

# Kombinatorische Gruppentheorie

Vorlesung im Sommersemester 2022

Benjamin Sambale  
Leibniz Universität Hannover

25. August 2024

$$M_{11} = \langle x, y, z \mid x^{11} = y^5 = z^4 = (xz)^3 = 1, \, xyx^{-1} = x^4, \, zyz^{-1} = y^2 \rangle$$

$x$	$x^{-1}$	$y$	$y^{-1}$	$z$	$z^{-1}$
2	3	1	1	4	4
5	1	6	7	8	9
1	10	11	12	11	13
14	15	4	4	1	1
6	2	13	11	5	5
7	5	10	2	16	16
17	6	2	17	14	18
19	9	9	18	10	2
8	16	14	8	2	10
3	11	17	6	9	8
10	12	5	3	12	3
11	13	3	13	13	11
12	17	12	5	3	12
20	4	16	9	17	7
4	18	21	22	21	19
9	20	18	14	6	6
13	7	7	10	18	14
15	21	8	16	7	17
22	8	22	20	15	22
16	14	19	21	20	20
18	22	20	15	22	15
21	19	15	19	19	21

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort	2
1 Freie Gruppen	3
2 Untergruppen freier Gruppen	11
3 Automorphismen freier Gruppen	17
4 Gruppen-Erweiterungen	20
5 Erweiterungen der alternierenden Gruppen	37
6 Sporadische Gruppen	44
7 Symplektische Gruppen	54
8 Coxetergruppen	59
9 Freie Produkte und Amalgame	79
10 Das Burnside-Problem	84
11 Gruppenklassen und Varietäten	97
12 $p$ -Gruppen	103
13 Entscheidbarkeitsprobleme	107
Aufgaben	109
Stichwortverzeichnis	115

## Vorwort

In der kombinatorischen Gruppentheorie werden Gruppen hauptsächlich mittels Erzeuger und Relationen studiert. Naturgemäß muss man sich daher größtenteils mit unendlichen Objekten auseinandersetzen. Eine der wichtigsten Motivationen ist das *Burnside-Problem*: Ist jede endlich erzeugte Gruppe mit endlichem Exponenten endlich? Da gelegentlich geometrische Argumente zum Einsatz kommen (zum Beispiel bei Coxetergruppen), spricht man alternativ auch von *geometrischer Gruppentheorie*.

Dieses Skript entstand im Rahmen einer 3 + 1 Vorlesung im Sommersemester 2022 an der Leibniz Universität Hannover. Die Vorlesung schließt an meine Gruppentheorie-Vorlesung im Wintersemester 2020/21 an und setzt entsprechende Kenntnisse voraus (Verweise sind mit GT gekennzeichnet). An einigen Stellen gibt es Doppelungen in beiden Vorlesungen. Die Gründe dafür sind:

- Kenntnisse ins Gedächtnis zurückrufen.
- Alternative Beweismethoden vorstellen.
- Themen, die zwar im Gruppentheorie-Skript stehen, aber dort aus Zeitgründen nicht behandelt wurden (Beispiel: Schur-Erweiterungen).

Aus Zeitgründen wurden die Kapitel 3 und 9–13 nicht behandelt (darin sind also mehr Fehler zu erwarten). Um das Rechnen mit (realistischen) Beispielen praktikabel zu machen, führen wir an vielen Stellen Befehle für das kostenlose Computeralgebrasystem GAP 4.11.1 ein. An dieser Stelle vielen Dank an Thomas Breuer für nützliche Ratschläge. Ich bedanke mich ebenso bei Luca Blaas, Adrian Homma, Scheima Obeidi und Tim Wittenberg für einige Fehlerhinweise.

Literatur:

- T. Camps, V. Rebel, G. Rosenberger, *Einführung in die kombinatorische und die geometrische Gruppentheorie*, Heldermann Verlag, Lemgo, 2008<sup>1</sup>
- M. Hall, *The Theory of Groups*, 4th printing, The Macmillan Company, New York, 1963<sup>2</sup>
- D. J. S. Robinson, *A Course in the Theory of Groups*, 2nd edition, Springer, New York, 1996<sup>3</sup>
- W. Magnus, A. Karrass, D. Solitar, *Combinatorial Group Theory*, 2nd edition, Dover, Mineola, 2004<sup>4</sup>
- R. C. Lyndon, P. E. Schupp, *Combinatorial Group Theory*, Springer, Berlin, 1977
- J. E. Humphreys, *Reflection groups and Coxeter groups*, Cambridge University Press, Cambridge, 1994
- D. L. Johnson, *Presentations of Groups*, 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1997
- H. S. M. Coxeter, W. O. J. Moser, *Generators and Relations for Discrete Groups*, 4th edition, Springer, Berlin, 1980
- The GAP Group, *GAP – Groups, Algorithms, and Programming, Version 4.11.1*; 2021, (<http://www.gap-system.org>).

## 1 Freie Gruppen

**Bemerkung 1.1.** Eine Basis  $B$  eines Vektorraums  $V$  lässt sich durch folgende Eigenschaft charakterisieren: Für jeden Vektorraum  $W$  besitzt jede Abbildung  $B \rightarrow W$  genau eine lineare Fortsetzung  $V \rightarrow W$ . Auf diese Weise kann man Basen für beliebige (nicht-abelsche) Gruppen definieren. Im Gegensatz zu Vektorräumen besitzen die meisten Gruppen aber keine Basen.

**Definition 1.2** (Universelle Eigenschaft). Eine Gruppe  $F$  heißt *frei* bzgl. einer Teilmenge  $X \subseteq F$ , falls für jede Gruppe  $G$  und jede Abbildung  $\sigma : X \rightarrow G$  genau ein Homomorphismus  $\hat{\sigma} : F \rightarrow G$  mit  $\hat{\sigma}(x) = \sigma(x)$  für alle  $x \in X$  existiert (d. h.  $\hat{\sigma}$  ist eine Fortsetzung von  $\sigma$ ).

**Beispiel 1.3.**

- (i) Die triviale Gruppe  $F = 1$  ist die einzige freie Gruppe bzgl.  $X = \emptyset$ , denn jede nicht-triviale Gruppe  $F$  besitzt mindestens zwei Endomorphismen.
- (ii) Die Gruppe  $\mathbb{Z}$  ist frei bzgl.  $X = \{1\}$ , denn jede Abbildung  $\sigma : X \rightarrow G$  besitzt die eindeutige Fortsetzung  $\mathbb{Z} \rightarrow G$ ,  $n \mapsto \sigma(1)^n$ .

---

<sup>1</sup>Dieses vielversprechende Buch habe ich leider erst nach Semesterende entdeckt.

<sup>2</sup>Behandelt endliche und unendliche Gruppen gleichberechtigt. Trotz seines Alters gut zu lesen.

<sup>3</sup>Etwas moderner und umfangreicher als Hall.

<sup>4</sup>Unveränderter Neudruck der 1975 erschienenen Ausgabe. Kleine Schrift, viel Fließtext, schwer zu lesen.

**Definition 1.4.** Sei  $X$  eine Menge, die wir *Alphabet* nennen. Die Elemente von  $X$  heißen *Buchstaben*. Sei  $W$  die Menge aller *Worte* der Form  $w = x_1^{\epsilon_1} \dots x_n^{\epsilon_n}$  mit  $n \in \mathbb{N}_0$ ,  $x_1, \dots, x_n \in X$  und  $\epsilon_1, \dots, \epsilon_n \in \{\pm 1\}$ . Dabei heißt  $|w| := n$  die *Länge* von  $w$ . Für  $n = 0$  erhält man das *leere Wort*  $w = 1$ . Gilt  $x_i \neq x_{i+1}$  oder  $\epsilon_i = \epsilon_{i+1}$  für  $i = 1, \dots, n-1$ , so heißt  $w$  *reduziert*. Offenbar kann man jedes Wort  $w$  in ein reduziertes Wort überführen, indem man Teile der Form  $xx^{-1}$  oder  $x^{-1}x$  sukzessiv streicht. Zwei Worte  $v, w \in W$  heißen *äquivalent*, wenn man sie in das gleiche reduzierte Wort überführen kann. Dies ist eine Äquivalenzrelation auf  $W$ . Die Menge der Äquivalenzklassen  $F_X := \{[w] : w \in W\}$  bildet dann eine Gruppe bzgl. Konkatenation, d. h.

$$[w][v] := [wv] \quad [w], [v] \in F_X.$$

Das neutrale Element ist die Äquivalenzklasse des leeren Worts  $[1]$ . Das Inverse von  $[x_1^{\epsilon_1} \dots x_n^{\epsilon_n}]$  ist  $[x_n^{-\epsilon_n} \dots x_1^{-\epsilon_1}]$ . Indem man  $x \in X$  mit  $[x] \in F_X$  identifiziert, kann man  $X \subseteq F_X$  annehmen.

**Satz 1.5.**

- (i)  $F_X$  ist frei bzgl.  $X$ .
- (ii) Jede freie Gruppe bzgl.  $X$  ist zu  $F_X$  isomorph.
- (iii) Es gilt  $F_X \cong F_Y$  genau dann, wenn  $X$  und  $Y$  gleichmächtig sind.

*Beweis.*

- (i) Sei  $G$  eine Gruppe und  $\sigma : X \rightarrow G$ . Für  $w = x_1^{\epsilon_1} \dots x_n^{\epsilon_n} \in W$  definieren wir

$$\hat{\sigma}(w) := \sigma(x_1)^{\epsilon_1} \dots \sigma(x_n)^{\epsilon_n} \in G.$$

Für äquivalente Wörter  $v, w \in W$  gilt offenbar  $\hat{\sigma}(v) = \hat{\sigma}(w)$ . Somit induziert  $\hat{\sigma}$  eine wohldefinierte Abbildung  $F_X \rightarrow G$ , die wir ebenfalls mit  $\hat{\sigma}$  bezeichnen. Wegen  $\hat{\sigma}(wv) = \hat{\sigma}(w)\hat{\sigma}(v)$  für  $w, v \in W$  ist  $\hat{\sigma}$  ein Homomorphismus. Wegen  $F_X = \langle X \rangle$  ist  $\hat{\sigma}$  eindeutig durch  $\sigma$  bestimmt.

- (iii) Sei  $\sigma : X \rightarrow Y$  eine Bijektion. Dann existieren Homomorphismen  $\alpha : F_X \rightarrow F_Y$  und  $\beta : F_Y \rightarrow F_X$  mit  $\alpha|_X = \sigma$  und  $\beta|_Y = \sigma^{-1}$ . Also ist  $\alpha\beta : F_Y \rightarrow F_Y$  eine Fortsetzung von  $\text{id}_Y$ . Aus der universellen Eigenschaft folgt  $\alpha\beta = \text{id}_{F_Y}$ . Analog zeigt man  $\beta\alpha = \text{id}_{F_X}$ . Also ist  $\alpha$  ein Isomorphismus zwischen  $F_X$  und  $F_Y$ .

Sei umgekehrt ein Isomorphismus  $\alpha : F_X \rightarrow F_Y$  gegeben. Wir betrachten

$$N_X := \langle g^2, [g, h] : g, h \in F_X \rangle \trianglelefteq F_X$$

und  $\overline{F_X} := F_X/N_X$ . Wegen  $\alpha(N_X) = \langle \alpha(g), [\alpha(g), \alpha(h)] : g, h \in F_X \rangle = N_Y$  ist  $\overline{F_X} \cong \overline{F_Y}$ . Nach Konstruktion ist  $\overline{F_X}$  eine abelsche Gruppe mit  $\bar{g}^2 = 1$  für alle  $\bar{g} \in \overline{F_X}$ . Durch die Skalarmultiplikation  $\lambda \bar{g} := \bar{g}^\lambda$  für  $\lambda \in \mathbb{F}_2$  wird  $\overline{F_X}$  ein  $\mathbb{F}_2$ -Vektorraum (eine unendliche Version der elementarabelschen Gruppen aus GT). Die Elemente  $\bar{x} := xN_X$  mit  $x \in X$  bilden ein Erzeugendensystem von  $\overline{F_X}$ . Nehmen wir an es gibt paarweise verschiedene  $x_1, \dots, x_n \in X$  mit  $x_1 \dots x_n \in N_X$ . Sei  $\sigma : X \rightarrow \mathbb{F}_2$  mit  $\sigma(x_1) = 1$  und  $\sigma(x_i) = 0$  für  $i = 2, \dots, n$ . Sei  $\hat{\sigma} : F_X \rightarrow \mathbb{F}_2$  die Fortsetzung von  $\sigma$ . Wegen  $\hat{\sigma}(g^2) = 2\hat{\sigma}(g) = 0$  und  $\hat{\sigma}([g, h]) = \hat{\sigma}(g) + \hat{\sigma}(h) - \hat{\sigma}(g) - \hat{\sigma}(h) = 0$  ist  $x_1 \dots x_n \in N_X \subseteq \text{Ker}(\hat{\sigma})$ . Dies widerspricht  $\hat{\sigma}(x_1 \dots x_n) = \sigma(x_1) = 1$ . Also ist  $x_1 \dots x_n \notin N_X$ . Dies zeigt, dass  $\{\bar{x} : x \in X\}$  eine Basis von  $\overline{F_X}$  ist. Also folgt  $|X| = \dim \overline{F_X} = \dim \overline{F_Y} = |Y|$ .<sup>5</sup>

- (ii) Folgt wie in (iii) (es wird nur die universelle Eigenschaft benutzt). □

---

<sup>5</sup>benötigt das Auswahlaxiom, falls  $|X| = \infty$

**Definition 1.6.** Ist  $F$  frei bzgl.  $X$ , so nennt man  $\text{rk } F := |X|$  den *Rang* von  $F$ . Nach Satz 1.5 gibt es bis auf Isomorphie nur eine freie Gruppe vom Rang  $r \in \mathbb{N}$ . Diese bezeichnen wir mit  $F_r$ .

**Lemma 1.7** (vgl. GT-Aufgabe 53). *Jedes Wort  $w \in W$  ist zu genau einem reduzierten Wort  $\tilde{w} \in W$  äquivalent.*

*Beweis* (VAN DER WAERDEN). Wir wissen bereits, dass  $w$  zu mindestens einem reduzierten Wort äquivalent ist. Für die Eindeutigkeit sei  $R \subseteq W$  die Menge aller reduzierten Wörter. Für  $r = x_1^{\epsilon_1} \dots x_n^{\epsilon_n} \in R$  und  $x \in X$  sei

$$x_r := \begin{cases} xx_1^{\epsilon_1} \dots x_n^{\epsilon_n} & \text{falls } x \neq x_1^{-\epsilon_1}, \\ x_2^{\epsilon_2} \dots x_n^{\epsilon_n} & \text{falls } x = x_1^{-\epsilon_1}. \end{cases}$$

Offenbar induziert  $x$  eine Permutation  $\sigma(x) \in \text{Sym}(R)$  mit Umkehrabbildung  $\sigma(x^{-1})$ . Nach der universellen Eigenschaft setzt sich  $\sigma$  zu einer Operation  $F_X \rightarrow \text{Sym}(R)$  fort. Für äquivalente reduzierte Wörter  $v, w \in R$  gilt

$$v = [v]_1 = [w]_1 = w. \quad \square$$

**Bemerkung 1.8.**

- (i) Für  $r \geq 2$  ist  $F_r$  nicht-abelsch, denn  $xyx^{-1}y^{-1} \neq 1$  ist reduziert für  $x \neq y$ .
- (ii) Sei  $w = x_1^{\epsilon_1} \dots x_n^{\epsilon_n} \in W$  reduziert mit endlicher Ordnung  $k$  in  $F_X$ . Indem man notfalls mit  $x_1^{-\epsilon_1}$  konjugiert, kann man  $x_1^{\epsilon_1} \neq x_n^{-\epsilon_n}$  annehmen. Dann ist auch  $w^k$  reduziert und es folgt  $w = 1$ . Also ist  $F_r$  torsionsfrei.

**Folgerung 1.9.** *Ist  $F$  frei bzgl.  $X \subseteq F$ , so lässt sich jedes Element von  $F$  eindeutig in der Form  $x_1^{a_1} \dots x_n^{a_n}$  schreiben, wobei  $n \in \mathbb{N}_0$ ,  $x_1, \dots, x_n \in X$  mit  $x_i \neq x_{i+1}$  für  $i = 1, \dots, n-1$  und  $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{Z} \setminus \{0\}$ . Insbesondere ist  $F = \langle X \rangle$ .*

*Beweis.* O.B.d.A. sei  $F = F_X$ . Jedes Element lässt sich nach Lemma 1.7 eindeutig in reduzierter Form schreiben. Indem man gleiche Buchstaben zusammenfasst, erhält man eine Darstellung in der gewünschten Form.  $\square$

**Bemerkung 1.10.** Nach Cayley ist jede Gruppe zu einer Untergruppe einer symmetrischen Gruppe isomorph. Die freien Gruppen besitzen eine duale Eigenschaft.

**Satz 1.11.** *Jede Gruppe  $G$  ist zu einer Faktorgruppe einer freien Gruppe  $F$  isomorph. Lässt sich  $G$  durch  $n$  Elemente erzeugen, so kann man  $\text{rk } F = n$  wählen.*

*Beweis.* Sei  $X$  ein Erzeugendensystem von  $G$  (notfalls  $X = G$ ). Dann lässt sich die Inklusion  $X \rightarrow G$  zu einem Epimorphismus  $F_X \rightarrow G$  fortsetzen. Die Behauptung folgt aus dem Homomorphiesatz.  $\square$

**Beispiel 1.12.** Sei

$$a := \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad b := \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}.$$

Wir zeigen, dass  $G := \langle a, b \rangle \leq \text{GL}(2, \mathbb{Q})$  frei bzgl.  $\{a, b\}$  ist. Sei dafür  $X = \{x, y\}$  und  $\varphi : F_X \rightarrow G$  der Epimorphismus mit  $\varphi(x) = a$  und  $\varphi(y) = b$ . Angenommen es gibt ein nicht-triviales reduziertes Wort

$w := z_1^{k_1} \dots z_n^{k_n} \in \text{Ker}(\varphi)$  mit  $z_1, \dots, z_n \in X$  und  $k_1, \dots, k_n \in \mathbb{Z} \setminus \{0\}$ . Nach Konjugation können wir  $z_n = x$  und  $k_n > 0$  annehmen. Dann gilt  $1 = \varphi(w) = \dots a^{k_{n-2}} b^{k_{n-1}} a^{k_n}$ . Für  $k \in \mathbb{Z}$  gilt

$$a^k := \begin{pmatrix} 1 & 2k \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad b^k := \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 2k & 1 \end{pmatrix}$$

(Induktion nach  $k$ ). Sei

$$V_{>} := \{(s, t) \in \mathbb{Q}^2 : |s| > |t|\}, \quad V_{<} := \{(s, t) \in \mathbb{Q}^2 : |s| < |t|\}.$$

Für  $v := (1, 1) \in \mathbb{Q}^2$  gilt  $a^{k_n} v = (2k_n + 1, 1) \in V_{>}$  wegen  $k_n > 0$ . Für  $v = (s, t) \in V_{>}$  gilt  $b^{k_{n-1}} v = (s, 2k_{n-1}s + t) \in V_{<}$ , denn  $|2k_{n-1}s + t| \geq 2|k_{n-1}||s| - |t| > |s|$  (Dreiecksungleichung) wegen  $k_{n-1} \neq 0$ . Analog gilt  $a^{k_{n-2}} v \in V_{>}$  für  $v \in V_{<}$  usw.<sup>6</sup> Dies ergibt den Widerspruch

$$(1, 1) = \varphi(w)(1, 1) = \dots a^{k_{n-2}} b^{k_{n-1}} a^{k_n}(1, 1) \in V_{>} \cup V_{<}.$$

Also ist  $\varphi$  injektiv und  $G \cong F_X \cong F_2$ .

### Bemerkung 1.13.

- (i) Sei  $X$  ein Erzeugendensystem für  $G$  und  $\sigma : F_X \rightarrow G$  mit  $\sigma(x) = x$  wie in Satz 1.11. Die Elemente in  $\text{Ker}(\sigma)$  nennt man *Relatoren* für  $G$  bzgl.  $X$ . Für  $x_1^{\epsilon_1} \dots x_n^{\epsilon_n} \in \text{Ker}(\sigma)$  gilt also  $x_1^{\epsilon_1} \dots x_n^{\epsilon_n} = 1$  in  $G$ . Eine Gleichung dieser Form heißt *Relation* für  $G$  bzgl.  $X$ .
- (ii) Sei umgekehrt  $R \subseteq F_X$ . Sei  $N := \langle R \rangle^{F_X} := \langle gRg^{-1} : g \in F_X \rangle \trianglelefteq F_X$  der normale Abschluss von  $R$  in  $F_X$ . Wir setzen

$$G := \langle X \mid R \rangle = \langle X \mid \{r = 1 : r \in R\} \rangle := F_X / N.$$

Man identifiziert Buchstaben  $x \in X$  oft mit ihren Nebenklassen  $xN \in G$  (im Allgemeinen nicht injektiv!). Ist  $|X| + |R| < \infty$ , so nennt man  $G$  *endlich präsentiert*. Auf diese Weise lässt sich jede Gruppe durch Erzeuger und Relationen beschreiben (dies entspricht der Aussage, dass jeder Vektorraum die Lösungsmenge eines linearen Gleichungssystems ist). Im Allgemeinen ist es jedoch schwierig die Eigenschaften von  $G$  aus  $X$  und  $R$  abzulesen.

### Beispiel 1.14.

- (i)  $\langle X \mid \emptyset \rangle \cong F_X$ .
- (ii)  $\langle x \mid x^n \rangle = \langle x \mid x^n = 1 \rangle \cong \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \cong C_n$ .
- (iii) Jede endliche Gruppe  $G$  ist endlich präsentiert: Sei  $X := \{x_g : g \in G\}$ ,  $R := \{x_g x_h x_{gh}^{-1} : g, h \in G\}$  und  $N := \langle R \rangle^{F_X}$ . Dann existiert ein Epimorphismus  $\varphi : F_X \rightarrow G$  mit  $\varphi(x_g) = g$  und  $R \subseteq \text{Ker}(\varphi)$ . Wegen  $\text{Ker}(\varphi) \trianglelefteq F_X$  ist auch  $N \subseteq \text{Ker}(\varphi)$ . Sei umgekehrt  $w := x_{g_1}^{\epsilon_1} \dots x_{g_n}^{\epsilon_n} \in \text{Ker}(\varphi)$ . Wegen  $x_1 = x_1 x_1 x_1^{-1} \in R$  und  $x_g x_{g^{-1}} x_1^{-1} \in R$  ist  $x_g x_{g^{-1}} \in \langle R \rangle$  und  $x_g^{-1} \equiv x_{g^{-1}} \pmod{N}$ . Es folgt

$$w \equiv x_{g_1}^{\epsilon_1} \dots x_{g_n}^{\epsilon_n} \equiv x_{g_1}^{\epsilon_1} x_{g_2}^{\epsilon_2} x_{g_3}^{\epsilon_3} \dots \equiv x_{g_1}^{\epsilon_1} \dots g_n^{\epsilon_n} \equiv x_1 \equiv 1 \pmod{N}.$$

Also ist  $\text{Ker}(\varphi) \subseteq N$  und  $G = \langle X \mid R \rangle$ .

**Satz 1.15 (VON DYCK).** Seien  $G = \langle x_i : i \in I \rangle$  und  $H = \langle y_i : i \in I \rangle$  Gruppen, sodass für jede Relation  $x_{i_1}^{\epsilon_1} \dots x_{i_n}^{\epsilon_n} = 1$  in  $G$  auch die Relation  $y_{i_1}^{\epsilon_1} \dots y_{i_n}^{\epsilon_n} = 1$  in  $H$  gilt. Dann existiert ein Epimorphismus  $G \rightarrow H$  mit  $f(x_i) = y_i$  für  $i \in I$ .

<sup>6</sup>Das Argument nennt sich *Ping-Pong-Lemma*.

*Beweis.* Nach der universellen Eigenschaft existieren Epimorphismen  $f_G : F_I \rightarrow G$  und  $f_H : F_I \rightarrow H$  mit  $f_G(i) = x_i$  und  $f_H(i) = y_i$  für  $i \in I$ . Nach Voraussetzung gilt  $\text{Ker}(f_G) \leq \text{Ker}(f_H)$ . Also ist

$$G \cong F_I / \text{Ker}(f_G) \rightarrow (F_I / \text{Ker}(f_G)) / (\text{Ker}(f_H) / \text{Ker}(f_G)) \cong F_I / \text{Ker}(f_H) \cong H$$

der gesuchte Epimorphismus. □

**Bemerkung 1.16.** Man kann den Satz von von-Dyck benutzen, um undurchsichtige Gruppenpräsentationen durch bekannte Gruppen zu approximieren.

**Beispiel 1.17.**

- (i) Sei  $G := \langle x_1, \dots, x_n \mid [x_i, x_j] = 1 \ \forall i, j \rangle$ . Offenbar ist  $G$  abelsch und jedes Element in  $G$  hat die Form  $x_1^{a_1} \dots x_n^{a_n}$  mit  $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{Z}$ . Sei nun  $H := \langle y_1 \rangle \oplus \dots \oplus \langle y_n \rangle \cong C_\infty^n$ . Nach Satz 1.15 existiert ein Epimorphismus  $f : G \rightarrow H$  mit  $f(x_i) = y_i$  für  $i = 1, \dots, n$ . Offenbar ist  $f$  auch injektiv und  $G \cong H \cong C_\infty^n$ . Dies zeigt auch  $F_n / F'_n \cong C_\infty^n$ .
- (ii) Sei  $G = \langle x, y \rangle$  mit  $x \neq y$  und  $|\langle x \rangle| = |\langle y \rangle| = 2$ . Dann besteht  $G$  aus den Elementen der Form  $xyxy \dots$  und  $xyxy \dots$ . Ist  $G$  endlich, so gilt  $n := |\langle xy \rangle| \in \mathbb{N}$  und jedes Element hat die Form  $x^i(xy)^j$  mit  $0 \leq i \leq 1$  und  $0 \leq j \leq n-1$ . Dann folgt

$$G \cong D_{2n} := \langle \sigma, \tau \mid \sigma^n = \tau^2 = 1, \tau\sigma\tau = \sigma^{-1} \rangle,$$

wobei  $D_4 = C_2^2$ .

**Bemerkung 1.18 (GAP).**

```
F:=FreeGroup("x","y");; #das doppelte Semikolon überdrückt die Ausgabe
AssignGeneratorVariables(F);;
G:=F/[x^2,y^3,(x*y)^5];; #endlich präsentierte Gruppe
Size(G);
H:=Image(IsomorphismPermGroup(G));; #isomorphe Permutationsgruppe (effizienter)
StructureDescription(H);

#Der umgekehrte Weg:
G:=Image(IsomorphismFpGroup(H));; #isomorphe endlich präsentierte Gruppe
RelatorsOfFpGroup(G); #neue Relationen

#Rechnen in der freien Gruppe:
x:=(1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11);; y:=(3,7,11,8)(4,10,5,6);; #Permutationen von S11
G:=Group(x,y);;
epi:=GroupHomomorphismByImages(F,G,GeneratorsOfGroup(F),[x,y]);
z:=Random(G);
PreImagesRepresentative(epi,z); #Darstellung von z als Wort in x,y
```

**Satz 1.19 (NEUMANN).** Sei  $G$  endlich präsentiert und  $X$  ein beliebiges Erzeugendensystem von  $G$ . Dann existiert eine endliche Präsentation  $G = \langle X_0 \mid R \rangle$  mit  $X_0 \subseteq X$ .

*Beweis.* Sei  $G = \langle y_1, \dots, y_n \mid s_1, \dots, s_m \rangle$  eine endliche Präsentation. Jedes  $y_i$  lässt sich durch endlich viele  $x \in X$  ausdrücken, sagen wir  $y_i = w_i(x)$ . Daher existiert eine endliche Teilmenge  $X_0 = \{x_1, \dots, x_k\} \subseteq X$  mit  $G = \langle X_0 \rangle$ . Umgekehrt lassen sich die  $x_i$  durch  $y_j$  ausdrücken, sagen wir  $x_i = v_i(y)$ . Man erhält folgende Relationen in  $X_0$ :

$$s_i(w_1(x), \dots, w_n(x)) = 1, \quad x_i = v_i(w_1(x), \dots, w_n(x)).$$

Sei  $R$  die Menge dieser Relatoren und  $H := \langle X_0 \mid R \rangle$ . Nach von-Dyck existiert ein Epimorphismus  $\varphi : H \rightarrow G$  mit  $\varphi(x_i) = x_i$  für  $i = 1, \dots, k$ . Man kann nun  $y_i := w_i(x)$  in  $H$  definieren. Wegen  $x_i = v_i(y_1, \dots, y_n)$  ist dann  $H = \langle y_1, \dots, y_n \rangle$ . Da die Relationen in  $s_i$  auch in  $H$  gelten, existiert ein Epimorphismus  $\psi : G \rightarrow H$  mit  $\psi(y_i) = y_i$  für  $i = 1, \dots, n$ . Wegen

$$\begin{aligned}\psi(\varphi(x_i)) &= \psi(x_i) = \psi(v_i(y)) = v_i(y) = x_i, \\ \varphi(\psi(y_i)) &= \varphi(y_i) = \varphi(w_i(x)) = w_i(x) = y_i\end{aligned}$$

sind  $\varphi$  und  $\psi$  zueinander inverse Isomorphismen.  $\square$

**Satz 1.20** (HALL). *Sei  $N \trianglelefteq G$ . Sind  $N$  und  $G/N$  endlich präsentiert, so auch  $G$ .*

*Beweis.* Sei  $N = \langle x_1, \dots, x_n \mid r_1, \dots, r_m \rangle$  und  $G/N = \langle y_1N, \dots, y_kN \mid s_1, \dots, s_l \rangle$ . Sicher ist  $G = \langle x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_k \rangle$ . Wegen  $s_i(y) \in N$  gelten Relationen  $s_i(y) = t_i(x)$ . Die Normalteiler-Eigenschaft lässt sich durch Relationen  $y_i x_j y_i^{-1} = u_{ij}(x)$  und  $y_i^{-1} x_j y_i = v_{ij}(x)$  ausdrücken. Wir definieren

$$H := \langle x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_k \mid r_i, s_i(y)t_i(x)^{-1}, u_{ij}(x)y_i x_j^{-1} y_i^{-1}, v_{ij}(x)y_i^{-1} x_j^{-1} y_i \ \forall i, j \rangle.$$

Dann existiert ein Epimorphismus  $\varphi : H \rightarrow G$  mit  $\varphi(x_i) = x_i$  und  $\varphi(y_j) = y_j$ . Sei  $\tilde{N} := \langle x_1, \dots, x_n \rangle \leq H$ . Die Relationen  $u_{ij}$  und  $v_{ij}$  zeigen  $\tilde{N} \trianglelefteq H$ . Für  $h \in \tilde{N} \cap \text{Ker}(\varphi)$  gilt  $h \in \langle r_1, \dots, r_m \rangle^{F_X}$ . Dies zeigt  $h = 1$  und  $\tilde{N} \cap \text{Ker}(\varphi) = 1$ . Offenbar induziert  $\varphi$  einen Epimorphismus  $\bar{\varphi} : H/\tilde{N} \rightarrow G/N$  mit  $\bar{\varphi}(y_i \tilde{N}) = y_i N$ . Die Relationen  $r_i, t_i, u_{ij}$  und  $v_{ij}$  werden in  $H/\tilde{N}$  trivial. Also erfüllen  $H/\tilde{N}$  und  $G/N$  die gleichen Relationen ( $s_i(y) = 0$ ) und  $\bar{\varphi}$  ist ein Isomorphismus. Für  $h \in \text{Ker}(\varphi)$  gilt  $h\tilde{N} \in \text{Ker}(\bar{\varphi}) = 1$ , also  $h \in \tilde{N} \cap \text{Ker}(\varphi) = 1$ . Also ist  $\varphi$  ein Isomorphismus.  $\square$

**Satz 1.21.** *Sei  $G = \langle X \mid R \rangle$  mit  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$  und  $R = \{r_1, \dots, r_k\}$ . Für  $i = 1, \dots, n$  sei  $r_i \equiv x_1^{a_{i1}} \dots x_n^{a_{in}} \pmod{F'_X}$ . Seien  $d_1 \mid \dots \mid d_l$  die Elementarteiler von  $A = (a_{ij}) \in \mathbb{Z}^{n \times k}$ , wobei  $l := \min\{n, k\}$ . Dann ist  $G/G' \cong \mathbb{Z}/d_1\mathbb{Z} \times \dots \times \mathbb{Z}/d_l\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}^{n-l}$ . Insbesondere ist  $|G| = |G/G'| = \infty$ , falls  $k < n$ .*

*Beweis.* Sei  $F := F_X$ . Nach Beispiel 1.17 ist  $F/F'$  eine freie abelsche Gruppe vom Rang  $n$ . Für  $N := \langle rF' : r \in R \rangle \leq F/F'$  gilt nun  $G/G' \cong (F/F')/(F/N) \cong \mathbb{Z}/d_1\mathbb{Z} \times \dots \times \mathbb{Z}/d_s\mathbb{Z}$  (siehe Satz 24.21 in Algebra-Skript).  $\square$

**Bemerkung 1.22.**

- (i) Nach Satz 1.21 kann man algorithmisch entscheiden, ob eine Gruppe endlich präsentierte Gruppe perfekt ist (dennoch weiß man nicht, ob die Gruppe trivial ist).
- (ii) Es sind nur wenige *endliche* Gruppen  $G = \langle X \mid R \rangle$  mit  $|X| = |R|$  bekannt (zum Beispiel  $Q_{2^n}$  nach Aufgabe 2).<sup>7</sup> Man vermutet sogar, dass sich jede solche Gruppe mit drei Elementen erzeugen lässt. Dies wurde für  $p$ -Gruppen bewiesen.

**Beispiel 1.23.** Sei  $G = \langle x, y \mid x^2 = y^3 = (xy)^7 = 1 \rangle$ . Dann erhält man die Matrix

$$A = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 3 \\ 7 & 7 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 0 \\ 0 & 3 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & -2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

<sup>7</sup>Man spricht von einer *balancierten* Präsentation.



Also ist  $G = G'$  perfekt. Man kann nachrechnen, dass die Matrizen

$$x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad y = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

in  $GL(3, 2)$  die Relationen erfüllen. Also gilt  $G \neq 1$ . Wir werden in Satz 8.50 zeigen, dass  $G$  unendlich ist.

**Lemma 1.24.** *Sei  $N$  der normale Abschluss von  $Y \subseteq X$  in  $F_X$ . Dann ist  $F_X/N$  frei bzgl.  $X \setminus Y$ .*

*Beweis.* O.B.d.A. sei  $\emptyset \neq Y \subset X$ . Jedes Element von  $N$  ist ein Produkt von Elementen der Form  $gwg^{-1}$  mit  $w \in \langle Y \rangle$  und  $g \in F_X$ . Die Summe der Exponenten eines Buchstaben  $x \in X \setminus Y$  in  $gwg^{-1}$  ist 0, denn  $x$  kann nur in  $g$  und  $g^{-1}$  auftreten. Dies zeigt, dass die Abbildung  $\sigma : X \setminus Y \rightarrow F/N$ ,  $x \mapsto xN$  injektiv ist. Wir zeigen, dass  $F_X/N$  frei bezüglich  $\sigma(X \setminus Y)$  ist. Sei  $G$  eine beliebige Gruppe und  $\alpha : X \setminus Y \rightarrow G$  eine Funktion. Setzt man

$$\bar{\alpha}(x) := \begin{cases} 1 & \text{falls } x \in Y \\ \alpha(x) & \text{falls } x \notin Y \end{cases}$$

für  $x \in X$ , so erhält man eine Fortsetzung  $\bar{\alpha} : X \rightarrow G$  von  $\alpha$ . Da  $F$  frei bzgl.  $X$  ist, gibt es einen Homomorphismus  $\bar{\beta} : F \rightarrow G$  mit  $\bar{\beta}(x) = \bar{\alpha}(x)$  für alle  $x \in X$ . Offenbar ist dann  $N \leq \text{Ker}(\bar{\beta})$ . Daher gibt es einen Homomorphismus  $\beta : F/N \rightarrow (F/N)/(\text{Ker}(\bar{\beta})/N) \rightarrow F/\text{Ker}(\bar{\beta}) \rightarrow G$  mit  $\beta(\sigma(x)) = \alpha(x)$  für alle  $x \in X \setminus Y$ . Sei nun  $\beta' : F/N \rightarrow G$  ein weiterer Homomorphismus mit  $\beta'(\sigma(x)) = \alpha(x)$  für alle  $x \in X \setminus Y$ . Wegen

$$F/N = \langle xN : x \in X \rangle = \langle xN : x \in X \setminus Y \rangle = \langle \sigma(x) : x \in X \setminus Y \rangle$$

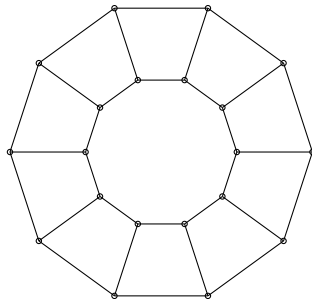
folgt dann sofort  $\beta = \beta'$ . □

**Bemerkung 1.25.**

- (i) Der *Cayley-Graph*  $\Omega(G, X)$  einer endlich erzeugten Gruppe  $G = \langle X \mid R \rangle$  ist ein Graph mit Eckenmenge  $G$ , sodass  $g, h \in G$  genau dann eine Kante bilden, wenn  $g^{-1}h \in X \cup X^{-1}$  (durch  $g^{-1}h \in X$  erhält man einen gerichteten Graphen). Offenbar hängt  $\Omega(G, X)$  von  $X$  ab. Um Schleifen zu vermeiden, setzen wir  $1 \notin X$  voraus. In jeden Fall ist  $\Omega(G, X)$  zusammenhängend und regulär (d. h. alle Ecken haben die gleiche Anzahl an Kanten).
- (ii) Ein Kreis in  $\Omega(G, X)$  entspricht einem reduzierten Wort  $x_1^{\epsilon_1} \dots x_n^{\epsilon_n} = 1$ . Daher ist  $\Omega(G, X)$  genau dann ein Baum (d. h. kreisfrei), wenn  $G$  bzgl.  $X$  frei ist.
- (iii) Die Gruppe  $G$  permutiert durch Linksmultiplikation die Ecken und Kanten von  $\Omega(G, X)$ . Daher ist  $G$  eine Untergruppe von  $\text{Aut}(\Omega(G, X))$ . Auf dieser Grundlage lässt sich zeigen, dass jede endliche Gruppe die Automorphismengruppe eines Graphen ist (Satz von FRUCHT).
- (iv) Nach dem Satz von Euler-Hierholzer, ist  $\Omega(G, X)$  genau dann eulersch, wenn  $|X \cup X^{-1}|$  gerade ist. Das bedeutet es gibt einen geschlossenen Weg, der jede Kante von  $\Omega(G, X)$  genau einmal besucht. Die offene Lovász-Vermutung besagt, dass  $\Omega(G, X)$  für  $2 < |G| < \infty$  hamiltonsch ist. Das bedeutet es gibt einen geschlossenen Weg, der jede Ecke von  $\Omega(G, X)$  genau einmal besucht.
- (v) Ist  $G$  endlich, so lassen sich die Eigenwerte der Adjazenzmatrix von  $\Omega(G, X)$  untersuchen. Man kann zeigen, dass sie in enger Verbindung zu den Werten der komplexen irreduziblen Charaktere von  $G$  stehen.

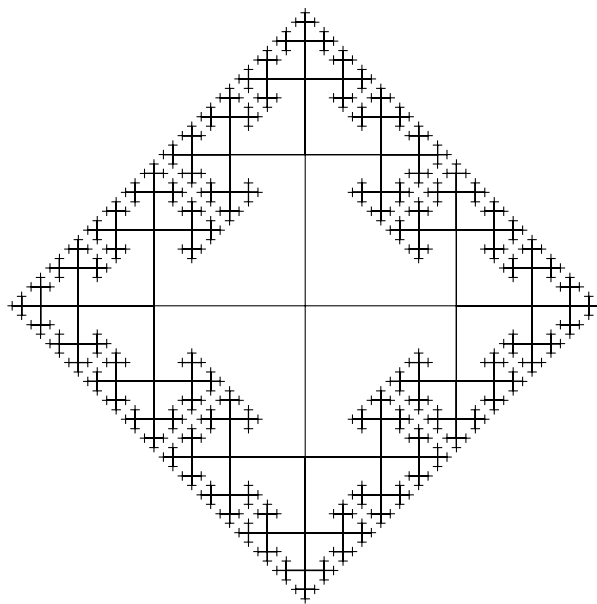
**Beispiel 1.26.**

- (i) Der Cayley-Graph von  $G = \langle x \mid x^n \rangle$  bzgl.  $X = \{x\}$  ist ein  $n$ -Eck. Wählt man  $X = G$ , so erhält man den vollständigen Graphen mit  $n$  Ecken.
- (ii) Sei  $G = D_{2n}$  erzeugt von zwei Spiegelungen  $X = \{x, y\}$ . Dann ist  $\Omega(G, X)$  eine  $2n$ -Eck genau wie für  $C_{2n}$ . Der Cayley-Graph bestimmt also nicht, ob  $G$  abelsch ist. Wählt man hingegen  $X = \{x, z\}$  mit einer Drehung  $z$  um  $360^\circ/n$ , so erhält man (mit  $n = 10$ ):



Die beiden Kreise entsprechen den Nebenklassen  $\langle z \rangle$  und  $x\langle z \rangle$ .

- (iii) Der Cayley-Graph von  $F_2$  lässt sich (näherungsweise) als Fraktal zeichnen:



Interaktive Beispiele findet man unter <https://juliapoo.github.io/Cayley-Graph-Plotting/>.

- (iv) Sei  $G = \langle X \rangle$  die Gruppe des  $3 \times 3 \times 3$ -Zauberwürfel (Rubik's Cube) und  $X$  die Menge der  $90^\circ$ - und  $180^\circ$ -Drehungen der sechs Seitenflächen. Dann ist *God's Number* (20) der Durchmesser von  $\Omega(G, X)$ , also die maximale Länge eines kreisfreien Wegs (siehe Weihnachtsvorlesung Gruppentheorie).

**Bemerkung 1.27 (GAP).**

```
LoadPackage("grape",false);
G:=AlternatingGroup(5);;
Y:=[(1,2,3),(3,4,5)];; #X ist schreibgeschützt
C:=CayleyGraph(G,Y); #ersetzt Y durch Y ∪ Y-1
Diameter(C);
```

```

LoadPackage("hap",false); #lädt weitere Pakete
G:=DihedralGroup(22);;
Y:=GeneratorsOfGroup(G);
CayleyGraphOfGroupDisplay(G,Y,"chromium"); #im Browser chromium ausgeben, benötigt GraphViz

```

## 2 Untergruppen freier Gruppen

**Bemerkung 2.1.** Wir wissen bereits, dass jede Gruppe eine Untergruppe (bzw. Faktorgruppe) einer symmetrischen (bzw. freien) Gruppe ist. Die Faktorgruppen einer endlichen symmetrischen Gruppe sind selbst symmetrisch (da  $A_n$  für  $n \geq 5$  einfach ist). Wir zeigen dual dazu, dass die Untergruppen einer freien Gruppe selbst frei sind. Wir starten mit einer Variation der universellen Eigenschaft.

**Lemma 2.2** (STEINBERG). *Eine Gruppe  $F$  ist genau dann frei bzgl.  $X \subseteq F$ , falls für jede nicht-leere Menge  $\Omega$  und jede Abbildung  $\sigma : X \rightarrow \text{Sym}(\Omega)$  genau eine Operation  $F \rightarrow \text{Sym}(\Omega)$  mit  ${}^x\omega = \sigma(x)(\omega)$  für alle  $x \in X$  und  $\omega \in \Omega$  existiert.*

*Beweis.* Ist  $F$  frei bzgl.  $X$ , so lässt sich  $\sigma$  nach der universellen Eigenschaft zu einer Operation mit der angegebenen Eigenschaft fortsetzen. Für die Umkehrung zeigen wir zunächst  $F = \langle X \rangle$ . Die Abbildung  $\sigma : X \rightarrow \text{Sym}(\langle X \rangle)$  durch Linksmultiplikation (d. h.  $\sigma(x)(y) = xy$ ) lässt sich zu einer Operation  $\rho : F \rightarrow \text{Sym}(\langle X \rangle)$  fortsetzen. Man kann aber auch  $\sigma : X \rightarrow \text{Sym}(F)$  betrachten und erhält wegen der Eindeutigkeit genau die gleiche Fortsetzung  $\rho : F \rightarrow \text{Sym}(F)$ . Da die Operation durch Linksmultiplikation transitiv ist, gilt  $\langle X \rangle = F$ .

Seien nun eine Gruppe  $G$  und eine Abbildung  $\sigma : X \rightarrow G$  gegeben. Sei  $\tau : G \rightarrow \text{Sym}(G)$  der Monomorphismus aus dem Satz von Cayley. Nach Voraussetzung existiert genau eine Operation  $\rho : F \rightarrow \text{Sym}(G)$  mit  $\rho(x) = \tau(\sigma(x))$  für alle  $x \in X$ . Dabei gilt  $\rho(F) = \rho(\langle X \rangle) \leq \tau(G)$ . Offenbar ist  $\tau^{-1}\rho : F \rightarrow G$  ein Homomorphismus, der  $\sigma$  fortsetzt. Ist auch  $\gamma : F \rightarrow G$  eine Fortsetzung von  $\sigma$ , so ist  $\tau\gamma = \rho$  nach Voraussetzung. Dies zeigt  $\gamma = \tau^{-1}\rho$ .  $\square$

**Definition 2.3.** Sei  $F$  frei bzgl.  $X \subseteq F$  und  $G \leq F$ . Eine *Schreier-Transversale* für  $G$  ist ein Repräsentantensystem  $S$  für  $F/G$  mit folgender Eigenschaft: Ist  $x^\epsilon s \in S$  reduziert mit  $x \in X$  und  $\epsilon = \pm 1$ , so ist auch  $s \in S$ .

**Lemma 2.4.** *Jede Untergruppe einer freien Gruppe besitzt eine Schreier-Transversale.*

*Beweis.* Sei  $F$  frei bzgl.  $X \subseteq F$  und  $G \leq F$ . Die *Länge* einer Nebenklasse  $aG$  sei die minimale Länge eines reduzierten Worts in  $aG$ . Wir konstruieren eine Schreier-Transversale  $S$  von  $G$  durch Induktion nach der Länge der Nebenklassen. Offenbar ist  $1G$  die einzige Nebenklasse mit Länge 0. Sei also  $1 \in S$ . Sei nun  $aG$  mit Länge  $l \geq 1$ . Dabei habe  $a$  Länge  $l$ . Sei  $a = x^\epsilon b$  reduziert mit  $x \in X$  und  $\epsilon = \pm 1$ . Nach Induktion existiert  $s \in S$  mit  $sG = bG$ . Wir wählen  $x^\epsilon s \in S$  als Repräsentanten von  $aG$ . Offenbar entsteht auf diese Weise eine Schreier-Transversale.  $\square$

**Satz 2.5** (NIELSEN-SCHREIER). *Untergruppen von freien Gruppen sind frei.*

*Beweis.* Sei  $F$  frei bzgl.  $X \subseteq F$  und  $G \leq F$ . Sei  $T$  eine Schreier-Transversale von  $G$ . Für  $a \in F$  sei  $\bar{a} \in T$  mit  $aG = \bar{a}G$ . Wir zeigen mit Lemma 2.2, dass  $G$  frei bzgl.

$$Y := \{(\overline{xt})^{-1}xt : (x, t) \in (X, T), xt \neq \overline{xt}\} \subseteq G$$

ist. Sei dafür  $\sigma : Y \rightarrow \text{Sym}(\Omega)$  eine beliebige Abbildung. Wir erweitern  $\sigma$  durch die Vorschrift  $\sigma(1) := \text{id}_\Omega$ . Die Abbildung  $f : X \rightarrow \text{Sym}(\Omega \times T)$  mit  $f(x)(\omega, t) = (\sigma((\overline{xt})^{-1}xt)(\omega), \overline{xt})$  setzt sich zu einer Operation  $\hat{f} : F \rightarrow \text{Sym}(\Omega \times T)$  fort. Wir zeigen, dass die Einschränkung  $\hat{\sigma} : G \rightarrow \text{Sym}(\Omega \times \{1\})$  von  $\hat{f}$  die einzige homomorphe Fortsetzung von  $\sigma$  ist. Wir zeigen zunächst  ${}^t(\omega, 1) = (\omega, t)$  für alle  $t \in T$ . Dies ist klar für  $t = 1$ . Sei also  $t = x^\epsilon s$  reduziert mit  $x \in X$ ,  $\epsilon = \pm 1$ . Da  $T$  eine Schreier-Transversale ist, gilt  $s \in T$ . Durch Induktion nach der Länge von  $t$  können wir  ${}^s(\omega, 1) = (\omega, s)$  annehmen. Im Fall  $\epsilon = 1$  folgt

$${}^t(\omega, 1) = {}^x(\omega, s) = (\sigma((\overline{xs})^{-1}xs)(\omega), t) = (\sigma(1)(\omega), t) = (\omega, t).$$

Sei nun  $\epsilon = -1$ . Dann gilt  ${}^x(\omega, t) = (\sigma((\overline{xt})^{-1}xt)(\omega), xt) = (\omega, s)$  und

$${}^t(\omega, 1) = {}^{x^{-1}s}(\omega, 1) = {}^{x^{-1}}(\omega, s) = (\omega, t).$$

Sei nun  $y := (\overline{xt})^{-1}xt \in Y$  beliebig. Dann gilt

$${}^{xt}(\omega, 1) = {}^x(\omega, t) = (\sigma(y)(\omega), \overline{xt}) = \overline{xt}(\sigma(y)(\omega), 1)$$

und  $\hat{\sigma}(y) = \sigma(y)$ . Also ist  $\hat{\sigma}$  eine Fortsetzung von  $\sigma$ . Sei auch  $\tau : G \rightarrow \text{Sym}(\Omega)$  eine Fortsetzung. Dann ist  $\rho : F \rightarrow \text{Sym}(\Omega \times T)$  mit  $\rho(a)(\omega, t) := (\tau((\overline{at})^{-1}at)(\omega), \overline{at})$  eine Operation, denn für  $a, b \in F$  und  $t \in T$  gilt

$$\begin{aligned} (\rho(a)\rho(b))(\omega, t) &= \rho(a)(\tau((\overline{bt})^{-1}bt)(\omega), \overline{bt}) = (\tau((\overline{abt})^{-1}abt)(\tau((\overline{bt})^{-1}bt)(\omega)), \overline{abt}) \\ &= (\tau((\overline{abt})^{-1}abt)(\omega), \overline{abt}) = \rho(ab)(\omega, t). \end{aligned}$$

Für  $x \in X$  ist

$$\rho(x)(\omega, t) = (\tau((\overline{xt})^{-1}xt)(\omega), \overline{xt}) = (\sigma((\overline{xt})^{-1}xt)(\omega), \overline{xt}) = {}^x(\omega, t).$$

Wegen  $F = \langle X \rangle$  stimmt  $\rho$  also mit der oben definierten Operation überein. Insbesondere ist  $\tau = \hat{\sigma}$ .  $\square$

**Bemerkung 2.6.** Für Vektorräume (oder freie abelsche Gruppen)  $U \leq V$  gilt bekanntlich  $\dim U \leq \dim V$ . Für freie Gruppen ist dies völlig falsch.

**Satz 2.7** (SCHREIERS Formel). *Ist  $F$  frei und  $G \leq F$  mit  $|F : G| < \infty$ , so gilt*

$$\boxed{\text{rk}(G) = |F : G|(\text{rk}(F) - 1) + 1.}$$

*Beweis.* Es genügt die Mächtigkeit der Menge  $Y$  in Satz 2.5 zu bestimmen. Seien  $s, t \in T$  und  $x, y \in X$  mit

$$(\overline{xt})^{-1}xt = (\overline{ys})^{-1}ys \neq 1.$$

Dann ist  $xt, ys \notin T$ . Da  $T$  eine Schreier-Transversale ist, müssen  $xt$  und  $ys$  reduziert sein. Angenommen  $\overline{xt} = xt'$  ist reduziert. Dann folgt  $t' \in T$  mit

$$t'G = x^{-1}xt'G = x^{-1}\overline{xt}G = x^{-1}xtG = tG,$$

also  $t = t'$ . Dies widerspricht der Wahl von  $x$  und  $t$ . Daher beginnt  $\overline{xt}$  nicht mit  $x$ . Folglich kann sich  $x$  nicht aus  $(\overline{xt})^{-1}xt$  kürzen. Analog kürzt sich  $y$  nicht aus  $(\overline{ys})^{-1}ys$ . Da  $xt$  und  $ys$  reduziert sind, muss

$xt$  am Ende von  $ys$  vorkommen (oder  $ys$  am Ende von  $xt$ ). Wäre  $xt$  tatsächlich kürzer als  $ys$ , so würde  $xt$  bereits in  $s$  vorkommen und man erhält den Widerspruch  $xt \in T$ . Also ist  $xt = ys$  und es folgt  $(x, t) = (y, s)$ . Die aufgezählten Elemente von  $Y$  sind also paarweise verschieden.

Sei nun  $t \in T \setminus \{1\}$ . Sei  $t = x^\epsilon s$  in reduzierter Form mit  $x \in X$  und  $\epsilon = \pm 1$ . Da  $T$  eine Schreier-Transversale ist, gilt  $s \in T$ . Im Fall  $\epsilon = 1$  ist  $xs \in T$  und anderenfalls ist  $xt \in T$ . Daher bestimmt jedes  $t \neq 1$  genau ein Paar  $(x', t') \in X \times T$  mit  $x't' \in T$ . Umgekehrt entsteht jedes solche Paar auf diese Weise. Dies liefert

$$|Y| = |X \times T| - |T \setminus \{1\}| = |T|(|X| - 1) + 1 = |F : G|(\text{rk}(F) - 1) + 1. \quad \square$$

**Beispiel 2.8.** Sei  $F_2 = \langle x, y \rangle$  und sei  $N$  der normale Abschluss von  $\{x^2, y^2, (xy)^2\}$  in  $F_2$ . Nach Beispiel 1.17 ist  $F_2/N$  die Kleinsche Vierergruppe. Nach Schreiers Formel ist  $\text{rk } N = 4(2 - 1) + 1 = 5$ . Wir wählen die Schreier-Transversale  $\{1, x, y, xy\}$  von  $N$  in  $F_2$  und berechnen

$$\begin{aligned} (\overline{xx})^{-1}xx &= x^2, & (\overline{xy})^{-1}xy &= y^{-1}x^2y, & (\overline{yy})^{-1}yy &= y^2, \\ (\overline{yx})^{-1}yx &= y^{-1}x^{-1}yx, & (\overline{yxy})^{-1}yxy &= x^{-1}yxy \end{aligned}$$

Also ist  $N$  frei bzgl.  $\{x^2, y^2, y^{-1}x^2y, y^{-1}x^{-1}yx, x^{-1}yxy\}$ .

**Folgerung 2.9.** Die Gruppe  $F_2$  besitzt (freie) Untergruppen von jedem endlichen oder abzählbaren Rang. Für jede abzählbare Gruppe  $G$  existieren  $N \trianglelefteq H \leq F_2$  mit  $G \cong H/N$  (vgl. Satz 9.25).

*Beweis.* Sei  $F_2 = \langle x, y \rangle$ . Dann ist  $G := \langle x \rangle \leq F_2$  mit  $\text{rk } G = 1$  (Schreiers Formel gilt hier nicht wegen  $|F : G| = \infty$ ). Für  $n \in \mathbb{N}$  existiert  $N \trianglelefteq F$  mit  $F/N \cong C_n$  nach Satz 1.11. Schreiers Formel zeigt  $\text{rk } N = n + 1$ . Sei schließlich  $N := F' = [F, F]$ . Nach Beispiel 1.17 ist  $F/N \cong \mathbb{Z}^2$ . Daher bilden die Elemente  $x^a y^b$  mit  $a, b \in \mathbb{Z}$  eine Schreier-Transversale von  $N$  in  $F$ . Die im Beweis von Satz 2.5 konstruierte Menge  $Y$  umfasst die paarweise verschiedenen reduzierten Wörter  $(\overline{yxy^b})^{-1}yxy^b = y^{-b-1}x^{-1}yxy^b$  mit  $b \in \mathbb{Z}$ . Daher ist  $\text{rk } N = \infty$ . Die zweite Aussage folgt aus Satz 1.11.  $\square$

**Bemerkung 2.10.**

(i) Der Beweis von Folgerung 2.9 zeigt, dass nicht jede Untergruppe einer endlich erzeugten Gruppe endlich erzeugt sein muss ( $\text{rk}(F'_2) = \infty$ ).

(ii) 

```
F:=FreeGroup("x","y");;
AssignGeneratorVariables(F);;
H:=Subgroup(F,[x^2,y^3,(x*y)^5]);;
IsFreeGroup(H);
Rank(H); #= 3
FreeGeneratorsOfGroup(H);
Index(F,H); #= ∞
N:=NormalClosure(F,H);;
Index(F,N); #= 60
GeneratorsOfGroup(N);; #Zwischenberechnung
Rank(N);
```

**Satz 2.11.** Ist  $G$  endlich erzeugt und  $H \leq G$  mit  $|G : H| < \infty$ , so ist auch  $H$  endlich erzeugt.

*Beweis.* Sei  $X = X^{-1}$  ein endliches Erzeugendensystem von  $G$  und  $R$  ein Repräsentantensystem für  $G/H$  mit  $1 \in R$ . Für  $x \in X$  und  $r \in R$  existieren  $\alpha(x, r) \in H$  und  $\gamma(x, r) \in R$  mit  $xr = \gamma(x, r)\alpha(x, r)$ . Jedes Element in  $H$  hat die Form  $h = x_1 \dots x_n$  mit  $x_1, \dots, x_n \in X$ . Dabei gilt

$$\begin{aligned} h &= x_1 \dots x_n 1 = x_1 \dots x_{n-1} \gamma(x_n, 1) \alpha(x_n, 1) = x_1 \dots x_{n-2} \gamma(x_{n-1}, \gamma(x_n, 1)) \alpha(x_{n-1}, \gamma(x_n, 1)) \alpha(x_n, 1) \\ &= \dots = \gamma(x_1, \dots) \alpha(x_1, \dots) \dots \alpha(x_n, 1). \end{aligned}$$

Wegen  $h \in H$  gilt dabei  $\gamma(x_1, \dots) = 1$ . Es folgt  $H = \langle \alpha(x, r) : x \in X, r \in R \rangle$ .  $\square$

**Bemerkung 2.12.** Der Beweis von Satz 2.11 zeigt, dass man  $H$  mit  $|G : H||X|$  Elementen erzeugen kann. Der nächste Satz gibt eine optimale Abschätzung.

**Satz 2.13** (REIDEMEISTER-SCHREIER). *Sei  $G = \langle X \mid R \rangle$  eine Gruppe und  $H \leq G$ . Dann lässt sich eine Präsentation  $H = \langle Y \mid S \rangle$  aus  $X$  und  $R$  ableiten. Im Fall  $|G : H| < \infty$  gilt  $|Y| \leq |G : H|(|X| - 1) + 1$  und  $|S| \leq |G : H||R|$ .*

*Beweis.* Sei  $F := F_X$  und  $N := \langle R \rangle^F \trianglelefteq F$ . Sei  $\varphi : F \rightarrow G$  der Epimorphismus mit  $\text{Ker}(\varphi) = N$ . Sei  $\tilde{H} = \varphi^{-1}(H) \leq F$ . Dann ist  $|F : \tilde{H}| = |F/N : \tilde{H}/N| = |G : H|$ . Sei  $T$  eine Schreier-Transversale von  $\tilde{H}$  in  $F$ . Wie im Beweis von Satz 2.5 ist  $\tilde{H}$  frei bzgl.

$$Y := \{y_{xt} := (\overline{xt})^{-1}xt : (x, t) \in (X, T), y_{xt} \neq 1\} \subseteq \tilde{H}.$$

Insbesondere ist  $\langle \varphi(Y) \rangle = \varphi(\tilde{H}) = H$ . Sei zusätzlich

$$y_{x^{-1}t} = (\overline{x^{-1}t})^{-1}x^{-1}t = (t^{-1}\overline{xx^{-1}}t)^{-1} = y_{x, x^{-1}t}^{-1}.$$

Für ein reduziertes Wort  $w := x_1^{\epsilon_1} \dots x_n^{\epsilon_n} \in F$  sei

$$\psi(w) := y_{x_n^{\epsilon_n}, x_1^{\epsilon_1} \dots x_{n-1}^{\epsilon_{n-1}}} y_{x_{n-1}^{\epsilon_{n-1}}, x_1^{\epsilon_1} \dots x_{n-2}^{\epsilon_{n-2}}} \dots y_{x_2^{\epsilon_2}, x_1^{\epsilon_1}} y_{x_1^{\epsilon_1}, 1} \in \tilde{H}$$

ein Wort in  $Y$ . Sei  $S := \{\psi(t^{-1}rt) : t \in T, r \in R\}$ . Wir zeigen  $H \cong \langle Y \mid S \rangle$ . Sei dafür  $M := \langle S \rangle^{\tilde{H}} \trianglelefteq \tilde{H}$ . Zunächst verifizieren wir  $\psi(w) = \overline{w}^{-1}w$  für  $w \in F$  durch Induktion nach  $|w|$ . Dies ist klar für  $|w| \leq 1$ . Sei nun  $w = zx^\epsilon$  reduziert. Dann ist

$$\psi(w) = y_{x^\epsilon, \overline{z}} \psi(z) = (\overline{x^\epsilon z})^{-1} x^\epsilon \overline{z} \cdot \overline{z}^{-1} z = \overline{w}^{-1} w.$$

Für  $h \in \tilde{H}$  folgt  $\psi(h) = (\overline{h})^{-1}h = h$ . Insbesondere ist  $\psi(t^{-1}rt) = t^{-1}rt \in N$  für  $r \in R$  und  $t \in T$ . Also gilt  $S \subseteq N$  und  $M \subseteq N$  wegen  $N \trianglelefteq \tilde{H}$ . Für die umgekehrte Inklusion genügt es  $g^{-1}rg \in M$  für  $g \in F$  und  $r \in R$  zu zeigen. Sei  $g = th$  mit  $t \in T$  und  $h \in \tilde{H}$ . Dann ist  $g^{-1}rg = h^{-1}t^{-1}rth = h^{-1}\psi(t^{-1}rt)h \in M$ . Also ist  $H \cong \tilde{H}/N = \tilde{H}/M = \langle Y \mid S \rangle$ .

Die zweite Behauptung folgt aus Schreiers Formel und der Konstruktion von  $S$ .  $\square$

**Bemerkung 2.14** (GAP).

```
G:=SymmetricGroup(6);;
FG:=Image(IsomorphismFpGroup(G));;
FH:=DerivedSubgroup(FG);; #= A6
P:=PresentationSubgroup(FG,FH,"y"); #Präsentation mit Erzeugern y_i
TzPrintPresentation(P); #Statistik über Erzeuger und Relationen
```

**Satz 2.15** (COXETER-TODD-Algorithmus). Sei  $G = \langle X \mid R \rangle$  endlich präsentiert und  $H \leq G$  mit  $|G : H| < \infty$ . Dann existiert ein Algorithmus, der die Operation von  $G$  auf  $G/H$  bestimmt. Insbesondere lässt sich  $|G : H|$  aus einem Erzeugendensystem von  $H$  berechnen.

*Beweisskizze.* Nach Reidemeister-Schreier existiert ein endliches Erzeugendensystem  $Y$  von  $H$ . Sei  $G/H = \{H = H_1, \dots, H_n\}$ . Für  $y = x_1^{\epsilon_1} \dots x_k^{\epsilon_k} \in Y$  sei  $t_y := (t_1, \dots, t_k)$  mit  $x_i^{\epsilon_i} \dots x_k^{\epsilon_k} H = H_{t_i}$  für  $i = 1, \dots, k$ . Wegen  $y \in H$  ist  $t_1 = 1$ . Für  $r = x_1^{\epsilon_1} \dots x_l^{\epsilon_l} \in R$  sei  $T_r = (t_{ij}) \in \mathbb{N}^{n \times l}$  mit  $x_m^{\epsilon_m} \dots x_l^{\epsilon_l} H_i = H_{t_{im}}$  für  $m = 1, \dots, l$ . Wegen  $r = 1$  in  $G$  ist  $t_{i1} = i$  für  $i = 1, \dots, n$ . Wir füllen die Vektoren  $t_y$  ( $y \in Y$ ) und Matrizen  $T_r$  ( $r \in R$ ) von links nach rechts und von oben nach unten, indem wir neue Nebenklassen zuweisen und alle logischen Folgerungen dabei berücksichtigen. Für jede neue Nebenklasse wird eine neue Zeile in  $T_r$  angefügt. Wegen  $|G : H| < \infty$  sind irgendwann alle Einträge in  $t_y$  und  $T_r$  gefüllt. Außerdem kommt jedes  $x \in X$  in einem  $r \in R$  oder in einem Erzeuger von  $H$  vor. Auf diese Weise kann man die Operation von  $G$  auf  $G/H$  ablesen. Da  $G$  transitiv operiert, tauchen wirklich alle Nebenklassen in den Tabellen auf, d. h. man kann  $n = |G : H|$  ablesen.  $\square$

**Beispiel 2.16.** Sei  $G = \langle x, y \mid x^3 = y^5 = (xy)^2 = 1 \rangle$  und  $H := \langle y \rangle$ . Der Vektor  $t_y = (1)$  enthält hier keinerlei Information. Die erste Zeile von  $T_{y^5}$  ist  $(1, 1, 1, 1, 1)$ . Die Festlegung  $H_2 := x^{-1}H_1 = x^2H$  ergibt folgende Einträge in  $T_{x^3}$ ,  $T_{y^5}$  und  $T_{(xy)^2}$ :

$x$	$x$	$x$	$y$	$y$	$y$	$y$	$y$	$y$	$x$	$y$	$x$	$y$
1	2		1	1	1	1	1		1	2		1
2			2						2			

Sei nun  $H_3 := x^{-1}H_2 = xH$ . Dann ist  $x^{-1}H_3 = H_1$  und  $y^4H_2 = y^{-1}x^{-1}H = xyH = H_3$ .

$x$	$x$	$x$	$y$	$y$	$y$	$y$	$y$	$y$	$x$	$y$	$x$	$y$
1	2	3	1	1	1	1	1		1	2	3	1
2	3	1	2	3					2	3		
3	1	2	3						3	1	1	2

Wir definieren weiter  $H_4 := y^{-1}H_3$ ,  $H_5 := x^{-1}H_4$ ,  $H_6 := y^{-1}H_4$ ,  $H_7 := x^{-1}H_5$  usw.

$x$	$x$	$x$	$y$	$y$	$y$	$y$	$y$	$y$	$x$	$y$	$x$	$y$
1	2	3	1	1	1	1	1		1	2	3	1
4	5	7	2	3	4	6	5		2	3	4	5
6	9	8	7	8	10	11	9		5	7	8	6
10	11	12	12	12	12	12	12		6	9	7	4
									9	8	10	11
									11	12	12	10

(redundante Zeilen wurden gestrichen). Man kann nun ablesen  $|G| = |G : H||H| = 12|H| \leq 60$ . In der Tat erfüllen die Permutationen  $x = (1, 2, 3)$  und  $y := (1, 4, 3, 5, 2)$  in  $A_5$  die Relationen. Nach von-Dyck ist  $G \cong \langle (1, 2, 3), (1, 4, 3, 5, 2) \rangle = A_5$ .

**Bemerkung 2.17** (GAP).

```
F:=FreeGroup(2);;
G:=F/[F.1^3,F.2^5,(F.1*F.2)^2];; #F.n ist der n-te Erzeuger
H:=Subgroup(G,[G.2]);;
CT:=CosetTable(G,H);;
Display(TransposedMat(CT)); #nur Spalten F.1^±1 und F.2^±1
f:=FactorCosetAction(G,H); #Operation auf G/H
```

StructureDescription(Image(f)); #entsprechende Permutationsgruppe

G:=F/[F.1^2,F.2^3,(F.1\*F.2)^7];;

CT:=CosetTable(G,TrivialSubgroup(G));; #bricht nach 4096000 Nebenklassen ab (|G| = ∞)

Für kompliziertere Beispiele und bessere grafische Umsetzung kann man die Pakete ACE bzw. ICT (benötigt xgap) benutzen. Auf dem Cover ist die Tabelle für  $A_6 \leq M_{11}$  angegeben.

**Satz 2.18** (MOORE). Für  $n \geq 2$  gilt

$$S_n \cong \langle x_1, \dots, x_{n-1} \mid 1 = x_i^2 = (x_j x_{j+1})^3 = (x_k x_l)^2 \text{ für } k < l - 1 \rangle.$$

*Beweis.* Sei  $G$  die Gruppe auf der rechten Seite. Für  $n = 2$  gilt  $G \cong C_2 \cong S_2$ . Sei also  $n > 2$  und  $H := \langle x_1, \dots, x_{n-2} \rangle \leq G$ . Nach Induktion ist  $H$  eine Faktorgruppe von  $S_{n-1}$ . Insbesondere ist  $|H| \leq (n-1)!$ . Wir zeigen, dass  $G$  folgende Nebenklassen permutiert:

$$H, x_{n-1}H, x_{n-2}x_{n-1}H, \dots, x_1 \dots x_{n-1}H.$$

Sicher ist

$$\begin{aligned} x_i(x_i x_{i+1} \dots x_{n-1}H) &= x_{i+1} \dots x_{n-1}H, \\ x_{i-1}(x_i x_{i+1} \dots x_{n-1}H) &= x_{i-1}x_i \dots x_{n-1}H. \end{aligned}$$

Für  $j < i - 1$  gilt  $x_i x_j = (x_i x_j)^{-1} = x_j x_i$  und

$$x_j(x_i x_{i+1} \dots x_{n-1}H) = x_i x_{i+1} \dots x_{n-1} x_j H = x_i x_{i+1} \dots x_{n-1}H.$$

Sei nun  $j > i$ . Wegen  $(x_{j-1} x_j)^3 = 1$  gilt  $x_{j-1} x_j x_{j-1} = x_j x_{j-1} x_j$ . Es folgt

$$\begin{aligned} x_j(x_i x_{i+1} \dots x_{n-1}H) &= x_i \dots x_{j-2} (x_j x_{j-1} x_j) x_{j+1} \dots x_{n-1}H = x_i \dots x_{j-2} (x_{j-1} x_j x_{j-1}) x_{j+1} \dots x_{n-1}H \\ &= x_i \dots x_{n-1} x_{j-1}H = x_i \dots x_{n-1}H. \end{aligned}$$

Da  $G$  im Allgemeinen transitiv auf  $G/H$  operiert, ist  $|G : H| \leq n$  und  $|G| \leq n!$ .

Umgekehrt erfüllen die Transpositionen  $x'_i := (i, i+1) \in S_n$  für  $i = 1, \dots, n-1$  die gleichen Relationen und wegen  $S_n = \langle x'_1, \dots, x'_{n-1} \rangle$  folgt die Behauptung.  $\square$

**Satz 2.19** (MOORE). Für  $n \geq 2$  gilt

$$A_n \cong \langle x_1, \dots, x_{n-2} \mid 1 = x_1^3 = x_2^2 = \dots = x_{n-2}^2 = (x_i x_{i+1})^3 = (x_k x_l)^2 \text{ für } k < l - 1 \rangle.$$

*Beweis.* Sei wieder  $G$  die rechte Seite. Für  $n \leq 3$  stimmt die Behauptung. Sei  $n \geq 4$  und  $H := \langle x_1, \dots, x_{n-3} \rangle \leq G$ . Nach Induktion ist  $|H| \leq \frac{1}{2}(n-1)!$ . Wir zeigen, dass  $G$  die folgenden  $n$  Nebenklassen permutiert

$$H, x_{n-2}H, x_{n-3}x_{n-2}H, \dots, x_1 \dots x_{n-2}H, x_1^2 x_2 \dots x_{n-2}H.$$

Solange kein  $x_1$  involviert ist, geht dies wie in Satz 2.18. Für  $i \geq 3$  gilt  $x_1 x_i = x_i x_1^{-1}$  und

$$\begin{aligned} x_1 x_i \dots x_{n-2}H &= x_i \dots x_{n-2} x_1^{\pm 1} H = x_i \dots x_{n-2}H, \\ x_i x_1^{\pm 1} x_2 \dots x_{n-2}H &= x_1^{\mp 1} x_i x_2 \dots x_{n-2}H = x_1^{\mp 1} x_2 \dots x_{n-2}H. \end{aligned}$$

Aus  $(x_1 x_2)^3 = 1$  folgt  $x_2 x_1 x_2 = x_1^{-1} x_2 x_1^{-1}$  und

$$x_2 x_1^{\pm 1} \dots x_{n-2}H = x_1^{\mp 1} x_2 x_1^{\mp 1} x_3 \dots x_{n-2}H = x_1^{\mp 1} x_2 \dots x_{n-2}H.$$

Wie in Satz 2.18 erhält man  $|G| \leq n|H| \leq |A_n|$ . Umgekehrt erfüllen die Elemente  $x_1 = (1, 2, 3)$ ,  $x_i = (1, 2)(i+1, i+2)$  ( $i = 2, \dots, n-2$ ) von  $A_n$  die angegebenen Relationen.  $\square$



**Bemerkung 2.20.** GURALNICK-KANTOR-KASSABOV-LUBOTZKY haben gezeigt, dass man alle symmetrischen und alternierenden Gruppen mit zwei Erzeugern und acht Relationen präsentieren kann (oder drei Erzeuger und sieben Relationen<sup>8</sup>).

