

# Eine Herleitung der 17 Kongruenzgruppen der Euklidischen Ebene mit topologischen Methoden.

Autor(en): **Steiger, Franz**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Commentarii Mathematici Helvetici**

Band (Jahr): **8 (1935-1936)**

PDF erstellt am: **17.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-9295>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Eine Herleitung der 17 Kongruenzgruppen der Euklidischen Ebene mit topologischen Methoden

Von FRANZ STEIGER, Solothurn

Brouwer hat die indikatrix-erhaltenden topologischen Abbildungen des Torus angegeben<sup>1)</sup>, und Scherrer hat darauf hingewiesen<sup>2)</sup>, daß die Aufzählung *aller* endlichen Torusgruppen, genauer gesagt, der Faktorgruppen ihrer Normalteiler, mit der Aufzählung der *ebenen Kristallgruppen* äquivalent sei. Dies soll hier, in enger Anlehnung an die bereits am Beispiel der Kugel und der projektiven Ebene erprobte Methode<sup>2)</sup>, durchgeführt werden. Die als Grundlage der Untersuchung benötigten Relationen und Sätze aus der Theorie der endlichen topologischen Abbildungsgruppen geschlossener Flächen entnehme ich der unter<sup>2)</sup> zitierten Abhandlung. Ich verweise auch auf meine Arbeit über „die maximalen Ordnungen periodischer topologischer Abbildungen geschlossener Flächen in sich“<sup>3)</sup>, welcher dieselben Tatsachen zugrunde liegen. Damit jedoch der vorliegende Aufsatz unabhängig von der eben erwähnten Publikation gelesen werden kann, wiederhole ich daraus kurz alles das, worauf wir uns nachher stützen müssen.

Nach Brouwer und Scherrer darf die betrachtete geschlossene Fläche  $F$ , die einer endlichen Gruppe von Abbildungen unterworfen ist, als *reguläre Überlagerungsfläche* einer Modulfläche  $\Phi$  aufgefaßt werden. Die Abbildungsgruppe ist dann die Gruppe der Decktransformationen der Überlagerungsfläche  $F$ . Wenn  $n$  ihre Ordnung ist, so besteht  $F$  aus  $n$  übereinanderliegenden Blättern, nämlich aus  $n$  nach bestimmten Vorschriften zusammengehefteten Exemplaren der mit einem geeigneten Schnittsystem versehenen Modulfläche  $\Phi$ . Jeder Punkt  $P$  der „Grundfläche“  $\Phi$  ist gemeinsamer Spurpunkt von  $n$  übereinander liegenden (gelegentlich zusammenfallenden) Punkten  $P_1, P_2, \dots, P_n$  von  $F$ . Über dem Innern von  $\Phi$  liegen endlich viele Verzweigungspunkte von  $F$ , über den Rändern von  $\Phi$  jeweils  $\frac{n}{2}$  Faltungslinien und endlich viele Faltverzweigungspunkte. Der Durchlaufung von  $n$  Kurven auf  $F$ , die auf  $\Phi$  *dieselbe* ge-

<sup>1)</sup> Enumération des surfaces de Riemann régulières de genre un. Comptes rendus, t. 168, p. 677, 1919.

<sup>2)</sup> W. Scherrer, Zur Theorie der endlichen Gruppen topologischer Abbildungen von geschlossenen Flächen in sich, Habilit. Schrift, Commentarii Mathematici Helvetici, vol. 1, Heft 2 (1929), (S. 118).

<sup>3)</sup> Commentarii Mathematici Helvetici, vol. 8, Heft 1 (1935).

*schlossene* Spurkurve haben, ordnen wir folgendermaßen eine Substitution  $S$  zu: Die  $n$  übereinanderliegenden laufenden Punkte der Kurven führen von einer gewissen Ausgangslage  $(P_1, P_2, \dots, P_n)$  in die Endlage  $(P_{i_1}, P_{i_2}, \dots, P_{i_n})$  über. Die Substitution  $S$  ist die dadurch definierte Permutation der  $n$  Blätter und ist bestimmt durch die Art, in der die Blätter längs der Schnitte oder Ränder zusammengeheftet sind. (Ausführlichere Darlegung des Verfahrens auf S. 87 der unter<sup>2)</sup> zitierten Arbeit.) So erhalten wir eine endliche Gruppe von Substitutionen, die sogenannte Monodromiegruppe. Es gilt dann der „*Monodromie-Satz*“: „Die Monodromiegruppe einer regulären Überlagerungsfläche ist vollständig isomorph mit der Gruppe der Decktransformationen unter Vertauschung der Faktorenfolge.“ Man kann daher von der durch die Zusammenheftung der Blätter bestimmten Monodromiegruppe sofort auf die Decktransformationen schließen und umgekehrt. Als *Verzweigungssubstitutionen* kommen in Frage:

1.  $V_1, V_2 \dots V_v$  für die Umkreisung der Verzweigungspunkte (Überschreiten der nach den Verzweigungspunkten hingeführten Schnitte); ( $v$  = Anzahl der Verzweigungsstellen über  $\Phi$ ).
2.  $R_1, R_2, \dots, R_\rho$  für das Überschreiten der zu den Rändern hingeführenden Schnitte; ( $\rho$  = Anzahl der Ränder auf  $\Phi$ ).
3.  $S_{ik}$  für die Randübergänge auf dem  $k$ -ten Bogen des  $i$ -ten Randes.
4.  $\bar{V}_{ik}$  für das Umfahren der Faltverzweigungspunkte auf dem  $i$ -ten Rande.
5.  $A_1, B_1, A_2, B_2, \dots, A_\pi, B_\pi$  für das Überschreiten der Schnitte eines kanonischen Schnittsystems auf  $\Phi$  ( $\pi$  = Geschlecht von  $\Phi$ ), wenn  $\Phi$  zweiseitig ist;  
 $A_1, A_2, \dots, A_\pi$ , wenn  $\Phi$  einseitig ist.

