

Maximale Toroide und singuläre Elemente in geschlossenen Lieschen Gruppen.

Autor(en): **Hopf, Heinz**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Commentarii Mathematici Helvetici**

Band (Jahr): **15 (1942-1943)**

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-14880>

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.

Maximale Toroide und singuläre Elemente in geschlossenen Lieschen Gruppen

Von HEINZ HOPF, Zürich

Die nachstehenden Ausführungen haben den Zweck, zu den in Nr. 6 formulierten Sätzen, die nicht neu sind, auf einem Wege zu gelangen, der unter Vermeidung der infinitesimalen Theorie der halb-einfachen Gruppen ganz in dem Bereich elementarer geometrisch-algebraischer Begriffe verläuft, dem die Sätze selbst angehören. Auf einem solchen Wege ist vor kurzem *E. Stiefel* in demjenigen Teil (§ 2) seiner interessanten Abhandlung [1] über die Beziehungen zwischen geschlossenen Lieschen Gruppen und diskontinuierlichen Bewegungsgruppen vorgegangen, in welchem einer gegebenen Lieschen Gruppe G eine diskontinuierliche Raumgruppe Γ zugeordnet wird; an einer Stelle macht er aber einen Abstecher in die infinitesimale Theorie ([1], § 2, Nr. 7); der Wunsch, diesen Abstecher zu vermeiden, wird durch die vorliegende Note erfüllt. Die gewünschte Darstellung gelingt, ohne daß etwas wesentlich Neues bewiesen würde, durch geeignete Anordnung bekannter Tatsachen, wobei es aber wichtig ist, daß man eine Arbeit von H. Samelson [2] heranzieht (Nr. 2); dabei ergeben sich auch noch einige andere Abänderungen des Gedankenganges von Stiefel, die mir vorteilhaft erscheinen. Außer aus den genannten Arbeiten [1], [2] werden noch aus zwei anderen Arbeiten [3], [4] kleine Teile benutzt. Einiges aus den Arbeiten [1]—[4] habe ich im folgenden noch einmal ausführlich vorgebracht, teils um kleiner Abänderungen in der Formulierung willen, die für unseren Zweck nötig waren, teils auch darum, um eine einigermaßen in sich geschlossene Darstellung zu erhalten, deren Lektüre nicht zu unbequem ist. Eine Grundlage für die erwähnten Arbeiten wie für die vorliegende ist der Satz, daß jede kompakte und zusammenhängende, Abelsche, Liesche Gruppe ein Toroid ist, d. h. das direkte Produkt von endlich vielen Kreisdrehungsgruppen. Außer diesem Satz werden nur einige Hauptsätze von prinzipiellem Charakter aus der Theorie der Lieschen Gruppen benötigt, wie z. B.: die Existenz kanonischer Koordinaten in der Umgebung des Eins-Elementes; der Satz, daß jede abgeschlossene Untergruppe einer geschlossenen Lieschen Gruppe selbst aus einer Lieschen Gruppe und allenfalls endlich vielen Nebengruppen derselben besteht; der Satz von Weyl, daß jede kompakte Gruppe linearer Transformationen bei Einführung geeigneter Koordinaten eine orthogonale Gruppe ist.

Die erwähnten Arbeiten, aus denen wir Teile benutzen werden, sind die folgenden:

[1] *E. Stiefel*, Über eine Beziehung zwischen geschlossenen Lieschen Gruppen und diskontinuierlichen Bewegungsgruppen euklidischer Räume und ihre Anwendung auf die Aufzählung der einfachen Lieschen Gruppen, *Comment. Math. Helvet.* **14** (1942), 350—380.

[2] *H. Samelson*, Über die Sphären, die als Gruppenräume auftreten, *ibidem* **13** (1941), 144—155.

[3] *H. Hopf*, Über den Rang geschlossener Liescher Gruppen, *ibidem* **13** (1941), 119—143.

[4] *H. Hopf* und *H. Samelson*, Ein Satz über die Wirkungsräume geschlossener Liescher Gruppen, *ibidem* **13** (1941), 240—251.

Der Inhalt einer in denselben Rahmen gehörigen Note von *A. Weil*, *Démonstration topologique d'un théorème fondamental de Cartan*, *C. R.* **200** (1935), 518—520, ist in [4] enthalten.

1. Maximale Toroide; die Gruppe Φ . Es sei immer G eine geschlossene Liesche Gruppe, n ihre Dimension. In G gibt es Toroide, nämlich die abgeschlossenen Hüllen der einparametrischen Untergruppen; ein Toroid, das in keinem höherdimensionalen Toroid von G enthalten ist, heißt maximal. Es sei immer T ein festes maximales Toroid in G , l seine Dimension.

