# Kinematik, Liesche Kreisgeometrie und Geraden-Kugel-Transformation

Autor(en): Strubecker, Karl

Objekttyp: Article

Zeitschrift: Elemente der Mathematik

Band (Jahr): 8 (1953)

Heft 1

PDF erstellt am: **24.05.2024** 

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-16913

#### 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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek* ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

4

On appelle hypothèse généralisée du continu l'hypothèse que, E étant un ensemble infini quelconque et S l'ensemble de tous les sous-ensembles de E, tout sous-ensemble de S qui contient un sous-ensemble de même puissance que E et qui n'est pas luimême de même puissance que E, est de même puissance que S.

L'hypothèse du continu est un cas particulier de cette hypothèse du continu généralisée, notamment lorsque E est l'ensemble de tous les nombres naturels.

M. K. GÖDEL a démontré<sup>1</sup>) que l'hypothèse généralisée du continu est non contradictoire avec les axiomes généralement admis de la théorie des ensembles, si ces axiomes ne sont pas contradictoires.

Une des conséquences de l'hypothèse généralisée du continu est l'axiome du choix²).

W. Sierpiński, Varsovie.

## Kinematik, Liesche Kreisgeometrie und Geraden-Kugel-Transformation<sup>3</sup>)

#### I. Ebene Kinematik

Man kann nach E. Study<sup>4</sup>) die Bewegungen (Drehungen, Parallelverschiebungen) der Ebene durch vier homogene Parameter  $\alpha_0: \alpha_1: \alpha_2: \alpha_3$  mit bilinearer Zusammensetzung darstellen.

Ist  $(x_m, y_m)$  der Drehungsmittelpunkt und  $\omega$  der Drehwinkel dieser Drehung (Figur 1), so gilt für diese Studyschen Parameter

$$\alpha_0: \alpha_1: \alpha_2: \alpha_3 = -\operatorname{ctg} \frac{\omega}{2}: x_m: y_m: 1.$$

 $\alpha_3 = 0$  liefert (Figur 2) Parallelverschiebungen um den Vektor  $(-2 \alpha_2/\alpha_0, 2 \alpha_1/\alpha_0)$  der Länge  $\Omega$ . Die Bewegungsformeln lauten dann in homogenen kartesischen Koordinaten  $x_1 : x_2 : x_3 = x : y : 1$ :

$$\begin{aligned} (\alpha_0^2 + \alpha_3^2) \ x_1' &= (\alpha_0^2 - \alpha_3^2) \ x_1 \\ (\alpha_0^2 + \alpha_3^2) \ x_2' &= -2 \ \alpha_0 \ \alpha_3 \ x_1 + (\alpha_0^2 - \alpha_3^2) \ x_2 + 2 \ (\alpha_0 \ \alpha_1 + \alpha_2 \ \alpha_3) \ x_3, \\ (\alpha_0^2 + \alpha_3^2) \ x_3' &= \end{aligned}$$

$$(\alpha_0^2 + \alpha_3^2) \ x_3' &= (\alpha_0^2 + \alpha_3^2) \ x_3,$$

und die bilinearen Zusammensetzungsformeln sind

$$lpha_0'' = lpha_0 \, lpha_0' \quad * \quad * \quad - lpha_3 \, lpha_3', \qquad lpha_2'' = lpha_0 \, lpha_2' + lpha_2 \, lpha_0' + lpha_3 \, lpha_1' - lpha_1 \, lpha_3', \ lpha_1'' = lpha_0 \, lpha_1' + lpha_1 \, lpha_0' + lpha_2 \, lpha_3' - lpha_3 \, lpha_2', \qquad lpha_3'' = lpha_0 \, lpha_3' + lpha_3 \, lpha_0' \quad * \quad *$$

<sup>1)</sup> K. Gödel, Proc. nat. Acad. Sci. 24, 556-557 (1938); The consistency of the axiom of choice and of generalized continuum hypothesis with the axioms of the set theory, Ann. math. Studies N° 3 (Princeton 1940).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>) Cette proposition a été énoncée sans démonstration en 1926 par A. Lindenbaum et A. Tarski dans leur Communication sur les recherches de la théorie des emsembles, C. r. Soc. Sci. Varsovie, Cl. III, 19, 314 (1926), th. 94. Pour la démonstration voir W. Sierpiński, Fund. Math. 34, 1-5 (1947).

<sup>3)</sup> Vortrag, gehalten am 19. September 1951 auf der Tagung der DMV. in Berlin.

<sup>4)</sup> EDUARD STUDY, a) Über Systeme komplexer Zahlen und ihre Anwendung in der Theorie der Transformationsgruppen, Mh. Math. Phys. 1, 283-355 (1890); b) Von den Bewegungen und Umlegungen, Math. Ann. 39, 441-566 (1891).