**Definition 2.21.** Ein reduziertes Wort  $x_1^{\epsilon_1} \dots x_n^{\epsilon_n}$  einer freien Gruppe heißt *zyklisch reduziert*, falls  $x_1^{\epsilon_1} \neq x_n^{-\epsilon_n}$ .

**Bemerkung 2.22.** Für eine Gruppe  $\langle X \mid r \rangle$  mit nur einer Relation kann man nach Konjugation stets annehmen, dass  $r$  zyklisch reduziert ist. Es gilt nun die folgende Verallgemeinerung von Lemma 1.24.

**Satz 2.23** (MAGNUS' Freiheitssatz). *Sei  $G = \langle X \mid r \rangle$ , wobei  $r$  zyklisch reduziert sei. Kommt  $x \in X$  in  $r$  vor, so ist  $\langle X \setminus \{x\} \rangle \leq G$  frei bzgl.  $X \setminus \{x\}$ .*

*Beweis.* Zu schwierig. □

### 3 Automorphismen freier Gruppen

**Definition 3.1.** Seien  $X \subseteq X'$  Alphabete und  $R \subseteq F_X$  mit normalem Abschluss  $N \trianglelefteq F$ . Die Transformationen

- $(X, R) \rightarrow (X, R \cup \{r\})$  mit  $r \in N \setminus R$ ,
- $(X, R) \rightarrow (X \cup \{x\}, R \cup \{x^{-1}w\})$  mit  $x \in X' \setminus X$  und  $w \in F_X$

und ihre Umkehrabbildungen werden *Tietze-Transformationen* genannt.

**Satz 3.2.** *Zwei endlich präsentierte Gruppen  $\langle X_1 \mid R_1 \rangle$  und  $\langle X_2 \mid R_2 \rangle$  sind genau dann isomorph, wenn man  $(X_1, R_1)$  durch endlich viele Tietze-Transformationen in  $(X_2, R_2)$  überführen kann.*

*Beweis.* O.B.d.A. sei  $X_1 \cap X_2 = \emptyset$ . Sei  $F_i := F_{X_i}$  und  $N_i := \langle R_i \rangle^{F_i} \trianglelefteq F_i$ . Für  $r \in N_i$  gilt sicher  $\langle R_i \cup \{r\} \rangle^{F_i} = N_i$  und  $G_i := \langle X_i \mid R_i \rangle \cong \langle X_i \mid R_i \cup \{r\} \rangle$ . Sei nun  $x \in X' \setminus X_i$  und  $w \in F_i$ . Dann existiert ein Epimorphismus  $\varphi : F_{X_i \cup \{x\}} \rightarrow G_i$  mit  $\varphi(x_i) = x_i N_i$  für  $x_i \in X_i$  und  $\varphi(x) = w N_i$ . Offenbar ist

$$N'_i := \langle R_i \cup \{x^{-1}w\} \rangle^{F_{X_i \cup \{x\}}} \subseteq \text{Ker}(\varphi).$$

Sei umgekehrt  $y := y_1^{\epsilon_1} \dots y_n^{\epsilon_n} \in \text{Ker}(\varphi)$  mit  $y_1, \dots, y_n \in X_i \cup \{x\}$ . Sei  $k := |\{1 \leq j \leq n : y_j = x\}|$ . Gilt  $k = 0$ , so ist  $y \in \text{Ker}(\varphi) \cap F_i = N_i \subseteq N'_i$ . Sei nun  $k > 0$ . Um  $y \in N'_i$  zu zeigen, können wir  $y_n^{\epsilon_n} = x$  nach Konjugation annehmen. Es genügt dann  $yx^{-1}w \in N'_i$  zu zeigen, aber das folgt mit Induktion nach  $k$ . Also ist  $\text{Ker}(\varphi) = N'_i$  und  $G_i \cong \langle X_i \cup \{x\} \mid R_i \cup \{x^{-1}w\} \rangle$ . Wenn man  $(X_1 \mid R_1)$  durch Tietze-Transformationen nach  $(X_2 \mid R_2)$  überführen kann, so sind also  $G_1$  und  $G_2$  isomorph (dafür braucht man keine endliche Präsentation).

Sei nun umgekehrt  $G := G_1 \cong G_2$ . Dann existieren Epimorphismen  $\varphi_i : F_i \rightarrow G$  mit Kern  $N_i$  für  $i = 1, 2$ . Sei  $X := X_1 \cup X_2$  und  $F := F_X$ . Dann existiert ein Homomorphismus  $\varphi : F \rightarrow G$ , der  $\varphi_1$  und  $\varphi_2$  fortsetzt. Für  $x \in X_1$  wählen wir  $w_x \in F_2$  mit  $\varphi(x) = \varphi_2(w_x) = \varphi(w_x)$ . Sei  $S_1 := \{s_x := x^{-1}w_x : x \in X_1\} \subseteq F$ . Analog definieren wir  $S_2$ . Durch eine offensichtliche (endliche) Folge von Tietze-Transformationen überführen wir  $(X_1, R_1)$  in  $(X, R_1 \cup S_2)$ . Sicher ist  $N := \langle R_1 \cup S_2 \rangle^F \subseteq \text{Ker}(\varphi)$ . Wie oben zeigt man  $\text{Ker}(\varphi) \subseteq N$ . Insbesondere ist  $R_2 \cup S_1 \subseteq N$ . Man kann also durch

<sup>8</sup>Die Präsentation war fehlerhaft und wurde von HUXFORD korrigiert.

Tietze-Transformationen von  $(X, R_1 \cup S_2)$  nach  $(X, R_1 \cup R_2 \cup S_1 \cup S_2)$  übergehen. Die Situation ist nun symmetrisch. Man kann daher auch von  $(X_2, R_2)$  nach  $(X, R_1 \cup R_2 \cup S_1 \cup S_2)$  übergehen. Die umgekehrten Tietze-Transformationen überführen schließlich  $(X_1, R_1)$  nach  $(X_2, R_2)$ .  $\square$

**Bemerkung 3.3** (GAP). Die Befehle `SimplifyPresentation` (=TzGo), `SimplifiedFpGroup` und `IsomorphismSimplifiedFpGroup` führen stillschweigend Tietze-Transformationen durch, um eine endliche Präsentation  $\langle X \mid R \rangle$  zu vereinfachen, d. h.  $|X|$ ,  $|R|$ , und  $\sum_{r \in R} l(r)$  werden minimiert. Man kann die Transformationen aber auch gezielt anwenden.

```
G:=PerfectGroup(768000,10); #perfekte Gruppe aus Datenbank
H:=Image(IsomorphismFpGroup(G));
P:=PresentationFpGroup(H,2); #Präsentation, print level=2, also mehr Ausgabe
TzGoGo(P); #iteriert Vereinfachungen mit Tietze-Transformation
TzPrintPresentation(P); #5 Erzeuger, 33 Relationen, Gesamtlänge 224
gen:=SmallGeneratingSet(G); #geht auch mit 2 Erzeugern
H:=Image(IsomorphismFpGroupByGenerators(G,gen)); #benutze diese
P:=PresentationFpGroup(H,2);
TzGoGo(P);
TzPrintPresentation(P); #2 Erzeuger, 59 Relationen, Gesamtlänge 3220

gen:=GeneratorsOfPresentation(P);
TzSubstitute(P,gen[1]^2*gen[2]); #führe zweite Tietze-Transformation mit  $w = x^2y$  durch
```

**Definition 3.4.** Sei  $F = F_X$  und  $x, y \in X$  mit  $x \neq y$ . Die Automorphismen

$$\alpha_x : F \rightarrow F, \quad z \mapsto \begin{cases} x^{-1} & \text{falls } z = x \\ z & \text{falls } z \neq x \end{cases},$$

$$\beta_{xy} : F \rightarrow F, \quad z \mapsto \begin{cases} xy & \text{falls } z = x \\ z & \text{falls } z \neq x \end{cases}$$

(wobei  $z \in X$ ) heißen *Nielsen-Transformationen* (man beachte die Analogie zum Gauß-Algorithmus). Sei  $\text{Aut}_N(F) := \langle \alpha_x, \beta_{xy} : x, y \in X, x \neq y \rangle \leq \text{Aut}(F)$ .

**Bemerkung 3.5.** Für verschiedene  $x, y \in X$  gilt

$$\begin{aligned} \alpha_y \beta_{xy} \alpha_x \beta_{yx} \alpha_y \beta_{xy}(x, y) &= \alpha_y \beta_{xy} \alpha_x \beta_{yx} \alpha_y(xy, y) = \alpha_y \beta_{xy} \alpha_x \beta_{yx}(xy^{-1}, y^{-1}) \\ &= \alpha_y \beta_{xy} \alpha_x(y^{-1}, x^{-1}y^{-1}) = \alpha_y \beta_{xy}(y^{-1}, xy^{-1}) = \alpha_y(y^{-1}, x) = (y, x). \end{aligned}$$

Also lässt sich jede Permutation auf  $X$  durch Nielsen-Transformationen realisieren.

**Satz 3.6.** Seien  $w_1, \dots, w_n \in F = F_X$  und  $\gamma \in \text{Aut}(F)$ . Dann existiert ein  $\delta \in \text{Aut}_N(F)$  mit  $\delta(w_i) = \gamma(w_i)$  für  $i = 1, \dots, n$ . Insbesondere ist  $\text{Aut}(F) = \text{Aut}_N(F)$ , falls  $|X| < \infty$ .

*Beweis.* Sei  $Y \subseteq X$  mit  $|Y| < \infty$  und  $w_1, \dots, w_n \in F_Y$ . Es genügt ein  $\delta \in \text{Aut}_N(F)$  mit  $\gamma(y) = \delta(y)$  für alle  $y \in Y$  zu konstruieren. Wegen  $\langle \gamma^{-1}(X) \rangle = F$  existiert eine endliche Teilmenge  $Z \subseteq X$  mit  $Y \subseteq \langle \gamma^{-1}(Z) \rangle$ . Wir können  $Y \subseteq Z = \{x_1, \dots, x_n\}$  annehmen. Sei  $w_i := \gamma^{-1}(x_i)$  reduziert für  $i = 1, \dots, n$ . Angenommen es existieren  $1 \leq i, j \leq n$  mit  $|w_i w_j| < |w_i|$ . Offenbar ist dann  $i \neq j$ . Indem wir  $\gamma$  durch  $\beta_{x_i x_j}^{-1} \gamma$  ersetzen, wird  $w_i$  durch  $w_i w_j$  ersetzt, während sich  $w_k$  für  $k \neq i$  nicht verändert.

Auf diese Weise wird  $\sum_{i=1}^n |w_i|$  kleiner. Im Fall  $|w_i w_j| < |w_j|$  kann man analog die Transformationen  $w_i \mapsto w_j \mapsto w_i w_j$  mittels Bemerkung 3.5 durchführen. Wir können also

$$|w_i w_j| \geq \max\{|w_i|, |w_j|\}$$

für  $1 \leq i, j \leq n$  annehmen. Dies bedeutet, dass sich höchstens die Hälfte von  $w_i$  und  $w_j$  im Produkt  $w_i w_j$  kürzen kann. Nehmen wir nun an, dass  $i, j, k$  existieren mit  $|w_i w_j w_k| \leq |w_i| - |w_j| + |w_k|$ . Sei dabei  $w_i = as^{-1}$ ,  $w_j = sbt^{-1}$  und  $w_k = tc$ , sodass  $w_i w_j = abt^{-1}$  und  $w_j w_k = sbc$  reduziert sind (beachte, dass sich jeweils nur die Hälfte von  $w_j$  links und rechts kürzen kann). Es gilt

$$|a| + |b| + |c| = |w_i w_j w_k| \leq |w_i| - |w_j| + |w_k| = |a| - |b| + |c|,$$

d. h.  $b = 1$  und  $|s| = |t|$ . Wegen  $|w_i| = |a| + |s| = |w_i w_j| \geq |w_j| = 2|s|$  gilt  $|s| \leq \frac{1}{2}|w_i|$  und analog  $|s| \leq \frac{1}{2}|w_k|$ . Wir können nun  $w_i$  durch  $w_i w_j$  ersetzen oder  $w_k$  durch  $w_j w_k$  (tauschen von  $w_j$  und  $w_k$  ist machbar), ohne dass sich  $\sum_{i=1}^n |w_i|$  ändert. Für  $w \in F_Z$  sei  $L(w)$  das linke Teilwort von  $w$  der Länge  $\lfloor (|w| + 1)/2 \rfloor$ . Sei  $\leq$  die lexikographische (Wohl-)Ordnung auf  $F_Z$  mit

$$1 < x_n^{-1} < x_{n-1} < \dots < x_1 < x_2 < \dots < x_n < x_n^{-2} < x_n^{-1} x_{n-1}^{-1} < \dots$$

Wir schreiben  $w \prec v$ , falls  $\min\{L(w), L(w^{-1})\} < \min\{L(v), L(v^{-1})\}$  oder  $(\min\{L(w), L(w^{-1})\} = \min\{L(v), L(v^{-1})\} \text{ und } \max\{L(w), L(w^{-1})\} < \max\{L(v), L(v^{-1})\})$ , wobei das Minimum/Maximum bzgl.  $\leq$  zu bilden ist. Gilt in der obigen Situation  $s < t$ , so ist  $w_j w_k = sc \prec tc = w_k$ , denn  $L(c^{-1}s^{-1}) = L(c^{-1}) = L(c^{-1}t^{-1})$ . Ist  $t < s$ , so folgt  $w_i w_j = at^{-1} \prec as^{-1} = w_i$ . Durch geeignete Nielsen-Transformationen können wir also erreichen, dass die  $w_i$  möglichst klein bzgl.  $\prec$  sind (da  $\leq$  eine Wohlordnung ist, können die  $w_i$  nicht beliebig klein werden). Die Eigenschaft  $|w_i w_j| \geq \max\{|w_i|, |w_j|\}$  bleibt dabei erhalten. Am Ende ist

$$|w_i w_j w_k| > |w_i| - |w_j| + |w_k|$$

für  $1 \leq i, j, k \leq n$ , d. h.  $w_j$  kürzt sich nicht vollständig in  $w_i w_j w_k$ . Das gleiche Verfahren lässt sich allgemeiner mit den Elementen  $w_i^{\pm 1}$  durchführen.

Wegen  $Y \subseteq \langle \gamma^{-1}(Z) \rangle$  lässt sich jedes  $x_i \in Y$  als Produkt der  $w_j$  darstellen, sagen wir  $x_i = w_{j_1}^{\epsilon_1} \dots w_{j_k}^{\epsilon_k}$ . Nach Konstruktion gilt aber  $1 = |x_i| = |w_{j_1}^{\epsilon_1} \dots w_{j_k}^{\epsilon_k}| \geq k$ , d. h.  $x_i = w_{j_1}^{\epsilon_1}$ . Nach weiteren Nielsen-Transformationen wie in Bemerkung 3.5 erreicht man schließlich  $w_i = x_i$  für  $i = 1, \dots, n$ .  $\square$

**Bemerkung 3.7.** NIELSEN hat eine endliche Präsentation von  $\text{Aut}(F_n)$  bzgl. der Nielsen-Transformationen angegeben. NEWMAN hat gezeigt, dass man  $\text{Aut}(F_n)$  mit nur zwei Automorphismen (unendlicher Ordnung) erzeugen kann.

**Bemerkung 3.8 (GAP).** `F:=FreeGroup("x","y");;`

`AssignGeneratorVariables(F);;`

`FreeGroupAutomorphismsGeneratorO(F); #Nielsen-Transformation  $\alpha_x$`

`FreeGroupAutomorphismsGeneratorU(F); # $\beta_{xy}$`

`FreeGroupAutomorphismsGeneratorP(F); # $(x, y) \mapsto (y, x)$`

`A:=AutomorphismGroup(F);; #Aut(F)`

`iso:=IsomorphismFpGroup(A);; #Isomorphismus von A zu einer endlich präsentierten Gruppe`

`a:=GroupHomomorphismByImages(F,F,[x,y],[x^y,x*y]); #a  $\in A$`

`a^iso; #a als Wort in  $\alpha_x, \beta_{xy}$  und  $(x, y) \mapsto (y, x)$`

**Satz 3.9.** Sei  $\Phi : \text{Aut}(F_n) \rightarrow \text{GL}(n, \mathbb{Z})$ , wobei  $\Phi(\alpha)_{ij}$  die Exponentensumme von  $x_j$  in  $\alpha(x_i)$  ist. Dann ist  $\Phi$  ein Epimorphismus.

*Beweis.* Die Abbildung  $\Phi$  entsteht aus der Einschränkung

$$\text{Aut}(F_n) \rightarrow \text{Aut}(F_n/F'_n) \cong \text{Aut}(\mathbb{Z}^n) \cong \text{GL}(n, \mathbb{Z})$$

und ist daher ein wohldefinierter Homomorphismus. Für die Surjektivität genügt es zu zeigen, dass jede Matrix  $A \in \text{GL}(n, \mathbb{Z})$  ein Produkt von  $\Phi(\alpha_x)$  und  $\Phi(\beta_{xy})$  ist. Linksmultiplikation (bzw. Rechtsmultiplikation) mit  $\Phi(\alpha_x)$  bewirkt, dass eine Zeile (bzw. Spalte) von  $A$  mit  $-1$  multipliziert wird. Durch  $\Phi(\beta_{xy})$  kann man eine Zeile (bzw. Spalte) von  $A$  zu einer anderen Zeile (bzw. Spalte) addieren. Wie in Bemerkung 3.5 kann man Zeilen und Spalten von  $A$  auch vertauschen. Mit diesen Operationen lässt sich  $A$  auf die Smith-Normalform bringen. Wegen  $\det A = \pm 1$  sind alle Elementarteiler 1, d. h.  $A$  lässt sich zur Einheitsmatrix überführen.  $\square$

## 4 Gruppen-Erweiterungen

**Bemerkung 4.1.** Nach dem Satz von Jordan-Hölder sind alle endlichen Gruppen (oder solche die eine Kompositionsreihe besitzen) aus einfachen Gruppen aufgebaut. Die endlichen einfachen Gruppen sind bekanntlich vollständig klassifiziert. Es bleibt zu untersuchen, wie sich eine Gruppe aus Normalteilern und Faktorgruppen zusammensetzt.

**Definition 4.2.**

- Eine (*Gruppen-*)*Erweiterung* von  $N$  mit  $H$  ist eine kurze exakte Folge von Gruppen

$$1 \rightarrow N \xrightarrow{\nu} G \xrightarrow{\pi} H \rightarrow 1,$$

d. h.  $N \cong \nu(N) \trianglelefteq G$  und  $G/\nu(N) \cong \pi(G) = H$ .<sup>9</sup>

- Wir nennen  $G$  eine *zerfallende* Erweiterung, falls ein Homomorphismus  $\rho : H \rightarrow G$  mit  $\pi \circ \rho = \text{id}_H$  existiert. Gegebenenfalls ist  $\rho(H)$  ein Komplement von  $\nu(N)$  in  $G$  und  $G \cong N \rtimes H$ . Umgekehrt ist jedes semidirekte Produkt eine zerfallende Erweiterung.
- Zwei Gruppen-Erweiterungen  $G_1, G_2$  von  $N$  mit  $H$  heißen *äquivalent*, falls ein Homomorphismus  $\gamma : G_1 \rightarrow G_2$  mit  $\gamma \circ \nu_1 = \nu_2$  und  $\pi_2 \circ \gamma = \pi_1$  existiert. Das heißt, das folgende Diagramm kommutiert:

$$\begin{array}{ccc} & G_1 & \\ \nu_1 \nearrow & \downarrow \gamma & \searrow \pi_1 \\ N & & H \\ \nu_2 \searrow & \downarrow & \nearrow \pi_2 \\ & G_2 & \end{array}$$

**Bemerkung 4.3.**

- Jede Gruppe  $G$  mit Normalteiler  $N$  ist eine Erweiterung von  $N$  mit  $H = G/N$ , indem man für  $\nu$  die Inklusion und für  $\pi$  den kanonischen Epimorphismus wählt.
- Seien  $G_1$  und  $G_2$  äquivalente Erweiterungen mittels  $\gamma : G_1 \rightarrow G_2$ . Sei  $x \in \text{Ker}(\gamma)$ . Wegen  $\pi_1(x) = \pi_2(\gamma(x)) = 1$  ist  $x \in \nu_1(N)$ , sagen wir  $x = \nu_1(y)$ . Aus  $\nu_2(y) = \gamma(\nu_1(y)) = \gamma(x) = 1$  folgt  $y = 1 = x$ . Daher ist  $\gamma$  injektiv. Für  $g \in G_2$  existiert  $x \in G_1$  mit  $\pi_2(\gamma(x)) = \pi_1(x) = \pi_2(g)$ . Also existiert  $y \in N$  mit  $g^{-1}\gamma(x) = \nu_2(y) = \gamma(\nu_1(y))$ . Dies zeigt  $g = \gamma(G_1)$  und  $\gamma$  ist surjektiv. Insgesamt gilt  $G_1 \cong G_2$ . Die Äquivalenz von Gruppen ist daher eine Äquivalenzrelation.

<sup>9</sup>Achtung: Dieser Sprachgebrauch ist in der Literatur nicht einheitlich.

(iii) Isomorphe Erweiterungen müssen allerdings nicht äquivalent sein: Sei

$$G_1 = G_2 = \langle x, y \mid x^4 = y^2 = 1, yxy = x^{-1} \rangle \cong D_8,$$

$N = \langle x^2, y \rangle \cong C_2^2$  und  $H = \langle xy \rangle$ . Sei  $\nu_1$  die Inklusion,  $\nu_2(x^2) = y$  und  $\nu_2(y) = x^2$ . Seien  $\pi_1$  und  $\pi_2$  die kanonischen Epimorphismen. Wegen  $Z(G_i) = \langle x^2 \rangle$  kann es kein  $\gamma \in \text{Aut}(G_i)$  mit  $\gamma(x^2) = \gamma(\nu_1(x^2)) = \nu_2(x^2) = y$  geben. Dennoch ist es nützlich Erweiterungen bis auf Äquivalenz bestimmen zu können.

(iv) Seien  $G_1$  und  $G_2$  äquivalente Erweiterungen von  $N$  mit  $H$  bzgl.  $\gamma : G_1 \rightarrow G_2$ . Angenommen  $G_1$  zerfällt mit  $\rho_1 : H \rightarrow G_1$  und  $\pi_1 \rho_1 = \text{id}_H$ . Für  $\rho_2 := \gamma \rho_1 : H \rightarrow G_2$  gilt  $\pi_2 \rho_2 = \pi_2 \gamma \rho_1 = \pi_1 \rho_1 = \text{id}_H$ . Also zerfällt auch  $G_2$ .

(v) Ohne die im Folgenden beschriebenen Methoden kann man Erweiterungen in GAP mit dem `grpconst`-Paket konstruieren:

```
LoadPackage("grpconst",false);
G:=AlternatingGroup(6);; #das Paket erwartet eine Permutationsgruppe
up:=UpwardsExtensions(G,2)[2]; #Erweiterungen von G mit C2
List(up,IdGroup);
P:=DihedralGroup(IsPermGroup,32);;
up:=CyclicExtensions(P,2);; #ist schneller, aber reduziert nicht bis auf Isomorphie
Size(up)=Size(Set(up,IdGroup)); #false, also Liste redundant
UpwardsExtensionsNoCentre(G,2); #funktioniert nur für G = G' und Z(G) = 1
```

**Definition 4.4.** Seien  $H$  und  $N$  Gruppen. Für  $x \in N$  sei  $c_x \in \text{Inn}(N)$  der innere Automorphismus (d. h.  $c_x(y) = xyx^{-1}$ ). Ein Paar von Abbildungen

$$\alpha : H \rightarrow \text{Aut}(N), \quad x \mapsto \alpha_x, \quad \kappa : H \times H \rightarrow N$$

heißt *Parametersystem* von  $N$  mit  $H$ , falls für alle  $x, y, z \in H$  gilt:

- $\alpha_x \alpha_y = c_{\kappa(x,y)} \alpha_{xy},$
- $\kappa(x,y) \kappa(xy,z) = \alpha_x(\kappa(y,z)) \kappa(x,yz).$

Ggf. nennt man  $\alpha$  *Automorphismensystem* und  $\kappa$  *Faktorensystem*. Ein Parametersystem (oder Faktorensystem) heißt *normalisiert*, falls  $\kappa(x,1) = \kappa(1,x) = 1$  für alle  $x \in H$  gilt (ggf. ist  $\alpha_1 = \text{id}_N$ ). Schließlich heißt  $\kappa$  *trivial*, falls  $\kappa(x,y) = 1$  für alle  $x, y \in G$  (ggf. ist  $\alpha$  ein Homomorphismus).

**Lemma 4.5.** Jede Erweiterung von  $N$  mit  $H$  bestimmt ein (normalisiertes) Parametersystem.

*Beweis.* Sei  $N \xrightarrow{\nu} G \xrightarrow{\pi} H$  eine Erweiterung. Für  $x \in H$  wählen wir  $\tilde{x} \in G$  mit  $\pi(\tilde{x}) = x$  und  $\tilde{1} = 1$ . Dann ist  $\alpha_x : N \rightarrow N, y \mapsto \nu^{-1}(\tilde{x} \nu(y) \tilde{x}^{-1})$  ein Automorphismus (beachte:  $\nu$  ist injektiv) und  $\alpha_1 = \text{id}_N$ . Für  $x, y \in H$  ist  $\pi(\tilde{x} \tilde{y}) = xy = \pi(\tilde{x}) \pi(\tilde{y}) = \pi(\tilde{x} \tilde{y})$ . Daher existiert  $\kappa(x,y) \in N$  mit  $\tilde{x} \tilde{y} = \nu(\kappa(x,y)) \tilde{x} \tilde{y}$ . Dabei gilt  $\kappa(x,1) = \kappa(1,x) = 1$ . Für  $g \in N$  gilt

$$\begin{aligned} (\alpha_x \alpha_y)(g) &= \alpha_x(\nu^{-1}(\tilde{y} \nu(g) \tilde{y}^{-1})) = \nu^{-1}(\tilde{x} \tilde{y} \nu(g) \tilde{y}^{-1} \tilde{x}^{-1}) = \nu^{-1}(\nu(\kappa(x,y)) \tilde{x} \tilde{y} \nu(g) \tilde{x} \tilde{y}^{-1} \nu(\kappa(x,y)^{-1})) \\ &= \kappa(x,y) \nu^{-1}(\tilde{x} \tilde{y} \nu(g) \tilde{x} \tilde{y}^{-1}) \kappa(x,y)^{-1} = c_{\kappa(x,y)} \alpha_{xy}(g). \end{aligned}$$

Für  $x, y, z \in H$  gilt

$$\begin{aligned} \nu(\kappa(x,y)) \nu(\kappa(xy,z)) \tilde{x} \tilde{y} \tilde{z} &= \nu(\kappa(x,y)) \tilde{x} \tilde{y} \tilde{z} = (\tilde{x} \tilde{y}) \tilde{z} = \tilde{x} (\tilde{y} \tilde{z}) = \tilde{x} \nu(\kappa(y,z)) \tilde{y} \tilde{z} \\ &= \nu(\alpha_x(\kappa(y,z))) \tilde{x} \tilde{y} \tilde{z} = \nu(\alpha_x(\kappa(y,z))) \nu(\kappa(x,yz)) \tilde{x} \tilde{y} \tilde{z}. \end{aligned}$$

Da  $\nu$  injektiv ist, folgt die Behauptung. □

**Beispiel 4.6.**

- (i) Ist  $G = N \rtimes H$ , so kann man  $\tilde{x} \in H$  im obigen Beweis wählen. Man erhält dann das triviale Faktorensystem und für  $\alpha : H \rightarrow \text{Aut}(N)$  die Konjugationsoperation.
- (ii) Ist  $x \in H$  mit  $x^2 \neq 1$ , so kann man  $\widetilde{x^{-1}} = \tilde{x}^{-1}$  im obigen Beweis wählen. Man erhält dann  $\kappa(x, x^{-1}) = 1$ .
- (iii) Sei  $G = \langle x, y \rangle = Q_8$ ,  $N = \langle x \rangle \cong C_4$ ,  $\nu$  die Inklusion und  $H = \langle z \rangle \cong C_2$ . Wir können  $\tilde{z} = y$  wählen. Man erhält  $\kappa(z, z) = \tilde{z}^2(\tilde{z}^2)^{-1} = y^2 \neq 1$ .
- (iv) Sei  $n \in \mathbb{N}$  und  $H = \langle x \rangle \cong C_n \cong \langle a \rangle = N$ . Für  $i, j \in \mathbb{Z}$  sei  $\alpha_{x^i} := \text{id}_N$  und  $\kappa(x^i, x^j) := a^{ij}$  (wohldefiniert!). Dann gilt

$$\kappa(x^i, x^j) \kappa(x^i x^j, x^k) = x^{ij+(i+j)k} = x^{jk+i(j+k)} = \kappa(x^j, x^k) \kappa(x^i, x^j x^k).$$

Daher ist  $(\alpha, \kappa)$  ein normalisiertes Parametersystem.

**Lemma 4.7.** *Jedes normalisierte Parametersystem von  $N$  mit  $H$  bestimmt eine Erweiterung.*

*Beweis.* Sei  $(\alpha, \kappa)$  ein normalisiertes Parametersystem von  $N$  mit  $H$ . Wir betrachten die Menge  $G = N \times H$  mit der Verknüpfung

$$(a, x)(b, y) := (a\alpha_x(b)\kappa(x, y), xy).$$

Dann gilt

$$\begin{aligned} ((a, x)(b, y))(c, z) &= (a\alpha_x(b)\kappa(x, y), xy)(c, z) = (a\alpha_x(b)\kappa(x, y)\alpha_{xy}(c)\kappa(xy, z), xyz) \\ &= (a\alpha_x(b)\kappa(x, y)\alpha_{xy}(c)\kappa(x, y)^{-1}\kappa(x, y)\kappa(xy, z), xyz) \\ &= (a\alpha_x(b)\alpha_x(\alpha_y(c))\alpha_x(\kappa(y, z))\kappa(x, yz), xyz) \\ &= (a\alpha_x(b\alpha_y(c)\kappa(y, z))\kappa(x, yz), xyz) \\ &= (a, x)(b\alpha_y(c)\kappa(y, z), yz) = (a, x)((b, y)(c, z)). \end{aligned}$$

Die Verknüpfung ist daher assoziativ. Da  $\kappa$  normalisiert ist, ist  $(1, 1)$  ein neutrales Element. Inverse Elemente erhält man durch

$$(\kappa(y^{-1}, y)^{-1}\alpha_{y^{-1}}(b)^{-1}, y^{-1})(b, y) = (\kappa(y^{-1}, y)^{-1}\alpha_{y^{-1}}(b)^{-1}\alpha_{y^{-1}}(b)\kappa(y^{-1}, y), y^{-1}y) = (1, 1).$$

Also ist  $G$  eine Gruppe. Offenbar ist  $\nu : N \rightarrow G$ ,  $a \mapsto (a, 1)$  ein Monomorphismus und  $\pi : G \rightarrow H$ ,  $(a, x) \mapsto x$  ein Epimorphismus mit  $\nu(N) = N \times 1 = \text{Ker}(\pi)$ .  $\square$

**Bemerkung 4.8.**

- (i) Für das triviale Faktorensystem ergibt sich im obigen Beweis das semidirekte Produkt  $N \rtimes H$ .
- (ii) Sei  $(\alpha, \kappa)$  ein normalisiertes Parametersystem mit  $\alpha_x = \text{id}_N$  für alle  $x \in H$  (wir schreiben dafür  $\alpha = 1$ ). Wegen  $c_{\kappa(x, y)} = c_{\kappa(x, y)}\alpha_{xy} = \alpha_x\alpha_y = \text{id}_N$  ist  $\kappa(H \times H) \leq Z(N)$ . Sei  $G$  die entsprechende Erweiterung und  $K := \langle (1, x) : x \in H \rangle$ . Wegen

$$\begin{aligned} (a, x)(1, y)(a, x)^{-1} &= (a\kappa(x, y), xy)(\kappa(x^{-1}, x)^{-1}a^{-1}, x^{-1}) \\ &= (a\kappa(x, y)\kappa(x^{-1}, x)^{-1}a^{-1}\kappa(xy, x^{-1}), xyx^{-1}) = (1, x)(1, y)(1, x)^{-1} \in K \end{aligned}$$

ist  $K \trianglelefteq G$  und  $N \cap K \leq \kappa(H \times H) \leq Z(G)$ . Also ist  $G = N * K$  ein Zentralprodukt.

**Definition 4.9.** Zwei Parametersysteme  $(\alpha, \kappa)$ ,  $(\alpha', \kappa')$  heißen *äquivalent*, falls eine Abbildung  $\varphi : H \rightarrow N$  mit

- $\alpha'_x = c_{\varphi(x)}\alpha_x$ ,
- $\kappa'(x, y) = \varphi(x)\alpha_x(\varphi(y))\kappa(x, y)\varphi(xy)^{-1}$

für alle  $x, y \in H$  existiert. Ggf. schreiben wir  $(\alpha, \kappa) \sim (\alpha', \kappa')$ .

**Bemerkung 4.10.** Die Abbildungen  $H \rightarrow N$  bilden eine Gruppe  $C^1(H, N)$  bzgl.  $(\varphi\psi)(x) := \varphi(x)\psi(x)$  ( $x \in H$ ), die zu  $\times_{h \in H} N$  isomorph ist. Wir zeigen, dass  ${}^\varphi(\alpha, \kappa) := (\alpha', \kappa')$  wie in Definition 4.9 eine Operation von  $C^1(H, N)$  auf der Menge der Parametersysteme definiert. Zunächst muss gezeigt werden, dass  $(\alpha', \kappa')$  ein Parametersystem ist:

$$\begin{aligned} \alpha'_x \alpha'_y &= c_{\varphi(x)}\alpha_x c_{\varphi(y)}\alpha_y = c_{\varphi(x)}\alpha_x c_{\varphi(y)}\alpha_x^{-1}\alpha_x\alpha_y = c_{\varphi(x)}c_{\alpha_x(\varphi(y))}c_{\kappa(x, y)}\alpha_{xy} = c_{\kappa'(x, y)}\alpha'_{xy} \\ \kappa'(x, y)\kappa'(xy, z) &= \varphi(x)\alpha_x(\varphi(y))\kappa(x, y)\alpha_{xy}(\varphi(z))\kappa(xy, z)\varphi(xyz)^{-1} \\ &= \varphi(x)\alpha_x(\varphi(y))(c_{\kappa(x, y)}\alpha_{xy})(\varphi(z))\kappa(x, y)\kappa(xy, z)\varphi(xyz)^{-1} \\ &= \varphi(x)\alpha_x(\varphi(y))(\alpha_x\alpha_y)(\varphi(z))\alpha_x(\kappa(y, z))\kappa(x, yz)\varphi(xyz)^{-1} \\ &= \varphi(x)\alpha_x(\varphi(y)\alpha_y(\varphi(z))\kappa(y, z))\kappa(x, yz)\varphi(xyz)^{-1} \\ &= (c_{\varphi(x)}\alpha_x)(\kappa'(y, z))\varphi(x)\alpha_x(\varphi(yz))\kappa(x, yz)\varphi(xyz)^{-1} \\ &= \alpha'_x(\kappa'(y, z))\kappa'(x, yz). \end{aligned}$$

Sicher ist  ${}^1(\alpha, \kappa) = (\alpha, \kappa)$ . Sei  $\varphi, \psi \in C^1(H, N)$  mit  ${}^\psi(\alpha, \kappa) = (\alpha', \kappa')$ . Dann gilt

$$\begin{aligned} c_{\varphi(x)}\alpha'_x &= c_{\varphi(x)}c_{\psi(x)}\alpha_x = c_{\varphi(x)\psi(x)}\alpha_x = c_{(\varphi\psi)(x)}\alpha_x, \\ \varphi(x)\alpha'_x(\varphi(y))\kappa'(x, y)\varphi(xy)^{-1} &= \varphi(x)\psi(x)\alpha_x(\varphi(y))\alpha_x(\psi(y))\kappa(x, y)\psi(xy)^{-1}\varphi(xy)^{-1} \\ &= (\varphi\psi)(x)\alpha_x((\varphi\psi)(y))\kappa(x, y)(\varphi\psi)(xy)^{-1}. \end{aligned}$$

Dies zeigt  ${}^{\varphi\psi}(\alpha, \kappa) = {}^{\varphi\psi}({}^\psi(\alpha, \kappa))$ . Die Äquivalenzklassen von Parametersystemen sind also die Bahnen unter  $C^1(H, N)$ . Insbesondere ist  $\sim$  eine Äquivalenzrelation. Die Anzahl der Äquivalenzklassen könnte man mit Burnsidess Lemma bestimmen.

**Lemma 4.11.** *Jedes Parametersystem ist zu einem normalisierten Parametersystem äquivalent.*

*Beweis.* Sei  $(\alpha, \kappa)$  ein beliebiges Parametersystem und  $\zeta := \kappa(1, 1) \in N$ . Wegen  $\alpha_1\alpha_1 = c_\zeta\alpha_1$  ist  $\alpha_1 = c_\zeta$ . Aus

$$\zeta\kappa(1 \cdot 1, x) = \alpha_1(\kappa(1, x))\kappa(1, 1x) = \zeta\kappa(1, x)\zeta^{-1}\kappa(1, x).$$

folgt  $\kappa(1, x) = \zeta$  für alle  $x \in H$ . Mit  $\kappa(x, 1)\kappa(x1, 1) = \alpha_x(\zeta)\kappa(x, 1 \cdot 1)$  ist  $\kappa(x, 1) = \alpha_x(\zeta)$ .

Definiere nun  $\varphi(1) := \zeta^{-1}$  und  $\varphi(y) := 1$  für  $y \in H \setminus \{1\}$ . Dann gilt

$$\begin{aligned} \varphi(x)\alpha_x(\varphi(1))\kappa(x, 1)\varphi(x)^{-1} &= \varphi(x)\alpha_x(\zeta)^{-1}\alpha_x(\zeta)\varphi(x)^{-1} = 1, \\ \varphi(1)\alpha_1(\varphi(x))\kappa(1, x)\varphi(x)^{-1} &= \zeta^{-1}\zeta\varphi(x)\zeta^{-1}\zeta\varphi(x)^{-1} = 1 \end{aligned}$$

für alle  $x \in H$ . Auf diese Weise erhält man ein äquivalentes normalisiertes Parametersystem.  $\square$

**Lemma 4.12.** *Äquivalente Erweiterungen definieren äquivalente Parametersysteme.*

*Beweis.* Seien  $N \xrightarrow{\nu_1} G_1 \xrightarrow{\pi_1} H$  und  $N \xrightarrow{\nu_2} G_2 \xrightarrow{\pi_2} H$  äquivalente Erweiterungen mittels  $\gamma : G_1 \rightarrow G_2$ . Für  $x \in H$  sei  $\tilde{x} \in G_1$  und  $\bar{x} \in G_2$  mit  $\pi_1(\tilde{x}) = x = \pi_2(\bar{x})$ . Wie im Beweis von Lemma 4.5 erhält man Parametersysteme  $(\alpha, \kappa)$  und  $(\alpha', \kappa')$  mit

$$\begin{aligned}\alpha_x(g) &= \nu_1^{-1}(\tilde{x}\nu_1(g)\tilde{x}^{-1}), & \kappa(x, y) &= \nu_1^{-1}(\tilde{x}\tilde{y}\tilde{x}\tilde{y}^{-1}), \\ \alpha'_x(g) &= \nu_2^{-1}(\bar{x}\nu_2(g)\bar{x}^{-1}), & \kappa'(x, y) &= \nu_2^{-1}(\bar{x}\bar{y}\bar{x}\bar{y}^{-1})\end{aligned}$$

für  $x, y \in H$  und  $g \in N$ . Wegen  $\pi_2(\gamma(\tilde{x})) = \pi_1(\tilde{x}) = x = \pi_2(\bar{x})$  können wir

$$\varphi(x) := \nu_2^{-1}(\bar{x}\gamma(\tilde{x})^{-1}) \in N$$

für  $x \in H$  definieren. Wegen  $\gamma\nu_1 = \nu_2$  ist  $\varphi(x) = \nu_1^{-1}(\gamma^{-1}(\bar{x})\tilde{x}^{-1})$ . Es folgt

$$\begin{aligned}(c_{\varphi(x)}\alpha_x)(g) &= \nu_1^{-1}(\gamma^{-1}(\bar{x})\tilde{x}^{-1})\nu_1^{-1}(\tilde{x}\nu_1(g)\tilde{x}^{-1})\nu_1^{-1}(\tilde{x}\gamma^{-1}(\bar{x})^{-1}) = \nu_1^{-1}(\gamma^{-1}(\bar{x})\nu_1(g)\gamma^{-1}(\bar{x})^{-1}) \\ &= \nu_1^{-1}(\gamma^{-1}(\bar{x}\nu_2(g)\bar{x}^{-1})) = \nu_2^{-1}(\bar{x}\nu_2(g)\bar{x}^{-1}) = \alpha'_x(g)\end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned}\varphi(x)\alpha_x(\varphi(y))\kappa(x, y)\varphi(xy)^{-1} &= \nu_1^{-1}(\gamma^{-1}(\bar{x})\tilde{x}^{-1})\nu_1^{-1}(\tilde{x}\nu_1(\varphi(y))\tilde{x}^{-1})\nu_1^{-1}(\tilde{x}\tilde{y}\tilde{x}\tilde{y}^{-1})\nu_1^{-1}(\tilde{x}\gamma^{-1}(\bar{xy})^{-1}) \\ &= \nu_1^{-1}(\gamma^{-1}(\bar{x})\nu_1(\varphi(y))\tilde{y}\gamma^{-1}(\bar{xy})^{-1}) \\ &= \nu_1^{-1}(\gamma^{-1}(\bar{x})\gamma^{-1}(\bar{y})\gamma^{-1}(\bar{xy})^{-1}) = \nu_2^{-1}(\bar{x}\bar{y}\bar{xy}^{-1}) = \kappa'(x, y).\end{aligned}$$

Daher sind  $(\alpha, \kappa)$  und  $(\alpha', \kappa')$  äquivalent. □

**Lemma 4.13.** *Äquivalente (normalisierte) Parametersysteme definieren äquivalente Erweiterungen.*

*Beweis.* Seien  $(\alpha, \kappa)$  und  $(\alpha', \kappa')$  äquivalente Parametersysteme mittels  $\varphi : H \rightarrow N$ . Nach Lemma 4.11 können wir annehmen, dass beide Parametersysteme normalisiert sind. Dann gilt

$$1 = \kappa'(1, x) = \varphi(1)\alpha_1(\varphi(x))\kappa(1, x)\varphi(x)^{-1} = \varphi(1).$$

Wir konstruieren  $(G_1, \cdot)$  und  $(G_2, *)$  wie im Beweis von Lemma 4.7. Da  $G_1$  und  $G_2$  als Mengen gleich sind, können wir  $\gamma : G_1 \rightarrow G_2$ ,  $(a, x) \mapsto (a\varphi(x)^{-1}, x)$  definieren. Für  $(a, x), (b, y) \in G_1$  gilt

$$\begin{aligned}\gamma(a, x) * \gamma(b, y) &= (a\varphi(x)^{-1}, x) * (b\varphi(y)^{-1}, y) = (a\varphi(x)^{-1}\alpha'_x(b\varphi(y)^{-1})\kappa'(x, y), xy) \\ &= (a\alpha_x(b\varphi(y)^{-1})\alpha_x(\varphi(y))\kappa(x, y)\varphi(xy)^{-1}, xy) = (a\alpha_x(b)\kappa(x, y)\varphi(xy)^{-1}, xy) \\ &= \gamma(a\alpha_x(b)\kappa(x, y), xy) = \gamma((a, x) \cdot (b, y)),\end{aligned}$$

d. h.  $\gamma$  ist ein Homomorphismus. Außerdem gilt

$$\begin{aligned}(\gamma\nu_1)(a) &= \gamma(a, 1) = (a\varphi(1)^{-1}, 1) = (a, 1) = \nu_2(a), \\ (\pi_2\gamma)(a, x) &= \pi_2(a\varphi(x)^{-1}, x) = x = \pi_1(a, x).\end{aligned}$$

Also sind  $G_1$  und  $G_2$  äquivalent. □

**Satz 4.14** (SCHREIER). *Es gibt eine Bijektion zwischen der Menge der Äquivalenzklassen von Erweiterungen von  $N$  mit  $H$  und der Menge der Äquivalenzklassen von (normalisierten) Parametersystemen von  $N$  mit  $H$ .*



*Beweis.* Nach Lemma 4.12 und Lemma 4.13 gibt es wohldefinierte Abbildungen zwischen den Mengen von Äquivalenzklassen. Wir zeigen, dass sie zueinander invers sind.

Die Erweiterung  $N \xrightarrow{\nu_1} G_1 \xrightarrow{\pi_1} H$  definiere das normalisierte Parametersystem  $(\alpha, \kappa)$  mit den Elementen  $\tilde{x} \in G_1$  wie in Lemma 4.5. Aus  $(\alpha, \kappa)$  konstruieren wir die Erweiterung  $N \xrightarrow{\nu_2} G_2 \xrightarrow{\pi_2} H$  wie in Lemma 4.7. Jedes Element in  $G_1$  lässt sich eindeutig in der Form  $\nu_1(a)\tilde{x}$  mit  $a \in N$  und  $x \in H$  schreiben. Wir definieren  $\gamma : G_1 \rightarrow G_2$ ,  $\nu_1(a)\tilde{x} \mapsto (a, x)$ . Für  $\nu_1(a)\tilde{x}, \nu_1(b)\tilde{y} \in G_1$  gilt

$$\begin{aligned} \gamma(\nu_1(a)\tilde{x} \cdot \nu_1(b)\tilde{y}) &= \gamma(\nu_1(a)\tilde{x}\nu_1(b)\tilde{x}^{-1} \cdot \tilde{x}\tilde{y}) = \gamma(\nu_1(a)\nu_1(\alpha_x(b)) \cdot \nu_1(\kappa(x, y))\tilde{xy}) \\ &= (a\alpha_x(b)\kappa(x, y), xy) = (a, x) * (b, y) = \gamma(\nu_1(a)\tilde{x}) * \gamma(\nu_1(b)\tilde{y}), \end{aligned}$$

d. h.  $\gamma$  ist ein Homomorphismus mit

$$\begin{aligned} (\gamma\nu_1)(a) &= \gamma(\nu_1(a)\tilde{1}) = (a, 1) = \nu_2(a), \\ (\pi_2\gamma)(\nu_1(a)\tilde{x}) &= \pi_2(a, x) = x = \pi_1(\tilde{x}) = \pi_1(\nu_1(a)\tilde{x}). \end{aligned}$$

Also sind  $G_1$  und  $G_2$  äquivalent.

Umkehrt sei zuerst  $(\alpha, \kappa)$  normalisiert gegeben. Wir konstruieren die Erweiterung  $G$  und daraus das Parametersystem  $(\alpha', \kappa')$  mittels der Elemente  $\tilde{x} = (1, x) \in G$  für  $x \in H$ . Zunächst gilt

$$\kappa(x, x^{-1}) = \kappa(x, x^{-1})\kappa(xx^{-1}, x) = \alpha_x(\kappa(x^{-1}, x))\kappa(x, x^{-1}x) = \alpha_x(\kappa(x^{-1}, x)) \quad (4.1)$$

für  $x \in H$ . Daraus folgt

$$\begin{aligned} \alpha'_x(g) &= \nu^{-1}(\tilde{x}\nu(g)\tilde{x}^{-1}) = \nu^{-1}((1, x)(g, 1)(1, x)^{-1}) = \nu^{-1}((\alpha_x(g), x)(\kappa(x^{-1}, x)^{-1}, x^{-1})) \\ &= \nu^{-1}(\alpha_x(g)\alpha_x(\kappa(x^{-1}, x)^{-1})\kappa(x, x^{-1}), 1) = \alpha_x(g), \\ \kappa'(x, y) &= \nu^{-1}(\tilde{x}\tilde{y}\tilde{xy}^{-1}) = \nu^{-1}((1, x)(1, y)(\kappa((xy)^{-1}, xy)^{-1}, (xy)^{-1})) \\ &= \nu^{-1}((\kappa(x, y), xy)(\kappa((xy)^{-1}, xy)^{-1}, (xy)^{-1})) \\ &= \nu^{-1}(\kappa(x, y)\alpha_{xy}(\kappa((xy)^{-1}, xy)^{-1})\kappa(xy, (xy)^{-1}), 1) \\ &= \nu^{-1}(\kappa(x, y), 1) = \kappa(x, y) \end{aligned}$$

für  $x, y \in H$  und  $g \in N$ . Dies zeigt  $(\alpha, \kappa) = (\alpha', \kappa')$ . □

**Bemerkung 4.15.** Nach Bemerkung 4.3 entsprechen die zerfallenden Erweiterungen bis auf Äquivalenz genau den Parametersystemen mit trivialem Faktorensystem.

**Satz 4.16.** Sei  $H = \langle x \rangle \cong C_n$  und  $\beta \in \text{Aut}(N)$ . Genau dann existiert ein Parametersystem  $(\alpha, \kappa)$  mit  $\alpha_x = \beta$ , wenn ein  $a \in N$  mit  $\beta(a) = a$  und  $\beta^n = c_a$  existiert.

*Beweis.* Sei  $(\alpha, \kappa)$  ein Parametersystem mit  $\alpha_x = \beta$ . Im Fall  $n = 1$  gilt die Behauptung mit  $a := \kappa(1, 1)$ , denn

$$\begin{aligned} \alpha_1\alpha_1 &= c_{\kappa(1,1)}\alpha_1, \\ \kappa(1, 1)\kappa(1, 1) &= \alpha_1(\kappa(1, 1))\kappa(1, 1). \end{aligned}$$

Für  $n \geq 2$  dürfen wir zu einem normalisierten Parametersystem übergeben, ohne dass sich  $\alpha_x$  ändert (siehe Beweis von Lemma 4.11). Wir konstruieren die entsprechende Erweiterung  $G = N \times H$ . Für  $\tilde{x} := (1, x) \in G$  und  $b \in N$  gilt

$$\tilde{x}\nu(b)\tilde{x}^{-1} = (1, x)(b, 1)(1, x)^{-1} = (\alpha_x(b), x)(\kappa(x^{-1}, x)^{-1}, x^{-1}) \stackrel{(4.1)}{=} (\alpha_x(b), 1) = \nu(\beta(b)).$$

Also ist  $\beta = \nu^{-1}c_{\tilde{x}}\nu$ . Sei  $(a, 1) := \tilde{x}^n$ . Dann gilt  $\beta^n = \nu^{-1}c_{(a,1)}\nu = c_a$  und

$$\beta(a) = \nu^{-1}(\tilde{x}\nu(a)\tilde{x}^{-1}) = \nu^{-1}(\tilde{x}\tilde{x}^n\tilde{x}^{-1}) = \nu^{-1}(a, 1) = a.$$

Sei umgekehrt  $\beta^n = c_a$  und  $\beta(a) = a$  für ein  $a \in N$ . Wir definieren  $\alpha_{x^i} := \beta^i$  und

$$\kappa(x^i, x^j) := \begin{cases} 1 & \text{falls } i + j < n, \\ a & \text{falls } i + j \geq n \end{cases}$$

für  $0 \leq i, j \leq n - 1$ . Dann gilt

$$\alpha_{x^i}\alpha_{x^j} = \beta^{i+j} = \begin{cases} \alpha_{x^{i+j}} = c_{\kappa(x^i, x^j)}\alpha_{x^i x^j} & \text{falls } i + j < n, \\ c_a \beta^{i+j-n} = c_{\kappa(x^i, x^j)}\alpha_{x^i x^j} & \text{falls } i + j \geq n \end{cases}$$

und

$$\kappa(x^i, x^j)\kappa(x^{i+j}, x^k) = \begin{cases} 1 & \text{falls } i + j + k < n, \\ a & \text{falls } n \leq i + j + k < 2n, \\ a^2 & \text{falls } i + j + k \geq 2n. \end{cases}$$

Wegen  $\alpha_{x^i}(a) = \beta^i(a) = a$  gilt  $\kappa(x^i, x^j)\kappa(x^{i+j}, x^k) = \alpha_{x^i}(\kappa(x^j, x^k))\kappa(x^i, x^{j+k})$  in allen Fällen. Somit ist  $(\alpha, \kappa)$  ein Parametersystem.  $\square$

#### Beispiel 4.17.

- (i) Ist  $\beta$  in der Situation von Satz 4.16 ein innerer Automorphismus, sagen wir  $\beta = c_b$  mit  $b \in N$ , so gelten die Voraussetzungen mit  $a = b^n$ . Es gibt also immer eine Erweiterung, sodass  $\beta$  von  $x$  induziert wird.
- (ii) Ist  $N$  abelsch, so reduzieren sich die Bedingungen zu  $\beta^n = 1$ . Für nicht-abelsche Gruppen ist das nicht ausreichend (Aufgabe 17).

**Bemerkung 4.18.** Sei  $N$  abelsch. Dann sind die Automorphismensysteme genau die Homomorphismen  $\alpha : H \rightarrow \text{Aut}(N)$ . Die entsprechenden Faktorensysteme bilden eine Untergruppe  $F_\alpha \leq C^2(H, N) := C^1(H \times H, N)$  (bei festem  $\alpha$ ). Aus  $(\alpha, \kappa) \sim (\alpha', \kappa')$  folgt außerdem  $\alpha = \alpha'$ . Man kann also die Äquivalenzklassen innerhalb  $F_\alpha$  untersuchen.

**Satz 4.19.** Sei  $N$  abelsch und  $\alpha : H \rightarrow \text{Aut}(N)$  ein Homomorphismus. Dann ist

$$P_\alpha := \{\kappa \in F_\alpha : (\alpha, \kappa) \sim (\alpha, 1)\} \leq F_\alpha.$$

Die Äquivalenzklassen von Parametersystemen mit Automorphismensystem  $\alpha$  entsprechen den Elementen von  $\overline{F_\alpha} := F_\alpha / P_\alpha$ .

*Beweis.* Für  $\kappa, \kappa' \in P_\alpha$  existieren  $\varphi, \psi \in C^1(H, N)$  mit  $\kappa(x, y) = \varphi(x)\alpha_x(\varphi(y))\varphi(xy)^{-1}$  und  $\kappa'(x, y) = \psi(x)\alpha_x(\psi(y))\psi(xy)^{-1}$  für  $x, y \in H$ . Da  $N$  abelsch ist, folgt

$$(\kappa\kappa')(x, y) = (\varphi\psi)(x)\alpha_x((\varphi\psi)(y))(\varphi\psi)(xy)^{-1}$$

und  $\kappa\kappa' \in P_\alpha$ . Man erhält leicht  $P_\alpha \leq F_\alpha$ . Da  $C^2(H, N) \cong \times_{x \in H \times H} N$  abelsch ist, gilt  $P_\alpha \trianglelefteq F_\alpha$  und  $\overline{F_\alpha}$  ist wohldefiniert. Außerdem ist

$$\begin{aligned} (\alpha, \kappa) \sim (\alpha, \kappa') &\iff \exists \varphi \in C^1(H, N) \forall x, y \in H : \kappa'(x, y) = \varphi(x)\alpha_x(\varphi(y))\kappa(x, y)\varphi(xy)^{-1} \\ &\iff \exists \varphi \in C^1(H, N) : \kappa^{-1}\kappa' \in P_\alpha \iff \kappa P_\alpha = \kappa' P_\alpha. \end{aligned}$$

$\square$

**Bemerkung 4.20** (GAP). Erweiterungen lassen sich auf dem Computer besonders effizient für *polyzyklische* Gruppen  $H$  berechnen. Dies bedeutet, dass  $H$  eine Subnormalreihe mit zyklischen Faktoren besitzt. Für endliche Gruppen ist polyzyklisch äquivalent zu auflösbar. Wir nehmen außerdem an, dass  $N$  eine elementarabelsche  $p$ -Gruppe ist. Durch den Homomorphismus  $\alpha : H \rightarrow \text{Aut}(N)$  wird  $N$  dann zu einem  $\mathbb{F}_p H$ -Modul.

```
H:=SymmetricGroup(4);; #Permutationsgruppe
H:=Image(IsomorphismPcGroup(H));; #isomorphe polyzyklische Gruppe
IrrM:=IrreducibleModules(H,GF(2),2); #einfache  $\mathbb{F}_2 H$ -Moduln der Dimension  $\leq 2$ 
N:=IrrM[2][2];; #ein 2-dimensionaler einfacher  $\mathbb{F}_2 H$ -Modul, also  $N \cong C_2^2$ 
ext:=Extensions(H,N); #zwei Erweiterungen der Ordnung 96
List(ext,IdGroup); #Nummer in der small groups library
IdGroup(SplitExtension(H,N)); #zerfallende Erweiterung
Fa:=VectorSpace(GF(2),TwoCocycles(H,N));; #= $F_\alpha$ 
Pa:=Subspace(Fa,TwoCoboundaries(H,N));; #= $P_\alpha$ 
t:=Difference(Fa,Pa)[1];; #nicht-triviales Faktorensystem
G:=Extension(H,N,t);; #das sollte die nicht-zerfallende Erweiterung sein
IdGroup(G);
TwoCohomology(H,N); #mehr Info über  $\overline{F_\alpha}$ 
```

Für nicht-polyzyklische Gruppen kann man das `cohomolo`-Paket (bisher nur unter Linux) einbinden. Es erwartet als Eingabe eine Permutationsgruppe und eine dazu isomorphe endlich präsentierte Gruppe.

```
LoadPackage("cohomolo",false); #false unterdrückt Banner
H:=GL(5,2);;
gen:=GeneratorsOfGroup(H);;
Hp:=Image(IsomorphismPermGroup(H));;
Hf:=Image(IsomorphismFpGroupByGenerators(H,gen));;
chr:=CHR(Hp,2,Hf,gen); #hier ist  $N = \mathbb{F}_2^5$  und  $\alpha : H \rightarrow \text{Aut}(N)$  der natürliche Isomorphismus
SecondCohomologyDimension(chr); #=1 bedeutet  $\overline{F_\alpha} \cong \mathbb{F}_2$ , d.h. es gibt zwei Erweiterungen
G:=NonsplitExtension(chr); #das ist die DEMPWOLFF-Gruppe
Size(G); #dauert ewig
```

**Satz 4.21.** Sei  $N$  abelsch,  $K \leq H$  endlich und  $\alpha : H \rightarrow \text{Aut}(N)$  ein Homomorphismus. Sei  $\alpha_K : K \rightarrow \text{Aut}(N)$  die Einschränkung von  $\alpha$ . Dann ist die Abbildung

$$\overline{F_\alpha} \rightarrow \overline{F_{\alpha_K}}, \quad \kappa P_\alpha \mapsto \kappa_{K \times K} P_{\alpha_K}$$

ein Homomorphismus. Aus  $\kappa_{K \times K} \in P_{\alpha_K}$  folgt  $\kappa^{|H:K|} \in P_\alpha$ . Insbesondere ist  $\exp(\overline{F_\alpha})$  ein Teiler von  $|H|$ .

*Beweis.* Für  $\kappa \in F_\alpha$  ist offensichtlich  $\kappa_{K \times K} \in F_{\alpha_K}$  und die Abbildung  $F_\alpha \rightarrow F_{\alpha_K}$ ,  $\kappa \mapsto \kappa_{K \times K}$  ist ein Homomorphismus. Aus  $\kappa \equiv \kappa' \pmod{P_\alpha}$  folgt  $\kappa_{K \times K} \equiv \kappa'_{K \times K} \pmod{F_{\alpha_K}}$ . Also ist  $\overline{F_\alpha} \rightarrow \overline{F_{\alpha_K}}$  ein wohldefinierter Homomorphismus.

Sei nun  $\kappa_{K \times K} \in P_{\alpha_K}$ . Sei  $G$  eine Erweiterung von  $N$  mit  $H$  bzgl.  $(\alpha, \kappa)$ . Dann existiert ein Homomorphismus  $\rho : K \rightarrow G$  mit  $\pi\rho = \text{id}_K$ . Sei  $R$  ein Repräsentantensystem für  $H/K$  mit  $1 \in R$ . Für  $r \in R$  sei  $\tilde{r} \in G$  mit  $\pi(\tilde{r}) = r$  und  $\tilde{1} = 1$ . Für  $x \in H$  sei  $r_x \in R$  mit  $r_x^{-1}x \in K$ . Wir definieren  $\tilde{x} := \tilde{r}_x \rho(r_x^{-1}x)$ . Dann gilt  $\pi(\tilde{x}) = r_x r_x^{-1}x = x$  und

$$\kappa'(x, y) := \nu^{-1}(\tilde{x}\tilde{y}\tilde{x}^{-1})$$

definiert ein zu  $(\alpha, \kappa)$  äquivalentes normalisiertes Parametersystem. Für  $x, y \in H$  gilt  $r_{xy}K = xyK = xr_yK = r_{xr_y}K$  und  $r_{xy} = r_{xr_y}$ . Es folgt

$$\begin{aligned}\kappa'(x, y) &= \nu^{-1}(\widetilde{xr_y\rho(r_y^{-1}y)\widetilde{xy}^{-1}}) = \nu^{-1}(\widetilde{xr_y}\widetilde{xr_y^{-1}}\widetilde{xr_y\rho(r_y^{-1}y)\widetilde{xy}^{-1}}) \\ &= \kappa'(x, r_y)\nu^{-1}(\widetilde{xr_y\rho(r_y^{-1}y)\widetilde{xy}^{-1}}) = \kappa'(x, r_y)\nu^{-1}(r_{xy}\rho(r_{xy}^{-1}xr_y)\rho(r_y^{-1}y)\widetilde{xy}^{-1}) = \kappa'(x, r_y).\end{aligned}$$

Für  $r \in R$  folgt

$$\kappa'(x, y) = \alpha_x(\kappa'(y, r))\kappa'(x, yr)\kappa'(xy, r)^{-1} = \alpha_x(\kappa'(y, r))\kappa'(x, r_{yr})\kappa'(xy, r)^{-1}.$$

Mit  $r$  läuft auch  $r_{yr}$  durch alle Elemente in  $R$ . Sei  $\varphi(x) := \prod_{r \in R} \kappa'(x, r)$  für  $x \in H$ . Dann gilt

$$\kappa'(x, y)^{|H:K|} = \prod_{r \in R} \alpha_x(\kappa'(y, r))\kappa'(x, r_{yr})\kappa'(xy, r)^{-1} = \alpha_x(\varphi(y))\varphi(x)\varphi(xy)^{-1}.$$

Dies zeigt  $(\kappa')^{|H:K|} \in P_\alpha$ . Wegen  $(\alpha, \kappa) \sim (\alpha, \kappa')$  ist auch  $\kappa^{|H:K|} \in P_\alpha$  nach Satz 4.19.

Die zweite Aussage folgt, indem man  $K = 1$  wählt.  $\square$

**Bemerkung 4.22.** Die folgenden beiden Sätze wurden nachträglich im Gruppentheorie-Skript mit alternativen Beweisen hinzugefügt.

**Satz 4.23** (GASCHÜTZ). *Sei  $G$  eine endliche Gruppe mit abelschem Normalteiler  $N$ . Sei  $N \leq H \leq G$  mit  $\text{ggT}(|N|, |G : H|) = 1$ , sodass  $N$  ein Komplement in  $H$  besitzt. Dann besitzt  $N$  ein Komplement in  $G$ .*

*Beweis.* Bekanntlich ist  $G$  eine Erweiterung von  $N$  mit  $G/N$ . Sei  $(\alpha, \kappa)$  das entsprechende Parametersystem. Nach Voraussetzung zerfällt die Erweiterung von  $N$  mit  $K := H/N$ . Daher ist  $\kappa_{K \times K} \in P_{\alpha_K}$ . Aus Satz 4.21 folgt  $\kappa^{|G:H|} \in P_\alpha$ . Wegen  $F_\alpha \leq C^2(G/N, N)$  ist auch  $\kappa^{|N|} \in P_\alpha$ . Aus  $\text{ggT}(|G : H|, |N|) = 1$  ergibt sich  $\kappa \in P_\alpha$ , d. h.  $G$  zerfällt.  $\square$

**Satz 4.24** (GASCHÜTZ). *Sei  $G$  eine endliche Gruppe mit abelschem Normalteiler  $N$ . Genau dann besitzt  $N$  ein Komplement in  $G$ , wenn  $N$  ein Komplement in  $P$  besitzt für jede Sylowgruppe  $P/N$  von  $G/N$ .*

*Beweis.* Ist  $K$  ein Komplement von  $N$  in  $G$ , so ist  $K \cap P$  ein Komplement von  $N$  in  $P$  für  $N \leq P \leq G$ , denn  $N(K \cap P) = NK \cap P = P$  und  $N \cap (K \cap P) \leq N \cap K = 1$ .

Nehmen wir nun umgekehrt an, dass  $N$  ein Komplement in  $P$  besitzt für alle Sylowgruppen  $P/N$  von  $G/N$ . Sei  $(\alpha, \kappa)$  das Parametersystem der Erweiterung  $G$ . Nach Satz 4.21 gilt  $\kappa^{|G:P|} \in P_\alpha$ . Dies zeigt  $\kappa^{|G/N|_{p'}} \in P_\alpha$  für alle Primteiler  $p$  von  $|G/N|$ . Da die Zahlen  $|G/N|_{p'}$  teilerfremd sind (wobei  $p$  über alle Primteiler von  $|G|$  läuft), folgt  $\kappa \in P_\alpha$ , d. h.  $G$  zerfällt.  $\square$

**Definition 4.25.** Sei nun  $N$  beliebig und  $(\alpha, \kappa)$  ein Parametersystem.

- Die Abbildung  $\omega : H \rightarrow \text{Out}(N)$ ,  $x \mapsto \alpha_x \text{Inn}(N)$  ist ein Homomorphismus, den man die *Paarung* von  $(\alpha, \kappa)$  nennt. Sei  $\text{Par}(\omega)$  die Menge der Parametersysteme mit Paarung  $\omega$ . Äquivalente Parametersysteme definieren die gleiche Paarung. Sei  $\overline{\text{Par}(\omega)}$  die entsprechende Menge der Äquivalenzklassen.
- Sei  $Z := Z(N)$ . Jeder Homomorphismus  $\omega : H \rightarrow \text{Out}(N)$ ,  $x \mapsto \omega_x \text{Inn}(N)$  definiert einen wohldefinierten Homomorphismus  $\omega_Z : H \rightarrow \text{Aut}(Z)$ ,  $x \mapsto (\omega_x)|_Z$ .

**Bemerkung 4.26.** Nicht zu jedem Homomorphismus  $\omega : H \rightarrow \text{Out}(N)$  muss ein entsprechendes Parametersystem existieren (Aufgabe 17).

**Satz 4.27.** Sei  $\omega : H \rightarrow \text{Out}(N)$  ein Homomorphismus mit  $\text{Par}(\omega) \neq \emptyset$ . Sei  $Z := Z(N)$  und  $\beta := \omega_Z$ . Dann operiert  $\overline{F_\beta}$  regulär auf  $\overline{\text{Par}(\omega)}$ . Insbesondere sind  $\overline{\text{Par}(\omega)}$  und  $\overline{F_\beta}$  gleichmächtig.

*Beweis.* Sei  $\lambda \in F_\beta$  und  $(\alpha, \kappa) \in \text{Par}(\omega)$ . Wegen  $\lambda(H \times H) \leq Z$  gilt

$$\begin{aligned}\alpha_x \alpha_y &= c_{\kappa(x,y)} \alpha_{xy} = c_{(\lambda\kappa)(x,y)} \alpha_{xy}, \\ (\lambda\kappa)(x,y)(\lambda\kappa)(xy,z) &= \alpha_x(\kappa(y,z))\beta_x(\lambda(y,z))(\lambda\kappa)(x,yz) = \alpha_x((\lambda\kappa)(y,z))(\lambda\kappa)(x,yz)\end{aligned}$$

für  $x, y, z \in H$ . Daher ist  $(\alpha, \lambda\kappa) \in \text{Par}(\omega)$ . Man sieht leicht, dass  ${}^\lambda(\alpha, \kappa) := (\alpha, \lambda\kappa)$  eine Operation von  $F_\beta$  auf  $\text{Par}(\omega)$  definiert. Sei  $(\alpha', \kappa') \sim (\alpha, \kappa)$ . Dann existiert  $\varphi \in C^1(H, N)$  mit

$$\begin{aligned}\alpha'_x &= c_{\varphi(x)} \alpha_x, \\ (\lambda\kappa')(x,y) &= \varphi(x) \alpha_x(\varphi(y)) (\lambda\kappa)(x,y) \varphi(xy)^{-1}.\end{aligned}$$

Also ist  ${}^\lambda(\alpha, \kappa) \sim {}^\lambda(\alpha', \kappa')$  und  $F_\beta$  operiert auf  $\overline{\text{Par}(\omega)}$ . Sei  $\lambda \in P_\beta$ , also  $\lambda(x,y) = \delta(x)\beta_x(\delta(y))\delta(xy)^{-1}$  für ein  $\delta \in C^1(H, Z)$ . Dann ist

$$(\lambda\kappa)(x,y) = \delta(x) \alpha_x(\delta(y)) \kappa(x,y) \delta(xy)^{-1},$$

d. h.  ${}^\lambda(\alpha, \kappa) \sim (\alpha, \kappa)$ . Somit operiert  $P_\beta$  trivial auf  $\overline{\text{Par}(\omega)}$  und man erhält eine wohldefinierte Operation von  $\overline{F_\beta}$  auf  $\overline{\text{Par}(\omega)}$ . Sei  $\lambda \in F_\beta$  mit  ${}^\lambda(\alpha, \kappa) \sim (\alpha, \kappa)$ . Dann existiert  $\varphi \in C^1(H, N)$  mit

$$\begin{aligned}\alpha_x &= c_{\varphi(x)} \alpha_x, \\ (\lambda\kappa)(x,y) &= \varphi(x) \alpha_x(\varphi(y)) \kappa(x,y) \varphi(xy)^{-1}\end{aligned}$$

für  $x, y \in H$ . Es folgt  $\varphi(H) \leq Z$  und  $\lambda(x,y) = \varphi(x)\beta_x(\varphi(y))\varphi(xy)^{-1}$ . Dies zeigt  $\lambda \in P_\beta$ . Daher operiert  $\overline{F_\beta}$  fixpunktfrei auf  $\overline{\text{Par}(\omega)}$ . Für die Transitivität seien  $(\alpha, \kappa), (\alpha', \kappa') \in \text{Par}(\omega)$ . Wegen  $\alpha_x \text{Inn}(N) = \omega(x) = \alpha'_x \text{Inn}(N)$  für  $x \in H$  existiert  $\varphi \in C^1(H, N)$  mit  $\alpha_x = c_{\varphi(x)} \alpha'_x$  für  $x \in H$ . Wir können also  $(\alpha', \kappa')$  durch ein äquivalentes Parametersystem der Form  $(\alpha, \kappa')$  ersetzen. Nun gilt

$$c_{\kappa(x,y)} \alpha_{xy} = \alpha_x \alpha_y = c_{\kappa'(x,y)} \alpha_{xy}$$

und  $\lambda := \kappa^{-1}\kappa' : H \times H \rightarrow Z$ . Wegen

$$\begin{aligned}\lambda(x,y)\lambda(xy,z) &= \kappa(xy,z)^{-1}\lambda(x,y)\kappa'(xy,z) = \kappa(xy,z)^{-1}\kappa(x,y)^{-1}\kappa'(x,y)\kappa'(xy,z) \\ &= (\alpha_x(\kappa(y,z))\kappa(x,yz))^{-1}\alpha_x(\kappa'(y,z))\kappa'(x,yz) \\ &= \kappa(x,yz)^{-1}\alpha_x(\kappa(y,z)^{-1}\kappa'(y,z))\kappa'(x,yz) = \kappa(x,yz)^{-1}\beta_x(\lambda(y,z))\kappa'(x,yz) \\ &= \beta_x(\lambda(y,z))\kappa(x,yz)^{-1}\kappa'(x,yz) = \beta_x(\lambda(y,z))\lambda(x,yz)\end{aligned}$$

für  $x, y \in H$  gilt  $\lambda \in F_\beta$  und  ${}^\lambda(\alpha, \kappa) = (\alpha, \kappa\lambda) = (\alpha, \kappa')$ . Also operiert  $\overline{F_\beta}$  regulär auf  $\overline{\text{Par}(\omega)}$ .  $\square$

**Folgerung 4.28.** Sei  $Z(N) = 1$ . Dann gilt:

- (i) Für jeden Homomorphismus  $\omega : H \rightarrow \text{Out}(N)$  gilt  $|\overline{\text{Par}(\omega)}| = 1$ .
- (ii) Besitzt  $\text{Inn}(N) \cong N$  ein Komplement in  $\text{Aut}(N)$ , so zerfällt jede Erweiterung von  $N$ .