Es bestehen nun folgende *Relationen*:

- (1) I  $V_1 V_2 \dots V_v R_1 R_2 \dots R_\rho A_1 B_1 A_1^{-1} B_1^{-1} \dots A_\pi B_\pi A_\pi^{-1} B_\pi^{-1} = 1$ ,  
falls  $\Phi$  zweiseitig ist;
- (2) I'  $V_1 V_2 \dots V_v R_1 R_2 \dots R_\rho A_1^2 A_2^2 \dots A_\pi^2 = 1$ ,  
falls  $\Phi$  einseitig ist.
- (3) II  $S_{i, \lambda+1} S_{i, \lambda} = \bar{V}_{i, \lambda} \quad \lambda = 1, 2, \dots, v_i - 1$ .
- (4) III  $R_i^{-1} S_{i, 1} R_i S_{i, v_i} = \bar{V}_{i, v_i}$ .

Falls ein Rand keine Faltverzweigung trägt, gilt

$$(5) \quad \text{III}' \quad R_i^{-1} S_i R_i S_i = 1 \quad (\text{es ist } S_i \text{ für } S_{i_1} \text{ gesetzt})$$

Falls Ränder auf  $\Phi$  (nicht aber auf  $F$ ) überhaupt vorhanden, gilt

$$(6) \quad \text{IV} \quad S_{ik}^2 = 1, \quad n \equiv 0 \pmod{2}.$$

Schließlich ist

$$(7) \quad \text{V} \quad V_i^{\lambda_i} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, v \quad (\lambda_i, \text{ die Ordnung der Verzweigung, ist Teiler von } n)$$

$$(8) \quad \text{VI} \quad \overline{V}_{ik}^{\mu_{ik}} = 1 \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, \varrho \\ k = 1, 2, \dots, v_i. \end{array}$$

Dazu kommt noch die erweiterte „Hurwitz-Relation“:

$$(9) \quad 2 - z = n(2 - \zeta) - \sum_{(i)} n \left(1 - \frac{1}{\lambda_i}\right) - \sum'_{(i,k)} \frac{n}{2} \left(1 - \frac{1}{\mu_{ik}}\right)$$

Hierbei bedeutet

$$(10) \quad z = 2p_2 + p_1 \text{ die Zusammenhangszahl der (geschlossenen) Überlagerungsfläche } F,$$

$$(11) \quad \zeta = 2\pi_2 + \pi_1 + \varrho \text{ diejenige der Modulfläche } \Phi.$$

$$(12) \quad \text{Ist } F \text{ zweiseitig, so ist } z = 2p, \quad (p = p_2 = \text{Geschlecht})$$

Ferner gilt:

$$(13) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{wenn } \Phi \text{ zweiseitig ist: } \zeta = 2\pi + \varrho, \quad (\pi = \text{Geschlecht}). \\ \text{wenn } \Phi \text{ einseitig ist: } \zeta = \pi + \varrho. \end{array} \right\}$$

Schließlich brauchen wir noch folgenden Satz:

Eine endlichblättrige Überlagerungsfläche ist dann und nur dann einseitig, wenn die Monodromiegruppe eine Relation enthält, in welcher die unter Berücksichtigung der Multiplizitäten festgestellte Anzahl der indikatrix-umkehrenden erzeugenden Operationen ungerade ist. Als indikatrixumkehrende Operationen sind dabei diejenigen Substitutionen bezeichnet, welche einem Randübergang oder einem einufrigen Rückkehrschnitt entsprechen.

Nach dieser Zusammenstellung der erforderlichen Grundlagen können wir uns unserer eigentlichen Aufgabe, der Herleitung der ebenen Kongruenzgruppen zuwenden.

Unter den „ebenen Kristallgruppen“ oder „ebenen Kongruenzgruppen“ versteht man bekanntlich diejenigen diskreten Gruppen von Bewegungen und Spiegelungen der Euklidischen Ebene in sich, die einen endlichen Fundamentalbereich besitzen. Wenn wir als äquivalente Punkte diejenigen Punkte der Ebene bezeichnen, die aus einem ersten unter ihnen durch Anwendung aller Operationen der Gruppe hervorgehen, so definieren wir den „Fundamentalbereich“ als einen Bereich der Ebene, der zu jedem Punkt derselben genau einen äquivalenten enthält.

Unsere Aufgabe besteht darin, alle überhaupt möglichen ebenen Kongruenzgruppen aufzuzählen. Dabei wird die grundlegende Tatsache als bereits bewiesen vorausgesetzt, daß jede solche zwei linear unabhängige Translationen enthält<sup>4</sup>). (Dieser in den metrischen Eigenschaften der euklidischen Ebene begründete Satz wurde von Bieberbach und von Frobenius auf die Kongruenzgruppen des  $n$ -dimensionalen euklidischen Raumes übertragen<sup>5</sup>.)

Es existieren also in einer Kongruenzgruppe  $\mathfrak{K}$  der Ebene zwei linear unabhängige „primitive Translationen“, aus denen die ganze Untergruppe  $\mathfrak{L}$  der Translationen erzeugt wird. Die hinsichtlich  $\mathfrak{L}$  äquivalenten Punkte bilden ein zweidimensionales Punktgitter. Als der zu  $\mathfrak{L}$  gehörige Fundamentalbereich kann das „primitive Parallelogramm“ gewählt werden, das durch die Vektoren der beiden primitiven Translationen aufgespannt wird.