Man kann diese Formeln nach Study besonders elegant schreiben, wenn man sich eines Systems von höheren komplexen Zahlen bedient der Form

$$\alpha = \alpha_0 e_0 + \alpha_1 e_1 + \alpha_2 e_2 + \alpha_3 e_3$$

$$x = x_1 e_1 + x_2 e_2 + x_3 e_3,$$

bzw.

das ein Grenzfall der Hamiltonschen Quaternionen ist und als System der Studyschen Quaternionen bezeichnet werden soll, für dessen vier Einheiten  $e_0$ ,  $e_1$ ,  $e_2$ ,  $e_3$  die folgende Produkttafel gilt:

Dann lautet die Produktformel einfach

$$\alpha'' = \alpha \alpha'$$

und die Bewegungsformel selbst

$$x' = \alpha^{-1} x \alpha$$

wobei

$$\alpha^{-1} = \frac{\alpha_0 e_0 - \alpha_1 e_1 - \alpha_2 e_2 - \alpha_3 e_3}{\alpha_0^2 + \alpha_3^2} = \frac{\overline{\alpha}}{\alpha \overline{\alpha}} = \frac{\overline{\alpha}}{N(\alpha)}$$

die reziproke Quaternion zu a ist.

 $N(\alpha) = \alpha_0^2 + \alpha_3^2 = 0$  kennzeichnet die singulären Bewegungen.

### II. Kinematische Abbildung des Geradenraumes und quasielliptische Geometrie

Deutet man die vier homogenen Parameter  $\alpha_i$  als homogene kartesische Punktkoordinaten im Raum, indem man setzt

$$\alpha_0: \alpha_1: \alpha_2: \alpha_3=z: x: y: 1$$
,

so dass also  $\alpha_0$  der (lotrechten) z-Richtung entspricht und  $\alpha_3 = 0$  die Fernebene darstellt, so wird jeder *ebenen Bewegung*  $\alpha$  im Raum ein *Bildpunkt*  $A(\alpha)$  zugeordnet. Der Raum wird in der Lieschen Ausdrucksweise zum *Parameterraum* der ebenen Bewegungen.

W. Blaschke<sup>1</sup>) und J. Grünwald<sup>2</sup>) haben 1911 diese Abbildung der ebenen Bewegungen auf Raumpunkte, die später E. Müller und E. Kruppa<sup>3</sup>) als kinematische Abbildung bezeichnet haben, durch eine einfache geometrische Konstruktion verwirklicht.

<sup>1)</sup> WILHELM BLASCHKE, Euklidische Kinematik und Nichteuklidische Geometrie, I und II, Z. Math. Phys. 60, 61-91, 203-204 (1911). Vgl. dazu die kurze Darstellung von W. Blaschke in: F. Klein, Vorlesungen über höhere Geometrie (Springer, Berlin 1926), § 81, und die ausführliche Darstellung in dem Büchlein von W. Blaschke, Ebene Kinematik, Hamburger math. Einzelschriften, 25. Heft (Leipzig und Berlin 1938).

<sup>2)</sup> Josef Grünwald, Ein Abbildungsprinzip, welches die ebene Geometrie und Kinematik mit der räumlichen Geometrie verknüpft, Sitz.-Ber. Akad. Wiss. Wien, Math.-naturw. Kl., Abt. IIa, 120, 677-741 (1911).

<sup>3)</sup> EMIL MÜLLER, Vorlesungen über Darstellende Geometrie, 1. Band: Die linearen Abbildungen, bearbeitet von Erwin Kruppa (Deuticke, Leipzig und Berlin 1923).

Legt man nämlich (Figuren 3 und 4) durch den Bildpunkt  $A(\alpha)$  im Raume die  $\infty^2$  Geraden g des Bündels und schneidet man sie mit den Ebenen z=-1 und z=+1 in Punkten  $G_-$  und  $G_+$ , sucht man ferner deren Grundrisse  $G'_-$ ,  $G'_+$  auf die Ebene  $\pi(z=0)$  auf und schwenkt man diese Punkte  $G'_-$ ,  $G'_+$  um ihren Mittelpunkt G um  $+\pi/2$ , so erhält man als «kinematische Bilder» der Geraden g zwei Punkte  $G_t$  und  $G_r$ , die sich genau in der Bewegung  $\alpha$  entsprechen, deren Bildpunkt  $A(\alpha)$  war.

Es ist gelegentlich zweckmässig, die Ebene  $\pi$ , aufgefasst als Ort der linken Bildpunkte  $G_l$  und als Ort der rechten Bildpunkte  $G_r$ , in zwei Blätter getrennt zu denken und von der Ebene  $\pi_l$  der linken und von der Ebene  $\pi_r$  der rechten Bildpunkte zu sprechen.