*Beweis.*

- (i) Sei  $\omega(x) = \alpha_x \text{Inn}(N)$  für  $x \in H$ . Wegen  $\alpha_{xy} \text{Inn}(N) = \omega(xy) = \omega(x)\omega(y) = \alpha_x \alpha_y \text{Inn}(N)$  existieren  $\kappa(x, y) \in N$  mit  $\alpha_x \alpha_y = c_{\kappa(x, y)} \alpha_{xy}$  für alle  $x, y \in H$ . Dabei gilt

$$\begin{aligned} c_{\kappa(x, y) \kappa(xy, z)} \alpha_{xyz} &= c_{\kappa(x, y)} \alpha_{xy} \alpha_z = \alpha_x \alpha_y \alpha_z = \alpha_x c_{\kappa(y, z)} \alpha_{yz} \\ &= c_{\alpha_x(\kappa(y, z))} \alpha_x \alpha_{yz} = c_{\alpha_x(\kappa(y, z)) \kappa(x, yz)} \alpha_{xyz}. \end{aligned}$$

Aus  $\text{Inn}(N) \cong N/\text{Z}(N) \cong N$  folgt  $\kappa(x, y) \kappa(xy, z) = \alpha_x(\kappa(y, z)) \kappa(x, yz)$ . Dies zeigt  $(\alpha, \kappa) \in \text{Par}(\omega) \neq \emptyset$  und  $|\text{Par}(\omega)| = 1$  nach Satz 4.27.

- (ii) Nach Voraussetzung existiert ein Homomorphismus  $\tau : \text{Out}(N) \rightarrow \text{Aut}(N)$  mit  $\tau(\gamma) \text{Inn}(N) = \gamma$  für alle  $\gamma \in \text{Out}(N)$ . Jeder Homomorphismus  $\omega : H \rightarrow \text{Out}(N)$  lässt sich also zu einem Homomorphismus  $\alpha := \tau\omega : H \rightarrow \text{Aut}(N)$  liften (d. h.  $\omega(x) = \alpha_x \text{Inn}(N)$  für alle  $x \in H$ ). Nach (i) ist die zerfallende Erweiterung bzgl.  $(\alpha, 1)$  die einzige Erweiterung mit Paarung  $\omega$ .  $\square$

**Beispiel 4.29.** Ist  $N$  vollständig, d. h.  $\text{Z}(N) = 1 = \text{Out}(N)$ , so gibt es nur die Erweiterungen  $N \times H$ . Dies wurde bereits in GT-Aufgabe 21 gezeigt.

**Bemerkung 4.30** (GAP). Die Anzahl der Erweiterungen einer nicht-abelschen Gruppe  $N$  zu einer Paarung  $\omega : K \rightarrow \text{Out}(N)$  lässt sich mit dem `hap`-Paket bestimmen:

```
LoadPackage("hap", false); #lädt weitere Pakete
N:=QuaternionGroup(8);;
H:=AutomorphismGroup(N);;
NH:=SemidirectProduct(H, N);;
omega:=GOuterGroup(NH, Image(Embedding(NH, 2))); #definiert Paarung H -> Out(N)
beta:=Center(omega); #zugehöriges Faktorensystem H -> Aut(Z(N))
A:=ActingGroup(beta);; #Urbild von beta
R:=ResolutionFiniteGroup(A, 3);; #drei Glieder einer Auflösung
C:=HomToGModule(R, alpha);; #zugehöriger Kettenkomplex
Cohomology(C, 2); #Ordnungen der zyklischen Faktoren von F_beta
```

**Satz 4.31** (JOHNSON-ZASSENHAUS). Zwei Erweiterungen  $N \xrightarrow{\nu_i} G_i \xrightarrow{\pi_i} H$  ( $i = 1, 2$ ) sind genau dann äquivalent, wenn für jede Sylowgruppe  $P$  von  $H$  die Erweiterungen  $\pi_1^{-1}(P)$  und  $\pi_2^{-1}(P)$  von  $N$  mit  $P$  äquivalent sind.

*Beweis.* Seien  $G_1$  und  $G_2$  äquivalent mittels  $\gamma : G_1 \rightarrow G_2$ . Für eine Primzahl  $p$  und  $P \in \text{Syl}_p(H)$  sei  $P_i := \pi_i^{-1}(P) \leq G_i$  und  $\delta := \gamma_{P_1}$ . Dann gilt  $\delta(P_1) = \gamma(\pi_1^{-1}(P)) = \gamma(\gamma^{-1}(\pi_2^{-1}(P))) = P_2$ ,  $\delta\nu_1 = \nu_2$  und  $(\pi_2)_{|P_2}\delta = (\pi_1)_{|P_1}$ . Also sind  $P_1$  und  $P_2$  äquivalent.

Nehmen wir nun an, dass  $P_1$  und  $P_2$  für alle Sylowgruppen  $P$  von  $H$  äquivalent sind. Seien  $(\alpha, \kappa)$  und  $(\alpha', \kappa')$  die Parametersysteme von  $G_1$  bzw.  $G_2$ . Dann sind  $(\alpha_P, \kappa_{P \times P})$  und  $(\alpha'_P, \kappa'_{P \times P})$  äquivalent und es folgt  $\alpha_x \text{Inn}(N) = \alpha'_x \text{Inn}(N)$  für alle  $x \in P$ . Da  $H$  von seinen Sylowgruppen erzeugt wird, besitzen  $(\alpha, \kappa)$  und  $(\alpha', \kappa')$  die gleiche Paarung  $\omega$ . Sei  $Z := \text{Z}(N)$  und  $\beta := \omega_Z$ . Nach Satz 4.27 existiert  $\lambda \in F_\beta$  mit  $(\alpha', \kappa') \sim (\alpha, \lambda\kappa)$ . Nach Voraussetzung gilt  $\lambda_P \in P_{\beta_P}$  für jede Sylowgruppe  $P$  von  $H$ , d. h. die Erweiterung von  $Z$  mit  $P$  zerfällt. Mit Satz 4.24 zerfällt nun auch die Erweiterung von  $Z$  mit  $H$ , d. h.  $\lambda \in P_\beta$ . Dies zeigt  $(\alpha', \kappa') \sim (\alpha, \lambda\kappa) \sim (\alpha, \kappa)$ .  $\square$

**Bemerkung 4.32.** Satz 4.31 eignete sich nicht, um den Satz 4.24 von Gaschütz für nicht-abelsches  $N$  zu beweisen, denn nicht zu jedem Homomorphismus  $\omega : H \rightarrow \text{Out}(N)$  existiert eine zerfallende Erweiterung, mit der man vergleichen könnte (Aufgabe 17). Selbst wenn eine solche zerfallende Erweiterung von  $H$  mit  $N$  existiert, so muss die eingeschränkte Erweiterung von  $H$  mit  $Z(N)$  nicht unbedingt zerfallen. Zum Beispiel ist  $G = D_8 * C_4$  eine zerfallende Erweiterung von  $N = D_8$  mit  $H = C_2$ , aber die eingeschränkte Erweiterung  $C_G(N) = C_4$  von  $Z(N) \cong C_2$  mit  $H$  zerfällt nicht. Ein ähnliches Beispiel zeigt, dass Satz 4.24 für nicht-abelsche Gruppen  $N$  im Allgemeinen falsch ist (Aufgabe 15).

**Definition 4.33.** Ist  $N$  abelsch und  $\alpha : H \rightarrow \text{Aut}(N)$  trivial, so ist

$$\begin{aligned} Z^2(H, N) &:= F_\alpha = \{\kappa \in C^2(H, N) : \kappa(x, y)\kappa(xy, z) = \kappa(y, z)\kappa(x, yz)\}, \\ B^2(H, N) &:= P_\alpha = \{\kappa \in Z^2(H, N) : \exists \varphi \in C^1(H, N) : \kappa(x, y) = \varphi(x)\varphi(y)\varphi(xy)^{-1}\}, \\ H^2(H, N) &:= \overline{F_\alpha}. \end{aligned}$$

Die Elemente von  $Z^2(H, N)$  nennt man *2-Kozyklen*. Für  $\varphi \in C^1(H, N)$  sei  $\partial\varphi \in B^2(H, N)$  mit  $\partial\varphi(x, y) := \varphi(x)\varphi(y)\varphi(xy)^{-1}$  für  $x, y \in H$ . Man nennt  $H^2(H, N)$  die zweite *Kohomologiegruppe* von  $H$  mit Werten in  $N$ . Ist  $G$  eine entsprechende Erweiterung, so gilt  $\nu(N) \leq Z(G)$  (vgl. Bemerkung 4.8). Man spricht daher von *zentralen* Erweiterungen. Man nennt  $G$  eine *Schur-Erweiterung* von  $H$ , wenn zusätzlich  $\nu(N) \leq G'$  gilt. Der *Schur-Multiplikator* von  $H$  ist  $M(H) := H^2(H, \mathbb{C}^\times)$ .

**Beispiel 4.34.**

- (i) Sei  $G$  eine nicht-abelsche endliche nilpotente Gruppe. Nach GT-Satz 3.14 gilt  $G' \cap Z(G) \neq 1$ . Daher ist  $G$  eine Schur-Erweiterung einer kleineren Gruppe. Insbesondere sind  $D_8$  und  $Q_8$  Schur-Erweiterungen von  $C_2^2$ .
- (ii) Jede quasiainfache Gruppe ist eine Schur-Erweiterung einer einfachen Gruppe.

**Bemerkung 4.35.**

- (i) Im Folgenden studieren wir die möglichen Schur-Erweiterungen einer festen Gruppe  $H$ , die wir zu diesem Zweck in  $G$  umbenennen.
- (ii) Sei  $\widehat{G}$  eine Schur-Erweiterung von  $G$  mit  $1 \neq Z \leq \widehat{G}' \cap Z(\widehat{G})$  und  $\widehat{G}/Z \cong G$ . Besitzt  $Z$  ein Komplement  $K$  in  $\widehat{G}$ , so wäre  $\widehat{G} = Z \times K$  und  $Z \not\leq 1 \times K' = \widehat{G}'$ . Echte Schur-Erweiterungen sind daher nicht zerfallend.
- (iii) Ist  $n := |G| < \infty$ , so gilt  $\exp(M(G)) \mid n$  nach Satz 4.21. Die Werte von  $\kappa \in M(G)$  sind also  $n$ -te Einheitswurzeln. Dies zeigt  $|M(G)| \leq |Z^2(G, \mathbb{C}^\times)| \leq n^{n^2} < \infty$ . Im Folgenden sei  $G$  stets endlich und  $A$  abelsch. Die nächsten Sätze wurden in der Gruppentheorie teils mit Ad-Hoc-Argumenten bewiesen (Kapitel 11).

**Lemma 4.36.** Für  $\kappa \in Z^2(G, A)$  ist die Abbildung  $\Psi_\kappa : \text{Hom}(A, \mathbb{C}^\times) \rightarrow M(G)$ ,  $\lambda \mapsto (\lambda \circ \kappa)B^2(G, \mathbb{C}^\times)$  ein Homomorphismus.

*Beweis.* Für  $\lambda \in \text{Hom}(A, \mathbb{C}^\times)$  und  $x, y, z \in G$  ist

$$(\lambda \circ \kappa)(x, y)(\lambda \circ \kappa)(xy, z) = \lambda(\kappa(x, y)\kappa(xy, z)) = \lambda(\kappa(y, z)\kappa(x, yz)) = (\lambda \circ \kappa)(y, z)(\lambda \circ \kappa)(x, yz)$$

und  $\lambda \circ \kappa \in Z^2(G, \mathbb{C}^\times)$ . Für  $\lambda, \mu \in \text{Hom}(A, \mathbb{C}^\times)$  ist  $(\lambda\mu) \circ \kappa = (\lambda \circ \kappa)(\mu \circ \kappa)$ . Also ist  $\Psi_\kappa$  tatsächlich ein Homomorphismus.  $\square$

**Lemma 4.37.** Für eine endliche abelsche Gruppe  $A$  ist  $\text{Hom}(A, \mathbb{C}^\times) \cong A$ .

*Beweis.* Sei  $A = \langle a_1 \rangle \oplus \dots \oplus \langle a_n \rangle$  und  $d_i := |\langle a_i \rangle|$  für  $i = 1, \dots, n$ . Sei  $\zeta_i \in \mathbb{C}$  eine primitive  $d_i$ -te Einheitswurzel. Für jedes  $\lambda \in \text{Hom}(A, \mathbb{C}^\times)$  gilt dann  $\lambda(a_i) \in \langle \zeta_i \rangle$ . Umgekehrt definiert jede Wahl  $\lambda(a_i) = \zeta_i^{k_i}$  einen Homomorphismus. Dies zeigt  $|\text{Hom}(A, \mathbb{C}^\times)| = d_1 \dots d_n = |A|$ . Wir definieren  $F: A \rightarrow \text{Hom}(A, \mathbb{C}^\times)$  mit  $F(a_1^{k_1} \dots a_n^{k_n})(a_i) := \zeta_i^{k_i}$  für  $i = 1, \dots, n$ . Man zeigt leicht, dass  $F$  ein wohldefinierter Isomorphismus ist.  $\square$

**Satz 4.38 (SCHUR).** Sei  $\widehat{G}$  eine Schur-Erweiterung von  $G$  mit  $\widehat{G}/Z \cong G$ . Dann ist  $Z$  zu einer Untergruppe von  $M(G)$  isomorph. Insbesondere ist  $|\widehat{G}| \leq |G||M(G)|$  und  $G$  besitzt nur endlich viele Schur-Erweiterungen bis auf Isomorphie.

*Beweis.* Für  $x \in G$  sei  $\widehat{x} \in \widehat{G}$  mit  $\widehat{x}Z = x$  und  $\widehat{1} = 1$ . Sei  $\kappa \in Z^2(G, Z)$  das dazugehörige normalisierte Faktorensystem von  $\widehat{G}$  (Lemma 4.5). Es gilt  $\kappa(x, y) = \widehat{xy}\widehat{xy}^{-1}$  für  $x, y \in G$ . Nach Lemma 4.37 genügt es zu zeigen, dass die Abbildung  $\Psi_\kappa$  aus Lemma 4.36 injektiv ist. Sei also  $\lambda \in \text{Hom}(Z, \mathbb{C}^\times)$  mit  $\lambda\kappa = \partial\gamma$  für ein  $\gamma \in C^1(G, \mathbb{C}^\times)$ . Dann ist

$$\gamma(1) = \gamma(1)\gamma(1)\gamma(1)^{-1} = \partial\gamma(1) = \lambda(\kappa(1, 1)) = \lambda(1) = 1.$$

Sei  $\widehat{\lambda}: \widehat{G} \rightarrow \mathbb{C}^\times$  mit  $\widehat{\lambda}(\widehat{xa}) := \gamma(x)\lambda(a)$  für  $x \in G$  und  $a \in Z$ . Wegen  $\widehat{\lambda}(a) = \widehat{\lambda}(\widehat{1a}) = \lambda(a)$  ist  $\widehat{\lambda}$  eine Fortsetzung von  $\lambda$ . Für  $x, y \in G$  und  $a, b \in Z$  gilt

$$\begin{aligned} \widehat{\lambda}(\widehat{xa} \cdot \widehat{yb}) &= \widehat{\lambda}(\widehat{xyab}) = \widehat{\lambda}(\kappa(x, y)\widehat{xyab}) = \lambda(\kappa(x, y))\gamma(xy)\lambda(a)\lambda(b) \\ &= \gamma(x)\gamma(y)\gamma(xy)^{-1}\gamma(xy)\lambda(a)\lambda(b) = \gamma(x)\lambda(a)\gamma(y)\lambda(b) = \widehat{\lambda}(\widehat{xa})\widehat{\lambda}(\widehat{yb}). \end{aligned}$$

Also ist  $\widehat{\lambda}$  ein Homomorphismus mit  $\widehat{G}/\text{Ker}(\widehat{\lambda}) \leq \mathbb{C}^\times$ . Es folgt  $Z \leq \widehat{G}' \leq \text{Ker}(\widehat{\lambda})$ . Dies zeigt  $\lambda = 1$  und wir sind fertig.  $\square$

**Definition 4.39.** Eine Schur-Erweiterung  $\widehat{G}$  von  $G$  heißt *maximal*, falls  $|\widehat{G}| = |G||M(G)|$ .

**Satz 4.40 (SCHUR).** Jede endliche Gruppe  $G$  besitzt eine maximale Schur-Erweiterung.

*Beweis.* Nach Bemerkung 4.35 ist  $M(G) = \langle \overline{\kappa_1} \rangle \oplus \dots \oplus \langle \overline{\kappa_n} \rangle$ . Sei  $d_i := |\langle \overline{\kappa_i} \rangle|$  und  $A_i \leq \mathbb{C}^\times$  mit  $|A_i| = d_i$  für  $i = 1, \dots, n$ . Sei  $\kappa_i \in Z^2(G, \mathbb{C}^\times)$  mit  $\kappa_i B^2(G, \mathbb{C}^\times) = \overline{\kappa_i}$ . Dann ist  $\kappa_i^{d_i} = \partial\gamma_i$  für ein  $\gamma_i \in C^1(G, \mathbb{C}^\times)$ . Sei  $\delta_i(x) \in \mathbb{C}^\times$  mit  $\delta_i(x)^{d_i} = \gamma_i(x)^{-1}$  für  $x \in G$ . Nachdem wir  $\kappa_i$  durch  $\kappa_i \partial\delta_i$  ersetzt haben, gilt  $\kappa_i^{d_i} = 1$  für  $i = 1, \dots, n$ . Insbesondere ist  $\kappa_i \in Z^2(G, A_i)$  für  $i = 1, \dots, n$ . Nach Lemma 4.11 dürfen wir auch  $\kappa_i(x, 1) = \kappa_i(1, x) = 1$  für  $x \in G$  annehmen. Sei  $A := A_1 \times \dots \times A_n \cong M(G)$  und  $\kappa \in C^2(G, A)$  mit  $\kappa(x, y) = (\kappa_1(x, y), \dots, \kappa_n(x, y))$  für  $x, y \in G$ . Offenbar ist dann  $\kappa \in Z^2(G, A)$  mit  $\kappa(1, x) = \kappa(x, 1) = 1$  für  $x \in G$ .

Sei  $\widehat{G} = A \times G$  die zentrale Erweiterung von  $A$  mit  $G$  bzgl.  $\kappa$  (Lemma 4.7). Mit  $\widehat{x} := (1, x) \in \widehat{G}$  für  $x \in G$  gilt  $\kappa(x, y) = \widehat{xy}\widehat{xy}^{-1}$ . Sei  $\pi_i: A \rightarrow A_i \leq \mathbb{C}^\times$  die  $i$ -te Projektion. Mit der Abbildung  $\Psi_\kappa$  aus Lemma 4.36 gilt dann  $\Psi_\kappa(\pi_i) = (\pi_i \circ \kappa)B^2(G, \mathbb{C}^\times) = \overline{\kappa_i}$  für  $i = 1, \dots, n$ . Wegen  $M(G) = \langle \overline{\kappa_1}, \dots, \overline{\kappa_n} \rangle$  ist  $\Psi_\kappa$  surjektiv. Nach Lemma 4.37 ist  $\text{Hom}(A, \mathbb{C}^\times) \cong A \cong M(G)$ . Daher ist  $\Psi_\kappa$  auch injektiv. Nach dem Hauptsatz über endliche abelsche Gruppen (angewendet auf  $\widehat{G}/\widehat{G}'$ ) existieren Normalteiler  $N_1, \dots, N_s \trianglelefteq \widehat{G}$  mit  $\widehat{G}' = N_1 \cap \dots \cap N_s$ , sodass  $\widehat{G}/N_i$  zyklisch ist für  $i = 1, \dots, s$ .



Nehmen wir  $A \not\subseteq \widehat{G}'$  an. Dann existiert ein  $i$  mit  $A \not\subseteq N_i$ . Indem man  $\widehat{G}/N_i$  in  $\mathbb{C}^\times$  einbettet, erhält man einen Homomorphismus  $\varphi : \widehat{G} \rightarrow \widehat{G}/N_i \rightarrow \mathbb{C}^\times$  mit  $\varphi(A) \neq 1$ . Die Einschränkung  $\varphi_A$  ist also ein nicht-triviales Element in  $\text{Hom}(A, \mathbb{C}^\times)$ . Für  $x \in G$  setzen wir  $\varphi(x) := \varphi(\widehat{x})$ . Für  $x, y \in G$  gilt

$$\Psi_\kappa(x, y) = \varphi(\kappa(x, y)) = \varphi(\widehat{xyxy}^{-1}) = \varphi(x)\varphi(y)\varphi(xy)^{-1} = \partial\varphi(x, y).$$

Dies liefert  $\Psi_\kappa(\varphi_A) = 1$  im Widerspruch zur Injektivität von  $\Psi_\kappa$ . Also ist  $A \subseteq \widehat{G}'$  und  $\widehat{G}$  ist eine Schur-Erweiterung von  $G$ .  $\square$

**Bemerkung 4.41** (GAP). In GAP gibt es mehrere Möglichkeiten den Schur-Multiplikator und eine maximale Schur-Erweiterung zu bestimmen:

```
G:=AlternatingGroup(7);;
AbelianInvariantsMultiplier(G); #Ordnungen der zyklischen Faktoren von M(G)
S:=SchurCover(G); #maximale Schur-Erweiterung
S:=Image(IsomorphismPermGroup(S));; #effizientere Darstellung als Permutationsgruppe
NrMovedPoints(S); #Grad der Permutationsgruppe
S:=Image(SmallerDegreePermutationRepresentation(S));; #noch effizientere Darstellung
NrMovedPoints(S);
StructureDescription(S); #= C6.A7

epi:=EpimorphismSchurCover(G, [3]); #Epimorphismus G-hat -> G mit Kern O3(M(G))
S:=Source(epi); #nicht maximale Schur-Erweiterung G-hat
M:=Kernel(epi); #O3(M(G))

P:=SmallGroup(256, 111);;
SchurCovers(P); #alle maximalen Schur-Erweiterungen, nur für p-Gruppen

LoadPackage("cohomolo", false);
G:=PSL(3, 4);;
for p in PrimeDivisors(Size(G)) do
  chr:=CHR(G, p);;
  Print(SchurMultiplier(chr)); #= Op(M(G)) schneller als AbelianInvariantsMultiplier
od; #insgesamt folgt M(G) = O2(M(G)) + O3(M(G)) = C12 x C4

LoadPackage("hap", false); #lädt weitere Pakete
GroupHomology(G, 2); #M(G) = H2(G, Z)
```

**Satz 4.42.** Sei  $G$  eine beliebige Gruppe mit  $|G : Z(G)| < \infty$ . Dann ist  $|G'| < \infty$ .

*Beweis (Rosenlicht).* Sei  $Z := Z(G)$  und  $n := |G : Z| < \infty$ . Sei  $R$  ein Repräsentantensystem für  $G/Z$ . Für  $\Gamma := \{[r, s] : r, s \in R\}$  gilt  $|\Gamma| \leq |R|^2 = |G/Z|^2 = n^2$ . Für  $r, s \in R$  und  $z \in Z$  gilt  $[rz, s] = [r, s] = [r, sz]$ . Jedes Element  $g \in G'$  hat also die Form  $g = c_1 \dots c_m$  mit  $c_1, \dots, c_m \in \Gamma$ . Es genügt zu zeigen, dass man dabei  $m \leq n^3$  wählen kann (dann folgt  $|G'| \leq n^{2n^3} < \infty$ ). Nehmen wir  $m > n^3$  an. Dann existiert ein  $\gamma \in \Gamma$  mit  $|\{i \in \{1, \dots, m\} : c_i = \gamma\}| > n$ . Wegen  $c_i c_{i+1} = c_{i+1} (c_{i+1}^{-1} c_i c_{i+1}) = c_{i+1} \delta$  mit  $\delta \in \Gamma$  können wir  $c_1 = \dots = c_{n+1} = \gamma$  annehmen. Im Widerspruch zur Minimalität von  $m$  werden wir zeigen, dass  $\gamma^{n+1}$  ein Produkt von  $n$  Kommutatoren ist. Sei dafür  $\gamma = [r, s]$  mit  $r, s \in R$ . Wegen  $\gamma^n = \gamma^{|G:Z|} \in Z$  ist

$$\gamma^{n+1} = \gamma \gamma^n = \gamma s \gamma^n s^{-1} = \gamma s \gamma s^{-1} (s \gamma s^{-1})^{n-1} = [r, s] s [r, s] s^{-1} [s r s^{-1}, s]^{n-1} = [r, s^2] [s r s^{-1}, s]^{n-1}. \quad \square$$

**Satz 4.43.** Sei  $G = F/N$  eine endliche Gruppe mit  $F = F_n$  (Satz 1.11). Dann gilt:

- (i)  $N/[F, N]$  ist eine endlich erzeugte abelsche Gruppe mit freiem Teil vom Rang  $n$  und Torsionsteil  $(F' \cap N)/[F, N]$ .
- (ii) Für  $N/[F, N] = (F' \cap N)/[F, N] \oplus K/[F, N]$  ist  $F/K$  eine maximale Schur-Erweiterung von  $G$ .
- (iii) Für jede Schur-Erweiterung  $\widehat{G}$  von  $G$  existiert ein  $L \trianglelefteq F$  mit  $N = (F' \cap N)L$  und  $\widehat{G} \cong F/L$ . Insbesondere ist  $\widehat{G}$  eine Faktorgruppe einer maximalen Schur-Erweiterung.
- (iv)  $M(G) \cong (F' \cap N)/[F, N]$  (Hopf-Formel).

*Beweis.*

- (i) Nach Satz 2.11 ist  $N$  endlich erzeugt. Mit  $N \trianglelefteq F$  ist  $[F, N] \trianglelefteq F$  und  $[F, N] \leq F' \cap N$ . Wegen  $N/[F, N] \leq Z(F/[F, N])$  hat  $Z(F/[F, N])$  endlichen Index in  $F/[F, N]$ . Nach Satz 4.42 ist  $F'/[F, N]$  endlich. Daher ist auch  $(F' \cap N)/[F, N]$  endlich. Wegen  $N' \leq [F, N]$  ist  $N/[F, N]$  abelsch. Weiter ist

$$(N/[F, N])/((F' \cap N)/[F, N]) \cong N/(F' \cap N) \cong NF'/F' \leq F/F'.$$

Nach Beispiel 1.17 ist  $F/F'$  eine freie abelsche Gruppe vom Rang  $n$ . Wegen  $|F/N| = |G| < \infty$  muss auch  $NF'/F'$  eine freie abelsche Gruppe vom Rang  $n$  sein. Daher ist  $(F' \cap N)/[F, N]$  der Torsionsteil von  $N/[F, N]$ .

- (ii) Wegen  $N/[F, N] \leq Z(F/[F, N])$  ist  $K \trianglelefteq F$ . Sei  $\widehat{G} := F/K$  und  $Z := N/K$ . Dann gilt  $\widehat{G}/Z \cong F/N \cong G$  und  $Z \leq Z(\widehat{G})$  wegen  $[F, N] \leq K$ . Aus  $N/[F, N] \leq F'K/[F, N]$  folgt

$$Z = N/K \leq F'K/K = (F/K)' = \widehat{G}'.$$

Also ist  $\widehat{G}$  eine Schur-Erweiterung mit  $Z \cong (F' \cap N)/[F, N]$ . Aus Satz 4.38 folgt  $|M(G)| \geq |(F' \cap N)/[F, N]|$ . Für die umgekehrte Ungleichung zeigen wir erst (iii).

- (iii) Seien  $\alpha: F \rightarrow G$  und  $\beta: \widehat{G} \rightarrow G$  die kanonischen Epimorphismen mit  $N = \text{Ker}(\alpha)$  und  $Z := \text{Ker}(\beta)$ . Da  $F$  frei ist, existiert ein Homomorphismus  $\rho: F \rightarrow \widehat{G}$  mit  $\beta\rho = \alpha$ . Es gilt dann  $\widehat{G} = \rho(F)Z$  und  $Z \leq \widehat{G}' \leq \rho(F)' \leq \rho(F)$ , also  $\rho(F) = \widehat{G}$ . Offenbar ist  $L := \text{Ker}(\rho) \leq \text{Ker}(\alpha) = N$ . Wegen  $\beta\rho(N) = \alpha(N) = 1$  ist  $\rho(N) \leq \text{Ker}(\beta) = Z$ . Es gilt sogar Gleichheit, denn

$$|\widehat{G} : \rho(N)| = |F/L : N/L| = |G| = |\widehat{G} : Z|.$$

Dies zeigt  $\rho([F, N]) \leq [\widehat{G}, Z] = 1$  und  $[F, N] \leq L$ . Aus  $\rho(N) = Z \leq \widehat{G}' = \rho(F')$  folgt außerdem  $N \leq LF'$  und  $L(F' \cap N) = LF' \cap N = N$  nach Dedekind. Die Ungleichung

$$|Z| = |\rho(N)| = |N : L| = |F' \cap N : F' \cap L| \leq |(F' \cap N)/[F, N]|$$

zeigt, dass die in (ii) konstruierte Schur-Erweiterung tatsächlich maximal ist.

Nach (i) und dem Hauptsatz über endlich erzeugte abelsche Gruppen gilt

$$L/[F, N] = (L \cap F' \cap N)/[F, N] \oplus M/[F, N],$$

wobei  $(L \cap F' \cap N)/[F, N]$  der Torsionsteil ist. Nach (ii) ist  $F/M$  eine maximale Schur-Erweiterung und  $\widehat{G} \cong F/L \cong (F/M)/(L/M)$ .

- (iv) Folgt aus dem Beweis von (ii). □

**Satz 4.44.** Sei  $G = \langle x_1, \dots, x_n \mid r_1, \dots, r_k \rangle$  endlich. Dann lässt sich  $M(G)$  mit  $k - n$  Elementen erzeugen. Insbesondere ist  $M(G) = 1$  falls  $n = k$ .

*Beweis.* Nach Satz 1.21 ist  $n \leq k$ . Sei  $F$  die freie Gruppe bzgl.  $x_1, \dots, x_n$  und  $N := \langle r_1, \dots, r_k \rangle^F$ . Wegen  $N/[F, N] \leq Z(F/[F, N])$  ist  $N/[F, N] = \langle \bar{r}_1, \dots, \bar{r}_k \rangle$ , wobei  $\bar{r}_i := r_i[F, N]$ . Nach Satz 4.43 hat der freie Teil von  $N/[F, N]$  Rang  $n$  und der Torsionsteil ist zu  $M(G)$  isomorph. Also lässt sich  $M(G)$  mit  $k - n$  Elementen erzeugen.  $\square$

**Beispiel 4.45.** Nach Satz 4.44 und Aufgabe 2 ist  $M(C_m) = 1 = M(Q_{2^n})$  für  $m \geq 1$  und  $n \geq 3$  (vgl. GT-Beispiel 11.37).

**Satz 4.46.** Seien  $\hat{G}_1, \hat{G}_2$  maximale Schur-Erweiterungen von  $G$  mit  $\hat{G}_1/Z_1 \cong G \cong \hat{G}_2/Z_2$ . Dann gilt

- (i) (SCHUR)  $\hat{G}'_1 \cong \hat{G}'_2$  und  $\hat{G}_1/\hat{G}'_1 \cong G/G' \cong \hat{G}_2/\hat{G}'_2$ .
- (ii) (GASCHÜTZ)  $\hat{G}_1/Z(\hat{G}_1) \cong \hat{G}_2/Z(\hat{G}_2)$ .
- (iii) (READ)  $Z(\hat{G}_1)/Z_1 \cong Z(\hat{G}_2)/Z_2$ .

*Beweis.* Sei  $G = F/N$ ,  $K_i \trianglelefteq F$  und  $\hat{G}_i \cong F/K_i$  wie in Satz 4.43. Wir zeigen, dass die angegebenen Gruppen nicht von  $i$  abhängen.

(i) Es gilt

$$\begin{aligned} \hat{G}'_i &\cong F'K_i/K_i \cong F'/(F' \cap K_i) = F'/(F' \cap N \cap K_i) = F'/[F, N], \\ \hat{G}_i/\hat{G}'_i &\cong (\hat{G}_i/Z_i)/(\hat{G}'_i/Z_i) \cong G/G'. \end{aligned}$$

- (ii) Für  $L/[F, N] := Z(F/[F, N])$  gilt  $[F, L] \leq [F, N] \leq K_i$  und  $L/K_i \leq Z(F/K_i)$ . Sei umgekehrt  $xK_i \in Z(F/K_i)$ . Dann ist  $[x, F] \leq K_i \cap F' = K_i \cap F' \cap N = [F, N]$  und es folgt  $x[F, N] \in Z(F/[F, N]) = L/[F, N]$ . Dies zeigt

$$\hat{G}_i/Z(\hat{G}_i) \cong (F/K_i)/Z(F/K_i) = (F/K_i)/(L/K_i) \cong F/L.$$

(iii) Mit den Bezeichnungen aus (ii) gilt

$$Z(\hat{G}_i)/Z_i \cong (L/K_i)/(N/K_i) \cong L/N. \quad \square$$

**Bemerkung 4.47.** Im Allgemeinen ist  $Z(\hat{G}_1) \not\cong Z(\hat{G}_2)$  in der Situation von Satz 4.46. Zum Beispiel sind die minimal nicht-abelschen Gruppen

$$\begin{aligned} \hat{G}_1 &= \langle x, y \mid x^8 = y^2 = 1, yxy^{-1} = x^5 \rangle, \\ \hat{G}_2 &= \langle x, y \mid x^4 = y^2 = [x, y]^2 = [x, x, y] = [y, x, y] = 1 \rangle \end{aligned}$$

der Ordnung 16 aus Aufgabe 4 und Aufgabe 6 maximale Schur-Erweiterungen von  $G = C_4 \times C_2$  mit  $Z(\hat{G}_1) = \langle x^2 \rangle \cong C_4$  und  $Z(\hat{G}_2) = \langle x^2, [x, y] \rangle \cong C_2^2$  (aus GT-Satz 11.36 folgt  $M(G) \cong C_2$ ).

**Lemma 4.48.** Sei  $H$  eine beliebige Gruppe und  $|H : Z(H)| = p^n$  eine Primzahlpotenz. Dann gilt  $|H'| \leq p^{\binom{n}{2}}$ .

*Beweis.* Induktion nach  $n$ . Für  $n = 1$  ist  $H' = 1$  nach GT-Aufgabe 8. Sei nun  $n \geq 2$ . Mit  $H/Z(H)$  ist auch  $H$  nilpotent. Daher existiert  $x \in Z_2(H) \setminus Z(H)$ . Für  $a, b \in H$  gilt  $[x, b] \in Z(H)$  und  $[x, ab] = [x, a] \cdot {}^a[x, b] = [x, a][x, b]$ . Somit ist  $H \rightarrow H, a \mapsto [x, a]$  ein Homomorphismus mit Bild

$$N := [x, H] = \{[x, a] : a \in H\} \leq H' \cap Z(H).$$

Wegen  $Z(H)/N < Z(H)\langle x \rangle/N \leq Z(H/N)$  ist  $|H/N : Z(H/N)| \leq p^{n-1}$ . Induktion ergibt  $|H'/N| = |(H/N)'| \leq p^{\binom{n-1}{2}}$ . Aus

$$[x, a] = [x, b] \iff {}^a x = {}^b x \iff aC_H(x) = bC_H(x)$$

folgt  $|N| = |H : C_H(x)| \leq |H : Z(H)\langle x \rangle| \leq p^{n-1}$ . Insgesamt gilt nun

$$|H'| = |H'/N||N| \leq p^{\binom{n-1}{2} + n-1} = p^{\binom{n}{2}}. \quad \square$$

**Satz 4.49** (JONES). *Für jede  $p$ -Gruppe  $P$  der Ordnung  $p^n$  gilt  $|M(P)||P'| \leq p^{\binom{n}{2}}$ .*

*Beweis.* Sei  $P = F/N$  eine Präsentation,  $H = F/[F, N]$  und  $Z(H) := Z/[F, N]$ . Wegen  $N/[F, N] \leq Z(H)$  gilt  $H/Z(H) \cong F/Z \cong P/(Z/N)$ . Insbesondere ist  $H/Z(H)$  eine  $p$ -Gruppe mit Ordnung  $\leq p^n$ . Aus Lemma 4.48 folgt  $|F'/[F, N]| = |H'| \leq p^{\binom{n}{2}}$ . Mit der Hopf-Formel erhält man  $|M(P)||P'| = |(F' \cap N)/[F, N]| |F'/(F' \cap N)| = |F'/[F, N]| \leq p^{\binom{n}{2}}$ .  $\square$

**Satz 4.50.** *Sind  $|G/G'|$  und  $|M(G)|$  teilerfremd, so besitzt  $G$  bis auf Isomorphie nur eine maximale Schur-Erweiterung.*

*Beweis.* Wie in Satz 4.46 sei  $G = F/N$  und  $\widehat{G}_i = F/K_i$  für  $i = 1, 2$ . Dann ist

$$\widehat{G}_i/\widehat{G}'_i \cong F/F'K_i = F/F'N \cong G/G' \cong C_{d_1} \times \dots \times C_{d_n}$$

nach dem Hauptsatz über endliche abelsche Gruppen. Wir wählen  $x_1, \dots, x_n \in F$  mit  $F/F'N = \langle x_1, \dots, x_n \rangle F'N/F'N$  und  $x_i^{d_i} \in F'N$  für  $i = 1, \dots, n$ . Sei  $a_i \in N$  mit  $x_i^{d_i} a_i \in F'$ . Als Teiler von  $|G/G'|$  ist  $d_i$  zu  $|M(G)|$  teilerfremd. Der kanonische Monomorphismus

$$N/(K_1 \cap K_2) \rightarrow N/K_1 \times N/K_2 \cong M(G)^2$$

zeigt, dass  $d_i$  auch zu  $|N/(K_1 \cap K_2)|$  teilerfremd ist. Daher existiert ein  $b_i \in N$  mit  $b_i^{d_i} \equiv a_i \pmod{K_1 \cap K_2}$ . Es folgt

$$(x_i b_i)^{d_i} \equiv x_i^{d_i} b_i^{d_i} \equiv 1 \pmod{F'(K_1 \cap K_i)}.$$

Indem wir  $x_i$  durch  $x_i b_i$  ersetzen, können wir  $x_i^{d_i} \in F'(K_1 \cap K_2)$  für  $i = 1, \dots, n$  annehmen. Wegen  $F' \cap K_1 = [F, N] = F' \cap K_2$  ist die Abbildung  $F'N/K_1 \rightarrow F'N/K_2, yK_1 \mapsto yK_2$  mit  $y \in F'$  ein wohldefinierter Isomorphismus. Dabei wird  $x_i^{d_i} K_1$  auf  $x_i^{d_i} K_2$  abgebildet.

Jedes Element in  $\widehat{G}_i$  hat die Form  $x_1^{e_1} \dots x_n^{e_n} y K_i$  mit  $y \in F'$  und eindeutig bestimmten  $0 \leq e_i < d_i$ . Daher ist die Abbildung

$$\Gamma : \widehat{G}_1 \rightarrow \widehat{G}_2, \quad x_1^{e_1} \dots x_n^{e_n} y K_1 \mapsto x_1^{e_1} \dots x_n^{e_n} y K_2$$

wohldefiniert und bijektiv. Für  $0 \leq f_i < d_i$  und  $z \in F'$  gilt

$$x_1^{e_1} \dots x_n^{e_n} y \cdot x_1^{f_1} \dots x_n^{f_n} z \equiv x_1^{e_1+f_1} \dots x_n^{e_n+f_n} \pmod{F'}.$$

Sei  $e_i + f_i = g_i + k_i d_i$  mit  $0 \leq g_i < d_i$  für  $i = 1, \dots, n$ . Dann existiert  $c \in F'$  mit

$$x_1^{e_1} \dots x_n^{e_n} y \cdot x_1^{f_1} \dots x_n^{f_n} z = x_1^{g_1} \dots x_n^{g_n} x_1^{k_1 d_1} \dots x_n^{k_n d_n} c.$$

Dies zeigt

$$\Gamma(x_1^{g_1} \dots x_n^{g_n} x_1^{k_1 d_1} \dots x_n^{k_n d_n} c K_1) = x_1^{g_1} \dots x_n^{g_n} x_1^{k_1 d_1} \dots x_n^{k_n d_n} c K_2 = \Gamma(x_1^{e_1} \dots x_n^{e_n} y K_1) \Gamma(x_1^{f_1} \dots x_n^{f_n} z K_1),$$

d. h.  $\Gamma$  ist ein Isomorphismus.  $\square$

#### Bemerkung 4.51.

- (i) Besitzt  $G$  bis auf Isomorphie nur eine maximale Schur-Erweiterung, so spricht man von der *universellen* Schur-Erweiterung (nach Satz 4.43 ist jede Schur-Erweiterung ein Quotient der universellen Schur-Erweiterung).
- (ii) Schur-Multiplikatoren kommen auch in der Darstellungstheorie endlicher Gruppen vor: Sei  $N \trianglelefteq G$  und  $\Delta : N \rightarrow \text{GL}(d, \mathbb{C})$  eine irreduzible Darstellung von  $N$ . Für  $g \in G$  ist auch  ${}^g\Delta : N \rightarrow \text{GL}(d, \mathbb{C})$ ,  $x \mapsto \Delta(g^{-1}xg)$  eine Darstellung. Nehmen wir an, dass  $\Delta$  und  ${}^g\Delta$  für alle  $g \in G$  äquivalent sind, d. h. für  $g \in G$  existiert  $T_g \in \text{GL}(d, \mathbb{C})$  mit  ${}^g\Delta(x) = T_g \Delta(x) T_g^{-1}$  für alle  $x \in N$ . Sei  $g_1, \dots, g_k \in G$  ein Repräsentantensystem für  $G/N$  und  $T_i := T_{g_i}$ . Für  $x \in N$  definieren wir

$$\Gamma : G \rightarrow \text{GL}(d, \mathbb{C}), \quad g_i x \mapsto \Delta(x^{-1}) T_i.$$

Für  $y \in N$  gilt

$$\Gamma(g_i x) \Delta(y) \Gamma(g_i x)^{-1} = \Delta(x^{-1}) T_i \Delta(y) T_i^{-1} \Delta(x) = \Delta(x^{-1} g_i^{-1} y g_i x) = {}^{g_i x} \Delta(y).$$

Dies zeigt

$$\Gamma(gh) \Delta(y) \Gamma(gh)^{-1} = {}^{gh} \Delta(y) = {}^g ({}^h \Delta)(y) = \Gamma(g) \Gamma(h) \Delta(y) \Gamma(h)^{-1} \Gamma(g)^{-1}$$

für  $g, h \in G$  und alle  $y \in N$ . Aus Schurs Lemma (Lemma 1.9 in Charaktertheorie-Skript) folgt  $\Gamma(gh) = \kappa(g, h) \Gamma(g) \Gamma(h)$  für ein  $\kappa(g, h) \in \mathbb{C}^\times$ . Man nennt  $\Gamma$  eine *projektive Darstellung* von  $G$ , denn  $G \rightarrow \text{PGL}(d, \mathbb{C})$ ,  $g \mapsto \Gamma(g) \mathbb{C}^\times$  ist ein Homomorphismus. Wegen

$$\begin{aligned} \kappa(x, yz) \kappa(y, z) \Gamma(x) \Gamma(y) \Gamma(z) &= \kappa(x, yz) \Gamma(x) \Gamma(yz) = \Gamma(x(yz)) = \Gamma((xy)z) \\ &= \kappa(xy, z) \Gamma(xy) \Gamma(z) = \kappa(xy, z) \kappa(x, y) \Gamma(x) \Gamma(y) \Gamma(z) \end{aligned}$$

ist  $\kappa \in Z^2(G, \mathbb{C}^\times)$ . Tatsächlich hängt  $\kappa$  nur  $G/N$  ab, d. h.  $\kappa \in Z^2(G/N, \mathbb{C}^\times)$ . Andere Wahlen der  $T_i$  liefern äquivalente  $\kappa$ . Im Fall  $M(G/N) = 1$  kann man  $\kappa = 1$  erreichen. Dann ist  $\Gamma$  eine gewöhnliche Darstellung, die  $\Delta$  fortsetzt.

## 5 Erweiterungen der alternierenden Gruppen

**Bemerkung 5.1.** Aus der Gruppentheorie wissen wir, dass die alternierenden Gruppen  $A_n$  für  $n \geq 5$  einfach sind. Wir bestimmen in diesem Kapitel Erweiterungen von  $A_n$  und mit  $A_n$ .

**Lemma 5.2.** Für  $n \geq 4$  gilt  $C_{S_n}(A_n) = 1$ . Insbesondere ist  $Z(S_n) = Z(A_n) = 1$ .

*Beweis.* Sei  $\sigma \in C_{S_n}(A_n)$  und  $\tau := (a, b, c) \in A_n$  ein 3-Zyklus. Aus  $\sigma\tau = \tau\sigma$  folgt  ${}^\sigma\{a, b, c\} = \{a, b, c\}$ . Nun ist  $\{a\}$  der Durchschnitt aller 3-elementigen Mengen  $\Delta \subseteq \{1, \dots, n\}$ , die  $a$  enthalten (beachte:  $n \geq 4$ ). Dies zeigt  $\sigma(a) = a$  für  $a = 1, \dots, n$ .  $\square$

**Bemerkung 5.3.** Zu jedem Homomorphismus  $\omega : H \rightarrow \text{Out}(A_n)$  ( $n \geq 4$ ) gibt es nach Folgerung 4.28 also genau eine Erweiterung von  $A_n$  mit  $H$  zur Paarung  $\omega$ . Wir müssen daher  $\text{Out}(A_n)$  bestimmen.

**Lemma 5.4** (GT-Aufgabe 34). Für  $n \geq 3$  ist  $A_n = \langle (1, 2, 3), \dots, (1, 2, n) \rangle$ .

*Beweis.* Wir argumentieren durch Induktion nach  $n$ . Der Fall  $n = 3$  ist klar. Sei nun  $n \geq 4$ . Es genügt zu zeigen, dass  $A_n = \langle A_{n-1}, (1, 2, n) \rangle =: H$  gilt. Sei indirekt  $\sigma \in A_n \setminus H$ . Dann existiert ein  $k \neq n$  mit  ${}^\sigma k = n$ . Wähle  $\tau \in A_{n-1}$  mit  ${}^\tau 1 = k$ . Dann ist  $\sigma\tau(1, 2, n) \in A_{n-1}$  und wir erhalten den Widerspruch  $\sigma \in H$ .  $\square$

**Lemma 5.5.** Sei  $\Omega$  eine Menge und  $G \leq \text{Sym}(\Omega)$  mit genau einem minimalen Normalteiler. Dann existiert eine Bahn  $\Delta \subseteq \Omega$ , sodass  $G$  treu auf  $\Delta$  operiert.

*Beweis.* Seien  $\Delta_1, \dots, \Delta_s$  die Bahnen von  $G$ . Sei  $N \trianglelefteq G$  der einzige minimale Normalteiler und  $x \in N \setminus \{1\}$ . Dann existiert ein  $1 \leq i \leq s$ , sodass  $x$  nicht-trivial auf  $\Delta_i$  operiert. Für den Kern  $K$  der eingeschränkten Operation  $G \rightarrow \text{Sym}(\Delta_i)$  gilt also  $K \cap N = 1$ . Dies zeigt  $K = 1$  und  $G$  operiert treu auf  $\Delta_i$ .  $\square$

**Bemerkung 5.6.**

- (i) Nach GT-Satz 6.36 gilt die Voraussetzung von Lemma 5.5 für alle symmetrischen und alternierenden Gruppen.
- (ii) Für einen  $k$ -Zyklus  $(a_1, \dots, a_k) \in S_n$  und eine beliebige Permutation  $\sigma \in S_n$  gilt

$$\sigma(a_1, \dots, a_k)\sigma^{-1} = (\sigma(a_1), \dots, \sigma(a_k)).$$

Dies zeigt, dass alle  $k$ -Zyklen in  $S_n$  konjugiert sind. Durch Zerlegen in disjunkte Zyklen erhält man, dass zwei beliebige Permutationen  $\sigma, \tau \in S_n$  genau dann konjugiert sind, wenn sie den gleichen Zyklentyp haben. Für  $\sigma \in A_n$  ist  ${}^{S_n}\sigma \subseteq A_n$  eine Vereinigung von Konjugationsklassen von  $A_n$ . Wegen

$$|A_n : C_{A_n}(\sigma)| = |A_n : A_n \cap C_{S_n}(\sigma)| = |A_n C_{S_n}(\sigma) : C_{S_n}(\sigma)|$$

gilt  ${}^{S_n}\sigma = {}^{A_n}\sigma$  genau dann, wenn  $C_{S_n}(\sigma) \not\subseteq A_n$ . Sei  $\sigma = \sigma_1 \dots \sigma_l$  mit disjunkten Zyklen  $\sigma_i$  der Länge  $\lambda_i$  (inklusive Einerzyklen). Ist  $\lambda_i$  gerade, so ist  $\sigma_i \in C_{S_n}(\sigma) \setminus A_n$ . Nehmen wir nun an, dass  $\lambda_1, \dots, \lambda_l$  ungerade sind. Angenommen es existieren  $i \neq j$  mit  $\lambda_i = \lambda_j$ . Für  $\sigma_i = (a_1, \dots, a_{\lambda_i})$  und  $\sigma_j = (b_1, \dots, b_{\lambda_i})$  ist  $(a_1, b_1) \dots (a_{\lambda_i}, b_{\lambda_i}) \in C_{S_n}(\sigma) \setminus A_n$ .

Im Fall  ${}^{S_n}\sigma \neq {}^{A_n}\sigma$  müssen  $\lambda_1, \dots, \lambda_l$  also ungerade und paarweise verschieden sein. Man kann zeigen, dass die Umkehrung ebenfalls gilt.

**Lemma 5.7.** Sei  $n \geq 4$  und  $A_{n-1} \cong H \leq A_n$ . Dann ist  $H = \text{Alt}(\{1, \dots, n\} \setminus \{i\})$  für ein  $i \in \{1, \dots, n\}$  oder  $n = 6$ .

*Beweis.* O. B. d. A. sei  $n \geq 5$ . Nach Lemma 5.5 operiert  $H$  treu auf einer Bahn  $\Delta \subseteq \{1, \dots, n\}$ . Wegen  $|H| = (n-1)!/2$  ist  $|\Delta| \geq n-1$ . Wir können also annehmen, dass  $H$  transitiv auf  $\{1, \dots, n\}$  operiert. Insbesondere ist  $n \mid |H| \mid (n-1)!$ . Daher dürfen wir  $n \geq 8$  voraussetzen.

Sei  $f : A_{n-1} \rightarrow H$  ein Isomorphismus und sei  $\sigma \in A_{n-1}$  ein 3-Zyklus. Offenbar ist  $A_{n-4}$  zu einer Untergruppe von  $C_{A_{n-1}}(\sigma)$  isomorph. Insbesondere besitzt auch  $C_H(f(\sigma))$  eine Untergruppe  $C \cong A_{n-4}$ . Sei  $f(\sigma)$  das disjunkte Produkt von  $k$  vielen 3-Zyklen. Offenbar permutiert  $C$  die Bahnen von  $f(\sigma)$  (einschließlich trivialer Bahnen). Der Kern dieser Operation ist eine 3-Gruppe und damit trivial. Es gibt also einen Monomorphismus  $F : C \rightarrow S_{n-2k}$ . Wegen  $|C| = (n-4)!/2$  folgt  $k \leq 2$ . Im Fall  $k = 2$  ist  $F$  transitiv und man erhält den Widerspruch  $n = 3k = 6$ . Also ist auch  $f(\sigma)$  ein 3-Zyklus.

Sei  $f((1, 2, 3)) = (\alpha, \beta, \gamma)$  und  $f((1, 2, 4)) = (\delta, \epsilon, \varphi)$ . Im Fall  $\{\alpha, \beta, \gamma\} \cap \{\delta, \epsilon, \varphi\} = \emptyset$  wäre

$$A_4 \cong \langle (1, 2, 3), (1, 2, 4) \rangle \cong \langle f((1, 2, 3)), f((1, 2, 4)) \rangle$$

abelsch. Im Fall  $|\{\alpha, \beta, \gamma\} \cap \{\delta, \epsilon, \varphi\}| = 1$  würde  $\langle f((1, 2, 3)), f((1, 2, 4)) \rangle$  transitiv auf der 5-elementigen Menge  $\{\alpha, \beta, \gamma\} \cup \{\delta, \epsilon, \varphi\}$  operieren. Also ist  $|\{\alpha, \beta, \gamma\} \cap \{\delta, \epsilon, \varphi\}| = 2$  und  $\langle f((1, 2, 3)), f((1, 2, 4)) \rangle$  kann nur vier Ziffern bewegen. Durch Induktion nach  $k$  sieht man, dass  $\langle f((1, 2, 3)), \dots, f((1, 2, k)) \rangle$  höchstens  $k$  Ziffern bewegen kann. Also ist  $H = f(A_{n-1}) = \langle f((1, 2, 3)), \dots, f((1, 2, n-1)) \rangle$  (Lemma 5.4) intransitiv. Dies war aber bereits ausgeschlossen.  $\square$

**Satz 5.8** (HÖLDER). *Es gilt  $\text{Aut}(A_6) \cong S_6 \rtimes C_2$  und  $\text{Aut}(A_n) \cong S_n$  für  $4 \leq n \neq 6$ .*

*Beweis.* Offenbar operiert  $S_n$  durch Konjugation auf  $A_n$  mit Kern  $C_{S_n}(A_n) = 1$  (Lemma 5.2). Dies liefert einen Monomorphismus  $\Psi : S_n \rightarrow \text{Aut}(A_n)$ . Sei  $H_i := \text{Alt}(\{1, \dots, n\} \setminus \{i\})$  für  $i = 1, \dots, n$ . Sei zunächst  $n \neq 6$ . Nach Lemma 5.7 operiert dann  $\text{Aut}(A_n)$  auf  $\{H_1, \dots, H_n\}$ . Dies liefert einen Homomorphismus  $\Gamma : \text{Aut}(A_n) \rightarrow S_n$ . Sei  $f \in \text{Ker}(\Gamma)$  und  $\sigma \in A_n$ . Dann ist

$$H_{f(\sigma)_i} = f(\sigma)H_i f(\sigma)^{-1} = f(\sigma)f(H_i)f(\sigma)^{-1} = f(\sigma H_i \sigma^{-1}) = f(H_{\sigma_i}) = H_{\sigma_i}$$

und  $f(\sigma) = \sigma$ . Also ist  $\Gamma$  injektiv. Damit sind  $\Psi$  und  $\Gamma$  sogar Isomorphismen. Sei nun  $n = 6$ .

**Schritt 1:**  $\Psi(S_6) < \text{Aut}(A_6)$ .

Offenbar operiert  $A_5$  treu und transitiv auf  $\text{Syl}_5(A_5)$  durch Konjugation. Dies liefert einen Monomorphismus  $f : A_5 \rightarrow \text{Sym}(\text{Syl}_5(A_5)) \cong S_6$ . Im Fall  $f(A_5) \not\subseteq A_6$  wäre  $1 \neq f(A_5) \cap A_6 \triangleleft f(A_5)$  im Widerspruch zur Einfachheit von  $f(A_5) \cong A_5$ . Also ist  $f(A_5) \leq A_6$ . Da  $f$  transitiv ist, gilt  $f(A_5) \neq H_i$  für  $i = 1, \dots, 6$ . Die Operation von  $A_6$  auf den Nebenklassen  $A_6/f(A_5)$  liefert einen Monomorphismus  $\varphi : A_6 \rightarrow S_6$ . Wie eben ist  $\varphi(A_6) = A_6$ , d. h.  $\varphi \in \text{Aut}(A_6)$ . Da  $f(A_5)$  der Stabilisator der trivialen Nebenklasse ist, muss  $\varphi(f(A_5)) = H_i$  für ein  $i \in \{1, \dots, 6\}$  gelten. Insbesondere ist  $\varphi \notin \Psi(S_6)$ .

**Schritt 2:**  $|\text{Out}(A_6)| = 4$ .

Seien  $\varphi, \psi \in \text{Aut}(A_6) \setminus \Psi(S_6)$ . Offenbar bildet jeder Automorphismus Konjugationsklassen auf Konjugationsklassen ab. Nach Bemerkung 5.6 ist die Menge der 3-Zyklen eine Konjugationsklasse  $C$  von  $A_6$ . Gilt  $\varphi(C) = C$ , so sieht man wie im Beweis von Lemma 5.7, dass  $\varphi$  die Untergruppen  $H_i$  permutiert. Dann wäre aber  $\varphi \in \Psi(S_6)$ . Also muss  $\varphi(C) = \psi(C)$  die Konjugationsklasse der Elemente vom Zyklentyp  $(3, 3)$  sein, denn dies sind die einzigen weiteren Elemente der Ordnung 3. Es folgt  $(\varphi\psi)(C) = C$  und  $\varphi\psi \in \Psi(S_6)$ . Dies impliziert die Behauptung.

**Schritt 3:**  $\text{Aut}(A_6) \cong S_6 \rtimes C_2$ .

Als Untergruppe vom Index 2 ist  $\Psi(S_6) \trianglelefteq \text{Aut}(A_6)$ . Es genügt also ein Element  $\varphi \in \text{Aut}(A_6) \setminus \Psi(S_6)$  der Ordnung 2 zu finden. Sei zunächst  $\varphi \in \text{Aut}(A_6) \setminus \Psi(S_6)$  beliebig und sei  $x := (1, 2, 3, 4, 5) \in A_6$ . Dann ist auch  $\varphi(x)$  ein 5-Zyklus und daher in  $S_6$  zu  $x$  konjugiert (Bemerkung 5.6). Ersetzt man also  $\varphi$  durch ein geeignetes Element aus der Nebenklasse  $\varphi\Psi(S_6)$ , so kann man  $\varphi(x) = x$  annehmen. Also

existiert ein  $y \in C_{S_6}(x)$  mit  $\varphi^2 = \Psi(y)$ . Da  $S_6$  genau  $6 \cdot 4!$  Zyklen der Länge 5 besitzt, ist  $|C_{S_6}(x)| \leq 5$  und damit  $y \in C_{S_6}(x) = \langle x \rangle$ . Dies zeigt  $|\langle \varphi \rangle| \in \{2, 10\}$ . Also hat  $\varphi^5 \in \text{Aut}(A_6) \setminus \Psi(S_6)$  die Ordnung 2.  $\square$

**Satz 5.9.** Für  $4 \leq n \neq 6$  zerfällt jede Erweiterung von  $A_n$ .

*Beweis.* Nach Satz 5.8 besitzt  $\text{Inn}(A_n) \cong A_n$  ein Komplement in  $\text{Aut}(A_n) \cong S_n$ . Die Behauptung folgt aus Lemma 5.2 und Folgerung 4.28.  $\square$

**Bemerkung 5.10.** Nach Satz 5.8 ist  $\text{Out}(A_6) \cong C_2^2$ . Der nächste Satz zeigt, dass Satz 5.9 für  $n = 6$  falsch ist.

**Satz 5.11.** Die Erweiterung  $\text{Aut}(A_6)$  von  $\text{Inn}(A_6) \cong A_6$  zerfällt nicht.

*Beweis.* Angenommen  $A \leq \text{Aut}(A_6)$  ist ein Komplement von  $\text{Inn}(A_6)$ . Sei  $\Psi(S_6) \leq \text{Aut}(A_6)$  wie im Beweis von Satz 5.8. Dann gilt  $|\Psi(S_6) \cap A| = 2$ . Sei  $\sigma \in S_6$  eine Involution mit  $\alpha := \Psi(\sigma) \in A$ . Wegen  $\text{Inn}(A_6) \cap A = 1$  hat  $\sigma$  Zyklentyp (2) oder (2, 2, 2). O. B. d. A. sei  $\sigma \in \{(1, 2), (1, 2)(3, 4)(5, 6)\}$ . Sei  $\beta \in A \setminus \Psi(S_6)$ . Wie im Beweis von Satz 5.8 vertauscht  $\beta$  die 3-Zyklen mit den Permutationen vom Zyklentyp (3, 3). Wegen  $|A| = 4$  ist  $A$  abelsch.

**Fall 1:**  $\sigma = (1, 2)$ .

Es gilt

$$\beta((3, 4, 5)) = (\beta\alpha)((3, 4, 5)) = (\alpha\beta)((3, 4, 5)) = (1, 2)\beta((3, 4, 5))(1, 2),$$

aber (1, 2) kann keine Permutation vom Zyklentyp (3, 3) zentralisieren. Widerspruch.

**Fall 2:**  $\sigma = (1, 2)(3, 4)(5, 6)$ .

Offenbar wird  $(1, 3, 5)(2, 4, 6)$  von  $\sigma$  zentralisiert. Die gleiche Rechnung wie in Fall 1 mit  $(1, 3, 5)(2, 4, 6)$  anstelle von  $(3, 4, 5)$  zeigt, dass  $\sigma$  einen 3-Zyklus zentralisiert. Dies ist ebenfalls unmöglich.  $\square$

**Bemerkung 5.12** (GAP). Das außergewöhnliche Verhalten von  $\text{Aut}(A_6)$  lässt sich durch den (ebenfalls außergewöhnlichen) Isomorphismus  $A_6 \cong \text{PSL}(2, 9)$  erklären (Aufgabe 18).

```
G:=AlternatingGroup(6);;
A:=AutomorphismGroup(G);;
sub:=SubgroupsOfIndexTwo(A);;
List(sub, IdGroup);
IdGroup(SymmetricGroup(6));
IdGroup(PGL(2, 9));
IdGroup(MathieuGroup(10));
```

**Lemma 5.13.** Für  $n \in \mathbb{N}$  gilt  $|M(S_n)| \leq 2$ .

*Beweis.* Wir benutzen die Präsentation

$$S_n = \langle x_1, \dots, x_{n-1} \mid x_i^2, (x_i x_{i+1})^3, [x_i, x_j] \text{ für } i < j - 1 \rangle$$

aus Satz 2.18. Seien  $F$  und  $N$  wie in Satz 4.43. Sei  $\overline{F} := F/[F, N]$  und  $\overline{x_i} := x_i[F, N] \in \overline{F}$  für  $i = 1, \dots, n-1$ . Seien  $a_i := \overline{x_i}^2$ ,  $b_i := (\overline{x_i x_{i+1}})^3$  und  $c_{ij} := [\overline{x_i}, \overline{x_j}]$  Elemente in  $\overline{N}$ . Wegen  $\overline{N} \leq Z(\overline{F})$  sind dies Erzeuger von  $\overline{N}$  (man braucht nicht den normalen Abschluss). Da man  $x_i$  durch die Transposition



$(i, i+1)$  realisieren kann, existieren  $g \in F$ ,  $y, z \in N$  mit  $\bar{g}x_i\bar{g}^{-1} = x_1y$  und  $\bar{g}x_j\bar{g}^{-1} = x_3y$  (beachte:  $i < j-1$ ). Wegen  $\bar{N} \leq Z(\bar{F})$  folgt

$$c_{ij} = \bar{g}c_{ij}\bar{g}^{-1} = [\overline{gx_i g^{-1}}, \overline{gx_j g^{-1}}] = [\overline{x_1 y}, \overline{x_3 y}] = [\overline{x_1}, \overline{x_3}] = c_{13}.$$

Außerdem gilt

$$c_{13}^2 a_3 = (c_{13} \bar{x}_3)^2 = (\overline{x_1 x_3 x_1^{-1}})^2 = a_3$$

und somit  $c_{13}^2 = 1$ . Eine ähnliche Rechnung zeigt

$$b_i^2 a_i^{-1} a_{i+1}^{-2} = (b_i (\overline{x_{i+1} x_i x_{i+1}})^{-1})^2 = (\overline{x_i x_{i+1} x_i})^2 = a_i^2 a_{i+1}$$

und es folgt  $b_i^2 = (a_i a_{i+1})^3$ . Wir setzen  $d_1 := a_1$  und  $d_{i+1} := b_i (a_i a_{i+1})^{-1}$ . Dann gilt  $d_{i+1}^2 = a_i a_{i+1}$  und

$$\bar{N} = \langle d_1, \dots, d_{n-1}, c_{13} \rangle$$

mit  $c_{13}^2 = 1$ . Nach Satz 4.43 hat der freie Teil von  $\bar{N}$  Rang  $n-1$ . Daher müssen  $d_1, \dots, d_{n-1}$  unendliche Ordnung haben. Der Torsionsteil ist somit  $\langle c_{13} \rangle$ . Die Behauptung folgt nun aus Satz 4.43.  $\square$

**Lemma 5.14.** Für  $n \in \mathbb{N} \setminus \{6, 7\}$  gilt  $|M(A_n)| \leq 2$  und  $|M(A_6)|, |M(A_7)| \leq 6$ .

*Beweis.* Die Fälle  $n \leq 7$  können mit GAP oder GT-Folgerung 11.19 behandelt werden. Sei also  $n \geq 8$  und

$$A_n \cong \langle x_1, \dots, x_{n-2} \mid 1 = x_1^3 = x_2^2 = \dots = x_{n-2}^2 = (x_i x_{i+1})^3 = (x_i x_j)^2 \text{ für } |j-i| > 1 \rangle$$

wie in Satz 2.19. Wir benutzen die Bezeichnungen aus Lemma 5.13 mit  $a_1 := \bar{x}_1^3$ ,  $a_i := \bar{x}_i^2$  ( $i \geq 2$ ),  $b_i := (\bar{x}_i \bar{x}_{i+1})^3$ ,  $c_i := (\bar{x}_1 \bar{x}_i)^2$  ( $i \geq 3$ ) und  $c_{ij} := [\bar{x}_i, \bar{x}_j]$  für  $2 \leq i < j-1$ . Wie in Lemma 5.13 folgt dann  $c_{ij} = c_{24} =: c$ ,  $c^2 = 1$  und  $b_i^2 = (a_i a_{i+1})^3$  für  $i \geq 2$ . Für  $z_{i+1} := b_i (a_i a_{i+1})^{-1}$  gilt also  $\langle b_i, a_i a_{i+1} \rangle = \langle z_{i+1} \rangle$  für  $i = 2, \dots, n-3$ . Für  $i \geq 3$  ist

$$a_1 = (\bar{x}_i^{-1} x_1 x_i)^3 = (a_i^{-1} \bar{x}_1^{-1} c_i)^3 = a_1^{-1} (a_i^{-1} c_i)^3$$

und  $\boxed{(c_i a_i^{-1})^3 = a_1^2}$ . Wir setzen  $z_1 := a_1 (c_3 a_3^{-1})^{-1}$  und erhalten  $\langle a_1, c_3 a_3^{-1} \rangle = \langle z_1 \rangle$ .

Aus  $c_4 = \bar{x}_1^{-1} (\bar{x}_1 \bar{x}_4)^2 \bar{x}_1 = (\bar{x}_4 \bar{x}_1)^2$  und  $c = a_2 a_4 [\bar{x}_2^{-1}, \bar{x}_4^{-1}] a_2^{-1} a_4^{-1} = [\bar{x}_2^{-1}, \bar{x}_4^{-1}]$  folgt

$$\overline{x_4 x_1 x_2 x_4^{-1}} = \overline{c_4 x_1^{-1} x_4^{-1} x_2 x_4 a_4^{-1}} = \overline{c_4 x_1^{-1} x_2 c a_4^{-1}} = \overline{x_2 (x_1 x_2)^{-1} x_2^{-1} a_2 c a_4^{-1}}.$$

Die dritte Potenz ergibt

$$b_1 = b_1^{-1} a_2^3 c_4^3 c a_4^{-3}.$$

Wegen  $(c_4 a_4^{-1})^3 = a_1^2$  erhält man  $b_1^2 = a_1^2 a_2^3 c$ . Mit  $z_2 := b_1 a_1^{-1} a_2^{-1} c$  gilt  $z_2^2 = a_2 c$  und  $z_2^3 = a_1^{-1} b_1$ .

Für  $i \geq 5$  gilt

$$\overline{x_3 x_1 x_i x_3^{-1}} = \overline{c_3 x_1^{-1} x_3^{-1} x_i x_3 a_3^{-1}} = \overline{c_3 x_1^{-1} x_i c_3 a_3^{-1}}$$

und  $c_i = (c_3 a_3^{-1})^2 (\bar{x}_1^{-1} x_i)^2$  nach quadrieren. Wegen  $\overline{x_1^{-1} x_i} = a_i \bar{x}_i^{-1} (\bar{x}_1 \bar{x}_i)^{-1} \bar{x}_i$  folgt  $(c_i a_i^{-1})^2 = (c_3 a_3^{-1})^2$ . Andererseits gilt auch  $(c_i a_i^{-1})^3 = a_1^2 = (c_3 a_3^{-1})^3$ . Dies zeigt  $c_i a_i^{-1} = c_3 a_3^{-1}$  für  $i \geq 5$ . Die gleiche Rechnung mit Index 4 anstatt 3 liefert  $c_4 a_4^{-1} = c_6 a_6^{-1}$ . Daher ist  $\langle z_1 \rangle = \langle a_1, c_i a_i^{-1} \rangle$  für  $i = 3, \dots, n-2$ .

