

17. 11.

MATHEMATISCHE WERKE

VON

KARL WEIERSTRASS.

HERAUSGEGEBEN

UNTER MITWIRKUNG EINER VON DER KÖNIGLICH PREUSSISCHEN AKADEMIE
DER WISSENSCHAFTEN EINGESetzten COMMISSION.

ZWEITER BAND.

ABHANDLUNGEN II.

BERLIN.

MAYER & MÜLLER.

1895.

29

20

20 56
JAGELLONICA
ET
IN

INSTITUT WYBROCHOWY WARSZAWA

WYBROCHOWY WARSZAWA

WYBROCHOWY WARSZAWA
WYBROCHOWY WARSZAWA
WYBROCHOWY WARSZAWA

WYBROCHOWY WARSZAWA

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000300337

MATHEMATISCHE WERKE

VON

KARL WEIERSTRASS.

MATHEMATISCHE WERKE

VON

KARL WEIERSTRASS.

HERAUSGEGEBEN

UNTER MITWIRKUNG EINER VON DER KÖNIGLICH PREUSSISCHEN AKADEMIE
DER WISSENSCHAFTEN EINGESETZTEN COMMISSION.

ZWEITER BAND.

ABHANDLUNGEN II.

BERLIN.

MAYER & MÜLLER.

1895.

D/485

KD 517(081)Weierstrass

Übersetzungsrecht vorbehalten.



III 16X08



III 306281

BPK-B-116/2012

Akc. Nr. 4090 50

INHALTS-VERZEICHNISS.

	Seite
× 1. Über eine Gattung reell periodischer Functionen (Monatsberichte der Königl. Preuss. Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1866, S. 97—115, 185.)	1—18.
2. Zur Theorie der bilinearen und quadratischen Formen (Monatsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1868, S. 310—338.)	19—44.
3. Über die allgemeinsten eindeutigen und $2n$ -fach periodischen Functionen von n Veränderlichen (Monatsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1869, S. 853—857.)	45—48.
× 4. Über das sogenannte Dirichlet'sche Princip	49—54.
5. Neuer Beweis eines Hauptsatzes der Theorie der periodischen Functionen von mehreren Veränderlichen (Monatsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1876, S. 680—693; Abhandlungen aus der Functionenlehre (Berlin 1886), S. 165—182.)	55—69.
Anmerkungen	70.
× 6. Über continuirliche Functionen eines reellen Arguments, die für keinen Werth des letzteren einen bestimmten Differentialquotienten besitzen	71—74.
7. Bemerkungen zur Integration eines Systems linearer Differentialgleichungen mit constanten Coefficienten	75—76.
× 8. Zur Theorie der eindeutigen analytischen Functionen (Mathematische Abhandlungen der Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1876, S. 11—60; Abhandlungen aus der Functionenlehre, S. 1—52.)	77—124.
9. Untersuchungen über die $2r$ -fach periodischen Functionen von r Veränderlichen (Journal für die reine und angewandte Mathematik, Bd. 89 (1880), S. 1—8.)	125—133.
Anmerkung	134.
× 10. Einige auf die Theorie der analytischen Functionen mehrerer Veränderlichen sich beziehende Sätze (Autographirt, Berlin o. J. (1879); Abhandlungen aus der Functionenlehre, S. 105—164.)	135—188.

	Seite
× 11. Über einen functionentheoretischen Satz des Herrn G. Mittag-Leffler (Monatsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1880, S. 707—717; Abhandlungen aus der Functionenlehre, S. 53—66.)	189—199.
× 12. Zur Functionenlehre	201—223.
(Monatsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1880, S. 719—743; Abhandlungen aus der Functionenlehre, S. 67—101.)	
Anmerkungen	224—230.
Nachtrag	231—233.
(Monatsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1881, S. 228—230; Abhandlungen aus der Functionenlehre, S. 102—104.)	
13. Aus einem bisher noch nicht veröffentlichten Briefe an Herrn Professor Schwarz, vom 3. October 1875.	235—244.
14. Zur Theorie der elliptischen Functionen	245—255.
(Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1882, S. 443—451.)	
15. Zur Theorie der elliptischen Functionen	257—309.
(Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1883, S. 193—203, 265—275, 1271—1297.)	
× 16. Zur Theorie der aus n Haupteinheiten gebildeten complexen Grössen. 311—332. (Nachrichten von der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Jahrg. 1884, S. 395—414.)	
Zusätzliche Bemerkungen von Herrn H. A. Schwarz	332—339.
(A. a. O. S. 414—419, 516—519.)	
17. Zu Lindemann's Abhandlung: »Über die Ludolph'sche Zahl«	341—362.
(Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1885, S. 1067—1085.)	
—————	
Anmerkung	363.

ÜBER EINE GATTUNG REELL PERIODISCHER FUNCTIONEN.

(Aus dem Monatsbericht der Königl. Akademie der Wissenschaften
vom 22. Februar 1866.)

1.

Geometrische und mechanische Probleme führen nicht selten auf eine Differentialgleichung

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 = F(x),$$

in der die von einander abhängigen Veränderlichen t, x reelle Grössen bedeuten und F eine gegebene eindeutige Function von x ist.

Ein besonderes Interesse hat der Fall, wo x eine periodische und stets endlich bleibende Function von t ist. Dies tritt ein, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- 1) Es verschwindet $F(x)$ für zwei reelle Werthe a, b von x ;
- 2) der Quotient $\frac{(x-a)(b-x)}{F(x)}$, welcher mit $\frac{1}{F_1(x)}$ bezeichnet werde, ändert sein Zeichen nicht und wird nicht unendlich, so lange x in dem Intervall $a \dots b$ bleibt;
- 3) für irgend einen bestimmten Werth von t ist der zugehörige von x in diesem Intervall enthalten.

Man setze nämlich, $b > a$ annehmend und unter v eine neue reelle Veränderliche verstehend,

$$x = \frac{a+b}{2} + \frac{a-b}{2} \cos v,$$

so ist

$$\begin{aligned}x - a &= \frac{b - a}{2} (1 - \cos v), & b - x &= \frac{b - a}{2} (1 + \cos v), \\(x - a)(b - x) &= \left(\frac{b - a}{2}\right)^2 \sin^2 v, \\ \frac{dx}{dt} &= -\frac{a - b}{2} \sin v \frac{dv}{dt};\end{aligned}$$

und es wird also die gegebene Differentialgleichung befriedigt, wenn man v so bestimmt, dass

$$\frac{dv}{dt} = \sqrt{F_1\left(\frac{a+b}{2} + \frac{a-b}{2} \cos v\right)}$$

ist, wobei der Quadratwurzel ihr positiver Werth beigelegt werde.

Nun werde ferner

$$F_1\left(\frac{a+b}{2} + \frac{a-b}{2} \cos v\right) \text{ mit } f(\cos v)$$

und das Integral

$$\int_0^{\psi(v)} \frac{dv}{\sqrt{f(\cos v)}} \text{ mit } \psi(v)$$

bezeichnet, so ist $\psi(v)$ eine Function, welche, wenn v beständig wachsend alle reellen Werthe von $-\infty$ bis $+\infty$ durchläuft, ebenfalls stetig wachsend von $-\infty$ in $+\infty$ übergeht. Daraus folgt, wenn man

$$\psi(v) = w$$

setzt, dass zu jedem reellen Werthe von w ein Werth von v gehört, der sich stetig mit jenem ändert; oder mit anderen Worten, dass es eine ganz bestimmte continuirliche Function $\varphi(w)$ giebt, die für v gesetzt die vorstehende Gleichung befriedigt. Nimmt man also, unter τ eine beliebige Constante verstehend,

$$v = \varphi(t + \tau)$$

an, so hat man

$$t + \tau = \psi(v), \quad dt = \psi'(v) dv, \quad \frac{dv}{dt} = \sqrt{f(\cos v)},$$

und es wird die Differentialgleichung

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 = F(x)$$

befriedigt, wenn man

$$x = \frac{a+b}{2} + \frac{a-b}{2} \cos [\varphi(t+\tau)]$$

setzt.

Es lässt sich aber auch leicht zeigen, dass dieser Ausdruck jede Function darstellt, die unter den gemachten Voraussetzungen der Differentialgleichung genügt. Denn es ist stets möglich, τ so zu bestimmen, dass für einen gegebenen Werth t_0 von t nicht nur x einen in dem Intervall $a \dots b$ willkürlich angenommenen Werth x_0 , sondern auch $\frac{dx}{dt}$ ein vorgeschriebenes Zeichen erhält. Es folgt nämlich aus dem vorstehenden Ausdrücke von x

$$\frac{dx}{dt} = \frac{b-a}{2} \sin [\varphi(t+\tau)] \varphi'(t+\tau),$$

und es hat daher, da $\varphi'(t+\tau) = \frac{dv}{dt}$ positiv ist, $\sin [\varphi(t+\tau)]$ stets dasselbe Zeichen wie $\frac{dx}{dt}$. Man braucht daher, um den angegebenen Bedingungen Genüge zu leisten, nur einen Bogen v_0 so zu bestimmen, dass

$$x_0 = \frac{a+b}{2} + \frac{a-b}{2} \cos v_0$$

wird und zugleich $\sin v_0$ das Zeichen von $\left(\frac{dx}{dt}\right)_{t_0}$ erhält, und dann

$$\tau = \psi(v_0) - t_0$$

zu nehmen, so dass $v_0 = \varphi(t_0 + \tau)$ wird.

Aus der Formel

$$\frac{d\psi(v)}{dv} = \frac{1}{\sqrt{f(\cos v)}}$$

ergiebt sich

$$\frac{d\psi(v+2\pi)}{dv} = \frac{d\psi(v)}{dv},$$

und hieraus

$$\psi(v+2\pi) = \psi(v) + 2\omega,$$

wo ω eine positive Constante bedeutet. Da nun

$$t + \tau = \psi(v),$$

so folgt

$$\begin{aligned} t + 2\omega + \tau &= \psi(v + 2\pi), \\ \varphi(t + 2\omega + \tau) &= \varphi(t + \tau) + 2\pi; \end{aligned}$$

und es ist daher

$$x = \frac{a+b}{2} + \frac{a-b}{2} \cos [\varphi (t + \tau)]$$

eine Function, die ihren Werth nicht ändert, wenn t um ein beliebiges Vielfaches von 2ω vermehrt oder vermindert wird.

Ferner wird

$$\text{für } t = -\tau: \quad v = 0, \quad x = a;$$

$$\text{für } t = -\tau + \omega: \quad v = \pi, \quad x = b;$$

$$\text{für } t = -\tau + 2\omega: \quad v = 2\pi, \quad x = a;$$

woraus sich weiter ergibt, dass x die Grenzwerte a, b unzählige Mal erhält, den ersteren für $t = -\tau + 2\nu\omega$, wo (wie überall im Folgenden) ν eine beliebige ganze Zahl bedeuten soll, und den anderen für $t = -\tau + (2\nu + 1)\omega$. Auch folgt aus dem in Betreff des Zeichens von $\frac{dx}{dt}$ Bemerkten, dass x bei einem solchen Übergange von einer Grenze zur anderen beständig wächst oder beständig abnimmt.

Aus der Gleichung

$$\psi(v + 2\pi) = \psi(v) + 2\omega$$

erhält man, wenn man $v = -\pi$ setzt und bemerkt, dass

$$\psi(-v) = -\psi(v)$$

ist,

$$\omega = \psi(\pi) = \int_0^\pi \frac{dv}{\sqrt{f(\cos v)}} = \int_a^b \frac{dx}{\sqrt{F(x)}},$$

wo $\sqrt{F(x)}$ positiv zu nehmen ist.

Führt man jetzt eine neue Veränderliche $u = \frac{\pi}{\omega}(t + \tau)$ ein, so wird $\cos v$ eine gerade Function von u mit der Periode 2π und kann daher in der Form

$$\cos v = A_0 + 2A_1 \cos u + 2A_2 \cos 2u + \dots + 2A_n \cos nu + \dots$$

dargestellt werden, wo A_0, A_1, \dots Constanten sind, die sich als bestimmte Integrale folgendermassen ausdrücken lassen.

Zunächst hat man

$$\pi A_n = \int_0^\pi \cos v \cos nu \, du.$$

Es geht aber, der Gleichung

$$u = \frac{\pi}{\omega}(t + \tau) = \frac{\pi}{\omega}\psi(v)$$

zufolge, u stetig wachsend von 0 in π über, wenn v das Intervall $0 \dots \pi$ durchläuft, und es ergibt sich daher, da

$$du = \frac{\pi}{\omega} \frac{dv}{\sqrt{f(\cos v)}}$$

ist,

$$A_n = \frac{1}{\omega} \int_0^\pi \cos v \cos\left(\frac{n\pi}{\omega}\psi(v)\right) \frac{dv}{\sqrt{f(\cos v)}}.$$

Ganz ebenso erhält man, wenn $G(x)$ eine beliebige, für alle in dem Intervalle $a \dots b$ liegenden Werthe von x eindeutig bestimmte und stetige Function ist,

$$G(x) = B_0 + 2B_1 \cos u + \dots + 2B_n \cos nu + \dots,$$

$$B_n = \frac{1}{\omega} \int_0^\pi G(x) \cos\left(\frac{n\pi}{\omega}\psi(v)\right) \frac{dv}{\sqrt{f(\cos v)}},$$

wo für x der Ausdruck

$$\frac{a+b}{2} + \frac{a-b}{2} \cos v$$

zu setzen ist.

Durch partielle Integration erhält man ferner, wenn $n > 0$ ist,

$$\begin{aligned} A_n &= \frac{1}{n\pi} \int_0^\pi \sin v \sin\left(\frac{n\pi}{\omega}\psi(v)\right) dv \\ &= \frac{1}{2n\pi} \int_0^\pi \cos\left(\frac{n\pi}{\omega}\psi(v) - v\right) dv - \frac{1}{2n\pi} \int_0^\pi \cos\left(\frac{n\pi}{\omega}\psi(v) + v\right) dv. \end{aligned}$$

$G(x)$ aber kann man stets auf die Form

$$G_0 + G_1 \cos v + G_2 \cos 2v + \dots$$

bringen und deshalb, da

$$\frac{1}{\omega} \int_0^\pi \cos v \cos\left(\frac{n\pi}{\omega}\psi(v)\right) \frac{dv}{\sqrt{f(\cos v)}} = \frac{v}{n\pi} \int_0^\pi \sin v \sin\left(\frac{n\pi}{\omega}\psi(v)\right) dv$$

ist, B_n aus den in der Formel

$$\frac{\nu}{2n\pi} \int_0^\pi \cos\left(\frac{n\pi}{\omega} \psi(v) - \nu v\right) dv$$

enthaltenen bestimmten Integralen zusammensetzen.

Als ein einfaches Beispiel für die Anwendung dieser Formeln erinnere ich an die Aufgabe, den Radiusvector eines Planeten und dessen Potenzen durch die Zeit auszudrücken, welche von Bessel und Hansen in der hier dargestellten Weise behandelt worden ist.

In den meisten Fällen aber, selbst wenn die Function $F(x)$ eine einfache Form hat, sind die Coefficienten A_n, B_n sehr complicirt zusammengesetzte Grössen, deren direkte Entwicklung aus den aufgestellten Ausdrücken schwierig erscheint. Man kann sie jedoch fast immer durch ein Verfahren bestimmen, welches das Eigenthümliche hat, ohne jede Integration zum Ziele zu führen, und zugleich sehr geeignet ist, eine Einsicht in die Zusammensetzungsweise der zu entwickelnden Grössen zu gewähren und so auch bei der Ermittlung angenäherter Ausdrücke für dieselben, mit denen man sich oft begnügen kann, wesentliche Dienste zu leisten.

2.

Ich nehme an, es sei die Function $F(x)$ nicht bloss für reelle Werthe von x , sondern auch für alle complexen innerhalb eines die Strecke $a \dots b$ in sich enthaltenden Bereiches eindeutig definirt, und so beschaffen, dass $F_1(x)$ weder Null noch unendlich gross wird. Es wird kaum ein der analytischen Behandlung überhaupt zugänglicher Fall vorkommen, wo dies nicht zutrifft.

Setzt man dann, unter α, β, ξ, η reelle Grössen verstehend,

$$v = \alpha + \beta i, \quad x = \xi + \eta i,$$

so hat man

$$\xi = \frac{a+b}{2} + \frac{a-b}{2} \cos \beta i \cos \alpha,$$

$$\eta = -\frac{a-b}{2} \frac{\sin \beta i}{i} \sin \alpha.$$

Hiernach ist, wenn man β einen bestimmten Werth beilegt, α aber veränderlich lässt, der Ort des die complexe Grösse x repräsentirenden Punktes,

dessen Coordinaten ξ, η sind, eine Ellipse mit den Brennpunkten a, b und den Halbaxen $\frac{b-a}{2} \cos \beta i, \frac{b-a}{2} \frac{\sin \beta i}{i}$. Setzt man daher fest, es solle β stets in dem Intervalle $-\beta_0 \dots + \beta_0$ bleiben, a aber alle Werthe von $-\infty$ bis $+\infty$ annehmen können, so liegt der Punkt x stets im Innern oder auf dem Umfange derjenigen Ellipse, die zu dem Werthe β_0 gehört. Diese kann man nun, wenn man nur die positive Grösse β_0 hinlänglich klein annimmt, der die Punkte a, b verbindenden Geraden so nahe sich anschliessen lassen, dass die Function $F_1(x)$ für alle so limitirten Werthe von x die angegebene Eigenschaft besitzt. Wird dann bestimmt, dass $\sqrt{F_1(x)}$ für $x = a$ positiv sein soll, so sind dadurch und durch die im Folgenden stets festzuhaltende Bedingung, dass x beim Übergange von einem Werthe zum anderen nicht aus dem angegebenen Bereich heraustreten darf, $\sqrt{F_1(x)}$ und $\frac{1}{\sqrt{F_1(x)}}$ als eindeutige und continuirliche Functionen von x , und somit auch von v , vollständig definirt. Und da dieselben ihren Werth nicht ändern, wenn $\pm v + 2v\pi$ für v gesetzt wird, so kann man $\frac{1}{\sqrt{F_1(x)}}$ oder $\frac{1}{\sqrt{f(\cos v)}}$ durch eine für alle jetzt in Betracht kommenden Werthe von v convergirende Reihe

$$a_0 + 2a_1 \cos v + 2a_2 \cos 2v + \dots$$

darstellen. Setzt man dann

$$a_0 v + 2a_1 \sin v + 2a_2 \frac{\sin 2v}{2} + \dots = \psi(v),$$

so ist $\psi(v)$ für reelle Werthe von v dieselbe Function wie die im Vorhergehenden so bezeichnete, und somit

$$\omega = a_0 \pi.$$

Jetzt werde eine Function z von v durch die Formel

$$z = e^{\frac{\pi i}{\omega} \psi(v)}$$

definirt, so lässt sich zeigen, dass wenn α stetig wachsend von einem bestimmten Werthe α_0 in $\alpha_0 + 2\pi$ übergeht, während β unverändert bleibt, der Punkt z eine einfache geschlossene Linie beschreibt, welche ganz innerhalb oder ganz ausserhalb eines mit dem Radius 1 um den Nullpunkt beschriebenen Kreises liegt, je nachdem β positiv oder negativ ist, während sie, wenn $\beta = 0$, mit diesem Kreise zusammenfällt, vorausgesetzt, dass der Grenzwert β_0

hinlänglich klein angenommen werde. Setzt man nämlich

$$\psi(\alpha + \beta i) = p + qi, \quad z = e^{-\frac{\pi}{\omega} q} \cdot e^{\frac{\pi i}{\omega} p},$$

so ist

$$p = a_0 \alpha + 2a_1 \cos \beta i \sin \alpha + 2a_2 \cos 2\beta i \frac{\sin 2\alpha}{2} + \dots,$$

$$q = a_0 \beta + 2a_1 \frac{\sin \beta i}{i} \cos \alpha + 2a_2 \frac{\sin 2\beta i}{i} \frac{\cos 2\alpha}{2} + \dots,$$

und

$$\frac{\partial p}{\partial \alpha} = a_0 + 2a_1 \cos \beta i \cos \alpha + 2a_2 \cos 2\beta i \cos 2\alpha + \dots$$

Für $\beta = 0$ wird

$$\frac{\partial p}{\partial \alpha} = \frac{1}{\sqrt{f(\cos \alpha)}}, \quad \frac{q}{\beta} = a_0 = \frac{\omega}{\pi}, \quad \frac{1}{\sqrt{f(\cos \alpha)}}$$

und es sind also beide Grössen positiv, woraus erhellt, dass bei hinlänglicher Kleinheit von β_0

$$\frac{\partial p}{\partial \alpha} \text{ stets positiv}$$

sein und

$$q \text{ das Zeichen von } \beta$$

haben wird. Dann geht, wenn p_0 der Werth von p für $\alpha = \alpha_0$ ist, $\frac{\pi p}{\omega}$ beständig wachsend von $\frac{\pi p_0}{\omega}$ in $\frac{\pi p_0}{\omega} + 2\pi$ über, während α das Intervall $\alpha_0 \dots \alpha_0 + 2\pi$ durchläuft, und es dreht sich die den Nullpunkt mit dem Punkte z verbindende Gerade beständig im positiven Sinne. Ferner ist

$$e^{-\frac{\pi}{\omega} q} \begin{cases} \geq 1, \\ \leq 1, \end{cases} \text{ je nachdem } \beta \begin{cases} \leq 0; \\ \geq 0; \end{cases}$$

womit das Behauptete bewiesen ist.

Man stelle sich nun vor, es durchlaufe v den Umfang des durch die vier Punkte

$$-\beta_0 i, \quad 2\pi - \beta_0 i, \quad 2\pi + \beta_0 i, \quad \beta_0 i$$

bestimmten Rechtecks in dem durch diese Aufeinanderfolge festgesetzten Sinne, so beschreibt der Punkt z zuerst von einer bestimmten Stelle z_0 aus im positiven Sinne eine einfache geschlossene Linie (l_0), die ganz im Äusseren des eben genannten Kreises liegt, geht dann dem Nullpunkt sich nähernd zu einer innerhalb des Kreises liegenden Stelle z_1 über, beschreibt von da aus,

stets innerhalb des Kreises bleibend, im negativen Sinne eine zweite einfache geschlossene Linie (l_1), und kehrt darauf von z_1 nach z_0 zurück, denselben Weg, den er beim Übergange von z_0 zu z_1 genommen, im entgegengesetzten Sinne durchlaufend. Nach einem bekannten Satze entspricht also jedem Punkte z in dem von den Linien l_0, l_1 begrenzten Ringe ein Punkt v des Rechtecks, der mit ihm durch die Gleichung

$$z = e^{\frac{\pi i}{\omega} \psi(v)}$$

verbunden ist; wobei jedoch von den beiden Seiten des Rechtecks, die durch die Punkte $0, 2\pi$ gehen, eine ausgeschlossen werden muss. Und da z unverändert bleibt, wenn $v + 2\nu\pi$ für v gesetzt wird, so erhält man aus diesem einen Werthe von v alle übrigen, die für denselben Werth von z die vorstehende Gleichung befriedigen, wenn man zu ihm alle Vielfachen von 2π addirt. Hieraus folgt nun, dass e^{vi} eine eindeutige und continuirliche Function von z ist.

Nun sei ϱ der grösste Werth, den $e^{-\frac{\pi}{\omega} q}$, nachdem man $\beta = \beta_0$ gesetzt hat, annehmen kann, so ist nach dem Vorhergehenden $\varrho < 1$ und zugleich $\frac{1}{\varrho}$ der kleinste Werth von $e^{-\frac{\pi}{\omega} q}$, wenn $\beta = -\beta_0$ genommen wird. Legt man also der Veränderlichen z nur solche Werthe bei, die dem absoluten Betrage nach nicht kleiner als ϱ und nicht grösser als $\frac{1}{\varrho}$ sind, so gehören diese alle dem von den Linien l_0, l_1 begrenzten Bereiche an, und zugleich lässt sich alsdann e^{vi} in eine Reihe

$$c_0 + c_1 z + c_2 z^2 + \dots \\ + c'_1 z^{-1} + c'_2 z^{-2} + \dots$$

entwickeln. Daraus folgt, wenn man $-v$ für v , mithin $\frac{1}{z}$ für z setzt,

$$e^{-vi} = c_0 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots \\ + c'_1 z + c'_2 z^2 + \dots,$$

und man hat daher die Gleichung

$$\cos v = A_0 + A_1(z + z^{-1}) + A_2(z^2 + z^{-2}) + \dots,$$

wo

$$A_0 = c_0, \quad A_n = \frac{1}{2} (c_n + c'_n)$$

ist, für jeden Werth von v , bei dem der absolute Betrag von

$$e^{\frac{\pi i}{\omega} \psi(v)}$$

nicht ausserhalb der angegebenen Grenzen liegt.

Setzt man nun

$$v = \varphi(t + \tau),$$

wo $\varphi(t + \tau)$ wieder die oben definirte reelle Function von t bedeutet, so ist

$$t + \tau = \psi(v),$$

$$\cos v = A_0 + 2A_1 \cos \frac{\pi}{\omega} (t + \tau) + 2A_2 \cos \frac{2\pi}{\omega} (t + \tau) + \dots,$$

und daher sind A_0, A_1, A_2, \dots dieselben Grössen wie vorhin. Es geht aber aus der vorstehenden Deduction hervor, dass die durch die Gleichung

$$x = \frac{a+b}{2} + \frac{a-b}{2} \left(A_0 + 2A_1 \cos \frac{\pi}{\omega} (t + \tau) + \dots \right)$$

definirte Function von t nicht nur für reelle Werthe dieser Grösse der Differentialgleichung

$$\left(\frac{dx}{dt} \right)^2 = F(x)$$

genügt, sondern auch für jeden complexen Werth, dessen zweite Coordinate — d. h. der reelle Theil von $\frac{t}{i}$ — ihrem absoluten Betrage nach eine gewisse Grenze nicht überschreitet. Diese kann nicht grösser als $\frac{\omega}{\pi} \lg \left(\frac{1}{\rho} \right)$ sein; doch ist dies nicht nothwendig ihr wahrer Werth, indem durch das Vorhergehende nur nachgewiesen wird, dass es überhaupt eine solche Grenze giebt. Je grösser aber dieselbe ist, um so stärker convergirt die Reihe für x bei reellen Werthen von t .

Aus der Gleichung

$$x = \frac{a+b}{2} + \frac{a-b}{2} \left(A_0 + A_1(z + z^{-1}) + A_2(z^2 + z^{-2}) + \dots \right),$$

oder

$$x = C_0 + C_1(z + z^{-1}) + C_2(z^2 + z^{-2}) + \dots,$$

wo

$$C_0 = \frac{a+b}{2} + \frac{a-b}{2} A_0, \quad C_n = \frac{a-b}{2} A_n,$$

ergibt sich jetzt, wenn wir wieder x und z als Functionen von $v = \alpha + \beta i$ ansehen, folgende Bestimmung der Coefficienten C_n . Man gebe β irgend einen bestimmten Werth, bei dem der absolute Betrag von z für jeden Werth von α zwischen den Grenzen ϱ und $\frac{1}{\varrho}$ bleibt, so ist

$$\int_0^{2\pi} z^{-1} \frac{dz}{dv} d\alpha = 2\pi i, \quad \int_0^{2\pi} z^{\pm n-1} \frac{dz}{dv} d\alpha = 0, \text{ wenn } n > 0.$$

Daraus folgt

$$\int_0^{2\pi} x z^{-n} \frac{1}{z} \frac{dz}{dv} d\alpha = 2\pi i C_n,$$

$$\int_0^{2\pi} x z^{+n} \frac{1}{z} \frac{dz}{dv} d\alpha = 2\pi i C_n,$$

und daher auch

$$C_n = \frac{1}{2\pi i} \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} x (z^n + z^{-n}) \frac{1}{z} \frac{dz}{dv} d\alpha.$$

Nun ist aber $\frac{1}{2}(z^n + z^{-n})$ als Function von x betrachtet eindeutig. Denn hat man für einen bestimmten Werth von x einen def. Gleichung

$$x = \frac{a+b}{2} + \frac{a-b}{2} \cos v$$

genügenden Werth v , so sind die übrigen in der Formel $\pm v + 2\nu\pi$ enthalten; für alle diese aber hat, da

$$\psi(\pm v + 2\nu\pi) = \pm \psi(v) + 2\nu\omega$$

ist, $\frac{1}{2}(z^n + z^{-n})$ denselben Werth. Ferner ist

$$\frac{1}{z} \frac{dz}{dv} = \frac{\pi i}{\omega} \frac{1}{\sqrt{f(\cos v)}} = \frac{\pi i}{\omega} \frac{1}{\sqrt{F_1(x)}},$$

$$dx = \frac{b-a}{2} \sin v d\alpha = \pm \sqrt{(x-a)(b-x)} d\alpha,$$

wobei der Werth der Wurzelgrösse folgendermassen fixirt werden möge.

Für einen Punkt x ausserhalb der Strecke $a \dots b$ wird $\frac{x-a}{x-b}$ niemals eine reelle negative Grösse, und es ist daher für einen solchen $\sqrt{(x-a)(b-x)}$ völlig bestimmt, wenn festgesetzt wird, es solle

$$\sqrt{(x-a)(b-x)} = i(x-a) \sqrt{\frac{x-b}{x-a}}$$

und der reelle Theil von $\sqrt{\frac{x-b}{x-a}}$ positiv sein. Dasselbe gilt von $\sqrt{F(x)}$, wenn man

$$\sqrt{F(x)} = \sqrt{(x-a)(b-x)} \cdot \sqrt{F_1(x)}$$

nimmt und $\sqrt{F_1(x)}$ so fixirt, wie oben angegeben worden. Nun ist für den Punkt, in welchem die betrachtete Ellipse die über b hinaus verlängerte Strecke $a \dots b$ schneidet, $\alpha = \pi$, also $\sin v = -\sin \beta i$, und daher stets

$$\frac{b-a}{2} \sin(\alpha + \beta i) = \begin{cases} +\sqrt{(x-a)(b-x)}, & \text{wenn } \beta \text{ negativ,} \\ -\sqrt{(x-a)(b-x)}, & \text{wenn } \beta \text{ positiv,} \end{cases}$$

indem es, weil $\sqrt{(x-a)(b-x)}$ und $\sin(\alpha + \beta i)$ sich stetig mit α ändern, ohne jemals zu verschwinden, hinreicht, dass diese Zeichenbestimmung für einen Werth von α als richtig nachgewiesen wird.

Dieses vorausgesetzt, gebe man β irgend einen negativen Werth, so dass die zugehörige Ellipse, wie aus den obigen Ausdrücken von ξ, η zu ersehen ist, von einem Punkte in ihrem Inneren aus betrachtet im positiven Sinne beschrieben wird, wenn α von 0 bis 2π wächst. Dann erhält man, wenn man $\frac{1}{2}(z^n + z^{-n})$, als Function von x aufgefasst, mit $P(x, n)$ bezeichnet,

$$C_n = \frac{1}{2\omega} \int \frac{xP(x, n)dx}{\sqrt{F(x)}},$$

wo sich die Integration im positiven Sinne über alle Punkte der Ellipse zu erstrecken hat, an deren Stelle jedoch, was wohl zu beachten ist, jetzt jede andere einfache in sich zurücklaufende und die Punkte a, b in demselben Sinne umschliessende Linie treten kann, wenn sie nur ganz in dem Bereiche liegt, für dessen Punkte $F(x)$ die oben angegebene Beschaffenheit hat.

Dieser Ausdruck von C_n erweist sich nun in vielen Fällen zur Berechnung dieser Grösse sehr brauchbar. Angenommen z. B. es gelinge, $\frac{P(x, n)}{\sqrt{F_1(x)}}$ für alle einem einfach begrenzten, die Strecke $a \dots b$ in sich enthaltenden Bereiche angehörigen Werthe von x durch eine Reihe

$$\overset{0}{G}(x, n) + \overset{1}{G}(x, n) + \overset{2}{G}(x, n) + \dots,$$

deren Glieder sämmtlich ganze Functionen von x sind, darzustellen; so er-

giebt sich zunächst

$$C_n = \frac{1}{2\omega} \sum_{\lambda} \int \frac{\overset{\lambda}{G}(x, n) x dx}{\sqrt{(x-a)(b-x)}}$$

unter der Bedingung, dass jede einzelne Integration auf die eben angegebene Weise ausgeführt werde. Da aber $\overset{\lambda}{G}(x, n)$ eine ganze Function von x ist, so kann man zur Bestimmung von

$$\int \frac{\overset{\lambda}{G}(x, n) x dx}{\sqrt{(x-a)(b-x)}}$$

den ursprünglichen Integrationsweg durch irgend einen Kreis ersetzen, der die Punkte a, b umschliesst, wobei es gar nicht nothwendig ist, dass die Reihe

$$\overset{0}{G}(x, n) + \overset{1}{G}(x, n) + \dots$$

für alle Punkte desselben convergirt. Ist nun c der Mittelpunkt des Kreises, so kann man ferner seinen Radius so gross wählen, dass für alle Punkte des Umfangs

$$\frac{1}{\sqrt{(x-a)(b-x)}}$$

sich nach ganzen und positiven Potenzen von $\frac{1}{x-c}$ entwickeln lässt, wobei das Anfangsglied $\frac{1}{i(x-c)}$ sein muss, weil

$$\frac{\sqrt{(x-a)(b-x)}}{i}$$

für alle reellen Werthe von x , die $> b$ sind, positiv ist. Dann ist aber der Werth des Integrals gleich

$$2\pi i \left(\frac{x \overset{\lambda}{G}(x, n)}{\sqrt{(x-a)(b-x)}} \right)_{(x-c)^{-1}}$$

und somit

$$C_n = \frac{\pi}{\omega} \sum_{\lambda} \left(\frac{x \overset{\lambda}{G}(x, n)}{\sqrt{(x-a)(x-b)}} \right)_{(x-c)^{-1}},$$

wenn hier für $\frac{1}{\sqrt{(x-a)(x-b)}}$ die Entwicklung dieser Function nach Potenzen von $\frac{1}{x-c}$, in der das Anfangsglied $\frac{1}{x-c}$ ist, gesetzt wird.

Ganz ebenso ergeben sich die oben mit B_0, B_1, \dots bezeichneten Coefficienten, wenn nur die Function $G(x)$ ebenfalls für alle complexen Werthe von x innerhalb eines die Strecke $a \dots b$ enthaltenden Bereiches eindeutig defnirt und stetig ist. Man hat dann

$$B_n = \frac{1}{2\omega} \int \frac{G(x) P(x, n) dx}{\sqrt{F(x)}} = \frac{\pi}{\omega} \sum_{\lambda} \left(\frac{\overset{\lambda}{G}(x, n) G(x)}{\sqrt{(x-a)(x-b)}} \right)_{(x-c)^{-1}}.$$

Nimmt man in dieser Formel $G(x) = 1$ und $n = 0$, so erhält man noch

$$\frac{\omega}{\pi} = \sum_{\lambda} \left(\frac{\overset{\lambda}{G}(x, 0)}{\sqrt{(x-a)(x-b)}} \right)_{(x-c)^{-1}},$$

wobei zu bemerken, dass

$$\frac{1}{\sqrt{F_1(x)}} = \sum_{\lambda} \overset{\lambda}{G}(x, 0)$$

ist.

Entwicklungen der Function $\frac{P(x, n)}{\sqrt{F_1(x)}}$ von der angegebenen Form existiren aber stets. Dies geht schon daraus hervor, dass ja

$$\frac{1}{2} \frac{e^n + e^{-n}}{\sqrt{F_1(x)}}$$

als Function von v betrachtet für alle complexen Werthe dieser Grösse, bei denen β zwischen $-\beta_0$ und β_0 liegt, durch eine Reihe

$$b_0 + 2b_1 \cos v + 2b_2 \cos 2v + \dots$$

darstellbar, $\cos nv$ aber eine ganze rationale Function von x ist. Ebenso ist eine Entwicklung nach Kugel-Functionen mit dem Argument $\frac{2x-a-b}{b-a}$ möglich, die für alle Werthe von x innerhalb einer Ellipse mit den Brennpunkten a, b convergirt. Wenn ferner $F_1(x)$ für alle Punkte im Inneren eines die Strecke $a \dots b$ umschliessenden Kreises die vorausgesetzte Beschaffenheit hat, so lässt sich die in Rede stehende Function auch nach ganzen Potenzen von $x-c$ entwickeln, wo c den Mittelpunkt des Kreises bezeichnet, und dann erhält man vermittelst der vorstehenden Formeln die einfachste Bestimmung der Grösse C_n . Alle diese Reihen werden sich aber am einfachsten aus einer linearen Differentialgleichung, der

$$\frac{P(x, n)}{\sqrt{F_1(x)}}$$

genügt, herleiten lassen, zumal wenn, wie das oft vorkommt, $F(x)$ eine rationale Function von x ist.

Aus der Gleichung

$$z^n + z^{-n} = 2P(x, n)$$

erhält man nämlich, da

$$\frac{dz}{z} = \frac{\pi i}{\omega} d\psi(v) = \frac{\pi i}{\omega} \frac{dx}{\sqrt{F(x)}}$$

ist,

$$z^n - z^{-n} = \frac{2\omega}{n\pi i} \frac{dP(x, n)}{dx} \sqrt{F(x)},$$

$$z^n = P(x, n) + \frac{\omega}{n\pi i} \frac{dP(x, n)}{dx} \sqrt{F(x)},$$

$$z^{-n} = P(x, n) - \frac{\omega}{n\pi i} \frac{dP(x, n)}{dx} \sqrt{F(x)}.$$

Der Wurzelgrösse $\sqrt{F(x)}$ müssen hier ihre beiden Werthe beigelegt werden, indem z als Function von x zweiwerthig ist. Daraus folgt weiter, wenn man jetzt P_n, F, F', F'' statt $P(x, n), F(x), F'(x), F''(x)$ schreibt,

$$F \left(\frac{dP_n}{dx} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{\omega} \right)^2 P_n^2 = \left(\frac{n\pi}{\omega} \right)^2,$$

$$F \frac{d^2 P_n}{dx^2} + \frac{1}{2} F' \frac{dP_n}{dx} + \left(\frac{n\pi}{\omega} \right)^2 P_n = 0,$$

oder auch

$$\sqrt{F} \frac{d}{dx} \left(\sqrt{F} \frac{dP_n}{dx} \right) + \left(\frac{n\pi}{\omega} \right)^2 P_n = 0.$$

Da $\psi(v) = 0$ ist für $v = 0$, und $\psi(v) = \omega$ für $v = \pi$, so hat man

$$P(a, n) = 1, \quad P(b, n) = (-1)^n,$$

so dass die beiden Constanten, welche die allgemeine Lösung der vorstehenden Differentialgleichung enthält, bestimmt werden können.

Man kann aber, statt die Functionen $P(x, n)$ und $\frac{1}{\sqrt{F(x)}}$ einzeln zu entwickeln, das Produkt derselben mittelst einer ähnlichen Differentialgleichung direct bestimmen. Bezeichnet man nämlich

$$\frac{P(x, n)}{\sqrt{F(x)}} \text{ mit } R(x, n) \text{ oder } R_n,$$

so hat man

$$\begin{aligned}\sqrt{F} \frac{dP_n}{dx} &= F \frac{dR_n}{dx} + \frac{1}{2} F' R_n, \\ \frac{d}{dx} \left(F \frac{dR_n}{dx} + \frac{1}{2} F' R_n \right) + \left(\frac{n\pi}{\omega} \right)^2 R_n &= 0, \\ F \frac{d^2 R_n}{dx^2} + \frac{3}{2} F' \frac{dR_n}{dx} + \left(\frac{1}{2} F'' + \left(\frac{n\pi}{\omega} \right)^2 \right) R_n &= 0.\end{aligned}$$

Wird ferner, $n > 0$ angenommen,

$$\begin{aligned}Q(x, n) = Q_n &= - \left(\frac{\omega}{n\pi} \right)^2 \sqrt{F(x)} \frac{dP(x, n)}{dx} \\ &= - \left(\frac{\omega}{n\pi} \right)^2 \left(F \frac{dR_n}{dx} + \frac{1}{2} F' R_n \right)\end{aligned}$$

gesetzt, so erhält man aus der zweiten Gleichung für P_n

$$\sqrt{F} \frac{d}{dx} \left(\sqrt{F} \frac{dQ_n}{dx} \right) + \left(\frac{n\pi}{\omega} \right)^2 Q_n = 0,$$

oder

$$F \frac{d^2 Q_n}{dx^2} + \frac{1}{2} F' \frac{dQ_n}{dx} + \left(\frac{n\pi}{\omega} \right)^2 Q_n = 0,$$

also dieselbe Gleichung wie für P_n selbst. Da nun

$$\frac{dQ_n}{dx} = - \left(\frac{\omega}{n\pi} \right)^2 \frac{d}{dx} \left(\sqrt{F} \frac{dP_n}{dx} \right) = R_n$$

ist, so ergeben sich aus den Formeln

$$C_n = \frac{1}{2\omega} \int x R(x, n) dx, \quad B_n = \frac{1}{2\omega} \int G(x) R(x, n) dx$$

durch partielle Integration noch die folgenden:

$$C_n = - \frac{1}{2\omega} \int Q(x, n) dx, \quad B_n = - \frac{1}{2\omega} \int G'(x) Q(x, n) dx.$$

Nun hat man

$$\begin{aligned}R(x, n) &= \frac{G(x, n)}{\sqrt{(x-a)(b-x)}}, \\ Q(x, n) &= H(x, n) \sqrt{(x-a)(b-x)}\end{aligned}$$

zu setzen und für $G(x, n), H(x, n)$ Entwicklungen von der Form

$$\begin{aligned} & \overset{0}{G}(x, n) + \overset{1}{G}(x, n) + \overset{2}{G}(x, n) + \dots, \\ & \overset{0}{H}(x, n) + \overset{1}{H}(x, n) + \overset{2}{H}(x, n) + \dots, \end{aligned}$$

wo $\overset{0}{H}, \overset{1}{H}, \dots$ ebenso wie $\overset{0}{G}, \overset{1}{G}, \dots$ ganze Functionen von x bedeuten sollen, aus den vorstehenden Differentialgleichungen abzuleiten; worauf man dann ausser den schon vorhin angegebenen Ausdrücken von B_n, C_n , wenn $n > 0$ ist,

$$\begin{aligned} C_n &= \frac{\pi}{\omega} \sum_{\lambda} \left(\overset{\lambda}{H}(x, n) \sqrt{(x-a)(x-b)} \right)_{(x-c)^{-1}}, \\ B_n &= \frac{\pi}{\omega} \sum_{\lambda} \left(G'(x) \overset{\lambda}{H}(x, n) \sqrt{(x-a)(x-b)} \right)_{(x-c)^{-1}} \end{aligned}$$

erhält, in welchen Formeln für $\sqrt{(x-a)(x-b)}$ die mit $x-c$ anfangende Entwicklung dieser Function nach fallenden Potenzen von $x-c$ zu setzen ist.

Hierbei ist noch zu bemerken, dass man zur Entwicklung der Functionen $G(x, n), H(x, n)$, welche zur Abkürzung mit G_n, H_n bezeichnet werden sollen, auch die Gleichungen

$$\begin{aligned} (x-a)(x-b) \frac{dH_n}{dx} + \left(x - \frac{a+b}{2}\right) H_n + G_n &= 0, \\ F_1(x) \frac{dG_n}{dx} + \frac{1}{2} F_1'(x) G_n + \left(\frac{n\pi}{\omega}\right)^2 H_n &= 0 \end{aligned}$$

anwenden kann, welche aus den vorhergehenden Gleichungen

$$\begin{aligned} \frac{dQ_n}{dx} - R_n &= 0, \\ F \frac{dR_n}{dx} + \frac{1}{2} F' R_n + \left(\frac{n\pi}{\omega}\right)^2 Q_n &= 0 \end{aligned}$$

sich ergeben; oder auch die Differentialgleichungen zweiter Ordnung, die sich aus ihnen für jede einzelne Function ableiten lassen. Zur Constanten-Bestimmung hat man dann

$$G(a, n) = \frac{1}{\sqrt{F_1(a)}}, \quad G(b, n) = \frac{(-1)^n}{\sqrt{F_1(b)}}$$

und, wie aus der ersten Differentialgleichung selbst folgt,

$$H(a, n) = \frac{2}{(b-a)\sqrt{F_1(a)}}, \quad H(b, n) = \frac{(-1)^n \cdot 2}{(a-b)\sqrt{F_1(b)}}.$$

Alle diese Differentialgleichungen sind besonders brauchbar in dem schon erwähnten Falle, dass sich P_n, G_n, H_n nach ganzen positiven Potenzen von $x-c$ entwickeln lassen. Namentlich erhält man, wenn F eine rationale Function ist, und daher für die zu entwickelnde Reihe, z. B. für H_n , sich eine Differentialgleichung

$$L \frac{d^2 H_n}{dx^2} + M \frac{dH_n}{dx} + NH_n = 0,$$

in der L, M, N ganze Functionen von x sind, finden lässt, zur Bestimmung ihrer Coefficienten Recursions-Formeln von möglichst einfacher Beschaffenheit. Es kann jedoch alsdann vortheilhaft sein, zunächst für $P(x, n)$ eine Entwicklung

$$\overset{0}{P}(x, n) + \overset{1}{P}(x, n) + \dots,$$

in der $\overset{0}{P}, \overset{1}{P}, \dots$ ganze Functionen sind, herzustellen, so dass

$$\int \frac{G(x) \overset{2}{P}(x, n)}{\sqrt{F(x)}} dx,$$

wenn auch $G(x)$ eine rationale Function ist, ein vollständiges Abel'sches Integral wird, zu dessen Bestimmung es besondere Methoden giebt.

Aus den obigen Formeln für z^n, z^{-n} geht noch hervor, dass

$$P(x, n) \pm \frac{\omega}{n\pi i} \frac{dP(x, n)}{dx} \sqrt{F(x)} = \left(P(x, 1) \pm \frac{\omega}{\pi i} \frac{dP(x, 1)}{dx} \sqrt{F(x)} \right)^n$$

ist. Man kann daher $P(x, n)$ aus $P(x, 1), \frac{dP(x, 1)}{dx}, F(x)$ zusammensetzen. In den meisten Fällen wird es aber einfacher sein, $P(x, n)$ mittelst der obigen Differentialgleichung direct zu bestimmen, da man ja nur für die in der Entwicklung von $P(x, 1)$ vorkommende Grösse $\frac{\pi}{\omega}$ überall $\frac{n\pi}{\omega}$ zu setzen hat.

homogene lineare Functionen von p, q sind, und einer von diesen Veränderlichen unabhängigen Grösse dargestellt werden. Dabei möge, um diesen Ausdruck von $[P, Q]$ zu einem völlig bestimmten zu machen, ein Paar besonderer Werthe (g, h) von (p, q) , für welche $[P, Q]$ nicht verschwindet, nach Willkür angenommen und festgesetzt werden, dass jeder einzelne der genannten n Factoren für $p = g, q = h$ den Werth Eins erhalten soll.

Dies vorausgesetzt, sei $ap + bq$ irgend einer dieser Factoren, und l der Exponent der höchsten in $[P, Q]$ aufgehenden Potenz desselben. Ferner bezeichne $l^{(x)}$ den Exponenten der höchsten Potenz von $ap + bq$, durch welche alle aus den Elementen von $[P, Q]$ gebildeten partiellen Determinanten $(n-x)^{\text{ter}}$ Ordnung — homogene ganze Functionen $(n-x)^{\text{ten}}$ Grades von p, q , die kurz Unter-Determinanten von $[P, Q]$ genannt werden mögen — theilbar sind. *)

Jede Determinante $(n-x+1)^{\text{ter}}$ Ordnung des Systems (2.) kann dargestellt werden als eine Summe, in welcher jedes einzelne Glied das Product aus einer Determinante $(n-x)^{\text{ter}}$ Ordnung und einem Elemente von $[P, Q]$ ist. Ein gemeinschaftlicher Theiler aller Determinanten $(n-x)^{\text{ter}}$ Ordnung muss daher auch ein Theiler aller Determinanten der $(n-x+1)^{\text{ten}}$ Ordnung, und somit überhaupt aller Determinanten von höherer als der $(n-x)^{\text{ten}}$ Ordnung sein. Daraus folgt, dass wenn von den Zahlen l, l', \dots irgend eine gleich Null ist, alle folgenden es ebenfalls sind. Da ferner die Ableitungen einer Determinante $(n-x+1)^{\text{ter}}$ Ordnung nach p und q sich darstellen lassen als Summen, in denen jedes Glied das Product aus einer Determinante $(n-x)^{\text{ter}}$ Ordnung und einem Coefficienten von P und Q ist, so muss $l^{(x-1)} > l^{(x)}$ sein, wofern nicht $l^{(x)} = 0$ ist. Hiernach bestehen, wenn in der Reihe der Zahlen l, l', \dots die letzte der von Null verschiedenen den Index $(r-1)$ hat, die Ungleichheiten

$$(3.) \quad l > l' > \dots > l^{(r-1)} > 0.$$

Setzt man daher

$$(4.) \quad e = l - l', \quad e' = l' - l'', \quad \dots \quad e^{(r-1)} = l^{(r-1)},$$

*) Die Bezeichnung $l^{(x)}$ ist in dem Sinne zu verstehen, dass $l^{(0)} = l, l^{(1)} = l', l^{(2)} = l'', \dots$

so sind $e, e', \dots e^{(r-1)}$ positive Zahlen, und man hat

$$(5.) \quad (ap + bq)^l = (ap + bq)^e (ap + bq)^{e'} \dots (ap + bq)^{e^{(r-1)}}.$$

Jeder einzelne der so definirten r Factoren von

$$(ap + bq)^l,$$

(also $(ap + bq)^l$ selbst, wenn $l = 0$ ist) möge ein Elementar-Theiler der Determinante von $pP + qQ$ heissen — ein Name, dessen Einführung die folgenden Untersuchungen rechtfertigen werden.

Hiernach ist, wenn

$$(a_1p + b_1q)^{e_1}, \quad (a_2p + b_2q)^{e_2}, \quad \dots \quad (a_qp + b_qq)^{e_q}$$

sämmtliche Elementar-Theiler von $[P, Q]$ sind,

$$(6.) \quad [P, Q] = C(a_1p + b_1q)^{e_1} (a_2p + b_2q)^{e_2} \dots (a_qp + b_qq)^{e_q},$$

wo C den Werth von $[P, Q]$ für $p = g, q = h$ bezeichnet. Die wesentliche Bedeutung aber, welche gerade diese Zerfällung von $[P, Q]$ in Factoren für das Formenpaar (P, Q) hat, erhellt aus folgendem Satze:

Es werde durch die Substitutionen

$$(7.) \quad \begin{cases} x_1 = \sum_{\gamma} h_{1\gamma} u_{\gamma}, & \dots & x_n = \sum_{\gamma} h_{n\gamma} u_{\gamma} \\ y_1 = \sum_{\gamma} k_{1\gamma} v_{\gamma}, & \dots & y_n = \sum_{\gamma} k_{n\gamma} v_{\gamma}, \end{cases}$$

wo $u_1, \dots u_n$ und $v_1, \dots v_n$ neue Veränderliche bedeuten, $h_{11}, \dots h_{nn}, k_{11}, \dots k_{nn}$ aber Constanten, welche keiner anderen Beschränkung unterworfen sind, als dass die Determinanten

$$(8.) \quad H = \begin{vmatrix} h_{11} & \dots & h_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ h_{n1} & \dots & h_{nn} \end{vmatrix}, \quad K = \begin{vmatrix} k_{11} & \dots & k_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ k_{n1} & \dots & k_{nn} \end{vmatrix}$$

nicht gleich Null sein dürfen, die Form

$$P(x_1, \dots x_n | y_1, \dots y_n) \text{ in eine andere } P'(u_1, \dots u_n | v_1, \dots v_n),$$

und zugleich

$$Q(x_1, \dots x_n | y_1, \dots y_n) \text{ in } Q'(u_1, \dots u_n | v_1, \dots v_n)$$

Demzufolge ist

$$(13.) \quad [P', Q'] = HK[P, Q],$$

jeder Theiler der einen Determinante also auch ein Theiler der anderen. Ferner lässt sich jede Unter-Determinante $(n-x)^{\text{ter}}$ Ordnung von $[P', Q']$ als ein Aggregat von Producten dreier Factoren, die Unter-Determinanten $(n-x)^{\text{ter}}$ Ordnung von H, K und $[P, Q]$ sind, darstellen. Jeder gemeinsame Theiler aller Unter-Determinanten einer bestimmten Ordnung von $[P, Q]$ ist also auch ein Theiler aller Unter-Determinanten derselben Ordnung von $[P', Q']$. Nun geht aber auch P' in P , und zugleich Q' in Q über, wenn man für u_1, \dots, u_n und v_1, \dots, v_n die aus den Gleichungen (7.) sich ergebenden linearen Functionen von x_1, \dots, x_n und y_1, \dots, y_n setzt; es muss daher jeder gemeinsame Theiler aller Unter-Determinanten einer bestimmten Ordnung von $[P', Q']$ auch ein Theiler aller Unter-Determinanten derselben Ordnung von $[P, Q]$ sein.

Hiernach ist, wenn die vorhin gebrauchten Bezeichnungen beibehalten werden,

$$(ap + bq)^l \quad (13)$$

auch die höchste in $[P', Q']$ enthaltene Potenz von $ap + bq$, und

$$(ap + bq)^{l^{(a)}}$$

die höchste in allen Unter-Determinanten $(n-x)^{\text{ter}}$ Ordnung von $[P', Q']$ enthaltene. Die als Elementar-Theiler von $[P, Q]$ definirten r Factoren von $(ap + bq)^l$:

$$(14.) \quad (ap + bq)^{l-l'}, (ap + bq)^{l-l''}, \dots, (ap + bq)^{l^{(r-1)}}$$

sind also auch die zu demselben Theiler $(ap + bq)^l$ gehörigen Elementar-Theiler von $[P', Q']$; w. z. b. w.

Der Beweis für den zweiten Theil des aufgestellten Satzes beruht darauf, dass ein Formenpaar P, Q durch eine bestimmte lineare Transformation in ein anderes verwandelt werden kann, dessen Coefficienten gegeben sind, wenn man die einzelnen Elementar-Theiler der Determinante $[P, Q]$ kennt.

3.

Man setze, unter s eine unbeschränkt veränderliche Grösse verstehend und unter g', h' Constanten, die mit g, h durch die Relation

$$(15.) \quad gh' - hg' = 1$$

verbunden sind,

$$(16.) \quad p = gs - g', \quad q = hs - h',$$

$$(17.) \quad \Phi = gP + hQ, \quad \Psi = g'P + h'Q,$$

$$(18.) \quad a_{\alpha\beta} = gA_{\alpha\beta} + hB_{\alpha\beta}, \quad b_{\alpha\beta} = g'A_{\alpha\beta} + h'B_{\alpha\beta},$$

$$(19.) \quad S = [P, Q] = \begin{vmatrix} sa_{11} - b_{11}, & \dots & sa_{1n} - b_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ sa_{n1} - b_{n1}, & \dots & sa_{nn} - b_{nn} \end{vmatrix}.$$

Dann folgt aus den Gleichungen

$$(20.) \quad p \frac{\partial P}{\partial x_\alpha} + q \frac{\partial Q}{\partial x_\alpha} = s \frac{\partial \Phi}{\partial x_\alpha} - \frac{\partial \Psi}{\partial x_\alpha} = \sum_{\beta} (sa_{\alpha\beta} - b_{\alpha\beta}) y_{\beta}$$

$$(21.) \quad p \frac{\partial P}{\partial y_{\beta}} + q \frac{\partial Q}{\partial y_{\beta}} = s \frac{\partial \Phi}{\partial y_{\beta}} - \frac{\partial \Psi}{\partial y_{\beta}} = \sum_{\alpha} (sa_{\alpha\beta} - b_{\alpha\beta}) x_{\alpha},$$

wenn man mit

$$(-1)^{\alpha+\beta} S_{\alpha\beta}$$

diejenige Unter-Determinante bezeichnet, deren Elementen-System aus dem von S durch Weglassung der α^{ten} Horizontal- und der β^{ten} Verticalreihe entsteht,

$$(22.) \quad \left\{ \begin{array}{l} y_{\beta} = \sum_{\alpha} \frac{S_{\alpha\beta}}{S} \left(s \frac{\partial \Phi}{\partial x_{\alpha}} - \frac{\partial \Psi}{\partial x_{\alpha}} \right) \\ x_{\alpha} = \sum_{\beta} \frac{S_{\alpha\beta}}{S} \left(s \frac{\partial \Phi}{\partial y_{\beta}} - \frac{\partial \Psi}{\partial y_{\beta}} \right) \\ \Phi = \sum_{\beta} \frac{\partial \Phi}{\partial y_{\beta}} y_{\beta} = \sum_{\alpha\beta} \frac{S_{\alpha\beta}}{S} \left(s \frac{\partial \Phi}{\partial x_{\alpha}} \frac{\partial \Phi}{\partial y_{\beta}} - \frac{\partial \Phi}{\partial y_{\beta}} \frac{\partial \Psi}{\partial x_{\alpha}} \right) \\ \Psi = \sum_{\alpha} \frac{\partial \Psi}{\partial x_{\alpha}} x_{\alpha} = \sum_{\alpha\beta} \frac{S_{\alpha\beta}}{S} \left(s \frac{\partial \Phi}{\partial y_{\beta}} \frac{\partial \Psi}{\partial x_{\alpha}} - \frac{\partial \Psi}{\partial x_{\alpha}} \frac{\partial \Psi}{\partial y_{\beta}} \right) \\ s\Phi + \Psi = \sum_{\alpha\beta} \frac{S_{\alpha\beta}}{S} \left(s^2 \frac{\partial \Phi}{\partial x_{\alpha}} \frac{\partial \Phi}{\partial y_{\beta}} - \frac{\partial \Psi}{\partial x_{\alpha}} \frac{\partial \Psi}{\partial y_{\beta}} \right). \end{array} \right.$$

Nun ist S eine ganze Function n^{ten} Grades von s (indem in ihr der Coefficient von s^n gleich der Determinante von $gP + hQ$ ist), $S_{\alpha\beta}$ aber eine von

nicht höherem als dem $(n-1)^{\text{ten}}$ Grade. Setzt man daher, unter

$$\xi_1, \dots, \xi_n, \quad \eta_1, \dots, \eta_n$$

$2n$ neue Veränderliche verstehend,

$$(23.) \quad F(\xi_1, \dots, \xi_n | \eta_1, \dots, \eta_n) = \sum_{\alpha\beta} \frac{S_{\alpha\beta}}{S} \eta_\alpha \xi_\beta,$$

so kann man für alle Werthe von s , die dem absoluten Betrage nach grösser sind als jede Wurzel der Gleichung $S = 0$, F nach fallenden Potenzen von s entwickeln, in der Form

$$(24.) \quad F = s^{-1} F_1(\xi_1, \dots, \xi_n | \eta_1, \dots, \eta_n) + s^{-2} F_2(\xi_1, \dots, \xi_n | \eta_1, \dots, \eta_n) + \dots,$$

und erhält dann aus der letzten der unter (22.) aufgestellten Gleichungen

$$(25.) \quad \left\{ \begin{array}{l} \Phi = gP + hQ = F_1 \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y_1}, \dots, \frac{\partial \Phi}{\partial y_n} \mid \frac{\partial \Phi}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial \Phi}{\partial x_n} \right) \\ \Psi = g'P + h'Q = F_2 \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y_1}, \dots, \frac{\partial \Phi}{\partial y_n} \mid \frac{\partial \Phi}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial \Phi}{\partial x_n} \right). \end{array} \right.$$

Jetzt werde mit

$$S^{(\kappa)}$$

diejenige Determinante $(n-\kappa)^{\text{ter}}$ Ordnung bezeichnet, deren Elementen-System aus dem von S durch gleichzeitige Weglassung der κ ersten Horizontal- und Vertical-Reihen erhalten wird. Ferner bedeute

$$(-1)^{\alpha+\beta} S_{\alpha\beta}^{(\kappa)}$$

unter der Voraussetzung, dass α, β beide grösser als κ sind, die Determinante $(n-\kappa-1)^{\text{ter}}$ Ordnung, deren Elementen-System aus dem von $S^{(\kappa)}$ durch Weglassung der $(\alpha-\kappa)^{\text{ten}}$ Horizontal- und der $(\beta-\kappa)^{\text{ten}}$ Vertical-Reihe hervorgeht — werde aber gleich Null angenommen, wenn eine der Zahlen $\alpha, \beta \leq \kappa$ ist. Dann ist

$$(26.) \quad S_{\alpha\beta}^{(\alpha-1)} = S^{(\alpha)},$$

und es bestehen die Relationen

$$(27.) \quad \left\{ \begin{array}{l} S_{11} S_{\alpha\beta} - S_{\alpha 1} S_{1\beta} = S S'_{\alpha\beta} \\ S'_{22} S'_{\alpha\beta} - S'_{\alpha 2} S'_{2\beta} = S' S''_{\alpha\beta} \\ S''_{33} S''_{\alpha\beta} - S''_{\alpha 3} S''_{3\beta} = S'' S'''_{\alpha\beta} \\ \text{u. s. w.} \end{array} \right.$$

nun zunächst annehmen, dass in keiner dieser Functionen eine höhere Potenz von $s-c$ als die angegebene als Factor enthalten sei.

Dies vorausgesetzt, seien

$$(s-c_1)^{e_1}, (s-c_2)^{e_2}, \dots (s-c_\rho)^{e_\rho}$$

die Functionen von s , in welche sich die Elementar-Theiler von $[P, Q]$

$$(a_1 p + b_1 q)^{e_1}, (a_2 p + b_2 q)^{e_2}, \dots (a_\rho p + b_\rho q)^{e_\rho}$$

durch die angegebenen Substitutionen verwandeln. Man entwickle, unter λ irgend eine der Zahlen $1, \dots, \rho$ verstehend, wenn e_λ in der Reihe der zu dem Theiler $a_\lambda p + b_\lambda q$ gehörigen Zahlen e die x^{te} ist,

$$S^{(x-1)}, S^{(x)}, X^{(x-1)}, Y^{(x-1)}$$

nach steigenden Potenzen von $s-c_\lambda$. Dann ist der Grad des Anfangsgliedes in der ersten dieser Entwicklungen um e_λ Einheiten grösser als in jeder der drei anderen. Man erhält also für hinlänglich kleine Werthe von $s-c_\lambda$

$$(32.) \quad \left\{ \begin{aligned} \frac{X^{(x-1)}}{\sqrt{S^{(x-1)} S^{(x)}}} &= (s-c_\lambda)^{-\frac{1}{2}e_\lambda} \sum X_{\lambda\mu} (s-c_\lambda)^\mu \\ &\quad (\mu = 0, 1, \dots, \infty) \\ \frac{Y^{(x-1)}}{\sqrt{S^{(x-1)} S^{(x)}}} &= (s-c_\lambda)^{-\frac{1}{2}e_\lambda} \sum Y_{\lambda\nu} (s-c_\lambda)^\nu \\ &\quad (\nu = 0, 1, \dots, \infty) \end{aligned} \right.$$

$$(33.) \quad \frac{X^{(x-1)} Y^{(x-1)}}{S^{(x-1)} S^{(x)}} = \sum_{\mu\nu} X_{\lambda\mu} Y_{\lambda\nu} (s-c_\lambda)^{\mu+\nu-e_\lambda}$$

$$(34.) \quad \left\{ \begin{aligned} X_{\lambda\mu} &= \frac{1}{\sqrt{C_\lambda}} (C'_{\lambda\mu} \xi_\mu + \dots + C_{n\lambda\mu} \xi_n) \\ Y_{\lambda\nu} &= \frac{1}{\sqrt{C_\lambda}} (C'_{\lambda\nu} \eta_\nu + \dots + C'_{n\lambda\nu} \eta_n), \end{aligned} \right.$$

wo C_λ und sämtliche Coefficienten der Grössen ξ, η ganze Functionen von c_λ , den Coefficienten der Formen P, Q und den Grössen g, h, g', h' sind.

Ist nun c irgend eine der Grössen c_1, \dots, c_ρ , und kommt dieselbe in dieser Reihe r mal vor, so werden in dem Ausdrucke (30.) von F nur die r ersten Glieder unendlich gross für $s=c$; es stimmt daher die Reihe

$$\sum_\lambda \sum_{\mu\nu} X_{\lambda\mu} Y_{\lambda\nu} (s-c_\lambda)^{\mu+\nu-e_\lambda},$$

wenn man die Summation nur auf diejenigen Werthe von λ ausdehnt, für

welche $c_\lambda = c$ ist, mit der Entwicklung von F nach Potenzen von $s-c$ in allen Gliedern, die für $s=c$ unendlich gross werden, überein. Daraus folgt sofort, wenn man zugleich beachtet, dass $F=0$ für $s=\infty$ wird,

$$(35.) \quad F(\xi_1, \dots, \xi_n | \eta_1, \dots, \eta_m) = \sum_\lambda \sum_{\substack{\mu, \nu \\ (\mu + \nu < e_\lambda)}} [X_{\lambda\mu} Y_{\lambda\nu} (s-c_\lambda)^{\mu+\nu-e_\lambda}].$$

Zur Abkürzung werde, wenn e eine beliebige ganze Zahl ist,

$$(36.) \quad \sum_{\substack{\mu, \nu \\ (\mu + \nu = e-1)}} X_{\lambda\mu} Y_{\lambda\nu} \quad \text{mit} \quad (X_\lambda Y_\lambda)_e$$

bezeichnet. Dann ist

$$(37.) \quad F(\xi_1, \dots, \xi_n | \eta_1, \dots, \eta_m) = \sum_\lambda \left[\frac{(X_\lambda Y_\lambda)_{e_\lambda}}{s-c_\lambda} + \frac{(X_\lambda Y_\lambda)_{e_\lambda-1}}{(s-c_\lambda)^2} + \dots \right].$$

Den Formeln (25.) zufolge ergibt sich hieraus

$$(38.) \quad \begin{cases} \Phi = gP + hQ = \sum_\lambda (X_\lambda Y_\lambda)_{e_\lambda} \\ \Psi = g'P + h'Q = \sum_\lambda c_\lambda (X_\lambda Y_\lambda)_{e_\lambda} + \sum_\lambda (X_\lambda Y_\lambda)_{e_\lambda-1}, \end{cases}$$

wenn man in den vorhergehenden Ausdrücken der Grössen $X_{\lambda\mu}, Y_{\lambda\nu}$

$$(39.) \quad \begin{cases} \xi_\beta = g \frac{\partial P}{\partial y_\beta} + h \frac{\partial Q}{\partial y_\beta} = \sum_\alpha (gA_{\alpha\beta} + hB_{\alpha\beta}) x_\alpha \\ \eta_\alpha = g \frac{\partial P}{\partial x_\alpha} + h \frac{\partial Q}{\partial x_\alpha} = \sum_\beta (gA_{\alpha\beta} + hB_{\alpha\beta}) y_\beta \end{cases}$$

setzt, so dass

$$(40.) \quad \begin{cases} X_{\lambda\mu} = \frac{1}{\sqrt{C_\lambda}} \sum_\beta (C_{\beta\lambda\mu} (g \frac{\partial P}{\partial y_\beta} + h \frac{\partial Q}{\partial y_\beta})) \\ Y_{\lambda\nu} = \frac{1}{\sqrt{C_\lambda}} \sum_\alpha (C'_{\alpha\lambda\nu} (g \frac{\partial P}{\partial x_\alpha} + h \frac{\partial Q}{\partial x_\alpha})) \end{cases}$$

wird.

Da man nun

$$c_\lambda = g'a_\lambda + h'b_\lambda, \quad 1 = ga_\lambda + hb_\lambda,$$

also

$$(41.) \quad a_\lambda = h' - hc_\lambda, \quad b_\lambda = -g' + gc_\lambda$$

hat, so ergeben sich aus den Gleichungen (38.) die folgenden Darstellungen von P, Q :

$$(42.) \quad \begin{cases} P = \sum_\lambda [a_\lambda (X_\lambda Y_\lambda)_{e_\lambda} - h (X_\lambda Y_\lambda)_{e_\lambda-1}] \\ Q = \sum_\lambda [b_\lambda (X_\lambda Y_\lambda)_{e_\lambda} + g (X_\lambda Y_\lambda)_{e_\lambda-1}]. \end{cases}$$

In diesen Formeln ist

$$(X_\lambda Y_\lambda)_{e_\lambda - 1} = 0$$

zu setzen, wenn $e_\lambda = 1$.

Den Grössen g, h, g', h' giebt man am einfachsten ganzzahlige Werthe. Wenn z. B. die Determinante von P nicht gleich Null ist, so kann man

$$g = 1, \quad h = 0, \quad g' = 0, \quad h' = 1$$

nehmen, sowie, wenn die Determinante von Q nicht verschwindet,

$$g = 0, \quad h = -1, \quad g' = 1, \quad h' = 0.$$

Aus Gleichung (38.) ergibt sich, wenn (für jeden bestimmten Werth von λ) unter μ, ν Zahlen aus der Reihe $0, \dots, e_\lambda - 1$, deren Summe gleich $e_\lambda - 1$ ist, verstanden werden,

$$(43.) \quad \frac{\partial (gP + hQ)}{\partial Y_{\lambda\nu}} = X_{\lambda\mu},$$

$$(44.) \quad \frac{\partial (gP + hQ)}{\partial X_{\lambda\mu}} = Y_{\lambda\nu}.$$

Hiernach hat $gP + hQ$, als bilineare Form der Grössen $X_{\lambda\mu}, Y_{\lambda\nu}$ betrachtet, die Determinante ± 1 , und somit ist $\pm [P, Q]$ gleich dem Producte aus der Determinante der n Functionen $X_{\lambda\mu}$ in Beziehung auf die Veränderlichen x_1, \dots, x_n und der Determinante der n Functionen $Y_{\lambda\nu}$ in Beziehung auf y_1, \dots, y_n ; keine dieser beiden Determinanten ist also gleich Null. Man kann also die Grössen x_1, \dots, x_n durch die $X_{\lambda\mu}$, und die Grössen y_1, \dots, y_n durch die $Y_{\lambda\nu}$ ausdrücken in der Gestalt

$$(45.) \quad \begin{cases} x_\alpha = \sum_\lambda \sum_{(\mu=0, \dots, e_\lambda-1)} (\alpha, \lambda, \mu) X_{\lambda\mu} \\ y_\beta = \sum_\lambda \sum_{(\nu=0, \dots, e_\lambda-1)} (\beta, \lambda, \nu) Y_{\lambda\nu}. \end{cases}$$

Es ist aber

$$(46.) \quad X_{\lambda\mu} = \frac{\partial (gP + hQ)}{\partial Y_{\lambda\nu}} = \sum_\beta \frac{\partial y_\beta}{\partial Y_{\lambda\nu}} \frac{\partial (gP + hQ)}{\partial y_\beta},$$

$$(47.) \quad Y_{\lambda\nu} = \frac{\partial (gP + hQ)}{\partial X_{\lambda\mu}} = \sum_\alpha \frac{\partial x_\alpha}{\partial X_{\lambda\mu}} \frac{\partial (gP + hQ)}{\partial x_\alpha},$$

also

$$(48.) \quad \begin{cases} X_{\lambda\mu} = \sum_\beta (\beta, \lambda, \nu) \frac{\partial (gP + hQ)}{\partial y_\beta} \\ Y_{\lambda\nu} = \sum_\alpha (\alpha, \lambda, \mu) \frac{\partial (gP + hQ)}{\partial x_\alpha}. \end{cases}$$

Die in den Formeln (45.) vorkommenden Constanten sind also durch die Gleichungen (34.) bestimmt.

Wenn die bei den vorstehenden Entwicklungen gemachte Voraussetzung, es seien P, Q so beschaffen, dass die höchste Potenz eines jeden linearen Factors der Determinante S , durch welche diese und alle ihre Unter-Determinanten $(n-x)^{\text{ter}}$ Ordnung theilbar sind, zugleich die höchste in $S^{(x)}$ enthaltene ist, nicht zutrifft, so kann man, wie ich sogleich zeigen werde, die Formen P, Q durch eine simultane lineare Transformation stets in andere

$$\bar{P}(x'_1, \dots, x'_n | y'_1, \dots, y'_n), \quad \bar{Q}(x'_1, \dots, x'_n | y'_1, \dots, y'_n)$$

verwandeln, welche die angegebene Beschaffenheit besitzen, und zwar so, dass die Grössen x'_α lineare Functionen der x_α mit ganzzahligen Coefficienten, und die y'_β ebensolche Functionen der y_β sind. Da nun die Determinanten $[P, Q]$, $[\bar{P}, \bar{Q}]$ in ihren Elementar-Theilern übereinstimmen, so kann man \bar{P}, \bar{Q} so darstellen, wie unter (42.) angegeben ist. Drückt man darauf die x'_α, y'_β durch die x_α, y_β aus, so gehen \bar{P}, \bar{Q} in P, Q über, die $X_{\lambda\mu}, Y_{\lambda\nu}$ werden homogene lineare Functionen der Grössen

$$\frac{\partial(gP+hQ)}{\partial y_\beta}, \quad \frac{\partial(gP+hQ)}{\partial x_\alpha},$$

und es bleibt auch bestehen, was über die algebraische Zusammensetzung der Coefficienten dieser Ausdrücke gesagt worden ist. Die Umgestaltung von P, Q in die unter (42.) angegebenen Formen ist also stets ausführbar. Da ferner die Gleichungen (43.), (44.) aus der Gleichung (38.) sich ergeben, so gilt auch allgemein, dass von den beiden Gleichungs-Systemen (45.), (48.) jedes eine Folge des anderen ist.

In dem besonderen Falle, wo unter den Coefficienten von P, Q, P', Q' die Relationen

$$(48^a.) \quad A_{\alpha\beta} = A_{\beta\alpha}, \quad B_{\alpha\beta} = B_{\beta\alpha}, \quad A'_{\alpha\beta} = A'_{\beta\alpha}, \quad B'_{\alpha\beta} = B'_{\beta\alpha}$$

bestehen, kann jene simultane lineare Transformation stets so gewählt werden, dass die Grössen x'_α mit den x_α durch dieselbe Substitution zusammenhängen, wie die y'_β mit den y_β .

4.

Der von mir bei der ersten Veröffentlichung dieser Abhandlung gegebene Beweis des am Schlusse des vorigen Paragraphen angeführten Hilfssatzes kann, abgesehen davon, dass er in Folge eines Versehens beim Abdruck unvollständig ausgefallen ist, erheblich vereinfacht werden, wie dies namentlich Herr Frobenius gezeigt hat. Um unnöthige Wiederholungen zu vermeiden, halte ich es unter diesen Umständen für hinreichend, zur Rechtfertigung der ausgesprochenen Behauptung auf die im Sitzungsbericht der Berliner Akademie der Wissenschaften vom 18. Januar 1894 mitgetheilte Arbeit des Herrn Frobenius zu verweisen.

5.

Angenommen nun, es sei ausser dem Formenpaare

$$P(x_1, \dots, x_n | y_1, \dots, y_n), \quad Q(x_1, \dots, x_n | y_1, \dots, y_n)$$

noch ein zweites

$$P'(u_1, \dots, u_n | v_1, \dots, v_n), \quad Q'(u_1, \dots, u_n | v_1, \dots, v_n)$$

gegeben, und es habe die Determinante von

$$pP' + qQ'$$

dieselben Elementar-Theiler wie die Determinante von

$$pP + qQ;$$

dann lassen sich n homogene lineare Functionen

$$\begin{array}{cccc} U_{10}, & \dots & U_{1(e_1-1)} & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ U_{e_0}, & \dots & U_{e_0(e_0-1)} & \end{array}$$

der Grössen u_1, \dots, u_n und n andere

$$\begin{array}{cccc} V_{10}, & \dots & V_{1(e_1-1)} & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ V_{e_0}, & \dots & V_{e_0(e_0-1)} & \end{array}$$

der Grössen v_1, \dots, v_n dergestalt bestimmen, dass

$$\begin{aligned} P' &= \sum_{\lambda} [a_{\lambda}(U_{\lambda}V_{\lambda})_{e_{\lambda}} - h(U_{\lambda}V_{\lambda})_{e_{\lambda}-1}], \\ Q' &= \sum_{\lambda} [b_{\lambda}(U_{\lambda}V_{\lambda})_{e_{\lambda}} + g(U_{\lambda}V_{\lambda})_{e_{\lambda}-1}] \end{aligned}$$

Um das vorstehende Theorem, durch welches eine der Hauptfragen in der Theorie der bilinearen Formen erledigt wird, anwenden zu können, braucht man jedoch die Zerlegung der beiden Determinanten in ihre Elementar-Theiler nicht wirklich auszuführen. Es genügt vielmehr, für die Form $pP + qQ = s\Phi - \Psi$ die im vorhergehenden § definirten Functionen

$$R(s), R'(s) \text{ u. s. w.}$$

und für die Form $pP' + qQ' = s\Phi' - \Psi'$ die entsprechenden

$$\bar{R}(s), \bar{R}'(s) \text{ u. s. w.}$$

zu bestimmen. Jedem linearen Theiler $(ap + bq)$ von $[P, Q]$ entspricht dann ein Theiler $(s - c)$ von $R(s)$, und wenn für den ersteren l, l', l'', \dots die oben definirten Zahlen sind, so ist $l^{(n)}$ auch der Exponent der höchsten in $R^{(n)}(s)$ enthaltenen Potenz von $(s - c)$. Da nun, wie bereits früher bemerkt, jeder Theiler von $R^{(n)}(s)$ auch einer von $R(s)$, und der Coefficient von $R^{(n)}(s)$ gleich Eins ist, so ist es nothwendig und hinreichend, dass — für jeden Werth von s — die Gleichungen

$$(51.) \quad R(s) = \bar{R}(s), \quad R'(s) = \bar{R}'(s), \quad \text{u. s. w.}$$

bestehen, wenn die Determinanten $[P, Q], [P', Q']$ in ihren Elementar-Theilern übereinstimmen sollen.

6.

Die in § 3 (Gleichung (42.)) erhaltenen Ausdrücke

$$(52.) \quad \left\{ \begin{array}{l} \sum_{\lambda} [a_{\lambda}(X_{\lambda}Y_{\lambda})_{e_{\lambda}} - h(X_{\lambda}Y_{\lambda})_{e_{\lambda}-1}], \\ \sum_{\lambda} [b_{\lambda}(X_{\lambda}Y_{\lambda})_{e_{\lambda}} + g(X_{\lambda}Y_{\lambda})_{e_{\lambda}-1}], \end{array} \right.$$

welche sich in P, Q verwandeln, wenn man für

$$\begin{array}{l} X_{10}, \dots, X_{1(e_1-1)}, \dots, X_{e_0}, \dots, X_{e(e_0-1)} \\ Y_{10}, \dots, Y_{1(e_1-1)}, \dots, Y_{e_0}, \dots, Y_{e(e_0-1)} \end{array}$$

die a. a. O. (Gleichung (48.)) angegebenen Functionen von x_1, \dots, x_n und y_1, \dots, y_n substituirt, haben das Eigenthümliche, dass sie als bilineare Formen der Grössen X, Y betrachtet, völlig bestimmt sind, sobald man die Elementar-

Daraus ergibt sich zunächst:

$$(56.) \quad [\bar{P}, \bar{Q}] = \prod_{\lambda} [P_{\lambda}, Q_{\lambda}] = \prod_{\lambda} (a_{\lambda} p + b_{\lambda} q)^{e_{\lambda}}.$$

Ferner verschwinden von den Unter-Determinanten $(n-x)^{\text{ter}}$ Ordnung von $[\bar{P}, \bar{Q}]$ nur diejenigen nicht für beliebige Werthe von p, q , welche sich, wenn man mit

$$[P_{\lambda}, Q_{\lambda}]^{(m)}$$

irgend eine Unter-Determinante $(e_{\lambda}-m)^{\text{ter}}$ Ordnung von $[P_{\lambda}, Q_{\lambda}]$ oder, wenn $m = 0$, diese Determinante selbst bezeichnet, in der Gestalt

$$(57.) \quad \prod_{\lambda} [P_{\lambda}, Q_{\lambda}]^{(m_{\lambda})}$$

dastellen lassen, wo

$$(58.) \quad \sum_{\lambda} m_{\lambda} = x$$

sein muss. Man hat also für jeden linearen Theiler von $[\bar{P}, \bar{Q}]$ zu ermitteln, wie oft er in allen diesen Producten als Factor enthalten ist.

Es seien, wenn $ap + bq$ irgend einer dieser Theiler ist, $\lambda_1, \dots, \lambda_r$ diejenigen Werthe von λ , für welche $a_{\lambda} = a, b_{\lambda} = b$; und

$$e, \dots, e^{(r-1)}$$

die zugehörigen Exponenten e_{λ} , jedoch so geordnet, dass keiner von ihnen grösser ist als der vorhergehende.

Wenn nun $x \geq r$ ist, so giebt es unter den betrachteten Unter-Determinanten wenigstens eine, in der m_{λ} für $\lambda = \lambda_1, \dots, \lambda_r$ den Werth Eins hat, und diese enthält den Factor $ap + bq$ nicht. Ist aber $x < r$, so müssen von den Zahlen m_1, \dots, m_q mindestens $q - x = q - r + (r - x)$ den Werth Null haben, also auch unter den mit den Indices $\lambda_1, \dots, \lambda_r$ versehenen wenigstens $(r - x)$ solche sich finden. Es ist also jede Unter-Determinante $(n - x)^{\text{ter}}$ Ordnung durch eine Potenz von $ap + bq$ theilbar, deren Exponent die Summe von $(r - x)$ der Zahlen

$$e, \dots, e^{(r-1)},$$

also sicher nicht kleiner als

$$\sum_{(k = x, \dots, r-1)} e^{(k)}$$

ist. Setzt man also

$$(59.) \quad l = e + \dots + e^{(r-1)}, \quad l' = l - e, \quad l'' = l' - e', \quad \text{u. s. w.},$$

so hat jede Unter-Determinante $(n-x)^{\text{ter}}$ Ordnung von $[\bar{P}, \bar{Q}]$ den Theiler

$$(ap + bq)^{l^{(x)}},$$

wofern $x < r$ ist. Unter ihnen giebt es aber stets eine, welche nicht durch eine höhere Potenz von $ap + bq$ theilbar ist, und welche erhalten wird, wenn man denjenigen x Zahlen m_x , zu deren Indices die Exponenten

$$e, \dots e^{(x-1)}$$

gehören, den Werth Eins, allen übrigen aber den Werth Null giebt. Hier-nach ist also

$$(ap + bq)^l$$

die höchste Potenz von $ap + bq$, die in $[\bar{P}, \bar{Q}]$, und

$$(ap + bq)^{l^{(x)}}$$

die höchste, welchen in allen Unter-Determinanten $(n-x)^{\text{ter}}$ Ordnung von $[\bar{P}, \bar{Q}]$ enthalten ist. *) Hieraus folgt unmittelbar, dass die in dem vorstehenden Ausdrücke von $[\bar{P}, \bar{Q}]$ enthaltenen Factoren

$$(a_x p + b_x q)^{e_x}$$

in der That sämmtlich Elementar-Theiler dieser Determinante sind. Die aufgeworfene Frage ist also zu bejahen.

Um eine Anwendung von dem bewiesenen Satze zu geben, betrachte ich den Fall, wo die Determinante $[P, Q]$ n Elementar-Theiler hat — unter denen jedoch auch gleiche vorkommen können — die Exponenten $e_1, \dots e_n$

*) Wenn man, von den ursprünglichen Formen P, Q ausgehend, für einen linearen Theiler $ap + bq$ von $[P, Q]$ die zugehörigen Exponenten $e, \dots e^{(r-1)}$ in der im Anfange angegebenen Weise bestimmt, so erhält man

$$e = l - l', \quad e' = l' - l'', \quad \dots \quad e^{(r-1)} = l^{(r-1)}.$$

Dieselben Werthe von $e, \dots e^{(r-1)}$ ergeben sich aber, da die Reihe der Zahlen l, l', \dots sich nicht ändert, wenn man $ap + bq$ als einen Theiler von $[\bar{P}, \bar{Q}]$ ansieht, auch aus den Gleichungen (59.) unter der Voraussetzung, dass

$$e \geq e' \dots \geq e^{(r-1)}$$

sei. Man kann daraus schliessen, dass in dem Falle, wo $r > 1$ ist,

$$l^{(x-1)} - l^{(x)} \geq l^{(x)} - l^{(x+1)}$$

oder

$$2l^x \leq l^{(x-1)} + l^{(x+1)} \quad (x = 1, \dots, r-1)$$

sein muss. Dies lässt sich mittels der obigen Relationen (27.) auch leicht direct nachweisen.

also sämmtlich gleich Eins sind. Dann erhält man den Formeln (42.) bis (48.) zufolge:

$$(60.) \quad \left\{ \begin{array}{l} P = a_1 X_1 Y_1 + a_2 X_2 Y_2 + \dots + a_n X_n Y_n, \\ Q = b_1 X_1 Y_1 + b_2 X_2 Y_2 + \dots + b_n X_n Y_n, \\ X_\lambda = \sum_{\beta} (\beta, \lambda)' \frac{\partial (gP + hQ)}{\partial y_{\beta}}, \quad x_{\alpha} = \sum_{\lambda} (\alpha, \lambda) X_{\lambda}, \\ Y_{\lambda} = \sum_{\alpha} (\alpha, \lambda) \frac{\partial (gP + hQ)}{\partial x_{\alpha}}, \quad y_{\beta} = \sum_{\lambda} (\beta, \lambda)' Y_{\lambda}, \end{array} \right.$$

wo $X_{\lambda}, Y_{\lambda}, (\alpha, \lambda), (\beta, \lambda)'$ für $X_{\lambda_0}, Y_{\lambda_0}, (\alpha, \lambda, 0), (\beta, \lambda, 0)'$ geschrieben ist. Nach dem Vorherstehenden hat aber die Determinante der Form

$$p\bar{P} + q\bar{Q} = \sum_{\lambda} (a_{\lambda} p + b_{\lambda} q) X_{\lambda} Y_{\lambda}$$

die Elementar-Theiler

$$a_1 p + b_1 q, \quad \dots \quad a_n p + b_n q;$$

es ist daher, wenn P, Q sich in der angegebenen Gestalt sollen darstellen lassen, nothwendig, dass die Determinante $[P, Q]$ n Elementar-Theiler besitze. Es ist aber, wenn $[P, Q]$ einen ihrer linearen Theiler in der l^{ten} Potenz enthält, und die zugehörigen Exponenten e, e', \dots alle gleich Eins sind, $l' = l-1, l'' = l-2, \dots$ u. s. w., $r = l$, und daher jener Theiler auch ein allen Unter-Determinanten $(n-l+1)^{\text{ter}}$ Ordnung gemeinschaftlicher. Und da auch umgekehrt ein gemeinschaftlicher linearer Theiler aller dieser Determinanten in $[P, Q]$ mindestens l mal als Factor enthalten ist, so ergibt sich der Satz:

Damit es möglich sei, die Formen P, Q durch n lineare Functionen X_1, \dots, X_n von x_1, \dots, x_n , und n andere Y_1, \dots, Y_n von y_1, \dots, y_n in der Gestalt

$$(61.) \quad \left\{ \begin{array}{l} P = a_1 X_1 Y_1 + a_2 X_2 Y_2 + \dots + a_n X_n Y_n \\ Q = b_1 X_1 Y_1 + b_2 X_2 Y_2 + \dots + b_n X_n Y_n \end{array} \right.$$

auszudrücken, ist nothwendig und hinreichend, dass jeder lineare Theiler der Determinante $[P, Q]$, wenn er in derselben l mal als Factor enthalten und $l > 1$ ist, auch ein gemeinschaftlicher Theiler aller Unter-Determinanten $(n-l+1)^{\text{ter}}$ Ordnung von $[P, Q]$ sei.

7.

Aus den im Vorstehenden entwickelten Sätzen über bilineare Formen ergibt sich nun unmittelbar eine Reihe analoger Theoreme für quadratische Formen.

Es seien $\mathfrak{P}, \mathfrak{Q}$ zwei quadratische Formen von n Veränderlichen x_1, \dots, x_n und

$$P = \sum_{\beta} \frac{1}{2} \frac{\partial \mathfrak{P}}{\partial x_{\beta}} y_{\beta}, \quad Q = \sum_{\beta} \frac{1}{2} \frac{\partial \mathfrak{Q}}{\partial x_{\beta}} y_{\beta}.$$

Dann sind P, Q bilineare (und zwar symmetrische) Formen der $2n$ Veränderlichen $x_1, \dots, x_n | y_1, \dots, y_n$, und es wird die Determinante von $pP + qQ$ die Determinante der Form $p\mathfrak{P} + q\mathfrak{Q}$ genannt und ist im Folgenden mit $[\mathfrak{P}, \mathfrak{Q}]$ bezeichnet.

Unter der Voraussetzung, dass $[\mathfrak{P}, \mathfrak{Q}]$ nicht für jedes Werthepaar p, q verschwinde, sind dann ferner unter den Elementar-Theilern von $[\mathfrak{P}, \mathfrak{Q}]$ die Elementar-Theiler von $[P, Q]$ zu verstehen, die nach Annahme zweier Grössen g, h , für welche die Determinante von $gP + hQ$ einen von Null verschiedenen Werth hat, so zu bestimmen sind, wie im Anfange des § 1 festgesetzt worden ist.