Es folgt, dass die linken und die rechten Bilder zweier sich in  $A(\alpha)$  schneidenden Geraden g, h gleiche Entfernungen haben:

$$\overline{G_lH_l}=\overline{G_rH_r}$$
.

Ein Strahlbüschel hat als kinematische Bilder zwei kongruente gerade Punktreihen, ein Punkt (Strahlbündel) eine Bewegung, eine Ebene (Strahlenfeld) eine  $Umlegung G_l \rightarrow G_r$ . Das Bild eines eigentlichen Punkts  $A(\alpha_3 \pm 0)$  ist eine Drehung, das Bild eines Fernpunkts ( $\alpha_3 = 0$ ) eine Parallelverschiebung. Der Fernpunkt O der lotrechten  $\alpha_0$ -Achse hat als Bild die identische Bewegung  $G_l \equiv G_r$ .

Den singulären Bewegungen  $\alpha_0^2 + \alpha_3^2 = 0$ , das heisst  $\alpha_0 \pm i \alpha_3 = 0$  entsprechen (Figur 5) die Punkte eines konjugiert komplexen Paares  $\iota^+$ ,  $\iota^-$  von Ebenen:  $z = \pm i$ , den singulären Umlegungen ebenso Ebenen durch die absoluten Punkte  $J^+$ ,  $J^-$  der Ferngeraden s der Bildebene  $\pi$  (z = 0), so dass im kinematischen Parameterraum insgesamt ein selbstduales singuläres Gebilde, bestehend aus zwei konjugiert komplexen Ebenen  $\iota^+$ ,  $\iota^-$  und konjugiert komplexen Punkten  $J^+$ ,  $J^-$  ausgezeichnet ist, das (aufgefasst als Linienort) zwei ausgezeichnete Paare verschränkter Strahlbüschel von «Erzeugenden» trägt, die linken Erzeugenden ( $J^+$ ,  $\iota^-$ ), ( $J^-$ ,  $\iota^-$ ) und die rechten Erzeugenden ( $J^+$ ,  $\iota^-$ ), ( $J^-$ ,  $\iota^+$ ).

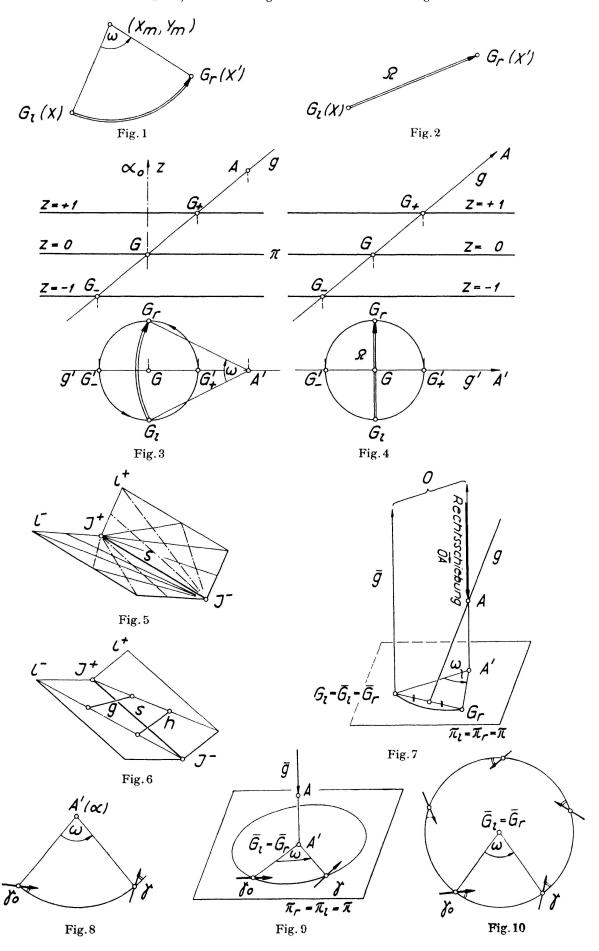
Zeichnet man dieses Gebilde als absolutes Gebilde einer projektiven Massbestimmung aus, so erhält der Raum quasielliptische Struktur. Es entsteht ein Grenzfall des elliptischen Raumes, der sogenannte quasielliptische Raum, dessen Geometrie der des elliptischen Raumes sehr ähnlich ist. Zum Beispiel gibt es auch hier Cliffordsche Parallelen, Cliffordsche Schiebungen usw.

Die Geraden g, h sind zum Beispiel im Cliffordschen Sinne linksparallel, wenn sie denselben linken kinematischen Bildpunkt  $G_l = H_l$  haben; sie schneiden dann (Figur 6) das Massgebilde in Punkten desselben linken Erzeugendenpaares.

