(x,t) \mapsto (1-t)x$.

- $\mathbb{R}^n$ ist zusammenziehbar, denn $B(0,1) \cong \mathbb{R}^n$ (analog $(0,1) \cong \mathbb{R}$ mittels $F : B(0,1) \to \mathbb{R}$, $x \mapsto \tan \pi(x - 1/2)$),
- $S_n := \{x \in \mathbb{R}^{n+1} \mid \|x\|_2 = 1\} \subset \mathbb{R}^{n+1}$ ist nicht zusammenziehbar.

2. Vorlesung, 13.10.2016

---

3. Vorlesung, 19.10.2016

2.3 Konstruktionen und Beispiele

- Wiederholung: Torus lässt sich darstellen als

$$[0,1] \times [0,1] \big/ (0,y) \sim (1,y) \wedge (x,0) \sim (x,1) \cdot$$

  Sukzessives Zusammenkleben. Formales Vorgehen:

  (0) Starte mit einem Punkt $\{*\} =: e^0$.
  (1) Betrachte zwei Kopien von $[0,1]$: $e_a^1 := [0,1]$, $e_b^1 := [0,1] \implies \partial e_a^1 = \{0_a, 1_a\}$, $\partial e_b^1 = \{0_b, 1_b\}$. Abbildungen $\varphi_a : \partial e_a^1 \to e^0 = \{*\}$, $\varphi_b : \partial e_b^1 \to e^0 = \{*\}$. Betrachte

$$X^1 := e^0 \cup e_a^1 \cup e_b^1 \big/ \varphi_a(x) \sim x \wedge \varphi_b(x) \sim x$$

  (habe e_a^1, e_b^1 an e^0 angeklebt).
  (2) Betrachte $e^2 := D^2$ $(= \overline{B(0,1)} \subset \mathbb{R}^2)$, $\partial e^2 := \partial D^2 = S^1$, $\varphi^2 : \partial e^2 \to X^1$,

$$\implies X^2 := X^1 \cup e^2 \big/ \varphi^2(x) \sim x = \Pi^2.$$

- Konstruktion einer Sphäre: Verklebe den gesamten Rand einer Kreisscheibe mit einem einzigen Punkt. $X^0 := \{*\}$, $X^1 := X^0$, $e_2 = D^2$, $\varphi^2 : \partial e^2 \to X^1$, $x \mapsto * \implies X^2 := X^1 \cup e^2 \big/ \varphi^2(x) \sim x = S^2$.

Notation:

- Zusammenkleben von Räumen längs einer Abbildung: Seien X, Y topologische Räume, $\varphi : A \subset X \to Y$ stetig. Dann ist

$$X \cup_\varphi Y := X \sqcup Y \big/ x \sim \varphi(x), x \in X \cdot$$

- $D^n := \overline{B(0,1)} \subset \mathbb{R}^n$.
- $\partial D^n = S^{n-1} = \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x\|_2 = 1\}$.
- e_α^n bezeichnet stets eine Kopie von D^n. So eine Kopie heißt *n-Zelle*.

2.3.1 Definition. Ein *CW-Komplex* X ist ein topologischer Raum, der wie folgt entsteht:

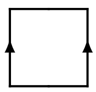
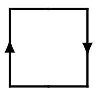
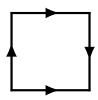
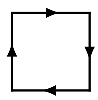
(0) Fange mit einem diskreten Raum X^0 := disjunkte Vereinigung von Punkten an.

(1) Definiere induktiv die Räume X^n (die sogenannte *n-Skelette / n-Gerüste* von X) für $n \geq 1$ folgendermaßen: für eine Familie $\{e^n_\alpha\}_{\alpha\in A}$ von n-Zellen fixiere stetige Abbildungen $\varphi^n_\alpha : \partial e^n_\alpha \to X^{n-1}$ und definiere $X^n := (\bigsqcup_{\alpha\in A} e^n_\alpha) \cup_{\varphi^n_\alpha} X^{n-1}$.

(2) $X = \bigcup_{n\in\mathbb{N}} X^n$ mit der *schwachen Topologie*: $Y \subset X$ offen $\iff$ $Y \cap X^n$ offen für alle n.

2.3.2 Definition. Eine topologische *Mannigfaltigkeit* von Dimension n ist ein Hausdorffraum X, sodass jeder Punkt $x \in X$ eine Umgebung $U \ni x$ besitzt, die homöomorph zu $\mathbb{R}^n$ ist.

2.3.3 Beispiel (Flächen höheren Geschlechts). Anschaulich: Man schneidet aus der Sphäre S^2 zwei Kreise aus und klebt an die Löcher die kreisförmigen Enden eines Zylinders $[0,1] \times S^2$. Dieses Objekt ist homöomorph zu einem Torus. Eine Fläche Σ_g, die durch sukzessives Ankleben von g Handgriffen an die Sphäre S^2 heißt *Fläche von Geschlecht g*. Siehe z.B. Abbildung auf S. 5 in Hatcher: Algebraic Topology. Ferner:

 $\cong$ Zylinder  $\cong$ Möbius-band  $\cong$ Kleinsche Flasche  $\cong \mathbb{RP}^2$

Wiederholdung: $\mathbb{RP}^2 := \{\text{Geraden } l \subset \mathbb{R}^3 \mid 0 \in l\}$ (topologisiert durch Winkelabstand) ist die *Projektive Ebene*. Andere Definition:

$$\begin{aligned}\mathbb{RP}^2 := \mathbb{R}^3\backslash\{0\}\Big/ v \sim \lambda v, \lambda \in \mathbb{R}^x =& \{[x_1 : x_2 : x_3] \mid (x_1, x_2, x_3) \neq 0\} \\ =& \underbrace{\{[x_1 : x_2 : 1]\}}_{\mathbb{R}^2} \cup \underbrace{\{[x_1 : x_2 : 0]\}}_{\mathbb{RP}^1}\end{aligned}$$

oder $\mathbb{RP}^2 := S^2\big/ x \sim -x$. Allgemeiner Fall:

$$\mathbb{RP}^n := \{\text{Geraden } l \subset \mathbb{R}^{n+1} \mid l \ni 0\} = \mathbb{R}^{n+1}\backslash\{0\}\Big/ v \sim \lambda v,\ \lambda \in \mathbb{R}^x = S^n\Big/ x \sim -x.$$

In sogenannten homogenen Koordinaten:

$$\{[x_0 : x_1 : \cdots : x_n] \mid (x_0, ..., x_n) \neq 0\} = \mathbb{R}^n \sqcup \mathbb{RP}^{n-1}.$$

Der kleinste Fall:

$$\mathbb{RP}^1 = \underbrace{\mathbb{R}}_{=e^1} \sqcup \underbrace{\{\infty\}}_{=e^0} = S^1\Big/ x \sim -x \cong S^1.$$

$\mathbb{RP}^n$ ist also ein CW-Komplex mit einer Zelle in jeder Dimension und die Anklebeabbildungen sind die kanonischen Abbildunden $\varphi^k : S^k \to \mathbb{RP}^k$.

3. Vorlesung, 19.10.2016

---

4. Vorlesung, 20.10.2016

2.4 Fundamentalgruppe

Sei X topologischer Raum (ab jetzt: alle Räume sind Hausdorff).

2.4.1 Definition. Eine stetige Abbildung $\gamma : [0,1] \to X$ heißt *Weg* in X. Ein Weg $\gamma : [0,1] \to X$ mit $\gamma(0) = \gamma(1)$ heißt *Schleife* in X.

Konvention: Homotopie von Wegen wird immer relativ zu $\{0,1\}$ verstanden. $\gamma_1 \sim \gamma_2$ wird verstanden als $\gamma_1 \sim_{\{0,1\}} \gamma_2$. ($\gamma_1(0) = \gamma_2(0)$, $\gamma_1 = \gamma_2(1)$, $H : [0,1] \times [0,1] \to X$ zwischen γ_1 und γ_2 muss $H(0,t) = \gamma_1(0) = \gamma_2(0)$, $H(1,t) = \gamma_1(1) = \gamma_2(1)$). Notation:

- $I := [0,1]$,
- $H : X \times I \to Y$ eine Homotopie zwischen f und g, dann schreibe $H : f \rightsquigarrow g$.

2.4.2 Beispiel. Je zwei Wege mit gleichen Anfangs- und Endpunkten in $\mathbb{R}^n$ sind homotop: $\gamma_1, \gamma_2 : I \to \mathbb{R}^n$ mit $\gamma_1(0) = \gamma_2(0) = x$, $\gamma_1(1) = \gamma_2(1) = y$. Wähle $H(s,t) := t \cdot \gamma_2(s) + (1-t)\gamma_1(s) \implies H$ ist eine Homotopie.

2.4.3 Korollar. *Alle Schleifen an $0 \in \mathbb{R}^n$ sind homotop.*

2.4.4 Proposition. *Homotopie von Wegen mit festen Endpunkten $x, y \in X$ ist eine Äquivalenzrelation. Sei $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 : I \to X$. Wegen $\gamma_1(0) = \gamma_1(0) = \gamma_3(0) = x$, $\gamma_1(1) = \gamma_1(1) = \gamma_3(1) = y$:*

- $\gamma_1 \sim \gamma_2, \iff \gamma_2 \sim \gamma_1$
- $\gamma_1 \sim \gamma_1$
- $\gamma_1 \sim \gamma_2,\ \gamma_2 \sim \gamma_3 \implies \gamma_1 \sim \gamma_3.$

Beweis.
- $H : \gamma_1 \rightsquigarrow \gamma_2$ Homotopie, dann ist $\overline{H}(s,t) := H(s, 1-t)$ eine Homotopie $\gamma_2 \rightsquigarrow \gamma_1$.
- $H : \gamma_1 \rightsquigarrow \gamma_1$: $H(s,t) := \gamma_1(s)$.
- $H_1 : \gamma_1 \rightsquigarrow \gamma_2$, $H_2 : \gamma_2 \rightsquigarrow \gamma_1$. Definiere

$$H(s,t) := \begin{cases} H_1(s, 2t), & t \in [0, 1/2], \\ H_2(s, 2t-1), & t \in [1/2, 1]. \end{cases}$$

Dies ist eine Homotopie zwischen γ_1 und γ_3.

■

Übung: Der Beweis funktioniert für beliebige stetige Abb. $\gamma : Z \to X$ (Homotopie ist eine Äquivalenzrelation auf stetigen Abbildungen). Notation: $[\gamma]$ ist die Äquivalenzklasse des Wegen γ ($[f]$ ist die Äquivalenzklasse der Abb. f).

2.4.5 Definition. Seien $\gamma_1, \gamma_2 : I \to X$ zwei Wege s.d. $\gamma_2(0) = \gamma_1(1)$. Dann wird der Weg $\gamma := \gamma_2 \centerdot \gamma_1$ so definiert:

$$\gamma(s) := \begin{cases} \gamma_1(2s), & s \in [0, 1/2], \\ \gamma_2(2s-1), & s \in [1/2, 1]. \end{cases}$$

γ heißt *Verknüpfung* von γ_1, γ_2.

2.4.6 Lemma. $\gamma_1 \sim \gamma_1' \implies \gamma_2 \centerdot \gamma_1 \sim \gamma_2 \centerdot \gamma_1'$, $\gamma_2 \sim \gamma_2' \implies \gamma_2 \centerdot \gamma_1 \sim \gamma_2' \centerdot \gamma_1$.

Beweis. Wenn $H : \gamma_1 \rightsquigarrow \gamma_1'$, $\gamma_{1,t}(\centerdot) := H(\centerdot, t)$, dann ist $H_{2,1}(s,t) := \gamma_2 \centerdot \gamma_{1,t}(s)$ eine Homotopie $\gamma_2 \centerdot \gamma_1 \rightsquigarrow \gamma_2 \centerdot \gamma_1'$. Analog andersherum. ∎

Sei $x_0 \in X$ fest. Def.: $\Omega(X, x_0) := \{\gamma : I \to X \mid \gamma(0) = \gamma(1) = x_0\}$ *Schleifen an* x_0. Die Verknüpfung definiert Operation $\centerdot : \Omega(X, x_0) \times \Omega(X, x_0) \to \Omega(X, x_0)$, die aber nicht assoziativ ist:

2.4.7 Definition. $(\pi_1(X, x_0), \centerdot)$, $\pi_1(X, x_0) := \{[\gamma] \mid \gamma \in \Omega(X, x_0)\}$, $\centerdot$ ist die obige Verknüpfung, heißt *Fundamentalgruppe* von X an x_0.