Dies vorausgesetzt, gelten nun die folgenden Sätze:

A. Wenn zwei quadratische Formen $\mathfrak{P}, \mathfrak{Q}$ von n Veränderlichen x_1, \dots, x_n durch Substitutionen von der Gestalt

$$(62.) \quad x_1 = \sum_{\gamma} h_{1\gamma} u_{\gamma}, \quad \dots \quad x_n = \sum_{\gamma} h_{n\gamma} u_{\gamma}$$

gleichzeitig in zwei andere $\mathfrak{P}', \mathfrak{Q}'$ von u_1, \dots, u_n verwandelt werden, und die Substitutions-Determinante

$$\begin{vmatrix} h_{11} & \dots & h_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ h_{n1} & \dots & h_{nn} \end{vmatrix}$$

ist nicht gleich Null, so stimmen die Determinanten der beiden Formen

$$p\mathfrak{P} + q\mathfrak{Q}, \quad p\mathfrak{P}' + q\mathfrak{Q}'$$

in ihren Elementar-Theilern überein.

Bildet man nämlich die bilinearen Formen

$$(63.) \quad \left\{ \begin{array}{l} P = \sum_{\beta} \frac{1}{2} \frac{\partial \mathfrak{P}}{\partial x_{\beta}} y_{\beta}, \quad Q = \sum_{\beta} \frac{1}{2} \frac{\partial \mathfrak{Q}}{\partial x_{\beta}} y_{\beta}, \\ P' = \sum_{\beta} \frac{1}{2} \frac{\partial \mathfrak{P}'}{\partial u_{\beta}} v_{\beta}, \quad Q' = \sum_{\beta} \frac{1}{2} \frac{\partial \mathfrak{Q}'}{\partial u_{\beta}} v_{\beta}, \end{array} \right.$$

so sind die Determinanten von $p\mathfrak{P} + q\mathfrak{Q}$, $p\mathfrak{P}' + q\mathfrak{Q}'$ ihrer Definition nach identisch mit denen von $pP + qQ$, $pP' + qQ'$; die beiden letzteren aber haben dieselben Elementar-Theiler, weil P, Q in P', Q' übergehen, wenn man für x_1, \dots, x_n die angegebenen Functionen von u_1, \dots, u_n , und für y_1, \dots, y_n dieselben Functionen von v_1, \dots, v_n setzt.

B. Es seien für zwei gegebene quadratische Formen $\mathfrak{P}, \mathfrak{Q}$ von n Veränderlichen x_1, \dots, x_n

$$(a_1 p + b_1 q)^{e_1}, \dots, (a_q p + b_q q)^{e_q}$$

sämmtliche (den angegebenen Festsetzungen gemäss bestimmte) Elementar-Theiler der Determinante von $p\mathfrak{P} + q\mathfrak{Q}$; dann lassen sich n homogene lineare Functionen der Grössen x_1, \dots, x_n

$$X_{10}, \dots, X_{1(e_1-1)}, \dots, X_{e_0}, \dots, X_{e(e_q-1)}$$

bestimmen, durch welche ausgedrückt $\mathfrak{P}, \mathfrak{Q}$ sich in der Form

$$(64.) \quad \mathfrak{P} = \sum_{\lambda} [a_{\lambda} (X_{\lambda} X_{\lambda})_{e_{\lambda}} - h (X_{\lambda} X_{\lambda})_{e_{\lambda}-1}]$$

$$(65.) \quad \mathfrak{Q} = \sum_{\lambda} [b_{\lambda} (X_{\lambda} X_{\lambda})_{e_{\lambda}} + g (X_{\lambda} X_{\lambda})_{e_{\lambda}-1}]$$

darstellen, wo

$$(X_{\lambda} X_{\lambda})_{e_{\lambda}-1} = 0$$

zu setzen ist, wenn $e_{\lambda} = 1$.

Da nämlich in P sowohl als in Q die Coefficienten von $x_{\alpha} y_{\beta}$ und $x_{\beta} y_{\alpha}$ einander gleich sind, so wird, wie schon im § 5 bemerkt worden, wenn man P, Q in der unter (42.) angegebenen Gestalt darstellt, Y_{μ} dieselbe Function von y_1, \dots, y_n wie X_{μ} von x_1, \dots, x_n , und daher $Y_{\mu} = X_{\mu}$, wenn man $y_1 = x_1, \dots, y_n = x_n$ setzt, wodurch sich zugleich P, Q in $\mathfrak{P}, \mathfrak{Q}$ verwandeln.

Setzt man

$$(66.) \quad X_{\lambda\mu} = \sum_{\beta} (\beta, \lambda, \mu) \left(\frac{1}{2} g \frac{\partial \mathfrak{P}}{\partial x_{\beta}} + \frac{1}{2} h \frac{\partial \mathfrak{Q}}{\partial x_{\beta}} \right),$$

so hat man nach Gleichung (34.)

$$(67.) \quad (\beta, \lambda, \mu) = \frac{C_{\beta\lambda\mu}}{\sqrt{C_{\lambda}}},$$

wo C_{λ} und $C_{\beta\lambda\mu}$ ganze Functionen von $a_{\lambda}, b_{\lambda}, g, h, g', h'$ und den Coefficienten der Formen $\mathfrak{P}, \mathfrak{Q}$ sind. Zugleich ist

$$(68.) \quad x_{\alpha} = \sum_{\lambda, \mu} (\alpha, \lambda, \mu) X_{\lambda\mu} \quad (\lambda = 1, \dots, e; \mu < e_{\lambda}).$$

C. Der Satz (A.) ist auch umgekehrt richtig; d. h. wenn die Formen $\mathfrak{P}, \mathfrak{Q}, \mathfrak{P}', \mathfrak{Q}'$ so beschaffen sind, dass die Determinanten von

$$p\mathfrak{P} + q\mathfrak{Q}, \quad p\mathfrak{P}' + q\mathfrak{Q}'$$

dieselben Elementar-Theiler

$$(a_1 p + b_1 q)^{e_1}, \quad \dots \quad (a_e p + b_e q)^{e_e}$$

haben, so können auch stets die Constanten h_{11}, \dots, h_{nn} so bestimmt werden, dass durch die Substitutionen

$$x_1 = \sum_{\gamma} h_{1\gamma} u_{\gamma}, \quad \dots \quad x_n = \sum_{\gamma} h_{n\gamma} u_{\gamma}$$

\mathfrak{P} in \mathfrak{P}' und zugleich \mathfrak{Q} in \mathfrak{Q}' übergeht.

Man hat zu dem Ende die n Functionen

$$U_{10}, \dots, U_{1(e_1-1)}, \quad \dots \quad U_{e_0}, \dots, U_{e_0(e_0-1)}$$

der Grössen u_1, \dots, u_e zu bestimmen, durch welche sich $\mathfrak{P}', \mathfrak{Q}'$ in der Gestalt

$$(69.) \quad \begin{cases} \mathfrak{P}' = \sum_{\lambda} [a_{\lambda} (U_{\lambda} U_{\lambda})_{e_{\lambda}} - h (U_{\lambda} U_{\lambda})_{e_{\lambda}-1}] \\ \mathfrak{Q}' = \sum_{\lambda} [b_{\lambda} (U_{\lambda} U_{\lambda})_{e_{\lambda}} + g (U_{\lambda} U_{\lambda})_{e_{\lambda}-1}] \end{cases}$$

ausdrücken lassen. Dann wird nach dem vorhergehenden Satze

$$(70.) \quad \mathfrak{P} = \mathfrak{P}', \quad \mathfrak{Q} = \mathfrak{Q}',$$

wenn man

$$(71.) \quad x_\alpha = \sum_{\lambda, \mu} (\alpha, \lambda, \mu) U_{\lambda\mu}$$

setzt.

D. Auch der Satz (B.) lässt sich umkehren. Nimmt man die Zahlen e_1, \dots, e_q und die Constanten $g, h, a_1, b_1, \dots, a_q, b_q$ den Bedingungen

$$\sum e_\lambda = n, \quad ga_1 + hb_1 = 1, \quad \dots \quad ga_q + hb_q = 1$$

gemäss, im Übrigen aber nach Willkür an, und setzt

$$\mathfrak{P}_\lambda = a_\lambda (X_\lambda X_\lambda)_{e_\lambda} - h (X_\lambda X_\lambda)_{e_\lambda - 1},$$

$$\mathfrak{Q}_\lambda = b_\lambda (X_\lambda X_\lambda)_{e_\lambda} + g (X_\lambda X_\lambda)_{e_\lambda - 1},$$

$$\bar{\mathfrak{P}} = \sum \mathfrak{P}_\lambda, \quad \bar{\mathfrak{Q}} = \sum \mathfrak{Q}_\lambda;$$

so hat die Determinante $[\mathfrak{P}_\lambda, \mathfrak{Q}_\lambda]$, wenn man die Form $p\mathfrak{P}_\lambda + q\mathfrak{Q}_\lambda$ als Function der e_λ in ihr vorkommenden Grössen

$$X_{20}, \dots, X_{\lambda(e_\lambda - 1)}$$

betrachtet, nur den einen Elementar-Theiler

$$(a_\lambda p + b_\lambda q)^{e_\lambda},$$

und dieser ist zugleich ein Elementar-Theiler der Determinante $[\bar{\mathfrak{P}}, \bar{\mathfrak{Q}}]$.

Wenn man daher in $\bar{\mathfrak{P}}, \bar{\mathfrak{Q}}$ für die n Grössen \mathbf{X} beliebige, jedoch von einander unabhängige homogene lineare Functionen der Veränderlichen x_1, \dots, x_n substituirt, so erhält man stets quadratische Formen $\mathfrak{P}, \mathfrak{Q}$ von der Beschaffenheit, dass die Determinante $[\mathfrak{P}, \mathfrak{Q}]$ die Elementar-Theiler

$$(a_1 p + b_1 q)^{e_1}, \quad \dots \quad (a_q p + b_q q)^{e_q}$$

besitzt.

E. Wenn die Anzahl der Elementar-Theiler von $[\mathfrak{P}, \mathfrak{Q}]$ gleich n , jede der Zahlen e_λ also gleich Eins ist, so erhalten die Gleichungen (64.) bis (68.) die Gestalt:

$$(72.) \quad \left\{ \begin{array}{l} \mathfrak{P} = a_1 X_1^2 + a_2 X_2^2 + \dots + a_n X_n^2 \\ \mathfrak{Q} = b_1 X_1^2 + b_2 X_2^2 + \dots + b_n X_n^2 \\ X_\alpha = \sum_{\beta} (\beta, \alpha) \left(\frac{1}{2} g \frac{\partial \mathfrak{P}}{\partial x_{\beta}} + \frac{1}{2} h \frac{\partial \mathfrak{Q}}{\partial x_{\beta}} \right) \\ (\beta, \alpha) = \frac{C_{\beta\alpha}}{\sqrt{C_{\alpha}}} \\ x_{\alpha} = \sum_{\beta} (\beta, \alpha) X_{\beta}, \end{array} \right.$$

wo α für λ und $C_{\beta\alpha}$ für $C_{\beta\alpha 0}$ geschrieben ist.

Umgekehrt müssen, wenn sich \mathfrak{P} , \mathfrak{Q} aus den Quadraten linearer Functionen der Grössen x_1, \dots, x_n sollen zusammensetzen lassen, die Zahlen e_{λ} sämtlich gleich Eins sein. Dazu ist aber erforderlich und hinreichend, dass jeder lineare Theiler der Determinante $[\mathfrak{P}, \mathfrak{Q}]$, welcher in derselben λ mal als Factor vorkommt, auch ein gemeinschaftlicher Theiler aller Unter-Determinanten $(l-1)$ ter Ordnung von $[\mathfrak{P}, \mathfrak{Q}]$ sei.

F. Diese Bedingung ist, wie ich in der oben angeführten Abhandlung (Monatsberichte der Akademie v. J. 1858, S. 207*) gezeigt habe, stets erfüllt, wenn die Coefficienten von \mathfrak{P} , \mathfrak{Q} reell sind und unter den Formen

$$p\mathfrak{P} + q\mathfrak{Q}$$

irgend eine sich findet, welche bei reellen Werthen von x_1, \dots, x_n nur gleich Null werden kann, wenn diese Grössen selbst sämtlich verschwinden.

Der Beweis dieses Satzes kann jetzt nach vollständiger Entwicklung der Ausdrücke von \mathfrak{P} , \mathfrak{Q} durch die Grössen X unmittelbar aus der Gleichung

$$g\mathfrak{P} + h\mathfrak{Q} = \sum_{\lambda} (X_{\lambda} X_{\lambda})_{e_{\lambda}}$$

abgeleitet werden, wobei es jedoch erforderlich ist, den Grössen g, h, g', h' reelle Werthe zu geben. Wenn dann für einen bestimmten Werth von λ der Quotient $\frac{b_{\lambda}}{a_{\lambda}}$, und somit der Gleichung $ga_{\lambda} + hb_{\lambda} = 1$ wegen auch jede der Grössen a_{λ}, b_{λ} selbst reell ist, und ε_{λ} die positive oder die negative Einheit bedeutet, jenachdem C_{λ} positiv oder negativ ist, so wird, wenn man

$$(73.) \quad X_{\lambda u} = \sqrt{\varepsilon_{\lambda}} \cdot x_{\lambda u}$$

*) [Bd. I, S. 233 dieser Ausgabe.]

setzt, $\mathfrak{X}_{\lambda\mu}$ eine lineare Function von x_1, \dots, x_n mit reellen Coefficienten, und man hat

$$(74.) \quad (X_\lambda X_\lambda)_{e_\lambda} = \varepsilon_\lambda (\mathfrak{X}_\lambda \mathfrak{X}_\lambda)_{e_\lambda}.$$

Ist dagegen $\frac{b_\lambda}{a_\lambda}$ eine complexe Grösse, so gesellt sich zu dem Elementar-Theiler

$$(a_\lambda p + b_\lambda q)^{e_\lambda}$$

von $[\mathfrak{P}, \mathfrak{Q}]$ ein zweiter

$$(\bar{a}_\lambda p + \bar{b}_\lambda q)^{e_\lambda},$$

in welchem $\bar{a}_\lambda, \bar{b}_\lambda$ die mit a_λ, b_λ conjugirten complexen Grössen sind. Giebt man dann den Wurzelgrössen $\sqrt{C_\lambda}, \sqrt{\bar{C}_\lambda}$ ebenfalls conjugirte Werthe, und setzt

$$(75.) \quad \begin{cases} X_{\lambda\mu} = \mathfrak{X}_{\lambda\mu} + i\mathfrak{X}'_{\lambda\mu} \\ \bar{X}_{\lambda\mu} = \mathfrak{X}_{\lambda\mu} - i\mathfrak{X}'_{\lambda\mu} \end{cases}$$

so werden auch $\mathfrak{X}_{\lambda\mu}$ und $\mathfrak{X}'_{\lambda\mu}$ lineare Functionen von x_1, \dots, x_n mit reellen Coefficienten, und man hat

$$(76.) \quad (X_\lambda X_\lambda)_{e_\lambda} + (\bar{X}_\lambda \bar{X}_\lambda)_{e_\lambda} = 2(\mathfrak{X}_\lambda \mathfrak{X}_\lambda)_{e_\lambda} - 2(\mathfrak{X}'_\lambda \mathfrak{X}'_\lambda)_{e_\lambda}.$$

Hiernach kann man, wenn unter den Quotienten $\frac{b_\lambda}{a_\lambda}$ sich σ reelle finden, $g\mathfrak{P} + h\mathfrak{Q}$ in der Gestalt

$$(77.) \quad g\mathfrak{P} + h\mathfrak{Q} = \sum \varepsilon_\lambda (\mathfrak{X}_\lambda \mathfrak{X}_\lambda)_{e_\lambda} + 2 \sum [(\mathfrak{X}_\lambda \mathfrak{X}_\lambda)_{e_\lambda} - (\mathfrak{X}'_\lambda \mathfrak{X}'_\lambda)_{e_\lambda}] \\ (\lambda = 1, \dots, \sigma) \quad \left(\lambda = \sigma + 1, \dots, \sigma + \frac{e - \sigma}{2} \right)$$

so darstellen, dass zu reellen Werthen der ursprünglichen Veränderlichen x auch stets reelle Werthe der neu eingeführten \mathfrak{X} gehören. Ist nun für irgend einen Werth von λ der Exponent $e_\lambda > 1$, so wird $g\mathfrak{P} + h\mathfrak{Q} = 0$, wenn man sämtliche Grössen $\mathfrak{X}, \mathfrak{X}'$ ausser \mathfrak{X}_{λ_0} gleich Null setzt. Ferner verschwindet, wenn λ eine der Zahlen $\sigma + 1, \dots, \sigma + \frac{e + \sigma}{2}$ ist, auch in dem Falle, dass $e_\lambda = 1$, $g\mathfrak{P} + h\mathfrak{Q}$ dadurch, dass man $\mathfrak{X}_{\lambda_0} = \mathfrak{X}'_{\lambda_0}$, die übrigen $\mathfrak{X}, \mathfrak{X}'$ aber gleich Null setzt. Daraus folgt, dass wenn unter den Formen $g\mathfrak{P} + h\mathfrak{Q}$ sich eine findet, die bei reellen Werthen der Veränderlichen x_1, \dots, x_n nur gleich Null wird, wenn diese sämtlich verschwinden, die Determinante von $p\mathfrak{P} + q\mathfrak{Q}$ nothwendig n Elementar-Theiler besitzt und zugleich die Quotienten $\frac{b_\lambda}{a_\lambda}$ alle reell sind. Dann aber erhält

die vorstehende Gleichung die Gestalt

$$(78.) \quad g\mathfrak{P} + h\mathfrak{Q} = \sum_{(\lambda=1, \dots, n)} \varepsilon_{\lambda} \mathfrak{X}_{\lambda}^2$$

(wo \mathfrak{X}_{λ} statt \mathfrak{X}_{λ_0} geschrieben ist), und es müssen daher die Zahlen ε_{λ} alle denselben Werth (ε) haben. Ferner ist nach Gleichung (38.)

$$(79.) \quad g'\mathfrak{P} + h'\mathfrak{Q} = \sum_{\lambda} \varepsilon_{\lambda} c_{\lambda} \mathfrak{X}_{\lambda}^2,$$

und daher

$$(80.) \quad \begin{cases} \mathfrak{P} = \varepsilon \sum_{\lambda} a_{\lambda} \mathfrak{X}_{\lambda}^2, \\ \mathfrak{Q} = \varepsilon \sum_{\lambda} b_{\lambda} \mathfrak{X}_{\lambda}^2, \end{cases}$$

wo $\varepsilon = \pm 1$ ist, $\mathfrak{X}_1, \dots, \mathfrak{X}_n$ homogene lineare Functionen von x_1, \dots, x_n mit reellen Coefficienten und die Constanten a_{λ}, b_{λ} ebenfalls sämmtlich reelle Grössen sind.

ÜBER DIE ALLGEMEINSTEINEN EINDEUTIGEN UND $2n$ -FACH PERIODISCHEN FUNCTIONEN VON n VERÄNDERLICHEN.

(Aus dem Monatsbericht der Königl. Akademie der Wissenschaften vom 2. Dec. 1869.)

Nimmt man zwischen $2n$ veränderlichen Grössen

$$u_1, u_2, \dots, u_n \quad \text{und} \quad x_1, x_2, \dots, x_n$$

die nachstehenden Gleichungen an, in denen

$$\psi_1(x_v), \quad \psi_2(x_v), \quad \dots \quad \psi_n(x_v)$$

Functionen bedeuten, deren erste Ableitungen algebraische Functionen von x_v sind:

$$(a) \quad \left\{ \begin{array}{l} u_1 = \sum_1^n \psi_1(x_v), \\ u_2 = \sum_1^n \psi_2(x_v), \\ \dots \dots \dots \\ u_n = \sum_1^n \psi_n(x_v); \end{array} \right.$$

so werden im Allgemeinen zu jedem Systeme der Grössen u_1, u_2, \dots, u_n unendlich viele Systeme der Grössen x_1, x_2, \dots, x_n gehören. Es lassen sich aber, wie die Theorie der Abel'schen Transcendenten lehrt, die Functionen ψ so bestimmen, dass jeder rational und symmetrisch aus x_1, x_2, \dots, x_n zusammengesetzte Ausdruck eine eindeutige Function von u_1, u_2, \dots, u_n wird, welche dann die ausgezeichnete Eigenschaft besitzt, $2n$ -fach periodisch zu sein, und durch θ -Functionen von n Argumenten ausgedrückt werden kann.

Indessen sind die θ -Functionen, die man auf diesem Wege erhält, nur specielle; zwischen den $\frac{n(n+1)}{2}$ wesentlichen Constanten (Moduln), die in ihnen vorkommen und bei allen dieselben sind, besteht eine Anzahl von Relationen, so dass nur $3n-3$ derselben willkürlich anzunehmende Werthe erhalten können. In Folge davon sind auch die durch diese θ -Functionen ausdrückbaren $2n$ -fach periodischen Functionen von n Argumenten nicht die allgemeinsten ihrer Art.

Ich habe deshalb, um möglicherweise zu den letzteren zu gelangen, mir die Aufgabe gestellt, die Functionen ψ so zu bestimmen, dass zu einem Systeme der Grössen $u_1, u_2, \dots u_n$ eine endliche Anzahl von Systemen der Grössen $x_1, x_2, \dots x_n$ gehöre. Denn es lässt sich zeigen, dass alsdann $x_1, \dots x_n$ die Wurzeln einer Gleichung n^{ten} Grades werden, deren Coefficienten algebraisch durch die partiellen Ableitungen einer eindeutigen und $2n$ -fach periodischen Function von $u_1, u_2, \dots u_n$ sich ausdrücken lassen.*) Nun habe ich zwar die algebraischen Schwierigkeiten, welche sich der allgemeinen Lösung der angegebenen Aufgabe entgegenstellen, bis jetzt nicht überwinden können; ich habe mich jedoch überzeugt, dass man auf dem bezeichneten Wege wirklich zu den allgemeinsten eindeutigen und $2n$ -fach periodischen Functionen von n Argumenten gelangen muss. Ist nämlich $\varphi(u_1, \dots u_n)$ irgend eine derartige Function, und

$$\varphi_v(u_1, \dots u_n) = \frac{\partial \varphi(u_1, \dots u_n)}{\partial u_v},$$

so gelten folgende Sätze:

- 1) Zwischen φ und $\varphi_1, \varphi_2, \dots \varphi_n$ besteht eine algebraische Gleichung, deren Coefficienten von den Grössen $u_1, u_2, \dots u_n$ unabhängig sind.
- 2) Jede eindeutige Function von $u_1, u_2, \dots u_n$, welche dieselben Periodensysteme wie φ besitzt, lässt sich rational durch $\varphi_1, \varphi_2, \dots \varphi_n$ ausdrücken.

Namentlich ist also $\varphi(u_1 + v_1, \dots u_n + v_n)$ rational durch

$$\begin{aligned} &\varphi(u_1, \dots u_n), \quad \varphi_1(u_1, \dots u_n), \quad \dots \quad \varphi_n(u_1, \dots u_n) \\ &\varphi(v_1, \dots v_n), \quad \varphi_1(v_1, \dots v_n), \quad \dots \quad \varphi_n(v_1, \dots v_n) \end{aligned}$$

darstellbar.

*) In besonderen Fällen kann diese Function in eine, die weniger als $2n$ Periodensysteme besitzt, entarten.

3) Da hiernach die höheren Ableitungen von φ rational durch $\varphi, \varphi_1, \dots, \varphi_n$ ausdrückbar sind, so werden, wenn man du_1, du_2, \dots, du_n auf die Form

$$(b) \quad \left\{ \begin{array}{l} du_1 = \sum_1^n F_{1v} d\varphi_v, \\ du_2 = \sum_1^n F_{2v} d\varphi_v, \\ \dots \dots \dots \\ du_n = \sum_1^n F_{nv} d\varphi_v \end{array} \right.$$

bringt, die Coefficienten $F_{\mu\nu}$ ebenfalls sämtlich rationale Functionen von $\varphi, \varphi_1, \dots, \varphi_n$. Nimmt man nun zwischen $\varphi, \varphi_1, \dots, \varphi_n$ noch irgend $(n-1)$ andere algebraische Relationen an, so kann man sämtliche alsdann noch möglichen Werthsysteme dieser Grössen darstellen in der Form

$$(c) \quad \varphi = F(x, \chi x), \quad \varphi_1 = F_1(x, \chi x), \quad \dots \quad \varphi_n = F_n(x, \chi x),$$

wo x eine unbeschränkt veränderliche Grösse, χx eine algebraische Function derselben und F, F_1, \dots, F_n rational aus x und χx zusammengesetzte Ausdrücke bedeuten; und es erhält dann der Ausdruck von du_μ die Gestalt

$$R_\mu(x, \chi x) dx,$$

wo R_μ ebenfalls eine rationale Function von x und χx ist. Setzt man dann

$$(d) \quad R_\nu(x) dx = d\psi_\nu(x),$$

so werden bei gehöriger Constanten-Bestimmung die Gleichungen

$$(e) \quad \left\{ \begin{array}{l} F(x) = \varphi(u_1, u_2, \dots, u_n), \\ F_1(x) = \varphi_1(u_1, u_2, \dots, u_n), \\ \dots \dots \dots \\ F_n(x) = \varphi_n(u_1, u_2, \dots, u_n) \end{array} \right.$$

befriedigt, wenn man

$$(f) \quad u_1 = \psi_1(x), \quad u_2 = \psi_2(x), \quad \dots \quad u_n = \psi_n(x)$$

setzt.

4) Jedes System zusammengehöriger Perioden der Integrale $\psi_1(x), \psi_2(x), \dots, \psi_n(x)$ ist auch ein Periodensystem der Function $\varphi(u_1, u_2, \dots, u_n)$.

5) Man kann die Functionen $\chi(x), F_1, F_2, \dots, F_n$ stets so bestimmen, dass die Functionen $\varphi_1, \dots, \varphi_n$, wenn man

$$(g) \quad \begin{cases} u_1 = \sum_1^n \psi_1(x_v), \\ u_2 = \sum_1^n \psi_2(x_v), \\ \dots \dots \dots \\ u_n = \sum_1^n \psi_n(x_v) \end{cases}$$

setzt, sich in rationale Functionen von

$$x_1, x_2, \dots, x_n \quad \text{und} \quad \chi x_1, \chi x_2, \dots, \chi x_n$$

verwandeln, unter denen keine Abhängigkeit von einander besteht. Daraus folgt, dass den vorstehenden Gleichungen bei gegebenen Werthen von u_1, u_2, \dots, u_n — wenn unter diesen nicht eine bestimmte Relation stattfindet — nur durch eine endliche Anzahl von Systemen der Grössen x_1, x_2, \dots, x_n Genüge geschehen kann, und dass die zu einem solchen Systeme gehörigen Werthe dieser Grössen als Wurzeln einer Gleichung n^{ten} Grades, deren Coefficienten algebraische Functionen von

$$\varphi_1(u_1, u_2, \dots, u_n), \quad \dots \quad \varphi_n(u_1, u_2, \dots, u_n)$$

sind, erhalten werden können.

Aus jeder θ -Function von n Argumenten ergeben sich unzählig viele $2n$ -fach periodische Functionen, unter deren $2n \cdot n$ Perioden nicht mehr als $\frac{n(n-1)}{2}$ Relationen stattfinden. Durch das Vorstehende ist also bewiesen, dass es Gleichungssysteme von der Form (a), die allgemeiner sind als die bisher in der Theorie der Abel'schen Transcendenten betrachteten, und gleichwohl einer ganz analogen Behandlung fähig sind, wirklich giebt. Ob $2n$ -fach periodische Functionen von n Argumenten existiren, die nicht durch θ -Functionen ausgedrückt werden können, ist eine Frage, deren Erörterung ich mir vorbehalte.

ÜBER DAS SOGENANNTTE DIRICHLET'SCHE PRINCIP.

(Gelesen in der Königl. Akademie der Wissenschaften am 14. Juli 1870.)

In seinen Vorlesungen über die Kräfte, welche nach dem Newton'schen Gesetz wirken, hat sich Lejeune Dirichlet zur Begründung eines Hauptsatzes der Potentialtheorie einer eigenthümlichen Schlussweise bedient, welche später auch von anderen Mathematikern, namentlich von Riemann, vielfach angewandt worden ist und den Namen »Dirichlet'sches Princip« erhalten hat.

Über die Zulässigkeit dieses »Princip« haben sich seitdem manche Zweifel geltend gemacht, welche, wie ich im Folgenden zeigen werde, durchaus begründet sind. Ehe ich aber darauf eingehe, will ich, da Dirichlet über den in Rede stehenden Gegenstand nichts veröffentlicht hat, aus einer von Dirichlet im Sommer-Semester 1856 gehaltenen Vorlesung, welche mir in einer von Herrn Dedekind angefertigten sorgfältigen Nachschrift vorliegt, die folgende Stelle mittheilen, aus welcher mit voller Bestimmtheit hervorgeht, was Dirichlet gemeint und wie er sein Beweisverfahren zu rechtfertigen versucht hat:

»Ist irgend eine endliche Fläche gegeben, so kann man dieselbe stets, aber nur auf eine Weise, so mit Masse belegen, dass das Potential in jedem Punkte der Fläche einen beliebig vorgeschriebenen (nach der Stetigkeit sich ändernden) Werth hat.«

»Zum Beweise schicken wir den folgenden Satz voraus:

»Ist irgend ein endlicher zusammenhängender Raum t gegeben, so giebt es stets eine, aber nur eine einzige Function w , welche sich nebst ihren ersten Derivirten überall in t stetig ändert, auf der Begrenzung von t überall

beliebig vorgeschriebene (stetig veränderliche) Werthe annimmt und innerhalb t überall der Gleichung

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = 0$$

Genüge leistet. — Dieser Satz ist eigentlich identisch mit einem anderen aus der Wärmelehre, der dort Jedem unmittelbar evident erscheint, dass nämlich, wenn die Begrenzung von t auf einer überall beliebig vorgeschriebenen Temperatur constant erhalten wird, es stets eine, aber auch nur eine Temperaturvertheilung im Inneren giebt, bei welcher Gleichgewicht stattfindet; oder dass, wie man auch sagen kann, wenn die ursprüngliche Temperatur im Inneren eine beliebige war, diese sich einem Finalzustande nähert, bei welchem Gleichgewicht stattfinden würde.«

»Wir beweisen den Satz, indem wir von einer rein mathematischen Evidenz ausgehen. Es ist in der That einleuchtend, dass unter allen Functionen u , welche überall nebst ihren ersten Derivirten sich stetig in t ändern und auf der Begrenzung von t die vorgeschriebenen Werthe annehmen, es eine (oder mehrere) geben muss, für welche das durch den ganzen Raum t ausgedehnte Integral

$$U = \int \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right\} dt$$

seinen kleinsten Werth erhält. Wir wollen eine solche Function gerade mit u und das Minimum des Integrals mit U bezeichnen. Sei nun u' irgend eine andere Function, welche dieselben Grenz- und Stetigkeitsbedingungen wie u erfüllt, und U' der entsprechende Werth des Integrals, so kann $U' - U$ nie negativ sein. Setzen wir nun

$$u + hw = u',$$

wo h einen unbestimmten constanten Factor bezeichnet, so ist w eine Function, welche dieselben Stetigkeitsbedingungen wie u und u' erfüllt und auf der Begrenzung von t überall gleich Null wird, sonst aber ganz willkürlich ist. Dann findet man leicht

$$U' - U = 2hM + h^2N,$$

wo

$$M = \int \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial z} \right\} dt,$$

$$N = \int \left\{ \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} dt$$

ist. Durch theilweise Integration mit Rücksicht auf die Grenz- und Stetigkeitsbedingungen für w und die Stetigkeitsbedingungen für die ersten Derivirten von u findet man leicht

$$M = - \int w \left\{ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right\} dt.$$

Da nun $U' - U$ für jedes auch noch so kleine h niemals negativ sein kann, und N eine endliche positive Grösse ist, so folgt, dass M nothwendig gleich Null ist; und da dies der Fall sein muss, wie auch w beschaffen sein mag, so müssen wir schliessen, dass überall innerhalb t (höchstens mit Ausnahme einzelner Flächen, Linien, Punkte)

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0$$

sein muss; denn wäre dies Trinom in einem körperlichen Raume von Null verschieden, so brauchte man nur w überall dasselbe Zeichen wie jenem Trinom zu geben, um einen von Null verschiedenen Werth für M zu erhalten.

»Es giebt also jedenfalls eine solche Function u , welche die angegebenen Grenz- und Stetigkeitsbedingungen erfüllt und der partiellen Differentialgleichung genügt. Aber es giebt auch nur eine einzige solche Function u . Denn ist $u' = u + w$ irgend eine andere Function, welche dieselben Grenz- und Stetigkeitsbedingungen erfüllt, so ist das entsprechende Integral

$$U' = U + \int \left\{ \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} dt,$$

und folglich ist U wirklich ein absolutes Minimum; und sollte etwa $U' = U$ sein, so müsste, wie leicht zu sehen, im ganzen Raume t

$$\left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 = 0$$

sein. Daraus würde folgen, dass w constant ist; und da es stetig und auf

der Begrenzung von t Null ist, so muss es überall Null sein, d. h. u' muss mit u identisch sein.«

»Es wird später gezeigt werden, dass dieses u , welches die Grenz- und Stetigkeitsbedingungen erfüllt, und von welchem wir wissen, dass es der partiellen Differentialgleichung höchstens in einzelnen Punkten, Linien oder Flächen innerhalb t widerspricht, überall, d. h. in jedem Punkte ihr genügen muss, dass also solche Ausnahmestellen unmöglich sind.«

Unter der Voraussetzung, dass es für den Raum t überhaupt eine den festgesetzten Grenz- und Stetigkeitsbedingungen genügende Function gebe, soll hiernach das im Vorstehenden auseinandergesetzte Dirichlet'sche Verfahren dazu dienen, die Existenz einer Function von x, y, z nachzuweisen, welche der Differentialgleichung

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0$$

und zugleich den angegebenen Nebenbedingungen genügt. Das letztere ist in jedem bestimmten Falle leicht zu beweisen; das andere aber gilt nur in dem Falle, wo sich zeigen lässt, dass es eine Function u giebt, für welche der Werth des Ausdrucks

$$\int \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right\} dt,$$

ein (absolutes) Minimum ist. Dieses lässt sich aber aus den von Dirichlet gemachten Voraussetzungen keineswegs folgern, sondern es kann nur behauptet werden, dass es für den in Rede stehenden Ausdruck eine bestimmte untere Grenze giebt, welcher er beliebig nahe kommen kann, ohne sie wirklich erreichen zu müssen. Hiernach erweist sich Dirichlet's Schlussweise als hinfällig.

Ich will schliesslich das Vorstehende noch an einem einfachen Beispiel erläutern, durch welches die Unzulässigkeit der Dirichlet'schen Schlussweise evident dargethan wird.

Es bezeichne nämlich $\varphi(x)$ eine reelle eindeutige Function der reellen Veränderlichen x von der Beschaffenheit, dass erstens $\varphi(x)$ und $\frac{d\varphi(x)}{dx}$ im Intervall $(-1 \dots +1)$ stetige Functionen von x sind, und dass zweitens $\varphi(x)$ an der Grenze -1 des Intervalls den vorgeschriebenen Werth a , an der

Grenze +1 den vorgeschriebenen Werth b hat. Dabei sollen die beiden Constanten a und b zwei von einander verschiedene Grössen sein. Wenn nun die Dirichlet'sche Schlussweise zulässig wäre, so müsste sich unter den betrachteten Functionen $\varphi(x)$ eine solche specielle Function befinden, für welche der Werth des Integrals

$$J = \int_{-1}^{+1} \left(x \frac{d\varphi(x)}{dx} \right)^2 dx$$

gleich der unteren Grenze aller derjenigen Werthe ist, die dieses Integral für die verschiedenen der betrachteten Gesammtheit angehörenden Functionen $\varphi(x)$ annehmen kann.

Die erwähnte untere Grenze ist aber in dem vorliegenden Falle nothwendig gleich Null. Denn setzt man z. B.

$$\varphi(x) = \frac{a+b}{2} + \frac{b-a}{2} \frac{\operatorname{arctg} \frac{x}{\varepsilon}}{\operatorname{arctg} \frac{1}{\varepsilon}},$$

wo ε eine willkürlich anzunehmende positive Grösse bezeichnet, so erfüllt diese Function die beiden ersten Bedingungen; und da

$$J < \int_{-1}^{+1} (x^2 + \varepsilon^2) \left(\frac{d\varphi(x)}{dx} \right)^2 dx$$

und

$$\frac{d\varphi(x)}{dx} = \frac{b-a}{2 \operatorname{arctg} \frac{1}{\varepsilon}} \cdot \frac{\varepsilon}{x^2 + \varepsilon^2},$$

so ist für diese specielle Function

$$J < \varepsilon \frac{(b-a)^2}{\left(2 \operatorname{arctg} \frac{1}{\varepsilon} \right)^2} \int_{-1}^{+1} \frac{\varepsilon dx}{x^2 + \varepsilon^2}$$

und somit

$$J < \frac{\varepsilon}{2} \frac{(b-a)^2}{\operatorname{arctg} \frac{1}{\varepsilon}}.$$

Daraus erhellt, da man ε beliebig klein annehmen kann, dass die untere Grenze des Werthes von J gleich Null ist, denn negative Werthe kann J überhaupt nicht annehmen.

Diese Grenze kann aber der Werth von J nicht erreichen, wie man auch den obigen beiden Bedingungen gemäss die Function $\varphi(x)$ wählen möge. Denn da $\varphi(x)$ und $\frac{d\varphi(x)}{dx}$ stetige Functionen von x sein sollen, so wäre hierzu erforderlich, dass

$$\frac{d\varphi(x)}{dx}$$

für jeden dem Intervall $(-1 \cdots +1)$ angehörenden Werth von x verschwinde, dass also $\varphi(x)$ eine Constante sei. Dies ist aber mit der Annahme, dass a und b von einander verschieden sind, unverträglich.

Die Dirichlet'sche Schlussweise führt also in dem betrachteten Falle offenbar zu einem falschen Resultat.

35

NEUER BEWEIS
EINES HAUPTSATZES DER THEORIE DER PERIODISCHEN
FUNCTIONEN VON MEHREREN VERÄNDERLICHEN.*)

(Aus dem Monatsbericht der Königl. Akademie der Wissenschaften vom 9. Nov. 1876
mit einigen Veränderungen abgedruckt.)

1.

Eine Function f von n Veränderlichen $(u_1, u_2, \dots u_n)$ kann so beschaffen sein, dass für bestimmte Systeme constanter Grössen $(P_1, P_2, \dots P_n)$ bei beliebigen Werthen von $u_1, u_2, \dots u_n$ die Gleichung

$$f(u_1 + P_1, u_2 + P_2, \dots u_n + P_n) = f(u_1, u_2, \dots u_n)$$

besteht. Die Function heisst alsdann periodisch, und jedes einzelne Grössensystem $(P_1, P_2, \dots P_n)$ ein Periodensystem derselben.**)

Aus dieser Definition ergeben sich die folgenden Sätze:

1) Ist

$$(P'_1, P'_2, \dots P'_n)$$

ein Periodensystem einer Function von n Veränderlichen, so ist auch

$$(-P'_1, -P'_2, \dots -P'_n)$$

ein solches.

*) Vgl. Hermite, Extrait de lettres à C. G. J. Jacobi (Crelle's Journal Bd. 40, S. 310); und Riemann, Auszug aus einem Schreiben an Weierstrass, (ebd. Bd. 71, S. 197; Riemann's Gesammelte Werke S. 276).

**) Dies gilt, mag die Function f eine analytische Function sein oder nicht. Ist sie mehrdeutig, so besagt die aufgestellte Gleichung, dass die Gesammtheit der zu einem bestimmten Werthsystem $(u_1, u_2, \dots u_n)$ gehörigen Werthe von f identisch ist mit der Gesammtheit der zu $(u_1 + P_1, u_2 + P_2, \dots u_n + P_n)$ gehörigen.

2) Sind

$$(P'_1, P'_2, \dots, P'_n), \quad (P''_1, P''_2, \dots, P''_n)$$

irgend zwei Periodensysteme der Function, so ist auch

$$(P'_1 + P''_1, P'_2 + P''_2, \dots, P'_n + P''_n)$$

ein solches System.

Aus diesen beiden Sätzen folgt dann der allgemeinere:

3) Sind irgend r Periodensysteme

$$(P'_1, P'_2, \dots, P'_n), \quad (P''_1, P''_2, \dots, P''_n), \quad \dots \quad (P^{(r)}_1, P^{(r)}_2, \dots, P^{(r)}_n)$$

der Function gegeben, so kann man aus ihnen beliebig viele andere (P_1, P_2, \dots, P_n) ableiten, indem man r ganze Zahlen (m_1, m_2, \dots, m_r) willkürlich annimmt und (für $\alpha = 1, \dots, n$)

$$P_\alpha = \sum_{\beta=1}^r m_\beta P_\alpha^{(\beta)}$$

setzt.

4) Werden aus der Gesamtheit der Periodensysteme der betrachteten Function irgend $(\varrho + 1)$ Systeme

$$(P'_1, P'_2, \dots, P'_n), \quad \dots \quad (P^{(\varrho+1)}_1, P^{(\varrho+1)}_2, \dots, P^{(\varrho+1)}_n)$$

willkürlich herausgehoben, und ist

$$P_\alpha^{(\beta)} = p_{\alpha\beta} + ip'_{\alpha\beta},$$

wo $p_{\alpha\beta}$ und $p'_{\alpha\beta}$ reelle Grössen bedeuten; so lassen sich im Falle, dass $\varrho \geq 2n$ ist, stets $(\varrho + 1)$ reelle Grössen $(\mu_1, \dots, \mu_{\varrho+1})$ bestimmen, welche die $2n$ Gleichungen

$$\sum_{\beta=1}^{\varrho+1} \mu_\beta p_{\alpha\beta} = 0, \quad \sum_{\beta=1}^{\varrho+1} \mu_\beta p'_{\alpha\beta} = 0 \quad (\alpha = 1, \dots, n)$$

befriedigen und nicht sämmtlich gleich Null sind. Möglicherweise ist dies auch noch der Fall für $\varrho = 2n - 1$, $\varrho = 2n - 2$ u. s. w., jedenfalls aber nicht für $\varrho = 0$. Es muss also einen kleinsten, zwischen 0 und $2n - 1$ liegenden Werth von ϱ geben, bei dem es noch möglich ist, die vorstehenden Gleichungen für beliebige $(\varrho + 1)$ Periodensysteme in der angegebenen Weise zu befriedigen. Dieser Werth von ϱ werde fortan mit r bezeichnet. Dann existiren nothwendig Com-

plexe von r Periodensystemen, für welche den in Rede stehenden Gleichungen, wenn man $\varrho = r-1$ nimmt, nur dadurch, dass man jeder der Grössen μ_1, \dots, μ_r den Werth Null giebt, genügt werden kann.

Angenommen nun, es seien

$$(P'_1, P'_2, \dots, P'_n), (P''_1, P''_2, \dots, P''_n), \dots (P^{(r)}_1, P^{(r)}_2, \dots, P^{(r)}_n)$$

irgend r Systeme, welche einen solchen Complex bilden, und

$$(P_1, P_2, \dots, P_n)$$

ein beliebiges Periodensystem, so lassen sich $(r+1)$ reelle Grössen μ, μ_1, \dots, μ_r , die nicht sämmtlich den Werth Null haben, so bestimmen, dass die Gleichungen

$$\mu P_\alpha + \sum_{\beta=1}^r \mu_\beta P_\alpha^{(\beta)} = 0 \quad (\alpha = 1, \dots, n)$$

bestehen.

In diesen Gleichungen hat dann μ nothwendig einen von Null verschiedenen Werth; man erhält also, wenn man

$$m_\beta = -\frac{\mu_\beta}{\mu} \quad (\beta = 1, \dots, r)$$

setzt,

$$(A) \quad \left\{ \begin{array}{l} P_1 = \sum_{\beta=1}^r m_\beta P_1^{(\beta)}, \\ P_2 = \sum_{\beta=1}^r m_\beta P_2^{(\beta)}, \\ \dots \dots \dots \\ P_n = \sum_{\beta=1}^r m_\beta P_n^{(\beta)}. \end{array} \right.$$

Zugleich folgt aus der angenommenen Beschaffenheit der Systeme

$$(P_1^{(\beta)}, P_2^{(\beta)}, \dots, P_n^{(\beta)}),$$

dass zu einem bestimmten Periodensysteme (P_1, P_2, \dots, P_n) nur ein System reeller Grössen m_1, m_2, \dots, m_r , für welches die vorstehenden Gleichungen gelten, gehört.

- 5) Obgleich die Function unendlich viele Periodensysteme besitzt, so kann sie doch so beschaffen sein, dass die Anzahl derjenigen Periodensysteme, in denen jede einzelne Periode ihrem absoluten Betrage nach

eine willkürlich anzunehmende Grenze nicht überschreitet, endlich ist. In diesem Falle sind die in den vorstehenden Gleichungen (A) vorkommenden Grössen m_1, m_2, \dots, m_r immer rationale Zahlen.

Es lassen sich alsdann die Periodensysteme

$$(P'_1, P'_2, \dots, P'_n), (P''_1, P''_2, \dots, P''_n), \dots, (P^{(r)}_1, P^{(r)}_2, \dots, P^{(r)}_n)$$

stets auch so auswählen, dass die Grössen m_1, m_2, \dots, m_r für jedes Periodensystem (P_1, P_2, \dots, P_r) sämmtlich ganze Zahlen werden.

Der Beweis dieses fundamentalen Satzes kann folgendermassen geführt werden.

Es bedeute λ irgend eine der Zahlen $1, 2, \dots, r$, so fasse man, unter der Voraussetzung, dass die Periodensysteme

$$(P_1^{(\beta)}, P_2^{(\beta)}, \dots, P_n^{(\beta)}) \quad (\beta = 1, \dots, r)$$

den unter 4) angegebenen Bedingungen gemäss angenommen seien, diejenigen Periodensysteme (P_1, P_2, \dots, P_n) in's Auge, für welche die in den Gleichungen (A) vorkommenden Grössen m_1, m_2, \dots, m_r folgenden Bedingungen genügen:

$$\begin{aligned} 0 < m_\lambda &\leq 1, \\ 0 &\leq m_\beta \leq 1, \quad \text{wenn } \beta < \lambda, \\ 0 &= m_\beta, \quad \text{wenn } \beta > \lambda. \end{aligned}$$

Solche Systeme giebt es — namentlich ist $(P_1^{(\lambda)}, P_2^{(\lambda)}, \dots, P_n^{(\lambda)})$ eines von ihnen —; sie sind aber, weil durch die angegebene Beschränkung der Grössen m_β für den absoluten Betrag jeder einzelnen Periode eine Grenze, die er nicht überschreiten kann, festgestellt wird, nur in endlicher Anzahl vorhanden, und es muss sich unter ihnen eines finden, für welches m_λ den kleinsten Werth hat. Die zu diesem System gehörigen Grössen m_1, \dots, m_λ mögen mit $m_1^{(\lambda)}, \dots, m_\lambda^{(\lambda)}$ bezeichnet werden.

Nach diesen Festsetzungen ist, wenn m'_1, m'_2, \dots, m'_r reelle Grössen sind, welche die Bedingungen

$$0 \leq m'_1 < m_1^{(1)}, \quad 0 \leq m'_2 < m_2^{(2)}, \quad \dots, \quad 0 \leq m'_r < m_r^{(r)}$$

erfüllen, das System

$$\left(\sum_{\beta=1}^r m'_\beta P_1^{(\beta)}, \sum_{\beta=1}^r m'_\beta P_2^{(\beta)}, \dots, \sum_{\beta=1}^r m'_\beta P_n^{(\beta)} \right)$$

Die durch die Gleichungen (B) definirten Periodensysteme

$$(P_{11}, P_{21}, \dots, P_{n1}), (P_{12}, P_{22}, \dots, P_{n2}), \dots (P_{1r}, P_{2r}, \dots, P_{nr})$$

sind demnach so beschaffen, dass sich aus ihnen alle übrigen auf die oben — unter 3) — angegebene Weise ableiten lassen.

In den Gleichungen (C) nehme man nun, unter γ eine der Zahlen 1, 2, ... r verstehend,

$$P_1 = P_1^{(\gamma)}, P_2 = P_2^{(\gamma)}, \dots, P_n = P_n^{(\gamma)},$$

und bezeichne die Werthe, die dann $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_r$ haben, mit

$$\nu_{\gamma 1}, \nu_{\gamma 2}, \dots, \nu_{\gamma r},$$

so dass man

$$P_\alpha^{(\gamma)} = \sum_{\beta=1}^r \nu_{\gamma\beta} P_{\alpha\beta} \quad \left(\begin{array}{l} \alpha = 1, \dots, n \\ \gamma = 1, \dots, r \end{array} \right)$$

hat. Dann ist die Determinante

$$\begin{vmatrix} \nu_{11} & \dots & \nu_{1r} \\ \dots & \dots & \dots \\ \nu_{r1} & \dots & \nu_{rr} \end{vmatrix}$$

nothwendig von Null verschieden, weil sich sonst die $2n$ Gleichungen

$$\sum_{\beta=1}^r \mu_\beta p_{\alpha\beta} = 0, \quad \sum_{\beta=1}^r \mu_\beta p'_{\alpha\beta} = 0 \quad (\alpha = 1, \dots, n)$$

durch reelle Werthe der Grössen μ_β , ohne dass diese sämmtlich gleich Null zu sein brauchten, würden befriedigen lassen. Man kann daher, wenn $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_r$ beliebige ganze Zahlen sind, r rationale Zahlen m_1, \dots, m_r so bestimmen, dass die r Gleichungen

$$\sum_{\gamma=1}^r m_\gamma \nu_{\gamma\beta} = \nu_\beta \quad (\beta = 1, \dots, r)$$

bestehen. Dann ist gemäss den Gleichungen (C)

$$P_\alpha = \sum_{\beta=1}^r \nu_\beta P_{\alpha\beta} = \sum_{\gamma=1}^r m_\gamma P_\alpha^{(\gamma)} = \sum_{\beta=1}^r m_\beta P_\alpha^{(\beta)} \quad (\alpha = 1, \dots, n).$$

Da es nun, wie vorhin bemerkt worden, für jedes Periodensystem (P_1, P_2, \dots, P_n) nur ein System reeller Grössen m_1, m_2, \dots, m_r giebt, für das die Gleichungen (A) gelten, so ist bewiesen, dass diese Grössen, wie man

auch die r Periodensysteme

$$(P_1^{(\beta)}, P_2^{(\beta)}, \dots, P_n^{(\beta)}) \quad (\beta = 1, \dots, r)$$

den unter 4) angegebenen Bestimmungen entsprechend annehmen möge, stets rationale Zahlen sind.

6) Zu dem vorstehenden Satze ist noch Folgendes zu bemerken.

Angenommen, es seien für eine periodische Function von n Veränderlichen die Zahl r und die Grössen $P_\alpha^{(\beta)}$ so bestimmt, wie unter 4) angegeben wurde. Setzt man dann, unter m_1, m_2, \dots, m_r reelle Grössen verstehend, wie oben

$$\begin{aligned} P_\alpha^{(\beta)} &= p_{\alpha\beta} + i p'_{\alpha\beta}, & (\alpha = 1, \dots, n) \\ & & (\beta = 1, \dots, r) \\ P_\alpha &= \sum_{\beta=1}^r m_\beta p_{\alpha\beta} + i \sum_{\beta=1}^r m_\beta p'_{\alpha\beta}, \end{aligned}$$

so hat der Ausdruck

$$P = \sum_{\alpha=1}^n \left\{ \left(\sum_{\beta=1}^r m_\beta p_{\alpha\beta} \right)^2 + \left(\sum_{\beta=1}^r m_\beta p'_{\alpha\beta} \right)^2 \right\} = \sum_{\alpha=1}^n |P_\alpha|^2$$

stets einen positiven Werth, wenn die Grössen m nicht sämtlich gleich Null sind. Es ist deshalb, wenn g eine willkürlich angenommene positive Grösse bezeichnet, $P > g$, sobald der Werth von $\sum_{\beta=1}^r m_\beta^2$ eine bestimmte Grenze überschreitet, und es giebt daher unter denjenigen Werthsystemen (m_1, m_2, \dots, m_r), in denen jede einzelne Grösse eine ganze Zahl ist, nur eine endliche Anzahl solcher, für welche die absoluten Beträge von P_1, P_2, \dots, P_n sämtlich kleiner als g sind. Daraus folgt, dass die Gleichungen (A), wenn in denselben den Grössen m_1, m_2, \dots, m_r bloss ganzzahlige Werthe gegeben werden, sämtliche Periodensysteme der Function nur in dem Falle liefern können, wo die oben (im Anfange dieser No.) in Betreff der Beschaffenheit der Function gemachte Voraussetzung zutrifft.

Diese Voraussetzung ist aber gleichbedeutend mit der Annahme, dass die Function kein System unendlich kleiner Perioden besitze.

Man setze

$$P_\alpha = p_\alpha + i p_{n+\alpha}, \quad (\alpha = 1, \dots, n)$$

wo p_α und $p_{n+\alpha}$ reelle Grössen bedeuten, und nehme an, es lasse sich eine positive Grösse k so bestimmen, dass in jedem Periodensystem wenigstens eine der Grössen p_1, p_2, \dots, p_{2n} dem absoluten Betrage nach grösser als k ist.

Wenn man dann $2n$ ganze Zahlen

$$\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_{2n}$$

willkürlich annimmt, so kann es höchstens ein Periodensystem geben, in welchem die Grössen p_1, p_2, \dots, p_{2n} den Bedingungen

$$\nu_\lambda k \leq p_\lambda < \nu_\lambda k + k \quad (\lambda = 1, \dots, 2n)$$

genügen. Denn angenommen, es sei

$$(p'_1 + ip'_{n+1}, p'_2 + ip'_{n+2}, \dots, p'_n + ip'_{2n})$$

ein solches, und $(q_1, q_2, \dots, q_{2n})$ ein beliebiges System von $2n$ Grössen, welche ebenfalls die Bedingungen

$$\nu_\lambda k \leq q_\lambda < \nu_\lambda k + k \quad (\lambda = 1, \dots, 2n)$$

erfüllen, so ist, wenn man

$$q_\lambda = p'_\lambda + k_\lambda$$

setzt, k_λ dem absoluten Betrage nach kleiner als k , und deshalb

$$(k_1 + ik_{n+1}, k_2 + ik_{n+2}, \dots, k_n + ik_{2n})$$

kein Periodensystem; woraus folgt, dass auch

$$(q_1 + iq_{n+1}, q_2 + iq_{n+2}, \dots, q_n + iq_{2n})$$

kein solches ist.

Nun sei g eine willkürlich angenommene positive Grösse, so giebt es nur eine endliche Anzahl solcher Zahlensysteme $(\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_{2n})$, für welche

$$\nu_1 k, \nu_2 k, \dots, \nu_{2n} k$$

sämtlich zwischen den Grenzen $g, -g$ liegen; es existirt also auch nur eine endliche Anzahl von Periodensystemen, für welche jede der Grössen p_λ ihrem absoluten Betrage nach kleiner als g ist.

2.

Ich will jetzt annehmen, die betrachtete periodische Function $f(u_1, u_2, \dots, u_n)$ sei eine eindeutige analytische Function, und zunächst nachweisen, dass dieselbe ein System unendlich kleiner Perioden nur in dem Falle besitzt, wo sie sich als Function von weniger als n Argumenten, die ganze lineare Functionen von u_1, u_2, \dots, u_n sind, darstellen lässt.

Es seien $v_1, v_2, \dots v_m$ ganze lineare Functionen von $u_1, u_2, \dots u_n$, und $m < n$, so können n Grössen $P_1, P_2, \dots P_n$ so bestimmt werden, dass $v_1, v_2, \dots v_m$ sich nicht ändern, wenn man $u_1 + P_1, u_2 + P_2, \dots u_n + P_n$ für $u_1, u_2, \dots u_n$ setzt. Im Falle, dass sich f als Function von $v_1, v_2, \dots v_m$ ausdrücken lässt, ist also

$$f(u_1 + P_1, u_2 + P_2, \dots u_n + P_n) = f(u_1, u_2, \dots u_n).$$

Man kann aber $(n - m)$ der Grössen P beliebig annehmen, und giebt man diesen unendlich kleine Werthe, so werden die übrigen ebenfalls unendlich klein. Es besitzt also $f(u_1, u_2, \dots u_n)$ Systeme unendlich kleiner Perioden.

Bezeichnet man f , als Function von $v_1, v_2, \dots v_m$ betrachtet, mit \bar{f} , so hat man

$$\frac{\partial f}{\partial u_\alpha} = \sum_{\beta=1}^m \frac{\partial \bar{f}}{\partial v_\beta} \frac{\partial v_\beta}{\partial u_\alpha}; \quad (\alpha = 1, \dots n)$$

es bestehen also zwischen den ersten partiellen Ableitungen von f , von denen jetzt die nach u_α genommene mit $f(u_1, u_2, \dots u_n)_\alpha$ bezeichnet werden möge, $(n - m)$ Gleichungen von der Form

$$\sum_{\alpha=1}^n c_\alpha f(u_1, \dots u_n)_\alpha = 0,$$

wo $c_1, c_2, \dots c_n$ Constanten bezeichnen, welche nicht sämmtlich gleich Null sind.

Dagegen findet bekanntlich, wenn die Function f nicht die besondere Eigenschaft besitzt, sich auf die angegebene Weise in eine Function von weniger als n Argumenten verwandeln zu lassen, unter ihren Ableitungen keine solche Relation statt, und es ist daher möglich, n nicht singuläre*) Werthsysteme der Grössen $u_1, u_2, \dots u_n$

$$(u'_1, u'_2, \dots u'_n), \quad (u''_1, u''_2, \dots u''_n), \quad \dots \dots \quad (u^{(n)}_1, u^{(n)}_2, \dots u^{(n)}_n)$$

so anzunehmen, dass die Determinante

$$\begin{vmatrix} f(u'_1, u'_2, \dots u'_n)_1, & \dots & f(u'_1, u'_2, \dots u'_n)_n \\ f(u''_1, u''_2, \dots u''_n)_1, & \dots & f(u''_1, u''_2, \dots u''_n)_n \\ \dots & \dots & \dots \\ f(u^{(n)}_1, u^{(n)}_2, \dots u^{(n)}_n)_1, & \dots & f(u^{(n)}_1, u^{(n)}_2, \dots u^{(n)}_n)_n \end{vmatrix}$$

einen von Null verschiedenen Werth hat.

*) Es ist $(u'_1, u'_2, \dots u'_n)$ ein nicht singuläres Argumentensystem, wenn sich $f(u_1, u_2, \dots u_n)$ unter der Bedingung, dass die absoluten Beträge von $u_1 - u'_1, u_2 - u'_2, \dots u_n - u'_n$ gewisse Grenzen nicht übersteigen, nach ganzen positiven Potenzen dieser Differenzen in eine convergirende Reihe entwickeln lässt.

Man kann dann ferner, unter h_1, h_2, \dots, h_n veränderliche Grössen verstehend, deren absolute Beträge eine Grenze h nicht übersteigen sollen, die letztere so klein annehmen, dass (für $\alpha = 1, \dots, n$)

$$\begin{aligned} & f(u_1^{(\alpha)} + h_1, u_2^{(\alpha)} + h_2, \dots, u_n^{(\alpha)} + h_n) - f(u_1^{(\alpha)}, u_2^{(\alpha)}, \dots, u_n^{(\alpha)}) \\ &= \sum_{\beta=1}^n h_\beta \int_0^1 f(u_1^{(\alpha)} + th_1, u_2^{(\alpha)} + th_2, \dots, u_n^{(\alpha)} + th_n)_\beta dt, \end{aligned}$$

und zugleich die Determinante der als lineare Functionen von h_1, h_2, \dots, h_n betrachteten Ausdrücke auf der rechten Seite dieser n Gleichungen, welche für unendlich kleine Werthe von h_1, h_2, \dots, h_n unendlich wenig von der vorstehenden verschieden ist, ebenfalls nicht gleich Null ist. Dann sind die Differenzen auf der linken Seite der Gleichungen nur in dem Falle sämmtlich gleich Null, wenn sämmtliche Grössen h_1, h_2, \dots, h_n es sind. Hiernach ist es unmöglich, dass in einem Periodensystem der Function f jede einzelne Periode ihrem absoluten Betrage nach kleiner als h sei; mit anderen Worten, die Function besitzt kein System unendlich kleiner Perioden.

Es gilt also der Satz:

»Eine eindeutige analytische Function von n Veränderlichen sei periodisch, ohne als Function einer geringeren Anzahl von Argumenten, die ganze lineare Functionen der ursprünglichen sind, darstellbar zu sein, und r sei für sie die oben für eine beliebige periodische Function definirte Zahl, welche also einen der Werthe $1, 2, \dots, 2n$ hat. Dann lassen sich stets r Periodensysteme

$$(P_{11}, P_{21}, \dots, P_{n1}), \dots (P_{1r}, P_{2r}, \dots, P_{nr})$$

der Function so auswählen, dass durch die Gleichungen

$$P_\alpha = \sum_{\beta=1}^r v_\beta P_{\alpha\beta}, \quad (\alpha = 1, \dots, n)$$

in denen v_1, v_2, \dots, v_n beliebig anzunehmende ganze Zahlen bezeichnen, sämmtliche Periodensysteme der Function geliefert werden.«

Hierzu ist noch zu bemerken, dass es unmöglich ist, aus irgend welchen $(r-1)$ Periodensystemen alle übrigen abzuleiten; was aus der gegebenen Definition der Zahl r unmittelbar hervorgeht.

Dagegen lassen sich die r Systeme

$$(P_{1\beta}, P_{2\beta}, \dots, P_{n\beta})$$

durch unendlich viele Complexe von r anderen ersetzen.

Nimmt man nämlich an

$$\bar{P}_{\alpha\beta} = \sum_{\gamma=1}^r v_{\beta\gamma} P_{\alpha\gamma}, \quad \begin{matrix} (\alpha = 1, \dots, n) \\ (\beta = 1, \dots, r) \end{matrix}$$

wo die $v_{\beta\gamma}$ ganze Zahlen bezeichnen, und es sollen sich aus den r Periodensystemen

$$(\bar{P}_{1\beta}, \bar{P}_{2\beta}, \dots, \bar{P}_{n\beta}) \quad (\beta = 1, \dots, r)$$

alle übrigen ableiten lassen, so muss man haben

$$P_{\alpha\gamma} = \sum_{\beta=1}^r v'_{\alpha\gamma} \bar{P}_{\alpha\beta}, \quad \begin{matrix} (\alpha = 1, \dots, n) \\ (\gamma = 1, \dots, r) \end{matrix}$$

wo die $v'_{\beta\gamma}$ ebenfalls ganze Zahlen bedeuten, und somit

$$P_{\alpha\gamma} = \sum_{\beta=1}^r \sum_{\delta=1}^r v'_{\beta\gamma} v_{\beta\delta} P_{\alpha\delta}.$$

Es sind aber die Grössen $P_{\alpha\gamma}$, wie aus der gegebenen Definition derselben hervorgeht, so beschaffen, dass es unmöglich ist, die n Gleichungen

$$\sum_{\gamma=1}^r \mu_{\gamma} P_{\alpha\gamma} = 0 \quad (\alpha = 1, \dots, n)$$

durch reelle Werthe von $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_r$, wenn diese nicht sämtlich gleich Null sind, zu befriedigen. Folglich muss

$$\sum_{\beta=1}^r v'_{\beta\gamma} v_{\beta\delta} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } \gamma = \delta, \\ 0, & \text{wenn } \gamma \neq \delta, \end{cases}$$

sein. Daraus ergibt sich

$$\begin{vmatrix} v_{11} & \dots & v_{1r} \\ \dots & \dots & \dots \\ v_{r1} & \dots & v_{rr} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} v'_{11} & \dots & v'_{1r} \\ \dots & \dots & \dots \\ v'_{r1} & \dots & v'_{rr} \end{vmatrix} = 1,$$

und es müssen daher die Zahlen $v_{\beta\gamma}$ so gewählt werden, dass die Determinante

$$\begin{vmatrix} v_{11} & \dots & v_{1r} \\ \dots & \dots & \dots \\ v_{r1} & \dots & v_{rr} \end{vmatrix} = \pm 1$$

ist. Umgekehrt erhält man, wenn diese Bedingung erfüllt ist, die Grössen $P_{\alpha\gamma}$ durch die $\bar{P}_{\alpha\beta}$ so ausgedrückt, dass die $v'_{\beta\gamma}$ ganze Zahlen sind, und kann daher sämtliche Periodensysteme (P_1, P_2, \dots, P_n) auch aus den r Systemen

$$(\bar{P}_{11}, \bar{P}_{21}, \dots, \bar{P}_{n1}), \dots, (\bar{P}_{1r}, \bar{P}_{2r}, \dots, \bar{P}_{nr})$$

ableiten.

3.

Der im Vorstehenden bewiesene Satz gilt, wie ich jetzt zeigen will, auch in dem Falle, wo $f(u_1, u_2, \dots, u_n)$ eine m -deutige analytische Function ist.

Bezeichnet man die m Werthe der Function, welche zu demselben Werthsystem (u_1, u_2, \dots, u_n) gehören, mit $f^{(1)}, f^{(2)}, \dots, f^{(m)}$, und versteht unter x eine unbestimmte Grösse, so ist das Product

$$(x - f^{(1)})(x - f^{(2)}) \dots (x - f^{(m)})$$

eine eindeutige analytische Function von u_1, u_2, \dots, u_n , und eine ganze rationale Function von x ; es können also $f^{(1)}, f^{(2)}, \dots, f^{(m)}$ definiert werden als die Wurzeln einer Gleichung m^{ten} Grades

$$x^m + f_1(u_1, u_2, \dots, u_n)x^{m-1} + \dots + f_m(u_1, u_2, \dots, u_n) = 0,$$

deren Coefficienten eindeutige Functionen von u_1, u_2, \dots, u_n sind.

Diese Functionen von n Veränderlichen können nun so beschaffen sein, dass sie sich alle als Functionen einer geringeren Anzahl von Argumenten (v_1, v_2, \dots, v_l) , welche ganze lineare Functionen von u_1, u_2, \dots, u_n sind, darstellen lassen. In diesem Falle kann man n Constanten c_1, c_2, \dots, c_n , die nicht sämtlich gleich Null sind, so bestimmen, dass die Gleichungen

$$\sum_{\alpha=1}^n c_\alpha \frac{\partial v_\beta}{\partial u_\alpha} = 0 \quad (\beta = 1, \dots, l)$$

befriedigt werden, und daher v_1, v_2, \dots, v_l sich nicht ändern, wenn man, unter t eine unbestimmte Grösse verstehend,

$$u_1 + c_1 t, u_2 + c_2 t, \dots, u_n + c_n t \quad \text{für} \quad u_1, u_2, \dots, u_n$$

setzt. Es bestehen also die m Gleichungen

$$(A) \quad f_\mu(u_1 + c_1 t, u_2 + c_2 t, \dots, u_n + c_n t) = f_\mu(u_1, u_2, \dots, u_n), \\ (\mu = 1, \dots, m)$$

und es sind demzufolge die m Werthe von $f(u_1 + c_1 t, u_2 + c_2 t, \dots u_n + c_n t)$ identisch mit den m Werthen von $f(u_1, u_2, \dots u_n)$.

Die Function f besitzt also, wenn f_1, \dots, f_m die angegebene Beschaffenheit haben, ein Periodensystem $(c_1 t, c_2 t, \dots c_n t)$, in welchem, wenn man t unendlich klein annimmt, jede einzelne Periode einen unendlich kleinen Werth hat.

Aus den Gleichungen (A) ergeben sich die nachstehenden:

$$(B) \quad \sum_{\alpha=1}^n c_{\alpha} \frac{\partial f_{\mu}(u_1, u_2, \dots u_n)}{\partial u_{\alpha}} = 0, \quad (\mu = 1, \dots m)$$

welche also eine nothwendige Folge der in Betreff der Functionen f_1, \dots, f_m gemachten Annahme sind.

Umgekehrt haben diese Functionen die in Rede stehende Beschaffenheit, wenn für irgend ein System constanter Grössen $c_1, c_2, \dots c_n$, die nicht sämmtlich gleich Null sind, die Gleichungen (B) bestehen. Denn dann ist

$$\frac{\partial f_{\mu}(u_1 + c_1 t, u_2 + c_2 t, \dots u_n + c_n t)}{\partial t} = 0,$$

also $f_{\mu}(u_1 + c_1 t, u_2 + c_2 t, \dots u_n + c_n t)$ von t unabhängig, und es gelten somit die Gleichungen (A). Setzt man aber in den letzteren

$$t = -\frac{u_{\lambda}}{c_{\lambda}},$$

wo λ so zu wählen ist, dass c_{λ} nicht den Werth Null hat, so ergibt sich

$$f_{\mu}(u_1, u_2, \dots u_n) = f_{\mu}(v_1, v_2, \dots v_n), \quad (\mu = 1, \dots m)$$

wo

$$v_{\alpha} = u_{\alpha} - \frac{c_{\alpha}}{c_{\lambda}} u_{\lambda}, \quad v_{\lambda} = 0.$$

Nun ist aber, damit $f(u_1, u_2, \dots u_n)$ als Function von $(n-1)$ linear durch $u_1, u_2, \dots u_n$ ausdrückbaren Argumenten betrachtet werden könne, nothwendig und hinreichend, dass sich $f_1(u_1, u_2, \dots u_n), \dots, f_m(u_1, u_2, \dots u_n)$ sämmtlich als Functionen derselben $(n-1)$ Grössen darstellen lassen. Wenn also, wie in dem zu beweisenden Satze angenommen wird, $f(u_1, u_2, \dots u_n)$ die angegebene besondere Beschaffenheit nicht besitzt, so ist es unmöglich, dass für irgend ein System constanter Grössen $(c_1, c_2, \dots c_n)$, wofern nicht jede von ihnen den

Werth Null hat, die m Functionen

$$\sum_{\alpha=1}^n c_{\alpha} f_{\mu}(u_1, u_2, \dots, u_n)_{\alpha},$$

wo $f_{\mu}(u_1, \dots, u_n)_{\alpha}$ die erste Ableitung von $f_{\mu}(u_1, u_2, \dots, u_n)$ nach u_{α} bedeutet, alle identisch gleich Null sind. Daraus lässt sich folgern, dass man n nicht singuläre Werthsysteme

$$(u'_1, \dots, u'_n), (u''_1, \dots, u''_n), \dots (u^{(n)}_1, \dots, u^{(n)}_n)$$

und n ganze Zahlen $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$, von denen jede einen der Werthe 1, 2, \dots , m hat, so auswählen kann, dass die Determinante

$$D = \begin{vmatrix} f_{\mu_1}(u'_1, \dots, u'_n)_1, & \dots & f_{\mu_1}(u'_1, \dots, u'_n)_n \\ f_{\mu_2}(u''_1, \dots, u''_n)_1, & \dots & f_{\mu_2}(u''_1, \dots, u''_n)_n \\ \dots & \dots & \dots \\ f_{\mu_n}(u^{(n)}_1, \dots, u^{(n)}_n)_1, & \dots & f_{\mu_n}(u^{(n)}_1, \dots, u^{(n)}_n)_n \end{vmatrix}$$

einen von Null verschiedenen Werth erhält.

Man bezeichne, unter s eine der Zahlen 1, 2, \dots , n verstehend, mit D_s die Determinante

$$\begin{vmatrix} f_{\mu_1}(u'_1, \dots, u'_n)_1, & \dots & f_{\mu_1}(u'_1, \dots, u'_n)_s \\ \dots & \dots & \dots \\ f_{\mu_s}(u^{(s)}_1, \dots, u^{(s)}_n)_1, & \dots & f_{\mu_s}(u^{(s)}_1, \dots, u^{(s)}_n)_s \end{vmatrix},$$

so dass

$$D_1 = f_{\mu_1}(u'_1, \dots, u'_n)_1$$

und $D_n = D$ ist. Dann hat man, wenn $s > 1$,

$$D_s = D_{s-1} f_{\mu_s}(u^{(s)}_1, \dots, u^{(s)}_n)_1 + D'_{s-1} f_{\mu_s}(u^{(s)}_1, \dots, u^{(s)}_n)_2 + \dots,$$

wo D_{s-1}, D'_{s-1}, \dots nur von den $(s-1)$ ersten Werthsystemen $(u^{(\alpha)}_1, \dots, u^{(\alpha)}_n)$ abhängen. Sind nun diese und die Zahlen μ_1, \dots, μ_{s-1} so gewählt, dass D_{s-1} nicht gleich Null ist, so ist

$$D_{s-1} f_{\mu}(u_1, \dots, u_n)_1 + D'_{s-1} f_{\mu}(u_1, \dots, u_n)_2 + \dots$$

nicht für jeden Werth von μ identisch gleich Null; man kann also μ_s und

$$(u^{(s)}_1, \dots, u^{(s)}_n)$$

so annehmen, dass auch D_s nicht gleich Null ist. Da nun nicht alle Functionen

$$f_{\mu}(u_1, \dots, u_n)_1$$

gleich Null sind, so kann man zunächst

$$\mu_1 \text{ und } u'_1, u'_2, \dots u'_n,$$

sodann

$$\mu_2 \text{ und } u''_1, u''_2, \dots u''_n,$$

u. s. w. bis zuletzt

$$\mu_n \text{ und } u^{(n)}_1, u^{(n)}_2, \dots u^{(n)}_n$$

so wählen, dass $D_1, D_2, \dots D_n$ sämmtlich von Null verschiedene Werthe erhalten.

Man kann dann ferner eine Grenze h so fixiren, dass für alle Werthsysteme

$$(h_1, h_2, \dots h_n),$$

in denen jede einzelne Grösse dem absoluten Betrage nach kleiner als h ist,

$$\begin{aligned} & f_{\mu_s}(u_1^{(s)} + h_1, \dots u_n^{(s)} + h_n) - f_{\mu_s}(u_1^{(s)}, \dots u_n^{(s)}) \\ &= \sum_{\beta=1}^n h_\beta \int_0^1 f_{\mu_s}(u_1^{(s)} + th_1, \dots u_n^{(s)} + th_n)_\beta dt, \quad (s = 1, \dots n) \end{aligned}$$

und zugleich die Determinante der als lineare Functionen von $h_1, \dots h_n$ betrachteten Ausdrücke auf der rechten Seite dieser Gleichungen, welche bei einem unendlich kleinen Werthe von h sich unendlich wenig von D unterscheidet, ebenfalls nicht gleich Null ist. Dann sind die Differenzen auf der linken Seite der Gleichungen nur in dem Falle sämmtlich gleich Null, wenn sämmtliche Grössen $h_1, \dots h_n$ es sind. Es ist also unmöglich, dass in einem gemeinschaftlichen Periodensysteme der Functionen

$$f_1(u_1, u_2, \dots u_n), \dots f_m(u_1, u_2, \dots u_n)$$

jede einzelne Periode dem absoluten Betrage nach kleiner als h sei. Da nun die m Werthe von $f(u_1 + h_1, u_2 + h_2, \dots u_n + h_n)$ nur in dem Falle, wo $(h_1, h_2, \dots h_n)$ ein gemeinschaftliches Periodensystem der Functionen $f_1, \dots f_m$ ist, mit den m Werthen von $f(u_1, u_2, \dots u_n)$ identisch sind, so folgt, dass die Function $f(u_1, \dots u_n)$, wofern sie nicht die besprochene besondere Beschaffenheit hat, kein System unendlich kleiner Perioden besitzt, und demnach der in (2.) für eine eindeutige Function aufgestellte Satz bestehen bleibt, wenn das Wort »eindeutig« in » m -deutig« umgeändert wird.

ANMERKUNGEN.

(Vom Jahre 1886.)

1) Unter welchen Bedingungen der vorstehende Satz für eine analytische Function $f(u_1, u_2, \dots, u_n)$ auch in dem Falle gültig bleibe, wo sie so beschaffen ist, dass zu jedem Werthsysteme der Veränderlichen u_1, u_2, \dots, u_n unendlich viele Werthe von $f(u_1, u_2, \dots, u_n)$ gehören, ist noch nicht ermittelt worden. Dass es aber Functionen dieser Art giebt, für welche der Satz nicht gilt, ist bekannt. Herr Casorati hat bereits vor Jahren gezeigt, wie sich analytische Functionen eines Arguments, deren Perioden sich nicht aus zwei derselben ableiten lassen, in sehr einfacher Weise definiren lassen. (Comptes rendus, 21 déc. 1863 et 25 janv. 1864.)

2) Das in § 1 begründete Theorem gilt, wie schon oben bemerkt worden ist, für eine beliebige (analytische oder nicht analytische) Function $f(u_1, u_2, \dots, u_n)$. Es findet also auch Anwendung, wenn diese Function nur für reelle Werthe der Veränderlichen u_1, u_2, \dots, u_n definirt ist und somit auch nur Systeme reeller Perioden in Betracht kommen, in welchem Falle dann die Zahl r der gegebenen Definition nach nicht grösser als n sein kann. Dagegen ist der Satz, dass eine Function von n Variabeln nur dann Systeme unendlich kleiner Perioden haben kann, wenn sie sich als Function von weniger als n Argumenten, die ganze lineare Functionen der ursprünglichen sind, darstellen lässt, von mir nur für ein- oder m -deutige analytische Functionen bewiesen worden. Auf eine nicht analytische eindeutige und stetige Function reeller Argumente findet jedoch der gegebene Beweis auch noch Anwendung, wenn die partiellen Ableitungen erster Ordnung der Function existiren und ebenfalls stetige Functionen sind. Dass der in Rede stehende Satz aber richtig ist und sich beweisen lässt, wenn für eine Function reeller Veränderlichen nur feststeht, dass sie eindeutig und stetig sei, hat neuerdings Herr Kronecker nachgewiesen. (Sitzungsberichte der Berliner Akademie, 20. November 1884.)

ÜBER CONTINUIRLICHE FUNCTIONEN EINES REELLEN ARGUMENTS,
DIE FÜR KEINEN WERTH DES LETZTEREN EINEN BESTIMMTEN
DIFFERENTIALQUOTIENTEN BESITZEN.

(Gelesen in der Königl. Akademie der Wissenschaften am 18. Juli 1872.)

Bis auf die neueste Zeit hat man allgemein angenommen, dass eine eindeutige und continuirliche Function einer reellen Veränderlichen auch stets eine erste Ableitung habe, deren Werth nur an einzelnen Stellen unbestimmt oder unendlich gross werden könne. Selbst in den Schriften von Gauss, Cauchy, Dirichlet findet sich meines Wissens keine Äusserung, aus der unzweifelhaft hervorginge, dass diese Mathematiker, welche in ihrer Wissenschaft die strengste Kritik überall zu üben gewohnt waren, anderer Ansicht gewesen seien. Erst Riemann hat, wie ich von einigen seiner Zuhörer erfahren, mit Bestimmtheit ausgesprochen (i. J. 1861, oder vielleicht auch schon früher), dass jene Annahme unzulässig sei und z. B. bei der durch die unendliche Reihe

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n^2 x)}{n^2}$$

dargestellten Function sich nicht bewahrheite. Leider ist der Beweis hierfür von Riemann nicht veröffentlicht worden und scheint sich auch nicht in seinen Papieren oder durch mündliche Überlieferung erhalten zu haben. Dieses ist um so mehr zu bedauern, als ich nicht einmal mit Sicherheit habe erfahren können, wie Riemann seinen Zuhörern gegenüber sich ausgedrückt hat. Die Mathematiker, welche sich, nachdem die Riemann'sche Behauptung in weiteren Kreisen bekannt geworden war, mit dem Gegenstande beschäftigt haben, scheinen (wenigstens in ihrer Mehrzahl) der Ansicht gewesen zu sein,

es genüge, die Existenz von Functionen nachzuweisen, welche in jedem noch so kleinen Intervalle ihres Arguments Stellen darbieten, wo sie nicht differentiirbar sind. Dass es Functionen dieser Art giebt, lässt sich ausserordentlich leicht nachweisen, und ich glaube daher, dass Riemann nur solche Functionen im Auge gehabt hat, die für keinen Werth ihres Arguments einen bestimmten Differentialquotienten besitzen. Der Beweis dafür, dass die angegebene trigonometrische Reihe eine Function dieser Art darstelle, scheint mir indessen einigermaßen schwierig zu sein; man kann aber leicht continuirliche Functionen eines reellen Arguments x bilden, für welche sich mit den einfachsten Mitteln nachweisen lässt, dass sie für keinen Werth von x einen bestimmten Differentialquotienten besitzen.

Dies kann z. B. folgendermassen geschehen.

Es sei x eine reelle Veränderliche, a eine ungrade ganze Zahl, b eine positive Constante, kleiner als 1, und

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} b^n \cos(a^n x \pi);$$

so ist $f(x)$ eine stetige Function, von der sich zeigen lässt, dass sie, sobald der Werth des Products ab eine gewisse Grenze übersteigt, an keiner Stelle einen bestimmten Differentialquotienten besitzt.

Es sei x_0 irgend ein bestimmter Werth von x , und m eine beliebig angenommene ganze positive Zahl; so giebt es eine bestimmte ganze Zahl α_m , für welche die Differenz

$$a^m x_0 - \alpha_m,$$

die mit x_{m+1} bezeichnet werde, $> -\frac{1}{2}$, aber $\leq \frac{1}{2}$ ist.

Setzt man dann

$$x' = \frac{\alpha_m - 1}{a^m}, \quad x'' = \frac{\alpha_m + 1}{a^m},$$

so hat man

$$x' - x_0 = -\frac{1 + x_{m+1}}{a^m}, \quad x'' - x_0 = \frac{1 - x_{m+1}}{a^m};$$

es ist also

$$x' < x_0 < x''.$$

Man kann aber m so gross annehmen, dass x' , x'' beide der Grösse x_0 so nahe kommen, wie man will.

Nun ist

$$\begin{aligned} \frac{f(x') - f(x_0)}{x' - x_0} &= \sum_{n=0}^{\infty} \left(b^n \cdot \frac{\cos(a^n x' \pi) - \cos(a^n x_0 \pi)}{x' - x_0} \right) \\ &= \sum_{n=0}^{m-1} \left((ab)^n \cdot \frac{\cos(a^n x' \pi) - \cos(a^n x_0 \pi)}{a^n (x' - x_0)} \right) \\ &\quad + \sum_{n=0}^{\infty} \left(b^{m+n} \cdot \frac{\cos(a^{m+n} x' \pi) - \cos(a^{m+n} x_0 \pi)}{x' - x_0} \right). \end{aligned}$$

Der erste Theil dieses Ausdruckes ist, da

$$\frac{\cos(a^n x' \pi) - \cos(a^n x_0 \pi)}{a^n (x' - x_0)} = -\pi \sin\left(a^n \frac{x' + x_0}{2} \pi\right) \cdot \frac{\sin\left(a^n \frac{x' - x_0}{2} \pi\right)}{a^n \frac{x' - x_0}{2} \pi}$$

und der Werth von

$$\frac{\sin\left(a^n \frac{x' - x_0}{2} \pi\right)}{a^n \frac{x' - x_0}{2} \pi}$$

stets zwischen -1 und $+1$ liegt, dem absoluten Betrage nach kleiner als

$$\pi \sum_{n=0}^{m-1} (ab)^n,$$

also auch kleiner als

$$\frac{\pi}{ab-1} (ab)^m.$$

Ferner hat man, weil a eine ungrade Zahl ist:

$$\begin{aligned} \cos(a^{m+n} x' \pi) &= \cos(a^n (\alpha_m - 1) \pi) = -(-1)^{\alpha_m}, \\ \cos(a^{m+n} x_0 \pi) &= \cos(a^n \alpha_m \pi + a^n x_{m+1} \pi) = (-1)^{\alpha_m} \cos(a^n x_{m+1} \pi), \end{aligned}$$

also

$$\sum_{n=0}^{\infty} b^{m+n} \cdot \left(\frac{\cos(a^{m+n} x' \pi) - \cos(a^{m+n} x_0 \pi)}{x' - x_0} \right) = (-1)^{\alpha_m} (ab)^m \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1 + \cos(a^n x_{m+1} \pi)}{1 + x_{m+1}} b^n.$$

Alle Glieder der Summe

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1 + \cos(a^n x_{m+1} \pi)}{1 + x_{m+1}} b^n$$

sind positiv, und das erste, da $\cos(x_{m+1} \pi)$ nicht negativ ist, $1 + x_{m+1}$ aber zwischen $\frac{1}{2}$ und $\frac{3}{2}$ liegt, nicht kleiner als $\frac{2}{3}$.

II.

Hiernach hat man

$$\frac{f(x') - f(x_0)}{x' - x_0} = (-1)^{\alpha_m} (ab)^m \cdot \eta \left(\frac{2}{3} + \varepsilon \frac{\pi}{ab-1} \right),$$

wo η eine positive Grösse, die > 1 , bezeichnet, während ε zwischen -1 und $+1$ enthalten ist.

Ebenso ergibt sich

$$\frac{f(x'') - f(x_0)}{x'' - x_0} = -(-1)^{\alpha_m} (ab)^m \cdot \eta_1 \left(\frac{2}{3} + \varepsilon_1 \frac{\pi}{ab-1} \right),$$

wo η_1 ebenso wie η positiv und > 1 ist, ε_1 aber zwischen -1 und $+1$ liegt.

Nimmt man nun a, b so an, dass $ab > 1 + \frac{3}{2}\pi$, also

$$\frac{2}{3} > \frac{\pi}{ab-1}$$

ist, so haben

$$\frac{f(x') - f(x_0)}{x' - x_0}, \quad \frac{f(x'') - f(x_0)}{x'' - x_0}$$

stets entgegengesetzte Zeichen, werden aber beide, wenn m ohne Ende wächst, unendlich gross.

Hieraus ergibt sich unmittelbar, dass $f(x)$ an der Stelle ($x = x_0$) weder einen bestimmten endlichen, noch auch einen bestimmten unendlich grossen Differentialquotienten besitzt.

BEMERKUNGEN ZUR INTEGRATION
EINES SYSTEMS LINEARER DIFFERENTIALGLEICHUNGEN
MIT CONSTANTEN COEFFICIENTEN.

(Der Königl. Akademie der Wissenschaften mitgetheilt am 28. Oct. 1875.)

Die Resultate, zu denen ich in meiner Arbeit »Zur Theorie der bilinearen und quadratischen Formen« gelangt bin, finden eine Anwendung bei der Aufgabe der Integration eines Systems linearer Differentialgleichungen mit constanten Coefficienten

$$(1.) \quad \sum a_{\alpha\beta} \frac{dx_\alpha}{dt} = \sum b_{\alpha\beta} x_\alpha, \quad (\alpha, \beta = 1, 2, \dots, n)$$

wo x_1, x_2, \dots, x_n die zu bestimmenden Functionen der unabhängigen Variablen t sind. Auf diese Form kann man jedes derartige System bringen. Denn sollten höhere Ableitungen, z. B. $\frac{d^2 x_\alpha}{dt^2}$ auftreten, so braucht man nur $\frac{dx_\alpha}{dt} = x'_\alpha$, $\frac{d^2 x_\alpha}{dt^2} = \frac{dx'_\alpha}{dt}$ zu setzen. Multiplicirt man die Gleichungen (1.) mit n unbestimmten Constanten y_β und addirt sie, so erhält man

$$(2.) \quad \frac{d\varphi(x_1, \dots, x_n | y_1, \dots, y_n)}{dt} = \psi(x_1, \dots, x_n | y_1, \dots, y_n),$$

wo

$$(3.) \quad \varphi = \sum_{\alpha, \beta} a_{\alpha\beta} x_\alpha y_\beta, \quad \psi = \sum_{\alpha, \beta} b_{\alpha\beta} x_\alpha y_\beta$$

zwei bilineare Formen sind. Man kann annehmen, dass die Determinante $|a_{\alpha\beta}|$ von Null verschieden ist. Denn sonst kann man den Grössen y_β solche Werthe B_β geben, dass identisch $\varphi(x_1, \dots, x_n | B_1, \dots, B_n) = 0$, also nach (2.) auch $\psi(x_1, \dots, x_n | B_1, \dots, B_n) = 0$ ist. Ist nun keine der Gleichungen (1.) eine Folge der übrigen, so ist diese lineare Gleichung nicht identisch erfüllt. Man kann daher eine der Functionen x_α durch die übrigen ausdrücken und erhält dann aus dem gegebenen Gleichungssystem ein anderes mit nur $n-1$ unbestimmten Functionen. Ich bediene mich nun derselben Bezeichnungen wie in

der oben citirten Arbeit. Da $|\alpha_{\alpha\beta}|$ von Null verschieden ist, so kann man dort $g = 1$ und $h = 0$ setzen und durch Einführung neuer Variabeln die beiden bilinearen Formen auf die Gestalt bringen

$$(4.) \quad \varphi = \sum (X_\lambda Y_\lambda)_{e_\lambda}, \quad \psi = \sum c_\lambda (X_\lambda Y_\lambda)_{e_\lambda} + \sum (X_\lambda Y_\lambda)_{e_{\lambda-1}},$$

wo $(s - c_\lambda)^{e_\lambda}$ die Elementartheiler der Determinante der Form $s\varphi - \psi$ durchläuft und

$$(X_\lambda Y_\lambda)_e = \sum_{\mu+\nu=e} X_{\lambda\mu} Y_{\lambda\nu}$$

ist. Daher geht die Differentialgleichung (2.) über in

$$(5.) \quad \sum_\lambda \sum_{(\mu+\nu=e_\lambda)} \frac{dX_{\lambda\mu}}{dt} Y_{\lambda\nu} = \sum_\lambda \sum_{(\mu+\nu=e_\lambda)} c_\lambda X_{\lambda\mu} Y_{\lambda\nu} + \sum_\lambda \sum_{(\mu+\nu=e_{\lambda-1})} X_{\lambda\mu} Y_{\lambda\nu}.$$

Durch Vergleichung der Coefficienten von $Y_{\lambda\nu}$ ergeben sich daraus die Differentialgleichungen

$$(6.) \quad \frac{dX_{\lambda 0}}{dt} = c_\lambda X_{\lambda 0}, \quad \frac{dX_{\lambda\mu}}{dt} = c_\lambda X_{\lambda\mu} + X_{\lambda,\mu-1}.$$

Dies System zerfällt also in mehrere Systeme von der Form

$$(7.) \quad \frac{dX}{dt} = cX, \quad \frac{dX_1}{dt} = cX_1 + X, \quad \dots \quad \frac{dX_r}{dt} = cX_r + X_{r-1},$$

deren jedes einem Elementartheiler $(s - c)^r$ der Determinante von $s\varphi - \psi$ entspricht. Multiplicirt man diese Gleichungen mit e^{-ct} , so erhält man

$$\frac{d}{dt} (Xe^{-ct}) = 0, \quad \frac{d}{dt} (X_1 e^{-ct}) = X e^{-ct}, \quad \dots \quad \frac{d}{dt} (X_r e^{-ct}) = X_{r-1} e^{-ct}$$

und durch Integration

$$X = Ae^{ct}, \quad \frac{d}{dt} (X_1 e^{-ct}) = A, \quad X_1 = (At + A_1) e^{ct}, \\ \frac{d}{dt} (X_2 e^{-ct}) = At + A_1, \quad X_2 = \left(\frac{1}{2} At^2 + A_1 t + A_2\right) e^{ct},$$

schliesslich

$$(8.) \quad X_r = \left(\frac{A}{r!} t^r + \frac{A_1}{(r-1)!} t^{r-1} + \dots + A_r \right) e^{ct}.$$

Die Constanten A, A_1, \dots, A_r sind die Anfangswerthe der Functionen X, X_1, \dots, X_r für $t = 0$. Sie bestimmen sich mittelst der bekannten linearen Transformationsformeln aus den Anfangswerthen von x_1, x_2, \dots, x_n .