Analog sind im Cliffordschen Sinne rechtsparallele Geraden erklärt.

Alle untereinander links- bzw. rechtsparallelen Geraden bilden ein Strahlnetz, nämlich ein

der Darstellung



das im allgemeinen elliptisch, im Falle  $\beta_3 = 0$  bzw.  $\alpha_3 = 0$  jedoch parabolisch ist und dessen Leitgeraden zwei konjugiert komplexe Erzeugende der

Linksschar Rechtsschar

des absoluten Gebildes sind, die im parabolischen Falle mit der Ferngeraden s zusammenfallen.

Zu jedem dieser Netze gibt es eine eingliedrige stetige Gruppe von Kollineationen, bei der die Punkte x des Raumes auf den Strahlen des Netzes (also geradlinig!) verschoben werden, und die man daher, weil sie dann notwendig das absolute Gebilde des quasielliptischen Raumes festlassen, als quasielliptische *Cliffordsche Schiebungen* bezeichnet. Genauer spricht man wieder, je nachdem die Bahngeraden der Schiebung links- bzw. rechtsparallel sind, von Links- bzw. Rechtsschiebungen.

Fasst man auch im Raume die homogenen Koordinaten  $x_i$  zu Studyschen Quaternionen zusammen, indem man setzt

$$x = x_0 e_0 + x_1 e_1 + x_2 e_2 + x_3 e_3$$
, und bedeuten  $lpha = lpha_0 e_0 + lpha_1 e_1 + lpha_2 e_2 + lpha_3 e_3$  und  $eta = eta_0 e_0 + eta_1 e_1 + eta_2 e_2 + eta_3 e_3$ 

beliebige Studysche Quaternionen, so lauten diese quasielliptischen Cliffordschen

Linksschiebungen: Rechtsschiebungen:  $x' = \beta x$ ,  $x' = x \alpha$ .

Sie bilden kommutative dreigliedrige Gruppen

 $\mathfrak{G}_3^l$   $\mathfrak{G}_3^r$ 

die zusammen die & der quasielliptischen Bewegungen

$$x' = \beta x \alpha$$

ergeben.

Wie äussert sich nun eine solche Cliffordsche Schiebung, ausgeübt auf die Geraden (g) des Raumes, in den (die Ebene  $\pi$  überdeckenden) Ebenen  $\pi_l$  und  $\pi_r$  der linken und rechten kinematischen Bildpunkte  $(G_l)$  und  $(G_r)$ ?

Die Antwort gibt der sogenannte Fundamentalsatz der kinematischen Abbildung:

Bei einer Linksschiebung erfährt das linke Bildfeld  $\pi_l$  eine Bewegung, das rechte  $\pi_r$  bleibt fest.

Bei einer Rechtsschiebung erfährt das rechte Bildfeld  $\pi_r$  eine Bewegung, das linke  $\pi_l$  bleibt fest.

Anwendung: Das Bündel der lotrechten Geraden  $\bar{g}$  durch den Fernpunkt O der  $x_0$ -Achse bildet sich auf identische Bildpaare  $\bar{G}_t = \bar{G}_r$  ab (Figur 7). Es folgt:

Bringt man (Figur 7) den Punkt  $O(x = e_0)$  durch eine Rechtsschiebung ( $\alpha$ ) nach  $A(x' = e_0 \alpha = \alpha)$ , so kommt  $\bar{g}$  nach g, das linke Bildfeld  $\pi_i$  bleibt dabei fest ( $G_i = \bar{G}_i$ ),

das rechte  $\pi_r$  aber erfährt eine Bewegung  $(G_r = \overline{G}_r \alpha)$ , nämlich jene, die zum Punkte  $A(\alpha)$  gehört und das Bild der Rechtsschiebung  $\overline{OA}$  ist.

Das kinematische Bild des Punktes A (Drehung, Translation) ist also identisch mit dem Bilde jener Rechtsschiebung, die O nach A bringt.

Der Drehwinkel  $\omega$  (die Translationsstrecke  $\Omega$ ) ist dabei gleich der doppelten quasielliptischen Schieblänge  $2\overrightarrow{OA}$ .