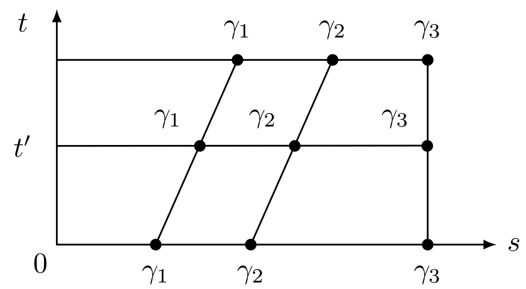
2.4.8 Proposition. *$\pi_1(X, x_0)$ ist eine Gruppe mit dem neutralen Element $e = [\underline{x_0}]$, $\underline{x_0} : I \to X$, $t \mapsto x_0$. Das Inverse einer Klasse $[\gamma]$ ist gegeben durch $[\gamma]^{-1} = [\overline{\gamma}]$, $\overline{\gamma}(t) := \gamma(1 - t)$.*

Beweis. Assoziativität—zu zeigen ist $[\gamma_3 \centerdot (\gamma_2 \centerdot \gamma_1)] = [(\gamma_3 \centerdot \gamma_2) \centerdot \gamma_1]$. Die Abb.

$$\gamma_3 \centerdot (\gamma_2 \centerdot \gamma_1)(s) := \begin{cases} \gamma_1(4s), & s \in [0, 1/4], \\ \gamma_2(4s - 1), & s \in [1/4, 1/2], \\ \gamma_3(2s - 1), & s \in [1/2, 1]. \end{cases}$$

$$(\gamma_3 \centerdot \gamma_2) \centerdot \gamma_1(s) := \begin{cases} \gamma_1(2s), & s \in [0, 1/2], \\ \gamma_2(4s - 2), & s \in [1/4, 3/4], \\ \gamma_3(4s - 3), & s \in [3/4, 1]. \end{cases}$$

sind äquivalent durch folgende Homotopie (zuerst anschaulich in der Bildnotation):



$$H(s,t) := \begin{cases} \gamma_1((4 - 2t)s), & s \in [0, 1/(4 - 2t)], \\ \gamma_2(4s - t - 1), & s \in ..., \\ \gamma_3((2 + 2t)s - 1 - 2t), & s \in .... \end{cases}$$

Neutrales Element: $[\underline{x_0} \centerdot \gamma] = [\gamma \centerdot \underline{x_0}] = [\gamma]$ offenbar. Inverses: $[\gamma \centerdot \overline{\gamma}] = [\overline{\gamma} \centerdot \gamma] = e$. Wähle

$$H(s,t) := \begin{cases} \gamma(2s(1 - t)), & s \in [0, 1/2] \\ \gamma((1 - 2s)(1 - t)), & s \in [1/2, 1] \end{cases}$$

Dann ist dies tatsächlich eine Homotopie $\overline{\gamma} \centerdot \gamma \rightsquigarrow \underline{x_0}$ mit $H(s, 1) = \gamma(0) = x_0$. Da $\overline{\overline{\gamma}}$, folgt das andere. ∎

2.4.9 Beispiel. • $\pi_1(\mathbb{R}^n, 0) \cong \{e\}$ (jede Schleife ist homotop zur konstanten Schleife).

- Wenn $X \cong \{*\}$, dann $\pi_1(X, *) \cong \{e\}$, denn: $\gamma : I \to X$ eine Schleife an $*$, dann kann man die Homotopie zwsichen $f : X \to X$, $x \mapsto *$ und $\mathrm{id} : X \to X$ benutzen, um zu zeigen: $\gamma \sim \underline{*}$: Sei $\gamma : I \to X$ gegeben, $H : X \times I \to X$ Homotopie zwischen id und $f \implies H \circ (\gamma \times \mathrm{id}) : I \times I \to X$ eine Homotopie zwischen γ und $\underline{*}$ (denn: $H \circ (\gamma \times \mathrm{id})(s, 0) = H(\gamma(s), 0) = \gamma(s)$, weil $H(\,\cdot\,, 0) = \mathrm{id}$ und $H \circ (\gamma \times \mathrm{id})(s, 1) = H(\gamma(s), 1) = *$, weil $H(\,\cdot\,, 1) = \gamma$.)
- $S^1 \subset \mathbb{C}$, dann $\pi_1(S^1, 1) \cong \mathbb{Z}$. (Expliziter Homomorphismus $\phi : \pi_1(S^1, 1) \to \mathbb{Z}$ ist gegeben z.B. durch Funktionentheorie: $[\gamma] \overset{\phi}{\mapsto} \frac{1}{2\pi i} \int_\gamma \frac{dz}{z}$.)

2.4.10 Proposition. *Seien X, Y topologische Räume, $f : X \to Y$ stetig, $x_0 \in X$, $y_0 \in Y$, $f(x_0) = y_0$. Dann gilt: die Abbildung $f_* : \pi_1(X, x_0) \to \pi_1(Y, y_0)$, $[\gamma] \mapsto [f \circ \gamma]$ ein Gruppenhomomorphismus. Außerdem: wenn $g : Y \to Z$ stetig, $g(y_0) = z_0 \implies (g \circ f)_* = g_* \circ f_* : \pi_1(X, x_0) \to \pi_1(Z, z_0)$.*

Beweis. f_* ist wohldefiniert, weil $\gamma_1 \sim \gamma_2$ durch H, dann gilt $f \circ \gamma_1 \sim f \circ \gamma_2$ durch $f \circ H$. $f_*(\gamma_2 \centerdot \gamma_1) = [f \circ (\gamma_2 \centerdot \gamma_1)] = [(f \circ \gamma_2) \centerdot (f \circ \gamma_1)] = [f \circ \gamma_2] \centerdot [f \circ \gamma_1] = f_*(\gamma_2) \centerdot f_*(\gamma_1)$. $(g \circ f)_*([\gamma]) = [g \circ f \circ \gamma] = g_*([f \circ g]) = (g_* \circ f_*)([\gamma])$. ■

4. Vorlesung, 20.10.2016

---

5. Vorlesung, 26.10.2016

2.4.11 Lemma. *$f, g : X \to Y$ zwei stetige Abb. mit $f(x_0) = f'(x_0) = y_0 \implies f \sim f'$ rel. zu $x_0 \implies f_* = f'_*$.*

Beweis. $f_*([\gamma]) = [f \circ \gamma]$. Erste Homotopie $f \rightsquigarrow f'$ induziert eine Homotopie $f \circ \gamma \rightsquigarrow f' \circ \gamma \implies f_*([\gamma]) = [f \circ \gamma] = [f' \circ \gamma] = f_*([\gamma])$. ■

Die obigen Behauptungen motivieren die Frage: Wie hängt $\pi_1(X, x_0)$ von x_0 ab?

2.4.12 Lemma. *Sei X ein wegzusammenhängender Raum, $x_0, x_1 \in X$. Dann gilt: $\pi_1(X, x_0) \cong \pi_1(X, x_1)$. Genauer: Jede Homotopieklasse der Wege $\beta : I \to X$, $\beta(0) = x_0$, $\beta(1) = x_1$ induziert einen solchen Isomorphismus $\Theta_{[\beta]} : \pi_1(X, x_0) \to \pi_1(X, x_1)$, $[\gamma] \mapsto [\beta \centerdot \beta \centerdot \beta^{-1}]$.*

Beweis. $\Theta_{[\beta]}$ ist wohldefiniert, denn: $\beta \sim \beta' \implies \beta^{-1} \sim \beta'^{-1}$, $\gamma \centerdot \beta^{-1} \sim \gamma \centerdot \beta'^{-1}$, $\beta \centerdot \gamma \centerdot \beta^{-1} \sim \beta' \centerdot \gamma \centerdot \beta'^{-1} \implies [\beta \centerdot \gamma \centerdot \beta^{-1}] = [\beta' \centerdot \gamma \centerdot \beta'^{-1}]$. $\Theta_{[\beta]}$ ist ein Gruppenhomomorphismus; $\Theta_{[\beta]}([\gamma_2] \centerdot [\gamma_1]) = \Theta_{[\beta]}([\gamma_2 \centerdot \gamma_1]) = [\beta \centerdot \gamma_2 \centerdot \gamma_1 \centerdot \beta^{-1}] = [\beta \centerdot \gamma_2 \centerdot \beta^{-1} \centerdot \beta \gamma_1 \centerdot \beta^{-1}] = [\beta \centerdot \gamma_2 \centerdot \beta^{-1}] \centerdot [\beta \centerdot \gamma_1 \centerdot \beta^{-1}] = \Theta_{[\beta]}(\gamma_2) \centerdot \Theta_{[\beta]}([\gamma_1])$. Ferner $\Theta_{[\beta^{-1}]} = \Theta_{[\beta]}^{-1}$, denn: $\Theta \circ \Theta_{[\beta^{-1}]}([\gamma]) = \Theta_{[\beta^{-1}]}([\beta \centerdot \gamma \beta^{-1}]) = [\beta^{-1} \centerdot \beta \centerdot \gamma \centerdot \beta^{-1} \centerdot \beta] = [\gamma]$, weil $\beta^{-1} \centerdot \beta \sim \underline{x_0}$; analog folgt $\Theta_{[\beta]} \circ \Theta_{[\beta^{-1}]}([\gamma]) = [\gamma]$. ■

2.4.13 Definition. X wegzusammenhängend $\implies \pi_1(X)$ ist die Isomorphieklasse von $\pi_1(X, x_0)$ mit $x_0 \in X$.

2.5 Fundamentalgruppe von S^1

Wir wollen folgenden Satz zeigen:

2.5.1 Satz. $\pi_1(S^1, 1)$ *(bzw.* $S^1 \subseteq \mathbb{C}$*) ist isomorph zu* $\mathbb{Z}$*, sie wird durch die Äquivalenzklasse der Schleife* $\omega : I \to S^1$*,* $s \mapsto e^{2\pi i s} = \cos(2\pi s) + i\sin(2\pi s)$ *erzeugt.*

Was ist hier zu zeigen? $\omega^n \sim (\cos 2\pi ns + i \sin 2\pi ns = e^{2\pi ins})$, $n \in \mathbb{Z}$. Zu zeigen:

- Jede Schleife in S^1 ist homotop zu einer ω^n.
- $\omega^n \not\sim \underline{1}$.

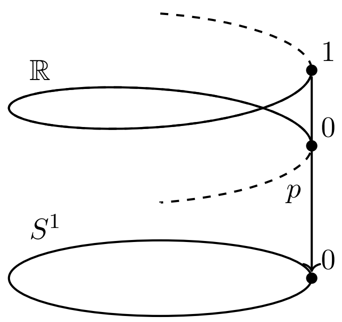
Betrachte $p : \mathbb{R} \to S^1$, $x \mapsto e^{2\pi ix}$ (hier hat man $p(x+n) = p(x) \forall n \in \mathbb{Z}$, also realisiert man $S^1 \simeq \mathbb{R}/\mathbb{Z}$). Idee: Für jede Schleife $\gamma \in \Omega(S^1, 1)$ gibt es einen eindeutigen Weg $\widetilde{\gamma} : I \to \mathbb{R}$ mit $\widetilde{\gamma}(0) = 0$, $p \circ \widetilde{\gamma} = \gamma$ (die sogenannte Hochhebung von γ). Nun kann man eine Abbildung $\gamma : \Omega(S^1, 1) \to \mathbb{Z}$, $\gamma \mapsto \widetilde{\gamma}(1)$ (Wdhlg. $\Omega(S^1, 1) := \{\gamma : I \to S^1 \mid \gamma(0) = \gamma(1) = 1\}$) definieren. Dann müsste man zeigen: φ induziert eine Abbildung $\overline{\varphi} : \pi_1(S^1, 1) \to \mathbb{Z}$, die ein Isomorphismus ist (dazu sollte man zeigen, dass $\overline{\varphi}$ nur von der Homotopieklasse von γ abhängt).

2.5.2 Definition. Eine *Überlagerung* $p : Y \to X$ ist eine surjektive stetige Abbildung mit folgenden Eigenschaften: Für jeden Punkt $x \in X$ ex. eine Umgebung $U \ni x$, so dass

$$p^{-1}(U) = \bigsqcup_{j \in I} V_j \subset Y,$$

wobei $V_j \subset Y$ offen und so dass $p|_{V_j} \to U$ ein Homöomorphismus ist.

2.5.3 Beispiel.
- $p : \mathbb{R} \to S^1$, $x \mapsto e^{2\pi ix}$ ist eine Überlagerung, denn: p stetig, surjektiv, und für jedes $z = e^{i\varphi} \in S^1$ gilt: $p^{-1}(S^2 \backslash \{z\}) \cong (S^1 \backslash \{z\}) \times \mathbb{Z}$.



- Wenn man $S^1 \subset \mathbb{C}$ realisiert, kann man die Abb. $p_k : S^1 \to S^1$, $z \mapsto z^k$ $(e^{i\varphi} \mapsto e^{ki\varphi})$. Es ist $p^{-1}(S^1 \backslash \{-z\}) \cong (S^1 \backslash \{-z\}) \times \mathbb{Z}/k$.

2.6 Hochhebung von Wegen und Homotopien

Fragestellung: Gegeben eine stetige Abbildung $f : Z \to X$, finde *Hochhebungen* $\widetilde{f} : Z \to Y$, $(f = p \circ \widetilde{f})$ und untersuche, ob sie eindeutig sind.

$$\begin{tikzcd} Z \arrow[r, "f"] \arrow[d, dashed, "\exists ? \widetilde{f}"'] & X \\ Y \arrow[ur, "p"'] & \end{tikzcd}$$

2.6.1 Proposition (Homotopiehochhebungseigenschaft von Überlagerungen). *Sei $p : Y \to X$ eine überlagerung, $F : Z \times I \to X$ stetig. Sei $\widetilde{F} : Z \times \{0\} \to Y$ eine Abbildung mit $p \circ \widetilde{F} = F|_{Z \times \{0\}}$ (intuitiv: F ist eine Homotopie zwischen $F|_{Z\times\{0\}}$ und $F|_{Z\times\{1\}}$, und eine Hochhebung von der ersten Abbildung ist gegeben). Dann existiert eine Fortsetzung $\widetilde{F} : Z \times I \to Y$ mit $p \circ \widetilde{F} = F$, von der obigen $\widetilde{F} : Z \times \{0\} \to Y$.*

2.6.2 Korollar. (1) *Gegeben $\gamma : I \to X$ und $y_0 \in Y$ s.d. $p(y_0) = \gamma(0)$, es ex. genau eine Hochhebung $\widetilde{\gamma} : I \to Y$ mit $\widetilde{\gamma}(0) = y_0$ $(Z = \{*\}, F = \gamma : I \to X,\ \widetilde{F}|_{\{0\}} = y_0)$.*
(2) *Gegeben $\gamma_1, \gamma_2 : I \to X$, eine Homotopie $H : \gamma_1 \rightsquigarrow \gamma_2$ und $y_0 \in p^{-1}(\gamma_1(0)) = p^{-1}(\gamma_2(0)) \implies \exists! \widetilde{H} : I \times I \to Y$ zwischen den Hochhebungen $\widetilde{\gamma}_1, \widetilde{\gamma}_2$ s.d. $\widetilde{H}|_{I\times\{0\}} = H$.*

Beweis (der Homotopiehochhebungseigenschaft). Sei $z_0 \in Z$ fest. Wir werden erstmal $\widetilde{F}$ auf $N \times I$ fortsetzen, wobei $N \ni z_0$ eine Umgebung von z_0 ist. Die Abbildung

$$\begin{tikzcd} Z \times I \arrow[r, "F"] \arrow[d, "\tilde{F}|_{Z\times\{0\}}"'] & X \\ Y \arrow[ur, "p"'] & \end{tikzcd}$$