1.1. Ist T' ein (beliebiges) Toroid in G und a ein Element von G , das mit allen Elementen von T' vertauschbar ist, so gibt es in G ein Toroid, das sowohl T' als auch a enthält.

Beweis: [3], Nr. 23. — Aus 1.1 folgt (l. c.):

1.1'. Ein maximales Toroid T ist zugleich maximale Abelsche Untergruppe von G , d. h. es ist nicht echte Untergruppe einer Abelschen Untergruppe von G .

Für die Dimensionen n und l von G und T gilt ([3], Nr. 27):

1.2. $n \equiv l \pmod{2}$.

Der Hilfssatz 2 in [4], Nr. 4 besagt:

1.3. Der Normalisator N_T von T — also die Gruppe derjenigen $a \in G$, für welche $a^{-1}Ta = T$ ist — hat die Dimension l ; daher besitzt N_T eine endliche Restklassenzerlegung mod. T :

$$N_T = T + a_1T + \cdots + a_{s-1}T.$$

1.4. Definition: Φ sei die Gruppe derjenigen Automorphismen von T , welche durch innere Automorphismen von G bewirkt werden.

Die Automorphismen aus Φ werden durch diejenigen Automorphismen $x \rightarrow a^{-1}xa$ von G bewirkt, für welche $a \in N_T$ ist; jedem $a \in N_T$ ist also ein $h(a) \in \Phi$ zugeordnet, und h ist offenbar ein Homomorphismus von N_T auf Φ ; ist $a \in T$, so ist $h(a)$ das Einselement von Φ ; ist umgekehrt $h(a)$ das Einselement, so ist $a^{-1}xa = x$ für alle $x \in T$, also ist die von T und a erzeugte Gruppe Abelsch, also ist nach 1.1' $a \in T$. Damit ist gezeigt:

1.5. Die Gruppe Φ ist isomorph mit der Faktorgruppe N_T/T ; sie ist also endlich (1.3), und zwar ist ihre Ordnung gleich der Anzahl der Komponenten von N_T .¹⁾

Es sei jetzt h eine homomorphe Abbildung von G auf eine Liesche Gruppe G_1 , und der Kern²⁾ H von h sei in T enthalten; dann gelten die folgenden beiden Sätze:

1.6. $T_1 = h(T)$ ist maximales Toroid in G_1 .

1.7. Die Gruppe Φ_1 , die für G_1 und T_1 dieselbe Bedeutung hat wie Φ für G und T , ist mit Φ isomorph.

Beweis: Aus $H \subset T$ folgt leicht: $T = h^{-1}(T_1)$, $N_T = h^{-1}(N_{T_1})$. Ferner ist klar, daß T_1 kompakt, zusammenhängend und Abelsch, also ein Toroid ist. Um zu zeigen, daß T_1 maximal ist, nehmen wir eine Umgebung V von T , die außer den Elementen von T kein Element von N_T enthält; nach 1.3 gibt es solche V . Aus $H \subset T$ folgt, daß $h(V)$ eine Umgebung der Eins von G_1 ist. a_1 sei ein beliebiges Element in $h(V)$, das mit T_1 vertauschbar ist; ist dann a ein Element von V mit $h(a) = a_1$, so ist $a \in h^{-1}(N_{T_1}) = N_T$, also $a \in T$; folglich ist $a_1 \in T_1$; das bedeutet, daß T_1 maximal ist. Da, wie schon festgestellt, $h^{-1}(T_1) = T$, $h^{-1}(N_{T_1}) = N_T$ ist, ist $N_{T_1}/T_1 \cong N_T/T$, also nach 1.5 $\Phi_1 \cong \Phi$.

1.8. Es gilt der Satz, daß je zwei maximale Toroide in G miteinander konjugiert sind ([4], Nr. 4, Hilfssatz 4); daraus folgt, daß die Zahl l und die Struktur der Gruppe Φ vollständig durch G bestimmt sind; l heißt der Rang von G . Wir werden diese Tatsachen aber nicht benutzen.

¹⁾ In [4], Nr. 7, wird auf einen Zusammenhang zwischen der Gruppe N_T/T und topologischen Eigenschaften der Wirkungsräume von G hingewiesen. — Man kann auch zeigen, daß der Raum G/T einfach zusammenhängend ist; daraus folgt leicht, daß die Fundamentalgruppe des Raumes G/N_T , dessen Überlagerungsraum G/T ist, mit N_T/T und nach dem obigen Satz 1.5 daher mit Φ isomorph ist. Aus unserer Bemerkung 1.8 ergibt sich, daß G/N_T mit dem Raum aller maximalen Toroide in G homöomorph ist. Nach [4], Nr. 7, hat G/N_T die Charakteristik $+1$; mit Hilfe unseres späteren Satzes 5.4 läßt sich beweisen, daß diese Mannigfaltigkeit nicht-orientierbar ist.