Um die Kongruenzgruppen zu gewinnen, wollen wir alle hinsichtlich der Translationsgruppe  $\mathfrak{L}$  äquivalenten Punkte  $P_1, P_2, \dots$  in inf. identifizieren, d. h. als einen einzigen Punkt  $P$  einer Modulmannigfaltigkeit  $F$  betrachten. Das kommt darauf hinaus, daß wir an Stelle der ganzen Ebene ein einziges primitives Parallelogramm herausgreifen und je zwei gegenüberliegende Seiten desselben identifizieren, indem wir sie zusammenheften. Die dadurch gewonnene Modulmannigfaltigkeit  $F$  hat dann den Zusammenhang eines Torus. Die Kongruenzgruppen der Ebene erscheinen jetzt als Abbildungsgruppen des Torus in sich, wobei die invariante Untergruppe  $\mathfrak{L}$  der Translationen durch die Identität auf dem Torus dargestellt wird. Die gesuchten Abbildungsgruppen des Torus sind

---

<sup>4</sup>) Siehe z. B. *A. Speiser*, Die Theorie der Gruppen von endlicher Ordnung, Springer, Berlin, 1927, S. 96.

<sup>5</sup>) Göttinger Nachr. 1910; Math. Ann. Bd. 70; Berliner Sitzungsberichte 1911.

die Faktorgruppen  $\mathfrak{F} = \mathfrak{R}/\mathfrak{L}$  der Kongruenzgruppen  $\mathfrak{R}$ . Daß diese Gruppen  $\mathfrak{F}$  endlich sind, muß zwar schon beim Existenzbeweis der zwei primitiven Translationen bewiesen und gebraucht werden. Es ist leicht, sich nachträglich davon zu überzeugen. Es gibt nämlich in der Ebene einen Kreis  $K$  von nicht verschwindendem Radius, der keine zwei äquivalente Punkte enthält. Denn andernfalls wäre die Gruppe kontinuierlich und hätte keinen Fundamentalbereich. Dem Kreis  $K$  entspricht auf dem Torus ein nicht verschwindender Bereich  $B$ . Die zu ihm äquivalenten Bereiche dürfen einander nirgends überdecken und können daher auf der endlichen Torusfläche nur in endlicher Anzahl auftreten. Die Torusgruppe ist also endlich.

Unser Torus  $F$  wurde aus einem *primitiven Parallelogramm* gebildet. Jeder fixpunktfreien indikatrix-erhaltenden Transformation von  $F$  entspricht eine Translation der Ebene, die nicht eine ganzzahlige Linearkombination der zwei primitiven Translationen ist und deshalb nicht zur Kongruenzgruppe gehört. Wir müssen deswegen nur diejenigen Torusgruppen aufsuchen, die keine fixpunktfreien indikatrixerhaltenden Operationen enthalten. Das ist dasselbe, wie wenn wir von *allen* überhaupt möglichen Torusgruppen nur die Faktorgruppen aufzählen, die zu den invarianten Untergruppen fixpunktfreier indikatrixerhaltender Abbildungen gehören.

Wir gehen jetzt daran, die gewünschten Gruppen aufzustellen<sup>6)</sup>.

Dazu verwenden wir die Hurwitz-Relation für geschlossene Flächen (9):

$$2 - z = n(2 - \zeta) - \sum n \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) - \sum' \frac{n}{2} \left(1 - \frac{1}{\mu}\right).$$

Für den geschlossenen Torus ist  $p = 1$ ,  $z = 2p = 2$ .

$$0 = n(2 - \zeta) - \sum n \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) - \sum' \frac{n}{2} \left(1 - \frac{1}{\mu}\right)$$

$$0 = 2 - \zeta - \sum \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) - \sum' \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\mu}\right).$$

Daß die Blätterzahl  $n$  aus der Gleichung herausfällt, bedeutet, daß zwar nicht ganz beliebige  $n$ , aber doch beliebig viele verschiedene  $n$  Lösungen und Torusgruppen ergeben können.

<sup>6)</sup> Für das Verfahren siehe die unter <sup>2)</sup> zitierte Abhandlung, S. 91.

Setzen wir (vgl. Seite 2)  $\sum 1 = v$ ,  $\sum' 1 = v'$ , so folgt:

$$0 = 2 - \zeta - v + \sum \frac{1}{\lambda} - \frac{v'}{2} + \sum' \frac{1}{2\mu}$$

$$(14) \quad (H) \quad \sum \frac{1}{\lambda} + \sum' \frac{1}{2\mu} = \zeta + v + \frac{v'}{2} - 2.$$

Hier ist die linke Seite sicher nie negativ; dies gilt auch für die rechte:

$$(15) \quad \zeta + v + \frac{v'}{2} \geq 2$$

Andererseits folgt aus  $\lambda_i \geq 2$  und  $\mu_{ik} \geq 2$

$$(16) \quad \zeta + \frac{v}{2} + \frac{v'}{4} \leq 2.$$

Insbesondere ist

$$(17) \quad \zeta = 2\pi_2 + \pi_1 + \varrho \leq 2$$

$$(18) \quad \left. \begin{array}{l} v \leq 4 \\ v' \leq 8 \end{array} \right\}$$

Zur Aufzählung sämtlicher mit diesen Bedingungen verträglicher Lösungen von (H) setzen wir

$$(19) \quad \sigma = \zeta + v + v'$$

und bemerken, daß wegen (15)

$$(20) \quad \sigma \geq 2 \quad \text{ist.}$$

In der nachfolgenden Tabelle sind die Möglichkeiten nach aufsteigendem  $\sigma$  geordnet. Dabei sind bereits alle diejenigen Fälle weggelassen worden, die mit obigen Bedingungen unverträglich sind; ferner diejenigen, für welche die Hurwitz'sche Relation (H) keine Lösungen besitzt, und schließlich diejenigen, die sonstwie den Voraussetzungen widersprechen. So können z. B. Faltverzweigungen nur dann vorhanden sein ( $v' \neq 0$ ), falls die Modulfläche  $\Phi$  berandet ist:  $\varrho \neq 0$ . Für die übrigbleibenden Fälle liefert (H) eine oder mehrere Lösungen. So erhält man im ganzen genau 17 Möglichkeiten.