$F : Z \times I \to X$ ist stetig, deswegen existiert für jedes $t \in X$ eine Umgebung $N_t \times (a_t, b_t) \subset Z \times I$ von (z_0, t), s.d. $F(N_t \times (a_t, b_t)) \subset U^t \subset X$ für eine Umgebung U^t von $F(z_0, t)$ mit $p^{-1}(U^t) = \bigsqcup_{j\in J} V_j^t$, wobei $p|_{V_j^t}$ ein Homöomorphismus ist (F stetig + Def. der Überlagerung). Sei $\bigcup_{t\in I}(a_t, b_t) = I$ eine off. Überdeckung, I kompakt $\implies$ es gibt eine endliche Teilüberdeckung, also $I = \bigcup_{i=1}^n (a_{t_i}, b_{t_i})$, o.B.d.A. $0 = a_{t_1} < b_{t_1} < ... < a_{t_n} < b_{t_n} = 1$. Sei $N := \bigcap_{i=1}^n N_{t_i} \subset Z$. Wir definieren $\widetilde{F}$ auf $N \times I$ induktiv: (o.B.d.A.) $F(N \times [a_{t_1}, b_{t_1})) \subset U^{t_1}$, deswegen $\exists! j$ s.d. $\widetilde{F}(N \times \{0\}) \subset V_j^{t_1}$; definiere $\widetilde{F}|_{N\times(a_{t_1}, b_{t_1})} := p_{j,1}^{-1} \circ F$, wobei $p_{j,1}^{-1} : U^{t_1} \to V_j^{t_1}$ der inverse Homöomorphismus ist. Weiter: Wenn $\widetilde{F}$ auf $N \times \bigcup_{i=1}^k (a_{t_i}, b_{t_i})$ definiert ist, dann ist der Durchschnitt $(a_{t_k}, b_{t_k}) \cap (a_{t_{k+1}}, b_{t_{k+1}}) \neq \emptyset$ (evtl. nach Umnummerierung). Dann definiert man $\widetilde{F}|_{N\times(a_{t_{k+1}}, b_{t_{k+1}})} := p_{j,k+1}^{-1} \circ F$, wobei $p_{j,k+1} : U^{t_{k+1}} \to V_j^{t_{k+1}}$ ein Homöomorphismus ist, $F(N \times (a_{t_k}, b_{t_k})) \subset V_j^{t_{k+1}}$. Nach endlich vielen Schritten erhalten wir $\widetilde{F} : N \times I \to Y$. Diese Fortsetzung ist eindeutig, weil die Wahl von j in jedem Schritt eindeutig war. Schreibe jetzt $Z = \bigcup_{z\in Z} N_z$ (wiederhole für jede Wahl von z_0) $\implies$ erhalte $\widetilde{F}_z : N_z \times I \to Y$ für jedes z. Sobald $N_z \cap N_{z'} \neq \emptyset$, gilt $\widetilde{F}_z = \widetilde{F}_{z'}$, weil die Fortsetzung eindeutig $\implies$ Definiere $\widetilde{F} : Z \times I \to Y$ durch $\widetilde{F}|_{N_z \times I} = \widetilde{F}_z$ (wohldefiniert, weil $\widetilde{F}_z$ kompatibel und eindeutig, weil jedes $\widetilde{F}_z$ eindeutig). ■

5. Vorlesung, 26.10.2016

---

6. Vorlesung, 27.10.2016

Beweis (von Satz 2.5.1). $p : \mathbb{R} \to S^1$, $x \mapsto e^{2\pi i x}$ ist eine Überlagerung. Die Hochhebung $\widetilde{\omega}$ von ω mit $\widetilde{\omega}(0) = 0$ ist $\widetilde{\omega}(s) = s$ (damit $(p \circ \widetilde{\omega})(s) = e^{2\pi i s} = \omega(s)$). Entsprechend ist $\widetilde{\omega}^n(s) = n \cdot s$ die eindeutige Hochhebung von ω^n. Definiere eine Abbildung $\phi : \pi_1(S^1, 1) \to \mathbb{Z}$ durch $\phi([\gamma]) := \widetilde{\gamma}(1)$, wobei $\widetilde{\gamma}$ die (eindeutige) Hochhebung von γ ist. Z.z.: ϕ ist wohldefiniert. Dazu:

(1) $\widetilde{\gamma}$ ist eine Hochhebung, also $p \circ \widetilde{\gamma} = \gamma \implies (p \circ \widetilde{\gamma})(1) = p(\widetilde{\gamma}(1)) = \gamma(1) = 1 \implies \widetilde{\gamma}(1) \in p^{-1}(1) = \mathbb{Z}$.

(2) Seien γ_1, γ_2 zwei homotope Schleifen an 1. Seien $\widetilde{\gamma}_1, \widetilde{\gamma}_2$ ihre Hochhebungen. Nach dem Korollar von oben sind auch $\widetilde{\gamma}_1, \widetilde{\gamma}_2$ homotop, und daher $\widetilde{\gamma}_1(1) = \widetilde{\gamma}_2(1)$.

Nun ist z.z.: ϕ ist ein Gruppenhomomorphismus. Dazu erstmal: für jedes $\gamma \in \Omega(S^1, 1)$ gibt es ein $n \in \mathbb{Z}$ s.d. $[\gamma] = [\omega^n]$. Dazu: hebe γ hoch zu $\widetilde{\gamma}$, sei $\phi([\widetilde{\gamma}]) = n \in \mathbb{Z}$. Jetzt sind $\widetilde{\gamma}$ und $\widetilde{\omega}^n$ zwei Wege in $\mathbb{R}$ mit den gleichen Anfangspunkten ($\widetilde{\gamma}(0) = 0 = \widetilde{\omega}^n(0)$) und Endpunkten ($\widetilde{\gamma}(1) = n = \widetilde{\omega}^n(1)$) $\implies \widetilde{\gamma} \sim \widetilde{\omega}^n$, weil je zwei Wege in $\mathbb{R}$ mit gleichen Anfangs- und Endpunkten homotop sind (z.B. durch lineare Homotopie). Daher: $\gamma = p \circ \widetilde{\gamma} \sim p \circ \widetilde{\omega}^n = \omega^n$. Ferner $\phi([\omega^n]) = n$. $\phi([\omega^n] \cdot [\omega^m]) = \phi([\omega^{n+m}]) = n + m = \phi([\omega^n]) + \phi([\omega^m]) \implies \phi$ ist eine Homomorphismus, surjektiv. Bleibt: ϕ ist injektiv. Dazu $\phi([\omega^n]) = 0 \implies n = 0$, $\omega^0 = \underline{1}$. ■

2.6.3 Satz (Fundamentalsatz der Algebra). *Jedes komplexe Polynom $p \in \mathbb{C}[z]$, $p(z) = z^n + a_{n-1}z^{n-1} + ... + a_0$, $n \geq 1$ hat eine Nullstelle in $\mathbb{C}$.*

Beweis. Annahme: p hat keine Nullstellen in $\mathbb{C}$. Sei $r \geq 0$, betrachte

$$f_r(s) = \frac{p(re^{2\pi i s})/p(r)}{|p(re^{2\pi i s})/p(r)|} \in S^1 \subset \mathbb{C} \forall r.$$

So ist $f_r : I \to S^1$ eine Schleife in S^1 an 1. Wenn r sich stetig verändert, verändert sich die Schleife stetig ($f : \mathbb{R}_{\geq 0} \to S^1$, $(r, s) \mapsto f_r(s)$ ist stetig) $\implies [f_r]$ ist unabhängig von r.

$$f_0(s) = \frac{p(0)/p(0)}{|p(0)/p(0)|} = 1 \implies [f_0] = e \text{ in } \pi_1(S^1, 1).$$

Aber: $p(z) = z^n(1 + \frac{a_{n-1}}{z} + ... + \frac{a_0}{z^n}) = z^n r(z)$ und $|\frac{a_{n-1}}{z} + ... + \frac{a_0}{z^n}| < 1$ für $|z| \geq R$ hinreichend groß $\implies r(z) \subset B(1, 1) \implies r : \{|z| \geq R\} \to \mathbb{C}$ ist homotop zur konstanten Abbildung $\widetilde{r}(z) = 1$ durch Abbildungen $r_t(z) \neq 0$ auf $|z| \geq R \implies$ für hinreichend große r ist

$$f_r \sim \underbrace{\left(s \mapsto \frac{r^n e^{2\pi i n s}}{r^n} = e^{2\pi i n s} \right)}_{\omega^n}$$

$e = [f_r] = [\omega^n] \neq e$ in $\pi_1(S^1, 1)$. Widerspruch. ∎

2.6.4 Satz (Brouwerscher Fixpunktsatz). *Sei $D^2 \subset \mathbb{R}^2$ und sei $h : D^2 \to D^2$ stetig. Dann hat h einen Fixpunkt.*

Beweis. Widerspruchsbeweis. Wenn $h(x) \neq x \forall x \in D^2$. Definiere $r(x) \in S^1$ als den Punkt, wo der Strahl mit Richtung $h(x) - x$ den Rand Schneidet. Also gilt $r : D^2 \to S^1$, $r|_{S^1} = \mathrm{id}_{S^1}$ (r ist eine Retraktion von D^2 auf S^1). Sei $\iota : S^1 \hookrightarrow D^2$ die Inklusionsabbildung. Nach Proposition 2.4.10 sind $r_* : \pi_1(D^2, x_0) \to \pi_1(S^1, x_0)$, $\iota_* : \pi_1(S^2, x_0) \to \pi_1(D^1, x_0)$ Homomorphismen. Es ist $r \circ \iota = \mathrm{id}_{S^1} \implies r_* \circ \iota_* = (r \circ \iota)_* = (\mathrm{id}_{S^1})_* = \mathrm{id}_{\pi_1(S^1, x_0)}$.

$$\begin{tikzcd}
\pi_1(S^1, x_0) \arrow[r, "\iota_*"] \arrow[rr, bend left, "\mathrm{id}_{S^1}"] \arrow[d, phantom, "\cong" rotate=-90] & \pi_1(D^2, x_0) \arrow[r, "r_*"] \arrow[d, phantom, "\cong" rotate=-90] & \pi_1(S^1, x_0) \arrow[d, phantom, "\cong" rotate=-90] \\
\mathbb{Z} & \{e\} & \mathbb{Z}
\end{tikzcd}$$

$\implies \mathrm{id}_{\mathbb{Z}}$ faktoriziert durch $\{e\}$. Widerspruch. ∎

2.6.5 Satz (Borsuk-Ulam). *Sei $f : S^2 \to \mathbb{R}^2$ eine stetige Abbildung. Dann $\exists x \in S^2$ mit $f(x) = f(-x)$.*

Beweis. Widerspruchsbeweis. Wenn $f(x) \neq f(-x) \forall x \in S^2$, definiere

$$g(x) = \frac{f(x) - f(-x)}{\|f(x) - f(-x)\|} \in S^1$$

$\implies g : S^2 \to S^1$ ist stetig. Sei $\eta : I \to S^2$ die Schleife $s \mapsto (\cos 2\pi s, \sin 2\pi s, 0) \in S^2 \subset \mathbb{R}^2 \implies h := g \circ \eta$ ist eine Schleife in S^1. Wir setzen: $\{s + 1/2\} = s + 1/2 \mod 1$ ist der *Bruchteil* von $s + 1/2$. Es gilt $g(-x) = -g(x)\ \forall x \in S^2 \implies h(\{s + 1/2\}) = -h(s)$, denn

$$h(s + 1/2) = g(\eta(s + 1/2)) = g((\cos(2\pi s + \pi), \sin(2\pi s + \pi), 0) = g(-\eta(s)) = -h(s)$$

und $h(0) = h(1) \implies$ wenn $\widetilde{h} : I \to \mathbb{R}$ eine Hochhebung von h ist, dann gilt $\widetilde{h}(\{s+1/2\}) = \widetilde{h}(s) + q_s + 1/2$, wobei $q_s \in \mathbb{Z}$ ungerade. Es gilt $\mathbb{Z} \ni q_s = \widetilde{h}(\{s + 1/2\}) - \widetilde{h}(s) - 1/2$ stetig $\implies q_s = q \forall s \in I \implies \widetilde{h}(\{s+1/2\}) - \widetilde{h}(s) = (2q+1)/2$, also gilt $\widetilde{h}(1) - \widetilde{h}(0) = 2q+1 \neq 0$ (weil ungerade) $\implies [h] \neq [1]$ (sonst wäre $\widetilde{h}(1) = \widetilde{h}(0)$). Aber $e \neq [h] = [g \circ \eta] = g_*([\eta])$. Aber $[\eta] = e \in \pi_1(S^2, (1,0,0))$, weil man η über den "Nordpol" zusammenziehen kann. (Seien E_t Ebenen durch $(1,0,0)$ mit Normalenvektor $(\sin t, 0, \cos t)$ für $0 \leq t \leq \pi/2$, $\gamma_t :=$ Schleife an $(1,0,0)$ mit $\gamma_t(I) = E_t \cap S^2$, einmal durchgelaufen). Widerspruch. ∎

2.6.6 Proposition. *Seien X, Y topologische Räume, $x_0 \in X$, $y_0 \in Y$. Dann gilt: $\pi_1(X \times Y, (x_0, x_0)) \cong \pi_1(X, x_0) \times \pi_1(Y, y_0)$.*

Beweis. Jede Schleife γ in $X \times Y$ an (x_0, y_0) definiert durch Verknüpfung mit Projektionen $\pi_X : X \times Y \to X$, $(x, y) \mapsto x$, $\pi_Y : X \times Y \to Y$, $(x, y) \mapsto y$ zwei Schleifen $\pi_X \circ \gamma$, $\pi_Y \circ \gamma$. Umgedreht: ein Paar $(\gamma_x, \gamma_y) \in \Omega(X, x_0) \times \Omega(Y, y_0)$ definiert Schleife $\gamma(s) := (\gamma_x(s), \gamma_y(s)) \in \Omega(X \times Y, (x_0, y_0))$. Diese Entsprechung respektiert Homotopien und Verknüpfungen (nachzurechnen) $\implies$ $(\pi_X)_* \times (\pi_Y)_* : \pi_1(X \times Y, (x_0, y_0)) \to \pi_1(X, x_0) \times \pi_1(Y, y_0)$ ist ein Isomorphismus. ■

2.6.7 Korollar. $\pi_1(\Pi^n) = \pi_1(\overbrace{S^1 \times \ldots \times S^1}^{n\text{-}mal}) \cong \mathbb{Z}^n$.

6. Vorlesung, 27.10.2016

---

7. Vorlesung, 03.11.2016

2.7 Überlagerungen und Fundamentalgruppe

Wiederholung: Sei $p : (Y, y_0) \to (X, x_0)$ eine Überlagerung ($p(y_0) = x_0$), dann ist $p_* : \pi_1(Y, y_0) \to \pi_1(X, x_0)$, $[\gamma] \mapsto [p \circ \gamma]$ der induzierte Gruppenhomomorphismus.