²⁾ Der Kern eines Homomorphismus ist das Urbild des Einselementes der Bildgruppe.

2. *Gruppen vom Range 1.* G_1 sei eine Gruppe, in der es ein maximales Toroid T_1 von der Dimension 1 gibt; T_1 ist also eine Kreisdrehungsgruppe und mit der Kreislinie homöomorph. Die Dimension von G_1 sei n_1 ; es sei $n_1 > 1$, also G_1 nicht identisch mit T_1 . Die gemäß 1.4 zu G_1 und T_1 gehörige Gruppe heiße Φ_1 . Wir behaupten:

2.1. Φ_1 hat die Ordnung 2.

2.2. $n_1 = 3$.

Die nachstehenden Beweise sind bis auf kleine Änderungen der Arbeit [2] entnommen.

Beweis von 2.1: r sei eine der beiden orientierten Richtungen, die im Einselement e an T_1 tangential sind. Den inneren Automorphismus $x \rightarrow axa^{-1}$ von G_1 nennen wir A_a . Wenn a und b derselben Nebengruppe aT_1 von T_1 angehören, so ist $A_a(t) = A_b(t)$ für alle $t \in T_1$ und daher $A_a(r) = A_b(r)$; umgekehrt: wenn $A_a(r) = A_b(r)$ ist, so ist $A_a(t) = A_b(t)$ für $t \in T_1$, also $a^{-1}b$ mit allen $t \in T_1$ vertauschbar und nach 1.1' daher $a^{-1}b \in T_1$, $b \in aT_1$. Durch $f(aT_1) = A_a(r)$ ist also eine eineindeutige und natürlich stetige Abbildung f des Nebengruppenraumes³⁾ G_1/T_1 in die $(n_1 - 1)$ -dimensionale Sphäre S der orientierten Richtungen im Punkte e erklärt. Da $n_1 > 1$ ist, ist S zusammenhängend; S und G_1/T_1 sind geschlossene Mannigfaltigkeiten der Dimension $n_1 - 1$; daher folgt aus bekannten Sätzen (z. B. über den Abbildungsgrad), daß f eine Homöomorphie von G_1/T_1 auf die ganze Sphäre S ist. Folglich gibt es ein solches $a_1 \in G_1$, daß $A_{a_1}(r) = f(a_1T)$ die zu r entgegengesetzte Richtung ist; dann bewirkt A_{a_1} die Inversion von T_1 , die jedes t durch t^{-1} ersetzt. Φ_1 enthält also außer der Identität die Inversion; andere Automorphismen der Kreisdrehungsgruppe T_1 gibt es nicht; mithin gilt 2.1.

Beweis von 2.2: Dem Beweis von 2.1 entnehmen wir zwei Tatsachen: 1. G_1/T_1 ist mit der $(n_1 - 1)$ -dimensionalen Sphäre S homöomorph; 2. wenn ein Element a stetig von e in das oben genannte Element a_1 läuft, so stellt, wenn man T_1 als gerichteten geschlossenen Weg auffaßt, die Schar der Wege $A_a(T_1)$ eine Deformation von T_1 in den entgegengesetzt gerichteten Weg, den wir $-T_1$ nennen, dar; hierfür wollen wir kurz sagen: T_1 wird „umgedreht“. Drittens stellen wir noch fest: da n_1 nach 1.2 ungerade ist, ist $n_1 \geq 3$.

Damit ist die Behauptung 2.2 auf den folgenden topologischen Hilfsatz A zurückgeführt: „Die Mannigfaltigkeit G_1 , deren Dimension $n_1 \geq 3$

³⁾ Wegen der Begriffe „Nebengruppenraum“, „Wirkungsraum“, „Faserraum“ vgl. man z. B. [4], besonders Nr. 3, und [2], Nr. 2b.

ist, ist derart gefasert³⁾ — in die Nebengruppen von T_1 —, daß (a) die Fasern einfach geschlossene Linien sind, daß (b) die Faser T_1 umgedreht werden kann, und daß (c) der Faserraum G_1/T_1 die $(n_1 - 1)$ -dimensionale Sphäre S ist; dann ist $n_1 = 3$.“

P sei die Projektion von G_1 auf S , die jedem $x \in G_1$ denjenigen Punkt $P(x) \in S$ zuordnet, welcher der Faser entspricht, auf der x liegt. Wäre $n_1 > 3$, so wäre, da man die bei dem Umdrehen von T_1 überstrichene Punktmenge M von G_1 als zweidimensionales krummes Polyeder annehmen darf, $P(M)$ ein echter Teil von S , also in einer $(n_1 - 1)$ -dimensionalen (sphärischen) Vollkugel V enthalten; das Umdrehen von T_1 wäre also in einem Teil R von G_1 möglich, welcher derart gefasert ist, daß der Faserraum R/T_1 eine Vollkugel ist. Damit ist der Hilfssatz A auf den folgenden Hilfssatz B zurückgeführt: „Ist der Raum R derart in einfach geschlossene Linien gefasert, daß der Faserraum R/T_1 eine Vollkugel V ist, so kann die Faser T_1 in R nicht umgedreht werden.“