(21)

Nr.	$\sigma$	$\zeta$	$\pi_2$	$\pi_1$	$\rho$	$v$	$v'$	Lösungen von (H)
1	2	2	1	0	0	0	0	
2			0	2	0			
3			0	1	1			
4			0	0	2			
5	3	1	0	1	0	2	0	$\lambda_1 = \lambda_2 = 2$
6			0	0	1			$\lambda_1 = \lambda_2 = 2$
7			0	0	1	1	1	$\lambda = 3 \quad \mu = 3$
8								$\lambda = 4 \quad \mu = 2$
9		0	0	0	0	3	0	$\lambda_1 = 2 \quad \lambda_2 = 3 \quad \lambda_3 = 6$
10								$\lambda_1 = 2 \quad \lambda_2 = 4 \quad \lambda_3 = 4$
11								$\lambda_1 = 3 \quad \lambda_2 = 3 \quad \lambda_3 = 3$
12	4	1	0	0	1	1	2	$\lambda = 2 \quad \mu_1 = \mu_2 = 2$
13			0	0	1	0	3	$\mu_1 = 2 \quad \mu_2 = 3 \quad \mu_3 = 6$
14								$\mu_1 = 2 \quad \mu_2 = 4 \quad \mu_3 = 4$
15								$\mu_1 = 3 \quad \mu_2 = 3 \quad \mu_3 = 3$
16		0	0	0	0	4	0	$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 2$
17	5	1	0	0	1	0	4	$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = 2$

Es handelt sich jetzt darum, zu zeigen, daß die 17 gewonnenen Lösungen auch wirklich Torusgruppen liefern. Am einfachsten erreichen wir dies, indem wir von Fall zu Fall die Konstruktion der Überlagerungsfläche  $F$  durchführen, und zwar in der Weise eben, daß sie zu einem geschlossenen, zweiseitigen Torus wird. Da dieser ein *primitives Parallelogramm* darstellen soll, oder, anders ausgedrückt, da die zur Überlagerungsfläche gehörige Gruppe von Decktransformationen keine fixpunktfreien indikatrix-erhaltenden Abbildungen enthalten soll, muß die Überlagerungsfläche aus der *kleinsten* Anzahl von Blättern aufgebaut werden, welche überhaupt in Betracht fällt. An den nach dieser Vorschrift gewonnenen Modellen lassen sich die Eigenschaften der gesuchten Torusgruppen und der ihnen entsprechenden ebenen Kongruenzgruppen sofort erkennen. Jeder endlichen topologischen Torusgruppe entspricht zunächst eine unendliche topologische Gruppe der Ebene und dieser dann eine ebene Kongruenzgruppe. Denn alle auftretenden topologischen Abbildungen sind kongruenten Abbildungen der Ebene äquivalent, nämlich Drehungen, Spiegelungen, Gleitspiegelungen und Translationen.



Die Aufzählung der einzelnen Fälle soll möglichst kurz gehalten werden. Grundlagen dazu sind neben den oben gegebenen Vorschriften und der Tabelle (21) die Relationen (1) bis (8), der Monodromiesatz (S. 236) und der Satz über die Nichtorientierbarkeit der Überlagerungsfläche (S. 237).

## Einzeluntersuchung der 17 Lösungen

1.  $\Phi$  ist ein unberandeter Torus. Die Überlagerungsfläche  $F$  ist daher mit  $\Phi$  identisch und besteht deshalb aus einem einzigen Blatt. Die Torusgruppe besteht aus der Identität allein. Die zugehörige ebene Kongruenzgruppe ist die zweigliedrige Translationsgruppe.

2.  $\Phi$  ist eine Kugel mit zwei Kreuzhauben. Dem aus zwei einufrigen Rückkehrschnitten bestehenden Schnittsystem entsprechen die Substitutionen  $A_1$  und  $A_2$ . Die Relation I' (2),  $A_1^2 A_2^2 = 1$ , kann für  $n = 2$  erfüllt werden. Man hefte nämlich die zwei Blätter nach der Vorschrift zusammen:  $A_1^2 = 1$ ,  $A_2^2 = 1$ ,  $A_1 = A_2^*$ ). Die aufgeschnittene Fläche  $\Phi$  stelle man sich als Kugel mit zwei Löchern vor. Zwei solcher Exemplare sind in der Weise zu vereinigen, daß bei den zwei Paaren übereinanderliegender Ränder je ein Randpunkt des einen Exemplars mit dem diametral gegenüberliegenden des andern verknüpft wird. Die geschilderte Vereinigung geschieht am einfachsten, wenn man die eine der Kugeln um eine durch die Mitten der zwei Lochpaare gehende Achse um  $180^\circ$  dreht und dann übereinanderliegende Randpunkte verknüpft. Daß man so einen Torus erhält, sieht man leicht ein. Die Decktransformation führt zu einer fixpunktfreien, indikatrixumkehrenden Involution des Torus, einer Drehspiegelung. Den zwei sich nicht treffenden Drehzykeln auf ihm entspricht in der Ebene eine Schar paralleler Gleitspiegelachsen. Die gefundene Kongruenzgruppe besteht nur aus Gleitspiegelungen und Translationen.