ZUR THEORIE DER EINDEUTIGEN ANALYTISCHEN FUNCTIONEN.

(Aus den Abhandlungen der Königl. Akademie der Wissenschaften vom Jahre 1876.)

1. Einleitung.

Unter den eindeutigen analytischen Functionen einer Veränderlichen zeichnen sich die rationalen durch eine charakteristische Eigenthümlichkeit aus, die zunächst festgestellt werden soll.

Ich will von einer eindeutigen analytischen Function $f(x)$ der complexen Veränderlichen x sagen, sie verhalte sich regulär in der Umgebung einer bestimmten Stelle ($x = a$), wenn sie innerhalb eines gewissen Bezirks, dessen Mittelpunkt a ist, überall einen endlichen und mit x stetig sich ändernden Werth hat. Nach einem bekannten Satze existirt dann eine Potenzreihe $\mathfrak{P}(x|a)$, welche innerhalb des genannten Bezirks die Function darstellt. Dies gilt auch, wenn $a = \infty$ ist, indem unter $\mathfrak{P}(x|\infty)$ eine Potenzreihe von $\frac{1}{x}$ zu verstehen ist. *)

Die Gesammtheit der Stellen, an denen $f(x)$ diese beiden Eigenschaften besitzt, nenne ich den Stetigkeitsbereich der Function.

*) Ich bediene mich zur Bezeichnung einer Reihe von der Form

$$\sum_v A_v x^v \quad (v = 0, 1, 2, \dots \infty)$$

in Fällen, wo es auf die Werthe der von x unabhängigen Coefficienten A_0, A_1, A_2, \dots nicht ankommt, des Zeichens $\mathfrak{P}(x)$, auszusprechen »Potenzreihe von x «. Ist ferner a ein bestimmter Werth von x , so schreibe ich $\mathfrak{P}(x|a)$ für $\mathfrak{P}(x-a)$, um hervorzuheben, dass a der Mittelpunkt des Convergenzbezirks der Reihe ist. Diese Bezeichnungsweise behalte ich auch bei, wenn $a = \infty$ ist, indem ich in diesem Falle der Formel

$$x - \infty$$

die Bedeutung $\frac{1}{x}$ gebe.

Dieser Bereich ist — wenn man von dem Fall absieht, wo $f(x)$ sich auf eine Constante reducirt — stets ein begrenzter, wie sich folgendermassen beweisen lässt.

Es sei a irgend eine im Endlichen liegende Stelle und r der Radius des Convergenzbezirkes der Reihe $\mathfrak{P}(x|a)$, welche die Function $f(x)$ in einer gewissen Umgebung von a darstellt.

Hat r einen endlichen Werth, so giebt es unter denjenigen Werthen von x , für welche $|x-a| \leq r$ ist,*) mindestens einen (x'), der dem in Rede stehenden Bereich nicht angehört. Dann ist entweder x' selbst eine Grenzstelle des Bereichs, oder es findet sich eine solche in der Strecke ($x' \dots a$) zwischen x' und a .

Ist dagegen $r = \infty$, so giebt es unendlich grosse Werthe von x , denen auch unendlich grosse Werthe von $f(x)$ entsprechen; in diesem Falle ist also die Stelle ($x = \infty$) — und zwar diese allein — vom Stetigkeitsbereich der betrachteten Function ausgeschlossen und bildet die Begrenzung desselben.

Hiermit ist festgestellt, dass für jede Function $f(x)$ im Gebiete der Veränderlichen x nothwendig singuläre Stellen, wie ich sie nennen will, existiren, welche Grenzstellen des Stetigkeitsbereichs der Function sind, ohne diesem selbst anzugehören. (Das Letztere ergibt sich unmittelbar aus der Definition des Stetigkeitsbereichs.)

Ist a' irgend eine solche singuläre Stelle, so giebt es innerhalb eines beliebigen Bezirks, dessen Mittelpunkt a' ist, unendlich viele Stellen, die dem Stetigkeitsbereich von $f(x)$ angehören. Möglicherweise gilt dies, wenn der Radius des Bezirks hinlänglich klein angenommen wird, von allen Stellen des letzteren, und dann kann es vorkommen, dass sich $f(x)$ durch Multiplication mit einer ganzen Potenz von $(x-a')$ in eine in der Umgebung von a' regulär sich verhaltende Function verwandeln lässt. Jenachdem dies der Fall ist oder nicht, nenne ich a' in Beziehung auf die Function $f(x)$ eine ausserwesentliche oder eine wesentliche singuläre Stelle.

Hierzu ist noch Folgendes zu bemerken. Eine Function $f(x)$ kann so beschaffen sein, dass es im Gebiete von x Stellen giebt, die weder dem Stetigkeitsbereiche der Function (\mathcal{A}) angehören, noch Grenzstellen desselben

*) Ich bezeichne den absoluten Betrag einer complexen Grösse x mit $|x|$.

sind. An diesen Stellen, deren Gesammtheit mit A'' bezeichnet werden möge, ist dann die Function nicht definirt. Es ist aber A'' ein Bereich von derselben Beschaffenheit wie A ; nimmt man in demselben eine Stelle a'' beliebig an, so liegen auch alle einer gewissen Umgebung von a'' angehörig Stellen in A'' . Daraus folgt, dass der Bereich A'' ein begrenzter ist, seine Grenzstellen aber nicht zu ihm gehören, also, da sie auch nicht in A liegen, nothwendig mit Grenzstellen des letzteren Bereichs zusammenfallen, und zwar mit solchen, die wesentliche singuläre Stellen für die betrachtete Function sind. Nun liegt aber in jeder Strecke, die einen Punkt von A'' mit einem Punkte von A verbindet, mindestens eine Grenzstelle des Bereichs A'' ; es hat also die Function $f(x)$ in dem angenommenen Falle unendlich viele wesentliche singuläre Stellen.

Nach diesen Auseinandersetzungen lässt sich nun die Klasse der rationalen Functionen einer Veränderlichen (x) definiren als die Gesammtheit derjenigen eindeutigen Functionen von x , für die es im Gebiete dieser Grösse nur ausserwesentliche singuläre Stellen giebt.

Ist nämlich erstens $f(x)$ eine rationale Function — im gewöhnlichen Sinne — und a irgend ein bestimmter Werth von x , so kann man $f(x)$ zunächst als Quotienten zweier ganzen Functionen von $(x-a)$, die für $x = a$ nicht beide gleich Null sind, darstellen und sodann, wenn von den nicht verschwindenden Gliedern des Divisors das niedrigste von der m^{ten} Ordnung ist, bei hinlänglich kleinen Werthen von $(x-a)$

$$(x-a)^m f(x)$$

in eine Reihe $\mathfrak{P}(x|a)$ entwickeln; d. h. es existiren für die Function $f(x)$ nur ausserwesentliche singuläre Stellen.

Angenommen zweitens, es sei $f(x)$ eine irgendwie definirte eindeutige Function, von der sich feststellen lässt, dass für sie wesentliche singuläre Stellen im ganzen Gebiete von x nicht existiren, so dass in der Umgebung jeder beliebig angenommenen Stelle a die Function in der Form

$$(x-a)^{-m} \mathfrak{P}(x|a)$$

darstellbar ist, wo m eine ganze, nicht negative Zahl bedeutet. Nimmt man zunächst $a = \infty$, so giebt es nach dem Obigen im Innern des Convergenz-

bezirktes der Reihe $\mathfrak{B}(x|a)$, jenachdem $m \leq 0$ ist, entweder gar keine singuläre Stelle, oder nur die eine ∞ . Sämmtliche singuläre Stellen — ausser ∞ — sind also in einem ganz im Endlichen liegenden Bereiche zu suchen. In demselben kann es aber nur eine endliche Anzahl solcher Stellen geben. Existiren nämlich für irgend eine eindeutige Function im Innern eines begrenzten Bereichs unendlich viele ausserwesentliche singuläre Stellen, so giebt es im Innern oder an der Grenze des Bereichs wenigstens eine Stelle, welche sich dadurch auszeichnet, dass in jeder Umgebung derselben von ihr verschiedene singuläre Stellen vorhanden sind, und die deshalb nothwendig eine wesentliche singuläre Stelle für die Function ist. Es ergibt sich also aus der angenommenen Beschaffenheit der betrachteten Function $f(x)$ mit Nothwendigkeit, dass es für sie nur eine endliche Anzahl singulärer Stellen geben kann.

Es ist nun zunächst der Fall möglich, dass $f(x)$ in der Umgebung jeder im Endlichen liegenden Stelle sich regulär verhält, also durch eine für jeden endlichen Werth von x convergirende Reihe von der Form

$$A_0 + A_1 x + A_2 x^2 + \dots$$

dargestellt werden kann. Dann hat die Function nur die eine singuläre ∞ , und da diese der Voraussetzung nach eine ausserwesentliche ist, so muss sich eine ganze, nicht negative Zahl m so bestimmen lassen, dass

$$\left(\frac{1}{x}\right)^{m+1} f(x)$$

für jeden unendlich grossen Werth von x unendlich klein ist. Dies aber ist nach einem bekannten Satze nur möglich, wenn in der vorstehenden Reihe jeder Coefficient, dessen Index grösser als m ist, verschwindet. Es ist also in dem betrachteten Falle $f(x)$ eine ganze rationale Function.

In dem Falle ferner, dass $f(x)$ im Endlichen singuläre Stellen besitzt, mögen dieselben mit

$$a_1, \dots, a_r$$

bezeichnet werden, und es sei m_k die kleinste ganze Zahl, durch welche bewirkt werden kann, dass die Function

$$(x - a_k)^{m_k} f(x)$$

in der Umgebung der Stelle a_k sich regulär verhält. Dann ist

$$(x-a_1)^{m_1} \dots (x-a_r)^{m_r} f(x)$$

eine Function, welche in der Umgebung jeder im Endlichen liegenden Stelle sich regulär verhält, woraus nach dem Bewiesenen folgt, dass $f(x)$ in der Form

$$\frac{G(x)}{(x-a_1)^{m_1} \dots (x-a_r)^{m_r}}$$

dargestellt werden kann, wo $G(x)$ eine ganze rationale Function von x bedeutet.

Hiermit ist bewiesen, dass durch die gegebene Definition wirklich die charakteristische Eigenthümlichkeit der rationalen Functionen einer Veränderlichen ausgesprochen wird.

Durch die vorstehenden Erörterungen ist aber auch für die Untersuchung und Classification der transcendenten eindeutigen Functionen eines Arguments ein Fingerzeig gegeben.

Werden dem Stetigkeitsbereich einer Function diejenigen von seinen Grenzstellen, welche ausserwesentliche singuläre Stellen für die Function sind, hinzugefügt, so entsteht ein Bereich A' , von welchem man, dem soeben Festgestellten gemäss, sagen kann, dass in ihm $f(x)$ überall wie eine rationale Function sich verhalte. Dieser Bereich ist ein unbegrenzter oder ein begrenzter, je nachdem $f(x)$ eine rationale oder eine transcendente Function ist, und im letzteren Falle wird seine Begrenzung von den wesentlichen singulären Stellen der Function gebildet, deren Anzahl endlich oder auch unendlich gross sein kann.

Betrachtet man nun als einer Klasse angehörend alle Functionen $f(x)$, für welche der definirte Bereich A' ein und derselbe ist, so bildet nach dem Vorhergehenden die Gesammtheit der rationalen Functionen von x eine solche Klasse. Dagegen existiren unzählige Klassen von transcendenten Functionen $f(x)$; um für die Eintheilung derselben in Gattungen ein sachgemässes Princip zu gewinnen, wird man zu untersuchen haben, welche wesentlichen Verschiedenheiten in der Begrenzungsweise eines Bereichs A' , der für eine Klasse eindeutiger Functionen von x die angegebene Bedeutung hat, möglich sind. Aber auch ohne auf diese Untersuchung näher einzugehen, wird man in den

eindeutigen Functionen mit einer endlichen Anzahl wesentlicher singulärer Stellen die den rationalen Functionen am nächsten stehenden erkennen, und als einer Gattung angehörend alle diejenigen betrachten, für welche die Zahl solcher Stellen dieselbe ist.

Man überzeugt sich leicht, dass es Functionen dieser Art mit beliebig vielen, und zwar vorgeschriebenen wesentlichen singulären Stellen wirklich giebt.

Wie oben bemerkt worden, wird durch jede unendliche Reihe

$$A_0 + A_1x + A_2x^2 + \dots,$$

deren Coefficienten gegebene Constanten und so beschaffen sind, dass die Reihe für alle endlichen Werthe der Veränderlichen x convergirt, eine Function mit der einen wesentlichen singulären Stelle ∞ dargestellt. Dasselbe gilt, wie in ganz ähnlicher Weise gezeigt werden kann, wenn $G_1(x)$, $G_2(x)$ zwei solche Functionen sind — wobei jedoch eine von ihnen auch eine ganze rationale sein darf — für den Quotienten

$$\frac{G_1(x)}{G_2(x)}$$

in jedem Falle, wo derselbe nicht auf eine rationale Function reducirt werden kann.

Dies vorausgesetzt, seien nun

$$G_1(x_1), G_2(x_1), \dots, G_{2n-1}(x_n), G_{2n}(x_n)$$

irgend n Paare solcher Functionen, x_1, \dots, x_n aber lineare Functionen von x , welche an n verschiedenen, im Übrigen willkürlich anzunehmenden Stellen

$$c_1, \dots, c_n$$

unendlich gross werden; dann ist

$$f(x) = \prod_{v=1}^n \frac{G_{2v-1}(x_v)}{G_{2v}(x_v)}$$

eine eindeutige Function von x , für welche

$$c_1, \dots, c_n$$

wesentliche singuläre Stellen sind, während sie in der Umgebung jeder andern Stelle sich wie eine rationale Function verhält.

Zusammengesetztere Ausdrücke solcher Functionen kann man bilden, indem man in einer beständig convergirenden unendlichen Reihe von der Form

$$\sum \{ A_{v_1, v_2, \dots, v_n} x_1^{v_1} x_2^{v_2} \dots x_n^{v_n} \}$$

($v_1 = 0, \dots, \infty, v_2 = 0, \dots, \infty, \dots, v_n = 0, \dots, \infty$)

oder auch in dem Quotienten zweier solcher Reihen für x_1, x_2, \dots, x_n beliebige rationale Functionen der Veränderlichen x substituirt: die so gebildete Function von x hat dann keine anderen wesentlichen singulären Stellen als diejenigen, an denen eine der Grössen x_1, \dots, x_n unendlich wird.

Nun ist im Vorhergehenden gezeigt worden, dass man von einer Function $f(x)$ nur zu wissen braucht, sie sei eine eindeutige Function ohne eine wesentliche singuläre Stelle, um sicher zu sein, dass sie als Quotient zweier ganzen rationalen Functionen von x (von denen sich eine auch auf eine Constante reduciren kann) darstellbar ist; mit anderen Worten, es ist nachgewiesen worden, dass durch die beiden angenommenen Eigenschaften der Function auch die Art der arithmetischen Abhängigkeit ihres Werthes von dem Werthe der unabhängigen Veränderlichen bedingt und bestimmt ist. Dadurch ist die Frage nahe gelegt, ob für die eindeutigen Functionen mit einer endlichen Anzahl wesentlicher singulärer Stellen etwas Ähnliches gelte — ob es möglich sei, arithmetische, aus der Veränderlichen x und aus unbestimmten Constanten zusammengesetzte Ausdrücke zu bilden, welche sämtliche Functionen einer bestimmten Klasse — und nur diese — darstellen.

In der vorliegenden Arbeit findet diese Frage, in der ein den Elementen der Functionenlehre angehöriges, allgemeines und zugleich wohlbegrenztes Problem ausgesprochen ist, ihre vollständige Erledigung. Das Resultat ist einfacher als die Mannigfaltigkeit der Formen, in denen, wie die gegebenen Beispiele lehren, Functionen der in Rede stehenden Art auftreten können, es erwarten liess.

Unter den Functionen, um welche es sich handelt — die rationalen jetzt eingeschlossen — sind die einfachsten diejenigen, für welche es im ganzen Gebiete der unabhängigen Veränderlichen nur eine (wesentliche oder ausserwesentliche) singuläre Stelle giebt. Liegt diese Stelle im Unendlichen, so kann, wie oben bemerkt, eine solche Function stets dargestellt werden durch

eine Reihe von der Form

$$A_0 + A_1x + A_2x^2 + \dots,$$

in der x das Argument der Function, die Coefficienten A_0, A_1, A_2, \dots aber von x unabhängige, bestimmte Grössen bedeuten; so wie anderseits jede Reihe von dieser Form, wenn sie für jeden endlichen Werth von x convergirt, der Ausdruck einer eindeutigen Function von x mit der einen singulären Stelle ∞ ist. Eine solche Function will ich eine ganze eindeutige Function von x nennen — oder auch bloss, wo keine Zweideutigkeit dadurch entsteht, eine ganze Function —; man hat also zu unterscheiden zwischen rationalen ganzen Functionen, für welche die Stelle ∞ eine ausserwesentliche singuläre ist und die angegebene Reihe aus einer endlichen Anzahl von Gliedern besteht, und transcendenten ganzen Functionen, für welche ∞ eine wesentliche singuläre Stelle ist und die Reihe unendlich viele Glieder hat. Als Functionszeichen für eine unbestimmte, in der in Rede stehenden Form ausgedrückt gedachte Function verwende ich auch im Folgenden den Buchstaben G und unterscheide, wenn mehrere solche Functionen zu bezeichnen sind, die einzelnen durch hinzugefügte Indices.

Dies vorausgesetzt, ist nun die Beantwortung der gestellten Frage in folgenden Sätzen enthalten.

A. Der allgemeine Ausdruck einer eindeutigen Function von x mit nur einer (wesentlichen oder ausserwesentlichen) singulären Stelle (c) ist

$$G\left(\frac{1}{x-c}\right),$$

wo der obigen Festsetzung gemäss, wenn $c = \infty$, $\frac{1}{x-c}$ durch x zu ersetzen ist. Die singuläre Stelle ist eine wesentliche oder ausserwesentliche, jenachdem G eine transcendente oder eine rationale ganze Function von $\frac{1}{x-c}$ ist.

B. Der allgemeine Ausdruck einer eindeutigen Function von x mit n (wesentlichen oder ausserwesentlichen) singulären Stellen (c_1, \dots, c_n) kann in mannigfaltiger Weise aus n Functionen mit je einer singulären Stelle zusammengesetzt, am einfachsten aber in den nachstehenden Formen aufgestellt werden:

$$1) \sum_{v=1}^n G_v\left(\frac{1}{x-c_v}\right); \quad 2) \prod_{v=1}^n G_v\left(\frac{1}{x-c_v}\right) \cdot R^*(x),$$

wo $R^*(x)$ eine rationale Function bedeutet, welche nur an den wesentlichen singulären Stellen der darzustellenden Function Null oder unendlich gross wird.

C. Jede eindeutige Function von x , welche n wesentliche singuläre Stellen (c_1, \dots, c_n) und ausser diesen noch beliebig viele (auch unendlich viele) ausserwesentliche hat, kann in jeder der beiden nachstehenden Formen:

$$1) \quad \frac{\sum_{v=1}^n G_v \left(\frac{1}{x-c_v} \right)}{\sum_{v=1}^n G_{n+v} \left(\frac{1}{x-c_v} \right)},$$

$$2) \quad \frac{\prod_{v=1}^n G_v \left(\frac{1}{x-c_v} \right)}{\prod_{v=1}^n G_{n+v} \left(\frac{1}{x-c_v} \right)} \cdot R^*(x)$$

ausgedrückt werden, und zwar dergestalt, dass Zähler und Nenner für keinen Werth von x beide verschwinden.

Umgekehrt stellt jeder dieser Ausdrücke, wenn die Functionen G_1, \dots, G_{2n} willkürlich angenommen werden, eine eindeutige Function von x dar, welche im Allgemeinen n , in speciellen Fällen auch weniger als n wesentliche singuläre Stellen hat, während die Anzahl der ausserwesentlichen singulären Stellen, an denen die Function unendlich wird, unbeschränkt ist.

Von diesen Sätzen war bisher nur der unter (A) angeführte bekannt, und der unter (B, 1) aufgestellte aus bekannten Sätzen leicht abzuleiten. Die übrigen aufzufinden war nicht schwer, nachdem einmal die Aufgabe, um die es sich handelt, gehörig präcisirt war. Um sie allgemein beweisen zu können, hatte ich jedoch, wie sich alsbald ergab, zuvor eine in der Theorie der transcendenten ganzen Functionen bestehende, sogleich anzugebende Lücke auszufüllen, was mir erst nach manchen vergeblichen Versuchen vor nicht langer Zeit in befriedigender Weise gelungen ist.

Für jede eindeutige Function $f(x)$ gilt, dass in einem Theile des Gebiets von x , der weder im Innern noch an der Grenze eine wesentliche singuläre Stelle enthält, Werthe, für die $f(x) = \infty$, und ebenso Werthe, für die $f(x) = 0$ ist, stets nur in endlicher Anzahl vorhanden sind. Das Erstere ergibt sich

unmittelbar aus dem oben (S. 80) Bemerkten, und das Letztere ebenfalls, wenn man beachtet, dass die Function

$$\frac{1}{f(x)}$$

dieselben wesentlichen singulären Stellen hat wie $f(x)$ selbst.

Ist insbesondere $f(x)$ eine ganze eindeutige Function, so giebt es also unter den Werthen von x , deren absoluter Betrag eine willkürlich angenommene Grenze nicht übersteigt, stets nur eine endliche Anzahl solcher, für die $f(x)$ gleich Null ist. Dies gilt auch noch, wenn in Übereinstimmung mit dem bei ganzen rationalen Functionen Gebräuchlichen festgesetzt wird, dass bei Bestimmung der in Rede stehenden Zahl jeder Werth, für welchen ausser der Function $f(x)$ selbst auch die $(\mu - 1)$ ersten Ableitungen derselben verschwinden, die μ^{te} aber nicht, als ein μ -mal zu zählender betrachtet werden soll.

Hieraus folgt, dass es stets möglich ist, aus denjenigen Werthen von x , für die eine bestimmte eindeutige ganze Function dieser Grösse verschwindet, eine Reihe

$$a_1, a_2, a_3, \dots$$

zu bilden, welche jeden Werth so oft enthält, als er nach der gemachten Festsetzung zu zählen ist, und zugleich, falls die Anzahl ihrer Glieder unendlich gross ist, der Bedingung

$$\lim_{n \rightarrow \infty} |a_n| = \infty$$

genügt. Die so gebildete Reihe (a_1, a_2, a_3, \dots) möge die Reihe der »Null-Stellen« der betreffenden Function heissen.

Dies festgestellt, ergeben sich nun zwei Fragen:

- 1) In wie weit ist eine Function $G(x)$ durch die Reihe ihrer Null-Stellen bestimmt?
- 2) Existirt, wenn eine unendliche Reihe bestimmter Grössen a_1, a_2, a_3, \dots , die der Bedingung $\lim_{n \rightarrow \infty} |a_n| = \infty$ genügt, gegeben ist, stets eine Function $G(x)$, für welche diese Reihe in dem festgestellten Sinne die Reihe der Null-Stellen bildet?

Die erste Frage beantwortet sich leicht. Es giebt unendlich viele ganze Functionen, welche dieselben Null-Stellen haben wie eine gegebene $G(x)$; sie

sind sämmtlich enthalten in dem Ausdruck

$$G(x) e^{\overline{G}(x)},$$

wo unter $\overline{G}(x)$ eine willkürlich anzunehmende ganze Function zu verstehen ist.

Was dagegen die zweite, bis jetzt unerledigt gebliebene Frage angeht, so werde ich im folgenden Paragraphen nachweisen, dass dieselbe unbedingt zu bejahen ist.

Mit Hülfe des so gewonnenen fundamentalen Satzes lassen sich dann von den im Vorstehenden unter (C) aufgestellten Theoremen zunächst diejenigen leicht beweisen, welche auf Functionen mit einer wesentlichen singulären Stelle sich beziehen.

Sodann wird der nachstehende Hilfssatz eingeschaltet:

Es sei

$$\varphi(x) = k_0 + \frac{k_1}{x - c_1} + \dots + \frac{k_n}{x - c_n},$$

wo die c und k Constanten bedeuten, welche nur der Beschränkung unterworfen sind, dass von den Grössen k_1, \dots, k_n keine gleich Null, und von den Grössen c_1, \dots, c_n nicht zwei einander gleich sein sollen. Ferner seien $F_0(y), F_1(y), \dots, F_{n-1}(y)$ eindeutige Functionen der Veränderlichen y mit der einen wesentlichen singulären Stelle ∞ . Alsdann stellt nicht nur der Ausdruck

$$\sum_{v=0}^{n-1} F_v(y) \cdot \left(\frac{1}{x-c}\right)^v,$$

wo c eine beliebige der Grössen c_1, \dots, c_n bedeutet, wenn man in demselben

$$y = \varphi(x)$$

setzt, stets eine eindeutige Function mit den wesentlichen singulären Stellen c_1, \dots, c_n dar, sondern es lassen sich auch für jede gegebene Function $f(x)$ dieser Art die Functionen $F_0(y), \dots, F_{n-1}(y)$ so bestimmen, dass

$$f(x) = \sum_{v=0}^{n-1} F_v(\varphi(x)) \cdot \left(\frac{1}{x-c}\right)^v$$

ist. Dabei werden $F_0(y), \dots, F_{n-1}(y)$ sämmtlich ganze Functionen von y , wenn die Function $f(x)$ keine ausserwesentliche singuläre Stelle hat.

Dieser Satz dient zur Begründung des unter (B, 1) gegebenen Ausdrucks einer Function mit n (wesentlichen oder ausserwesentlichen) singulären Stellen.

Eine solche Function kann so beschaffen sein, dass sie an keiner Stelle, welche von den Stellen c_1, \dots, c_n verschieden ist, verschwindet; in diesem Falle ergibt sich für sie der Ausdruck

$$R^*(x) \prod_{v=1}^n e^{\overline{G}_v\left(\frac{1}{x-c_v}\right)}.$$

Ist nun $f(x)$ eine beliebige eindeutige Function mit den n wesentlichen singulären Stellen c_1, \dots, c_n , so hat man das Gebiet der Veränderlichen x in n Theile dergestalt zu zerlegen, dass im Innern eines jeden Theiles eine der genannten Stellen liegt, und dass zugleich die Function $f(x)$ an der Grenze zwischen je zwei Theilen überall einen endlichen und von Null verschiedenen Werth hat; dies kann auf unendlich viele Arten geschehen. Dann giebt es, wenn mit c irgend eine der Stellen c_1, \dots, c_n und mit C der zugehörige Theil bezeichnet wird, unter den zu C gehörenden Werthen von x , für welche

$$|x - c| > \varrho$$

ist, wo ϱ eine beliebig klein anzunehmende positive Grösse bedeutet, nur eine endliche Anzahl solcher, für die $f(x)$ verschwindet; dasselbe gilt auch noch, wenn auch jetzt festgesetzt wird, dass bei der Zählung dieser Werthe so verfahren werde, wie vorhin für eine ganze Function angegeben worden ist. Es kann demnach, wenn es überhaupt in C Werthe giebt, für die $f(x) = 0$ ist, aus der Gesamtheit derselben eine Reihe

$$a_1, a_2, a_3, \dots$$

in der Art gebildet werden, dass in derselben jeder einzelne Werth so oft vorkommt, als er der Festsetzung gemäss zu zählen ist, und zugleich, falls die Reihe nicht abbricht,

$$\lim_{n=\infty} |a_n - c| = 0$$

ist. Dann ist die Reihe

$$\frac{1}{a_1 - c}, \frac{1}{a_2 - c}, \dots, \frac{1}{a_n - c}, \dots$$

so beschaffen, dass eine Function $G(x')$ existirt, für welche sie die Reihe der

Null-Stellen bildet; und wenn man in dieser $x' = \frac{1}{x-c}$ setzt, so ist

$$G\left(\frac{1}{x-c}\right)$$

eine Function von x , welche nur die eine wesentliche singuläre Stelle c hat und zu der Function $f(x)$ in der Beziehung steht, dass die vollständige Reihe ihrer Null-Stellen identisch ist mit der Reihe der dem betrachteten Theile C angehörenden Null-Stellen von $f(x)$. (Sind Werthe von x , für die $f(x)$ verschwindet, in C nicht vorhanden, so ist die definirte Function G in den folgenden Formeln durch die Zahl 1 zu ersetzen.) Ebenso giebt es, da die Function $\frac{1}{f(x)}$ dieselben wesentlichen singulären Stellen wie $f(x)$ hat, eine Function $G'\left(\frac{1}{x-c}\right)$, welche zu $\frac{1}{f(x)}$ in derselben Beziehung steht wie $G\left(\frac{1}{x-c}\right)$ zu $f(x)$.

Bezeichnet man nun diese beiden Functionen für die Stelle c_v mit

$$G^{(v)}\left(\frac{1}{x-c_v}\right), \quad G^{(n+v)}\left(\frac{1}{x-c_v}\right),$$

und setzt

$$f(x) = \prod_{v=1}^n \left\{ \frac{G^{(v)}\left(\frac{1}{x-c_v}\right)}{G^{(n+v)}\left(\frac{1}{x-c_v}\right)} \right\} \cdot f_1(x),$$

so ist $f_1(x)$ eine Function, welche an allen Stellen des Gebiets von x , mit Ausnahme der Stellen c_1, \dots, c_n , einen endlichen und von Null verschiedenen Werth hat.

Drückt man sodann diese Function $f_1(x)$ in der vorhin angegebenen Weise aus, so ergeben sich die unter (B, 2) und (C, 2) aufgestellten Formen von $f(x)$. Aus der letzteren erhält man dann schliesslich mit Hülfe des Theorems (B, 1) den unter (C, 1) gegebenen Ausdruck derselben Function.

Die im Vorstehenden zusammengestellten Ausdrücke einer eindeutigen Function mit einer endlichen Anzahl wesentlicher singulärer Stellen können nun noch weiter entwickelt werden, so dass die arithmetische Abhängigkeit des Werthes der Function von dem Werthe ihres Arguments unmittelbar in Evidenz tritt. In den Formeln (B, 1) und (C, 1) ist es für diesen Zweck am angemessensten, jede Function $G\left(\frac{1}{x-c}\right)$ in der Form einer Potenzreihe von

$\frac{1}{x-c}$ darzustellen. Es lässt sich aber, wie in § 2 nachgewiesen wird, jede Function $G(x)$ auch darstellen als Product unendlich vieler Factoren, welche ebenso wie die Potenzen von x bestimmt charakterisirte Functionen sind; diese Ausdrucksform der Functionen $G\left(\frac{1}{x-c}\right)$ wird man am zweckmässigsten zur weiteren Entwicklung der Formeln (B, 2) und (C, 2) verwenden.

Ist

$$a_1, a_2, \dots a_r$$

die Reihe der Null-Stellen einer ganzen rationalen Function $G(x)$, und x_0 irgend ein in dieser Reihe nicht enthaltener Werth, so hat man

$$\frac{G(x)}{G(x_0)} = \prod_{n=1}^r \left(\frac{x-a_n}{x_0-a_n} \right).$$

Man hat schon früh versucht, diesen Satz auf transcendente ganze Functionen auszudehnen, wobei sich jedoch erhebliche Schwierigkeiten darboten. Man erkannte, dass es im Allgemeinen nöthig sei, dem Ausdruck rechts noch einen Factor von der Form

$$e^{\bar{G}(x)}$$

hinzuzufügen (Cauchy, Exercices de Mathématiques, IV.); aber dies reicht, abgesehen von dem Falle, wo Null-Stellen der Function nur in endlicher Anzahl vorhanden sind, nur aus, wenn die Reihe

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{a_n - x_0},$$

und mit ihr das Product

$$\prod_{n=1}^{\infty} \left(\frac{x-a_n}{x_0-a_n} \right)$$

convergirt, was im Allgemeinen nicht der Fall ist.

Bei manchen Functionen gelingt es zwar, durch Festsetzung einer bestimmten Aufeinanderfolge der Factoren, oder überhaupt durch Vorschrift einer bestimmten Ausführungsweise der unendlich vielen Multiplicationen, das Product zu einem bedingt convergenten zu machen; im Allgemeinen indess ist auch dies nicht möglich, wie unter anderen das Beispiel der Function

$$\frac{1}{\Pi(x)}$$

zeigt, bei welcher das in Rede stehende, aus den Factoren

$$1+x, \quad 1+\frac{x}{2}, \quad 1+\frac{x}{3}, \quad \dots$$

zu bildende Product unter allen Umständen divergirt.

Aber eben diese Function weist auf den Weg hin, der zum Ziele führt. Nach der von Gauss gegebenen Definition ist der Ausdruck derselben das beständig convergirende unendliche Product

$$\prod_{n=1}^{\infty} \left\{ \left(1 + \frac{x}{n} \right) \cdot \left(\frac{n+1}{n} \right)^{-x} \right\}$$

oder

$$\prod_{n=1}^{\infty} \left\{ \left(1 + \frac{x}{n} \right) e^{-x \log \left(\frac{n+1}{n} \right)} \right\};$$

d. h. die Function ist darstellbar als Product unendlich vieler Factoren, welche zwar nicht ganze lineare Functionen von x , aber doch gleich diesen eindeutige Functionen mit nur Einer singulären Stelle (∞) und auch nur Einer Null-Stelle sind.

Von dieser Bemerkung ausgehend legte ich mir die Frage vor, ob sich nicht jede Function $G(x)$ aus Factoren von der Form

$$(kx+l)e^{\bar{G}(x)}$$

möge zusammensetzen lassen, und gelangte, indem ich diesen Gedanken verfolgte, schliesslich zu einem Ergebnisse, durch welches die Theorie der eindeutigen Functionen mit einer endlichen Anzahl wesentlicher singulärer Stellen einen befriedigenden Abschluss erhält.

Ich nenne »Primfunction« von x jede eindeutige Function dieser Grösse, welche nur eine (wesentliche oder ausserwesentliche) singuläre Stelle und entweder nur eine oder gar keine Null-Stelle hat. Der allgemeinste Ausdruck einer solchen Function ist, wenn die singuläre Stelle mit c bezeichnet wird,

$$\left(\frac{k}{x-c} + l \right) e^{G\left(\frac{1}{x-c}\right)},$$

wo k, l Constanten bedeuten, und zu beachten ist, dass k auch gleich Null und $G\left(\frac{1}{x-c}\right)$ eine Constante sein kann. Es erweist sich aber für den in's

Auge gefassten Zweck als ausreichend und zweckmässig, ausschliesslich solche Primfunctionen einzuführen, bei denen $G\left(\frac{1}{x-c}\right)$ eine rationale ganze Function von $\frac{1}{x-c}$ ist; dies soll also im Folgenden überall, wo von Primfunctionen die Rede ist, stillschweigend angenommen werden.

Dies festgestellt, ergibt sich zunächst, dass jede eindeutige Function $f(x)$ mit einer (wesentlichen oder ausserwesentlichen) singulären Stelle entweder selbst eine Primfunction ist oder ein Product von Primfunctionen mit derselben singulären Stelle; die unter (B, 2) und (C, 2) angegebenen Ausdrücke lassen dann unmittelbar erkennen, dass und wie eine beliebige Function der dort betrachteten Arten aus Primfunctionen durch Multiplication und Division zusammengesetzt werden kann.

Ich lasse dieser Analyse des wesentlichen Inhalts meiner Arbeit und der Darlegung der leitenden Gesichtspunkte nunmehr die erforderlichen Entwicklungen in mehr synthetischer Form folgen, wobei ich bemerke, dass ich bei denselben mit Vorbedacht nur einige elementare Sätze der Reihen-Theorie und die Eigenschaften der Exponentialfunction als bekannt voraussetze.

2. Zur Theorie der ganzen eindeutigen Functionen Einer Veränderlichen.

Ist eine unendliche Reihe gegebener Grössen

$$a_1, a_2, a_3, \dots,$$

von denen keine den Werth Null hat, so beschaffen, dass

$$\lim_{n=\infty} |a_n| = \infty,$$

so kann man derselben auf mannigfaltige Weise eine Reihe ganzer Zahlen

$$m_1, m_2, m_3, \dots,$$

von denen jede ≥ 0 ist, so zuordnen, dass die Summe

$$\sum_{v=1}^{\infty} \left| \frac{1}{a_v} \left(\frac{x}{a_v}\right)^{m_v} \right|$$

für jeden Werth der Veränderlichen x einen endlichen Werth hat.

Man braucht zu dem Ende nur irgend eine unendliche Reihe positiver Grössen

$$\varepsilon, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots$$

so anzunehmen, dass $\varepsilon < 1$ ist und dass

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \varepsilon_{\nu}$$

einen endlichen Werth hat, und dann die Zahlen m_1, m_2, m_3, \dots so zu bestimmen, dass (für $\nu = 1, 2, 3, \dots \infty$)

$$\varepsilon^{m_{\nu}+1} \leq \varepsilon_{\nu}$$

wird.

Setzt man hierauf

$$F(x) = \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{1}{x - a_{\nu}} \left(\frac{x}{a_{\nu}} \right)^{m_{\nu}},$$

so ist $F(x)$ eine für jeden endlichen Werth von x definirte eindeutige Function von der Beschaffenheit, dass sich $F(a+k)$, wenn a irgend ein bestimmter Werth von x ist, bei hinlänglich kleinem Werthe der Veränderlichen k in der Form

$$\frac{m}{k} + \mathfrak{P}(k)$$

darstellen lässt, wo m eine ganze (nicht negative) Zahl ist, welche angiebt, wie oft der Werth a in der Reihe a_1, a_2, a_3, \dots vorkommt. Nach einem früher (Crelle's Journal, Bd. 52, S. 333*) von mir bewiesenen Satze existirt also eine Function $G(x)$, welche der Gleichung

$$\frac{dG(x)}{dx} = F(x) \cdot G(x)$$

genügt und die Eigenschaft besitzt, dass für sie die Reihe

$$a_1, a_2, a_3, \dots$$

in dem oben angegebenen Sinne die Reihe der Null-Stellen bildet.

Dies lässt sich aber noch einfacher als a. a. O. folgendermassen beweisen.

Für diejenigen Werthe von x , deren absoluter Betrag kleiner als Eins ist, hat man

$$\frac{1}{1-x} = \sum_{r=0}^{\infty} x^r = \frac{d}{dx} \sum_{r=0}^{\infty} \frac{x^{r+1}}{r+1},$$

*) [Bd. I, S. 349 dieser Ausgabe.]

woraus

$$1-x = e^{-\sum_{r=0}^{\infty} \left(\frac{x^{r+1}}{r+1} \right)}$$

folgt. Man setze nun

$$E(x, 0) = 1-x,$$

$$E(x, 1) = (1-x)e^x,$$

$$E(x, 2) = (1-x)e^{x+\frac{1}{2}x^2},$$

$$\dots \dots \dots$$

$$E(x, m) = (1-x)e^{\sum_{r=1}^m \left(\frac{x^r}{r} \right)},$$

so ist, unter der Bedingung, dass $|x| < 1$,

$$E(x, m) = e^{-\sum_{r=1}^{\infty} \left(\frac{x^{m+r}}{m+r} \right)}.$$

Fasst man nun die Gesammtheit der Grössen in's Auge, welche aus der Formel

$$\frac{1}{r+m_v} \left| \frac{x}{a_v} \right|^{r+m_v}$$

dadurch hervorgehen, dass man $r = 1, 2, \dots \infty$; $v = n, n+1, \dots \infty$ setzt, so ist ersichtlich, dass die Summe dieser Grössen einen endlichen Werth hat, wenn der Veränderlichen x nur solche Werthe gegeben werden, die dem absoluten Betrage nach kleiner sind als jede der Grössen

$$a_n, a_{n+1}, \dots;$$

denn dann ist sie kleiner als

$$\sum_{v=n}^{\infty} \sum_{r=1}^{\infty} \left| \frac{x}{a_v} \right|^{r+m_v} = \sum_{v=n}^{\infty} \frac{1}{1-\left| \frac{x}{a_v} \right|} \left| \frac{x}{a_v} \right|^{m_v+1},$$

also, wenn man mit k den kleinsten der Werthe

$$1-\left| \frac{x}{a_n} \right|, 1-\left| \frac{x}{a_{n+1}} \right|, \dots$$

bezeichnet, kleiner als das Product aus $\left| \frac{x}{k} \right|$ und der Summe

$$\sum_{v=n}^{\infty} \left| \frac{1}{a_v} \left(\frac{x}{a_v} \right)^{m_v} \right|,$$

welche der Voraussetzung nach einen endlichen Werth hat. Daraus folgt, dass die Doppelsumme

$$\sum_{v=n}^{\infty} \sum_{r=1}^{\infty} \frac{1}{r+m_v} \left(\frac{x}{a_v}\right)^{r+m_v}$$

für die angegebenen Werthe von x nicht nur unbedingt convergirt, sondern auch dadurch, dass man alle Glieder, welche dieselbe Potenz von x enthalten, in ein Glied zusammenzieht, in eine Potenzreihe

$$\mathfrak{P}(x, n)$$

verwandelt werden kann.

Nimmt man nun zunächst x dem absoluten Betrage nach kleiner als jede der Grössen a_1, a_2, \dots an, so convergiren sämtliche Reihen

$$\mathfrak{P}(x, 1), \mathfrak{P}(x, 2), \dots,$$

und man hat

$$\mathfrak{P}(x, 1) - \mathfrak{P}(x, n+1) = \sum_{v=1}^n \sum_{r=1}^{\infty} \frac{1}{r+m_v} \left(\frac{x}{a_v}\right)^{r+m_v},$$

woraus sich

$$e^{-\mathfrak{P}(x, 1)} = \prod_{v=1}^n E\left(\frac{x}{a_v}, m_v\right) \cdot e^{-\mathfrak{P}(x, n+1)}$$

ergiebt.

Es lässt sich aber jede der Functionen

$$E\left(\frac{x}{a_v}, m_v\right)$$

in eine für jeden endlichen Werth von x convergirende Reihe von der Form

$$1 + A_1^{(v)} x + A_2^{(v)} x^2 + \dots$$

entwickeln, und

$$e^{-\mathfrak{P}(x, n+1)}$$

in eine Reihe von derselben Form

$$1 + B_1^{(n)} x + B_2^{(n)} x^2 + \dots,$$

welche jedenfalls convergirt, wenn x dem absoluten Betrage nach kleiner als jede der Grössen a_{n+1}, a_{n+2}, \dots ist. Nimmt man daher eine positive Grösse g beliebig, n aber so an, dass

$$|a_v| > g \text{ ist, wenn } v > n,$$

so geht aus der Entwicklung des Products

$$(1 + B_1^{(n)}x + B_2^{(n)}x^2 + \dots) \prod_{v=1}^n (1 + A_1^{(v)}x + A_2^{(v)}x^2 + \dots)$$

eine Reihe

$$1 + A_1x + A_2x^2 + \dots$$

hervor, welche sicher für diejenigen Werthe von x , deren absoluter Betrag nicht grösser als g ist, convergirt. Die Coefficienten dieser Reihe sind aber, da der vorstehenden Gleichung gemäss für hinlänglich kleine Werthe von x

$$1 + A_1x + A_2x^2 + \dots = e^{-\mathfrak{P}(x,1)}$$

ist, unabhängig von der willkürlich anzunehmenden Grösse g ; es folgt also aus dem Bewiesenen, dass die Reihe für jeden endlichen Werth von x convergirt und somit eine ganze eindeutige Function $G(x)$ darstellt.

Diese Function verschwindet nun für einen bestimmten Werth a von x nur in dem Falle, wo a in der Reihe a_1, a_2, \dots enthalten ist, wie aus der Gleichung

$$G(x) = \prod_{v=1}^n E\left(\frac{x}{a_v}, m_v\right) e^{-\mathfrak{P}(x, n+1)}$$

ohne Weiteres erhellt, wenn man n so gross annimmt, dass a innerhalb des Convergenzbezirks der Reihe

$$\mathfrak{P}(x, n+1)$$

liegt, und beachtet, dass die Exponentialfunction für keinen endlichen Werth ihres Arguments verschwindet. Man sieht aber auch, dass, wenn a in der Reihe a_1, a_2, \dots μ -mal vorkommt,

$$G(x) \text{ auf die Form } (x-a)^\mu f(x)$$

in der Art gebracht werden kann, dass $f(x)$ für $x = a$ einen von Null verschiedenen endlichen Werth hat. Die gegebene Reihe

$$a_1, a_2, a_3, \dots$$

ist also die Reihe der Null-Stellen für die Function $G(x)$, welche nach dem Vorstehenden dadurch hergestellt werden kann, dass zunächst die Summe

$$\sum_{v=1}^{\infty} \sum_{r=1}^{\infty} \frac{1}{r+m_v} \left(\frac{x}{a_v}\right)^{r+m_v},$$

in welcher die Zahlen m_ν die oben angegebene Bedeutung haben, auf die Form $\mathfrak{P}(x, 1)$ gebracht, und dann

$$e^{-\mathfrak{P}(x, 1)}$$

nach Potenzen von x entwickelt wird.

Multiplicirt man $G(x)$ noch mit x^λ , wo λ eine ganze positive Zahl bedeutet, so erhält man eine Function, für welche die Reihe der Null-Stellen ausser den Grössen a_1, a_2, a_3, \dots noch λ Glieder, die gleich Null sind, enthält.

Es ist also stets möglich, eine ganze eindeutige Function $G(x)$ mit vorgeschriebenen Null-Stellen

$$a_1, a_2, a_3, \dots$$

zu bilden, wofern nur die nothwendige Bedingung

$$\lim_{n=\infty} |a_n| = \infty$$

erfüllt ist.

Es giebt aber nicht bloss eine solche Function, sondern unendlich viele.

Setzt man nämlich

$$G_1(x) = G(x) e^{\bar{G}(x)},$$

so hat offenbar die Function $G_1(x)$ dieselben Null-Stellen wie $G(x)$, wie auch die Function $\bar{G}(x)$ angenommen werden möge. Umgekehrt ist, wenn zwei Functionen $G(x), G_1(x)$ dieselben Null-Stellen haben, der Quotient

$$\frac{G_1(x)}{G(x)},$$

der mit $G_2(x)$ bezeichnet werde, eine Function, die für jeden endlichen Werth von x einen von Null verschiedenen endlichen Werth hat. Es lässt sich deshalb

$$\frac{1}{G_2(x)} \frac{dG_2(x)}{dx}$$

in eine beständig convergirende Reihe

$$C_1 + C_2 x + C_3 x^2 + \dots$$

entwickeln, und man erhält, wenn man

$$\bar{G}(x) = C_0 + C_1 x + \frac{1}{2} C_2 x^2 + \frac{1}{3} C_3 x^3 + \dots$$

setzt, und die Constante C_0 so annimmt, dass

$$G_2(0) = e^{C_0}$$

ist,

$$\frac{1}{G_2(x)} \frac{dG_2(x)}{dx} = \frac{d\overline{G(x)}}{dx},$$

$$G_2(x) = e^{\overline{G(x)}}.$$

Die Formel

$$G(x) e^{\overline{G(x)}}$$

gibt also alle ganzen eindeutigen Functionen von x , welche dieselben Null-Stellen wie $G(x)$ haben.

Jetzt bedeute $G(x)$ irgend eine gegebene ganze Function von x , so können drei Fälle eintreten:

- 1) sie hat keine Null-Stellen — dann ist sie eine Function wie die eben mit $G_2(x)$ bezeichnete, und kann in der Form

$$e^{\overline{G(x)}}$$

ausgedrückt werden;

- 2) sie hat Null-Stellen in endlicher Anzahl — dann ist sie in der Form

$$G_0(x) e^{\overline{G(x)}}$$

darstellbar, wo $G_0(x)$ eine rationale ganze Function bedeutet;

- 3) sie hat unendlich viele Null-Stellen — in diesem Falle kann sie auf die Form

$$x^\lambda G_0(x) e^{\overline{G(x)}}$$

gebracht werden, wo λ Null oder eine ganze positive Zahl, $G_0(x)$ aber in der beschriebenen Weise aus den von Null verschiedenen Null-Stellen (a_1, a_2, a_3, \dots) der Function, einer Reihe ganzer Zahlen (m_1, m_2, m_3, \dots) und der Veränderlichen x zusammengesetzt ist.

Dieser Function $G_0(x)$ kann man nun nach dem Vorstehenden für einen bestimmten Werth von x die Gestalt

$$\prod_{v=1}^n E\left(\frac{x}{a_v}, m_v\right) e^{-\mathfrak{P}(x, n+1)}$$

geben, wenn man n so gross annimmt, dass x dem absoluten Betrage nach kleiner ist als jede der Grössen a_{n+1}, a_{n+2}, \dots . Aus dem oben bestimmten Ausdruck der Grenze, unterhalb welcher der absolute Betrag von

$$\mathfrak{P}(x, n)$$

stets liegt, ergibt sich aber

$$\lim_{n=\infty} \mathfrak{P}(x, n+1) = 0,$$

indem

$$\lim_{n=\infty} \sum_{v=n}^{\infty} \left| \frac{1}{a_v} \left(\frac{x}{a_v} \right)^{m_v} \right| = 0$$

ist, wenn die Zahlen m_v , wie angenommen worden, so bestimmt sind, dass

$$\sum_{v=1}^{\infty} \left| \frac{1}{a_v} \left(\frac{x}{a_v} \right)^{m_v} \right|$$

einen endlichen Werth hat. Folglich ist — für jeden Werth von x —

$$G_0(x) = \prod_{v=1}^{\infty} E\left(\frac{x}{a_v}, m_v\right).$$

Der Function $\bar{G}(x)$ kann man ferner in mannigfaltiger Weise die Gestalt

$$\bar{G}(0) + \sum_{v=1}^{\infty} \bar{g}_v(x)$$

geben, in der Art, dass die $\bar{g}_v(x)$ sämmtlich rationale, für $x=0$ verschwindende ganze Functionen werden. Setzt man dann

$$g_v(x) = \bar{g}_v(x) + \sum_{r=1}^{m_v} \frac{1}{r} \left(\frac{x}{a_v} \right)^r,$$

so ergibt sich

$$G(x) = C \cdot x^\lambda \prod_{v=1}^{\infty} \left\{ \left(1 - \frac{x}{a_v} \right) e^{g_v(x)} \right\},$$

wo C eine Constante bedeutet. Da man nun auch im Falle (1)

$$G(x) = C \prod_{v=1}^{\infty} e^{\bar{g}_v(x)},$$

und im Falle (2), wenn a_1, a_2, \dots, a_m die von Null verschiedenen Null-Stellen der Function $G_0(x)$ sind,

$$G(x) = C x^\lambda \prod_{v=1}^m \left\{ \left(1 - \frac{x}{a_v} \right) e^{\bar{g}_v(x)} \right\} \cdot \prod_{v=m+1}^{\infty} e^{\bar{g}_v(x)}$$

hat, so ist hiermit der Satz begründet:

Jede ganze eindeutige Function von x kann dargestellt werden in der Gestalt eines Products, dessen Factoren sämtlich Primfunctionen von der Form

$$(kx + l)e^{g(x)}$$

sind, wo $g(x)$ eine rationale, für $x = 0$ verschwindende ganze Function ist und k, l Constanten bedeuten. (Dabei ist zu beachten, dass $g(x)$ und ebenso eine der Grössen k, l auch den Werth Null haben kann, also auch eine Constante als Primfunction zu betrachten ist.)

Hierzu ist noch Folgendes zu bemerken.

Das Product, durch welches $G(x)$ dargestellt wird, convergirt — wenn es aus unendlich vielen Factoren besteht — unbedingt und zugleich für alle Werthe von x , deren absoluter Betrag eine willkürlich anzunehmende Grenze nicht übersteigt, gleichmässig, vorausgesetzt, dass bei der angegebenen Zerlegung der Function $\bar{G}(x)$ so verfahren wird, dass die Reihe

$$\sum_{v=1}^{\infty} \bar{g}_v(x)$$

unbedingt und für die in Rede stehenden Werthe von x gleichmässig convergirt; was unter allen Umständen möglich ist. Denn unter dieser Voraussetzung braucht man nur nachzuweisen, dass das Product

$$\prod_{v=1}^{\infty} E\left(\frac{x}{a_v}, m_v\right)$$

die angegebene Beschaffenheit besitzt, was der Fall ist, wenn die folgende Bedingung erfüllt ist: Nach Annahme zweier positiven Grössen ξ, δ , von denen die erste beliebig gross, die andere beliebig klein sein kann, muss es möglich sein, eine Zahl n so zu bestimmen, dass das Product aus beliebig vielen derjenigen Functionen

$$E\left(\frac{x}{a_v}, m_v\right),$$

in denen $v > n$, für jeden Werth von x , dessen absoluter Betrag kleiner als ξ ist, von der Einheit um eine Grösse abweicht, die ihrem absoluten Betrage nach kleiner als δ ist. Dies ist aber in der That möglich. Nimmt man nämlich n so gross an, dass $|a_v| > \xi$ ist, sobald $v > n$, so hat man für jeden

Werth von ν , der grösser als n , und jeden Werth von x , dessen absoluter Betrag nicht grösser als ξ ist,

$$E\left(\frac{x}{a_\nu}, m_\nu\right) = e^{-\sum_{r=1}^{\infty} \frac{1}{r+m_\nu} \left(\frac{x}{a_\nu}\right)^{r+m_\nu}},$$

und es ist daher, wenn man von diesen Functionen $E\left(\frac{x}{a_\nu}, m_\nu\right)$ beliebig viele auswählt und das Product derselben gleich

$$e^{-f(x)}$$

setzt, $|f(x)|$ stets kleiner als

$$\sum_{\nu=n+1}^{\infty} \sum_{r=1}^{\infty} \frac{1}{r+m_\nu} \left|\frac{\xi}{a_\nu}\right|^{r+m_\nu},$$

von welcher Grösse gezeigt worden ist, dass sie für einen unendlich grossen Werth von n unendlich klein wird; woraus sich das Behauptete sofort ergibt.

Es ist ferner zu beachten, dass die in den Primfactoren der Function $G(x)$ vorkommenden Exponentialgrössen nicht vollständig bestimmt sind. Nimmt man nämlich eine Reihe rationaler ganzer Functionen $g'_\nu(x)$ so an, dass für jeden Werth von x

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} g'_\nu(x) = 0$$

ist — was auf unendlich viele Arten geschehen kann — so ändert der Ausdruck von $G(x)$ seinen Werth nicht, wenn man in jedem seiner Factoren

$$g_\nu(x) + g'_\nu(x) \text{ für } g_\nu(x)$$

setzt. Umgekehrt erhellt, dass man auf diese Weise alle möglichen Darstellungen von $G(x)$ in der Form eines aus Primfunctionen gebildeten Products erhält.

Endlich möge noch bemerkt werden, dass in dem häufig vorkommenden Falle, wo für eine bestimmte ganze und positive Zahl μ

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \left|\frac{1}{a_\nu}\right|^\mu$$

einen endlichen Werth hat, die in den Functionen $E\left(\frac{x}{a_\nu}, m_\nu\right)$ vorkommenden Zahlen m_1, m_2, \dots alle gleich $(\mu-1)$ gesetzt werden können.*

*) Die in diesem und dem folgenden § enthaltenen Sätze habe ich bereits im Herbst 1874 in meinen Universitäts-Vorlesungen ausführlich vorgetragen.

3. Eindeutige Functionen von x mit Einer wesentlichen singulären Stelle.

Ist $f(x)$ eine eindeutige Function von x mit der einen wesentlichen singulären Stelle ∞ , so lässt sich in dem Falle, wo sie ausserdem beliebig viele (auch unendlich viele) ausserwesentliche singuläre Stellen hat, eine Function $G_2(x)$ herstellen, für welche die Reihe der Null-Stellen identisch ist mit der Reihe der Null-Stellen der Function

$$\frac{1}{f(x)}.$$

Dann ist $G_2(x) \cdot f(x)$ ebenfalls eine ganze Function von x , und man hat, wenn diese mit $G_1(x)$ bezeichnet wird,

$$f(x) = \frac{G_1(x)}{G_2(x)}.$$

Zugleich sind diese Functionen $G_1(x)$, $G_2(x)$ so beschaffen, dass sie für denselben Werth von x nicht beide verschwinden. Und umgekehrt, wenn man zwei ganze Functionen von dieser Beschaffenheit willkürlich annimmt, und wenigstens eine von ihnen transcendent ist, so stellt der Quotient

$$\frac{G_1(x)}{G_2(x)}$$

eine eindeutige Function von x dar, welche höchstens die eine wesentliche singuläre Stelle ∞ hat.

Ist ferner $f(x)$ eine eindeutige Function mit einer (wesentlichen oder ausserwesentlichen) singulären Stelle c , so verwandelt sich, wenn man

$$x' = \frac{1}{x-c}$$

setzt, $f(x)$ in eine Function von x' mit der einen singulären Stelle ∞ , woraus sich

$$f(x) = G\left(\frac{1}{x-c}\right)$$

ergiebt. Dabei ist G eine transcendente oder rationale Function, jenachdem die singuläre Stelle c eine wesentliche oder ausserwesentliche ist.

Ebenso ergibt sich als allgemeiner Ausdruck einer eindeutigen Function von x , welche ausser einer wesentlichen singulären Stelle c beliebig viele ausserwesentliche hat, der Quotient

$$\frac{G_1\left(\frac{1}{x-c}\right)}{G_2\left(\frac{1}{x-c}\right)},$$

wo die Functionen G_1, G_2 nicht beide für einen und denselben Werth von x verschwinden, und wenigstens eine von ihnen transcendent ist.

4. Ein Hilfssatz.

Ist $F(y)$ eine eindeutige Function, welche nur die eine wesentliche singuläre Stelle ∞ hat, und $\varphi(x)$ eine rationale Function n^{ten} Grades, welche an n verschiedenen Stellen ($c_1, \dots c_n$) gleich ∞ wird, so verwandelt sich $F(y)$, wenn man $y = \varphi(x)$ setzt, in eine eindeutige Function von x mit den n wesentlichen singulären Stellen ($c_1, \dots c_n$). Man überzeugt sich indessen leicht, dass man auf diese Weise nur besondere Functionen dieser Art erhält. Wohl aber ist es möglich, wie bereits in § 1 angegeben worden und jetzt bewiesen werden soll, jede eindeutige Function $f(x)$, deren wesentliche singuläre Stellen ($c_1, \dots c_n$) sind, in der Form

$$\sum_{v=0}^{n-1} F_v(\varphi(x)) \cdot \left(\frac{1}{x-c}\right)^v$$

darzustellen, wo c irgend eine der Grössen $c_1, \dots c_n$ bedeutet.

Ich will zuerst annehmen, dass eine der wesentlichen singulären Stellen von $f(x)$, z. B. c_1 , den Werth ∞ habe, so dass

$$\varphi(x) = k_0 + k_1 x + \frac{k_2}{x-c_2} + \dots + \frac{k_n}{x-c_n}$$

ist, wo von den Constanten $k_1, \dots k_n$ keine den Werth Null hat. Nimmt man dann zwischen x und einer andern Veränderlichen y die Gleichung

$$\varphi(x) = y$$

an, so gehören zu jedem endlichen Werthe von y im Allgemeinen n ebenfalls endliche und zugleich von den $c_1, \dots c_n$ verschiedene Werthe von x , welche

Die Ausdrücke

$$\sum_{v=1}^n \frac{f(x_v)}{\Pi'(x_v)}, \quad \sum_{v=1}^n \frac{x_v f(x_v)}{\Pi'(x_v)}, \quad \dots \quad \sum_{v=1}^n \frac{x_v^{n-1} f(x_v)}{\Pi'(x_v)}$$

ferner, in denen die Grössen x_1, \dots, x_n ebenso wie in X_1, \dots, X_n symmetrisch vorkommen, haben gleichfalls eindeutig bestimmte Werthe für jeden Werth von y , der nicht zu den vorläufig ausgeschlossenen gehört; es reicht dies aber nicht aus zu dem Nachweise, dass sie — und mit ihnen F_0, \dots, F_{n-1} — Functionen der angegebenen Art von y sind, sondern es muss auch gezeigt werden, dass sich dieselben, wenn y in der Umgebung irgend eines bestimmten endlichen Werthes b angenommen wird, entweder unmittelbar oder doch, nachdem sie mit einer gewissen ganzen positiven Potenz von $(y-b)$ multiplicirt worden, in der Form

$$\mathfrak{P}(y-b)$$

darstellen lassen.

Wird zunächst b so angenommen, dass unter den Wurzeln der Gleichung $\varphi(x) = b$, welche mit a_1, \dots, a_n bezeichnet werden mögen, keine zwei gleiche sich finden, so ist

$$\varphi'(a_v) \quad (v = 1, \dots, n)$$

nicht gleich Null, und es hat also die Gleichung

$$\varphi(x) = y,$$

welche, wenn x in der Umgebung von a_v angenommen wird, auf die Form

$$\varphi'(a_v) \cdot (x - a_v) + \frac{1}{2} \varphi''(a_v) \cdot (x - a_v)^2 + \dots = y - b$$

gebracht werden kann, für hinlänglich kleine Werthe von $(y-b)$ eine in der Form

$$a_v + (y-b) \mathfrak{P}_v(y-b)$$

darstellbare Wurzel. Wird diese mit x_v bezeichnet, so hat man, da $\Pi'(a_v)$ nicht gleich Null, und a_v nicht eine der wesentlichen singulären Stellen der Function $f(x)$ ist, für $\lambda = 1, \dots, n$

$$\frac{x_v^{\lambda-1} f(x_v)}{\Pi'(x_v)} = (x_v - a_v)^{-m_v} \bar{\mathfrak{P}}_v(x_v - a_v),$$

wo m_v Null oder eine ganze positive Zahl ist, jenachdem $f(x)$ in der Umgebung von a_v sich regulär verhält oder nicht. Bedeutet also m die grösste

der Zahlen m_1, \dots, m_n , so ist

$$(y-b)^m \sum_{v=1}^n \frac{x_v^{\lambda-1} f(x_v)}{\Pi'(x_v)} = \mathfrak{P}^{(\lambda)}(y-b).$$

Hat aber b einen solchen Werth, dass die Gleichung

$$\varphi(x) = b$$

weniger als n von einander verschiedene Wurzeln besitzt, so sei a eine derselben, und μ die Ordnungszahl der niedrigsten Ableitung von $\varphi(x)$, welche für $x = a$ nicht verschwindet. Dann lässt sich die Gleichung

$$\varphi(x) = y,$$

wenn x in der Umgebung von a angenommen wird, auf die Form

$$\frac{1}{\mu!} \varphi^{(\mu)}(a) \cdot (x-a)^\mu + \frac{1}{(\mu+1)!} \varphi^{(\mu+1)}(a) \cdot (x-a)^{\mu+1} + \dots = y-b$$

bringen, und es giebt, wenn man

$$\left[\frac{\mu!(y-b)}{\varphi^{(\mu)}(a)} \right]^{\frac{1}{\mu}} = \eta$$

setzt, eine Reihe von der Form

$$a + \eta \mathfrak{P}(\eta),$$

welche, für x gesetzt, bei hinlänglich kleinen Werthen von $(y-b)$ die Gleichung

$$\varphi(x) = y$$

befriedigt; wobei zu beachten ist, dass $\mathfrak{P}(\eta)$ für $\eta = 0$ nicht verschwindet. Fixirt man also einen der μ Werthe von η und setzt

$$\varepsilon = e^{\frac{2\pi i}{\mu}},$$

$$x_1 = a + \eta \mathfrak{P}(\eta), \quad x_2 = a + \varepsilon \eta \mathfrak{P}(\varepsilon \eta), \quad \dots \quad x_\mu = a + \varepsilon^{\mu-1} \eta \mathfrak{P}(\varepsilon^{\mu-1} \eta),$$

so sind x_1, x_2, \dots, x_μ diejenigen μ Wurzeln der Gleichung, welche für $y = b$ den Werth a annehmen. Man hat dann, da die niedrigste Ableitung von $\Pi(x)$, welche für $y = b$, $x = a$ nicht verschwindet, die μ^{te} ist, für $v = 1, \dots, \mu$

$$\Pi'(x_v) = n x_v^{n-1} + (n-1) X_1 x_v^{n-2} + \dots + X_{n-1} = (\varepsilon^{v-1} \eta)^{\mu-1} \overline{\mathfrak{P}}(\varepsilon^{v-1} \eta),$$

wo $\overline{\mathfrak{P}}(\varepsilon^{v-1}\eta)$ für $\eta = 0$ nicht verschwindet, und, wenn für Werthe von x in der Umgebung der Stelle a

$$f(x) = (x-a)^{-m}[A_0 + A_1(x-a) + \dots],$$

so ist

$$\sum_{v=1}^{\mu} \frac{x_v^{\lambda-1} f(x_v)}{\Pi'(x_v)} = \eta^{-m\mu-\mu} \cdot \sum_{v=1}^{\mu} \varepsilon^{v-1} \eta \overline{\mathfrak{P}}^{(\lambda)}(\varepsilon^{v-1}\eta).$$

Aus der Reihe auf der rechten Seite dieser Gleichung müssen nun, da

$$\sum_{v=1}^{\mu} \varepsilon^{(v-1)\varrho}$$

nur für solche ganzzahligen Werthe von ϱ , die durch μ theilbar sind, einen von Null verschiedenen Werth hat, alle Potenzen von η , deren Exponent nicht ein Vielfaches von μ ist, fortfallen; und es ist daher

$$\sum_{v=1}^{\mu} \frac{x_v^{\lambda-1} f(x_v)}{\Pi'(x_v)} = (y-b)^{-m} \overline{\mathfrak{P}}^{(\lambda)}(y-b).$$

Hat also die Gleichung

$$\varphi(x) = b$$

r von einander verschiedene Wurzeln a_1, \dots, a_r , und haben μ_x, m_x für a_x dieselbe Bedeutung wie im Vorstehenden μ, m für a , so ergibt sich für hinlänglich kleine Werthe von $(y-b)$

$$\sum_{v=1}^n \frac{x_v^{\lambda-1} f(x_v)}{\Pi'(x_v)} = \sum_{x=1}^r (y-b)^{-m_x} \overline{\mathfrak{P}}_x^{(\lambda)}(y-b),$$

und somit, wenn jetzt m die grösste der Zahlen m_x bedeutet, ganz so wie in dem Falle, wo unter den Wurzeln der Gleichung $\varphi(x) = b$ sich keine zwei gleiche finden,

$$(y-b)^m \sum_{v=1}^n \frac{x_v^{\lambda-1} f(x_v)}{\Pi'(x_v)} = \overline{\mathfrak{P}}^{(\lambda)}(y-b).$$

Hiermit ist bewiesen, dass die Ausdrücke

$$\sum_{v=1}^n \frac{x_v^{\lambda-1} f(x_v)}{\Pi'(x_v)} \quad (\lambda = 1, \dots, n)$$

und daher auch die Grössen F_0, \dots, F_{n-1} , welche jetzt mit

$$F_0(y), \dots, F_{n-1}(y)$$

bezeichnet werden mögen, eindeutige Functionen der Veränderlichen y sind, welche höchstens die eine wesentliche singuläre Stelle ∞ haben. Zugleich folgt aus dem Vorstehenden, dass $F_0(y), \dots, F_{n-1}(y)$ in dem Falle, wo es für die Function $f(x)$ ausserwesentliche singuläre Stellen nicht giebt — die Zahl m also stets gleich Null ist — sämtlich ganze Functionen von y sind.

Der Definition dieser Functionen $F_v(y)$ gemäss besteht nun die Gleichung

$$\sum_{v=0}^{n-1} F_v(y) x^v = f(x),$$

wenn für irgend einen endlichen Werth von y die Grösse x der Gleichung $\varphi(x) = y$ genügt. Versteht man also unter x' irgend einen endlichen, von den c_2, \dots, c_n verschiedenen Werth und setzt $y = \varphi(x')$, so kann man $x = x'$ nehmen, und erhält dann

$$\sum_{v=0}^{n-1} F_v(\varphi(x')) x'^v = f(x');$$

d. h. es gilt für jeden Werth von x , der nicht in der Reihe $(\infty, c_2, \dots, c_n)$ enthalten ist, die Gleichung

$$\sum_{v=0}^{n-1} F_v(\varphi(x)) x^v = f(x).$$

Es ist angenommen worden, dass c_1 gleich ∞ sei, weil dann einem endlichen Werthe von y stets endliche Werthe der Grössen x_1, \dots, x_n entsprechen, und somit bei dem Beweise des vorstehenden Satzes das Verhalten der Functionen $F_v(y)$ in der Umgebung der Stelle ∞ nicht besonders untersucht zu werden braucht. Sind aber c_1, \dots, c_n sämtlich endliche Grössen, so setze man

$$x = c_1 + \frac{1}{z},$$

und bezeichne mit $\bar{\varphi}(z), \bar{f}(z)$ die Functionen, in welche sich $\varphi(x), f(x)$ dadurch verwandeln. Dann hat man

$$\bar{\varphi}(z) = k'_0 + k'_1 z + \frac{k'_2}{z - c'_2} + \dots + \frac{k'_n}{z - c'_n},$$

— wo die k', c' wieder Constanten bedeuten — und es sind $(\infty, c'_2, \dots, c'_n)$ die wesentlichen singulären Stellen für die Function $\bar{f}(z)$. Man hat also, wenn man jetzt die Functionen $F_0(y), \dots, F_{n-1}(y)$ für die Function $\bar{f}(z)$ ebenso

bestimmt wie im Vorhergehenden für $f(x)$,

$$\sum_{v=0}^{n-1} F_v(\bar{\varphi}(z)) z^v = \bar{f}(z),$$

oder

$$\sum_{v=1}^{n-1} F_v(\varphi(x)) \cdot \left(\frac{1}{x-c_1}\right)^v = f(x).$$

In dieser Form, welche in die vorher aufgestellte übergeht, wenn man $c_1 = \infty$ setzt, kann also die Function $f(x)$ stets dargestellt werden, wenn $\varphi(x)$ eine beliebige rationale Function n^{ten} Grades ist, welche an jeder der n wesentlichen singulären Stellen der ersteren unendlich gross wird.*)

5. Eindeutige Functionen von x mit einer endlichen Anzahl (wesentlicher oder ausserwesentlicher) singulärer Stellen.

Eine rationale Function $f(x)$ mit den singulären (ausserwesentlichen) Stellen c_1, \dots, c_n lässt sich bekanntlich in der Form

$$\sum_{v=1}^n G_v \left(\frac{1}{x-c_v}\right)$$

darstellen, wo G_1, \dots, G_n rationale ganze Functionen bedeuten.

Es soll nun gezeigt werden, dass jede eindeutige Function $f(x)$ mit einer endlichen Anzahl (wesentlicher oder ausserwesentlicher) singulärer Stellen (c_1, \dots, c_n) in derselben Form ausgedrückt werden kann, und zwar dergestalt, dass unter den Functionen

$$G_v \left(\frac{1}{x-c_v}\right)$$

so viel transcendente vorkommen, als $f(x)$ wesentliche singuläre Stellen hat.

Es möge zunächst $f(x)$ nur wesentliche singuläre Stellen haben. Dann sind, wenn man $f(x)$ auf die im vorhergehenden § auseinandergesetzte Weise in der Form

$$\sum_{v=0}^{n-1} F_v(\varphi(x)) \cdot \left(\frac{1}{x-c_1}\right)^v$$

darstellt, die Functionen $F_v(y)$, wie nachgewiesen worden ist, sämmtlich ganze

*) Es lassen sich leicht auch ähnliche Ausdrücke von $f(x)$, in denen die Grössen c_1, \dots, c_n symmetrisch vorkommen, aufstellen; es genügt aber der vorstehende für den zunächst ins Auge gefassten Zweck.

Functionen von y , so dass man

$$F_v(\varphi(x)) = \sum_{\lambda=0}^{\infty} F_{v,\lambda} \cdot (\varphi(x))^\lambda$$

hat, wo die $F_{v,\lambda}$ von x unabhängige Grössen sind.

Für alle Werthe von x , bei denen der absolute Betrag von $(x-c_1)$ unterhalb einer bestimmten Grenze bleibt, ist nun

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= \frac{1}{x-c_1} \mathfrak{P}(x-c_1), \\ F_v(\varphi(x)) &= \sum_{\lambda=0}^{\infty} F_{v,\lambda} \cdot (x-c_1)^{-\lambda} \cdot (\mathfrak{P}(x-c_1))^\lambda; \end{aligned}$$

und somit, wenn man

$$(\mathfrak{P}(x-c_1))^\lambda = \sum_{\mu=0}^{\infty} A_{\lambda,\mu} (x-c_1)^\mu$$

setzt,

$$F_v(\varphi(x)) = \sum_{\lambda=0}^{\infty} \left\{ \sum_{\mu=0}^{\infty} F_{v,\lambda} \cdot A_{\lambda,\mu} (x-c_1)^{-\lambda+\mu} \right\}.$$

Die Doppelsumme auf der Rechten dieser Gleichung hat aber die Eigenschaft, dass sie convergent bleibt, wenn man jedes ihrer Glieder durch dessen absoluten Betrag ersetzt. Convergirt nämlich die Reihe $\mathfrak{P}(x-c_1)$, wenn der absolute Betrag von $(x-c_1)$ kleiner als ϱ ist, so lässt sich eine positive Grösse g so bestimmen, dass jeder Coefficient von $\mathfrak{P}(x-c_1)$ dem absoluten Betrage nach kleiner ist als der entsprechende Coefficient in der Entwicklung der Function

$$\frac{g}{1 - \frac{x-c_1}{\varrho}};$$

und dann ist, wenn $|x-c_1| = \xi$ gesetzt und $\xi < \varrho$ angenommen wird,

$$\sum_{\mu=0}^{\infty} |A_{\lambda,\mu} (x-c_1)^{-\lambda+\mu}| < g^\lambda \xi^{-\lambda} \left(1 - \frac{\xi}{\varrho}\right)^{-\lambda},$$

also

$$\sum_{\lambda=0}^{\infty} \sum_{\mu=0}^{\infty} |F_{v,\lambda} \cdot A_{\lambda,\mu} (x-c_1)^{-\lambda+\mu}| < \sum_{\lambda=0}^{\infty} \left(|F_{v,\lambda}| \cdot g^\lambda \xi^{-\lambda} \left(1 - \frac{\xi}{\varrho}\right)^{-\lambda} \right),$$

woraus sich das Behauptete sofort ergibt, indem die Summe

$$\sum_{\lambda=0}^{\infty} (|F_{v,\lambda}| \cdot y^\lambda)$$

für jeden endlichen Werth von y einen ebenfalls endlichen Werth hat.

Die Doppelsumme, durch welche $F_v(\varphi(x))$ ausgedrückt worden, convergirt also unbedingt, und es ist daher gestattet, in ihr alle Glieder, welche dieselbe Potenz von $(x-c_1)$ enthalten, in eines zusammenzuziehen. Geschieht dies in den Ausdrücken sämtlicher Functionen

$$F_v(\varphi(x)),$$

so ergiebt sich

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n^{(v)} \left(\frac{1}{x-c_1} \right)^n + \mathfrak{P}^{(v)}(x-c_1)$$

für alle Werthe von x , bei denen der absolute Betrag von $(x-c_1)$ kleiner als ρ ist.

Die Reihe

$$\sum_{n=1}^{\infty} C_n^{(v)} \left(\frac{1}{x-c_1} \right)^n$$

convergirt hiernach für beliebig grosse Werthe von $\frac{1}{x-c_1}$, und ist also eine ganze Function dieser Grösse, welche mit $G_1\left(\frac{1}{x-c_1}\right)$ bezeichnet werden möge.

Man hat dann

$$f(x) - G_1\left(\frac{1}{x-c_1}\right) = \mathfrak{P}^{(v)}(x-c_1);$$

d. h. die Differenz

$$f(x) - G_1\left(\frac{1}{x-c_1}\right)$$

verhält sich in der Umgebung der Stelle c_1 regulär.

Versteht man nun unter $G_v\left(\frac{1}{x-c_v}\right)$ die Function, welche in Beziehung auf die singuläre Stelle c_v dieselbe Bedeutung hat wie $G_1\left(\frac{1}{x-c_1}\right)$ in Beziehung auf die Stelle c_1 , so ist

$$f(x) - \sum_{v=1}^n G_v\left(\frac{1}{x-c_v}\right)$$

eine eindeutige Function von x , welche sich in der Umgebung jeder beliebig angenommenen Stelle regulär verhält. Denn die Function $G_v\left(\frac{1}{x-c_v}\right)$ verhält sich regulär in der Umgebung jeder von c_v verschiedenen Stelle; es könnte also jene nur die singulären Stellen c_1, \dots, c_n haben, was nach dem eben Bewiesenen nicht der Fall ist — und hieraus folgt, wie schon in § 1 gezeigt worden, dass sie einen constanten Werth hat, der mit C bezeichnet werden möge.

Es ist also

$$f(x) = C + \sum_{v=1}^n G_v \left(\frac{1}{x-c_v} \right),$$

oder auch, wenn man zu den Functionen G_1, \dots, G_n constante Glieder, deren Summe gleich C ist, hinzufügt,

$$f(x) = \sum_{v=1}^n G_v \left(\frac{1}{x-c_v} \right).$$

Wenn nun ferner $f(x)$ die m wesentlichen singulären Stellen (c_1, \dots, c_m), und die $(n-m)$ ausserwesentlichen (c_{m+1}, \dots, c_n) hat, so lässt sich, wenn ν eine der Zahlen $(m+1), \dots, n$ ist, und x in der Umgebung von c_ν angenommen wird,

$$f(x) \text{ in der Form } (x-c_\nu)^{-m_\nu} \cdot \{C_0^{(\nu)} + C_1^{(\nu)}(x-c_\nu) + \dots\}$$

darstellen. Setzt man also

$$\sum_{z=0}^{m_\nu-1} C_z^{(\nu)} (x-c_\nu)^{-m_\nu+z} = G_\nu \left(\frac{1}{x-c_\nu} \right),$$

$$f(x) - \sum_{v=m+1}^n G_v \left(\frac{1}{x-c_v} \right) = f_1(x),$$

so ist $f_1(x)$ eine eindeutige Function, welche m wesentliche singuläre Stellen (c_1, \dots, c_m), aber keine ausserwesentliche hat, und deshalb nach dem Vorhergehenden in der Form

$$\sum_{v=1}^m G_v \left(\frac{1}{x-c_v} \right)$$

dargestellt werden kann.

Man hat also auch in diesem Falle

$$f(x) = \sum_{v=1}^n G_v \left(\frac{1}{x-c_v} \right),$$

mit dem Unterschiede, dass jetzt unter den Functionen G_v nur m transcendente sich finden.

Hiermit ist der in § 1 unter (B, 1) angegebene Satz vollständig bewiesen.*)

*) Es bedarf kaum der Erinnerung, dass unter Voraussetzung einiger Sätze, die nicht den ersten Elementen der Functionenlehre angehören, der im Vorstehenden entwickelte Ausdruck von $f(x)$ auf kürzerem Wege ohne den im vorhergehenden § bewiesenen Hilfssatz hätte hergeleitet werden können. Indess giebt dieser Hilfssatz, auch abgesehen von dem Gebrauch, der von ihm gemacht worden ist, einen an sich bemerkenswerthen allgemeinen Ausdruck der untersuchten Functionen, den ich nicht übergehen mochte.

6. Eindeutige Functionen von x , welche n wesentliche singuläre Stellen besitzen, an jeder anderen Stelle aber einen endlichen und von Null verschiedenen Werth haben.

Ist $f(x)$ eine Function dieser Art, so hat man, wenn x in der Umgebung irgend einer nicht singulären Stelle a angenommen wird,

$$f(x) = A_0 + A_1(x-a) + A_2(x-a)^2 + \dots,$$

wo A_0 nicht gleich Null ist. Daraus folgt, wenn a nicht ∞ ist,

$$\frac{1}{f(x)} \frac{df(x)}{dx} = \mathfrak{P}(x-a);$$

dagegen, wenn in dem Falle, wo die singulären Stellen (c_1, \dots, c_n) von $f(x)$ alle im Endlichen liegen, $a = \infty$ genommen wird, also $x-a = \frac{1}{x}$ zu setzen ist,

$$\frac{1}{f(x)} \frac{df(x)}{dx} = \frac{1}{x^2} \mathfrak{P}\left(\frac{1}{x}\right).$$

Die Function

$$\frac{1}{f(x)} \frac{df(x)}{dx}$$

hat also nur die n singulären Stellen c_1, \dots, c_n , und kann daher, wie im vorhergehenden § gezeigt worden, in der Form

$$C + \sum_{v=1}^n G_v \left(\frac{1}{x-c_v} \right)$$

dargestellt werden, so dass in den Functionen G_v kein constantes Glied vorkommt.

Ist c_v nicht ∞ , und k_v der Coefficient von $\frac{1}{x-c_v}$ in G_v , so lässt sich

$$G_v \left(\frac{1}{x-c_v} \right) \text{ auf die Form } \frac{k_v}{x-c_v} + \frac{d}{dx} \bar{G}_v \left(\frac{1}{x-c_v} \right)$$

bringen, wo auch $\bar{G}_v \left(\frac{1}{x-c_v} \right)$ eine ganze Function von $\frac{1}{x-c_v}$ ohne constantes Glied ist. In dem Falle, wo die c_v sämmtlich endliche Werthe haben, ist ferner, wenn x dem absoluten Betrage nach grösser als jeder dieser Werthe ist,

$$C + \sum_{v=1}^n G_v \left(\frac{1}{x-c_v} \right) = C + \frac{1}{x} \sum_{v=1}^n k_v + \frac{1}{x^2} \mathfrak{P}\left(\frac{1}{x}\right);$$

es muss also

$$C = 0, \quad \sum_{v=1}^n k_v = 0$$

sein, und man hat

$$\frac{1}{f(x)} \frac{df(x)}{dx} = \frac{d}{dx} \sum_{v=1}^n \bar{G}_v \left(\frac{1}{x-c_v} \right) + \sum_{v=1}^n \frac{k_v}{x-c_v}.$$

Wenn dagegen eine der Grössen c_v den Werth ∞ hat, so möge c_n diese sein; dann ist

$$C + G_n \left(\frac{1}{x-c_n} \right) = C + G_n(x) = \frac{d}{dx} \bar{G}_n(x),$$

wobei man $\bar{G}_n(0) = 0$ annehmen kann; man hat also in diesem Falle

$$\frac{1}{f(x)} \frac{df(x)}{dx} = \frac{d}{dx} \sum_{v=1}^n \bar{G}_v \left(\frac{1}{x-c_v} \right) + \sum_{v=1}^{n-1} \frac{k_v}{x-c_v}.$$

Es ist nun zunächst zu zeigen, dass in beiden Fällen die k_v sämtlich ganze Zahlen sind.

Man setze, unter ϱ eine constante, und unter τ eine veränderliche reelle Grösse verstehend,

$$x_\tau = c_\lambda + \varrho e^{\tau i},$$

wo λ im ersten Falle eine der Zahlen $1, \dots, n$ und im zweiten eine der Zahlen $1, \dots, (n-1)$ bedeutet. Dann lässt sich, wenn man ϱ hinreichend klein annimmt, in beiden Fällen die Summe der Grössen

$$\frac{k_v dx_\tau}{x_\tau - c_v}$$

auf die Form

$$k_\lambda i d\tau + d\mathfrak{P}(x_\tau - c_\lambda)$$

bringen; und es ist

$$\frac{1}{f(x_\tau)} \frac{df(x_\tau)}{d\tau} = \frac{d}{d\tau} \sum_{v=1}^n \bar{G}_v \left(\frac{1}{x_\tau - c_v} \right) + \frac{d}{d\tau} \mathfrak{P}(x_\tau - c_\lambda) + k_\lambda i.$$

Daraus folgt, wenn man

$$F(x) = e^{\sum_{v=1}^n \bar{G}_v \left(\frac{1}{x-c_v} \right) + \mathfrak{P}(x-c_\lambda)}$$

setzt:

$$f(x_\tau) = \bar{C} F(x_\tau) \cdot e^{k_\lambda \tau i},$$

wo \bar{C} eine von τ unabhängige Grösse bedeutet.

Vermehrt man in dieser Gleichung τ um 2π , so bleibt x_τ ungeändert; es muss also

$$e^{2k_\lambda \pi i} = 1$$

und somit k_λ eine ganze Zahl sein.

Setzt man jetzt, unter C_0 eine Constante verstehend,

$$R^*(x) = C_0 \prod_{\nu=1}^{n-\varepsilon} (x-c_\nu)^{k_\nu},$$

wo $\varepsilon = 0$ oder 1 zu nehmen ist, jenachdem c_n einen endlichen Werth hat oder nicht, so ist

$$\frac{1}{R^*(x)} \frac{dR^*(x)}{dx} = \sum_{\nu=1}^{n-\varepsilon} \frac{k_\nu}{x-c_\nu},$$

und es ergibt sich bei gehöriger Bestimmung der Constante C_0

$$f(x) = R^*(x) \cdot \prod_{\nu=1}^n e^{\bar{G}_\nu \left(\frac{1}{x-c_\nu} \right)}.$$

Da nun in dem Falle, wo die Grössen c_ν sämmtlich endliche Werthe haben,

$$\sum_{\nu=1}^n k_\nu = 0$$

ist, so ist für $x = \infty$ die Function $R^*(x)$ weder Null noch unendlich gross; sie ist also eine rationale Function von x , welche an jeder Stelle, die nicht zu den singulären Stellen von $f(x)$ gehört, einen endlichen und von Null verschiedenen Werth hat. Für $n = 1$ reducirt sich dieselbe auf eine Constante.

Es lässt sich also jede Function $f(x)$ von der oben angegebenen Beschaffenheit in der bereits in § 1 aufgestellten Form ausdrücken.

Umgekehrt stellt die vorstehende Formel stets eine Function dieser Beschaffenheit dar, wenn man die Grössen c_1, \dots, c_n und die Functionen $\bar{G}_\nu \left(\frac{1}{x-c_\nu} \right)$ willkürlich, die Function $R^*(x)$ aber so annimmt, dass sie die angegebene Eigenschaft besitzt.

Hierzu ist noch Folgendes zu bemerken. Wenn von einer eindeutigen Function $f(x)$ feststeht, dass nicht nur sie selbst, sondern auch $\frac{1}{f(x)}$ in der Umgebung jeder Stelle, welche nicht zu einer Reihe gegebener Stellen (c_1, \dots, c_n) gehört, sich regulär verhält, während über ihr Verhalten in der Umgebung einer der letzteren Stellen nichts bekannt ist, so ergibt sich ebenso

wie im Vorstehenden

$$\frac{1}{f(x)} \frac{df(x)}{dx} = \bar{C} + \sum_{v=1}^n G_v \left(\frac{1}{x-c_v} \right) = \sum_{v=1}^{n-\varepsilon} \frac{k_v}{x-c_v} + \frac{d}{dx} \sum_{v=1}^n \bar{G}_v \left(\frac{1}{x-c_v} \right),$$

$$f(x) = R^*(x) \prod_{v=1}^n e^{\bar{G}_v \left(\frac{1}{x-c_v} \right)}, \text{ wo } R^*(x) = C \prod_{v=1}^{n-\varepsilon} (x-c_v)^{k_v},$$

mit dem Unterschiede, dass jetzt die Functionen \bar{G}_v zum Theil oder auch alle gleich Null sein können.