2.7.1 Proposition. *p_* ist injektiv, $p_*(\pi_1(Y, y_0)) \subset \pi_1(X, x_0)$ ist die Untergruppe der Homotopieklassen von Schleifen γ, deren Hochhebung $\widetilde{\gamma}$ mit $\widetilde{\gamma}(0) = y_0$ auch Schleife ist.*

Beweis. Sei $\hat{\gamma} \in \Omega(Y, y_0)$ mit $p_*([\hat{\gamma}]) = e \implies p \circ \hat{\gamma} = \gamma \sim \underline{x_0}$. Wegen der Eindeutigkeit der Hochhebung gilt $\hat{\gamma} = \widetilde{\gamma}$ (Hochhebung von γ mit $\widetilde{\gamma}(0) = y_0$). Homotopiehochhebung liefert eine Homotopie von $\widetilde{\gamma}$ zu einer Hochhebung von $\underline{x_0}$, die nach Eindeutigkeit der Hochhebung gleich $\underline{y_0}$ ist $\implies \hat{\gamma} = \underline{y_0} \implies [\hat{\gamma}] = e \in \pi_1(Y, y_0)$. p_* ist also injektiv. Wenn $[\gamma] \in \operatorname{Im}(p_*) \implies [\widetilde{\gamma}] \in \pi_1(Y, y_0)$, weil $p_*([\widetilde{\gamma}]) = [\gamma] \implies \widetilde{\gamma} \in \Omega(Y, y_0)$. ■

Frage: Sei $\Gamma := \pi(X, x_0)$, $\Lambda < \Gamma$ Untergruppe. Gibt es eine Überlagerung $p : (Y, y_0) \to (X, x_0)$ mit $p_*(\pi_1(Y, y_0)) = \Lambda$?

2.7.2 Beispiel. $(X, x_0) = (S^1, 1) \implies \pi_1(S^1, 1) \cong \mathbb{Z} =: \Gamma$, jedes $\Lambda < \mathbb{Z}$ hat die Form $n\mathbb{Z}$. Welche Überlagerung gehört zu $n\mathbb{Z} < \mathbb{Z}$?

- $p_n : (S^1, 1) \to (S^1, 1)$, $z \mapsto z^n \implies (p_n)_*([\omega]) = [\omega^n] \implies (p_n)_*(\mathbb{Z}) = n\mathbb{Z}$.
- Sei $n = 0$, d.h. wir betrachten $0 < \mathbb{Z}$. Dann ist $p : \mathbb{R} \to S^1$, $x \mapsto e^{2\pi i x}$ die zugehörige Überlagerung.

2.7.3 Definition. Sei (X, x_0) ein punktierter Raum. Eine Überlagerung $\widetilde{p} : (\widetilde{X}, \widetilde{x}_0) \to (X, x_0)$ heißt *universelle Überlagerung*, falls $\pi_1(\widetilde{X}, \widetilde{x}_0) = \{e\}$.

Bemerkung: Es ist sinnvoll, X als wegzusammenhängend vorauszusetzen (alles hängt nur von der Wegzusammenhangskomponente von x_0 ab).

Welche Eigenschaften von X sind notwendig für existenz einer universellen Überlagerung? Sei $\widetilde{p} : (\widetilde{X}, \widetilde{x}_0) \to (X, x_0)$ eine universelle Überlagerung, sei $\gamma \in \Omega(X, x_0)$, $\widetilde{\gamma} \in \Omega(\widetilde{X}, \widetilde{x}_0)$ eine Hochhebung von γ (also setzen wir voraus, dass γ zu einer Schleife hochgehoben wird). Dann ist $\widetilde{\gamma} \sim \underline{\widetilde{x}_0}$, weil $\widetilde{X}$ einfach zusammenhängend ist. Wenn $U \ni x_0$

eine Umgebung von x_0 derart ist, dass $p^{-1}(U) = \bigsqcup_{\alpha\in F} V_\alpha$ mit $p : V_\alpha \to U$ Homöomorphismus, dann liegt $\widetilde{x}_0 \in V_{\alpha_0}$, also hebt sich jede Schleife $\gamma \in \Omega(U, x_0)$ zu $\widetilde{\gamma} \in \Omega(V_{\alpha_0}, \widetilde{x}_0)$. D.h. $\widetilde{\gamma} \sim \underline{\widetilde{x}_0} \implies \gamma \sim \underline{x_0}$.

Also gilt: Für jede offene Teilmenge $W \subset X$ gibt es eine offene Teilmenge $U \subset W \subset X$ s.d. jede Schleife $\gamma \in \Omega(U, x)$ homotop zur konstanten Schleife $\underline{x}$ ist. Dies ist eine Eigenschaft von X, die notwendig für die Existenz von einer universellen Überlagerung ist. Wenn X diese erfüllt, heißt X *semilokal einfach zusammenhängend.*

2.7.4 Definition. X heißt lokal *wegzusammenhängend*, wenn $\forall W \subset X$ offen eine offene Teilmenge $U \subset W$ ex. s.d. U wegzusammenhängend ist.

Bemerkung: CW-Komplexe erfüllen beide Eigenschaften automatisch (sie sind lokal zusammenziehbar, also hat jeder Punkt eine zusammenziehbare Umgebung).

Sei X ein wegzusammenhängender, lokal wegzusammenhängender, semilokal einfach zusammenhängender Raum, $x_0 \in X$ fest. Sei

$$\widetilde{X} := \{[\gamma] \mid \gamma : I \to X \text{ Weg mit } \gamma(0) = x_0\},$$

$p : \widetilde{X} \to X$, $[\gamma] \mapsto \gamma(1)$, $\widetilde{x}_0 := \underline{x_0} \in \widetilde{X}$. Die Abb. p ist wohldefiniert und surjektiv, da X wegzusammenhängend. Wir brauchen eine Topologie auf $\widetilde{X}$, s.d. $p : (\widetilde{X}, \widetilde{x}_0) \to (X, x_0)$ eine Überlagerung ist. Dazu betrachten wir:

$$\mathcal{U} := \{U \subset X \text{ offen, wegzusammenhängend} \mid \iota_* : \pi_1(U) \to \pi_1(X) \text{ trivial}\}.$$

Bemerkung: $U \in \mathcal{U}$, $V \subset U$ offen, wegzusammenhängend $\implies V \in \mathcal{U}$ ($\iota_*^V : \pi_1(V) \to \pi_1(U) \to \pi_1(X)$ ist trivial, weil ι_*^U trivial).

Behauptung. *Sei X lokal wegzusammenhängend, semilokal einfach zusammenhängend $\implies \mathcal{U}$ ist eine Basis der Topologie auf X.*

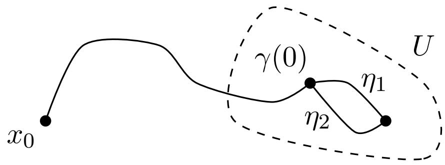
Beweis (der Behauptung). Es reicht zu zeigen: $\forall W \subset X$ offen, $\exists U \in \mathcal{U}$ mit $U \subset W$. Sei W gegeben. Finde $U' \subset W$ s.d. jede Schleife in U' homotop zur konstanten Schleife in X ist (also $\iota_* : \pi_1(U') \to \pi_1(X)$ ist trivial) und finde für dieses U' eine wegzusammenhängende offene Teilmenge U. Es folgt $U \in \mathcal{U}$, weil

$$\begin{tikzcd}[column sep=small]
\iota_*^U : \pi_1(U) \arrow[rr] \arrow[dr] & & \pi_1(X) \\
& \pi_1(U') \arrow[ur] &
\end{tikzcd}$$

■

Wir beweisen nun den nächsten Satz. Sei $U \in \mathcal{U}$ und $[\gamma] \in \widetilde{X}$ mit $\gamma(1) \in U$. Definiere

$$U_{[\gamma]} := \{[\eta \centerdot \gamma] \mid \eta : I \to X \text{ mit } \eta(0) = \gamma(1) \text{ und } \eta(I) \subset U\}$$



(wohldefiniert, weil Homotopie verträglich mit Verknüpfung ist). Die Abbildung

$$p|_{U_{[\gamma]}} : U_{[\gamma]} \to U$$

ist surjektiv, weil U wegzusammenhängend ist, auch injektiv, weil wenn $(\eta_1 \centerdot \gamma)(1) = (\eta_2 \centerdot \gamma)(1) \implies [\eta_1 \centerdot \gamma] = [\eta_2 \centerdot \gamma]$. Sei jetzt $\mathcal{T}$ die Topologie auf $\widetilde{X}$, die $\{U_{[\gamma]} \mid U \in \mathcal{U}, [\gamma] \in \widetilde{X}\}$ als Basis hat. Dann gilt: $p|_{U_{[\gamma]}} : U_{[\gamma]} \to U$ ist ein Homöomorphismus (wenn $V_{[\gamma]} \subset U_{[\gamma]} \iff V \subset U$). Also ist $p : (\widetilde{X}, \widetilde{x}_0) \to (X, x_0)$ stetig, weil Stetigkeit eine lokale Eigenschaft ist. Sei jetzt $U \in \mathcal{U}$, wähle $x \in U$.

$$p^{-1}(U) = \bigsqcup_{[\gamma]}{}^{1} U_{[\gamma]}.$$

Weil: Sei $U_{[\gamma_1]} \cap U_{[\gamma_2]} \neq \emptyset$. D.h. $[\eta_1 \centerdot \gamma_1] = [\eta_2 \centerdot \gamma_2]$ für gewisse $\eta_1, \eta_2 : I \to U$, $\gamma_1, \gamma_2 : I \to X$. Sei $[\eta' \centerdot \gamma_1] \in U_{[\gamma_1]}$. Dann gilt

$$[\eta' \centerdot \gamma_1] = [\eta' \centerdot \overline{\eta_1} \centerdot \eta_1 \centerdot \gamma_1] = [\eta' \centerdot \overline{\eta_1} \centerdot \eta_2 \centerdot \gamma_2] = [\eta'' \centerdot \gamma_2] \in U_{[\gamma_2]}$$

$\implies U_{[\gamma_1]} = U_{[\gamma_2]}$. Also: $p : (\widetilde{X}, \widetilde{x}_0) \to (X, x_0)$ ist eine Überlagerung. Bleibt zu zeigen: $\widetilde{X}$ ist einfach zusammenhängend.

(1) $\widetilde{X}$ ist wegzusammenhängend. Sei $[\gamma] \in \widetilde{X}$. Wir brauchen einen Weg $\widetilde{\gamma} : I \to \widetilde{X}$ mit $\widetilde{\gamma}(0) = \widetilde{x}_0$, $\widetilde{\gamma}(1) = \gamma$. Def.

$$\widetilde{\gamma}(t) := s \mapsto \begin{cases} \gamma(s) & \text{falls } s \in [0,t], \\ \gamma(t) & \text{falls } s \in [t,1] \end{cases} \qquad \text{(tautologische Definition)}$$

$\implies \widetilde{\gamma}(0) = \underline{x_0}$, $\widetilde{\gamma}(1) = \gamma$.

(2) Es reicht zu zeigen: $p_*(\pi_1(\widetilde{X}, \widetilde{x}_0)) = \{e\} < \pi_1(X, x_0)$, da p_* injektiv ist. Das Bild $p_*(\pi_1(\widetilde{X}, \widetilde{x}_0))$ besteht aus Homotopieklassen $[\gamma]$ von Wegen $\gamma \in \Omega(X, x_0)$, deren Hochhebung $\widetilde{\gamma} \in \Omega(\widetilde{X}, \widetilde{x}_0)$. Wenn $\gamma \in \Omega(X, x_0)$, sei $\hat{\gamma} : I \to \widetilde{X}$ wie oben definiert. $\hat{\gamma}$ ist eine Hochhebung von γ mit $\hat{\gamma}(0) = \underline{x_0}$ und $\{\hat{\gamma}(t)\}_{t \in I}$ ist eine Homotopie zwischen $\widetilde{x}_0$ und $\widetilde{\gamma}$. D.h.: $[\widetilde{\gamma}] = [\underline{\widetilde{x}_0}] \implies \pi_1(\widetilde{X}, \widetilde{x}_0) = \{e\}$.

2.7.5 Satz. *Sei X ein wegzusammenhängender, lokal wegzusammenhängender und semilokal einfach zusammenhängender Raum. Dann existiert eine universelle Überlagerung $p : (\widetilde{X}, \widetilde{x}_0) \to (X, x_0)$ (für jedes $x_0 \in X$).*

[1] Vereinigung über Homotopieklassen von Wegen $\gamma : I \to X, \gamma(0) = x_0, \gamma(1) = x \in U$

Bemerkung: Ab jetzt betrachten wir nur Räume, die lokal wegzusammenhängend und semilokal einfach zusammenhängend sind (s.d. jede Wegzusammenhangskomponente eine universelle Überlagerung besitzt).