## III. Kinematische Abbildung der Geraden auf Turbinen Liesche Kreisgeometrie

Man kann (Figur 8) die Lagen der Ebene  $\pi$  kennzeichnen durch die Lagen eines orientierten Linienelements  $\gamma$  gegen ein vorgegebenes Grundelement  $\gamma_0$  (Urelement). Study nennt  $\gamma$  ein «Soma»,  $\gamma_0$  das Ursoma («Protosoma»). Jede Bewegung  $\alpha$  ( $\pi_1 \rightarrow \pi_r$ ) führt das Grundelement  $\gamma_0$  (das in  $\pi_1$  liegen soll) in ein orientiertes Linienelement  $\gamma$  (von  $\pi_r$ ) über, das umgekehrt (durch seine Lage gegen  $\gamma_0$ ) die Bewegung  $\alpha$  eindeutig bestimmt, und damit auch eineindeutig auf den Bildpunkt  $A(\alpha)$  der Bewegung  $\alpha$  abgebildet ist. Diese (nach Wahl von  $\gamma_0$ ) umkehrbar eindeutige «kinematische» Abbildung der orientierten Linienelemente  $\gamma$  auf die Raumpunkte  $A(\alpha)$  liegt dem Folgenden zugrunde<sup>1</sup>).

Nach dem Fundamentalsatz haben dabei Punktgruppen (x),  $(\dot{x})$  des Raumes, die durch eine *Rechtsschiebung*  $\alpha$  auseinander entstehen, als Bilder in der Ebene  $\pi$  Figuren von orientierten Linienelementen  $(\gamma)$ ,  $(\dot{\gamma})$ , die durch *Bewegung* auseinander hervorgehen, und zwar durch jene Bewegung  $\alpha$  von  $\pi_r$  gegen  $\pi_l$ , die der Rechtsschiebung  $\alpha$  entspricht.

Welche Figuren von orientierten Linienelementen entsprechen in unserer kinematischen Abbildung den Punkten A einer Geraden g?

- 1. Die Gerade  $\bar{g}$  enthalte den Punkt O und sei
- a) eine eigentliche, also lotrechte Gerade (Figur 9). Dann ist  $\overline{G}_l = \overline{G}_r$ , die Punkte A von g bilden sich ab auf die Drehungen von  $\pi_r$  gegen  $\pi_l$  um den festen Punkt  $\overline{G}_l = \overline{G}_r = A'$ , wobei das orientierte Grundelement  $\gamma_0$  eine Drehschar von orientierten Linienelementen ( $\gamma$ ) beschreibt, eine Kasnersche Turbine<sup>2</sup>) durch  $\gamma_0$  (Figur 10), wobei der Drehwinkel  $\omega = 2\overline{OA}$ , also gleich der doppelten quasielliptischen Schiebstrecke ist.
- b) Wenn die Gerade  $\bar{g}$  eine Ferngerade durch O ist (Figur 11), so bilden sich ihre Punkte  $\bar{A}$  auf Translationen einer festen Richtung ab, wobei das orientierte Grundelement  $\gamma_0$  eine gerade Turbine durch  $\gamma_0$  beschreibt, und die Translationsstrecke

<sup>1)</sup> Die Linienelemente  $\gamma$  sind als Repräsentanten der ebenen Bewegungen im Sinne von Eduard Studys Geometrie der Dynamen (Teubner, Leipzig 1903) als (positive) Somen zu bezeichnen. Da die kinematische Abbildung analog die Ebenen des quasielliptischen Raumes eineindeutig auf die Umlegungen der Ebene  $\pi$  überträgt, die man nach Study (nach Wahl des Ursomas  $\gamma_0$ ) mit den negativen Somen  $\gamma'$  der Ebene  $\pi$  identifizieren kann, ergibt sich eine gleichartige Abbildung der negativen Somen von  $\pi$  auf die Ebenen des quasielliptischen Raumes. Man kann positive und negative Somen nach einem Vorschlag von Frank Löbell durch Linienelemente darstellen, die bloss an ihrem linken (positiven) oder rechten (negativen) Ufer durch einen Halbpfeil orientiert sind, wodurch Figuren entstehen, die Löbell als Rechts- bzw. Linkshaken bezeichnet hat. Wegen der gebotenen Kürze kann auf dieses wichtige Ausgestalten des Gegenstandes jedoch nicht eingegangen werden.

<sup>2)</sup> EDUARD KASNER, The Group of Turns and Slides and the Geometry of Turbines, Amer. J. Math. 33, 193-202 (1911).

 $\Omega = 2 \, \overline{OA}$  wieder gleich der doppelten quasielliptischen Schiebstrecke ist. Ist  $A' = [\bar{g} \, s]$  der (unendlich ferne) Schnittpunkt der Geraden  $\bar{g}$  mit der Bildebene $\pi$ , so ist die Translationsrichtung zur Richtung des Fernpunktes A' normal.