7. Eindeutige Functionen von x mit n wesentlichen und beliebig vielen ausserwesentlichen singulären Stellen.

Das Verfahren, durch welches man mit Hülfe der in den §§ 2 bis 6 entwickelten Sätze zu den in der Einleitung unter (B, 2) und (C, 1 u. 2) aufgestellten Ausdrücken einer eindeutigen Function $f(x)$ mit einer endlichen Anzahl wesentlicher singulärer Stellen gelangt, ist der Hauptsache nach bereits in § 1 so vollständig auseinander gesetzt worden, dass nur Weniges hinzuzufügen bleibt.

Hat die darzustellende Function keine Null-Stellen, so sind die a. a. O. mit $G^{(v)}$ bezeichneten Functionen sämtlich durch die Zahl 1 zu ersetzen.

Hat sie Null-Stellen in endlicher Anzahl, so kann man dieselben in beliebiger Weise den wesentlichen singulären Stellen zuordnen; es werden dann die $G^{(v)} \left(\frac{1}{x-c_v} \right)$ rationale Functionen, welche zusammengenommen dieselben Null-Stellen wie $f(x)$ haben. Am einfachsten ist es in diesem Falle, eine der Functionen $G^{(v)}$ so zu bestimmen, dass die Reihe ihrer Null-Stellen mit der von $f(x)$ übereinstimmt, und die übrigen dann durch die Zahl 1 zu ersetzen.

In dem Falle endlich, wo $f(x)$ unendlich viele Null-Stellen hat, giebt es unter den wesentlichen singulären Stellen mindestens eine — sie möge mit c_1 bezeichnet werden — die so liegt, dass in jeder Umgebung derselben unendlich viele Null-Stellen von $f(x)$ vorhanden sind. Ist dann c_2 irgend eine der übrigen wesentlichen singulären Stellen, und versteht man unter C_2 diejenige Umgebung derselben, in welcher

$$|x-c_2| \leq \varrho$$

ist, so kann man ϱ so klein annehmen, dass C_2 nur die eine wesentliche

singuläre Stelle c_2 , und Null-Stellen nur in dem Falle enthält, wo in jeder Umgebung von c_2 sich solche finden. Wenn man dabei ϱ auch so annimmt, dass an der Grenze von C_2 keine Null-Stellen liegen, und dann unter C_1 denjenigen Theil des Gebietes von x versteht, der nach Ausscheidung von C_2, C_3, \dots übrig bleibt, so ist das ganze Gebiet dergestalt in Theile C_1, C_2, \dots zerlegt, dass sich in der a. a. O. beschriebenen Weise Functionen

$$G^{(1)}\left(\frac{1}{x-c_1}\right), \quad G^{(2)}\left(\frac{1}{x-c_2}\right), \quad \dots$$

bilden lassen, deren Null-Stellen beziehlich die in C_1, C_2, \dots enthaltenen Null-Stellen von $f(x)$ sind. Dabei ist, wenn es in einem dieser Theile keine Null-Stellen von $f(x)$ giebt, die entsprechende Function $G^{(v)}$ durch 1 zu ersetzen; woraus erhellt, dass man auf die angegebene Weise verfahren die geringste Zahl von Functionen $G^{(v)}\left(\frac{1}{x-c_v}\right)$ erhält, für welche die Gesammtheit ihrer Null-Stellen identisch ist mit der Reihe der Null-Stellen der Function $f(x)$.

Wenn nun ferner $f(x)$ — wie in § 5 angenommen worden — n (wesentliche oder ausserwesentliche) singuläre Stellen (c_1, \dots, c_n) hat, so sind wieder drei Fälle zu unterscheiden.

Die singulären Stellen können sämmtlich wesentliche sein — dann ist, wenn man

$$f(x) = \prod_{v=1}^n G^{(v)}\left(\frac{1}{x-c_v}\right) \cdot f_1(x)$$

setzt, $f_1(x)$ eine Function von der im vorhergehenden § vorausgesetzten Beschaffenheit, so dass sie sich, da jede ihrer wesentlichen singulären Stellen in der Reihe c_1, \dots, c_n enthalten ist, in der Form

$$R^*(x) \prod_{v=1}^n e^{\bar{G}_v\left(\frac{1}{x-c_v}\right)}$$

darstellen lässt — wobei zu beachten ist, dass nach dem am Schluss d. a. § Bemerkten die Functionen \bar{G}_v zum Theil oder auch alle gleich Null sein können. Setzt man also

$$G^{(v)}\left(\frac{1}{x-c_v}\right) e^{\bar{G}_v\left(\frac{1}{x-c_v}\right)} = G_v\left(\frac{1}{x-c_v}\right),$$

so ergibt sich

$$f(x) = \prod_{v=1}^n G_v \left(\frac{1}{x-c_v} \right) \cdot R^*(x).$$

Hat ferner $f(x)$ m wesentliche singuläre Stellen (c_1, \dots, c_m) und $(n-m)$ ausserwesentliche (c_{m+1}, \dots, c_n) , so möge, wenn v eine der Zahlen $m+1, \dots, n$ ist, m_v die kleinste positive ganze Zahl sein, durch welche bewirkt wird, dass

$$(x-c_v)^{m_v} f(x)$$

für $x = c_v$ einen endlichen Werth erhält. Setzt man dann

$$G_v \left(\frac{1}{x-c_v} \right) = \left(\frac{1}{x-c_v} - \frac{1}{c_1-c_v} \right)^{m_v}, \quad (v = m+1, \dots, n)$$

wobei unter dem Zeichen $\frac{1}{c_1-c_v}$, falls $c_1 = \infty$ ist, der Werth 0, falls $c_v = \infty$ ist, der Werth c_1 zu verstehen ist, und

$$f(x) = \bar{f}(x) \cdot \prod_{v=m+1}^n G_v \left(\frac{1}{x-c_v} \right),$$

so ist $\bar{f}(x)$ eine Function, welche die m wesentlichen singulären Stellen (c_1, \dots, c_m) , aber keine ausserwesentliche hat, mithin in der Form

$$\prod_{v=1}^m G_v \left(\frac{1}{x-c_v} \right) \cdot R^*(x)$$

ausgedrückt werden kann.

Sind endlich c_1, \dots, c_n sämmtlich ausserwesentliche singuläre Stellen für die Function, und hat m_v dieselbe Bedeutung wie oben, so ist, wenn von den Grössen c_1, \dots, c_n keine den Werth ∞ hat,

$$f(x) = \frac{G(x)}{(x-c_1)^{m_1} \dots (x-c_n)^{m_n}},$$

wo $G(x)$ eine ganze rationale Function von nicht höherem als dem $(m_1 + \dots + m_n)^{\text{ten}}$ Grade bezeichnet — dagegen, wenn $c_n = \infty$,

$$f(x) = \frac{G(x)}{(x-c_1)^{m_1} \dots (x-c_{n-1})^{m_{n-1}}},$$

wo der Grad von $G(x)$ den des Nenners um m_n Einheiten übertrifft. Man kann daher in beiden Fällen $f(x)$ auf die Form

$$\prod_{v=1}^n G_v \left(\frac{1}{x-c_v} \right)$$

bringen, in der Art, dass $G_v\left(\frac{1}{x-c_v}\right)$ eine ganze rationale Function m_v^{ten} Grades von $\frac{1}{x-c_v}$ ist.

Hiernach kann also jede eindeutige Function von x mit n singulären Stellen in der in § 1 unter (B, 2) aufgestellten Form

$$\prod_{v=1}^n G_v\left(\frac{1}{x-c_v}\right) \cdot R^*(x)$$

ausgedrückt werden. Dabei ist zu beachten, dass $R^*(x)$ — wie a. a. O. angegeben worden — nur an solchen Stellen, welche sich unter den wesentlichen singulären Stellen der darzustellenden Function finden, Null oder unendlich gross wird; so wie auch, dass keine der Functionen $G_v\left(\frac{1}{x-c_v}\right)$, wenn dieselben in der beschriebenen Weise gebildet werden, sich auf eine Constante reducirt. Zugleich erhellt, dass, wenn die Functionen G_v , R^* diesen Bedingungen gemäss, im Übrigen aber willkürlich angenommen werden, die vorstehende Formel auch stets eine eindeutige Function von x mit höchstens n singulären Stellen darstellt.

Jetzt sei $f(x)$ eine beliebige eindeutige Function mit den n wesentlichen singulären Stellen $(c_1, \dots c_n)$. Dann ist wieder, wenn man unter

$$G_{n+1}\left(\frac{1}{x-c_1}\right), \dots G_{2n}\left(\frac{1}{x-c_n}\right)$$

die Functionen versteht, welche zur Function $\frac{1}{f(x)}$ in derselben Beziehung stehen wie

$$G^{(1)}\left(\frac{1}{x-c_1}\right), \dots G^{(n)}\left(\frac{1}{x-c_n}\right)$$

zu $f(x)^*$ — so dass die Gesamtheit ihrer Null-Stellen identisch ist mit der Reihe der Null-Stellen von $\frac{1}{f(x)}$ — und

$$f(x) = \prod_{v=1}^n \left\{ \frac{G^{(v)}\left(\frac{1}{x-c_v}\right)}{G_{n+v}\left(\frac{1}{x-c_v}\right)} \right\} \cdot f_1(x)$$

*) Es ist zu beachten, dass die zur Definition der Functionen G_{n+v} erforderliche Zerlegung des Gebietes von x in n Theile den in Beziehung auf die Function $f(x)$ gegebenen Bestimmungen gemäss auszuführen ist, so dass diese Theile nicht nothwendig dieselben werden wie die vorhin mit C_1, C_2, \dots bezeichneten.

setzt, $f_1(x)$ eine Function von derselben Beschaffenheit wie die im Vorstehenden so bezeichnete. Man erhält also, wenn man für dieselbe den angegebenen Ausdruck setzt und

$$G^{(v)}\left(\frac{1}{x-c_v}\right) \cdot e^{\bar{G}_v\left(\frac{1}{x-c_v}\right)} \text{ mit } G_v\left(\frac{1}{x-c_v}\right)$$

bezeichnet,

$$f(x) = \frac{\prod_{v=1}^n G_v\left(\frac{1}{x-c_v}\right)}{\prod_{v=1}^n G_{n+v}\left(\frac{1}{x-c_v}\right)} \cdot R^*(x).$$

Dies ist der in § 1 unter (C, 2) gegebene Ausdruck von $f(x)$.

Die in diesem Ausdrucke vorkommenden Functionen G_1, \dots, G_{2n} sind so beschaffen, dass nicht zwei derselben eine gemeinschaftliche Null-Stelle haben, und auch keine von ihnen an einer der Stellen c_1, \dots, c_n verschwindet. Ferner ist von den Factoren des Nenners jeder, welcher nicht unendlich viele Null-Stellen hat, eine rationale Function, und der entsprechende des Zählers dann nothwendig eine transcendente. Dabei darf angenommen werden, dass die Anzahl derjenigen Factoren des Nenners, welche nicht gleich 1 sind, ein Minimum sei; dann ist in dem Falle, wo $f(x)$ unendlich viele ausserwesentliche singuläre Stellen hat, jeder dieser Factoren eine Function mit unendlich vielen Null-Stellen, während im entgegengesetzten Falle der Nenner sich auf eine rationale Function von x mit einer — in der Reihe c_1, \dots, c_n enthaltenen — singulären Stelle, oder auch auf eine Constante reducirt. $R^*(x)$ hat dieselbe Bedeutung wie im vorher betrachteten Falle.

Zugleich ist klar, dass der vorstehende Ausdruck stets eine eindeutige Function von x mit den n wesentlichen singulären Stellen (c_1, \dots, c_n) darstellt, wenn die Functionen

$$G_1\left(\frac{1}{x-c_1}\right), \dots, G_n\left(\frac{1}{x-c_n}\right), G_{n+1}\left(\frac{1}{x-c_1}\right), \dots, G_{2n}\left(\frac{1}{x-c_n}\right), R^*(x)$$

so angenommen werden, dass sie die angegebene Beschaffenheit haben, im Übrigen aber willkürlich gewählt sind.

Die Function $R^*(x)$ kann in der Form

$$\frac{G_1^*\left(\frac{1}{x-c_2}\right)}{G_2^*\left(\frac{1}{x-c_2}\right)},$$

wo c_λ eine beliebige der Grössen c_1, \dots, c_n bedeutet, dergestalt ausgedrückt werden, dass G_1^*, G_2^* rationale ganze Functionen von $\frac{1}{x-c_\lambda}$ ohne gemeinschaftlichen Theiler sind.

Es lässt sich also der allgemeinste Ausdruck einer eindeutigen Function von x mit den n wesentlichen singulären Stellen c_1, \dots, c_n auch in der Form

$$\frac{\prod_{v=1}^n G_v \left(\frac{1}{x-c_v} \right)}{\prod_{v=1}^n G_{n+v} \left(\frac{1}{x-c_v} \right)}$$

darstellen, wo die Functionen G_1, \dots, G_{2n} dieselbe Beschaffenheit wie in dem vorhergehenden Ausdruck haben, mit der Modification, dass jetzt auch ein Factor des Zählers und der entsprechende des Nenners an einigen der Stellen c_1, \dots, c_n verschwinden können.

Übrigens erhellt, dass beide Ausdrücke, wie auch die Functionen G_1, \dots, G_{2n} angenommen werden mögen, stets eine eindeutige Function von x darstellen, deren wesentliche singuläre Stellen sich sämmtlich in der Reihe c_1, \dots, c_n finden; so wie auch, dass c_λ wirklich eine wesentliche singuläre Stelle dieser Function ist, wenn unter den übrigen Grössen c_v keine ihr gleiche sich findet und der Quotient

$$\frac{G_\lambda \left(\frac{1}{x-c_\lambda} \right)}{G_{n+\lambda} \left(\frac{1}{x-c_\lambda} \right)}$$

sich nicht auf eine rationale Function reducirt.

Der zweite Ausdruck von $f(x)$ kann nun auf doppelte Weise noch weiter entwickelt werden.

Setzt man

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{f_1(x)}{f_2(x)}, \\ f_1(x) &= \prod_{v=1}^n G_v \left(\frac{1}{x-c_v} \right), \\ f_2(x) &= \prod_{v=1}^n G_{n+v} \left(\frac{1}{x-c_v} \right), \end{aligned}$$

so sind $f_1(x), f_2(x)$ Functionen von x , welche sich in der Umgebung jeder von

c_1, \dots, c_n verschiedenen Stelle regulär verhalten, und deshalb nach § 5 in der Form

$$f_1(x) = A + \sum_{v=1}^n \sum_{\mu=1}^{\infty} A_{\mu,v} (x - c_v)^{-\mu},$$

$$f_2(x) = B + \sum_{v=1}^n \sum_{\mu=1}^{\infty} B_{\mu,v} (x - c_v)^{-\mu}$$

dargestellt werden können, wo die Coefficienten

$$A, B, A_{\mu,v}, B_{\mu,v}$$

Constanten und so beschaffen sind, dass die Reihen für jeden von c_1, \dots, c_n verschiedenen Werth der Veränderlichen x unbedingt convergiren. So ergibt sich der in § 1 unter (C, 1) aufgestellte Ausdruck von $f(x)$.

Wenn man ferner das in § 2 auseinandergesetzte Verfahren zur Zerlegung einer ganzen eindeutigen Function in Primfactoren auf die Functionen G_1, \dots, G_{2n} anwendet, so erhält man jede der Functionen $f_1(x), f_2(x)$, wofern sie nicht selbst eine Primfunction ist, als Product von (rationalen oder transcendenten) Primfactoren dargestellt, und zwar so, dass die singuläre Stelle jedes einzelnen eine der wesentlichen singulären Stellen von $f(x)$ ist, und das Product, falls es aus unendlich vielen Factoren besteht, in jedem Theile des Gebiets von x , der weder im Innern noch an der Grenze eine der Stellen c_1, \dots, c_n enthält, unbedingt und gleichmässig convergirt.

Hiermit ist vollständig nachgewiesen, wie sich jede eindeutige Function $f(x)$ mit einer endlichen Anzahl wesentlicher singulärer Stellen aus den einfachsten Functionen mit einer (wesentlichen oder ausserwesentlichen) singulären Stelle durch arithmetische Operationen zusammensetzen lässt.

Es bleibt aber noch übrig zu ermitteln, wie eine solche Function sich in der Umgebung einer ihrer wesentlichen singulären Stellen verhält.

8. Verhalten der untersuchten Functionen in der Umgebung einer ihrer wesentlichen singulären Stellen.

Ist $f(x)$ eine ganze eindeutige Function, so weiss man, dass es unendlich grosse Werthe von x giebt, für welche der Werth von $f(x)$ ebenfalls unendlich gross ist — mit andern Worten, dass sich, wenn a, b zwei willkürlich angenommene positive Grössen sind, unter den Werthen von x , die ihrem

absoluten Betrage nach grösser als a sind, stets solche finden, für die der absolute Betrag von $f(x)$ grösser als b ist.

Dasselbe gilt für jede eindeutige Function von x mit der einen wesentlichen singulären Stelle ∞ . Man denke sich nämlich eine solche Function so, wie in § 3 angegeben worden, in der Form

$$\frac{G_1(x)}{G_2(x)}$$

ausgedrückt, so hat man zwei Fälle zu unterscheiden. Ist der Nenner eine transcendente Function, so verschwindet derselbe für unendlich viele Werthe von x ; unter diesen giebt es also nothwendig unendlich grosse, und in einer unendlich kleinen Umgebung eines solchen Werthes ist der Werth von $f(x)$ unendlich gross. Ist aber $G_2(x)$ eine rationale Function, so kann

$$\frac{G_1(x)}{G_2(x)} \text{ auf die Form } \frac{G_3(x)}{G_2(x)} + G_4(x)$$

in der Art gebracht werden, dass $G_3(x)$ eine rationale ganze Function von niedrigerem Grade als $G_2(x)$, und $G_4(x)$ eine transcendente ganze Function ist; woraus sich, da der Quotient

$$\frac{G_3(x)}{G_2(x)}$$

für jeden unendlich grossen Werth unendlich klein ist, die Richtigkeit des Behaupteten auch in diesem Falle ergibt.

Dies vorausgeschickt, bedeute jetzt $f(x)$ wieder eine beliebige eindeutige Function mit einer endlichen Anzahl wesentlicher singulärer Stellen, so kann dieselbe, wenn c irgend eine dieser Stellen ist, nach dem vorhergehenden § in der Form

$$\frac{G_1\left(\frac{1}{x-c}\right)}{G_{n+1}\left(\frac{1}{x-c}\right)} \cdot F(x)$$

dergestalt ausgedrückt werden, dass $F(x)$ in der Umgebung der Stelle c sich regulär verhält, aber für $x = c$ nicht verschwindet. Es giebt also, wenn ϱ, R positive Grössen sind, von denen die erste beliebig klein und die andere

beliebig gross angenommen werden kann, Werthe von x , für die

$$|x-c| < \rho, \quad |f(x)| > R$$

ist.

Nun hat aber, wenn C eine willkürlich anzunehmende Grösse bedeutet, die Function

$$\frac{1}{f(x)-C}$$

dieselben wesentlichen singulären Stellen wie $f(x)$; es existiren also auch Werthe von x , für die

$$|x-c| < \rho, \quad \left| \frac{1}{f(x)-C} \right| > R, \quad |f(x)-C| < \frac{1}{R}$$

ist.

Hiernach ändert sich die Function $f(x)$ in einer unendlich kleinen Umgebung der Stelle c in der Art discontinuirlich, dass sie jedem willkürlich angenommenen Werthe beliebig nahe kommen kann, für $x=c$ also einen bestimmten Werth nicht besitzt; was sich in den entwickelten Ausdrücken der Function dadurch zu erkennen giebt, dass dieselben für $x=c$ aufhören, eine Bedeutung zu haben.

UNTERSUCHUNGEN ÜBER DIE $2r$ -FACH PERIODISCHEN FUNCTIONEN
VON r VERÄNDERLICHEN.

(Briefliche Mittheilungen an C. W. Borchardt. Crelle's Journal, Bd. 89.)

1.

Im Monatsbericht unserer Akademie v. J. 1869 (S. 855)*) habe ich das folgende Theorem mitgetheilt:

»Es sei $f_1(u_1, \dots, u_r)$ eine eindeutige Function, die bei endlichen Werthen der r Veränderlichen u_1, \dots, u_r den Charakter einer rationalen Function hat und $2r$ -fach periodisch ist; so lässt sich jede andere Function $f(u_1, \dots, u_r)$ dieser Art, welche dieselben Periodensysteme wie $f_1(u_1, \dots, u_r)$ besitzt, rational durch die $(r+1)$ Functionen

$$f_1(u_1, \dots, u_r), \quad \frac{\partial f_1(u_1, \dots, u_r)}{\partial u_1}, \quad \dots \quad \frac{\partial f_1(u_1, \dots, u_r)}{\partial u_r}$$

ausdrücken, unter diesen aber besteht eine algebraische Gleichung.«

Du siehst, lieber Freund, dieses Theorem entspricht vollkommen dem Liouville'schen Satze, nach welchem, wenn $f_1(u)$ eine eindeutige doppelt periodische Function ist, die innerhalb eines Perioden-Parallelogramms nur an zwei Stellen unendlich gross wird, jede andere eindeutige Function $f(u)$, welche dieselben Perioden wie $f_1(u)$ besitzt und innerhalb eines Perioden-Parallelogramms an beliebig vielen Stellen unendlich gross wird, in der Form

$$f(u) = \frac{M + Nf_1'(u)}{L}$$

dargestellt werden kann, wo L, M, N ganze rationale Functionen von $f_1(u)$

*) [S. 46 dieses Bandes.]

bezeichnen. Der Unterschied ist nur, dass nach meinem Satze $f(u)$ rational durch $f_1(u)$ und $f_1'(u)$ ausgedrückt werden kann, wenn $f_1(u)$ eine beliebige Function der betrachteten Art ist, welche dieselben Perioden wie $f(u)$ hat; was sich übrigens aus dem Liouville'schen Satze leicht folgern lässt.

Ich habe die Aussage meines Theorems im Wesentlichen so wiedergegeben, wie sie im Monatsbericht der Akademie steht. Dieselbe bedarf aber einer Modification.

Man betrachte als zu einer Klasse gehörend alle $2r$ -fach periodischen Functionen $f(u_1, \dots, u_r)$ der angegebenen Art, welche dieselben Periodensysteme besitzen; so ist das Theorem folgendermassen auszudrücken:

»Alle einer bestimmten Klasse angehörigen Functionen $f(u_1, \dots, u_r)$ lassen sich rational aus einer von ihnen — $f_1(u_1, \dots, u_r)$ — und den ersten Ableitungen derselben zusammensetzen, wobei diese Function f_1 im Allgemeinen beliebig ausgewählt werden kann, mit der Beschränkung, dass es möglicherweise particuläre Functionen der Klasse giebt, die auszuschliessen sind. Zugleich besteht zwischen jeder Function f und deren ersten Ableitungen eine algebraische Gleichung.«

Es ist aber dieser Satz nur ein besonderer Fall eines allgemeineren Theorems, das ich Dir bei dieser Gelegenheit mittheilen möchte. Es wird jedoch nöthig sein, dass ich einige Bemerkungen vorausschicke, durch welche der Charakter der Functionen, auf die das Theorem sich bezieht, genau festgestellt werden soll.

Liouville bezeichnet in den von Dir ausgearbeiteten »Leçons« die von ihm untersuchten Functionen als »fonctions bien déterminées«, ohne dieselben genauer zu definiren; es erhellt aber aus den Voraussetzungen, die er bei der Begründung seiner Sätze macht, und aus den Endresultaten seiner Untersuchung, dass er ausschliesslich solche eindeutige Functionen einer Veränderlichen im Auge hat, für die — nach der von mir in der Abhandlung: »Zur Theorie der eindeutigen Functionen«*) gebrauchten Terminologie — im Endlichen eine wesentliche singuläre Stelle nicht existirt. In der That haben für andere eindeutige Functionen seine Sätze keine Gültigkeit. (So z. B. ist

$$F(u) = e^{\sin am u}$$

*) Abhandlungen der Berliner Akademie aus dem Jahre 1876 [S. 77 dieses Bandes].

eine eindeutige und doppelt periodische Function, jedoch nicht rational durch $\sin am u$ und $\frac{d \sin am u}{du}$ ausdrückbar. Für dieselbe ist aber jeder Werth von u , für den $\sin am u = \infty$ wird, eine wesentliche singuläre Stelle. Denn es lässt sich $F(u)$, wenn a irgend ein solcher Werth ist, für hinlänglich kleine Werthe von $(u-a)$ zwar nach ganzen Potenzen dieser Grösse in eine convergirende Reihe entwickeln, in derselben kommen aber Glieder mit negativen Exponenten in unendlicher Anzahl vor.) Wenn es sich also darum handelt, die Liouville'sche Theorie der doppelt periodischen Functionen einer Veränderlichen auf $2r$ -fach periodische Functionen von r Veränderlichen auszudehnen, so ist von vorn herein klar, dass dies nur für Functionen von besonderer Beschaffenheit möglich sein wird.

Um mich im Folgenden kurz ausdrücken zu können, will ich, wenn $u_1, \dots u_r$ gleichzeitig betrachtete veränderliche Grössen sind, ein einzelnes Werthsystem derselben eine »Stelle im Gebiete der Grössen $u_1, \dots u_r$ « nennen. Ferner soll, wenn $(a_1, \dots a_r)$ eine bestimmte Stelle des Gebietes ist, die Gesammtheit der Stellen $(u_1, \dots u_r)$, für die jede der Differenzen $(u_1 - a_1), \dots (u_r - a_r)$ ihrem absoluten Betrage nach kleiner als eine gegebene Grösse δ ist, die »Umgebung (δ) der Stelle $(a_1, \dots a_r)$ « heissen. (Dabei setze ich fest, dass der Formel $(u-a)$ in dem Falle, wo $a = \infty$ ist, die Bedeutung $\frac{1}{u}$ gegeben werde.) Dies festgestellt, gebe ich nun folgende Definitionen:

Ich sage von einer eindeutigen Function $f(u_1, \dots u_r)$, sie verhalte sich an einer bestimmten Stelle $(a_1, \dots a_r)$ regulär, wenn sie in einer gewissen Umgebung dieser Stelle durch eine Reihe von der Form

$$\sum A_{v_1, \dots, v_r} (u_1 - a_1)^{v_1} \dots (u_r - a_r)^{v_r}, \quad (v_1, \dots, v_r = 0, \dots, \infty)$$

dargestellt werden kann, wo $v_1, \dots v_r$ ganze Zahlen bezeichnen und unter den Coefficienten A_{v_1, \dots, v_r} von $u_1, \dots u_r$ unabhängige Grössen zu verstehen sind. (Ich gebrauche für eine solche Reihe die Bezeichnung

$$\mathfrak{P}(u_1 - a_1, \dots u_r - a_r) \quad \text{oder auch} \quad \mathfrak{P}(u_1, \dots u_r | a_1, \dots a_r)$$

in Fällen, wo nur die Form der Reihe hervorgehoben werden soll und es auf die Werthe ihrer Coefficienten nicht ankommt.)

Die Stellen, an denen eine Function $f(u_1, \dots u_r)$ sich regulär verhält, bilden ein $2r$ -fach ausgedehntes Continuum, das nothwendig begrenzt ist;

jede an der Grenze desselben liegende Stelle nenne ich eine singuläre Stelle für die betrachtete Function.

Ist $(a'_1, \dots a'_r)$ eine solche singuläre Stelle, so kann möglicherweise $f(u_1, \dots u_r)$ durch Multiplication mit einer Potenzreihe

$$\mathfrak{P}_0(u_1 - a'_1, \dots u_r - a'_r),$$

die für $u_1 = a'_1, \dots u_r = a'_r$ den Werth Null hat, in eine an der Stelle $(a'_1, \dots a'_r)$ regulär sich verhaltende Function verwandelt werden, so dass sich $f(u_1, \dots u_r)$ für alle einer gewissen Umgebung der in Rede stehenden Stelle angehörigen Werthsysteme $(u_1, \dots u_r)$ in der Form

$$\frac{\mathfrak{P}_1(u_1 - a'_1, \dots u_r - a'_r)}{\mathfrak{P}_0(u_1 - a'_1, \dots u_r - a'_r)}$$

darstellen lässt. In diesem Falle nenne ich $(a'_1, \dots a'_r)$ eine ausserwesentliche, in jedem anderen Falle eine wesentliche singuläre Stelle.

Es gibt aber, wenn $r > 1$, zwei wohl von einander zu unterscheidende Arten ausserwesentlicher singulärer Stellen.

Man kann, wenn $(a'_1, \dots a'_r)$ irgend eine solche Stelle ist, $f(u_1, \dots u_r)$ in der angegebenen Form stets so darstellen, dass $\mathfrak{P}_0(u_1 - a'_1, \dots u_r - a'_r)$ und $\mathfrak{P}_1(u_1 - a'_1, \dots u_r - a'_r)$ nicht beide durch eine dritte, für $u_1 = a'_1, \dots u_r = a'_r$ verschwindende Function $\mathfrak{P}(u_1 - a'_1, \dots u_r - a'_r)$ theilbar sind. Wenn dann $\mathfrak{P}_1(u_1 - a'_1, \dots u_r - a'_r)$ für $u_1 = a'_1, \dots u_r = a'_r$ nicht verschwindet, so ist für alle einer unendlich kleinen Umgebung der Stelle $(a'_1, \dots a'_r)$ angehörigen Werthsysteme $(u_1, \dots u_r)$ der Werth von $f(u_1, \dots u_r)$ unendlich gross, und daher

$$f(u_1, \dots u_r) = \infty \quad \text{für } u_1 = a'_1, \dots u_r = a'_r.$$

Ist dagegen $\mathfrak{P}_1(u_1 - a'_1, \dots u_r - a'_r) = 0$ für $u_1 = a'_1, \dots u_r = a'_r$, so lässt sich zeigen, dass es in jeder noch so kleinen Umgebung der Stelle $(a'_1, \dots a'_r)$ Werthsysteme $(u_1, \dots u_r)$ giebt, für die $f(u_1, \dots u_r)$ einen beliebig vorgeschriebenen Werth erhält, so dass an der Stelle $(a'_1, \dots a'_r)$ selbst die Function keinen bestimmten Werth hat.

Hierzu ist noch Folgendes zu bemerken. Die Gesammtheit der Stellen, an denen sich $f(u_1, \dots u_r)$ wie eine rationale Function verhält — d. h. die Gesammtheit der nicht singulären und der ausserwesentlichen singulären

Stellen — ist ein $2r$ -fach ausgedehntes Continuum, dessen Begrenzung die wesentlichen singulären Stellen bilden.

Ist $(a_1, \dots a_r)$ irgend eine bestimmte Stelle im Innern dieses Continuum, und hat $f(a_1, \dots a_r)$ einen bestimmten endlichen Werth, so verhält sich $f(u_1, \dots u_r)$ in einer bestimmten Umgebung der Stelle $(a_1, \dots a_r)$ überall regulär.

Ist $f(a_1, \dots a_r) = \infty$, so giebt es in jeder Umgebung von $(a_1, \dots a_r)$, die keine singuläre Stelle der Function

$$\frac{1}{f(u_1, \dots u_r)}$$

enthält, wenn $r > 1$ ist, unendlich viele, eine $(2r-2)$ -fache Mannigfaltigkeit bildende Stellen, an denen die Function $f(u_1, \dots u_r)$ den Werth ∞ hat, während sie sich an allen übrigen Stellen des genannten Bereichs regulär verhält.

Hat endlich $f(u_1, \dots u_r)$ für $u_1 = a_1, \dots u_r = a_r$ keinen bestimmten Werth, so giebt es in jeder noch so kleinen Umgebung der Stelle $(a_1, \dots a_r)$ nicht nur unendlich viele andere ausserwesentliche singuläre Stellen, an denen die Function $f(u_1, \dots u_r)$ den Werth ∞ hat, sondern auch, wenn $r > 2$ ist, unendlich viele Stellen, an denen sie unbestimmt ist; die ersteren bilden eine $(2r-2)$ -fache, die letzteren eine $(2r-4)$ -fache Mannigfaltigkeit.

Ich knüpfe hieran sogleich die Aussage eines fundamentalen Satzes, von dem ich später Gebrauch machen werde.

»Eine eindeutige Function $f(u_1, \dots u_r)$, für die im ganzen Gebiete der Veränderlichen $u_1, \dots u_r$ keine wesentliche singuläre Stelle existirt, ist nothwendig eine rationale Function.«

Für Functionen einer Veränderlichen habe ich diesen Satz in der vorhin genannten Abhandlung bewiesen; für Functionen von beliebig vielen Veränderlichen ist derselbe aber keineswegs so einfach zu begründen, wie es auf den ersten Blick scheint.

Endlich will ich noch Eins erwähnen. Wird aus dem Gebiete von r complexen Veränderlichen $u_1, \dots u_r$ auf irgend eine Weise ein $2r$ -fach ausgedehntes Continuum ausgeschieden, so lassen sich stets eindeutige Functionen von $u_1, \dots u_r$ bestimmen, welche sich an allen Stellen im Innern dieses Continuum, aber an keiner Stelle seiner Begrenzung wie rationale Functionen verhalten. Es treten also die wesentlichen singulären Stellen einer eindeutigen

Function von r Veränderlichen nicht nothwendig vereinzelt auf, sondern es kann vielmehr jedes im Gebiete von r complexen Grössen mögliche Gebilde der Ort solcher Stellen sein.

Nach diesen Vorbemerkungen, auf die ich mich mehrfach werde beziehen müssen, setze ich nun fest, dass überall, wo im Folgenden von einer $2r$ -fach periodischen Function von r Veränderlichen die Rede sein wird, darunter nicht nur eine eindeutige Function verstanden, sondern auch angenommen werden soll, dass für dieselbe im Endlichen eine wesentliche singuläre Stelle nicht existire.

Dies vorausgesetzt, kann man zunächst beweisen, dass einer beliebigen $2r$ -fach periodischen Function $f_1(u_1, \dots, u_r)$ auf mannigfaltige Weise $(r-1)$ andere:

$$f_2(u_1, \dots, u_r), \dots, f_r(u_1, \dots, u_r),$$

welche — nach der oben gegebenen Definition — derselben Klasse wie $f_1(u_1, \dots, u_r)$ angehören, sich so adjungiren lassen, dass die Functionaldeterminante

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_r} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial u_r} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_r}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_r}{\partial u_r} \end{vmatrix}$$

nicht für beliebige Werthe von u_1, \dots, u_r verschwindet, die Functionen f_1, f_2, \dots, f_r also von einander unabhängig sind. Bei den in Betreff der Function f_1 gemachten Annahmen ist, wie ich in der Abhandlung: »Neuer Beweis eines Hauptsatzes der Theorie der periodischen Functionen mehrerer Veränderlichen« (Monatsbericht vom Jahre 1876, S. 687)* gezeigt habe, die Determinante

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial f_1(u_1, \dots, u_r)}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1(u_1, \dots, u_r)}{\partial u_r} \\ \frac{\partial f_1(u'_1, \dots, u'_r)}{\partial u'_1} & \dots & \frac{\partial f_1(u'_1, \dots, u'_r)}{\partial u'_r} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_1(u_1^{(r-1)}, \dots, u_r^{(r-1)})}{\partial u_1^{(r-1)}} & \dots & \frac{\partial f_1(u_1^{(r-1)}, \dots, u_r^{(r-1)})}{\partial u_r^{(r-1)}} \end{vmatrix}$$

*) [S. 55 dieses Bandes.]

nicht für beliebige Werthe der Grössen $u_1, \dots, u_r, u'_1, \dots, u'_r, \dots, u_1^{(r-1)}, \dots, u_r^{(r-1)}$ gleich Null. Setzt man also, unter $c'_1, \dots, c'_r, \dots, c_1^{(r-1)}, \dots, c_r^{(r-1)}$ von u_1, \dots, u_r unabhängige Grössen verstehend,

$$u'_\alpha = u_\alpha + c'_\alpha, \quad \dots \quad u_\alpha^{(r-1)} = u_\alpha + c_\alpha^{(r-1)}, \quad (\alpha = 1, \dots, r)$$

so kann man den Grössen $c'_\alpha, \dots, c_\alpha^{(r-1)}$ solche Werthe geben, dass die Determinante

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial f_1(u_1, \dots, u_r)}{\partial u_1}, & \dots & \frac{\partial f_1(u_1, \dots, u_r)}{\partial u_r} \\ \frac{\partial f_1(u_1 + c'_1, \dots, u_r + c'_r)}{\partial u_1}, & \dots & \frac{\partial f_1(u_1 + c'_1, \dots, u_r + c'_r)}{\partial u_r} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_1(u_1 + c_1^{(r-1)}, \dots, u_r + c_r^{(r-1)})}{\partial u_1}, & \dots & \frac{\partial f_1(u_1 + c_1^{(r-1)}, \dots, u_r + c_r^{(r-1)})}{\partial u_r} \end{vmatrix}$$

nicht bei beliebigen Werthen von u_1, \dots, u_r verschwindet. Nimmt man dann

$$f_2(u_1, \dots, u_r) = f_1(u_1 + c'_1, \dots, u_r + c'_r), \quad \dots \quad f_r(u_1, \dots, u_r) = f_1(u_1 + c_1^{(r-1)}, \dots, u_r + c_r^{(r-1)}),$$

so haben die Functionen f_1, f_2, \dots, f_r alle dieselben Periodensysteme, und ihre Functionaldeterminante ist nicht für beliebige Werthsysteme (u_1, \dots, u_r) gleich Null.

Es sei nun

$$f_1(u_1, \dots, u_r), \quad f_2(u_1, \dots, u_r), \quad \dots \quad f_r(u_1, \dots, u_r)$$

irgend ein System von r derselben Klasse angehörigen und von einander unabhängigen $2r$ -fach periodischen Functionen, so gilt für dasselbe zunächst der folgende Satz: Nimmt man zwischen den Grössen u_1, \dots, u_r und r anderen Veränderlichen s_1, \dots, s_r die r Gleichungen an:

$$f_1(u_1, \dots, u_r) = s_1, \quad f_2(u_1, \dots, u_r) = s_2, \quad \dots \quad f_r(u_1, \dots, u_r) = s_r,$$

so entsprechen jedem Werthsysteme der Grössen s_1, s_2, \dots, s_r im Allgemeinen, d. h. wenn von gewissen particulären Werthsystemen (s_1, s_2, \dots, s_r) , die nur eine $(2r-2)$ -fache Mannigfaltigkeit bilden, abgesehen wird — unendlich viele Stellen (u_1, \dots, u_r) , die weder zu den singulären Stellen der Functionen f_1, f_2, \dots, f_r gehören, noch zu denen, für welche die Functionaldeterminante von f_1, f_2, \dots, f_r verschwindet. Denkt man sich aber die zu einem Werthsysteme (s_1, s_2, \dots, s_r) gehörigen Stellen (u_1, \dots, u_r) in der Art in Gruppen vertheilt,

dass je zwei Stellen (u'_1, \dots, u'_r) , (u''_1, \dots, u''_r) in derselben oder in verschiedenen Gruppen sich finden, jenachdem die Differenzen $u''_1 - u'_1, \dots, u''_r - u'_r$ ein Periodensystem der Functionen f bilden oder nicht; so ist die Zahl dieser Gruppen endlich und hat für jedes Werthsystem (s_1, s_2, \dots, s_r) denselben Werth, der mit m bezeichnet werden möge. Die so definirte Zahl nenne ich den Grad des Functionensystems f_1, f_2, \dots, f_r .

Aus diesem Satze ergeben sich sodann die nachstehenden Theoreme.

»Ist $f(u_1, \dots, u_r)$ irgend eine 2r-fach periodische Function, unter deren Periodensystemen sich auch alle Periodensysteme der Functionen f_1, f_2, \dots, f_r finden, so besteht zwischen f und f_1, f_2, \dots, f_r eine irreductible Gleichung, deren Grad in Beziehung auf f gleich m oder ein Theiler von m ist.«

»Unter den 2r-fach periodischen Functionen der Klasse, zu welcher f_1, f_2, \dots, f_r gehören, giebt es unzählige, die mit f_1, f_2, \dots, f_r durch eine irreductible Gleichung m^{ten} Grades zusammenhangen; ist f_{r+1} irgend eine derselben, so lässt sich jede Function $f(u_1, \dots, u_r)$ von der im vorstehenden Satze angegebenen Beschaffenheit rational durch die $(r+1)$ Functionen $f_1, f_2, \dots, f_r, f_{r+1}$ ausdrücken «

Zu der Klasse der Functionen f_1, f_2, \dots, f_{r+1} gehören auch alle Ableitungen derselben. Setzt man also

$$f = R(f_1, f_2, \dots, f_{r+1}),$$

so hat man auch

$$\frac{\partial f}{\partial u_1} = R_1(f_1, f_2, \dots, f_{r+1}), \quad \dots \quad \frac{\partial f}{\partial u_r} = R_r(f_1, f_2, \dots, f_{r+1}),$$

wo R, R_1, \dots, R_r rationale Functionen von f_1, f_2, \dots, f_{r+1} bezeichnen. Aus diesen $(r+1)$ Gleichungen und der zwischen f_{r+1} und f_1, f_2, \dots, f_r bestehenden Gleichung kann man f_1, f_2, \dots, f_{r+1} eliminiren, und erhält dabei im Allgemeinen zugleich diese Grössen rational durch die Functionen $f, \frac{\partial f}{\partial u_1}, \dots, \frac{\partial f}{\partial u_r}$ ausgedrückt. So ergibt sich das im Anfange meines Briefes angeführte Theorem. Ich habe aber nicht untersucht, welcher Beschränkung der Ausdruck $R(f_1, f_2, \dots, f_{r+1})$ unterworfen werden muss, damit sich f_1, f_2, \dots, f_{r+1} wirklich rational durch f und $\frac{\partial f}{\partial u_1}, \dots, \frac{\partial f}{\partial u_r}$ ausdrücken lassen. Ich habe deswegen die ursprüngliche Fassung des in Rede stehenden Theorems etwas modificiren müssen.

Von den vorstehenden Sätzen ist der erste, wodurch der Begriff des Grades eines Systems von r derselben Klasse angehörigen und von einander

unabhängigen $2r$ -fach periodischen Functionen festgestellt wird, am schwierigsten zu beweisen. Dies hat seinen Grund hauptsächlich in dem Umstande, dass immer, sobald $r > 1$ ist, im Gebiet der Grössen u_1, \dots, u_r singuläre Stellen existiren, an denen die Functionen f_1, f_2, \dots, f_{r+1} zum Theil oder alle unbestimmt sind. Wenn Du mir gestattetest, in meinen Mittheilungen fortzufahren, so werde ich Dir in einem folgenden Briefe den — allerdings nicht gar kurzen — Weg beschreiben, auf dem ich zu einem, wie ich glaube, völlig strengen Beweise der aufgestellten Sätze gelangt bin, und der mich dann schliesslich auch zu dem Ziele geführt hat, das ich bei meinen Untersuchungen über die hier betrachteten $2r$ -fach periodischen Functionen von r Veränderlichen von Anfang an im Auge hatte — dem Nachweise nämlich, dass jede solche Function sich durch eine Θ -Function von r Argumenten ausdrücken lässt.

Berlin, den 5. November 1879.

ANMERKUNG.

Die beabsichtigte Fortsetzung der vorstehenden Mittheilungen ist unterblieben, weil ich im Winter 1879—80 schwer erkrankte und noch nicht völlig wieder hergestellt war, als Borchardt (27. Juni 1880) starb.

EINIGE AUF DIE THEORIE DER ANALYTISCHEN FUNCTIONEN
MEHRERER VERÄNDERLICHEN SICH BEZIEHENDE SÄTZE.

1. Vorbereitungssatz.*)

Ist $F(x, x_1, \dots, x_n)$ eine gegebene, in der Form einer gewöhnlichen Potenzreihe dargestellte Function von x, x_1, \dots, x_n , welche, wenn diese Veränderlichen sämtlich verschwinden, ebenfalls gleich Null wird, so giebt es stets unendlich viele, dem Convergenzbezirk der Reihe angehörige Werthsysteme der Grössen x, x_1, \dots, x_n , welche die Gleichung

$$F(x, x_1, \dots, x_n) = 0$$

befriedigen.

Bei vielen Untersuchungen handelt es sich nun darum, von diesen Werthsystemen alle diejenigen zu bestimmen, für welche der absolute Betrag jeder einzelnen Grösse eine — beliebig klein anzunehmende — Grenze δ nicht überschreitet.

Diese Aufgabe lässt sich folgendermassen lösen.

Es werde

$$F(x, 0, \dots, 0) \text{ mit } F_0(x)$$

bezeichnet und

$$F(x, x_1, \dots, x_n) = F_0(x) - F_1(x, x_1, \dots, x_n)$$

gesetzt, so dass F_1 für jeden Werth von x gleich Null wird, wenn x_1, \dots, x_n

*) Diesen Satz habe ich seit dem Jahre 1860 wiederholt in meinen Universitäts-Vorlesungen vorgetragen.

sämmtlich verschwinden. Ich nehme nun zunächst an, dass $F_0(x)$ nicht für jeden Werth von x verschwinde. Dann kann man eine positive Grösse ϱ so annehmen, dass $F_0(x)$ für keinen Werth von x , dessen absoluter Betrag > 0 , aber $\leq \varrho$ ist, verschwindet, und dass es zugleich Werthe von x_1, x_2, \dots, x_n , die sämmtlich von Null verschieden sind, giebt, für welche die Reihe $F_1(\varrho, x_1, \dots, x_n)$ convergirt. Wenn ferner eine zweite positive Grösse ϱ_0 so angenommen wird, dass sie > 0 , aber $< \varrho$ ist, und festgesetzt wird, dass der absolute Betrag von x zwischen ϱ_0 und ϱ liege, die absoluten Beträge von x_1, \dots, x_n aber alle unter einer Grenze ϱ_1 bleiben sollen, so kann man ϱ_1 so klein annehmen, dass für alle Werthsysteme von x, x_1, \dots, x_n , welche diese Bedingungen erfüllen, F_0 dem absoluten Betrage nach grösser als F_1 ist. Man hat dann

$$\begin{aligned} \frac{1}{F(x, x_1, \dots, x_n)} &= \frac{1}{F_0} + \frac{F_1}{F_0^2} + \frac{F_1^2}{F_0^3} + \dots = \sum_{\lambda=0}^{\infty} \frac{F_1^\lambda}{F_0^{\lambda+1}} \\ \frac{\partial F}{\partial x} &= \frac{dF_0}{dx} + \sum_{\lambda=1}^{\infty} \frac{F_1^\lambda \frac{dF_0}{dx}}{F_0^{\lambda+1}} - \sum_{\lambda=1}^{\infty} \frac{F_1^{\lambda-1} \frac{\partial F_1}{\partial x}}{F_0^\lambda} \\ &= \frac{dF_0}{dx} - \sum_{\lambda=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{F_1^\lambda}{F_0^\lambda} \right). \end{aligned}$$

Es ist aber, da der grösste Werth, welchen der absolute Betrag von $\frac{F_1}{F_0}$ für alle jetzt betrachteten Werthe von x, x_1, \dots, x_n besitzt, kleiner als 1 ist, die Reihe

$$\sum_{\lambda=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{F_1^\lambda}{F_0^\lambda} \right)$$

gleichmässig convergent, und daher

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{dF_0}{dx} - \frac{\partial}{\partial x} \sum_{\lambda=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda} \frac{F_1^\lambda}{F_0^\lambda}.$$

Es kann ferner, wenn das Anfangsglied in der Entwicklung von $F_0(x)$ den Exponenten m hat, $\frac{F_1^\lambda}{F_0^\lambda}$ in eine Reihe von der Form

$$\sum_{\mu=0}^{\infty} G(x_1, \dots, x_n)_{\lambda, \mu} x^{-m\lambda+\mu}$$

entwickelt werden, wo $G(x_1, \dots, x_n)_{\lambda, \mu}$ eine gewöhnliche Potenzreihe von x_1, \dots, x_n bedeutet; und bei der gleichmässigen Convergenz der Reihe

$$\sum_{\lambda=1}^{\lambda=\infty} \frac{1}{\lambda} \frac{F_1^\lambda}{F_0^\lambda}$$

kann man alle Glieder, welche dieselbe Potenz von x enthalten, in eines zusammenziehen und erhält so:

$$\sum_{\lambda=1}^{\lambda=\infty} \frac{1}{\lambda} \frac{F_1^\lambda}{F_0^\lambda} = \sum_{\nu=-\infty}^{\nu=+\infty} G(x_1, \dots, x_n)_\nu x^\nu,$$

wo auch $G(x_1, \dots, x_n)_\nu$ eine gewöhnliche Potenzreihe bezeichnet. Ferner ist

$$\frac{dF_0}{dx} = mx^{-1} + G(x),$$

wo $G(x)$ eine gewöhnliche Potenzreihe von x bedeutet. Also:

$$\frac{\partial F}{\partial x} = mx^{-1} + G(x) - \frac{\partial}{\partial x} \sum_{\nu=-\infty}^{\nu=+\infty} G(x_1, \dots, x_n)_\nu x^\nu.$$

Aus dieser Gleichung lässt sich zunächst ersehen, dass, wenn man den Grössen x_1, x_2, \dots, x_n bestimmte Werthe, die dem absoluten Betrage nach sämtlich kleiner als ϱ_1 sind, beilegt, die Gleichung

$$F(x, x_1, \dots, x_n) = 0$$

stets durch m Werthe von x , die dem absoluten Betrage nach kleiner als ϱ sind, befriedigt wird, vorausgesetzt, dass jeder so oft gezählt wird als die zugehörige Ordnungszahl anzeigt. (Vgl. S. 86.)

Dass es überhaupt innerhalb des angegebenen Bereiches Werthe von x giebt, welche $F = 0$ machen, lässt sich so zeigen: Angenommen, es würde $F(x, x_1, \dots, x_n)$ bei gegebenen Werthen von x_1, \dots, x_n für keinen der in Rede stehenden Werthe von x gleich Null, so liesse sich $\frac{1}{F} \frac{\partial F}{\partial x}$ für alle Werthe von x , die dem absoluten Betrage nach kleiner als ϱ sind, in eine nur ganze positive Potenzen von x enthaltende Reihe entwickeln, und diese müsste für die ihrem absoluten Betrage nach zwischen ϱ_0 und ϱ liegenden Werthe von x mit der vorstehenden übereinstimmen. Dies ist aber nicht möglich,

da in der letzteren Reihe das Glied mx^{-1} vorkommt. (Da die erste Ableitung einer Potenzreihe von x niemals ein Glied mit dem Exponenten -1 enthält, so kann sich das angegebene Glied nicht gegen ein anderes heben.) — Angenommen nun, es seien

$$x', x'', \dots x^{(n)}$$

die in dem angegebenen Bereiche liegenden Werthe von x , welche die Gleichung $F(x, x_1, \dots x_n) = 0$ befriedigen, wobei ein jeder in diese Reihe so oft aufzunehmen ist, als seine Ordnungszahl anzeigt, so wird die Differenz

$$\frac{1}{F} \frac{\partial F}{\partial x} - \frac{1}{x-x'} - \dots - \frac{1}{x-x^{(n)}}$$

für keinen Werth von x , dessen absoluter Betrag kleiner als ϱ ist, unendlich gross, und kann daher in eine nur ganze positive Potenzen von x enthaltende Reihe $\mathfrak{P}(x)$ entwickelt werden. Für alle Werthe von x , die dem absoluten Betrage nach kleiner als ϱ , aber grösser als jede der Grössen $x', x'', \dots x^{(n)}$ und ϱ_0 sind, hat man also:

$$\frac{1}{F} \frac{\partial F}{\partial x} = \mathfrak{P}(x) + \sum_{v=0}^{v=\infty} s_v x^{-v-1},$$

wo

$$s_v = (x')^v + \dots + (x^{(n)})^v,$$

und

$$\frac{1}{F} \frac{\partial F}{\partial x} = mx^{-1} + G(x) - \sum_{v=-\infty}^{v=+\infty} G(x_1, \dots x_n)_v \cdot vx^{v-1}.$$

Die Vergleichung dieser beiden Ausdrücke von $\frac{\frac{\partial F}{\partial x}}{F}$ giebt

$$s_0 = m \text{ oder } r = m,$$

d. h. die Anzahl der in Rede stehenden, die Gleichung $F(x, x_1, \dots x_n) = 0$ befriedigenden Werthe von x ist gleich dem Grade des Anfangsgliedes von $F(x, 0, \dots 0)$.

Ferner ergibt sich, wenn man

$$v = -l \text{ und } l > 0 \text{ annimmt,}$$

$$s_l = lG(x_1, \dots x_n)_{-l}.$$

Setzt man daher:

$$f(x, x_1, \dots, x_n) = (x - x') \dots (x - x^{(m)}) = x^m + f_1 x^{m-1} + \dots + f_m,$$

so dass

$$\frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial x} = \frac{1}{x - x'} + \dots + \frac{1}{x - x^{(m)}}$$

ist, so erhält man für Werthe von x , die dem absoluten Betrage nach grösser sind als $x', \dots, x^{(m)}$,

$$\frac{mx^{m-1} + (m-1)f_1 x^{m-2} + \dots + f_{m-1}}{x^m + f_1 x^{m-1} + \dots + f_m} = mx^{-1} + s_1 x^{-2} + s_2 x^{-3} + \dots,$$

und hieraus:

$$\begin{aligned} f_1 &= -s_1 \\ 2f_2 &= -s_2 - s_1 f_1 \\ 3f_3 &= -s_3 - s_2 f_1 - s_1 f_2 \\ &\dots \dots \dots \\ mf_m &= -s_m - s_{m-1} f_1 - s_{m-2} f_2 - \dots - s_1 f_{m-1}. \end{aligned}$$

Hiernach sind f_1, \dots, f_m sämtlich Potenzreihen von x_1, \dots, x_n , welche sicher convergiren, wenn alle diese Grössen dem absoluten Betrage nach kleiner als ϱ_1 sind. Die gesuchten m Werthe von x werden dann gefunden durch Auflösung der Gleichung

$$x^m + f_1 x^{m-1} + \dots + f_m = 0.$$

Man erhält ferner durch Vergleichung der beiden Ausdrücke von $\frac{1}{F} \frac{\partial F}{\partial x}$

$$\mathfrak{P}(x) = G(x) - \sum_{\nu=0}^{\infty} (\nu+1) G(x_1, \dots, x_n)_{\nu+1} \cdot x^\nu$$

für alle Werthe von x , die dem absoluten Betrage nach kleiner als ϱ sind.

Setzt man daher

$$\mathfrak{G}(x, x_1, \dots, x_n) = \int_0^x G(x) dx - \sum_{\nu=0}^{\infty} G(x_1, \dots, x_n)_{\nu+1} x^{\nu+1},$$

$$\mathfrak{F}(x, x_1, \dots, x_n) = e^{\mathfrak{G}(x, x_1, \dots, x_n)},$$

so sind \mathfrak{G} und \mathfrak{F} gewöhnliche Potenzreihen von x, x_1, \dots, x_n , welche sicher convergiren, wenn $|x| < \varrho, |x_1| < \varrho_1, \dots, |x_n| < \varrho_1$. Dabei wird $\mathfrak{F} = 1$, wenn x, x_1, \dots, x_n sämtlich verschwinden.

wo die Grössen c_{00}, \dots, c_{nn} Constanten bezeichnen, die keiner anderen Beschränkung unterworfen sind, als dass

$$\begin{vmatrix} c_{00} & \dots & c_{0n} \\ c_{10} & \dots & c_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ c_{n0} & \dots & c_{nn} \end{vmatrix}$$

und

$$(c_{00}, c_{10}, \dots, c_{n0})_{\mu}$$

von Null verschieden sein müssen. Durch diese Substitution verwandelt sich $F(x, x_1, \dots, x_n)$ in eine ähnliche Function von y, y_1, \dots, y_n , welche mit $\bar{F}(y, y_1, \dots, y_n)$ bezeichnet werden möge. Dann hat man:

$$\bar{F}(y, 0, \dots, 0) = (c_{00}, c_{10}, \dots, c_{n0})_{\mu} y^{\mu} + (c_{00}, c_{10}, \dots, c_{n0})_{\mu+1} y^{\mu+1} + \dots$$

Es ist also die Function $\bar{F}(y, 0, \dots, 0)$ nicht identisch gleich Null und ihr Anfangsglied von der μ^{ten} Ordnung.

Man kann daher nach dem Bewiesenen $\bar{F}(y, y_1, \dots, y_n)$ darstellen in der Form

$$\bar{F}(y, y_1, \dots, y_n) = (y^{\mu} + y^{\mu-1} \mathfrak{G}_1(y_1, \dots, y_n) + \dots + \mathfrak{G}_{\mu}(y_1, \dots, y_n)) \bar{\mathfrak{G}}(y, y_1, \dots, y_n),$$

wo $\mathfrak{G}_1, \dots, \mathfrak{G}_{\mu}$ Potenzreihen von y_1, \dots, y_n bezeichnen, die sämtlich gleich Null werden, wenn diese Veränderlichen sämtlich verschwinden, während $\bar{\mathfrak{G}}(y, y_1, \dots, y_n)$ eine Potenzreihe von y, y_1, \dots, y_n ist, welche einen von Null verschiedenen Werth erhält, wenn y, y_1, \dots, y_n sämtlich gleich Null gesetzt werden. Die letztere Reihe kann nun in eine ebenso beschaffene Potenzreihe von x, x_1, \dots, x_n verwandelt werden, die mit $\mathfrak{G}(x, x_1, \dots, x_n)$ bezeichnet werden möge. Dann hat man

$$F(x, x_1, \dots, x_n) = (y^{\mu} + y^{\mu-1} \mathfrak{G}_1(y_1, \dots, y_n) + \dots + \mathfrak{G}_{\mu}(y_1, \dots, y_n)) \mathfrak{G}(x, x_1, \dots, x_n).$$

Nun kann man δ so klein annehmen, dass für jedes Werthsystem der Grössen x, x_1, \dots, x_n , in welchem jede einzelne dem absoluten Betrage nach kleiner als δ ist, erstens $\mathfrak{G}(x, x_1, \dots, x_n)$ einen von Null verschiedenen Werth erhält und zweitens das entsprechende Werthsystem der Grössen y_1, \dots, y_n dem gemeinschaftlichen Convergenzbezirke der Reihen $\mathfrak{G}_1(y_1, \dots, y_n), \dots, \mathfrak{G}_{\mu}(y_1, \dots, y_n)$ angehört. Hieraus ergibt sich Folgendes:

Wenn man zu jedem dem gemeinschaftlichen Convergenzbezirke der Reihen $\mathfrak{G}_1, \dots, \mathfrak{G}_\mu$ angehörigen Werthsysteme y_1, \dots, y_n die μ der Gleichung

$$y^\mu + y^{\mu-1} \mathfrak{G}_1(y_1, \dots, y_n) + \dots + \mathfrak{G}_\mu(y_1, \dots, y_n) = 0$$

genügenden Werthe von y bestimmt, und dann aus den so sich ergebenden Werthsystemen y, y_1, \dots, y_n die entsprechenden Werthsysteme x, x_1, \dots, x_n berechnet, so finden sich unter den letzteren alle diejenigen, welche die Gleichung $F(x, x_1, \dots, x_n) = 0$ befriedigen und die Bedingung erfüllen, dass jede einzelne Grösse dem absoluten Betrage nach kleiner als die angegebene Grösse δ ist.

2.

Eine Potenzreihe $\mathfrak{P}_1(x_1, \dots, x_n)$ ist durch eine andere $\mathfrak{P}_0(x_1, \dots, x_n)$ theilbar, wenn sich eine dritte Reihe $\mathfrak{P}_2(x_1, \dots, x_n)$ so bestimmen lässt, dass

$$\mathfrak{P}_1(x_1, \dots, x_n) = \mathfrak{P}_0(x_1, \dots, x_n) \mathfrak{P}_2(x_1, \dots, x_n)$$

ist.

Hat \mathfrak{P}_0 an der Stelle $(x_1 = 0, \dots, x_n = 0)$ einen von Null verschiedenen Werth, so existirt stets eine die vorstehende Gleichung befriedigende Reihe \mathfrak{P}_2 ; dagegen ist dies nicht der Fall, wenn $\mathfrak{P}_0(0, \dots, 0) = 0$ ist, während $\mathfrak{P}_1(0, \dots, 0)$ einen von Null verschiedenen Werth hat. Es bleibt daher nur zu untersuchen, unter welchen Bedingungen \mathfrak{P}_1 durch \mathfrak{P}_0 theilbar ist in dem Falle, wo

$$\mathfrak{P}_0(0, \dots, 0), \quad \mathfrak{P}_1(0, \dots, 0)$$

beide gleich Null sind.

Man führe (wie in Art. 1) an Stelle von x_1, \dots, x_n n andere Veränderliche t_1, \dots, t_n ein, indem man

$$\begin{aligned} x_1 &= g_{11} t_1 + \dots + g_{1n} t_n \\ &\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ x_n &= g_{n1} t_1 + \dots + g_{nn} t_n \end{aligned}$$

setzt und die Constanten $g_{11}, g_{12}, \dots, g_{nn}$ so wählt, dass erstens x_1, \dots, x_n von einander unabhängige Functionen der Grössen t_1, \dots, t_n sind, und zweitens weder $\mathfrak{P}_0(g_{11} t_1, \dots, g_{n1} t_1)$ noch $\mathfrak{P}_1(g_{11} t_1, \dots, g_{n1} t_1)$ für jeden Werth von t_1 verschwindet. Wenn dann die höchsten Potenzen von t_1 , durch welche diese

beiden Functionen von t_1 theilbar sind, beziehlich die Exponenten μ, ν haben, so kann man, wie in Art. 1 gezeigt worden,

$$\begin{aligned} \mathfrak{P}_0(x_1, \dots x_n) & \text{ auf die Form } G_0(t_1, t_2, \dots t_n) \overline{\mathfrak{P}}_0(t_1, \dots t_n) \\ \mathfrak{P}_1(x_1, \dots x_n) & \text{ » » » } G_1(t_1, t_2, \dots t_n) \overline{\mathfrak{P}}_1(t_1, \dots t_n) \end{aligned}$$

bringen, wo

$$\begin{aligned} G_0(t_1, t_2, \dots t_n) &= t_1^\mu + \overset{0}{\mathfrak{P}}_1(t_2, \dots t_n) t_1^{\mu-1} + \dots + \overset{0}{\mathfrak{P}}_\mu(t_2, \dots t_n) \\ G_1(t_1, t_2, \dots t_n) &= t_1^\nu + \overset{1}{\mathfrak{P}}_1(t_2, \dots t_n) t_1^{\nu-1} + \dots + \overset{1}{\mathfrak{P}}_\nu(t_2, \dots t_n) \end{aligned}$$

ist. Dabei verschwinden $\overset{0}{\mathfrak{P}}_1, \dots, \overset{0}{\mathfrak{P}}_\mu, \overset{1}{\mathfrak{P}}_1, \dots, \overset{1}{\mathfrak{P}}_\nu$ sämmtlich an der Stelle ($t_2 = 0, \dots t_n = 0$), während $\overline{\mathfrak{P}}_0(0, \dots 0), \overline{\mathfrak{P}}_1(0, \dots 0)$ beide einen von Null verschiedenen Werth haben.

Man nehme nun eine positive Grösse δ so an, dass für jedes den Bedingungen

$$|t_1| \leq \delta, \dots |t_n| \leq \delta$$

genügende Werthsystem ($t_1, \dots t_n$) die angegebenen Umformungen von $\mathfrak{P}_0(x_1, \dots x_n), \mathfrak{P}_1(x_1, \dots x_n)$ gelten. Dann kann man ferner eine positive Grösse δ_1 , die kleiner als δ ist, so annehmen, dass für jedes den Bedingungen

$$|t_2| \leq \delta_1, \dots |t_n| \leq \delta_1$$

genügende Werthsystem ($t_2, \dots t_n$) jede der beiden Gleichungen

$$\begin{aligned} G_0(t_1, t_2, \dots t_n) &= 0, \\ G_1(t_1, t_2, \dots t_n) &= 0 \end{aligned}$$

nur durch solche Werthe von t_1 , die dem absoluten Betrage nach kleiner als δ sind, befriedigt wird. Sind für irgend ein System bestimmter Werthe von $t_2, \dots t_n$

$$t'_1, t''_1, \dots t_1^{(m)}$$

die von einander verschiedenen Werthe von t_1 , welche der einen oder der anderen dieser Gleichungen, oder auch beiden genügen, so hat man

$$\frac{G_1(t_1, t_2, \dots t_n)}{G_0(t_1, t_2, \dots t_n)} = (t_1 - t'_1)^{\lambda_1} \dots (t_1 - t_1^{(m)})^{\lambda_m},$$

wo $\lambda_1, \dots \lambda_m$ ganze Zahlen bezeichnen, deren Summe gleich $\nu - \mu$ ist. Hat eine dieser Zahlen einen negativen Werth, so kann man der Grösse t_1 einen

solchen Werth geben, dass

$$\left| \frac{G_1(t_1, t_2, \dots, t_n)}{G_0(t_1, t_2, \dots, t_n)} \right| > g$$

ist, wo g eine beliebig angenommene positive Grösse bedeutet, ohne dass $G_0(t_1, t_2, \dots, t_n) = 0$ ist. Infolge der Gleichung

$$\frac{\mathfrak{P}_1(x_1, \dots, x_n)}{\mathfrak{P}_0(x_1, \dots, x_n)} = \frac{G_1(t_1, t_2, \dots, t_n)}{G_0(t_1, t_2, \dots, t_n)} \cdot \frac{\bar{\mathfrak{P}}_1(t_1, \dots, t_n)}{\bar{\mathfrak{P}}_0(t_1, \dots, t_n)}$$

existiren also in jeder noch so kleinen Umgebung der Stelle $(0, 0, \dots, 0)$ Werthsysteme (x_1, \dots, x_n) , für die der Quotient

$$\frac{\mathfrak{P}_1(x_1, \dots, x_n)}{\mathfrak{P}_0(x_1, \dots, x_n)}$$

dem absoluten Betrage nach jede beliebig angenommene Grösse übertrifft. Daraus folgt sofort, dass, wenn $\mathfrak{P}_1(x_1, \dots, x_n)$ durch $\mathfrak{P}_0(x_1, \dots, x_n)$ theilbar sein soll, jede der Zahlen $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ positiv oder gleich Null, und somit (zunächst unter der Voraussetzung, dass t_2, \dots, t_n bestimmte, den Bedingungen

$$|t_2| \leq \delta_1, \dots, |t_n| \leq \delta_1$$

genügende Werthe haben, und der absolute Betrag der Veränderlichen t nicht grösser als δ sei) $G_1(t_1, t_2, \dots, t_n)$ durch $G_0(t_1, t_2, \dots, t_n)$ theilbar sein muss. Dazu ist zuerst erforderlich, dass $\nu \geq \mu$ sei.

Nun kann man aber, wenn diese Bedingung erfüllt ist, und

$$A_0 t_1^\mu + A_1 t_1^{\mu-1} + \dots + A_\mu, \quad B_0 t_1^\nu + B_1 t_1^{\nu-1} + \dots + B_\nu$$

zwei ganze Functionen von t_1 mit unbestimmten Coefficienten sind, zwei andere Functionen

$$C_0 t_1^{\nu-\mu} + \dots + C_{\nu-\mu}, \quad D_1 t_1^{\mu-1} + \dots + D_\mu$$

dergestalt bestimmen, dass die Gleichung

$$A_0^{-\mu+1} (B_0 t_1^\nu + \dots + B_\nu) = (A_0 t_1^\mu + \dots + A_\mu) (C_0 t_1^{\nu-\mu} + \dots + C_{\nu-\mu}) + D_1 t_1^{\mu-1} + \dots + D_\mu$$

besteht; und es sind dann

$$C_0, \dots, C_{\nu-\mu}, \quad D_1, \dots, D_\mu$$

ganze Functionen von $A_0, \dots, A_\mu, B_0, \dots, B_\nu$. Die nothwendigen und hin-

reichenden Bedingungen dafür, dass bei bestimmten Werthen von $A_0, \dots, A_\mu, B_0, \dots, B_\nu$ und unter der Voraussetzung, dass A_0 nicht den Werth Null habe,

$$B_0 t_1^\nu + \dots + B_\nu] \text{ durch } A_0 t_1^\mu + \dots + A_\mu$$

theilbar sei, werden dann durch die μ Gleichungen

$$D_1 = 0, \dots, D_\mu = 0$$

ausgedrückt.

Setzt man nun

$$\begin{aligned} A_0 &= 1, & A_1 &= \overset{0}{\mathfrak{P}}_1(t_2, \dots, t_n), & \dots & & A_\mu &= \overset{0}{\mathfrak{P}}_\mu(t_2, \dots, t_n), \\ B_0 &= 1, & B_1 &= \overset{1}{\mathfrak{P}}_1(t_2, \dots, t_n), & \dots & & B_\nu &= \overset{1}{\mathfrak{P}}_\nu(t_2, \dots, t_n), \end{aligned}$$

so wird $C_0 = 1$, und $C_1, \dots, C_{\nu-\mu}, D_1, \dots, D_\mu$ werden Potenzreihen von t_2, \dots, t_n , die sämmtlich an der Stelle ($t_2 = 0, \dots, t_n = 0$) verschwinden und mit

$$\overset{3}{\mathfrak{P}}_1(t_2, \dots, t_n), \dots, \overset{3}{\mathfrak{P}}_{\nu-\mu}(t_2, \dots, t_n); \quad \overset{4}{\mathfrak{P}}_1(t_2, \dots, t_n), \dots, \overset{4}{\mathfrak{P}}_\mu(t_2, \dots, t_n)$$

bezeichnet werden mögen. Damit $\mathfrak{P}_1(x_1, \dots, x_n)$ durch $\mathfrak{P}_0(x_1, \dots, x_n)$ theilbar sei, müssen nun

$$\overset{4}{\mathfrak{P}}_1(t_2, \dots, t_n), \dots, \overset{4}{\mathfrak{P}}_\mu(t_2, \dots, t_n)$$

sämmtlich verschwinden, wenn

$$|t_2| \leq \delta_1, \dots, |t_n| \leq \delta_1.$$

Dies ist aber nur möglich, wenn in jeder Reihe sämmtliche Coefficienten gleich Null sind.

Angenommen nun, diese Bedingung sei erfüllt, so hat man

$$\begin{aligned} G_1(t_1, t_2, \dots, t_n) &= G_0(t_1, t_2, \dots, t_n) \cdot (t_1^{\nu-\mu} + \dots + \overset{3}{\mathfrak{P}}_{\nu-\mu}(t_2, \dots, t_n)) \\ &= G_0(t_1, t_2, \dots, t_n) \cdot G_3(t_1, t_2, \dots, t_n), \end{aligned}$$

und daher

$$\begin{aligned} \mathfrak{P}_0(x_1, \dots, x_n) &= G_0(t_1, t_2, \dots, t_n) \cdot \overline{\mathfrak{P}}_0(t_1, t_2, \dots, t_n) \\ \mathfrak{P}_1(x_1, \dots, x_n) &= G_0(t_1, t_2, \dots, t_n) \cdot G_3(t_1, t_2, \dots, t_n) \cdot \overline{\mathfrak{P}}_1(t_1, t_2, \dots, t_n) \\ &= \mathfrak{P}_0(x_1, x_2, \dots, x_n) \cdot G_3(t_1, t_2, \dots, t_n) \cdot \frac{\overline{\mathfrak{P}}_1(t_1, t_2, \dots, t_n)}{\overline{\mathfrak{P}}_0(t_1, t_2, \dots, t_n)} \\ &= \mathfrak{P}_0(x_1, x_2, \dots, x_n) \cdot \overline{\mathfrak{P}}_2(t_1, t_2, \dots, t_n). \end{aligned}$$

Verwandelt man nunmehr $\overline{\mathfrak{P}}_2(t_1, \dots, t_n)$ in eine Potenzreihe von x_1, \dots, x_n , so

ergiebt sich

$$\mathfrak{P}_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = \mathfrak{P}_0(x_1, x_2, \dots, x_n) \mathfrak{P}_2(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Wir haben also folgenden Satz:

Es seien $\mathfrak{P}_0(x_1, \dots, x_n)$, $\mathfrak{P}_1(x_1, \dots, x_n)$ zwei Potenzreihen von x_1, \dots, x_n , welche beide an der Stelle $(x_1 = 0, \dots, x_n = 0)$ verschwinden. Man bilde auf die angegebene Weise die beiden Ausdrücke

$$t_1^\mu + \overset{\circ}{\mathfrak{P}}_1(t_2, \dots, t_n) t_1^{\mu-1} + \dots + \overset{\circ}{\mathfrak{P}}_\mu(t_2, \dots, t_n) \\ t_1^\nu + \overset{\dagger}{\mathfrak{P}}_1(t_2, \dots, t_n) t_1^{\nu-1} + \dots + \overset{\dagger}{\mathfrak{P}}_\nu(t_2, \dots, t_n),$$

und setze aus $\overset{\circ}{\mathfrak{P}}_1, \dots, \overset{\circ}{\mathfrak{P}}_\mu, \overset{\dagger}{\mathfrak{P}}_1, \dots, \overset{\dagger}{\mathfrak{P}}_\nu$ die Potenzreihen

$$\overset{\ddagger}{\mathfrak{P}}_1(t_2, \dots, t_n), \dots, \overset{\ddagger}{\mathfrak{P}}_\mu(t_2, \dots, t_n)$$

zusammen. Die nothwendige und hinreichende Bedingung dafür, dass $\mathfrak{P}_1(x_1, \dots, x_n)$ durch $\mathfrak{P}_0(x_1, \dots, x_n)$ theilbar sei, besteht dann darin, dass in jeder der Reihen $\overset{\ddagger}{\mathfrak{P}}_1, \dots, \overset{\ddagger}{\mathfrak{P}}_\mu$ sämtliche Coefficienten gleich Null sein müssen.

Es geht aber auch aus dem Vorstehenden hervor, dass nur in dem Falle, wo eine der mit $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ bezeichneten Zahlen negativ ist, \mathfrak{P}_1 nicht durch \mathfrak{P}_0 theilbar ist. Daraus lässt sich schliessen:

Kann man zeigen, dass der absolute Betrag des Quotienten

$$\frac{\mathfrak{P}_1(x_1, \dots, x_n)}{\mathfrak{P}_0(x_1, \dots, x_n)},$$

wenn (x_1, \dots, x_n) in einer gewissen Umgebung der Stelle $(0, \dots, 0)$ und so, dass $\mathfrak{P}_0(x_1, \dots, x_n)$ nicht gleich Null ist, angenommen wird, stets kleiner als eine angebbare Grösse ist, so reicht dies aus, um festzustellen, dass $\mathfrak{P}_1(x_1, \dots, x_n)$ durch $\mathfrak{P}_0(x_1, \dots, x_n)$ theilbar ist.

Denn wäre das Letztere nicht der Fall, so müsste wenigstens eine der Zahlen $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ negativ sein, und es existirte, wie gezeigt worden, innerhalb jeder Umgebung der Stelle $(0, \dots, 0)$ ein Werthsystem (x_1, \dots, x_n) , für welches der absolute Betrag des in Rede stehenden Quotienten jede angebbare Grösse überträfe, ohne dass $\mathfrak{P}_0(x_1, \dots, x_n)$ gleich Null wäre; was der Voraussetzung widerspricht.

In jedem Falle, wo entschieden werden kann, ob der Quotient $\frac{\mathfrak{P}_1}{\mathfrak{P}_0}$ die angegebene Beschaffenheit hat oder nicht, ist man demnach der Bildung der Reihen $\mathfrak{P}_1, \dots, \mathfrak{P}_\mu$ überhoben.

Es soll nun ferner untersucht werden, unter welchen Bedingungen zwei Reihen $\mathfrak{P}_0(x_1, \dots, x_n), \mathfrak{P}_1(x_1, \dots, x_n)$, die beide an der Stelle $(0, \dots, 0)$ verschwinden, einen gemeinschaftlichen Theiler von derselben Form, der ebenfalls an der Stelle $(0, \dots, 0)$ verschwindet, besitzen.

Angenommen, man habe

$$\begin{aligned}\mathfrak{P}_0(x_1, \dots, x_n) &= \mathfrak{P}_2(x_1, \dots, x_n) \cdot \mathfrak{P}_3(x_1, \dots, x_n), \\ \mathfrak{P}_1(x_1, \dots, x_n) &= \mathfrak{P}_2(x_1, \dots, x_n) \cdot \mathfrak{P}_4(x_1, \dots, x_n),\end{aligned}$$

und es sei $\mathfrak{P}_2(0, \dots, 0) = 0$. Man verwandle wieder $\mathfrak{P}_0, \mathfrak{P}_1$ auf die angegebene Weise in Functionen von t_1, \dots, t_n . Zufolge der in Betreff der Functionen $\mathfrak{P}_0(g_{11}t_1, \dots, g_{n1}t_1), \mathfrak{P}_1(g_{11}t_1, \dots, g_{n1}t_1)$ gemachten Voraussetzung kann auch $\mathfrak{P}_2(g_{11}t_1, \dots, g_{n1}t_1)$ nicht für jeden Werth von t_1 verschwinden; die höchste Potenz von t_1 , durch welche diese Function theilbar ist, habe den Exponenten λ , so kann man

$$\mathfrak{P}_2(x_1, \dots, x_n) \text{ auf die Form } G_2(t_1, t_2, \dots, t_n) \overline{\mathfrak{P}}_2(t_1, \dots, t_n)$$

bringen, wo

$$G_2(t_1, t_2, \dots, t_n) = t_1^\lambda + \mathfrak{P}_1(t_2, \dots, t_n) t_1^{\lambda-1} + \dots + \mathfrak{P}_\lambda(t_2, \dots, t_n),$$

und $\overline{\mathfrak{P}}_2(0, \dots, 0)$ nicht gleich Null ist.

Dann hat man

$$G_0(t_1, t_2, \dots, t_n) = G_2(t_1, t_2, \dots, t_n) \frac{\overline{\mathfrak{P}}_2(t_1, \dots, t_n)}{\mathfrak{P}_0(t_1, \dots, t_n)} \mathfrak{P}_3(x_1, \dots, x_n) = G_2(t_1, t_2, \dots, t_n) \mathfrak{P}_5(t_1, \dots, t_n),$$

$$G_1(t_1, t_2, \dots, t_n) = G_2(t_1, t_2, \dots, t_n) \frac{\overline{\mathfrak{P}}_2(t_1, \dots, t_n)}{\mathfrak{P}_1(t_1, \dots, t_n)} \mathfrak{P}_4(x_1, \dots, x_n) = G_2(t_1, t_2, \dots, t_n) \mathfrak{P}_6(t_1, \dots, t_n).$$

Es sind also

$$G_0(t_1, t_2, \dots, t_n), \quad G_1(t_1, t_2, \dots, t_n)$$

beide durch $G_2(t_1, t_2, \dots, t_n)$ theilbar.

Nun kann man bekanntlich, wenn

$$A_0, A_1, \dots, A_\mu, \quad B_0, B_1, \dots, B_\nu$$

unbestimmte Grössen bedeuten, aus denselben eine Reihe von ganzen Functionen

$$C, C_1, C_2, \dots$$

zusammensetzen, mittelst welcher die nothwendigen und hinreichenden Bedingungen dafür, dass bei bestimmten Werthen von $A_0, \dots, A_\mu, B_0, \dots, B_\nu$ und unter der Voraussetzung, dass weder A_0 noch B_0 gleich Null sei, die Functionen

$$A_0 t_1^\mu + \dots + A_\mu, \quad B_0 t_1^\nu + \dots + B_\nu$$

einen grössten gemeinschaftlichen Theiler λ^{ten} Grades besitzen, sich folgendermassen ausdrücken lassen: Es muss C_λ in der Reihe der Grössen C, C_1, C_2, \dots die erste sein, welche nicht gleich Null ist.

Diese Bedingung als erfüllt vorausgesetzt, stellt sich dann der grösste gemeinschaftliche Theiler der beiden Functionen in der Form

$$t_1^\lambda + \frac{C'_\lambda}{C_\lambda} t_1^{\lambda-1} + \dots + \frac{C_\lambda^{(\lambda)}}{C_\lambda}$$

dar, wo $C'_\lambda, \dots, C_\lambda^{(\lambda)}$ ebenfalls ganze Functionen von $A_0, \dots, A_\mu, B_0, \dots, B_\nu$ sind. Nimmt man

$$\begin{aligned} A_0 &= 1, & A_1 &= \mathfrak{P}_1^0(t_2, \dots, t_n), & \dots & A_\mu &= \mathfrak{P}_\mu^0(t_2, \dots, t_n), \\ B_0 &= 1, & B_1 &= \mathfrak{P}_1^1(t_2, \dots, t_n), & \dots & B_\nu &= \mathfrak{P}_\nu^1(t_2, \dots, t_n), \end{aligned}$$

so werden $C, C_1, C_2, \dots; C'_\lambda, C''_\lambda, \dots$ Potenzreihen von t_2, \dots, t_n , die mit

$$\mathfrak{P}(t_2, \dots, t_n), \mathfrak{P}^{(1)}(t_2, \dots, t_n), \mathfrak{P}^{(2)}(t_2, \dots, t_n), \dots; \mathfrak{P}^{(\lambda, 1)}(t_2, \dots, t_n), \mathfrak{P}^{(\lambda, 2)}(t_2, \dots, t_n), \dots$$

bezeichnet werden mögen. Dann muss, damit für ein bestimmtes Werthsystem (t_2, \dots, t_n)

$$G_0(t_1, t_2, \dots, t_n), \quad G_1(t_1, t_2, \dots, t_n),$$

als Functionen von t_1 betrachtet, einen gemeinschaftlichen Theiler haben,

$$\mathfrak{P}(t_2, \dots, t_n) = 0$$

sein. Diese Gleichung besteht also bei der in Betreff der Functionen $\mathfrak{P}_0(x_1, \dots, x_n), \mathfrak{P}_1(x_1, \dots, x_n)$ gemachten Annahme, wenn man den Grössen t_2, \dots, t_n solche Werthe giebt, für welche die angegebenen Umformungen von $\mathfrak{P}_0, \mathfrak{P}_1$ gelten; woraus folgt, dass die Coefficienten der Reihe $\mathfrak{P}(t_2, \dots, t_n)$ sämmtlich gleich Null sein müssen.

Damit ist die nothwendige Bedingung dafür, dass $\mathfrak{P}_0(x_1, \dots, x_n), \mathfrak{P}_1(x_1, \dots, x_n)$ einen gemeinschaftlichen Theiler besitzen, festgestellt.

Angenommen nun, es seien für zwei gegebene Potenzreihen $\mathfrak{P}_0(x_1, \dots, x_n), \mathfrak{P}_1(x_1, \dots, x_n)$ die im Vorstehenden definirten Functionen

$$G_0(t_1, t_2, \dots, t_n), G_1(t_1, t_2, \dots, t_n), \\ \mathfrak{P}(t_2, \dots, t_n), \mathfrak{P}^{(1)}(t_2, \dots, t_n), \mathfrak{P}^{(2)}(t_2, \dots, t_n), \dots$$

gebildet, und es ergebe sich, dass die Coefficienten der Reihe $\mathfrak{P}(t_2, \dots, t_n)$ sämmtlich gleich Null sind, so wie ferner, dass $\mathfrak{P}^{(2)}$ in der Reihe der Functionen $\mathfrak{P}, \mathfrak{P}^{(1)}, \dots$ die erste sei, die nicht identisch gleich Null ist. Nimmt man dann im Innern des gemeinschaftlichen Convergenzbezirkes der Reihen

$$\overset{\circ}{\mathfrak{P}}_1(t_2, \dots, t_n), \dots \overset{\circ}{\mathfrak{P}}_\mu(t_2, \dots, t_n), \overset{\circ}{\mathfrak{P}}_1(t_2, \dots, t_n), \dots \overset{\circ}{\mathfrak{P}}_\nu(t_2, \dots, t_n)$$

irgend ein bestimmtes Werthsystem (τ_2, \dots, τ_n) der Grössen t_2, \dots, t_n an und unterwirft diese der Bedingung, dass

$$|t_2| \leq |\tau_2|, \dots, |t_n| \leq |\tau_n|$$

und $\mathfrak{P}^{(2)}(t_2, \dots, t_n)$ nicht gleich Null sein soll, so haben

$$G_0(t_1, t_2, \dots, t_n), G_1(t_1, t_2, \dots, t_n),$$

als Functionen von t_1 betrachtet, einen grössten gemeinschaftlichen Theiler vom Grade λ , der zunächst in der Form

$$t_1^\lambda + \frac{\mathfrak{P}^{(2,1)}(t_2, \dots, t_n)}{\mathfrak{P}^{(2)}(t_2, \dots, t_n)} t_1^{\lambda-1} + \dots + \frac{\mathfrak{P}^{(2,\lambda)}(t_2, \dots, t_n)}{\mathfrak{P}^{(2)}(t_2, \dots, t_n)}$$

erhalten wird. Die Werthe von t_1 , für welche diese Function verschwindet, sind sämmtlich unter denen, für die $G_0(t_1, t_2, \dots, t_n) = 0$ wird, enthalten. Jeder der letzteren aber hat, wie man auch t_2, \dots, t_n den angegebenen Bedingungen entsprechend annehmen möge, einen endlichen Werth, dessen absoluter Betrag unterhalb einer angebbaren, von t_2, \dots, t_n unabhängigen Grenze liegt. Dasselbe gilt also auch von dem Bruch

$$\frac{\mathfrak{P}^{(2,\lambda')}(t_2, \dots, t_n)}{\mathfrak{P}^{(2)}(t_2, \dots, t_n)}, \quad (\lambda' = 1, \dots, \lambda)$$

woraus sich nach dem Obigen ergibt, dass der Zähler durch den Nenner theilbar ist. Damit ist bewiesen, dass der vorstehende gemeinschaftliche

Theiler von $G_0(t_1, t_2, \dots, t_n)$ und $G_1(t_1, t_2, \dots, t_n)$ in der Form

$$G_2^n(t_1, t_2, \dots, t_n) = t_1^2 + \mathfrak{P}_1^2(t_2, \dots, t_n)t_1^{2-1} + \dots + \mathfrak{P}_\lambda^2(t_2, \dots, t_n)$$

dargestellt werden kann.

Betrachtet man nun wieder $G_0(t_1, t_2, \dots, t_n)$, $G_1(t_1, t_2, \dots, t_n)$, $G_2(t_1, t_2, \dots, t_n)$ als Functionen von t_1 und dividirt die beiden ersten durch die dritte, so er giebt sich:

$$G_0(t_1, t_2, \dots, t_n) = G_2(t_1, t_2, \dots, t_n) G_3(t_1, t_2, \dots, t_n),$$

$$G_1(t_1, t_2, \dots, t_n) = G_2(t_1, t_2, \dots, t_n) G_4(t_1, t_2, \dots, t_n),$$

wo G_3, G_4 ganze Functionen von t_1 , deren Coefficienten Potenzreihen von t_2, \dots, t_n sind, bezeichnen.

Multiplicirt man sodann die erste dieser Gleichungen mit $\overline{\mathfrak{P}}_0(t_1, \dots, t_n)$, die zweite mit $\overline{\mathfrak{P}}_1(t_1, \dots, t_n)$ und drückt darauf t_1, \dots, t_n durch x_1, \dots, x_n aus, so er giebt sich:

$$\mathfrak{P}_0(x_1, \dots, x_n) = \mathfrak{P}_2(x_1, \dots, x_n) \mathfrak{P}_3(x_1, \dots, x_n),$$

$$\mathfrak{P}_1(x_1, \dots, x_n) = \mathfrak{P}_2(x_1, \dots, x_n) \mathfrak{P}_4(x_1, \dots, x_n),$$

wo

$$\mathfrak{P}_2(x_1, \dots, x_n) = G_2(t_1, t_2, \dots, t_n)$$

ist.

Es lässt sich nun ferner beweisen, dass $\mathfrak{P}_3(x_1, \dots, x_n)$, $\mathfrak{P}_4(x_1, \dots, x_n)$ nicht beide durch eine an der Stelle $(x_1 = 0, \dots, x_n = 0)$ verschwindende Potenzreihe von x_1, \dots, x_n theilbar sind.

Es ist:

$$\mathfrak{P}_3(x_1, \dots, x_n) = G_3(t_1, t_2, \dots, t_n) \overline{\mathfrak{P}}_0(t_1, t_2, \dots, t_n),$$

$$\mathfrak{P}_4(x_1, \dots, x_n) = G_4(t_1, t_2, \dots, t_n) \overline{\mathfrak{P}}_1(t_1, t_2, \dots, t_n).$$

Wären nun $\mathfrak{P}_3(x_1, \dots, x_n)$, $\mathfrak{P}_4(x_1, \dots, x_n)$ beide durch eine an der Stelle $(x_1 = 0, \dots, x_n = 0)$ verschwindende Potenzreihe von x_1, \dots, x_n theilbar, so müssten sich, wie oben gezeigt worden ist, zwei Grössen δ, δ_1 so annehmen lassen, dass für jedes den Bedingungen

$$|t_2| \leq \delta, \dots, |t_n| \leq \delta_1$$

genügende Werthsystem (t_2, \dots, t_n) die Gleichungen

$$G_3(t_1, t_2, \dots, t_n) \overline{\mathfrak{P}}_0(t_1, \dots, t_n) = 0,$$

$$G_4(t_1, t_2, \dots, t_n) \overline{\mathfrak{P}}_1(t_1, \dots, t_n) = 0$$

durch einen und denselben Werth von t_1 , dessen absoluter Betrag kleiner als δ wäre, befriedigt würden. Bei hinlänglich kleinen Werthen von δ, δ_1 müsste dieser Werth von t_1 also den beiden Gleichungen

$$\begin{aligned} G_3(t_1, t_2, \dots t_n) &= 0, \\ G_4(t_1, t_2, \dots t_n) &= 0 \end{aligned}$$

genügen, und es hätten somit für jedes den angegebenen Bedingungen entsprechende Werthsystem $(t_2, \dots t_n)$

$$G_3(t_1, t_2, \dots t_n) \text{ und } G_4(t_1, t_2, \dots t_n),$$

als Functionen von t_1 betrachtet, einen gemeinschaftlichen Theiler, und daher

$$G_0(t_1, t_2, \dots t_n) \text{ und } G_1(t_1, t_2, \dots t_n)$$

einen gemeinschaftlichen Theiler von höherem als dem λ^{ten} Grade. Dies ist aber nicht der Fall, wenn man $t_2, \dots t_n$ so annimmt, dass $\mathfrak{P}^{(\lambda)}(t_2, \dots t_n)$ nicht verschwindet; und es ist somit die Annahme, dass $\mathfrak{P}_3(x_1, \dots x_n)$ und $\mathfrak{P}_4(x_1, \dots x_n)$ beide durch eine an der Stelle $(x_1 = 0, \dots x_n = 0)$ verschwindende Potenzreihe von $x_1, \dots x_n$ theilbar seien, unstatthaft.