Insgesamt gilt

$$\bar{N} = \langle a_i, b_i, c_i, c \rangle = \langle z_1, \dots, z_{n-2}, c \rangle$$

und es folgt  $|M(A_n)| \leq 2$ .  $\square$

**Satz 5.15.** *Es gilt*

$$M(S_n) = \begin{cases} 1 & \text{falls } n \leq 3, \\ C_2 & \text{falls } n \geq 4. \end{cases}$$

*Beweis.* O.B.d.A. sei  $n \geq 4$ . Nach Lemma 5.13 genügt es eine echte Schur-Erweiterung von  $S_n$  zu konstruieren. Sei

$$\widehat{S}_n := \langle x_1, \dots, x_{n-1}, z \mid z^2 = 1, x_i^2 = (x_i x_{i+1})^3 = [x_i, x_j] = z \text{ für } i < j - 1 \rangle.$$

Nach von-Dyck gibt es einen Epimorphismus  $\widehat{S}_n \rightarrow S_n$  mit Kern  $\langle z \rangle$ . Wegen  $x_i^2 = [x_i, x_j] = z$  ist  $z \in Z(\widehat{S}_n) \cap \widehat{S}'_n$ . Allerdings könnte  $z = 1$  gelten. Wir definieren Matrizen in  $\text{GL}(2^n, \mathbb{C})$  als iterierte Kronecker-Produkte von  $2 \times 2$ -Matrizen:

$$A := \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad B := \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad C := \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$M_{2k-1} := C^{\otimes(n-k)} \otimes A \otimes 1_2^{\otimes(k-1)}, \quad M_{2k} := C^{\otimes(n-k)} \otimes B \otimes 1_2^{\otimes(k-1)}$$

für  $k = 1, \dots, n$ . Sei zusätzlich  $M_0 := 0_{2^n}$ . Wegen  $A^2 = B^2 = -C^2 = [A, B] = [A, C] = [B, C] = -1_2$  gilt  $M_k^2 = [M_k, M_l] = -I := -1_{2^n}$  für  $k \neq l$ . Wir setzen nun

$$X_k := \frac{1}{\sqrt{2k}} (\sqrt{k+1} M_k - \sqrt{k-1} M_{k-1})$$

für  $k = 1, \dots, n-1$ . Es folgt

$$\begin{aligned} X_k^2 &= -\frac{1}{2k} ((k+1)I + (k-1)I) = -I \quad (\Rightarrow X_k \in \text{GL}(2^n, \mathbb{C})), \\ X_k X_l &= -X_l X_k \quad (k < l-1), \\ X_{k+1} X_k &= \frac{1}{2\sqrt{k^2+k}} \left( \sqrt{(k+2)(k+1)} M_{k+1} M_k - \sqrt{(k+2)(k-1)} M_{k+1} M_{k-1} \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{k^2+k} I + \sqrt{k(k-1)} M_k M_{k-1} \right) \\ &= I - X_k X_{k+1}, \\ X_k X_{k+1} X_k &= X_k (I - X_k X_{k+1}) = X_k + X_{k+1} = (I - X_k X_{k+1}) X_{k+1} = X_{k+1} X_k X_{k+1} \\ (X_k X_{k+1})^3 &= X_k X_{k+1} X_k X_{k+1} X_k X_{k+1} = (-I)^3 = -I. \end{aligned}$$

Nach von-Dyck existiert ein Epimorphismus  $\Gamma : \widehat{S}_n \rightarrow \langle X_1, \dots, X_{n-1} \rangle$  mit  $\Gamma(z) = -I$ . Also ist  $z \neq 1$  in  $\widehat{S}_n$ .  $\square$

**Bemerkung 5.16** (GAP). Neben  $\widehat{S}_n$  gibt es noch die Schur-Erweiterung

$$\widetilde{S}_n := \langle x_1, \dots, x_{n-1}, z \mid z^2 = 1, x_i^2 = (x_i x_{i+1})^3 = 1, [x_i, x_j] = z \text{ für } i < j - 1 \rangle.$$

Man zeigt leicht  $\widetilde{S}_4 \cong \text{GL}(2, 3)$ . Sei allgemeiner  $q$  eine ungerade Primzahlpotenz,  $\mathbb{F}_q^\times = \langle \zeta \rangle$  und  $x := \begin{pmatrix} 0 & \zeta \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \in \text{GL}(2, q)$ . Dann induziert  $x$  durch Konjugation einen äußeren Automorphismus  $\alpha$  von  $\text{SL}(2, q)$  der Ordnung 2. Es gilt  $\text{SL}(2, 5) \rtimes \langle \alpha \rangle \cong \widetilde{S}_5$ . Durch eine ähnliche Konstruktion gelangt man zu  $\widetilde{S}_6 \cong \text{SL}(2, 9) \rtimes C_2$  (vgl. Aufgabe 18). Sei nun  $\zeta \in \mathbb{F}_{q^2}^\times$  der Ordnung  $2(q-1)$  und  $x := \text{diag}(\zeta, \zeta^{-1}) \in \text{SL}(2, q^2)$ . Dann ist  $K(q) := \text{SL}(2, q) \langle x \rangle \leq \text{SL}(2, q^2)$  eine nicht-zerfallende Erweiterung mit  $K(3) \cong \widetilde{S}_4$  und  $K(5) \cong \widetilde{S}_5$  (ohne Beweis). Ein äußerer Automorphismus von  $S_6$  liefert einen Isomorphismus  $\widehat{S}_6 \cong \widetilde{S}_6$ . Für  $n \neq 6$  gilt hingegen  $\widehat{S}_n \not\cong \widetilde{S}_n$ . Für größere  $n$  sind die Schur-Erweiterungen von  $S_n$  keine „bekannten“ Gruppen.

```

S1:=SchurCoverOfSymmetricGroup(5,3,1); # $\widehat{S}_5$  als Matrixgruppe über  $\mathbb{F}_3$ 
S2:=SchurCoverOfSymmetricGroup(5,3,-1); # $\widetilde{S}_5$ 
IdGroup(S1); IdGroup(S2);
IsomorphismGroups(SchurCoverOfSymmetricGroup(4,3,-1),GL(2,3))<>fail;

```

**Satz 5.17.** *Es gilt*

$$M(A_n) = \begin{cases} C_6 & \text{falls } n \in \{6, 7\}, \\ C_2 & \text{falls } n = 4, 5, 8, 9, \dots \end{cases}$$

*Beweis.* Man prüft leicht, dass  $\text{SL}(2, 3)$  eine Schur-Erweiterung von  $A_4$  ist (vgl. Aufgabe 15). Daher gilt  $M(A_4) \cong C_2$ . Sei nun  $n \geq 5$ ,  $\widehat{A}_n := \widehat{S}'_n$  und  $Z := Z(\widehat{S}_n) \leq Z(\widehat{A}_n)$ . Dann ist  $\widehat{A}_n/Z \cong (\widehat{S}_n/Z)' \cong S'_n \cong A_n$  und  $\widehat{A}'_n Z/Z = (\widehat{A}_n/Z)' \cong A'_n \cong A_n$ . Es folgt  $|\widehat{S}_n/\widehat{A}'_n| = |\widehat{S}_n/\widehat{A}_n| |\widehat{A}_n/\widehat{A}'_n| \leq 4$  und  $Z \leq \widehat{S}'_n \leq \widehat{A}'_n$ . Also ist  $\widehat{A}_n$  eine Schur-Erweiterung von  $A_n$  und  $2 \mid |M(A_n)|$  für  $n \geq 5$ . Für  $n \notin \{6, 7\}$  ist  $\widehat{A}_n$  die universelle Schur-Erweiterung von  $A_n$  nach Satz 4.50.

Es genügt daher Schur-Erweiterungen  $\widehat{A}_6$  und  $\widehat{A}_7$  mit  $Z(\widehat{A}_6) \cong Z(\widehat{A}_7) \cong C_3$  zu konstruieren. Wir erzeugen  $\widehat{A}_6$  durch monomiale Matrizen in  $\text{GL}(6, 4)$ . Sei  $\mathbb{F}_4^\times = \langle \zeta \rangle$ ,  $\bar{\zeta} := \zeta^{-1}$  und  $(a_1, \dots, a_6; \sigma) := (a_i \delta_{i\sigma(j)})_{ij} \in \text{GL}(6, 4)$  für  $a_1, \dots, a_6 \in \mathbb{F}_4$  und  $\sigma \in S_6$ . Wir definieren

$$\begin{aligned} x_1 &:= (\bar{\zeta}, 1, \zeta, 1, \zeta, \bar{\zeta}; (145)(263)), \\ x_2 &:= (1, 1, 1, 1, \bar{\zeta}, \zeta; (13)(56)), \\ x_3 &:= (1, \zeta, \bar{\zeta}, \zeta, \bar{\zeta}, 1; (23)(45)), \\ x_4 &:= (\bar{\zeta}, 1, \zeta, 1, \zeta, \bar{\zeta}; (15)(36)). \end{aligned}$$

Sei  $G := \langle x_1, x_2, x_3, x_4 \rangle$  (man beachte, dass die angegebenen Permutationen eine transitive  $A_5$  erzeugen). Eine Rechnung zeigt

$$x_1^3 = x_2^2 = x_3^2 = x_4^2 = (x_1 x_2)^3 = (x_2 x_3)^3 = (x_3 x_4)^3 = (x_1 x_4)^2 = (x_2 x_4)^2 = 1$$

und  $z := (x_1 x_3)^2 = \zeta 1_6 \in Z(G)$ . Außerdem ist  $z = x_1 x_3 x_1 x_3 = x_1 x_3 x_4 x_1^{-1} x_4 x_3 = [x_1, x_3 x_4] \in G'$ . Nach Moore ist  $G$  eine Schur-Erweiterung von  $A_6$  mit  $Z(G) = \langle z \rangle \cong C_3$ . Wir ergänzen nun

$$x_5 := \begin{pmatrix} 1 & \bar{\zeta} & 1 & \bar{\zeta} & 1 & . \\ \zeta & 1 & \zeta & . & \zeta & 1 \\ 1 & \bar{\zeta} & 1 & \bar{\zeta} & . & \bar{\zeta} \\ \zeta & . & \zeta & 1 & \zeta & 1 \\ 1 & \bar{\zeta} & . & \bar{\zeta} & 1 & \bar{\zeta} \\ . & 1 & \zeta & 1 & \zeta & 1 \end{pmatrix}.$$

Eine weitere Rechnung ergibt  $x_5^2 = (x_2 x_5)^2 = (x_3 x_5)^2 = (x_4 x_5)^3 = 1$  und  $(x_1 x_5)^2 = z$ . Daher ist  $\langle x_1, \dots, x_5 \rangle$  die gewünschte Schur-Erweiterung  $\widehat{A}_7$ .  $\square$

**Bemerkung 5.18** (GAP).

- (i) Die im Beweis konstruierte Schur-Erweiterung  $\widehat{A}_6$  mit  $|Z(\widehat{A}_6)| = 3$  nennt man *VALENTINER-Gruppe*.
- (ii) Angenommen die (universelle) Schur-Erweiterung  $\widehat{A}_7$  ist bereits konstruiert. Dann existiert eine Untergruppe  $Z \leq H \leq \widehat{A}_7$  mit  $H/Z \cong A_6$ . Für  $P \in \text{Syl}_3(H)$  ist auch  $P \in \text{Syl}_3(\widehat{A}_7)$ . Nach Taunt (GT-Satz 7.15) ist  $P$  nicht-abelsch und daher  $Z = [P, P] \leq H'$ . Also ist  $H$  eine Schur-Erweiterung von  $A_6$ . Es würde also reichen  $\widehat{A}_7$  zu konstruieren. GAP liefert mehrere Möglichkeiten:

```

S1:=SchurCover(AlternatingGroup(7));
S1:=Image(IsomorphismPermGroup(S1));
S2:=PerfectGroup(IsPermGroup,15120); #einzige perfekte Gruppe dieser Ordnung
LoadPackage("atlasrep",false);
S3:=AtlasGroup("6.A7"); #benötigt beim ersten Zugriff Internet
IsomorphismGroups(S1,S2)<>fail;
IsomorphismGroups(S1,S3)<>fail;
DoubleCoverOfAlternatingGroup(10,3); #A10 als Matrixgruppe über F3 mit Z(A10) ≅ C2

```

(iii) Blackburn hat alle Erweiterungen von elementarabelschen Gruppen mit  $S_n$  und  $A_n$  konstruiert.

## 6 Sporadische Gruppen

**Bemerkung 6.1.** In der Gruppentheorie haben wir drei unendliche Serien von einfachen Gruppen kennen gelernt:  $C_p$ ,  $A_n$  und  $\text{PSL}(n, q)$ . Im Abschnitt 7 kommt die Familie  $\text{PSp}(2n, q)$  hinzu. Nach der CFSG gibt es 26 *sporadische* Gruppen, die zu keiner der Familien gehören. Wir konstruieren in diesem Kapitel fünf sporadischen Gruppen, die gleichzeitig interessante mehrfach-transitive Gruppen sind. Wir wählen zuerst einen möglichst direkten Weg mit einem „maßgeschneiderten“ Lemma von Witt. Anschließend beschreiben wir einen kombinatorischen Ansatz, mit dem auch andere sporadische Gruppen konstruiert werden können.

**Definition 6.2.** Eine  $k$ -transitive Operation  $G \rightarrow \text{Sym}(\Omega)$  heißt *scharf  $k$ -transitiv*, wenn für zwei  $k$ -Tupel  $(\alpha_1, \dots, \alpha_k)$  und  $(\beta_1, \dots, \beta_k)$  mit paarweise verschiedenen Elementen *genau* ein  $g \in G$  mit  $g\alpha_i = \beta_i$  für  $i = 1, \dots, k$  existiert.

**Bemerkung 6.3.** Jede scharf  $k$ -transitive Operation ist treu. Die scharf 1-transitiven Operationen sind genau die regulären Operationen. Sei  $G \rightarrow \text{Sym}(\Omega)$  transitiv,  $\omega \in \Omega$  und  $k \geq 2$ . Wie in GT-Lemma 6.32 zeigt man, dass  $G$  genau dann scharf  $k$ -transitiv auf  $\Omega$  operiert, wenn  $G_\omega$  scharf  $(k-1)$ -transitiv auf  $\Omega \setminus \{\omega\}$  operiert. Induktiv erhält man, dass eine  $k$ -transitive Operation vom Grad  $n$  genau dann scharf  $k$ -transitiv ist, wenn  $|G| = n(n-1) \dots (n-k+1)$  gilt (vgl. GT-Lemma 6.31).

**Beispiel 6.4.**

- (i) Die natürliche Operation der  $S_n$  auf  $\{1, \dots, n\}$  ist scharf  $n$ -transitiv und scharf  $(n-1)$ -transitiv, falls  $n \geq 2$ .
- (ii) Die natürliche Operation von  $A_n$  ist scharf  $(n-2)$ -transitiv, falls  $n \geq 2$  (siehe GT-Beispiel 6.29).
- (iii) Sei  $n \in \mathbb{N}$ ,  $p$  eine Primzahl und  $S \leq \text{GL}(n, p)$  ein Singer-Zyklus (GT-Beispiel 6.23). Dann ist  $\mathbb{F}_p^n \rtimes S \leq \text{AGL}(n, p)$  eine scharf 2-transitive Permutationsgruppe auf  $\mathbb{F}_p^n$ .
- (iv) Nach GT-Aufgabe 44 operiert  $\text{SL}(2, 2^n)$  3-transitiv auf der Menge  $\Omega$  aller 1-dimensionalen Unterräume von  $\mathbb{F}_{2^n}^2$ . Wegen  $|\Omega| = 2^n + 1$  und  $|\text{SL}(2, 2^n)| = (2^{2n} - 1)2^n = (2^n + 1)2^n(2^n - 1)$  ist diese Operation scharf 3-transitiv.

**Lemma 6.5.** Sei  $\alpha, \beta \in \Omega$ ,  $H \leq G \leq \text{Sym}(\Omega)$  und  $a, x \in G$  mit folgenden Eigenschaften:

- $\alpha \neq \beta$ ,  ${}^a\alpha \neq \alpha$  und  ${}^x\beta \neq \beta$ ,
- $x \in H$  und  $G = \langle H, a \rangle$ ,
- $aH_\beta a = H_\beta$ ,

- $H$  operiert  $k$ -transitiv auf  $\Omega \setminus \{\alpha\}$  mit  $k \geq 2$ ,
- $a^2 = x^2 = (ax)^3 = 1$ .

Dann operiert  $G$   $(k+1)$ -transitiv auf  $\Omega$  und  $G_\alpha = H$ .

*Beweis.* Wegen  $H \subseteq G_\alpha$  ist  $G_\alpha$   $k$ -transitiv auf  $\Omega \setminus \{\alpha\}$ . Wegen  ${}^a\alpha \neq \alpha$  ist  $G$  offenbar auch transitiv auf  $\Omega$ . Aus GT-Lemma 6.30 folgt, dass  $G$   $(k+1)$ -transitiv operiert. Es bleibt zu zeigen:  $G_\alpha \subseteq H$ .

Für  $K := H \cup HaH$  ist  $K^{-1} := \{g^{-1} : g \in K\} = K$  wegen  $a^{-1} = a$ . Sei  $z \in H \setminus H_\beta$ . Wegen  $k \geq 2$  operiert  $H_\beta$  transitiv auf  $\Omega \setminus \{\alpha, \beta\}$ . Also existiert ein  $h \in H_\beta$  mit  ${}^{hz}\beta = {}^x\beta$ . Es folgt  $x^{-1}hz \in H_\beta$  und  $z \in H_\beta x H_\beta$ . Dies zeigt  $H = H_\beta \cup H_\beta x H_\beta$ . Die Relationen  $a^2 = x^2 = (ax)^3 = 1$  implizieren  $axa = xax$ . Nach Voraussetzung erhalten wir

$$\begin{aligned} aHa &= aH_\beta a \cup aH_\beta x H_\beta a = H_\beta \cup H_\beta axa H_\beta \\ &= H_\beta \cup H_\beta xax H_\beta \subseteq H \cup HaH = K. \end{aligned}$$

Für  $g, g' \in HaH$  ist also  $gg' \in HaHaH \subseteq HKH \subseteq K$ . Dies zeigt  $K \leq G$ . Wegen  $a \in K$  ist sogar  $G = \langle H, a \rangle = K$ . Für jedes  $g \in G \setminus H \subseteq HaH$  ist also  ${}^g\alpha \neq \alpha$ . Dies zeigt die Behauptung.  $\square$

**Lemma 6.6** (WITT). *Sei  $H$  eine 2-transitive Permutationsgruppe auf  $\Delta := \{4, \dots, n\} \ni \omega$  und sei  $x \in H \setminus H_\omega$  eine Involution. Seien  $a, b, c \in N_{S_n}(H_\omega)$  Involutionen mit*

$$a = (1, \omega)(2)(3) \dots, \quad b = (1, 2)(3)(\omega) \dots, \quad c = (2, 3)(1)(\omega) \dots$$

und

$$(ax)^3 = (ba)^3 = (cb)^3 = 1, \quad (xb)^2 = (xc)^2 = (ac)^2 = 1.$$

Dann ist  $G := \langle H, a, b, c \rangle$  5-transitiv auf  $\{1, \dots, n\}$  und  $G_1 \cap G_2 \cap G_3 = H$ .

*Beweis.* Nach Lemma 6.5 mit  $(\alpha, \beta) = (1, \omega)$  ist  $K := \langle H, a \rangle$  3-transitiv auf  $\Delta \cup \{1\}$  und  $K_1 = H$ . Nach GT-Satz 6.32 operiert  $H$  primitiv auf  $\Delta$ . Insbesondere ist  $H_\omega < H$  maximal und  $H = \langle H_\omega, x \rangle$ . Aus  $x^2 = (xb)^2 = b^2 = 1$  folgt  $xb = bx$ . Insbesondere ist  $bK_1b = bHb = \langle bH_\omega b, x \rangle = \langle H_\omega, x \rangle = H = K_1$ . Eine weitere Anwendung von Lemma 6.5 mit  $(b, a, 2, 1)$  anstelle von  $(a, x, \alpha, \beta)$  zeigt, dass  $L := \langle K, b \rangle$  4-transitiv auf  $\Delta \cup \{1, 2\}$  operiert mit  $L_2 = K$ . Aus den Relationen folgt nun wieder  $ac = ca$  und  $xc = cx$ . Also ist

$$cL_2c = cKc = \langle cHc, a \rangle = \langle cH_\omega c, x, a \rangle = \langle H_\omega, x, a \rangle = K = L_2.$$

Eine dritte Anwendung von Lemma 6.5 mit  $(c, b, 3, 2)$  anstelle von  $(a, x, \alpha, \beta)$  ergibt schließlich, dass  $G = \langle L, c \rangle$  5-transitiv auf  $\{1, \dots, n\}$  operiert mit  $G_3 = L$ . Damit ist auch  $G_1 \cap G_2 \cap G_3 = G_1 \cap L_2 = G_1 \cap K = K_1 = H$ .  $\square$

**Satz 6.7** (MATHIEU). *Sei*

$$\begin{aligned} a &= (1, 4)(7, 8)(9, 11)(10, 12), & b &= (1, 2)(7, 10)(8, 11)(9, 12), \\ c &= (2, 3)(7, 12)(8, 10)(9, 11), & d &= (4, 5, 6)(7, 8, 9)(10, 11, 12), \\ e &= (4, 7, 10)(5, 8, 11)(6, 9, 12), & f &= (5, 7, 6, 10)(8, 9, 12, 11), \\ g &= (5, 8, 6, 12)(7, 11, 10, 9). \end{aligned}$$

Dann ist  $M_{12} := \langle a, b, c, d, e, f, g \rangle \leq S_{12}$  scharf 5-transitiv vom Grad 12 und  $M_{11} := \langle a, b, d, e, f, g \rangle$  ist scharf 4-transitiv vom Grad 11.

*Beweis.* Da  $d$  die drei Zyklen von  $e$  permutiert, ist  $E := \langle d, e \rangle$  elementarabelsch der Ordnung 9. Außerdem operiert  $E$  regulär auf  $\Delta := \{4, \dots, 12\}$ . Offenbar ist  $f^2 = g^2$  eine Involution und  $fgf^{-1} = g^{-1}$ . Für  $Q := \langle f, g \rangle$  gilt also  $\langle g \rangle \trianglelefteq Q$  und  $|Q : \langle g \rangle| = 2$ . Also ist  $|Q| = 8$  ( $Q$  ist eine Quaternionengruppe). Eine Rechnung zeigt

$$\begin{aligned} fdf^{-1} &= e, & gdg^{-1} &= (4, 8, 12)(11, 6, 7)(9, 10, 5) = de, \\ fef^{-1} &= d^{-1}, & geg^{-1} &= (4, 11, 9)(8, 6, 10)(12, 7, 5) = de^{-1}. \end{aligned}$$

Also ist  $Q \subseteq N_{S_{12}}(E)$  und  $H := EQ \leq S_{12}$ . Aus Ordnungsgründen ist  $E \cap Q = 1$  und somit  $|H| = |E||Q| = 9 \cdot 8$ . Da  $E$  regulär auf  $\Delta$  operiert, ist  $H_4 = E_4Q = Q$ . Man sieht leicht, dass  $Q$  transitiv auf  $\Delta \setminus \{4\}$  operiert. Also ist  $H$  2-transitiv auf  $\Delta$  nach GT-Lemma 6.30. Wegen  $|H| = 9 \cdot 8$  und  $|\Omega| = 9$  ist die Operation sogar scharf 2-transitiv. Wir wollen nun Witts Lemma mit  $\omega = 4$  und

$$x := df^2d^{-1} = d(5, 6)(7, 10)(8, 12)(9, 11)d^{-1} = (4, 6)(7, 12)(8, 11)(9, 10) \in H \setminus H_4$$

anwenden. Dafür müssen wir zunächst  $a, b, c \in N_{S_{12}}(H_4) = N_{S_{12}}(Q)$  zeigen:

$$\begin{aligned} afa^{-1} &= g, & aga^{-1} &= a^2fa^{-2} = f, \\ bfb^{-1} &= f^{-1}, & bgb^{-1} &= (5, 11, 6, 9)(7, 12, 10, 8) = gf, \\ cfc^{-1} &= g^{-1}, & cgc^{-1} &= c^2f^{-1}c^{-2} = f^{-1}. \end{aligned}$$

Die Relationen aus Lemma 6.6 überprüft man wie folgt:

$$\begin{aligned} ax &= (1, 4, 6)(7, 10, 11)(8, 9, 12), & ba &= (1, 4, 2)(7, 11, 12)(8, 10, 9), \\ cb &= (1, 3, 2)(7, 8, 9)(10, 12, 11), & xb &= (1, 2)(4, 6)(7, 9)(10, 12), \\ xc &= (2, 3)(4, 6)(8, 9)(10, 11), & ac &= (1, 4)(2, 3)(7, 10)(8, 12). \end{aligned}$$

Also ist  $G := \langle H, a, b, c \rangle = M_{12}$  5-transitiv auf  $\Omega = \{1, \dots, 12\}$  und  $G_1 \cap G_2 \cap G_3 = H$ . Da  $H$  scharf 2-transitiv auf  $\Omega$  operiert, ist  $G_1 \cap G_2 \cap G_3 \cap G_4 \cap G_5 = H_4 \cap H_5 = 1$ . Dies zeigt, dass  $G$  sogar scharf 5-transitiv ist. Im Beweis von Lemma 6.6 ergab sich  $G_3 = M_{11}$ . Nach Bemerkung 6.3 ist  $M_{11}$  also scharf 4-transitiv vom Grad 11.  $\square$

**Bemerkung 6.8.** In der Gruppentheorie haben wir gezeigt, dass die einfache Gruppe  $H = \text{PSL}(3, 4)$  der Ordnung

$$|H| = \frac{(4^3 - 1)(4^3 - 4)(4^3 - 4^2)}{(4 - 1) \text{ggT}(3, 4 - 1)} = 2^6 \cdot 3^2 \cdot 5 \cdot 7 = 20.160$$

2-transitiv auf der Menge  $\Delta$  der 21 1-dimensionalen Unterräume von  $\mathbb{F}_4^3$  operiert (Beweis von GT-Lemma 10.7). Um Vektoren von Permutationen zu unterscheiden, schreiben wir die Elemente von  $\mathbb{F}_4^3$  in der Form  $[r, s, t]$  mit  $r, s, t \in \mathbb{F}_4$ . Sei außerdem  $\mathbb{F}_4^\times = \langle \zeta \rangle$  und  $[[r, s, t]] = \mathbb{F}_4[r, s, t] \in \Delta$ .

**Lemma 6.9.** *Mit den Bezeichnungen aus Bemerkung 6.8 sind folgende Abbildungen Involutionen in  $\text{Sym}(\Delta)$ :*

$$\alpha[[r, s, t]] := [[r^2 + st, s^2, t^2]], \quad \beta[[r, s, t]] := [[r^2, s^2, t^2\zeta]], \quad \gamma[[r, s, t]] := [[r^2, s^2, t^2]]$$

für  $r, s, t \in \mathbb{F}_4$ .

*Beweis.* Da die Werte von  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  homogene Polynome vom Grad 2 in  $r, s, t$  sind, hängen die Bilder von  $[[r, s, t]] = \mathbb{F}_4[r, s, t]$  nicht von der Wahl des Repräsentanten  $[r, s, t]$  ab (d. h.  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  sind

wohldefiniert). Bekanntlich ist  $\mathbb{F}_4 \rightarrow \mathbb{F}_4, x \mapsto x^2$  der Frobenius-Automorphismus (der Ordnung 2). Daher gilt

$$\begin{aligned}\alpha^2[[r, s, t]] &= \alpha[[r^2 + st, s^2, t^2]] = [[r + s^2t^2 + s^2t^2, s, t]] = [[r, s, t]], \\ \beta^2[[r, s, t]] &= \beta[[r^2, s^2, t^2\zeta]] = [[r, s, t\zeta^2\zeta]] = [[r, s, t]], \\ \gamma^2[[r, s, t]] &= [[r, s, t]].\end{aligned}$$

Folglich sind  $\alpha, \beta, \gamma$  invertierbar und haben Ordnung 2. □

**Satz 6.10** (MATHIEU). *Sei  $\text{PSL}(3, 4) \cong H \leq \text{Sym}(\Delta)$  wie in Bemerkung 6.8 und  $\Omega = \Delta \dot{\cup} \{1, 2, 3\}$ . Mit den Bezeichnungen aus Lemma 6.9 sei  $a := (1, [[1, 0, 0]])\alpha$ ,  $b := (1, 2)\beta$  und  $c := (2, 3)\gamma$ . Dann gilt:*

- (i)  $M_{22} := \langle H, a \rangle$  ist 3-transitiv auf  $\Delta \cup \{1\}$ .
- (ii)  $M_{23} := \langle H, a, b \rangle$  ist 4-transitiv auf  $\Omega \setminus \{3\}$ .
- (iii)  $M_{24} := \langle H, a, b, c \rangle$  ist 5-transitiv auf  $\Omega$ .

*Beweis.* Wir benutzen Witts Lemma mit  $\omega = [[1, 0, 0]] \in \Delta$  und

$$x := \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbb{F}_4^\times \in \text{PSL}(3, 4).$$

Nach Lemma 6.9 sind  $a, b, c, x$  Involutionen. Offenbar ist  ${}^b\omega = {}^c\omega = \omega$ . Sei  $F$  der Frobenius-Automorphismus auf  $H$  (bzw.  $\text{SL}(3, 4)$ ). Für  $h \in H$  und  $[[r, s, t]] \in \Delta$  gilt  ${}^{chc}[[r, s, t]] = {}^c[h[r^2, s^2, t^2]] = [F(h)[r, s, t]]$ . Dies zeigt  $cHc^{-1} = H$  und  $c \in N_{24}(H_\omega)$ . Sei  $y := \text{diag}(1, 1, \zeta) \in \text{GL}(3, 4)$ . Dann gilt

$${}^{bhb}[[r, s, t]] = {}^b[h[r^2, s^2, t^2\zeta]] = [yF(h)y^{-1}][r, s, t].$$

Wegen  $yF(h)y^{-1} \in H$  ist auch  $b \in \S_{24}(H_\omega)$ . Außerdem gilt  ${}^{aha}\omega = {}^{ah}1 = {}^a1 = \omega$ . Ein Element  $h \in H_\omega$  hat die Form  ${}^h[[r, s, t]] = [[r + \sigma s + \tau t, \rho_1 s + \rho_2 t, \rho_3 s + \rho_4 t]]$  mit  $\rho_1 \rho_4 + \rho_2 \rho_3 = \det(h) = 1$ . Eine Rechnung zeigt

$$\begin{aligned}{}^{aha}[[r, s, t]] &= {}^{ah}[[r^2 + st, s^2, t^2]] = {}^a[[r^2 + st + \sigma s^2 + \tau t^2, \rho_1 s^2 + \rho_2 t^2, \rho_3 s^2 + \rho_4 t^2]] \\ &= [[r + s^2t^2 + \sigma^2 s + \tau^2 t + (\rho_1 s^2 + \rho_2 t^2)(\rho_3 s^2 + \rho_4 t^2), \rho_1^2 s + \rho_2^2 t, \rho_3^2 s + \rho_4^2 t]] \\ &= [[r + (\sigma^2 + \rho_1 \rho_3)s + (\tau^2 + \rho_2 \rho_4)t, \rho_1^2 s + \rho_2^2 t, \rho_3^2 s + \rho_4^2 t]].\end{aligned}$$

Also entspricht  $aha$  der Matrix

$$\begin{pmatrix} 1 & \sigma^2 + \rho_1 \rho_3 & \tau^2 + \rho_2 \rho_4 \\ 0 & \rho_1^2 & \rho_2^2 \\ 0 & \rho_3^2 & \rho_4^2 \end{pmatrix} \in H_\omega,$$

denn  $\det(aha) = \rho_1^2 \rho_4^2 + \rho_2^2 \rho_3^2 = \det(h)^2 = 1$ . Wieder folgt  $c \in N_{S_{24}}(H_\omega)$ .

Offenbar gilt  $xb = bx$ ,  $xc = cx$  und  $ac = ca$ . Dies zeigt  $(xb)^2 = (xc)^2 = (ac)^2 = 1$ . Es verbleibt zu zeigen:  $(ax)^3 = (ba)^3 = (cb)^3 = 1$ . Dies ergibt aus den folgenden Rechnungen:

$$\begin{aligned}
^{cb}c[[r, s, t]] &= {}^c[[r, s, t\zeta]] = [[r^2, s^2, t^2\zeta^2]] = {}^b[[r, s, t\zeta^2]] = {}^{bcb}[[r, s, t]], \\
^{bab}[[r, s, t]] &= {}^b[[r + s^2t^2\zeta, s, t\zeta^2]] = [[r^2 + st\zeta^2, s^2, t^2\zeta^2]] \stackrel{1+\zeta=\zeta^2}{=} {}^a[[r + s^2t^2, s, t\zeta]] = {}^{aba}[[r, s, t]], \\
^{axa}1 &= {}^a[[0, 1, 0]] = [[0, 1, 0]] = {}^{xax}1, \\
^{axa}[[1, 0, 0]] &= [[1, 0, 0]] = {}^{xax}[[1, 0, 0]], \\
^{axa}[[0, 1, 0]] &= 1 = {}^{xax}[[1, 0, 0]], \\
^{axa}[[r, s, t]] &= {}^a[[s^2, r^2 + st, t^2]] = [[s + r^2t^2 + st^3, r + s^2t^2, t]] \\
&= \left\{ \begin{array}{ll} [[r^2, s^2 + rt, t^2]] & \text{falls } t \neq 0, \\ [[s, r, 0]] & \text{falls } t = 0 \neq rs \end{array} \right\} = {}^x[[s^2 + rt, r^2, t^2]] = {}^{xax}[[r, s, t]].
\end{aligned}$$

Witts Lemma zeigt nun, dass  $M_{24}$  5-transitiv auf  $\Omega$  operiert. Aus den Beweis von Witts Lemma erhält man  $(M_{24})_3 = M_{23}$  und  $M_{22} = (M_{23})_2$ . Damit folgen die restlichen Aussagen.  $\square$

**Definition 6.11.** Man nennt  $M_{11}$ ,  $M_{12}$ ,  $M_{22}$ ,  $M_{23}$  und  $M_{24}$  die *Mathieugruppen* vom Grad 11, 12, 22, 23 bzw. 24. Aus Bemerkung 6.3 ergibt sich

$$\begin{aligned}
|M_{11}| &= 11 \cdot 10 \cdot 9 \cdot 8 = 7.920 = 2^4 \cdot 3^2 \cdot 5 \cdot 11, \\
|M_{12}| &= 12 \cdot 11 \cdot 10 \cdot 9 \cdot 8 = 95.040 = 2^6 \cdot 3^3 \cdot 5 \cdot 11, \\
|M_{22}| &= 22|\text{PSL}(3, 4)| = 443.520 = 2^7 \cdot 3^2 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 11, \\
|M_{23}| &= 23|M_{22}| = 10.200.960 = 2^7 \cdot 3^2 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 11 \cdot 23, \\
|M_{24}| &= 24|M_{23}| = 244.823.040 = 2^{10} \cdot 3^3 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 11 \cdot 23.
\end{aligned}$$

**Lemma 6.12.** Sei  $G \leq \text{Sym}(\Omega)$  3-transitiv vom Grad  $d = |\Omega| \geq 5$ . Ist  $G_\omega$  einfach für ein  $\omega \in \Omega$ , so ist  $G$  einfach oder  $d$  ist eine 2-Potenz.

*Beweis.* Der Beweis funktioniert wie bei der Einfachheit der alternierenden Gruppen. Sei  $1 \neq N \leq G$ . Nach GT-Satz 6.20 operiert  $N$  transitiv. Das Frattini-Argument liefert  $G = G_\omega N$ . Wir können indirekt  $G_\omega \not\leq N$  annehmen. Aus der Einfachheit von  $G_\omega$  folgt  $N_\omega = G_\omega \cap N = 1$ . Also ist  $N$  ein regulärer Normalteiler und  $|N| = d \geq 5$ . Nach GT-Satz 6.19 operiert  $G_\omega$  2-transitiv auf  $N \setminus \{1\}$  durch Konjugation. Aus GT-Satz 6.33 folgt  $d = |N| = 2^k$  für ein  $k \in \mathbb{N}$ .  $\square$

**Beispiel 6.13.** Sei  $d = 2^n \geq 8$  und  $\Omega := \mathbb{F}_2^n$ . Nach linearer Algebra operiert die einfache Gruppe  $\text{GL}(n, 2)$  2-transitiv auf  $\Omega \setminus \{0\}$ . Daher operiert die nicht-einfache Gruppe  $\text{AGL}(n, 2) = \mathbb{F}_2^n \rtimes \text{GL}(n, 2)$  3-transitiv auf  $\Omega$  mit Stabilisator  $G_0 = \text{GL}(n, 2)$  (GT-Beispiel 6.23).

**Satz 6.14.** Die Mathieugruppen  $M_{11}$ ,  $M_{12}$ ,  $M_{22}$ ,  $M_{23}$  und  $M_{24}$  sind einfach.

*Beweis* (CHAPMAN). Sei zunächst  $G = M_{11}$  und  $P \in \text{Syl}_{11}(G)$ . In  $S_{11}$  gibt es  $10!$  Elemente der Ordnung 11, die sich auf  $9!$  Sylowgruppen verteilen. Also ist  $|\text{N}_{S_{11}}(P)| = 11 \cdot 10$  und  $|\text{N}_G(P) : P|$  teilt 10. Nach Sylow ist

$$5 \equiv 10 \cdot 9 \cdot 8 = \frac{|G|}{11} = |G : \text{N}_G(P)| |\text{N}_G(P) : P| \equiv |\text{N}_G(P) : P| \pmod{11}$$



und somit  $|N_G(P) : P| = 5$  und  $|G : N_G(P)| = 16 \cdot 9$ . Sei nun  $1 \neq N \trianglelefteq G$ . Dann ist  $N$  transitiv und alle 11-Sylowgruppen von  $G$  liegen in  $N$ . Insbesondere ist  $|N : N_N(P)| = 16 \cdot 9$ . Dies zeigt  $|G : N| \leq 5$ . Nehmen wir  $|G : N| = 5$  an. Dann besitzt  $N$  genau  $16 \cdot 9 \cdot 10$  Elemente der Ordnung 11. Die übrigen  $|N|/11$  Elemente müssen dann den Stabilisator  $N_1$  bilden. Insbesondere ist  $N_1 = \dots = N_{11}$ . Dann kann  $N$  aber nicht treu operieren. Also ist  $G = N$  und  $G$  ist einfach.

Die Einfachheit von  $M_{12}$  folgt nun aus Lemma 6.12, da  $M_{11}$  ein Stabilisator von  $M_{12}$  ist. Da  $\text{PSL}(3, 4)$  einfach ist, kann man mit Lemma 6.12 auch die Einfachheit von  $M_{22}$ ,  $M_{23}$  und  $M_{24}$  zeigen.  $\square$

### Bemerkung 6.15.

- (i) Gelegentlich definiert man die Mathieugruppen  $M_9$ ,  $M_{10}$ ,  $M_{20}$  und  $M_{21} \cong \text{PSL}(3, 4)$  als geeignete Stabilisatoren der größeren Mathieugruppen. Sie sind jedoch keine sporadisch einfachen Gruppen. Im Beweis von Satz 6.7 haben wir  $M_9 \cong C_3^2 \rtimes Q_8$  als scharf 2-transitive Gruppe vom Grad 9 konstruiert. Insbesondere ist  $M_9$  eine Frobeniusgruppe.
- (ii) Man kann (elementar) zeigen, dass  $S_k$ ,  $S_{k+1}$ ,  $A_{k+2}$ ,  $M_{11}$  und  $M_{12}$  die einzigen scharf  $k$ -transitiven Permutationsgruppen mit  $k \geq 4$  sind. Mit der CFSG konnte man zeigen, dass  $S_n$ ,  $A_n$ ,  $M_{11}$ ,  $M_{12}$ ,  $M_{23}$  und  $M_{24}$  die einzigen 4-transitiven Permutationsgruppen sind.
- (iii) Man kann die Mathieugruppen auch jeweils mit nur zwei Permutationen erzeugen, aber dann ist es schwierig die Struktur (geschweige denn die Ordnung) zu bestimmen. Tatsächlich stieß Mathieus Arbeit von 1861 lange Zeit auf Unverständnis. So behauptete MILLER 1898  $M_{24}$  würde nicht existieren. Nach der CFSG weiß man, dass sich jede endliche einfache Gruppe mit einer Involution und einem weiteren Element mit Primzahlordnung erzeugen lässt.
- (iv) Die nachfolgende Definition lässt sich folgendermaßen motivieren: Wie viele Lotto-Scheine muss man kaufen, wenn man garantiert vier „Richtige“ haben will? Im besten Fall kommt jede 4er Kombination nur auf einem Tippschein vor (ob das möglich ist, sehen wir in Beispiel 6.19).

**Definition 6.16.** Ein  $((t, k, v)\text{-})\text{Steinersystem}$  ist ein Paar  $S = (\Omega, \mathcal{B})$  mit folgenden Eigenschaften:

- $\Omega$  ist eine  $v$ -elementige Menge von „Punkten“ (engl. vertices).
- $\mathcal{B}$  ist eine Menge von  $k$ -elementigen Teilmengen von  $\Omega$ , die „Blöcke“ genannt werden.<sup>10</sup>
- Jede  $t$ -elementige Teilmenge von  $\Omega$  liegt in genau einem Block von  $\mathcal{B}$ .

Man nennt

$$\text{Aut}(S) := \{\sigma \in \text{Sym}(\Omega) : \forall B \in \mathcal{B} : \sigma(B) \in \mathcal{B}\} \leq \text{Sym}(\Omega)$$

die *Automorphismengruppe* von  $S$ .

### Beispiel 6.17.

- (i)  $(t, k, v)$ -Steinersysteme können offensichtlich nur für  $t \leq k \leq v$  existieren. Im Fall  $t = k$  ist  $\mathcal{B}$  die Menge aller  $k$ -elementigen Teilmengen von  $\Omega$  und  $\text{Aut}(S) = \text{Sym}(\Omega)$ . Im Fall  $k = v$  ist  $\mathcal{B} = \{\Omega\}$  und  $\text{Aut}(S) = \text{Sym}(\Omega)$ . Diese Steinersysteme nennt man *trivial*. Wir können also  $t < k < v$  annehmen.
- (ii) Im Fall  $t = 1$  ist  $\mathcal{B}$  eine Partition von  $\Omega$  und es folgt  $k \mid v$ . Die Anzahl dieser Steinersysteme ist die Stirling-Zahl der zweiten Art  $\left\{ \begin{smallmatrix} v \\ k \end{smallmatrix} \right\}$ . Wir sehen in Lemma 6.18, dass es im Allgemeinen starke Einschränkungen an  $t, k, v$  gibt.

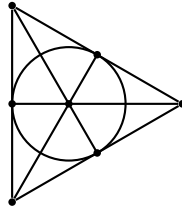
<sup>10</sup>Dies hat nichts mit den Blöcken einer imprimitiven Operation zu tun.

- (iii) Sei  $q$  eine Primzahlpotenz,  $n \geq 2$ ,  $\Omega = \mathbb{F}_q^n$  und

$$\mathcal{B} = \{\mathbb{F}_q v + w : v, w \in \Omega, v \neq 0\}$$

die Menge der „Geraden“ auf  $\Omega$  (man ersetze gedanklich  $\mathbb{F}_q$  durch  $\mathbb{R}$ ). Da je zwei verschiedene Punkte auf genau einer Geraden liegen, ist  $S = (\Omega, \mathcal{B})$  ein  $(2, q, q^n)$ -Steinersystem. Man nennt  $S$  *affine Ebene* über  $\mathbb{F}_q^n$ .

- (iv) Sei  $n \geq 3$ ,  $\Omega = \{\mathbb{F}_q v : v \in \mathbb{F}_q^n \setminus \{0\}\}$  die Menge der 1-dimensionalen Unterräume von  $\mathbb{F}_q^n$  und  $\mathcal{B}$  die Menge der 2-dimensionalen Unterräume von  $\mathbb{F}_q^n$  (formal: jeder Block besteht aus den 1-dimensionalen Unterräumen eines 2-dimensionalen Raums). Da je zwei linear unabhängige Vektoren einen 2-dimensionalen Unterraum aufspannen, ist  $S = (\Omega, \mathcal{B})$  ein  $(2, q+1, \frac{q^n-1}{q-1})$ -Steinersystem. Man nennt  $S$  *projektive Ebene* über  $\mathbb{F}_q^n$ . Für  $(q, n) = (2, 3)$  erhält man die *Fano-Ebene*:



**Lemma 6.18.** Sei  $S = (\Omega, \mathcal{B})$  ein  $(t, k, v)$ -Steinersystem und  $0 \leq s \leq t$ . Dann gilt:

- (i) Die Anzahl der Blöcke, die eine gegebene  $s$ -elementige Teilmenge von  $\Omega$  enthalten, ist

$$\gamma_s := \frac{(v-s)(v-s-1)\dots(v-t+1)}{(k-s)(k-s-1)\dots(k-t+1)}.$$

- (ii)  $|\mathcal{B}| = \gamma_0 = \frac{v\gamma_1}{k}$ .

- (iii) (FISHERS Ungleichung)  $v \leq |\mathcal{B}|$  und  $k \leq \gamma_1$ .

*Beweis.*

- (i) Jede  $s$ -elementige Teilmenge liegt in genau  $\binom{v-s}{t-s}$   $t$ -elementigen Teilmengen von  $\Omega$ . Jede  $t$ -elementige Teilmenge liegt nach Definition in genau einem Block. Jeder Block enthält genau  $\binom{k-s}{t-s}$   $s$ -elementige Teilmengen. Dies zeigt

$$\gamma_s = \frac{\binom{v-s}{t-s}}{\binom{k-s}{t-s}} = \frac{(v-s)(v-s-1)\dots(v-t+1)}{(k-s)(k-s-1)\dots(k-t+1)}.$$

- (ii) Folgt aus (i).

- (iii) Sei  $\Omega = \{\omega_1, \dots, \omega_v\}$  und  $\mathcal{B} = \{B_1, \dots, B_r\}$ . Sei  $M := (m_{ij}) \in \mathbb{Z}^{v \times r}$  die Inzidenzmatrix von  $S$ , d. h.  $m_{ij} = 1$  falls  $\omega_i \in B_j$  und  $m_{ij} = 0$  sonst. Dann gilt

$$MM^t = \left( \sum_{l=1}^r m_{il} m_{jl} \right)_{ij} = \begin{pmatrix} \gamma_1 & \gamma_2 & \cdots & \gamma_2 \\ \gamma_2 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \gamma_2 \\ \gamma_2 & \cdots & \gamma_2 & \gamma_1 \end{pmatrix} = (\gamma_1 - \gamma_2)1_v + \gamma_2 J,$$



zu  $M_{24}$  isomorph ist. Die Vektoren (*Codewörter*) mit genau acht Einsen in  $C$  entsprechen den Blöcken eines  $(5, 8, 24)$ -Steinersystems (die Positionen der Einsen sind die Blöcke). Der Golay-Code wurde zur Datenübertragung der Voyager-Raumsonden benutzt.

- (iv) Die Automorphismengruppen und Schur-Multiplikatoren sind

$G$	$M_{11}$	$M_{12}$	$M_{22}$	$M_{23}$	$M_{24}$
$\text{Out}(G)$	1	$C_2$	$C_2$	1	1
$M(G)$	1	$C_2$	$C_{12}$	1	1

(ohne Beweis). Für alle sporadisch einfachen Gruppen  $S$  gilt  $|\text{Out}(S)| \leq 2$ . Für die korrekte Berechnung von  $M(M_{22})$  hat man drei Anläufe benötigt. „Schlimmer“ ist nur  $M(M_{21}) = M(\text{PSL}(3, 4)) \cong C_{12} \times C_4$ . In GAP kann man zum Beispiel folgendes anstellen:

```
G:=MathieuGroup(24);;
AllPrimitiveGroups(NrMovedPoints,24,Transitivity,5); #gibt nur eine
PrimitiveIdentification(G); #G=PrimitiveGroup(24,1)
IsSimple(G);
H:=Stabilizer(G,24); #= $M_{23}$ 

LoadPackage("guava",false); #Paket für Codes
C:=ExtendedBinaryGolayCode();
Display(GeneratorMat(C));
A:=AutomorphismGroup(C);
Transitivity(A); #5-transitiv
c:=Positions(Basis(C)[1],Z(2)^0); #Codewort mit genau acht Einsen
B:=Orbit(A,c,OnSets);; #Blöcke des (5,8,24)-Steinersystems
Size(B); # $759 = (24 \cdot 23 \cdot 22 \cdot 21 \cdot 20) / (8 \cdot 7 \cdot 6 \cdot 5 \cdot 4)$ 
```

- (v) Die Gruppe  $M_{23}$  ist die einzige sporadische Gruppe, für die das *inverse Galois-Problem* noch nicht gelöst ist, d. h. man weiß nicht, ob es einen Zahlkörper  $K \subseteq \mathbb{C}$  mit  $\text{Gal}(K|\mathbb{Q}) \cong M_{23}$  gibt.
- (vi) Eng verwandt mit dem Golay-Code ist das *Leech-Gitter*  $L \leq \mathbb{Z}^{24}$ , welches aus den ganzzahligen Linearkombinationen der Zeilen folgender Matrix besteht:

[illegible]

Sei  $A := \text{Aut}(L) := \{f \in \text{O}(\mathbb{R}^{24}) : f(L) = L\}$ , wobei  $\text{O}(\mathbb{R}^n)$  die orthogonale Gruppe ist (Matrizen  $x$  mit  $xx^t = 1_n$ ). Nach Aufgabe 25 ist  $A$  endlich. Es gilt  $Z(A) = \langle -1_{24} \rangle$  und man nennt  $\text{Co}_1 :=$

$A/Z(A)$  die erste *Conway-Gruppe* ( $A$  ist eine Schur-Erweiterung von  $Co_1$ ). Folgende Vektoren liegen in  $L$ :

$$\begin{aligned}u &:= (4, 4, 0, \dots, 0), \\v &:= (4, -4, 0, \dots, 0), \\w &:= (5, 1, \dots, 1).\end{aligned}$$

Man nennt  $Co_2 := C_A(u)$  bzw.  $Co_3 := C_A(w)$  die zweite bzw. dritte Conway-Gruppe. Außerdem ist  $McL := C_A(u, w)$  die *McLaughlin-Gruppe* und  $C_A(v, w) \cong HS$ . Alle sind sporadisch einfache Gruppen mit Ordnungen

$$\begin{aligned}|Co_1| &= 2^{21} \cdot 3^9 \cdot 5^4 \cdot 7^2 \cdot 11 \cdot 13 \cdot 23 = 4.157.776.806.543.360.000, \\|Co_2| &= 2^{18} \cdot 3^6 \cdot 5^3 \cdot 7 \cdot 11 \cdot 23 = 42.305.421.312.000, \\|Co_3| &= 2^{10} \cdot 3^7 \cdot 5^3 \cdot 7 \cdot 11 \cdot 23 = 495.766.656.000, \\|McL| &= 2^7 \cdot 3^6 \cdot 5^3 \cdot 7 \cdot 11 = 898.128.000.\end{aligned}$$

- (vii) Erst über 100 Jahre nach Mathieus Arbeit entdeckte JANKO die nächste sporadisch einfache Gruppe  $J_1$ . Sie lässt sich am einfachsten durch eine  $\mathbb{F}_{11}$ -Darstellung definieren:

$$J_1 := \left\langle \begin{pmatrix} \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \\ 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -3 & 2 & -1 & -1 & -3 & -1 & -3 \\ -2 & 1 & 1 & 3 & 1 & 3 & 3 \\ -1 & -1 & -3 & -1 & -3 & -3 & 2 \\ -1 & -3 & -1 & -3 & -3 & 2 & -1 \\ -3 & -1 & -3 & -3 & 2 & -1 & -1 \\ 1 & 3 & 3 & -2 & 1 & 1 & 3 \\ 3 & 3 & -2 & 1 & 1 & 3 & 1 \end{pmatrix} \right\rangle \leq GL(7, 11).$$

Es gilt  $|J_1| = 2^3 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 11 \cdot 19 = 175.560$ . Drei weitere sporadische Gruppen  $J_2$ ,  $J_3$  und  $J_4$  sind nach Janko benannt.

- (viii) Präsentationen, Permutations- und Matrixdarstellungen sämtlicher sporadischer Gruppen kann man unter <http://brauer.maths.qmul.ac.uk/Atlas/v3/> nachschlagen oder direkt mit GAP beziehen:

```
LoadPackage("atlasrep");
DisplayAtlasInfo("M24"); #Übersicht Darstellungen, braucht Internet
AtlasGroup("M24", Dimension, 11, Ring, GF(2));
prog:=AtlasProgram("M24", "presentation");
slp:=StraightLineProgramFromStraightLineDecision(prog.program);
F:=FreeGroup(2);
rels:=ResultOfStraightLineProgram(slp, GeneratorsOfGroup(F));
G:=F/rels;
PresentationFpGroup(G);

ct:=CharacterTable("M"); #Charaktertafel des Monsters
PrintFactorsInt(Size(ct)); #Primfaktorisierung der Ordnung
NrConjugacyClasses(ct);
SizesConjugacyClasses(ct);
OrdersClassRepresentatives(ct); #Ordnungen der Elemente bis auf Konjugation
```

- (ix) Erst 2014 konnte KEEVASH zeigen, dass es nicht-triviale  $(t, k, v)$ -Steinersysteme mit  $t \geq 6$  gibt. Tatsächlich sind die Teilbarkeitsbedingungen aus Lemma 6.18 in den „meisten“ Fällen hinreichend für die Existenz eines entsprechenden Steinersystems. Der Beweis ist probabilistisch und nicht konstruktiv.<sup>13</sup> Die Anzahl der  $(2, 3, v)$ -Steinersysteme für  $v \leq 19$  kann man unter OEIS nachschlagen.

<sup>13</sup>Dazu ein populärwissenschaftlicher Artikel: [wired.com](http://wired.com)

## 7 Symplektische Gruppen

**Bemerkung 7.1.** Die kompliziertesten einfachen Gruppen aus der CFSG sind die Gruppen vom *Lie-Typ*. Dies sind gewisse Matrixgruppen über endlichen Körpern, von denen wir die projektiven speziellen linearen Gruppen  $\mathrm{PSL}(n, q)$  bereits in der Gruppentheorie konstruiert haben. In diesem Kapitel werden die (projektiven) symplektischen Gruppen  $\mathrm{PSp}(2n, q)$  eingeführt, die nur in gerader Dimension existieren. Für  $n = 1$  gilt  $\mathrm{PSp}(2, q) = \mathrm{PSL}(2, q)$ . Für  $n \geq 2$  erhält man „neue“ einfache Gruppen. Der Beweis benutzt Iwasawas Lemma. Im Unterschied zu  $\mathrm{PSL}(n, q)$  versuchen wir diesmal „koordinatenfrei“ zu argumentieren.

**Definition 7.2.** Sei  $K$  ein Körper und  $V$  ein endlich-dimensionaler  $K$ -Vektorraum. Sei  $\beta : V \times V \rightarrow K$ ,  $(v, w) \mapsto [v, w]$  eine Bilinearform mit folgenden Eigenschaften:

- (nicht-ausgeartet) Für alle  $v \in V \setminus \{0\}$  existiert ein  $w \in V$  mit  $[v, w] \neq 0$ .
- (alternierend) Für alle  $v \in V$  gilt  $[v, v] = 0$ .

Für  $v \in V$  und  $U \subseteq V$  sei  $v^\perp := \{w \in V : [v, w] = 0\} \leq V$  und  $U^\perp := \bigcap_{u \in U} u^\perp \leq V$ .

**Bemerkung 7.3.** Aus  $[v, v] = 0$  folgt die *Antisymmetrie*  $[u, v] = [u + v, u + v] - [v, u] = -[v, u]$  für  $u, v \in V$ . Für  $\mathrm{char} K \neq 2$  sind die Begriffe „alternierend“ und „antisymmetrisch“ äquivalent, denn  $[v, v] = -[v, v] = 0$ . Für  $\mathrm{char} K = 2$  ist Symmetrie und Antisymmetrie identisch.

**Satz 7.4.** Für  $U \leq V$  gilt  $\dim V = \dim U + \dim U^\perp$  (aber nicht unbedingt  $U \cap U^\perp = 0$ ).

*Beweis.* Wir ergänzen eine Basis  $b_1, \dots, b_k$  von  $U$  zu einer Basis  $b_1, \dots, b_n$  von  $V$ . Bezüglich dieser Basis identifizieren wir  $V$  mit  $K^n$ . Für die Gram-Matrix  $B = ([b_i, b_j])$  von  $\beta$  gilt dann  $[v, w] = vBw^t$  für  $v, w \in V$ . Da  $\beta$  nicht-ausgeartet ist, ist  $B$  invertierbar (alternierend wird für den Beweis nicht benötigt). Die ersten  $k$  Zeilen von  $B$  bilden eine Matrix  $A$  vom Rang  $k = \dim U$ . Nun ist  $U^\perp$  der Lösungsraum des homogenen Gleichungssystems  $Ax = 0$ . Aus der linearen Algebra folgt  $\dim U^\perp = n - k = \dim V - \dim U$ .  $\square$

**Satz 7.5.** Es existiert eine Basis  $b_1, \dots, b_n, c_1, \dots, c_n$  von  $V$  mit  $[b_i, b_j] = 0 = [c_i, c_j]$  und  $[b_i, c_j] = \delta_{ij}$  für  $i, j = 1, \dots, n$ . Insbesondere ist  $\dim V = 2n$  gerade (vgl. GT-Aufgabe 63).

*Beweis.* Induktion nach  $\dim V$ . Sei  $b_1 \in V \setminus \{0\}$ . Da  $\beta$  nicht-ausgeartet ist, existiert  $c_1 \in V$  mit  $[b_1, c_1] \neq 0$ . Nach Skalierung gilt  $[b_1, c_1] = 1$ . Sei nun  $U := \langle b_1, c_1 \rangle$ . Offenbar ist  $U \cap U^\perp = 0$  und Satz 7.4 zeigt  $V = U \oplus U^\perp$ . Für  $u \in U^\perp$  existiert ein  $v \in V$  mit  $[u, v] \neq 0$ . Schreibt man  $v = v_1 + v_2$  mit  $v_1 \in U$  und  $v_2 \in U^\perp$ , so folgt  $[u, v_2] = [u, v] \neq 0$ . Daher ist auch die Einschränkung von  $\beta$  auf  $U^\perp$  nicht-ausgeartet und alternierend. Die Behauptung folgt nun mit Induktion.  $\square$

**Definition 7.6.**

- Man nennt  $(v, w) \in V^2$  mit  $[v, w] = 1$  ein *hyperbolisches Paar*. Eine Basis wie in Satz 7.5 nennt man *symplektisch*.
- Wir nennen

$$\begin{aligned} \mathrm{Sp}(V) &:= \{f \in \mathrm{GL}(V) : [f(v), f(w)] = [v, w]\} \leq \mathrm{GL}(V), \\ \mathrm{PSp}(V) &:= \mathrm{Sp}(V)/\mathrm{Z}(\mathrm{Sp}(V)). \end{aligned}$$

die (projektive) *symplektische Gruppe* von  $V$ .

**Bemerkung 7.7.**

- (i) Die Gram-Matrix von  $\beta$  bzgl. einer symplektischen Basis ist  $B = \begin{pmatrix} 0 & 1_n \\ -1_n & 0 \end{pmatrix}$ . Für  $v, w \in K^{2n}$  bzgl. dieser Basis gilt  $[v, w] = vBw^t$ . Dies zeigt

$$\mathrm{Sp}(2n, K) := \{A \in \mathrm{GL}(2n, K) : A^t B A = B\} \cong \mathrm{Sp}(V).$$

Insbesondere hängt der Isomorphietyp von  $\mathrm{Sp}(V)$  nicht von  $\beta$  ab. Für endliche Körper setzen wir  $\mathrm{Sp}(2n, q) := \mathrm{Sp}(2n, \mathbb{F}_q)$ .

- (ii) Für  $A = \begin{pmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{pmatrix} \in \mathrm{Sp}(2n, K)$  gilt

$$\begin{pmatrix} A_1^t & A_3^t \\ A_2^t & A_4^t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_3 & A_4 \\ -A_1 & -A_2 \end{pmatrix} = A^t B A = B = \begin{pmatrix} 0 & 1_n \\ -1_n & 0 \end{pmatrix},$$

also  $A_1^t A_3 = A_3^t A_1$ ,  $A_2^t A_4 = A_4^t A_2$  und  $A_1^t A_4 = 1_n + A_3^t A_2$ . Für  $n = 1$  sind die ersten beiden Gleichungen trivial und die dritte besagt  $\det(A) = 1$ . Dies zeigt  $\mathrm{Sp}(2, K) = \mathrm{SL}(2, K)$ . Für beliebiges  $n$  ist  $\begin{pmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_1^{-t} \end{pmatrix} \in \mathrm{Sp}(V)$  für alle  $A_1 \in \mathrm{GL}(n, K)$ . Daher ist  $\mathrm{GL}(n, K)$  zu einer Untergruppe von  $\mathrm{Sp}(2n, K)$  isomorph.

- (iii) Wir können die Gram-Matrix von  $\beta$  auch in der Form  $B = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \oplus \dots \oplus \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$  anordnen. Dann folgt  $\mathrm{Sp}(2k, K) \times \mathrm{Sp}(2(n-k), K) \leq \mathrm{Sp}(2n, K)$  für  $0 < k < n$ .

**Lemma 7.8.** *Es gilt  $Z(\mathrm{Sp}(V)) = \mathrm{Sp}(V) \cap K^\times \mathrm{id} = \langle -\mathrm{id} \rangle$ .*

*Beweis.* Wegen  $-\mathrm{id} \in \mathrm{Sp}(V) \cap K^\times \mathrm{id} \subseteq Z(\mathrm{Sp}(V))$  müssen wir nur  $Z(\mathrm{Sp}(2n, K)) \subseteq \langle -1_2 \rangle$  zeigen. Für  $n = 1$  ist  $Z(\mathrm{Sp}(2, K)) = Z(\mathrm{SL}(2, K)) = \langle -1_2 \rangle$  (im Fall  $\mathrm{char} K = 2$  ist  $-1_2 = 1_2$ ). Sei also  $n \geq 2$ . Wir schreiben  $A = \begin{pmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{pmatrix} \in Z(\mathrm{Sp}(2n, K))$  wie in Bemerkung 7.7. Für  $M = \begin{pmatrix} C & 0 \\ 0 & C^{-t} \end{pmatrix} \in \mathrm{Sp}(2n, K)$  mit  $C \in \mathrm{GL}(n, K)$  gilt

$$\begin{pmatrix} A_1 C & A_2 C^{-t} \\ A_3 C & A_4 C^{-t} \end{pmatrix} = A M = M A = \begin{pmatrix} C A_1 & C A_2 \\ C^{-t} A_3 & C^{-t} A_4 \end{pmatrix}.$$

Dies zeigt  $A_1, A_4 \in Z(\mathrm{GL}(n, K)) = K^\times 1_n$ . Für  $C = 1_n + E_{ij}$  mit  $i \neq j$  folgt  $E_{ij} A_2 = -A_2 E_{ji}$  und  $A_2 = 0$ . Analog ist  $A_3 = 0$  und man erhält  $A_1^t = A_4^{-1} \in \mathrm{GL}(n, K)$ . Sei  $\lambda \in K^\times$  mit  $A_1 = \lambda 1_n$  und  $A_4 = \lambda^{-1} 1_n$ . Wegen  $B = \begin{pmatrix} 0 & 1_n \\ -1_n & 0 \end{pmatrix} \in \mathrm{Sp}(2n, K)$  gilt auch

$$\begin{pmatrix} 0 & A_1 \\ -A_4 & 0 \end{pmatrix} = A B = B A = \begin{pmatrix} 0 & A_4 \\ -A_1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Also ist  $\lambda = \lambda^{-1} = \pm 1$ . □

**Satz 7.9.** *Es gilt*

$$\begin{aligned} |\mathrm{Sp}(2n, q)| &= q^{n^2} \prod_{k=1}^n (q^{2k} - 1), \\ |\mathrm{PSp}(2n, q)| &= \frac{1}{\mathrm{ggT}(q-1, 2)} q^{n^2} \prod_{k=1}^n (q^{2k} - 1). \end{aligned}$$

*Beweis.* Nach Lemma 7.8 folgt die zweite Gleichung aus der ersten. Jedes  $f \in \text{Sp}(V)$  bildet eine symplektische Basis auf eine symplektische Basis ab. Umgekehrt kann man dadurch genau ein  $f \in \text{Sp}(V)$  definieren. Daher ist  $|\text{Sp}(V)|$  die Anzahl der symplektischen Basen von  $V$ . Für  $b_1 \in V \setminus \{1\}$  gibt es  $q^{2n} - 1$  Möglichkeiten. Der Vektor  $c_1$  definiert genau eine Nebenklasse  $c_1 + b_1^\perp$ . Also gibt es  $|b_1^\perp| = q^{2n-1}$  Möglichkeiten für  $c_1$ . Im Fall  $n = 1$  ist daher  $|\text{Sp}(2, q)| = q(q^2 - 1)$  wie behauptet. Sei nun  $n \geq 2$  und  $U := \langle b_1, c_1 \rangle$ . Wie in Satz 7.5 ist  $V = U \oplus U^\perp$  und  $b_2, \dots, b_n, c_2, \dots, c_n$  bilden eine symplektische Basis von  $U^\perp$ . Durch Induktion nach  $n$  folgt

$$|\text{Sp}(2n, q)| = q^{2n-1}(q^{2n} - 1)|\text{Sp}(2n-2, q)| = q^{2n-1+(n-1)^2} \prod_{k=1}^n (q^{2k} - 1) = q^{n^2} \prod_{k=1}^n (q^{2k} - 1). \quad \square$$

**Definition 7.10.** Für  $\lambda \in K$  und  $v \in V$  nennt man die lineare Abbildung

$$t_{\lambda, v} : V \rightarrow V, \quad x \mapsto x + \lambda[x, v]v$$

eine (*symplektische*) *Transvektion*.

**Bemerkung 7.11.** Wegen

$$[t_{\lambda, v}(x), t_{\lambda, v}(y)] = [x, y] + \lambda[x, v][v, y] + \lambda[y, v][x, v] + \lambda^2[x, v][y, v][v, v] = [x, y]$$

für  $x, y \in V$  ist  $t_{\lambda, v} \in \text{Sp}(V)$ . Offenbar ist  $v^\perp$  der Fixpunktraum (Eigenraum zum Eigenwert 1) von  $t_{\lambda, v}$ . Für ein hyperbolisches Paar  $(v, w)$  gilt  $t_{\lambda, v}(w) = w - \lambda v \in w + v^\perp$ . Dies zeigt  $\det(t_{\lambda, v}) = 1$ . Außerdem ist

$$t_{\lambda, v}(t_{\mu, v}(x)) = t_{\lambda, v}(x + \mu[x, v]v) = x + \mu[x, v]v + \lambda[x + \mu[x, v]v, v]v = t_{\lambda + \mu, v}(x).$$

Insbesondere ist  $t_{\lambda, v}^{-1} = t_{-\lambda, v}$ . Für  $g \in \text{Sp}(V)$  gilt

$$(gt_{\lambda, v}g^{-1})(x) = g(g^{-1}(x) + \lambda[g^{-1}(x), v]v) = x + \lambda[x, g(v)]g(v) = t_{\lambda, g(v)}(x).$$

Für  $\mu \in K$  ist

$$t_{\lambda, \mu v}(x) = x + \lambda[x, \mu v]\mu v = x + \lambda\mu^2[x, v]v = t_{\lambda\mu^2, v}(x).$$

**Lemma 7.12.** Die symplektischen Transvektionen erzeugen  $\text{Sp}(V)$ . Insbesondere ist  $\text{Sp}(V) \leq \text{SL}(V)$ .

*Beweis.* Nach Satz 7.9 genügt es zu zeigen, dass  $S := \langle t_{\lambda, v} : \lambda \in K, v \in V \rangle$  transitiv auf der Menge  $\Omega$  aller symplektischen Basen operiert. Seien  $v, w \in V \setminus \{0\}$ . Falls  $\lambda := [v, w] \neq 0$ , so ist

$$t_{\lambda^{-1}, v-w}(v) = v + \lambda^{-1}[v, v-w](v-w) = v - (v-w) = w.$$

Anderenfalls wähle  $x \in V \setminus (v^\perp \cup w^\perp)$ . Man kann nun  $v \mapsto x \mapsto w$  durch zwei Transvektionen realisieren. Also ist  $S$  transitiv auf  $V \setminus \{0\}$ .

Seien nun  $u, v, w \in V$  mit  $[u, v] = [u, w] = 1$ . Dann ist  $v - w \in u^\perp$ . Im Fall  $\lambda := [v, w] \neq 0$  gilt  $t_{\lambda^{-1}, v-w}(u, v) = (u, w)$ . Anderenfalls setze  $x := u + v$ . Dann ist  $[u, v] = [u, x] = [u, w] = 1$  und  $[v, x] \neq 0 \neq [x, w]$ . Man kann daher  $(u, v) \mapsto (u, x) \mapsto (u, w)$  durch zwei Transvektionen realisieren. Damit ist  $S$  transitiv auf der Menge der hyperbolischen Paare.

Seien schließlich  $b_1, \dots, b_n, c_1, \dots, c_n$  und  $b'_1, \dots, b'_n, c'_1, \dots, c'_n$  symplektische Basen von  $V$ . Nach dem bereits Gezeigten können wir  $(b'_1, c'_1) = (b_1, c_1)$  annehmen. Dann sind

$$b_2, \dots, b_n, c_2, \dots, c_n \quad \text{und} \quad b'_2, \dots, b'_n, c'_2, \dots, c'_n$$



symplektische Basen von  $\langle b_1, c_1 \rangle^\perp$ . Nach Induktion existiert ein Produkt von symplektischen Transvektionen auf  $\langle b_1, c_1 \rangle^\perp$ , dass  $(b_2, \dots, b_n, c_2, \dots, c_n)$  auf  $(b'_2, \dots, b'_n, c'_2, \dots, c'_n)$  abbildet. Für  $x \in \langle b_1, c_1 \rangle^\perp$  werden  $b_1$  und  $c_1$  von  $t_{\lambda, x}$  festgehalten. Die Transvektionen auf  $\langle b_1, c_1 \rangle^\perp$  lassen sich also nach  $V = \langle b_1, c_1 \rangle^\perp \oplus \langle b_1, c_1 \rangle$  fortsetzen, indem man trivial auf  $\langle b_1, c_1 \rangle$  operiert. Also kann man  $b_1, \dots, b_n, c_1, \dots, c_n$  auf  $b'_1, \dots, b'_n, c'_1, \dots, c'_n$  mittels  $S$  abbilden.  $\square$

**Satz 7.13.** *Für jeden endlichen Körper  $K$  operiert  $\mathrm{PSp}(V)$  treu und primitiv auf der Menge  $\Omega$  der 1-dimensionalen Unterräume von  $V$ .*

*Beweis.* Für  $\mathrm{Sp}(2, K) = \mathrm{SL}(2, K)$  ist die Behauptung bekannt. Sei also  $n \geq 2$  und  $q := |K|$ . Nach GT-Lemma 10.7 operiert  $G := \mathrm{Sp}(V) \leq \mathrm{SL}(V)$  auf  $\Omega$  mit Kern  $\mathrm{Sp}(V) \cap K^\times \mathrm{id} = \langle -\mathrm{id} \rangle$ . Also operiert  $\bar{G} := \mathrm{PSp}(V)$  treu auf  $\Omega$ . Nach dem Beweis von Satz 7.9 operiert  $\bar{G}$  transitiv auf  $\Omega$ . Sei  $U := Ku \in \Omega$  und  $G_U$  der Stabilisator von  $U$  in  $G$ . Sei  $(u, u')$  ein hyperbolisches Paar. Wie im Beweis von Lemma 7.12 operiert  $G_u \subseteq G_U$  transitiv auf  $u' + u^\perp$ . Da jeder Vektor in  $u' + u^\perp$  einen anderen Unterraum aufspannt, hat  $G_U$  eine Bahn der Länge  $\geq q^{2n-1}$  auf  $\Omega$ . Seien nun  $v, w \in u^\perp \setminus U$ . Im Fall  $[v, w] \neq 0$  kann man wie im Beweis von Lemma 7.12  $(u, v)$  auf  $(u, w)$  abbilden. Sei nun  $[v, w] = 0$ . Wegen

$$(v^\perp)^\perp = \langle v \rangle \neq U = (u^\perp)^\perp \neq (w^\perp)^\perp$$

ist  $v^\perp \neq u^\perp \neq w^\perp$ . Sei  $x \in u^\perp \setminus v^\perp$  und  $y \in u^\perp \setminus w^\perp$ . Im Fall  $u^\perp \subseteq v^\perp \cup w^\perp$  ist  $x \in w^\perp, y \in v^\perp$  und man erhält den Widerspruch  $x + y \in u^\perp \setminus (v^\perp \cup w^\perp)$ . Dies zeigt  $u^\perp \not\subseteq v^\perp \cup w^\perp$ . Sei also  $x \in u^\perp \setminus (v^\perp \cup w^\perp)$ . Man kann nun mit zwei Transvektionen  $(u, v) \mapsto (u, x) \mapsto (u, w)$  realisieren. Also sind  $G_u$  und  $G_U$  transitiv auf  $u^\perp \setminus U$ . Dies liefert eine Bahn der Länge  $\frac{q^{2n-1}-q}{q-1} < q^{2n-1}$ . Wegen

$$|\Omega \setminus \{U\}| = \frac{q^{2n} - q}{q - 1} = \frac{q^{2n-1} - q}{q - 1} + q^{2n-1}$$

hat  $G_U$  zwei Bahnen auf  $\Omega \setminus \{U\}$  mit den Längen  $q^{2n-1}$  und  $\frac{q^{2n-1}-q}{q-1}$ .