- 2. Ist g eine beliebige Gerade, welche
- a) die absolute Gerade s nicht trifft, so kann man sie (Figur 7) durch eine Rechtsschiebung in eine ebensolche Gerade  $\bar{g}$  durch O verwandeln. Der linke Bildpunkt  $G_l$  von g bleibt dabei unverändert ( $G_l = \bar{G}_l$ ), der rechte erleidet eine Bewegung (Drehung)  $G_r \to \bar{G}_r$ , die nach dem Fundamentalsatz die Bildfigur der orientierten Linienelemente von g in die von  $\bar{g}$  überführt. Also folgt (Figur 12):

Das Bild einer beliebigen (die absolute Gerade  $s = [\iota^+ \iota^-]$  nicht schneidenden) Geraden g ist eine Kasnersche Turbine mit dem rechten kinematischen Bildpunkt  $G_r$  von g als Mittelpunkt, die kongruent ist zu jener Turbine, welche das Grundelement  $\gamma_0$  bei Drehung um den linken kinematischen Bildpunkt  $G_\iota$  von g beschreibt.

b) Wenn g eine beliebige die absolute Gerade  $s = [\iota^+ \iota^-]$  schneidende (das heisst horizontale) Gerade ist, so erhält man analog eine beliebige gerade Turbine als kinematisches Bild der Punkte A von g (Figur 13).

Sind  $(G_l, G_r)$  die beiden (unendlichfernen) kinematischen Bildpunkte der horizontalen Geraden g, und ist  $\gamma$  das Bildelement eines beliebigen Punktes der Geraden g, so entsteht dabei die gerade Bildturbine von g durch Translation von  $\gamma$  normal zur Richtung  $G_r$  und ist damit kongruent zu der geraden Turbine, die entsteht, wenn man das Grundelement  $\gamma_0$  normal zur Richtung  $G_l$  verschiebt.

Schneidenden Geraden  $g_1$ ,  $g_2$  entsprechen stets berührende Turbinen, das heisst solche, die ein orientiertes Linienelement (Bild des Schnittpunktes  $A = [g_1 g_2]$ ) gemeinsam haben (Figur 14).

Sonderfall (Figur 15). Liegt  $G_i$  auf der Normalen  $n_i$  des Grundelements  $\gamma_0$ , so gehört die Gerade g einem Gewinde («Linksgewinde»)  $\mathfrak{G}_i$  an. Wenn  $\gamma_0$  im Nullpunkt auf der x-Achse liegt, so ist die Gleichung dieses sogenannten «Nebengewindes»

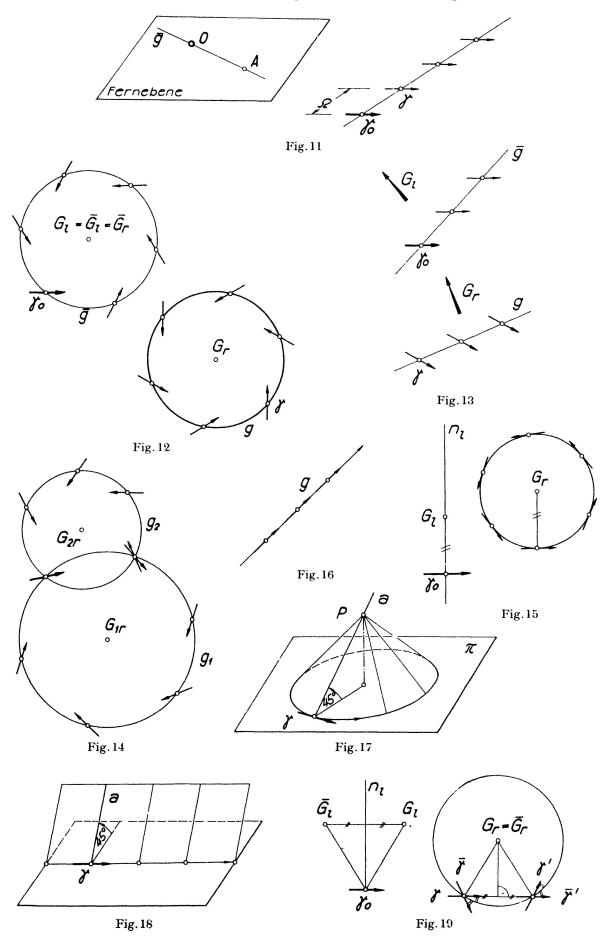
$$p_{01} + p_{23} = 0.$$

Als kinematische Bilder der (Punkte der) Strahlen g dieses Nebengewindes  $\mathfrak{G}_l$  erhält man die orientierten Linienelemente von Zykeln. Schneidende Geraden g, h des Nebengewindes  $\mathfrak{G}_l$  haben als Bilder berührende Zykel.