Wir haben also den Satz:

Die nothwendige und hinreichende Bedingung dafür, dass zwei gegebene, an der Stelle $(x_1 = 0, \dots x_n = 0)$ verschwindende Potenzreihen $\mathfrak{P}_0(x_1, \dots x_n), \mathfrak{P}_1(x_1, \dots x_n)$ beide durch eine dritte Reihe von derselben Beschaffenheit theilbar seien, besteht darin, dass die Coefficienten einer bestimmten, nach der gegebenen Vorschrift zu bildenden Potenzreihe von $n-1$ Veränderlichen $t_2, \dots t_n$ sämmtlich gleich Null sein müssen. Ferner ist es, wenn diese Bedingung erfüllt ist, stets möglich, $\mathfrak{P}_0(x_1, \dots x_n), \mathfrak{P}_1(x_1, \dots x_n)$ in der Form

$$\begin{aligned} \mathfrak{P}_0(x_1, \dots x_n) &= \mathfrak{P}_2(x_1, \dots x_n) \mathfrak{P}_3(x_1, \dots x_n) \\ \mathfrak{P}_1(x_1, \dots x_n) &= \mathfrak{P}_2(x_1, \dots x_n) \mathfrak{P}_4(x_1, \dots x_n) \end{aligned}$$

so auszudrücken, dass $\mathfrak{P}_3(x_1, \dots x_n), \mathfrak{P}_4(x_1, \dots x_n)$ keinen an der Stelle $(x_1 = 0, \dots x_n = 0)$ verschwindenden gemeinschaftlichen Theiler haben.*)

*) Es lässt sich aus dem Vorhergehenden noch leicht ableiten, dass jede Potenzreihe von $x_1, \dots x_n$, durch welche die gegebenen Reihen beide theilbar sind, nothwendig ein Theiler von $\mathfrak{P}_2(x_1, \dots x_n)$ ist.

Hieran knüpfen sich nun noch einige andere Sätze.

Ich nehme jetzt an, es seien $\mathfrak{P}_0(x_1, \dots, x_n)$, $\mathfrak{P}_1(x_1, \dots, x_n)$ nicht beide durch eine an der Stelle $(0, \dots, 0)$ verschwindende Potenzreihe von x_1, \dots, x_n theilbar, aber $\mathfrak{P}_0(0, \dots, 0)$ und $\mathfrak{P}_1(0, \dots, 0)$ gleich Null. Dann giebt es, wenn $n > 2$ ist, in jeder Umgebung der Stelle $(0, \dots, 0)$ unendlich viele Werthsysteme (x_1, \dots, x_n) , für die sowohl $\mathfrak{P}_0(x_1, \dots, x_n)$ als $\mathfrak{P}_1(x_1, \dots, x_n)$ verschwindet. Denn man drücke wieder $\mathfrak{P}_0(x_1, \dots, x_n)$, $\mathfrak{P}_1(x_1, \dots, x_n)$ auf die angegebene Weise durch die Veränderlichen t_1, t_2, \dots, t_n aus, bestimme die Function $\mathfrak{P}(t_2, \dots, t_n)$ und nehme auch die Grössen δ, δ_1 so an, wie oben festgesetzt worden ist. Dann giebt es unendlich viele, den Bedingungen

$$|t_2| \leq \delta_1, \dots, |t_n| \leq \delta_1$$

entsprechende Werthsysteme (t_2, \dots, t_n) , für die

$$\mathfrak{P}(t_2, \dots, t_n) = 0$$

ist, und zu jedem dieser Werthsysteme giebt es wenigstens einen Werth von t_1 , dessen absoluter Betrag kleiner als δ ist, und der die beiden Gleichungen

$$G_0(t_1, t_2, \dots, t_n) = 0,$$

$$G_1(t_1, t_2, \dots, t_n) = 0$$

befriedigt; woraus das zu Beweisende unmittelbar folgt.

Man nehme jetzt im Gebiete der Grössen x_1, \dots, x_n irgend einen die Stelle $(0, \dots, 0)$ umgebenden Bezirk so an, dass für jedes demselben angehörige Werthsystem (x_1, \dots, x_n) nicht nur die Gleichungen

$$\mathfrak{P}_0(x_1, \dots, x_n) = G_0(t_1, t_2, \dots, t_n) \overline{\mathfrak{P}}_0(t_1, \dots, t_n),$$

$$\mathfrak{P}_1(x_1, \dots, x_n) = G_1(t_1, t_2, \dots, t_n) \overline{\mathfrak{P}}_1(t_1, \dots, t_n)$$

gelten, sondern auch $\overline{\mathfrak{P}}_0(t_1, \dots, t_n)$, $\overline{\mathfrak{P}}_1(t_1, \dots, t_n)$ beide einen von Null verschiedenen Werth haben; und setze, unter (c_1, \dots, c_n) irgend ein bestimmtes Werthsystem der Grössen x_1, \dots, x_n in dem genannten Bezirke und unter (b_1, \dots, b_n) das entsprechende Werthsystem der Grössen t_1, \dots, t_n verstehend,

$$x_1 = c_1 + u_1, \dots, x_n = c_n + u_n,$$

$$t_1 = b_1 + s_1, \dots, t_n = b_n + s_n,$$

so dass man

$$\begin{aligned} u_1 &= g_{11}s_1 + \dots + g_{1n}s_n, \quad \dots \quad u_n = g_{n1}s_1 + \dots + g_{nn}s_n, \\ \mathfrak{P}_0(c_1 + u_1, \dots, c_n + u_n) &= G_0(b_1 + s_1, b_2 + s_2, \dots, b_n + s_n) \overline{\mathfrak{P}}_0(b_1 + s_1, \dots, b_n + s_n), \\ \mathfrak{P}_1(c_1 + u_1, \dots, c_n + u_n) &= G_1(b_1 + s_1, b_2 + s_2, \dots, b_n + s_n) \overline{\mathfrak{P}}_1(b_1 + s_1, \dots, b_n + s_n) \end{aligned}$$

hat.

Es können nun $\mathfrak{P}_0(c_1 + u_1, \dots, c_n + u_n)$, $\mathfrak{P}_1(c_1 + u_1, \dots, c_n + u_n)$, als Potenzreihen von u_1, \dots, u_n betrachtet, einen an der Stelle ($u_1 = 0, \dots, u_n = 0$) verschwindenden gemeinschaftlichen Theiler nur in dem Falle besitzen, wo $\mathfrak{P}_0(c_1, \dots, c_n)$, $\mathfrak{P}_1(c_1, \dots, c_n)$ beide gleich Null sind. Dann ist auch

$$\begin{aligned} G_0(b_1, b_2, \dots, b_n) &= 0, \\ G_1(b_1, b_2, \dots, b_n) &= 0; \end{aligned}$$

es geht aber aus den Ausdrücken von G_0, G_1 hervor, dass weder $G_0(b_1 + s_1, b_2, \dots, b_n)$ noch $G_1(b_1 + s_1, b_2, \dots, b_n)$ für jeden Werth von s_1 verschwindet; man kann also $G_0(b_1 + s_1, b_2 + s_2, \dots, b_n + s_n)$ auf die Form $(s_1^\mu + \overset{\circ}{\mathfrak{P}}(s_2, \dots, s_n)_1 s_1^{\mu-1} + \dots + \overset{\circ}{\mathfrak{P}}(s_2, \dots, s_n)_\mu) \overline{\mathfrak{P}}(s_1, \dots, s_n)_0$, $G_1(b_1 + s_1, b_2 + s_2, \dots, b_n + s_n) \gg \gg \gg (s_1^\nu + \overset{\frac{1}{2}}{\mathfrak{P}}(s_2, \dots, s_n)_1 s_1^{\nu-1} + \dots + \overset{\frac{1}{2}}{\mathfrak{P}}(s_2, \dots, s_n)_\nu) \overline{\mathfrak{P}}(s_1, \dots, s_n)_1$ in der Art bringen, dass

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{\mathfrak{P}}(0, \dots, 0)_1, \dots, \overset{\circ}{\mathfrak{P}}(0, \dots, 0)_\mu, \\ \overset{\frac{1}{2}}{\mathfrak{P}}(0, \dots, 0)_1, \dots, \overset{\frac{1}{2}}{\mathfrak{P}}(0, \dots, 0)_\nu \end{aligned}$$

sämmtlich gleich Null sind, während $\overline{\mathfrak{P}}(0, \dots, 0)_0, \overline{\mathfrak{P}}(0, \dots, 0)_1$ beide einen von Null verschiedenen Werth haben.

Angenommen nun, $\mathfrak{P}_0(c_1 + u_1, \dots, c_n + u_n)$, $\mathfrak{P}_1(c_1 + u_1, \dots, c_n + u_n)$ wären beide durch eine dritte an der Stelle ($u_1 = 0, \dots, u_n = 0$) verschwindende Potenzreihe von u_1, \dots, u_n theilbar, so würde sich nach dem Vorhergehenden zu jedem System unendlich kleiner Werthe von s_2, \dots, s_n ein ebenfalls unendlich kleiner Werth von s_1 finden lassen, für den

$$G_0(b_1 + s_1, b_2 + s_2, \dots, b_n + s_n), \quad G_1(b_1 + s_1, b_2 + s_2, \dots, b_n + s_n)$$

beide gleich Null wären. Dann aber müsste

$$\mathfrak{P}(b_2 + s_2, \dots, b_n + s_n) = 0$$

für jedes System unendlich kleiner Werthe von s_2, \dots, s_n sein, was nach einem

II.

bekanntem Satze nur der Fall ist, wenn

$$\mathfrak{F}(t_2, \dots, t_n)$$

für jedes dem Convergenzbezirk der Reihe angehörige Werthsystem t_2, \dots, t_n verschwindet, also die Coefficienten der Reihe sämmtlich gleich Null sind. Bei der in Betreff der Reihen $\mathfrak{F}_0(x_1, \dots, x_n)$, $\mathfrak{F}_1(x_1, \dots, x_n)$ gemachten Annahme ist aber $\mathfrak{F}(t_2, \dots, t_n)$ nicht identisch gleich Null; und es ist somit erwiesen:

Wenn die Reihen

$$\mathfrak{F}_0(x_1, \dots, x_n), \quad \mathfrak{F}_1(x_1, \dots, x_n)$$

keinen an der Stelle $(x_1 = 0, \dots, x_n = 0)$ verschwindenden gemeinschaftlichen Theiler besitzen, so haben auch

$$\mathfrak{F}_0(c_1 + u_1, \dots, c_n + u_n), \quad \mathfrak{F}_1(c_1 + u_1, \dots, c_n + u_n),$$

als Potenzreihen von u_1, \dots, u_n betrachtet, keinen an der Stelle $(u_1 = 0, \dots, u_n = 0)$ verschwindenden gemeinschaftlichen Theiler, vorausgesetzt, dass die Stelle $(x_1 = c_1, \dots, x_n = c_n)$ innerhalb einer gewissen — oben definirten — Umgebung der Stelle $(x_1 = 0, \dots, x_n = 0)$ angenommen werde.

3. Zur Theorie der eindeutigen analytischen Functionen beliebig vieler Veränderlichen.

Ich sage von einer eindeutigen analytischen Function $f(x_1, \dots, x_n)$, sie verhalte sich an einer bestimmten Stelle (a_1, \dots, a_n) regulär, wenn sie in einer gewissen Umgebung dieser Stelle durch eine Reihe von der Form

$$\sum_{(v_1, \dots, v_n = 0, \dots, \infty)} \{ A_{v_1, \dots, v_n} (x_1 - a_1)^{v_1} \dots (x_n - a_n)^{v_n} \}$$

dargestellt werden kann, wo v_1, \dots, v_n ganze, nicht negative Zahlen bezeichnen und unter den Coefficienten A_{v_1, \dots, v_n} von x_1, \dots, x_n unabhängige Grössen zu verstehen sind. Diese Reihe nenne ich dann ein reguläres Element der Function. Dabei ist zu bemerken, dass die Grössen a_1, \dots, a_n zum Theil oder auch alle den Werth ∞ haben können, wenn festgesetzt wird, dass das Zeichen $(x - \infty)$ gleichbedeutend mit $\frac{1}{x}$ sein soll.

Aus der vorstehenden Definition ergibt sich nun sofort:

Verhält sich eine eindeutige analytische Function $f(x_1, \dots, x_n)$ regulär an einer bestimmten Stelle (a_1, \dots, a_n) , so gilt dasselbe auch von jeder Stelle (a'_1, \dots, a'_n) , die in einer gewissen Umgebung der ersteren liegt.

Denn es sei $\mathfrak{P}(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)$ die Reihe, welche die betrachtete Function in der Umgebung von (a_1, \dots, a_n) darstellt, so lässt sich aus derselben, wenn man im Innern ihres Convergenzbezirkes eine Stelle (a'_1, \dots, a'_n) willkürlich annimmt, eine andere Reihe $\mathfrak{P}_1(x_1 - a'_1, \dots, x_n - a'_n)$ dergestalt ableiten, dass für alle einer gewissen Umgebung der Stelle (a'_1, \dots, a'_n) angehörigen Werthsysteme (x_1, \dots, x_n) die Gleichung

$$\mathfrak{P}_1(x_1 - a'_1, \dots, x_n - a'_n) = \mathfrak{P}(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)$$

besteht. Es ist also $\mathfrak{P}_1(x_1 - a'_1, \dots, x_n - a'_n)$ ebenfalls ein Element der Function $f(x_1, \dots, x_n)$, und es verhält sich diese demnach auch an der Stelle (a'_1, \dots, a'_n) regulär.

Die Gesammtheit der Stellen, an denen die Function $f(x_1, \dots, x_n)$ sich regulär verhält, bildet hiernach ein $2n$ -fach ausgedehntes Continuum im Gebiet der Grössen x_1, \dots, x_n .

Dieses Continuum ist nun nothwendig begrenzt.

Angenommen nämlich, es sei $\mathfrak{P}(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)$ irgend ein Element der Function f , wobei vorausgesetzt werde, dass die Stelle (a_1, \dots, a_n) im Endlichen liege; so können zwei Fälle eintreten:

1. Convergiert die Reihe $\mathfrak{P}(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)$ für jedes System endlicher Werthe der Grössen x_1, \dots, x_n , so besteht, wenn $\mathfrak{P}_1(x_1 - a'_1, \dots, x_n - a'_n)$ irgend ein reguläres Element der Function f ist, für jedes dem Convergenzbezirk der Reihe \mathfrak{P}_1 angehörige System endlicher Werthe von x_1, \dots, x_n die Gleichung

$$\mathfrak{P}_1(x_1 - a'_1, \dots, x_n - a'_n) = \mathfrak{P}(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n).$$

Dies ist aber unmöglich, wenn die Grössen a'_1, \dots, a'_n nicht sämtlich endliche Werthe haben, woraus folgt, dass in dem angenommenen Falle eine Stelle (x_1, \dots, x_n) im Innern oder an der Grenze des in Rede stehenden Continuum liegt, je nachdem die Grössen x_1, \dots, x_n sämtlich endliche Werthe haben oder nicht.

2. Liegen die den Convergenzbezirk der Reihe $\mathfrak{P}(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)$ begrenzenden Stellen alle oder zum Theil im Endlichen, so giebt es, wie in

der Functionentheorie gezeigt wird, unter ihnen mindestens eine Stelle, an der sich $f(x_1, \dots, x_n)$ nicht regulär verhält; eine solche Stelle liegt dann auch an der Grenze des in Rede stehenden Continuum.

Dies festgestellt, nenne ich jede an der Grenze dieses Continuum liegende Stelle eine singuläre Stelle für die betrachtete Function.

Ist (a'_1, \dots, a'_n) eine solche singuläre Stelle, so kann es möglicherweise eine Potenzreihe

$$\mathfrak{P}_0(x_1 - a'_1, \dots, x_n - a'_n)$$

geben, die für $x_1 = a'_1, \dots, x_n = a'_n$ verschwindet und so beschaffen ist, dass das Product

$$\mathfrak{P}_0(x_1 - a'_1, \dots, x_n - a'_n) f(x_1, \dots, x_n)$$

für alle einer gewissen Umgebung der Stelle (a'_1, \dots, a'_n) angehörig Werthsysteme (x_1, \dots, x_n) in der Form

$$\mathfrak{P}_1(x_1 - a'_1, \dots, x_n - a'_n)$$

dargestellt werden kann. In diesem Falle nenne ich (a'_1, \dots, a'_n) eine ausserwesentliche, in jedem andern Falle eine wesentliche singuläre Stelle.

Es giebt aber, wenn $n > 1$ ist, zwei wohl von einander zu unterscheidende Arten von ausserwesentlichen singulären Stellen.

Ist (a_1, \dots, a_n) irgend eine solche Stelle, so lässt sich die Function $f(x_1, \dots, x_n)$ für hinlänglich kleine Werthe der Differenzen $x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n$ stets dergestalt in der Form

$$\frac{\mathfrak{P}_1(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)}{\mathfrak{P}_0(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)}$$

darstellen, dass $\mathfrak{P}_0(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)$, $\mathfrak{P}_1(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)$ nicht beide durch eine dritte, an der Stelle (a_1, \dots, a_n) verschwindende Reihe $\mathfrak{P}(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)$ theilbar sind.

Wenn dann $\mathfrak{P}_1(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)$ an der Stelle (a_1, \dots, a_n) einen von Null verschiedenen Werth hat, so ist für alle einer unendlich kleinen Umgebung der Stelle (a_1, \dots, a_n) angehörig Werthsysteme (x_1, \dots, x_n) der Werth von $f(x_1, \dots, x_n)$ unendlich gross, und daher

$$f(x_1, \dots, x_n) = \infty \text{ für } (x_1 = a_1, \dots, x_n = a_n).$$

Verschwinden dagegen $\mathfrak{P}_0(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)$, $\mathfrak{P}_1(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)$ beide an der Stelle (a_1, \dots, a_n) , so kann man (nach Art. 1), indem man homogene lineare Functionen t_1, t_2, \dots, t_n von $x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n$ einführt, in mannigfaltiger Weise

$$\mathfrak{P}_0(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n) \text{ auf die Form } (t_1^\mu + \overset{\circ}{\mathfrak{P}}_1(t_2, \dots, t_n)t_1^{\mu-1} + \dots + \overset{\circ}{\mathfrak{P}}_\mu(t_2, \dots, t_n))\bar{\mathfrak{P}}_0(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)$$

$$\mathfrak{P}_1(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n) \text{ » » » } (t_1^\nu + \overset{\circ}{\mathfrak{P}}_1(t_2, \dots, t_n)t_1^{\nu-1} + \dots + \overset{\circ}{\mathfrak{P}}_\nu(t_2, \dots, t_n))\bar{\mathfrak{P}}_1(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)$$

bringen, dergestalt dass

$$\overset{\circ}{\mathfrak{P}}_1(t_2, \dots, t_n), \dots, \overset{\circ}{\mathfrak{P}}_\mu(t_2, \dots, t_n), \overset{\circ}{\mathfrak{P}}_1(t_2, \dots, t_n), \dots, \overset{\circ}{\mathfrak{P}}_\nu(t_2, \dots, t_n)$$

für $t_2 = 0, \dots, t_n = 0$ verschwinden, $\bar{\mathfrak{P}}_0(0, \dots, 0)$, $\bar{\mathfrak{P}}_1(0, \dots, 0)$ beide von Null verschieden sind und die Functionen

$$t_1^\mu + \overset{\circ}{\mathfrak{P}}_1(t_2, \dots, t_n)t_1^{\mu-1} + \dots + \overset{\circ}{\mathfrak{P}}_\mu(t_2, \dots, t_n),$$

$$t_1^\nu + \overset{\circ}{\mathfrak{P}}_1(t_2, \dots, t_n)t_1^{\nu-1} + \dots + \overset{\circ}{\mathfrak{P}}_\nu(t_2, \dots, t_n)$$

keinen an der Stelle $(t_1 = 0, \dots, t_n = 0)$ verschwindenden gemeinschaftlichen Theiler besitzen. Dann existiren unzählige Systeme unendlich kleiner Werthe t_1, t_2, \dots, t_n , für welche die erste der vorstehenden Functionen, nicht aber zugleich die zweite verschwindet; woraus folgt, dass es in jeder noch so kleinen Umgebung von (a_1, \dots, a_n) andere Stellen (x_1, \dots, x_n) giebt, an denen $\mathfrak{P}_0(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)$ verschwindet, $\mathfrak{P}_1(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)$ aber nicht, so dass an jeder solchen Stelle $f(x_1, \dots, x_n) = \infty$ ist. Es hat aber, wenn b eine beliebig angenommene endliche Grösse ist, die Function

$$\frac{1}{f(x_1, \dots, x_n) - b}$$

in der Umgebung der Stelle (a_1, \dots, a_n) dieselbe Form wie $f(x_1, \dots, x_n)$; es existiren also in jeder Umgebung von (a_1, \dots, a_n) auch Stellen, an denen

$$\frac{1}{f(x_1, \dots, x_n) - b} = \infty,$$

d. h.

$$f(x_1, \dots, x_n) = b$$

ist. Es kann also $f(x_1, \dots, x_n)$ in dem jetzt betrachteten Falle in einer unendlich kleinen Umgebung der singulären Stelle (a_1, \dots, a_n) jeden

beliebigen Werth annehmen und besitzt deshalb an dieser Stelle selbst keinen bestimmten Werth.

Hierzu ist noch Folgendes zu bemerken:

Die Gesammtheit der Stellen, an denen sich $f(x_1, \dots, x_n)$ wie eine rationale Function verhält — d. h. die Gesammtheit der nicht singulären und der ausserwesentlichen singulären Stellen — ist ein $2n$ -fach ausgedehntes Continuum, dessen Begrenzung die wesentlichen singulären Stellen bilden.

Ist (a_1, \dots, a_n) irgend eine bestimmte Stelle im Innern dieses Continuum, und hat $f(a_1, \dots, a_n)$ einen bestimmten endlichen Werth, so verhält sich, wie schon oben angegeben worden ist, $f(x_1, \dots, x_n)$ in einer bestimmten Umgebung der Stelle (a_1, \dots, a_n) überall regulär.

Ist $f(a_1, \dots, a_n) = \infty$, so giebt es in jeder Umgebung der Stelle (a_1, \dots, a_n) , die keine singuläre Stelle der Function

$$\frac{1}{f(x_1, \dots, x_n)}$$

enthält, unendlich viele, eine $(2n-2)$ -fache Mannigfaltigkeit bildende Stellen, an denen die Function $f(x_1, \dots, x_n)$ den Werth ∞ hat, während sie sich an allen übrigen Stellen des genannten Bereiches regulär verhält.

Hat endlich $f(x_1, \dots, x_n)$ an der Stelle (a_1, \dots, a_n) keinen bestimmten Werth, so giebt es in jeder Umgebung dieser Stelle nicht nur unendlich viele andere singuläre Stellen, an denen $f(x_1, \dots, x_n)$ den Werth ∞ hat — was schon vorhin nachgewiesen ist — sondern auch, wenn $n > 2$ ist, unendlich viele Stellen, an denen $f(x_1, \dots, x_n)$ keinen bestimmten Werth hat. Das Letztere lässt sich folgendermassen zeigen:

Es gelte für alle Werthsysteme (x_1, \dots, x_n) in der Umgebung von (a_1, \dots, a_n) die Gleichung

$$\mathfrak{P}_0(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n) f(x_1, \dots, x_n) = \mathfrak{P}_1(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n),$$

unter der gestatteten Annahme, dass die Potenzreihen $\mathfrak{P}_0, \mathfrak{P}_1$ keinen an der Stelle (a_1, \dots, a_n) verschwindenden gemeinschaftlichen Theiler haben. Innerhalb des gemeinschaftlichen Convergenzbezirks der beiden Reihen nehme man eine Stelle (a'_1, \dots, a'_n) zunächst beliebig an, und setze

$$\begin{aligned} x_1 - a_1 &= \xi_1, & \dots & x_n - a_n &= \xi_n, \\ x_1 - a'_1 &= \xi'_1, & \dots & x_n - a'_n &= \xi'_n. \end{aligned}$$

Ferner sei c_x der Werth von ξ_x für $x_x = a'_x$, und $\eta_x = \xi_x - c_x$, so sind ξ'_x, η_x lineare Functionen von x_x , die beide für $x_x = a'_x$ verschwinden; man hat daher

$$\eta_x = \frac{h_x \xi'_x}{1 + l_x \xi'_x}, \quad \xi'_x = \frac{\eta_x}{h_x - l_x \eta_x}, \quad (x = 1, \dots, n)$$

wo h_x, l_x Constanten bezeichnen. (Wenn a_x nicht gleich ∞ ist, so ist $h_x = 1, l_x = 0$.) Entwickelt man nun

$$\mathfrak{P}_0(c_1 + \eta_1, \dots, c_n + \eta_n), \quad \mathfrak{P}_1(c_1 + \eta_1, \dots, c_n + \eta_n)$$

nach Potenzen von η_1, \dots, η_n und verwandelt die so sich ergebenden Reihen in Potenzreihen von ξ'_1, \dots, ξ'_n , die mit

$$\mathfrak{P}_2(\xi'_1, \dots, \xi'_n), \quad \mathfrak{P}_3(\xi'_1, \dots, \xi'_n)$$

bezeichnet werden mögen, so gelten für alle einer bestimmten Umgebung der Stelle (a'_1, \dots, a'_n) angehörigen Werthsysteme (x_1, \dots, x_n) die Gleichungen

$$\begin{aligned} \mathfrak{P}_0(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n) &= \mathfrak{P}_2(x_1 - a'_1, \dots, x_n - a'_n), \\ \mathfrak{P}_1(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n) &= \mathfrak{P}_3(x_1 - a'_1, \dots, x_n - a'_n), \\ \mathfrak{P}_2(x_1 - a'_1, \dots, x_n - a'_n) f(x_1, \dots, x_n) &= \mathfrak{P}_3(x_1 - a'_1, \dots, x_n - a'_n). \end{aligned}$$

Nun nehme man — was dem am Schlusse von Art. 2 Bewiesenen zufolge stets angeht — n positive Grössen C_1, \dots, C_n so an, dass erstens die Stelle $(\xi_1 = C_1, \dots, \xi_n = C_n)$ im gemeinschaftlichen Convergenzbezirk der Reihen $\mathfrak{P}_0(\xi_1, \dots, \xi_n), \mathfrak{P}_1(\xi_1, \dots, \xi_n)$ liegt, und dass zweitens, wenn man c_1, \dots, c_n den Bedingungen

$$|c_1| \leq C_1, \dots, |c_n| \leq C_n$$

unterwirft, $\mathfrak{P}_0(c_1 + \eta_1, \dots, c_n + \eta_n), \mathfrak{P}_1(c_1 + \eta_1, \dots, c_n + \eta_n)$, als Potenzreihen von η_1, \dots, η_n betrachtet, keinen an der Stelle $(\eta_1 = 0, \dots, \eta_n = 0)$ verschwindenden gemeinschaftlichen Theiler haben. Dann besitzen auch die Reihen

$$\mathfrak{P}_2(x_1 - a'_1, \dots, x_n - a'_n) \quad \text{und} \quad \mathfrak{P}_3(x_1 - a'_1, \dots, x_n - a'_n),$$

wie sofort erhellt, keinen an der Stelle $(x_1 = a'_1, \dots, x_n = a'_n)$ verschwindenden gemeinschaftlichen Theiler, und es hat daher nach dem vorhin Bewiesenen $f(x_1, \dots, x_n)$ an der Stelle (a'_1, \dots, a'_n) keinen bestimmten Werth, wenn $\mathfrak{P}_2(0, \dots, 0), \mathfrak{P}_3(0, \dots, 0)$ beide gleich Null sind. Es giebt aber, wenn $n > 2$ ist, wie am Schlusse von No. 2 gezeigt worden ist, unendlich viele, den vorstehenden

Bedingungen genügende Werthsysteme (c_1, \dots, c_n) , für welche die beiden Gleichungen

$$\mathfrak{P}_0(c_1, \dots, c_n) = 0, \quad \mathfrak{P}_1(c_1, \dots, c_n) = 0$$

bestehen; jedem dieser Werthsysteme, deren Gesammtheit eine $(2n-4)$ -fache Mannigfaltigkeit bildet, entspricht also im Gebiete der Grössen x_1, \dots, x_n innerhalb des durch die Bedingungen

$$|x_1 - a_1| \leq C_1, \dots, |x_n - a_n| \leq C_n$$

definirten Bezirkes eine Stelle (a'_1, \dots, a'_n) , an der $f(x_1, \dots, x_n)$ keinen bestimmten Werth hat.

Hieran knüpft sich noch eine wichtige Bemerkung.

Es seien zwei beliebige Potenzreihen

$$\mathfrak{P}_0(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n), \quad \mathfrak{P}_1(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)$$

gegeben, so lässt sich für die dem Innern des gemeinschaftlichen Convergenzbezirks der beiden Reihen angehörigen Stellen (x_1, \dots, x_n) , deren Gesammtheit mit \mathfrak{G} bezeichnet werde, eine eindeutige Function $f(x_1, \dots, x_n)$ in folgender Weise definiren:

Ist x'_1, \dots, x'_n eine Stelle von \mathfrak{G} , an der $\mathfrak{P}_0, \mathfrak{P}_1$ nicht beide verschwinden, so soll

$$f(x'_1, \dots, x'_n) = \frac{\mathfrak{P}_1(x'_1 - a_1, \dots, x'_n - a_n)}{\mathfrak{P}_0(x'_1 - a_1, \dots, x'_n - a_n)}$$

sein.

Hat aber an einer Stelle (x'_1, \dots, x'_n) sowohl \mathfrak{P}_1 als \mathfrak{P}_0 den Werth Null, so bringe man auf die im Vorhergehenden angegebene Weise

$$\begin{aligned} \mathfrak{P}_0(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n) & \text{ auf die Form } \mathfrak{P}_2(x_1 - x'_1, \dots, x_n - x'_n) \mathfrak{P}_4(x_1 - x'_1, \dots, x_n - x'_n), \\ \mathfrak{P}_1(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n) & \text{ » » » } \mathfrak{P}_3(x_1 - x'_1, \dots, x_n - x'_n) \mathfrak{P}_4(x_1 - x'_1, \dots, x_n - x'_n), \end{aligned}$$

in der Art, dass die Reihen $\mathfrak{P}_2, \mathfrak{P}_3$ keinen an der Stelle $(x_1 = x'_1, \dots, x_n = x'_n)$ verschwindenden gemeinschaftlichen Theiler haben. Wenn dann

$$\mathfrak{P}_2(0, \dots, 0), \quad \mathfrak{P}_3(0, \dots, 0)$$

nicht beide gleich Null sind, so soll

$$f(x'_1, \dots, x'_n) = \frac{\mathfrak{P}_3(0, \dots, 0)}{\mathfrak{P}_2(0, \dots, 0)}$$

sein. Dagegen soll, wenn sowohl

$$\mathfrak{P}_3(0, \dots, 0) = 0 \text{ als } \mathfrak{P}_2(0, \dots, 0) = 0$$

ist, $f(x_1, \dots, x_n)$ an der Stelle (x'_1, \dots, x'_n) keinen bestimmten Werth haben.

Dies lässt sich auch so ausdrücken. Ist (x'_1, \dots, x'_n) irgend eine bestimmte Stelle von \mathfrak{G} , so kann man stets zwei Potenzreihen

$$\mathfrak{P}_2(x_1 - x'_1, \dots, x_n - x'_n), \quad \mathfrak{P}_3(x_1 - x'_1, \dots, x_n - x'_n)$$

ohne einen an der Stelle $(x_1 = x'_1, \dots, x_n = x'_n)$ verschwindenden gemeinschaftlichen Theiler so bestimmen, dass an allen einer bestimmten Umgebung der Stelle (x'_1, \dots, x'_n) angehörig Stellen die Gleichung

$$\mathfrak{P}_3(x_1 - x'_1, \dots, x_n - x'_n) \mathfrak{P}_0(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n) = \mathfrak{P}_2(x_1 - x'_1, \dots, x_n - x'_n) \mathfrak{P}_1(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)$$

besteht. Dann ist

$$f(x'_1, \dots, x'_n) = \frac{\mathfrak{P}_3(0, \dots, 0)}{\mathfrak{P}_2(0, \dots, 0)}$$

zu setzen, mit der Massgabe, dass, wenn so dargestellt $f(x'_1, \dots, x'_n)$ in der Form $\frac{0}{0}$ erscheint, der Function f an der Stelle (x'_1, \dots, x'_n) kein bestimmter Werth beizulegen ist.

Es ist nun zu zeigen, dass die so definirte Function $f(x_1, \dots, x_n)$ innerhalb des Bereiches \mathfrak{G} eine eindeutige analytische Function ist, für welche diejenigen Stellen, an denen sie der gegebenen Definition gemäss den Werth ∞ hat oder unbestimmt ist, ausserwesentliche singuläre Stellen in dem oben festgestellten Sinne sind, während sie an allen übrigen Stellen sich regulär verhält.

Es sei (x'_1, \dots, x'_n) irgend eine bestimmte Stelle von \mathfrak{G} , und

$$\begin{aligned} \mathfrak{P}_0(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n) &= \mathfrak{P}_2(x_1 - x'_1, \dots, x_n - x'_n) \cdot \mathfrak{P}_4(x_1 - x'_1, \dots, x_n - x'_n), \\ \mathfrak{P}_1(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n) &= \mathfrak{P}_3(x_1 - x'_1, \dots, x_n - x'_n) \cdot \mathfrak{P}_4(x_1 - x'_1, \dots, x_n - x'_n), \end{aligned}$$

wo $\mathfrak{P}_2, \mathfrak{P}_3, \mathfrak{P}_4$ dieselbe Bedeutung wie im Vorstehenden haben, und \mathfrak{P}_4 sich auf eine Constante reduciren kann. Nach dem oben Bewiesenen kann man nun eine Umgebung der Stelle (x'_1, \dots, x'_n) so bestimmen, dass, wenn (x''_1, \dots, x''_n) eine bestimmte Stelle dieser Umgebung ist, und man aus $\mathfrak{P}_2, \mathfrak{P}_3, \mathfrak{P}_4$ die drei Potenzreihen $\overline{\mathfrak{P}}_2, \overline{\mathfrak{P}}_3, \overline{\mathfrak{P}}_4$ von $x_1 - x''_1, \dots, x_n - x''_n$ ableitet, für welche bei hinläng-

lich kleinen Werthen dieser Differenzen die Gleichungen

$$\begin{aligned}\mathfrak{P}_2(x_1 - x'_1, \dots, x_n - x'_n) &= \overline{\mathfrak{P}}_2(x_1 - x''_1, \dots, x_n - x''_n), \\ \mathfrak{P}_3(x_1 - x'_1, \dots, x_n - x'_n) &= \overline{\mathfrak{P}}_3(x_1 - x''_1, \dots, x_n - x''_n), \\ \mathfrak{P}_4(x_1 - x'_1, \dots, x_n - x'_n) &= \overline{\mathfrak{P}}_4(x_1 - x''_1, \dots, x_n - x''_n)\end{aligned}$$

bestehen, die beiden Reihen $\overline{\mathfrak{P}}_2, \overline{\mathfrak{P}}_3$ keinen an der Stelle $(x_1 = x''_1, \dots, x_n = x''_n)$ verschwindenden gemeinschaftlichen Theiler besitzen. Wenn dann $f(x''_1, \dots, x''_n)$ einen bestimmten endlichen Werth hat, so ist

$$\begin{aligned}f(x''_1, \dots, x''_n) &= \frac{\overline{\mathfrak{P}}_3(0, \dots, 0)}{\overline{\mathfrak{P}}_2(0, \dots, 0)} \\ &= \frac{\mathfrak{P}_3(x''_1 - x'_1, \dots, x''_n - x'_n)}{\mathfrak{P}_2(x''_1 - x'_1, \dots, x''_n - x'_n)},\end{aligned}$$

d. h. es gilt die Gleichung

$$f(x_1, \dots, x_n) = \frac{\mathfrak{P}_3(x_1 - x'_1, \dots, x_n - x'_n)}{\mathfrak{P}_2(x_1 - x'_1, \dots, x_n - x'_n)}$$

innerhalb einer gewissen Umgebung der Stelle (x'_1, \dots, x'_n) für alle Stellen (x_1, \dots, x_n) , an denen $f(x_1, \dots, x_n)$ einen bestimmten endlichen Werth hat. Wenn daher $\mathfrak{P}_2(0, \dots, 0)$ nicht gleich Null ist, so verhält sich $f(x_1, \dots, x_n)$ an der Stelle (x'_1, \dots, x'_n) regulär.

Ist $\mathfrak{P}_2(0, \dots, 0) = 0$, nicht aber $\mathfrak{P}_3(0, \dots, 0)$, so kann man die in Rede stehende Umgebung von (x'_1, \dots, x'_n) so klein annehmen, dass an allen Stellen derselben der absolute Betrag von $f(x_1, \dots, x_n)$ grösser ist als jede beliebig angenommene endliche Grösse, so dass $f(x'_1, \dots, x'_n) = \infty$ zu setzen ist, wie der Ausdruck von $f(x_1, \dots, x_n)$ angiebt.

Sind endlich $\mathfrak{P}_2(0, \dots, 0), \mathfrak{P}_3(0, \dots, 0)$ beide gleich Null, so giebt es, wie oben gezeigt worden ist, in jeder noch so kleinen Umgebung von (x'_1, \dots, x'_n) Stellen, an denen die Function $f(x_1, \dots, x_n)$ einen beliebig vorgeschriebenen Werth hat; sie hat also an der Stelle (x'_1, \dots, x'_n) selbst keinen bestimmten Werth.

Damit ist bewiesen, dass die in der angegebenen Weise definirte Function $f(x_1, \dots, x_n)$ innerhalb des Bezirkes \mathfrak{G} sich überall wie eine rationale Function verhält.

4. Zur Theorie der ganzen eindeutigen Functionen von beliebig vielen Veränderlichen.

Dem Vorstehenden zufolge stellt eine Potenzreihe $\mathfrak{P}(x_1, \dots, x_n)$, die für jedes System endlicher Werthe der Veränderlichen x_1, \dots, x_n convergirt, eine eindeutige Function $f(x_1, \dots, x_n)$ dar, die sich an jeder im Endlichen des Grössengebiets (x_1, \dots, x_n) liegenden Stelle regulär verhält.

Umgekehrt weiss man, dass jede eindeutige Function $f(x_1, \dots, x_n)$, die sich an allen im Endlichen liegenden Stellen des Gebietes (x_1, \dots, x_n) regulär verhält, durch eine für jedes System endlicher Werthe von x_1, \dots, x_n convergirende Reihe $\mathfrak{P}(x_1, \dots, x_n)$ ausgedrückt werden kann.

Ich nenne eine solche Function $f(x_1, \dots, x_n)$ eine ganze Function. Hat die Reihe, durch welche sie dargestellt wird, unendlich viele Glieder, deren Coefficienten nicht gleich Null sind, so ist die Function eine transcendente.

Sind ferner zwei Potenzreihen $\mathfrak{P}_0(x_1, \dots, x_n)$, $\mathfrak{P}_1(x_1, \dots, x_n)$ gegeben, welche beide für jedes System endlicher Werthe von x_1, \dots, x_n convergiren, so wird durch den Quotienten

$$\frac{\mathfrak{P}_1(x_1, \dots, x_n)}{\mathfrak{P}_0(x_1, \dots, x_n)}$$

den in Art. 3 festgesetzten Bestimmungen gemäss eine eindeutige Function $f(x_1, \dots, x_n)$ defnirt, die dadurch charakterisirt ist, dass sie sich an jeder im Endlichen liegenden Stelle des Grössengebiets (x_1, \dots, x_n) wie eine rationale Function verhält.

Ob aber umgekehrt jede eindeutige Function $f(x_1, \dots, x_n)$, welche sich im Endlichen überall wie eine rationale Function verhält — also, wenn (a_1, \dots, a_n) irgend ein System endlicher Werthe ist, in einer gewissen Umgebung der Stelle (a_1, \dots, a_n) als Quotient zweier Potenzreihen von $x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n$ ausgedrückt werden kann —, auch als Quotient zweier für jedes System endlicher Werthe von x_1, \dots, x_n convergirenden Potenzreihen sich darstellen lasse, das ist eine für Functionen von mehreren Veränderlichen bis jetzt unerledigte Frage, welche sehr erhebliche Schwierigkeiten darzubieten scheint.

Mit dieser Frage ist aber noch eine andere verknüpft.

Für jede rationale Function von x_1, \dots, x_n gilt, dass sie als Quotient zweier ganzen Functionen dieser Veränderlichen dargestellt werden kann und

zwar so, dass der Dividend und der Divisor keinen gemeinschaftlichen Theiler besitzen. Dann verschwinden Dividend und Divisor gleichzeitig nur an solchen Stellen, an denen die Function keinen bestimmten Werth hat. Es entsteht also die Frage, ob in dem Falle, wo eine Function als Quotient zweier ganzen Functionen von x_1, \dots, x_n , von denen wenigstens eine transcendent ist, dargestellt werden kann, dies auch in der Art geschehen könne, dass der Quotient nur bei solchen Werthsystemen der Veränderlichen, für welche die Function unbestimmt ist, in der Form $\frac{0}{0}$ erscheint — mit andern Worten, dass aus den Werthen, welche Dividend und Divisor an einer bestimmten Stelle haben, sich unmittelbar entnehmen lässt, ob an dieser Stelle die Function einen bestimmten Werth hat oder nicht, und wie sie sich in der Umgebung dieser Stelle verhält. Auch diese Frage ist bis jetzt nur für Functionen von einer Veränderlichen — und zwar für diese im bejahenden Sinne — entschieden.

In manchen Fällen, wo eine eindeutige Function mehrerer Veränderlichen durch analytische Bestimmungen definirt ist, ist es aber möglich, die angelegten Fragen mittelst eines Theorems, das ich im Folgenden ausführlich entwickeln will, zu erledigen.

Es bedeute jetzt $f(x_1, \dots, x_n)$ eine (transcendente oder rationale) ganze Function der Veränderlichen x_1, \dots, x_n . Man setze für diese Grössen ganze lineare Functionen einer Veränderlichen τ :

$$x_1 = a_1 + c_1 \tau, \quad \dots \quad x_n = a_n + c_n \tau,$$

so geht $f(x_1, \dots, x_n)$ in eine ganze Function von τ über, welche im Allgemeinen — d. h. wenn die Grössen c_1, \dots, c_n einer sogleich anzugebenden Beschränkung unterworfen werden — nicht für jeden Werth von τ verschwindet. Denn es erhält $f(x_1, \dots, x_n)$, nach Potenzen von $x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n$ entwickelt, die Form

$$\sum_{\nu=0}^{\infty} (x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)^\nu,$$

wo $(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)^\nu$ eine homogene ganze Function ν^{ten} Grades von $x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n$ bezeichnet; es brauchen also die Grössen c_1, \dots, c_n nur die Bedingung zu erfüllen, dass die Ausdrücke

$$(c_1, \dots, c_n)^\nu$$

nicht alle gleich Null sind. Dies vorausgesetzt, sei in der Entwicklung von $f(a_1 + c_1 \tau, \dots, a_n + c_n \tau)$ nach Potenzen von τ das erste Glied, dessen Coefficient nicht verschwindet, von der Ordnung μ , so hat man

$$f(a_1 + c_1 \tau, \dots, a_n + c_n \tau) = C_\mu \tau^\mu + C_{\mu+1} \tau^{\mu+1} + \dots,$$

wo C_μ nicht gleich Null ist. Daraus ergibt sich für hinlänglich kleine Werthe von τ

$$\frac{d \log f(a_1 + c_1 \tau, \dots, a_n + c_n \tau)}{d\tau} = \mu \tau^{-1} + \mathfrak{P}(\tau).$$

Setzt man also

$$d \log f(x_1, \dots, x_n) = \sum_{\alpha=1}^n f_\alpha(x_1, \dots, x_n) dx_\alpha,$$

wo $f_1(x_1, \dots, x_n), \dots, f_n(x_1, \dots, x_n)$ eindeutige Functionen sind, welche sich an jeder im Endlichen liegenden Stelle des Gebietes (x_1, \dots, x_n) wie rationale Functionen verhalten und den Gleichungen

$$\frac{\partial f_\alpha(x_1, \dots, x_n)}{\partial x_\beta} = \frac{\partial f_\beta(x_1, \dots, x_n)}{\partial x_\alpha} \quad \begin{matrix} (\alpha = 1, \dots, n) \\ (\beta = 1, \dots, n) \end{matrix}$$

genügen, so hat man

$$\sum_{\alpha=1}^n f_\alpha(x_1, \dots, x_n) dx_\alpha = (\mu \tau^{-1} + \mathfrak{P}(\tau)) d\tau,$$

wenn

$$x_1 = a_1 + c_1 \tau, \quad \dots \quad x_n = a_n + c_n \tau$$

gesetzt wird, und es ist dann μ stets entweder gleich Null oder eine positive ganze Zahl.

Dieser Satz lässt sich nun in folgender Weise umkehren:

Es seien n Functionen

$$f_1(x_1, \dots, x_n), \dots, f_n(x_1, \dots, x_n)$$

gegeben, welche den folgenden Bedingungen genügen:

- 1) Sie sollen eindeutige Functionen sein, für die wesentliche singuläre Stellen im Endlichen des Grössengebiets (x_1, \dots, x_n) nicht existiren.
- 2) Der Differentialausdruck

$$\sum_{\alpha=1}^n f_\alpha(x_1, \dots, x_n) dx_\alpha$$

soll die durch die Gleichungen

$$\frac{\partial f_\alpha(x_1, \dots, x_n)}{\partial x_\beta} = \frac{\partial f_\beta(x_1, \dots, x_n)}{\partial x_\alpha} \quad \begin{matrix} (\alpha = 1, \dots, n) \\ (\beta = 1, \dots, n) \end{matrix}$$

ausgedrückten Integrabilitätsbedingungen erfüllen.

- 3) Es soll, wenn man für x_1, \dots, x_n irgend welche ganze lineare Functionen einer Veränderlichen τ substituirt:

$$x_1 = a_1 + c_1 \tau, \quad \dots \quad x_n = a_n + c_n \tau,$$

für hinlänglich kleine Werthe von τ

$$\sum_{\alpha=1}^n f_\alpha(x_1, \dots, x_n) dx_\alpha \text{ die Form } (\mu\tau^{-1} + \mathfrak{P}(\tau)) d\tau$$

annehmen, und dann μ entweder gleich Null oder eine positive ganze Zahl sein, vorausgesetzt, dass von den beiden Potenzreihen von $x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n$, als deren Quotient

$$\sum_{\alpha=1}^n c_\alpha f_\alpha(x_1, \dots, x_n)$$

in der Umgebung der Stelle (a_1, \dots, a_n) dargestellt werden kann, der Divisor durch die angegebenen Substitutionen nicht identisch gleich Null werde.

Alsdann existirt eine ganze Function $f(x_1, \dots, x_n)$, welche der Differentialgleichung

$$d \log f(x_1, \dots, x_n) = \sum_{\alpha=1}^n f_\alpha(x_1, \dots, x_n) dx_\alpha$$

genügt und völlig bestimmt ist, wenn der Werth irgend eines ihrer Coefficienten, der in Folge der vorstehenden Gleichung nicht nothwendig gleich Null ist, fixirt wird, was in beliebiger Weise geschehen kann.

Um diesen Satz zu beweisen, nehme ich zuerst an, es sei innerhalb einer bestimmten Umgebung der Stelle $(0, \dots, 0)$ jede Function f_α in der Form

$$\begin{aligned} f_\alpha(x_1, \dots, x_n) &= \mathfrak{P}_\alpha(x_1, \dots, x_n) \\ &= \sum_{\nu=0}^{\infty} (x_1, \dots, x_n)_\alpha^\nu \end{aligned}$$

darstellbar. Dann ist zufolge der Bedingung 2)

$$\frac{\partial (x_1, \dots, x_n)_\alpha^\nu}{\partial x_\beta} = \frac{\partial (x_1, \dots, x_n)_\beta^\nu}{\partial x_\alpha}$$

Setzt man

$$(x_1, \dots, x_n)^{\nu+1} = \sum_{\alpha=1}^n \frac{1}{\nu+1} (x_1, \dots, x_n)_{\alpha}^{\nu} x_{\alpha},$$

so ist

$$d(x_1, \dots, x_n)^{\nu+1} = \sum_{\alpha=1}^n \left\{ \frac{1}{\nu+1} (x_1, \dots, x_n)_{\alpha}^{\nu} dx_{\alpha} \right\} + \frac{1}{\nu+1} \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n \frac{\partial (x_1, \dots, x_n)_{\alpha}^{\nu}}{\partial x_{\beta}} x_{\alpha} dx_{\beta}.$$

Es ist aber

$$\begin{aligned} \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n \frac{\partial (x_1, \dots, x_n)_{\alpha}^{\nu}}{\partial x_{\beta}} x_{\alpha} dx_{\beta} &= \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n \frac{\partial (x_1, \dots, x_n)_{\beta}^{\nu}}{\partial x_{\alpha}} x_{\alpha} dx_{\beta} \\ &= \sum_{\beta=1}^n \nu (x_1, \dots, x_n)_{\beta}^{\nu} dx_{\beta} \\ &= \sum_{\alpha=1}^n \nu (x_1, \dots, x_n)_{\alpha}^{\nu} dx_{\alpha}, \end{aligned}$$

und daher

$$\begin{aligned} d(x_1, \dots, x_n)^{\nu+1} &= \sum_{\alpha=1}^n (x_1, \dots, x_n)_{\alpha}^{\nu} dx_{\alpha}, \\ \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\nu=0}^{\infty} (x_1, \dots, x_n)_{\alpha}^{\nu} dx_{\alpha} &= d \sum_{\nu=0}^{\infty} (x_1, \dots, x_n)^{\nu+1}. \end{aligned}$$

Entwickelt man also, unter C eine willkürlich anzunehmende Constante ver-
stehend, den Ausdruck

$$C e^{\sum_{\nu=0}^{\infty} (x_1, \dots, x_n)^{\nu+1}}$$

nach Potenzen von x_1, \dots, x_n , so genügt die so sich ergebende Potenzreihe,
für $f(x_1, \dots, x_n)$ gesetzt, der in Rede stehenden Differentialgleichung und ist
sicher convergent in dem gemeinschaftlichen Convergenzbezirk der Entwickelungen
von $f_1(x_1, \dots, x_n), \dots, f_n(x_1, \dots, x_n)$.

Zweitens nehme ich an, man habe für alle einer bestimmten Umgebung
der Stelle $(0, \dots, 0)$ angehörigen Werthsysteme (x_1, \dots, x_n)

$$f_{\alpha}(x_1, \dots, x_n) = \frac{\mathfrak{P}_{\alpha}^{(1)}(x_1, \dots, x_n)}{\mathfrak{P}_{\alpha}^{(0)}(x_1, \dots, x_n)},$$

wobei ich bemerke, dass es nicht eine nothwendige Bedingung ist, dass
 $\mathfrak{P}_{\alpha}^{(0)}(x_1, \dots, x_n), \mathfrak{P}_{\alpha}^{(1)}(x_1, \dots, x_n)$ keinen an der Stelle $(x_1 = 0, \dots, x_n = 0)$ verschwin-
denden gemeinschaftlichen Theiler haben. Man substituirt nun für x_1, \dots, x_n
homogene lineare Functionen von n andern Veränderlichen t_1, \dots, t_n :

$$x_{\alpha} = \sum_{\beta=1}^n g_{\alpha\beta} t_{\beta}, \quad (\alpha = 1, \dots, n)$$

wodurch sich das Differential

$$\sum_{\alpha=1}^n f_{\alpha}(x_1, \dots, x_n) dx_{\alpha}$$

in ein anderes von der Form

$$\sum_{\alpha=1}^n \varphi_{\alpha}(t_1, \dots, t_n) dt_{\alpha}$$

verwandelt, für welches die Integrabilitätsbedingungen ebenfalls erfüllt sind. Die Constanten $g_{\alpha\beta}$ hat man so anzunehmen, dass die Determinante

$$\begin{vmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1n} \\ g_{21} & g_{22} & \dots & g_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ g_{n1} & g_{n2} & \dots & g_{nn} \end{vmatrix}$$

von Null verschieden ist, und bei keiner der Functionen

$$\mathfrak{P}_1^{(0)}(g_{11}t_1, \dots, g_{n1}t_1), \dots, \mathfrak{P}_n^{(0)}(g_{11}t_1, \dots, g_{n1}t_1),$$

wenn man sie nach Potenzen von t_1 entwickelt, sämtliche Coefficienten verschwinden.

Dann lässt sich

$$\varphi_{\alpha}(t_1, \dots, t_n) \text{ in der Form } \frac{\mathfrak{P}_{\alpha}(t_1, \dots, t_n)}{\mathfrak{P}_0(t_1, \dots, t_n)}$$

darstellen, und es ist $\mathfrak{P}_0(t_1, 0, \dots, 0)$ eine Potenzreihe von t_1 , deren Coefficienten nicht sämtlich gleich Null sind. Ist das Anfangsglied dieser Reihe von der Ordnung l , so nehme man eine positive Grösse δ_1 so an, dass die Stelle ($t_1 = \delta_1, t_2 = 0, \dots, t_n = 0$) innerhalb des gemeinschaftlichen Convergencebezirks der Reihen

$$\mathfrak{P}_0(t_1, \dots, t_n), \mathfrak{P}_1(t_1, \dots, t_n), \dots, \mathfrak{P}_n(t_1, \dots, t_n)$$

liegt, und die Function

$$t_1^{-l} \mathfrak{P}_0(t_1, 0, \dots, 0)$$

für jeden Werth von t_1 , dessen absoluter Betrag nicht grösser als δ_1 ist, einen von Null verschiedenen Werth hat. Wird darauf eine zweite positive Grösse δ' , die kleiner als δ_1 ist, beliebig angenommen, so lassen sich $n-1$ andere $\delta_2, \dots, \delta_n$ so bestimmen, dass die Stelle ($t_1 = \delta_1, t_2 = \delta_2, \dots, t_n = \delta_n$) innerhalb des gemeinschaftlichen Convergencebezirks der Reihen $\mathfrak{P}_0, \mathfrak{P}_1, \dots, \mathfrak{P}_n$ liegt,

und für jedes den Bedingungen

$$A) \quad \delta' \leq |t_1| \leq \delta_1, |t_2| \leq \delta_2, \dots |t_n| \leq \delta_n$$

genügende Werthsystem $(t_1, t_2, \dots t_n)$

$$|\mathfrak{P}_0(t_1, 0, \dots 0)| > |\mathfrak{P}_0(t_1, t_2, \dots t_n) - \mathfrak{P}_0(t_1, 0, \dots 0)|$$

ist. Dann giebt es, wie in Art. 1 gezeigt worden ist, für jedes den Bedingungen

$$B) \quad |t_2| \leq \delta_2, \dots |t_n| \leq \delta_n$$

entsprechende Werthsystem $(t_2, \dots t_n)$ unter denjenigen Werthen von t_1 , für welche $|t_1| \leq \delta_1$ ist, nicht mehr als l , welche der Gleichung

$$\mathfrak{P}_0(t_1, t_2, \dots t_n) = 0$$

genügen, und diese sind ihrem absoluten Betrage nach sämmtlich kleiner als δ' . Nun sei $(t'_2, \dots t'_n)$ irgend ein System bestimmter, den Bedingungen B) genügender Werthe von $t_2, \dots t_n$, und es habe die Gleichung

$$\mathfrak{P}_0(t_1, t'_2, \dots t'_n) = 0$$

r von einander verschiedene Wurzeln

$$t'_1, t''_1, \dots t'_1^{(r)},$$

welche ihrem absoluten Betrage nach kleiner als δ' sind. Setzt man dann

$$t_1 = t'_1 + \tau, \quad t_2 = t'_2, \quad \dots \quad t_n = t'_n,$$

so werden $x_1, \dots x_n$ ganze lineare Function von τ , welche der oben unter 3) angegebenen Bedingung genügen, indem

$$\sum_{\alpha=1}^n f_{\alpha}(x_1, \dots x_n) dx_{\alpha} = \sum_{\alpha=1}^n \frac{\mathfrak{P}_{\alpha}(t_1, \dots t_n)}{\mathfrak{P}_0(t_1, \dots t_n)} dt_{\alpha}$$

ist, und $\mathfrak{P}_0(t'_1 + \tau, t'_2, \dots t'_n)$ nicht für jeden Werth von τ verschwindet. Man erhält also für hinlänglich kleine Werthe von τ

$$\varphi_1(t'_1 + \tau, t'_2, \dots t'_n) = \frac{m'}{\tau} + \mathfrak{P}'(\tau),$$

wo m' eine ganze Zahl und ≥ 0 ist; und ebenso

$$\varphi_1(t''_1 + \tau, t'_2, \dots t'_n) = \frac{m''}{\tau} + \mathfrak{P}''(\tau), \quad \dots \quad \varphi_1(t'_1^{(r)} + \tau, t'_2, \dots t'_n) = \frac{m^{(r)}}{\tau} + \mathfrak{P}^{(r)}(\tau),$$

II.

wo $m'', \dots, m^{(n)}$ gleichfalls ganze, nicht negative Zahlen sind. Daraus folgt, dass die Differenz

$$\varphi_1(t_1, t'_2, \dots, t'_n) - \left(\frac{m'}{t_1 - t'_1} + \frac{m''}{t_1 - t''_1} + \dots + \frac{m^{(n)}}{t_1 - t^{(n)}_1} \right)$$

für keinen Werth von t_1 , dessen absoluter Betrag kleiner als δ_1 ist, unendlich gross wird und demgemäss in der Form

$$\mathfrak{P}(t_1)$$

dargestellt werden kann. Setzt man also

$$\varphi(t) = (t - t'_1)^{m'} (t - t''_1)^{m''} \dots (t - t^{(n)}_1)^{m^{(n)}},$$

so ergibt sich für jeden der Bedingung $|t_1| < \delta_1$ genügenden Werth von t_1

$$\varphi_1(t_1, t'_2, \dots, t'_n) = \frac{1}{\varphi(t_1)} \frac{d\varphi(t_1)}{dt_1} + \mathfrak{P}(t_1).$$

Die Function $\varphi(t)$ lässt sich aber ermitteln, ohne dass es nöthig wäre, die Grössen $t'_1, t''_1, \dots, t^{(n)}_1$ und die zugehörigen Zahlen $m', m'', \dots, m^{(n)}$ zu bestimmen.

Man kann, wenn man die Grössen t_1, t_2, \dots, t_n den Bedingungen

$$C) \quad |t_1| \leq \delta_1, |t_2| \leq \delta_2, \dots, |t_n| \leq \delta_n$$

unterwirft, $\mathfrak{P}_0(t_1, t_2, \dots, t_n)$ in der oben (in Art. 1) angegebenen Weise auf die Form

$$G_0(t_1, t_2, \dots, t_n) \overline{\mathfrak{P}}_0(t_1, \dots, t_n)$$

bringen, in der Art, dass $\overline{\mathfrak{P}}_0(t_1, \dots, t_n)$ für kein den vorstehenden Bedingungen entsprechendes Werthsystem (t_1, t_2, \dots, t_n) verschwindet. Die Function $G_0(t_1, t_2, \dots, t_n)$ kann dann nicht unendlich klein werden, wenn man die Grössen t_1, t_2, \dots, t_n den Bedingungen A) unterwirft. Für alle diesen Bedingungen genügenden Werthsysteme (t_1, t_2, \dots, t_n) lässt sich deshalb

$$\frac{1}{G_0(t_1, t_2, \dots, t_n)}$$

in eine gleichmässig convergirende Reihe von der Form

$$\sum_{\nu=0}^{\infty} T_{\nu} t_1^{-i-\nu}$$

entwickeln, in der die Coefficienten T_ν gewöhnliche Potenzreihen von t_2, \dots, t_n sind. Diese Reihe convergirt dann auch, als Potenzreihe von t_1, t_2, \dots, t_n betrachtet, bei jeder Anordnung ihrer Glieder. Dasselbe gilt für die gewöhnliche Potenzreihe von t_1, t_2, \dots, t_n , in welche der Quotient

$$\frac{\mathfrak{P}_1(t_1, \dots, t_n)}{\mathfrak{P}_0(t_1, \dots, t_n)}$$

verwandelt werden kann; man erhält daher für die jetzt betrachteten Werthsysteme (t_1, \dots, t_n) die Function $\varphi_1(t_1, \dots, t_n)$ dargestellt durch eine bei jeder Anordnung ihrer Glieder convergirende Potenzreihe der Grössen t_1, t_2, \dots, t_n , welche negative Potenzen von t_1 im Allgemeinen in unendlicher Anzahl, aber keine negativen Potenzen von t_2, \dots, t_n enthält und somit auf die Form

$$\sum_{\mu=0}^{\infty} \mathfrak{P}^{(-\mu-1)}(t_2, \dots, t_n) t_1^{-\mu-1} + \sum_{\nu=0}^{\infty} \mathfrak{P}^{(\nu)}(t_2, \dots, t_n) t_1^{\nu}$$

gebracht werden kann.*)

Es lässt sich aber auch

$$\frac{1}{\varphi(t_1)} \frac{d\varphi(t_1)}{dt_1} = \frac{m'}{t_1 - t'_1} + \frac{m''}{t_1 - t''_1} + \dots + \frac{m^{(r)}}{t_1 - t^{(r)}_1},$$

wenn $|t_1| \geq \delta'$ ist, in eine Reihe von der Form

$$\sum_{\mu=0}^{\infty} T'_{\mu+1} t_1^{-\mu-1}$$

entwickeln, und es ist dann namentlich $T'_1 = m' + m'' + \dots + m^{(r)}$. Man hat also

$$\varphi_1(t_1, t'_2, \dots, t'_n) - \frac{1}{\varphi(t_1)} \frac{d\varphi(t_1)}{dt_1} = \sum_{\mu=0}^{\infty} \left\{ \mathfrak{P}^{(-\mu-1)}(t'_2, \dots, t'_n) - T'_{\mu+1} \right\} t_1^{-\mu-1} + \sum_{\nu=0}^{\infty} \mathfrak{P}^{(\nu)}(t'_2, \dots, t'_n) t_1^{\nu}.$$

Aus dieser Reihe müssen nun dem vorhin Bemerkten zufolge alle Glieder mit einer negativen Potenz von t_1 verschwinden; man hat also

$$T'_{\mu+1} = \mathfrak{P}^{(-\mu-1)}(t'_2, \dots, t'_n) \quad (\mu = 0, \dots, \infty).$$

*) Diese Reihe erhält man auch dadurch, dass man (unter der Annahme $\delta' \leq |t_1| \leq \delta_1$) die Function $\varphi_1(t_1, t_2, \dots, t_n)$ als Potenzreihe von t_2, \dots, t_n darstellt und darauf die Coefficienten derselben, welche sämmtlich die Form

$$\frac{\mathfrak{P}(t_1)}{\mathfrak{P}_0(t_1, 0, \dots, 0)}$$

haben, nach steigenden Potenzen von t_1 entwickelt.

Es ist daher $\mathfrak{P}^{(-1)}(t_2, \dots, t_n)$ für jedes der betrachteten Werthsysteme (t_2, \dots, t_n) eine ganze Zahl. Daraus folgt, dass sich $\mathfrak{P}^{(-1)}(t_2, \dots, t_n)$ auf ein von t_2, \dots, t_n unabhängiges Glied reducirt. Denn wäre dies nicht der Fall, so würde $\mathfrak{P}^{(-1)}(t_2, \dots, t_n)$ eine continuirliche Function von t_2, \dots, t_n sein, die auch andere als ganzzahlige Werthe haben könnte. Es ist also die Summe $(m' + m'' + \dots + m^{(r)})$ von dem gewählten Werthsystem (t'_2, \dots, t'_n) unabhängig und kann gefunden werden, wenn man gleichzeitig $t'_2 = 0, \dots, t'_n = 0$ setzt.

Da nun, wenn t'_2, \dots, t'_n sämmtlich gleich Null gesetzt werden,

$$\varphi_1(t_1, 0, \dots, 0) = \sum_{\mu=0}^{\infty} \mathfrak{P}^{(-\mu-1)}(0, \dots, 0) t_1^{-\mu-1} + \sum_{\nu=0}^{\infty} \mathfrak{P}^{(\nu)}(0, \dots, 0) t_1^{\nu},$$

$$\frac{1}{\varphi(t_1)} \frac{d\varphi(t_1)}{dt_1} = (m' + m'' + \dots + m^{(r)}) t_1^{-1}$$

ist, und aus der Differenz der Ausdrücke auf der Rechten dieser Gleichungen alle Glieder mit negativen Potenzen von t_1 wegfallen müssen, so sieht man, dass die Entwicklung von

$$\varphi_1(t_1, 0, \dots, 0)$$

für jeden Werth von t_1 , dessen absoluter Betrag $\leq \delta_1$ ist, die Gestalt

$$m t_1^{-1} + \mathfrak{P}(t_1)$$

hat, wo m eine ganze Zahl bedeutet, die ≥ 0 ist, und dass man

$$m' + m'' + \dots + m^{(r)} = m$$

hat. Dabei ist noch zu bemerken, dass m immer > 0 ist, wenn nicht etwa jede Function $\mathfrak{P}_\alpha^{(1)}(x_1, \dots, x_n)$ durch $\mathfrak{P}_\alpha^{(0)}(x_1, \dots, x_n)$ theilbar ist, welcher Fall schon behandelt worden und hier auszuschliessen ist.

Nachdem so der Grad der Function $\varphi(t_1)$ ermittelt ist, setze man

$$\varphi(t_1) = t_1^m + F'_1 t_1^{m-1} + \dots + F'_m,$$

so hat man, zunächst für die der Bedingung

$$\delta' \leq |t_1| \leq \delta_1$$

genügenden Werthe von t_1 ,

$$\frac{1}{\varphi(t_1)} \frac{d\varphi(t_1)}{dt_1} = \sum_{\mu=0}^{\infty} T'_{\mu+1} t_1^{-\mu-1} = \sum_{\mu=0}^{\infty} \mathfrak{P}^{(-\mu-1)}(t'_2, \dots, t'_n) t_1^{-\mu-1},$$

$$m t_1^{m-1} + (m-1) F'_1 t_1^{m-2} + \dots + F'_{m-1} = (t_1^m + F'_1 t_1^{m-1} + \dots + F'_m) \left\{ m t_1^{-1} + \sum_{\mu=1}^{\infty} \mathfrak{P}^{(-\mu-1)}(t'_2, \dots, t'_n) t_1^{-\mu-1} \right\}.$$

Daraus ergeben sich die Gleichungen

$$\begin{aligned} F'_1 + \mathfrak{P}^{(-2)}(t'_2, \dots, t'_n) &= 0, \\ 2F'_2 + F'_1 \cdot \mathfrak{P}^{(-2)}(t'_2, \dots, t'_n) + \mathfrak{P}^{(-3)}(t'_2, \dots, t'_n) &= 0, \\ 3F'_3 + F'_2 \cdot \mathfrak{P}^{(-2)}(t'_2, \dots, t'_n) + F'_1 \cdot \mathfrak{P}^{(-3)}(t'_2, \dots, t'_n) + \mathfrak{P}^{(-4)}(t'_2, \dots, t'_n) &= 0, \\ \dots &\dots \\ mF'_m + F'_{m-1} \mathfrak{P}^{(-2)}(t'_2, \dots, t'_n) + F'_{m-2} \mathfrak{P}^{(-3)}(t'_2, \dots, t'_n) + \dots + \mathfrak{P}^{(-m-1)}(t'_2, \dots, t'_n) &= 0. \end{aligned}$$

Durch diese Gleichungen lassen sich die Grössen F'_1, \dots, F'_m bestimmen. Substituirt man in den Ausdrücken derselben für t'_2, \dots, t'_n die unbestimmten Grössen t_2, \dots, t_n , bezeichnet die Potenzreihe von t_2, \dots, t_n , in welche F'_μ dadurch übergeht, mit

$$F_\mu(t_2, \dots, t_n)$$

und setzt

$$\varphi(t_1, t_2, \dots, t_n) = t_1^m + F_1(t_2, \dots, t_n) t_1^{m-1} + \dots + F_m(t_2, \dots, t_n),$$

so ist durch das Vorstehende bewiesen, dass für jedes den angegebenen Bedingungen entsprechende Werthsystem (t_1, t_2, \dots, t_n)

$$\varphi_1(t_1, t_2, \dots, t_n) - \frac{\partial \log \varphi(t_1, t_2, \dots, t_n)}{\partial t_1} = \sum_{\nu=0}^{\infty} \mathfrak{P}^{(\nu)}(t_2, \dots, t_n) t_1^\nu$$

ist. Da aber die Reihe auf der Rechten dieser Gleichung keine negativen Potenzen von t_1 enthält, so convergirt sie für jedes den Bedingungen C) genügende Werthsystem (t_1, t_2, \dots, t_n) , und zwar, wie aus ihrer Entstehungsweise hervorgeht, unabhängig von der Anordnung ihrer Glieder. Dasselbe gilt von den Reihen

$$F_1(t_2, \dots, t_n), \dots, F_m(t_2, \dots, t_n);$$

es besteht somit die vorstehende Gleichung für jedes den zuletzt angegebenen Bedingungen entsprechende Werthsystem (t_1, \dots, t_n) .

Nun hat man, wenn $\alpha > 1$ ist,

$$\frac{\partial \varphi_\alpha(t_1, \dots, t_n)}{\partial t_1} = \frac{\partial \varphi_1(t_1, \dots, t_n)}{\partial t_\alpha} = \frac{\partial^2 \log \varphi(t_1, \dots, t_n)}{\partial t_1 \partial t_\alpha} + \frac{\partial}{\partial t_\alpha} \sum_{\nu=0}^{\infty} \mathfrak{P}^{(\nu)}(t_2, \dots, t_n) t_1^\nu,$$

$$\frac{\partial}{\partial t_1} \left\{ \varphi_\alpha(t_1, \dots, t_n) - \frac{\partial \log \varphi(t_1, \dots, t_n)}{\partial t_\alpha} \right\} = \frac{\partial}{\partial t_1} \sum_{\nu=0}^{\infty} \left\{ \frac{t_1^{\nu+1}}{\nu+1} \frac{\partial \mathfrak{P}^{(\nu)}(t_2, \dots, t_n)}{\partial t_\alpha} \right\}.$$

Es lassen sich aber, wenn man t_1, t_2, \dots, t_n wieder den Bedingungen A) unterwirft,

$$\varphi_\alpha(t_1, \dots, t_n) \text{ und } \frac{\partial \log \varphi(t_1, \dots, t_n)}{\partial t_\alpha}$$

in Reihen von derselben Form, wie die im Vorhergehenden für $\varphi_1(t_1, \dots, t_n)$ angegebene, entwickeln. Die vorstehende Gleichung lehrt nun, dass in der Differenz dieser beiden Reihen Glieder mit einer negativen Potenz von t_1 nicht vorkommen, und dass man

$$\varphi_\alpha(t_1, \dots, t_n) - \frac{\partial \log \varphi(t_1, \dots, t_n)}{\partial t_\alpha} = \mathfrak{P}_\alpha^{(0)}(t_2, \dots, t_n) - \varphi_\alpha^{(0)}(t_2, \dots, t_n) + \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{t_1^{\nu+1}}{\nu+1} \frac{\partial \mathfrak{P}^{(\nu)}(t_2, \dots, t_n)}{\partial t_\alpha}$$

hat, wo $\mathfrak{P}_\alpha^{(0)}(t_2, \dots, t_n)$ die Summe der von t_1 unabhängigen Glieder der eben erwähnten Entwicklung von $\varphi_\alpha(t_1, \dots, t_n)$ bezeichnet, und $\varphi_\alpha^{(0)}(t_2, \dots, t_n)$ dieselbe Bedeutung für die Function $\frac{\partial \log \varphi(t_1, \dots, t_n)}{\partial t_\alpha}$ hat. Aus der Form der Ausdrücke auf beiden Seiten dieser Gleichung ergibt sich dann wieder, dass die Gleichung für jedes den Bedingungen C) entsprechende Werthsystem (t_1, t_2, \dots, t_n) gilt.

Damit ist bewiesen, dass sich

$$\sum_{\alpha=0}^n \varphi_\alpha(t_1, \dots, t_n) dt_\alpha$$

auf die Form

$$d \log \varphi(t_1, \dots, t_n) + \sum_{\alpha=1}^n \mathfrak{P}(t_1, \dots, t_n)_\alpha dt_\alpha$$

bringen lässt. Der Ausdruck unter dem Summenzeichen genügt dann wieder den Integrabilitätsbedingungen und kann nach dem im zuerst betrachteten Falle Bewiesenen in der Form

$$d \log \mathfrak{P}(t_1, \dots, t_n)$$

dargestellt werden, wobei man $\mathfrak{P}(0, \dots, 0) = 1$ annehmen kann. Folglich ist, wenn man, unter C eine von Null verschiedene, im Übrigen willkürlich

anzunehmende Constante verstehend,

$$\psi(t_1, \dots, t_n) = C \varphi(t_1, \dots, t_n) \mathfrak{P}(t_1, \dots, t_n)$$

setzt,

$$\sum_{\alpha=1}^n \varphi_{\alpha}(t_1, \dots, t_n) dt_{\alpha} = d \log \psi(t_1, \dots, t_n).$$

Drückt man nunmehr t_1, \dots, t_n durch x_1, \dots, x_n aus und setzt

$$\psi(t_1, \dots, t_n) = f(x_1, \dots, x_n),$$

so ergibt sich

$$\sum_{\alpha=1}^n f_{\alpha}(x_1, \dots, x_n) dx_{\alpha} = d \log f(x_1, \dots, x_n).$$

Diese Gleichung gilt nun ihrer Herleitung zufolge für alle einer gewissen Umgebung der Stelle $(0, \dots, 0)$ angehörigen Werthsysteme (x_1, \dots, x_n) . Etwas Bestimmteres über den Convergenzbezirk der Reihe für $f(x_1, \dots, x_n)$ lässt sich durch die gegebene Deduction nicht ermitteln, weil bei derselben nur vorausgesetzt ist, dass die Functionen $f_{\alpha}(x_1, \dots, x_n)$ innerhalb einer begrenzten Umgebung der Stelle $(0, \dots, 0)$ überall eindeutig definirt seien und sich wie rationale Functionen verhalten. Gleichwohl reicht der in der vorstehenden Gleichung ausgesprochene Satz aus, um für den Fall, wo die Functionen $f_{\alpha}(x_1, \dots, x_n)$ sich an allen im Endlichen des Grössengebietes (x_1, \dots, x_n) liegenden Stellen wie rationale Functionen verhalten, das oben ausgesprochene Theorem zu beweisen.

Es sei (a_1, \dots, a_n) ein System bestimmter, endlicher Werthe von x_1, \dots, x_n , und man nehme an, es convergire die auf die beschriebene Weise hergeleitete Reihe $f(x_1, \dots, x_n)$ (in der wir uns jetzt für die Constante C einen bestimmten Werth gesetzt denken) für jedes den Bedingungen

$$|x_1| < |a_1|, \dots, |x_n| < |a_n|$$

genügende Werthsystem (x_1, \dots, x_n) . — Ferner sei (a'_1, \dots, a'_n) irgend ein bestimmtes Werthsystem, das den Bedingungen

$$|a'_1| = |a_1|, \dots, |a'_n| = |a_n|$$

gemäss, im Übrigen aber beliebig angenommen ist. Dann kann man innerhalb einer bestimmten Umgebung der Stelle (a'_1, \dots, a'_n)

$$f_{\alpha}(x_1, \dots, x_n) \text{ in der Form } \frac{\mathfrak{P}_{\alpha}^{(1)}(x_1 - a'_1, \dots, x_n - a'_n)}{\mathfrak{P}_{\alpha}^{(0)}(x_1 - a'_1, \dots, x_n - a'_n)}$$

darstellen und nach dem Vorhergehenden eine Reihe

$$\mathfrak{P}(x_1 - a'_1, \dots, x_n - a'_n)$$

herleiten, welche der Gleichung

$$d \log \mathfrak{P}(x_1 - a'_1, \dots, x_n - a'_n) = \sum_{\alpha} \frac{\mathfrak{P}_{\alpha}^{(1)}(x_1 - a'_1, \dots, x_n - a'_n)}{\mathfrak{P}_{\alpha}^{(0)}(x_1 - a'_1, \dots, x_n - a'_n)} dx_{\alpha}$$

genügt. Diese Reihe möge convergiren an allen Stellen, für die

$$|x_1 - a'_1| < \delta, \dots, |x_n - a'_n| < \delta$$

ist, wo δ eine positive Grösse bedeutet. Unter diesen Stellen giebt es nun auch solche — und zwar bilden dieselben ein $2n$ -fach ausgedehntes Continuum —, welche zugleich den Bedingungen

$$|x_1| < |a_1|, \dots, |x_n| < |a_n|$$

genügen. Innerhalb des Bereiches dieser Stellen hat man also

$$d \log \mathfrak{P}(x_1 - a'_1, \dots, x_n - a'_n) = \sum_{\alpha=1}^n f_{\alpha}(x_1, \dots, x_n) dx_{\alpha},$$

$$d \log f(x_1, \dots, x_n) = \sum_{\alpha=1}^n f_{\alpha}(x_1, \dots, x_n) dx_{\alpha},$$

$$\frac{d \mathfrak{P}(x_1 - a'_1, \dots, x_n - a'_n)}{\mathfrak{P}(x_1 - a'_1, \dots, x_n - a'_n)} = \frac{df(x_1, \dots, x_n)}{f(x_1, \dots, x_n)},$$

woraus sich, da die Functionen $f(x_1, \dots, x_n)$, $\mathfrak{P}(x_1 - a'_1, \dots, x_n - a'_n)$ innerhalb des in Rede stehenden Bereichs an allen Stellen sich regulär verhalten,

$$f(x_1, \dots, x_n) = C' \mathfrak{P}(x_1 - a'_1, \dots, x_n - a'_n)$$

ergiebt, wo C' eine von x_1, \dots, x_n unabhängige Grösse bedeutet. Da dies für jedes den angegebenen Bedingungen entsprechende Werthsystem (a'_1, \dots, a'_n) gilt, so folgt daraus (nach einem der Sätze, welche in der Functionentheorie in Betreff der Convergenzbedingungen für Potenzreihen entwickelt werden) die Existenz einer positiven Grösse δ' , so beschaffen, dass die Reihe auch noch convergirt für jedes den Bedingungen

$$|x_1| < |a_1| + \delta', \dots, |x_n| < |a_n| + \delta'$$

genügende Werthsystem (x_1, \dots, x_n). Daraus ergiebt sich sofort, dass die Reihe $f(x_1, \dots, x_n)$ für jedes System endlicher Werthe von x_1, \dots, x_n convergirt und

die Gleichung

$$\sum_{\alpha=1}^n f_{\alpha}(x_1, \dots, x_n) dx_{\alpha} = d \log f(x_1, \dots, x_n)$$

befriedigt.

Man sieht zugleich, wie sich die in $f(x_1, \dots, x_n)$ vorkommende Constante C so bestimmen lässt, dass einer der Coefficienten der Reihe, welcher nicht nothwendig bei jedem Werth von C gleich Null ist, einen vorgeschriebenen Werth erhält.

Es bedarf kaum der Erinnerung, dass in einem gegebenen Falle die Entwicklung der Reihe $f(x_1, \dots, x_n)$ nicht nothwendig auf dem beschriebenen Wege bewerkstelligt zu werden braucht. Vielmehr kann man, nachdem einmal durch das Vorstehende die Form und der Convergenzbezirk der Reihe festgestellt worden sind, jedes zur Bestimmung ihrer Coefficienten führende Verfahren ohne Verstoß gegen die Strenge der Herleitung anwenden.

5.

An das im Vorstehenden entwickelte Theorem schliesst sich nun ein anderes an, durch welches in manchen Fällen für eine eindeutige Function $f(x_1, \dots, x_n)$, welche an allen im Endlichen des Grössengebietes (x_1, \dots, x_n) liegenden Stellen sich wie eine rationale Function verhält, der Nachweis geführt werden kann, dass sie als Quotient zweier — transcendenten oder rationalen — ganzen Functionen von x_1, \dots, x_n darstellbar ist, und zwar in der Art, dass nur an denjenigen Stellen, wo $f(x_1, \dots, x_n)$ keinen bestimmten Werth hat, der Dividend sowohl als der Divisor verschwindet.

Angenommen, es sei eine bestimmte Function $f(x_1, \dots, x_n)$ in der angegebenen Weise als Quotient zweier ganzen Functionen $g_1(x_1, \dots, x_n), g_0(x_1, \dots, x_n)$ ausgedrückt, so hat man, wenn

$$\frac{\partial \log g_0(x_1, \dots, x_n)}{\partial x_{\alpha}} = f_{\alpha}^{(0)}(x_1, \dots, x_n),$$

$$\frac{\partial \log g_1(x_1, \dots, x_n)}{\partial x_{\alpha}} = f_{\alpha}^{(1)}(x_1, \dots, x_n)$$

gesetzt wird,

$$d \log f(x_1, \dots, x_n) = \sum_{\alpha=1}^n f_{\alpha}^{(1)}(x_1, \dots, x_n) dx_{\alpha} - \sum_{\alpha=1}^n f_{\alpha}^{(0)}(x_1, \dots, x_n) dx_{\alpha}$$

und es besitzen die Functionen $f_\alpha^{(0)}, f_\alpha^{(1)}$ folgende Eigenschaften:

- 1) Sie sind alle eindeutige Functionen von x_1, \dots, x_n , welche sich im Endlichen wie rationale Functionen verhalten.
- 2) Die Differentialausdrücke

$$\sum_{\alpha=1}^n f_\alpha^{(1)}(x_1, \dots, x_n) dx_\alpha, \quad \sum_{\alpha=1}^n f_\alpha^{(0)}(x_1, \dots, x_n) dx_\alpha$$

genügen beide den Integrabilitätsbedingungen.

- 3) Jede im Endlichen gelegene singuläre Stelle einer der Functionen $f_\alpha^{(0)}(x_1, \dots, x_n)$ ist zugleich eine singuläre Stelle der Function $f(x_1, \dots, x_n)$; jede im Endlichen gelegene singuläre Stelle einer der Functionen $f_\alpha^{(1)}(x_1, \dots, x_n)$ ist entweder eine Null-Stelle von $f(x_1, \dots, x_n)$ oder eine derjenigen singulären Stellen dieser Function, an denen sie keinen bestimmten Werth hat.

Dies Theorem — dessen Beweis auf der Hand liegt — lässt sich folgendermassen umkehren.

Angenommen, man wisse von einer irgendwie definirten Function $f(x_1, \dots, x_n)$, dass sie eine eindeutige Function der hier betrachteten Art sei, und es gelinge, das Differential

$$d \log f(x_1, \dots, x_n)$$

in der Form

$$\sum_{\alpha=1}^n f_\alpha^{(1)}(x_1, \dots, x_n) dx_\alpha - \sum_{\alpha=1}^n f_\alpha^{(0)}(x_1, \dots, x_n) dx_\alpha$$

dergestalt auszudrücken, dass die Functionen $f_\alpha^{(0)}, f_\alpha^{(1)}$ die im Vorstehenden unter 1), 2), 3) angegebenen Eigenschaften besitzen; so sind diese Functionen auch so beschaffen, dass sich auf die in Art. 4 gelehrt Weise zwei ganze Functionen $g_0(x_1, \dots, x_n), g_1(x_1, \dots, x_n)$ bestimmen lassen, welche die Gleichungen

$$A) \quad \begin{cases} d \log g_0(x_1, \dots, x_n) = \sum_{\alpha=1}^n f_\alpha^{(0)}(x_1, \dots, x_n) dx_\alpha \\ d \log g_1(x_1, \dots, x_n) = \sum_{\alpha=1}^n f_\alpha^{(1)}(x_1, \dots, x_n) dx_\alpha \end{cases}$$

befriedigen. Dann ist

$$B) \quad f(x_1, \dots, x_n) = C \frac{g_1(x_1, \dots, x_n)}{g_0(x_1, \dots, x_n)},$$

wo C eine von x_1, \dots, x_n unabhängige Grösse bezeichnet, und es verschwinden

g_0, g_1 gleichzeitig nur an solchen Stellen (x_1, \dots, x_n) , wo $f(x_1, \dots, x_n)$ keinen bestimmten Werth hat.

Es sei (a_1, \dots, a_n) irgend ein System endlicher Werthe der Grössen x_1, \dots, x_n , so giebt es — nach Art. 2 — eine gewisse Umgebung (\mathfrak{C}) der Stelle (a_1, \dots, a_n) , innerhalb welcher jede der Functionen $f, f_1^{(0)}, \dots, f_n^{(0)}, f_1^{(1)}, \dots, f_n^{(1)}$ sich als Quotient zweier Potenzreihen von $x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n$ in der Art darstellen lässt, dass der Dividend und der Divisor nur an solchen Stellen (x_1, \dots, x_n) , wo die betreffende Function keinen bestimmten Werth hat, gleichzeitig verschwinden. Bezeichnet man für $f, f_1^{(1)}, f_1^{(0)}$ die Dividenden bez. mit p, p'_α, q'_α und die Divisoren bez. mit q, p_α, q_α , so hat man

$$\sum_{\alpha=1}^n \left(\frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial x_\alpha} - \frac{p'_\alpha}{p_\alpha} \right) dx_\alpha = \sum_{\alpha=1}^n \left(\frac{1}{q} \frac{\partial q}{\partial x_\alpha} - \frac{q'_\alpha}{q_\alpha} \right) dx_\alpha,$$

woraus sich, da die Veränderlichen x_1, \dots, x_n unabhängig von einander sind,

$$\frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial x_\alpha} - \frac{p'_\alpha}{p_\alpha} = \frac{1}{q} \frac{\partial q}{\partial x_\alpha} - \frac{q'_\alpha}{q_\alpha} \quad (\alpha = 1, 2, \dots, n)$$

ergiebt.

Der Voraussetzung 3) nach kann q_α innerhalb des Bereiches (\mathfrak{C}) nur an solchen Stellen (x_1, \dots, x_n) verschwinden, die zugleich singuläre Stellen der Function $\frac{p}{q}$ sind, für welche also $q = 0$ ist. Ebenso kann p_α nur an solchen Stellen verschwinden, an denen $p = 0$ ist. Daraus kann man schliessen, dass die Function

$$\frac{1}{q} \frac{\partial q}{\partial x_\alpha} - \frac{q'_\alpha}{q_\alpha}$$

sich innerhalb (\mathfrak{C}) regulär verhält. Denn wäre dies nicht der Fall, so hätte sie (nach Art. 3) innerhalb (\mathfrak{C}) unendlich viele singuläre Stellen, und unter diesen gäbe es nothwendig solche, an denen $q = 0$ wäre, p aber, und somit auch p_α , einen von Null verschiedenen Werth besässe, was der Gleichung

$$\frac{1}{q} \frac{\partial q}{\partial x_\alpha} - \frac{q'_\alpha}{q_\alpha} = \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial x_\alpha} - \frac{p'_\alpha}{p_\alpha}$$

widerspricht. Man kann also für die dem Bereiche (\mathfrak{C}) angehörigen Werthsysteme (x_1, \dots, x_n)

$$\frac{1}{q} \frac{\partial q}{\partial x_\alpha} - \frac{q'_\alpha}{q_\alpha} = \mathfrak{P}_\alpha(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)$$

setzen und hat dann

$$\sum_{\alpha=1}^n f_{\alpha}^{(0)}(x_1, \dots, x_n) dx_{\alpha} = d \log q - \sum_{\alpha=1}^n \mathfrak{P}_{\alpha}(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n) dx_{\alpha},$$

$$\sum_{\alpha=1}^n f_{\alpha}^{(1)}(x_1, \dots, x_n) dx_{\alpha} = d \log p - \sum_{\alpha=1}^n \mathfrak{P}_{\alpha}(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n) dx_{\alpha}.$$

Der Differentialausdruck auf der rechten Seite dieser Gleichungen genügt nun den Integrabilitätsbedingungen; man kann ihn daher in der Form

$$d\mathfrak{P}(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)$$

darstellen und erhält dann

$$\sum_{\alpha=1}^n f_{\alpha}^{(0)}(x_1, \dots, x_n) dx_{\alpha} = d \log \{q \cdot e^{-\mathfrak{P}(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)}\} = d \log \mathfrak{P}^{(0)}(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n),$$

$$\sum_{\alpha=1}^n f_{\alpha}^{(1)}(x_1, \dots, x_n) dx_{\alpha} = d \log \{p \cdot e^{-\mathfrak{P}(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)}\} = d \log \mathfrak{P}^{(1)}(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n).$$

Es sind also die Functionen $f_{\alpha}^{(0)}(x_1, \dots, x_n)$, $f_{\alpha}^{(1)}(x_1, \dots, x_n)$ in der That so beschaffen, dass man (nach Art. 4) zwei ganze Functionen $g_0(x_1, \dots, x_n)$, $g_1(x_1, \dots, x_n)$ bestimmen kann, für welche — bei gehöriger Bestimmung der Constante C — die vorstehenden Gleichungen A), B) gelten. In der Umgebung jeder bestimmten Stelle (a_1, \dots, a_n) ist dann

$$g_0(x_1, \dots, x_n) = C_1 q e^{-\mathfrak{P}(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)},$$

$$g_1(x_1, \dots, x_n) = C_2 p e^{-\mathfrak{P}(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)},$$

wo C_1 , C_2 Constanten bezeichnen; es verschwinden daher g_0 , g_1 gleichzeitig an der Stelle (a_1, \dots, a_n) nur dann, wenn auch p , q an derselben beide verschwinden, $f(x_1, \dots, x_n)$ also für das Werthsystem $(x_1 = a_1, \dots, x_n = a_n)$ keinen bestimmten Werth besitzt; w. z. b. w.