3.  $\Phi$  ist eine Kugel mit einer Kreuzhaube und einem Rand. Relationen: I'  $RA^2 = 1$ , IV  $S^2 = 1$ . Sie sind erfüllt, wenn  $n = 2$ ,  $A = S$ ,  $R = 1$ . Die Verknüpfung der Blätter ist hieraus ohne weiteres zu erkennen.

Auf dem Torus: Ein Fixzykel und ein Drehzykel, die sich nicht treffen.

In der Ebene: Eine Schar paralleler Achsen, die abwechselnd Gleitspiegelachsen und Spiegelachsen sind, nebst Translationen. (Die Translationsgruppe, die ja immer als Untergruppe vorhanden ist, wird künftig nicht besonders angeführt.)

---

\*) Das willkürliche Beifügen von „Zusatzrelationen“ bedeutet gruppentheoretisch das Bilden einer Faktorgruppe. Siehe z. B. *Seifert & Threlfall*, Lehrbuch der Topologie, (Teubner 1934), S. 299.

4.  $\Phi$  ist ein ebener Kreisring.

*Relationen*: I.  $R_1 R_2 = 1$ , IV.  $S_1^2 = 1, S_2^2 = 1$ .

Brauchbare Lösung:  $n = 2, R_1 = R_2 = 1, S_1 = S_2$ .

*Modell*: Spiegelung des Torus an einer ihn in zwei Fixzykeln schneidenden Ebene. Dem entspricht für die ebene Kongruenzgruppe eine Schar paralleler Spiegelachsen.

5. Es gelten die *Relationen*: I'  $V_1 V_2 A^2 = 1$ , V.  $V_1^2 = 1, V_2^2 = 1$ . Hier reichen zwei Blätter nicht hin; denn sonst wäre  $A = V_1$  und  $F$  würde einseitig. Dagegen kommt man mit vier Blättern aus. Die Monodromiegruppe ist eine Vierergruppe und besteht aus den Operationen  $1, V_1 = V_2, A, AV_1$ . (Eine zyklische Gruppe  $G_4$  mit  $A$  als erzeugendem Element ist nicht möglich, da notwendig  $V_1 = V_2 = A^2$  wäre, was mit  $I'$  nicht verträglich ist.)

*Modell*: Wegen der Relation  $A^2 = 1$  sind die 4 Blätter längs des einufrigen Rückkehrschnittes zu je zweien vereinigt. Auf dem Torus existieren daher zwei sich nicht treffende Drehzykel, in der Ebene eine Schar paralleler Gleitspiegelachsen. Der Torus gestattet eine Drehung von  $180^\circ$  um eine Achse, die ihn in zwei mal zwei Punkten ( $V_1, V_2$ ) trifft. In der Ebene liegen demnach zwischen den erwähnten Gleitspiegelachsen Rotationszentren für Drehungen um  $180^\circ$ , sogenannte Digyren. Der indikatrixumkehrenden, fixpunktfreien Operation  $AV$  entsprechen auf dem Torus weitere zwei Drehzykel, welche die ersten zwei treffen. In der Ebene gibt es also eine zweite Schar paralleler Gleitspiegelachsen quer zur ersten Schar.

6. *Relationen*: I.  $V_1 V_2 R = 1$ , IV.  $S^2 = 1$ , V.  $V_1^2 = 1, V_2^2 = 1$ . Wir erhalten wieder eine Vierergruppe:  $1, V_1 = V_2, S, SV_1$ .

*Modell*: Die Spiegelung  $S$  mit zwei Fixzykeln, die sich nicht treffen, bedeutet die Spiegelung des Torus an einer ihn schneidenden Ebene.  $V_1 = V_2$  ist eine Drehung um eine Achse, die den Torus in 4 Punkten trifft, und die wir uns senkrecht auf der Spiegelebene denken können.  $SV_1$  ist eine indikatrixumkehrende, fixpunktfreie Operation, also eine Gleitspiegelung, die in unserem Modell als Spiegelung am Zentrum erscheint. Die zwei zugehörigen Drehzykel treffen die Fixzykel und werden außerdem von den Windungspunkten je in zwei Teile getrennt. Wir schließen daraus: Die ebene Kongruenzgruppe enthält Spiegelungen an einer Schar paralleler Achsen, ferner Gleitspiegelungen an einer Schar quer dazu liegender Achsen, schließlich Digyren, deren Zentren sich auf den Gleitspiegelachsen befinden.

7. *Relationen*: I.  $VR = 1$ , III.  $R^{-1}SR S = \bar{V}$ , IV.  $S^2 = 1$ , V.  $V^3 = 1$ , VI.  $\bar{V}^3 = 1$ .

Diesen Bedingungen kann mit  $n = 6$  als niedrigster Ordnung genügt werden, indem man die Heftung der 6 Blätter so vollzieht, daß  $\bar{V} = R$  wird. Dann definieren die Folgerelationen  $R^3 = 1$ ,  $S^2 = 1$  und  $RSRS = 1$  eine Diedergruppe  $G_6$ .

*Modell*: Die Abbildungsgruppe besitzt auf dem Torus einen Fixpunkt  $P_1 (\bar{V})$ . Seine Umgebung und die Umgebungen zweier weiterer Punkte  $P_2$  und  $P_3 (V)$  erfahren bei den indikatrizerhaltenden Operationen 3-zählige Drehungen in sich. Die übrigen Operationen sind für die Umgebung von  $P_1$  Spiegelungen an einem der drei durch  $P_1$  laufenden Fixzykel, und sie vertauschen die Drehzentren  $P_2$  und  $P_3$ .