Wir haben damit eine überaus einfache konstruktive (darstellend-geometrische) Herstellung jener berühmten Berührungstransformation von Sophus Lie gewonnen, durch welche die Strahlen g eines Gewindes auf die Lieschen orientierten Kreise (Zykel) abgebildet werden<sup>1</sup>). Der zehngliedrigen stetigen Gruppe  $\mathfrak{G}_{10}$  der projektiven Automorphien des Nebengewindes  $\mathfrak{G}_1$  entspricht dabei die  $\mathfrak{G}_{10}$  der Lieschen Kreistransformationen.

Sonderfall (Figur 16): Den Strahlen g des Nebengewindes  $\mathfrak{G}_l$ , welche die (ebenfalls in  $\mathfrak{G}_l$  liegende) absolute Gerade s schneiden und die ein parabolisches Netz («Nebennetz»  $\mathfrak{N}$ ) bilden, entsprechen gerade Zykel, das heisst Speere. Die siebengliedrige stetige Gruppe  $\mathfrak{G}_7$  der projektiven Automorphien des Nebennetzes wird dabei auf die  $\mathfrak{G}_7$  der Laguerreschen Speertransformationen übertragen.

<sup>1)</sup> SOPHUS LIE, Geometrie der Berührungstransformationen (Teubner, Leipzig 1896).



#### IV. Euklidische Geraden-Kugel-Transformation

Die  $Zyklographie^1$ ) lehrt (Figuren 17 und 18), orientierte Linienelemente  $\gamma$  der Ebene  $\pi$  aufzufassen als Bilder von isotropen Geraden a oder, nach einer Realitätsverschiebung (Multiplikation der z-Koordinaten mit i), als Bilder von Geraden, die unter  $45^{\circ}$  «nach links oben» auf der Bildebene  $\pi$  aufstehen und daher einen bestimmten einteiligen Fernkreis «C» schneiden der Gleichung

$$t=0$$
 | Fernebene  $x^2+y^2-z^2=0$  | Fernkreis « $C$ ».

Als Kugeln («C-Kugeln») fungieren dann die Drehflächen 2. Ordnung (einschaligen Drehhyperboloide) durch den Fernkreis C der Gleichung

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 - (z-c)^2 = r^2$$
  
( $r = \text{Kehlradius} = \text{``Radius der Kugel''}$ ).

Die orientierten Linienelemente einer Turbine sind daher zyklographische Bilder der Erzeugenden einer Schar einer solchen «Kugel», welche durch die Auszeichnung einer Erzeugendenschar orientiert ist. Berührende Turbinen (Figur 14) sind zyklographische Bilder von berührenden orientierten «Kugeln».

Damit haben wir insgesamt durch Zusammensetzung der kinematischen Abbildung der Geraden des Raumes auf Turbinen und der zyklographischen Abbildung der Turbinen auf orientierte (C)-Kugeln eine denkbar einfache darstellend-geometrische Konstruktion der berühmten Berührungstransformation Lies<sup>2</sup>) erhalten, welche die Geraden g des (quasielliptischen) Raumes auf die orientierten Kugeln n des (quasieuklidischen) Raumes abbildet.

Schneidenden Geraden entsprechen dabei berührende Kugeln.

Geraden des Nebengewindes  $\mathfrak{G}_l$  entsprechen kinematisch zuerst Zykel, dann (Figur 17) zyklographisch isotrope Kegel (Tangentenkegel des Kegelschnitts C, sogenannte «C-Kegel»). Geraden g, die die absolute Gerade g schneiden, entsprechen zuerst kinematisch gerade Turbinen, dann zyklographisch nichtisotrope g benen, die durch Auszeichnung einer ihrer Isotropenscharen orientiert sind; insbesondere entsprechen g geraden des Nebennetzes g zuerst kinematisch Speere, dann (Figur 18) zyklographisch g isotrope g benen (g-Ebenen), die ebenso wie die isotropen Kegel (g-Kegel) nur eine Orientierung zulassen.

Lie selbst hat die Kugeln noch nicht orientiert, das heisst seine Geraden-Kugel-Transformation ist nicht eineindeutig. Den beiden isotropen Erzeugendenscharen der Kugel entsprechen zyklographisch «polare Turbinen», deren orientierte Linienelemente bezüglich des Trägerkreises der Turbine symmetrisch liegen (Figur 19), das heisst

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>) EMIL MÜLLER, Vorlesungen über Darstellende Geometrie, II. Band: Die Zyklographie, bearbeitet von J. I.. Krames, (Deuticke, Leipzig und Wien 1929),

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>) SOPHUS LIE, Über Komplexe, insbesondere Linien- und Kugelkomplexe, mit Anwendung auf die Theorie partieller Differentialgleichungen, Math. Ann. 5, 145–256 (1872) = Gesammelte Abhandlungen. Bd. 2, I, S.1–121. Eine ausführliche historische Überschau gab E. A. Weiss, Die geschichtliche Entwicklung der Lehre von der Geraden-Kugel-Transformation, I-VII, Deutsche Math. 1-3 (1935–1938).

kinematisch: Geraden g,  $\bar{g}$ , deren linke Bildpunkte  $G_l$ ,  $\bar{G}_l$  bezüglich der Bildgeraden  $n_l$  des Nebengewindes  $\mathfrak{G}_l$  symmetrisch liegen, das heisst Geraden g,  $\bar{g}$ , die bezüglich des Nebengewindes  $\mathfrak{G}_l$  nullpolar sind.