Anmerkungen.

1. Es ist vorausgesetzt worden, man wisse von der Function $f(x_1, \dots, x_n)$, dass sie eine eindeutige Function sei und im Endlichen sich überall wie eine rationale Function verhalte. Ist dies nicht bekannt, vielmehr die Aufgabe gestellt, die Function so zu bestimmen, dass sie der Differentialgleichung

$$d \log f(x_1, \dots, x_n) = \sum_{\alpha=1}^n f_{\alpha}^{(1)}(x_1, \dots, x_n) dx_{\alpha} - \sum_{\alpha=1}^n f_{\alpha}^{(0)}(x_1, \dots, x_n) dx_{\alpha}$$

genüge, so hat man zur Lösung dieser Aufgabe kein anderes Mittel als zu untersuchen, ob jeder der beiden Differentialausdrücke auf der Rechten der Gleichung die in Art. 4 von dem dort betrachteten Ausdruck

$$\sum_{\alpha=1}^n f_{\alpha}(x_1, \dots, x_n) dx_{\alpha}$$

vorausgesetzte Beschaffenheit habe, und im Falle, dass sich dies bestätigt und somit feststeht, dass $f(x_1, \dots, x_n)$ in der Form

$$\frac{g_1(x_1, \dots, x_n)}{g_0(x_1, \dots, x_n)}$$

dargestellt werden kann, sich zu vergewissern, ob die Functionen $f_{\alpha}^{(0)}, f_{\alpha}^{(1)}$ auch der oben (unter 3) angegebenen Bedingung entsprechen.

2. Das im Vorstehenden entwickelte Theorem kann ohne Schwierigkeit folgendermassen verallgemeinert werden:

Es sei von einer irgendwie definirten Function $f(x_1, \dots, x_n)$ bekannt, dass sie sich im Endlichen überall wie eine rationale Function verhalte, und es lasse sich $d^m \log f(x_1, \dots, x_n)$ in der Form

$$d^m \log f(x_1, \dots, x_n) = \sum_{\alpha_1, \dots, \alpha_m} f_{\alpha_1, \dots, \alpha_m}^{(1)}(x_1, \dots, x_n) dx_{\alpha_1} \dots dx_{\alpha_m} - \sum_{\alpha_1, \dots, \alpha_m} f_{\alpha_1, \dots, \alpha_m}^{(0)}(x_1, \dots, x_n) dx_{\alpha_1} \dots dx_{\alpha_m}$$

($\alpha_1, \dots, \alpha_m = 1, 2, \dots, n$)

dergestalt ausdrücken, dass jeder der beiden Differentialausdrücke auf der Rechten der Gleichung den Integrabilitätsbedingungen genüge, und die Functionen $f_{\alpha_1, \dots, \alpha_m}^{(0)}, f_{\alpha_1, \dots, \alpha_m}^{(1)}$ die im Vorstehenden unter 1), 3) angegebene Beschaffenheit besitzen, so ist $f(x_1, \dots, x_n)$ in der Form

$$\frac{g_1(x_1, \dots, x_n)}{g_0(x_1, \dots, x_n)}$$

darstellbar, wo g_0, g_1 ganze Functionen von x_1, \dots, x_n sind, welche nur an solchen Stellen (x_1, \dots, x_n) , wo $f(x_1, \dots, x_n)$ keinen bestimmten Werth hat, gleichzeitig verschwinden.

Der Beweis dieses Satzes ist dem für den Fall, wo $m = 1$ ist, durchgeführten ganz analog, und es braucht dabei nur folgender, leicht abzuleitende Hilfssatz vorausgesetzt zu werden:

Genügt ein Differentialausdruck

$$\sum_{\alpha_1, \dots, \alpha_m} \mathfrak{F}_{\alpha_1, \dots, \alpha_m}(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n) dx_{\alpha_1} \dots dx_{\alpha_m}$$

den Integrabilitätsbedingungen, so kann er auf die Form

$$d^m \mathfrak{P}(x_1 - a_1, \dots, x_n - a_n)$$

gebracht werden.

3. Auch das in Art. 4 bewiesene Theorem kann folgendermassen verallgemeinert werden:

Ist ein den Integrabilitätsbedingungen genügender Differentialausdruck

$$\sum_{(\alpha_1, \dots, \alpha_m = 1, 2, \dots, n)} f_{\alpha_1, \dots, \alpha_m}(x_1, \dots, x_n) dx_{\alpha_1} \dots dx_{\alpha_m}$$

gegeben, in welchem die Functionen $f_{\alpha_1, \dots, \alpha_m}(x_1, \dots, x_n)$ eindeutige Functionen der hier betrachteten Art sind, und lässt sich zeigen, dass derselbe, wenn für x_1, \dots, x_n lineare Functionen einer Veränderlichen τ gesetzt werden — welche nur der in Art. 4 für den Fall, wo $m = 1$ ist, angegebenen Bedingung unterworfen sind — für hinlänglich kleine Werthe von τ stets die Gestalt

$$\mu d^m \log \tau + \mathfrak{P}(\tau) d\tau^m$$

erhält, wo μ entweder gleich Null oder eine positive ganze Zahl ist, so ist jede der Differentialgleichung

$$d^m \log f(x_1, \dots, x_n) = \sum_{(\alpha)} f_{\alpha_1, \dots, \alpha_m}(x_1, \dots, x_n) dx_{\alpha_1} \dots dx_{\alpha_m}$$

genügende Function $f(x_1, \dots, x_n)$ eine ganze Function von x_1, \dots, x_n ; und ist eine solche Function $f_0(x_1, \dots, x_n)$ bestimmt, so erhält man den allgemeinen Ausdruck von $f(x_1, \dots, x_n)$, wenn man

$$f(x_1, \dots, x_n) = f_0(x_1, \dots, x_n) e^{G(x_1, \dots, x_n)}$$

setzt und für $G(x_1, \dots, x_n)$ eine ganze rationale Function $(m-1)^{\text{ten}}$ Grades von x_1, \dots, x_n mit willkürlichen Coefficienten nimmt.

Um diesen Satz beweisen zu können, hat man zunächst zu untersuchen, unter welchen Bedingungen ein gegebener Ausdruck

$$\sum_{\alpha=1}^n f_{\alpha}(x_1, \dots, x_n) dx_{\alpha},$$

in welchem die Functionen $f_{\alpha}(x_1, \dots, x_n)$ eindeutige Functionen der hier betrachteten Art sind, das Differential einer ebenfalls eindeutigen Function ist — eine Frage, welche sich mit Hülfe der Ergebnisse der vorhergehenden

Es soll nun bewiesen werden, dass sich $\varphi(v_1, v_2, \dots, v_n)$ durch eine beständig convergirende Reihe von der Form

$$\sum C_{v_1, v_2, \dots, v_n} e^{2(v_1 v_1 + v_2 v_2 + \dots + v_n v_n) \pi i}$$

$(v_1, v_2, \dots, v_n = -\infty, \dots, +\infty)$

darstellen lässt, wo die C_{v_1, v_2, \dots, v_n} von v_1, v_2, \dots, v_n unabhängige Grössen sind.

Es ist leicht, diesen Satz aus dem auf Functionen mehrerer Veränderlichen ausgedehnten Fourier'schen Theoreme abzuleiten. Man setzt zu dem Ende, unter $s_1, \dots, s_n, t_1, \dots, t_n$ reelle Grössen verstehend,

$$v_\alpha = t_\alpha + s_\alpha i,$$

so lässt sich $\varphi(t_1 + s_1 i, \dots, t_n + s_n i)$, als Function von t_1, \dots, t_n betrachtet, in der Form

$$\sum C'_{v_1, \dots, v_n} e^{2(v_1 t_1 + \dots + v_n t_n) \pi i} \quad (v_1, \dots, v_n = -\infty, \dots, +\infty)$$

ausdrücken, wenn man

$$C'_{v_1, \dots, v_n} = \int_0^1 \dots \int_0^1 \varphi(t_1 + s_1 i, \dots, t_n + s_n i) e^{-2(v_1 t_1 + \dots + v_n t_n) \pi i} dt_1 \dots dt_n$$

nimmt. Man beweist dann leicht, dass die partiellen Ableitungen der als Function von s_1, \dots, s_n betrachteten Grösse

$$C'_{v_1, \dots, v_n} e^{2(v_1 s_1 + \dots + v_n s_n) \pi}$$

bei der vorausgesetzten Beschaffenheit der Function φ sämtlich gleich Null sind, diese Grösse also einen von s_1, \dots, s_n unabhängigen Werth hat, woraus sich der angegebene Ausdruck von $\varphi(v_1, \dots, v_n)$ und die Bestimmung von C_{v_1, \dots, v_n} , nämlich

$$C_{v_1, \dots, v_n} = \int_0^1 \dots \int_0^1 \varphi(t_1, \dots, t_n) e^{-2(v_1 t_1 + \dots + v_n t_n) \pi i} dt_1 \dots dt_n$$

ergiebt.

Die mit einer strengen Begründung des Fourier'schen Theorems für reelle Veränderliche verknüpften Schwierigkeiten fallen bei der Function $\varphi(t_1 + s_1 i, \dots, t_n + s_n i)$ fort, indem deren Ableitungen stetige Functionen von t_1, \dots, t_n sind.

Es lässt sich indess der in Rede stehende Ausdruck von $\varphi(v, \dots v_n)$ auch aus den Fundamentalsätzen der Theorie der gewöhnlichen Potenzreihen ableiten. Dies soll hier ausgeführt werden.

Es sei

$$g(v, x_1, \dots x_r)$$

eine ganze Function der $r+1$ von einander unabhängigen Veränderlichen $v, x_1, \dots x_r$, welche in Beziehung auf die Veränderliche v die Periode 1 besitzt, so dass, wenn m eine beliebige ganze Zahl ist, die Gleichung

$$g(v+m, x_1, \dots x_r) = g(v, x_1, \dots x_r)$$

besteht. Setzt man dann

$$g_0(v, x_1, \dots x_r) = \frac{1}{2}g(v, x_1, \dots x_r) + \frac{1}{2}g(-v, x_1, \dots x_r),$$

$$g_1(v, x_1, \dots x_r) = \frac{\frac{1}{2}g(v, x_1, \dots x_r) - \frac{1}{2}g(-v, x_1, \dots x_r)}{\sin 2v\pi},$$

so ist nicht nur g_0 , sondern auch g_1 eine ganze Function von $v, x_1, \dots x_r$. Denn der Nenner von g_1 verschwindet nur, wenn $v = \frac{m}{2}$ und m eine ganze Zahl ist; setzt man aber $v = \frac{m}{2} + h$, so ist

$$\sin 2\left(\frac{m}{2} + h\right)\pi = \pm \sin 2h\pi,$$

$$g\left(-\frac{m}{2} - h, x_1, \dots x_r\right) = g\left(\frac{m}{2} - h, x_1, \dots x_r\right),$$

also

$$g\left(\frac{m}{2} + h, x_1, \dots x_r\right) - g\left(-\frac{m}{2} - h, x_1, \dots x_r\right) = h\mathfrak{P}(h, x_1, \dots x_r),$$

und es hat somit $g_1(v, x_1, \dots x_r)$ auch für $v = \frac{m}{2}$ einen bestimmten endlichen Werth.

Jetzt sei s eine neue unbeschränkt veränderliche Grösse, und es werde eine Function $G_0(s, x_1, \dots x_r)$ folgendermassen defnirt: Jedem endlichen Werthe von s ordne man einen die Gleichung

$$s = \cos 2v\pi$$

befriedigenden Werth von v zu und nehme dann

$$G_0(s, x_1, \dots x_r) = g_0(v, x_1, \dots x_r),$$

so hat $G_0(s, x_1, \dots, x_r)$ für jedes System endlicher Werthe von s, x_1, \dots, x_r einen bestimmten und ebenfalls endlichen Werth. Denn es sei v' irgend einer derjenigen Werthe von v , welche für einen gegebenen Werth s' von s der Gleichung $s' = \cos 2v\pi$ genügen, so werden alle übrigen durch die Formel

$$\pm v' + m$$

geliefert, wo m eine ganze Zahl bedeutet; für alle diese Werthe von v hat aber $g_0(v, x_1, \dots, x_r)$ denselben Werth. Nimmt man ferner s hinlänglich nahe bei s' an und setzt $h = 2\pi(v - v')$, so erhält man aus der Gleichung

$$s - s' = -\sin 2v'\pi \cdot \left(h - \frac{h^3}{3!} + \dots \right) - \cos 2v'\pi \cdot \left(\frac{h^2}{2!} - \frac{h^4}{4!} + \dots \right),$$

falls $\sin 2v'\pi$ nicht gleich Null ist, einen dieselbe befriedigenden Werth von $v - v'$, und in dem Falle, wo $\sin 2v'\pi = 0$ ist, einen Werth von $(v - v')^2$ in der Form einer Potenzreihe von $s - s'$ ausgedrückt. Da nun im letzteren Falle $v' = \frac{m}{2}$ und daher

$$\begin{aligned} g_0(v, x_1, \dots, x_r) &= \frac{1}{2} g\left(\frac{m}{2} + (v - v'), x_1, \dots, x_r\right) + \frac{1}{2} g\left(-\frac{m}{2} - (v - v'), x_1, \dots, x_r\right) \\ &= \frac{1}{2} g\left(\frac{m}{2} + (v - v'), x_1, \dots, x_r\right) + \frac{1}{2} g\left(\frac{m}{2} - (v - v'), x_1, \dots, x_r\right) \end{aligned}$$

ist, also in der Entwicklung von $g_0(v, x_1, \dots, x_r)$ nach Potenzen von $v - v'$ nur gerade Potenzen dieser Grösse vorkommen, so lässt sich in beiden Fällen $G_0(s, x_1, \dots, x_r)$ als Potenzreihe von $s - s', x_1, \dots, x_r$ darstellen. Damit ist bewiesen, dass $G_0(s, x_1, \dots, x_r)$ eine ganze Function von s, x_1, \dots, x_r ist, welche, wenn $s = \cos 2v\pi$ gesetzt wird, in $g_0(v, x_1, \dots, x_r)$ übergeht.

Ebenso wird gezeigt, dass eine ganze Function $G_1(s, x_1, \dots, x_r)$ existirt, welche, wenn $s = \cos 2v\pi$ gesetzt wird, in $g_1(v, x_1, \dots, x_r)$ übergeht.

Hiernach hat man

$$g(v, x_1, \dots, x_r) = G_0(\cos 2v\pi, x_1, \dots, x_r) + G_1(\cos 2v\pi, x_1, \dots, x_r) \sin 2v\pi.$$

Wendet man nun diesen Satz auf die Function $\varphi(v_1, v_2, \dots, v_n)$ an, so kann man dieselbe zunächst auf die Form

$$G_0(\cos 2v_1\pi, v_2, \dots, v_n) + G_1(\cos 2v_1\pi, v_2, \dots, v_n) \sin 2v_1\pi$$

bringen. Die Functionen G_0, G_1 haben dann in Beziehung auf jedes Argument

v_2, \dots, v_n die Periode 1, und man erhält also (für $\varepsilon = 0, 1$):

$$G_\varepsilon(\cos 2v_1\pi, v_2, \dots, v_n) = G_{\varepsilon,0}(\cos 2v_1\pi, \cos 2v_2\pi, v_3, \dots, v_n) \\ + G_{\varepsilon,1}(\cos 2v_1\pi, \cos 2v_2\pi, v_3, \dots, v_n) \sin 2v_2\pi.$$

Dann haben die Functionen $G_{\varepsilon,0}, G_{\varepsilon,1}$, in Beziehung auf jedes der Argumente v_3, \dots, v_n die Periode 1; man erhält also (für $\varepsilon = 0, 1; \varepsilon_1 = 0, 1$)

$$G_{\varepsilon,\varepsilon_1}(\cos 2v_1\pi, \cos 2v_2\pi, v_3, \dots, v_n) = G_{\varepsilon,\varepsilon_1,0}(\cos 2v_1\pi, \cos 2v_2\pi, \cos 2v_3\pi, v_4, \dots, v_n) \\ + G_{\varepsilon,\varepsilon_1,1}(\cos 2v_1\pi, \cos 2v_2\pi, \cos 2v_3\pi, v_4, \dots, v_n) \sin 2v_3\pi.$$

So fortfahrend kommt man zu dem Ergebniss, dass sich $\varphi(v_1, v_2, \dots, v_n)$ in der Form

$$\sum_{\varepsilon=0}^{\varepsilon=1} \sum_{\varepsilon_1=0}^{\varepsilon_1=1} \dots \sum_{\varepsilon_{n-1}=0}^{\varepsilon_{n-1}=1} G_{\varepsilon,\varepsilon_1,\dots,\varepsilon_{n-1}}(\cos 2v_1\pi, \cos 2v_2\pi, \dots, \cos 2v_n\pi) \sin^\varepsilon 2v_1\pi \cdot \sin^{\varepsilon_1} 2v_2\pi \dots \sin^{\varepsilon_{n-1}} 2v_n\pi$$

darstellen lässt, wo die Functionen $G_{\varepsilon,\varepsilon_1,\dots,\varepsilon_{n-1}}$ sämmtlich ganze Functionen der Grössen $\cos 2v_1\pi, \cos 2v_2\pi, \dots, \cos 2v_n\pi$ sind.

Setzt man sodann

$$\cos 2v_\alpha\pi = \frac{1}{2} e^{2v_\alpha\pi i} + \frac{1}{2} e^{-2v_\alpha\pi i}, \quad \sin 2v_\alpha\pi = \frac{1}{2i} e^{2v_\alpha\pi i} - \frac{1}{2i} e^{-2v_\alpha\pi i}, \\ (\alpha = 1, \dots, n)$$

so kann der vorstehende Ausdruck in eine beständig convergirende Potenzreihe der $2n$ Grössen

$$e^{2v_1\pi i}, e^{-2v_1\pi i}, \dots, e^{2v_n\pi i}, e^{-2v_n\pi i}$$

verwandelt werden, so dass man

$$\varphi(v_1, v_2, \dots, v_n) = \sum_{(\lambda_1, \mu_1, \dots, \lambda_n, \mu_n = 0, \dots, \infty)} A_{\lambda_1, \mu_1, \dots, \lambda_n, \mu_n} e^{2[(\lambda_1 - \mu_1)v_1 + (\lambda_2 - \mu_2)v_2 + \dots + (\lambda_n - \mu_n)v_n] \pi i}$$

erhält. Da diese Reihe unbedingt convergirt, so kann man, wenn v_1, v_2, \dots, v_n irgend n bestimmte ganze Zahlen sind, diejenigen Glieder der Reihe, in denen die Differenzen

$$\lambda_1 - \mu_1, \lambda_2 - \mu_2, \dots, \lambda_n - \mu_n$$

bezüglich die Werthe

$$v_1, v_2, \dots, v_n$$

haben, in ein Glied zusammenziehen, wodurch sich die oben angegebene, ebenfalls unbedingt convergirende Reihe für $\varphi(v_1, v_2, \dots v_n)$ ergibt.

Drückt man sodann $v_1, v_2, \dots v_n$ durch die ursprünglichen Veränderlichen $u_1, u_2, \dots u_n$ aus, so gelangt man zu einer Entwicklung von $f(u_1, u_2, \dots u_n)$, in welcher jedes einzelne Glied dieselbe Periodicität wie die Function $f(u_1, \dots u_n)$ selbst besitzt.

Der gleichmässigen Convergenz der für $\varphi(v_1, v_2, \dots v_n)$ gefundenen Reihe wegen ist, wenn $\mu_1, \dots \mu_n$ beliebige ganze Zahlen sind,

$$\begin{aligned} & \int_0^1 \dots \int_0^1 \varphi(v_1, \dots v_n) e^{-2(\mu_1 v_1 + \dots + \mu_n v_n) \pi i} dv_1 \dots dv_n \\ &= \sum C_{\mu_1, \dots \mu_n} \int_0^1 \dots \int_0^1 e^{2[(v_1 - \mu_1) v_1 + \dots + (v_n - \mu_n) v_n] \pi i} dv_1 \dots dv_n, \\ & \qquad \qquad \qquad (v_1, \dots v_n = -\infty, \dots + \infty) \end{aligned}$$

woraus in Übereinstimmung mit dem oben Angegebenen

$$C_{\mu_1, \dots \mu_n} = \int_0^1 \dots \int_0^1 \varphi(v_1, \dots v_n) e^{-2(\mu_1 v_1 + \dots + \mu_n v_n) \pi i} dv_1 \dots dv_n$$

folgt.

ÜBER EINEN FUNCTIONENTHEORETISCHEN SATZ DES
HERRN G. MITTAG-LEFFLER.

(Aus dem Monatsbericht der Königl. Akademie der Wissenschaften
vom 5. August 1880.)

1.

In den Berichten der Akademie der Wissenschaften zu Stockholm*) a. d. J. 1877 hat Herr Mittag-Leffler im Anschluss an meine in den Abhandlungen unserer Akademie a. d. J. 1876**) veröffentlichten Untersuchungen über die eindeutigen analytischen Functionen einer Veränderlichen einige sehr beachtenswerthe Theoreme entwickelt. Unter denselben ist von besonderer Wichtigkeit das nachstehende, auf welches näher einzugehen ich aus dem Grunde Veranlassung habe, weil es mir dazu gedient hat, die Ergebnisse meiner Arbeit in mehreren wesentlichen Punkten zu vervollständigen:

»Es seien gegeben

- 1) eine unendliche Reihe bestimmter endlicher Grössen:

$$a_1, a_2, a_3, \dots,$$

unter denen keine zwei gleiche sich finden, und die der Bedingung

$$\lim_{v=\infty} a_v = \infty$$

genügen; und

- 2) eine unendliche Reihe rationaler Functionen einer Veränderlichen x :

$$f_1(x), f_2(x), f_3(x), \dots,$$

von denen $f_v(x)$ nur an der Stelle ($x = a_v$) unendlich gross wird und für $x = \infty$ verschwindet.

*) Öfversigt af Kongl. Vetenskaps-Akademiens Förhandlingar, 1877.

**) [S. 77 dieses Bandes.]

Dann lässt sich stets eine eindeutige analytische Function $F(x)$ mit der einen wesentlichen singulären Stelle ∞ bilden, welche nur an den Stellen a_1, a_2, a_3, \dots unendlich gross wird, und zwar so, dass — für jeden bestimmten Werth von ν — die Differenz

$$F(x) - f_\nu(x)$$

an der Stelle ($x = a_\nu$) einen endlichen Werth hat, und daher innerhalb einer gewissen Umgebung dieser Stelle

$$F(x) \text{ in der Form } f_\nu(x) + \mathfrak{P}(x - a_\nu)$$

dargestellt werden kann.«

Herr Mittag-Leffler beweist diesen Satz, indem er zeigt, dass sich aus den gegebenen Functionen

$$f_1(x), f_2(x), f_3(x), \dots$$

eine Reihe anderer rationaler Functionen:

$$F_1(x), F_2(x), F_3(x), \dots$$

dergestalt ableiten lässt, dass jede der Differenzen

$$F_1(x) - f_1(x), F_2(x) - f_2(x), F_3(x) - f_3(x), \dots$$

eine ganze Function von x oder eine Constante ist, und zugleich die unendliche Reihe

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} F_\nu(x)$$

innerhalb jedes Bereichs, der keine der Stellen a_1, a_2, a_3, \dots enthält, gleichmässig convergirt, woraus sich folgern lässt, dass dieselbe eine Function $F(x)$ von der angegebenen Beschaffenheit darstellt.

Man kann indess für die Functionen $F_\nu(x)$ eine einfachere Bildungsweise als die von Herrn Mittag-Leffler auseinandergesetzte angeben und dadurch den Beweis des Satzes erheblich vereinfachen.

Man nehme eine unendliche Reihe positiver Grössen:

$$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots,$$

deren Summe einen endlichen Werth hat, und ausserdem eine ebenfalls positive Grösse ε , die < 1 ist, willkürlich an.

Ist nun, für einen bestimmten Werth von ν , $a_\nu = 0$, so nehme man

$$F_\nu(x) = f_\nu(x).$$

Wenn aber a_ν einen von Null verschiedenen Werth hat, so entwickle man $f_\nu(x)$ in eine Potenzreihe

$$\sum_{\mu=0}^{\infty} A_\mu^{(\nu)} x^\mu,$$

welche für jeden der Bedingung

$$\left| \frac{x}{a_\nu} \right| < 1$$

genügenden Werth von x convergirt. Dann kann man eine ganze Zahl m_ν so bestimmen, dass für jeden der Bedingung

$$\left| \frac{x}{a_\nu} \right| \leq \varepsilon$$

entsprechenden Werth von x der absolute Betrag von

$$\sum_{\mu=m_\nu}^{\infty} A_\mu^{(\nu)} x^\mu$$

kleiner als ε , ist.*) Nach Ermittlung dieser Zahl m_ν nehme man

$$F_\nu(x) = f_\nu(x) - \sum_{\mu=0}^{m_\nu-1} A_\mu^{(\nu)} x^\mu,$$

*) Nach Annahme einer positiven Grösse ε_0 , die kleiner als 1, aber grösser als ε ist, bestimme man eine Grösse g so, dass für jeden Werth von x , der den absoluten Betrag $\varepsilon_0 |a_\nu|$ hat,

$$|A_\mu^{(\nu)} x^\mu| \leq g$$

ist. Dann hat man

$$|A_\mu^{(\nu)}| \leq g \cdot \varepsilon_0 |a_\nu|^{-\mu},$$

und es ist somit, wenn $\left| \frac{x}{a_\nu} \right| \leq \varepsilon$,

$$\left| \sum_{\mu=m}^{\infty} A_\mu^{(\nu)} x^\mu \right| \leq g \sum_{\mu=m}^{\infty} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^\mu = \frac{g}{1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^m.$$

Man kann also für m_ν jede ganze, nicht negative Zahl m wählen, die der Bedingung

$$\frac{g}{1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^m < \varepsilon_\nu$$

genügt.

wobei zu bemerken, dass $F_\nu(x) = f_\nu(x)$ zu setzen ist, wenn $m_\nu = 0$, und dass man

$$F_\nu(x) = x^{m_\nu} \varphi_\nu(x)$$

hat, wo $\varphi_\nu(x)$ eine rationale Function ist, die ebenso wie $f_\nu(x)$ nur für $x = a_\nu$ unendlich gross wird und für $x = \infty$ verschwindet.

Nun sei x_0 irgend ein bestimmter endlicher Werth von x , der nicht in der Reihe

$$a_1, a_2, a_3, \dots$$

enthalten ist, und ϱ eine positive Grösse, die man so klein anzunehmen hat, dass auch unter denjenigen Werthen von x , für die

$$|x - x_0| \leq \varrho,$$

keine der Grössen a_1, a_2, a_3, \dots sich findet. Dann kann, wenn δ irgend eine gegebene, beliebig kleine positive Grösse ist, eine ganze Zahl r so angenommen werden, dass

$$\sum_{\nu=r}^{\infty} \varepsilon_\nu < \delta,$$

und dass für jeden der eben angegebenen Werthe von x , sobald $\nu \geq r$,

$$\left| \frac{x}{a_\nu} \right| \leq \varepsilon$$

und somit

$$|F_\nu(x)| < \varepsilon_\nu,$$

$$\left| \sum_{\nu=r}^{\infty} F_\nu(x) \right| < \delta$$

ist. Die Reihe

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} F_\nu(x)$$

convergiert also, und zwar gleichmässig, für alle der Bedingung

$$|x - x_0| \leq \varrho$$

entsprechenden Werthe von x , und kann daher, nach einem bekannten Satz, für diese auch in der Form einer gewöhnlichen Potenzreihe von $(x - x_0)$ dargestellt werden.

Ist ferner a_λ irgend eine der Grössen a_1, a_2, a_3, \dots , und nimmt man ϱ so klein an, dass sich unter denjenigen Werthen von x , für die

$$|x - a_\lambda| \leq \varrho,$$

ausser a_λ keine der genannten Grössen findet, so ist nach dem Vorstehenden die Reihe

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} F_\nu(x) - F_\lambda(x)$$

für die in Rede stehenden Werthe von x gleichmässig convergent und in der Form

$$\mathfrak{P}(x - a_\lambda)$$

darstellbar, so dass man

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} F_\nu(x) = F_\lambda(x) + \mathfrak{P}(x - a_\lambda) = f_\lambda(x) + \mathfrak{P}_1(x - a_\lambda)$$

hat. Damit ist bewiesen, dass die Reihe

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} F_\nu(x)$$

eine Function $F(x)$ von der in dem angeführten Satze angegebenen Beschaffenheit darstellt.

Hierzu ist noch Folgendes zu bemerken. Ist $G(x)$ eine beliebige (rationale oder transcendente) ganze Function von x , und setzt man

$$\bar{F}(x) = F(x) + G(x),$$

so ist auch $\bar{F}(x)$ eine Function von der in Rede stehenden Beschaffenheit. Und umgekehrt, wenn $F(x)$, $\bar{F}(x)$ irgend zwei solche Functionen sind, so ist die Differenz

$$\bar{F}(x) - F(x)$$

nothwendig eine ganze Function von x .

2.

Nunmehr sei $f(x)$ irgend eine gegebene eindeutige analytische Function von x , welche nur die eine wesentliche singuläre Stelle ∞ besitzt, und an beliebig vielen anderen Stellen

$$a_1, a_2, a_3, \dots$$

gleich ∞ wird. Dann ist in dem Falle, wo die Anzahl dieser Stellen unendlich gross ist,

$$\lim_{\nu=\infty} a_\nu = \infty,$$

da jeder endliche Bereich nur eine endliche Anzahl dieser Stellen enthalten kann.

Ferner lässt sich, wenn a_v eine l_v mal zu zählende Unendlichkeits-Stelle der Function $f(x)$ ist, für die einer bestimmten Umgebung dieser Stelle angehörigen Werthe von x

$$(x - a_v)^{l_v} f(x) \text{ in der Form } \sum_{\mu=0}^{\infty} C_{\mu}^{(v)} (x - a_v)^{\mu}$$

darstellen; man hat also, wenn

$$f_v(x) = \sum_{\mu=0}^{l_v-1} C_{\mu}^{(v)} (x - a_v)^{-l_v+\mu}$$

gesetzt wird,

$$f(x) = f_v(x) + \mathfrak{P}(x - a_v),$$

und es ist $f_v(x)$ eine rationale Function von x , die nur für $x = a_v$ unendlich gross wird und für $x = \infty$ verschwindet.

Leitet man aus den Functionen

$$f_1(x), f_2(x), f_3(x), \dots$$

auf die in (1.) beschriebene Weise die Functionen

$$F_1(x), F_2(x), F_3(x), \dots$$

ab — wobei man, wenn die Anzahl der Unendlichkeits-Stellen von $f(x)$ endlich ist, $F_v(x) = f_v(x)$ setzen kann —, so wird die Differenz

$$f(x) - \sum_v F_v(x)$$

für keinen endlichen Werth von x unendlich gross, und es ist also

$$f(x) = \sum_v F_v(x) + G(x),$$

wo $G(x)$ wieder eine ganze Function von x bedeutet.

Die Function $G(x)$ kann aber auf mannigfaltige Weise als eine Summe von ganzen rationalen Functionen der Veränderlichen x dargestellt werden.

Es lässt sich also jede eindeutige analytische Function $f(x)$, für die im Endlichen keine wesentliche singuläre Stelle existirt, als eine Summe von rationalen Functionen der Veränderlichen x

dergestalt ausdrücken, dass jede dieser Functionen im Endlichen höchstens eine Unendlichkeits-Stelle hat.

Dies war bisher nur für die rationalen und für einige bestimmte transcendente Functionen einer Veränderlichen bekannt.

3.

Aus den beiden in (1, 2) entwickelten Sätzen leitet man leicht die folgenden ab.

A. Es seien gegeben

- 1) eine bestimmte Grösse c und eine unendliche Reihe von c verschiedener Grössen:

$$a_1, a_2, a_3, \dots,$$

unter denen keine zwei gleiche sich befinden, und die der Bedingung

$$\lim_{v=\infty} a_v = c$$

genügen; und

- 2) eine unendliche Reihe rationaler Functionen:

$$f_1(x), f_2(x), f_3(x), \dots,$$

von denen $f_v(x)$ nur an der Stelle ($x = a_v$) unendlich gross wird und für $x = c$ verschwindet.

Dann lässt sich stets eine eindeutige analytische Function $F(x)$ mit der einen wesentlichen singulären Stelle c bilden, welche nur an den Stellen a_1, a_2, a_3, \dots gleich ∞ wird, und zwar so, dass

$$F(x) - f_v(x)$$

an der Stelle ($x = a_v$) einen endlichen Werth hat.

Diese Function $F(x)$ kann dargestellt werden in der Form

$$\sum_{v=1}^{\infty} F_v(x),$$

wo $F_v(x)$ eine in der Form

$$f_v(x) + G_v \left(\frac{1}{x-c} \right)$$

ausdrückbare rationale Function bezeichnet.

B. Jede eindeutige analytische Function $f(x)$ mit nur einer wesentlichen singulären Stelle c lässt sich als eine Summe von rationalen Functionen der Veränderlichen x dergestalt ausdrücken, dass jede dieser Functionen nicht mehr als eine von c verschiedene Unendlichkeits-Stelle hat.

Diese Sätze ergeben sich aus den in (1, 2) bewiesenen, wenn man

$$\frac{1}{x-c} = x'$$

setzt und dann $f(x)$ als Function von x' betrachtet.

Der Satz B reiht sich den in §§ 2, 3 meiner oben angeführten Abhandlung entwickelten Sätzen an.

4.

In der genannten Abhandlung habe ich (§ 7) für eine eindeutige analytische Function einer Veränderlichen x mit n wesentlichen singulären Stellen (c_1, \dots, c_n) zwei allgemeine Ausdrücke aufgestellt, nämlich

$$1) \frac{\sum_{\lambda=1}^n G_{\lambda} \left(\frac{1}{x-c_{\lambda}} \right)}{\sum_{\lambda=1}^n G_{n+\lambda} \left(\frac{1}{x-c_{\lambda}} \right)},$$

$$2) \frac{\prod_{\lambda=1}^n G_{\lambda} \left(\frac{1}{x-c_{\lambda}} \right)}{\prod_{\lambda=1}^n G_{n+\lambda} \left(\frac{1}{x-c_{\lambda}} \right)} \cdot R^*(x),$$

wo $R^*(x)$ eine rationale Function von x , die nur an den Stellen c_1, \dots, c_n Null oder unendlich gross werden kann, bedeutet.

Bezeichnet man mit $F(x; c)$ eine eindeutige analytische Function von x mit einer wesentlichen singulären Stelle c , so lässt sich der Ausdruck 2) auf die Form

$$2a) \prod_{\lambda=1}^n F_{\lambda}(x; c_{\lambda})$$

bringen.

Nun stellt aber auch der Ausdruck

$$3) \sum_{\lambda=1}^n F_{\lambda}(x; c_{\lambda})$$

eine eindeutige Function mit n wesentlichen singulären Stellen (c_1, \dots, c_n) dar; es konnte aber mit den in der genannten Abhandlung angewandten Hilfsmitteln nicht bewiesen werden, dass jede solche Function, wie ich jetzt mit Hülfe des Satzes (3, A) zeigen will, in der vorstehenden Form 3) ausgedrückt werden kann.

Es sei $f(x)$ irgend eine Function von der in Rede stehenden Beschaffenheit, so zerlege man das Gebiet der Veränderlichen x dergestalt in n Theile, dass im Innern eines jeden eine der Stellen c_1, \dots, c_n liegt, und zugleich an der Grenze zwischen zwei Theilen $f(x)$ überall einen endlichen Werth hat. Derjenige Theil, in welchem c_λ liegt, werde mit C_λ bezeichnet. Angenommen nun, es enthalte, für einen bestimmten Werth von λ , C_λ unendlich viele ausserwesentliche singuläre Stellen der betrachteten Function:

$$a_1^{(\lambda)}, a_2^{(\lambda)}, a_3^{(\lambda)}, \dots,$$

so ist

$$\lim_{v=\infty} a_v^{(\lambda)} = c_\lambda.$$

Bestimmt man dann eine Reihe rationaler Functionen:

$$f_1^{(\lambda)}(x), f_2^{(\lambda)}(x), f_3^{(\lambda)}(x), \dots$$

dergestalt, dass $f_v^{(\lambda)}(x)$ nur an der Stelle $(x = a_v^{(\lambda)})$ unendlich gross wird, die Differenz

$$f(x) - f_v^{(\lambda)}(x)$$

aber an derselben Stelle einen endlichen Werth hat, und überdies $f_v^{(\lambda)}(x)$ für $x = c_\lambda$ verschwindet; so lässt sich nach (3, A) eine eindeutige Function $F^{(\lambda)}(x)$ mit der einen wesentlichen singulären Stelle c_λ herstellen, welche nur an den Stellen $a_1^{(\lambda)}, a_2^{(\lambda)}, a_3^{(\lambda)}, \dots$ unendlich gross wird, und zwar so, dass die Differenz

$$F^{(\lambda)}(x) - f_v^{(\lambda)}(x)$$

an der Stelle $(x = a_v^{(\lambda)})$ einen endlichen Werth hat. Daraus folgt dann, dass die Function

$$f(x) - F^{(\lambda)}(x)$$

im Innern und an der Grenze von C_λ ausser c_λ keine singuläre Stelle besitzt.

Enthält ferner C_λ nur eine endliche Anzahl ausserwesentlicher singulärer Stellen der Function $f(x)$:

$$a_1^{(\lambda)}, a_2^{(\lambda)}, \dots,$$

so setze man

$$F^{(\lambda)}(x) = f_1^{(\lambda)}(x) + f_2^{(\lambda)}(x) + \dots,$$

wo die Functionen $f_1^{(\lambda)}(x), f_2^{(\lambda)}(x), \dots$ dieselbe Bedeutung haben wie vorhin; dann wird $F^{(\lambda)}(x)$ nur an den Stellen $a_1^{(\lambda)}, a_2^{(\lambda)}, \dots$ unendlich gross, und es besitzt auch in diesem Falle die Function

$$f(x) - F^{(\lambda)}(x)$$

im Innern und an der Grenze von C_λ ausser c_λ keine singuläre Stelle.

In dem Falle endlich, wo C_λ keine ausserwesentliche Stelle der Function $f(x)$ enthält, setze man

$$F^{(\lambda)}(x) = 0.$$

Sind auf diese Weise die Functionen $F^{(1)}(x), \dots, F^{(n)}(x)$ bestimmt, so ist der Ausdruck

$$f(x) - \sum_{\lambda=1}^n F^{(\lambda)}(x)$$

eine eindeutige Function von x , die keine anderen (wesentlichen oder ausserwesentlichen) singulären Stellen als c_1, \dots, c_n besitzt, und somit (nach § 5 der g. Abhdlg.) in der Form

$$\sum_{\lambda=1}^n G_\lambda \left(\frac{1}{x - c_\lambda} \right)$$

dargestellt werden kann, wo $G_\lambda \left(\frac{1}{x - c_\lambda} \right)$ eine ganze Function von $\frac{1}{x - c_\lambda}$ bezeichnet.

Setzt man nun

$$f_\lambda(x; c_\lambda) = F^{(\lambda)}(x) + G_\lambda \left(\frac{1}{x - c_\lambda} \right),$$

so ist

$$f(x) = \sum_{\lambda=1}^n f_\lambda(x; c_\lambda).$$

Da die Functionen $F^{(\lambda)}(x), G_\lambda \left(\frac{1}{x - c_\lambda} \right)$ im Gebiete der Veränderlichen x keine von c_λ verschiedene wesentliche singuläre Stelle besitzen, so gilt dies auch von der Function $f_\lambda(x; c_\lambda)$; für diese aber ist in Folge der Voraussetzung,

dass $f(x)$ n wesentliche singuläre Stellen besitze, c_λ nothwendig eine solche Stelle.

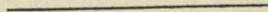
Zu bemerken ist, dass nicht zwei der Functionen

$$f_1(x; c_1), \dots, f_n(x; c_n)$$

eine gemeinschaftliche Unendlichkeits-Stelle haben.

Der im Vorstehenden mit Hülfe des in (1.) mitgetheilten Mittag-Leffler'schen Theorems begründete Satz ist in meiner Abhandlung bloss für den Fall bewiesen worden, wo die Function $f(x)$ ausserwesentliche singuläre Stellen entweder gar nicht oder nur in endlicher Anzahl besitzt. (S. § 5 d. g. Abhdlg.)

Stellt man jede der Functionen $f_\lambda(x; c_\lambda)$ in der oben (3, B) angegebenen Gestalt dar, so ergibt sich ein neuer allgemeiner Ausdruck einer eindeutigen analytischen Function $f(x)$ mit einer endlichen Anzahl wesentlicher singulärer Stellen in der Form einer unendlichen Reihe, deren Glieder sämtlich rationale Functionen der Veränderlichen x sind. Diese Reihe convergirt gleichmässig für alle Werthe von x , welche einem Bereiche angehören, der weder im Innern noch an der Grenze eine der singulären Stellen der Function $f(x)$ enthält.



ZUR FUNCTIONENLEHRE.

(Aus dem Monatsbericht der Königl. Akademie der Wissenschaften
vom 12. August 1880.)

Im Nachstehenden theile ich einige auf unendliche Reihen, deren Glieder rationale Functionen einer Veränderlichen sind, sich beziehende Untersuchungen mit, welche hauptsächlich den Zweck haben, gewisse, bisher — so viel ich weiss — nicht beachtete Eigenthümlichkeiten, die solche Reihen darbieten können und deren Kenntniss für die Functionenlehre von Wichtigkeit ist, klar zu stellen.

1.

Es seien unendlich viele rationale Functionen einer Veränderlichen x in bestimmter Aufeinanderfolge gegeben:

$$f_0(x), f_1(x), f_2(x), \dots$$

Die Gesamtheit derjenigen Werthe von x , für welche die Reihe

$$\sum_{v=0}^{\infty} f_v(x)$$

einen endlichen Werth hat, nenne ich den Convergencebereich dieser Reihe. Lässt sich ferner für eine bestimmte Stelle a dieses Bereichs eine positive Grösse ϱ so annehmen, dass die Reihe für die der Bedingung

$$|x-a| \leq \varrho$$

entsprechenden Werthe von x gleichmässig*) convergirt, so will ich sagen, die Reihe convergire gleichmässig in der Nähe der Stelle a . Die Grösse ρ hat dann eine obere Grenze; ist diese R , so möge — in Beziehung auf die betrachtete Reihe — die Gesammtheit derjenigen Werthe von x , für welche

$$|x-a| < R$$

ist, die Umgebung von a , und R deren Halbmesser genannt werden. Nimmt man in dieser Umgebung eine Stelle beliebig an, so ist klar, dass auch in der Nähe der letzteren die Reihe gleichmässig convergirt. Daraus ergibt sich, dass, falls überhaupt Stellen vorhanden sind, in deren Nähe die Reihe gleichmässig convergirt, die Gesammtheit dieser Stellen in der Ebene der Veränderlichen x durch eine zweifach ausgedehnte Fläche repräsentirt wird, welche aber aus mehreren, von einander getrennten Stücken bestehen kann.

*) Eine unendliche Reihe

$$\sum_{v=0}^{\infty} f_v,$$

deren Glieder Functionen beliebig vieler Veränderlichen sind, convergirt in einem gegebenen Theile (B) ihres Convergenzbereichs gleichmässig, wenn sich nach Annahme einer beliebig kleinen positiven Grösse δ stets eine ganze positive Zahl m so bestimmen lässt, dass der absolute Betrag der Summe

$$\sum_{v=n}^{\infty} f_v,$$

für jeden Werth von n , der $\geq m$, und für jedes dem Bereiche B angehörige Werthsystem der Veränderlichen kleiner als δ ist. Soll die Reihe in demselben Bereiche zugleich unbedingt convergent sein, d. h. bei jeder Anordnung ihrer Glieder denselben Werth haben, so muss es, wie man auch δ annehmen möge, stets möglich sein, aus der Reihe eine endliche Anzahl von Gliedern so auszusondern, dass die Summe von beliebig vielen der übrigbleibenden für jedes der betrachteten Werthsysteme der Veränderlichen kleiner als δ ist. Diese Bedingung ist sicher erfüllt, wenn es eine Reihe bestimmter positiver Grössen

$$g_0, g_1, g_2, \dots$$

gibt, für die sich feststellen lässt, dass an jeder Stelle des Bereichs B

$$|f_v| \leq g_v, \quad (v = 0, \dots, \infty)$$

und die Summe

$$\sum_{v=0}^{\infty} g_v$$

einen endlichen Werth hat. — Aus der gegebenen Definition der gleichmässigen Convergencz folgt u. A. unmittelbar, dass, wenn die betrachtete Reihe in mehreren Theilen ihres Convergenczbereichs gleichmässig convergirt, dasselbe auch für den aus diesen Theilen zusammengesetzten Bereich gilt.

Angenommen nämlich, es gebe überhaupt Stellen der in Rede stehenden Art, deren Gesammtheit mit A bezeichnet werde, so denke man sich eine von ihnen willkürlich angenommen, in der Umgebung derselben eine beliebige zweite, in der Umgebung dieser eine dritte, u. s. w. Die Gesammtheit der Stellen von A , zu denen man auf diese Weise gelangen kann, ist dann ein in der Ebene der Grösse x durch ein zusammenhängendes Stück derselben repräsentirtes Continuum (A_1), dessen Begrenzung aus einzelnen Punkten, aus einer oder aus mehreren Linien, und auch aus einzelnen Punkten und Linien zugleich bestehen kann. Möglicherweise existiren nun ausserhalb A_1 noch Stellen von A , dann giebt es mindestens noch ein zweites Continuum (A_2) von derselben Beschaffenheit wie A_1 , das ebenfalls ein Bestandtheil von A ist und mit A_1 keine Stelle gemeinschaftlich hat — was jedoch nicht ausschliesst, dass die Begrenzungen von A_1 und A_2 theilweise oder ganz zusammenfallen. Existiren ferner noch Stellen von A , die weder in A_1 noch in A_2 liegen, so giebt es mindestens noch ein drittes Continuum (A_3) von derselben Beschaffenheit wie A_1, A_2 , das gleichfalls ein Bestandtheil von A ist und mit den beiden ersten keine Stelle gemein hat. U. s. w.

Nachdem so festgestellt ist, wie der Bereich A möglicherweise gestaltet ist, kann leicht an Beispielen gezeigt werden, dass die angegebenen verschiedenen Fälle auch wirklich vorkommen. Es genügt hier die beiden Reihen

$$\sum_{v=0}^{\infty} x^v, \quad \sum_{v=0}^{\infty} \left(\frac{1}{x^v + x^{-v}} \right)$$

anzuführen. Für die erstere bilden den Bereich A alle diejenigen Werthe von x , die ihrem absoluten Betrage nach kleiner als 1 sind, für die andere ausser denselben Werthen auch alle diejenigen, die ihrem absoluten Betrage nach grösser als 1 sind; es besteht also A in dem ersten Falle aus einem zusammenhängenden Stücke, in dem anderen aus zwei solchen Stücken, die keine Stelle gemein haben. Beispiele von Reihen der hier betrachteten Art, für welche der Bereich A aus mehr als zwei Stücken besteht, werden später vorkommen.

Es ist ferner noch Folgendes nachzuweisen.

Angenommen, es convergire die betrachtete Reihe gleichmässig in der Nähe jeder Stelle, die im Innern oder an der Grenze eines gegebenen zu-

sammenhängenden Bereichs (B) liegt, so convergirt sie auch in dem ganzen Bereiche gleichmässig.

Sind a, a' irgend zwei Stellen des Bereichs A , von denen a' in der Umgebung von a liegt, und ist R der Halbmesser der letzteren, $D = |a' - a|$ der Abstand der beiden Stellen, so folgt aus den gegebenen Definitionen unmittelbar, dass der Halbmesser (R') der Umgebung von a' nicht kleiner als $R - D$ sein kann. Ist $D < \frac{1}{2}R$, so ist also $R' > \frac{1}{2}R$, und es liegt a in der Umgebung von a' ; mithin muss $R \geq R' - D$ sein, R' also zwischen

$$R - D \text{ und } R + D$$

liegen. Wenn daher die Stelle a in A ihre Lage stetig ändert, so ändert sich auch der zugehörige Werth von R stetig. Daraus folgt weiter, dass die untere Grenze R_0 derjenigen Werthe von R , die diese Grösse im Bereiche B annehmen kann, mindestens an einer im Innern oder an der Grenze dieses Bereiches liegenden Stelle wirklich erreicht wird, und dass daher R_0 nicht gleich Null ist. Deshalb kann B in eine endliche Anzahl von Theilen dergestalt zerlegt werden, dass in jedem einzelnen Theile der grösste Abstand zweier Stellen kleiner als R_0 ist. Jeder solcher Theil liegt dann ganz in der Umgebung einer in ihm willkürlich angenommenen Stelle; für die demselben angehörigen Werthe von x convergirt also die betrachtete Reihe gleichmässig, woraus nach dem oben Bemerkten die Richtigkeit des ausgesprochenen Satzes sich unmittelbar ergibt.

Eine Reihe der in Rede stehenden Art kann so beschaffen sein, dass sie in der Nähe jeder im Innern ihres Convergencebereichs liegenden Stelle gleichmässig convergirt. Im Folgenden werde ich ausschliesslich Reihen von dieser Beschaffenheit untersuchen. Wenn man nämlich von der Reihe

$$\sum_{v=0}^{\infty} f_v(x)$$

nur weiss, dass es im Gebiete der Veränderlichen x einen zusammenhängenden Bereich giebt, in welchem die Reihe convergirt, so lässt sich daraus allein nicht einmal folgern, dass ihr Werth in demselben Bereiche eine stetige Function von x sei. Macht man aber die angegebene Voraussetzung, so lässt sich zeigen, dass die Reihe in jedem der im Vorstehenden definirten Stücke (A_1, \dots) ihres Convergencebereiches im Allgemeinen einen

eindeutigen Zweig einer monogenen analytischen Function von x , und in besondern Fällen eine solche Function vollständig darstellt.

Hierzu ist ein Hilfssatz erforderlich, den ich zunächst anführen und beweisen will.

2.

»Es seien unendlich viele Potenzreihen einer Veränderlichen x , welche Potenzen dieser Grösse mit ganzen, positiven und negativen Exponenten in beliebiger Anzahl enthalten, in bestimmter Aufeinanderfolge gegeben:

$$P_0(x), P_1(x), P_2(x), \dots;$$

und es sei möglich, zwei reelle Grössen R, R' , von denen $R' > R, R \geq 0$ ist, so anzunehmen, dass für die der Bedingung

$$R < |x| < R'$$

entsprechenden Werthe von x nicht nur jede einzelne der gegebenen Reihen, sondern auch die Summe

$$\sum_{v=0}^{\infty} P_v(x)$$

convergiert, und zwar die letztere für alle diejenigen Werthe der Veränderlichen, die denselben absoluten Betrag haben, gleichmässig. Dann hat, wenn

$$A_{\mu}^{(v)}$$

der Coefficient von x^{μ} in $P_v(x)$ ist, die Summe

$$\sum_{v=0}^{\infty} A_{\mu}^{(v)}$$

für jeden Werth von μ einen bestimmten endlichen Werth, der mit A_{μ} bezeichnet werde, und es lässt sich zeigen, dass für jeden Werth von x , dessen absoluter Betrag grösser als R und kleiner als R' ist, die Reihe

$$\sum_{\mu} A_{\mu} x^{\mu}$$

convergiert und die Gleichung

$$\sum_{v=0}^{\infty} P_v(x) = \sum_{\mu} A_{\mu} x^{\mu}$$

besteht.«

Es sei r irgend eine bestimmte, zwischen R und R' enthaltene positive Grösse, und k eine beliebige andere, so kann in Folge der hinsichtlich der Convergenz der Reihe

$$\sum_{v=0}^{\infty} P_v(x)$$

gemachten Voraussetzung eine ganze positive Zahl m so angenommen werden, dass für jeden Werth von x , dessen absoluter Betrag gleich r ist, und für jede ganze Zahl n , die $\geq m$, der absolute Betrag der Summe

$$\sum_{v=n}^{\infty} P_v(x)$$

kleiner als $\frac{1}{2}k$, und deshalb für jede Zahl n' , die $\geq n$,

$$\left| \sum_{v=n}^{n'} P_v(x) \right| < k$$

ist. Man hat aber

$$\sum_{v=n}^{n'} P_v(x) = \sum_{\mu} \left\{ \sum_{v=n}^{n'} A_{\mu}^{(v)} \cdot x^{\mu} \right\},$$

und es ist deshalb nach einem bekannten Satze*) für jeden ganzzahligen Werth von μ

$$\left| \sum_{v=n}^{n'} A_{\mu}^{(v)} \right| < k r^{-\mu}.$$

Demgemäss hat die Summe

$$\sum_{v=0}^{\infty} A_{\mu}^{(v)}$$

einen bestimmten endlichen Werth, der mit A_{μ} bezeichnet werde.

Nun nehme man zwei positive Grössen r_1, r_2 so an, dass

$$R < r_1 < r < r_2 < R',$$

so kann man der Zahl n einen solchen Werth geben, dass

$$\left| \sum_{v=n}^{n'} A_{\mu}^{(v)} \right|$$

auch kleiner als jede der beiden Grössen

$$k r_1^{-\mu}, k r_2^{-\mu}$$

*) [S. Anmerkung 1, S. 224 dieses Bandes.]

ist; woraus folgt:

$$\left| \sum_{\nu=n}^{\infty} A_{\mu}^{(\nu)} \right| \leq k r_1^{-\mu},$$

$$\left| \sum_{\nu=n}^{\infty} A_{\mu}^{(\nu)} \right| \leq k r_2^{-\mu}.$$

Hiernach hat man, wenn

$$\sum_{\nu=0}^{n-1} A_{\mu}^{(\nu)} = A'_{\mu}, \quad \sum_{\nu=n}^{\infty} A_{\mu}^{(\nu)} = A''_{\mu}$$

gesetzt, und der Veränderlichen x ein Werth, dessen absoluter Betrag gleich r ist, beigelegt wird,

$$\sum_{\mu=-1}^{-\infty} |A''_{\mu} x^{\mu}| \leq k \sum_{\mu=-1}^{-\infty} \left(\frac{r}{r_1}\right)^{\mu},$$

$$\sum_{\mu=0}^{+\infty} |A''_{\mu} x^{\mu}| \leq k \sum_{\mu=0}^{+\infty} \left(\frac{r}{r_2}\right)^{\mu},$$

und somit

$$\sum_{\mu=-\infty}^{+\infty} |A''_{\mu} x^{\mu}| \leq k \left(\frac{r_1}{r-r_1} + \frac{r_2}{r_2-r} \right).$$

Die Reihe

$$\sum_{\mu} A''_{\mu} x^{\mu}$$

ist also unbedingt convergent, und da

$$\sum_{\mu} A'_{\mu} x^{\mu} = \sum_{\nu=0}^{n-1} P_{\nu}(x),$$

so gilt dasselbe auch von der Reihe

$$\sum_{\mu} A_{\mu} x^{\mu}.$$

Man hat ferner

$$\sum_{\nu=0}^{\infty} P_{\nu}(x) - \sum_{\mu} A_{\mu} x^{\mu} = \sum_{\nu=n}^{\infty} P_{\nu}(x) - \sum_{\mu} A''_{\mu} x^{\mu},$$

und somit

$$\left| \sum_{\nu=0}^{\infty} P_{\nu}(x) - \sum_{\mu} A_{\mu} x^{\mu} \right| \leq k + k \left(\frac{r_1}{r-r_1} + \frac{r_2}{r_2-r} \right).$$

Da man nun für jeden bestimmten Werth von x , dessen absoluter Betrag (r) zwischen R und R' enthalten ist, zunächst r_1, r_2 der angegebenen Bedingung gemäss, und dann k so annehmen kann, dass

$$k + k \left(\frac{r_1}{r-r_1} + \frac{r_2}{r_2-r} \right)$$

kleiner ist als eine beliebige gegebene Grösse, so folgt, dass für jeden der Bedingung

$$R < |x| < R'$$

entsprechenden Werth von x nicht nur die Reihe

$$\sum_{\mu} A_{\mu} x^{\mu}$$

convergiert, sondern auch die Gleichung

$$\sum_{\mu} A_{\mu} x^{\mu} = \sum_{\nu=0}^{\infty} P_{\nu}(x)$$

besteht; w. z. b. w.

3.

Es sei jetzt

$$F(x) = \sum_{\nu=0}^{\infty} f_{\nu}(x)$$

irgend eine Reihe von der am Schlusse des § 1 angegebenen Beschaffenheit, und es werde mit A' eines der Stücke bezeichnet, aus denen nach der vorangegangenen Auseinandersetzung der Convergencebereich der Reihe besteht.

Nimmt man dann in A' eine Stelle a_0 willkürlich an, und beschränkt die Veränderliche x auf die Umgebung von a_0 , so lässt sich nicht nur jede der Functionen $f_{\nu}(x)$, sondern nach dem vorhergehenden Satze auch die Summe derselben durch eine gewöhnliche Potenzreihe von $x - a_0$, die mit

$$\mathfrak{P}_0(x - a_0)$$

bezeichnet werde, und die ich ein »Element« der Function $F(x)$ nenne, ausdrücken.*)

Nimmt man ferner in der Umgebung von a_0 eine zweite Stelle (a_1) an, und ist $\mathfrak{P}_1(x - a_1)$ das zu dieser gehörige Element von $F(x)$, so hat man für

*) Hierzu bemerke ich, dass nach dem Satze des § 2 der Coefficient von $(x - a_0)^{\mu}$ gleich

$$\frac{1}{\mu!} \sum_{\nu=0}^{\infty} \left[\frac{d^{\mu} f_{\nu}(x)}{dx^{\mu}} \right]_{(x=a_0)}$$

ist. Die Function $F(x)$ hat also in A' Ableitungen jeder Ordnung, und es ist

$$\frac{d^{\mu} F(x)}{dx^{\mu}} = \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{d^{\mu} f_{\nu}(x)}{dx^{\mu}}.$$

Es ist ferner leicht zu zeigen, dass auch die Reihe auf der rechten Seite dieser Gleichung in der Nähe jeder Stelle von A' gleichmässig convergiert, und somit dieselbe Beschaffenheit wie die gegebene hat.

diejenigen Werthe von x , die in der Umgebung von a_0 sowohl als von a_1 liegen,

$$\mathfrak{P}_1(x-a_1) = \mathfrak{P}_0(x-a_0), \quad \mathfrak{P}_0(x-a_0) = \sum_{\mu=0}^{\infty} \mathfrak{P}_0^{(\mu)}(a_1-a_0) \frac{(x-a_1)^\mu}{\mu!},$$

wo

$$\mathfrak{P}_0^{(\mu)}(x-a_0) = \frac{d^\mu \mathfrak{P}_0(x-a_0)}{dx^\mu}.$$

Daraus folgt, dass der Coefficient von $(x-a_1)^\mu$ in $\mathfrak{P}_1(x-a_1)$ mit dem entsprechenden Coefficienten der Entwicklung von $\mathfrak{P}_0(x-a_0)$ nach Potenzen von $(x-a_1)$ übereinstimmen muss.

Nun kann man, wenn a eine beliebige Stelle in A' ist, zwischen a_0 und a eine Reihe von Stellen

$$a_1, a_2, \dots a_n$$

so einschalten, dass a_1 in der Umgebung von a_0 , a_2 in der Umgebung von a_1 , u. s. w., und schliesslich a in der Umgebung von a_n liegt.

Dann hat man, wenn

$$\mathfrak{P}_1(x-a_1), \mathfrak{P}_2(x-a_2), \dots \mathfrak{P}_n(x-a_n), \mathfrak{P}(x-a)$$

die zu den Stellen $a_1, a_2, \dots a_n, a$ gehörigen Elemente der Function $F(x)$ sind,

$$\mathfrak{P}_1(x-a_1) = \sum_{\mu=0}^{\infty} \mathfrak{P}_0^{(\mu)}(a_1-a_0) \frac{(x-a_1)^\mu}{\mu!},$$

$$\mathfrak{P}_2(x-a_2) = \sum_{\mu=0}^{\infty} \mathfrak{P}_1^{(\mu)}(a_2-a_1) \frac{(x-a_2)^\mu}{\mu!},$$

u. s. w.,

$$\mathfrak{P}(x-a) = \sum_{\mu=0}^{\infty} \mathfrak{P}_n^{(\mu)}(a-a_n) \frac{(x-a)^\mu}{\mu!}.$$

Es besteht also in dem Bereich A' zwischen den Elementen der betrachteten Function ein solcher Zusammenhang, dass aus einem beliebig angenommenen Elemente jedes andere durch ein bestimmtes Rechnungsverfahren abgeleitet werden kann. Für die dem genannten Bereich angehörigen Werthe von x ist also die Function völlig bestimmt, sobald irgend eines ihrer Elemente gegeben ist.

Möglicherweise erstreckt sich, wenn die Stelle a der Begrenzung von A' hinlänglich nahe angenommen wird, der Convergenzbezirk der Reihe $\mathfrak{P}(x-a)$ über A' hinaus. In diesem Falle (der sogar der gewöhnliche ist)

existiren unendlich viele, aus $\mathfrak{P}_0(x-a_0)$ durch das beschriebene Verfahren ableitbare Potenzreihen $\mathfrak{P}'(x-a')$, deren Convergenzbezirke ganz oder theilweise ausserhalb A' liegen, und aus diesen können dann möglicherweise durch dasselbe Verfahren wieder andere sich ergeben, welche in ihrem Convergenzbezirk auch Stellen von A' enthalten, aber an diesen andere Werthe als $F(x)$ haben. Alle diese Reihen stellen Fortsetzungen der durch die gegebene Reihe $F(x)$ zunächst für die dem Bezirk A' angehörigen Werthe von x definirten Function dar; sie sind, nach der in meinen Vorlesungen über die Anfangsgründe der allgemeinen Functionenlehre eingeführten Terminologie, sämmtlich Elemente einer monogenen analytischen Function, die eindeutig oder mehrdeutig sein kann, aber als vollständig definirt zu betrachten ist, sobald irgend eines ihrer Elemente gegeben ist.

Wenn der Convergenzbereich der Reihe $\mathfrak{P}(x-a)$, wie man auch a annehmen möge, stets ganz in A' enthalten ist, so kann die durch den Ausdruck $F(x)$ für den Bereich A' definirte Function über die Grenzen dieses Bereichs nicht fortgesetzt werden. Es stellt also in diesem Falle — der wirklich vorkommt, wie weiter unten wird gezeigt werden — die Reihe, wenn die Veränderliche x auf den Bereich A' beschränkt wird, eine eindeutige monogene Function von x vollständig dar.

Hiernach lässt sich das im Vorstehenden Auseinandergesetzte kurz so, wie am Schlusse von § 1 geschehen ist, zusammenfassen.

Hieran knüpft sich nun eine für die Functionenlehre wichtige Frage.

Angenommen, der Convergenzbereich der betrachteten Reihe bestehe aus mehreren Stücken (A_1, A_2, \dots), so ist es möglich, dass sie in denselben Zweige einer und derselben monogenen Function darstellt. Es fragt sich nun, ob sich dies in allen Fällen so verhält. Muss diese Frage verneint werden, wie dies wirklich der Fall ist, so ist damit bewiesen, dass der Begriff einer monogenen Function einer complexen Veränderlichen mit dem Begriff einer durch (arithmetische) Grössenoperationen ausdrückbaren Abhängigkeit sich nicht vollständig deckt.*) Daraus aber folgt dann, dass mehrere der wichtigsten Sätze der

*) Das Gegentheil ist von Riemann ausgesprochen worden (Grundlagen für eine allgemeine Theorie der Functionen einer veränderlichen complexen Grösse, § 20, am Schluss), wobei ich bemerke, dass eine Function eines complexen Arguments, wie sie Riemann definirt, stets eine monogene Function ist.

neueren Functionenlehre nicht ohne Weiteres auf Ausdrücke, welche im Sinne der älteren Analytisten (Euler, Lagrange u. A.) Functionen einer complexen Veränderlichen sind, dürfen angewandt werden.*)

Ich habe bereits vor Jahren gefunden — und in meinen Vorlesungen mitgetheilt —, dass die oben angeführte Reihe

$$F(x) = \sum_{v=0}^{\infty} \left(\frac{1}{x^v + x^{-v}} \right),$$

deren Convergencebereich aus zwei Stücken besteht, zwei verschiedene monogene Functionen, und zwar eine jede vollständig darstellt.

Ist nämlich x_0 irgend ein Werth von x , der den absoluten Betrag 1 hat, so lässt sich — mit Hülfe von Sätzen, welche die Theorie der linearen Transformation der elliptischen ϑ -Functionen liefert — zeigen, dass sich sowohl unter denjenigen Werthen von x , für die $|x| < 1$, als auch unter denen, für die $|x| > 1$, in jeder noch so kleinen Umgebung von x_0 solche finden, für die der absolute Betrag von $F(x)$ jede beliebig angenommene Grösse übertrifft.***) Daraus folgt sofort, dass die Reihe in jedem der beiden Stücke ihres Convergencebereichs eine Function darstellt, die über die Begrenzung des Stückes hinaus nicht fortgesetzt werden kann.

Es blieb indessen, obwohl dies eine Beispiel zur Erledigung der in Rede stehenden Frage ausreichte, noch ein Bedenken übrig.

Die beiden durch die angeführte Reihe ausgedrückten Functionen stehen in einer sehr einfachen Beziehung zu einander, indem

$$F(x^{-1}) = F(x)$$

*) Wenn z. B. zwei Ausdrücke

$$\sum_{v=0}^{\infty} f_v(x), \quad \sum_{v=0}^{\infty} \bar{f}_v(x)$$

der hier betrachteten Art gegeben sind, und sich zeigen lässt, dass es in der Nähe einer bestimmten, im Innern des Convergencebereichs sowohl des einen als des andern liegenden Stelle unendlich viele Werthe von x giebt, für welche die Ausdrücke gleiche Werthe haben, so ist damit festgestellt, dass innerhalb eines bestimmten zusammenhängenden Bereichs der Veränderlichen x die Gleichung

$$\sum_{v=0}^{\infty} f_v(x) = \sum_{v=0}^{\infty} \bar{f}_v(x)$$

besteht; es lässt sich aber nicht behaupten, dass dieselbe an allen Stellen des gemeinschaftlichen Convergencebereichs der beiden Reihen gelte, wofern nicht der Nachweis geführt werden kann, dass beide Ausdrücke in dem genannten Bereich monogene Functionen sind.

***) [S. Anmerkung 2, S. 226 dieses Bandes.]

ist. Es war daher der Gedanke nicht abzuweisen, ob nicht überhaupt in dem Falle, wo ein arithmetischer Ausdruck $F(x)$ in verschiedenen Theilen seines Geltungsbereichs verschiedene monogene Functionen der complexen Veränderlichen x darstellt, unter diesen ein nothwendiger Zusammenhang bestehe, der bewirke, dass durch die Eigenschaften der einen auch die Eigenschaften der andern bestimmt seien. Wäre dies der Fall, so würde daraus folgen, dass der Begriff der monogenen Function erweitert werden müsste.

Um jeden Zweifel über diesen Punkt zu beseitigen, habe ich mir die Aufgabe gestellt, einen Ausdruck

$$F(x) = \sum_{v=0}^{\infty} f_v(x)$$

von der hier angenommenen Beschaffenheit, der den folgenden Bedingungen genüge, zu bilden: Der Convergenzbereich der Reihe soll aus n Stücken (A_1, A_2, \dots, A_n), wie sie oben definirt worden sind, bestehen, und es soll $F(x)$ in A_1 gleich $F_1(x)$, in A_2 gleich $F_2(x)$, ... in A_n gleich $F_n(x)$ sein, wo $F_1(x)$, $F_2(x)$, ... $F_n(x)$ willkürlich anzunehmende, für das ganze Gebiet der Veränderlichen x , mit Ausnahme von einzelnen Stellen, definirte eindeutige und monogene Functionen bedeuten.

Zur Lösung dieser Aufgabe stelle ich zunächst einen Ausdruck von der angegebenen Form her, welcher in der Nähe jeder Stelle, wo der reelle Theil von x nicht gleich Null ist, gleichmässig convergirt und den Werth

$$+1 \text{ oder } -1$$

hat, jenachdem der reelle Theil von x positiv oder negativ ist. Formeln, die in der Theorie der elliptischen Functionen vorkommen, führen zu einem solchen Ausdruck. Bei der nachstehenden Herleitung desselben habe ich jedoch absichtlich aus der genannten Theorie nichts vorausgesetzt.

4.

Nimmt man zwei endliche und von Null verschiedene complexe Grössen (ω, ω') so an, dass der reelle Theil des Quotienten

$$\frac{\omega'}{\omega i}$$

nicht gleich Null ist, und versteht unter ν, ν' unbeschränkt veränderliche ganze Zahlen, so hat bekanntlich die Summe

$$\sum' |2\nu\omega + 2\nu'\omega'|^{-3}$$

einen endlichen Werth, wenn bei der Summation dasjenige Glied, in welchem ν, ν' beide gleich Null sind, fortgelassen wird.*) Es stellt deshalb — wie in § 2 meiner Abhandlung »Zur Theorie der eindeutigen analytischen Functionen«**) gezeigt worden ist — die Reihe

$$\frac{1}{u} + \sum' \left\{ \frac{1}{u - 2\nu\omega - 2\nu'\omega'} \left(\frac{u}{2\nu\omega + 2\nu'\omega'} \right)^2 \right\},$$

die bei jeder Anordnung ihrer Glieder denselben Werth hat, eine eindeutige analytische Function der Veränderlichen u — mit der einen wesentlichen singulären Stelle ∞ — dar, welche Function hier mit

$$\psi(u, \omega, \omega')$$

bezeichnet werden möge.

Mit Hülfe der bekannten Gleichungen

$$\pi \operatorname{ctg} u\pi = \frac{1}{u} + \sum' \left(\frac{1}{u - \nu} + \frac{1}{\nu} \right),$$

$$\pi (\operatorname{ctg} u\pi - \operatorname{ctg} a\pi) = \sum' \left(\frac{1}{u - \nu} - \frac{1}{a - \nu} \right), \text{ wenn } a \text{ keine ganze Zahl,}$$

$$\left(\frac{\pi}{\sin u\pi} \right)^2 = \sum' \frac{1}{(u - \nu)^2},$$

$$\frac{\pi^2}{3} = \sum' \frac{1}{\nu^2}$$

lässt sich der vorstehende Ausdruck von $\psi(u, \omega, \omega')$ folgendermassen umgestalten.

Es ist

$$\psi(u, \omega, \omega') = \frac{1}{u} + \sum' \left(\frac{1}{u - 2\nu\omega - 2\nu'\omega'} + \frac{1}{2\nu\omega + 2\nu'\omega'} + \frac{u}{(2\nu\omega + 2\nu'\omega')^2} \right).$$

*) Durch das dem Σ beigefügte Zeichen ($'$) soll hier und im Folgenden darauf hingewiesen werden, dass unter den Werthen, die der Ausdruck unter dem Summenzeichen annehmen kann, sich einer findet, der $= \infty$ ist und bei der Summation fortgelassen werden muss.

**) [S. 92 dieses Bandes.]

Die Summe aller Glieder dieser Reihe, in denen ν' den Werth Null hat, ist

$$\frac{1}{2\omega} \left\{ \frac{2\omega}{u} + \sum_{\nu}' \left(\frac{1}{\frac{u}{2\omega} - \nu} + \frac{1}{\nu} \right) \right\} + \frac{u}{4\omega^2} \sum_{\nu}' \frac{1}{\nu^2} = \frac{\pi}{2\omega} \operatorname{ctg} \frac{u\pi}{2\omega} + \frac{\pi^2}{12\omega^2} u.$$

Ferner die Summe aller Glieder, in denen ν' einen bestimmten, von Null verschiedenen Werth hat,

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2\omega} \sum_{\nu}' \left(\frac{1}{\frac{u-2\nu'\omega'}{2\omega} - \nu} - \frac{1}{\frac{\nu'\omega'}{\omega} - \nu} \right) + \frac{u}{4\omega^2} \sum_{\nu}' \left(\frac{1}{\frac{\nu'\omega'}{\omega} + \nu} \right)^2 \\ &= \frac{\pi}{2\omega} \left(\operatorname{ctg} \frac{u-2\nu'\omega'}{2\omega} \pi + \operatorname{ctg} \frac{\nu'\omega'}{\omega} \pi \right) + \frac{\pi^2 u}{4\omega^2 \sin^2 \left(\frac{\nu'\omega'}{\omega} \pi \right)}. \end{aligned}$$

Man hat also

$$\begin{aligned} \psi(u, \omega, \omega') &= \frac{\pi}{2\omega} \operatorname{ctg} \frac{u\pi}{2\omega} + \frac{\pi}{2\omega} \sum_{\nu'} \left(\operatorname{ctg} \frac{u-2\nu'\omega'}{2\omega} \pi + \operatorname{ctg} \frac{\nu'\omega'}{\omega} \pi \right) \\ &+ \left(\frac{1}{3} + \sum_{\nu'} \sin^{-2} \left(\frac{\nu'\omega'}{\omega} \pi \right) \right) \cdot \frac{u\pi^2}{4\omega^2}, \end{aligned}$$

oder auch, wenn man, unter n eine ganze positive Zahl verstehend,

$$\eta = \frac{\pi^2}{\omega} \left(\frac{1}{12} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \sin^{-2} \left(\frac{n\omega'}{\omega} \pi \right) \right)$$

setzt,

$$\psi(u, \omega, \omega') = \frac{\eta u}{\omega} + \frac{\pi}{2\omega} \operatorname{ctg} \frac{u\pi}{2\omega} + \frac{\pi}{2\omega} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\operatorname{ctg} \frac{u-2n\omega'}{2\omega} \pi + \operatorname{ctg} \frac{u+2n\omega'}{2\omega} \pi \right).$$

Aus dieser Gleichung ergibt sich

$$\psi(u+2\omega, \omega, \omega') = \psi(u, \omega, \omega') + 2\eta,$$

und hieraus, wenn man $u = -\omega$ setzt und bemerkt, dass $\psi(u, \omega, \omega')$ eine ungrade Function von u ist,

$$\eta = \psi(\omega, \omega, \omega').$$

Man erhält also aus dem vorhergehenden Ausdruck von $\psi(u, \omega, \omega')$, wenn man in demselben

$$u = \omega'$$

nimmt,

$$\begin{aligned} & \omega' \psi(\omega, \omega, \omega') - \omega \psi(\omega', \omega, \omega') \\ &= -\frac{\pi}{2} \operatorname{ctg} \frac{\omega'\pi}{2\omega} + \frac{\pi}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\operatorname{ctg} \frac{(2n-1)\omega'}{2\omega} \pi - \operatorname{ctg} \frac{(2n+1)\omega'}{2\omega} \pi \right). \end{aligned}$$

Man hat aber, wenn m eine beliebige positive ganze Zahl ist,

$$-\frac{\pi}{2} \operatorname{ctg} \frac{\omega' \pi}{2\omega} + \frac{\pi}{2} \sum_{n=1}^m \left(\operatorname{ctg} \frac{(2n-1)\omega'}{2\omega} \pi - \operatorname{ctg} \frac{(2n+1)\omega'}{2\omega} \pi \right) = -\frac{\pi}{2} \operatorname{ctg} \frac{(2m+1)\omega'}{2\omega} \pi;$$

es ist also der Ausdruck auf der rechten Seite der vorhergehenden Gleichung gleich der Grenze, der sich

$$-\frac{\pi}{2} \operatorname{ctg} \frac{(2m+1)\omega'}{2\omega} \pi = \frac{e^{\frac{(2m+1)\omega'}{2\omega i} \pi} + e^{-\frac{(2m+1)\omega'}{2\omega i} \pi}}{e^{\frac{(2m+1)\omega'}{2\omega i} \pi} - e^{-\frac{(2m+1)\omega'}{2\omega i} \pi}} \cdot \frac{\pi i}{2}$$

nähert, wenn m unendlich gross wird. Diese Grenze aber hat den Werth

$$\frac{\pi i}{2} \text{ oder } -\frac{\pi i}{2},$$

jenachdem der reelle Theil von $\frac{\omega'}{\omega i}$ positiv oder negativ ist.

Es geht ferner aus dem ursprünglichen Ausdruck von $\psi(u, \omega, \omega')$, da derselbe sich nicht ändert, wenn man gleichzeitig

$$v' \text{ für } v, \text{ und } -v \text{ für } v'$$

setzt, die Gleichung

$$\psi(u, \omega, \omega') = \psi(u, \omega', -\omega)$$

hervor. Man hat also

$$\omega' \psi(\omega, \omega, \omega') - \omega \psi(\omega', \omega', -\omega) = \pm \frac{\pi i}{2},$$

wo das obere oder das untere Zeichen gilt, jenachdem der reelle Theil von $\frac{\omega'}{\omega i}$ positiv oder negativ ist.

Es gilt ferner, wenn c eine beliebige Grösse ist, die Gleichung

$$\psi(u, \omega, \omega') = c \psi(cu, c\omega, c\omega'),$$

woraus sich, wenn $c = \frac{1}{\omega}$ gesetzt wird,

$$\psi(\omega, \omega, \omega') = \frac{1}{\omega} \psi\left(1, 1, \frac{\omega'}{\omega}\right)$$

ergiebt. Ebenso ist

$$\psi(\omega', \omega', -\omega) = \frac{1}{\omega'} \psi\left(1, 1, -\frac{\omega}{\omega'}\right),$$

und man hat also

$$\frac{\omega'}{\omega i} \psi\left(1, 1, \frac{\omega'}{\omega}\right) + \frac{\omega i}{\omega'} \psi\left(1, 1, -\frac{\omega}{\omega'}\right) = \pm \frac{\pi}{2}.$$

Setzt man nun

$$\frac{\omega'}{\omega i} = x,$$

so dass x eine complexe Grösse ist, welche jeden Werth, dessen reeller Theil nicht gleich Null ist, annehmen kann, und

$$\chi(x) = \frac{2x}{\pi} \psi(1, 1, xi) + \frac{2}{\pi x} \psi\left(1, 1, \frac{i}{x}\right),$$

so ist

$$\begin{aligned} \chi(x) = & \frac{2}{\pi} (x + x^{-1}) + \frac{2}{\pi} \sum'_{r, r'} \left(\frac{x}{(1 - 2\nu - 2\nu' xi)(2\nu + 2\nu' xi)^2} \right) \\ & + \frac{2}{\pi} \sum'_{r, r'} \left(\frac{x^{-1}}{(1 - 2\nu - 2\nu' x^{-1} i)(2\nu + 2\nu' x^{-1} i)^2} \right) \end{aligned}$$

ein in der Form einer unendlichen Reihe, deren Glieder sämmtlich rationale Functionen von x sind, dargestellter Ausdruck und hat den Werth

$$+1 \text{ oder } -1,$$

jenachdem der reelle Theil von x positiv oder negativ ist.

Man nehme nun im Gebiet der Grösse x einen ganz im Endlichen liegenden Bereich (X) so an, dass weder im Innern noch an der Grenze desselben der reelle Theil von x gleich Null wird; so lässt sich leicht zeigen, dass die vorstehende Reihe innerhalb dieses Bereiches unbedingt und gleichmässig convergirt.

Man setze

$$w = 2\nu + 2\nu' xi,$$

so dass

$$\psi(1, 1, xi) = 1 + \sum'_{r, r'} \frac{1}{(1-w)w^2}$$

ist. Versteht man nun unter k den kleinsten Werth, den der absolute Betrag der Grösse

$$\varepsilon + \varepsilon'(\xi + \xi' i) i$$

für reelle Werthe der Veränderlichen $\varepsilon, \varepsilon', \xi, \xi'$ unter der Bedingung, dass

$$\varepsilon\varepsilon + \varepsilon'\varepsilon' = 1$$

sein und $\xi + \xi'i$ im Innern oder an der Grenze von \mathbf{X} liegen soll, annehmen kann; so ist k nicht gleich Null, und man hat

$$\begin{aligned} |w| &\geq 2k\sqrt{\nu\nu + \nu'\nu'} \\ |1-w| &\geq k\sqrt{(2\nu-1)^2 + 4\nu'\nu'} \end{aligned}$$

für jeden nicht ausserhalb des Bereichs \mathbf{X} liegenden Werth von x . Es ist aber für jede ganze Zahl ν

$$(2\nu-1)^2 \geq \nu^2,$$

also

$$(2\nu-1)^2 + 4\nu'\nu' \geq \nu\nu + \nu'\nu',$$

und somit

$$\left| \frac{1}{(1-w)w^2} \right| \leq \frac{(\nu\nu + \nu'\nu')^{-\frac{3}{2}}}{4k^3}.$$

Hiernach ist jedes Glied der Reihe, durch welche $\psi(1, 1, xi)$ dargestellt wird, seinem absoluten Betrage nach kleiner oder höchstens eben so gross als das entsprechende Glied der Reihe

$$1 + \sum_{\nu, \nu'} \frac{(\nu\nu + \nu'\nu')^{-\frac{3}{2}}}{4k^3},$$

welche bekanntlich eine endliche Summe hat. Damit ist bewiesen, dass die erstgenannte Reihe für die dem Bereiche \mathbf{X} angehörigen Werthe von x unbedingt und gleichmässig convergirt.

Es ist aber, wenn x in \mathbf{X} angenommen wird, der Bereich der Grösse $\frac{1}{x}$ ebenfalls so beschaffen, dass weder im Innern noch an der Grenze desselben der reelle Theil von $\frac{1}{x}$ gleich Null wird. Daher convergirt auch der Ausdruck von $\psi\left(1, 1, \frac{i}{x}\right)$ für die dem betrachteten Bereiche angehörigen Werthe von x unbedingt und gleichmässig. Dasselbe gilt also auch für die Reihe, durch welche $\chi(x)$ dargestellt ist.

Es möge noch bemerkt werden, dass man in der Reihe $\psi(1, 1, xi)$, weil dieselbe unbedingt convergent ist, je zwei Glieder, in denen ν denselben, ν' aber entgegengesetzte Werthe hat, in eines zusammenziehen kann, wodurch man, wenn unter n eine ganze positive Zahl verstanden wird,

$$\psi(1, 1, xi) = 1 + \sum_{\nu} \frac{1}{4\nu^2(1-2\nu)} + \frac{1}{2} \sum_{n, \nu} \left\{ \frac{(6\nu-1)n^2x^2 - (2\nu-1)\nu^2}{(4\nu^2x^2 + (2\nu-1)^2)(n^2x^2 + \nu^2)} \right\}$$

erhält. Die Glieder der so umgeformten Reihe sind rationale Functionen von x , welche rationale Coefficienten haben und nur für solche Werthe von x , deren reeller Theil gleich Null ist, unendlich gross werden. Als Summe von ebenso beschaffenen Gliedern lässt sich also auch $\chi(x)$ ausdrücken.

5.

Nun sei x' eine beliebige rationale Function von x , und es werde

$$\chi_1(x) = \chi(x')$$

gesetzt, so dass $\chi_1(x)$ ebenfalls eine Summe von unendlich vielen rationalen Functionen der Veränderlichen x ist. In der Ebene der letzteren Grösse werden dann diejenigen Werthe derselben, für welche der reelle Theil von x' verschwindet, durch eine reelle algebraische Curve repräsentirt, welche die Ebene dergestalt in mehrere Stücke zerlegt, dass der reelle Theil von x' in einigen Stücken überall positiv, in den andern überall negativ ist. In den ersteren hat also $\chi_1(x)$ überall den Werth $+1$, in den andern überall den Werth -1 .

Nimmt man beispielsweise

$$x' = \frac{\alpha x + \beta}{\gamma x + \delta}$$

an, wo $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ Constanten bedeuten, deren Wahl keiner andern Beschränkung unterliegt, als dass $\alpha\delta - \beta\gamma$ nicht gleich Null sein darf, so ist die genannte Curve bekanntlich ein Kreis,*) und es können $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ so bestimmt werden, dass dieser Kreis ein gegebener wird und der reelle Theil von x' für einen gegebenen Punkt ein vorgeschriebenes Zeichen hat.

Nun seien $F_1(x), F_2(x)$ irgend zwei eindeutige Functionen von x mit einer endlichen Anzahl wesentlicher singulärer Stellen. Dann lässt sich, wenn

$$\chi_1(x) = \chi\left(\frac{\alpha x + \beta}{\gamma x + \delta}\right),$$

$$\mathfrak{F}_0(x) = \frac{F_1(x) + F_2(x)}{2}, \quad \mathfrak{F}_1(x) = \frac{F_1(x) - F_2(x)}{2}$$

gesetzt wird, der Ausdruck

$$\mathfrak{F}_0(x) + \mathfrak{F}_1(x)\chi_1(x)$$

*) Dies gilt allgemein, wenn man eine unbegrenzte Gerade als einen Kreis mit unendlich grossem Radius betrachtet.

in eine unendliche Reihe, deren Glieder rationale Functionen von x sind, umformen, und diese stellt in dem einen der beiden Theile, in welche das Gebiet der Veränderlichen x durch den genannten Kreis zerlegt wird, die Function $F_1(x)$, in dem andern Theile dagegen die Function $F_2(x)$ dar.

Nimmt man ferner in der Ebene der Grösse x beliebig viele Kreise (oder unbegrenzte Geraden)

$$K', K'', \dots K^{(n)}$$

willkürlich an, und bestimmt r lineare Functionen von x

$$x', x'', \dots x^{(r)}$$

so, dass der reelle Theil von $x^{(\lambda)}$ in der Linie $K^{(\lambda)}$ verschwindet, so wird die Ebene durch die genannten Linien in eine gewisse Anzahl von Stücken dargestellt zerlegt, dass der reelle Theil einer jeden Function $x^{(\lambda)}$ innerhalb eines solchen Stückes überall dasselbe Zeichen hat. Sind dann

$$\mathfrak{F}_0(x), \mathfrak{F}_1(x), \dots \mathfrak{F}_r(x)$$

eindeutige Functionen von x mit einer endlichen Anzahl wesentlicher singulärer Stellen, und setzt man

$$\chi_\lambda(x) = \chi(x^{(\lambda)}), \quad (\lambda = 1, \dots, r)$$

so kann der Ausdruck

$$\mathfrak{F}_0(x) + \mathfrak{F}_1(x)\chi_1(x) + \mathfrak{F}_2(x)\chi_2(x) + \dots + \mathfrak{F}_r(x)\chi_r(x)$$

ebenfalls in eine unendliche Reihe, deren Glieder rationale Functionen von x sind, umgeformt werden, und diese Reihe hat dann die Eigenthümlichkeit dass sie zwar innerhalb eines jeden der Stücke, in welche die Ebene zerlegt ist, einen Zweig einer bestimmten monogenen Function darstellt, in verschiedenen Stücken aber Zweige verschiedener Functionen.

Sind z. B. $K', K'', \dots K^{(n)}$ Kreise, von denen keiner einen andern umschliesst, so wird durch dieselbe die Ebene in $(r+1)$ Stücke zerlegt; und wenn man die Function $x^{(\lambda)}$ so bestimmt,*) dass ihr reeller Theil im Mittel-

*) Ist r_λ der Radius des Kreises $K^{(\lambda)}$, und a_λ der Werth von x im Mittelpunkt desselben, so kann man

$$x^{(\lambda)} = \frac{r_\lambda - a_\lambda + x}{r_\lambda + a_\lambda - x}$$

setzen.

punkt von $K^{(a)}$ positiv ist, so liefert der Ausdruck

$$F_{r+1}(x) + \frac{1}{2} \sum_{\lambda=1}^r (1 + \chi_{\lambda}(x)) (F_{\lambda}(x) - F_{r+1}(x)),$$

der mit dem vorstehenden übereinstimmt, wenn unter $F_1(x), F_2(x), \dots, F_{r+1}(x)$ ebenfalls eindeutige Functionen mit einer endlichen Anzahl wesentlicher singulärer Stellen verstanden werden, eine Reihe von der in Rede stehenden Eigenthümlichkeit, indem dieselbe, wenn x innerhalb der von $K^{(a)}$ begrenzten Kreisfläche angenommen wird, gleich $F_{\lambda}(x)$, und wenn x ausserhalb aller dieser Flächen liegt, gleich $F_{r+1}(x)$ ist, also innerhalb eines jeden der $(r+1)$ Stücke, worin die Ebene zerlegt ist, einen Zweig einer willkürlich anzunehmenden Function von der hier vorausgesetzten Beschaffenheit darstellt.