Angenommen  $G$  ist imprimitiv auf  $\Omega$  mit Block  $\Delta \ni U$ . Dann muss eine der beiden nicht-trivialen Bahnen von  $G_U$  in  $\Delta$  liegen. Allerdings sind  $q^{2n-1} + 1$  und  $\frac{q^{2n-1}-q}{q-1} + 1 = \frac{q^{2n-1}-1}{q-1}$  keine Teiler von  $|\Omega| = \frac{q^{2n}-1}{q-1} = q^{2n-1} + q^{2n-2} + \dots + 1$ . Dieser Widerspruch zeigt, dass  $G$  und  $\bar{G}$  primitiv operieren.  $\square$

**Lemma 7.14.** *Für  $n \geq 2$  und  $(n, q) \neq (2, 2)$  ist  $\mathrm{Sp}(2n, q)$  perfekt.*

*Beweis.* Nach Lemma 7.12 genügt es zu zeigen, dass die Transvektionen Kommutatoren sind. Sei zunächst  $q \geq 4$ . Sei  $v \in V \setminus \{0\}$  und  $\lambda \in K^\times$ . Wähle  $\mu \in K^\times \setminus \{\pm 1\}$  und setze  $\alpha := \lambda(1 - \mu^2)^{-1}$ . Bekanntlich existiert  $g \in \mathrm{Sp}(V)$  mit  $g(v) = \mu^2 v$ . Nach Bemerkung 7.11 gilt

$$\mathrm{Sp}(V)' \ni [t_{\alpha, v}, g] = t_{\alpha, v} g t_{-\alpha, v} g^{-1} = t_{\alpha, v} t_{-\alpha, g(v)} = t_{\alpha, v} t_{-\alpha \mu^2, v} = t_{\alpha(1-\mu^2), v} = t_{\lambda, v}.$$

Sei nun  $q = 3$  und  $b_1, \dots, b_n, c_1, \dots, c_n$  eine symplektische Basis von  $V$ . Wir definieren  $g, h \in \mathrm{Sp}(V)$  durch

$$\begin{aligned} g(b_1) &:= b_1 + b_2, & g(c_1) &:= c_2, & g(b_2) &:= b_1, & g(c_2) &:= c_1 - c_2, \\ h(b_1) &:= b_1 - c_1 + c_2, & h(c_1) &:= c_1, & h(b_2) &:= b_2 + c_1, & h(c_2) &:= c_2 \end{aligned}$$

und  $g(b_i) = h(b_i) = b_i$  sowie  $g(c_i) = h(c_i) = c_i$  für  $i \geq 3$ . Es gilt

$$\begin{aligned} [g, h](b_1) &= ghg^{-1}(b_1 + c_1 - c_2) = gh(b_2 + c_2) = g(b_2 + c_1 + c_2) = b_1 + c_1, \\ [g, h](c_1) &= ghg^{-1}(c_1) = gh(c_1 + c_2) = g(c_1 + c_2) = c_1, \\ [g, h](b_2) &= ghg^{-1}(b_2 - c_1) = gh(b_1 - b_2 - c_1 - c_2) = g(b_1 - b_2) = b_2, \\ [g, h](c_2) &= ghg^{-1}(c_2) = gh(c_1) = g(c_1) = c_2, \end{aligned}$$

d. h.  $t_{1,c_1} = [g, h] \in \text{Sp}(V)'$  und  $t_{-1,c_1} = t_{1,c_1}^{-1} \in \text{Sp}(V)'$ . Da  $c_1$  beliebig ist, folgt die Behauptung.

Schließlich sei  $q = 2$  und  $n \geq 3$ . Diesmal definieren wir

$$\begin{aligned} g(b_1) &:= b_1 + b_3, & g(c_1) &:= c_3, & g(b_2) &:= b_1, & g(c_2) &:= c_1 + c_3, \\ g(b_3) &:= b_2, & g(c_3) &:= c_2, & h(b_1) &:= b_1 + c_2, & h(c_1) &:= c_1, \\ h(b_2) &:= b_2 + c_1 + c_2 + c_3, & h(c_2) &:= c_2, & h(b_3) &:= b_3 + c_2 + c_3, & h(c_3) &:= c_3 \end{aligned}$$

und  $g(b_i) = h(b_i) = b_i$  sowie  $g(c_i) = h(c_i) = c_i$  für  $i \geq 4$ . Es gilt

$$\begin{aligned} [g, h](b_1) &= ghg^{-1}(b_1 + c_2) = gh(b_2 + c_3) = g(b_2 + c_1 + c_2) = b_1 + c_1, \\ [g, h](c_1) &= ghg^{-1}(c_1) = gh(c_1 + c_2) = g(c_1 + c_2) = c_1, \\ [g, h](b_2) &= ghg^{-1}(b_2 + c_1 + c_2 + c_3) = gh(b_3 + c_2 + c_3) = g(b_3) = b_2, \\ [g, h](c_2) &= ghg^{-1}(c_2) = gh(c_3) = g(c_3) = c_2, \\ [g, h](b_3) &= ghg^{-1}(b_3 + c_2 + c_3) = gh(b_1 + b_2 + c_1 + c_3) = g(b_1 + b_2) = b_3, \\ [g, h](c_3) &= ghg^{-1}(c_3) = gh(c_1) = g(c_1) = c_3, \end{aligned}$$

d. h.  $t_{1,c_1} = [g, h] \in \text{Sp}(V)'$ . Dies zeigt die Behauptung.  $\square$

**Satz 7.15.** *Es gilt  $\text{Sp}(4, 2) \cong S_6$ . Insbesondere ist  $\text{Sp}(4, 2) = \text{PSp}(4, 2)$  nicht perfekt.*

*Beweis.* Sei  $V := \{x \in \mathbb{F}_2^6 : \sum_{i=1}^6 x_i = 0\} \leq \mathbb{F}_2^6$  und  $U := \langle (1, \dots, 1) \rangle \leq V$ . Die symmetrische Gruppe  $S_6$  operiert durch permutieren der Koordinaten treu auf  $V/U \cong \mathbb{F}_2^4$ . Das „Standardskalarprodukt“

$$[v + U, w + U] := \sum_{i=1}^6 v_i w_i$$

ist eine wohldefinierte alternierende Bilinearform auf  $V/U$ . Sei  $v + U \neq 0$ , o. B. d. A.  $v_1 = v_2 = 1$  und  $v_3 = 0$ . Dann ist  $w + U := (0, 1, 1, 0, 0, 0) + U \in V/U$  mit  $[v + U, w + U] \neq 0$ . Also ist die Bilinearform nicht-ausgeartet. Für  $\sigma \in S_6$  gilt schließlich  $[\sigma(v) + U, \sigma(v) + U] = [v + U, w + U]$ . Dies zeigt  $S_6 \leq \text{Sp}(4, 2)$ . Nach Satz 7.9 ist andererseits  $|\text{Sp}(4, 2)| = 2^4(2^2 - 1)(2^4 - 1) = 720 = |S_6|$ .  $\square$

**Satz 7.16.** *Für  $n \geq 2$  und  $(n, q) \neq (2, 2)$  ist  $\text{PSp}(2n, q)$  einfach.*

*Beweis.* Nach den vorherigen Sätzen ist  $G := \text{PSp}(2n, q)$  perfekt und primitiv auf der Menge der 1-dimensionalen Unterräume von  $V$ . Sei  $U := \langle u \rangle \leq V$  mit  $u \neq 0$  und  $A := \{\pm t_{\lambda, u} : \lambda \in K\} \leq G_U$ . Offenbar ist  $A$  abelsch und normal in  $G_U$ . Außerdem ist jede Transvektion in  $\text{Sp}(V)$  zu  $t_{\lambda, u}$  mit einem  $\lambda \in K$  konjugiert. Aus Lemma 7.12 folgt  $\langle gAg^{-1} : g \in G \rangle = G$ . Nach Iwasawas Lemma aus der GT ist  $G$  einfach.  $\square$

**Bemerkung 7.17.** Eine weitere Familie von einfachen Gruppen vom Lie-Typ lässt sich durch Untergruppen von  $\mathrm{Sp}(4, q)$  mit  $q = 2^{2n+1}$  und  $n \in \mathbb{N}$  konstruieren: Sei  $e_1, e_2, e_3, e_4$  eine symplektische Basis auf  $V = \mathbb{F}_q^4$  mit  $[e_1, e_3] = 1 = [e_2, e_4]$ . Wir definieren eine kommutative Multiplikation auf  $V$  durch

$$e_i * e_j := \begin{cases} e_1 & \text{falls } \{i, j\} = \{2, 3\}, \\ e_2 & \text{falls } \{i, j\} = \{1, 2\}, \\ e_3 & \text{falls } \{i, j\} = \{1, 4\}, \\ e_4 & \text{falls } \{i, j\} = \{3, 4\}, \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$\left( \sum_{i=1}^4 \lambda_i e_i \right) * \left( \sum_{i=1}^4 \mu_i e_i \right) := \sum_{i,j=1}^4 (\lambda_i \mu_j)^{2^n} e_i * e_j$$

für  $\lambda_i, \mu_j \in \mathbb{F}_q$ . Sei  $U := \{(u, v) \in V^2 : [u, v] = 0\}$  und

$$\mathrm{Sz}(q) := \{f \in \mathrm{Sp}(V) : \forall (u, v) \in U : f(u) * f(v) = u * v\} \leq \mathrm{Sp}(V).$$

Man nennt  $\mathrm{Sz}(q)$  die *Suzuki-Gruppe* über  $\mathbb{F}_q$ . Sie ist einfach mit Ordnung

$$|\mathrm{Sz}(q)| = q^2(q^2 + 1)(q - 1) \equiv -1 \pmod{3}.$$

Die Suzuki-Gruppen sind die einzigen nicht-abelschen einfachen Gruppen, deren Ordnung nicht durch 3 teilbar ist. Wegen  $q^2 + 1 \equiv 16^n \cdot 4 + 1 \equiv 0 \pmod{5}$  ist die Ordnung jeder nicht-abelschen einfachen Gruppe durch 3 oder 5 teilbar (sogar durch 12 oder  $2^6 \cdot 5$  nach Feit-Thompson). Die Untergruppenstruktur und die Charaktertafel von  $\mathrm{Sz}(q)$  ist ähnlich wie bei  $\mathrm{PSL}(2, q)$  sehr übersichtlich (die Sylowgruppen zu ungeraden Primzahlen sind zyklisch, vgl. GT-Satz 10.13). Suzuki hat auch eine sporadische Gruppe der Ordnung 448.345.497.600 entdeckt.

## 8 Coxetergruppen

**Bemerkung 8.1.** Die Gruppen, die sich von zwei Involutionen erzeugen lassen, sind bekanntlich genau die Diedergruppen. Wir untersuchen in diesem Abschnitt Gruppen, die sich von endlich vielen Involutionen erzeugen lassen. Diese treten als Symmetriegruppen höher-dimensionaler Räume auf und führen zur Klassifikation der (endlichen) Spiegelungsgruppen.

**Definition 8.2.** Eine Gruppe der Form

$$G = \langle x_1, \dots, x_n \mid (x_i x_j)^{m_{ij}} = 1, 1 \leq i \leq j \leq n \rangle$$

mit  $2 \leq m_{ij} \leq \infty$  für  $i < j$  und  $m_{ii} = 1$  für  $i = 1, \dots, n$  heißt *Coxetergruppe* vom Rang  $n$ .

**Bemerkung 8.3.**

- (i) Im Folgenden sei  $G = \langle x_1, \dots, x_n \rangle$  stets eine Coxetergruppe (wir identifizieren die Erzeuger  $x_1, \dots, x_n$  der freien Gruppe mit entsprechenden Nebenklassen in  $G$ ). Die Relationen der Form  $(x_i x_j)^\infty = 1$  haben keine Bedeutung und können ignoriert werden. Aus  $m_{ii} = 1$  folgt  $x_i^2 = 1$  für  $i = 1, \dots, n$ . Wegen  $(x_j x_i)^{m_{ij}} = (x_i x_j)^{-m_{ij}} = 1$  definieren wir  $m_{ji} := m_{ij}$  für  $i < j$ . Nach von-Dyck existiert ein Homomorphismus  $f : G \rightarrow \{\pm 1\}$  mit  $f(x_i) = -1$  für  $i = 1, \dots, n$ . Also sind  $x_1, \dots, x_n$  Involutionen in  $G$ . Die Gleichung  $m_{ij} = 2$  besagt, dass  $x_i$  und  $x_j$  vertauschbar sind.

- (ii) Die Relation  $(x_i x_j)^{m_{ij}} = 1$  ist äquivalent zu  $x_i x_j x_i \dots = x_j x_i x_j \dots$ , wobei auf beiden Seiten genau  $m_{ij}$  Faktoren stehen. Sei  $(x_i x_j)_n := x_i x_j x_i \dots$  ein alternierendes Produkt von  $n$  Faktoren. Verzichtet man in der Definition der Coxetergruppen auf die Bedingung  $m_{ii} = 2$ , so erhält man *Artingruppen*:

$$\langle x_1, \dots, x_n \mid (x_i x_j)_{m_{ij}} = (x_j x_i)_{m_{ij}}, 1 \leq i, j \leq n \rangle$$

mit  $2 \leq m_{ij} \leq \infty$ . Die Wahl  $m_{ij} = \infty$  für alle  $i, j$  ergibt die freie Gruppe  $F_n$ . Nach von-Dyck ist jede Coxetergruppe eine Faktorgruppe einer Artingruppe. Im Spezialfall  $m_{ij} = 3$  für  $|i - j| = 1$  und  $m_{ij} = 2$  für  $|i - j| > 1$  spricht man von einer *Zopfgruppe*. Im Gegensatz zu  $S_n$  (Satz 2.18) gilt  $m_{ii} = \infty$  anstatt  $m_{ii} = 2$ . Man kann die Elemente der Zopfgruppe durch „Zöpfe“ mit  $n$  „Strängen“ realisieren. Die Verknüpfung ist das „Verkleben“ der Stränge an deren Enden:

$$x_1 x_2 x_1 = \text{Zopf} = \text{Zopf} = x_2 x_1 x_2$$

Auf diese Gruppen werden wir allerdings nicht weiter eingehen.

#### Beispiel 8.4.

- (i)  $G = \langle x, y \mid x^2 = y^2 = (xy)^m = 1 \rangle \cong D_{2m}$  ist eine Coxetergruppe.
- (ii)  $G = \langle x_1, \dots, x_n \mid x_i^2 = (x_i x_j)^2 = 1, i < j \rangle \cong C_2^n$  ist eine Coxetergruppe.
- (iii) Nach Satz 2.18 sind die symmetrischen Gruppen Coxetergruppen mit  $x_i = (i, i + 1)$  für  $i = 1, \dots, n - 1$ .
- (iv) Im Fall  $m_{ij} = \infty$  für alle  $i < j$  nennt man  $G$  die *universelle* Coxetergruppe vom Rang  $n$ . Für  $n = 2$  erhält man  $D_\infty$ . Jede Coxetergruppe ist eine Faktorgruppe einer universellen Coxetergruppe.
- (v) Eine *Spiegelung*  $\sigma \in \text{GL}(\mathbb{R}^d)$  ist eine Abbildung der Form  $\sigma_b(v) := v - 2[v, b]b$  für einen normierten Vektor  $b \in \mathbb{R}^d$  (hierbei ist  $[v, b]$  das Standardskalarprodukt). Eine *Spiegelungsgruppe* ist eine endliche Untergruppe  $S \leq \text{GL}(\mathbb{R}^d)$ , die von Spiegelungen  $\sigma_1, \dots, \sigma_n$  erzeugt wird. Nach von-Dyck ist  $S$  eine Faktorgruppe einer Coxetergruppe. Wir werden in Satz 8.41 zeigen, dass  $S$  tatsächlich zu einer Coxetergruppe isomorph ist (d. h. alle weiteren Relationen in  $S$  folgen aus den Relationen  $(\sigma_i \sigma_j)^{m_{ij}} = 1$ ).
- (vi) Sei  $S$  eine endliche, nicht-abelsche einfache Gruppe. Nach Feit-Thompson besitzt  $S$  eine Involution  $s$ . Offenbar wird  $S$  von allen Konjugierten von  $s$  erzeugt. Also ist  $S$  zu einer Faktorgruppe einer (möglicherweise unendlichen) Coxetergruppe.

**Definition 8.5.** Jedes  $g \in G$  lässt sich in der Form  $g = x_{i_1} \dots x_{i_k}$  schreiben. Ist  $k$  dabei so klein wie möglich, so nennt man diese Darstellung *reduziert* (im Gegensatz zu freien Gruppen sind reduzierte Darstellungen nicht unbedingt eindeutig). Außerdem sei  $l(g) := k$  die *Länge* von  $g$ .

**Lemma 8.6.** Für  $g, h \in G$  und  $1 \leq i \leq n$  gilt

- (i)  $l(gh) \leq l(g) + l(h)$ .
- (ii)  $l(g^{-1}) = l(g)$ .
- (iii)  $l(gx_i) = l(g) \pm 1$ .

*Beweis.* Die ersten beiden Aussagen sind trivial. Sie zeigen

$$l(g) - 1 = l(gx_i x_i) - l(x_i) \leq l(gx_i) \leq l(g) + l(x_i) = l(g) + 1.$$

Der Homomorphismus  $f : G \rightarrow \{\pm 1\}$  aus Bemerkung 8.3 liefert

$$(-1)^{l(gx_i)} = f(gx_i) = -f(g) = -(-1)^{l(g)}$$

und  $l(gx_i) \neq l(g)$ . □

**Bemerkung 8.7.** Der Kern des Homomorphismus  $f : G \rightarrow \{\pm 1\}$  ist die Menge der Elemente gerader Länge. Man nennt ihn die *alternierende Untergruppe*. In  $S_n$  gilt  $\text{sgn}(g) = (-1)^{l(g)}$  für  $g \in S_n$ .

**Definition 8.8.** Sei  $V$  ein  $\mathbb{R}$ -Vektorraum mit Basis  $b_1, \dots, b_n$ .

- Wir definieren eine symmetrische Bilinearform auf  $V$  durch

$$[b_i, b_j]_G := [b_i, b_j] = -\cos \frac{\pi}{m_{ij}},$$

wobei  $-\cos \frac{\pi}{\infty} = -1$  gesetzt wird.

- Für  $i = 1, \dots, n$  sei

$$\sigma_i : V \rightarrow V, \quad v \mapsto v - 2[v, b_i]b_i.$$

**Satz 8.9.** Es existiert genau ein Homomorphismus  $\sigma : G \rightarrow \text{GL}(V)$  mit  $\sigma(x_i) = \sigma_i$  für  $i = 1, \dots, n$ . Dabei hat  $\sigma_i \sigma_j$  die Ordnung  $m_{ij}$  für  $1 \leq i, j \leq n$ . Mit der Bezeichnung  ${}^g v := \sigma(g)(v)$  gilt  $[v, w]_G = [{}^g v, {}^g w]_G$ .

*Beweis.* Für  $i = 1, \dots, n$  gilt  $[b_i, b_i] = 1$ . Daher ist  $V_i := b_i^\perp := \text{Ker}(v \mapsto [v, b_i]) \leq V$  eine Hyperebene und  $V = V_i \oplus \mathbb{R}b_i$ . Es gilt  $\sigma_i(b_i) = -b_i$  und  $\sigma_i(v) = v$  für  $v \in V_i$ . Also ist  $\sigma_i$  eine „Spiegelung“ an  $V_i$  (im Gegensatz zum euklidischen Raum ist  $[\cdot, \cdot]_G$  nicht unbedingt positiv definit). Insbesondere hat  $\sigma_i$  Ordnung 2. Sei nun  $i < j$  und  $W := \langle b_i, b_j \rangle$ . Die Definition von  $\sigma_i$  zeigt, dass  $\langle \sigma_i, \sigma_j \rangle$  auf  $W$  operiert.

Sei zunächst  $m_{ij} = \infty$ . Dann gilt

$$(\sigma_i \sigma_j)^k(b_i) = (\sigma_i \sigma_j)^{k-1}(\sigma_i(b_i + 2b_j)) = (\sigma_i \sigma_j)^{k-1}(3b_i + 2b_j) = \dots = (2k+1)b_i + 2kb_j$$

für  $k \geq 1$ . Insbesondere hat  $\sigma_i \sigma_j$  unendliche Ordnung.

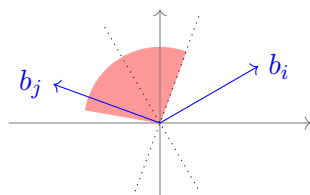
Jetzt sei  $m_{ij} < \infty$  und  $\varphi := \pi/m_{ij}$ . Für  $v = \lambda b_i + \mu b_j \in W$  gilt

$$[v, v] = \lambda^2 - 2\lambda\mu \cos \varphi + \mu^2 = (\lambda - \mu \cos \varphi)^2 + \mu^2 \sin^2(\varphi) > 0.$$

Also ist  $[\cdot, \cdot]_G$  auf  $W$  positiv definit und stimmt daher bis auf Basiswahl mit dem Standardskalarprodukt überein. Außerdem ist

$$[b_i, b_j] = -\cos \varphi = \cos(\pi - \varphi),$$

d. h. der „Winkel“ zwischen  $b_i$  und  $b_j$  beträgt  $\pi - \varphi$ . Daher ist  $(\sigma_i \sigma_j)|_W$  eine „Drehung“ um  $2\varphi$  (da die Abbildung linear ist, genügt es die Bilder der beiden linear unabhängigen Spiegelachsen zu betrachten):



Insbesondere hat  $(\sigma_i \sigma_j)|_W$  Ordnung  $m_{ij}$ . Da  $[\cdot, \cdot]_G$  auf  $W$  positiv definit ist, gilt  $V = W \oplus W^\perp = W \oplus (V_i \cap V_j)$ . Da  $\sigma_i \sigma_j$  trivial auf  $V_i \cap V_j$  operiert, hat  $\sigma_i \sigma_j$  auch auf  $V$  Ordnung  $m_{ij}$ . Nach von-Dyck ist  $\sigma$  nun ein Homomorphismus. Für die letzte Aussage berechnen wir

$$\begin{aligned} [\sigma_i(v), \sigma_i(w)] &= [v - 2[v, b_i]b_i, w - 2[w, b_i]b_i] \\ &= [v, w] - 2[v, b_i][b_i, w] - 2[w, b_i][v, b_i] + 4[v, b_i][w, b_i] = [v, w]. \end{aligned} \quad \square$$

**Definition 8.10.**

- Man nennt

$$\Phi := \{^g b_i : 1 \leq i \leq n, g \in G\} \subseteq V$$

das *Wurzelsystem* von  $G$  und seine Elemente heißen *Wurzeln*.

- Eine Wurzel  $v$  lässt sich eindeutig in der Form  $v = \sum_{i=1}^n v_i b_i$  schreiben. Man nennt  $v$  *positiv* (bzw. *negativ*), falls  $v_1, \dots, v_n \geq 0$  (bzw.  $v_1, \dots, v_n \leq 0$ ). Ggf. schreibt man  $v > 0$  (bzw.  $v < 0$ ; der Fall  $v = 0$  ist ausgeschlossen). Die Menge der positiven Wurzeln sei  $\Pi$ .
- Für  $v \in \Phi$  sei

$$\sigma_v : V \rightarrow V, \quad w \mapsto w - 2[w, v]v.$$

**Bemerkung 8.11.**

- Nach Satz 8.9 sind alle Wurzeln von  $G$  normiert bzgl.  $[\cdot, \cdot]_G$ . Insbesondere ist  $\sigma_v(v) = -v$ , d. h.  $\sigma_v$  ist die Spiegelung an der Hyperebene  $v^\perp$ .
- Wegen  $\sigma_i(b_i) = -b_i$  ist  $-\Phi = \Phi$  und  $\sigma_v = \sigma_{-v}$ . Sei  $g \in G$  und  $1 \leq i \leq n$  mit  $v = g(b_i)$ . Dann gilt

$$gx_i g^{-1} w = g(g^{-1} w - 2[g^{-1} w, b_i]b_i) = w - 2[w, ^g b_i]^g b_i = w - 2[w, v]v.$$

Dies zeigt  $\sigma(gx_i g^{-1}) = \sigma_v$ . Wir werden auch  $x_v := gx_i g^{-1}$  als Spiegelung bezeichnen.

**Beispiel 8.12.**

- Sei  $G = \langle x, y \rangle \cong D_{2m}$ ,  $\varphi = \pi - \frac{\pi}{m}$ ,  $b_1 = (1, 0)$  und  $b_2 = (\cos \varphi, \sin \varphi)$ . Dann ist  $[\cdot, \cdot]_G$  das Standardskalarprodukt auf  $\mathbb{R}^2$  bzgl.  $b_1, b_2$  und  $\sigma : G \rightarrow \text{GL}(\mathbb{R}^2)$  ist die bekannte Darstellung als Symmetriegruppe des regelmäßigen  $m$ -Ecks. Die Wurzeln entsprechen den  $2m$  Spiegelachsen. Die positiven Wurzeln liegen geometrisch „zwischen“  $b_1$  und  $b_2$ . Insbesondere ist  $\Phi = \Pi \cup (-\Pi)$ .
- Sei  $G = \langle x_1, \dots, x_{n-1} \rangle \cong S_n$ . Sei  $e_1, \dots, e_n$  die Standardbasis von  $\mathbb{R}^n$  und  $b_i := \frac{1}{\sqrt{2}}(e_i - e_{i+1})$  für  $i = 1, \dots, n-1$ . Man rechnet leicht nach, dass  $[\cdot, \cdot]_G$  das Standardskalarprodukt auf  $V := \langle b_1, \dots, b_{n-1} \rangle$  bzgl.  $b_1, \dots, b_{n-1}$  ist. Der Homomorphismus  $\sigma : G \rightarrow \text{GL}(V)$  entsteht durch die Permutationsoperation von  $S_n$  auf den  $n$  Koordinaten, denn

$$\begin{aligned} x_i b_i &= \sigma_i(b_i) = -b_i = \frac{1}{\sqrt{2}}(e_{i+1} - e_i) = \frac{1}{\sqrt{2}}(e_{x_i(i)} - e_{x_i(i+1)}), \\ x_i b_{i+1} &= b_{i+1} - 2[b_{i+1}, b_i]b_i = b_{i+1} + b_i = \frac{1}{\sqrt{2}}(e_i - e_{i+2}) = \frac{1}{\sqrt{2}}(e_{x_i(i+1)} - e_{x_i(i+2)}), \\ x_i b_j &= b_j = \frac{1}{\sqrt{2}}(e_{x_i(j)} - e_{x_i(j+1)}) \quad (|j - i| > 1). \end{aligned}$$

Offenbar ist  $\Phi = \{e_i - e_j : i \neq j\}$  und  $\Pi = \{e_i - e_j : i < j\}$ , denn  $e_i - e_j = b_i + b_{i+1} + \dots + b_{j-1}$ . Insbesondere gilt  $|\Phi| = n(n-1)$  und  $|\Pi| = n(n-1)/2$ .

**Lemma 8.13.** Für  $g \in G$  und  $1 \leq i \leq n$  gilt  ${}^g b_i > 0$  falls  $l(gx_i) > l(g)$  und  ${}^g b_i < 0$  falls  $l(gx_i) < l(g)$ . Insbesondere ist jede Wurzel positiv oder negativ, d. h.  $\Phi = \Pi \cup (-\Pi)$ .

*Beweis.* Wegen  $g = gx_i x_i$  und  ${}^{gx_i} b_i = -{}^g b_i$  genügt es den Fall  $l(gx_i) > l(g)$  zu betrachten. Wir beweisen die erste Aussage durch Induktion nach  $l(g)$ . Im Fall  $l(g) = 0$  ist  $g = 1$ ,  $l(x_i) = 1$  und  $b_i > 0$ . Sei nun  $g \neq 1$  und  $1 \leq j \leq n$  mit  $l(gx_j) = l(g) - 1$  (der letzte Faktor einer reduzierten Darstellung von  $g$ ). Nach Voraussetzung ist  $x_j \neq x_i$ . Wir betrachten die Diedergruppe  $H := \langle x_i, x_j \rangle \leq G$ . Sei  $l_H : H \rightarrow \mathbb{N}_0$  die Längenfunktion bzgl. der Erzeuger  $x_i, x_j$  von  $H$ .<sup>14</sup> Sei

$$A := \{y \in gH : l(y) + l_H(y^{-1}g) = l(g)\}.$$

Wegen  $g \in A$  ist  $A \neq \emptyset$ . Wähle  $y \in A$  mit  $l(y)$  minimal. Wegen  $l(gx_j) + l_H(x_j) = l(g) - 1 + 1 = l(g)$  ist  $gx_j \in A$ . Die Wahl von  $y$  zeigt  $l(y) \leq l(gx_j) < l(g)$ .

Nehmen wir  $l(yx_i) = l(y) - 1$  an. Dann gilt

$$l(g) \leq l(yx_i) + l_H(x_i y^{-1}g) \leq l(y) - 1 + l_H(y^{-1}g) + 1 = l(y) + l_H(y^{-1}g) = l(g)$$

und  $l(g) = l(yx_i) + l_H(x_i y^{-1}g)$ . Dies zeigt  $yx_i \in A$  im Widerspruch zu  $l(yx_i) < l(y)$ . Also gilt  $l(yx_i) > l(y)$  und völlig analog  $l(yx_j) > l(y)$ . Induktion zeigt  ${}^y b_i, {}^y b_j > 0$ . Sei  $h := y^{-1}g \in H$ . Wegen  $g = yh$  genügt es zu zeigen, dass  ${}^h b_i$  eine nicht-negative Linearkombination von  $b_i$  und  $b_j$  ist.

Angenommen es gilt  $l_H(hx_i) < l_H(h)$ . Dann wäre

$$l(gx_i) = l(yhx_i) \leq l(y) + l_H(hx_i) < l(y) + l_H(h) = l(g).$$

Also muss jede reduzierte Darstellung von  $h$  bzgl.  $x_i, x_j$  in  $x_j$  enden. Im Fall  $m_{ij} = \infty$  ist  $x_j b_i = b_i + 2b_j$ ,  $x_i x_j b_i = x_i(b_i + 2b_j) = 3b_i + 2b_j$  usw. (vgl. Beweis von Satz 8.9). Wir können also  $m := m_{ij} < \infty$  annehmen. Dann bilden  $b_i$  und  $b_j$  den Winkel  $\pi - \frac{\pi}{m}$  und  $x_i x_j$  ist eine „Drehung“ um  $\frac{2\pi}{m}$ . Ist  $l_H(h) = m$ , so gilt  $h = (x_i x_j)^{m/2}$  falls  $m$  gerade und  $h = x_j (x_i x_j)^{(m-1)/2}$  falls  $m$  ungerade. In beiden Fällen gäbe es eine reduzierte Darstellung, die mit  $x_i$  endet (nämlich  $h = (x_j x_i)^{m/2}$  bzw.  $x_i (x_j x_i)^{(m-1)/2}$ ). Also ist  $l_H(h) < m$  und  $h \in \{(x_i x_j)^k, x_j (x_i x_j)^k\}$  mit  $k < m/2$ . Im Fall  $k = (m-1)/2$  ist  $h = (x_i x_j)^k$  und  ${}^h b_i = b_j$ . In allen anderen Fällen ist  $(x_i x_j)^k$  eine Drehung um weniger als  $\frac{(m-1)\pi}{m}$ , d. h.  $(x_i x_j)^k b_i$  liegt echt „zwischen“  $b_i$  und  $b_j$ . Eine weitere Anwendung von  $x_j$  ändert daran nichts. Also ist  ${}^h b_i$  eine nicht-negative Linearkombination von  $b_i$  und  $b_j$ .  $\square$

**Satz 8.14.** Der Homomorphismus  $\sigma : G \rightarrow \text{GL}(V)$  aus Satz 8.9 ist injektiv.

*Beweis.* Sei  $g \in \text{Ker}(\sigma) \setminus \{1\}$ . Dann existiert  $1 \leq i \leq n$  mit  $l(gx_i) < l(g)$ . Lemma 8.13 liefert den Widerspruch  $b_i = {}^g b_i < 0$ .  $\square$

**Definition 8.15.** Für  $I \subseteq \{1, \dots, n\}$  nennt man  $G_I := \langle x_i : i \in I \rangle \leq G$  eine *parabolische* Untergruppe von  $G$ .

**Satz 8.16.** Für  $I \subseteq \{1, \dots, n\}$  ist

$$G_I \cong \langle \{y_i : i \in I\} \mid \{(y_i y_j)^{m_{ij}} : i, j \in I\} \rangle,$$

d. h.  $G_I$  ist selbst eine Coxetergruppe.

<sup>14</sup>Nach Lemma 8.17 ist  $l_H$  die Einschränkung von  $l$  auf  $H$ . Das wird hier aber nicht benutzt.

*Beweis.* Wendet man die Konstruktion von  $\sigma$  auf die Coxetergruppe auf der rechten Seite an, so erhält man genau  $\sigma(G_I) \cong G_I$ .  $\square$

**Lemma 8.17.** *Sei  $g = x_{i_1} \dots x_{i_k} \in G_I$  reduziert in  $G$ . Dann gilt  $i_1, \dots, i_k \in I$ . Insbesondere ist  $\{x_1, \dots, x_n\} \cap G_I = \{x_i : i \in I\}$ .*

*Beweis.* Induktion nach  $k$ . O.B.d.A. sei  $k \geq 1$ . Nach Lemma 8.13 gilt  ${}^g b_{i_k} < 0$ . Sei außerdem  $g = x_{j_1} \dots x_{j_l}$  mit  $j_1, \dots, j_l \in I$ . Nach Definition der  $\sigma_i$  gilt

$${}^g b_{i_k} = b_{i_k} + \sum_{a=1}^l \lambda_a b_{j_a}$$

mit  $\lambda_a \in \mathbb{R}$ . Wegen  ${}^g b_{i_k} < 0$  muss  $i_k = j_s \in I$  für ein  $1 \leq s \leq l$  gelten. Insbesondere ist  $h := x_{i_1} \dots x_{i_{k-1}} = g x_{i_k} \in G_I$  reduziert. Die Behauptung folgt nun durch Induktion.  $\square$

**Folgerung 8.18.** *Sind  $g = x_{i_1} \dots x_{i_k} = x_{j_1} \dots x_{j_k}$  zwei reduzierte Darstellungen von  $g \in G$ , so gilt  $\{i_1, \dots, i_k\} = \{j_1, \dots, j_k\}$ .*

**Beispiel 8.19.** In der Situation von Folgerung 8.18 müssen  $\{i_1, \dots, i_k\}$  und  $\{j_1, \dots, j_k\}$  nicht als Multimengen übereinstimmen. In  $S_3$  sind beispielsweise  $x_1 x_2 x_1 = (1, 3) = x_2 x_1 x_2$  reduzierte Darstellungen.

**Satz 8.20.** *Wir betrachten  $S_n$  als Coxetergruppe in den Erzeugern  $x_i := (i, i+1)$ . Für  $\sigma \in S_n$  existieren eindeutig bestimmte Zahlen  $l \geq 0$  und  $1 \leq a_1, \dots, a_l \leq n-1$  mit folgenden Eigenschaften:*

- (i)  $\sigma = x_{a_1} \dots x_{a_l}$ .
  - (ii)  $a_i \neq a_{i-1} \leq a_i + 1$  für  $i = 2, \dots, l$ .
  - (iii) Die Folge  $(a_1, \dots, a_l)$  besitzt keinen Abschnitt der Form  $(a, a-1, \dots, a-r, a)$  mit  $r \geq 1$ .
- Ggf. ist  $\sigma = x_{a_1} \dots x_{a_l}$  ein reduziertes Wort, d. h.  $l = l(\sigma)$ .

*Beweis.* Wir wenden folgenden Algorithmus auf eine beliebige Darstellung  $\sigma = x_{a_1} \dots x_{a_k}$  an:

- (1) Ist  $a_i = a_{i+1}$  für ein  $i$ , so lösche  $x_{a_i} x_{a_{i+1}} = 1$  aus der Darstellung.
- (2) Ist  $a_{i-1} > a_i + 1$ , so tausche  $x_{a_{i-1}}$  und  $x_{a_i}$  und beginne wieder bei (1). Dies ist erlaubt, da  $x_{a_{i-1}}$  und  $x_{a_i}$  disjunkt sind.
- (3) Besitzt  $(a_1, \dots, a_k)$  einen Abschnitt der Form  $(a, a-1, \dots, a-r, a)$ , so ersetze diesen durch  $(a-1, a, a-1, \dots, a-r)$  und beginne wieder bei (1). Dies verändert  $\sigma$  nicht, denn

$$x_a x_{a-1} \dots x_{a-r} x_a = x_a x_{a-1} x_a x_{a-2} x_{a-3} \dots x_{a-r} = x_{a-1} x_a x_{a-1} x_{a-2} \dots x_{a-r}$$

nach der Zopfrelation.



Durch (1) und (3) wird  $\sum_{i=1}^k a_i$  reduziert, während (2) die lexikographische Ordnung der Folge  $(a_1, \dots, a_k)$  verringert. Daher muss der Algorithmus nach endlich vielen Schritten abbrechen. Am Ende sind die Bedingungen (i)–(iii) erfüllt.

Eine Folge  $(a_1, \dots, a_l)$ , die (ii) und (iii) erfüllt, nennen wir *regulär*. Für  $n = 2$  gibt es nur die regulären Folgen  $a = ()$  (mit  $l = 0$ ) und  $a = (1)$ . Induktiv nehmen wir an, dass es genau  $(n - 1)!$  reguläre Folgen  $(a_1, \dots, a_l)$  gibt mit  $1 \leq a_1, \dots, a_l \leq n - 2$ . Sei nun  $(a_1, \dots, a_l)$  mit  $a_k = n - 1$ . Dann gilt  $(a_k, a_{k+1}, \dots, a_l) = (n - 1, n - 2, \dots, n - r)$  für ein  $r \geq 1$  wegen (ii) und (iii). Für  $(a_1, \dots, a_{k-1})$  gibt es induktiv genau  $(n - 1)!$  Möglichkeiten, während es für  $r$  genau  $n - 1$  Möglichkeiten gibt. Daher existieren  $(n - 1)!(n - 1)$  reguläre Folgen, die  $n - 1$  enthalten. Zusammen mit den  $(n - 1)!$  Folgen, die  $n - 1$  nicht enthalten, erhält man genau  $n! = |S_n|$  reguläre Folgen. Jede Permutation kann also nur durch eine reguläre Folge repräsentiert werden.

Wendet man obigen Algorithmus auf ein reduziertes Wort an, so kann die Länge  $l$  nicht kleiner werden. Es gilt also  $l = l(\sigma)$ .  $\square$

**Beispiel 8.21.** In  $S_5$  gilt

$$\begin{aligned} x_4 x_3 x_2 x_3 x_1 x_4 x_2 &= x_4 x_3 (x_2 x_1 x_2) x_3 x_4 = x_4 x_3 (x_1 x_2 x_1) x_3 x_4 = x_1 x_4 (x_3 x_2 x_1 x_3) x_4 \\ &= x_1 x_4 (x_2 x_3 x_2 x_1) x_4 = x_1 x_2 (x_4 x_3 x_2 x_1 x_4) = x_1 x_2 x_3 x_4 x_3 x_2 x_1. \end{aligned}$$

Etwas schneller findet man eine reduzierte Darstellung, wenn man rekursiv vorgeht. Sei  $\sigma \in S_n$  und  $a := \sigma^{-1}(n)$ . Dann gilt  $\tau := \sigma x_a x_{a+1} \dots x_{n-1} \in S_{n-1}$ . Nach Induktion besitzt  $\tau$  eine Darstellung in der gewünschten Form. Daher hat auch  $\sigma = \tau t_{n-1} t_{n-2} \dots t_a$  diese Eigenschaft.

**Satz 8.22.** Die Abbildung  $I \mapsto G_I$  ist ein Isomorphismus von Verbänden, d. h. es gilt

- (i)  $I \subseteq J \iff G_I \leq G_J$ .
- (ii)  $G_{I \cup J} = \langle G_I, G_J \rangle$ .
- (iii)  $G_{I \cap J} = G_I \cap G_J$ .

*Beweis.*

- (i) Aus  $I \subseteq J$  folgt offensichtlich  $G_I \leq G_J$ . Ist  $G_I \leq G_J$ , so folgt

$$\{x_i : i \in I\} = \{x_1, \dots, x_n\} \cap G_I \subseteq \{x_1, \dots, x_n\} \cap G_J = \{x_j : j \in J\}$$

aus Lemma 8.17.

- (ii) Trivial.

- (iii) Offenbar ist  $G_{I \cap J} \leq G_I \cap G_J$ . Die umgekehrte Inklusion folgt aus Lemma 8.17.  $\square$

**Satz 8.23.** Für  $g \in G$  ist  $l(g)$  die Anzahl der positiven Wurzeln, die unter  $g$  auf negative Wurzeln abgebildet werden, d. h.  $l(g) = |\Pi \cap g^{-1}(-\Pi)| \leq |\Pi|$ . Insbesondere ist diese Zahl endlich.

*Beweis.* Induktion nach  $l(g)$ : O.B.d.A.  $g \neq 1$ . Sei zunächst  $g = x_i$  für ein  $1 \leq i \leq n$ . Wegen  ${}^g b_i = -b_i$  müssen wir  ${}^g v > 0$  für alle  $v \in \Pi \setminus \{b_i\}$  zeigen. Da alle Wurzeln normiert sind, ist  $v$  kein Vielfaches von  $b_i$ . Sei also  $v = \sum_{j=1}^n \lambda_j b_j$  mit  $\lambda_k > 0$  für mindestens ein  $k \neq i$ . In  ${}^g v = \sigma_i(v) = v - 2[v, b_i]b_i$  hat  $b_k$  immer noch den positiven Koeffizienten  $\lambda_k$ . Daher ist  ${}^g v > 0$ .

Sei nun  $l(g) \geq 2$  und  $1 \leq i \leq n$  mit  $l(gx_i) = l(g) - 1$ . Nach Lemma 8.13 ist  ${}^g b_i < 0$ , d.h.  $b_i \in \Pi \cap g^{-1}(-\Pi)$ . Mit dem eben Bewiesenen folgt

$$\Pi \cap (gx_i)^{-1}(-\Pi) = x_i(x_i(\Pi) \cap g^{-1}(-\Pi)) = x_i(\Pi \cap g^{-1}(-\Pi) \setminus \{b_i\}).$$

Induktion zeigt

$$|\Pi \cap g^{-1}(-\Pi)| = |\Pi \cap (gx_i)^{-1}(-\Pi)| + 1 = l(gx_i) + 1 = l(g). \quad \square$$

**Bemerkung 8.24.** Ist die Länge in  $G$  beschränkt, sagen wir durch  $m$ , so gilt  $|G| \leq n^m < \infty$ . In unendlichen Coxetergruppen muss es daher unendlich viele (positive) Wurzeln geben. Insbesondere ist  $-\text{id}_V \notin \sigma(G)$  (anderenfalls hätte  $-\text{id}$  unendliche Länge).

**Folgerung 8.25.** Ist  $G$  endlich, so gibt es genau ein Element  $g \in G$  mit maximaler Länge.

*Beweis.* Angenommen  $g, h \in G$  haben maximale Länge  $l(g) = l(h)$ . Dann gilt  $l(gx_i) < l(g)$  und  ${}^g b_i < 0$  für  $i = 1, \dots, n$ . Da jede positive Wurzel eine nicht-negative Linearkombination der  $b_i$  ist, muss  $g$  (und  $h$ ) alle positiven Wurzeln auf negative Wurzeln abbilden, d.h.  $g(\Pi) = -\Pi$ . Damit ist  $g^2(\Pi) = \Pi = gh(\Pi)$  und  $l(g^2) = 0 = l(gh)$ . Dies zeigt  $h = g^{-1} = g$ .  $\square$

**Beispiel 8.26.**

- (i) Für  $G = \langle x, y \rangle \cong D_{2m}$  ist  $z := xy \dots = yx \dots$  (je  $m$  Faktoren) das Element maximaler Länge (vgl. Beispiel 8.12). Ist  $m$  gerade, so ist  $\sigma(z) = -\text{id}$ , also die Drehung um  $\pi$ .
- (ii) Für  $g \in G = S_n$  und  $i < j$  gilt

$${}^g \left( \frac{1}{\sqrt{2}}(e_i - e_j) \right) < 0 \iff \frac{1}{\sqrt{2}}(e_{g(i)} - e_{g(j)}) < 0 \iff g(i) > g(j)$$

(Beispiel 8.12). Daher ist  $l(g)$  die Anzahl der *Fehlstände* von  $g$ , also Paare  $i < j$  mit  ${}^g i > {}^g j$ . Das Element maximaler Länge ist daher

$$g = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \cdots & n \\ n & n-1 & \cdots & 1 \end{pmatrix} = (1, n)(2, n-1) \dots = t_1 \dots t_{n-1}$$

mit  $t_i = (i+1, i) \dots (2, 1)$  und  $l(g) = 1 + \dots + n-1 = n(n-1)/2 = |\Pi|$ .

**Lemma 8.27** (TITS). Sei  $g \in G$  und  $v \in \Pi$ . Dann gilt  $l(gx_v) > l(g) \iff {}^g v > 0$ .

*Beweis.* Wie in Lemma 8.13 genügt es  $l(gx_v) > l(g) \Rightarrow {}^g v > 0$  zu zeigen. Induktion nach  $l(g)$ . Der Fall  $g = 1$  ist klar. Sei nun  $l(g) > 0$  und  $l(x_i g) < l(g)$ . Wegen

$$l(x_i gx_v) \geq l(gx_v) - 1 > l(g) - 1 = l(x_i g)$$

gilt  ${}^{x_i g} v > 0$  nach Induktionsvoraussetzung. Nehmen wir  ${}^g v < 0$  an. Nach Satz 8.23 gilt dann  ${}^g v = -b_i$ . Dies zeigt  $g^{-1}x_i g v = g^{-1}b_i = -v$  und  $g^{-1}x_i g = x_v$  nach Bemerkung 8.11. Dies widerspricht aber  $l(gx_v) > l(g) > l(x_i g) = l(gx_v)$ .  $\square$

**Bemerkung 8.28.** Im Folgenden benutzen wir die Schreibweise  $x_1 \dots \check{x}_i \dots x_k := x_1 \dots x_{i-1} x_{i+1} \dots x_k$ .

**Satz 8.29.**

- (i) (Austauschbedingung) Sei  $g = x_{i_1} \dots x_{i_k} \in G$  und  $v \in \Phi$  mit  $l(gx_v) < l(g)$ . Dann existiert  $1 \leq s \leq k$  mit  $gx_v = x_{i_1} \dots \check{x}_{i_s} \dots x_{i_k}$ . Ist  $l(g) = k$ , so ist  $s$  eindeutig bestimmt.
- (ii) (Löschbedingung) Sei  $g = x_{i_1} \dots x_{i_k} \in G$  mit  $l(g) < k$ . Dann existieren  $1 \leq s < t \leq k$  mit  $g = x_{i_1} \dots \check{x}_{i_s} \dots \check{x}_{i_t} \dots x_{i_k}$ .

*Beweis.*

- (i) Wegen  $x_v = x_{-v}$  können wir  $v > 0$  annehmen. Aus Lemma 8.27 folgt  ${}^g v < 0$ . Wegen  $v > 0$  existiert ein  $s$  mit  $x_{i_{s+1}} \dots x_{i_k} v > 0$  und  $x_{i_s} \dots x_{i_k} v < 0$ . Aus Satz 8.23 folgt  $x_{i_{s+1}} \dots x_{i_k} v = b_{i_s}$ . Dies zeigt  $(x_{i_{s+1}} \dots x_{i_k}) x_v (x_{i_{s+1}} \dots x_{i_k})^{-1} = x_{i_s}$ , also  $gx_v = x_{i_1} \dots \check{x}_{i_s} \dots x_{i_k}$ . Sei nun  $l(g) = k$ . Angenommen es existieren  $s < t$  mit  $x_{i_1} \dots \check{x}_{i_s} \dots x_{i_k} = gx_v = x_{i_1} \dots \check{x}_{i_t} \dots x_{i_k}$ . Dies liefert  $x_{i_{s+1}} \dots x_{i_t} = x_{i_s} \dots x_{i_{t-1}}$  und  $x_{i_s} \dots x_{i_t} = x_{i_{s+1}} \dots x_{i_{t-1}}$ . Dann wäre aber  $g = x_{i_1} \dots \check{x}_{i_s} \dots \check{x}_{i_t} \dots x_{i_k}$  und  $l(g) < k$ .
- (ii) Wegen  $l(g) < k$  existiert ein  $t$  mit  $l(x_{i_1} \dots x_{i_t}) < l(x_{i_1} \dots x_{i_{t-1}})$ . Aus (i) folgt  $x_{i_1} \dots x_{i_t} = x_{i_1} \dots \check{x}_{i_s} \dots x_{i_{t-1}}$  für ein  $s < t$ .  $\square$

**Bemerkung 8.30.**

- (i) Es gilt

$$l(x_v g) < l(g) \implies l(g^{-1} x_v) < l(g^{-1}) \implies g^{-1} x_v = x_{i_k} \dots \check{x}_{i_s} \dots x_{i_1} \implies gx_v = x_{i_1} \dots \check{x}_{i_s} \dots x_{i_k}.$$

- (ii) Man kann zeigen, dass jede Gruppe, die die Austauschbedingung (oder Löschbedingung) bzgl. eines Erzeugendensystems von Involutionen erfüllt, eine Coxetergruppe ist.
- (iii) Die Löschbedingung zeigt, dass man aus einer beliebigen Darstellung  $g = x_{i_1} \dots x_{i_k}$  durch suggestives Löschen eine reduzierte Darstellung erhält.

**Definition 8.31.**

- Man nennt  $G$  *irreduzibel*, falls keine Partition  $\{1, \dots, n\} = I \dot{\cup} J$  mit  $G = G_I \times G_J$  existiert.
- Der *Coxetergraph*  $C(G)$  besteht aus den Ecken  $e_1, \dots, e_n$  und den Kanten  $(e_i, e_j)$  mit  $m_{ij} \geq 3$ . Im Fall  $m_{ij} > 3$  werden die Kanten mit  $m_{ij}$  beschriftet. Offenbar ist  $G$  durch  $C(G)$  bis auf Reihenfolge der  $x_i$  eindeutig bestimmt.

**Beispiel 8.32.** Es gilt  $C(S_n)$ :  $\bullet \text{---} \bullet \text{---} \bullet \text{---} \bullet$  und  $C(D_{2m})$ :  $\bullet \xrightarrow{m} \bullet$  nach Beispiel 8.4.

**Satz 8.33.** Genau dann ist  $G$  irreduzibel, falls  $C(G)$  zusammenhängend ist.

*Beweis.* Ist  $G = G_I \times G_J$ , so gilt  $m_{ij} = 2$  für  $i \in I$  und  $j \in J$ . Also gibt es keinen Weg zwischen  $e_i$  und  $e_j$  in  $C(G)$ . Ist umgekehrt  $C(G)$  unzusammenhängend, so existiert eine Partition  $\{1, \dots, n\} = I \dot{\cup} J$  mit  $[x_i, x_j] = 1$  (Kommutator) für alle  $i \in I$  und  $j \in J$ . Insbesondere ist  $[G_I, G_J] = 1$ . Nach Satz 8.22 ist  $G = G_{I \dot{\cup} J} = \langle G_I, G_J \rangle$  und  $G_I \cap G_J = G_{I \cap J} = 1$ . Dies zeigt  $G = G_I \times G_J$ .  $\square$

**Bemerkung 8.34.** Achtung: Der Isomorphietyp von  $G$  bestimmt nicht, ob  $G$  als Coxetergruppe irreduzibel ist. Zum Beispiel ist  $G = D_{12}$  irreduzibel mit zwei Erzeugern, aber auch reduzibel mit drei Erzeugern  $G \cong D_6 \times S_2$ .

**Lemma 8.35.** Sei  $G$  irreduzibel und  $V_0 := \{v \in V : [v, V]_G = 0\} \leq V$ . Dann operiert  $G$  trivial auf  $V_0$  und jeder echte  $G$ -invariante Unterraum von  $V$  liegt in  $V_0$ .

*Beweis.* Für  $v \in V_0$  gilt  $x_i v = \sigma_i(v) = v - 2[v, b_i]_G b_i = v$ . Da  $G$  von  $x_1, \dots, x_n$  erzeugt wird, operiert  $G$  trivial auf  $V_0$ .

Sei nun  $W < V$   $G$ -invariant. Angenommen es existiert  $v \in W \setminus V_0$ . Dann existiert ein  $i$  mit  $[v, b_i]_G \neq 0$ . Es folgt  $b_i = \frac{v - \sigma_i(v)}{2[v, b_i]_G} \in W$ . Für  $b_j$  mit  $m_{ij} \geq 3$  gilt  $[b_i, b_j]_G \neq 0$  und  $b_j = \frac{b_i - \sigma_j(b_i)}{2[b_i, b_j]_G} \in W$ . Da  $C(G)$  zusammenhängend ist, erhält man  $b_1, \dots, b_n \in W$  im Widerspruch zu  $W < V$ .  $\square$

**Satz 8.36.** Sei  $G$  eine endliche irreduzible Coxetergruppe und  $z \in G$  mit maximaler Länge. Dann gilt  $Z(G) \leq \langle z \rangle$ . Insbesondere ist  $|Z(G)| \leq 2$ .

*Beweis.* Sei  $g \in Z(G) \setminus \{1\}$ . Aus  $x_i(g b_i) = g x_i b_i = -g b_i$  folgt  $g b_i = \pm b_i$  (Satz 8.23). Daher ist  $b_i \in E_1(\sigma(g)) \cup E_{-1}(\sigma(g))$  (Eigenräume zum Eigenwert 1 bzw.  $-1$ ). Wegen  $g \in Z(G)$  sind  $E_1(\sigma(g))$  und  $E_{-1}(\sigma(g))$   $G$ -invariant und  $E_1(\sigma(g)) < V$ , da  $g \neq 1$ . Im Fall  $E_{-1}(\sigma(g)) < V$  wäre  $b_i \in V_0$  nach Lemma 8.35. Allerdings ist  $[b_i, b_i]_G = 1$ . Dies zeigt  $\sigma(g) = -\text{id}$  und  $g v < v$  für alle  $v \in \Pi$ . Aus Satz 8.23 folgt  $g = z$ .  $\square$

**Lemma 8.37.** Sei  $H \leq \text{GL}(n, \mathbb{R})$  endlich und irreduzibel als Matrixgruppe. Dann gilt:

- (i) Es existiert eine  $H$ -invariante positiv definite Bilinearform auf  $\mathbb{R}^n$ .
- (ii) Angenommen es existieren  $h \in H$  und  $\lambda \in \mathbb{R}$ , sodass der Eigenraum  $E_\lambda(h)$  ungerade Dimension hat. Dann ist  $C_{\text{GL}(n, \mathbb{R})}(H) = \mathbb{R}^\times 1_n$ .<sup>15</sup> Insbesondere gilt dies, falls  $n$  ungerade ist.
- (iii) Ist  $C_{\text{GL}(n, \mathbb{R})}(H) = \mathbb{R}^\times 1_n$ , so unterscheiden sich je zwei nicht-ausgeartete  $H$ -invariante Bilinearform auf  $\mathbb{R}^n$  nur durch eine Konstante.

*Beweis.*

- (i) Für  $v, w \in \mathbb{R}^n$  definiert

$$[v, w]_H := \sum_{h \in H} [hv, hw]$$

eine  $H$ -invariante positiv definite Bilinearform, wobei  $[\cdot, \cdot]$  das Standardskalarprodukt ist.

- (ii) Sei  $f \in C_{\text{GL}(n, \mathbb{R})}(H)$ . Dann operiert  $f$  auf  $E_\lambda(h)$ . Da  $\dim E_\lambda(h)$  ungerade ist, besitzt  $f$  auf  $E_\lambda(h)$  einen reellen Eigenwert  $\mu$ . Nun ist  $0 \neq E_\mu(f) \leq \mathbb{R}^n$   $H$ -invariant und es folgt  $E_\mu(f) = \mathbb{R}^n$  sowie  $f = \mu 1_n$ , da  $H$  irreduzibel ist. Die zweite Aussage erhält man mit  $h = 1$ .

---

<sup>15</sup>Man sagt:  $H$  ist absolut irreduzibel.

- (iii) Seien  $[\cdot, \cdot]_1$  und  $[\cdot, \cdot]_2$  zwei nicht-ausgeartete  $H$ -invariante Bilinearformen auf  $V := \mathbb{R}^n$ . Sei  $V^* := \text{Hom}(V, \mathbb{R})$  der Dualraum von  $V$ . Dann sind  $\varphi_i : V \rightarrow V^*$ ,  $v \mapsto [v, \cdot]_i$  für  $i = 1, 2$  Isomorphismen von Vektorräumen (beachte  $\dim V = \dim V^*$ ). Also ist  $f := \varphi_2^{-1} \circ \varphi_1 : V \rightarrow V$  ein Isomorphismus mit  $[v, w]_1 = [f(v), w]_2$  für alle  $v, w \in V$ . Für  $h \in H$  folgt

$$[f(hv), hw]_2 = [hv, hw]_1 = [v, w]_1 = [f(v), w]_2 = [hf(v), hw]_2.$$

Dies zeigt  $fh = hf$ , d. h.  $f \in \text{C}_{\text{GL}(n, \mathbb{R})}(H) = \mathbb{R}^\times 1_n$ .  $\square$

**Bemerkung 8.38.** Wir betrachten den Dualraum  $V^* := \text{Hom}(V, \mathbb{R})$  mit der dualen Basis  $\beta_1, \dots, \beta_n$ , wobei  $\beta_i(\beta_j) = \delta_{ij}$ . Durch  ${}^g\varphi(v) := \varphi(g^{-1}v)$  für  $v \in V$ ,  $\varphi \in V^*$  und  $g \in G$  operiert  $G$  auf  $V^*$ . Die Abbildung  $\Gamma : V \rightarrow V^*$ ,  $v \mapsto [v, \cdot]_G$  vermittelt einen Isomorphismus zwischen den Operationen auf  $V$  und  $V^*$ , denn

$$({}^g\Gamma(v))(w) = \Gamma(v)({}^{g^{-1}}w) = [v, {}^{g^{-1}}w]_G = [{}^gv, w]_G = \Gamma({}^gv)(w)$$

für  $v, w \in V$  und  $g \in G$ . Sei  $\sigma^* : G \rightarrow \text{GL}(V^*)$  der entsprechende Monomorphismus. Wir definieren

$$C := \{\varphi \in V^* : \forall i : \varphi(\beta_i) > 0\} \subseteq V^*.$$

Bzgl. der dualen Basis ist  $C = \mathbb{R}_{>0}^n$  eine offene Menge im euklidischen Raum  $\mathbb{R}^n$ . Da die Determinante  $\mathbb{R}^{n \times n} \rightarrow \mathbb{R}$  stetig ist, ist  $\text{GL}(V^*) = \det^{-1}(\mathbb{R} \setminus \{0\})$  offen in  $\mathbb{R}^{n \times n}$ .

**Satz 8.39.** *Das Bild  $\sigma^*(G)$  ist eine diskrete Untergruppe von  $\text{GL}(V^*)$ , d. h. für alle  $a \in \sigma^*(G)$  existiert eine offene Umgebung  $U(a) \subseteq \text{GL}(V^*)$  mit  $U(a) \cap \sigma^*(G) = \{a\}$ . Insbesondere ist  $\sigma^*(G)$  abgeschlossen.*

*Beweis.* Wir identifizieren  $G$  mit  $\sigma^*(G)$ . Sei  $c \in C$  und  $F : \text{GL}(V^*) \rightarrow V^*$ ,  $a \mapsto {}^ac = a(c)$ . Da die Matrix-Vektormultiplikation stetig ist, ist  $F$  stetig und  $D := F^{-1}(C) \subseteq \text{GL}(V^*)$  ist eine offene Umgebung von  $1 \in \text{GL}(V^*)$ . Für  $g \in G \setminus \{1\}$  existiert  $x_i$  mit  $l(g^{-1}x_i) < l(g)$ . Aus Tits Lemma folgt  ${}^{g^{-1}}\beta_i < 0$  und  ${}^gc(\beta_i) = c({}^{g^{-1}}\beta_i) < 0$ . Dies zeigt  $D \cap G = \{1\}$ . Für ein beliebiges  $g \in G$  ist  $gD$  eine offene Umgebung um  $g$  mit  $gD \cap G = g(D \cap G) = \{g\}$ .

Sei nun  $(a_i) \subseteq G$  eine konvergente Folge. Dann existiert  $k \in \mathbb{N}$  mit  $a_i \in U(a_k) \cap G = \{a_k\}$  für alle  $i \geq k$ . Also wird die Folge konstant und der Grenzwert liegt in  $G$ . Dies zeigt, dass  $G$  abgeschlossen ist.  $\square$

**Satz 8.40.** *Genau dann ist  $G$  endlich, wenn  $[\cdot, \cdot]_G$  positiv definit auf  $V$  ist.*

*Beweis.* Sei  $G$  endlich. Wir argumentieren durch Induktion nach  $n$ . Im Fall  $n = 1$  ist  $[b_1, b_1]_G = 1$  und wir sind fertig. Sei  $n > 1$ . Nehmen wir an, dass  $G = G_I \times G_J$  reduzibel ist. Dann gilt  $V = V_I \oplus V_J$  mit  $V_I := \langle \beta_i : i \in I \rangle$  und analog  $V_J$ . Nach Induktion sind  $[\cdot, \cdot]_{G_I}$  und  $[\cdot, \cdot]_{G_J}$  positiv definit auf  $V_I$  bzw.  $V_J$ . Für  $i \in I$  und  $j \in J$  gilt  $[b_i, b_j]_G = -\cos \frac{\pi}{2} = 0$ . Für  $v = v_I + v_J \neq 0$  folgt

$$[v, v]_G = [v_I, v_I]_{G_I} + [v_J, v_J]_{G_J} > 0.$$

Also ist  $[\cdot, \cdot]_G$  positiv definit auf  $V$ .

Sie nun  $G$  irreduzibel und  $V_0 = \{v \in V : [v, V]_G = 0\} \leq V$ . Nach Maschke besitzt  $V_0$  ein  $G$ -invariantes Komplement  $W \leq V$ . Lemma 8.35 zeigt  $W = V$  und  $V_0 = 0$ , d. h.  $[\cdot, \cdot]_G$  ist nicht-ausgeartet. Das gleiche Argument zeigt auch, dass  $\sigma(G)$  als Matrixgruppe irreduzibel ist. Wegen  $\dim E_{-1}(\sigma(x_1)) = \dim E_{-1}(\sigma_1) = 1$  ist  $[\cdot, \cdot]_G$  bis auf eine Konstante eindeutig bestimmt nach Lemma 8.37. Lemma 8.37 besagt aber auch, dass eine  $G$ -invariante positiv definite Bilinearform existiert. Also ist  $[\cdot, \cdot]_G$  positiv definit.

Sei nun umgekehrt  $[\cdot, \cdot]_G$  positiv definit. Durch den Isomorphismus  $\Gamma : V \rightarrow V^*$ ,  $v \mapsto [v, \cdot]_G$  aus Bemerkung 8.38 erhält man eine  $G$ -invariante positiv definite Bilinearform auf  $V^*$  (nämlich  $[\varphi, \mu] := [\Gamma^{-1}(\varphi), \Gamma^{-1}(\mu)]_G$  für  $\varphi, \mu \in V^*$ ). Nach Sylvesters Trägheitssatz besitzt  $V^*$  eine Orthonormalbasis  $\Delta$  bzgl. dieser Bilinearform. Schreibt man  $g \in \sigma^*(G)$  als Matrix bzgl.  $\Delta$ , so haben die Spalten Norm 1. Da alle Normen auf dem  $\mathbb{R}^n$  äquivalent sind, ist  $\sigma^*(G)$  beschränkt (bzgl. der euklidischen Norm). Nach Satz 8.39 ist  $\sigma^*(G)$  zusätzlich abgeschlossen und daher kompakt. Für  $a \in \sigma^*(G)$  wählen wir gemäß Satz 8.39 eine offene Umgebung  $U(a) \subseteq \mathbb{R}^{n \times n}$  mit  $U(a) \cap \sigma^*(G) = \{a\}$ . Nach Heine-Borel überdeckt bereits eine endliche Auswahl dieser Umgebungen  $\sigma^*(G)$ . Daher muss  $\sigma^*(G) \cong G$  endlich sein.  $\square$

**Satz 8.41.** *Die endlichen Coxetergruppen sind genau die Spiegelungsgruppen.*

*Beweis.* Sei  $G$  eine endliche Coxetergruppe. Nach Satz 8.9 und Satz 8.14 ist  $G \cong \sigma(G) \leq \text{GL}(V)$  eine Spiegelungsgruppe.

Sei nun umgekehrt  $V := \mathbb{R}^n$  und  $S \leq \text{GL}(V)$  eine Spiegelungsgruppe. Sei  $\Phi \subseteq V$  die Menge der Einheitsvektoren  $b$ , sodass die Spiegelung  $\sigma_b$  an  $b^\perp$  in  $S$  liegt. Wir zeigen, dass  $\Phi$  die Eigenschaften eines Wurzelsystems hat. Aus  $|S| < \infty$  folgt  $|\Phi| < \infty$ . Wegen  $b^\perp = (-b)^\perp$  ist  $-\Phi = \Phi$ . Wir ordnen die  $b \in \Phi$  lexikografisch entsprechend der Koeffizienten bzgl. der Standardbasis von  $\mathbb{R}^n$ . Sei  $\Pi := \{b \in \Phi : b > 0\}$  die Menge der *positiven Wurzeln* ( $b > 0$  bedeutet, dass die erste von 0 verschiedene Komponente von  $b$  positiv ist). Dann gilt  $\Phi = \Pi \cup (-\Pi)$ . Sei  $\Delta \subseteq \Phi$  eine minimale Teilmenge, sodass für alle  $b \in \Pi$  Zahlen  $\lambda_s \geq 0$  mit  $b = \sum_{s \in \Delta} \lambda_s s$  existieren. Im Folgenden sei  $[\cdot, \cdot]$  das Standardskalarprodukt auf  $\mathbb{R}^n$ .

**Schritt 1:**  $[b, c] \leq 0$  für alle verschiedenen  $b, c \in \Delta$ .

Angenommen  $[b, c] > 0$ . Für  $\mu := 2[b, c] > 0$  gilt  $\sigma_b(c) = c - \mu b$ . Wegen  $\sigma_b \sigma_c \sigma_b = \sigma_{\sigma_b(c)} \in S$  gilt  $\sigma_b(c) \in \Phi$ . Sei zunächst  $\sigma_b(c) \in \Pi$ . Dann existieren  $\lambda_s \geq 0$  mit  $\sigma_b(c) = \sum_{s \in \Delta} \lambda_s s$ . Im Fall  $\lambda_c < 1$  erhält man

$$(1 - \lambda_c)c = \sigma_b(c) + \mu b - \lambda_c c = \mu b + \sum_{s \neq c} \lambda_s s.$$

Nun könnte man aber  $c$  aus  $\Delta$  entfernen im Widerspruch zur Minimalität von  $\Delta$ . Also gilt  $\lambda_c \geq 1$  und

$$(\lambda_c - 1)c + \mu b + \sum_{s \neq c} \lambda_s s = 0.$$

Wegen  $\mu > 0$  widerspricht dies aber der Definition von  $\Pi$ . Dies zeigt  $-\sigma_b(c) \in \Pi$ . Mit  $-\sigma_b(c) = \sum_{s \in \Delta} \lambda_s s$  folgt

$$(\mu - \lambda_b)b = -\sigma_b(c) + c - \lambda_b b = c + \sum_{s \neq b} \lambda_s s.$$

Im Fall  $\lambda_b < \mu$  könnte man  $b$  aus  $\Delta$  entfernen. Also ist  $\lambda_b \geq \mu$ . Dann wäre aber

$$(\lambda_b - \mu)b + c + \sum_{s \neq b} \lambda_s s = 0$$

ein Widerspruch zur Definition von  $\Pi$ . Insgesamt muss also  $[b, c] \leq 0$  gelten.

**Schritt 2:**  $\Delta$  ist linear unabhängig.

Sei  $\sum_{s \in \Delta} \lambda_s s = 0$  mit  $\lambda_s \in \mathbb{R}$  für  $s \in \Delta$ . Trennen der positiven und negativen Koeffizienten liefert  $b := \sum_{\lambda_s \geq 0} \lambda_s s = -\sum_{\lambda_t < 0} \lambda_t t$ . Aus Schritt 2 folgt

$$0 \leq [b, b] = \sum_{\lambda_s \geq 0} \sum_{\lambda_t < 0} \lambda_s (-\lambda_t) [s, t] \leq 0$$

und  $b = 0$ . Da  $b$  eine nicht-negative Linearkombination positiver Wurzeln ist, folgt  $\lambda_s = 0$  für alle  $s \in \Delta$ .

**Schritt 3:**  $S = \langle \sigma_b : b \in \Delta \rangle$ .

Nach Schritt 2 lässt sich jede Wurzel in  $\Phi$  eindeutig als Linearkombination von  $\Delta$  schreiben, wobei entweder alle Koeffizienten nicht-negativ oder alle Koeffizienten nicht-positiv sind. Sei  $T := \langle \sigma_b : b \in \Delta \rangle \leq S$  und  $b \in \Pi$ . Unter allen Elementen in der Bahn  ${}^T b$  wählen wir  $c = \sum_{s \in \Delta} \lambda_s s \in \Pi$ , sodass  $h(c) := \sum_{s \in \Delta} \lambda_s$  möglichst klein ist. Nehmen wir  $c \notin \Delta$  an. Wegen  $1 = [c, c] = \sum_{s \in \Delta} \lambda_s [c, s]$  existiert ein  $t \in \Delta$  mit  $[c, t] > 0$ . Es gilt  $\sigma_t(c) = c - 2[c, t]t$ . Wegen  $c \in \Pi \setminus \Delta$  ist  $c$  kein Vielfaches von  $t$ . Nach Schritt 2 ist die Darstellung von  $\sigma_t(c)$  bzgl.  $\Delta$  eindeutig. Wegen  $\Phi = \Pi \cup (-\Pi)$  kann es keine Koeffizienten mit verschiedenen Vorzeichen geben. Dies zeigt  $\lambda_t \geq 2[c, t]$  und man hat den Widerspruch  $h(\sigma_t(c)) < h(c)$  zur Wahl von  $c$ . Also ist  $c \in \Delta$  und es existiert  $t \in T$  mit  $b = t(c)$ . Wie bereits bemerkt folgt  $\sigma_b = t\sigma_c t^{-1} \in T$ . Also gilt  $S = \langle \sigma_b : b \in \Pi \rangle = T$ .

**Schritt 4:**  $S$  ist eine Coxetergruppe.

Sei  $\Delta = \{b_1, \dots, b_n\}$  und  $\sigma_i = \sigma_{b_i}$  für  $i = 1, \dots, n$ . Sei  $|\langle \sigma_i \sigma_j \rangle| = m_{ij}$  für  $1 \leq i, j \leq n$ . Nach Schritt 2 ist  $m_{ij} \geq 2$  für  $i \neq j$ . Ggf. ist  $\sigma_i \sigma_j$  eine Drehung um den Winkel  $\varphi := 2\pi/m_{ij} \leq \pi$  in der Ebene  $\langle b_i, b_j \rangle$ . Es folgt

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= [b_j, \sigma_i \sigma_j(b_j)] = -[b_j, \sigma_i(b_j)] = -[b_j, b_j - 2[b_j, b_i]b_i] = -1 + 2[b_i, b_j]^2, \\ [b_i, b_j]^2 &= \frac{\cos \varphi + 1}{2} = \frac{\cos(\varphi/2)^2 - \sin(\varphi/2)^2 + 1}{2} = \cos(\varphi/2)^2. \end{aligned}$$

Aus Schritt 1 erhält man  $[b_i, b_j] = -\cos(\varphi/2) = -\cos(\pi/m_{ij})$ . Sei  $G = \langle x_1, \dots, x_n \rangle$  die Coxetergruppe mit den Parametern  $m_{ij}$ . Mit den Bezeichnungen aus Definition 8.8 ist nun  $[\cdot, \cdot]_G$  das Standardskalarprodukt und der Monomorphismus  $\sigma$  aus Satz 8.9 bildet  $G$  nach  $S$  ab. Wegen Schritt 3 ist  $\sigma$  surjektiv und  $S \cong G$  ist eine Coxetergruppe.  $\square$

**Bemerkung 8.42.**

- (i) Genau dann ist  $G$  endlich, wenn die Matrix  $(-\cos(\pi/m_{ij}))_{ij}$  positiv definit ist. Für  $G = S_n$  erhält man die Matrix

$$\begin{pmatrix} 1 & -1/2 & & 0 \\ -1/2 & \ddots & \ddots & \\ & \ddots & 1 & -1/2 \\ 0 & & -1/2 & 1 \end{pmatrix}.$$

- (ii) Im Folgenden nennen wir  $G$  *positiv semidefinit*, falls  $[\cdot, \cdot]_G$  positiv semidefinit ist. Insbesondere ist jede endliche Coxetergruppe positiv semidefinit.