Beobachtung: Sei $\Gamma := \pi_1(X, x_0)$. Dann wirkt Γ von rechts auf $(\widetilde{X}, \widetilde{x}_0)$ durch

$$\underset{\widetilde{X}}{\underset{\Cap}{[\gamma]}} \cdot \underset{\Gamma}{\underset{\Cap}{[\beta]}} = [\gamma \cdot \beta].$$

7. Vorlesung, 03.11.2016

---

8. Vorlesung, 09.11.2016

Letztes mal haben wir gesehen: Wenn (X, x_0) ein hinreichend guter topologischer Raum ist, dann existiert eine universelle Überlagerung $p : (\widetilde{X}, \widetilde{x}_0) \to (X, x_0)$. Um aus $\widetilde{X}$ eine andere Überlagerung zu konstruieren, brauchen wir folgenden Begriff: Sei Γ eine Gruppe, Y ein topologischer Raum.

2.7.6 Definition.
- $\mathrm{Homeo}(Y) := \{f : Y \to Y \mid f \text{ ist Homöomorphismus}\}$.
- Eine *Wirkung* von Γ auf Y ist ein Gruppenhomomorphismus $\alpha : \Gamma \to \mathrm{Homeo}(Y)$. Bezeichnung: $\Gamma \overset{\alpha}{\curvearrowright} Y$.

2.7.7 Beispiel. Sei $\Gamma := \mathbb{Z}$. Dann ist $\alpha : \mathbb{Z} \to \mathrm{Homeo}(\mathbb{R})$, $n \mapsto (x \mapsto x+n)$ eine Wirkung.

Sei $\Gamma \overset{\alpha}{\curvearrowright} Y$ eine Wirkung. Sei $R_{\Gamma \overset{\alpha}{\curvearrowright} Y} := \{(y, \alpha(g)(y)) \mid y \in Y, g \in \Gamma\}$.

$$\Gamma\backslash Y := R_{\Gamma \overset{\alpha}{\curvearrowright} Y}\backslash Y = {}_{\substack{y \sim \alpha(g)(y),\\ y \in Y, g \in \Gamma}}\backslash Y$$

heißt *Quotientenraum* der Wirkung (der Raum aller Orbits).

Bemerkung: Der obige Begriff der Wirkung heißt manchmal Linkswirkung, weil die Abbildung α eine Abbildung $\widetilde{\alpha} : \Gamma \times X \to X$, $(g, y) \mapsto \alpha(g)(y)$ induziert. $\widetilde{\alpha}$ erfüllt $\alpha(gh, x) = \widetilde{\alpha}(g, \widetilde{\alpha}(h, x))$. Wenn die Wirkung fest ist, schreibt man $g \cdot x$ für $\alpha(g)(x)$. Entsprechend gibt es den Begriff der Rechtswirkung $\widetilde{\beta} : X \times \Gamma \to X$ mit $(x, g) \mapsto \widetilde{\beta}(x, g)$ mit Abkürzung $\widetilde{\beta}(x, g) = x \cdot g$. Es gilt $\widetilde{\beta}(x, gh) = \widetilde{\beta}(\widetilde{\beta}(x, g), h)$. Zu einer Rechtswirkung $\widetilde{\beta}$ gehört auch ein Homomorphismus $\beta : \Gamma \to \mathrm{Homeo}(Y)$, $g \mapsto \widetilde{\beta}(x, g^{-1})$.

Rechtswirkungen bezeichnet man durch $Y \overset{\beta}{\curvearrowleft} \Gamma$. Entsprechend bezeichnet man den Quotientenraum durch Y/Γ für die Rechtswirkung.

2.7.8 Beispiel. Sei G eine Gruppe, $Y := G$. Dann ist $L : G \times Y \to G$, $(g, h) \mapsto g \cdot h$ ist eine Linkswirkung, $R : Y \times G \to G$, $(h, g) \mapsto h \cdot g$ ist eine Rechtswirkung.

2.7.9 Beispiel. Sei $X = S^1 \subset \mathbb{C}$, $\Gamma = \mathbb{Z}$, $\alpha_\omega : \Gamma \curvearrowright X$ gegeben durch $\alpha_\omega(n)(z) := e^{i\omega n} \cdot z$ für $\omega \in \mathbb{R}$.

(i) $\omega/2\pi \in \mathbb{Q} \implies$ jede Bahn ist endlich $\implies S^1\backslash\mathbb{Z} \cong S^1$.

(ii) $\omega/2\pi \notin \mathbb{Q} \implies$ jede Bahn ist dicht in S^1. $X_\omega := {}^{S^1}\backslash^{\mathbb{Z}}$ ist schwer verständlich. Die Topologie auf X_ω viel besser: Wenn $f : X_\omega \to Z$ stetig $\implies \overline{f} := f \circ g$ ist stetig (Eigenschaft der Quotiententopologie). Aber $\overline{f}$ ist nach Konstruktion $\mathbb{Z}$-invariant: $\overline{f} \circ \alpha_\omega(n) = \overline{f} \forall n \in \mathbb{Z}$.

$$\overline{f}(\alpha_\omega(n)(x)) = \overline{f}(x) \forall x \in S^1, \forall n \in \mathbb{Z} \implies \overline{f}(y) = \overline{f}(x) \forall x, y \in S^1,$$

da die Bahn von x dicht ist und $\overline{f}$ stetig $\implies \overline{f}$ ist konstant $\implies f$ ist konstant $\implies X_\omega$ hat triviale Topologie (die antidiskrete Topologie) und ist somit z.B. nicht Hausdorff.

2.7.10 Definition. Sei X ein topologischer Raum, $\alpha : \Gamma \curvearrowright X$ eine Wirkung. Dann heißt α eine *Überlagerungswirkung*, wenn jedes $x \in X$ eine Umgebung $U \ni x$ hat s.d. $\forall g_1 \neq g_2 \in \Gamma$ gilt $g_1 U \cap g_2 U = \emptyset$ ($g_1 U = \alpha(g_1)(U)$, $g_2 U = \alpha(g_2)(U)$).

2.7.11 Proposition. *$\alpha : \Gamma \curvearrowright X$ ist eine Überlagerungswirkung $\implies q : X \to {}_{\Gamma}\backslash^{X}$ ist eine Überlagerung.*

Beweis. Sei $x \in X$, $U \ni x$ aus der Def. der Überlagerung. Dann gilt für $V := q(U)$.

$$q^{-1}(V) = \bigsqcup_{g \in \Gamma} gU,$$

denn:

- $q(x) \in V \iff \exists g \in \Gamma$ s.d. $g \cdot x \in U$ (Def. des Quotientenraumes).
- die Vereinigung ist disjunkt, denn: $g_1 U \cap g_2 U \neq \emptyset \implies g_1 = g_2$ nach Definition eine Überlagerungswirkung.
- $q|_{gU} : gU \to V$ ist eine Homöomorphismus nach Definition der Quotiententopologie.

■

Sei (X, x_0) topologischer Rum, $(\widetilde{X}, \widetilde{x}_0)$ eine universelle Überlagerung, $\Gamma := \pi_1(X, x_0)$. Wir haben folgende Rechtswirkung von Γ auf $(\widetilde{X}, \widetilde{x}_0)$:

$$\widetilde{\beta} : \widetilde{X} \times \Gamma \to \widetilde{X}, ([\gamma], [\delta]) \to [\gamma \centerdot \delta].$$

Dies ist tatsächlich eine Wirkung, denn $[(\gamma \centerdot \delta_1) \centerdot \delta_2] = [\gamma \centerdot (\delta_1 \centerdot \delta_2)]$. Es ist ebenfalls eine Überlagerungswirkung: Für jedes $\widetilde{x} \in \widetilde{X}$ gibt es eine Umgebung $U_{[\gamma]}$ (bei der Konstruktion von $\widetilde{X}$ benutzt) mit: $[\gamma_1] \neq [\gamma_2] \in \pi_1(X, x_0) \implies U_{[\gamma]} \centerdot \gamma_1 \cap U_{[\gamma]} \centerdot \gamma_2 = \emptyset$ (wurde bei Konstruktion von $\widetilde{X}$ bewiesen).

2.7.12 Korollar. *Sei $\Lambda < \Gamma := \pi_1(X, x_0)$ eine Untergruppe. Dann gilt: die Abbildung $q_\Lambda : (\widetilde{X}, \widetilde{x}_0) \to (\widetilde{X}, \widetilde{x}_0)/\Lambda =: X_\Lambda$ ist eine Überlagerung.*

Also haben wir: Wenn $\widetilde{x} \cdot g = \widetilde{y}$ für ein $g \in \Lambda$ mit $\widetilde{x} = [\gamma]$, $\widetilde{y} = [\gamma']$, $g = [\delta]$. Dann $[\gamma'] = [\gamma \centerdot \delta] \implies \gamma'(1) = \gamma(1) \implies \widetilde{p}(\widetilde{y}) = \widetilde{p}(\widetilde{x}) \implies \exists p_\Lambda : (X_\Lambda, x_0^\Lambda) \to (X, x_0)$ stetig (nach universellen Eigenschaft von Quotientenraum) $p_\Lambda([\gamma] \centerdot \Lambda) = \gamma(1)$.

2.7.13 Proposition. *p_Λ ist eine Überlagerung.*

Beweis. Zu zeigen: $\forall x \in X \exists U \ni x$ s.d. $p_\Lambda^{-1}(U) = \bigsqcup_{j \in J} V_j$ s.d. $p_\Lambda|_{V_j} : V_j \overset{\cong}{\to} U$ ein Homöomorphismus. Nimm U aus der Überlagerungseigenschaft von $\widetilde{p} \implies \widetilde{p}(U) = \bigsqcup_{k \in K} \widetilde{V}_k \subset \widetilde{X}$ s.d. $\widetilde{p}|_{\widetilde{V}_k}$ Homöomorphismus $\implies V_j := q_\Lambda(\widetilde{V}_k)$, wo $\widetilde{V}_{k_j}$ einzeln (aus jeder Λ-Bahn wird eine gewählt) aus Λ-Bahnen von $\widetilde{V}_k' s$ gewählt werden. ∎

2.7.14 Proposition. $(p_\Lambda)_*(\pi_1(X_\Lambda, x_0^\Lambda)) = \Lambda < \pi_1(X, x_0)$ *(insbesondere gibt es für jede $\Lambda < \pi_1(X, x_0)$ eine Überlagerung, die Λ realisiert).*

Beweis. Wir haben folgende Charakterisierung von $(p_\lambda)_*(\pi_1(X_\Lambda, x_0^\Lambda))$: $[\gamma] \in (p_\lambda)_*(\pi_1(X_\Lambda, x_0^\Lambda)) \iff \widetilde{\gamma}$ ist eine Schleife in X_Λ (Hochhebung nach X_Λ). D.h. $\widetilde{\gamma}(1) = \widetilde{\gamma}(0) = x_0^\Lambda$. Sei $\widetilde{\widetilde{\gamma}}$ die Hochhebung von γ nach $\widetilde{X}$ (es gilt: $q_\Lambda(\widetilde{\widetilde{\gamma}}) = \widetilde{\gamma}$).

$\gamma(1) = x_0^\Lambda \iff \widetilde{\widetilde{\gamma}}(1)$ liegt in der Λ-Bahn von $\widetilde{x}_0$, also $\exists [\delta] \in \Lambda$ s.d. $\widetilde{\widetilde{\gamma}}(1) = \widetilde{x}_0 \centerdot [\delta] = [\delta]$. Aber $\widetilde{\widetilde{\gamma}}(1) = [\gamma] \in \widetilde{X}$ (wenn $\gamma : I \to X$ Weg, ist $\widetilde{\widetilde{\gamma}} : I \to \widetilde{X}$, $t \mapsto [\gamma|_{[0,t)}]$ die Hochhebung von γ) $\implies [\gamma] = [\delta] \in \Lambda$. ∎

2.7.15 Definition. Zwei Überlagerungen $p : (Y, y_0) \to (X, x_0)$, $p' : (Y', y_0') \to (X, x_0)$ heißen *isomorph*, wenn $\exists h : Y \overset{\cong}{\to} Y'$ Homöomorphismus mit $p' \circ h = p$.

Frage: Sei $p : (Y, y_0) \to (X, x_0)$ eine Überlagerung, $f : (Z, z_0) \to (X, x_0)$ eine (stetige) Abbildung. Wann existiert eine Hochhebung $\overline{f} : (Z, z_0) \to (Y, y_0)$ $(p \circ \overline{f} = f)$?

Beobachtung: Wenn $\overline{f}$ existiert, dann gilt: $f_* = p_* \circ \overline{f}_* : \pi_1(Y, y_0) \to \pi_1(X, x_0) \implies \operatorname{Im} f_* \subset \operatorname{Im} p_* \subset \pi_1(X, x_0)$.

2.7.16 Proposition. *Sei p, f wie oben, Z wegzusammenhängend. Eine Hochhebung $\overline{f}$ existiert genau dann, wenn $f_*(\pi_1(Z, z_0)) \subset p_*(\pi_1(Y, y_0))$.*

Beweis. Notwendigkeit erledigt. Sei $f : (Z, z_0) \to (X, x_0)$ gegeben, sei $f_*(\pi_1(Z, z_0)) \subset p_*(\pi_1(Y, y_0))$. Sei $z \in Z$ gegeben, sei $\gamma_z : I \to Z$ ein Weg von z_0 nach z. $f \circ \gamma_z$ ist ein Weg in X mit Anfang x_0. Sei $\overline{\gamma}_z$ die Hochhebung von $f \circ \gamma_z$ nach Y mit Anfang y_0. Sei $\overline{f}(z) := \overline{\gamma}_z(1)$. Dann $p \circ \overline{f}(z) = f(z)$ nach Eigenschaften von $\overline{\gamma}_z$.