Ein anderes Beispiel erhält man, wenn die Kreise $K', K'', \dots, K^{(r)}$ so angenommen werden, dass jeder der $(r-1)$ ersten von dem folgenden umschlossen, und somit die Ebene durch sie gleichfalls in $(r+1)$ Stücke zerlegt wird. Dann hat nämlich der Ausdruck

$$\frac{1}{2} (F_1(x) + F_{r+1}(x)) + \frac{1}{2} \sum_{\lambda=1}^r (F_{\lambda}(x) - F_{\lambda+1}(x)) \chi_{\lambda}(x)$$

die Eigenschaft, dass er innerhalb eines jeden der genannten Stücke gleich einer der Functionen $F_1(x), F_2(x), \dots, F_{r+1}(x)$ ist. (Ein besonderer Fall ist der, wo an die Stelle der r Kreise r einander parallele gerade Linien treten.) Scheidet man ferner aus dem Gebiete der Veränderlichen x alle negativen Werthe (mit Einschluss von 0) aus, so existiren bekanntlich*) unendliche, aus rationalen Functionen von x zusammengesetzte Reihen, welche einwerthige Zweige gewisser mehrdeutiger Functionen, wie z. B. $\log x, x^m$ (wo m eine beliebige Constante bedeutet) darstellen und in der Nähe jeder Stelle, die nicht zu den ausgeschlossenen gehört, gleichmässig convergiren. Es können nun in dem Ausdruck

$$\mathfrak{F}_0(x) + \mathfrak{F}_1(x) \chi_1(x) + \mathfrak{F}_2(x) \chi_2(x) + \dots + \mathfrak{F}_r(x) \chi_r(x)$$

$\mathfrak{F}_0(x), \mathfrak{F}_1(x), \mathfrak{F}_2(x), \dots, \mathfrak{F}_r(x)$ auch solche Reihen sein, und man erhält dann aus ihm eine gleichfalls aus rationalen Functionen gebildete Reihe, welche in

*) S. die auf die Gauss'schen Kettenbrüche und die nach Kugelfunctionen fortschreitenden Reihen sich beziehenden Abhandlungen von Thomé im 66. und 67. Bande des Borchardt'schen Journals.

jedem der Stücke, in die das Gebiet von x durch die Linien $K^{(2)}$ und die Strecke der negativen Werthe zerlegt wird, einen einwerthigen Zweig einer mehrdeutigen monogenen Function darstellt, in verschiedenen Stücken aber im Allgemeinen Zweige verschiedener Functionen.

Aus diesen Beispielen erhellt zur Genüge, dass die am Schlusse des § 3 aufgeworfene Frage folgendermassen zu beantworten ist:

Wenn der Convergencebereich einer Reihe, deren Glieder rationale Functionen einer Veränderlichen x sind, in der Art in mehrere Stücke zerlegt werden kann, dass in der Nähe jeder im Innern eines solchen Stückes gelegenen Stelle die Reihe gleichmässig convergirt; so stellt dieselbe in jedem einzelnen Stücke einen einwerthigen Zweig einer monogenen Function von x dar, in verschiedenen Stücken aber nicht nothwendig Zweige einer und derselben Function.

6.

Ich habe in meinen Vorlesungen über die Elemente der Functionenlehre von Anfang an zwei mit den gewöhnlichen Ansichten nicht übereinstimmende Sätze hervorgehoben, nämlich:

- 1) dass man bei einer Function eines reellen Arguments aus der Stetigkeit derselben nicht folgern könne, dass sie auch nur an einer einzigen Stelle einen bestimmten Differentialquotienten, geschweige denn eine — wenigstens in Intervallen — ebenfalls stetige Ableitung besitze;
- 2) dass eine Function eines complexen Arguments, welche für einen beschränkten Bereich des letzteren definirt ist, sich nicht immer über die Grenzen dieses Bereichs hinaus fortsetzen lasse; und dass die Stellen, für welche die Function nicht definirbar ist, nicht bloss einzelne Punkte, sondern auch Linien und Flächen bilden können.

Da im Vorhergehenden von Functionen einer complexen Veränderlichen, denen die unter 2) genannte Eigenthümlichkeit zukommt, die Rede gewesen ist, so will ich bei dieser Gelegenheit ein leicht zu behandelndes Beispiel einer solchen Function beibringen.

Angenommen, der Halbmesser des Convergenzbezirks einer gewöhnlichen Potenzreihe

$$\sum_{v=0}^{\infty} A_v x^v$$

sei gleich 1, die Reihe convergire aber auch unbedingt und gleichmässig für alle Werthe von x , deren absoluter Betrag gleich 1 ist, so dass, wenn unter t eine reelle Veränderliche verstanden wird,

$$\sum_{v=0}^{\infty} A_v e^{vti}$$

eine stetige Function von t ist.

Im Innern des Convergenzbezirks der Reihe nehme man eine Stelle x_0 beliebig an und forme die gegebene Reihe in eine Potenzreihe $\mathfrak{P}(x-x_0)$ um. Ist r_0 der absolute Betrag von x_0 , so kann der Halbmesser des Convergenzbezirks der Reihe $\mathfrak{P}(x-x_0)$ nicht kleiner als $1-r_0$, wohl aber grösser sein. Ist das Letztere der Fall, so liegt ein Theil der Begrenzung des Convergenzbezirks der gegebenen Reihe ganz im Convergenzbezirke von $\mathfrak{P}(x-x_0)$, und es besteht, wenn

$$\frac{x_0}{r_0} = e^{t_0 i} \text{ ist und } x_i = e^{ti}$$

gesetzt wird, für alle Werthe von t zwischen zwei bestimmten Grenzen ($t_0 - \tau, t_0 + \tau$) die Gleichung

$$\sum_{v=0}^{\infty} A_v e^{vti} = \mathfrak{P}(x_i - x_0).$$

Nun hat aber $\mathfrak{P}(x-x_0)$, als Function von x betrachtet, Ableitungen jeder Ordnung, dasselbe gilt also auch von $\mathfrak{P}(x_i-x_0)$, als Function von t betrachtet, für die zwischen $t_0 - \tau$ und $t_0 + \tau$ liegenden Werthe dieser Grösse. Hieraus folgt nun: Wenn sich in einem bestimmten Falle beweisen lässt, dass die Function

$$\sum_{v=0}^{\infty} A_v e^{vti}$$

in keinem Intervalle der Veränderlichen t Ableitungen jeder Ordnung besitzt, so ist daraus zu schliessen, dass der Convergenzbezirk der Reihe $\mathfrak{P}(x-x_0)$, wie man auch x_0 annehmen möge, ganz in dem Convergenzbezirk der gegebenen Reihe enthalten ist, die Function also, welche durch diese letztere dargestellt wird, über deren Convergenzbezirk hinaus nicht fortgesetzt werden kann.

Nun sei a eine ungrade positive ganze Zahl, b eine positive Grösse, die < 1 , und $a_v = a^v$. Dann erfüllt die Reihe

$$\sum_{v=0}^{\infty} b^v x^{a_v}$$

die oben für die betrachtete Reihe gestellten Bedingungen. Es ist aber von mir der Beweis*) geführt worden, dass die Function

$$\sum_{v=0}^{\infty} b^v \cos a_v t,$$

sobald $ab > 1 + \frac{3}{2}\pi$ ist, für keinen Werth von t einen bestimmten Differentialquotienten besitzt. Durch die Reihe

$$\sum_{v=0}^{\infty} b^v x^{a_v}$$

wird also, wenn $ab > 1 + \frac{3}{2}\pi$, eine Function definirt, die nicht über den Convergencebereich der Reihe hinaus fortgesetzt werden kann, und also ausschliesslich für solche Werthe von x , deren absoluter Betrag die Einheit nicht überschreitet, existirt.

Es ist leicht, unzählige andere Potenzreihen von derselben Beschaffenheit wie die vorstehende anzugeben, und selbst für einen beliebig begrenzten Bereich der Veränderlichen x die Existenz von Functionen derselben, die über diesen Bereich hinaus nicht fortgesetzt werden können, nachzuweisen; worauf ich jedoch hier nicht eingehe.

Schliesslich möge noch bemerkt werden, dass sich auch in Beziehung auf zusammengesetztere arithmetische Formen, welche eindeutige monogene Functionen einer und mehrerer Veränderlichen oder einwerthige Zweige solcher Functionen auszudrücken geeignet sind, Untersuchungen anstellen lassen, welche der hier für eine der einfachsten Formen durchgeführten analog sind und zu ähnlichen Resultaten führen.

*) Dieser Beweis ist von Herrn P. du Bois-Reymond, dem ich ihn brieflich mitgetheilt hatte, im 79. Bande von Borchardt's Journal (S. 30) veröffentlicht. (Ich berichtige bei dieser Gelegenheit zwei a. a. O. sich findende Druckfehler. Z. 10 v. o. muss es » x_0 « statt » a_0 «, und Z. 4 v. u. »auch« statt »nicht« heissen.) [S. Anmerkung 3, S. 228 dieses Bandes.]

ANMERKUNGEN.

1. Zu S. 206, Z. 13. *)

Den hier angeführten wichtigen Satz beweise ich in meinen Vorlesungen in sehr einfacher Weise.

Ich betrachte zunächst eine Potenzreihe $P(x)$, welche nur eine endliche Anzahl von Gliedern enthält, also die Form

$$P(x) = \sum_{v=-m}^{v=+m} A_v x^v$$

hat, wo m eine ganze positive Zahl bedeutet.

Es sei ξ eine bestimmte Grösse, deren absoluter Betrag gleich 1 ist, und deren Wahl nur der Beschränkung unterliegt, dass ξ^v , wenn v eine der Zahlen $0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm m$ ist, nicht gleich 1 sein darf. Ferner bedeute r eine beliebig anzunehmende positive Grösse, so existirt für den absoluten Betrag von $P(x)$, wenn man der Veränderlichen x nur solche Werthe beilegt, deren absoluter Betrag gleich r ist, eine endliche obere Grenze, die mit G bezeichnet werden möge. Dann ist, wenn unter l eine beliebige ganze Zahl verstanden wird,

$$\left| \frac{1}{l} \sum_{\lambda=0}^{l-1} P(r\xi^\lambda) \right| \leq G.$$

Man hat aber

$$\begin{aligned} \frac{1}{l} \sum_{\lambda=0}^{l-1} P(r\xi^\lambda) &= \sum_{v=-m}^{v=+m} \sum_{\lambda=0}^{l-1} \left(\frac{1}{l} A_v r^v \xi^{\lambda v} \right) \\ &= A_0 + \frac{1}{l} \sum_v' A_v \frac{1 - \xi^{lv}}{1 - \xi^v} r^v, \end{aligned}$$

*) [Vgl. auch die Abhandlung „Zur Theorie der Potenzreihen“, Bd. I, S. 67 dieser Ausgabe.]

wo bei der durch das Zeichen \sum' angedeuteten Summation der Zahl ν alle Werthe von $-m$ bis $+m$, mit Ausschluss der Null, zu geben sind. Nun kann man aber, nach Annahme einer beliebig kleinen positiven Grösse δ , der Zahl l einen so grossen Werth geben, dass der absolute Betrag von

$$\frac{1}{l} \sum' A_\nu \frac{1-\xi^{\nu l}}{1-\xi^\nu} r^\nu$$

kleiner als δ wird; dann hat man

$$|A_0| < G + \delta,$$

also

$$|A_0| \leq G.$$

Jetzt sei

$$P(x) = \sum_{\nu=-\infty}^{+\infty} A_\nu x^\nu$$

eine beliebige Potenzreihe, welche convergent ist für jeden Werth von x , dessen absoluter Betrag zwischen zwei bestimmten Grenzen R, R' liegt. Ist dann r eine zwischen R und R' enthaltene, im Übrigen willkürlich anzunehmende positive Grösse, so giebt es wieder für den absoluten Betrag von $P(x)$, wenn man der Veränderlichen x nur solche Werthe beilegt, deren absoluter Betrag gleich r ist, eine endliche obere Grenze, die mit g bezeichnet werden möge. Man kann ferner, nach Annahme einer beliebig kleinen positiven Grösse δ , eine ganze positive Zahl m so bestimmen, dass für jeden Werth von x , für den $|x| = r$,

$$\left| \sum_{\nu=-m-1}^{-\infty} A_\nu x^\nu \right| < \frac{1}{2} \delta, \quad \left| \sum_{\nu=m+1}^{+\infty} A_\nu x^\nu \right| < \frac{1}{2} \delta$$

ist; dann hat man

$$\left| \sum_{\nu=-m}^{+m} A_\nu x^\nu \right| < g + \delta,$$

also nach dem Bewiesenen

$$|A_0| < g + \delta$$

und somit

$$|A_0| \leq g.$$

Lässt man ferner die Reihe $x^{-\mu} P(x)$, wo μ eine beliebige ganze Zahl bedeutet, an die Stelle von $P(x)$ treten, so ist $gr^{-\mu}$ die obere Grenze für den absoluten Betrag von $x^{-\mu} P(x)$, wenn man der Grösse x nur solche Werthe giebt, deren

absoluter Betrag gleich r ist; man hat also

$$|A_\mu| \leq gr^{-\mu},$$

was zu beweisen war.

Für Potenzreihen von mehreren Veränderlichen gilt ein analoger Satz, der sich ebenso elementar wie der vorstehende beweisen lässt.

2. Zu S. 211, Z. 15.

Sind ω, ω' zwei complexe Grössen, für welche der reelle Bestandtheil von $\frac{\omega'}{\omega i}$ positiv ist, und bezeichnet man die Werthe, welche die Function $\wp(u|\omega, \omega')$ für $u = \omega, \omega + \omega', \omega'$ annimmt, beziehlich mit e_1, e_2, e_3 , so hat man*)

$$\left(\frac{2\omega}{\pi}\right)^2 \cdot (e_1 - e_3) = (1 + 2h + 2h^4 + 2h^9 + \dots)^4,$$

wo

$$h = e^{-\frac{\omega'\pi}{\omega i}}$$

ist. Nimmt man ferner vier ganze, von Null verschiedene Zahlen p, q, p', q' so an, dass unter ihnen die Relation

$$pq' - p'q = 1$$

besteht, und setzt

$$\tilde{\omega} = p\omega + q\omega', \quad \tilde{\omega}' = p'\omega + q'\omega', \quad h_1 = e^{-\frac{\tilde{\omega}'\pi}{\tilde{\omega}i}},$$

so ist, wenn p', q beide grade, p, q' also beide ungrade Zahlen sind, auch

$$\wp(\tilde{\omega}|\omega, \omega') = e_1, \quad \wp(\tilde{\omega} + \tilde{\omega}'|\omega, \omega') = e_2, \quad \wp(\tilde{\omega}'|\omega, \omega') = e_3,$$

und es gilt die Gleichung

$$\left(\frac{2\tilde{\omega}}{\pi}\right)^2 \cdot (e_1 - e_3) = (1 + 2h_1 + 2h_1^4 + 2h_1^9 + \dots)^4;$$

man hat also

$$\left(1 + 2 \sum_{v=1}^{\infty} h_1^{v^2}\right)^4 = \left(p + q \frac{\omega'}{\omega}\right)^2 \cdot \left(1 + 2 \sum_{v=1}^{\infty} h^{v^2}\right)^4.$$

Nun sei t eine positive Grösse, und

$$\omega = \frac{1}{2}, \quad \omega' = \frac{1}{2}ti,$$

*) S. die Formeln und Lehrsätze zum Gebrauche der elliptischen Functionen, herausgegeben von H. A. Schwarz, S. 43.

so ist

$$\begin{aligned}\lim_{t=\infty} h &= \lim_{t=\infty} e^{-t\pi} = 0, \\ \lim_{t=\infty} h_1 &= \lim_{t=\infty} e^{\frac{p'+q'ti}{p+q'ti}\pi i} = e^{\frac{q'}{q}\pi i};\end{aligned}$$

es ergibt sich also, wenn unter x eine Veränderliche, deren absoluter Betrag kleiner als 1 ist, verstanden wird, aus der vorstehenden Gleichung, dass der absolute Betrag der Summe

$$1 + 2 \sum_{v=1}^{\infty} x^{v^2}$$

unendlich gross wird, wenn sich x auf einem bestimmten Wege dem Grenzwerte

$$e^{\frac{q'}{q}\pi i}$$

nähert. Nun kann man aber, wenn x_0 irgend eine bestimmte Grösse vom absoluten Betrage 1 ist, die Zahlen p, q, p', q' so annehmen, dass dieselben den angegebenen Bedingungen genügen und überdies der absolute Betrag der Differenz

$$e^{\frac{q'}{q}\pi i} - x_0$$

so klein wird, wie man will; es giebt also in jeder noch so kleinen Umgebung von x_0 Werthe der Veränderlichen x , für welche der absolute Betrag von

$$1 + 2 \sum_{v=1}^{\infty} x^{v^2}$$

grösser ist als jede beliebig angenommene positive Grösse.

Hieraus ergibt sich nun ohne Weiteres das, was im Texte bereits von dem Ausdrücke

$$F(x) = \sum_{v=1}^{\infty} \left(\frac{1}{x^v + x^{-v}} \right)$$

gesagt worden ist, indem für diejenigen Werthe von x , deren absoluter Betrag kleiner als 1 ist, die Gleichung

$$1 + 4F(x) = \left(1 + 2 \sum_{v=1}^{\infty} x^{v^2} \right)^2$$

gilt. *)

*) C. G. J. Jacobi, Fund. nova § 40, Gl. (4.) und § 65, Gl. (6.).

Dazu bemerke ich noch Folgendes:

Setzt man, unter τ eine Grösse verstehend, deren zweite Coordinate nicht gleich Null sein soll,

$$x = e^{\tau\pi i}, \quad 1 + 4F(x) = \varphi(\tau),$$

so hat man, wenn die zweite Coordinate von τ positiv ist,

$$\varphi(\tau) = \mathfrak{S}_3^2(0|\tau),$$

woraus sich die Relation

$$\varphi(\tau) = \frac{i}{\tau} \varphi\left(-\frac{1}{\tau}\right)$$

ergiebt. Ist dagegen die zweite Coordinate von τ negativ, so hat man

$$\varphi(\tau) = \varphi(-\tau) = \frac{i}{-\tau} \varphi\left(\frac{1}{\tau}\right),$$

also

$$\varphi(\tau) = -\frac{i}{\tau} \varphi\left(-\frac{1}{\tau}\right).$$

Hiernach ist also der Ausdruck

$$\frac{i\varphi\left(-\frac{1}{\tau}\right)}{\varphi(\tau)}$$

in dem einen Theile seines Geltungsbereichs gleich τ , in dem andern aber gleich $-\tau$; er ist also nicht eine monogene Function von τ , und demzufolge auch $F(x)$ nicht eine monogene Function von x .

3. Zu S. 223, Z. 5.

(Der Beweis befindet sich auf S. 71—74 dieses Bandes.)

Im 13. Bande des »Jahrbuchs über die Fortschritte der Mathematik« finde ich auf S. 335 in einem Referate über Herrn Wiener's im 90. Bande des Borchardt'schen Journals erschienene, auf die im Vorstehenden betrachtete Function $f(x)$ sich beziehende Abhandlung die Bemerkung, es sei Herr Wiener durch eine gründliche geometrische und analytische Untersuchung der in Rede stehenden Function zu dem Resultate gelangt, dass die Behauptung, es besitze diese Function an keiner Stelle einen bestimmten Differentialquotienten, nicht

durchweg aufrecht erhalten werden könne. Ich entnehme daraus, dass ich im Glauben, Jedermann wisse, was erforderlich ist, wenn eine stetige Function an einer bestimmten Stelle einen bestimmten Differentialquotienten besitzen soll, am Schlusse des obigen Beweises mich doch zu kurz gefasst haben muss, weswegen ich die folgenden Erläuterungen hinzufüge, welche freilich für die meisten Leser überflüssig sein werden.

Wenn eine stetige Function $F(x)$ der reellen Veränderlichen x an einer bestimmten Stelle ($x = x_0$) einen bestimmten endlichen Differentialquotienten besitzen soll, so ist dazu nothwendig — selbstverständlich aber nicht hinreichend — dass alle Werthe, welche der Quotient

$$\frac{F(x) - F(x_0)}{x - x_0}$$

nach Festsetzung einer oberen Grenze für den absoluten Betrag der Differenz $x - x_0$ annehmen kann, zwischen endlichen Grenzen enthalten seien. Diese Bedingung ist für die von mir angegebene Function $f(x)$ niemals erfüllt, wie man auch x_0 annehmen möge.

Soll ferner $F(x)$ für $x = x_0$ einen bestimmten unendlich grossen Differentialquotienten ($+\infty$ oder $-\infty$) haben, so muss nach Annahme einer beliebigen positiven Grösse g für den absoluten Betrag von $x - x_0$ eine obere Grenze sich so festsetzen lassen, dass jeder Werth, den der Quotient

$$\frac{F(x) - F(x_0)}{x - x_0}$$

alsdann erhalten kann, im ersten Falle zwischen g und $+\infty$, im zweiten dagegen zwischen $-g$ und $-\infty$ liegt. Eine nothwendige Bedingung für die Existenz eines bestimmten unendlich grossen Differentialquotienten der Function an der Stelle ($x = x_0$) ist also, dass der Quotient

$$\frac{F(x) - F(x_0)}{x - x_0}$$

für alle einer hinlänglich klein angenommenen Umgebung der Stelle x_0 angehörigen Werthe von x dasselbe Zeichen habe. Auch diese Bedingung ist für die in Rede stehende Function $f(x)$, wie gezeigt worden, niemals erfüllt. Ich muss also den Satz, dass die von mir aufgestellte Function an

keiner Stelle einen bestimmten Differentialquotienten besitze, als unbedingt gültig aufrecht erhalten. Die dagegen erhobenen Einwendungen beruhen übrigens auf einem leicht aufzuklärenden Missverständnisse. Es ist mit dem Satze gar wohl vereinbar, dass für gewisse Werthe x_0 sich eine unendliche Reihe von Werthen x_1, x_2, x_3, \dots so bestimmen lässt, dass $\lim_{n=\infty} x_n = x_0$ ist und zugleich

$$\lim_{n=\infty} \frac{f(x_n) - f(x_0)}{x_n - x_0}$$

einen bestimmten Werth erhält. Daraus aber zu schliessen, dass in einem solchen Falle $f(x)$ an der Stelle ($x = x_0$) einen bestimmten Differentialquotienten besitze, ist ebenso unzulässig, wie es sein würde, wenn man z. B. von der Function

$$F(x) = x \sin\left(x + \frac{1}{x}\right)$$

behaupten wollte, sie besitze an der Stelle ($x = 0$) den Differentialquotienten Null, weil sich, wenn man $x_n = \frac{1}{n\pi}$ setzt,

$$\lim_{n=\infty} x_n = 0 \quad \text{und} \quad \lim_{n=\infty} \frac{F(x_n)}{x_n} = 0$$

ergibt.

ZUR FUNCTIONENLEHRE.

Nachtrag.

(Aus dem Monatsbericht der Königl. Akademie der Wissenschaften
vom 21. Februar 1881.)

In der am 12. August 1880 der Akademie vorgelegten Abhandlung »Zur Functionenlehre« habe ich (in § 4) eine aus rationalen Functionen einer Veränderlichen x gebildete unendliche Reihe aufgestellt, welche die Eigenthümlichkeit besitzt, dass sie den Werth

$$+1 \text{ oder } -1$$

hat, jenachdem der reelle Theil von x positiv oder negativ ist.

Obwohl diese Reihe an sich einfach genug ist und für den Gebrauch, den ich von ihr zum Beweise des in § 5 d. g. Abhdlg. gegebenen Hauptsatzes gemacht habe, durchaus geeignet sich erweist, so ist doch ihre Herleitung einigermassen umständlich und setzt mehrere Sätze aus der Theorie der trigonometrischen Functionen voraus. Um so interessanter war es mir, kürzlich durch eine briefliche Mittheilung von Herrn J. Tannery, Professor an der Faculté des sciences zu Paris, der meine Abhandlung in's Französische übersetzt hat, zu erfahren, dass es höchst einfache Reihen ähnlicher Art giebt, welche nicht nur für den angegebenen Zweck dasselbe leisten wie die meinige, sondern vor dieser zugleich den wesentlichen Vorzug haben, dass zu ihrer Aufstellung und zum Nachweis ihrer charakteristischen Eigenschaft nur die elementarsten Sätze der Functionenlehre erforderlich sind.

Ich erlaube mir, aus Herrn Tannery's Briefe das Nachstehende mitzutheilen.

»Man nehme eine unendliche Reihe positiver ganzer Zahlen

$$m_0, m_1, m_2, \dots$$

so an, dass

$$\lim_{n=\infty} m_n = \infty,$$

so ist

$$\lim_{n=\infty} \frac{1+x^{m_n}}{1-x^{m_n}} = \begin{cases} +1, & \text{wenn } |x| < 1, \\ -1, & \text{wenn } |x| > 1. \end{cases}$$

Man hat aber

$$\begin{aligned} \frac{1+x^{m_n}}{1-x^{m_n}} &= \frac{1+x^{m_0}}{1-x^{m_0}} + \sum_{v=1}^n \left\{ \frac{1+x^{m_v}}{1-x^{m_v}} - \frac{1+x^{m_{v-1}}}{1-x^{m_{v-1}}} \right\} \\ &= \frac{1+x^{m_0}}{1-x^{m_0}} + \sum_{v=1}^n \frac{2x^{m_v-1}(x^{m_v-m_{v-1}}-1)}{(x^{m_v}-1)(x^{m_{v-1}}-1)}; \end{aligned}$$

setzt man also

$$\psi(x) = \frac{1+x^{m_0}}{1-x^{m_0}} + \sum_{v=1}^{\infty} \frac{2x^{m_v-1}(x^{m_v-m_{v-1}}-1)}{(x^{m_v}-1)(x^{m_{v-1}}-1)},$$

so convergirt die Reihe auf der rechten Seite dieser Gleichung für jeden Werth von x , dessen absoluter Betrag von 1 verschieden ist, und hat den Werth

$$+1 \text{ oder } -1,$$

jenachdem der absolute Betrag von x kleiner oder grösser als 1 ist.

Nimmt man in dem vorstehenden Ausdrücke von $\psi(x)$

$$m_v = 2^v,$$

so erhält derselbe eine besonders einfache Gestalt; es ist dann

$$\psi(x) = \frac{1+x}{1-x} + \frac{2x}{x^2-1} + \frac{2x^2}{x^4-1} + \frac{2x^4}{x^8-1} + \dots \text{ (*)}$$

*) Ich bin vor nicht langer Zeit darauf aufmerksam gemacht worden, dass sich in einer Abhandlung des Herrn E. Schröder a. d. J. 1876 (Schlömilch's Zeitschrift für Math. u. Phys., 22. Jahrg. S. 184) die Formel

$$\frac{1}{x-x^{-1}} + \frac{1}{x^2-x^{-2}} + \frac{1}{x^4-x^{-4}} + \frac{1}{x^8-x^{-8}} + \dots = \begin{cases} \frac{x}{x-1}, & \text{wenn } |x| < 1, \\ \frac{1}{x-1}, & \text{wenn } |x| > 1, \end{cases}$$

findet, woraus sich die im Texte nachgewiesene Eigenschaft der Function $\psi(x)$ in dem Falle, wo $m_v = 2^v$ ist, unmittelbar ergibt.

Dazu bemerke ich noch Folgendes.

Es ist unmittelbar ersichtlich, dass die von Herrn Tannery gegebene Reihe in der Nähe jedes Werthes von x , dessen absoluter Betrag nicht gleich 1 ist, gleichförmig convergirt.

Ist ferner x' eine beliebige rationale Function von x , so werden in der Ebene der letzteren Grösse diejenigen Werthe derselben, für die der absolute Betrag von x' gleich 1 ist, durch eine algebraische Curve repräsentirt, welche die Ebene dergestalt in mehrere Stücke zerlegt, dass der absolute Betrag von x' in einigen Stücken kleiner als 1, in den andern grösser als 1 ist. Setzt man also

$$\psi(x') = \chi_1(x),$$

so ist $\chi_1(x)$ ein Ausdruck von derselben Beschaffenheit wie der von mir im Anfang des § 5 d. g. Abhdlg. ebenso bezeichnete. Nimmt man insbesondere,

$$x' = \frac{1-x}{1+x},$$

so erhält man einen Ausdruck, der gleich dem von mir mit $\chi(x)$ bezeichneten den Werth

$$+1 \text{ oder } -1$$

hat, jenachdem der reelle Theil von x positiv oder negativ ist.

AUS EINEM BISHER NOCH NICHT VERÖFFENTLICHTEN BRIEFE
AN HERRN PROFESSOR SCHWARZ, VOM 3. OCTOBER 1875.

... Je mehr ich über die Principien der Functionentheorie nachdenke — und ich thue dies unablässig —, um so fester wird meine Überzeugung, dass diese auf dem Fundamente algebraischer Wahrheiten aufgebaut werden muss, und dass es deshalb nicht der richtige Weg ist, wenn umgekehrt zur Begründung einfacher und fundamentaler algebraischer Sätze das »Transcendente«, um mich kurz auszudrücken, in Anspruch genommen wird — so bestechend auch auf den ersten Anblick z. B. die Betrachtungen sein mögen, durch welche Riemann so viele der wichtigsten Eigenschaften algebraischer Functionen entdeckt hat. (Dass dem Forscher, so lange er sucht, jeder Weg gestattet sein muss, versteht sich von selbst; es handelt sich nur um die systematische Begründung.)

Nachdem ich dies mein Glaubensbekenntniss, in welchem ich besonders durch eingehendes Studium der Theorie der analytischen Functionen mehrerer Veränderlichen bekräftigt worden bin, vorausgeschickt, gestatten Sie mir, in möglichster Kürze Ihnen aus meiner letzten Vorlesung über Abelsche Functionen diejenigen algebraischen Sätze vorzuführen, deren Kenntniss hinreicht, um in dem Resultat Ihrer Untersuchung (betr. den Satz, dass eine algebraische Gleichung zwischen zwei Veränderlichen, wenn sie unendlich viele Transformationen in sich selbst zulässt, nothwendig den Rang 1 hat) eine so zu sagen selbstverständliche Wahrheit zu erblicken.

Ist zwischen zwei veränderlichen Grössen x, y irgend eine irreductible algebraische Gleichung gegeben, so nenne ich die Gesammtheit der diese

Gleichung befriedigenden Werthepaare (x, y) das durch die Gleichung definirte Gebilde, jedes einzelne Paar aber eine Stelle (Punkt) dieses Gebildes. Das Nächste ist dann, den Ihnen bekannten Begriff des Elementes eines solchen Gebildes gehörig festzustellen.

Es sei (a, b) eine bestimmte Stelle des betrachteten Gebildes, so giebt es eindeutige und in der Form gewöhnlicher Potenzreihen darstellbare Functionen $f_1(t), f_2(t)$ einer Veränderlichen t von der Beschaffenheit, dass erstens die gegebene Gleichung befriedigt wird, wenn man

$$x-a = f_1(t), \quad y-b = f_2(t)$$

setzt, wobei $(x-a)$ durch $\frac{1}{x}$ zu ersetzen ist, falls $a = \infty$ — ein Ähnliches gilt von $(y-b)$ —; zweitens $x = a$ und $y = b$ wird für $t = 0$, und drittens zu verschiedenen Werthen von t — wenigstens wenn dieselben dem absoluten Betrage nach eine gewisse Grenze nicht übersteigen — auch verschiedene Stellen des Gebildes gehören. Die Gesammtheit der durch ein solches Functionenpaar gegebenen Werthepaare (x, y) nenne ich nun ein Element des betrachteten Gebildes, und beweise, dass das ganze Gebilde in eine endliche Anzahl solcher Elemente zerlegt werden kann. (Zur Entwicklung von $f_1(t), f_2(t)$ habe ich jetzt eine Methode, die viel einfacher ist, als das bekannte Verfahren zur Entwicklung von $y-b$ nach ganzen oder gebrochenen Potenzen von $x-a$.) Ferner wird gezeigt, dass aus einem Elemente alle übrigen abgeleitet werden können, weshalb das durch eine irreductible algebraische Gleichung definirte Gebilde ein monogenes ist. Dann ist noch zu bemerken, dass im Allgemeinen alle Stellen (x, y) , die einer gegebenen (a, b) unendlich nahe liegen, einem Elemente angehören; es giebt aber einzelne singuläre Stellen, für welche dies nicht der Fall ist. Wenn daher von einer bestimmten Stelle des Gebildes die Rede ist, so wird, falls es sich um eine dieser singulären Stellen handelt, vorausgesetzt, dass das Element, dem sie angehören soll, bezeichnet werde. Hierauf wird festgestellt, was es heisst, es werde eine gegebene rationale Function von (x, y) an einer bestimmten Stelle unendlich gross von einer gewissen Ordnung; woran sich dann eine Reihe von Erklärungen und Sätzen schliesst, die ich nicht zu wiederholen brauche. Ich will nur anführen, wie ich den Begriff »zwei algebraische Gebilde sind rational in einander transformirbar« fasse.

Es sei $f(x, y) = 0$ die gegebene Gleichung und $R_1(x, y)$ eine beliebige rationale Function von (x, y) , so gehört, wenn man $\xi = R_1(x, y)$ setzt, zu jedem Werthe von ξ — eine beschränkte Anzahl specieller ausgenommen — eine bestimmte Anzahl verschiedener Werthepaare (x, y) , welche ich den Grad von $R_1(x, y)$ nenne. Setzt man diese in eine zweite rationale Function $R_2(x, y)$ ein, und findet sich, dass für einen beliebigen Werth von ξ die entsprechenden Werthe von $R_2(x, y)$ alle von einander verschieden sind, so erhält man, wenn man $\eta = R_2(x, y)$ setzt, aus den Gleichungen

$$f(x, y) = 0, \quad \xi = R_1(x, y), \quad \eta = R_2(x, y)$$

stets eine irreductible Gleichung

$$\varphi(\xi, \eta) = 0,$$

welche, wenn μ, ν die Grade von $R_1(x, y), R_2(x, y)$ bezeichnen, in Beziehung auf η vom μ^{ten} , in Beziehung auf ξ vom ν^{ten} Grade ist. Dann entspricht aber auch immer nicht nur einem Werthepaare (x, y) ein Paar (ξ, η) , sondern dies gilt auch umgekehrt, und man erhält

$$x = R_3(\xi, \eta), \quad y = R_4(\xi, \eta),$$

wo R_3, R_4 ebenfalls rationale Functionen bezeichnen. Die Gleichungen

$$x = R_3(\xi, \eta), \quad y = R_4(\xi, \eta), \quad \varphi(\xi, \eta) = 0$$

führen sodann durch Elimination von ξ, η zu der ursprünglichen zurück. Man sagt daher, die Gleichungen $f(x, y) = 0, \varphi(\xi, \eta) = 0$ seien rational in einander transformirbar, und wendet diesen Ausdruck auch auf die beiden durch sie definirten Gebilde an.

Dies hätte ich Ihnen allerdings nicht so weitläufig darzulegen brauchen, ich wollte Ihnen aber eine ungefähre Anschauung von meinem Gange geben. Wesentlicher und Ihnen wohl noch nicht vollständig bekannt ist das nunmehr Folgende.

Es werde irgend eine bestimmte Stelle (a, b) des betrachteten Gebildes ausgewählt, so lässt sich zeigen, dass es unendlich viele rationale Functionen von (x, y) giebt, die nur an dieser Stelle unendlich gross werden. Unter diesen giebt es nothwendig eine vom niedrigsten Grade — ich will eine solche z nennen —, und es ist klar, dass dann jede andere von der Form $\alpha z_1 + \beta$ ist,

wo α, β Constanten bezeichnen. Unter den übrigen, d. h. denen, die von höherem Grade als z_1 sind, wähle man eine (z_2) von niedrigstem Grade aus, ebenso eine (z_3) von denen, deren Grad höher als der von z_2 ist u. s. w. So erhält man eine unendliche Reihe von Functionen

$$\begin{aligned} & z_1, z_2, z_3, z_4, \dots, \\ \text{deren Grade} & \quad \quad \quad \nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4, \dots \end{aligned}$$

eine steigende Reihe bilden, und die der doppelten Bedingung genügen, dass sie alle nur an der Stelle (a, b) unendlich gross werden, und zugleich jede andere Function z von derselben Beschaffenheit sich in der Form

$$\alpha_0 + \alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2 + \dots + \alpha_m z_m$$

darstellen lässt, wo $\alpha_0, \dots, \alpha_m$ Constanten bedeuten. Es lässt sich ferner leicht zeigen, dass in der Reihe der Zahlen

$$\nu_1, \nu_2, \nu_3, \dots$$

von einer bestimmten an jede um eine Einheit grösser ist als die unmittelbar vorhergehende.

Ist $\nu_1 = 1$, so ist die Gleichung $f(x, y) = 0$ von der Beschaffenheit, dass sich alle Werthe paare (x, y) in der Form

$$x = R_1(t), \quad y = R_2(t)$$

ausdrücken lassen. In jedem andern Falle müssen daher in der Reihe

$$\nu_1, \nu_2, \dots$$

einige ganze Zahlen fehlen, die mit

$$k_1, k_2, \dots$$

bezeichnet werden mögen.

Durch sehr einfache Betrachtungen zeige ich nun, dass erstens zwar nicht diese Zahlen k selbst, wohl aber ihre Anzahl für alle Stellen (a, b) dieselbe ist — ich nenne sie ϱ — und

zweitens für alle Stellen mit Ausnahme einer beschränkten Menge singulärer (und zwar algebraisch bestimmbarer) die in Rede stehenden fehlenden Zahlen die folgenden sind:

$$1, 2, \dots, \varrho.$$

(Hieraus werden Sie erkennen, dass ϱ die Bedeutung hat, die ich sonst diesem Buchstaben gebe.)

Ist ν_α die erste der Zahlen ν_1, ν_2, \dots , welche kein ganzzahliges Vielfaches von ν_1 ist, so besteht zwischen z_1 und z_α eine algebraische Gleichung von der Form

$$z_\alpha^{\nu_1} + G_1(z_1) \cdot z_\alpha^{\nu_1-1} + \dots + G_{(\nu_1-1)}(z_1) \cdot z_\alpha + G_{\nu_1}(z_1) = 0,$$

wo $G_1, G_2, \dots, G_{\nu_1}$ ganze Functionen von z_1 bedeuten. Die Grade von $G_1, G_2, \dots, G_{(\nu_1-1)}$ sind nicht grösser als beziehlich

$$\frac{\nu_\alpha}{\nu_1}, \frac{2\nu_\alpha}{\nu_1}, \dots, (\nu_1-1) \frac{\nu_\alpha}{\nu_1},$$

der von G_{ν_1} aber ist ν_α . Da man nun aber, wenn λ die grösste in dem Bruche $\frac{\nu_\alpha}{\nu_1}$ enthaltene ganze Zahl bedeutet, $a_0 z_\alpha^\lambda + a_1 z_1^\lambda + a_2 z_1^{\lambda-1} + \dots + a_\lambda z_1 + a_{\lambda+1}$ für z_α setzen darf, so kann man durch geeignete Wahl der Function z_α erreichen, dass in der vorstehenden Gleichung $G_1(z_1) = 0$ wird. Da man ferner $b_0 z_1 + b_1$ für z_1 setzen darf, so kann man ausserdem durch geeignete Wahl von z_1 erreichen, dass in $G_{\nu_1}(z_1)$ der Coefficient von $z_1^{\nu_\alpha}$ gleich (-1) , der von $z_1^{\nu_\alpha-1}$ aber gleich Null wird. Dadurch ist das Functionenpaar (z_1, z_α) soweit völlig bestimmt, dass man statt desselben nur noch das folgende

$$(c^{\nu_1} z_1, c^{\nu_\alpha} z_\alpha),$$

wo c eine willkürliche Constante bedeutet, setzen darf.

Betrachtet man nun z_2, z_3 u. s. w. als Functionen von z_1 , so entsprechen jedem Werthe dieser Grösse ν_1 Werthe jeder der übrigen, und man erhält für hinlänglich grosse Werthe von z_1 , wenn man

$$s = z_1^{\frac{1}{\nu_1}}$$

setzt, alle Werthe von z_m dargestellt durch eine Reihe von der Form

$$c_0 s^{\nu_m} + c_1 s^{\nu_m-1} + c_2 s^{\nu_m-2} + \dots$$

Man kann aber die Function z_m durch

$$\alpha_0 + \alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2 + \dots + \alpha_m z_m$$

ersetzen und die Constanten α so bestimmen, dass $c_0 = 1$, und von den übrigen Gliedern mit nicht negativen Potenzen von s nur diejenigen bleiben, in

denen der Exponent von s eine der Zahlen k_1, k_2, \dots, k_ρ (und zugleich $< \nu_m$) ist. (Dies gilt auch für die Entwicklung von z_α nach Potenzen von s .)

Auf diese Weise ergibt sich eine Reihe von Functionen

$$z_1, z_2, z_3, \dots,$$

welche soweit bestimmt sind, dass man sie nur durch die folgenden

$$c^{\nu_1} z_1, c^{\nu_2} z_2, c^{\nu_3} z_3, \dots$$

ersetzen kann.

Alles dies gilt, wie gesagt, für jede Stelle (a, b) . Nun möge aber (a, b) so gewählt werden, dass für diese Stelle die Zahl ν_1 , die im Allgemeinen gleich $\rho + 1$ ist, so klein als überhaupt möglich wird. Hier tritt nun ein wesentlicher Unterschied ein. Wenn $\rho = 0$ oder 1 , so kann ν_1 nicht kleiner als $\rho + 1$ werden. Wenn aber $\rho > 1$, so giebt es stets Stellen, für welche $\nu_1 \leq \rho$, und also auch mindestens eine, für die diese Zahl ein Minimum ist. Für diese Stelle seien nun die Functionen z_1, z_2, z_3, \dots gebildet. Im Allgemeinen ist dann die Gleichung zwischen z_1 und z_2 irreductibel. In besonderen Fällen kann aber das Gegentheil stattfinden, immer aber giebt es unter den Zahlen ν_2, ν_3, \dots solche, die relativ prim zu ν_1 sind. Ist ν_r die erste derselben, so besteht zwischen z_1 und z_r stets eine irreductible Gleichung von der Beschaffenheit, dass für hinlänglich grosse Werthe von z_1 die zugehörigen ν_1 Werthe von z_r durch eine Reihe von der Form

$$\left(\frac{1}{z_1^{\nu_1}}\right)^{\nu_r} + C_1 \left(\frac{1}{z_1^{\nu_1}}\right)^{k_1} + C_2 \left(\frac{1}{z_1^{\nu_1}}\right)^{k_2} + \dots + \text{Glieder mit negativen Potenzen von } \frac{1}{z_1^{\nu_1}}$$

(in der $C_\mu = 0$ ist, wenn $k_\mu > \nu_r$) gegeben werden.

Diese Gleichung zwischen z_1 und z_r ist nun durch eine rationale Transformation aus der gegebenen $f(x, y) = 0$ ableitbar, und jede Function z_m rational durch z_1 und z_r ausdrückbar.

Umgekehrt ist aus der Form der Gleichung unmittelbar ersichtlich, dass, wenn sie durch eine rationale Transformation aus der gegebenen zwischen x, y entspringt, z_1, z_r nothwendig rationale Functionen von x, y sind, welche beide nur an einer Stelle des Gebildes (x, y) und zwar derselben, unendlich gross werden, und lediglich die Grade ν_1, ν_r haben.

Angenommen nun, die Gleichung $f(x, y) = 0$ lasse eine rationale Transformation in sich selbst zu, so ist ein Gleiches der Fall mit der zwischen z_1

und z_r bestehenden Gleichung, so dass es zwei rationale Functionen (ζ_1, ζ_r) von (z_1, z_r) giebt, zwischen denen dieselbe Gleichung besteht, wie zwischen z_1 und z_r , so dass für hinlänglich grosse Werthe von ζ_1 die Entwicklung von ζ_r nach Potenzen von $\zeta_1^{\frac{1}{v_1}}$ aus der oben für z_r angegebenen durch die Substitution von $\zeta_1^{\frac{1}{v_1}}$ für $z_1^{\frac{1}{v_1}}$ hervorgeht. Dann sind ζ_1, ζ_r rationale Functionen von (x, y), welche nach dem oben Bemerkten nur an einer Stelle des Gebildes (x, y) unendlich gross werden und beziehlich die Grade v_1, v_r haben. Ist ferner ζ_m dieselbe rationale Function von (ζ_1, ζ_r) wie z_m von (z_1, z_r), so hat auch ζ_m für hinlänglich grosse Werthe von ζ_1 dieselbe Entwicklung wie z_m für grosse Werthe von z_1 . Da nun z_m nur für $z_1 = \infty$, also auch ζ_m nur für $\zeta_1 = \infty$ unendlich gross wird, so folgt, dass auch ζ_m als Function von x, y nur an derjenigen Stelle (a', b') des Gebildes unendlich wird, an der dies mit ζ_1 der Fall ist. Hieraus ergibt sich, dass für die Stelle (a', b') die Reihe der Functionen

$$\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \dots$$

genau dieselbe Bedeutung hat, wie für die Stelle (a, b) die obige Reihe

$$z_1, z_2, z_3, \dots,$$

in der Art, dass nicht nur die Reihe der Zahlen v und somit auch die der k für beide dieselbe ist, sondern auch die für grosse Werthe von ζ_1 geltende Entwicklung von ζ_m nach Potenzen von $\zeta_1^{\frac{1}{v_1}}$ für jeden Werth von m aus der entsprechenden Entwicklung von z_m durch Substitution von $\zeta_1^{\frac{1}{v_1}}$ für $z_1^{\frac{1}{v_1}}$ hervorgeht.

Nun sind zwei Fälle möglich.

Erstens kann die Stelle (a', b') mit (a, b) identisch sein. Dann muss nach dem oben Bemerkten

$$\zeta_1 = c^{v_1} z_1, \quad \zeta_2 = c^{v_2} z_2, \quad \dots \quad \zeta_m = c^{v_m} z_m$$

sein. Die Bedingung, dass die Gleichung zwischen ζ_1 und ζ_r dieselbe sei wie zwischen z_1 und z_r , hat aber zur Folge, dass c nothwendig eine bestimmte Einheitswurzel (im Allgemeinen 1 selbst) ist.

Zweitens kann die Stelle (a', b') von (a, b) verschieden sein. Dann wird auf dieselbe Weise gezeigt, dass es nur eine geschlossene Anzahl von Functionenpaaren (ζ_1, ζ_r) geben kann, welche nur an dieser Stelle unendlich gross werden und durch dieselbe Gleichung wie z_1 und z_r mit einander verbunden sind. Es giebt aber, wenn $\varrho > 1$ ist, überhaupt nur eine beschränkte Anzahl von Stellen, für die eine Function ζ_1 vom Grade ν_1 existirt.

Damit steht fest: »Wenn eine Gleichung $f(x, y) = 0$ überhaupt rationale Transformationen in sich selbst zulässt, so ist die Anzahl derselben, sobald der Rang (ϱ) der Gleichung grösser als 1 ist, in jedem Falle eine endliche«.

Sie sehen also, lieber College, dieser von Ihnen bewiesene Satz ist ungemein leicht abzuleiten, wenn die erforderlichen algebraischen Hilfsmittel vorhanden sind. Ich weiss mich nicht zu erinnern, ob ich denselben in meiner Vorlesung erwähnt habe — näher auf den Beweis eingegangen bin ich nicht —, muss es aber vermuthen, da ich ihn in der Dissertation von Schottky, worüber ich Ihnen schon schrieb — gedruckt ist dieselbe noch nicht —, als einen »bekanntem« angeführt gefunden, welchen Ausdruck ich bei der Revision gestrichen habe. (In der Theorie der Abbildung mehrfach zusammenhangender ebener Flächen auf einander ist derselbe von wesentlicher Bedeutung.)

Nun ist es aber meine Meinung durchaus nicht, dass Sie Ihren Beweis unterdrücken sollen, aber ich wünsche, dass Sie bei der Publication bemerken möchten, ich habe Ihnen eine rein algebraische Ableitung des fraglichen Satzes mitgetheilt, und zwar wünsche ich dies einfach aus dem Grunde, weil einige meiner Zuhörer mit den Principien, worauf meine Deduction beruht, so vertraut sind, dass leicht Jemand sich finden möchte, der nach Veröffentlichung Ihrer Abhandlung in vielleicht nicht angemessener Weise mit der Bemerkung, es lasse sich das Resultat viel einfacher begründen, hervorträte; was für uns beide nicht grade angenehm sein würde.

Gestatten Sie mir noch einige Bemerkungen in Betreff der Bedeutung, welche die Functionen z für die Theorie der Abelschen Integrale haben.

Wenn man die Stelle (a, b) so auswählt, dass die Zahl ν_1 ein Minimum ist, so hat die zwischen z_1 und z_r bestehende Gleichung ein Minimum von Constanten.

(Durch die Substitution von $c^{v_1} z_1, c^{v_r} z_r$ kann man bewirken, dass noch ein Coefficient der Gleichung den Werth 1 erhält.) Im Allgemeinen kann v_1 nicht kleiner als ϱ werden, und dann ist der Riemann'sche Satz von den $(3\varrho-3)$ Constanten gültig.

Es kann aber v_1 bis auf 2 herabsinken (den Fall $\varrho = 0$ ausgeschlossen), und dann beträgt die Anzahl der Constanten nur $2\varrho-1$. (Fall der ellipt. und hyperellipt. Integrale.) Dazwischen liegt eine Reihe besonders zu behandelnder Fälle. Besonders bemerkenswerth ist, dass in eine solche Gleichung zwischen z_1, z_r (man muss für einen bestimmten Werth von ϱ die zugehörigen Gleichungen (Gebilde) zunächst in Gruppen theilen, so dass kein Gebilde, das einer Gruppe angehört, aus einem Gebilde einer andern Gruppe durch rationale Transformation hervorgehen kann) die erforderliche Anzahl willkürlicher Constanten unmittelbar eingeht, d. h. dass alle Coefficienten rationale Functionen dieser Constanten sind. Ferner giebt es ein bestimmtes Verfahren, wodurch sich für jeden Werth von ϱ die in Rede stehenden Gleichungen bilden lassen, während natürlich die Umformung einer gegebenen Gleichung in eine solche »kanonische« nicht ohne — practisch meist nicht durchführbare — algebraische Operationen geschehen kann.

Für $\varrho = 1, 2, 3, 4, 5$ hat mir Frau von Kovalevsky die Gleichungen wirklich hergestellt.

Bildet man für eine beliebige Stelle (a, b) die Reihe der Functionen z_1, z_2, \dots , so ist

$$\alpha_0 + \alpha_1 z_1 + \dots + \alpha_m z_m$$

der allgemeinste Ausdruck einer Function, die rational durch x, y ausdrückbar und an der Stelle (a, b) unendlich gross (von der Ordnung v_m) wird. Dieselbe wird dann nothwendig an v_m Stellen Null. Man kann aber unendliche Reihen

$$\alpha_0 + \alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2 + \dots,$$

welche beständig convergiren, so bilden, dass sie nur an der Stelle (a, b) , die für sie eine eigentliche Grenzstelle ist, unstetig werden, und zugleich nur an einer Stelle oder an gar keiner verschwinden. Diese Functionen von (x, y) nenne ich Primfunctionen. In Betreff der nirgends verschwin-

denden zeige ich, dass es 2ϱ solche,

$$E(x, y)_1, \dots, E(x, y)_{2\varrho}$$

giebt, aus denen sich alle übrigen in der Form

$$E^{g_1}(x, y)_1, \dots, E^{g_{2\varrho}}(x, y)_{2\varrho},$$

wo die g ganze Zahlen bedeuten, zusammensetzen lassen. Eine Function der andern Art, die an der Stelle (x_1, y_1) verschwindet (und zwar mit der Ordnungszahl 1), bezeichne ich mit $E(x, y; x_1, y_1)$, und beweise dann zwei Fundamentalsätze.

1) Jede rationale Function $R(x, y)$ r^{ten} Grades lässt sich in der Form

$$R(x, y) = C \frac{E(x, y; x'_1, y'_1) \dots E(x, y; x'_r, y'_r)}{E(x, y; x_1, y_1) \dots E(x, y; x_r, y_r)}$$

darstellen.

2) Wenn $(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)$ die verschiedenen Stellen sind, an denen $\int R(x, y) dx = \infty$ wird, so hat man

$$\int R(x, y) dx = C_1 \log E(x, y; x_1, y_1) + \dots + C_m \log E(x, y; x_m, y_m) \\ + C'_1 \log E(x, y)_1 + \dots + C'_{2\varrho} \log E(x, y)_{2\varrho} + R_1(x, y),$$

wo R_1 eine rationale Function von x, y bezeichnet und die C Constanten sind.

Auf diese Weise sind die Integrale algebraischer Differentiale in einer Form, die den analytischen Charakter derselben zur Evidenz bringt, dargestellt. Fügt man noch zwei Formeln hinzu, die das Verhalten der E -Functionen in der Nähe der (willkürlich auszuwählenden) Stelle (a, b) angeben, so sind alle Sätze, welche die Theorie der Abelschen Integrale ausmachen, einfache Corollare der unter 1), 2) aufgestellten.

ZUR THEORIE DER ELLIPTISCHEN FUNCTIONEN. *)

(Aus dem Sitzungsbericht der Königl. Akademie der Wissenschaften
vom 27. April 1882.)

I.

Herleitung der Relationen, welche unter den Functionen
 $\mathfrak{G}(u|\omega, \omega')$, $\mathfrak{G}_1(u|\omega, \omega')$, $\mathfrak{G}_2(u|\omega, \omega')$, $\mathfrak{G}_3(u|\omega, \omega')$
und deren partiellen Ableitungen nach u , ω , ω' stattfinden.

Es werde irgend eine dieser Functionen bloss mit \mathfrak{G} bezeichnet und

$$\varphi = -\frac{\partial^2 \log \mathfrak{G}}{\partial u^2}$$

gesetzt, so dass für die erste Function

$$\varphi = \wp(u)$$

und für \mathfrak{G}_λ , wo λ eine der Zahlen 1, 2, 3 bedeutet,

$$\varphi = \wp(u + \omega_\lambda)$$

ist. Dann hat man

$$(1.) \quad \left(\frac{\partial \varphi}{\partial u}\right)^2 = 4\varphi^3 - g_2\varphi - g_3,$$

$$(2.) \quad \frac{\partial^2 \varphi}{\partial u^2} = 6\varphi^2 - \frac{1}{2}g_2.$$

*) In Betreff der in dieser Mittheilung gebrauchten Bezeichnungen und als bekannt vorausgesetzten Formeln verweise ich auf die „Formeln und Lehrsätze zum Gebrauche der elliptischen Functionen. Nach Vorlesungen und Aufzeichnungen des Herrn K. Weierstrass bearbeitet und herausgegeben von H. A. Schwarz“.

Aus diesen Gleichungen erhält man, wenn man sich der Bezeichnung $d'F$ bedient, um anzudeuten, dass ein die Grössen u, ω, ω' enthaltender Ausdruck in Beziehung auf ω, ω' differentiirt werden solle:

$$\begin{aligned}
 2 \frac{\partial \varphi}{\partial u} \frac{\partial}{\partial u} d' \varphi &= (12\varphi^2 - g_2) d' \varphi - \varphi dg_2 - dg_3, \\
 2 \frac{\partial \varphi}{\partial u} \frac{\partial}{\partial u} d' \varphi - 2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial u^2} d' \varphi + \varphi dg_2 + dg_3 &= 0, \\
 (3.) \quad 2 \frac{\partial}{\partial u} \left(\frac{d' \varphi}{\frac{\partial \varphi}{\partial u}} \right) + \frac{\varphi dg_2 + dg_3}{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial u} \right)^2} &= 0.
 \end{aligned}$$

Man hat aber

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial u} \left(\frac{1}{\frac{\partial \varphi}{\partial u}} \right) &= - \frac{6\varphi^2 - \frac{1}{2}g_2}{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial u} \right)^2}, \\
 \frac{\partial}{\partial u} \left(\frac{\varphi}{\frac{\partial \varphi}{\partial u}} \right) &= - \frac{1}{2} - \frac{g_2 \varphi + \frac{3}{2}g_3}{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial u} \right)^2}, \\
 \frac{\partial}{\partial u} \left(\frac{\varphi^2}{\frac{\partial \varphi}{\partial u}} \right) &= \frac{1}{2} \varphi - \frac{g_2 \varphi^2 + \frac{3}{2}g_3 \varphi}{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial u} \right)^2}, \\
 \frac{\partial}{\partial u} \left(\frac{\varphi^2 - \frac{1}{6}g_2}{\frac{\partial \varphi}{\partial u}} \right) &= \frac{1}{2} \varphi - \frac{\frac{3}{2}g_3 \varphi + \frac{1}{12}g_2^2}{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial u} \right)^2};
 \end{aligned}$$

wenn man also d_1, d_2 so bestimmt, dass

$$(4.) \quad dg_2 = -4g_2 d_1 - 6g_3 d_2, \quad dg_3 = -6g_3 d_1 - \frac{1}{3}g_2^2 d_2$$

ist — was angeht, weil $g_2^3 - 27g_3^2$ nicht gleich Null ist —, so lässt sich die Gleichung (3.) in der Form

$$\frac{\partial}{\partial u} \left\{ 2 \frac{d' \varphi}{\frac{\partial \varphi}{\partial u}} + 2 \left(u + \frac{2\varphi}{\frac{\partial \varphi}{\partial u}} \right) d_1 + \left(2 \frac{\partial \log \sigma}{\partial u} + \frac{4\varphi^2 - \frac{2}{3}g_2}{\frac{\partial \varphi}{\partial u}} \right) d_2 \right\} = 0$$

schreiben. In dieser Gleichung sind alle Glieder des Ausdrucks, auf den sich das Zeichen $\frac{\partial}{\partial u}$ bezieht, ungerade Functionen von u , weil φ eine gerade und $\frac{\partial \log \sigma}{\partial u}$ eine ungerade Function derselben Grösse ist; folglich muss dieser

Ausdruck, da er von u unabhängig ist, gleich Null sein. Man hat also

$$(5.) \quad d'\varphi + \left(u \frac{\partial \varphi}{\partial u} + 2\varphi\right) d_1 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial u} \frac{\partial \log \sigma}{\partial u} + 2\varphi^2 - \frac{1}{3}g_2\right) d_2 = 0.$$

Nun ist

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial u^2} \left(\frac{d'\sigma}{\sigma}\right) &= \frac{\partial^2 d' \log \sigma}{\partial u^2} = -d'\varphi, \\ \frac{\partial}{\partial u} \left(\frac{u \cdot \partial \sigma}{\sigma \partial u}\right) &= \frac{\partial \log \sigma}{\partial u} - u\varphi, \\ \frac{\partial^2}{\partial u^2} \left(\frac{u \cdot \partial \sigma}{\sigma \partial u}\right) &= -u \frac{\partial \varphi}{\partial u} - 2\varphi, \\ \frac{\partial}{\partial u} \left(\frac{1}{\sigma} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial u^2}\right) &= \frac{\partial}{\partial u} \left(\frac{\partial^2 \log \sigma}{\partial u^2} + \left(\frac{\partial \log \sigma}{\partial u}\right)^2\right) = -\frac{\partial \varphi}{\partial u} - 2\varphi \frac{\partial \log \sigma}{\partial u}, \\ \frac{\partial^2}{\partial u^2} \left(\frac{1}{\sigma} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial u^2}\right) &= 2\varphi^2 - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial u^2} - 2 \frac{\partial \varphi}{\partial u} \frac{\partial \log \sigma}{\partial u} = -4\varphi^2 - 2 \frac{\partial \varphi}{\partial u} \frac{\partial \log \sigma}{\partial u} + \frac{1}{2}g_2; \end{aligned}$$

und es lässt sich also die Gleichung (5.) so schreiben:

$$\frac{\partial^2}{\partial u^2} \left\{ 2 \frac{d'\sigma}{\sigma} + 2 \frac{u}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial u} d_1 + \left(\frac{1}{\sigma} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial u^2} + \frac{1}{12}g_2 u^2\right) d_2 \right\} = 0.$$

In dieser Gleichung sind nun alle Glieder des Ausdrucks, auf den sich das Zeichen $\frac{\partial^2}{\partial u^2}$ bezieht, gerade Functionen von u ; folglich muss der Ausdruck einen von u unabhängigen Werth haben. Bezeichnet man diesen mit C , so wird

$$2d'\sigma + 2u \frac{\partial \sigma}{\partial u} d_1 + \left(\frac{\partial^2 \sigma}{\partial u^2} + \frac{1}{12}g_2 u^2\right) d_2 = C\sigma.$$

Nimmt man jetzt

$$\sigma = \sigma(u | \omega, \omega'),$$

so hat man

$$\sigma = u + u^5 \mathfrak{P}(u),$$

und es ergibt sich, wenn man auf beiden Seiten der vorstehenden Gleichung den Coefficienten von u bestimmt, $C = 2d_1$.

Nimmt man aber $\sigma = \sigma_\lambda$, so ist

$$\sigma_\lambda = 1 - \frac{1}{2}e_\lambda u^2 + u^4 \mathfrak{P}_\lambda(u),$$

und man erhält, wenn man in der Gleichung $u = 0$ setzt, $C = -e_\lambda d_2$. So

ergeben sich die folgenden Gleichungen:

$$(A.) \quad 2d'\sigma + 2\left(u \frac{\partial \sigma}{\partial u} - \sigma\right) d_1 + \left(\frac{\partial^2 \sigma}{\partial u^2} + \frac{1}{12} g_2 u^2 \sigma\right) d_2 = 0,$$

$$(B.) \quad 2d'\sigma_\lambda + 2u \frac{\partial \sigma_\lambda}{\partial u} d_1 + \left(\frac{\partial^2 \sigma_\lambda}{\partial u^2} + \left(\frac{1}{12} g_2 u^2 + e_\lambda\right) \sigma_\lambda\right) d_2 = 0 \quad (\lambda = 1, 2, 3).$$

Wir haben hier σ, σ_λ als Functionen von u, ω, ω' betrachtet, so dass d_1, d_2 homogene lineare Functionen von $d\omega, d\omega'$ sind, welche folgendermassen bestimmt werden können.

Man setze

$$\frac{\partial \log \sigma}{\partial u} = \psi(u), \quad \frac{\partial \psi(u)}{\partial \omega} = \psi^{(1)}(u), \quad \frac{\partial \psi(u)}{\partial \omega'} = \psi^{(2)}(u),$$

so folgt aus der Gleichung (A.), wenn man dieselbe durch σ dividirt, wodurch sie die Form

$$2d' \log \sigma + 2(u\psi - 1) d_1 + \left(-\varphi + \psi^2 + \frac{1}{12} g_2 u^2\right) d_2 = 0$$

erhält, und dann in Beziehung auf u differentiirt:

$$(6.) \quad \begin{cases} \psi^{(1)}(u) d\omega + \psi^{(2)}(u) d\omega' + (\psi(u) - u\varphi(u)) d_1 - \left(\varphi(u)\psi(u) - \frac{1}{12} g_2 u\right) d_2 - \frac{1}{2} \frac{\partial \varphi(u)}{\partial u} d_2 = 0 \\ \psi^{(1)}(u) d\omega + \psi^{(2)}(u) d\omega' + (d_1 - \varphi(u) d_2) \psi(u) + \left(\frac{1}{12} g_2 d_2 - d_1 \varphi(u)\right) u - \frac{1}{2} \frac{\partial \varphi(u)}{\partial u} d_2 = 0. \end{cases}$$

Aus den Gleichungen

$$\psi(u + 2\omega) = \psi(u) + 2\eta, \quad \psi(u + 2\omega') = \psi(u) + 2\eta'$$

aber ergibt sich

$$(7.) \quad \begin{cases} 2 \frac{\partial \psi(u + 2\omega)}{\partial u} + \psi^{(1)}(u + 2\omega) = \psi^{(1)}(u) + 2 \frac{\partial \eta}{\partial \omega}, & \psi^{(1)}(u + 2\omega') = \psi^{(1)}(u) + 2 \frac{\partial \eta'}{\partial \omega}, \\ 2 \frac{\partial \psi(u + 2\omega')}{\partial u} + \psi^{(2)}(u + 2\omega') = \psi^{(2)}(u) + 2 \frac{\partial \eta'}{\partial \omega'}, & \psi^{(2)}(u + 2\omega) = \psi^{(2)}(u) + 2 \frac{\partial \eta}{\partial \omega'}, \end{cases}$$

oder

$$(8.) \quad \begin{cases} \psi^{(1)}(u + 2\omega) - \psi^{(1)}(u) = 2 \frac{\partial \eta}{\partial \omega} + 2\varphi(u), & \psi^{(2)}(u + 2\omega) - \psi^{(2)}(u) = 2 \frac{\partial \eta}{\partial \omega'}, \\ \psi^{(1)}(u + 2\omega') - \psi^{(1)}(u) = 2 \frac{\partial \eta'}{\partial \omega}, & \psi^{(2)}(u + 2\omega') - \psi^{(2)}(u) = 2 \frac{\partial \eta'}{\partial \omega'} + 2\varphi(u). \end{cases}$$

In der Gleichung (6.) setze man nun $u + 2\omega$, $u + 2\omega'$ für u , und subtrahire sie dann von den so entstehenden neuen Gleichungen, so kommt

$$d\eta + \varphi(u) d\omega + \eta (d_1 - \varphi(u) d_2) + \omega \left(\frac{1}{12} g_2 d_2 - d_1 \varphi(u) \right) = 0,$$

$$d\eta' + \varphi(u) d\omega' + \eta' (d_1 - \varphi(u) d_2) + \omega' \left(\frac{1}{12} g_2 d_2 - d_1 \varphi(u) \right) = 0.$$

Da $\varphi(u)$ jeden Werth haben kann, so folgt hieraus

$$(C.) \quad \begin{cases} d\omega = \eta d_2 + \omega d_1, & d\eta = -\frac{1}{12} g_2 \omega d_2 - \eta d_1, \\ d\omega' = \eta' d_2 + \omega' d_1, & d\eta' = -\frac{1}{12} g_2 \omega' d_2 - \eta' d_1. \end{cases}$$

Mit Berücksichtigung der Relation

$$\eta \omega' - \omega \eta' = \frac{1}{2} \pi i$$

erhält man sodann

$$(D.) \quad d_1 = \frac{2i}{\pi} (\eta' d\omega - \eta d\omega'), \quad d_2 = -\frac{2i}{\pi} (\omega' d\omega - \omega d\omega'),$$

$$(E.) \quad \begin{cases} d\eta = \frac{2i}{\pi} \left[\left(-\eta \eta' + \frac{1}{12} g_2 \omega \omega' \right) d\omega + \left(\eta^2 - \frac{1}{12} g_2 \omega^2 \right) d\omega' \right] \\ d\eta' = \frac{2i}{\pi} \left[\left(-\eta'^2 + \frac{1}{12} g_2 \omega'^2 \right) d\omega + \left(\eta \eta' - \frac{1}{12} g_2 \omega \omega' \right) d\omega' \right], \end{cases}$$

$$(F.) \quad \begin{cases} dg_2 = -\frac{2i}{\pi} \left[\left(4g_2 \eta' - 6g_3 \omega' \right) d\omega - \left(4g_2 \eta - 6g_3 \omega \right) d\omega' \right] \\ dg_3 = -\frac{2i}{\pi} \left[\left(6g_3 \eta' - \frac{1}{3} g_2^2 \omega' \right) d\omega - \left(6g_3 \eta - \frac{1}{3} g_2^2 \omega \right) d\omega' \right], \end{cases}$$

$$(G.) \quad \begin{cases} d_1 = \frac{-g_2^2 dg_2 + 18g_3 dg_3}{4(g_2^3 - 27g_3^2)} = -\frac{1}{12} \frac{d(g_2^3 - 27g_3^2)}{g_2^3 - 27g_3^2} \\ d_2 = \frac{18g_3 dg_2 - 12g_2 dg_3}{4(g_2^3 - 27g_3^2)}. \end{cases}$$

Aus der Gleichung

$$4e_1^3 - g_2 e_1 - g_3 = 0$$

ergibt sich ferner

$$\begin{aligned} (12e_1^2 - g_2) de_1 &= e_1 dg_2 + dg_3 = -(4g_2 e_1 + 6g_3) d_1 - \left(6g_3 e_1 + \frac{1}{3} g_2^2 \right) d_2 \\ &= -(24e_1^3 - 2g_2 e_1) d_1 - \left(24e_1^4 - 6g_2 e_1^2 + \frac{1}{3} g_2^2 \right) d_2 \\ &= -2e_1 (12e_1^2 - g_2) d_1 - (12e_1^2 - g_2) \left(2e_1^2 - \frac{1}{3} g_2 \right) d_2, \end{aligned}$$

also

$$de_1 = -2e_1 d_1 + \left(\frac{1}{3}g_2 - 2e_1^2\right)d_2;$$

und ebenso

$$de_2 = -2e_2 d_1 + \left(\frac{1}{3}g_2 - 2e_2^2\right)d_2,$$

$$de_3 = -2e_3 d_1 + \left(\frac{1}{3}g_2 - 2e_3^2\right)d_2.$$

Hieraus folgt weiter, da $e_1 + e_2 + e_3 = 0$,

$$d(e_1 - e_2) = -2(e_1 - e_2)(d_1 - e_3 d_2),$$

$$d(e_1 - e_3) = -2(e_1 - e_3)(d_1 - e_2 d_2),$$

$$d(e_1 - e_2)(e_1 - e_3) = -2(e_1 - e_2)(e_1 - e_3)(2d_1 + e_1 d_2).$$

Es ist aber, wenn man

$$(H.) \quad \varepsilon_1 = (e_1 - e_2)(e_1 - e_3), \quad \varepsilon_2 = (e_2 - e_1)(e_2 - e_3), \quad \varepsilon_3 = (e_3 - e_1)(e_3 - e_2)$$

setzt,

$$(J.) \quad g_2 = 4(3e_1^2 - \varepsilon_1), \quad g_3 = 4e_1^3 - g_2 e_1 = 4e_1(\varepsilon_1 - 2e_1^2), \quad (\lambda = 1, 2, 3)$$

und somit

$$(K.) \quad \begin{cases} de_\lambda = -2e_\lambda d_1 - \left(\frac{4}{3}\varepsilon_\lambda - 2e_\lambda^2\right)d_2 = -2e_\lambda(d_1 - e_\lambda d_2) - \frac{4}{3}\varepsilon_\lambda d_2 \\ d\varepsilon_\lambda = -4\varepsilon_\lambda d_1 - 2e_\lambda \varepsilon_\lambda d_2 = -4\varepsilon_\lambda(d_1 - e_\lambda d_2) - 6e_\lambda \varepsilon_\lambda d_2. \end{cases}$$

Die Gleichungen (A.), (D.), (E.), (F.) lehren hiernach, dass jede partielle Ableitung der Function \mathcal{G} nach ω und ω' dargestellt werden kann in der Form

$$F_0 \mathcal{G} + F_1 \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial u} + F_2 \frac{\partial^2 \mathcal{G}}{\partial u^2} + \dots,$$

wo F_0, F_1, F_2, \dots ganze Functionen der Grössen $\omega, \omega', \eta, \eta', g_2, g_3, u$ sind.

Ebenso ergibt sich aus den Gleichungen (B.), (D.), (E.), (J.), (K.) für jede partielle Ableitung von \mathcal{G}_λ nach ω, ω' ein Ausdruck

$$F_0^{(\lambda)} \mathcal{G}_\lambda + F_1^{(\lambda)} \frac{\partial \mathcal{G}_\lambda}{\partial u} + F_2^{(\lambda)} \frac{\partial^2 \mathcal{G}_\lambda}{\partial u^2} + \dots,$$

in welchem $F_0^{(\lambda)}, F_1^{(\lambda)}, F_2^{(\lambda)}, \dots$ ganze Functionen der Grössen $\omega, \omega', \eta, \eta', \varepsilon_\lambda, e_\lambda, u$ sind.

Es lässt sich aber \mathcal{G} in der Form einer beständig convergirenden Potenzreihe der Grössen u, g_2, g_3 darstellen. Betrachtet man demgemäss \mathcal{G} als Function von u, g_2, g_3 , so zeigen die Gleichungen (A.), (G.), dass jede partielle

Ableitung von \mathcal{G} nach g_2, g_3 die Form

$$G_0 \mathcal{G} + G_1 \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial u} + G_2 \frac{\partial^2 \mathcal{G}}{\partial u^2} + \dots$$

hat, wo sich jede der Grössen G_0, G_1, G_2, \dots als eine ganze Function von g_2, g_3, u , dividirt durch eine Potenz von $(g_2^3 - 27g_3^2)$, darstellen lässt.

Ferner ist, wenn man

$$\varphi_\lambda = - \frac{\partial^2 \log \mathcal{G}_\lambda}{\partial u^2}$$

setzt,

$$\frac{\partial^3 \varphi_\lambda}{\partial u^2} = 6\varphi_\lambda^2 - \frac{1}{2}g_2,$$

und für $u = 0$

$$\varphi_\lambda = e_\lambda, \quad \frac{\partial \varphi_\lambda}{\partial u} = 0;$$

woraus sich ergibt, dass in der Entwicklung von φ_λ nach Potenzen von u nur Glieder mit geraden Potenzen dieser Grösse vorkommen, und die Coefficienten derselben ganze Functionen von g_2, e_λ und somit auch von $e_\lambda, \epsilon_\lambda$ sind. Demgemäss erhält die Entwicklung von \mathcal{G}_λ die Form

$$e^{-\frac{1}{2}e_\lambda u^2} (1 + E_2^{(\lambda)} u^4 + E_3^{(\lambda)} u^6 + \dots),$$

wo $E_2^{(\lambda)}, E_3^{(\lambda)}, \dots$ ganze Functionen von $\epsilon_\lambda, e_\lambda$ sind.

Betrachtet man nun \mathcal{G}_λ als Function von $u, e_\lambda, \epsilon_\lambda$, so ergibt sich aus den Gleichungen (B.), (K.) für jede partielle Ableitung von \mathcal{G}_λ nach $e_\lambda, \epsilon_\lambda$ ein Ausdruck

$$G_0^{(\lambda)} \mathcal{G}_\lambda + G_1^{(\lambda)} \frac{\partial \mathcal{G}_\lambda}{\partial u} + G_2^{(\lambda)} \frac{\partial^2 \mathcal{G}_\lambda}{\partial u^2} + \dots,$$

in welchem jede der Grössen $G^{(\lambda)}$ eine ganze Function von $u, e_\lambda, \epsilon_\lambda$, dividirt durch eine Potenz von $(e_1 - e_2)(e_1 - e_3)(e_2 - e_3)$ ist.

II.

Gebrauch der im Vorstehenden entwickelten Differentialgleichungen zur Entwicklung der Functionen $\mathcal{G}, \mathcal{G}_\lambda$.

Aus der Gleichung (A.) erhält man, indem man $d'\mathcal{G}$ auf die Form

$$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial g_2} dg_2 + \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial g_3} dg_3 = - \left(4g_2 \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial g_2} + 6g_3 \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial g_3} \right) d_1 - \left(6g_3 \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial g_2} + \frac{1}{3} g_2^2 \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial g_3} \right) d_2$$

bringt und beachtet, dass d_1, d_2 , als Functionen von dg_2, dg_3 betrachtet, von einander unabhängig sind — was aus den Gleichungen (4.) sich ergibt, weil

$(g_2^3 - 27g_3^2)$ nicht gleich Null ist —, die beiden nachstehenden partiellen Differentialgleichungen:

$$(A.) \quad \frac{\partial^2 \sigma}{\partial u^2} - 12g_3 \frac{\partial \sigma}{\partial g_2} - \frac{2}{3} g_2^2 \frac{\partial \sigma}{\partial g_3} + \frac{1}{12} g_2 u^2 \sigma = 0,$$

$$(B.) \quad u \frac{\partial \sigma}{\partial u} - 4g_2 \frac{\partial \sigma}{\partial g_2} - 6g_3 \frac{\partial \sigma}{\partial g_3} - \sigma = 0.$$

Setzt man

$$\sigma = \sum_{m,n,r} A_{m,n,r} g_2^m g_3^n u^r, \quad (m, n, r = 0, 1, \dots, \infty)$$

so lehrt die zweite Gleichung, dass in jedem Gliede der Reihe, dessen Coefficient nicht gleich Null ist,

$$r - 4m - 6n - 1 = 0$$

sein muss. Man kann daher setzen

$$(C.) \quad \sigma(u) = \sum_{m,n} a_{m,n} \left(\frac{1}{2} g_2\right)^m (2g_3)^n \cdot \frac{u^{4m+6n+1}}{(4m+6n+1)!}$$

und erhält zur Bestimmung der Coefficienten $a_{m,n}$ aus (A.) die Recursionsformel

$$(D.) \quad a_{m,n} = 3(m+1)a_{m+1,n-1} + \frac{16}{3}(n+1)a_{m-2,n+1} - \frac{1}{3}(2m+3n-1)(4m+6n-1)a_{m-1,n}.$$

Bei der Anwendung dieser Formel ist jeder Coefficient, in welchem einer der Indices einen negativen Werth erhält, gleich Null zu setzen. Der Coefficient $a_{0,0}$ ist gleich 1. Betrachtet man als zu einer Gruppe gehörig alle $a_{m,n}$, für welche die Summe $4m+6n$ denselben Werth hat, so lehrt die vorstehende Formel, dass jede Zahl $a_{m,n}$ einer bestimmten Gruppe aus zwei Zahlen der unmittelbar vorhergehenden und einer Zahl der zweitvorhergehenden Gruppe berechnet werden kann.

Die Function σ_λ hat nach dem Vorhergehenden die Form $e^{-\frac{1}{2}e_\lambda u^2} \cdot S_\lambda$, wo S_λ eine Potenzreihe von $u, e_\lambda, \varepsilon_\lambda$ ist. Dann hat man

$$\begin{aligned} d'\sigma_\lambda &= e^{-\frac{1}{2}e_\lambda u^2} \left(d'S_\lambda - \frac{1}{2} u^2 S_\lambda d e_\lambda \right) \\ &= e^{-\frac{1}{2}e_\lambda u^2} \left\{ d'S_\lambda + u^2 S_\lambda \left(e_\lambda (d_1 - e_\lambda d_2) + \frac{2}{3} \varepsilon_\lambda d_2 \right) \right\}, \\ \frac{\partial \sigma_\lambda}{\partial u} &= e^{-\frac{1}{2}e_\lambda u^2} \left(\frac{\partial S_\lambda}{\partial u} - e_\lambda u S_\lambda \right), \\ \frac{\partial^2 \sigma_\lambda}{\partial u^2} &= e^{-\frac{1}{2}e_\lambda u^2} \left(\frac{\partial^2 S_\lambda}{\partial u^2} - 2e_\lambda u \frac{\partial S_\lambda}{\partial u} - (e_\lambda - e_\lambda^2 u^2) S_\lambda \right), \end{aligned}$$

und es geht die Differentialgleichung (I. (B.)) über in die folgende:

$$(E.) \quad 2d'S_\lambda + 2u \frac{\partial S_\lambda}{\partial u} (d_1 - e_\lambda d_2) + \left(\frac{\partial^2 S_\lambda}{\partial u^2} + \varepsilon_\lambda u^2 S_\lambda \right) d_2 = 0.$$

Diese aber zerfällt, da

$$d'S_\lambda = - \left(2e_\lambda \frac{\partial S_\lambda}{\partial e_\lambda} + 4\varepsilon_\lambda \frac{\partial S_\lambda}{\partial \varepsilon_\lambda} \right) (d_1 - e_\lambda d_2) - \left(\frac{4}{3} \frac{\partial S_\lambda}{\partial e_\lambda} + 6e_\lambda \frac{\partial S_\lambda}{\partial \varepsilon_\lambda} \right) \varepsilon_\lambda d_2$$

ist, in die beiden:

$$(F.) \quad \frac{\partial^2 S_\lambda}{\partial u^2} - 8\varepsilon_\lambda \left(\frac{1}{3} \frac{\partial S_\lambda}{\partial e_\lambda} + \frac{3}{2} e_\lambda \frac{\partial S_\lambda}{\partial \varepsilon_\lambda} \right) + \varepsilon_\lambda u^2 S_\lambda = 0,$$

$$(G.) \quad u \frac{\partial S_\lambda}{\partial u} - 2e_\lambda \frac{\partial S_\lambda}{\partial e_\lambda} - 4\varepsilon_\lambda \frac{\partial S_\lambda}{\partial \varepsilon_\lambda} = 0.$$

Setzt man

$$S_\lambda = \sum_{m,n,r} C_{m,n,r} e_\lambda^m \varepsilon_\lambda^n u^r,$$

so folgt aus (G.), dass

$$r - 2m - 4n = 0$$

sein muss, wenn $C_{m,n,r}$ nicht gleich Null ist. Man kann also setzen:

$$(H.) \quad \mathcal{G}_\lambda(u) = e^{-\frac{1}{2} e_\lambda u^2} \sum_{m,n} c_{m,n} (12e_\lambda)^m (2\varepsilon_\lambda)^n \cdot \frac{u^{2m+4n}}{(2m+4n)!}, \quad \text{wo } 2\varepsilon_\lambda = 6e_\lambda^2 - \frac{1}{2} g_2,$$

und erhält aus (F.) zur Bestimmung der Coefficienten $c_{m,n}$ die Recursionsformel

$$(J.) \quad c_{m,n} = 16(m+1)c_{m+1,n-1} + nc_{m-1,n} - (m+2n-1)(2m+4n-3)c_{m,n-1},$$

wo $c_{m+1,-1}$, $c_{-1,n}$, $c_{m,-1}$ gleich Null zu setzen sind und $c_{0,0} = 1$ ist.

Endlich kann man auch der Function \mathcal{G} die Form

$$\mathcal{G} = e^{-\frac{1}{2} e_\lambda u^2} S^{(\lambda)}$$

geben. Schreibt man die Gleichung (I. (A.)) in der Gestalt

$$2d'\mathcal{G} + 2u \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial u} d_1 + \left(\frac{\partial^2 \mathcal{G}}{\partial u^2} + \left(\frac{1}{12} g_2 u^2 + e_\lambda \right) \mathcal{G} \right) d_2 - 2\mathcal{G}(d_1 - e_\lambda d_2) - 3e_\lambda \mathcal{G} d_2 = 0,$$

so ist ersichtlich, dass man zu der Gleichung

$$(K.) \quad 2d'S^{(\lambda)} + 2 \left(u \frac{\partial S^{(\lambda)}}{\partial u} - S^{(\lambda)} \right) (d_1 - e_\lambda d_2) + \left(\frac{\partial^2 S^{(\lambda)}}{\partial u^2} - 3e_\lambda S^{(\lambda)} + \varepsilon_\lambda u^2 S^{(\lambda)} \right) d_2 = 0$$

geführt wird, welche in die beiden nachstehenden zerfällt:

$$(L.) \quad \frac{\partial^2 S^{(\lambda)}}{\partial u^2} - 8\varepsilon_\lambda \left(\frac{1}{3} \frac{\partial S^{(\lambda)}}{\partial e_\lambda} + \frac{3}{2} e_\lambda \frac{\partial S^{(\lambda)}}{\partial \varepsilon_\lambda} \right) + (-3e_\lambda + \varepsilon_\lambda u^2) S^{(\lambda)} = 0,$$

$$(L^*) \quad u \frac{\partial S^{(\lambda)}}{\partial u} - 2e_\lambda \frac{\partial S^{(\lambda)}}{\partial e_\lambda} - 4\varepsilon_\lambda \frac{\partial S^{(\lambda)}}{\partial \varepsilon_\lambda} - S^{(\lambda)} = 0.$$

Man kann also setzen

$$(M.) \quad \sigma(u) = e^{-\frac{1}{2}e_\lambda u^2} \sum_{m,n} b_{m,n} (3e_\lambda)^m (2\varepsilon_\lambda)^n \frac{u^{2m+4n+1}}{(2m+4n+1)!}, \quad \text{wo } 2\varepsilon_\lambda = 6e_\lambda^2 - \frac{1}{2}g_2,$$

und erhält aus (L.) zur Bestimmung der Coefficienten $b_{m,n}$ die Recursionsformel:

$$(N.) \quad b_{m,n} = 4(m+1)b_{m+1,n-1} + (4n+1)b_{m-1,n} - (m+2n-1)(2m+4n-1)b_{m,n-1}.$$

Hier ist

$$b_{0,0} = 1, \quad \text{und } b_{m+1,-1} = 0, \quad b_{-1,n} = 0, \quad b_{m,-1} = 0.$$

Aus den Gleichungen (J.), (N.) ist unmittelbar ersichtlich, dass die Coefficienten $b_{m,n}$ und $c_{m,n}$ sämmtlich ganze Zahlen sind. Aber auch die $a_{m,n}$ sind alle ganze Zahlen. Denn aus der Gleichung (M.) ergibt sich, dass, wenn man

$$\sigma(u) = \sum_{r=0}^{\infty} C_r \frac{u^{2r+1}}{(2r+1)!}$$

setzt, C_r für jeden Werth von r eine ganze Function von $\frac{1}{2}g_2$ und $\frac{1}{2}e_\lambda$ mit ganzzahligen Coefficienten ist. Schafft man aus C_r alle Potenzen von e_λ , deren Exponent > 2 ist, mittels der Gleichung

$$e_\lambda^3 = \frac{1}{4}g_2 e_\lambda + \frac{1}{4}g_3$$

fort, so müssen in dem so umgeformten Ausdruck von C_r , da derselbe für $\lambda = 1, 2, 3$ denselben Werth hat, die mit e_λ und e_λ^2 multiplicirten Glieder fortfallen; er reducirt sich also auf eine ganze Function von g_2, g_3 , deren Coefficienten Brüche sind, die zu Nennern Potenzen von 2 haben. Die $a_{m,n}$ könnten also, wenn sie Brüche wären, ebenfalls nur Potenzen von 2 zu Nennern haben; dies ist aber nach der Recursionsformel (D.) nicht der Fall.

Die Werthe der Zahlen $a_{m,n}$, für die $4m+6n+1 \leq 35$ ist, finden sich in den oben erwähnten »Formeln und Lehrsätzen zum Gebrauche der elliptischen

Functionen« S. 7; die Werthe derjenigen Zahlen $b_{m,n}$, $c_{m,n}$, für die $2m + 4n \leq 12$ ist, welche also zur Entwicklung der Reihen $S^{(2)}$, S_λ bis zu den Gliedern, welche in Beziehung auf u beziehlich vom 13^{ten} und 12^{ten} Grade sind, ausreichen, enthält die folgende Tabelle.

$2m + 4n$	m	n	$b_{m,n}$	$c_{m,n}$
0	0	0	1	1
2	1	0	1	0
4	2	0	1	0
	0	1	1	-1
6	3	0	1	0
	1	1	3	-1
8	4	0	1	0
	2	1	6	-1
	0	2	-9	-1
10	5	0	1	0
	3	1	10	-1
	1	2	-141	-6
12	6	0	1	0
	4	1	15	-1
	2	2	-1479	-15
	0	3	-69	-51

ZUR THEORIE DER ELLIPTISCHEN FUNCTIONEN. *)

(Aus dem Sitzungsbericht der Königl. Akademie der Wissenschaften vom 15. und
22. Februar und vom 13. December 1883.)

I.

Um die elliptischen Functionen

$$\sin \operatorname{am}(u, k), \quad \cos \operatorname{am}(u, k), \quad \Delta \operatorname{am}(u, k)$$

durch die Jacobi'schen Functionen

$$\mathfrak{S}(x, q) = 1 - 2q \cos 2x + 2q^4 \cos 4x - 2q^9 \cos 6x + \dots,$$

$$\mathfrak{S}_1(x, q) = 2\sqrt[4]{q} \cdot (\sin x - q^2 \sin 3x + q^6 \sin 5x - \dots),$$

$$\mathfrak{S}_2(x, q) = 2\sqrt[4]{q} \cdot (\cos x + q^2 \cos 3x + q^6 \cos 5x + \dots),$$

$$\mathfrak{S}_3(x, q) = 1 + 2q \cos 2x + 2q^4 \cos 4x + 2q^9 \cos 6x + \dots$$

auszudrücken, hat man die Aufgabe zu lösen, für jeden gegebenen Werth von k einen die Gleichung

$$(1.) \quad \sqrt{k} = \frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)} = 2\sqrt[4]{q} \cdot \frac{1 + q^2 + q^6 + q^{12} + \dots}{1 + 2q + 2q^4 + 2q^9 + \dots}$$

befriedigenden Werth von q zu bestimmen. Ist ein solcher Werth gefunden, so hat man, wenn

$$(2.) \quad \frac{2K}{\pi} = \mathfrak{S}_2^2(0, q), \quad x = \frac{u\pi}{2K}$$

*) Durch diese Abhandlung soll eine Lücke ausgefüllt werden, welche sich in der Jacobi'schen »Theorie der elliptischen Functionen aus den Eigenschaften der Thetareihen abgeleitet« (Gesammelte Werke, Band I, S. 497 ff.) findet, und auf die ich in einer Anmerkung auf S. 545 a. a. O. aufmerksam gemacht habe. Es sind deshalb hier durchgehends die Jacobi'schen Bezeichnungen von mir angewandt worden.

gesetzt wird,

$$(3.) \quad \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{k} \cdot \sin \operatorname{am}(u, k) = \frac{\mathfrak{S}_1(x, q)}{\mathfrak{S}(x, q)} \\ \frac{\sqrt{k}}{\sqrt[4]{1-k^2}} \cdot \cos \operatorname{am}(u, k) = \frac{\mathfrak{S}_2(x, q)}{\mathfrak{S}(x, q)} \\ \frac{1}{\sqrt[4]{1-k^2}} \cdot \Delta \operatorname{am}(u, k) = \frac{\mathfrak{S}_3(x, q)}{\mathfrak{S}(x, q)}. \end{array} \right.$$

Dabei kann der Werth einer der beiden Wurzelgrössen \sqrt{k} , $\sqrt[4]{q}$ beliebig fixirt werden, worauf dann der Werth der anderen durch die Gleichung (1.) bestimmt wird. Der Werth von $\sqrt[4]{1-k^2}$ ist so zu wählen, dass

$$(4.) \quad \sqrt[4]{1-k^2} = \frac{\mathfrak{S}(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)} = \frac{1-2q+2q^4-2q^9+\dots}{1+2q+2q^4+2q^9+\dots}$$

wird.