In der ebenen Kongruenzgruppe befinden sich Spiegelungen an 3 Scharen paralleler Achsen, die untereinander Winkel von  $60^\circ$  bzw.  $120^\circ$  bilden und sich stets zu dreien schneiden. Diese Schnittpunkte sind auch Zentren 3-zähliger Rotationen; zwischen ihnen liegen doppelt so viele eigentliche Trigyre.

8. *Relationen*: I.  $VR = 1$ , III.  $R^{-1}SR S = \bar{V}$ , VI.  $S^2 = 1$ , V.  $V^4 = 1$ , VI.  $\bar{V}^2 = 1$ .

Wir heften 8 Blätter nach diesen Vorschriften und sorgen dafür, daß  $\bar{V} = R^2$  wird. Es resultiert eine Diedergruppe  $G_8$ , definiert durch die Relationen  $R^4 = 1$ ,  $S^2 = 1$ ,  $RSRS = 1$ .

*Modell*: Es existieren Abbildungen, bei denen die Umgebungen zweier Punkte 4-zählige Drehungen erfahren ( $V$ ), daneben Spiegelungen, welche diese Drehzentren vertauschen. Es gibt ferner zwei Punkte ( $\bar{V}$ ), in denen sich je ein Paar von Fixzykeln kreuzt, deren Umgebung also bei der Operation  $\bar{V}$  eine Rotation von  $180^\circ$  ausführt.

Die Kongruenzgruppe der Ebene enthält Rotationen von  $90^\circ$  um Zentren, die notwendig ein quadratisches Gitter bilden. Ferner existieren zwei Scharen einander kreuzender Spiegelachsen, die nicht durch die Tetragyrezentren laufen. Ihre Schnittpunkte sind Zentren von 2-zähligen Drehungen. Der Operation  $RS$  und anderen entsprechen Gleitspiegelungen.

9. *Relationen*: I.  $V_1 V_2 V_3 = 1$ , V.  $V_1^2 = 1$ ,  $V_2^3 = 1$ ,  $V_3^6 = 1$ . Diesen Relationen genügt eine zyklische Gruppe der Ordnung 6. Dabei ist  $V_1 = V_3^3$  und  $V_2 = V_3^2$ .

Die ebene Kongruenzgruppe enthält Drehungen von  $60^\circ$  (Hexagyren), deren Zentren ein rhombisches Gitter vom Achsenwinkel  $60^\circ$  erfüllen. Zwischen ihnen liegen doppelt so viele Trigyre und drei mal so viele Digyre.

10. *Relationen*: I.  $V_1V_2V_3 = 1$ , V.  $V_1^2 = 1$ ,  $V_2^2 = 1$ ,  $V_3^2 = 1$ . Hier existiert eine zyklische  $G_4$ , falls  $V_1 = V_2$  und  $V_2 = V_3$  genommen wird.

Die ebene Kongruenzgruppe enthält Rotationen von  $90^\circ$  um Zentren, welche in einem quadratischen Gitter angeordnet sind. Dazwischen befinden sich Digyre ( $V_1$ ).

11. *Relationen*: I.  $V_1V_2V_3 = 1$ , V.  $V_1^3 = 1$ ,  $V_2^3 = 1$ ,  $V_3^3 = 1$ . Wir machen  $V_1 = V_2 = V_3$  und erreichen eine zyklische  $G_3$ . Die ebene Kongruenzgruppe enthält Rotationen von  $120^\circ$ , Trigyre, deren Zentren ein rhombisches Gitter mit dem Achsenwinkel  $60^\circ$  erfüllen.

12. *Relationen*: I.  $VR = 1$ , II.  $S_2S_1 = \bar{V}_1$ , III.  $R^{-1}S_1RS_2 = \bar{V}_2$ , IV.  $S_1^2 = 1$ ,  $S_2^2 = 1$ , V.  $V^2 = 1$ , VI.  $\bar{V}_1^2 = 1$ ,  $\bar{V}_2^2 = 1$ .

Diese Relationen definieren eine Vierergruppe:

$$1, S_1, S_2, S_1S_2 = \bar{V}_1 = \bar{V}_2 = V = R. \quad n = 4.$$

*Modell*: Der Torus trägt zwei geschlossene Fixzykel, die sich *zweimal* überkreuzen ( $\bar{V}_1, \bar{V}_2!$ ). Wenn der erste z. B. den Torus als „Länglenkreis“ umschließt, so muß sich der zweite quer zum ersten zweimal um den Torus herumwinden. Der Torus ist dadurch in zwei Gebiete getrennt. In jedem Gebiet liegt ein Fixpunkt der Operation  $V$ , ein Digyrenzentrums ( $P_1, P_2$ ).  $S_1$  und  $S_2$  vertauschen diese beiden Punkte  $P_1$  und  $P_2$ . Eine gewisse, sich zweimal um den Torus herumwindende Linie, die den als Länglenkreis bezeichneten Fixzykel  $C_1$  zweimal überschreitet, zum andern Fixzykel  $C_2$  gewissermaßen „parallel“ verläuft, und dabei durch die beiden Punkte  $P_1$  und  $P_2$  hindurch geht, erfährt bei der Spiegelung an  $C_2$  eine fixpunktfreie Drehung in sich. Eine solche erfährt auch ein „Länglenkreis“, der durch  $P_1$  und  $P_2$  geht und den Fixzykel  $C_2$  zweimal überschreitet, bei der Spiegelung an  $C_1$ .

Die ebene Kongruenzgruppe enthält also zwei senkrecht zueinanderliegende Scharen von abwechselnd parallelen Spiegel- und Gleitspiegelachsen. Die Schnittpunkte zweier Spiegelachsen und diejenigen zweier Gleitspiegelachsen sind Zentren für 2-zählige Drehungen.