Nun folgt aber aus der Voraussetzung, daß $R/T_1 = V$ eine Vollkugel ist, nach einem wichtigen und leicht beweisbaren Satz von Feldbau⁴⁾: „ R ist das topologische Produkt $V \times F$, wobei F mit den Fasern homöomorph ist; und zwar entsprechen den Fasern von R die Fasern $p \times F$ von $V \times F$, wobei p die Punkte von V durchläuft.“ In unserem Falle ist F eine Kreislinie; dann kann in $V \times F$ ein Weg $p \times F$ nicht umgedreht werden, da er ein erzeugendes Element der unendlich zyklischen Fundamentalgruppe von $V \times F$ darstellt. Folglich gilt der Hilfssatz B und mithin auch der Satz 2.2.

Der Hilfssatz B läßt sich auch folgendermaßen ohne den Satz von Feldbau beweisen: Könnte T_1 in R umgedreht werden, so könnte man einen Kreisring K , der von den gleichsinnig gerichteten Kreisen C_1 und C_2 berandet wird, durch eine Abbildung f derart in den Raum R abbilden, daß $f(C_1) = T_1$, $f(C_2) = -T_1$ wäre. P sei wie oben die Projektion von R auf V ; dann wäre $Pf = g$ eine Abbildung von K in V mit $g(C_i) = O$, wobei O der Punkt $P(T_1)$ ist ($i = 1, 2$); da V eine Vollkugel ist, ließe sich das Bild $g(K)$ unter Festhaltung von O auf den Punkt O zusammenziehen, d. h. es gäbe eine Abbildungsschar g_τ , $0 \leq \tau \leq 1$, von K in V mit $g_0 = g$, $g_\tau(y) = O$ für $y \in C_i$ ($i = 1, 2$) und alle τ , $g_1(y) = O$ für $y \in K$. Nach einem grundlegenden und leicht beweisbaren Lemma aus der Theorie der stetigen Abbildungen in gefaserte Räume⁵⁾ gäbe es dann auch eine Abbildungsschar f_τ , $0 \leq \tau \leq 1$, von K in R mit $Pf_\tau = g_\tau$ für alle τ und $f_0 = f$; dabei wäre, wenn \bar{T}_1 die Menge der Punkte des gerichteten Weges T_1 bezeichnet,

⁴⁾ *J. Feldbau*, Sur la classification des espaces fibrés, C. R. **208** (1939), 1621 — 1623, Théorème A.

⁵⁾ *B. Eckmann*, Zur Homotopietheorie gefaserner Räume, Comment. Math. Helvet. **14** (1941), 141—192; besonders 155—156.

(1) $f_\tau(C_i) \subset \overline{T}_1$ für $i = 1, 2$ und alle τ , (2) $f_1(K) \subset \overline{T}_1$.

(1) bedeutet: der Weg $f_0(C_i) = \pm T_1$ ist auf \overline{T}_1 homotop mit dem Wege $f_1(C_i)$;
 (2) bedeutet: $f_1(C_1)$ ist auf \overline{T}_1 homotop zu $f_1(C_2)$. Also wären T_1 und $-T_1$ einander homotop auf \overline{T}_1 , der Weg T_1 könnte also auf \overline{T}_1 umgedreht werden. Da dies unmöglich ist, ist die Annahme, T_1 könne in R umgedreht werden, falsch.

3. Die singulären Elemente. G sei jetzt wieder eine beliebige Gruppe wie in Nr. 1; auch T, n, l, Φ sollen dieselben Bedeutungen haben wie dort.

3.1. Definition: Das Element t von T heißt regulär, wenn es auf keinem von T verschiedenen maximalen Toroid von G liegt, und singulär, wenn es außer auf T noch auf einem anderen maximalen Toroid liegt.

Nach [3], Nr. 25, ist diese Definition mit der folgenden gleichwertig:

3.2. t ist regulär oder singulär, jenachdem sein Normalisator die Dimension l oder größere Dimension hat.