Frage: Warum ist $\overline{f}$ wohldefiniert? Sei γ_z' ein anderer Weg von z_0 nach z, $f \circ \gamma_z', \overline{\gamma}_z'$ entsprechend. Zu zeigen: $\overline{\gamma}_z(1) = \overline{\gamma}_z'(1)$. Es ist $\gamma_z'^{-1} \circ \gamma_z \in \Omega(Z, z_0) \implies f \circ (\gamma_z'^{-1} \circ \gamma_z) \in \Omega(X, x_0)$. Also $[f \circ (\gamma_z'^{-1} \circ \gamma_z)] = f_*([\gamma_z'^{-1} \circ \gamma_z]) \subset \operatorname{Im} p_*$ nach Voraussetzung $\implies \gamma_z'^{-1} \circ \gamma_z$ hebt sich zu einer Schleife hoch; nach Eindeutigkeit ist diese Schleife gleich $\overline{\gamma}_z'^{-1} \circ \overline{\gamma}_z \implies \overline{\gamma}(z)(1) = \overline{\gamma}_z'(1)$. ∎

8. Vorlesung, 09.11.2016

---

9. Vorlesung, 10.11.2016

2.7.17 Satz. *Seien $p : (Y, y_0) \to (X, x_0)$, $p' : (Y', y_0') \to (X, x_0)$ wegzusammenhängende Überlagerungen mit $p_*(\pi_1(Y, y_0)) = p_*'(\pi_1(Y', y_0')) \subset \pi_1(X, x_0)$. Dann gilt: $p : (Y, y_0) \to (X, x_0)$ und $p' : (Y', y_0') \to (X, x_0)$ sind isomorph.*

$$\begin{tikzcd}
(Y, y_0) \arrow[r, shift right, "\overline{p}"'] \arrow[dr, "p"'] & (Y', y_0) \arrow[l, shift right, "\overline{p}'"'] \arrow[d, "p'"] \\
& (X, x_0)
\end{tikzcd}$$

Beweis. Satz über Hochhebung von Abbildungen liefert Hochhebungen $\overline{p} : (Y, y_0) \to (Y', y_0')$, $\overline{p}' : (Y', y_0) \to (Y, y_0)$. Wir wollen zeigen, dass $\overline{p} \circ \overline{p}' = \mathrm{id}_{Y'}$, $\overline{p}' \circ \overline{p} = \mathrm{id}_Y$. Dazu: $\overline{p} \circ \overline{p}'(y_0') = y_0'$, d.h. die Menge $A' := \{y' \in Y' \mid \overline{p} \circ \overline{p}' = y'\} \neq \emptyset$. Wir zeigen: A' ist offen und abgeschlossen:

- A' abgeschlossen, denn $A' = ((\overline{p} \circ \overline{p}') \times \mathrm{id})^{-1}(\Delta)$, wobei $\Delta := \{(y', y') \mid y' \in Y'\} \subseteq Y' \times Y'$.
- A' ist offen, denn $\overline{p} \circ \overline{p}' : (Y', y_0') \to (Y', y_0')$ ist eine Hochhebung von der $p' : (Y, y_0) \to (X, x_0)$, denn $p' \circ \overline{p} \circ \overline{p}' = p \circ \overline{p}' = p'$.

$$\begin{tikzcd}
& (Y', y_0') \arrow[d, "p'"] \\
(Y', y_0') \arrow[ur, bend left=40, "\mathrm{id}"] \arrow[ur, bend left=20, "\overline{p} \circ \overline{p}'"'] \arrow[r, "p'"'] & (X, x_0)
\end{tikzcd}$$

Sei $U \subset X$ eine offene Teilmenge s.d. $p^{-1}(U) = \bigsqcup_{j \in J} V_j$ s.d. $p'|_V : V_j \xrightarrow{\cong} U$ lokaler Homöomorphismus ist. Sei $y' \in Y'$ s.d. $p'(y') \in U$, s.d. $\mathrm{id}(y') = \overline{p} \circ \overline{p}'(y')$. Es $\exists j$ s.d. $y' \in V_j$. Daher bildet $\overline{p} \circ \overline{p}'$ das V_j in V_j ab. Das heißt, dass $\overline{p} \circ \overline{p}'|_{V_j} = \mathrm{id}|_{V_j} \implies A'$ ist offen (mit jedem Punkt enthält sie eine Umgebung). Nun ist Y' ist wegzusammenhängend $\implies A' = Y' \implies \overline{p} \circ \overline{p}' = \mathrm{id}$; aus Symmetriegründen folgt auch $\overline{p}' \circ \overline{p} = \mathrm{id}_Y$. ■

2.7.18 Satz (Klassifikationssatz für Überlagerungen). *Es gibt eine* $1:1$-*Korrespondenz zwsichen*

$$\begin{pmatrix} \textit{Isomorphieklassen von Überlagerungen} \\ p : (Y, y_0) \to (X, x_0) \ \textit{(wegzusammenhängend)} \end{pmatrix} \quad \textit{und} \quad \begin{pmatrix} \textit{Untergruppen} \\ \Lambda < \pi_1(X, x_0) \end{pmatrix}$$

Die Korrespondenz ordnet einer Überlagerung $p : (Y, y_0) \to (X, x_0)$ *die Untergruppe* $p_*(\pi_1(Y, y_0)) \subseteq \pi_1(X, x_0)$ *zu.*

Beweis. Es folgt aus

(1) Existenz von Überlagerungen zu jeder Untergruppe von $\pi_1(X, x_0)$.
(2) Überlagerungen, die zu gleicher Untergruppe gehören, sind isomorph.

■

2.7.19 Beispiel (Klassifikation von Überlagerungen von S^1). Wir wissen schon: $\pi_1(S^1, 1) \cong \mathbb{Z}$. Jede Untergruppe $\Lambda \subset \mathbb{Z}$ ist von der Form $n\mathbb{Z}$ für ein $n \in \mathbb{N}$.

- $n = 0 : \Lambda = 0 < \mathbb{Z}$. Dazu gehört die universelle Überlagerung $\widetilde{p} : \mathbb{R} \to S^1, x \mapsto e^{2\pi i x}$.
- $n \neq 0$: $\Lambda = n\mathbb{Z} \subset \mathbb{Z}$, $p_n : S^1 \to S^1$, $z \mapsto z^n$.

Notation: $\Gamma := \pi_1(X, x_0)$, $\Lambda < \Gamma \implies (X_\Lambda, x_0^\Lambda)$ ist die (eindeutig bestimmte) wegzusammenhängende Überlagerung, die zu Λ gehört.

Erinnerung:

$$\begin{tikzcd}
& (\widetilde{X}, \widetilde{x}_0) = (X_{\{1\}}, x_0^{\{1\}}) \arrow[dl, "\widetilde{p}"'] \arrow[dr, "q_\Lambda"] & \\
(Y, y_0) & & (X_\Lambda, X_0^\Lambda) \arrow[ll, "p_\lambda"']
\end{tikzcd}$$

2.7.20 Lemma. $\Lambda_1 < \Lambda_2 < \Gamma$, *dann gilt: es gibt ein kommutatives Diagramm*

$$\begin{tikzcd}
(X_{\lambda_1}, x_0^{\Lambda_1}) \arrow[dd, "p_{\Lambda_1}"'] \arrow[dr, "\exists q_{\Lambda_2}^{\Lambda_1} \text{ Überlagerung}"] & \\
& (X_{\lambda_2}, x_0^{\Lambda_2}) \arrow[dl, "p_{\Lambda_2}"] \\
(X, x_0) &
\end{tikzcd}$$

Entsprechend: Wenn es eine stetige Abbildung $q_{\Lambda_2}^{\Lambda_1}$ *gibt, die das obige Diagramm kommutativ macht, dann gilt* $\Lambda_1 < \Lambda_2$.

Beweis. $X_{\Lambda_1} = \widetilde{X}\big/\Lambda_1$, $X_{\Lambda_2} = \widetilde{X}\big/\Lambda_2$. Wenn $\Lambda_1 < \Lambda_2$, dann erhalten wir eine kanonische stetige Abbildung

$$q_{\Lambda_2}^{\Lambda_1} : X_{\Lambda_1} = \widetilde{X}\big/\Lambda_1 \to X_{\Lambda_1} = \widetilde{X}\big/\Lambda_2,$$

$p_{\Lambda_1} = p_{\Lambda_2} \circ q_{\Lambda_2}^{\Lambda_1}$ nach Konstruktion von p_{Λ_1}, p_{Λ_2}. Die Umkehrung folgt aus Eindeutigkeit der Korrespondenz zwischen Gruppen mit Überlagerungen. ■

2.7.21 Definition. Sei $p : (Y, y_0) \to (X, x_0)$ eine Überlagerung mit (X, x_0) wegzusammenhängend. Die Mächtigkeit von $p^{-1}(x_0)$ heißt *Anzahl der Blätter* der Überlagerung (wohldefiniert, da $|p^{-1}(x_0)| = |p^{-1}(x)| \forall x \in X$ wegen X zusammenhängend).

2.7.22 Lemma. *Sei* $p_\Lambda : (X_\Lambda, x_0^\Lambda) \to (X, x_0)$ *eine Überlagerung (zur* $\Lambda < \pi_1(X, x_0) =:$ Γ*). Dann gilt:* $|p_\Lambda^{-1}(x_0)| = [\Gamma : \Lambda]$.

Beweis. Sei $\gamma \in \Omega(X, x_0)$, $\widetilde{\gamma} : I \to X_\Lambda$ die Hochhebung davon. Wenn $[\lambda] \in \Lambda \implies \widetilde{\lambda} \in \Omega(X_\Lambda, x_0^\Lambda)$, das heißt, $\widetilde{\gamma} \circ \widetilde{\lambda}$ hat gleichen Endpunkt wie $\widetilde{\gamma}$. Definiere jetzt $\phi : \Gamma\big/\Lambda \to p_\Lambda^{-1}(x_0)$, $[\gamma] \centerdot \Lambda \mapsto \widetilde{\gamma}(1)$. Abb. ϕ ist bijektiv, denn:

- ϕ ist injektiv: $\widetilde{\gamma}(1) = \widetilde{\gamma}'(1) \implies \widetilde{\gamma}'^{-1} \circ \widetilde{\gamma} \in \Omega(X_\Lambda, x_0^\Lambda) \implies [\gamma'^{-1} \circ \gamma] \in \Lambda \implies [\gamma] \in [\gamma'] \centerdot \Lambda$.
- ϕ ist surjektiv: X_Λ wegzusammenhängend $\implies \forall y \in p^{-1}(x_0) \exists \widetilde{\gamma} : I \to X_\Lambda$, ein Weg von x_0^Λ nach y; $p_\Lambda \circ \widetilde{\gamma} \in \Omega(X, x_0)$ mit Hochhebung $\widetilde{\gamma}$, $\phi([p_\Lambda \circ \widetilde{\gamma}] \centerdot \Lambda) = \widetilde{\gamma}(1) = y$.

■

2.7.23 Korollar. *Die Anzahl der Blätter der universellen Überlagerung ist gleich* $|\pi_1(X, x_0)|$.

2.7.24 Definition. Sei $(Y, y_0) \xrightarrow{p} (X, x_0)$ eine Überlagerung. Eine *Decktransformation* $h : Y \to Y$ ist ein Homöomorphismus mit $p \circ h = p$ (anders gesagt: $h : (Y, y_0) \to (Y, h(y_0))$ ist ein Isomorphismus von Überlagerungen).

Die Decktransformationen bilden eine Gruppe, die durch $\mathrm{Aut}\,(p)$ bezeichnet wird. Frage: Was ist $\mathrm{Aut}\,(p_\Lambda)$ in Termen von $\Lambda < \pi_1(X, x_0)$?

2.7.25 Definition. Eine Überlagerung $(Y, y_0) \xrightarrow{p} (X, x_0)$ heißt *normal*, wenn die Gruppe von Decktransformationen $\mathrm{Aut}\,(p)$ *transitiv* auf $p^{-1}(x_0)$ wirkt ($\forall x_0' \in p^{-1}(x_0) \exists h \in \mathrm{Aut}\,(p)$ mit $h(x_0) = x_0'$).

2.7.26 Proposition. *Sei* $p : (Y, y_0) \to (X, x_0)$ *eine Überlagerung, s.d. beide Räume wegzusammenhängend sind, sei* $\Lambda := p_*(\pi_1(Y, y_0)) < \pi_1(X, x_0) =: \Gamma$ *die zugehörige Untergruppe. Dann gilt:*

(1) p *ist normal* $\iff \Lambda \triangleleft \Gamma$ *Normalteiler.*

(2) $\mathrm{Aut}\,(p) \cong N(\Lambda) \big/ \Lambda$, *wobei*

$$N(\Lambda) := \{g \in \Gamma \mid g \Lambda g^{-1} = \Lambda,$$

der Normalisator *von* Λ *in* Γ.

(3) *Insbesondere gilt:* p *normal* $\implies \mathrm{Aut}\,(p) \cong \Gamma \big/ \Lambda$,

$$\mathrm{Aut}\,(\widetilde{p}) \cong \Gamma.$$

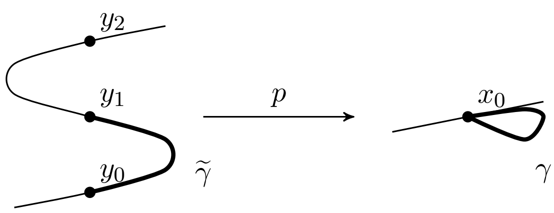
2.7.27 Korollar. $\mathrm{Aut}\,(\widetilde{p}) \cong \pi_1(X, x_0) = \Gamma$.

9. Vorlesung, 10.11.2016

---

10. Vorlesung, 17.11.2016

Erinnerung: p heißt normal, wenn $\mathrm{Aut}\,(p)$ transitiv auf $p^{-1}(x_0)$ wirkt, also $\forall y \in p^{-1}(x_0) \exists h \in \mathrm{Aut}\,(p)$ s.d. $h(y_0) = y_1$.



Beweis (der Proposition). Sei $h \in \mathrm{Aut}\,(p)$, dann haben wir folgendes kommutative Diagramm:

$$\begin{tikzcd}
h:\ (Y, y_0) \arrow[rr] \arrow[dr] & & (Y, y_1) \arrow[dl] \\
& (X, x_0) &
\end{tikzcd}$$

$\Lambda = p_*\pi_1(Y, y_0) = p_*h_*\pi_1(Y, y_0) = p_*\pi_1(Y, y_1)$, weil h_* ein Isomorphismus ist.