13. *Relationen:*

$$\text{I. } R = 1, \quad \text{II. } S_2 S_1 = \bar{V}_1, \quad S_3 S_2 = \bar{V}_2, \quad \text{III. } R^{-1} S_1 R S_3 = \bar{V}_3, \\ \text{IV. } S_1^2 = S_2^2 = S_3^2 = 1, \quad \text{VI. } \bar{V}_1^2 = 1, \quad \bar{V}_2^3 = 1, \quad \bar{V}_3^6 = 1.$$

Hier ist eine Diedergruppe der Ordnung 12 möglich. Ihre definierenden Relationen sind  $S_1^2 = 1$ ,  $S_3^2 = 1$ , und  $(S_1 S_3)^6 = 1$ . Beim Verknüpfen der Blätter muß man dafür sorgen, daß folgende Zusatzrelationen erfüllt werden:

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_3^3, \quad S_2 = \bar{V}_3^3 S_1, \quad \bar{V}_2 = \bar{V}_3^2.$$

Die ebene Kongruenzgruppe enthält Spiegelungen an 6 Scharen paralleler Achsen, deren Winkel untereinander Vielfache von  $30^\circ$  sind. Die Schnittpunkte von sechs Spiegelachsen sind Zentren von 6-zähligen Drehungen (Hexagyren). Sie bilden ein rhombisches Gitter vom Achsenwinkel  $60^\circ$ . Die Schnittpunkte von drei Spiegelachsen sind Zentren von Trigynen, diejenigen von zwei Achsen Zentren von Digynen.

14. *Relationen:*

$$\text{I. } R = 1, \quad \text{II. } S_2 S_1 = \bar{V}_1, \quad S_3 S_2 = \bar{V}_2, \quad \text{III. } R^{-1} S_1 R S_3 = \bar{V}_3, \\ \text{IV. } S_1^2 = S_2^2 = S_3^2 = 1, \quad \text{VI. } \bar{V}_1^2 = 1, \quad \bar{V}_2^4 = 1, \quad \bar{V}_3^4 = 1.$$

Hier gibt es eine Diedergruppe von der Ordnung 8:

$$S_1^2 = 1, \quad S_3^2 = 1, \quad (S_1 S_3)^4 = 1. \quad \text{Dabei ist } \bar{V}_1 = \bar{V}_3^2, \quad S_2 = \bar{V}_3^2 S_1, \quad \bar{V}_2 = \bar{V}_3.$$

*Modell:* Die Gruppe hat auf dem Torus zwei Fixpunkte, durch welche dieselben vier Fixzykel hindurchlaufen ( $\bar{V}_2, \bar{V}_3$ ). Ferner gibt es zwei Stellen, an denen sich je zwei Fixzykel kreuzen ( $\bar{V}_1$ ).

Die ebene Kongruenzgruppe enthält Spiegelungen an vier Scharen paralleler Achsen, die sich unter  $45^\circ$  bzw.  $90^\circ$  schneiden. Die Schnittpunkte von vier Achsen sind Zentren 4-zähliger Drehungen und bilden daher ein quadratisches Gitter. Die Schnittpunkte von nur zwei Achsen sind Zentren 2-zähliger Drehungen.

15. *Relationen:*

$$\text{I. } R = 1, \quad \text{II. } S_2 S_1 = \bar{V}_1, \quad S_3 S_2 = \bar{V}_2, \quad \text{III. } R^{-1} S_1 R S_3 = \bar{V}_3, \\ \text{IV. } S_1^2 = S_2^2 = S_3^2 = 1, \quad \text{VI. } \bar{V}_1^3 = 1, \quad \bar{V}_2^3 = 1, \quad \bar{V}_3^3 = 1. \quad \text{Dies gibt} \\ \text{eine Diedergruppe der Ordnung 6.}$$

*Modell:* Die Torusgruppe hat drei Fixpunkte ( $\bar{V}_1, \bar{V}_2, \bar{V}_3$ ), durch welche dieselben drei Fixzykel hindurchlaufen. Die Umgebungen dieser drei Punkte erfahren gleichzeitig 3-zählige Drehungen.

Die ebene Kongruenzgruppe enthält Spiegelungen an drei Scharen paralleler Achsen mit den Winkeln  $60^\circ$  und  $120^\circ$  gegeneinander. Die Achsen schneiden sich je zu dreien in Zentren von Trigynen. Diese bilden ein rhombisches Gitter mit dem Achsenwinkel  $60^\circ$ .

16. *Relationen*: I.  $V_1 V_2 V_3 V_4 = 1$ , V.  $V_1^2 = V_2^2 = V_3^2 = V_4^2 = 1$ .  
Diesen Relationen genügt eine Involution:  $n = 2$ ,  $V_1 = V_2 = V_3 = V_4$ .

*Modell*: Drehung von  $180^\circ$  um eine den Torus in 4 Punkten treffende Achse.

Die ebene Kongruenzgruppe besteht neben den Translationen nur aus Rotationen um  $180^\circ$ , Digynen.

17. *Relationen*:

I.  $R = 1$ , II.  $S_2 S_1 = \bar{V}_1$ ,  $S_3 S_2 = \bar{V}_2$ ,  $S_4 S_3 = \bar{V}_3$ , III.  $R^{-1} S_1 R S_4 = \bar{V}_4$ ,  
IV.  $S_1^2 = S_2^2 = S_3^2 = S_4^2 = 1$ , VI.  $\bar{V}_1^2 = \bar{V}_2^2 = \bar{V}_3^2 = \bar{V}_4^2 = 1$ .