In [1], § 2, Nr. 3, wird folgendes gezeigt: m sei die gemäß 1.2 durch $n - l = 2m$ bestimmte ganze Zahl; jedem $t \in T$ sind m Kreisdrehungen $\vartheta_1(t), \dots, \vartheta_m(t)$ zugeordnet; $\vartheta_1, \dots, \vartheta_m$ sind homomorphe Abbildungen von T in die Kreisdrehungsgruppe D ; keine von ihnen ist die triviale Abbildung auf das Einselement von D ; wenn das Element t den Kernen²⁾ von genau ν der Homomorphismen ϑ_i angehört, so hat sein Normalisator die Dimension $l + 2\nu$.⁶⁾

Aus der letzten Tatsache und aus 3.2 folgt, daß t dann und nur dann singulär ist, wenn t wenigstens einem der Kerne angehört. Die Kerne mögen U_1, \dots, U_m heißen; sie sind abgeschlossene Untergruppen von T ; da D eindimensional und kein Homomorphismus ϑ_i trivial ist, sind die U_i $(l - 1)$ -dimensional. Es gelten somit die folgenden beiden Sätze:

3.3. Die Menge der singulären Elemente von T ist die Vereinigungsmenge der Elemente von m abgeschlossenen Untergruppen U_1, \dots, U_m von T ; jede Gruppe U_i hat die Dimension $l - 1$; es ist $2m = n - l$.

3.4. Wenn das Element t genau ν der Gruppen U_i angehört ($\nu \geq 0$), so hat sein Normalisator die Dimension $l + 2\nu$.

Zu 3.3 ist zu bemerken: es ist noch nicht bewiesen, daß die Gruppen

⁶⁾ In [1], l. c., werden nicht die homomorphen Abbildungen mit ϑ_i bezeichnet, sondern unter $\vartheta_i(t)$ wird die durch 2π dividierte Winkelkoordinate der Drehung verstanden, die durch den betreffenden Homomorphismus dem Element t zugeordnet ist; daß keine der Abbildungen trivial ist, bedeutet dann: kein ϑ_i verschwindet identisch mod. 1; und der Kern des Homomorphismus ist dann die Menge derjenigen t , für welche ϑ_i mod. 1 verschwindet.

U_1, \dots, U_m sämtlich voneinander verschieden sind; dies wird erst in Nr. 5 gezeigt werden. In [1] ist der betreffende Beweis die eingangs erwähnte Stelle, an welcher die infinitesimale Theorie der halb-einfachen Gruppen herangezogen wird.

Da die Transformationen aus Φ durch Automorphismen von G bewirkt werden, ergibt sich aus der Definition 3.1:

3.5. Die Menge der singulären Elemente, also die Vereinigung der Gruppen U_i , wird durch jede Transformation aus Φ auf sich abgebildet.

In bezug auf kanonische Koordinaten, die in einer Umgebung des Einselementes e gelten, ist T eine l -dimensionale Ebene, die e enthält, und die U_i sind $(l - 1)$ -dimensionale Ebenen in T , die e enthalten; die Ebenen U_i zerlegen T — in der Umgebung von e — in endlich viele Gebiete B_1, B_2, \dots . Die inneren Automorphismen von G sind in bezug auf die kanonischen Koordinaten affine Abbildungen, die e festhalten; diejenigen Automorphismen, welche zu Φ gehören, transformieren T in sich; da sie nach 3.5 die Ebenen U_i permutieren, permutieren sie auch die Gebiete B_j . Es gilt nun folgender Satz ([1], § 2, Satz 11):

3.6. Durch eine Transformation $\varphi \in \Phi$, die nicht die Identität ist, wird kein Gebiet B_j auf sich abgebildet.

Beweis ([1], l. c., sowie Satz 6): B_j werde durch $\varphi \in \Phi$ auf sich abgebildet. Als Element der endlichen Gruppe Φ hat φ endliche Ordnung. t sei ein Punkt von B_j , seine Bilder bei den endlich vielen Potenzen von φ seien t_h , und der Schwerpunkt der t_h sei s ; alle diese Punkte liegen in B_j ; (t wird in hinreichender Nähe von e angenommen). Da das System der t_h durch φ auf sich abgebildet wird, ist s Fixpunkt der affinen Abbildung φ ; daher ist auch jeder Punkt der Strecke S , die e mit s verbindet, Fixpunkt von φ . Die Strecke S erzeugt eine einparametrische Untergruppe von G ; deren abgeschlossene Hülle ist ein Toroid T' . Die Abbildung φ werde durch den inneren Automorphismus $x \rightarrow a^{-1}xa$ von G bewirkt; daß die Elemente von S Fixpunkte von φ sind, bedeutet: a ist mit jedem Element von S vertauschbar; folglich ist a auch mit jedem Element von T' vertauschbar. Nach 1.1 gibt es daher ein Toroid T'' , das a und T' , also auch s , enthält. Nun ist aber das Element s , da es in B_j , und daher auf keinem U_i liegt, reguläres Element; nach 3.1 ist daher $T'' \subset T$, da andernfalls s sowohl auf T als auch auf einem von T verschiedenen maximalen Toroide, das T'' enthält, läge. Da $T'' \subset T$ ist, ist $a \in T$; das bedeutet: φ ist die identische Abbildung von T .