**Lemma 8.43.** Sei  $A = (a_{ij}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  symmetrisch, positiv semidefinit und unzerlegbar (d. h. zu jeder Partition  $\{1, \dots, n\} = I \dot{\cup} J$  existieren  $i \in I, j \in J$  mit  $a_{ij} \neq 0$ ). Für  $i \neq j$  sei außerdem  $a_{ij} \leq 0$ . Dann gilt

(i)  $\text{Ker}(A) = \{v \in \mathbb{R}^n : vAv^t = 0\}$  und  $\dim \text{Ker}(A) \leq 1$ .

(ii) Der Eigenraum zum kleinsten Eigenwert von  $A$  wird von einem positiven Eigenvektor (d. h. alle Komponenten sind positiv) aufgespannt.

*Beweis.*

- (i) Sicher liegt  $\text{Ker}(A)$  in  $N := \{v \in \mathbb{R}^n : vAv^t = 0\}$ . Sei umgekehrt  $v \in N$ . Nach dem Spektralsatz existiert eine orthogonale Matrix  $S$  mit  $D := SAS^t = \text{diag}(d_1, \dots, d_n)$  und  $d_1, \dots, d_n \geq 0$ . Für  $w := vS^t$  folgt

$$\sum_{i=1}^n w_i^2 d_i = wDw^t = vAv^t = 0.$$

Also ist  $w_i = 0$  oder  $d_i = 0$  für alle  $i$ . Dies zeigt  $0 = S^t Dw^t = Av^t$  und  $N \subseteq \text{Ker}(A)$ .

Sei nun  $x \in N \setminus \{0\}$  und  $z = (|x_1|, \dots, |x_n|)$ . Wegen  $a_{ij} \leq 0$  für  $i \neq j$  gilt

$$0 \leq zAz^t = \sum_{i,j=1}^n a_{ij}|x_i x_j| \leq \sum_{i,j=1}^n a_{ij}x_i x_j = xAx^t = 0,$$

also  $z \in N$ . Sei  $I := \{1 \leq i \leq n : z_i = 0\}$  und  $J = \{1, \dots, n\} \setminus I$ . Aus  $z \in \text{Ker}(A)$  folgt  $\sum_{j \in J} a_{ij}z_j = 0$  für  $i = 1, \dots, n$ . Wegen  $z_j > 0$  geht dies nur falls  $a_{ij} = 0$  für alle  $i \in I$  und  $j \in J$ . Da  $A$  unzerlegbar ist, muss  $I = \emptyset$  gelten, d. h. alle Komponenten von  $z$  sind positiv und alle Komponenten von  $x$  sind ungleich 0. Da  $x \neq 0$  beliebig war, schließen wir  $\dim N \leq 1$  (anderenfalls könnte man aus zwei linear unabhängigen Vektoren eine Linearkombination mit 0-Komponente kombinieren).

- (ii) Sei  $d := \min\{d_1, \dots, d_n\} \geq 0$ . Dann erfüllt auch  $B := A - d1_n$  die Voraussetzungen des Satzes. Die Behauptung folgt nun aus dem Beweis von (i) für  $B$ .  $\square$

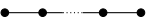
**Lemma 8.44.** *Sei  $G$  irreduzibel und positiv semidefinit. Wir konstruieren aus  $C(G)$  einen echten Teilgraphen  $D$ , indem wir Ecken oder Kanten entfernen oder Kantengewichte reduzieren. Dann ist die Coxetergruppe zu  $D$  endlich.*


*Beweis.* Wir nummerieren die Ecken von  $C(G)$ , sodass  $D$  aus den ersten  $k$  Ecken gebildet wird. Seien  $A = (a_{ij}) = ([b_i, b_j]_G) \in \mathbb{R}^{k \times k}$  und  $B = (b_{ij}) = (-\cos(\pi/m'_{ij})) \in \mathbb{R}^{k \times k}$  die entsprechenden Matrizen. Dann gilt  $b_{ij} \geq -\cos(\pi/m_{ij}) = a_{ij}$ . Angenommen  $B$  ist nicht positiv definit. Sei  $v \in \mathbb{R}^k \setminus \{0\}$  mit  $vBv^t \leq 0$  und  $w = (|v_1|, \dots, |v_k|, 0, \dots, 0) \in \mathbb{R}^n$ . Da  $G$  positiv semidefinit ist, folgt


$$0 \leq wAw^t = \sum_{i,j=1}^k a_{ij}|v_i||v_j| \leq \sum_{i,j=1}^k b_{ij}|v_i||v_j| \leq \sum_{i,j=1}^k b_{ij}v_i v_j = vBv^t \leq 0$$


und  $wAw^t = 0$ . Nach Lemma 8.43 sind alle Komponenten von  $w$  positiv, d. h.  $k = n$  und  $v_i \neq 0$  für  $i = 1, \dots, k$ . Daraus ergibt sich  $a_{ij} = b_{ij}$ . Nun ist  $D$  aber kein echter Teilgraph mehr. Widerspruch.  $\square$

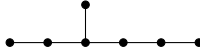
**Satz 8.45 (COXETER).** *Jede endliche irreduzible Coxetergruppe  $G$  gehört zu einer der folgenden Familien.<sup>16</sup>*


$(A_n)$   mit  $n \geq 1$ .

$(B_n)$   mit  $n \geq 2$ .

$(D_n)$   mit  $n \geq 4$ .

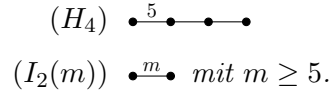
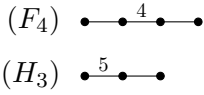
$(E_6)$  

$(E_7)$  

$(E_8)$  

<sup>16</sup>Diese speziellen Graphen heißen *Dynkin-Diagramme*.





*Beweis.*

**Existenz:** Da die angegebenen Graphen zusammenhängend sind, sind die entsprechenden Gruppen irreduzibel (Satz 8.33). Wir zeigen, dass sie alle endlich sind. Alle Graphen sind Bäume. Entfernt man ein geeignetes Blatt, so erhält man einen Baum, der auch einen der angegebenen Typen besitzt. Wir können daher durch Induktion argumentieren und müssen nur zeigen, dass die Matrix  $M := 2([b_i, b_j])$  positive Determinante hat (Sylvester-Kriterium). Für  $n = 2$  erhält man

$$\det M = 4(1 - \cos(\pi/m)^2) = 4 \sin(\pi/m)^2 > 0$$

wegen  $m = m_{12} \geq 3$ . Sei nun  $n \geq 3$ . Wir nummerieren die Ecken  $e_1, \dots, e_n$ , sodass  $e_n$  ein Blatt ist und die dazugehörige Kante  $\{e_{n-1}, e_n\}$  Gewicht  $m = 3$  oder  $4$  hat. Laplace-Entwicklung nach der letzten Spalte zeigt

$$\det M = 2 \det M_{n-1} - 4 \cos(\pi/m)^2 \det M_{n-2} = 2 \det M_{n-1} - \lambda \det M_{n-2}$$

mit  $\lambda \in \{1, 2\}$ , denn  $\cos(\pi/3) = 1/2$  und  $\cos(\pi/4) = 1/\sqrt{2}$ . Unter Benutzung von  $\sin(\pi/5) = \sqrt{10 - 2\sqrt{5}}/4$  berechnet man induktiv

$$(A_n): \det M = 2n - (n - 1) = n + 1,$$

$$(B_n): \det M = 2 \cdot 2 - 2 = 2,$$

$$(D_n): \det M = 2 \cdot 4 - 4 = 4,$$

$$(E_6): \det M = 2 \cdot 4 - 5 = 3,$$

$$(E_7): \det M = 2 \cdot 3 - 4 = 2,$$

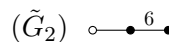
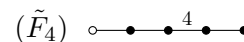
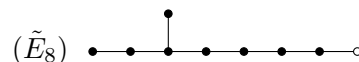
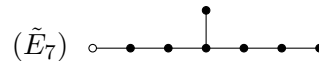
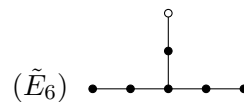
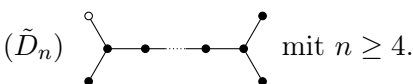
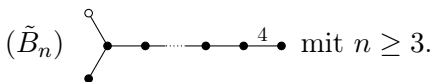
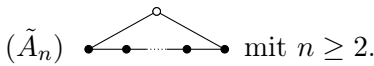
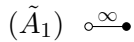
$$(E_8): \det M = 2 \cdot 2 - 3 = 1,$$

$$(F_4): \det M = 2 \cdot 2 - 3 = 1,$$

$$(H_3): \det M = 2 \cdot 4 \sin(\pi/5)^2 - 2 = \frac{10 - 2\sqrt{5} - 4}{2} = 3 - \sqrt{5} > 0,$$

$$(H_4): \det M = 2(3 - \sqrt{5}) - 4 \sin(\pi/5)^2 = \frac{12 - 4\sqrt{5} - 5 + \sqrt{5}}{2} = \frac{7 - 3\sqrt{5}}{2} > 0.$$

**Hilfsgraphen:** Wir fügen an einige der Graphen eine weitere Ecke hinzu und erhalten die folgenden Coxetergraphen<sup>17</sup> (die Anzahl der Ecken ist nun  $n + 1$ ):



<sup>17</sup>Die Bezeichnungen sind in der Literatur nicht einheitlich.

Wir zeigen, dass die entsprechende Bilinearform positiv semidefinit, aber nicht positiv definit ist. Für  $\tilde{A}_n$  sind die Zeilensummen von  $M$  alle  $2 - 1 - 1 = 0$ , d.h. 0 ist ein Eigenwert und  $\det M = 0$ . In allen anderen Fällen kann man obige Rekursionsformel anwenden (beachte  $\sin(\pi/6) = 1/2$ ):

$$\begin{aligned}(\tilde{B}_n): \det M &= 2 \cdot 2 - 2 \cdot 2 = 0, \\(\tilde{C}_n): \det M &= 2 \cdot 2 - 2 \cdot 2 = 0, \\(\tilde{D}_n): \det M &= 2 \cdot 4 - 2 \cdot 4 = 0, \\(\tilde{E}_6): \det M &= 2 \cdot 3 - 6 = 0, \\(\tilde{E}_7): \det M &= 2 \cdot 2 - 4 = 0, \\(\tilde{E}_8): \det M &= 2 \cdot 1 - 2 = 0, \\(\tilde{F}_4): \det M &= 2 \cdot 1 - 2 = 0, \\(\tilde{G}_2): \det M &= 2 \cdot 1 - 2 = 0.\end{aligned}$$

Fügt man eine Ecke zu  $H_3$  und  $H_4$  hinzu, so erhält man folgende Coxetergraphen:

$$(Z_4): \circ \text{---} \overset{5}{\bullet} \text{---} \bullet \quad (Z_5): \bullet \text{---} \overset{5}{\bullet} \text{---} \bullet \text{---} \bullet \text{---} \circ$$

Wegen

$$\begin{aligned}(Z_4): \det M &= 2(3 - \sqrt{5}) - 3 = 3 - 2\sqrt{5} < 0, \\(Z_5): \det M &= 7 - 3\sqrt{5} - (3 - \sqrt{5}) = 4 - 2\sqrt{5} < 0\end{aligned}$$

sind die entsprechenden Bilinearformen nicht mehr positiv semidefinit.

**Eindeutigkeit:** Sei nun  $G$  eine endliche irreduzible Coxetergruppe vom Rang  $n$ . Sei  $m$  das größte Kantengewicht. Nehmen wir an, dass  $C(G)$  nicht zu den oben beschriebenen positiv (semi)definiten Graphen gehört.

- (1) Da alle zusammenhängenden Graphen mit  $n = 2$  bereits aufgelistet wurden, gilt  $n \geq 3$ .
- (2) Nach Lemma 8.44 ist  $\tilde{A}_1$  kein Teilgraph von  $C(G)$  und daher  $m < \infty$ .
- (3) Da  $\tilde{A}_k$  kein Teilgraph ist, muss  $C(G)$  ein Baum sein. Nehmen wir zunächst  $m = 3$  an.
- (4) Wegen  $C(G) \neq A_n$  besitzt  $C(G)$  einen Verzweigungspunkt.
- (5) Da  $\tilde{D}_k$  kein Teilgraph ist, gibt es genau einen Verzweigungspunkt  $e$ .
- (6) Da  $\tilde{D}_4$  kein Teilgraph ist, besitzt  $e$  genau drei Äste. Seien  $a \leq b \leq c$  die Anzahl der Ecken der drei Äste.
- (7) Da  $\tilde{E}_6$  kein Teilgraph ist, ist  $a = 1$ .
- (8) Da  $\tilde{E}_7$  kein Teilgraph ist, ist  $b \leq 2$ .
- (9) Wegen  $C(G) \neq D_n$  ist  $b = 2$ .
- (10) Da  $\tilde{E}_8$  kein Teilgraph ist, ist  $c \leq 4$ .
- (11) Da  $C(G)$  weder  $E_6$ ,  $E_7$  noch  $E_8$  ist, kann der Fall  $m = 3$  nicht eintreten. Sei also  $m \geq 4$ .
- (12) Da  $\tilde{C}_k$  kein Teilgraph ist, kann es nur eine Kante mit Gewicht  $> 3$  geben.
- (13) Da  $\tilde{B}_k$  kein Teilgraph ist, gibt es keine Verzweigungspunkte, d. h.  $C(G)$  ist eine Linie. Nehmen wir nun  $m = 4$  an.

(14) Wegen  $C(G) \neq B_n$  haben die beiden äußeren Kanten Gewicht 3.

(15) Da  $\tilde{F}_4$  kein Teilgraph ist, muss  $n = 4$  gelten.

(16) Wegen  $C(G) \neq F_4$  kann  $m = 4$  nicht gelten. Sei also  $m \geq 5$ .

(17) Da  $\tilde{G}_2$  kein Teilgraph ist, gilt  $m = 5$ .

(18) Da  $Z_4$  kein Teilgraph ist, muss eine äußere Kante Gewicht  $m$  haben.

(19) Da  $Z_5$  kein Teilgraph ist, muss  $n \leq 4$  gelten.

(20) Nun wäre aber  $C(G)$  gleich  $H_3$  oder  $H_4$ . Widerspruch. □

**Satz 8.46.** Für die Gruppen in Satz 8.45 gilt

$$\begin{array}{ll}
 (A_n) \ G \cong S_{n+1} & (E_8) \ G = 2.\Omega^+(8, 2).2 \text{ mit } |G| = 696.729.600 = 2^{14}3^55^27. \\
 (B_n) \ G \cong C_2 \wr S_n. & \\
 (D_n) \ G \cong C_2^{m-1} \rtimes S_n. & (F_4) \ G \cong (C_2^3 \rtimes S_4) \rtimes S_3. \\
 (E_6) \ G \cong \text{Aut}(\text{SU}(4, 2)) \cong \text{SU}(4, 2) \rtimes C_2 \text{ mit } |G| = 51.840 = 2^73^45. & (H_3) \ G \cong A_5 \times C_2. \\
 (E_7) \ G \cong \text{Sp}(6, 2) \times C_2 \text{ mit } |G| = 2.903.040 = 2^{10}3^45 \cdot 7. & (H_4) \ |G| = 14.400 = 2^63^25^2. \\
 & (I_2(m)) \ G \cong D_{2m}.
 \end{array}$$

*Beweisskizze.* Für  $(A_n)$  und  $(I_2(m))$  ist die Behauptung aus Beispiel 8.32 bekannt. Da  $[\cdot, \cdot]_G$  positiv definit ist, stimmt  $[\cdot, \cdot]_G$  bis auf Basiswahl mit dem Standardskalarprodukt auf  $\mathbb{R}^n$  überein. Wir wählen konkrete Vektoren  $b_1, \dots, b_n$  mit den vorgegebenen Werten  $[b_i, b_j]$  und bestimmen  $\sigma(G)$  explizit. Sei  $e_1, \dots, e_n$  die Standardbasis von  $\mathbb{R}^n$ .

$(B_n)$  Definiere  $b_i := \frac{1}{\sqrt{2}}(e_i - e_{i+1})$  für  $i = 1, \dots, n-1$  und  $b_n = e_n$ . Es gilt  $[b_i, b_i] = 1$ ,  $[b_i, b_j] = 0$  für  $|j - i| > 1$ ,  $[b_i, b_{i+1}] = -1/2 = -\cos(\pi/3)$  für  $i = 1, \dots, n-2$  und  $[b_{n-1}, b_n] = -1/\sqrt{2} = -\cos(\pi/4)$  wie gewünscht. Es gilt  $b_i^\perp = \langle e_j, e_i + e_{i+1} : j \neq i \rangle$ . Bezüglich  $e_1, \dots, e_n$  entspricht  $\sigma(x_i)$  der Permutationsmatrix zur Transposition  $(i, i+1)$  für  $i = 1, \dots, n-1$  und  $\sigma(x_n) = \text{diag}(1, \dots, 1, -1)$ . Daher ist  $\sigma(G)$  die Gruppe der vorzeichenbehafteten Permutationsmatrizen. Dies zeigt  $G \cong C_2 \wr S_n$ .

$(D_n)$  Definiere  $b_i := \frac{1}{\sqrt{2}}(e_i - e_{i+1})$  für  $i = 1, \dots, n-1$  und  $b_n = \frac{1}{\sqrt{2}}(e_{n-1} + e_n)$ . Es gilt  $[b_{n-2}, b_{n-1}] = [b_{n-2}, b_n] = -1/2$  und  $[b_{n-1}, b_n] = 0$ . Wieder sind  $\sigma(x_i)$  für  $i < n$  Permutationsmatrizen und

$$\sigma(x_n) = \begin{pmatrix} 1 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & 1 & & \\ & & & 0 & -1 \\ & & & -1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Daher besteht  $\sigma(G)$  aus den vorzeichenbehafteten Permutationsmatrizen mit einer geraden Anzahl von  $-1$ -Einträgen. Die entsprechenden Diagonalmatrizen bilden einen Normalteiler  $C_2^{n-1}$  mit Komplement  $S_n$  in  $G$ .

( $H_3$ ) Für  $x := x_3x_2$ ,  $y := x_2x_1$  gilt  $|\langle x \rangle| = 3$ ,  $|\langle y \rangle| = 5$  und  $|\langle xy \rangle| = 2$ . Nach Beispiel 2.16 existiert ein Epimorphismus  $A_5 \rightarrow \langle x, y \rangle =: H$ . Da  $A_5$  einfach ist, folgt  $H \cong A_5$ . Aus  $\sigma(H) \leq \text{SL}(3, \mathbb{R})$  und  $\det(\sigma_1) = -1$  ergibt sich  $|G| = 2|H| = 120$ . Nach Bemerkung 5.3 gilt  $G \in \{S_5, A_5 \times C_2\}$ . Im Fall  $G \cong S_5$  wäre  $D_{10} \cong \langle x_1, x_2 \rangle \leq A_5$  im Widerspruch zu  $\det(x_1) = -1$ .

Die anderen Fällen sind recht aufwendig und können mit GAP behandelt werden:

```
for para in [{"E",6}, {"E",7}, {"E",8}, {"F",4}] do
  L:=SimpleLieAlgebra(para[1],para[2],Rationals);
  R:=RootSystem(L);;
  W:=WeylGroup(R);
  Print(para, " ", Order(W), "\n");
od;
F:=FreeGroup("a","b","c","d");;
AssignGeneratorVariables(F);;
H4:=F/[a^2,b^2,c^2,d^2,(a*b)^5,(b*c)^3,(c*d)^3,Comm(a,c),Comm(a,d),Comm(b,d)];
#Comm(a,b)=[a,b]
Size(H4);
```

□

#### Bemerkung 8.47.

- (i) Die Matrix  $-1_n$  liegt offenbar im Zentrum der Coxetergruppe  $G \cong C_2^n \rtimes S_n$  vom Typ  $(B_n)$  (Permutationsmatrizen mit Vorzeichen). Nach Satz 8.36 ist  $Z(G) = \langle -1_n \rangle$ . Wenn  $n$  ungerade ist, gilt  $G = Z(G) \times H$ , wobei  $H$  zur Coxetergruppe vom Typ  $(D_n)$  isomorph ist (Permutationsmatrizen mit einer geraden Anzahl an  $-1$ -Einträgen). Dennoch ist  $G$  irreduzibel. Für  $n = 3$  erhält man

$$G \cong C_2 \times (C_2^2 \rtimes S_3) \cong C_2 \times S_4.$$

Diese Gruppe permutiert die acht Eckpunkte des Würfels  $(\pm 1, \pm 1, \pm 1)$  und ist daher dessen Symmetriegruppe (und des Oktaeders mit Ecken  $(\pm 1, 0, 0)$ ,  $(0, \pm 1, 0)$ ,  $(0, 0, \pm 1)$ ). Für  $n \geq 4$  erhält man die Symmetriegruppe des  $n$ -dimensionalen Hyperwürfels. Die Coxetergruppe  $H \cong C_2^2 \rtimes S_3 \cong S_4$  vom Typ  $(D_3)$  permutiert die vier Eckpunkte  $(1, 1, 1)$ ,  $(1, -1, -1)$ ,  $(-1, 1, -1)$ ,  $(-1, -1, 1)$  des Tetraeders und ist daher dessen Symmetriegruppe. Bekanntlich ist  $S_4$  auch die Coxetergruppe vom Typ  $(A_3)$ .

- (ii) Man kann zeigen, dass die Coxetergruppe vom Typ  $(H_3)$  die Symmetriegruppe des Dodekaeders (bzw. des Ikosaeders) ist. Die Coxetergruppe vom Typ  $(F_4)$  ist eine Erweiterung der Gruppe vom Typ  $(D_4)$  mit  $S_3$ . Die Coxetergruppe vom Typ  $(E_7)$  ist eine Schur-Erweiterung der orthogonalen Gruppe  $GO^+(8, 2) \cong \Omega^+(8, 2).2$  mit Zentrum  $C_2$ .
- (iii) Eine (komplexe) *Lie-Algebra* ist ein endlich-dimensionaler  $\mathbb{C}$ -Vektorraum  $L$  mit einer alternierenden bilinearen Abbildung  $L \times L \rightarrow L$ ,  $(v, w) \mapsto [v, w]$ , die die *Jacobi-Identität*

$$[u, [v, w]] + [v, [w, u]] + [w, [u, v]] = 0$$

erfüllt. Zum Beispiel  $L = \mathbb{C}^{n \times n}$  mit  $[v, w] := vw - wv$ . Man nennt  $L$  *einfach*, falls  $[L, L] \neq 0$  und falls kein Unterraum  $0 < U < L$  mit  $[L, U] \subseteq U$  existiert. Die Klassifikation der einfachen Lie-Algebren führt auf die Diagramme  $A_n, B_n, C_n, D_n, E_6, E_7, E_8, F_4$  und  $G_2$ . Diese entsprechen mehr oder weniger den einfachen Gruppen vom Lie-Typ (zum Beispiel entspricht  $A_n$  der Familie  $\text{PSL}(n+1, q)$  und  $C_n$  der Familie  $\text{PSp}(2n, q)$ ).

- (iv) Man nennt  $\sigma \in \text{GL}(\mathbb{C}^d)$  eine *komplexe Spiegelung*, falls  $|\langle \sigma \rangle| < \infty$  und  $\dim \text{Ker}(\sigma - \text{id}) = d - 1$ . Eine *komplexe Spiegelungsgruppe* ist eine endliche Untergruppe  $G \leq \text{GL}(\mathbb{C}^d)$ , die von komplexen Spiegelungen erzeugt wird. Jede Spiegelungsgruppe ist offenbar auch eine komplexe Spiegelungsgruppe. Shephard und Todd haben die irreduziblen komplexen Spiegelungsgruppen vollständig klassifiziert. Abgesehen von 34 Ausnahmen hat jede solche Gruppe die Form

$$G(m, d, n) := \langle (x_1, \dots, x_n; \sigma) \in C_m \wr S_n : (x_1 \dots x_n)^{m/d} = 1 \rangle,$$

wobei  $n, m, d \in \mathbb{N}$  und  $d \mid m$ . Offenbar ist  $G(m, 1, 1) \cong C_m$ ,  $G(1, 1, n) \cong S_n$ ,  $G(2, 1, n) \cong C_2 \wr S_n$  (Typ  $(B_n)$ ),  $G(2, 2, n)$  Typ  $(D_n)$  und  $G(m, m, 2) \cong D_{2m}$  (Typ  $(I_2(m))$ ). Die 34 Ausnahme-Gruppen sind leider nur in der alten GAP-Version 3 verfügbar.<sup>18</sup>

**Definition 8.48.** Für  $a, b, c \in \mathbb{Z} \setminus \{0\}$  nennt man

$$D(a, b, c) := \langle x, y \mid x^a = y^b = (xy)^c = 1 \rangle$$

eine *von-Dyck-Gruppe*.

**Lemma 8.49.**  $D(a, b, c)$  hängt nicht von der Reihenfolge und der Vorzeichen von  $a, b, c$  ab.

*Beweis.* Die Unabhängigkeit vom Vorzeichen ist offensichtlich. Sei also  $a, b, c \geq 1$ . Wegen  $(xy)^c = 1 \iff (yx)^c = 1$  kann man  $a$  und  $b$  vertauschen. Sei nun  $x' := xy$  und  $y' := y^{-1}$ . Dann ist  $x^a = y^b = (xy)^c = 1$  äquivalent zu  $(x')^c = (y')^b = (x'y')^a = 1$ . Also kann man auch  $a$  und  $c$  vertauschen.  $\square$

**Satz 8.50.** Genau dann ist  $D(a, b, c)$  endlich, wenn  $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} > 1$ . Ggf. tritt einer der folgenden Fälle ein:

- (i)  $D(1, b, c) \cong C_{\text{ggT}(b, c)}$ .
- (ii)  $D(2, 2, c) \cong D_{2c}$ .
- (iii)  $D(2, 3, 3) \cong A_4$ .
- (iv)  $D(2, 3, 4) \cong S_4$ .
- (v)  $D(2, 3, 5) \cong A_5$ .

*Beweis.* Nach Lemma 8.49 können wir  $1 \leq a \leq b \leq c$  annehmen. Sei zunächst  $a = 1$ . Nach Euklid existieren  $\alpha, \beta \in \mathbb{Z}$  mit  $\text{ggT}(b, c) = \alpha b + \beta c$ . Also ist  $y^{\text{ggT}(b, c)} = (y^b)^\alpha + (y^c)^\beta = 1$  in  $D(1, b, c)$ . Es folgt  $|D(1, b, c)| \leq \text{ggT}(b, c)$ . Umgekehrt erfüllt auch  $C_{\text{ggT}(b, c)}$  die Relationen von  $D(1, b, c)$ . Also gilt (i).

Im Fall  $a = b = 2$  folgt die Behauptung aus Beispiel 1.17. Der Fall  $(a, b, c) = (2, 3, 3)$  wurde in Aufgabe 2 behandelt.

Sei  $(a, b, c) = (2, 3, 4)$  und  $G := \langle x, y \mid x^4 = y^2 = (xy)^3 = 1 \rangle \cong D(2, 3, 4)$  und  $H := \langle x \rangle \leq G$ . Wir betrachten die Nebenklassen

$$H, yH, xyH, x^2yH, x^3yH, yx^2yH.$$

Wegen  $xyx = yx^{-1}y$  und  $xyx^2y = yx^{-1}yxy = yx^2xyxy = yx^2yx^{-1}$  werden die Nebenklassen durch Linksmultiplikation von  $x$  permutiert. Wegen  $xyy = x^{-1}yx^{-1} = x^3yx^3$  permutiert auch  $y$  diese Nebenklassen und wir sehen, dass jedes Element in  $G$  in einer dieser Nebenklassen enthalten ist. Also ist  $|G| \leq |G : H| |H| \leq 24$ . Andererseits sieht man, dass  $x' := (1, 2, 3, 4)$  und  $y' := (1, 2)$  in  $S_4$  auch

<sup>18</sup><https://webusers.imj-prg.fr/~jean.michel/gap3/>

die Relationen von  $G$  erfüllen. Dies liefert (iv). Der Fall  $(a, b, c) = (2, 3, 5)$  wurde bereits mehrfach behandelt (Bemerkung 1.18, Beispiel 2.16). Man sieht leicht, dass in allen anderen Fällen  $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} \leq 1$  gilt.

Sei

$$H := \langle u, v, w \mid u^2 = v^2 = w^2 = (uv)^a = (vw)^b = (uw)^c = 1 \rangle$$

eine Coxetergruppe. Offenbar ist  $N := \langle uv, vw \rangle \leq H$  mit  $|H : N| = 2$ . Außerdem existiert ein Epimorphismus  $D(a, b, c) \rightarrow N$ . Es genügt also zu zeigen, dass  $H$  unendlich ist für  $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} \leq 1$ . Im Fall  $a \geq 3$  ist  $C(H)$  ein Kreis und  $|H| = \infty$  nach Satz 8.45. Sei also  $a = 2$  und  $\frac{1}{b} + \frac{1}{c} \leq \frac{1}{2}$ . Dann ist  $b, c \geq 3$  und  $H$  ist irreduzibel. Für  $b = 3$  ist  $c \geq 6$  und die Behauptung folgt in jedem Fall aus Satz 8.45.  $\square$

**Bemerkung 8.51.** Eine endliche Gruppe  $G \neq 1$  heißt *Hurwitz-Gruppe*, falls  $G = \langle x, y \rangle$  mit  $x^2 = y^3 = (xy)^7 = 1$  gilt. Dies sind also genau die endlichen nicht-trivialen Faktorgruppen der unendlichen von-Dyck-Gruppe  $D(2, 3, 7)$ . Nach Aufgabe 29 sind alle Hurwitz-Gruppen perfekt und tatsächlich sind viele einfache Gruppen, u. a.  $A_n$  für  $n \geq 168$ ,  $\mathrm{GL}(3, 2)$  und die sporadische *Monstergruppe* Hurwitz-Gruppen.

**Satz 8.52.** Für  $n \in \mathbb{N}$  gibt es unendlich viele Primzahlen  $p \equiv 1 \pmod{n}$ .<sup>19</sup>

*Beweis.* Seien  $p_1, \dots, p_s$  Primzahlen mit  $p_i \equiv 1 \pmod{n}$  für  $i = 1, \dots, s$  (der Fall  $s = 0$  ist zugelassen). Sei  $m := np_1 \dots p_s$ . Das Kreisteilungspolynom  $\Phi_m$  induziert als normiertes Polynom eine unbeschränkte Funktion  $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ . Daher existiert ein  $k \in \mathbb{N}$  mit  $\Phi_m(km) > 1$ . Sei  $p$  ein Primteiler von  $\Phi_m(km)$ . Wegen  $\Phi_m(km) \mid ((km)^m - 1)$  ist  $p \nmid m$  und die Ordnung  $r$  von  $mk + p\mathbb{Z} \in \mathbb{F}_p^\times$  teilt  $\mathrm{ggT}(m, p-1)$ . Nehmen wir  $r < m$  an und setzen  $a := (mk)^r \equiv 1 \pmod{p}$ . Dann gilt

$$\frac{m}{r} \equiv 1 + a + \dots + a^{\frac{m}{r}-1} = \frac{a^{\frac{m}{r}} - 1}{a - 1} = \frac{(mk)^n - 1}{(mk)^r - 1} = \prod_{\substack{d \mid m \\ d \nmid r}} \Phi_d(mk) \equiv 0 \pmod{p}$$

im Widerspruch zu  $p \nmid m$ . Also gilt  $r = m$  ist  $m \mid p-1$ , d. h.  $p \equiv 1 \pmod{m}$ . Wegen  $n \mid m$  gilt auch  $p \equiv 1 \pmod{n}$ . Andererseits ist  $m = np_1 \dots p_s$  und  $p \notin \{p_1, \dots, p_s\}$ . Wir haben also eine neue Primzahl in der Restklasse  $1 + n\mathbb{Z}$  gefunden.  $\square$

**Satz 8.53 (MILLER).** Für  $a, b, c \in \mathbb{N} \setminus \{1\}$  existiert eine endliche Gruppe  $G = \langle x, y \rangle$  mit  $|\langle x \rangle| = a$ ,  $|\langle y \rangle| = b$  und  $|\langle xy \rangle| = c$ .

*Beweis (HOLT).* Anstatt  $G$  als Quotienten einer von-Dyck-Gruppe zu konstruieren, geben wir einen unabhängigen Beweis. Satz 8.52 garantiert die Existenz einer Primzahl  $p \equiv 1 \pmod{2abc}$ . Seien  $\zeta_a, \zeta_b, \zeta_c \in \mathbb{F}_p^\times$  Elemente mit Ordnung  $2a, 2b$  bzw.  $2c$ . Sei  $\lambda \in \mathbb{F}_p$  zunächst beliebig. Dann haben

$$x := \begin{pmatrix} \zeta_a & 1 \\ 0 & \zeta_a^{-1} \end{pmatrix} \in \mathrm{SL}(2, p), \quad y := \begin{pmatrix} \zeta_b & 0 \\ \lambda & \zeta_b^{-1} \end{pmatrix} \in \mathrm{SL}(2, p)$$

die Eigenwerte  $\zeta_a \neq \zeta_a^{-1}$  bzw.  $\zeta_b \neq \zeta_b^{-1}$ . Insbesondere sind  $x, y$  diagonalisierbar und es folgt  $|\langle x \rangle| = 2a$  und  $|\langle y \rangle| = 2b$ . Wegen  $\mathrm{tr}(xy) = 2\zeta_a\zeta_b + \lambda$  kann man  $\lambda$  so wählen, dass  $\mathrm{tr}(xy) = \zeta_c + \zeta_c^{-1}$  gilt. Für die Eigenwerte  $e, f$  von  $xy$  (in einem Zerfällungskörper) gilt  $e + f = \mathrm{tr}(xy)$  und  $ef = \det(xy) = \det(x)\det(y) = 1$ . Dies zeigt  $\{e, f\} = \{\zeta_c, \zeta_c^{-1}\}$  und  $xy$  ist ebenfalls diagonalisierbar mit Ordnung  $2c$ . Da  $x^a, x^b$  und  $(xy)^c$  den doppelten Eigenwert  $-1$  haben, gilt  $x^a = y^b = (xy)^c = -1_2 \in Z := Z(\mathrm{SL}(2, p))$ . Mit  $\bar{x} := xZ$  und  $\bar{y} := yZ$  erfüllt  $G = \langle \bar{x}, \bar{y} \rangle \leq \mathrm{PSL}(2, p)$  die Behauptung.  $\square$

<sup>19</sup>Dies ist ein Spezialfall des DIRICHLETSchen Primzahlsatz: Die Primzahlen verteilen sich gleichmäßig auf die primen Restklassen modulo  $n$ , d. h. für  $\mathrm{ggT}(k, n) = 1$  beträgt der Anteil der Primzahlen in  $k + n\mathbb{Z}$  genau  $1/\varphi(n)$ .

## 9 Freie Produkte und Amalgame

**Beispiel 9.1.** Das direkte Produkt  $G \times H$  von zwei Gruppen  $G$  und  $H$  ist die größte Gruppe  $D$  mit folgenden Eigenschaften:

- $G, H \leq D$  und  $D = \langle G, H \rangle$ ,
- $xy = yx$  für alle  $x \in G$  und  $y \in H$ .

Wir konstruieren die größte Gruppe, die nur die erste Eigenschaft erfüllt.

**Definition 9.2.** Sei  $G_I := \{G_i : i \in I\}$  eine nichtleere Familie von Gruppen. Ein *freies Produkt* von  $G_I$  ist eine Gruppe  $G$  mit Homomorphismen  $\lambda_i : G_i \rightarrow G$  ( $i \in I$ ) mit folgender universeller Eigenschaft: Für jede Gruppe  $H$  und Homomorphismen  $\rho_i : G_i \rightarrow H$  existiert genau ein Homomorphismus  $\varphi : G \rightarrow H$  mit  $\rho_i = \varphi \lambda_i$  für alle  $i \in I$ .

**Lemma 9.3.**

- (i) Die Homomorphismen  $\lambda_i$  sind injektiv und  $G = \langle \lambda_i(G_i) : i \in I \rangle$ .
- (ii) Bis auf Isomorphie gibt es höchstens ein freies Produkt von  $G_I$ .

*Beweis.*

- (i) Sei  $H := G_i$ ,  $\rho_i := \text{id}_H$  und  $\rho_j := 1$  für  $j \neq i$ . Dann existiert ein  $\varphi : G \rightarrow H$  mit  $\text{id}_H = \rho_i = \varphi \lambda_i$ . Insbesondere ist  $\lambda_i$  injektiv. Sei nun  $H := \langle \lambda_i(G_i) : i \in I \rangle \leq G$  und  $\rho_i := \lambda_i : G_i \rightarrow H$ . Dann existiert genau ein  $\varphi : G \rightarrow H$  mit  $\lambda_i = \varphi \lambda_i$  für  $i \in I$ . Aus dem gleichen Grund existiert genau ein Homomorphismus  $\varphi' : G \rightarrow G$  mit  $\lambda_i = \varphi' \lambda_i$ . Offensichtlich muss  $\varphi' = \text{id}_G$  gelten. Interpretiert man  $\varphi$  als Abbildung  $G \rightarrow G$ , so gilt auch  $\varphi = \varphi'$ . Dies zeigt  $G = H$ .
- (ii) Sei  $H$  ebenfalls ein freies Produkt von  $G_I$  mit Homomorphismen  $\mu_i : G_i \rightarrow H$ . Dann existieren Homomorphismen  $\varphi : G \rightarrow H$  und  $\psi : H \rightarrow G$  mit  $\mu_i = \varphi \lambda_i$  und  $\lambda_i = \psi \mu_i$  für  $i \in I$ . Es folgt  $\psi \varphi \lambda_i = \psi \mu_i = \lambda_i$  und  $\varphi \psi \mu_i = \varphi \lambda_i = \mu_i$ . Nun sind, wie in (i),  $\text{id}_G$  und  $\text{id}_H$  die einzigen Homomorphismen mit  $\text{id}_G \lambda_i = \lambda_i$  und  $\text{id}_H \mu_i = \mu_i$ . Dies zeigt  $\varphi \psi = \text{id}_H$  und  $\psi \varphi = \text{id}_G$ . Insbesondere ist  $\varphi : G \rightarrow H$  ein Isomorphismus.  $\square$

**Bemerkung 9.4.** Nach Lemma 9.3 kann man von *dem* freien Produkt von  $G_I$  sprechen ohne die Homomorphismen  $\lambda_i$  zu erwähnen. Man schreibt  $G = \text{Fr}_{i \in I} G_i$  oder  $G_1 * \dots * G_n$  falls  $I = \{1, \dots, n\}$ .<sup>20</sup> Da die  $\lambda_i$  injektiv sind, kann man  $G_i \leq G$  annehmen (dies entspricht dem formalen Unterschied zwischen direktem Produkt und direkter Summe).

**Satz 9.5.** Für jede nichtleere Familie von Gruppen  $G_I$  existiert  $\text{Fr}_{i \in I} G_i$ .

*Beweis.* Wir modifizieren Definition 9.2. O. B. d. A. sei  $G_i \cap G_j = \emptyset$  für  $i \neq j$ . Sei  $W$  die Menge aller formalen Worte der Form  $w = g_1 \dots g_n$  mit  $n \in \mathbb{N}_0$  und  $g_1, \dots, g_n \in \bigcup_{i \in I} G_i$ . Man nennt  $w$  *reduziert*, falls  $g_1, \dots, g_n \neq 1$  und  $\{g_i, g_{i+1}\} \not\subseteq G_j$  für  $i = 1, \dots, n-1$  und alle  $j \in I$ . Offenbar lässt sich  $w$  stets reduzieren. Wörter  $v, w \in W$  heißen *äquivalent*, falls sie sich zu dem gleichen Wort reduzieren lassen. Sei  $G = \{[w] : w \in W\}$  die Menge der Äquivalenzklassen dieser Relation. Offenbar ist  $G$  eine Gruppe bzgl. Konkatenation. Wir definieren  $\lambda_i : G_i \rightarrow G$  durch  $\lambda_i(g) := [g]$  für  $g \in G_i$ . Sei nun  $H$  eine weitere Gruppe und  $\rho_i : G_i \rightarrow H$  Homomorphismen für  $i \in I$ . Offenbar ist die Abbildung  $\varphi : G \rightarrow H$

<sup>20</sup>Achtung: Verwechslungsgefahr mit dem Zentralprodukt.

mit  $[w] \mapsto \rho_1(g_1) \dots \rho_n(g_n)$  ein wohldefinierter Homomorphismus mit  $\rho_i = \varphi \lambda_i$  für  $i \in I$ . Da  $G$  nach Konstruktion durch die Elemente  $[g]$  mit  $g \in \bigcup G_i$  erzeugt wird, ist  $\varphi$  durch  $\rho_i$  eindeutig bestimmt.  $\square$

**Lemma 9.6.** *Jedes Element in  $\text{Fr}_{i \in I} G_i$  lässt sich eindeutig als reduziertes Wort schreiben.*

*Beweis.* Wir gehen wie in Lemma 1.7 vor. Sei  $R$  die Menge der reduzierten Worte  $r = g_1 \dots g_n$  mit  $g_1, \dots, g_n \in \bigcup G_i$ . Für  $g \in G_j$  sei

$$g_r := \begin{cases} r & \text{falls } g = 1, \\ gg_1 \dots g_n & \text{falls } g_1 \notin G_j, \\ g_2 \dots g_n & \text{falls } g = g_1^{-1}, \\ (gg_1)g_2 \dots g_n & \text{sonst.} \end{cases}$$

Man sieht leicht, dass dies eine Operation  $G_j \rightarrow \text{Sym}(R)$  beschreibt. Nach der universellen Eigenschaft lässt sich die Operation zu  $G \rightarrow \text{Sym}(R)$  fortsetzen. Für  $v, w \in R$  mit  $[v] = [w]$  gilt nun  $v = [v]_1 = [w]_1 = w$ .  $\square$

**Bemerkung 9.7.** Im Folgenden werden wir  $[w]$  durch  $w$  ersetzen. Jedes Element in  $\text{Fr } G_i$  lässt sich dann eindeutig in der reduzierten Form  $g_1 \dots g_n$  schreiben. Hat man umgekehrt  $H = \langle G_i : i \in I \rangle$ , sodass sich jedes Element in  $H$  eindeutig in reduzierter Form schreiben lässt, so folgt  $H \cong \text{Fr}_{i \in I} G_i$ , denn man kann die Inklusionen  $\sigma_i : G_i \hookrightarrow H$  zu einem Isomorphismus fortsetzen.

**Beispiel 9.8.**

- (a) Ein freies Produkt von freien Gruppen ist frei: Sei  $F_i = F_{X_i}$  mit  $X_i \cap X_j = \emptyset$  für  $i \neq j$ . Sei  $X := \bigcup_{i \in I} X_i$  und  $F := F_X$ . Seien  $\rho_i : F_i \rightarrow H$  Homomorphismen. Dann existiert genau ein Homomorphismus  $\varphi : F \rightarrow H$  mit  $\varphi(x) := \rho_i(x)$  für  $x \in X_i$ . Wegen  $F_i = \langle X_i \rangle$  ist  $\rho_i = \varphi|_{F_i}$ . Als Spezialfall erhält man  $F_n = \mathbb{Z} * \dots * \mathbb{Z}$ .
- (b) Sei  $G = \langle x \rangle * \langle y \rangle \cong C_2 * C_2$  und  $z := xy \in G$ . Wegen  $z^{-1} = yx$  lässt sich jedes Element in  $G$  eindeutig in der Form  $z^a x^b$  mit  $a \in \mathbb{Z}$  und  $b \in \{0, 1\}$  schreiben. Wegen  $xzx^{-1} = z^{-1}$  ist  $G = \langle z \rangle \rtimes \langle x \rangle \cong \mathbb{Z} \rtimes C_2 \cong D_\infty$ .

**Lemma 9.9.** *Es gilt  $\text{PSL}(2, \mathbb{Z}) \cong C_2 * C_3$ .*

*Beweis.* Seien  $A := \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$  und  $B := \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$  in  $\text{SL}(2, \mathbb{Z})$ . Wir zeigen zunächst  $\text{SL}(2, \mathbb{Z}) = \langle A, B \rangle$ . Sei indirekt  $C = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in \text{SL}(2, \mathbb{Z}) \setminus \langle A, B \rangle$  mit  $|a| + |c|$  minimal. Nehmen wir  $a \neq 0 \neq c$  an. Dann ist

$$\begin{aligned} (AB)^s C &= \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a+sc & b+sd \\ c & d \end{pmatrix} \notin \langle A, B \rangle, \\ (BA)^{-r} C &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ r & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ ra+c & rb+d \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Im Fall  $|a| \geq |c|$  kann man  $s$  so wählen, dass  $|a+sc| + |c| < |a| + |c|$  gilt. Anderenfalls kann man  $r$  so wählen, dass  $|a| + |ra+c| < |a| + |c|$  gilt. Widerspruch. Also ist  $a = 0$  oder  $c = 0$ . Im ersten Fall wäre

$$C = \begin{pmatrix} 0 & \pm 1 \\ \mp 1 & d \end{pmatrix} \in \{BA^2(AB)^{-d-1}, B(AB)^{d-1}\}$$



und im zweiten Fall wäre

$$C = \begin{pmatrix} \pm 1 & b \\ 0 & \mp 1 \end{pmatrix} \in \{(AB)^b, A^2(AB)^{-b}\}.$$

Dies zeigt  $\mathrm{SL}(2, \mathbb{Z}) = \langle A, B \rangle$ .

Wegen  $A^2 = -1 = B^3$  haben  $\bar{A}, \bar{B} \in \mathrm{PSL}(2, \mathbb{Z})$  Ordnung 2 bzw. 3 (beachte  $Z(\mathrm{SL}(2, \mathbb{Z})) = \langle -1_2 \rangle$ ). Sei  $G := \langle x \rangle * \langle y \rangle \cong C_2 * C_3$ . Dann existiert ein Epimorphismus  $\varphi : G \rightarrow \mathrm{PSL}(2, \mathbb{Z})$  mit  $\varphi(x) = \bar{A}$  und  $\varphi(y) = \bar{B}$ . Angenommen es existiert  $w \in \mathrm{Ker}(\varphi) \setminus \{1\}$ . Dann ist  $w$  ein alternierendes Produkt von  $x$  und  $y^{\pm 1}$ . Nach Konjugation können wir  $w = xy^{\epsilon_1} \dots xy^{\epsilon_n}$  mit  $\epsilon_1, \dots, \epsilon_n \in \{\pm 1\}$  annehmen. Die Matrizen  $AB$  und  $AB^{-1} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ -1 & -1 \end{pmatrix}$  haben nicht-negative bzw. nicht-positive Einträge. Die gleiche Eigenschaft müsste auch für

$$\overline{AB^{\epsilon_1} \dots AB^{\epsilon_{n-1}} AB^{-\epsilon_n}} = \varphi(wy^{\epsilon_n}) = \varphi(w)\varphi(y^{\epsilon_n}) = \overline{B^{\epsilon_n}}$$

gelten. Tatsächlich hat  $B^{\epsilon_n}$  aber sowohl positive als auch negative Einträge. Also ist  $\varphi$  ein Isomorphismus.  $\square$

**Lemma 9.10.** *Sei  $F := \mathrm{Fr}_{i \in I} G_i$  mit  $G_i \neq 1$  für alle  $i \in I$ . Dann gilt:*

- (i) *Jedes Element  $g \in F$  endlicher Ordnung liegt bis auf Konjugation in einem  $G_i$ .*
- (ii) *Für  $g \in G_i \setminus \{1\}$  gilt  $C_F(g) = C_{G_i}(g)$ .*
- (iii) *Für  $|I| \geq 2$  gilt  $|F| = \infty$  und  $Z(F) = 1$ .*

*Beweis.*

- (i) Sei  $g = g_1 \dots g_n \in F$  reduziert mit  $n \geq 2$ . Nach Konjugation können wir annehmen, dass  $g_1$  und  $g_n$  in unterschiedlichen Faktoren  $G_i$  liegen. Offenbar ist dann  $g^k \neq 1$  für alle  $k \geq 1$ .
- (ii) Sei  $x = x_1 \dots x_n \in C_F(g)$  reduziert und o. B. d. A.  $x_n \notin G_i$ . Dann wäre auch  $xgx^{-1}$  reduziert und  $xgx^{-1} \neq g$ .
- (iii) Für  $g \in G_i \setminus \{1\}$  und  $h \in G_j \setminus \{1\}$  mit  $i \neq j$  ist  $gh$  reduziert mit unendlicher Ordnung. Außerdem ist  $Z(F) \leq C_F(g) \cap C_F(h) \leq G_i \cap G_j = 1$  nach (ii).  $\square$

**Satz 9.11.** *Seien  $G = \mathrm{Fr}_{i \in I} G_i$  und  $H = \mathrm{Fr}_{i \in I} H_i$  freie Produkte über der gleichen Indexmenge  $I$ . Seien  $\sigma_i : G_i \rightarrow H_i$  Homomorphismen für  $i \in I$ . Dann gibt es genau einen Homomorphismus  $\varphi : G \rightarrow H$ , der alle  $\sigma_i$  fortsetzt. Außerdem ist  $\mathrm{Ker}(\varphi)$  der normale Abschluss von  $\bigcup_{i \in I} \mathrm{Ker}(\sigma_i)$  in  $G$ .*

*Beweis.* Die Existenz und Eindeutigkeit von  $\varphi$  folgt aus der universellen Eigenschaft. Sei  $N \trianglelefteq G$  der normale Abschluss von  $\bigcup_{i \in I} \mathrm{Ker}(\sigma_i)$  in  $G$ . Sicher ist  $N \subseteq \mathrm{Ker}(\varphi)$ . Nehmen wir  $\mathrm{Ker}(\varphi) \not\subseteq N$  an und wählen  $g = g_1 \dots g_n \in \mathrm{Ker}(\varphi) \setminus N$  reduziert mit minimalem  $n$  und  $g_k \in G_{i_k}$  für  $k = 1, \dots, n$ . Gilt  $\sigma_{i_k}(g_k) \neq 1$  für  $k = 1, \dots, n$ , so wäre  $1 = \varphi(g) = \sigma_{i_1}(g_1) \dots \sigma_{i_n}(g_n)$  reduziert in  $H$ . Dieser Widerspruch zeigt  $\sigma_{i_k}(g_k) = 1$  für ein  $1 \leq k \leq n$ . Dann wäre aber  $g_1 \dots g_{k-1} g_{k+1} \dots g_n \in \mathrm{Ker}(\varphi) \setminus N$  im Widerspruch zur Wahl von  $n$ .  $\square$

**Folgerung 9.12.** *Seien  $G_i = \langle X_i \mid R_i \rangle$  Präsentationen für  $i \in I$ . Dann ist*

$$\mathrm{Fr}_{i \in I} G_i \cong \langle \bigcup_{i \in I} X_i \mid \bigcup_{i \in I} R_i \rangle.$$

*Beweis.* Sei  $F_i := F_{X_i}$  und  $F$  die freie Gruppe bzgl.  $\bigcup_{i \in I} X_i$ . Nach Beispiel 9.8 ist  $F = \text{Fr}_{i \in I} F_i$ . Sei  $\sigma_i : F_i \rightarrow G_i$  der kanonische Epimorphismus. Nach Satz 9.11 existiert ein Epimorphismus  $\varphi : F \rightarrow \text{Fr}_{i \in I} G_i$  mit  $\text{Ker}(\varphi) = \langle \bigcup \text{Ker}(\sigma_i) \rangle^F = \langle \bigcup R_i^{F_i} \rangle^F = \langle \bigcup R_i \rangle^F$ . Dies zeigt die Behauptung.  $\square$

**Bemerkung 9.13.**

(i) KUROSCH hat gezeigt, dass jede Untergruppe  $H$  von  $F := \text{Fr}_{i \in I} G_i$  die Form

$$F_0 * \text{Fr}_{i \in I} \text{Fr}_{HxG_i \in H \backslash F/G_i} (H \cap xG_i x^{-1})$$

hat, wobei  $F_0$  frei ist (hierbei ist  $H \backslash F/G_i$  die Menge der *Doppelnebenklassen* bzgl.  $H$  und  $G_i$ ).

(ii) Aus direkten Produkten kann man Zentralprodukte machen, indem man zentrale Untergruppen heraufsteilt. Wir konstruieren eine nicht-kommutative Variante.

**Definition 9.14.** Sei  $G_I = \{G_i : i \in I\}$  eine Familie von Gruppen. Sei  $H$  eine Gruppe und  $\sigma_i : H \rightarrow G_i$  Monomorphismen für  $i \in I$ . Sei  $N$  der normale Abschluss von  $\{\sigma_i(h)^{-1} \sigma_j(h) : h \in H, i, j \in I\}$  in  $F := \text{Fr}_{i \in I} G_i$ . Man nennt  $F/N$  das *Amalgam von  $G_I$  bzgl.  $H$* .

**Bemerkung 9.15.** Wegen  $\sigma_i(h) \equiv \sigma_j(h) \pmod{N}$  gilt  $\sigma_i(H)N/N = \sigma_j(H)N/N \leq F/N$ . Man identifiziert also die isomorphen Kopien von  $H$  in  $G_i$ . Im Fall  $H = 1$  ist  $N = 1$  und man erhält das gewöhnliche freie Produkt. Im Gegensatz zum freien Produkt hängt  $F/N$  auch von der Wahl der Monomorphismen  $\sigma_i$  ab.

**Beispiel 9.16.** Wir hatten  $\text{PSL}(2, \mathbb{Z}) = \langle \overline{A}, \overline{B} \rangle \cong C_2 * C_3$  in Lemma 9.9 bewiesen. Man sieht leicht, dass  $\text{SL}(2, \mathbb{Z}) = \langle A, B \rangle$  ein Amalgam von  $\langle A \rangle = C_4$  und  $\langle B \rangle \cong C_6$  bzgl.  $\langle A^2 \rangle = \langle B^3 \rangle = \langle -1_2 \rangle = \text{Z}(\text{SL}(2, \mathbb{Z}))$  ist.

**Lemma 9.17.** In der Situation von Definition 9.14 sei  $R_i$  ein Repräsentantensystem für die Nebenklassen von  $\sigma_i(H)$  in  $G_i$  mit  $1 \in R_i$ . Dann lässt sich jedes Element in  $F/N$  eindeutig in der reduzierten Form  $r_1 \dots r_n h N$  mit  $n \in \mathbb{N}_0$ ,  $r_k \in R_{i_k} \setminus \{1\}$ ,  $i_k \neq i_{k+1}$  und  $h \in \sigma_{i_n}(H)$  schreiben.

*Beweis.* Sei  $g = g_1 \dots g_n N \in F/N$  mit  $g_k \in G_{i_k}$  beliebig. Dann existieren  $\overline{r_1} \in R_{i_1}$  und  $h_1 \in H$  mit  $g_1 = r_1 \sigma_{i_1}(h_1)$ . Wegen  $\sigma_{i_1}(h_1)N = \sigma_{i_2}(h_1)N$  existieren  $r_2 = \overline{\sigma_{i_2}(h_1)g_2} \in R_{i_2}$  und  $h_2 \in H$  mit  $g = r_1(\sigma_{i_2}(h_1)g_2)g_3 \dots g_n N = r_1 r_2 \sigma_{i_2}(h_2)g_3 \dots g_n N$  usw. Elemente  $r_i = 1$  kann man weglassen. Auf diese Weise lässt sich  $g$  auf die reduzierte Form bringen.

Sei nun  $R := \{r_1 \dots r_n \sigma_{i_n}(h) : r_i \in R_i, h \in H\} \subseteq F$  die Menge der reduzierten Wörter. Wir zeigen wie in Lemma 9.6, dass  $F$  auf  $R$  operiert. Es genügt zu zeigen, dass jedes  $G_j$  auf  $R$  operiert. Sei  $x = \overline{x} \sigma_j(h_1) \in G_j$  und  $r = r_1 \dots r_n \sigma_{i_n}(h) \in R$ . Wir nehmen zunächst  $j \neq i_1$  an und definieren

$${}^x r := \overline{x \sigma_{i_1}(h_1) r_1 \sigma_{i_2}(h_2) r_2 \dots \sigma_{i_n}(h_n) r_n \sigma_{i_n}(h_{n+1} h)} \in R$$

mit  $\sigma_{i_k}(h_k) r_k = \overline{\sigma_{i_k}(h_k) r_k \sigma_{i_k}(h_{k+1})}$  für  $k = 1, \dots, n$  (im Fall  $x \in \sigma_j(H)$  muss man  $\overline{x}$  entfernen). Für  $y \in G_j$  folgt

$${}^y ({}^x r) = \overline{y x \sigma_{i_1}(h'_1 h_1) r_1 \dots \sigma_{i_n}(h'_n h_n) r_n \sigma_{i_n}(h'_{n+1} h_{n+1} h)}$$

mit  $y x = \overline{y x} \sigma_j(h'_1)$  und  $\sigma_{i_k}(h'_k) \overline{\sigma_{i_k}(h_k) r_k} = \overline{\sigma_{i_k}(h'_k h_k) r_k \sigma_{i_k}(h'_{k+1})}$  für  $k = 1, \dots, n$ . Andererseits ist

$${}^{yx} r = \overline{y x \sigma_{i_1}(h''_1) r_1 \dots \sigma_{i_n}(h''_n) r_n \sigma_{i_n}(h''_{n+1} h)}$$

mit  $yx = \overline{yx}\sigma_j(h_1'')$  und  $\sigma_{i_k}(h_k'')r_k = \overline{\sigma_{i_k}(h_k'')r_k}\sigma_{i_k}(h_{k+1}'')$  für  $k = 1, \dots, n$ . Es folgt

$$\overline{yx}\sigma_j(h_1'') = yx = y\overline{x}\sigma_j(h_1) = \overline{yx}\sigma_j(h_1'h_1)$$

und  $h_1'' = h_1'h_1$ , da  $\sigma_j$  injektiv ist. Durch Induktion nach  $k$  ergibt sich

$$\begin{aligned} \overline{\sigma_{i_k}(h_k'')r_k}\sigma_{i_k}(h_{k+1}'') &= \sigma_{i_k}(h_k'')r_k = \sigma_{i_k}(h_k'h_k)r_k = \sigma_{i_k}(h_k')\overline{\sigma_{i_k}(h_k)r_k}\sigma_{i_k}(h_{k+1}) \\ &= \overline{\sigma_{i_k}(h_k'h_k)r_k}\sigma_{i_k}(h_{k+1}'') = \overline{\sigma_{i_k}(h_k'')r_k}\sigma_{i_k}(h_{k+1}''), \end{aligned}$$

d. h.  $h_{k+1}' = h_{k+1}''$ . Der Fall  $j = i_1$  funktioniert analog. Damit ist  $y(xr) = y^x r$  bewiesen und  $F$  operiert auf  $R$  mit  ${}^x[r] \equiv [xr] \pmod{N}$ . Für  $h \in H$  hat  $\sigma_i(h)$  die gleiche Wirkung auf  $R$  wie  $\sigma_j(h)$  für  $i, j \in I$ . Also operiert  $N$  trivial und  $F/N$  operiert auf  $R$ . Für  $v, w \in R$  mit  $[v]N = [w]N$  gilt nun  $v = [v]N1 = [w]N1 = w$ .  $\square$

**Lemma 9.18.** *Sei  $G = F/N$  ein Amalgam von  $G_I$  bzgl.  $H$  und  $\sigma_i : H \rightarrow G_i$ . Dann existieren Untergruppen  $H \cong \overline{H} \leq G$  und  $G_i \cong \overline{G}_i \leq G$  mit  $G = \langle \overline{G}_i : i \in I \rangle$  und  $\overline{H} = \overline{G}_i \cap \langle \overline{G}_j : j \neq i \rangle$  für alle  $i \in I$ .*

*Beweis.* Sei  $\overline{G}_i := G_i N/N$  und  $\overline{H} := \sigma_i(H)N/N \leq G$  (hängt nicht von  $i$  ab). Aus Lemma 9.17 folgt  $\overline{G}_i \cong G_i/G_i \cap N \cong G_i$ . Wegen  $\overline{H} \leq \overline{G}_i$  ist auch  $\overline{H} \cong H$ . Aus  $F = \langle G_i : i \in I \rangle$  folgt  $G = \langle \overline{G}_i : i \in I \rangle$ . Schließlich folgt auch  $\overline{H} = \overline{G}_i \cap \langle \overline{G}_j : j \neq i \rangle$  aus Lemma 9.17.  $\square$

**Bemerkung 9.19.** Wir werden im Folgenden die Gruppen  $G_i$  und  $H$  als Untergruppen von  $G = F/N$  auffassen. Sei  $R_i$  ein Repräsentantensystem für  $G_i/H$  mit  $1 \in R_i$  für  $i \in I$ . Jedes Element in  $G$  lässt sich dann eindeutig in der reduzierten Form  $r_1 \dots r_n h$  mit  $r_k \in R_{i_k} \setminus \{1\}$  und  $h \in H$  schreiben.

**Lemma 9.20.** *Sei  $G$  ein Amalgam von  $G_I$  bzgl.  $H$ . Dann gilt*

- (i) *Jedes Element endlicher Ordnung von  $G$  liegt bis auf Konjugation in einem  $G_i$ .*
- (ii) *Existieren verschiedene  $i, j \in I$  mit  $G_i \neq H \neq G_j$ , so ist  $|G| = \infty$ .*

*Beweis.*

- (i) Sei  $g = r_1 \dots r_n h$  in reduzierter Form mit endlicher Ordnung. Nach Konjugation können wir  $i_1 \neq i_n$  annehmen (Achtung: es werden möglicherweise alle  $r_i$  verändert). Dann sind die Elemente  $g, g^2, \dots$  aber alle verschieden. Dieser Widerspruch zeigt  $n \leq 1$  und  $g \in G_{i_1}$ .
- (ii) Für  $g_1 \in G_i \setminus H$  und  $g_2 \in G_j \setminus H$  hat  $g_1 g_2$  unendliche Ordnung.  $\square$

**Satz 9.21.** *Jede endliche Gruppe  $G$  ist eine Untergruppe einer endlichen Gruppe  $\hat{G}$  mit folgender Eigenschaft: Sind  $H, K \leq G$  isomorphe Untergruppe und  $\varphi : H \rightarrow K$  ein Isomorphismus, so existiert ein  $x \in \hat{G}$  mit  $\varphi(h) = xhx^{-1}$  für alle  $h \in H$ . Insbesondere sind  $H$  und  $K$  in  $\hat{G}$  konjugiert.*

*Beweis.* Wir setzen  $\hat{G} := \text{Sym}(G)$  und betten  $G$  mittels der regulären Darstellung  $\sigma : G \rightarrow \hat{G}$ ,  $x \mapsto \sigma_x$  mit  $\sigma_x(y) = xy$  ein. Sei  $\hat{\varphi} \in \hat{G}$  eine beliebige bijektive Fortsetzung von  $\varphi$ . Für  $h \in H$  und  $k \in K$  gilt nun

$$(\hat{\varphi}\sigma_h\hat{\varphi}^{-1})(k) = \varphi(h\varphi^{-1}(k)) = \varphi(h)k = \sigma_{\varphi(h)}(k)$$

und  $\hat{\varphi}\sigma_h\hat{\varphi}^{-1} = \sigma_{\varphi(h)}$ .  $\square$

**Bemerkung 9.22.** Der Beweis von Satz 9.21 funktioniert nicht mehr für unendliche Gruppen. Beispielsweise lässt sich der kanonische Isomorphismus  $\varphi : \mathbb{Z} \rightarrow 2\mathbb{Z}$  nicht zu einer Bijektion  $\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}$  fortsetzen.

**Satz 9.23** (HIGMAN-NEUMANN-NEUMANN). *Sei  $G$  eine Gruppe,  $H, K \leq G$  und  $\varphi : H \rightarrow K$  ein Isomorphismus. Dann ist  $G$  eine Untergruppe einer Gruppe  $\hat{G}$ , sodass ein  $x \in \hat{G}$  mit  $\varphi(h) = xhx^{-1}$  für alle  $h \in H$  existiert. Insbesondere sind  $H$  und  $K$  in  $\hat{G}$  konjugiert.*

*Beweis.* Sei  $\langle a_i \rangle \cong \mathbb{Z}$  und  $G_i := G * \langle a_i \rangle$  für  $i = 1, 2$ . Nach der universellen Eigenschaft existieren Homomorphismen  $\sigma_1 : G * H \rightarrow G_1$  und  $\sigma_2 : G * H \rightarrow G_2$  mit  $(\sigma_i)|_G = \text{id}$  und  $\sigma_1(h) := a_1 h a_1^{-1}$  sowie  $\sigma_2(h) := a_2 \varphi(h) a_2^{-1}$  für  $h \in H$ . Nach Lemma 9.6 sind  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  injektiv. Sei  $\hat{G}$  das Amalgam von  $G_1$  und  $G_2$  bzgl.  $G * H$ . Nach Lemma 9.18 kann man  $G$  mit  $\sigma_1(G) = \sigma_2(G)$  in  $\hat{G}$  identifizieren. Für  $h \in H$  gilt  $a_1 h a_1^{-1} = \sigma_1(h) = \sigma_2(h) = a_2 \varphi(h) a_2^{-1}$  und die Behauptung folgt mit  $x := a_2^{-1} a_1 \in \hat{G}$ .  $\square$

**Bemerkung 9.24.** In der Situation von Satz 9.23 nennt man  $\langle G, x \rangle \leq \hat{G}$  eine HNN-Erweiterung von  $G$  bzgl.  $\varphi : H \rightarrow K$ . Ist  $G$  torsionsfrei, so auch jede HNN-Erweiterung nach Lemma 9.20.

**Satz 9.25.** *Jede abzählbare Gruppe ist eine Untergruppe einer Gruppe mit zwei Erzeugern.*

*Beweis.* Sei  $G = \{1 = g_0, g_1, \dots\}$  eine abzählbare Gruppe. Ist  $G$  endlich, so folgt die Behauptung aus  $G \leq \text{Sym}(G)$ . Sei also  $|G| = \infty$ . Sei  $F_2 = \langle x, y \rangle$ ,  $X := \{y^k x y^{-k} : k \geq 0\}$  und

$$Y := \{x^k y x^{-k} g_k : k \geq 0\} \subseteq G * F_2.$$

Aus Lemma 9.6 folgt leicht:  $\langle X \rangle \cong F_X \cong F_Y \cong \langle Y \rangle$ . Sei  $\varphi : \langle X \rangle \rightarrow \langle Y \rangle$ ,  $y^k x y^{-k} \mapsto x^k y x^{-k} g_k$  für  $k \geq 0$ . Sei  $\hat{G} := \langle G * F_2, s \rangle$  eine HNN-Erweiterung von  $G * F_2$  bzgl.  $\varphi$ . Dann gilt  $s y^k x y^{-k} s^{-1} = x^k y x^{-k} g_k$  für  $k \geq 0$ . Insbesondere ist  $y = s x s^{-1} \in \langle x, s \rangle$  und  $g_k = (x^k y x^{-k})^{-1} s y^k x y^{-k} s^{-1} \in \langle x, s \rangle$  für  $k \geq 1$ . Dies zeigt  $G \leq \hat{G} = \langle x, s \rangle$ .  $\square$

**Satz 9.26.** *Es existiert eine unendliche Gruppe mit genau zwei Konjugationsklassen.*

*Beweis.* Sei zunächst  $G = G_1 = \{1 = g_0, g_1, g_2, \dots\}$  eine beliebige abzählbare torsionsfreie Gruppe (zum Beispiel  $G = \mathbb{Z}$ ). Induktiv existiert eine torsionsfreie abzählbare HNN-Erweiterung  $G_{n+1}$  von  $G_n$ , sodass  $g_1$  und  $g_{n+1}$  in  $G_{n+1}$  konjugiert sind. In der torsionsfreien abzählbaren Gruppe  $G^* := \bigcup_{n \in \mathbb{N}} G_n$  sind dann alle  $g_i$  konjugiert. Wir setzen nun  $H_1 := G$  und  $H_{n+1} := H_n^*$  für  $n \geq 1$ . Sei schließlich  $H := \bigcup_{n \geq 1} H_n$ . Für  $x, y \in H \setminus \{1\}$  existiert ein  $n \geq 1$  mit  $x, y \in H_n$ . Nach Konstruktion sind  $x$  und  $y$  in  $H_{n+1} \leq H$  konjugiert. Also besitzt  $H$  nur zwei Konjugationsklassen.  $\square$

**Bemerkung 9.27.** Sei  $G$  eine Torsionsgruppe mit Klassenzahl 2. Dann hat jedes nicht-triviale Element in  $G$  die gleiche Ordnung  $p$ . Sicher ist  $p$  eine Primzahl. Im Fall  $p > 2$  kann  $x \in G \setminus \{1\}$  nicht zu  $x^{-1}$  konjugiert sein. Also ist  $p = 2$  und  $G$  ist abelsch. Es folgt  $G \cong C_2$ .

## 10 Das Burnside-Problem

**Bemerkung 10.1.** BURNSIDE fragte 1902:

- (I) Ist jede endlich erzeugte Torsionsgruppe endlich?
- (II) Ist jede endlich erzeugte periodische Gruppe endlich?<sup>21</sup>

<sup>21</sup>Erinnerung: Periodisch bedeutet, dass die Ordnung aller Elemente global beschränkt ist (also  $\exp(G) < \infty$ ).

(III) Gibt es für  $d, e \in \mathbb{N}$  höchstens endlich viele endliche Gruppen mit  $d$  Erzeugern und Exponenten  $e$ ?

Die erste Frage wurde 1964 von GOLOD negativ beantwortet. NOVIKOV und ADJAN beantworteten 1968 auch (II) negativ. ZELMANOV hingegen bewies 1989, dass (III) richtig ist (er bekam dafür die Fieldsmedaille).<sup>22</sup>

**Satz 10.2** (GOLOD). *Für jede Primzahl  $p > 2$  existiert eine unendliche  $p$ -Gruppe mit zwei Erzeugern.*

*Beweis* (GUPTA).

**Schritt 1:** Konstruktion von  $G$ .

Sei  $\langle a \rangle \cong \langle t \rangle \cong C_p$  und  $H = \langle a \rangle * \langle t \rangle$ . Sei  $a_i := t^i a t^{-i}$  und

$$A := \langle a \rangle^H = \langle a_0, a_1, \dots, a_{p-1} \rangle.$$

Da sich jedes Element aus  $A$  eindeutig in der Form  $a_{i_1}^{n_1} \dots a_{i_s}^{n_s}$  mit  $1 \leq n_1, \dots, n_s < p$  und  $i_k \neq i_{k+1}$  schreiben lässt, ist  $A \cong \langle a_0 \rangle * \dots * \langle a_{p-1} \rangle$  (Bemerkung 9.7). Außerdem gilt  $H = A \rtimes \langle t \rangle$ . Für  $0 \leq k < p$  sei  $\theta_k : A \rightarrow H$  der Homomorphismus mit  $\theta_k(a_k) := a$  und  $\theta_k(a_i) := t^{i-k}$  für  $i \neq k$ . Setze  $N_0 = 1$  und

$$N_{k+1} := \{x \in A : \forall i : \theta_i(x) \in N_k\}.$$

Offenbar ist  $1 = N_0 \leq N_1 \leq \dots$ . Wir zeigen  $N_k \trianglelefteq H$ . Dies ist klar für  $k = 0$ . Sei induktiv  $N_k \trianglelefteq H$ . Dann ist zunächst  $N_{k+1} \trianglelefteq A$ . Sei  $w = w(a_0, \dots, a_{p-1}) \in N_{k+1}$ . Wegen  $\theta_i(a_j) = \theta_{i-1}(a_{j-1})$  ist

$$\theta_i(twt^{-1}) = \theta_i(w(a_1, \dots, a_{p-1}, a_0)) = \theta_{i-1}(w(a_0, \dots, a_{p-1})) \in N_k$$

und  $twt^{-1} \in N_{k+1}$ . Dies zeigt  $N_{k+1} \trianglelefteq H$ . Also ist auch  $N := \bigcup_{k \geq 0} N_k \trianglelefteq H$ . Sei schließlich

$$G := H/N.$$

**Schritt 2:**  $G$  ist eine endlich erzeugte  $p$ -Gruppe.

Sicher ist  $G = \langle aN, tN \rangle$ . Für  $h = wt^i \in H$  mit  $w = a_{j_1}^{w_1} \dots a_{j_k}^{w_k} \in A$  reduziert und  $0 \leq i < p$  sei

$$l(h) := \begin{cases} 1 + k & \text{falls } i \neq 0, \\ k & \text{falls } i = 0. \end{cases}$$

Wir zeigen  $h^{p^{l(h)}} \in N_{l(h)}$  für alle  $h \in H$ . Dann ist  $G$  eine  $p$ -Gruppe. Für  $l(h) \leq 1$  ist  $h \in \langle t \rangle \cup \langle a_0 \rangle \cup \dots \cup \langle a_{p-1} \rangle$  und  $h^p = 1 \in N_0$ . Sei  $l(h) = n + 1$  und die Behauptung für  $n$  bereits bewiesen. Nehmen wir zunächst  $i \neq 0$  an. Dann ist  $l(w) = n$  und

$$h^p = (wt^i)^p = wt^i wt^{-i} t^{2i} wt^{-2i} \dots t^{(p-1)i} wt^{-(p-1)i}.$$

Für  $w = w(a_0, \dots, a_{p-1})$  gilt  $t^{ji} wt^{-ji} = w(a_{ji}, a_{ji+1}, \dots, a_{ji+p-1})$ , wobei die Indizes modulo  $p$  zu lesen sind. Sei  $d_k$  die Anzahl der Potenzen von  $a_k$  in  $w$ . Die Anzahl der Potenzen von  $a_k$  in  $h^p$  ist dann höchstens

$$\sum_{j=0}^{p-1} d_{k-ji} = \sum_{j=0}^{p-1} d_j \leq n$$

<sup>22</sup>Der Beweis benutzt Schreiers Vermutung und basiert damit auf der CFSG.

wegen  $p \nmid i$ . Die Anzahl der Potenzen von  $a$  in  $\theta_k(h^p)$  ist also ebenfalls  $\leq n$ . Wir zählen wie viele  $t$  in  $\theta_k(h^p)$  auftreten. Für  $r \neq k$  sei  $s_r$  die Summe der Exponenten aller  $a_r$  in  $w$ . Der Beitrag dieser Potenzen in der Exponentensumme von  $t$  in  $\theta_k(h^p)$  ist dann

$$\sum_{j=0}^{p-1} s_r(r + ij - k) \equiv s_r \left( p(r - k) + i \binom{p}{2} \right) \equiv 0 \pmod{p},$$

da  $p > 2$  (man beachte, dass für  $ij + r = k$  nichts gezählt wird). Wegen  $A \trianglelefteq H$  lassen sich alle  $t$  in  $\theta_k(h^p)$  nach rechts schieben, ohne dass sich die Exponentensumme ändert. Dies zeigt  $\theta_k(h^p) \in A$ . Durch das Verschieben der  $t$  werden einige der  $a$  in  $a_j$  umgewandelt. Deren Anzahl ist aber nach wie vor  $\leq n$ , d. h.  $l(\theta_k(h^p)) \leq n$ . Nach Induktion ist  $\theta_k(h^{p^{n+1}}) = \theta_k(h^p)^{p^n} \in N_n$  für alle  $k$ , d. h.  $h^{p^{n+1}} \in N_{n+1}$ .