Die Notwendigkeit der Orientierung der Kugeln hat zuerst (1897) E. Study<sup>1</sup>) erkannt, der auch als erster (1926) eine völlig einwandfreie analytische Darstellung der (euklidischen) Geraden-Kugel-Transformation gegeben hat<sup>2</sup>), die mit unserem geometrischen Modell in Übereinstimmung ist.

Man kann in der gleichen Weise die Liesche Kreisgeometrie auf der Kugel und die nichteuklidische Geraden-Kugel-Transformation geometrisch-konstruktiv begründen, indem man sich der Kinematik der Kugel und ihres (elliptischen) Parameterraumes bedient, wie ich schon 1930 gezeigt habe<sup>3</sup>).

Das euklidische Modell findet sich schon in einer aus der gleichen Zeit stammenden Wiener Dissertation von A. E. MAYER<sup>4</sup>), die jedoch nicht zugänglich ist und über die auch nichts veröffentlicht wurde.

Ich selbst habe im Winter- und Sommersemester 1935/36 den Gegenstand in einer Wiener Vorlesung über «Neuere Kinematik» ausführlich dargelegt. Im Jahre 1948 hat W. Blaschke<sup>5</sup>) in den «Münchener Sitzungsberichten» und 1949 in den «Rendiconti di matematica» darüber veröffentlicht.

Karl Strubecker, Karlsruhe.

## Kleine Mitteilungen

#### Sur une démonstration géométrique d'un théorème de M.D. Pompeïu

M. D. Pompeïu a démontré, à l'aide des nombres complexes, ce théorème de géométrie élémentaire ):

Dans le plan, on peut toujours construire un triangle avec les distances d'un point aux sommets d'un triangle équilatéral.

Nous montrerons ici que l'on peut déduire ce théorème de la proposition suivante:

Dans le plan, le lieu géométrique des sommets Q des triangles PTQ, directement semblables à un triangle donné ABC et dont les deux sommets P et T sont sur deux circonférences  $O_1$  et  $O_2$ , est un anneau fermé.

1º Soient donnés le triangle ABC et les deux circonférences de centres  $O_1$ ,  $O_2$  et de rayons a, b (figure 1), avec a < b.

Construisons d'abord  $\triangle O_1O_2K \sim \triangle ABC$ ,  $\overline{O_1O_2} = m$ ,  $\overline{O_1K} = l$ ,  $\overline{O_2K} = n$ , et ensuite les triangles  $O_1MO$  et  $R_1MR_2$  semblables au triangle donné, les points  $R_1$ , M étant sur la droite  $O_1O_2$ ,  $R_1$  sur la circonférence  $O_1$  et M sur la circonférence  $O_2$ .

<sup>1)</sup> Vgl. die ausführliche kritische Abhandlung von E. Study, Über Lies Kugelgeometrie, Jber. Dtsch. Math.-Ver. 25, 96-113 (1917).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>) Eduard Study, Vereinfachte Begründungen von Lies Kugelgeometrie I, Sitz.-Ber. Preuss. Akad. Wiss., Berlin 1926, 360-380.

<sup>3)</sup> KARL STRUBECKER, Zur nichteuklidischen Geraden-Kugel-Transformation, Sitz.-Ber. Akad. Wiss. Wien, Math.-naturw. Kl., Abt. II a, 139, 685-700 (1930) und Zur Geometrie sphärischer Kurvenscharen, Jber. Dtsch. Math.-Ver. 44, 184-198 (1934).

<sup>4)</sup> ANTON ERNST MAYER, Die kinematische Abbildung, Dissertation, Techn. Hochschule Wien (1930).

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>) W. Blaschke, Kinematische Begründung von S. Lies Geraden-Kugeltransformation, Sitz.-Ber. Bayer. Akad. Wiss. (München 1948), 291–297, und Contributi alla cinematica, Rend. Mat. Applicazioni [V] 8, 268–280 (1949).

<sup>6)</sup> D. Pompeïu, Une identité entre nombres complexes et un théorème de géométrie élémentaire, Bull. Math. Phys. Ecole polytechn. Bucarest 6, 6-7 (1936).