Sei $\widetilde{\gamma}$ ein Weg in Y von y_0 nach y_1, $\gamma := p \circ \widetilde{\gamma}$. Es gibt einen Isomorphismus $\phi_\gamma : \pi_1(Y, y_0) \to \pi_1(Y, y_1)$, $[\delta] \mapsto [\widetilde{\gamma} \centerdot \delta \centerdot \widetilde{\gamma}^{-1}]$.

p_* ist injektiv $\implies$ $p_*\pi_1(Y, y_0)$ und $p_*\pi_1(Y, y_1)$ sind durch $[\gamma] \in \pi_1(X, x_0)$ konjugiert:

$$[\gamma] \centerdot \Lambda \centerdot [\gamma]^{-1} = p_*\pi_1(Y, y_1).$$

Wenn jetzt $h \in \mathrm{Aut}\,(p)$ mit $h(y_0) = y_1$, so ist $p_*\pi_1(Y, y_1) = \Lambda$ nach obiger Beobachtung $\implies$ $[\gamma] \centerdot \Lambda \centerdot [\gamma]^{-1} = \Lambda \iff [\gamma] \in N(\Lambda)$.

Das heißt: Wenn p normal ist, nimm ein beliebiges $[\gamma] \in p\pi_1(X, x_0)$, lifte das zu $\widetilde{\gamma}$ in Y mit Anfang y_0. Sei y_1 das Ende von $\widetilde{\gamma}$. Nach Normalität von p $\exists h \in \mathrm{Aut}\,(p)$ mit $h(y_0) = y_1 \implies [\gamma] \in N(\Lambda)$. Da $[\gamma]$ beliebig war, folgt $N(\Lambda) = \Gamma \implies \Lambda \trianglelefteq \Gamma$.

Umgekehrt: Wenn $\Lambda \trianglelefteq \Gamma$ normal, $y_1 \in p^{-1}(y_0)$ gegeben. Nimm $\widetilde{\gamma}$ in Y von y_0 nach $y_1 \implies \gamma := p \circ \widetilde{\gamma}$ erfüllt $[\gamma] \centerdot \Lambda \centerdot [\gamma]^{-1} = \Lambda$. Da $[\gamma] \centerdot \Lambda \centerdot [\gamma]^{-1} = p_*\pi_1(Y, y_1)$, $\exists h : (Y, y_0) \to (Y, y_1)$ mit $p \circ h = p$. Aus Symmetriegründen existiert $g : (Y, y_1) \to (Y, y_0)$ mit $p \circ g = p$. Da h, g eindeutig sind und jeweils p hochheben, gilt $g \circ h = \mathrm{id}$, $h \circ g = \mathrm{id} \implies h \in \mathrm{Aut}\,(p)$.

$$\begin{tikzcd}
(Y, y_0) \arrow[r, "h"] \arrow[rr, bend left=60, "g \circ h"] \arrow[rr, bend left=30, "\mathrm{id}"] \arrow[dr, "p"'] & (Y, Y_1) \arrow[r, "g"] \arrow[d, "p"] & (Y, Y_0) \arrow[dl, "p"] \\
& (X, X_0) &
\end{tikzcd}$$

Damit ist (1) bewiesen.

Für (2): Wie betrachten die Abbildung $\varphi : N(\Lambda) \to \mathrm{Aut}\,(p)$, $[\gamma] \mapsto h_{[\gamma]}$, $h_{[\gamma]}$ ist die eindeutig bestimmte Hochhebung

$$\begin{tikzcd}
& (Y, y_1) \arrow[d, "p"] \\
(Y, y_0) \arrow[ur, "h_{[\gamma]}"] \arrow[r, "p"'] & (X, x_0)
\end{tikzcd}$$

wobei $y_1 = \widetilde{\gamma}(1)$, $\widetilde{\gamma}$ ist die Hochhebung von γ.

γ ist wohldefiniert:

- $\widetilde{\gamma}(1)$ kommt nur auf $[\gamma]$ an (homotope Wege haben homotope Hochhebungen).
- $h_{[\gamma]} \in \operatorname{Aut}(p)$ wie in (1). $h_{[\gamma]} \centerdot h_{[\gamma]^{-1}}$ ist die Hochhebung der $p : (Y, y_0) \to (X, x_0)$ und ist daher gleich id.
- φ ist ein Homomorphismus: $h_{[\gamma_2 \centerdot \gamma_1]}$ und $h_{[\gamma_2]} \centerdot h_{[\gamma_1]}$ heben $p : (Y, y_0) \to (X, x_0)$ nach (Y, y_2) hoch $\implies$ Gleichheit.
- φ ist surjektiv: Sei $h \in \operatorname{Aut}(p)$,

$$\begin{tikzcd} h : (Y, y_0) \arrow[r] \arrow[dr, "p"'] & (Y, y_1) \arrow[d, "p"] \\ & (X, x_0) \end{tikzcd}$$

  Sei $\widetilde{\gamma}$ ein Weg von y_0 nach y_1 in Y, $y := p \circ \widetilde{\gamma}$. Dann ist $h = h_{[\gamma]}$ nach Konstruktion.
- $\ker \varphi = \{[\gamma] \in N(\Lambda) \mid h_{[\gamma]} = \mathrm{id}\} = \{[\gamma] \in N(\Lambda) \mid \widetilde{\gamma} = y_0\}$. ($\Lambda$ besteht aus Schleifen unten, die sich zu Schleifen hochheben.) D.h. $\varphi : N(\Lambda) \to \operatorname{Aut}(p)$ surjektiv, $\ker(\varphi) = \Lambda \implies \operatorname{Aut}(p) \cong N(\Lambda)/\Lambda$. ■

Erinnerung: $\Gamma \curvearrowright Y$ ist eine Überlagerungswirkung. Dann ist $q : (Y, y_0) \to \left(Y/\Gamma, \overline{y_0}\right)$ eine Überlagerung.

Beobachtung: Jedes $g \in \Gamma$ definiert ein Element $\alpha(g) \in \operatorname{Aut}(q)$:

$$\begin{tikzcd} h : (Y, y_0) \arrow[r, "\alpha(g)"] \arrow[dr, "q"'] & (Y, \alpha(g)(y_0)) \arrow[d, "q"] \\ & \left(Y/\Gamma, \overline{y_0}\right) \end{tikzcd}$$

2.7.28 Proposition. *In der obingen Situation gilt:*

(1) $\operatorname{Aut}(q) \cong \Gamma$, *wenn Y wegzusammenhängend.*

(2) $\Gamma \cong \pi_1\left(Y/\Gamma\right)/_{q_* \pi_1(Y)}$, *wenn Y wegzusammenhängend ist.*

Beweis. Die Überlagerung $q : (Y, y_0) \to \left(Y/\Gamma, \overline{y_0}\right)$ ist normal, weil $q^{-1}(\overline{y_0}) = y_0 \centerdot \Gamma$, und Γ wirkt darauf transitiv.

$$\operatorname{Aut}(q) \cong \pi_1\left(Y/\Gamma\right)/_{q_* \pi_1(Y)}$$

nach dem Satz oben.

Nun haben wir: Wenn $h \in \operatorname{Aut}(q)$

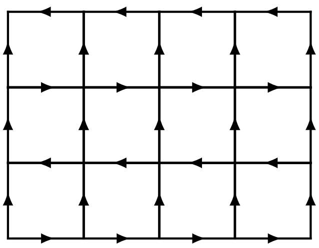
$$\begin{tikzcd} h: (Y, y_0) \arrow[rr] \arrow[dr, "q"'] & & (Y, y_1) \arrow[dl, "q"] \\ & \left({}^{Y}\!\big/_{\Gamma}, \overline{y_0}\right) & \end{tikzcd}$$

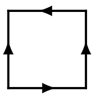
$\exists g \in \Gamma$ s.d. $y_1 = \alpha(g)y_0$. Aber dann ist $\alpha(g)$ auch eine Hochhebung von $q : (Y, y_0) \to \left({}^{Y}\!\big/_{\Gamma}, \overline{y_0}\right)$ nach $(Y, y_1) \implies h = \alpha(g) \implies \operatorname{Aut}(q) \cong \Gamma$. ■

2.7.29 Korollar. *Wenn $\Gamma \curvearrowright Y$ eine Überlagerungswirkung ist, Y einfach zusammenhängend (Y wegzusammenhängend, $\pi_1(Y) \cong \{1\}$). Dann gilt:*

$$\pi_1({}^{Y}\!\big/_{\Gamma}) \cong \Gamma.$$

2.7.30 Beispiel.
- Es ist $\pi_1(\mathbb{RP}^n) \cong {}^{\mathbb{Z}}\!\big/_{2}$. Denn $\mathbb{RP}^n \cong {}^{S^n}\!\big/_{\mathbb{Z}/2}$, ${}^{\mathbb{Z}}\!\big/_{2} \curvearrowright S^n$, $t \neq$, $t \cdot x = -x$.
- Sei $Y = \mathbb{R}^2$, dann ${}^{\mathbb{R}^2}\!\big/_{\mathbb{Z}^2} \cong \Pi^2 \implies \pi_1(\Pi^2) \cong \mathbb{Z}^2$.
- Sei $\Gamma \subset \operatorname{Isom}(\mathbb{R}^2)$ die Automorphismengruppe von diesen Graphen.:



${}^{R^2}\!\big/_{\Gamma} =$  $=$ die kleinsche Flasche F, $\pi_1(F) \cong \Gamma$.

Frage: Gibt es für jede Gruppe Γ einen wegzusammenhängenden Raum X mit $\pi_1(X) \cong \Gamma$? Wir werden für diese Frage die Cayley-Graphen betrachten und daraus den Raum X wie oben konstruieren.

2.7.31 Definition. Sei Γ eine Gruppe, $S \subset \Gamma$ Teilmenge,

$$\langle S \rangle := \bigcup_{\Lambda < \Gamma, S \subseteq \Lambda} \Lambda$$

die durch S erzeugte Untergruppe von Γ. S heißt *Erzeugendenmenge* von Γ, wenn $\langle S \rangle = \Gamma$. (Übung: $\langle S \rangle = \{s_1^{\varepsilon_1} \cdots s_n^{\varepsilon_n} \mid n \in \mathbb{N},\ s_i \in S, \varepsilon_i \in \{\pm 1\}\}$).

2.7.32 Beispiel. $\Gamma = (\mathbb{Z}, +)$, $S = (2, 4)$, $\langle S \rangle = 2\mathbb{Z}$. $S' = \{3, 5\} \implies \langle S \rangle = \mathbb{Z}$.

2.7.33 Definition. Sei Γ eine Gruppe, $S \subseteq \Gamma$, $\langle S \rangle = \Gamma$. $\operatorname{Cay}(\Gamma, S)$ ist der Graph mit

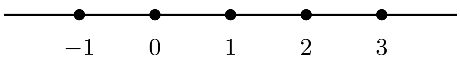
- Ecken $V(\operatorname{Cay}(\Gamma, S)) = \Gamma$,

- Kanten $E(\text{Cay}(\Gamma, S)) = \{(g, gs) \mid g \in \Gamma, s \in S\}$.

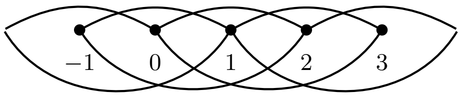
Entsprechend können wir Cay (Γ, S) als einen 1-dimensionalen CW-Komplex auffassen (Ecken=0-Zellen, Kanten=1-Zellen).

2.7.34 Beispiel. $\Gamma = (\mathbb{Z}, +)$

- $S = \{1\}$:



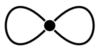
- $S = \{2, 3\}$:



Die Linkswirkung von Γ auf sich selbst induziert eine Wirkung $\Gamma \overset{\alpha}{\curvearrowright} \text{Cay}(\Gamma, S)$ $(g \in \Gamma = V(\text{Cay}(\Gamma, S)),\ \alpha(h)(g) = h \cdot g)$. $(g, gs) \in E(\text{Cay}(\Gamma, S)) \rightsquigarrow \alpha(h)(g, gs) = (h, hgs) \in E(\text{Cay}(\Gamma, S))$. Die Wirkung $\Gamma \curvearrowright \text{Cay}(\Gamma, S)$ ist eine Überlagerung (Übung).

Den Quotientenraum $_{\Gamma}\backslash^{\text{Cay}(\Gamma, S)}$ kann man leicht verstehen; Γ wirkt transitiv auf Γ, also bleibt im Quotienten nur eine Ecke [1], an dieser Ecke bekommen wir $|S|$ Schleifen;

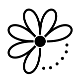
Sei X ein Punkt mit $|S|$ Schleifen. Was ist $\pi_1(X)$?

Beobachtung: Wenn $\pi_1(\text{Cay}(\Gamma, S)) \cong \{1\} \implies \pi_1(X_S) \cong \Gamma$ nach Proposition. $\pi_1(X_1) = \pi\Big($  $\Big) \cong \mathbb{Z}$. Um $\pi\Big($  $\Big)$ zu berechnen, brauche ich eine Gruppe $\Gamma = \langle a, b\rangle$, s.d. $\pi_1(\text{Cay}(\Gamma, \{a, b\})) \cong \{1\}$ (ohne Schleifen).

10. Vorlesung, 17.11.2016

---

11. Vorlesung, 23.11.2016

Frage: $\pi\Big($  $\Big)$ =? Wenn $\pi_1(\text{Cay}(\Gamma, S)) = \{1\}$ ist $\Gamma \cong \pi_1(X_S)$.

(unter der Klammer: $_{\Gamma}\backslash^{\text{Cay}(\Gamma, S)}$)

2.8 Gruppen angegeben durch Erzeuger und Relationen; freie Gruppen

Fragestellung: Sei Γ eine Gruppe erzeugt durch $S \subseteq \Gamma$ $(\Gamma = \langle S\rangle)$. Welche "Rechenregeln" gelten für Elemente in S. Kann man Γ anhand von S und dessen "Rechenregeln" beschrieben?