Sei nun  $i = 0$ , also  $h = w \in A$ . Nach Konjugation können wir annehmen, dass  $w$  nicht mit dem gleichen  $a_j$  beginnt und endet. Gilt bereits  $l(\theta_k(w)) \leq n$  für alle  $k$ , so ist  $\theta_k(w^{p^n}) \in N_n$  nach Induktion und es folgt  $w^{p^n} \in N_{n+1}$  sowie  $w^{p^{n+1}} \in N_{n+1}$ . Nehmen wir also  $l(\theta_k(w)) = n + 1$  für ein  $k$  an (man beachte, dass die Länge nicht größer werden kann). Enthält  $w$  zwei Potenzen von  $a_j$  mit  $j \neq k$ , so werden diese unter  $\theta_k$  in Potenzen von  $t$  überführt. Nachdem man alle  $t$  in  $\theta_k(w)$  nach rechts schiebt, erhält man den Widerspruch  $l(\theta_k(w)) \leq n$ . Also kann  $w$  höchstens eine Potenz von jedem  $a_j$  mit  $j \neq k$  enthalten. Andererseits beginnt und endet  $w$  mit verschiedenen  $a_j$ . Dies zeigt  $n = 2$  und nach Konjugation hat  $w$  die Form  $w = a_k^r a_j^s$  mit  $j \neq k$ . Es folgt  $\theta_k(w) = a^r t^{j-k}$ . Wie im Fall  $i \neq 0$  ergibt sich  $\theta_m(\theta_k(w)^p) \in A$  mit  $l(\theta_m(\theta_k(w)^p)) \leq 1$  für  $m = 0, \dots, p-1$  (an dieser Stelle hatten wir noch keine Induktion benutzt). Also ist  $\theta_m(\theta_k(w^{p^2})) = 1$  und  $\theta_k(w^{p^2}) \in N_1$ . Vertauscht man die Rollen von  $k$  und  $j$ , so erhält man  $\theta_j(w^{p^2}) \in N_1$ . Für  $m \notin \{k, j\}$  ist sogar  $\theta_m(w^p) = 1$ . Also ist  $w^{p^2} \in N_2$  wie behauptet.

**Schritt 3:**  $|G| = \infty$ .

Angenommen  $G$  ist endlich. Nach Reidemeister-Schreier ist dann  $N$  endlich erzeugt. Insbesondere ist  $N = N_n$  für ein  $n \in \mathbb{N}$ . Wir definieren  $v_0 := [a_1, a] \in A$  und  $v_{k+1} = [v_k, a] \in A$  für  $k \geq 0$ . Dann gilt  $\theta_0(v_0) = [t, a] = a_1 a^{-1}$  und  $\theta_0(v_1) = [a_1 a^{-1}, a] = v_0$ . Induktiv folgt  $\theta_0(v_{k+1}) = v_k$  für  $k \geq 0$ . Nach Lemma 9.10 haben alle  $v_i$  unendliche Ordnung, denn ihre reduzierte Form beginnt mit  $a_1$  und endet mit  $a^{-1}$ . Sei  $r \geq 0$  mit  $v_0^r \in N_2$ . Dann ist  $\theta_0(v_0^r) = (a_1 a^{-1})^r \in N_1$  und man erhält  $(ta^{-1})^r = \theta_0(a_1 a^{-1})^r = 1$ . Dies zeigt  $p \mid r$ . Es folgt

$$1 = ((ta^{-1})^p)^{r/p} = ((at^{-1})^p)^{-r/p} = (a_0 a_{p-1} \dots a_1)^{-r/p}$$

und  $r = 0$ . Wir haben damit  $\langle v_0 \rangle \cap N_2 = 1$  bewiesen. Sei nun induktiv  $\langle v_{k-1} \rangle \cap N_{k+1} = 1$  und  $v_k^r \in N_{k+2}$ . Dann ist  $v_{k-1}^r = \theta_0(v_k)^r \in N_{k+1}$  und  $r = 0$ . Somit gilt  $\langle v_k \rangle \cap N_{k+2} = 1$  für alle  $k \geq 0$ . Andererseits ist  $v_n^{p^{l(v_n)}} \in N = N_n = N_{n+2}$  nach Schritt 2. Widerspruch.  $\square$

**Definition 10.3.** Für  $d, e \in \mathbb{N}$  sei  $B(d, e) := F_d / \langle g^e : g \in F_d \rangle$  die *Burnside-Gruppe* mit  $d$  Erzeugern und Exponent  $e$ . Das Burnside-Problem (II) ist äquivalent zu  $|B(d, e)| < \infty$  für alle  $d, e \in \mathbb{N}$ .

**Satz 10.4.** Für  $d, e \in \mathbb{N}$  gilt

- (i)  $B(1, e) \cong C_e$ .
- (ii)  $B(d, 2) \cong C_2^d$ .
- (iii)  $|B(d, 3)| \leq 3^{3^{d-1}}$ .

*Beweis.*

- (i) Trivial.

- (ii) Jede Gruppe vom Exponent 2 ist abelsch. Nach Burnside's Basissatz ist  $C_2^d$  die größte elementarabelsche Gruppe mit  $d$  Erzeugern.
- (iii) Induktion nach  $d$ : Der Fall  $d = 1$  folgt aus (i). Sei  $d \geq 2$  und  $G := B(d, 3) = \langle x_1, \dots, x_d \rangle$ . Nach Induktion hat  $H := \langle x_1, \dots, x_{d-1} \rangle$  Ordnung  $\leq 3^{3^{d-2}}$ . Jedes  $g \in G$  hat die Form  $g = h_1 x_d^{\epsilon_1} h_2 \dots x_d^{\epsilon_n} h_{n+1} \dots$  mit  $\epsilon_i \in \{\pm 1\}$  und  $h_i \in H$ . Wegen  $\exp(G) = 3$  gilt

$$x^{\pm 1} y x^{\pm 1} = y^{-1} x^{\mp 1} y^{-1} \quad x^{\pm 1} y x^{\mp 1} = y^{-1} x^{\mp 1} y^{-1} x^{\pm 1}$$

für alle  $x, y \in G$ . Also gilt  $g = h_1 x_d h_2 x_d^{-1} h_3$  mit  $h_1, h_2, h_3 \in H$ . Es folgt  $|G| \leq |H|^3 \leq 3^{3^{d-1}}$ .  $\square$

**Definition 10.5** (Wiederholung GT). Für  $x_1, \dots, x_n \in G$  sei  $[x_1, x_2] := x_1 x_2 x_1^{-1} x_2^{-1}$  und

$$[x_1, \dots, x_n] := [x_1, [x_2, \dots, x_n]]$$

für  $n \geq 3$ . Wir setzen  $G^{[1]} := G$  und  $G^{[k]} := [G, G^{[k-1]}]$  für  $k \geq 2$ .

**Lemma 10.6.** Für  $G = \langle X \rangle$  und  $k \geq 1$  gilt  $G^{[k]} = \langle [x_1, \dots, x_k] : x_1, \dots, x_k \in X \rangle G^{[k+1]}$ .

*Beweis.* Die Behauptung gilt für  $k = 1$ , wenn man  $[x] = x$  interpretiert. Sei nun die Behauptung für ein  $k \geq 1$  bereits bewiesen. Sei  $N := \langle [x_1, \dots, x_{k+1}] : x_1, \dots, x_{k+1} \in X \rangle G^{[k+2]} \leq G^{[k+1]}$ . Für  $g \in G$  und  $x_1, \dots, x_{k+1} \in X$  gilt

$$g[x_1, \dots, x_{k+1}]g^{-1} = [g, x_1, \dots, x_{k+1}][x_1, \dots, x_{k+1}] \leq G^{[k+2]}N = N.$$

Daraus folgt  $N \trianglelefteq G$ . Modulo  $N$  ist jeder der Erzeuger  $x \in X$  von  $G$  mit den Erzeugern  $[x_1, \dots, x_k]$  und  $g \in G^{[k+1]}$  von  $G^{[k]}$  vertauschbar. Dies zeigt  $G^{[k+1]} = [G, G^{[k]}] \leq N$ .  $\square$

**Lemma 10.7** (LEVI). Sei  $G$  eine Gruppe vom Exponenten 3. Dann gilt

- (i)  $[x, x, y] = 1$  für  $x, y \in G$ .
- (ii)  $[x, y, z] = [y, z, x] = [x, z, y]^{-1}$  für  $x, y, z \in G$ .
- (iii)  $G$  ist nilpotent mit Klasse höchstens 3.

*Beweis.*

(i) Folgt aus

$$x \cdot yxy^{-1} = (xy)^2 y^{-2} = (xy)^{-1} y = y^{-1} x^{-1} y = y^2 (y^{-1} x)^{-1} = y^2 (y^{-1} x)^2 = yxy^{-1} \cdot x.$$

(ii) Aus (i) folgt, dass je zwei Konjugierte von  $x$  vertauschbar sind. Also ist  $\langle x \rangle^G$  abelsch. Es folgt

$${}^x[y, z][x, z] = [xy, z] = {}^{xy}[xy, z] = {}^{xy}(\underbrace{[y, z][x, z]}_{\in \langle y \rangle^G}) = {}^x({}^x[y, z] \cdot {}^y[x, z]) = {}^{x^{-1}}[y, z] \cdot {}^y[x, z].$$

Konjugation mit  $x^{-1}$  liefert

$${}^x[y, z] \cdot {}^y[x, z] = \underbrace{[y, z]}_{\in \langle z \rangle^G} \underbrace{[x, z]}_{\in \langle z \rangle^G} = [x, z][y, z].$$

Nun ist

$$[x, y, z] = {}^x[y, z][z, y] = {}^y[z, x][x, z][y, z][z, y] = {}^y[z, x][x, z] = [y, z, x].$$

Wegen

$$[x, y^{-1}] = [x, yy] = [x, y] \cdot {}^y[x, y] = [x, y]^2 = [x, y]^{-1}$$

$$\text{ist } [x, y, z]^{-1} = [x, [y, z]^{-1}] = [x, z, y].$$

(iii) Aus (ii) folgt  $[x, y, z, w] = [x, [y, z, w]] = [x, z, w, y]$  und

$$[x, y, z, w] = [x, y, [z, w]] = [x, [z, w], y]^{-1} = [y, x, [z, w]]^{-1} = [y, x, z, w]^{-1}.$$

Für  $\pi \in \langle (1, 2), (2, 3, 4) \rangle = S_4$  und  $x_1, \dots, x_4 \in G$  gilt also

$$[x_{\pi(1)}, x_{\pi(2)}, x_{\pi(3)}, x_{\pi(4)}] = [x_1, x_2, x_3, x_4]^{\text{sgn}(\pi)}.$$

Andererseits ist

$$\begin{aligned} [x, y, z, w] &= [x, y, [z, w]] = [[z, w], x, y] = [[z, w], [x, y]] = [[x, y], [z, w]]^{-1} \\ &= [[x, y], z, w]^{-1} = [z, w, [x, y]]^{-1} \stackrel{\pi=(1,3)(2,4)}{=} [x, y, z, w]^{-1}. \end{aligned}$$

Dies zeigt  $[x, y, z, w] = 1$  für alle  $x, y, z, w \in G$  und die Behauptung folgt.  $\square$

### Bemerkung 10.8.

- (i) Bekanntlich ist jede Gruppe vom Exponenten 2 abelsch, also nilpotent der Klasse höchstens 1. Für  $p$ -Gruppen mit Exponent  $p \geq 5$  gibt es hingegen keine absolute Schranke mehr für die Nilpotenzklasse (sofern die Gruppe nilpotent ist).
- (ii) Für  $p > 10^{75}$  bewies OLSCHANSKI die Existenz unendlicher  $p$ -Gruppen, sodass jede nicht-triviale echte Untergruppe Ordnung  $p$  hat. Man nennt diese Gruppen *Tarski-Monster* (wie das sporadische Monster sind sie einfache Gruppen).
- (iii) Der nächste Satz verbessert Satz 10.4.

**Satz 10.9** (LEVI, VAN DER WAERDEN). Für  $d \geq 1$  gilt  $|B(d, 3)| = 3^{d(d^2+5)/6}$ .

*Beweis.* Sei  $G := B(d, 3) = \langle x_1, \dots, x_d \rangle$ . Nach von-Dyck existiert ein Epimorphismus  $G \rightarrow C_3^d$ . Da  $G/G'$  von  $d$  Elementen erzeugt wird, folgt  $G/G' \cong C_3^d$ . Nach Lemma 10.6 wird die elementarabelsche Gruppe  $G'/G^{[3]}$  von den Elementen  $[x_i, x_j]G^{[3]}$  mit  $i < j$  erzeugt. Dies zeigt  $|G'/G^{[3]}| \leq 3^{\binom{d}{2}}$ . Nach Lemma 10.7 ist auch  $G^{[3]}$  elementarabelsch mit  $[x, y, z] = [y, z, x]$  sowie  $[x, y, z] = [x, z, y]^{-1}$ . Nach Lemma 10.6 wird  $G^{[3]}$  daher von den Elementen  $[x_i, x_j, x_k]$  mit  $i < j < k$  erzeugt. Somit ist  $|G^{[3]}| \leq 3^{\binom{d}{3}}$  und  $|G| \leq 3^k$  mit  $k = d + \binom{d}{2} + \binom{d}{3} = d(d^2 + 5)/6$ .

Jedes Element in  $G$  hat die Form

$$x_1^{a_1} \dots x_d^{a_d} [x_1, x_2]^{b_{12}} \dots [x_{d-1}, x_d]^{b_{d-1,d}} [x_1, x_2, x_3]^{c_{123}} \dots [x_{d-2}, x_{d-1}, x_d]^{c_{d-2,d-1,d}}$$

mit  $a_i, b_{ij}, c_{ijk} \in \{0, 1, 2\}$ . Nehmen wir an, dass ein Element  $g$  zwei verschiedene Faktorisierungen dieser Art besitzt. Diese Faktorisierungen müssen in  $G/G'$  gleich sein, denn  $|G/G'| = 3^d$ . Wir können also  $g \in G'$  annehmen. Wegen  $G'' \subseteq G^{[4]} = 1$  (GT-Satz 3.12) ist  $G'$  abelsch. Durch Umstellen erhält man eine nicht-triviale Relation der Form

$$[x_1, x_2]^{b_{12}} \dots [x_{d-1}, x_d]^{b_{d-1,d}} [x_1, x_2, x_3]^{c_{123}} \dots [x_{d-2}, x_{d-1}, x_d]^{c_{d-2,d-1,d}} = 1.$$



Seien  $i, j, k \in \{0, 1, 2\}$  mit  $b_{ij} \neq 0$  oder  $c_{i,j,k} \neq 0$ . Indem wir alle anderen  $x_l = 1$  setzen, erhalten wir eine nicht-triviale Relation in  $B(3, 3)$ . Wenn wir  $|B(3, 3)| = 3^{3(3^2+5)/6} = 3^7$  zeigen können, hätten wir den gewünschten Widerspruch. In GAP lässt sich  $B(3, 3) \cong \text{SmallGroup}(3^7, 4487)$  zeigen.<sup>23</sup> Wir geben dennoch ein theoretisches Argument.

Sei  $A := \langle a, b, c, d \rangle \cong C_3^4$  und  $x \in \text{Aut}(A)$  mit  $x(a) = ad$  und  $[x, b] = [x, c] = [x, d] = 1$ . Offenbar ist  $x^3(a) = ad^3 = a$  und  $x^3 = 1$ . In  $B := A \rtimes \langle x \rangle$  gilt

$$(a^{\pm 1}x)^3 = a^{\pm 1}xa^{\pm 1}x^{-1}x^2a^{\pm 1}x^{-2} = a^{\pm 3}d^{\pm 3} = 1.$$

Also ist  $\exp(B) = 3$ . Sei  $y \in \text{Aut}(B)$  mit  $y(b) = bd^{-1}$ ,  $y(x) = cx$  und  $[y, a] = [y, c] = [y, d] = 1$ . Da die Bilder von  $y$  die gleichen Relationen wie  $a, b, c, d, x$  erfüllen, ist  $y$  tatsächlich ein Automorphismus. Wegen  $y^3(b) = bd^{-3} = b$  und  $y^3(x) = c^3x = x$  hat  $y$  Ordnung 3. In  $C := B \rtimes \langle y \rangle$  gilt

$$(b^i x^j y)^3 = b^i x^j \cdot b^i d^{-i} c^j x^j \cdot b^i d^i c^{-j} x^j = 1.$$

Also ist  $\exp(C) = 3$ . Sei schließlich  $z \in \text{Aut}(C)$  mit  $y' := z(y) = a^{-1}y$ ,  $x' := z(x) = b^{-1}x$ ,  $c' := z(c) = cd^{-1}$  und  $[z, a] = [z, b] = [z, d] = 1$ . Wegen

$$y'(x') = a^{-1}yb^{-1}xy^{-1}a = a^{-1}b^{-1}dyxy^{-1}a = a^{-1}b^{-1}dcxa = a^{-1}b^{-1}dcadx = c'x'$$

ist  $z$  tatsächlich ein Automorphismus. Wie zuvor hat  $z$  Ordnung 3. In  $G := C \rtimes \langle z \rangle$  gilt

$$\begin{aligned} (a^{i_a} b^{i_b} c^{i_c} d^{i_d} x^j y^k z)^3 &= a^{i_a-k} b^{i_b-j} c^{i_c+jk} d^{i_d-i_c-i_bk+i_{aj}} \cdot x^{2j} y^{2k} z^2 a^{i_a} b^{i_b} c^{i_c} d^{i_d} x^j y^k z \\ &= a^{i_a} b^{i_b} c^{i_c} d^{i_d} \cdot a^{i_a-k} b^{i_b-j} c^{i_c+jk} d^{i_d-i_c-i_bk+i_{aj}} \cdot a^{i_a+k} b^{i_b+j} c^{i_c-jk} d^{i_d+i_c+i_bk-i_{aj}} = 1, \end{aligned}$$

d. h.  $\exp(G) = 3$ . Wegen ist  $G = \langle x, y, z \rangle$  und  $|G| = 3^7$  ist  $G \cong B(3, 3)$ .  $\square$

**Satz 10.10** (SANOV). *Für  $d \geq 1$  gilt  $|B(d, 4)| < \infty$ .*

*Beweis.* Sei  $G := B(d, 4)$ . O.B.d.A. sei  $d \geq 2$ . Nach Induktion ist  $H := \langle x_1, \dots, x_{d-1} \rangle$  endlich. Sei  $y := x_d^2$ . Wir zeigen zunächst, dass  $K := \langle y, H \rangle$  endlich ist. Die Behauptung folgt dann mit dem gleichen Argument für  $K$  und  $x_d$  anstelle von  $H$  und  $y$ . Jedes  $g \in K$  hat die Form  $g = h_1 y h_2 \dots y h_n$  mit  $h_1, \dots, h_n \in H$ . Sei dabei  $n$  so klein wie möglich. Nehmen wir  $n \geq 2|H| + 3$  an. Dann gibt es unter den Elementen  $h_2 h_3^{-1}$ ,  $h_2 h_4 (h_3 h_5)^{-1}$ ,  $h_2 h_4 (h_3 h_5 h_7)^{-1}$ , ... zwei gleiche, sagen wir

$$h_2 h_4 \dots h_{2r} (h_3 h_5 \dots h_{2r+1})^{-1} = h_2 \dots h_{2s} (h_3 \dots h_{2s+1})^{-1}$$

mit  $r < s \leq (n-1)/2$ . Also ist

$$h_{2r+2} h_{2r+4} \dots h_{2s} (h_{2r+3} h_{2r+5} \dots h_{2s+1})^{-1} = 1.$$

Wegen  $\exp(G) = 4$  und  $y^2 = 1$  ist

$$y h y = h^{-1} y^{-1} h^{-1} y^{-1} h^{-1} = h^{-1} y h^{-1} y h^{-1}$$

für  $h \in H$ . Wir wenden dieser Regel auf  $h = h_{2s+1}$  in  $g$  an:

$$g = h_1 y h_2 \dots h_{2s} h_{2s+1}^{-1} y h'_{2s+1} y \dots y h_n.$$

Durch erneute Anwendung mit  $h = h_{2s} h_{2s+1}^{-1}$  wird  $h_{2s-1}$  durch  $h_{2s-1} (h_{2s} h_{2s+1}^{-1})^{-1} = h_{2s-1} h_{2s+1} h_{2s}^{-1}$  ersetzt. Danach wird  $h_{2s-2}$  durch  $h_{2s-2} h_{2s} (h_{2s-1} h_{2s+1})^{-1}$  ersetzt usw. Schließlich wird  $h_{2r+2}$  durch 1 ersetzt. Dies widerspricht der Minimalität von  $n$ . Folglich ist  $n \leq 2|H| + 2$  und man erhält  $|K| < \infty$ .  $\square$

<sup>23</sup>Zum Beispiel mit `OneGroup(3^7, RankPGroup, 3, Exponent, 3);`

**Beispiel 10.11.** Sei  $F := F_2$  und  $N := \langle x^2 : x \in F \rangle$ . Dann ist  $|F/N| = 4$  und Schreiers Formel zeigt  $N \cong F_5$ . Daher hat  $M := \langle x^2 : x \in N \rangle$  Index 32 in  $N$ . Da  $N$  charakteristisch in  $G$  ist, gilt  $M \trianglelefteq G$ . Nun hat  $G = F/M$  Ordnung  $2^7$ , Exponent 4 und zwei Erzeugern. Dies zeigt  $|B(2, 4)| \geq 2^7$ . Das gleiche Argument liefert  $|B(2, 8)| \geq 2^{7+2^7+1} = 2^{136}$  und  $|B(3, 4)| \geq 2^{3+17} = 2^{20}$ .

**Bemerkung 10.12.** Es gilt  $|B(2, 4)| = 2^{12}$ ,  $|B(3, 4)| = 2^{69}$ ,  $|B(4, 4)| = 2^{422}$  und  $|B(5, 4)| = 2^{2728}$ . Hall bewies

$$|B(d, 6)| = 2^{1+3^a(d-1)3^{b+\binom{b}{2}+\binom{b}{3}}}$$

mit  $a = d + \binom{d}{2} + \binom{d}{3}$  und  $b = 1 + 2^d(d-1)$ . Man weiß  $|B(d, e)| = \infty$  für alle  $d \geq 2$  und  $e \geq 8000$  (und alle ungeraden  $e \geq 557$ ).<sup>24,25</sup>

**Definition 10.13.**

- Sei  $M$  der Durchschnitt aller Normalteiler von  $B(d, e)$  mit endlichem Index und  $B_0(d, e) := B(d, e)/M$ . Das Burnside-Problem (III) ist äquivalent zu  $|B_0(d, e)| < \infty$  für alle  $d, e \in \mathbb{N}$ .
- Sei  $G$  eine endliche Gruppe und  $p$  eine Primzahl. Wir definieren  $N_0 := 1$  und

$$N_{2k-1}/N_{2k-2} := O_{p'}(G/N_{2k-2}), \quad N_{2k}/N_{2k-1} := O_p(G/N_{2k-1})$$

für  $k \geq 1$ . Existiert ein  $k \geq 0$  mit  $N_k = G$ , so nennt man  $G$  *p-auflösbar*. Ggf. nennt man die kleinste Zahl  $l := l_p(G) \geq 0$  mit  $N_{2l+1} = G$  die *p-Länge* von  $G$ .

**Bemerkung 10.14.**

- Ist  $G$  *p-auflösbar*, kann man die Normalreihe  $N_0 < \dots < N_k$  zu einer Hauptreihe und einer Kompositionsreihe verfeinern. Daher sind alle Haupt- und Kompositionsfaktoren *p*-Gruppen oder *p'*-Gruppen. Insbesondere ist jeder minimale Normalteiler von  $G$  eine *p*-Gruppe oder eine *p'*-Gruppe.
- Offenbar ist jede auflösbare Gruppe *p-auflösbar* für jede Primzahl *p*.

**Lemma 10.15** (HALL-HIGMAN). *Sei  $G$  eine *p*-auflösbare Gruppe mit  $O_{p'}(G) = 1$ . Dann ist*

$$C_G(O_p(G)) \leq O_p(G).$$

*Beweis.* O.B.d.A.  $N := O_p(G)$ . Dann ist  $C_G(N)N/N \trianglelefteq G/N$ . Im Fall  $C_G(N) \not\leq N$  existiert ein minimaler Normalteiler  $M/N \trianglelefteq G/N$  mit  $M \leq C_G(N)N$ . Wegen  $O_p(G/N) = 1$  ist  $M/N$  eine *p'*-Gruppe (Bemerkung 10.14). Nach Schur-Zassenhaus ist  $M = N \rtimes H$ . Da  $C_G(N)N/C_G(N) \cong N/Z(N)$  eine *p*-Gruppe ist, gilt  $H \leq C_G(N)$  und  $M = N \times H$ . Dann wäre aber  $H \leq O_{p'}(M) \leq O_{p'}(G) = 1$ .  $\square$

**Satz 10.16.** *Sei  $G$  *p*-auflösbar und  $c_p$  die Nilpotenzklasse einer *p*-Sylowgruppe von  $G$ . Dann gilt  $l_p(G) \leq c_p$ .*

<sup>24</sup>Siehe <https://arxiv.org/abs/2303.15997v5>

<sup>25</sup>Magnus kommentierte die erste Arbeit dieser Art als "This paper is possibly the most difficult paper to read that has ever been written on mathematics."

*Beweis.* Induktion nach  $c$ : Im Fall  $c = 0$  ist  $G = O_{p'}(G)$  und  $l_p(G) = 0$ . Sei nun  $c > 0$  und  $P \in \text{Syl}_p(G)$ . O. B. d. A. sei  $O_{p'}(G) = 1$  und  $N := O_p(G) > 1$ . Nach Hall-Higman ist  $Z(P) \leq C_G(P) \leq C_G(N) \leq N$ . Die  $p$ -Sylowgruppe

$$PN/N \cong P/P \cap N \cong (P/Z(P))/((N \cap P)/Z(P))$$

von  $G/N$  hat also Nilpotenzklasse  $\leq c - 1$ . Nach Induktion ist  $l_p(G) = l_p(G/N) + 1 \leq c$ .  $\square$

**Satz 10.17.** Für  $d \geq 1$  gilt  $|B_0(d, 6)| \leq |B_0(d, 12)| < \infty$ .

*Beweis.* Da  $B_0(d, 6)$  eine Faktorgruppe von  $B_0(d, 12)$  ist, genügt es  $|B_0(d, 12)| < \infty$  zu zeigen. Sei  $G$  eine endliche Gruppe mit  $d$  Erzeugern und Exponent 12. Nach Burnside's  $p^a q^b$ -Satz ist  $G$  auflösbar. Eine 3-Sylowgruppe  $P$  von  $G$  hat Exponent  $\leq 3$  und Nilpotenzklasse  $\leq 3$  nach Lemma 10.7. Nach Satz 10.16 ist  $l_3(G) \leq 3$ . Sei also  $1 = N_0 \leq \dots \leq N_7 = G$  wie in Definition 10.13. Dann ist  $G/N_6$  eine 2-Gruppe mit  $d$  Erzeugern und Exponent  $\leq 4$ . Nach Satz 10.10 ist  $|G/N_6|$  durch eine Funktion in  $d$  beschränkt. Nach Reidemeister-Schreier ist die Anzahl der Erzeuger von  $N_6$  durch eine Funktion in  $d$  beschränkt. Außerdem hat  $N_6/N_5$  Exponent  $\leq 3$ . Nach Satz 10.9 ist auch  $|N_6/N_5|$  durch eine Funktion in  $d$  beschränkt. Führt man auf diese Weise fort, so erhält man eine obere Schranke für  $|G|$ .  $\square$

**Bemerkung 10.18.** Hall und Higman zeigten, dass man die  $p$ -Länge von  $G$  durch eine Funktion in dem Exponenten einer  $p$ -Sylowgruppe von  $G$  abschätzen kann. Mit Hilfe der CFSG kann man die Frage  $|B_0(d, n)| < \infty$  nun auf den Fall zurückführen, in dem  $n = p^k$  eine Primzahlpotenz ist. Zelmanov bewies schließlich  $|B_0(d, p^k)| < \infty$ .

**Definition 10.19.** Sei  $G = \langle x_1, \dots, x_n \rangle$ . Wir definieren rekursiv eine Menge von *Basiskommutatoren*  $c_1, c_2, \dots$  wie folgt:

- Für  $i = 1, \dots, n$  seien  $c_i := x_i$  die Basiskommutatoren mit *Gewicht*  $\omega(c_i) := 1$ .
- Die Basiskommutatoren  $c_1, \dots, c_k$  seien bereits definiert. Für  $1 \leq i < j \leq k$  ist  $c := [c_i, c_j]$  ein Basiskommutator, falls entweder  $\omega(c_j) = 1$  oder  $c_j = [c_k, c_l]$  mit  $i \geq k$  gilt. Ggf. sei  $\omega(c) := \omega(c_i) + \omega(c_j)$ .
- Die Basiskommutatoren werden aufsteigend nach Gewicht nummeriert, wobei die Reihenfolge der Kommutatoren mit dem gleichen Gewicht keine Rolle spielt.

Für  $k \in \mathbb{N}$  sei  $\delta_n(k)$  die (endliche) Anzahl der Basiskommutatoren mit Gewicht  $k$ .

**Beispiel 10.20.** Offenbar gilt  $\delta_n(1) = n$  und  $\delta_n(2) = \binom{n}{2}$ . Für  $n = 3$  und  $(x_1, x_2, x_3) = (x, y, z)$  sind

$$x, y, z, [x, y], [x, z], [y, z], [x, x, y], [x, x, z], [y, x, y], [y, x, z], [y, y, z], [z, x, y], [z, x, z], [z, y, z]$$

die Basiskommutatoren mit Gewicht  $\leq 3$ . Es gilt also  $\delta_3(3) = 8$ .

**Satz 10.21.** Sei  $G = \langle x_1, \dots, x_n \rangle$  und  $k \in \mathbb{N}$ . Dann wird  $G^{[k]}/G^{[k+1]}$  von den Nebenklassen der Basiskommutatoren mit Gewicht  $k$  erzeugt.

*Beweis.* Für  $k = 1$  ist die Behauptung klar denn  $G^{[1]} = G$ . Sei die Aussage bereits für  $k - 1$  bewiesen. Nach Definition wird  $G^{[k]}$  von den Kommutatoren  $[g, h]$  mit  $g \in G$  und  $h \in G^{[k-1]}$  erzeugt. Wegen  $G^{[k]}/G^{[k+1]} \leq Z(G/G^{[k+1]})$  gilt

$$\begin{aligned} [xy, h] &= {}^x[y, h][x, h] \equiv [x, h][y, h] \pmod{G^{[k+1]}}, \\ [x^{-1}, h] &= [x^{-1}, h][xx^{-1}, h]^{-1} \equiv [x^{-1}, h]([x, h][x^{-1}, j])^{-1} \equiv [x, h]^{-1} \pmod{G^{[k+1]}} \end{aligned}$$

für alle  $x, y \in G$ . Wir können daher  $g = x_i = c_i$  mit  $1 \leq i \leq n$  annehmen. Nach Induktion existieren Basiskommutatoren  $c_{j_1}, \dots, c_{j_l}$  mit Gewicht  $k-1$  und  $h' \in G^{[k]}$  mit  $h = c_{j_1} \dots c_{j_l} h'$ . Es gilt nun analog

$$[g, h] \equiv [g, c_{j_1}] \dots [g, c_{j_l}][g, h'] \equiv [g, c_{j_1}] \dots [g, c_{j_l}] \pmod{G^{[k+1]}}.$$

Wir können somit  $h = c_j$  annehmen. Im Fall  $k = 2$  ist  $[c_i, c_j]$  oder  $[c_j, c_i] = [c_i, c_j]^{-1}$  ein Basiskommutator. Sei also  $k \geq 3$  und  $c_j = [c_s, c_t]$  mit  $s < t$ . Im Fall  $i \geq s$  ist  $[c_i, c_j]$  wieder ein Basiskommutator. Sei daher  $i < s < t$ . Die Hall-Witt-Identität (GT-Lemma 3.6) vereinfacht sich zu

$$1 = c_s[c_i, c_s^{-1}, c_t] \cdot c_t[c_s, c_t^{-1}, c_i] \cdot c_i[c_t, c_i^{-1}, c_s] \equiv [c_i, c_s^{-1}, c_t][c_s, c_t^{-1}, c_i][c_t, c_i^{-1}, c_s] \pmod{G^{[k+1]}}.$$

Es existiert ein  $z \in G^{[k]}$  mit  $[c_s^{-1}, c_t] = [c_s, c_t]^{-1}z$  und

$$[c_i, c_s^{-1}, c_t] \equiv [c_i, [c_s, c_t]^{-1}] \equiv [c_i, c_j]^{-1} \pmod{G^{[k+1]}}.$$

Wegen  $[G^{[a]}, G^{[b]}] \leq G^{[a+b]}$  (GT-Lemma 3.11) erhält man analog

$$[c_s, c_t^{-1}, c_i] \equiv [c_s, [c_t, c_i]^{-1}] \equiv [c_s, c_i, c_t] \pmod{G^{[k+1]}}$$

und  $[c_t, c_i^{-1}, c_s] \equiv [c_t, c_i, c_s]^{-1} \pmod{G^{[k+1]}}$ . Insgesamt ist

$$[c_i, c_j] \equiv [c_s, c_i, c_t][c_t, c_i, c_s]^{-1} \pmod{G^{[k+1]}}.$$

Sei  $c_u := [c_i, c_t]$  und  $c_v := [c_i, c_s]$ . Wegen  $\omega(c_u) = \omega(c_t) + 1$  ist  $s < t < u$ . Daher ist  $[c_s, c_i, c_t] = [c_s, c_u]$  ein Basiskommutator. Im Fall  $t < v$  ist auch  $[c_t, c_i, c_s] = [c_t, c_v]$  ein Basiskommutator. Im Fall  $t = v$  ist  $[c_t, c_v] = 1$ . Es bleibt also der Fall  $t > v$ . Sei  $c_t = [c_w, c_y]$ . Da  $c_j = [c_s, c_t]$  ein Basiskommutator ist, gilt  $s \geq w$ . Wegen  $\omega(c_v) = \omega(c_s) + 1$  ist  $v > s \geq w$ . Dies zeigt, dass  $[c_t, c_v]^{-1} = [c_v, c_t]$  ein Basiskommutator ist.  $\square$

**Lemma 10.22.** *Seien  $c_1, c_2, \dots$  die Basiskommutatoren von  $G = \langle x_1, \dots, x_n \rangle$ . Für alle  $k \geq 1$  gibt es genau  $n^k$  Folgen  $(a_1, a_2, \dots) \in \mathbb{N}_0^\infty$  mit  $a_1 \geq a_2 \geq \dots$  und  $\sum_{a_i \geq 1} \omega(c_{a_i}) = k$ .*

*Beweis.* Für  $s \in \mathbb{N}$  sei  $F_s$  die Menge aller Folgen  $(a_1, a_2, \dots) \in \mathbb{N}_0^\infty$ , sodass gilt:

- (i) Es existiert ein  $l \in \mathbb{N}_0$  mit  $a_1, \dots, a_{l-1} \geq s$ ,  $a_l > s$ ,  $s \geq a_{l+1} \geq a_{l+2} \geq \dots$
- (ii) Gilt  $c_{a_m} = [c_i, c_j]$  für ein  $m \leq l$ , so ist  $i < s$ .
- (iii)  $\sum_{a_i \geq 1} \omega(c_{a_i}) = k$ .

Wenn  $s$  groß genug ist, so gilt  $\omega(c_s) > k$ . Ggf. ist  $l = 0$  in (i) und (ii) liefert keine Einschränkungen. Daher besteht  $F_s$  genau aus den Folgen, die wir zählen wollen. Für  $s = 1$  gilt  $\omega(c_{a_i}) = 1$  für alle  $i \in \mathbb{N}$ . Nach (iii) ist dann  $a_k > 0 = a_{k+1} = a_{k+2} = \dots$ . Ansonsten gibt es keine weiteren Einschränkungen an die Folge. Wegen  $a_i \in \{1, \dots, n\}$  folgt  $|F_1| = n^k$ .

Für ein gegebenes  $s \geq 1$  genügt es eine Bijektion  $\varphi: F_s \rightarrow F_{s+1}$  zu konstruieren. Sei  $a := (a_i) \in F_s$  und  $l$  wie in (i). Wir durchlaufen die Folge von rechts nach links beginnend bei  $a_l$ . Treffen wir dabei auf ein Paar  $(a_i, a_{i+1}) = (s, t)$  mit  $t > s$ , so ist  $c_j := [c_s, c_t]$  nach (ii) ein Basiskommutator. Wir ersetzen ggf.  $(a_i, a_{i+1})$  durch  $j$ . Dadurch verändert sich (iii) nicht. Anschließend betrachten wir das Paar  $(a_{i-1}, j)$  und iterieren. Die so konstruierte Folge bezeichnen wir mit  $\varphi(a)$ . Nach Konstruktion gilt  $\varphi(a)_i \geq s+1$  für  $i = 1, \dots, l$ . Im Fall  $\varphi(a)_1 = \dots = \varphi(a)_l = s+1$ , gilt (i) mit  $l = 0$  bzgl.  $s+1$ . Anderenfalls gilt (i) mit  $l := \max\{i : a_i > s+1\}$ . Nach Konstruktion erfüllt  $\varphi(a)$  auch (ii). Daher gilt  $\varphi(a) \in F_{s+1}$ .

Sei nun umgekehrt  $(b_i)_i \in F_{s+1}$  mit  $l$  wie in (i) gegeben. Wir durchlaufen  $b$  von links nach rechts beginnend bei  $b_1$ . Gilt  $c_{b_i} = [c_s, c_t]$  für ein  $i \leq l$ , so ersetzen wir  $b_i$  durch das Paar  $(s, t)$ . Anschließend

betrachten wir  $t$  bzw.  $c_t$ . Dieser Prozess muss wegen  $\sum_{b_j \geq 1} \omega(c_{b_j}) = k$  nach endlich vielen Schritten enden. Das Endergebnis bezeichnen wir mit  $\psi(b)$ . Offenbar gilt  $\psi(b) \in F_s$  und die Abbildungen  $\varphi$  und  $\psi$  sind zueinander inverse Bijektionen.  $\square$

**Lemma 10.23.** Für  $k \in \mathbb{N}$  gilt

$$\sum_{d|k} \delta_n(d) d = n^k.$$

*Beweis.* Sei  $S_k$  die Menge der Folgen  $(a_1, a_2, \dots) \in \mathbb{N}_0^\infty$  aus Lemma 10.22. Kommt ein Basiskommutator  $c_j$  genau  $t$ -mal in  $(a_i)_i \in S_k$  vor, so trägt er  $t\omega(c_j)$  zur Summe  $\sum_{a_i \geq 1} \omega(c_{a_i}) = k$  bei. Sei  $K_w$  die Menge der Basiskommutatoren mit Gewicht  $w$ . Aus Lemma 10.22 erhält man eine Identität von formalen Potenzreihen:

$$\begin{aligned} \prod_{w=1}^{\infty} (1 - X^w)^{-\delta_n(w)} &= \prod_{w=1}^{\infty} (1 + X^w + X^{2w} + \dots)^{\delta_n(w)} = \prod_{w=1}^{\infty} \prod_{c \in K_w} (1 + X^{\omega(c)} + X^{2\omega(c)} + \dots) \\ &= \prod_{i=1}^{\infty} (1 + X^{\omega(c_i)} + X^{2\omega(c_i)} + \dots) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{(a_i) \in S_k} X^k = \sum_{k=0}^{\infty} n^k X^k = (1 - nX)^{-1}. \end{aligned}$$

Wir wenden auf beiden Seiten den formalen Logarithmus  $\log(1 - X) := -\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} X^k$  an:<sup>26</sup>

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{n^k}{k} X^k = -\log(1 - nX) = -\sum_{w=1}^{\infty} \delta_n(w) \log(1 - X^w) = \sum_{w=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\delta_n(w)}{k} X^{wk} = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{d|k} \frac{d\delta_n(d)}{k} X^k.$$

Ein Koeffizientenvergleich zeigt die Behauptung.  $\square$

**Satz 10.24** (WITTS Formel). Sei  $G = \langle x_1, \dots, x_n \rangle$  und  $k \in \mathbb{N}$ . Dann wird  $G^{[k]}/G^{[k+1]}$  von

$$\delta_n(k) = \frac{1}{k} \sum_{d|k} \mu(d) n^{k/d}$$

Elementen erzeugt. Dabei ist  $\mu$  die Möbius-Funktion aus der Zahlentheorie.

*Beweis.* Nach Satz 10.21 wird  $G^{[k]}/G^{[k+1]}$  von den  $\delta_n(d)$  Basiskommutatoren mit Gewicht  $k$  erzeugt. Die Formel für  $\delta_n(d)$  folgt durch Möbius-Inversion aus Lemma 10.23.  $\square$

**Bemerkung 10.25.** Wir zeigen als Nächstes, dass die Abschätzung für die Anzahl der Erzeuger von  $G^{[k]}/G^{[k+1]}$  in Satz 10.24 für die freie Gruppe optimal ist.

**Definition 10.26.**

- Sei  $M := \langle X_1, \dots, X_n \rangle$  das Monoid aller Monome  $X_{i_1} \dots X_{i_k}$  mit  $k \geq 0$  und  $1 \leq i_1, \dots, i_k \leq n$  in den nicht-vertauschbaren Variablen  $X_1, \dots, X_n$  bzgl. Konkatenation (also die freie Gruppe ohne Inverse).

<sup>26</sup>Siehe Kombinatorik-Skript

- Sei  $R$  ein kommutativer Ring und  $A := RM$  der freie  $R$ -Modul mit Basis  $M$ . Indem man die Konkatenation distributiv fortsetzt, wird  $A$  zu einem Ring. Zum Beispiel gilt

$$(1 + X_2X_1^2)(X_1 + X_3X_2) = X_1 + X_2X_1^3 + X_3X_2 + X_2X_1^2X_3X_2.$$

Man nennt  $A$  die *freie Algebra* über  $X_1, \dots, X_n$ .

- Sei  $\deg(X_{i_1} \dots X_{i_k}) := k$  der *Grad* eines Monoms. Sei  $A_k$  der von den Monomen vom Grad  $k$  erzeugte freie  $R$ -Untermodule von  $A$ , d. h.  $A_k$  besteht aus allen *homogenen Polynomen* vom Grad  $k$ . Offenbar ist  $\text{rk}(A_k) = n^k$  und  $A = \bigoplus_{k \geq 0} A_k$ .
- Der *Kommutator* von  $a, b \in A$  ist  $[a, b] := ab - ba$ . Die Basiskommutatoren in  $A$  definiert man analog zu Definition 10.19. Anstatt  $c_i$  schreiben wir  $C_i$ . Für  $n = 2$  und  $(X_1, X_2) = (X, Y)$  ist zum Beispiel

$$C_4 = [C_1, C_3] = X[X, Y] - [X, Y]X = X(XY - YX) - (XY - YX)X = X^2Y - 2XYX + YX^2$$

(vgl. Beispiel 10.20).

**Lemma 10.27.** *Für alle  $k \in \mathbb{N}$  ist*

$$B_k := \left\{ C_{a_1} \dots C_{a_m} : m \in \mathbb{N}, a_1 \geq \dots \geq a_m, \sum_{i=1}^m \omega(c_{a_i}) = k \right\}$$

*eine Basis von  $A_k$ . Insbesondere sind die Basiskommutatoren mit Gewicht  $k$  linear unabhängig über  $\mathbb{Z}$ .*

*Beweis.* Man sieht leicht induktiv, dass ein Basiskommutator mit Gewicht  $k$  in  $A_k$  liegt. Daher gilt  $B_k \subseteq A_k$ . Nach Lemma 10.22 ist  $|B_k| = n^k = \text{rk}(A_k)$ . Wir zeigen zunächst, dass  $B_k$  ein Erzeugendensystem von  $A_k$  ist. Dafür betrachten wir die Mengen  $F_s$  aus dem Beweis von Lemma 10.22. Wenn  $s$  groß genug ist, so besteht  $B_k$  genau aus den Produkten  $C_{a_1} \dots C_{a_m}$  mit  $a = (a_i)_i \in F_s$  (Nullen werden aus der Folge entfernt). Andererseits entspricht  $F_1$  genau den Monomen  $X_{i_1} \dots X_{i_k}$ . Es genügt daher zu zeigen, dass man  $C := C_{a_1} \dots C_{a_m}$  mit  $a \in F_s$  durch eine Linearkombination von  $C_{b_1} \dots C_{b_{m'}}$  mit  $b \in F_{s+1}$  ausdrücken kann. Wie im Beweis von Lemma 10.22 durchlaufen wir die Folge  $a$  von rechts nach links. Gilt  $(a_i, a_{i+1}) = (s, t)$  mit  $t > s$ , ersetzen wir  $C_s C_t$  in  $C$  durch den gleichwertigen Ausdruck  $[C_s, C_t] + C_t C_s$ . Mit  $C_j = [C_s, C_t]$  gilt

$$C = C_{a_1} \dots C_{a_{i-1}} C_j C_{a_{i+2}} \dots C_{a_m} + C_{a_1} \dots C_{a_{i+1}} C_{a_i} \dots C_{a_m}.$$

Mit dem ersten Summanden verfahren wir wie zuvor. Im zweiten Summanden ist  $C_{a_i} = C_s$  nach rechts gerückt. Die entsprechende Folge liegt immer noch in  $F_s$  und kann wie die Ausgangsfolge behandelt werden. Nach endlich vielen Schritten erreicht man eine Linearkombination von  $C_{b_1} \dots C_{b_{m'}}$  mit  $b \in F_{s+1}$ .

Also ist  $B_k$  ein Erzeugendensystem von  $A_k$ .<sup>27</sup> Es gibt daher eine Matrix  $M \in R^{n^k \times n^k}$ , sodass die Abbildung  $\varphi: R^{n^k} \rightarrow A_k \cong R^{n^k}$ ,  $v \mapsto Mv$  surjektiv ist. Für den  $i$ -ten Standardbasisvektor  $e_i \in R^{n^k}$  existiert ein  $x_i \in R^{n^k}$  mit  $Mx_i = e_i$ . Sei  $L \in R^{n^k \times n^k}$  die Matrix mit Spalten  $x_1, \dots, x_{n^k}$ . Dann gilt  $ML = 1_{n^k}$  und  $\det(M) \in R^\times$ . Für die zu  $M$  komplementäre Matrix  $M^*$  erhält man  $\det(M)^{-1} M^* M = 1_{n^k}$ . Dies zeigt, dass  $\varphi$  injektiv ist. Somit ist  $B_k$  linear unabhängig.  $\square$

**Definition 10.28.** Wie zuvor sei  $A := R\langle X_1, \dots, X_n \rangle$ . Sei  $I := A_{>k} := \sum_{l>k} A_l$  das von  $A_{k+1}$  erzeugte Ideal in  $A$ . Sei  $\bar{A} := A/I$  und  $\mathcal{A} := (1 + A_{>0} + I)/I \subseteq \bar{A}$ .

<sup>27</sup>Da  $R$  im Allgemeinen kein Körper ist, folgt die lineare Unabhängigkeit nicht automatisch.

**Bemerkung 10.29.** Für  $a = 1 + a_1 + I \in \mathcal{A}$  gilt

$$a(1 - a_1 + a_1^2 \mp \dots \pm a_1^k + I) = 1 \pm a_1^{k+1} + I = 1.$$

Daher ist  $\mathcal{A} \leq \overline{A}^\times$ .

**Satz 10.30.** Sei  $F$  die freie Gruppe vom Rang  $n$  und  $k \in \mathbb{N}$ . Dann ist  $F^{[k]}/F^{[k+1]}$  eine freie abelsche Gruppe vom Rang  $\delta_n(k)$ .

*Beweis.* Sei  $F$  frei bzgl.  $x_1, \dots, x_n$ . Wir betrachten  $A = \mathbb{Z}\langle X_1, \dots, X_n \rangle$  mit  $R = \mathbb{Z}$ . Nach der universellen Eigenschaft von  $F$  existiert ein Homomorphismus  $\varphi: F \rightarrow \mathcal{A}$  mit  $\varphi(x_i) = 1 + X_i + I$ . Wir zeigen

$$\varphi(c_i) \equiv 1 + C_i \pmod{\overline{A_{>\omega(c_i)}}}$$

für jeden Basiskommutator  $c_i$ . Dies ist klar für  $\omega(c_i) = 1$ . Sei  $w_i := \omega(c_i)$  und  $w_j := \omega(c_j)$ . Nach Induktion existieren  $\epsilon_i, \epsilon'_i \in \overline{A_{>w_i}}$  und  $\epsilon_j, \epsilon'_j \in \overline{A_{>w_j}}$  mit  $\varphi(c_i) = 1 + C_i + \epsilon_i$ ,  $\varphi(c_i)^{-1} = 1 - C_i + \epsilon'_i$ ,  $\varphi(c_j) = 1 + C_j + \epsilon_j$  und  $\varphi(c_j)^{-1} = 1 - C_j + \epsilon'_j$  (Bemerkung 10.29). Aus

$$1 = \varphi(c_i)\varphi(c_i)^{-1} = (1 + C_i + \epsilon_i)(1 - C_i + \epsilon'_i) = 1 + \epsilon_i + \epsilon'_i - C_i^2 + C_i\epsilon'_i - \epsilon_i C_i + \epsilon_i \epsilon'_i$$

folgt

$$\begin{aligned} \varphi([c_i, c_j]) &= (1 + C_i + \epsilon_i)(1 + C_j + \epsilon_j)(1 - C_i + \epsilon'_i)(1 - C_j + \epsilon'_j) \\ &\equiv 1 + C_i + C_j - C_i - C_j + \epsilon_i + \epsilon_j + \epsilon'_i + \epsilon'_j + C_i C_j - C_i C_j - C_j C_i + C_i C_j \\ &\quad - C_i^2 + C_i \epsilon'_i - \epsilon_i C_i + \epsilon_i \epsilon'_i - C_j^2 + C_j \epsilon'_j - \epsilon_j C_j + \epsilon_j \epsilon'_j \pmod{\overline{A_{>w_i+w_j}}} \\ &\equiv 1 + [C_i, C_j] \pmod{\overline{A_{>\omega([c_i, c_j])}}}, \end{aligned}$$

wie behauptet. Dies impliziert  $\varphi(F^{[k+1]}) = 1$ . Seien  $c_{i_1}, \dots, c_{i_m}$  die Basiskommutatoren von  $F$  mit Gewicht  $k$ . Nach Satz 10.21 wird  $F^{[k]}/F^{[k+1]}$  von  $c_{i_1}F^{[k+1]}, \dots, c_{i_m}F^{[k+1]}$  erzeugt. Seien  $a_1, \dots, a_m \in \mathbb{Z}$  mit  $g := c_{i_1}^{a_1} \dots c_{i_m}^{a_m} \in F^{[k+1]}$ . Dann gilt

$$1 = \varphi(g) = (1 + C_{i_1})^{a_1} \dots (1 + C_{i_m})^{a_m} = 1 + a_1 C_{i_1} + \dots + a_m C_{i_m}.$$

Aus Lemma 10.27 folgt  $a_1 = \dots = a_m = 0$ . Also ist  $c_{i_1}F^{[k+1]}, \dots, c_{i_m}F^{[k+1]}$  eine Basis von  $F^{[k]}/F^{[k+1]}$ .  $\square$

**Bemerkung 10.31.** Nach Bemerkung 2.10 ist  $F'_2$  frei mit (abzählbar) unendlichem Rang. Daher ist  $F'_2/F''_2$  nicht endlich erzeugt.

**Satz 10.32.** Für jede Primzahlpotenz  $q = p^e$  gilt:

- (i) Es existiert genau eine Gruppe  $P$  mit  $n$  Erzeugern, Exponent  $q$ , Nilpotenzklasse  $p - 1$  und  $P^{[k]}/P^{[k+1]} \cong C_q^{\delta_n(k)}$  für  $k = 1, \dots, p - 1$ .
- (ii) Es existiert eine Gruppe  $P$  mit  $n$  Erzeugern, Exponent  $q$  und Nilpotenzklasse  $q - 1$ , sodass  $P^{[k]}/P^{[k+1]}$  für  $k = 1, \dots, q - 1$  Rang  $\delta_n(k)$  besitzt.

*Beweis.* Sei  $F$  die freie Gruppe mit Erzeugern  $x_1, \dots, x_n$ . Sei  $N := \langle g^q : g \in F \rangle \trianglelefteq F$  und  $\overline{F} := F/N$ .

- (i) Wir betrachten  $A := R\langle X_1, \dots, X_n \rangle$  mit  $R = \mathbb{Z}/q\mathbb{Z}$ . In der Definition von  $\mathcal{A}$  sei  $k < p$ . Für  $1 + a \in \mathcal{A}$  gilt dann

$$(1 + a)^q = 1 + qa + \binom{q}{2}a^2 + \dots + \binom{q}{p}a^p + \dots = 1.$$

Für die Abbildung  $\varphi: F \rightarrow \mathcal{A}$ ,  $x_i \mapsto 1 + X_i + I$  aus dem Beweis von Satz 10.30 gilt also  $\varphi(N) = 1$ . Die Nebenklassen der Basiskommutatoren  $c_{i_1}, \dots, c_{i_m} \in F$  mit Gewicht  $k$  bilden wie bisher ein Erzeugendensystem von  $\overline{F}^{[k]}/\overline{F}^{[k+1]}$ . Seien  $a_1, \dots, a_m \in R$  mit  $g := c_{i_1}^{a_1} \dots c_{i_m}^{a_m} \in NF^{[k+1]}$ . Dann gilt wie zuvor  $\varphi(g) = 1$  und  $a_1 = \dots = a_m = 0$ . Dies zeigt, dass  $\overline{F}^{[k]}/\overline{F}^{[k+1]} \cong F^{[k]}N/F^{[k+1]}N$  ein freier  $R$ -Modul mit Rang  $\delta_n(k)$  ist. Also hat  $P := \overline{F}/\overline{F}^{[p]} \cong F/NF^{[p]}$  die gewünschten Eigenschaften.

Sei umgekehrt  $Q$  eine  $p$ -Gruppe mit den angegebenen Eigenschaften. Dann existiert ein Epimorphismus  $\sigma: F \rightarrow Q$  mit  $NF^{[p]} \leq \text{Ker}(\sigma)$ . Insbesondere ist  $|P| \geq |Q|$ . Aus

$$|Q| = q^{\delta_n(1) + \dots + \delta_n(p-1)} = |P|$$

folgt  $Q \cong P$ .

- (ii) Diesmal betrachten wir  $A = \mathbb{F}_p\langle X_1, \dots, X_n \rangle$  und  $k < q$  in der Definition von  $\mathcal{A}$ . Für  $1 + a \in \mathcal{A}$  gilt nach wie vor

$$(1 + a)^q = \sum_{k=0}^q \binom{q}{k} a^k = 1$$

wegen  $\binom{q}{k} \equiv 0 \pmod{p}$  für  $k = 1, \dots, q-1$ . Man erhält also wieder einen Homomorphismus  $\varphi: F \rightarrow \mathcal{A}$  mit  $\varphi(N) = 1$ . Da die Basiskommutatoren mit Gewicht  $k$  linear unabhängig über  $\mathbb{F}_p$  sind, hat  $\overline{F}^{[k]}/\overline{F}^{[k+1]}$  Rang  $\delta_n(k)$  (aber nicht unbedingt Exponent  $q$ ). Um zu zeigen, dass  $P := \overline{F}/\overline{F}^{[q]} \cong F/NF^{[q]}$  Exponent  $q$  hat, betrachten wir einen Epimorphismus  $\psi: F \rightarrow C_q^n$ . Wegen  $\psi(NF') = 1$  ist  $P/P' \cong F/F'N \cong C_q^n$ .  $\square$

### Bemerkung 10.33.

- (i) Satz 10.32 zeigt  $\lim_{p \rightarrow \infty} \log_p |B(n, p)| = \infty$  für  $n \geq 2$ . Für die Gruppe  $P$  aus Satz 10.32(i) gilt genauer

$$\log_q |P| = \sum_{k=1}^{q-1} \delta_n(k) = \sum_{k=1}^{q-1} \frac{1}{k} \sum_{d|k} \mu(d) n^{k/d} = \sum_{d=1}^{q-1} \frac{\mu(d)}{d} \sum_{e=1}^{\lfloor (q-1)/d \rfloor} \frac{n^e}{e}.$$

- (ii) Bekanntlich ist jede Gruppe mit Exponent 2 abelsch, d. h. die Nilpotenzklasse ist  $\leq 1$ . Man kann Satz 10.32 also nicht auf höhere Nilpotenzklassen übertragen.
- (iii) In Satz 10.32(i) hat  $\overline{F}^{[k]}/\overline{F}^{[k+1]}$  nicht unbedingt Exponent  $q$ . In der Tat gibt es keine Gruppe mit zwei Erzeugern, Ordnung  $2^6$ , Exponent 4 und Nilpotenzklasse  $2$ .<sup>28</sup>

**Beispiel 10.34.** Für  $q \in \{3, 5\}$  erhält man  $|B(n, 3)| \geq 3^{n+\binom{n}{2}} = 3^{\binom{n+1}{2}}$  (vgl. Satz 10.9) und  $|B(2, 5)| \geq 5^{2+1+2+3} = 5^8$ . Tatsächlich gilt  $|B_0(2, 5)| = 5^{34}$  (ohne Beweis).

**Bemerkung 10.35.** Eindeutig bestimmte Gruppen mit gewissen Eigenschaften wie in Satz 10.32 werden wir allgemeiner in Satz 11.28 konstruieren.

<sup>28</sup>GAP: `OneGroup(26, RankPGroup, 2, Exponent, 4, NilpotencyClassOfGroup, 2);`



## 11 Gruppenklassen und Varietäten

**Definition 11.1.** Eine Klasse  $\mathcal{X}$  von Gruppen heißt *Gruppenklasse*, falls  $1 \in \mathcal{X}$  und  $G \cong H \in \mathcal{X} \Rightarrow G \in \mathcal{X}$ . Die Elemente von  $\mathcal{X}$  heißen  $\mathcal{X}$ -Gruppen oder Gruppen mit Eigenschaft  $\mathcal{X}$ . Eine Gruppe  $G$  heißt *residuale  $\mathcal{X}$ -Gruppe*, falls für alle  $g \in G \setminus \{1\}$  ein  $N \trianglelefteq G$  mit  $g \notin N$  und  $G/N \in \mathcal{X}$  existiert. Die residualen  $\mathcal{X}$ -Gruppen bilden die Gruppenklasse  $\mathcal{X}^r$ .

**Bemerkung 11.2.** Offenbar gilt  $G \in \mathcal{X}^r$  genau dann, wenn  $\bigcap_{\substack{N \trianglelefteq G \\ N \in \mathcal{X}}} N = 1$ . Ggf. ist  $G$  zu einer Untergruppe von  $\times_{\substack{N \trianglelefteq G \\ N \in \mathcal{X}}} G/N$  isomorph. Ist  $\{G_i : i \in I\}$  eine beliebige Familie von Gruppen, so nennt man  $H \leq \times_{i \in I} G_i$  *subdirektes Produkt*, falls die Projektion von  $H$  auf jedes  $G_i$  surjektiv ist.

**Satz 11.3.** Sei  $\mathcal{X}$  eine Gruppenklasse. Dann besteht  $\mathcal{X}^r$  genau aus den subdirekten Produkten von  $\mathcal{X}$ -Gruppen.

*Beweis.* Nach Bemerkung 11.2 ist jede residuale  $\mathcal{X}$ -Gruppe ein subdirektes Produkt von  $\mathcal{X}$ -Gruppen. Sei umgekehrt  $H \leq \times_{i \in I} G_i$  ein subdirektes Produkt von  $\mathcal{X}$ -Gruppen  $G_i$ . Sei  $\pi_i : H \rightarrow G_i$  die Projektion und  $K_i := \text{Ker}(\pi_i) \trianglelefteq H$ . Nach Voraussetzung ist  $H/K_i \cong G_i \in \mathcal{X}$  und  $\bigcap_{i \in I} K_i = 1$ .  $\square$

**Beispiel 11.4.** Ist  $\mathcal{X}$  die Gruppenklasse der abelschen Gruppen, so ist  $\mathcal{X}^r = \mathcal{X}$ .

**Satz 11.5** (IWASAWA). Jede freie Gruppe ist eine residual endliche  $p$ -Gruppe für jede Primzahl  $p$ .

*Beweis.* Sei  $a = x_1^{a_1} \dots x_n^{a_n} \in F_X \setminus \{1\}$  mit  $x_i \neq x_{i+1}$  und  $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{Z} \setminus \{0\}$  wie in Folgerung 1.9. Sei  $q$  eine Potenz von  $p$ , die nicht  $a_1 \dots a_n$  teilt. Sei  $E_{st} \in \mathbb{Z}/q\mathbb{Z}^{(n+1) \times (n+1)}$  die Matrix mit einer 1 an Position  $(s, t)$  und sonst nur Nullen. Für  $x \in X$  sei

$$\sigma(x) := \prod_{\substack{1 \leq i \leq n \\ x_i = x}} (1_{n+1} + E_{i,i+1}) \in \text{GL}(n+1, \mathbb{Z}/q\mathbb{Z}).$$

Offenbar besteht  $G := \langle \sigma(x) : x \in X \rangle$  aus oberen Dreiecksmatrizen mit Einsen auf der Hauptdiagonale. Daher ist  $G$  eine endliche  $p$ -Gruppe. Nach der universellen Eigenschaft setzt sich  $\sigma$  zu einem Homomorphismus  $\hat{\sigma} : F \rightarrow G$  fort. Wegen  $E_{st}E_{uv} = \delta_{tu}E_{sv}$  und  $x_i \neq x_{i+1}$  sind die Faktoren von  $\sigma(x)$  paarweise vertauschbar. Dies zeigt

$$\sigma(x_i)^{a_i} = \prod_{x_j = x_i} (1_{n+1} + E_{j,j+1})^{a_i} = \prod_{x_j = x_i} (1_{n+1} + a_i E_{j,j+1}) = 1_{n+1} + a_i \sum_{x_j = x_i} E_{j,j+1}.$$

Daraus folgt

$$\hat{\sigma}(a) = \sigma(x_1)^{a_1} \dots \sigma(x_n)^{a_n} = 1_{n+1} + a_1 \dots a_n E_{1,n+1} + \dots \neq 1_{n+1}. \quad \square$$

**Folgerung 11.6** (MAGNUS). Jede freie Gruppe ist residual nilpotent.

**Lemma 11.7.** Sei  $G$  eine endlich erzeugte Gruppe. Dann gilt:

- (i) Für jedes  $n \in \mathbb{N}$  besitzt  $G$  nur endlich viele Untergruppen mit Index  $n$ .
- (ii) (HALL) Ist  $H \leq G$  mit  $|G : H| < \infty$ , so existiert eine charakteristische Untergruppe  $K \leq G$  mit  $K \leq H$  und  $|G : K| < \infty$ .

*Beweis.*

- (i) Jede Untergruppe  $H \leq G$  vom Index  $n$  induziert einen Homomorphismus  $G \rightarrow S_n$  mit Kern  $H_G$ . Da  $G$  endlich erzeugt ist, existieren nur endlich viele solche Homomorphismen. Wegen  $H_G \leq H$  gibt es mit  $H_G$  auch nur endlich viele Möglichkeiten für  $H$ .
- (ii) Nach (i) ist  $\{\alpha(H) : \alpha \in \text{Aut}(G)\}$  endlich. Dann hat die charakteristische Untergruppe  $K := \bigcap_{\alpha \in \text{Aut}(G)} \alpha(H)$  endlichen Index.  $\square$

**Satz 11.8** (BAUMSLAG). *Ist  $G$  endlich erzeugt und residual endlich, so ist auch  $\text{Aut}(G)$  residual endlich.*

*Beweis.* Sei  $\alpha \in \text{Aut}(G) \setminus \{1\}$  und  $g \in G$  mit  $\alpha(g) \neq g$ . Dann existiert  $N \trianglelefteq G$  mit  $|G : N| < \infty$  und  $\alpha(g)g^{-1} \notin N$ . Nach Lemma 11.7 hat die charakteristische Untergruppe  $M := \bigcap_{\beta \in \text{Aut}(G)} \beta(N)$  endlichen Index in  $G$ . Für  $A := C_{\text{Aut}(G)}(G/M) \trianglelefteq \text{Aut}(G)$  gilt daher  $|\text{Aut}(A)/A| \leq |\text{Aut}(G/M)| < \infty$ . Offenbar ist  $\alpha \notin A$ .  $\square$

**Definition 11.9.** Eine Gruppe  $G$  heißt *hopfsch*, falls  $G$  zu keiner echten Faktorgruppe von  $G$  isomorph ist. Das bedeutet, dass jeder Epimorphismus  $G \rightarrow G$  ein Automorphismus ist.

**Beispiel 11.10.** Offenbar sind alle endlichen Gruppen und alle einfachen Gruppen hopfsch. Aus Dimensionsgründen sind auch alle Vektorräume hopfsch. Andererseits ist  $C_2^{\mathbb{N}}$  nicht hopfsch.

**Satz 11.11** (MAL'CEV). *Jede endlich erzeugte residual endliche Gruppe ist hopfsch.*

*Beweis.* Sei  $\varphi : G \rightarrow G$  ein nicht-injektiver Epimorphismus. Sei  $g \in \text{Ker}(\varphi) \setminus \{1\}$ . Da  $G$  residual endlich ist, existiert ein  $N \trianglelefteq G$  mit  $g \notin N$  und  $|G : N| < \infty$ . Da  $G$  endlich erzeugt ist, gibt es nur endlich viele Homomorphismen  $\gamma_1, \dots, \gamma_n : G \rightarrow G/N$ . Dabei sei  $\gamma_1$  der kanonische Epimorphismus. Aus der Surjektivität von  $\varphi$  folgt  $\{\gamma_1, \dots, \gamma_n\} = \{\gamma_1\varphi, \dots, \gamma_n\varphi\}$ . Sei also  $\gamma_1 = \gamma_k\varphi$ . Dann erhält man den Widerspruch  $1 \neq gN = \gamma_1(g) = \gamma_k(\varphi(g)) = \gamma_k(1) = 1$ .  $\square$

**Folgerung 11.12.** *Jede freie Gruppe mit endlichem Rang ist hopfsch.*

*Beweis.* Folgt aus Satz 11.5.  $\square$

**Folgerung 11.13.** *Sei  $F$  frei vom Rang  $n < \infty$  und sei  $F = \langle Y \rangle$  mit  $|Y| = n$ . Dann ist  $F$  frei bzgl.  $Y$ .*

*Beweis.* Sei  $F = F_X$ . Eine beliebige Bijektion  $X \rightarrow Y \subseteq F$  setzt sich zu einem Epimorphismus  $\sigma : F \rightarrow F$  fort. Nach Mal'cev ist  $\sigma \in \text{Aut}(F)$ . Sei  $G$  eine Gruppe und  $\tau : Y \rightarrow G$ . Dann setzt sich die Abbildung  $\tau\sigma|_X$  zu einem Homomorphismus  $\gamma : F \rightarrow G$  fort. Schließlich ist  $\gamma\sigma^{-1} : F \rightarrow G$  eine Fortsetzung von  $\tau$ . Wegen  $F = \langle Y \rangle$  ist dies die einzige Fortsetzung. Also erfüllt  $F$  die universelle Eigenschaft bzgl.  $Y$ .  $\square$

**Satz 11.14.** *Jede endlich erzeugte residual nilpotente Gruppe ist hopfsch.*

*Beweis.* Sei  $G$  endlich erzeugt und residual nilpotent. Nach Voraussetzung ist  $\bigcap_{k=1}^{\infty} G^{[k]} = 1$  und nach Lemma 10.6 sind die Faktoren  $G^{[k]}/G^{[k+1]}$  endlich erzeugte abelsche Gruppen. Nehmen wir  $G \cong G/N$  für ein  $1 \neq N \trianglelefteq G$  an. Sei  $k \in \mathbb{N}$  mit  $N \subseteq G^{[k]}$  und  $N \not\subseteq G^{[k+1]}$ . Dann ist

$$G^{[k]}/G^{[k+1]} \cong (G/N)^{[k]}/(G/N)^{[k+1]} \cong G^{[k]}/G^{[k+1]}N \cong (G^{[k]}/G^{[k+1]})/(G^{[k+1]}N/G^{[k+1]}).$$

Nach dem Hauptsatz über endlich erzeugte abelsche Gruppen ist  $G^{[k]}/G^{[k+1]}$  aber hopfsch. Widerspruch.  $\square$

**Satz 11.15** (HALL). *Es existiert eine endlich erzeugte auflösbare Gruppe, die nicht hopfsch ist.*

*Beweis.* Sei  $R$  der Ring aller Zahlen der Form  $a2^b$  mit  $a, b \in \mathbb{Z}$  und  $N$  die Gruppe der oberen  $3 \times 3$ -Dreiecksmatrizen mit Einsen auf der Hauptdiagonale und Elementen aus  $R$ . Wir setzen

$$u := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad v := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad w := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Weiter sei  $t$  die Diagonalmatrix mit Diagonale  $(1, 2, 1)$ . Schließlich definieren wir  $H := \langle t, N \rangle$ .

Wir zeigen zuerst  $H = \langle t, u, v \rangle$ . Offenbar ist  $u^a = \begin{pmatrix} 1 & a & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$  für  $a \in \mathbb{Z}$ . Wegen

$$tu^at^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & a & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & a2^{-1} & 0 \\ 0 & 2^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & a2^{-1} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

ist  $\begin{pmatrix} 1 & a & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \in \langle t, u, v \rangle$  für alle  $a \in R$ . Analog ist  $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & a \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \in \langle t, u, v \rangle$  für alle  $a \in R$ . Schließlich ist

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} 1 & a & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} v \begin{pmatrix} 1 & -a & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} v^{-1} &= \begin{pmatrix} 1 & a & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -a & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & a & a \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -a & a \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \in \langle t, u, v \rangle \end{aligned}$$

für alle  $a \in R$ . Für  $a, b, c \in R$  ist außerdem

$$\begin{pmatrix} 1 & a & c \\ 0 & 1 & b \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & b \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & a & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & c \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \in \langle t, u, v \rangle.$$

Dies zeigt  $H = \langle N, t \rangle \subseteq \langle t, u, v \rangle \subseteq H$ .