Die Relationen definieren die Vierergruppe:

$$1, S_1 = S_3, S_2 = S_4, S_1 S_2 = \bar{V}_1 = \bar{V}_2 = \bar{V}_3 = \bar{V}_4.$$

*Modell*: Die Torusgruppe besteht aus den Spiegelungen an einer Ebene, die zwei „Breitenkreise“ herauschneidet, und an einer zweiten, senkrecht dazu stehenden Ebene.

Die ebene Kongruenzgruppe enthält Spiegelungen an zwei zu einander senkrecht stehenden Scharen paralleler Geraden. Die Schnittpunkte zweier Spiegelachsen sind Zentren 2-zähliger Drehungen.

*Schlußbemerkungen*: Durch die Konstruktion der Überlagerungsmodelle ist die Existenz der 17 Gruppen bestätigt worden. Ihre Operationen übersieht man anschaulich bequem an den 17 einfachen Ornamenttypen, wie sie z. B. in A. Speisers „Theorie der Gruppen von endlicher Ordnung“<sup>7)</sup> abgebildet sind.

Als Anwendungsbeispiel für die Gruppen *berandeter* Flächen ließen sich in ganz analoger Weise die endlichen Gruppen des Zylindermantels (d. h. des ebenen Kreisringes) aufstellen. Ihre Faktorgruppen liefern die 7 Kongruenzgruppen eines von zwei parallelen Geraden berandeten ebenen Streifens, also die Gruppen der ebenen Bortenornamente.

#### *Zur Literatur.*

Die hier auf einem neuen Wege hergeleiteten 17 ebenen Kongruenzgruppen wurden zuerst von *G. Pólya* aufgestellt (Zeitschr. f. Krist.,

<sup>7)</sup> Loc. cit. <sup>4)</sup> S. 87.

Bd. 60, 1924, S. 278), darauf von andern, z. B. von *P. Niggli*, bearbeitet, in der Hauptsache mit *euklidisch-geometrischen* Methoden.

Ich nenne ferner die Arbeit von *J. J. Burckhardt*, „Zur Theorie der Bewegungsgruppen“ (Comm. Math. Helv., Vol. 6, Heft 3, 1933/34), in welcher die Gruppen mit Hilfe eines *algebraisch-gruppentheoretischen* Verfahrens gewonnen werden.

Mit *topologischen* Methoden bestimmte *Brouwer* die indikatrix-erhaltenden endlichen Selbstabbildungsgruppen des Torus, womit indirekt bereits diejenigen 5 ebenen Kongruenz-Gruppen gewonnen sind, welche nur aus Translationen und Rotationen bestehen. Unser Beitrag bildet demnach eine Fortsetzung und Vervollständigung der *Brouwerschen* Arbeit (Fußnote<sup>1</sup>). Einen andern Weg — in Problemstellung und Methode — schlägt *F. Laves* ein („Ebenenteilung und Koordinationszahl“, Zeitschr. f. Krist., Bd. 78, Heft 3/4, 1931, S. 208). Er beweist mit kombinatorisch-arithmetischen Überlegungen, ohne gruppentheoretische Hilfsmittel, daß es genau 11 topologisch verschiedene Ebenenteilungen gibt, die aus endlichen Polygonen (gleicher Eckenzahl) bestehen, welche die unendliche euklidische Ebene lückenlos erfüllen und der Bedingung genügen, daß jedes Polygon in topologisch äquivalenter Art umgeben ist wie jedes andere Polygon. Die Behauptung gilt allerdings nur unter einer weiteren einschränkenden Bedingung, über die man sich in dem genannten Artikel orientieren möge.

Die *euklidisch-geometrischen* und *algebraisch-gruppentheoretischen* Methoden führten zur Lösung des entsprechenden Problems in *drei Dimensionen*, nämlich zur Aufzählung der 230 Raumgruppen, und sogar zur Aufstellung wesentlicher Sätze über die *n*-dimensionalen Raumgruppen. Mit *topologischen* Hilfsmitteln dagegen konnten dieselben bisher nicht hergeleitet werden, da ja die wichtigste topologische Frage, das Homöomorphie-Problem, für mehr als 2 Dimensionen nicht gelöst ist. Vielmehr zog, in umgekehrter Richtung, die Topologie Nutzen aus der Kenntnis der Raumgruppen. Auf diesem Wege wurde in den Arbeiten von *W. Hantzsche* und *H. Wendt* („Dreidimensionale euklidische Raumformen“, Math. Ann. Bd. 110, 1934, S. 593) und von *W. Nowacki* („Die euklidischen, dreidimensionalen, geschlossenen und offenen Raumformen“, Comm. Math. Helv., Vol. 7, Heft 2, 1934) das Problem der euklidischen Raumformen vollständig gelöst. Die ganze Entwicklung der Raumgruppen-Frage, samt Literaturangaben, findet man kurz zusammengefaßt in den erwähnten Arbeiten von *Burckhardt* und *Nowacki*.

Für die topologischen Fragen verweise ich besonders noch auf das Lehr-

buch der Topologie von *Seifert* und *Threlfall* (Teubner 1934), für das Gruppentheoretische auf dessen Schlußkapitel.

Die vorliegende Arbeit bildete ursprünglich einen selbständigen Bestandteil meiner Berner Dissertation („Beiträge zur Theorie der endlichen Gruppen topologischer Abbildungen von Flächen in sich“, datiert vom 19. Juli 1933), deren erster Teil unter dem Titel „Die maximalen Ordnungen periodischer topologischer Abbildungen geschlossener Flächen in sich“ in den *Comm. Math. Helv.* (Vol. 8, Heft 1, 1935) gedruckt wurde. Die seit 1933 erschienene Literatur konnte deshalb nur noch in diesem Anhang berücksichtigt werden.

(Eingegangen den 25. April 1935.)