4. Hilfssätze. Wir schalten hier drei einfache allgemeine Hilfssätze über Toroide ein; die Gruppe G kommt dabei nicht vor.

T sei ein l -dimensionales Toroid, U eine abgeschlossene $(l - 1)$ -dimensionale Untergruppe von T ; die Eins-Komponente von U — d. h. die Komponente, die das Einselement enthält — heiße U' ; sie ist ein $(l - 1)$ -dimensionales Toroid; die Faktorgruppe U/U' ist infolge der Abgeschlossenheit von U endlich; ihre Ordnung, also die Anzahl der Komponenten von U , heiße p .

4.1. Die Faktorgruppe U/U' ist zyklisch.

Denn U/U' ist Untergruppe der Gruppe T/U' , die eindimensional, kompakt und zusammenhängend, also die Kreisrotationsgruppe ist.

Jedes Toroid enthält nach dem Kroneckerschen Approximationssatz erzeugende Elemente, d. h. solche, deren Potenzen überall dicht in dem Toroid liegen. Es sei a ein erzeugendes Element von U' ; ferner sei die Nebengruppe U^* von U' ein (im gewöhnlichen Sinne) erzeugendes Element der nach 4.1 zyklischen endlichen Gruppe U/U' und b ein Element aus U^* . Dann ist $a b^{-p} \in U'$; aus den bekannten Rechenregeln in Toroiden geht hervor, daß es in U' ein Element c mit $c^p = a b^{-p}$ gibt (cf. [3], Nr. 19). Dann ist für jeden Exponenten k , wenn wir ihn in der Form $k = pq + r$, $0 \leq r < p$, darstellen und wenn wir $bc = d$ setzen: $d^k = a^q d^r$; die Potenzen a^q liegen überall dicht in U' , und die p Potenzen d^r liegen in den p Nebengruppen von U mod. U' ; daher liegen die Potenzen des Elementes d überall dicht in U . Damit ist gezeigt:

4.2. U enthält ein erzeugendes Element, d. h. ein solches, dessen Potenzen überall dicht in U liegen.

Ferner behaupten wir:

4.3. Wenn es einen Automorphismus von T gibt, der die Ordnung 2 hat und jedes Element von U festläßt, so ist $p = 1$ oder $p = 2$.

Beweis: Der Automorphismus φ erfülle die Voraussetzungen. Da jede Matrix der Ordnung 2 den Eigenwert -1 hat, gibt es im Punkt e , dem Einselement von T , eine Richtung, die durch φ in die ihr entgegengesetzte Richtung transformiert wird; die einparametrische Gruppe C , die diese Tangentialrichtung hat, erleidet daher bei φ die Inversion, d. h. es ist $\varphi(c) = c^{-1}$ für $c \in C$. Da φ die Elemente von U' festhält, ist C nicht in U' enthalten; folglich ist die von U' und C erzeugte Gruppe l -dimensional, also mit T identisch; insbesondere läßt sich daher jedes Element $u \in U$ in der Form $u = u_0 c$, $u_0 \in U'$, $c \in C$, darstellen; aus $c = u u_0^{-1} \in U$ folgt

$\varphi(c) = c$; da andererseits $\varphi(c) = c^{-1}$ ist, ist $c^2 = e$; daher ist $u^2 = u_0^2$, also $u^2 \in U'$ für jedes $u \in U$. Dies bedeutet: die (zyklische) Faktorgruppe U/U' hat die Ordnung 1 oder die Ordnung 2, w.z.b.w.

5. Fortsetzung der Untersuchung der Menge der singulären Elemente und der Gruppe Φ . Es sei wieder T ein maximales, l -dimensionales Toroid in G ; seine Untergruppen U_i sind wie in Nr. 3 erklärt; das $(l - 1)$ -dimensionale Toroid, das die Eins-Komponente von U_i ist, heiße U'_i .

a sei, bei festem i , erzeugendes Element des Toroids U'_i ; sein Normalisator sei N_a , und dessen Eins-Komponente sei N'_a ; die Dimension von N_a , die zugleich die Dimension von N'_a ist, sei n' . Nach 3.2 ist $n' > l$. Es ist $T \subset N'_a$; T ist also auch maximales Toroid in N'_a . Das Element a und daher auch das ganze Toroid U'_i gehören zum Zentrum von N_a ; da somit U'_i Normalteiler von N'_a ist, existiert die Gruppe $G_1 = N'_a/U'_i$, und es liegt eine homomorphe Abbildung h von N'_a auf G_1 mit dem Kern U'_i vor. Die Dimension von G_1 ist $n_1 = n' - (l - 1) > 1$; nach 1.6 ist $T_1 = T/U'_i$ maximales Toroid in G_1 ; seine Dimension ist $l - (l - 1) = 1$; nach 2.2 ist daher $n_1 = 3$, also $n' = l + 2$. Dies bedeutet nach 3.4, daß a keinem U_j mit $j \neq i$ angehört. Damit ist gezeigt:

5.1. Für $j \neq i$ ist $U_j \neq U_i$ und $U'_j \neq U'_i$.

Die Tangentialebenen von U_j und U_i im Punkte e sind $(l - 1)$ -dimensional und nach 5.1 voneinander verschieden; ihr Durchschnitt ist daher $(l - 2)$ -dimensional; mithin gilt folgende Verschärfung von 5.1:

5.1'. Für $j \neq i$ ist der Durchschnitt von U_j und U_i eine $(l - 2)$ -dimensionale Gruppe.

Die gemäß 1.4 zu der Gruppe G_1 und ihrem maximalen Toroid T_1 gehörige Gruppe Φ_1 hat nach 2.1 die Ordnung 2; nach 1.7 hat daher auch die Gruppe Φ' , die in analoger Weise zu der Gruppe N'_a und ihrem maximalen Toroid T gehört, die Ordnung 2; es sei φ_i das Element der Ordnung 2 in Φ' .

Wir behaupten: φ_i läßt jedes Element von U_i fest. Da φ_i durch einen inneren Automorphismus $x \rightarrow b^{-1}xb$ mit $b \in N'_a$ bewirkt wird, ist dies bewiesen, sobald gezeigt ist: U_i gehört zum Zentrum von N'_a . Es sei c erzeugendes Element von U_i , wie es nach 4.2 existiert, und N'_c die Eins-Komponente des Normalisators N_c von c ; nach 3.4 ist die Dimension von N_c und N'_c mindestens $l + 2$; da Potenzen von c in U'_i überall dicht liegen, ist jedes mit c vertauschbare Element auch mit a vertauschbar, und daher ist $N_c \subset N_a$ und $N'_c \subset N'_a$; da N'_a die Dimension $l + 2$ hat,

ist mithin $N'_c = N'_a$. Nun gehören c und daher auch die von c erzeugte Gruppe U_i zum Zentrum von N_c ; ferner ist $U_i \subset T \subset N'_c$; folglich gehört U_i zum Zentrum von $N'_c = N'_a$.

Aus $T \subset N'_a \subset G$ und der Definition 1.4 folgt unmittelbar, daß Φ' Untergruppe von Φ ist; es ist also $\varphi_i \in \Phi$. Damit ist folgendes bewiesen:

5.2. Die Gruppe Φ enthält m solche Involutionen $\varphi_1, \dots, \varphi_m$, daß φ_i alle Elemente von U_i festläßt ($i = 1, \dots, m$).

Aus 5.2 und 4.3 folgt:

5.3. Jede Gruppe U_i besteht aus höchstens zwei Komponenten.

Wir betrachten jetzt — in engem Anschluß an [1], § 2 — die Transformationen aus der Gruppe Φ noch näher. Zu diesem Zwecke führen wir wie bei der Behandlung von 3.6 in der Umgebung des Punktes e kanonische Koordinaten ein; diese können wir nach einem bekannten Satz von Weyl so wählen, daß in bezug auf sie die inneren Automorphismen von G nicht nur affin, sondern sogar orthogonal, also eigentliche oder uneigentliche Bewegungen sind; ein solches Koordinatensystem soll im folgenden kurz ein orthogonales kanonisches System heißen. Daraus, daß φ_i die Ebene T auf sich abbildet, alle Punkte von U_i festläßt, aber nicht die Identität ist, folgt:

5.4. In bezug auf ein orthogonales kanonisches Koordinatensystem in der Umgebung von e sind die Involutionen φ_i die Spiegelungen der l -dimensionalen Ebene T an den in T gelegenen $(l - 1)$ -dimensionalen Ebenen U_i .

Weiter betrachten wir wie bei 3.6 die Gebiete B_j , in welche der l -dimensionale Raum T durch die Ebenen U_i zerlegt wird (in der Umgebung von e); sind B, B' zwei dieser Gebiete, so kann man in ihnen Punkte t bzw. t' so wählen, daß deren Verbindungsstrecke keinen der $(l - 2)$ -dimensionalen Durchschnitte irgend zweier Ebenen U_h und U_i trifft; bei Durchlaufung dieser Strecke von t bis t' mögen der Reihe nach die Ebenen U_1, U_2, \dots, U_r durchschritten werden; nimmt man der Reihe nach die Spiegelungen $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_r$ vor, so entsteht eine Transformation φ' aus Φ mit $\varphi'(B) = B'$. Es sei nun φ eine beliebige Transformation aus Φ und B eines der Gebiete B_j ; wir setzen $\varphi(B) = B'$; wie wir eben gesehen haben, gibt es ein Produkt φ' von Spiegelungen φ_i , so daß $\varphi'(B) = B'$ ist; durch $\varphi'\varphi^{-1}$ wird B also auf sich abgebildet; nach 3.6 ist daher $\varphi'\varphi^{-1}$ die Identität, also $\varphi = \varphi'$. Damit haben wir (wie in [1], § 2, Nr. 10) folgendes bewiesen:

5.5. Die Gruppe Φ wird von den Involutionen $\varphi_1, \dots, \varphi_m$ erzeugt.

6. *Zusammenfassung der Ergebnisse.* Es seien wie bisher: G eine geschlossene Liesche Gruppe; T ein maximales Toroid in G ; n die Dimension von G , l die Dimension von T , m die durch $n - l = 2m$ bestimmte ganze Zahl (cf. 1.2). Die singulären Elemente sind wie in 3.1, die Gruppe Φ ist wie in 1.4 definiert.

Satz I. Die Menge der singulären Elemente von T ist die Vereinigungsmenge der Elemente von m abgeschlossenen Untergruppen U_1, \dots, U_m von T . Jede Gruppe U_i ist $(l - 1)$ -dimensional; sie ist entweder ein Toroid U'_i oder sie besteht aus einem Toroid U'_i und noch einer Nebengruppe von U'_i . Für $j \neq i$ ist $U_j \neq U_i$, und der Durchschnitt von U_j und U_i ist eine $(l - 2)$ -dimensionale Gruppe.

Satz II. Die Gruppe Φ ist endlich. Sie transformiert die Vereinigungsmenge der Gruppen U_i in sich. Sie wird von m Involutionen $\varphi_1, \dots, \varphi_m$ erzeugt. φ_i läßt jedes Element von U_i fest; in bezug auf orthogonale kanonische Koordinaten in der Umgebung des Einselementes e ist φ_i die Spiegelung von T an der Ebene U_i .

Zu dem Satz I sei noch ein Zusatz gemacht. Aus 1.1 folgt, daß das Zentrum Z von G in T enthalten ist. Ein Element $t \in G$ gehört dann und nur dann zu Z , wenn sein Normalisator N_t die ganze Gruppe G oder, was dasselbe ist, wenn N_t n -dimensional ist; nach 3.4 bedeutet das, daß t allen m Gruppen U_i angehört. Somit gilt folgender

Zusatz zu Satz I. Der Durchschnitt der Gruppen U_1, \dots, U_m ist das Zentrum Z von G . Daß die Gruppe G halb-einfach, d. h. daß Z diskret ist, ist also gleichbedeutend damit, daß der Durchschnitt der U_i nur aus endlich vielen Punkten besteht.

Von diesen Ergebnissen gelangt man zu denen des § 2 in [1], indem man die universelle Überlagerungsgruppe R von T heranzieht; sie ist der l -dimensionale euklidische Raum R mit der Vektoraddition als Gruppenoperation; die euklidische Metrik in R ist durch die orthogonalen kanonischen Koordinaten gegeben, die wir auf T nur in der Umgebung von e verwenden konnten, die sich aber über ganz R erstrecken lassen. Die Überlagerungsgruppen der U_i werden in R durch $(l - 1)$ -dimensionale Ebenen dargestellt; das System dieser Ebenen ist das Stiefelsche „Diagramm“ von G . Die Spiegelungen an den Ebenen des Diagramms erzeugen eine Gruppe Γ , welche bei der natürlichen homomorphen Abbildung

von R auf T in die Gruppe Φ übergeht; dies ist die diskontinuierliche Bewegungsgruppe, die Stiefel der Gruppe G zuordnet. Die Eigenschaften des Diagramms und der Gruppe Γ , die in [1], § 2, festgestellt werden, lassen sich leicht aus unseren Sätzen I und II ableiten.

Umgekehrt sind unsere Sätze in den Ergebnissen der Arbeit von Stiefel enthalten.

Ein weiterer Satz aus der Arbeit von Stiefel ([1], Satz 18) besagt, daß eine einfach zusammenhängende geschlossene Gruppe G durch ihre Gruppe Φ — diese nicht als abstrakte Gruppe, sondern als Automorphismengruppen eines Toroids aufgefaßt — vollständig bestimmt ist. Die Aufgabe, auch diesen Satz sowie ähnliche Sätze, die in [1], § 4, formuliert sind, unter möglichster Vermeidung der infinitesimalen Theorie durch globale geometrische Betrachtungen zu beweisen oder wenigstens die jetzt bekannten Beweise durch derartige Betrachtungen zu vereinfachen, ist noch offen.

(Eingegangen den 6. April 1942.)