Wegen

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & a & c \\ 0 & 1 & b \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & a2^{-1} & c \\ 0 & 2^{-1} & b \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & a2^{-1} & c \\ 0 & 1 & b2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \in N$$

ist  $N \trianglelefteq H = N\langle t \rangle$  und offenbar  $N \cap \langle t \rangle = 1$ . Nun betrachten wir die Abbildung  $f : H \rightarrow H$  mit

$$f \left( \begin{pmatrix} 1 & a & c \\ 0 & 1 & b \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} t^d \right) = \begin{pmatrix} 1 & a & c2 \\ 0 & 1 & b2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} t^d$$

für  $a, b, c \in R$  und  $d \in \mathbb{Z}$ . Wir zeigen, dass  $f$  ein Endomorphismus ist:

$$\begin{aligned} f \left( \begin{pmatrix} 1 & a_1 & c_1 \\ 0 & 1 & b_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} t^{d_1} \begin{pmatrix} 1 & a_2 & c_2 \\ 0 & 1 & b_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} t^{d_2} \right) &= f \left( \begin{pmatrix} 1 & a_1 & c_1 \\ 0 & 1 & b_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & a_2 2^{-d_1} & c_2 \\ 0 & 1 & b_2 2^{d_1} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} t^{d_1+d_2} \right) \\ &= f \left( \begin{pmatrix} 1 & a_2 2^{-d_1} + a_1 & c_2 + a_1 b_2 2^{d_1} + c_1 \\ 0 & 1 & b_2 2^{d_1} + b_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} t^{d_1+d_2} \right) = \begin{pmatrix} 1 & a_2 2^{-d_1} + a_1 & (c_2 + a_1 b_2 2^{d_1} + c_1)2 \\ 0 & 1 & (b_2 2^{d_1} + b_1)2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} t^{d_1+d_2} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & a_1 & c_1 2 \\ 0 & 1 & b_1 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & a_2 2^{-d_1} & c_2 2 \\ 0 & 1 & b_2 2^{d_1+1} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} t^{d_1+d_2} = \begin{pmatrix} 1 & a_1 & c_1 2 \\ 0 & 1 & b_1 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} t^{d_1} \begin{pmatrix} 1 & a_2 & c_2 2 \\ 0 & 1 & b_2 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} t^{d_2} \\ &= f \left( \begin{pmatrix} 1 & a_1 & c_1 \\ 0 & 1 & b_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} t^{d_1} \right) f \left( \begin{pmatrix} 1 & a_2 & c_2 \\ 0 & 1 & b_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} t^{d_2} \right). \end{aligned}$$

Offenbar ist  $f$  auch bijektiv. Wegen

$$\begin{aligned} uw &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = wu \\ vw &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = wv \end{aligned}$$

ist  $w \in Z(H)$ . Insbesondere ist  $\langle w \rangle \trianglelefteq H$ . Der Automorphismus  $f$  induziert nun einen Isomorphismus  $H/\langle w \rangle \cong H/\langle w^2 \rangle$ . Also ist  $G = H/\langle w^2 \rangle$  eine endlich erzeugte Gruppe die nicht hopfsch ist. Da  $H/Z(H)$  abelsch ist, ist  $H$  auflösbar.  $\square$

**Definition 11.16.** Sei  $w = w(x_1, \dots) \in W \subseteq F_X$ . Für eine Gruppe  $G$  und  $g_1, \dots \in G$  sei  $w(g_1, \dots) \in G$  das Element, welches entsteht, indem man  $x_i$  in  $w$  durch  $g_i$  ersetzt (nur endlich viele  $x_i$  tauchen in  $w$  auf). Man nennt

$$W(G) := \langle w(g_1, \dots) : w \in W, g_1, \dots \in G \rangle$$

die *verbale Untergruppe* bzgl.  $W$ .

**Beispiel 11.17.** Für  $W = \{[x, y]\}$  erhält man  $W(G) = G'$ .

**Bemerkung 11.18.** Für jeden Homomorphismus  $f : G \rightarrow H$  gilt  $f(W(G)) \leq W(H)$ , d.h. verbale Untergruppen sind vollinvariant.

**Satz 11.19** (NEUMANN). *Jede vollinvariante Untergruppe einer freien Gruppe ist verbal.*

*Beweis.* Sei  $F = F_X$  und  $H \leq F$  vollinvariant. Sei  $w = w(x_1, \dots) \in H$  und  $y_1, \dots \in F$  beliebig. Dann existiert ein Endomorphismus  $\alpha : F \rightarrow F$  mit  $\alpha(x_i) = y_i$ . Es gilt  $w(y_1, \dots) = \alpha(w) \in H$ . Also ist  $H = W(H)$  verbal.  $\square$

**Definition 11.20.** Sei wieder  $W \subseteq F = F_X$ . Ein Normalteiler  $N$  einer Gruppe  $G$  heißt *W-marginal*, falls

$$w(g_1, \dots, g_i a, g_{i+1}, \dots) = w(g_1, \dots)$$

für alle  $w \in W$ ,  $g_1, \dots \in G$ ,  $i \in \mathbb{N}$  und  $a \in N$  gilt. Dies ist äquivalent zu

$$w(g_1, \dots) = w(h_1, \dots)$$

für alle  $g_1, h_1, \dots \in G$  mit  $g_i \equiv h_i \pmod{N}$  für  $i \in \mathbb{N}$ . Das Erzeugnis aller  $W$ -marginalen Normalteiler nennt man die *W-marginale Untergruppe*  $W^*(G)$ .

**Bemerkung 11.21.** Offenbar ist  $W^*(G)$  selbst  $W$ -marginal. Für  $W = \{[x, y]\}$  gilt  $W^*(G) = Z(G)$ , denn

$$g \in W^*(G) \Rightarrow \forall h \in G : [g, h] = [1g, h] = [1, h] = 1 \Rightarrow g \in Z(G) \Rightarrow g \in W^*(G).$$

**Lemma 11.22.** Es gilt  $W(G) = 1$  genau dann, wenn  $W^*(G) = G$ .

*Beweis.* Aus  $W(G) = 1$  folgt sicher  $W^*(G) = G$ . Sei nun  $W^*(G) = G$  und  $g_1, \dots \in G$ . Aus  $g_i \equiv 1 \pmod{G}$  folgt  $w(g_1, \dots) = w(1, \dots) = 1$ . Dies zeigt  $W(G) = 1$ .  $\square$

**Definition 11.23.** Eine Gruppenklasse  $\mathcal{X}$  heißt *Varietät*, falls  $W \subseteq F_X$  existiert mit  $\mathcal{X} = \{G : W(G) = 1\}$ . Ggf. schreibt man  $\mathcal{X} = \mathcal{X}(W)$ .

**Beispiel 11.24.** Die abelschen Gruppen bilden die Varietät  $\mathcal{X}([x, y])$ . Die elementarabelschen  $p$ -Gruppen bilden die Varietät  $\mathcal{X}([x, y], x^p)$ . Die Gruppen, deren Exponent  $n$  teilt, bilden die Varietät  $\mathcal{X}(x^n)$  usw. Der nächste Satz impliziert, dass die auflösbaren Gruppen der Stufe  $\leq n$  eine Varietät bilden.

**Satz 11.25 (BIRKHOFF).** Eine Gruppenklasse  $\mathcal{X}$  ist genau dann eine Varietät, falls  $\mathcal{X}$  abgeschlossen ist unter Bildung von Faktorgruppen und subdirekten Produkten.

*Beweis.* Jede Varietät ist abgeschlossen bzgl. Untergruppen, Faktorgruppen und (sub)direkten Produkten. Sei nun  $\mathcal{X}$  eine Gruppenklasse, die bzgl. Faktorgruppen und subdirekten Produkten abgeschlossen ist. Sei  $W \subseteq F_X$  maximal mit  $W(G) = 1$  für alle  $G \in \mathcal{X}$ . Dann ist  $\mathcal{X} \subseteq \mathcal{X}(W)$ . Sei umgekehrt  $G \in \mathcal{X}(W)$ . Für jedes  $w \in F_X \setminus W$  wählen wir  $H(w) \in \mathcal{X}$  mit  $w(h_1, \dots) \neq 1$  für gewisse  $h_1, \dots \in H(w)$ . Sei  $Y$  eine Menge, die mindestens so groß wie  $G$  und alle  $H(w)$  ist (zum Beispiel  $Y = G \cup \bigcup_w H(w)$ ). Dann existieren Isomorphismen  $F_Y/N \cong G$  und  $F_Y/K(w) \cong H(w) \in \mathcal{X}$  mit  $w(y_1, \dots) \notin K(w)$ . Für jedes  $w \in F_Y \setminus N$  existieren  $g_1, \dots \in G$  mit  $w(g_1, \dots) \neq 1$ . Wegen  $G \in \mathcal{X}(W)$  ist also  $w \notin W$ . Wir setzen

$$K := \bigcap_{w \in F_Y \setminus N} K(w) \trianglelefteq F_Y.$$

Dann ist  $F_Y/K$  ein subdirektes Produkt der  $\mathcal{X}$ -Gruppen  $H(w)$ . Nach Voraussetzung ist  $F_Y/K \in \mathcal{X}$ . Für  $w \in F_Y \setminus N$  gilt  $w \notin K(w)$ , insbesondere  $w \notin K$ . Also ist  $K \subseteq N$  und  $G \cong F_Y/N \cong (F_Y/K)/(N/K)$  ist Faktorgruppe einer  $\mathcal{X}$ -Gruppe und damit  $G \in \mathcal{X}$ . Dies zeigt, dass  $\mathcal{X} = \mathcal{X}(W)$  eine Varietät ist.  $\square$

**Folgerung 11.26.** Ist eine Gruppenklasse abgeschlossen unter Bildung von Faktorgruppen und subdirekten Produkten, so auch unter Bildung von Untergruppen.

**Definition 11.27.** Sei  $\mathcal{X}$  eine Varietät. Eine Gruppe  $F \in \mathcal{X}$  heißt  $\mathcal{X}$ -frei bzgl.  $X \subseteq F$ , falls für jede  $\mathcal{X}$ -Gruppe  $G$  und jede Abbildung  $\sigma : X \rightarrow G$  genau ein Homomorphismus  $\hat{\sigma} : F \rightarrow G$  mit  $\hat{\sigma}(x) = \sigma(x)$  für alle  $x \in X$  existiert.

**Satz 11.28.** Sei  $F = F_X$  eine freie Gruppe und  $\mathcal{X} = \mathcal{X}(W)$  eine Varietät mit  $W \subseteq F$ . Dann ist  $\overline{F} := F/W(F)$   $\mathcal{X}$ -frei bzgl.  $\overline{X} := \{xW(F) : x \in X\}$  und jede  $\mathcal{X}$ -freie Gruppe bzgl.  $\overline{X}$  ist zu  $\overline{F}$  isomorph.

*Beweis.* Sei  $G$  eine  $\mathcal{X}$ -Gruppe und  $\sigma : \overline{X} \rightarrow G$ . Wir definieren  $\tau : X \rightarrow G$  durch  $\tau(x) := \sigma(xW(F))$  für  $x \in X$ . Dann existiert genau ein Homomorphismus  $\hat{\tau} : F \rightarrow G$  mit  $\hat{\tau}(x) = \tau(x)$  für  $x \in X$ . Wegen  $G \in \mathcal{X}$  gilt  $\hat{\tau}(w) = 1$  für alle  $w \in W(F)$ . Man erhält einen Homomorphismus  $\hat{\sigma} : \overline{F} \rightarrow G$  mit  $\hat{\sigma}(xW(F)) = \hat{\tau}(x) = \tau(x) = \sigma(xW(F))$  für  $x \in X$ . Wegen  $\overline{F} = \langle \overline{X} \rangle$  ist  $\hat{\sigma}$  durch die Bilder von  $\overline{X}$  eindeutig bestimmt.

Sei auch  $H$   $\mathcal{X}$ -frei bzgl.  $\overline{X}$ . Dann lässt sich  $\text{id}_{\overline{X}}$  zu Homomorphismen  $\varphi : \overline{F} \rightarrow H$  und  $\psi : H \rightarrow \overline{F}$  fortsetzen. Wie üblich folgt, dass  $\varphi$  ein Isomorphismus ist.  $\square$

**Bemerkung 11.29.** Im Gegensatz zu freien Gruppen, gibt es nicht für jede Menge  $X$  eine  $\mathcal{X}$ -freie Gruppe bzgl.  $X$ . Für  $\mathcal{X} = \mathcal{X}(x) = \{1\}$  ist beispielsweise jede  $\mathcal{X}$ -freie Gruppe trivial.

**Satz 11.30.** Sei  $\mathcal{X}$  eine Varietät. Dann ist jede  $\mathcal{X}$ -Gruppe zu einer Faktorgruppe einer  $\mathcal{X}$ -freien Gruppe isomorph.

*Beweis.* Sei  $G \in \mathcal{X} = \mathcal{X}(W)$  mit minimalem Erzeugendensystem  $X$ . Sei  $F := F_X$  und  $\overline{X} := \{xW(F) : x \in X\}$  wie in Satz 11.28. Seien  $x, y \in X$  mit  $x \equiv y \pmod{W(F)}$ . Dann ist  $y^{-1}x \in W(F)$ . Aus  $W(G) = 1$  folgt  $x = y$ . Daher gilt  $|\overline{X}| = |X|$  und es existiert eine Bijektion  $\sigma : \overline{X} \rightarrow X \subseteq G$ , die sich zu einem Epimorphismus  $\overline{F} \rightarrow G$  fortsetzt. Die Behauptung folgt aus Satz 11.28.  $\square$

**Satz 11.31 (ENGEL).** Seien  $x_1, \dots, x_k \in X$  mit  $x_{k-1} \neq x_k$ . Dann ist jede endliche Gruppe  $G \in \mathcal{X}([x_1, \dots, x_k])$  nilpotent.

*Beweis.* Sei  $G$  ein minimales Gegenbeispiel. Dann ist jede echte Untergruppe von  $G$  nilpotent. Nach Schmidt ist  $G = P \rtimes Q$  mit  $P \in \text{Syl}_p(G)$  und  $Q \in \text{Syl}_q(G)$ . Angenommen  $\Phi(P) \neq 1$ . Dann ist auch  $G/\Phi(P)$  nilpotent. Wegen  $\Phi(P) \leq \Phi(G)$  wären dann  $G/\Phi(G)$  und  $G$  nilpotent. Also ist  $\Phi(P) = 1$ , d. h.  $P$  ist elementarabelsch. Für  $x \in P$  und  $y = y_1 = \dots = y_{k-1} \in Q \setminus \{1\}$  gilt  $[y_1, \dots, y_{k-1}, x] = 1$  nach Voraussetzung. Da  $P$  abelsch ist, existiert  $\alpha \in \text{End}(P)$  mit  $\alpha(g) = [y, g]$  für  $g \in P$ . Induktiv erhält man  $\alpha^{k-1}(x) = [y_1, \dots, y_{k-1}, x] = 1$ . Ist  $\beta \in \text{Aut}(P)$  die Konjugation mit  $y$ , so gilt  $\alpha = \beta - 1 \in \text{End}(P)$ . Sei  $m \in \mathbb{N}$  mit  $p^m \geq k$ . Da  $P$  elementarabelsch ist, folgt

$$0 = \alpha^{p^m} = \sum_{i=1}^{p^m} \binom{p^m}{i} (-1)^i \beta^{p^m-i} = \beta^{p^m} - 1$$

(für  $p = 2$  ist  $-1 = 1$ ). Also gilt  $y^{p^m} \in C_G(P)$  und  $y \in C_G(P)$  wegen  $p \neq q$ . Dann wäre aber  $G$  nilpotent.  $\square$

**Folgerung 11.32 (ZORN).** Sei  $G$  eine endliche Gruppe und  $k \in \mathbb{N}$  mit  $\underbrace{[g, \dots, g, h]}_k = 1$  für alle  $g, h \in G$ , so ist  $G$  nilpotent.

**Bemerkung 11.33.** Ist sogar  $[g_1, \dots, g_k] = 1$  für alle  $g_1, \dots, g_k \in G$ , so ist  $G$  nilpotent mit Nilpotenzklasse  $\leq k$ . Siehe auch Lemma 10.7.

## 12 $p$ -Gruppen

**Definition 12.1.** Sei  $X = \{x_1, \dots\}$  und  $\mathcal{X} = \mathcal{X}(x^{p^2}, [x, y]^p, [x, y, z] : x, y, z \in F_X)$ . Sei  $G_r$  die  $\mathcal{X}$ -freie Gruppe vom Rang  $r \geq 1$  aus Satz 11.28. Wie üblich identifizieren wir  $x_i$  mit der entsprechenden Nebenklasse in  $G_r$ .

**Lemma 12.2.** Die Varietät  $\mathcal{X}$  besteht aus allen  $p$ -Gruppen  $G$  mit  $\Phi(G) \leq Z(G)$  und  $\Phi(\Phi(G)) = 1$ .

*Beweis.* Sei  $G$  eine  $p$ -Gruppe mit  $\Phi(G) \leq Z(G)$  und  $\Phi(\Phi(G)) = 1$ . Für  $x, y, z \in G$  gilt  $x^p \in \Phi(G)$  und  $x^{p^2} = 1$ . Außerdem ist  $[x, y] \in G' \leq \Phi(G)$  und  $[x, y]^p = 1$  folgt. Schließlich ist  $[y, z] \in \Phi(G) \leq Z(G)$  und daher  $[x, y, z] = [x, [y, z]] = 1$ .

Sei umgekehrt  $G \in \mathcal{X}$  und  $N := \langle x^p, [x, y] : x, y \in G \rangle$ . Dann ist  $G/N$  elementarabelsch (möglicherweise unendlich) und  $\Phi(G) \leq N$ . Wegen  $[x^p, y] = [x, y]^p = 1$  und  $[x, y, z] = 1$  ist  $N \leq Z(G)$  und  $N$  ist elementarabelsch, d. h.  $\Phi(\Phi(G)) \leq \Phi(N) = 1$ .  $\square$

**Lemma 12.3.** Sei  $G \in \mathcal{X}$  und  $y_1, \dots, y_r \in G$ . Dann existiert ein Homomorphismus  $\varphi : G_r \rightarrow G$  mit  $\varphi(x_i) = y_i$  für  $i = 1, \dots, r$ .

*Beweis.* Folgt aus Satz 11.30 oder Satz 1.15 (da  $y_1, \dots, y_r$  nicht unbedingt ein Erzeugendensystem von  $G$  ist, erhält man nur einen Homomorphismus anstelle eines Epimorphismus).  $\square$

**Lemma 12.4.** Es gilt:

- (i)  $\Phi(G_r)$  ist elementarabelsch vom Rang  $r(r+1)/2$ .
- (ii)  $G_r/\Phi(G_r)$  ist elementarabelsch vom Rang  $r$ .
- (iii) Operiert  $\alpha \in \text{Aut}(G_r)$  trivial auf  $G_r/\Phi(G_r)$ , so auch auf  $\Phi(G_r)$ .

*Beweis.*

- (i) Wegen  $[x_i, x_j x_k] = [x_i, x_j] \cdot {}^{x_j}[x_i, x_k] = [x_i, x_j][x_i, x_k]$  für  $1 \leq i, j, k \leq r$  ist  $G'_r = \langle [x_i, x_j] : 1 \leq i < j \leq r \rangle$  elementarabelsch vom Rang höchstens  $r(r-1)/2$ . Wegen  $(x_i x_j)^p \equiv x_i^p x_j^p \pmod{G'_r}$  ist  $G_r^p G'_r = \langle x_i^p, [x_i, x_j] \rangle$  elementarabelsch vom Rang höchstens  $r(r-1)/2 + r = r(r+1)/2$ . Da auch  $G/G_r^p G'_r$  elementarabelsch vom Rang höchstens  $r$  ist, ist  $G$  eine endliche  $p$ -Gruppe und  $\Phi(G_r) = G_r^p G'_r \leq Z(G_r)$ .

Angenommen es gibt eine Relation der Form

$$g := \prod_{i=1}^r x_i^{a_i} \prod_{1 \leq i < j \leq r} [x_i, x_j]^{b_{ij}} = 1$$

mit  $0 \leq a_i, b_{ij} \leq p-1$ . Für  $\langle h \rangle \cong C_{p^2}$  und  $1 \leq i \leq r$  existiert nach Lemma 12.3 ein Homomorphismus  $\varphi : G_r \rightarrow \langle h \rangle$  mit  $\varphi(x_i) = h$  und  $\varphi(x_j) = 1$  für  $j \neq i$ . Es folgt  $1 = \varphi(g) = h^{pa_i}$  und  $a_i = 0$  für  $i = 1, \dots, r$ . Für  $1 \leq i < j \leq r$  sei analog  $\langle h_i, h_j \rangle \cong p_+^{1+2}$ . Wieder existiert ein Homomorphismus  $\varphi : G_r \rightarrow \langle h_i, h_j \rangle$  mit  $\varphi(x_i) = h_i$ ,  $\varphi(x_j) = h_j$  und  $\varphi(x_k) = 1$  für  $i \neq k \neq j$ . Aus  $1 = \varphi(g) = [h_i, h_j]^{b_{ij}}$  folgt  $b_{ij} = 0$ . Dies zeigt, dass  $\Phi(G_r)$  Rang  $r(r+1)/2$  hat.

- (ii) Seien  $0 \leq a_1, \dots, a_r \leq p-1$  mit  $g = x_1^{a_1} \dots x_r^{a_r} \in \Phi(G_r)$ . Wie in (i) existiert ein Homomorphismus  $\varphi : G_r \rightarrow \langle h \rangle \cong C_{p^2}$  mit  $h^{a_i} = \varphi(g) \in \Phi(\langle h \rangle) = \langle h^p \rangle$ . Dies zeigt  $g = 1$  und die Behauptung folgt.

- (iii) Sei  $\alpha \in \text{Aut}(G_r)$  trivial auf  $G_r/\Phi(G_r)$ . Dann existieren  $h_1, \dots, h_r \in \Phi(G_r)$  mit  $\alpha(x_i) = x_i h_i$  für  $i = 1, \dots, r$ . Wegen (i) ist  $\alpha(x_i^p) = \alpha(x_i)^p = (x_i h_i)^p = x_i^p$  und  $\alpha([x_i, x_j]) = [x_i h_i, x_j h_j] = [x_i, x_j]$  für  $1 \leq i < j \leq r$ .  $\square$

**Lemma 12.5.** *Seien  $N, M \leq \Phi(G_r)$ . Genau dann gilt  $G_r/N \cong G_r/M$ , falls ein  $\alpha \in \text{Aut}(G_r)$  mit  $\alpha(N) = M$  existiert.*

*Beweis.* Jedes  $\alpha \in \text{Aut}(G_r)$  mit  $\alpha(N) = M$  induziert einen Isomorphismus  $G_r/N \cong G_r/M$ . Sei umgekehrt ein Isomorphismus  $\alpha' : G_r/N \rightarrow G_r/M$  gegeben. Wähle  $y_1, \dots, y_r \in G_r$  mit  $\alpha'(x_i N) = y_i M$  für  $i = 1, \dots, r$ . Nach Lemma 12.3 und Lemma 12.4 existiert ein Homomorphismus  $\alpha : G_r \rightarrow G_r$  mit  $\alpha(x_i) = y_i$  für  $i = 1, \dots, r$ . Bekanntlich gilt

$$G_r = \langle y_1, \dots, y_r \rangle M = \langle y_1, \dots, y_r \rangle \Phi(G_r) = \langle y_1, \dots, y_r \rangle.$$

Daher ist  $\alpha$  surjektiv und ein Isomorphismus. Wegen  $\alpha(x_i)M = y_i M = \alpha'(x_i N)$  gilt  $\alpha(g)M = \alpha'(gN)$  für alle  $g \in G_r$ . Dabei ist

$$g \in N \iff \alpha'(gN) = 1 \iff \alpha(g)M = 1 \iff \alpha(g) \in M.$$

Dies zeigt  $\alpha(N) = M$ .  $\square$

**Lemma 12.6.** *Die Anzahl der  $d$ -dimensionalen Unterräume von  $\mathbb{F}_p^n$  ist*

$$\binom{n}{d}_p = \frac{(p^n - 1)(p^n - p) \dots (p^n - p^{d-1})}{(p^d - 1)(p^d - p) \dots (p^d - p^{d-1})}$$

und es gilt  $p^{d(n-d)} \leq \binom{n}{d}_p \leq p^{d(n-d+1)}$ .

*Beweis.* Die Formel ist aus Kombinatorik bekannt. Die untere Abschätzung folgt aus  $p^{n-d} \leq \frac{p^n - p^i}{p^d - p^i}$  für  $0 \leq i \leq d-1$ . Andererseits ist  $p^n + p^{n-d+i+1} \leq 2p^n \leq p^{n+1} + p^i$  und dies liefert  $\frac{p^n - p^i}{p^d - p^i} \leq p^{n-d+1}$ .  $\square$

**Lemma 12.7.** *Sei  $r, s \in \mathbb{N}$  mit  $1 \leq s \leq r(r+1)/2$ . Dann existieren mindestens  $p^{rs(r+1)/2 - r^2 - s^2}$  nicht-isomorphe Gruppen der Ordnung  $p^{r+s}$ .*

*Beweis.* Sei  $\mathcal{N}$  die Menge der Normalteiler  $N \leq \Phi(G_r)$  mit  $|\Phi(G_r) : N| = p^s$ . Nach Lemma 12.4 und Lemma 12.6 gilt  $|\mathcal{N}| \geq p^{rs(r+1)/2 - s^2}$ . Für  $N \in \mathcal{N}$  gilt  $|G_r/N| = p^{r+s}$ . Nach Lemma 12.5 genügt es die Anzahl der Bahnen von  $\text{Aut}(G_r)$  auf  $\mathcal{N}$  abzuschätzen. Sei  $\Gamma : \text{Aut}(G_r) \rightarrow \text{Aut}(G_r/\Phi(G_r))$  der kanonische Homomorphismus. Nach Lemma 12.4 operieren die Automorphismen in  $\text{Ker}(\Gamma)$  trivial auf  $\mathcal{N}$ . Andererseits ist

$$|\text{Aut}(G_r/\Phi(G_r))| = |\text{GL}(r, p)| = (p^r - 1)(p^{r-1} - 1) \dots (p^r - p^{r-1}) \leq p^{r^2}.$$

Jede Bahn von  $\text{Aut}(G_r)$  auf  $\mathcal{N}$  hat also höchstens Länge  $p^{r^2}$ . Die Anzahl der Bahnen ist somit mindestens  $p^{rs(r+1)/2 - r^2 - s^2}$ .  $\square$

**Satz 12.8 (HIGMAN).** *Sei  $f(p^n)$  die Anzahl der nicht-isomorphen Gruppen der Ordnung  $p^n$  für eine Primzahl  $p$ . Dann gilt*

$$p^{\frac{2}{27}n^2(n-6)} \leq f(p^n) \leq p^{\frac{1}{6}(n^3-n)}.$$



*Beweis.* Für die untere Abschätzung können wir  $n \geq 6$  annehmen. Sei

$$s := \begin{cases} n/3 & \text{falls } n \equiv 0 \pmod{3}, \\ (n+2)/3 & \text{falls } n \equiv 1 \pmod{3}, \\ (n+1)/3 & \text{falls } n \equiv 2 \pmod{3} \end{cases}$$

und  $r = n - s$ . Dann ist  $s \leq r \leq r(r+1)/2$  und

$$\begin{aligned} rs(r+1)/2 - r^2 - s^2 &= \begin{cases} \frac{1}{27}n^2(2n+3) - \frac{4}{9}n^2 - \frac{1}{9}n^2 & \text{falls } n \equiv 0 \pmod{3} \\ \frac{1}{27}(n+2)(n-1)(2n+1) - \frac{4}{9}(n-1)^2 - \frac{1}{9}(n+2)^2 & \text{falls } n \equiv 1 \pmod{3} \\ \frac{1}{27}(n+1)(2n-1)(n+1) - \frac{1}{9}(2n-1)^2 - \frac{1}{9}(n+1)^2 & \text{falls } n \equiv 2 \pmod{3} \end{cases} \\ &= \begin{cases} \frac{2}{27}n^2(n-6) & \text{falls } n \equiv 0 \pmod{3} \\ \frac{2}{27}n^2(n-6) + \frac{1}{3}n - \frac{26}{27} & \text{falls } n \equiv 1 \pmod{3} \\ \frac{2}{27}n^2(n-6) + \frac{2}{9}n - \frac{7}{27} & \text{falls } n \equiv 2 \pmod{3} \end{cases} \\ &\geq \frac{2}{27}n^2(n-6). \end{aligned}$$

Nach Lemma 12.7 ist daher  $f(p^n) \geq p^{\frac{2}{27}n^2(n-6)}$ .

Für die obere Abschätzung sei  $G$  eine Gruppe der Ordnung  $p^n$  mit Hauptreihe  $G = H_0 > H_1 > \dots > H_n = 1$ . Wir wählen  $g_i \in H_{i-1} \setminus H_i$  für  $i = 1, \dots, n$ . Jedes Element in  $G$  lässt sich dann eindeutig in der Form  $g = g_1^{a_1} \dots g_n^{a_n}$  mit  $0 \leq a_1, \dots, a_n \leq p-1$  schreiben. Dabei gilt  $g \in H_i$  genau dann, wenn  $a_1 = \dots = a_i = 0$ . Seien  $0 \leq b_{ij} \leq p-1$  mit

$$g_i^p = g_{i+1}^{b_{i,i+1}} \dots g_n^{b_{i,n}}. \quad (12.1)$$

Wegen  $H_{j-1}/H_j \leq Z(G/H_j)$  gilt  $[g_i, g_j] \in H_j$  für  $1 \leq i < j \leq n$ . Daher existieren  $0 \leq c_{ij} \leq p-1$  mit

$$[g_i, g_j] = g_{j+1}^{c_{i,j+1}} \dots g_n^{c_{i,n}} \quad (i < j). \quad (12.2)$$

Wir zeigen nun, dass  $G$  durch die Relationen (12.1) und (12.2) eindeutig bestimmt ist. Dafür muss man ein Produkt  $g_1^{a_1} \dots g_n^{a_n} g_1^{a'_1} \dots g_n^{a'_n}$  auf die Form  $g_1^{a''_1} \dots g_n^{a''_n}$  bringen. Dies ist klar für  $n = 1$ . Sei  $n \geq 2$ . Mit (12.2) kann man  $g_1^{a'_1}$  nach links schieben, indem man Terme der Form  $g_j^{c_{1,j}}$  mit  $j \geq 2$  einfügt. Anschließend erhält man  $g_1^{a_1+a'_1} h$  mit  $h \in H_1$ . Mit (12.1) kann man  $a_1 + a'_1$  durch  $a''_1$  ersetzen, indem man weitere Terme der Form  $g_i^{b_{ij}}$  mit  $i \geq 2$  einfügt. Die Behauptung folgt nun durch Induktion. Die Anzahl der nicht-isomorphen Gruppen der Ordnung  $p^n$  ist also durch die Wahl der Parameter  $b_{ij}$  und  $c_{ij}$  beschränkt. Für die Wahl der  $b_{ij}$  gibt es  $p^{n(n-1)/2}$  Möglichkeiten. Für die Wahl der  $c_{ij}$  gibt es  $p^\alpha$  Möglichkeiten, wobei

$$\alpha = \sum_{i=1}^{n-2} \binom{n-i}{2} = \binom{n}{3} = \frac{n^3 - 3n^2 + 2n}{6}.$$

(Man zähle die Anzahl der 3-elementigen Teilmengen von  $\{1, \dots, n\}$  mit vorgegebenem Maximum.) Insgesamt ergeben sich höchstens  $p^{(n^3-n)/6}$  Gruppen der Ordnung  $p^n$ .  $\square$

**Bemerkung 12.9.** Sims-Newman-Seeley haben die stärkere Abschätzung  $f(p^n) \leq p^{\frac{2}{27}n^3 + O(n^{5/2})}$  bewiesen. Da wir zum Beweis der unteren Abschätzung nur Faktorgruppen von  $G_r$  benutzt haben, folgt: Fast alle  $p$ -Gruppen  $G$  besitzen einen Normalteiler  $N \leq Z(G)$ , sodass  $N$  und  $G/N$  elementarabelsch sind. Insbesondere haben fast alle  $p$ -Gruppen Nilpotenzklasse 2.

**Definition 12.10.**

- Sei  $F = F_X$  mit  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ . Für  $g \in F \setminus \{1\}$  existiert nach Folgerung 11.6 ein  $w(g) \geq 1$  mit  $g \in F^{[w(g)]} \setminus F^{[w(g)+1]}$ . Zusätzlich sei  $w(1) := \infty$ . Für  $Y \subseteq X$  sei  $N_Y := \langle Y \rangle^F \trianglelefteq F$ .
- Für endliche Mengen  $A, B \subseteq \mathbb{N}$  sei  $A \prec B$ , falls  $|A| < |B|$  oder falls  $|A| = |B|$  und  $A$  lexikographisch kleiner als  $B$  ist (d. h.  $\min(A \cup B) \setminus (A \cap B) \in A$ ).

**Bemerkung 12.11.**

- (i) Wegen  $[F^{[k]}, F^{[l]}] \subseteq F^{[k+l]}$  gilt  $w([g, h]) \geq w(g) + w(h)$  für alle  $g, h \in F$ .
- (ii) Offenbar ist  $\prec$  eine Totalordnung auf der Potenzmenge von  $\mathbb{N}$ .

**Lemma 12.12** (HALLs Kollektor-Prozess). Sei  $\{1, \dots, n\} = A_1 \dot{\cup} \dots \dot{\cup} A_m$ . Für  $\emptyset \neq I \subseteq \{1, \dots, m\}$  sei

$$C_I := F^{[I]} \cap \bigcap_{i \in I} N_{A_i} \cap \langle \bigcup_{i \in I} A_i \rangle \leq F.$$

Dann existieren  $c_I \in C_I$  mit

$$x_1 \dots x_n = \prod_{\emptyset \neq I \subseteq \{1, \dots, m\}} c_I,$$

wobei die Teilmengen  $I$  gemäß  $\prec$  durchlaufen werden.

*Beweis.* Für  $\emptyset \neq J \subseteq \{1, \dots, m\}$  zeigen wir

$$x_1 \dots x_n = \prod_{I \prec J} c_I \cdot y_1 \dots y_n$$

mit  $y_1, \dots, y_n \in C_K$  für ein  $J \preceq K$ . Die Behauptung folgt dann mit  $J = \{1, \dots, m\}$ , indem man  $c_J = y_1 \dots y_n$  setzt. Für  $J = \{1\}$  ist das Produkt über  $I \prec J$  leer. Für  $x_i \in A_j \leq \langle A_i \rangle = C_{\{j\}}$  kann man  $y_i = x_i$  wählen, denn  $J \preceq \{j\}$ . Sei nun die Behauptung für  $J$  bereits bewiesen und sei  $J'$  der Nachfolger von  $J$  bzgl.  $\prec$ . Wir können annehmen, dass mindestens ein  $y_i$  in  $C_J$  liegt (anderenfalls ist  $y_i \in C_{J'}$  für alle  $i$  und wir sind fertig). Sei dabei  $i$  minimal. Im Fall  $i > 1$  schreiben wir  $y_{i-1}y_i = y_i y_{i-1} z$  mit  $z := [y_{i-1}^{-1}, y_i^{-1}]$  und  $y_{i-1} \in C_K$ , wobei  $J \prec K$ . Dann gilt

- $w(z) \geq w(y_{i-1}) + w(y_i) \geq |J| + |K| \geq |J \cup K|$ .
- $z \in N_{A_j}$  für alle  $j \in J \cup K$ .
- $z \in \langle \bigcup_{j \in J \cup K} A_j \rangle$ .

Dies zeigt  $z \in C_{J \cup K}$  mit  $J \prec J \cup K$ . Mit endlich vielen Schritten können wir auf diese Weise alle  $y_i \in C_J$  nach links schieben und anschließend als  $c_J$  deklarieren. Für die verbleibenden Faktoren gilt nun  $y_j \in C_{J'}$  wie gewünscht.  $\square$

**Satz 12.13** (HALL-PETRESCU-Formel). Für jede Gruppe  $G$ ,  $x, y \in G$  und  $n \in \mathbb{N}$  existieren  $c_i \in G^{[i]}$  mit

$$x^n y^n = (xy)^n c_2^{\binom{n}{2}} c_3^{\binom{n}{3}} \dots c_n^{\binom{n}{n}}.$$

*Beweis.* Sei  $X = \{x_1, \dots, x_{2n}\}$  und  $A_i := \{i, n+i\}$ . Dann ist  $\{1, \dots, 2n\} = A_1 \dot{\cup} \dots \dot{\cup} A_n$ . Für  $I \subseteq \{1, \dots, n\}$  sei  $\mu_I : F \rightarrow F$  der Endomorphismus mit

$$\mu_I(x_i) = \begin{cases} x_i & \text{falls } i \in I \vee i - n \in I, \\ 1 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Sei  $c_I \in C_I$  mit der Bezeichnung aus Lemma 12.12. Für  $I \subseteq J$  gilt dann  $\mu_J(c_I) = c_I$ , denn  $C_I \subseteq \langle \bigcup_{i \in I} A_i \rangle$ . Für  $I \not\subseteq J$  gilt hingegen  $\mu_J(c_I) = 1$ , denn für  $i \in I \setminus J$  ist  $C_I \subseteq N_{A_i} = \langle x_i, x_{i+n} \rangle^F \subseteq \text{Ker}(\mu_J)$ . Nach Lemma 12.12 gilt also

$$\prod_{j \in J} x_j \prod_{j \in J} x_{j+n} = \mu_J(x_1 \dots x_{2n}) = \prod_{\emptyset \neq I \subseteq J} c_I,$$

wobei die Mengen  $I$  bzgl.  $\prec$  angeordnet sind.

Es genügt die Behauptung für  $G = F_2 = \langle x, y \rangle$  zu beweisen. Sei  $\varphi : F_X \rightarrow F_2$  mit  $\varphi(x_i) = x$  und  $\varphi(x_{i+n}) = y$  für  $i = 1, \dots, n$ . Für  $|J| = k$  erhalten wir

$$x^k y^k = \varphi(\mu_J(x_1 \dots x_{2n})) = \prod_{I \subseteq J} \varphi(c_I).$$

Wir behaupten, dass  $\varphi(c_I)$  nur von  $|I|$  abhängt. Für  $k = 1$  erhält man  $xy = \varphi(c_I)$  falls  $|I| = 1$ . Seien nun  $|J| = |J'|$  und

$$\prod_{I \subseteq J} \varphi(c_I) \varphi(c_J) = \prod_{I \subseteq J} \varphi(c_I) = x^k y^k = \prod_{I' \subseteq J'} \varphi(c_{I'}) = \prod_{I' \subseteq J'} \varphi(c_{I'}) \varphi(c_{J'}).$$

Auf beiden Seiten sind die  $I$  der Größe nach aufsteigend sortiert. Für  $l := |I| = |I'| < k$  gilt bereits  $\varphi(c_I) = \varphi(c_{I'})$  nach Induktion. Die Anzahl dieser Faktoren ist auf beiden Seiten  $\binom{k}{l}$ . Daher gilt auch  $\varphi(c_J) = \varphi(c_{J'})$ .

Wir setzen  $c_l := \varphi(c_{\{1, \dots, l\}})$  für  $l = 1, \dots, n$ . Dann gilt  $c_l \in \varphi(F_X^{[l]}) \subseteq F_2^{[l]}$  und

$$x^n y^n = \prod_{l=1}^n c_l^{\binom{n}{l}} = c_1^n \prod_{l=2}^n c_l^{\binom{n}{l}} = (xy)^n \prod_{l=1}^n c_l^{\binom{n}{l}}. \quad \square$$

### Beispiel 12.14.

- (i) Es gilt  $x^2 y^2 = xyx[x^{-1}, y^{-1}]y = (xy)^2[y^{-1}x^{-1}y, y^{-1}]$ .
- (ii) Sei  $G$  eine  $p$ -Gruppe mit Nilpotenzklasse  $< p$ , d.h.  $G^{[p]} = 1$ . Seien  $x, y \in G$ . Wegen  $\binom{p}{i} \equiv 0 \pmod{p}$  für  $i = 2, \dots, p-1$  existieren  $c_i \in G^{[i]}$  mit  $x^p y^p = (xy)^p c_2^p \dots c_{p-1}^p$ . Im Allgemeinen nennt man  $p$ -Gruppen mit dieser Eigenschaft *regulär*.

## 13 Entscheidbarkeitsprobleme

### Bemerkung 13.1 (DEHNs Probleme).

- (i) Sei  $G$  eine Gruppe mit Erzeugendensystem  $X$ . In der „Praxis“ möchte man folgende Aufgaben algorithmisch lösen:
  - (Wortproblem) Wann repräsentiert ein Wort in  $X$  das neutrale Element in  $G$ ?

- (Konjugationsproblem) Wann sind zwei Wörter in  $X$  als Elemente von  $G$  konjugiert?
  - (Isomorphieproblem) Wann ist  $G$  zu einer weiteren gegebenen Gruppe  $H$  isomorph?
- (ii) Eine Lösung des Wortproblems bedeutet, dass man jedes Element in  $G$  auf eine „Normalform“ bringen kann. Nach Lemma 1.7 ist das Wortproblem daher für freie Gruppen lösbar (vorausgesetzt man weiß bereits, dass  $G$  frei ist).
- (iii) Ist das Konjugationsproblem für  $G$  lösbar, so auch das Wortproblem, denn  $g = 1$  genau dann, wenn  $g$  und  $1$  konjugiert sind.
- (iv) NOVIKOV und BOONE haben gezeigt alle drei Probleme selbst für endlich präsentierte Gruppen unlösbar sind, d. h. es gibt keinen allgemeinen Algorithmus, der eines der drei Probleme in endlicher Zeit löst. Selbst die Frage, ob eine gegebene Gruppe endlich oder trivial ist, lässt sich nicht entscheiden!
- (v) Im Allgemeinen hängt die Lösbarkeit der Probleme von der gewählten Darstellung ab. Für endlich erzeugte Gruppen ist die Situation besser.

**Satz 13.2.** *Sei  $G = \langle X \mid R \rangle$  endlich erzeugt. Ist das Wortproblem (bzw. Konjugationsproblem) bzgl. dieser Präsentation von  $G$  lösbar, so ist das Wortproblem (bzw. Konjugationsproblem) auch für jede andere endliche erzeugte Präsentation von  $G$  lösbar.*

*Beweis.* Sei  $F := F_X$  und  $\varphi : F \rightarrow G$  der kanonische Epimorphismus. Sei  $F_1 := F_{X_1}$  und  $\varphi_1 : F_1 \rightarrow G$  eine weitere Präsentation mit  $|X_1| < \infty$ . Dann existiert eine Funktion  $\psi : X_1 \rightarrow F$  mit  $(\varphi\psi)(x) = \psi_1(x)$  für alle  $x \in X_1$ . Nach der universellen Eigenschaft setzt sich  $\psi$  nach  $F_1$  fort. Diese Fortsetzung lässt sich explizit anhand der endlich vielen Werte  $\varphi(x)$  mit  $x \in X_1$  berechnen. Sei nun  $w \in F_1$ . Ist das Wortproblem für  $\langle X \mid R \rangle$  lösbar, so lässt sich  $\varphi(\psi(w)) = 1$  entscheiden. Also lässt sich auch  $\varphi_1(w) = 1$  entscheiden, d. h. das Wortproblem für  $\langle X_1 \mid R_1 \rangle$  ist lösbar. Analog für das Konjugationsproblem.  $\square$

**Satz 13.3.** *Das Konjugationsproblem ist für alle freie Gruppen lösbar.*

*Beweis.* Offenbar ist jedes  $g \in F_X$  zu einem zyklisch reduzierten Wort  $\check{g}$  konjugiert. Unterscheiden sich  $\check{g}$  und  $\check{h}$  nur durch Shifts, so sind  $g$  und  $h$  in  $F_X$  konjugiert. Nehmen wir umgekehrt an, dass  $g$  und  $h$  konjugiert sind. Dann sind auch  $\check{g}$  und  $\check{h}$  konjugiert. Sei  $a \in F_X$  reduziert mit  $a\check{g}a^{-1} = \check{h}$ . Da  $\check{h}$  zyklisch reduziert ist, muss sich  $a^{-1}$  vollständig mit  $\check{g}$  kürzen. Also ist  $\check{g}$  ein Shift von  $\check{h}$ . Auf diese Weise kann man entscheiden, ob  $g$  und  $h$  konjugiert sind.  $\square$

**Satz 13.4.** *Sei  $G$  endlich präsentiert und residual endlich. Dann ist das Wortproblem für  $G$  lösbar.*

*Beweis.* Sei  $G = \langle X \mid R \rangle$  eine endliche Präsentation und  $w$  ein Wort in  $X$ . Wir führen folgende Algorithmen parallel (oder im Wechsel) aus:

- Man konstruiere alle (abzählbar viele) Wörter in  $R$  (zum Beispiel in lexikographischer Reihenfolge). Ist  $w = 1$  in  $G$ , so muss  $w$  irgendwann als ein solches Wort auftreten.
- Man konstruiere alle (abzählbar viele) endlichen Gruppen  $H$ . Da  $X$  endlich ist, gibt es nur endlich viele Homomorphismen  $\varphi : G \rightarrow H$ . Man prüfe  $\varphi(w) \neq 1$ . Ist  $w \neq 1$ , so existiert  $H$  und  $\varphi$  mit  $\varphi(w) \neq 1$ , da  $G$  residual endlich ist.  $\square$

**Satz 13.5.** *Das Wortproblem ist für Coxetergruppen lösbar.*

*Beweis.* Sei  $G = \langle x_1, \dots, x_n \rangle$  eine Coxetergruppe vom Rang  $n$  und  $w = x_{i_1} \dots x_{i_l} \in G$ . Sei  $\sigma : G \rightarrow \text{GL}(n, \mathbb{R})$  der Monomorphismus aus Satz 8.14. Dann lässt sich  $\sigma(w) = \sigma_{i_1} \dots \sigma_{i_l}$  allein aus den Zahlen  $m_{ij}$  berechnen. (Auf dem Computer könnte man die Matrixeinträge  $\cos(\pi/m_{ij})$  diskret in einem Kreisteilungskörper realisieren anstatt mit rundungsanfälligen Fließkommazahlen zu arbeiten.) Es gilt  $w = 1$  genau dann, wenn  $\sigma(w) = 1$ .  $\square$

### Bemerkung 13.6.

- (i) TITS hat einen effizienten Algorithmus für Satz 13.5 gegeben: Sei  $G = \langle x_1, \dots, x_n \rangle$  eine Coxetergruppe und  $\pi : F_X \rightarrow G$  der kanonische Epimorphismus mit  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ . Für  $w = x_{i_1} \dots x_{i_k} \in F_X$  sei  $R(w) \subseteq F_X$  die Menge aller Wörter, die man aus  $w$  mittels der folgenden Operationen erhalten kann:

- Ersetze  $x_i x_j x_i \dots$  ( $m_{ij}$  Buchstaben) durch  $x_j x_i x_j \dots$  ( $m_{ij}$  Buchstaben).
- Ist  $x_i = x_{i+1}$ , so entferne  $x_i x_{i+1}$ .

Da die Länge der Wörter in  $R(w)$  beschränkt ist, ist  $R(w)$  endlich. Offenbar gilt  $\pi(r) = \pi(w)$  für alle  $r \in R(w)$ . Man kann zeigen, dass  $\pi(w) = 1$  genau dann gilt, wenn  $1 \in R(w)$  (ohne Beweis).

- (ii) Das Isomorphieproblem für Coxetergruppen wurde noch nicht vollständig gelöst.
- (iii) Die Schwierigkeit der Dehnschen Probleme nutzt man in der Kryptographie aus. Wir beschreiben beispielhaft das ANSHEL-ANSHEL-GOLDFELD-Protokoll zur Bestimmung eines gemeinsamen geheimen Schlüssels zwischen Personen  $A$  und  $B$ . Gegeben sei eine Gruppe  $G$  für die das Wortproblem „effizient“ lösbar ist, das Konjugationsproblem aber nicht. Der öffentliche Schlüssel von  $A$  bzw.  $B$  besteht aus zufälligen Elementen  $a_1, \dots, a_n$  bzw.  $b_1, \dots, b_n$ . Die privaten Schlüssel bestehen jeweils aus Wörtern  $w_A$  bzw.  $w_B$  in  $a_1, \dots, a_n$  bzw.  $b_1, \dots, b_n$ . Der Schlüsselaustausch basiert auf folgenden Prinzip:

(i)  $A$  sendet  $(w_A b_1 w_A^{-1}, \dots, w_A b_n w_A^{-1})$  an  $B$ .

(ii)  $B$  sendet  $(w_B a_1 w_B^{-1}, \dots, w_B a_n w_B^{-1})$  an  $A$ .

(iii) Beide können nun

$$w_A w_A (w_B a_1 w_B^{-1}, \dots, w_B a_n w_B^{-1}) = [w_A, w_B] = w_B (w_A b_1 w_A^{-1}, \dots, w_A b_n w_A^{-1}) w_B^{-1}$$

berechnen und als gemeinsamen Schlüssel benutzen. In der Praxis setzt man für  $G$  Zopfgruppen oder polyzyklische Gruppen ein. Diese kryptographischen Verfahren werden interessant, wenn mit leistungsfähigen Quantencomputern bisherige Verfahren wie RSA unbrauchbar werden.

## Aufgaben

**Aufgabe 1.** Sei  $F$  eine freie Gruppe vom Rang  $> 1$ . Zeigen Sie  $Z(F) = 1$ .

**Aufgabe 2.** Zeigen Sie:

(a)  $Q_{2^n} \cong \langle x, y \mid x^{2^{n-2}} = y^2, yxy^{-1} = x^{-1} \rangle$  für  $n \geq 3$  (siehe GT-Satz 8.15)

(b)  $A_4 \cong \langle x, y \mid x^2 = y^3 = (xy)^3 = 1 \rangle$ .

**Aufgabe 3.** Eine Gruppe  $G$  heißt *metazyklisch*, falls ein zyklischer Normalteiler  $N$  mit zyklischer Faktorgruppe  $G/N$  existiert (Beispiel: GT-Satz 7.23). Sei  $P$  eine endliche metazyklische  $p$ -Gruppe. Zeigen Sie, dass  $a, b, c, k \geq 0$  mit  $k^{p^b} - 1 \equiv 0 \equiv p^c(k - 1) \pmod{p^a}$  und

$$P \cong \langle x, y \mid x^{p^a} = 1, y^{p^b} = x^{p^c}, yxy^{-1} = x^k \rangle$$

existieren.

*Bemerkung:* Verschiedene Parameter können zu isomorphen Gruppen gehören. Eine exakte Klassifikation wurde von Liedahl gegeben.

**Aufgabe 4.** Sei  $p$  eine Primzahl,  $a \geq 2$  und  $b \geq 1$ . Sei

$$P(a, b) := P = \langle x, y \mid x^{p^a} = y^{p^b} = 1, yxy^{-1} = x^{1+p^{a-1}} \rangle.$$

Zeigen Sie:

- (a)  $|P| = p^{a+b}$ .
- (b)  $P' = \langle x^{p^{a-1}} \rangle \cong C_p$ .
- (c)  $\Phi(P) = Z(P) = \langle x^p, y^p \rangle \cong C_{p^{a-1}} \times C_{p^{b-1}}$ .

**Aufgabe 5.** Eine nicht-abelsche Gruppe  $G$  heißt *minimal nicht-abelsch*, falls jede echte Untergruppe von  $G$  abelsch ist. Zeigen Sie, dass für eine endliche  $p$ -Gruppe  $P$  die folgenden Aussagen äquivalent sind:

- (a)  $P$  ist minimal nicht-abelsch.
- (b)  $|P : \Phi(P)| = |P : Z(P)| = p^2$ .
- (c)  $|P : \Phi(P)| = p^2$  und  $|P'| = p$ .

*Hinweis:* GT-Kapitel 4.

**Aufgabe 6.** Sei  $p$  eine Primzahl und  $a, b \in \mathbb{N}$ . Sei

$$Q(n, m) := Q = \langle x, y \mid x^{p^a} = y^{p^b} = [x, y]^p = [x, x, y] = [y, x, y] = 1 \rangle$$

(Erinnerung:  $[x, y, z] := [x, [y, z]]$ ). Zeigen Sie:

- (a)  $|Q| = p^{a+b+1}$ .
- (b)  $Q' = \langle [x, y] \rangle \cong C_p$ .
- (c)  $\Phi(Q) = Z(Q) = \langle x^p, y^p, [x, y] \rangle \cong C_{p^{a-1}} \times C_{p^{b-1}} \times C_2$ .

*Bemerkung:* Rédei hat gezeigt, dass jede minimal nicht-abelsche  $p$ -Gruppe zu  $P(a, b)$ ,  $Q(a, b)$  oder zu  $Q_8$  isomorph ist.

**Aufgabe 7.** Entscheiden Sie, ob der Petersen-Graph der Cayley-Graph einer Gruppe ist.

**Aufgabe 8.** Sei  $F$  die freie Gruppe über dem Alphabet  $\{x, y\}$  und  $G \leq F$  die Untergruppe aller Wörter mit gerader Länge. Zeigen Sie, dass  $G$  frei durch  $x^2$ ,  $y^2$  und  $xy$  erzeugt wird.

**Aufgabe 9.** Sei  $G = \langle X \mid R \rangle$  eine einfache Gruppe, wobei jeder Relator in  $R$  gerade Länge hat. Zeigen Sie:  $G \cong C_2$ .

**Aufgabe 10.** Sei  $F$  eine freie Gruppe und  $w \in F \setminus \{1\}$ . Zeigen Sie  $C_F(w) \cong C_\infty$ . Folgern Sie, dass  $F$  unzerlegbar ist.

**Aufgabe 11.** Zeigen Sie, dass eine Gruppe  $H$  genau dann frei ist, wenn jede Erweiterung mit  $H$  zerfällt.

**Aufgabe 12.** Das *Koprodukt*

$$A := \coprod_{n \in \mathbb{Z}} \mathbb{F}_2 \leq \prod_{n \in \mathbb{Z}} \mathbb{F}_2$$

besteht aus allen Folgen  $(a_n)_{n \in \mathbb{Z}}$  mit  $|\{n \in \mathbb{Z} : a_n = 1\}| < \infty$ . Offenbar existiert  $\gamma \in \text{Aut}(A)$  mit  $\gamma((a_n)_n) := (a_{n+1})_n$  für alle  $n \in \mathbb{Z}$ . Sei  $G := A \rtimes \langle \gamma \rangle$ . Zeigen Sie, dass  $G$  endlich erzeugt und metabelsch ist, aber die Untergruppe  $A \leq G$  nicht endlich erzeugt ist.

**Aufgabe 13.** Bestimmen Sie alle Erweiterungen von  $C_n$  mit  $C_2$  bis auf Äquivalenz ( $n \in \mathbb{N}$ ).

**Aufgabe 14.** Sei  $D_\infty := \langle x, y \mid x^2 = y^2 = 1 \rangle \cong C_\infty \rtimes C_2$  (GT-Aufgabe 54(b)). Zeigen Sie, dass  $G := \langle x, y \mid x^2 = y^2 \rangle$  eine Erweiterung von  $Z(G) \cong C_\infty$  mit  $D_\infty$  ist. Folgern Sie, dass  $G$  überauflösbar und  $G'$  zyklisch ist.

**Aufgabe 15.** Sei  $A := \langle a \rangle \cong C_4$ ,  $S := \text{SL}(2, 3)$  und  $G := (S \times A) / \langle (-1_2, a^2) \rangle \cong S * A$  (Zentralprodukt). Zeigen Sie:

(a)  $S \cong Q_8 \rtimes C_3$ .

(b)  $Q_8 \trianglelefteq G$  besitzt ein Komplement in  $H := Q_8 * A \in \text{Syl}_2(G)$ .

(c)  $Q_8$  besitzt kein Komplement in  $G$ .

*Bemerkung:* Für nicht-abelsche Gruppen  $N$  ist der Satz von Gaschütz also falsch.

**Aufgabe 16.** Sei  $N := D_8$  und  $H \cong C_2$ .

(a) Zeigen Sie  $\text{Aut}(N) \cong D_8$ .

(b) Bestimmen Sie alle Erweiterungen von  $N$  mit  $H$  bis auf Äquivalenz. Welche davon sind isomorph?

**Aufgabe 17.** Sei  $N = \langle a, b \mid a^8 = b^2 = 1, bab^{-1} = a^{-1} \rangle \cong D_{16}$  und  $H = \langle x \rangle \cong C_2$ . Zeigen Sie:

(a) Es existiert ein Automorphismus  $\beta \in \text{Aut}(N)$  mit  $\beta(a) = a^3$  und  $\beta(b) = ab$ .

(b) Es existiert ein Homomorphismus  $\omega : H \rightarrow \text{Out}(N)$  mit  $\omega(x) = \beta \text{Inn}(N)$ .

(c) Es gibt kein Parametersystem von  $N$  mit  $H$  zur Paarung  $\omega$ .

*Hinweis:* Satz 4.16.

**Aufgabe 18.** Wir betrachten die einfache Gruppe  $N := \text{PSL}(2, 9)$  der Ordnung 360. Wir identifizieren die Elemente in  $N$  mit ihren Urbildern in  $\text{SL}(2, 9)$  (beachte:  $Z(\text{SL}(2, 9)) = \langle -1_2 \rangle$ ). Sei  $\mathbb{F}_9^\times = \langle \zeta \rangle$  und  $d := \text{diag}(\zeta, 1) \in \text{GL}(2, 9)$ . Zeigen Sie:

- (a) Die Abbildung  $\sigma : N \rightarrow N$ ,  $x \mapsto dx d^{-1}$  ist ein äußerer Automorphismus mit  $\sigma^2 \in \text{Inn}(N)$ .
- (b) Die Abbildung  $\tau : N \rightarrow N$ ,  $(x_{ij}) \mapsto (x_{ij}^3)$  ist ein äußerer Automorphismus der Ordnung 2.
- (c) Sei  $H = \langle x \rangle \cong C_2$ . Nach Folgerung 4.28 gibt es je ein Parametersystem  $(\alpha, \kappa)$  von  $N$  mit  $H$  und  $\alpha_x \in \{1, \sigma, \tau, \sigma\tau\}$ . Untersuchen Sie, welche der Erweiterungen zerfallen und welche isomorph sind.

*Bemerkung:* Es gilt  $N \cong A_6$ .

**Aufgabe 19.** Sei  $N$  abelsch und  $\alpha : H \rightarrow \text{Aut}(N)$  ein Gruppenhomomorphismus. Eine Abbildung  $\delta : H \rightarrow N$  mit

$$\delta(xy) = \delta(x)\alpha_x(\delta(y))$$

für alle  $x, y \in H$  heißt *verschränkter Homomorphismus* bzgl.  $\alpha$ . Zeigen Sie:

- (a) Die verschränkten Homomorphismen bilden eine Gruppe  $\text{Hom}_\alpha(H, N) \leq C^1(H, N)$ .
- (b) Die Abbildung  $\Gamma : N \rightarrow \text{Hom}_\alpha(H, N)$ ,  $a \mapsto \delta_a$  mit  $\delta_a(x) := \alpha_x(a)a^{-1}$  ist ein Homomorphismus. Man setzt  $H_\alpha^1(H, N) := \text{Hom}_\alpha(H, N)/\Gamma(N)$ .
- (c) Sei  $K$  ein Komplement von  $N$  in  $G := N \rtimes_\alpha H$ . Für  $x \in H$  existiert genau ein  $y \in K$  mit  $\delta_K(x) := xy^{-1} \in N$ . Es gilt  $\delta_K \in \text{Hom}_\alpha(H, N)$ .
- (d) Jedes  $\delta \in \text{Hom}_\alpha(H, N)$  definiert ein Komplement  $K_\delta := \{\delta(x)^{-1}x : x \in H\}$  von  $N$  in  $G$  mit  $\delta_{K_\delta} = \delta$ .
- (e) Zwei Komplemente  $K_1, K_2$  von  $N$  in  $G$  sind genau dann konjugiert, wenn  $\delta_{K_1}\delta_{K_2}^{-1} \in \Gamma(N)$  gilt.
- (f) Die Abbildung  $K \rightarrow \delta_K$  induziert eine Bijektion zwischen den Konjugationsklassen von Komplementen von  $N$  in  $G$  und  $H_\alpha^1(H, N)$ .

**Aufgabe 20** (GASCHÜTZ). Sei  $N$  ein abelscher Normalteiler einer endlichen Gruppe  $G$  und  $N \leq H \leq G$  mit  $\text{ggT}(|N|, |G : H|) = 1$ . Zeigen Sie: Sind alle Komplemente von  $N$  in  $H$  konjugiert, so sind alle Komplemente von  $N$  in  $G$  konjugiert.

**Aufgabe 21.**

- (a) Zeigen Sie  $\text{Aut}(S_n) \cong \text{Aut}(A_n)$  für  $n \geq 4$ .
- (b) Zeigen Sie, dass  $\varphi \in \text{Aut}(S_6)$  mit

$$\begin{aligned} \varphi((1, 2)) &= (1, 5)(2, 3)(4, 6), & \varphi((1, 3)) &= (1, 4)(2, 6)(3, 5), \\ \varphi((1, 4)) &= (1, 3)(2, 4)(5, 6), & \varphi((1, 5)) &= (1, 2)(3, 6)(4, 5), \\ \varphi((1, 6)) &= (1, 6)(2, 5)(3, 4) \end{aligned}$$

ein äußerer Automorphismus der Ordnung 2 ist.

**Aufgabe 22.** Zeigen Sie, dass man mindestens 82 Lotto-Scheine (6 aus 49) ausfüllen muss, um zwei „Richtige“ (auf einem Schein) zu haben.



**Aufgabe 23.** Sei  $S = (\Omega, \mathcal{B})$  ein  $(2, k, v)$ -Steinersystem. Zeigen, dass die folgenden Aussagen äquivalent sind:

- (1)  $v = k^2$ .
- (2)  $|\mathcal{B}| = k^2 + k$ .
- (3) Für  $B \in \mathcal{B}$  und  $\omega \in \Omega \setminus B$  existiert genau ein Block  $B' \in \mathcal{B}$  mit  $\omega \in B'$  und  $B \cap B' = \emptyset$ .

*Bemerkung:* In der affinen Ebene  $\mathbb{F}_q^2$  ist (3) das *Parallelenpostulat*: Zu jedem Punkt  $x$  und jeder Gerade  $g$  existiert genau eine Parallele von  $g$ , die durch  $x$  verläuft.

**Aufgabe 24.** Zeigen Sie, dass der Higman-Sims-Graph 22-regulär ist, d. h. jede Ecke ist zu genau 22 weiteren Ecken verbunden.

**Aufgabe 25.** Ein *Gitter* ist eine freie abelsche Untergruppe von  $\mathbb{R}^n$  vom Rang  $n$ . Jedes Gitter hat also die Form  $L = \mathbb{Z}b_1 + \dots + \mathbb{Z}b_n$ , wobei  $b_1, \dots, b_n \in \mathbb{R}^n$  eine Basis von  $\mathbb{R}^n$  ist. Zeigen Sie, dass

$$\text{Aut}(L) = \{f \in \text{O}(\mathbb{R}^n) : f(L) = L\}$$

eine endliche Gruppe ist. Bestimmen Sie  $\text{Aut}(\mathbb{Z}^n)$ .

**Aufgabe 26.** Zeigen Sie, dass eine Operation von  $G$  auf  $\Omega$  genau dann 2-transitiv ist, wenn  $G = G_\omega \cup G_\omega x G_\omega$  für  $\omega \in \Omega$  und ein  $x \in G$  gilt.

**Aufgabe 27.** Zeigen Sie, dass die einfache Gruppe  $\text{PSp}(4, 3)$  zu keiner alternierenden Gruppe und keiner projektiven speziellen linearen Gruppe isomorph ist.

*Bemerkung:* Es gilt  $\text{PSp}(4, 3) \cong \text{PSU}(4, 2)$ . Mit Hilfe von *Zsigmondy-Primzahlen* kann man zeigen, dass  $\text{PSp}(2n, q)$  für  $n \geq 2$  zu keiner alternierenden Gruppe und keiner projektiven speziellen linearen Gruppe isomorph ist.

**Aufgabe 28.** Sei  $p > 2$  eine Primzahl und  $G := \langle x, y \mid x^p = y^p = (xy)^p = 1 \rangle$ . Zeigen Sie  $|G| = \infty$ .

*Hinweis:* Realisieren Sie  $G$  als Untergruppe von  $\text{Sym}(\mathbb{Z})$ .

**Aufgabe 29.** Zeigen Sie:

- (a) Jede Hurwitz-Gruppe  $G$  ist perfekt und 84 teilt  $|G|$ .
- (b)  $\text{GL}(3, 2)$  ist eine Hurwitz-Gruppe.

**Aufgabe 30.** Sei  $G = \text{Fr}_{i \in I} G_i$  und  $H = \bigoplus_{i \in I} G_i$ .

- (a) Konstruieren Sie einen natürlichen Epimorphismus  $G \rightarrow H$  und beschreiben Sie seinen Kern.
- (b) Zeigen Sie  $G/G' \cong H/H'$ .
- (c) Sei  $N_i \trianglelefteq G_i$  für  $i \in I$ . Sei  $N$  der normale Abschluss von  $\bigcup_{i \in I} N_i$  in  $G$ . Zeigen Sie  $G/N \cong \text{Fr}_{i \in I} G_i/N_i$ .

**Aufgabe 31.** Sei  $G$  ein Amalgam von  $G_I$  bzgl.  $H$  mit  $H < G_i$  für alle  $i \in I$ . Zeigen Sie:  $Z(G) = \bigcap_{i \in I} Z(G_i)$ .

**Aufgabe 32.** Zeigen Sie, dass jede endlich erzeugte periodische auflösbare Gruppe endlich ist.

# Stichwortverzeichnis

## Symbole

$B^2(H, N)$ , 31  
 $Co_1$ , 53  
 $Co_2$ , 53  
 $Co_3$ , 53  
 $\delta_n(k)$ , 91  
 $\text{Fr}_{i \in I} G_i$ , 79  
 $G * H$ , 79  
 $H^2(H, N)$ , 31  
 $HS$ , 51  
 $J_1$ , 53  
 $l(g)$ , 60  
 $M(G)$ , 31  
 $McL$ , 53  
 $M_d$ , 48  
 $\omega(c_i)$ , 91  
 $\text{PSp}(V)$ , 54  
 $\Phi$ , 62  
 $\Pi$ , 62  
 $\sigma_v$ , 62  
 $\text{Sp}(V)$ , 54  
 $\text{Sz}(q)$ , 59  
 $W^*(G)$ , 101  
 $W(G)$ , 100  
 $x_v$ , 62  
 $Z^2(H, N)$ , 31  
 $\partial\varphi$ , 31

## A

affine Ebene, 50  
 Alphabet, 4  
 Anshel-Anshel-Goldfeld-Protokoll, 109  
 Antisymmetrie, 54  
 Artingruppe, 60  
 Austauschbedingung, 67  
 Automorphismensystem, 21

## B

Basiskommutator, 91  
 Baumslag, 98  
 Birkhoff, 101  
 Buchstabe, 4  
 Burnside-Gruppe, 86

## C

Cayley-Graph, 9  
 Chapman, 48  
 Coextergraph, 67  
 Conway-Gruppe, 53  
 Coxeter, 72  
 Coxeter-Todd-Algorithmus, 15  
 Coxetergruppe, 59  
     alternierende Untergruppe, 61

irreduzible, 67  
 universelle, 60

## D

Dehns Probleme, 107  
 Dynkin-Diagramm, 72

## E

Engel, 102  
 Erweiterung, 20  
     zentrale, 31  
     zerfallende, 20  
     äquivalente, 20

## F

Faktorensystem, 21  
     triviale, 21  
 Fano-Ebene, 50  
 Fishers Ungleichung, 50  
 freie Algebra, 94  
 freies Produkt, 79  
 Frucht, 9

## G

GAP, 7, 10, 13–15, 18, 19, 21, 27, 30, 33, 40, 42, 43,  
     52, 76  
 Gaschütz, 28, 35, 112  
 Gewicht  
     Basiskommutator, 91  
 Gitter, 113  
 Golay-Code, 51  
 Golod, 85  
 Gruppe  
     endlich präsentierte, 6  
     hopfsche, 98  
     metazyklische, 110  
     minimal nicht-abelsche, 110  
     polyzyklische, 27  
     reguär, 107  
     symplektische, 54  
     vollständige, 30  
 Gruppenklasse, 97  
 Gupta, 85  
 Guralnick-Kantor-Kassabov-Lubotzky, 17

## H

Hall, 97, 99  
 Hall-Higman-Lemma, 90  
 Hall-Petrescu-Formel, 106  
 Halls Kollektor-Prozess, 106  
 Higman, 104  
 Higman-Neumann-Neumann, 84  
 Higman-Sims-Graph, 51  
 Higman-Sims-Gruppe, 51

HNN-Erweiterung, 84  
Hölder, 39  
Hopf-Formel, 34  
Hurwitz-Gruppe, 78  
hyperbolisches Paar, 54

## I

inverses Galois-Problem, 52  
Isomorphieproblem, 108  
Iwasawa, 97

## J

Jacobi-Identität, 76  
Johnson-Zassenhaus, 30  
Jones, 36

## K

Keevash, 53  
Kohomologiegruppe, 31  
Kommutator  
    freie Algebra, 94  
Konjugationsproblem, 108  
Koprodukt, 111  
Kozyklus, 31  
Kurosch, 82

## L

Leech-Gitter, 52  
Levi, 87, 88  
Lie-Algebra, 76  
Liedahl, 110  
Länge, 4, 60  
Löschbedingung, 67

## M

Magnus, 97  
Magnus' Freiheitssatz, 17  
Mal'cev, 98  
Mathieu, 45, 47  
Mathieugruppen, 48  
McLaughlin-Gruppe, 53  
Mendelsohn, 51  
Miller, 78  
Monstergruppe, 78  
Moore, 16

## N

Neumann, 100  
Newman, 19  
Nielsen-Schreier, 11  
Nielsen-Transformationen, 18  
Novikov-Ajan, 85  
Novikov-Boone, 108

## O

Olschanski, 88

## P

Paarung, 28  
Parallelenpostulat, 113  
Parametersystem, 21  
    normalisiertes, 21  
    äquivalente, 23  
Petersen-Graph, 110  
Ping-Pong-Lemma, 6  
projektive Darstellung, 37  
projektive Ebene, 50  
Präsentation  
    balancierte, 8

## R

Rang, 5  
    Coxetergruppe, 59  
Read, 35  
Rédei, 110  
Reidemeister-Schreier, 14  
Relation, 6  
Relator, 6

## S

Sanov, 89  
Schreier, 24  
Schreier-Transversale, 11  
Schreiers Formel, 12  
Schur, 32, 35  
Schur-Erweiterung, 31  
    maximale, 32  
    universelle, 37  
Schur-Multiplikator, 31  
Shephard-Todd, 77  
Sims-Newman-Seeley, 105  
Spiegelung, 60  
    komplexe, 77  
Spiegelungsgruppe, 60  
Steinberg, 11  
Steinersystem, 49  
Stirling-Zahl, 49  
subdirektes Produkt, 97  
Suzuki-Gruppen, 59  
symplektische Basis, 54  
symplektische Transvektion, 56

## T

Tarski-Monster, 88  
Tietze-Transformation, 17  
Tits, 66, 109

## U

Untergruppe  
     $W$ -marginale, 101  
    verbale, 100

## V

Valentiner-Gruppe, 43

Van der Waerden, 88  
Varietät, 101  
von Dyck, 6  
von-Dyck-Gruppe, 77

## **W**

Witt, 45  
Witts Formel, 93  
Wort, 4  
    leeres, 4  
    reduziert  
        Coxetergruppe, 60  
    reduziertes, 4  
    zyklisch reduziert, 17  
    äquivalente, 4  
Wortproblem, 107  
Wurzel, 62  
    positive/negative, 62  
Wurzelsystem, 62

## **Z**

Zelmanov, 85  
Zopfgruppe, 60  
Zorn, 102  
Zsigmondy-Primzahlen, 113