2.8.1 Beispiel. $\Gamma := \langle a, b\rangle$. Wenn in Γ gilt: $ab = ba$, was folgt über Γ? In Γ gilt: Jedes $g \in \Gamma$ kann man schreiben als $g = a^{\varepsilon_1} \cdot b^{\varepsilon_2} \cdot a^{\varepsilon_3} \cdots$, $\varepsilon_i \in \{-1, 0, 1\}$. Nach der Rechenregel oben erhalten wir $g = a^n \cdot b^m$, $n, m \in \mathbb{Z}$. Es kann sein, dass $\Gamma \cong \mathbb{Z}^2 = \langle (0, 1), (1, 0)\rangle$ oder $\Gamma \cong \{1\}$, wenn $a = b$. Der Unterschied besteht darin, ob es weitere "Rechenregeln" gibt, die $a^n \cdot b^m$ verfeinern können.

2.8.2 Beispiel. $\Gamma := \langle a, b\rangle$ “ohne Rechenregeln”. Es gilt $\Gamma \ni g = a^{\varepsilon_1} \cdot b^{\varepsilon_2} \cdot a^{\varepsilon_3} \cdots$, $\varepsilon_i \in \{-1, 0, 1\}$. Elemente sind z.B. $aba^{-1}b^{-1}$, $ab^2a^{-2}b^{-3}$ etc. Alle diese Wörter müssen unterschiedliche Elemente geben, denn: wenn z.B. $aba^{-1}b^{-1} = ab^2a^{-2}b^{-3} \iff b^3a^2b^{-2}a^{-1}aba{-}1b^{-1} = b^3a^2b^{-1}a^{-1}b^{-1} = 1$.

2.8.3 Definition. Sei S eine Menge,

$$X = S \sqcup \underbrace{\overline{S}}_{\substack{\text{Eine andere}\\ \text{Kopie von } S}}$$

Ein Wort im Alphabet X ist eine endliche Folge $w = x_1x_2\cdots x_n$ von Elementen von X, $n \in \mathbb{N}$ ($n = 0 \implies w = \underline{\varepsilon} = \underline{1}$ *leeres Wort*). Wort w heißt *reduziert*, wenn es kein Teilwort von der Form $s \cdot \overline{s}$ oder $\overline{s} \cdot s$ hat, $s \in S$. Z.B. $S = \langle a, b\rangle$, $a\overline{b}\overline{a}b$ reduziert, $a\overline{a}$ nicht reduziert. Die Menge der Wörter bezeichnet man X^*. Die reduzierten Wörter bezeichnet man X_r^*. Wenn $v, w \in X^*$, $v = v_1\cdots v_m$, $w = w_1\cdots w_n$, $v_i, w_i \in X$ dann $vw := v_1\cdots v_nw_1\cdots w_n$. Die Reduktion eines Wortes $w = vs\overline{s}u$, $s \in S$, $v, u \in X^*$ ist das Wort $w' = vu$; die Reduktion von $w = v\overline{s}su$ ist $w = vu$

2.8.4 Lemma. *Jedes Wort kann man durch endlich viele Reduktionsschritte aus eine reduziertes Wort bringen, dieses ist eindeutig.*

Bezeichnung: $r : X^* \to X_r^*$, $w \mapsto$ (reduzierte Form von w).

2.8.5 Proposition und Definition. $(X_r^*, \cdot)$, $w \cdot v := r(wv)$ *ist eine Gruppe. Sie heißt* *f r e i e G r u p p e mit dem Erzeugendensystem* S.

Beweis. Assoziativität folgt aus Assoziativität der Konkatenation und Eindeutigkeit der reduzierten Form: $w \cdot v \cdot u = r(w \cdot v \cdot u) = r(r(w \cdot v) \cdot u) = r(w \cdot r(v \cdot u))$. Sei $\overline{} : X \to X$, $S \ni a \mapsto \overline{a} \in \overline{S}$, $\overline{S} \ni \overline{a} \mapsto a \in S$. Dann gilt mit $w^{-1} := \overline{w_n}\cdots\overline{w_1}$:

$$w^{-1} \cdot w = r(\overline{w_n}\cdots\overline{w_1} \cdot w_1\cdots w_n) = \underline{1} = r(w_n\cdots w_1 \cdot \overline{w_1}\cdots\overline{w_n}) = w \cdot w^{-1}.$$

■

Bezeichnung: $\mathbb{F}_S$ freie Gruppe auf dem Erzeugendensystem S. Je zwei unterschiedliche reduzierte Wörter sind unterschiedliche Elemente von der Gruppe nach Konstruktion.

2.8.6 Proposition (Universelle Eigenschaft der freien Gruppe). *Sei* S *eine Menge,* $\mathbb{F}_S$ *freie Gruppe auf* S*. Dann gilt: für jede Gruppe* Γ *und jede Abbildung* $\varphi : S \to \Gamma$ $\exists!$ *Homomorphismus* $\phi : \mathbb{F}_S \to \Gamma$ *s.d.* $\phi|_S = \varphi$.

$$\begin{tikzcd} S \arrow[r, hook] \arrow[dr, "\varphi"'] & \mathbb{F}_S \arrow[d, dashed, "\exists!\Phi"] \\ & \Gamma \end{tikzcd}$$

Bemerkung: Analog dazu gilt: V Vektorraum, $B \subseteq V$ Basis, $\forall$ Vektorräume W $\forall \varphi : B \to W \exists! \phi : V \to W$ linear mit $\phi|_B = \varphi$.

$$\begin{tikzcd} B \arrow[r, hook] \arrow[dr, "\varphi"'] & V \arrow[d, dashed, "\exists!\Phi"] \\ & W \end{tikzcd}$$

Beweis. Sei $\varphi : S \to \Gamma$ gegeben. Definiere $\Phi(w_1, ..., w_n) = \varphi(w_1) \cdots \varphi(w_n)$, $w_i \in S = S \cup S^{-1}$. Sei $\varphi(w^{-1}) := \varphi(w)^{-1}$ (auf S^{-1} fortgesetzt). Dann gilt $\Phi(r(w \cdot v)) = \Phi(w \cdot v) = \Phi(w) \cdot \Phi(v)$ weil $\varphi(s) \cdot \varphi(s^{-1}) = \varphi(s) \cdot \varphi(s)^{-1} = 1 \implies \Phi$ ist eine Homomorphismus.

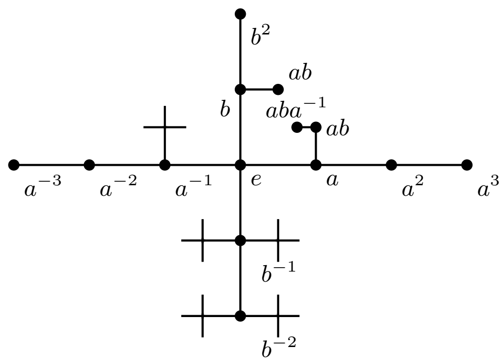
Eindeutigkeit: Wenn $\Psi : \mathbb{F}_S \to \Gamma$ ist Homomorphismus mit $\Psi|_S = \varphi$, dann gilt: $\Psi(s^{-1}) = \Psi(s)^{-1} = \varphi(s)^{-1} = \Phi(s)^{-1}$, $s \in S$. Dann gilt: $\Psi(w_1 \cdots w_n) = \Psi(w_1) \cdot \Psi(w_n) = \varphi(w_1) \cdots \varphi(w_n) = \Phi(w_1) \cdots \Phi(w_n) = \Phi(w)$. ■

2.8.7 Korollar. *Wenn $|S| = |S'|$, dann gilt $\mathbb{F}_S \cong \mathbb{F}_{S'}$.*

Beweis. Übung. ■

2.8.8 Korollar. *Wenn $\Gamma = \langle S \rangle$, dann ist Γ ein Quotient von $\mathbb{F}_S$: $\exists q : \mathbb{F}_S \twoheadrightarrow \Gamma$. Nach universellen Eigenschaft: q surjektiv, weil $\Gamma > q(\mathbb{F}_S) \supseteq dS \implies q(\mathbb{F}_s) \supseteq \langle S \rangle = \Gamma$.*

Sei $\mathbb{F}_2 := \langle a, b \rangle$ frei auf 2 Erzeugern. Was ist Cay $(\mathbb{F}_2, \{a, b\})$?



2.8.9 Proposition. Cay $(\mathbb{F}_2, \{a, b\})$ *ist ein 4-regulärer Baum.*

Beweis. (1) Jede Ecke ist mit 4 anderen Knoten verbunden (durch a, b, a^{-1}, b^{-1}).

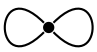
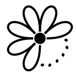
(2) Es ist ein Baum, denn: ein Zyklus an $w \in \mathbb{F}_2$ ist eine Sequenz $w, wa^{\varepsilon_1}, wa^{\varepsilon_2}b^{\varepsilon_2}, ..., w \cdot v = w \iff v = 1$, wobei v reduziert ist, weil wir Rückgänge nicht erlauben, somit ist v trivial $\implies$ es gibt keine Zyklen.

■

2.8.10 Korollar. $\pi_1(\text{Cay}(\mathbb{F}_2, \{a, b\})) \cong \{1\}$.

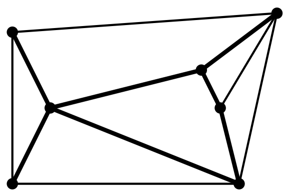
Beweis. (Cay $(\mathbb{F}_2, \{a, b\})$) ist zusammenziehbar: wir müssen eine Homotpie zwischen id und $c : \mathrm{Cay}(\mathbb{F}_2) \to e$ konstruieren. Sei h_t, $t \in [0,1]$ eine Familie der Abbildungen, die die 4 Kanten an 1 zusammenzieht?

$h_t^{(1)}$ sei die Familie von Abbildungen, die diese neuen Kanten an e zusammenzieht. Die gewünschte topologie entsteht durch Ausführung von $h_t^{(n)}$ auf dem Intervall $t \in [1 - 1/2^n, 1 - 1/2^{n+1}]$ und Verkleben. ■

2.8.11 Korollar. $\pi\Big($  $\Big)$ $\cong \mathbb{F}_2$*; analog (Übung):* $\pi\Big($  $\Big) \cong \mathbb{F}_S$*.*

$\mathbb{F}_2 \backslash \mathrm{Cay}(\mathbb{F}_2, \{a, b\})$ $|S|$ *viele*

Tatsächlich gilt noch mehr: die Fundamentalgruppe von jedem Graphen ist frei (Übung). Idee: $G = (V, E)$ hat einen maximalen Baum $T \subseteq G$, T wird zusammenziehbar



$\implies G \sim {}^{G}\!/_{T} =$ 

2.9 Angabe der Gruppen durch Erzeuger und Relationen.

2.9.1 Definition. Sei Γ eine Gruppe, $F \subseteq \Gamma$ eine Teilmenge. Die *normale Hülle* von F ist die kleinste normale Untergruppe $N \lhd \Gamma$, welche F enthält. Bezeichnung:

$$\langle\langle F \rangle\rangle = \bigcap_{N' \unlhd \Gamma, N' \supseteq F} N'.$$

2.9.2 Proposition. *Sei Γ eine Gruppe, $F \subseteq \Gamma$ eine Teilmenge. Die normale Hülle $\langle\langle F \rangle\rangle$ hat folgende Eigenschaft: $\forall$ Homomorphismen $\varphi\Gamma \to \Lambda$ mit $F \subseteq \ker\varphi$ gilt: $\langle\langle F \rangle\rangle \subseteq \ker\varphi$, und $\langle\langle F \rangle\rangle$ ist die größte normale Untergruppe von Γ mit dieser Eigenschaft.*

Beweis. $\ker\varphi \lhd \Gamma \implies (\ F \subseteq \ker\varphi \implies \langle\langle F \rangle\rangle \subseteq \ker\varphi\ )$. Maximalität: $q : \Gamma \twoheadrightarrow {}^{\Gamma}\!/_{\langle\langle F \rangle\rangle}$, $\ker q = \langle\langle F \rangle\rangle$. ■

2.9.3 Definition. Sei S eine Menge, $R \subseteq \mathbb{F}_S$. Die Gruppe $\Gamma = \langle S | R \rangle$ definiert durch Erzeuger S mit Relationen R ist

$$\Gamma = \langle S | R \rangle := {}^{\mathbb{F}_S}\!/_{\langle\langle R \rangle\rangle}.$$

2.9.4 Proposition. $\Gamma = \langle S | R \rangle$ *hat folgende universelle Eigenschaft: $\forall$ Gruppen Λ und jede Abbildung $\varphi : S \to \Lambda$ s.d. $\ker\Phi \supseteq \langle\langle F \rangle\rangle$, wobei $\Phi : \mathbb{F}_S \to \Lambda$ die durch φ induzierter Homomorphismus ist, existiert ein eindeutiger Homomorphismus $\Phi : \Gamma \to \Lambda$. Die Abbildung kann man auf Erzeuger angeben, wenn Relationen erfüllt sind.*

$$\begin{tikzcd}
S \arrow[r, hook] \arrow[ddr, dashed, "\varphi"'] & \mathbb{F}_S \arrow[d, "q"] \arrow[dd, bend left=60, "\exists!\Phi"] \\
& \Gamma \arrow[d, dashed, "\Phi"] \\
& \Lambda
\end{tikzcd}$$

Beweis. Übung. ■

2.9.5 Beispiel. $\Gamma = \langle a, b \mid aba^{-1}b^{-1} \rangle$ $(= \langle a, b \mid aba^{-1}b^{-1} = 1 \rangle = \langle a, b \mid ab = ba \rangle.)$ Behauptung: $\Gamma \cong \mathbb{Z}^2$. Ein Homomorphismus ist $\Phi : \Gamma \to \mathbb{Z}^2$, $a \mapsto (1, 0)$, $b \mapsto (0, 1)$ ist surjektiv, weil $(1, 0)$, $(0, 1)$ das $\mathbb{Z}^2$ erzeugen, die inverse Abbildung ist $\Psi : \mathbb{Z}^2 \to \Gamma$, $(1, 0) \mapsto a$, $(0, 1) \mapsto b$.