In der nachgelassenen Abhandlung Jacobi's »Theorie der elliptischen Functionen aus den Eigenschaften der Thetareihen abgeleitet« ist die genannte Aufgabe für den Fall, dass k eine reelle, zwischen 0 und 1 enthaltene Grösse ist, behandelt (§ 6) und nachgewiesen worden, dass man von der Gleichung (1.) ausgehend zu demselben Ausdrucke von q gelangt, den Jacobi in den »Fund. nov. funct. ellipt.« auf dem in diesem Werke eingeschlagenen Wege erhalten hatte. Ich werde jetzt zeigen, wie man mit den von Jacobi in der genannten Abhandlung angewandten Hilfsmitteln für jeden (complexen) Werth von k alle die Gleichung (1.) befriedigenden Werthe von q bestimmen kann, und zwar mittels einer Reihe, welche nicht nur ihrer starken Convergence wegen für einen numerisch gegebenen Werth von k eine bequeme Berechnung der zugehörigen Werthe von q gestattet, sondern auch, wenn man k als eine veränderliche Grösse und q als Function derselben betrachtet, dazu dienen kann, die charakteristischen Eigenschaften dieser Function aufzufinden. Es kommen dabei hauptsächlich in Anwendung die beiden, auch von Jacobi benutzten Gleichungen

$$(5.) \quad \left\{ \begin{array}{l} \mathfrak{S}_3(0, q) = \mathfrak{S}_3(0, q^4) + \mathfrak{S}_2(0, q^4) \\ \mathfrak{S}(0, q) = \mathfrak{S}_3(0, q^4) - \mathfrak{S}_2(0, q^4), \end{array} \right.$$

welche sich unmittelbar aus den Ausdrücken von $\mathfrak{S}_3(0, q)$, $\mathfrak{S}(0, q)$ ergeben, und die Relation

$$(6.) \quad \mathfrak{S}^4(0, q) + \mathfrak{S}_2^4(0, q) = \mathfrak{S}_3^4(0, q).$$

Ich betrachte zunächst ausschliesslich reelle, der Bedingung

$$0 \leq q < 1$$

unterworfenen Werthe der Grösse q , und setze fest, dass im Folgenden, wenn a eine positive Grösse ist, unter $\log a$ der reelle Werth des natürlichen Logarithmus von a , und unter a^m , für einen beliebigen Werth von m , der durch die Formel

$$e^{m \log a}$$

gegebene Werth der Potenz a^m verstanden werden soll. Dann haben $\mathfrak{S}(0, q)$, $\mathfrak{S}_2(0, q)$, $\mathfrak{S}_3(0, q)$ stets reelle Werthe und sind stetige Functionen von q . Ferner ist aus den Ausdrücken der Grössen $\mathfrak{S}_2(0, q)$, $\mathfrak{S}_3(0, q)$ unmittelbar ersichtlich, dass die zweite beständig positiv ist, und für die erste, die für $q = 0$ verschwindet, dasselbe gilt, wenn $q > 0$. Was aber $\mathfrak{S}(0, q)$ angeht, so würde, wenn diese Grösse für einen bestimmten Werth von q gleich Null wäre, aus (5.) folgen:

$$\mathfrak{S}_3(0, q^4) = \mathfrak{S}_2(0, q^4),$$

und es müsste demnach (gemäss Gleichung (6.)) auch $\mathfrak{S}(0, q^4) = 0$ sein. Daraus würde dann weiter folgen, dass auch $\mathfrak{S}(0, q^{16})$, $\mathfrak{S}(0, q^{64})$ u. s. w. gleich Null wären, was unmöglich ist, weil $\mathfrak{S}(0, q^m)$ für einen unendlich grossen positiven Werth von m unendlich wenig von 1 verschieden ist. Es kann also $\mathfrak{S}(0, q)$ für keinen der betrachteten Werthe von q verschwinden und ist demnach beständig positiv.

Hiernach ist

$$\frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)}$$

eine stetige Function von q , die für $q = 0$ verschwindet und für jeden andern Werth von q einen positiven Werth hat. Dieselbe ist, indem in Folge der Gleichung (6.)

$$\mathfrak{S}_3^4(0, q) > \mathfrak{S}_2^4(0, q),$$

stets kleiner als 1; es lässt sich aber zeigen, dass sie sich, wenn q von der Grenze Null an stetig wachsend der Grenze 1 sich nähert, ebenfalls beständig wachsend, derselben Grenze nähert.

Da nämlich

$$\frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)} = \frac{2q^{\frac{1}{2}}(1 + q^2 + q^6 + \dots)}{1 + 2q + 2q^4 + 2q^9 + \dots},$$

so lässt sich jedenfalls eine positive Grösse q_0 , die < 1 ist, so annehmen, dass

$$\frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)}$$

beständig zunimmt, wenn q stetig wachsend das Intervall $(0 \dots q_0)$ durchläuft. Aus den Gleichungen (5.) folgt aber, wenn $q^{\frac{1}{2}}$ für q gesetzt wird,

$$(7.) \quad \frac{\mathfrak{S}(0, q^{\frac{1}{2}})}{\mathfrak{S}_3(0, q^{\frac{1}{2}})} = \frac{1 - \frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)}}{1 + \frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)}}.$$

Hiernach nimmt $\frac{\mathfrak{S}(0, q^{\frac{1}{2}})}{\mathfrak{S}_3(0, q^{\frac{1}{2}})}$ beständig ab, wenn q stetig wachsend das genannte Intervall durchläuft, oder es nimmt, was dasselbe besagt, $\frac{\mathfrak{S}(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)}$ beständig ab, wenn q stetig wachsend von 0 aus in $q_0^{\frac{1}{2}}$ übergeht. Es ist aber

$$\frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)} = \left(1 - \frac{\mathfrak{S}^4(0, q)}{\mathfrak{S}_3^4(0, q)}\right)^{\frac{1}{4}};$$

es wächst also $\frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)}$ gleichzeitig mit q , so lange $q < q_0^{\frac{1}{2}}$ ist. Daraus folgt sofort, dass dasselbe gilt, so lange q kleiner als

$$q_0^{\frac{1}{16}}, q_0^{\frac{1}{64}}, \dots$$

ist. Die Glieder dieser Reihe convergiren aber gegen die Grenze 1; es wächst also $\frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)}$ gleichzeitig mit q , wie nahe auch q der Einheit kommen möge. Es ist ferner, wenn

$$\delta = 1 - \frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)}$$

gesetzt wird, nach (7.)

$$\frac{\mathfrak{S}(0, q^{\frac{1}{2}})}{\mathfrak{S}_3(0, q^{\frac{1}{2}})} < \delta,$$

$$1 - \frac{\mathfrak{S}_2^4(0, q^{\frac{1}{2}})}{\mathfrak{S}_3^4(0, q^{\frac{1}{2}})} = \frac{\mathfrak{S}^4(0, q^{\frac{1}{2}})}{\mathfrak{S}_3^4(0, q^{\frac{1}{2}})} < \delta^4,$$

und somit auch

$$1 - \frac{\mathfrak{S}_2(0, q^{\frac{1}{4}})}{\mathfrak{S}_3(0, q^{\frac{1}{4}})} < \delta^4.$$

Daraus folgt für jeden ganzzahligen positiven Werth von m

$$1 - \frac{\mathfrak{S}_2\left(0, q^{\frac{1}{4^m}}\right)}{\mathfrak{S}_3\left(0, q^{\frac{1}{4^m}}\right)} < (\delta)^{4^m};$$

es nähert sich daher, wenn m unendlich gross wird, der Werth von $q^{\frac{1}{4^m}}$ also der Grenze 1 unendlich nahe kommt,

$$\frac{\mathfrak{S}_2\left(0, q^{\frac{1}{4^m}}\right)}{\mathfrak{S}_3\left(0, q^{\frac{1}{4^m}}\right)}$$

ebenfalls dieser Grenze. Damit ist das oben hinsichtlich der Function $\frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)}$ Behauptete bewiesen.

Dies vorausgeschickt, denke man sich nun den Quotienten

$$\frac{\mathfrak{S}_2^4(0, q)}{\mathfrak{S}_3^4(0, q)}$$

in eine Potenzreihe $\mathfrak{P}(q)$ entwickelt. Das Anfangsglied derselben ist $16q$, und ihre Coefficienten sind sämtlich ganze Zahlen; man kann daher eine unendliche Reihe rationaler Zahlen

$$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots$$

so bestimmen, dass für hinlänglich kleine Werthe von q die Gleichung

$$(8.) \quad q = \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n \mathfrak{P}^{n+1}(q)$$

besteht, aus welcher sich, da $\alpha_0 = \frac{1}{16}$ ist,

$$(9.) \quad \log(16q) = \log \mathfrak{P}(q) + \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \mathfrak{P}^n(q)$$

ergiebt, wo β_1, β_2, \dots ebenfalls rationale Zahlen sind.

Nimmt man nun eine positive Grösse q_0 , die < 1 ist, so an, dass dieselbe im Convergenzbezirke der Reihe $\mathfrak{F}(q)$ liegt, und zugleich, wenn man

$$t_0 = \left(\frac{\mathfrak{S}_2(0, q_0)}{\mathfrak{S}_3(0, q_0)} \right)^4$$

setzt, die Summe

$$\sum_{n=1}^{\infty} |\beta_n| t_0^n$$

(wo $|\beta_n|$ den absoluten Betrag von β_n bezeichnet) einen endlichen Werth hat, so gilt die Gleichung

$$(10.) \quad \log q + \log 16 = 4 \log \frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)} + \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \left(\frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)} \right)^{4n}$$

sicher für die der Bedingung

$$0 < q \leq q_0$$

entsprechenden Werthe von q , weil für jeden solchen Werth nach dem Vorhergehenden

$$0 < \left(\frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)} \right)^4 \leq t_0$$

ist.

Man bezeichne

$$\left(\frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)} \right)^4 \text{ mit } t,$$

und setze in (10.) q^4 für q , so erhält man, da nach den Gleichungen (5.)

$$(11.) \quad \frac{\mathfrak{S}_2(0, q^4)}{\mathfrak{S}_3(0, q^4)} = \frac{1 - \frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)}}{1 + \frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)}} = \frac{1 - (1-t)^{\frac{1}{4}}}{1 + (1-t)^{\frac{1}{4}}}$$

ist, einen zweiten Ausdruck für $\log q$, nämlich

$$(12.) \quad 4 \log q + \log 16 = 4 \log \left(\frac{1 - (1-t)^{\frac{1}{4}}}{1 + (1-t)^{\frac{1}{4}}} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \left(\frac{1 - (1-t)^{\frac{1}{4}}}{1 + (1-t)^{\frac{1}{4}}} \right)^{4n}.$$

Aus (10.) und (12.) ergibt sich dann die Gleichung

$$(13.) \quad \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n t^n = \log \left(\frac{8}{t} \frac{1 - (1-t)^{\frac{1}{4}}}{1 + (1-t)^{\frac{1}{4}}} \right) + \frac{1}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \left(\frac{1 - (1-t)^{\frac{1}{4}}}{1 + (1-t)^{\frac{1}{4}}} \right)^{4n}.$$

Bei der Herleitung dieser Gleichung ist t als Function von q angenommen worden. Da aber, wenn q stetig wachsend das Intervall $(0 \dots q_0)$ durchläuft, t ebenfalls beständig wachsend vom Werthe 0 zum Werthe t_0 übergeht, so erhellt, dass die Gleichung (13.) besteht, wenn man t als eine unabhängige Veränderliche betrachtet und derselben irgend einen dem Intervall $(0 \dots t_0)$ angehörigen Werth giebt.

Es ist aber

$$\begin{aligned} d \log \left(\frac{1 - (1-t)^{\frac{1}{2}}}{1 + (1-t)^{\frac{1}{2}}} \right) &= \frac{\frac{1}{4}(1-t)^{-\frac{3}{2}} dt}{1 - (1-t)^{\frac{1}{2}}} + \frac{\frac{1}{4}(1-t)^{-\frac{3}{2}} dt}{1 + (1-t)^{\frac{1}{2}}} \\ &= \frac{\frac{1}{2}(1-t)^{-\frac{3}{2}} dt}{1 - (1-t)^{\frac{1}{2}}} = \left(\frac{1}{2}(1-t)^{-\frac{3}{2}} + \frac{1}{2}(1-t)^{-\frac{1}{2}} \right) \frac{dt}{t}; \end{aligned}$$

entwickelt man also $\frac{1}{2}(1-t)^{-\frac{3}{2}} + \frac{1}{2}(1-t)^{-\frac{1}{2}}$ nach Potenzen von t und setzt

$$(14.) \quad \frac{1}{2}(1-t)^{-\frac{3}{2}} + \frac{1}{2}(1-t)^{-\frac{1}{2}} = 1 + \epsilon_1 t + 2\epsilon_2 t^2 + 3\epsilon_3 t^3 + \dots,$$

so ergibt sich

$$(15.) \quad \log \left(\frac{1 - (1-t)^{\frac{1}{2}}}{1 + (1-t)^{\frac{1}{2}}} \right) = \log \frac{t}{8} + \sum_{v=1}^{\infty} \epsilon_v t^v,$$

und es sind $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots$ sämmtlich rationale und positive Zahlen. Aus (15.) folgt sodann

$$(16.) \quad \left(\frac{1 - (1-t)^{\frac{1}{2}}}{1 + (1-t)^{\frac{1}{2}}} \right)^m = t^m \sum_{v=0}^{\infty} \epsilon_{m,v} t^v,$$

wo für einen beliebigen Exponenten m die Coefficienten $\epsilon_{m,v}$ mittels der aus (16.) und (14.) sich ergebenden Gleichung

$$\sum_{v=0}^{\infty} (m+v) \epsilon_{m,v} t^{m+v-1} = m \sum_{v=0}^{\infty} \epsilon_{m,v} t^{m+v} \cdot \left(\frac{1}{t} + \sum_{v=1}^{\infty} v \epsilon_v t^{v-1} \right) \quad (16.)$$

bestimmt werden können. Man erhält aus dieser Gleichung die Recursionsformel

$$(17.) \quad v \epsilon_{m,v} = m \sum_{\mu=1}^v \mu \epsilon_{\mu} \epsilon_{m,v-\mu}, \quad (v > 0)$$

aus welcher, da $\epsilon_{m,0} = \left(\frac{1}{8}\right)^m$ ist, sich die wichtige Folgerung ergibt, dass für einen positiven Werth von m die Grössen $\epsilon_{m,v}$ sämmtlich positive Zahlen sind.

Die Reihen

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \varepsilon_{\nu} t^{\nu}, \quad \sum_{\nu=0}^{\infty} \varepsilon_{m,\nu} t^{\nu}$$

convergiren, wie aus der Herleitung derselben erhellt, für jeden (reellen oder complexen) Werth von t , dessen absoluter Betrag kleiner als 1 ist. Bei der angegebenen Beschaffenheit der Grössen ε_{ν} , $\varepsilon_{m,\nu}$ ist also für jeden zwischen 0 und 1 enthaltenen reellen Werth von t und jeden positiven Werth von m

$$\sum_{\nu=1}^n \varepsilon_{\nu} t^{\nu} < \log \left(\frac{1 - (1-t)^{\frac{1}{2}}}{1 + (1-t)^{\frac{1}{2}}} \right) + \log \frac{8}{t},$$

$$\sum_{\nu=0}^n \varepsilon_{m,\nu} t^{m+\nu} < \left(\frac{1 - (1-t)^{\frac{1}{2}}}{1 + (1-t)^{\frac{1}{2}}} \right)^m.$$

Daraus ergibt sich, wenn man t gegen die Grenze 1 convergiren lässt,

$$\sum_{\nu=1}^n \varepsilon_{\nu} \leq \log 8, \quad \sum_{\nu=0}^n \varepsilon_{m,\nu} \leq 1,$$

oder vielmehr, da dies auch gilt, wenn man $n+1$ für n setzt,

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \varepsilon_{\nu} < \log 8, \quad \sum_{\nu=0}^{\infty} \varepsilon_{m,\nu} < 1.$$

Demnach convergiren die Reihen

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \varepsilon_{\nu} t^{\nu}, \quad \sum_{\nu=0}^{\infty} \varepsilon_{m,\nu} t^{\nu}$$

auch für jeden Werth von t , dessen absoluter Betrag gleich 1 ist, und es ergibt sich aus den Gleichungen (15.), (16.), wenn man t der Grenze 1 sich nähern lässt,

$$(18.) \quad \sum_{\nu=1}^{\infty} \varepsilon_{\nu} = \log 8, \quad \sum_{\nu=0}^{\infty} \varepsilon_{m,\nu} = 1.$$

Es werde jetzt

$$\sum_{\nu=0}^{\infty} \varepsilon_{m,\nu} t^{m+\nu} \quad \text{mit } \mathfrak{P}(t, m)$$

bezeichnet, so gilt nach dem Vorhergehenden die Gleichung

$$(19.) \quad \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n t^n = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon_n t^n + \frac{1}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \mathfrak{P}(t, 4n)$$

für jeden in dem Intervall $(0 \dots t_0)$ enthaltenen reellen Werth von t . Es

möge jetzt aber t_0 irgend eine positive Grösse, die < 1 ist und zugleich im Innern des Convergenzbezirks der Reihe $\sum_{n=1}^{\infty} \beta_n t^n$ liegt, bedeuten. Dann ist, wenn man

$$t_1 = t_0^{\frac{1}{4}}$$

setzt, in Folge des Umstandes, dass die Coefficienten der Reihe $\mathfrak{P}(t, 4n)$ sämmtlich positiv sind und die Summe derselben den Werth 1 hat,

$$\mathfrak{P}(t_1, 4n) \text{ positiv, aber kleiner als } t_0^n,$$

und daher

$$0 < \sum_{n=1}^{\infty} |\beta_n| \mathfrak{P}(t_1, 4n) < \sum_{n=1}^{\infty} |\beta_n| t_0^n.$$

Für jeden der Bedingung

$$|t| \leq t_1$$

entsprechenden Werth von t ist nun

$$|\mathfrak{P}(t, 4n)| \leq \mathfrak{P}(t_1, 4n),$$

und hat also die Summe

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{v=0}^{\infty} |\beta_n| \varepsilon_{4n,v} |t|^{4n+v}$$

einen endlichen Werth. Es ist deshalb die Reihe

$$\sum_{n,v} \beta_n \varepsilon_{4n,v} t^{4n+v} \quad (n = 1, \dots, \infty; v = 0, \dots, \infty)$$

unbedingt convergent, und es ergibt sich, wenn man alle Glieder derselben, welche dieselbe Potenz von t enthalten, in eines zusammenzieht,

$$(20.) \quad \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \mathfrak{P}(t, 4n) = \sum_{r,q} (r, q) t^{4r+q}, \quad (q = 0, 1, 2, 3; r = 1, \dots, \infty)$$

wo

$$(21.) \quad (r, q) = \sum_{n=1}^r \varepsilon_{4n, 4r-4n+q} \beta_n.$$

Aus der Gleichung (19.) erhält man hiernach

$$(22.) \quad \left\{ \begin{array}{l} \beta_1 = \varepsilon_1, \quad \beta_2 = \varepsilon_2, \quad \beta_3 = \varepsilon_3, \\ \beta_{4r+q} = \varepsilon_{4r+q} + \frac{1}{4} \sum_{n=1}^r \varepsilon_{4n, 4r-4n+q} \beta_n \end{array} \right. \quad \left(\begin{array}{l} r = 1, \dots, \infty \\ q = 0, 1, 2, 3 \end{array} \right)$$

und kann also die Grössen β_n der Reihe nach berechnen, nachdem man zuvor die durch die Gleichungen (14.), (17.) definirten Zahlen $\varepsilon_n, \varepsilon_{4n,v}$ bestimmt hat.

Aus den vorstehenden Formeln (22.) ist ersichtlich, dass die Grössen β_n ebenso wie die $\epsilon_n, \epsilon_{2n}, \epsilon_{4n}, \dots$ sämtlich positive rationale Zahlen sind. Es ergibt sich aber auch aus dem Vorstehenden, dass die Reihe

$$\sum_{n=1}^{\infty} \beta_n t^n$$

für jeden (reellen oder complexen) Werth von t , dessen absoluter Betrag nicht grösser als 1 ist, unbedingt convergirt.

Um dies nachzuweisen, bemerke ich zunächst, dass man die im Vorstehenden gemachte Voraussetzung, es liege die mit t_0 bezeichnete Grösse im Innern des Convergenzbezirkes der Reihe $\sum \beta_n t^n$, jetzt fallen lassen kann und nur anzunehmen braucht, es sei die Reihe für $t = t_0$ convergent. Denn nach dem eben Bewiesenen ist $|\beta_n| = \beta_n$, und es bleibt somit bestehen, dass die Reihe auf der rechten Seite der Gleichung (20.) für $t = t_0^{\frac{1}{2}}$ convergirt. Für denselben Werth von t convergirt aber auch die Reihe $\sum \epsilon_n t^n$; die Gleichung (19.) lehrt also, dass, wenn die Reihe $\sum \beta_n t^n$ für $t = t_0$ convergirt, dasselbe nothwendig auch für $t = t_0^{\frac{1}{2}}$ und somit auch für

$$t = t_0^{\frac{1}{4}}, t_0^{\frac{1}{8}}, \dots$$

stattfindet. Demgemäss convergirt die Reihe für positive Werthe von t , die der Einheit so nahe kommen, wie man will, und es ist also der Radius ihres Convergenzbezirks nicht kleiner als 1.

Hiernach gilt die Gleichung (10.)

$$\log q + \log 16 = 4 \log \frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)} + \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \left(\frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)} \right)^{4n} \quad (20)$$

für jeden der Bedingung

$$0 \leq q < 1 \quad (21)$$

entsprechenden Werth von q . Nähert sich aber q der Grenze 1, so convergirt der Ausdruck auf der rechten Seite dieser Gleichung gegen die Grenze

$$\sum_{n=1}^{\infty} \beta_n, \quad (22)$$

und es ist daher

$$\sum_{n=1}^{\infty} \beta_n = \log 16.$$

Demzufolge convergirt die Reihe

$$\sum_{n=1}^{\infty} \beta_n t^n$$

auch dann, wenn der absolute Betrag von t gleich 1 ist, und stellt für den durch die Bedingung

$$|t| \leq 1$$

definirten Bereich der Grösse t eine continuirliche analytische Function derselben dar.

Setzt man nun

$$(23.) \quad \psi(t) = \frac{t}{16} e^{n \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n t^n},$$

so erhält man

$$(24.) \quad \psi(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n t^{n+1},$$

wo die Coefficienten α_n identisch sind mit den in der obigen Gleichung (8.)

$$q = \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n \mathfrak{P}^{n+1}(q)$$

vorkommenden, welche also aus den β_n berechnet werden können und ebenso wie diese sämtlich positive rationale Zahlen sind. Lässt man t der Grenze 1 sich nähern, so ergibt sich

$$(25.) \quad \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n = e^{-\log 16 + \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n} = 1.$$

Die Function $\psi(t)$ ist demnach durch die Gleichung (24.) für jeden der Bedingung

$$|t| \leq 1$$

entsprechenden Werth der Veränderlichen t definirt. Für $t = 1$ ist $\psi(t) = 1$, dagegen für jeden anderen Werth von t

$$|\psi(t)| < 1.$$

Nun besteht nach dem Obigen die Gleichung

$$(26.) \quad q = \psi(t),$$

wenn man

$$t = \left(\frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)} \right)^4$$

setzt, sicher für die einem gewissen Intervall $(0 \dots q_0)$ angehörigen reellen Werthe von q . Für alle diesen Werthen von q entsprechenden Werthe von t gilt also die Gleichung

$$(27.) \quad (1 + 2\psi(t) + 2\psi^4(t) + 2\psi^9(t) + \dots)^4 \cdot t = 16\psi(t)(1 + \psi^2(t) + \psi^6(t) + \dots).$$

Es sind aber, wenn man t als eine unabhängige Veränderliche betrachtet und auf den durch die Bedingung

$$|t| \leq 1$$

definirten Bereich beschränkt, den Werth $t = 1$ jedoch ausschliesst, beide Seiten der vorstehenden Gleichung eindeutige und continuirliche analytische Functionen von t , weil für jeden der betrachteten Werthe dieser Grösse

$$|\psi(t)| < 1$$

ist. Nach einem bekannten Satze besteht also die Gleichung für jeden dem angegebenen Bereiche angehörigen Werth von t . Es lässt sich ferner zeigen, dass $\mathfrak{S}_3(0, q)$ auch für einen complexen Werth von q nicht verschwinden kann, und zwar in derselben Weise, wie oben unter der Voraussetzung, dass q eine positive Grösse sei, für die Function $\mathfrak{S}(0, q)$ bewiesen worden ist, dass sie nicht gleich Null werden kann.

Hiermit ist nun bewiesen:

Ist t eine (reelle oder complexe) Grösse, deren absoluter Betrag die Einheit nicht übersteigt, und die auch nicht gleich 1 ist, so wird die Gleichung

$$\left(\frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)} \right)^4 = t$$

befriedigt, wenn man

$$q = \psi(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n t^{n+1}$$

setzt.

Wenn also der Modul (k) der elliptischen Functionen seinem absoluten Betrage nach die Einheit nicht übersteigt und sein Quadrat nicht gleich 1

ist, so gelten die unter (3.) aufgestellten Ausdrücke von

$$\sin \operatorname{am}(u, k), \quad \cos \operatorname{am}(u, k), \quad \Delta \operatorname{am}(u, k),$$

wenn man

$$q = \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n k^{2n+2}$$

nimmt. Da ferner die elliptischen Functionen eines beliebigen Moduls auf solche, deren Modul den eben angegebenen Bedingungen entspricht, zurückgeführt werden können, so genügt das Vorstehende zu dem Nachweise, dass jede der genannten Functionen als Quotient zweier Thetareihen darstellbar ist.

Weiter unten werde ich aber zeigen, wie man die Reihe

$$\sum \alpha_n t^n$$

in eine für jeden Werth von t convergirende umgestalten kann, und zugleich nachweisen, wie sich mit den hier angewandten Hilfsmitteln auch die Aufgabe lösen lässt, aus einem die Gleichung

$$\left(\frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)} \right)^4 = t$$

befriedigenden Werthe von q alle übrigen abzuleiten.

II.

Nach dem, was im Vorhergehenden über den Convergenzbezirk der Reihe

$$\sum_{n=1}^{\infty} \beta_n t^n$$

und die Beschaffenheit der Zahlen β_n festgestellt worden ist, besteht die Gleichung (I., (13.)), welche sich in der Form

$$\log t - \log 16 + \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n t^n = \frac{1}{4} \left\{ \log \left(\frac{1 - (1-t)^{\frac{1}{4}}}{1 + (1-t)^{\frac{1}{4}}} \right)^4 - \log 16 + \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \left(\frac{1 - (1-t)^{\frac{1}{4}}}{1 + (1-t)^{\frac{1}{4}}} \right)^{4n} \right\}$$

schreiben lässt, sicher für jeden reellen, in dem Intervall $(0 \dots 1)$ enthaltenen Werth von t , indem die Gleichung (I., (10.)), aus welcher sie abgeleitet wurde, nach dem Vorangehenden für jeden der Bedingung $0 \leq q < 1$ entsprechenden reellen Werth von q gilt, und für $t = 1$ in Folge der

Gleichungen

$$|\beta_n| = \beta_n, \quad \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n = \log 16$$

beide Seiten gleich Null werden. Setzt man also

$$e^{-\frac{1}{4} \log 16 + \frac{1}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n t^n} = \sum_{n=0}^{\infty} \gamma_n t^n,$$

wo dann die Coefficienten γ_n gleich den α_n sämmtlich positive rationale Zahlen sind und $\sum_{n=0}^{\infty} \gamma_n = 1$ ist, so hat man

$$(1.) \quad \psi(t) = t \left(\sum_{n=0}^{\infty} \gamma_n t^n \right)^4$$

und zugleich

$$(2.) \quad \psi(t) = \frac{1 - (1-t)^{\frac{1}{4}}}{1 + (1-t)^{\frac{1}{4}}} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \gamma_n \left(\frac{1 - (1-t)^{\frac{1}{4}}}{1 + (1-t)^{\frac{1}{4}}} \right)^{4n}.$$

Die Reihe auf der rechten Seite dieser Gleichung ist aber für jeden (reellen oder complexen) Werth der Grösse t convergent und stellt eine analytische Function derselben dar, wenn man von den vier Werthen, die man für jeden bestimmten Werth von t der Potenz $(1-t)^{\frac{1}{4}}$ beilegen kann, einen so, wie folgt, fixirt.

Schliesst man von dem Gebiet einer unbeschränkt veränderlichen Grösse x die negativen reellen Werthe derselben, sowie auch die Stellen $0, \infty$ aus, so giebt es unter den unendlich vielen Werthen, die der natürliche Logarithmus von x für einen bestimmten Werth dieser Grösse annehmen kann, immer einen, dessen zweite Coordinate zwischen

$$-\pi \quad \text{und} \quad +\pi$$

liegt. Dieser Werth des Logarithmus soll im Folgenden überall unter $\log x$ verstanden werden; er ist innerhalb des definirten Bereichs der Veränderlichen x eine eindeutige analytische Function derselben, indem sich, wenn x' irgend eine bestimmte Stelle des Bereichs ist, eine Umgebung derselben angeben lässt, innerhalb welcher die Reihe

$$(3.) \quad \log x' + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n} \left(\frac{x-x'}{x'} \right)^n$$

einen solchen Werth des natürlichen Logarithmus von x darstellt, dessen zweite Coordinate gleich der von $\log x'$ zwischen $-\pi$ und π liegt. Daraus ergibt sich insbesondere, dass

$$(4.) \quad \log x = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n} (x-1)^n$$

ist, wenn man die Grösse x auf den durch die Bedingung

$$|x-1| < 1$$

definierten Bereich beschränkt. Denn innerhalb dieses Bereichs sind die einander gleich gesetzten Ausdrücke beide eindeutige analytische Functionen von x ; die Gleichung gilt daher für den ganzen Bereich, da sie nach dem eben Bemerkten für eine gewisse Umgebung der Stelle 1 besteht.

Wenn ferner x_0 eine bestimmte negative Grösse ist, so ist für die einer gewissen Umgebung der Stelle x_0 angehörigen Werthe von x die zweite Coordinate der Grösse

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n} \left(\frac{x-x_0}{x_0} \right)^n$$

negativ oder positiv, je nachdem die zweite Coordinate von $x-x_0$ positiv oder negativ ist; man hat daher im ersten Falle

$$(5.) \quad \log x = \log(-x_0) + \pi i + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n} \left(\frac{x-x_0}{x_0} \right)^n,$$

im zweiten dagegen

$$(6.) \quad \log x = \log(-x_0) - \pi i + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n} \left(\frac{x-x_0}{x_0} \right)^n.$$

Hiernach kommt, wenn x der Stelle x_0 sich nähert, je nachdem dies von der positiven oder der negativen Seite der Strecke $(-\infty \dots 0)$ her geschieht, $\log x$ der Grenze $\log(-x_0) + \pi i$ oder der Grenze $\log(-x_0) - \pi i$ unendlich nahe. Bezeichnet man die durch die Formeln

$$\log(-x_0) + \pi i, \quad \log(-x_0) - \pi i$$

gegebenen Werthe von $\log x_0$ beziehlich mit

$$\log \overset{\dagger}{x}_0 \quad \text{und} \quad \log \bar{x}_0,$$

wo dann

$$(7.) \quad \log \overset{\dagger}{x}_0 = \log \bar{x}_0 + 2\pi i$$

ist, so hat man also nach dem Vorstehenden für die einer gewissen Umgebung der Stelle x_0 angehörigen Werthe von x

$$(8.) \quad \log x = \log \overset{\pm}{x}_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n} \left(\frac{x-x_0}{x_0} \right)^n,$$

wo das obere oder untere Zeichen über x_0 gilt, je nachdem die zweite Coordinate von $x-x_0$ positiv oder negativ ist.

Aus der Definition von $\log \overset{\pm}{x}_0$, $\log \bar{x}_0$ erhellt übrigens, dass beide Grössen innerhalb der Strecke $(-\infty \dots 0)$ stetige Functionen von x_0 sind.

Definirt man ferner, für die betrachteten Werthe von x und für einen beliebigen Exponenten m , die Potenz x^m durch die Gleichung

$$(9.) \quad x^m = e^{m \log x},$$

so ergeben sich aus den Gleichungen (3.), (4.) beziehlich die folgenden:

$$(10.) \quad x^m = x^m \cdot \sum_{n=0}^{\infty} (m)_n \left(\frac{x-x'}{x'} \right)^n, \quad \left((m)_n = \frac{(m, -1)^n}{(1, +1)^n} \right),$$

$$(11.) \quad x^m = \sum_{n=0}^{\infty} (m)_n (x-1)^n;$$

es ist also auch x^m eine eindeutige analytische Function von x .

Aus den Gleichungen (7.), (8.) aber erhält man, wenn man für eine negative Grösse x_0

$$(12.) \quad \begin{cases} (\overset{\pm}{x}_0)^m = e^{m\pi i} (-x_0)^m \\ (\bar{x}_0)^m = e^{-m\pi i} (-x_0)^m \end{cases}$$

setzt,

$$(13.) \quad (\overset{\pm}{x}_0)^m = e^{2m\pi i} (\bar{x}_0)^m,$$

$$(14.) \quad x^m = (\overset{\pm}{x}_0)^m \cdot \sum_{n=0}^{\infty} (m)_n \left(\frac{x-x_0}{x_0} \right)^n,$$

wo das obere oder das untere Zeichen über x_0 gilt, je nachdem die zweite Coordinate von $x-x_0$ positiv oder negativ ist. Der Bereich von x , innerhalb dessen die Gleichungen (10.), (11.), (14.) gelten, ist derselbe wie bei den entsprechenden Gleichungen (3.), (4.), (8.).

Endlich erhellt aus der Definition der Grössen

$$(\overset{\pm}{x}_0)^m, \quad (\bar{x}_0)^m,$$

dass beide innerhalb der Strecke $(-\infty \dots 0)$ stetige Functionen von x_0 sind.

Nach dem Vorstehenden ist, wenn man jetzt unter t eine unbeschränkt veränderliche Grösse versteht,

$$(1-t)^{\frac{1}{2}}$$

eine Function, welche für jeden der Strecke $(1 \dots +\infty)$ nicht angehörigen Werth von t eindeutig defnirt ist, während sie zwei Werthe hat, wenn t in der genannten Strecke angenommen wird. Setzt man, die Werthe $t = 1$ und $t = \infty$ ausschliessend und mit ϱ, σ reelle Grössen bezeichnend,

$$\log(1-t) = \varrho + \sigma i,$$

so hat man

$$(1-t)^{\frac{1}{2}} = e^{\frac{1}{2}\varrho} (\cos \frac{1}{4}\sigma + i \sin \frac{1}{4}\sigma)$$

und daher, da σ in dem Intervall $(-\pi \dots +\pi)$ liegt,

$$|1+(1-t)^{\frac{1}{2}}|^2 - |1-(1-t)^{\frac{1}{2}}|^2 = 4e^{\frac{1}{2}\varrho} \cos \frac{1}{4}\sigma > 0.$$

Daraus folgt, dass der absolute Betrag von

$$\frac{1-(1-t)^{\frac{1}{2}}}{1+(1-t)^{\frac{1}{2}}}$$

stets kleiner als 1, und demgemäss die Reihe auf der Rechten der Gleichung (2.) für jeden Werth von t unbedingt convergent ist. Das Letztere gilt selbst noch, wenn man der Grösse t einen der ausgeschlossenen Werthe giebt, indem $\frac{1-(1-t)^{\frac{1}{2}}}{1+(1-t)^{\frac{1}{2}}}$ für $t = 1$ den Werth 1, und für $t = \infty$ den Werth -1 hat.

Hiernach ist, wenn man nunmehr $\psi(t)$ durch die Gleichung

$$\psi(t) = \frac{1-(1-t)^{\frac{1}{2}}}{1+(1-t)^{\frac{1}{2}}} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \gamma_n \left(\frac{1-(1-t)^{\frac{1}{2}}}{1+(1-t)^{\frac{1}{2}}} \right)^{4n}$$

defnirt, $\psi(t)$ eine Function, welche ebenso wie $\frac{1-(1-t)^{\frac{1}{2}}}{1+(1-t)^{\frac{1}{2}}}$ nur für die zwischen 1 und $+\infty$ liegenden reellen Werthe von t zwei Werthe hat, für jeden andern Werth von t aber eindeutig bestimmt ist. Dabei ist zu beachten, dass die

beiden Werthe von $\psi(t)$, die zu einem zwischen 1 und $+\infty$ liegenden reellen Werthe von t gehören, conjugirte complexe Grössen sind, wie sich aus den Gleichungen (12.) unmittelbar ergibt.

Aus dem eben in Betreff der Function $\frac{1-(1-t)^{\frac{1}{2}}}{1+(1-t)^{\frac{1}{2}}}$ Bewiesenen ergibt sich ferner, dass $\psi(1) = 1$, $\psi(\infty) = -1$, für jeden von 1, ∞ verschiedenen Werth der Grösse t aber

$$|\psi(t)| < \sum_{n=0}^{\infty} \gamma_n,$$

also

$$|\psi(t)| < 1$$

ist.

Schliesst man vom Gebiete der Veränderlichen t die der Strecke $(1 \dots +\infty)$ angehörigen Stellen aus, so ist nach dem Vorstehenden nicht nur $(1-t)^{\frac{1}{2}}$ eine eindeutige analytische Function, sondern dasselbe gilt auch von den Functionen

$$\frac{1-(1-t)^{\frac{1}{2}}}{1+(1-t)^{\frac{1}{2}}}, \quad \psi(t), \quad \mathfrak{S}_2^4(0, \psi(t)), \quad \mathfrak{S}_3^4(0, \psi(t)),$$

und es besteht also die Gleichung (I., (27.))

$$\mathfrak{S}_2^4(0, \psi(t)) = t \mathfrak{S}_3^4(0, \psi(t)),$$

deren Richtigkeit für die zwischen 0 und 1 enthaltenen reellen Werthe von t nachgewiesen worden ist, für jeden der jetzt betrachteten Werthe dieser Grösse.

Ist ferner t_1 ein zwischen 1 und $+\infty$ liegender reeller Werth von t und setzt man, unter x eine positive Veränderliche verstehend,

$$\psi(t_1^+) = \lim_{x=0} \psi(t_1 + xi), \quad \psi(t_1^-) = \lim_{x=0} \psi(t_1 - xi),$$

so sind $\psi(t_1^+)$, $\psi(t_1^-)$ die beiden Werthe von $\psi(t)$ für $t = t_1$. Da nun $\psi(t_1 + xi)$, $\psi(t_1 - xi)$ sich stetig mit x ändern, und die absoluten Beträge von $\psi(t_1^+)$, $\psi(t_1^-)$ beide kleiner als 1 sind, so erhellt, dass die vorstehende Gleichung auch noch für $t = t_1$ gilt, welchen von ihren beiden Werthen man auch der Grösse $\psi(t_1)$ geben mag.

Damit ist nun bewiesen:

Wird die Function $\psi(t)$ so, wie im Vorstehenden angegeben worden, definirt, so erhält man für jeden Werth der Veränderlichen t , mit Ausschluss von $t=1$ und $t=\infty$, einen die Gleichung

$$\left(\frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)}\right)^4 = t$$

befriedigenden Werth der Grösse q , wenn man

$$q = \psi(t) = \frac{1-(1-t)^{\frac{1}{2}}}{1+(1-t)^{\frac{1}{2}}} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \gamma_n \left(\frac{1-(1-t)^{\frac{1}{2}}}{1+(1-t)^{\frac{1}{2}}}\right)^{4n} \quad (1)$$

setzt, wobei man, wenn t einen zwischen 1 und $+\infty$ enthaltenen reellen Werth hat, sowohl den einen als den andern der zugehörigen Werthe von $\psi(t)$ nehmen kann.

Die Coefficienten γ_n können entweder auf die im Vorhergehenden angegebene Weise oder auch durch folgendes Verfahren berechnet werden.

Nach dem eben bewiesenen Satze ist, wenn man

$$t^{\frac{1}{2}} = \xi, \quad \psi(t)^{\frac{1}{2}} = \eta$$

setzt,

$$2\eta \left(1 + \sum_{\nu=1}^{\infty} \eta^{4\nu(2\nu+1)}\right) = \xi \left(1 + \sum_{\nu=1}^{\infty} 2\eta^{4\nu}\right)$$

oder

$$\eta = \frac{\xi}{2} + \sum_{\nu=1}^{\infty} (\xi \eta^{4\nu} - \eta^{(2\nu+1)(2\nu+1)}).$$

Ferner ist nach der oben unter (1.) gegebenen Formel für die dort betrachteten Werthe von t

$$\eta = \sum_{m=0}^{\infty} \gamma_m \xi^{4m+1}.$$

Hieraus ergibt sich $\gamma_0 = \frac{1}{2}$ und, wenn man

$$\gamma_n = \sum_{m=0}^n \gamma_m \xi^{4m+1} \quad (n = 0, 1, \dots, \infty)$$

setzt,

$$\gamma_{n+1} = \sum_{\nu=1}^{\infty} [\xi \gamma_{n-\nu}^{4\nu} - \gamma_{n-\nu}^{(2\nu+1)(2\nu+1)}] \xi^{4n+5},$$

wobei von der Summe nur diejenigen Glieder in Betracht kommen, in denen

$\nu^2 \leq n+1$ ist. Mittels dieser Formel erhält man:

$$\gamma_1 = \frac{2}{2^5}, \quad \gamma_2 = \frac{15}{2^9}, \quad \gamma_3 = \frac{150}{2^{13}} \quad \text{u. s. w.}^*)$$

III.

Es soll jetzt gezeigt werden, wie man sämtliche Werthe von q findet, die für einen und denselben Werth von t die Gleichung

$$(1.) \quad \left(\frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)} \right)^4 = t$$

befriedigen. Dazu ist erforderlich, dass man für jede \mathfrak{S} -Function alle Werthe des Arguments kenne, für welche dieselbe bei einem gegebenen Werth von q verschwindet. Diese Werthe lassen sich sowohl durch Umwandlung der \mathfrak{S} -Reihen in unendliche Producte (wozu die in den »Fund. nov.« hergeleitete identische Gleichung

$$\prod_{n=1}^{\infty} (1 - q^{2n})(1 + q^{2n-1}z)(1 + q^{2n-1}z^{-1}) = \sum_{v=-\infty}^{+\infty} q^{\nu\nu} z^{\nu}$$

dient) als auch, wenn man nur die von Jacobi in der mehrgenannten Abhandlung entwickelten Sätze benutzen will, auf folgende Weise finden.

Aus der Gleichung**)

$$\frac{\mathfrak{S}'(y)}{\mathfrak{S}(y)} + \frac{1}{2} \frac{d}{dx} \log \frac{\mathfrak{S}_1(x-y)}{\mathfrak{S}_1(x+y)} = \frac{\mathfrak{S}_1(y) \mathfrak{S}_2(y) \mathfrak{S}_3(y) \mathfrak{S}^2(x)}{\mathfrak{S}(y) \mathfrak{S}_1(x+y) \mathfrak{S}_1(x-y)},$$

welche sich im ersten Bande der Jacobi'schen Werke auf S. 536 unter ((I.), (4.))

*) Die Formel

$$q = \sum_{n=0}^{\infty} \gamma_n \left(\frac{1 - (1 - k^2)^{\frac{1}{2}}}{1 + (1 - k^2)^{\frac{1}{2}}} \right)^{4n+1}$$

habe ich seit vielen Jahren in meinen Vorlesungen über die elliptischen Functionen gegeben, aber auf eine andere Art wie hier abgeleitet. Wendet man von ihr nur die r ersten Glieder an, so ist der Fehler, den man begeht, dem absoluten Betrage nach kleiner als

$$\left(1 - \sum_{n=0}^{r-1} \gamma_n \right) \cdot \left| \frac{1 - (1 - k^2)^{\frac{1}{2}}}{1 + (1 - k^2)^{\frac{1}{2}}} \right|^{4r+1}.$$

Vgl. die »Formeln und Lehrsätze zum Gebrauche der elliptischen Functionen« von H. A. Schwarz, S. 56.

**) Bei den folgenden Formeln ist vorausgesetzt, dass in allen vorkommenden \mathfrak{S} -Functionen die Grösse q denselben Werth habe.

findet, ergibt sich, wenn man beide Seiten nach Potenzen von y entwickelt, durch Vergleichung der Anfangsglieder

$$(2.) \quad \frac{\mathfrak{S}''(0)}{\mathfrak{S}(0)} - \frac{d^2 \log \mathfrak{S}_1(x)}{dx^2} = \frac{\mathfrak{S}'_1(0) \mathfrak{S}_2(0) \mathfrak{S}_3(0) \mathfrak{S}^2(x)}{\mathfrak{S}(0) \mathfrak{S}_1^2(x)}.$$

Ist nun ω irgend ein Werth, für den $\mathfrak{S}_1(\omega) = 0$ ist, so folgt aus der vorstehenden Gleichung, dass der Quotient $\frac{\mathfrak{S}_1(x)}{\mathfrak{S}(x)}$ für $x = \omega$ jedenfalls verschwindet, während aus den Gleichungen (2.), (4.) auf S. 511 a. a. O. erhellt, dass $\frac{\mathfrak{S}_2(x)}{\mathfrak{S}(x)}$, $\frac{\mathfrak{S}_3(x)}{\mathfrak{S}(x)}$ für $x = \omega$ von Null verschiedene, endliche Werthe haben. Aus der Formel für $\frac{\mathfrak{S}_1(x+y)}{\mathfrak{S}(x+y)}$ (S. 513 a. a. O.) ergibt sich hiernach

$$\frac{\mathfrak{S}_1(x+\omega)}{\mathfrak{S}(x+\omega)} = \pm \frac{\mathfrak{S}_1(x)}{\mathfrak{S}(x)},$$

und man hat also

$$\frac{d^2 \log \mathfrak{S}_1(x+\omega)}{dx^2} = \frac{d^2 \log \mathfrak{S}_1(x)}{dx^2},$$

woraus

$$(3.) \quad \mathfrak{S}_1(x+\omega) = Ce^{-2\nu xi} \mathfrak{S}_1(x)$$

folgt, wo C, ν von x unabhängige Grössen bezeichnen.

Aus den Gleichungen (2.) und (3.) auf S. 502 a. a. O. erhält man

$$(4.) \quad \mathfrak{S}_1(x+\pi) = -\mathfrak{S}_1(x), \quad \mathfrak{S}_1(x-i \log q) = -q^{-1} e^{-2xi} \mathfrak{S}_1(x);$$

setzt man also in (3.) $x+\pi, x-i \log q$, und in (4.) $x+\omega$ für x , so ergeben sich die Gleichungen

$$\begin{aligned} \mathfrak{S}_1(x+\omega+\pi) &= -e^{-2\nu\pi i} \cdot Ce^{-2\nu xi} \mathfrak{S}_1(x), \\ \mathfrak{S}_1(x+\omega+\pi) &= -Ce^{-2\nu xi} \mathfrak{S}_1(x), \\ \mathfrak{S}_1(x+\omega-i \log q) &= -e^{-2\nu \log q} \cdot q^{-1} Ce^{-2(\nu+1)xi} \mathfrak{S}_1(x), \\ \mathfrak{S}_1(x+\omega-i \log q) &= -e^{-2\omega i} \cdot q^{-1} Ce^{-2(\nu+1)xi} \mathfrak{S}_1(x). \end{aligned}$$

Es muss also sein

$$e^{-2\nu\pi i} = 1, \quad e^{-2\omega i} = e^{-2\nu \log q},$$

und somit

$$(5.) \quad \omega = \mu\pi - \nu i \log q,$$

wo μ, ν ganze Zahlen bedeuten. Umgekehrt ist, wie aus den Gleichungen (4.) leicht abgeleitet werden kann, stets

$$\mathfrak{S}_1(\mu\pi - i\nu \log q) = 0,$$

wenn μ, ν beliebige ganze Zahlen sind.

Aus der Gleichung

$$\mathfrak{S}_1(\omega + x) = Ce^{-2\nu xi} \mathfrak{S}_1(x)$$

ist ersichtlich, dass $\mathfrak{S}_1(\omega)$ nicht gleich Null ist, die Gleichung $\mathfrak{S}_1(x) = 0$ also nur einfache Wurzeln hat. Da ferner

$$\mathfrak{S}_1\left(x + \frac{1}{2}\pi\right) = \mathfrak{S}_2(x),$$

$$\mathfrak{S}_1\left(x - \frac{i}{2}\log q\right) = iq^{-\frac{1}{2}}e^{-xi} \mathfrak{S}(x),$$

$$\mathfrak{S}_1\left(x + \frac{1}{2}\pi - \frac{i}{2}\log q\right) = q^{-\frac{1}{2}}e^{-xi} \mathfrak{S}_3(x),$$

so werden sämmtliche Wurzeln der Gleichungen

$$\mathfrak{S}_2(x) = 0, \quad \mathfrak{S}(x) = 0, \quad \mathfrak{S}_3(x) = 0$$

beziehlich durch die Formeln

$$\left(\mu + \frac{1}{2}\right)\pi - i\nu \log q, \quad \mu\pi - i\left(\nu + \frac{1}{2}\right)\log q, \quad \left(\mu + \frac{1}{2}\right)\pi - i\left(\nu + \frac{1}{2}\right)\log q$$

gegeben, und es hat jede dieser Gleichungen ebenfalls nur einfache Wurzeln. Der Werth von $\log q$ kann in den vorstehenden Formeln beliebig fixirt werden.

Setzt man nun

$$(6.) \quad \left\{ \begin{array}{l} x = \frac{u}{\mathfrak{S}_3(0, q)} \\ f(u, q) = \frac{\mathfrak{S}_3(0, q)}{\mathfrak{S}_2(0, q)} \frac{\mathfrak{S}_1(x, q)}{\mathfrak{S}(x, q)} \\ f_1(u, q) = \frac{\mathfrak{S}(0, q)}{\mathfrak{S}_2(0, q)} \frac{\mathfrak{S}_2(x, q)}{\mathfrak{S}(x, q)} \\ f_2(u, q) = \frac{\mathfrak{S}(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)} \frac{\mathfrak{S}_3(x, q)}{\mathfrak{S}(x, q)}, \end{array} \right.$$

so sind $f(u, q), f_1(u, q), f_2(u, q)$ eindeutige Functionen der Grössen u und q , und es bestehen für dieselben, wenn man

$$t = \left(\frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)} \right)^4$$

setzt, nach den Formeln (18.), (23.) auf S. 515, 517 a. a. O. die folgenden Gleichungen:

$$(7.) \quad \begin{cases} \frac{\partial f(u, q)}{\partial u} = f_1(u, q)f_2(u, q), & \frac{\partial f_1(u, q)}{\partial u} = -f(u, q)f_2(u, q), & \frac{\partial f_2(u, q)}{\partial u} = -tf(u, q)f_1(u, q), \\ f(0, q) = 0, & f_1(0, q) = 1, & f_2(0, q) = 1. \end{cases}$$

Beschränkt man die Veränderliche u auf eine gewisse Umgebung der Stelle 0, so können $f(u, q), f_1(u, q), f_2(u, q)$ in der Form gewöhnlicher Potenzreihen dargestellt werden. Die Coefficienten dieser Reihen ergeben sich aus den Gleichungen (7.), und zwar als ganze rationale Functionen der Grösse t , in denen die Coefficienten rationale Zahlen sind. Wenn es daher zwei Grössen q, q_1 giebt, zu denen derselbe Werth von t gehört, so erhält man für $f(u, q_1), f_1(u, q_1), f_2(u, q_1)$ dieselben Reihen wie für $f(u, q), f_1(u, q), f_2(u, q)$, woraus sich in bekannter Weise folgern lässt, dass für jeden endlichen Werth von u die Gleichungen

$$(8.) \quad f(u, q_1) = f(u, q), \quad f_1(u, q_1) = f_1(u, q), \quad f_2(u, q_1) = f_2(u, q)$$

gelten.

Nun wird nach dem Vorhergehenden

$$(9.) \quad \left\{ \begin{array}{l} f(u, q) = 0 \text{ für } u = (\mu\pi - \nu i \log q) \mathfrak{S}_3^2(0, q) \\ f_1(u, q) = 0 \text{ für } u = \left(\left(\mu + \frac{1}{2} \right) \pi - \nu i \log q \right) \mathfrak{S}_3^2(0, q) \\ \frac{1}{f(u, q)} = 0 \text{ für } u = \left(\mu\pi - \left(\nu + \frac{1}{2} \right) i \log q \right) \mathfrak{S}_3^2(0, q) \\ f_2(u, q) = 0 \text{ für } u = \left(\left(\mu + \frac{1}{2} \right) \pi - \left(\nu + \frac{1}{2} \right) i \log q \right) \mathfrak{S}_3^2(0, q), \end{array} \right.$$

wenn unter μ, ν beliebig anzunehmende ganze Zahlen verstanden werden. Zugleich gilt, dass jede der vorstehenden vier Functionen nur für die angegebenen Werthe von u verschwindet.

In Folge der Gleichungen $f_1(u, q) = f_1(u, q_1), f(u, q) = f(u, q_1)$ wird nun

$$f_1(u, q) = 0 \text{ auch für } u = \frac{\pi}{2} \mathfrak{S}_3^2(0, q_1)$$

und

$$\frac{1}{f(u, q)} = 0 \text{ auch für } u = -\frac{i}{2} \mathfrak{S}_s^2(0, q_1) \log q_1;$$

es müssen sich also vier ganze Zahlen $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ so bestimmen lassen, dass

$$(10.) \quad \begin{cases} \pi \mathfrak{S}_s^2(0, q_1) = \mathfrak{S}_s^2(0, q) \cdot ((2\alpha + 1)\pi - 2\beta i \log q) \\ -i \mathfrak{S}_s^2(0, q_1) \log q_1 = \mathfrak{S}_s^2(0, q) \cdot (2\gamma\pi - (2\delta + 1)i \log q) \end{cases}$$

ist. Aber ebenso muss es vier ganze Zahlen $\alpha', \beta', \gamma', \delta'$ geben, für welche die Gleichungen

$$(11.) \quad \begin{cases} \pi \mathfrak{S}_s^2(0, q) = \mathfrak{S}_s^2(0, q_1) \cdot ((2\alpha' + 1)\pi - 2\beta' i \log q_1) \\ -i \mathfrak{S}_s^2(0, q) \log q = \mathfrak{S}_s^2(0, q_1) \cdot (2\gamma'\pi - (2\delta' + 1)i \log q_1) \end{cases}$$

gelten. Aus diesen vier Gleichungen ergibt sich, wenn man

$$\varepsilon = (2\alpha' + 1)(2\delta' + 1) - 4\beta'\gamma'$$

setzt,

$$\mathfrak{S}_s^2(0, q) \cdot \left((2\alpha + 1 - \frac{2\delta' + 1}{\varepsilon})\pi - (2\beta + \frac{2\beta'}{\varepsilon})i \log q \right) = 0,$$

$$\mathfrak{S}_s^2(0, q) \cdot \left((2\gamma + \frac{2\gamma'}{\varepsilon})\pi - (2\delta + 1 - \frac{2\alpha' + 1}{\varepsilon})i \log q \right) = 0;$$

diese Gleichungen können aber, da $\mathfrak{S}_s(0, q)$ und der reelle Theil von $\log q$ stets von Null verschiedene Werthe haben, nur bestehen, wenn

$$2\alpha + 1 = \frac{2\delta' + 1}{\varepsilon}, \quad 2\beta = -\frac{2\beta'}{\varepsilon}, \quad 2\gamma = -\frac{2\gamma'}{\varepsilon}, \quad 2\delta + 1 = \frac{2\alpha' + 1}{\varepsilon}$$

ist; folglich muss

$$(2\alpha + 1)(2\delta + 1) - 4\beta\gamma = \frac{1}{\varepsilon},$$

also

$$\varepsilon = \pm 1, \quad (2\alpha + 1)(2\delta + 1) - 4\beta\gamma = \pm 1$$

sein.

Aus (11.) ergibt sich nun

$$(12.) \quad \frac{1}{\pi i} \log q_1 = \frac{2\gamma + \frac{2\delta + 1}{\pi i} \log q}{2\alpha + 1 + \frac{2\beta}{\pi i} \log q}.$$

Damit q, q_1 dem absoluten Betrage nach kleiner als 1 seien, ist erforderlich, dass die zweite Coordinate von $\frac{1}{\pi i} \log q$ sowohl als von $\frac{1}{\pi i} \log q_1$ positiv

ist, und das Letztere findet in Folge des Ersteren nur statt, wenn

$$(2\alpha + 1)(2\delta + 1) - 4\beta\gamma$$

einen positiven Werth hat. Es muss also

$$(13.) \quad (2\alpha + 1)(2\delta + 1) - 4\beta\gamma = 1$$

sein.

Nimmt man nun $q = \psi(t)$, so ist durch das Vorstehende bewiesen:

Bedeutet $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ ganze Zahlen, unter denen die Relation (13.) besteht, so sind alle für einen gegebenen Werth von t die Gleichung

$$\left(\frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)} \right)^4 = t$$

befriedigenden Werthe von q in der Formel

$$e^{\frac{2\gamma\pi i + (2\delta + 1)\log \psi(t)}{(2\alpha + 1)\pi i + 2\beta \log \psi(t)} \cdot \pi i}$$

enthalten. Dabei sind jedoch die Werthe $t = 0, 1, \infty$ auszuschliessen.

Es bleibt aber noch zu untersuchen, ob man durch diese Formel, wenn man in ihr für $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ beliebige, der angegebenen Bedingung genügende ganze Zahlen setzt, stets einen die in Rede stehende Gleichung befriedigenden Werth von q erhält. Dass dies wirklich der Fall ist, lässt sich leicht durch die Theorie der sogenannten linearen Transformation der \mathfrak{S} -Functionen begründen, kann aber auch bloss mit Heranziehung der Formeln, mittels welcher sich die elliptischen Functionen des Arguments ui und des Moduls k auf die Functionen des Arguments u und des Moduls $k' = \sqrt{1-k^2}$ zurückführen lassen, nachgewiesen werden. Dies will ich im Folgenden ausführen.

IV.

Mit Zuhülfenahme der aus den Gleichungen (III., (6.)) und aus den in der Jacobi'schen Abhandlung auf S. 511 unter (D.) zusammengestellten Formeln sich ergebenden Relationen

$$\begin{aligned} f_1^2(u, q) + f^2(u, q) &= 1, \\ f_2^2(u, q) + tf^2(u, q) &= 1 \end{aligned} \quad \left(t = \left(\frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)} \right)^4 \right)$$

II.

leitet man aus den Gleichungen (III., (7.)) die folgenden ab:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial u} \frac{f(u, q)}{f_1(u, q)} &= \frac{f_2(u, q)}{f_1^2(u, q)}, \\ \frac{\partial}{\partial u} \frac{1}{f_1(u, q)} &= \frac{f(u, q)f_2(u, q)}{f_1^2(u, q)}, \\ \frac{\partial}{\partial u} \frac{f_2(u, q)}{f_1(u, q)} &= (1-t) \frac{f(u, q)}{f_1^2(u, q)}.\end{aligned}$$

Setzt man in diesen Gleichungen ui für u , q' für q und bestimmt q' so, dass

$$1 = \left(\frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)} \right)^4 + \left(\frac{\mathfrak{S}_2(0, q')}{\mathfrak{S}_3(0, q')} \right)^4$$

ist, so ergibt sich

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial u} \frac{f(ui, q')}{if_1(ui, q')} &= \frac{1}{f_1(ui, q')} \cdot \frac{f_2(ui, q')}{f_1(ui, q')}, \\ \frac{\partial}{\partial u} \frac{1}{f_1(ui, q')} &= - \frac{f(ui, q')}{if_1^2(ui, q')} \cdot \frac{f_2(ui, q')}{f_1(ui, q')}, \\ \frac{\partial}{\partial u} \frac{f_2(ui, q')}{f_1(ui, q')} &= - \frac{t}{f_1(ui, q')} \cdot \frac{f(ui, q')}{if_1^2(ui, q')},\end{aligned}$$

wo die Grösse t dieselbe Bedeutung hat, wie in den Gleichungen (III., (7.)), so dass also diese bestehen bleiben, wenn man in ihnen an die Stelle von

$$f(u, q), \quad f_1(u, q), \quad f_2(u, q)$$

beziehlich

$$\frac{f(ui, q')}{if_1(ui, q')}, \quad \frac{1}{f_1(ui, q')}, \quad \frac{f_2(ui, q')}{f_1(ui, q')}$$

setzt. Daraus folgt, wenn man die Schlüsse wiederholt, mittels welcher im Vorhergehenden die Gleichungen (III., (8.)) begründet worden sind, dass die letzteren Functionen mit den ersteren identisch sind. Man hat also

$$(1.) \quad \left\{ \begin{aligned} f(u, q) &= \frac{f(ui, q')}{if_1(ui, q')} \\ f_1(u, q) &= \frac{1}{f_1(ui, q')} \\ f_2(u, q) &= \frac{f_2(ui, q')}{f_1(ui, q')} \end{aligned} \right.$$

wenn die Grössen q, q' durch die Gleichung

$$(2.) \quad \left(\frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)}\right)^4 + \left(\frac{\mathfrak{S}_2(0, q')}{\mathfrak{S}_3(0, q')}\right)^4 = 1$$

mit einander verbunden sind.

Es möge jetzt unter t wieder eine unabhängige Veränderliche verstanden, und die Function, in welche $\mathfrak{S}_3^2(0, q)$ durch die Substitution $q = \psi(t)$ übergeht, mit $F(t)$ bezeichnet werden. Dann ist, wie aus den Formeln (III., (9.)) erhellt, wenn man der Grösse t irgend einen reellen, zwischen 0 und 1 enthaltenen Werth giebt und $q = \psi(t)$, $q' = \psi(1-t)$ nimmt, der kleinste positive Werth der Grösse u , für den $f(u, q) = 0$ ist, gleich $\pi F(t)$, und der kleinste positive Werth derselben Grösse, für den $f(u, q')$ verschwindet, gleich $-F(1-t) \log \psi(1-t)$; und es besteht also in Folge der Relationen (1.) die Gleichung

$$(3.) \quad \pi F(t) = -F(1-t) \log \psi(1-t),$$

aus der dann, wenn man $1-t$ für t setzt,

$$(4.) \quad \pi F(1-t) = -F(t) \log \psi(t),$$

$$(5.) \quad \log \psi(t) \log \psi(1-t) = \pi^2$$

folgt.

Jetzt bedeute τ eine Grösse, welcher nur solche complexe Werthe, deren zweite Coordinate positiv ist, beigelegt werden sollen. Ferner mögen (wie es in den »Formeln und Lehrsätzen« geschehen ist) die Functionen, in welche

$$\mathfrak{S}(x, q), \quad \mathfrak{S}_1(x, q), \quad \mathfrak{S}_2(x, q), \quad \mathfrak{S}_3(x, q)$$

durch die Substitutionen

$$x = v\pi, \quad q = e^{\tau\pi i}, \quad \sqrt[4]{q} = e^{\frac{1}{4}\tau\pi i}$$

übergehen, beziehlich mit

$$\mathfrak{S}_0(v|\tau), \quad \mathfrak{S}_1(v|\tau), \quad \mathfrak{S}_2(v|\tau), \quad \mathfrak{S}_3(v|\tau)$$

bezeichnet werden. Dann ist jede der letzteren Functionen eine eindeutige analytische Function der von einander unabhängigen Veränderlichen v, τ , wofern man das Gebiet von τ so, wie angegeben worden, beschränkt, während v jeden Werth, mit Ausnahme von ∞ , annehmen kann.

Man gebe nun der Grösse τ zunächst irgend einen Werth, dessen erste Coordinate gleich Null ist, so dass $\frac{\tau}{i}$ einen reellen, zwischen 0 und $+\infty$ enthaltenen Werth hat und somit, wenn man

$$q = e^{\tau\pi i}, \quad t = \left(\frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)} \right)^4 = \left(\frac{\mathfrak{S}_2(0 | \tau)}{\mathfrak{S}_3(0 | \tau)} \right)^4$$

setzt, t, q beide reell und zwischen 0 und 1 gelegen sind. Daraus folgt $\tau\pi i = \log \psi(t)$, weil einem reellen, zwischen 0 und 1 enthaltenen Werthe von t , wie in (I.) gezeigt worden ist, nur ein demselben Intervall angehöriger Werth q und diesem nur ein Werth von τ , für den $\frac{\tau}{i}$ reell ist, entspricht. Setzt man nun $\tau'\pi i = \log \psi(1-t)$, so ist nach Gleichung (5.) $\tau\tau' = -1$ und nach Gleichung (4.)

$$\mathfrak{S}_3^2(0 | \tau) = \frac{i}{\tau} \mathfrak{S}_3^2\left(0 \left| -\frac{1}{\tau} \right.\right).$$

Ferner hat man

$$\left(\frac{\mathfrak{S}_2\left(0 \left| -\frac{1}{\tau} \right.\right)}{\mathfrak{S}_3\left(0 \left| -\frac{1}{\tau} \right.\right)} \right)^4 = 1 - \frac{\mathfrak{S}_2^4(0 | \tau)}{\mathfrak{S}_3^4(0 | \tau)} = \frac{\mathfrak{S}_0^4(0 | \tau)}{\mathfrak{S}_3^4(0 | \tau)},$$

also

$$\mathfrak{S}_0^4(0 | \tau) = \left(\frac{i}{\tau} \right)^2 \mathfrak{S}_2^4\left(0 \left| -\frac{1}{\tau} \right.\right),$$

und somit auch

$$\mathfrak{S}_2^4(0 | \tau) = \left(\frac{i}{\tau} \right)^2 \mathfrak{S}_0^4\left(0 \left| -\frac{1}{\tau} \right.\right).$$

Da nun $\frac{i}{\tau}$, $\mathfrak{S}_0(0 | \tau)$, $\mathfrak{S}_2\left(0 \left| -\frac{1}{\tau} \right.\right)$ u. s. w. sämmtlich positive Grössen sind, so ergibt sich

$$(6.) \quad \left\{ \begin{array}{l} \mathfrak{S}_0(0 | \tau) = \left(\frac{i}{\tau} \right)^{\frac{1}{2}} \mathfrak{S}_2\left(0 \left| -\frac{1}{\tau} \right.\right) \\ \mathfrak{S}_2(0 | \tau) = \left(\frac{i}{\tau} \right)^{\frac{1}{2}} \mathfrak{S}_0\left(0 \left| -\frac{1}{\tau} \right.\right) \\ \mathfrak{S}_3(0 | \tau) = \left(\frac{i}{\tau} \right)^{\frac{1}{2}} \mathfrak{S}_3\left(0 \left| -\frac{1}{\tau} \right.\right). \end{array} \right.$$

Diese Gleichungen sind hergeleitet unter der Voraussetzung, dass $\frac{\tau}{i}$ einen zwischen 0 und $+\infty$ enthaltenen reellen Werth habe. Da aber alle vorkommenden Functionen eindeutige analytische Functionen von τ sind, wenn

der Werth von $\left(\frac{i}{\tau}\right)^{\frac{1}{2}}$ so, wie in (II.) angegeben worden, fixirt wird, so ist durch das Vorstehende die Richtigkeit der Gleichung für jeden Werth, den τ annehmen kann, bewiesen.

Aus den Ausdrücken der \mathfrak{S} -Functionen ergeben sich ferner unmittelbar die folgenden Relationen:

$$(7.) \quad \begin{cases} \mathfrak{S}_0(0|\tau) = \mathfrak{S}_0(0|\tau+1) \\ \mathfrak{S}_2(0|\tau) = i^{-\frac{1}{2}} \mathfrak{S}_2(0|\tau+1) \\ \mathfrak{S}_3(0|\tau) = \mathfrak{S}_3(0|\tau+1). \end{cases}$$

Aus (7.) erhält man nun weiter:

$$(8.) \quad \begin{cases} \mathfrak{S}_0(0|\tau) = \mathfrak{S}_0(0|\tau+2) \\ \mathfrak{S}_2(0|\tau) = -i \mathfrak{S}_2(0|\tau+2) \\ \mathfrak{S}_3(0|\tau) = \mathfrak{S}_3(0|\tau+2). \end{cases}$$

Ferner aus (6.), wenn man die \mathfrak{S} -Functionen auf der rechten Seite zunächst in Functionen von $\left(-\frac{1}{\tau}-2\right)$ und diese dann in Functionen von $\frac{\tau}{1+2\tau}$ verwandelt,

$$(9.) \quad \begin{cases} \mathfrak{S}_0(0|\tau) = i \left(\frac{1}{1+2\tau}\right)^{\frac{1}{2}} \mathfrak{S}_0\left(0\left|\frac{\tau}{1+2\tau}\right.\right) \\ \mathfrak{S}_2(0|\tau) = \left(\frac{1}{1+2\tau}\right)^{\frac{1}{2}} \mathfrak{S}_2\left(0\left|\frac{\tau}{1+2\tau}\right.\right) \\ \mathfrak{S}_3(0|\tau) = \left(\frac{1}{1+2\tau}\right)^{\frac{1}{2}} \mathfrak{S}_3\left(0\left|\frac{\tau}{1+2\tau}\right.\right). \end{cases}$$

Setzt man für τ in (8.) $\tau-2$ und in (9.) $\frac{\tau}{1-2\tau}$, so ergibt sich weiter:

$$(10.) \quad \begin{cases} \mathfrak{S}_0(0|\tau) = \mathfrak{S}_0(0|\tau-2) \\ \mathfrak{S}_2(0|\tau) = i \mathfrak{S}_2(0|\tau-2) \\ \mathfrak{S}_3(0|\tau) = \mathfrak{S}_3(0|\tau-2); \end{cases}$$

$$(11.) \quad \begin{cases} \mathfrak{S}_0(0|\tau) = -i \left(\frac{1}{1-2\tau}\right)^{\frac{1}{2}} \mathfrak{S}_0\left(0\left|\frac{\tau}{1-2\tau}\right.\right) \\ \mathfrak{S}_2(0|\tau) = \left(\frac{1}{1-2\tau}\right)^{\frac{1}{2}} \mathfrak{S}_2\left(0\left|\frac{\tau}{1-2\tau}\right.\right) \\ \mathfrak{S}_3(0|\tau) = \left(\frac{1}{1-2\tau}\right)^{\frac{1}{2}} \mathfrak{S}_3\left(0\left|\frac{\tau}{1-2\tau}\right.\right). \end{cases}$$

Aus diesen Gleichungen (7.) bis (11.) leitet man nun die folgenden ab, in denen g, h beliebige ganze Zahlen bedeuten:

$$(12.) \quad \left\{ \begin{array}{ll} \frac{\mathfrak{S}_2(0|\tau)}{\mathfrak{S}_3(0|\tau)} = i^{-g} \cdot \frac{\mathfrak{S}_2(0|\tau+2g)}{\mathfrak{S}_3(0|\tau+2g)}, & \frac{\mathfrak{S}_0(0|\tau)}{\mathfrak{S}_3(0|\tau)} = \frac{\mathfrak{S}_0(0|\tau+2g)}{\mathfrak{S}_3(0|\tau+2g)}, \\ \frac{\mathfrak{S}_2(0|\tau)}{\mathfrak{S}_3(0|\tau)} = \frac{\mathfrak{S}_2\left(0\left|\frac{\tau}{1+2h\tau}\right.\right)}{\mathfrak{S}_3\left(0\left|\frac{\tau}{1+2h\tau}\right.\right)}, & \frac{\mathfrak{S}_0(0|\tau)}{\mathfrak{S}_3(0|\tau)} = i^h \cdot \frac{\mathfrak{S}_0\left(0\left|\frac{\tau}{1+2h\tau}\right.\right)}{\mathfrak{S}_3\left(0\left|\frac{\tau}{1+2h\tau}\right.\right)}, \\ \frac{\mathfrak{S}_2(0|\tau)}{\mathfrak{S}_3(0|\tau)} = i^{-g} \cdot \frac{\mathfrak{S}_2\left(0\left|\frac{2g+\tau}{1+4gh+2h\tau}\right.\right)}{\mathfrak{S}_3\left(0\left|\frac{2g+\tau}{1+4gh+2h\tau}\right.\right)}, & \frac{\mathfrak{S}_0(0|\tau)}{\mathfrak{S}_3(0|\tau)} = i^h \cdot \frac{\mathfrak{S}_0\left(0\left|\frac{2g+\tau}{1+4gh+2h\tau}\right.\right)}{\mathfrak{S}_3\left(0\left|\frac{2g+\tau}{1+4gh+2h\tau}\right.\right)}. \end{array} \right.$$

Angenommen jetzt, es seien a, b, c, d vier gegebene ganze Zahlen, unter denen die Relation $ad-bc=1$ besteht; b und c seien grade, a und d also ungrade. Man setze in den beiden letzten der vorstehenden Gleichungen

$$\tau_1 = \frac{c+d\tau}{a+b\tau} \text{ f\"ur } \tau, \text{ und } -g, -h \text{ f\"ur } g, h;$$

dadurch erh\u00e4lt man, wenn man

$$c_1 = c-2ga, \quad d_1 = d-2gb, \quad a_1 = a-2hc_1, \quad b_1 = b-2hd_1, \\ \tau_2 = \frac{c_1+d_1\tau}{a_1+b_1\tau}$$

setzt,

$$\frac{\mathfrak{S}_2(0|\tau_1)}{\mathfrak{S}_3(0|\tau_1)} = i^g \cdot \frac{\mathfrak{S}_2(0|\tau_2)}{\mathfrak{S}_3(0|\tau_2)}, \quad \frac{\mathfrak{S}_0(0|\tau_1)}{\mathfrak{S}_3(0|\tau_1)} = i^{-h} \cdot \frac{\mathfrak{S}_0(0|\tau_2)}{\mathfrak{S}_3(0|\tau_2)}.$$

Es ist aber, wenn man mit ε diejenige der Zahlen 1, -1 bezeichnet, welcher $a \pmod{4}$ congruent ist,

$$\frac{\varepsilon c}{2} - \frac{\varepsilon c_1}{2} \equiv g \pmod{4},$$

ferner, in Folge der Gleichung $ad-bc=1$, $d \equiv a \pmod{4}$ und somit $d_1 \equiv d \equiv \varepsilon$,

$$\frac{\varepsilon b}{2} - \frac{\varepsilon b_1}{2} \equiv h \pmod{4}.$$

Folglich hat man

$$(13.) \quad i^{-\frac{\varepsilon c}{2}} \cdot \frac{\mathfrak{S}_2(0|\tau_1)}{\mathfrak{S}_3(0|\tau_1)} = i^{-\frac{\varepsilon c_1}{2}} \cdot \frac{\mathfrak{S}_2(0|\tau_2)}{\mathfrak{S}_3(0|\tau_2)}, \quad i^{\frac{\varepsilon b}{2}} \cdot \frac{\mathfrak{S}_0(0|\tau_1)}{\mathfrak{S}_3(0|\tau_1)} = i^{\frac{\varepsilon b_1}{2}} \cdot \frac{\mathfrak{S}_0(0|\tau_2)}{\mathfrak{S}_3(0|\tau_2)}.$$

Zugleich besteht unter den Zahlen a_1, b_1, c_1, d_1 die Gleichung $a_1 d_1 - b_1 c_1 = 1$, und es ist

$$a_1 \equiv a \equiv \varepsilon \pmod{4}.$$

Hieraus folgt nun sofort weiter:

Setzt man, unter g, h, g_1, h_1, g_2, h_2 u. s. w. beliebig anzunehmende ganze Zahlen verstehend,

$$\begin{aligned} c_1 &= c - 2ga, & d_1 &= d - 2gb, & a_1 &= a - 2hc_1, & b_1 &= b - 2hd_1, \\ c_2 &= c_1 - 2g_1 a_1, & d_2 &= d_1 - 2g_1 b_1, & a_2 &= a_1 - 2h_1 c_1, & b_2 &= b_1 - 2h_1 d_1, \\ c_3 &= c_2 - 2g_2 a_2, & d_3 &= d_2 - 2g_2 b_2, & a_3 &= a_2 - 2h_2 c_2, & b_3 &= b_2 - 2h_2 d_2, \end{aligned}$$

u. s. w.

und

$$\tau_2 = \frac{c_1 + d_1 \tau}{a_1 + b_1 \tau}, \quad \tau_3 = \frac{c_2 + d_2 \tau}{a_2 + b_2 \tau}, \quad \tau_4 = \frac{c_3 + d_3 \tau}{a_3 + b_3 \tau} \text{ u. s. w.},$$

so sind $b_1, c_1, b_2, c_2, b_3, c_3 \dots$ grade, $a_1, d_1, a_2, d_2, a_3, d_3 \dots$ ungrade Zahlen, unter denen die Gleichungen

$$a_1 d_1 - b_1 c_1 = 1, \quad a_2 d_2 - b_2 c_2 = 1, \quad a_3 d_3 - b_3 c_3 = 1, \dots$$

bestehen, und es ist

$$\begin{aligned} i^{-\frac{\varepsilon c}{2}} \cdot \frac{\mathfrak{S}_2(0|\tau_1)}{\mathfrak{S}_3(0|\tau_1)} &= i^{-\frac{\varepsilon c_1}{2}} \cdot \frac{\mathfrak{S}_2(0|\tau_2)}{\mathfrak{S}_3(0|\tau_2)} = i^{-\frac{\varepsilon c_2}{2}} \cdot \frac{\mathfrak{S}_2(0|\tau_3)}{\mathfrak{S}_3(0|\tau_3)} = i^{-\frac{\varepsilon c_3}{2}} \cdot \frac{\mathfrak{S}_2(0|\tau_4)}{\mathfrak{S}_3(0|\tau_4)} = \dots, \\ i^{\frac{\varepsilon b}{2}} \cdot \frac{\mathfrak{S}_0(0|\tau_1)}{\mathfrak{S}_3(0|\tau_1)} &= i^{\frac{\varepsilon b_1}{2}} \cdot \frac{\mathfrak{S}_0(0|\tau_2)}{\mathfrak{S}_3(0|\tau_2)} = i^{\frac{\varepsilon b_2}{2}} \cdot \frac{\mathfrak{S}_0(0|\tau_3)}{\mathfrak{S}_3(0|\tau_3)} = i^{\frac{\varepsilon b_3}{2}} \cdot \frac{\mathfrak{S}_0(0|\tau_4)}{\mathfrak{S}_3(0|\tau_4)} = \dots \end{aligned}$$

Ist nun b nicht gleich Null, so bestimme man, was immer angeht, die Zahlen g, h so, dass $|d_1| < |b|, |b_1| < |d_1|$ und somit

$$|b_1| < |b|$$

wird. Ist dann auch b_1 von Null verschieden, so bestimme man weiter g_1, h_1 so, dass

$$|b_2| < |b_1|,$$

ferner, wenn auch b_2 von Null verschieden ist, g_2, h_2 so, dass

$$|b_3| < |b_2|$$

wird, u. s. f. Auf diese Weise verfahren gelangt man nothwendig zu einem Ausdruck τ_r , in welchem $b_{r-1} = 0$ ist. In Folge der Gleichung $a_{r-1} d_{r-1} - b_{r-1} c_{r-1} = 1$,

und weil $a, a_1, a_2, \dots, a_{r-1}$ sämmtlich $\equiv \varepsilon \pmod{4}$ sind, ist dann $a_{r-1} = \varepsilon, d_{r-1} = \varepsilon,$
 $\tau_r = \varepsilon c_{r-1} + \tau,$ folglich (nach (12.))

$$i^{-\frac{\varepsilon c_{r-1}}{2}} \cdot \frac{\mathfrak{F}_2(0|\tau_r)}{\mathfrak{F}_3(0|\tau_r)} = \frac{\mathfrak{F}_2(0|\tau)}{\mathfrak{F}_3(0|\tau)}, \quad i^{\frac{\varepsilon b_{r-1}}{2}} \cdot \frac{\mathfrak{F}_0(0|\tau_r)}{\mathfrak{F}_3(0|\tau_r)} = \frac{\mathfrak{F}_0(0|\tau)}{\mathfrak{F}_3(0|\tau)}.$$

So ergibt sich schliesslich

$$(14.) \quad \frac{\mathfrak{F}_2(0|\tau_1)}{\mathfrak{F}_3(0|\tau_1)} = i^{\frac{\varepsilon c}{2}} \cdot \frac{\mathfrak{F}_2(0|\tau)}{\mathfrak{F}_3(0|\tau)}, \quad \frac{\mathfrak{F}_0(0|\tau_1)}{\mathfrak{F}_3(0|\tau_1)} = i^{-\frac{\varepsilon b}{2}} \cdot \frac{\mathfrak{F}_0(0|\tau)}{\mathfrak{F}_3(0|\tau)}.$$

Aus der ersten dieser Gleichungen folgt, wenn man

$$\tau = \frac{1}{\pi i} \log \psi(t)$$

nimmt,

$$\left(\frac{\mathfrak{F}_2(0|\tau_1)}{\mathfrak{F}_3(0|\tau_1)} \right)^4 = t,$$

oder

$$(15.) \quad \left(\frac{\mathfrak{F}_2(0, q)}{\mathfrak{F}_3(0, q)} \right)^4 = t,$$

wenn

$$(16.) \quad q = e^{\tau_1 \pi i} = e^{\frac{c \pi i + d \log \psi(t)}{a \pi i + b \log \psi(t)} \cdot \pi i}$$

gesetzt wird. Damit ist das am Schlusse des § III Behauptete bewiesen, und kann nunmehr der dort aufgestellte Satz bestimmter folgendermassen ausgesprochen werden:

Für jeden gegebenen Werth der Veränderlichen t giebt es unendlich viele Werthe der Grösse q , die der Gleichung

$$t = \left(\frac{\mathfrak{F}_2(0, q)}{\mathfrak{F}_3(0, q)} \right)^4$$

genügen; dieselben werden sämmtlich durch die Formel

$$q = e^{\frac{2\gamma \pi i + (2\delta + 1) \log \psi(t)}{(2\alpha + 1) \pi i + 2\beta \log \psi(t)} \cdot \pi i}$$

geliefert, in welcher $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ ganze Zahlen bedeuten, die der Bedingung

$$(2\alpha + 1)(2\delta + 1) - 4\beta\gamma = 1$$

genügen müssen, einer weiteren Beschränkung aber nicht unterworfen sind. (Der Werth des Logarithmus von $\psi(t)$ in der vorstehenden Formel kann beliebig fixirt werden.)

V.

Giebt man nun der Grösse q irgend einen der Werthe, die sie nach der vorstehenden Formel annehmen kann, wenn man $t = k^2$ setzt — wobei die singulären Werthe $k^2 = 0, 1, \infty$ auszuschliessen sind —, so hat man

$$(1.) \quad \left\{ \begin{aligned} \sin \operatorname{am}(u, k) &= \frac{\mathfrak{S}_3(0, q)}{\mathfrak{S}_2(0, q)} \frac{\mathfrak{S}_1(x, q)}{\mathfrak{S}(x, q)} \\ \cos \operatorname{am}(u, k) &= \frac{\mathfrak{S}(0, q)}{\mathfrak{S}_2(0, q)} \frac{\mathfrak{S}_2(x, q)}{\mathfrak{S}(x, q)} \\ \Delta \operatorname{am}(u, k) &= \frac{\mathfrak{S}(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)} \frac{\mathfrak{S}_3(x, q)}{\mathfrak{S}(x, q)}, \end{aligned} \right.$$

wo

$$(2.) \quad x = \frac{u}{\mathfrak{S}_3^2(0, q)}.$$

In dieser Form dargestellt erscheinen $\sin \operatorname{am}(u, k)$, $\cos \operatorname{am}(u, k)$, $\Delta \operatorname{am}(u, k)$ als eindeutige Functionen von u und q , indem die in $\mathfrak{S}_1(x, q)$, $\mathfrak{S}_2(x, q)$, $\mathfrak{S}_3(0, q)$ vorkommende Wurzelgrösse $\sqrt[4]{q}$ sich weghebt. Drückt man aber $\frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)}$, $\frac{\mathfrak{S}(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)}$ durch k^2 aus, so wird

$$(3.) \quad \left\{ \begin{aligned} \sin \operatorname{am}(u, k) &= \frac{1}{\sqrt[4]{k^2}} \cdot \frac{\mathfrak{S}_1(x, q)}{\mathfrak{S}(x, q)} \\ \cos \operatorname{am}(u, k) &= \frac{\sqrt[4]{1-k^2}}{\sqrt[4]{k^2}} \cdot \frac{\mathfrak{S}_2(x, q)}{\mathfrak{S}(x, q)} \\ \Delta \operatorname{am}(u, k) &= \sqrt[4]{1-k^2} \cdot \frac{\mathfrak{S}_3(x, q)}{\mathfrak{S}(x, q)}; \end{aligned} \right.$$

es bleibt jedoch noch zu ermitteln, welche Werthe man den Wurzelgrössen $\sqrt[4]{k^2}$, $\sqrt[4]{1-k^2}$, $\sqrt[4]{q}$ beizulegen hat. Dazu sind noch einige, die Functionen $\psi(t)$, $\log \psi(t)$ betreffende Erörterungen erforderlich.

Scheidet man von dem Gebiete der Veränderlichen t die der Strecke $(1 \dots + \infty)$ angehörigen reellen Werthe aus, so ist $\psi(t)$ eine eindeutige und continuirliche Function von t , welche ausserdem, dass ihr absoluter Betrag beständig kleiner als 1 ist, die folgenden Eigenschaften besitzt:

II.

1. Sie hat einen reellen oder imaginären Werth, je nachdem t reell oder imaginär ist.
2. Im ersteren Falle stimmt ihr Zeichen mit dem Zeichen von t überein.
3. Für jeden imaginären Werth von t hat ihre zweite Coordinate dasselbe Zeichen wie die zweite Coordinate von t .

Das Erste ergibt sich unmittelbar aus den Gleichungen

$$\psi(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \gamma_n \left(\frac{1-(1-t)^{\frac{1}{2}}}{1+(1-t)^{\frac{1}{2}}} \right)^{4n+1},$$

$$t = \left(\frac{\mathfrak{S}_2(0, \psi(t))}{\mathfrak{S}_3(0, \psi(t))} \right)^4 = 16\psi(t) \cdot \left(\frac{1+\psi^2(t)+\psi^6(t)+\dots}{1+2\psi(t)+2\psi^4(t)+\dots} \right)^4,$$

von denen die erste zeigt, dass $\psi(t)$ für die der Strecke $(-\infty \dots 1)$ angehörig reellen Werthe von t ebenfalls reell ist, die andere aber lehrt, dass umgekehrt, wenn $\psi(t)$ einen reellen Werth hat, auch t reell ist und somit, unter der gemachten Annahme, zwischen $-\infty$ und 1 liegt. Aus der zweiten Gleichung erhellt ferner die Richtigkeit des unter No. 2 Angegebenen. Das Dritte aber wird so bewiesen.

Für $t = 1+i$ ist $\log(1-t) = -\frac{\pi}{2}i$, also

$$\frac{1-(1-t)^{\frac{1}{2}}}{1+(1-t)^{\frac{1}{2}}} = \frac{1-e^{-\frac{\pi}{8}i}}{1+e^{-\frac{\pi}{8}i}} = i \operatorname{tg} \frac{\pi}{16},$$

und somit, da die γ_n sämmtlich positive Zahlen sind, $\psi(t)$ gleich dem Producte aus i und einer positiven Grösse. Von dem Werthe $1+i$ aus kann aber t stetig sich ändernd zu jedem anderen complexen Werthe t_1 , dessen zweite Coordinate positiv ist, übergehen, ohne dabei einen reellen Werth anzunehmen; die zweite Coordinate von $\psi(t)$ ändert sich bei diesem Übergange stetig mit t , ohne den Werth Null anzunehmen (No. 1) und ist also für $t = t_1$ ebenso wie für $t = 1+i$ positiv. In ganz ähnlicher Weise wird gezeigt, dass $\psi(t)$ für $t = 1-i$ gleich dem Producte aus i und einer negativen Grösse ist, und daraus die Übereinstimmung des Zeichens der zweiten Coordinate von $\psi(t)$ mit dem Zeichen der zweiten Coordinate von t auch in dem Falle, wo die letztere negativ ist, gefolgert. Übrigens ergibt sich aus der oben festgesetzten Bedeutung von $(1-t)^{\frac{1}{2}}$ und aus No. 1, dass conjugirten complexen

Werthen von t auch conjugirte complexe Werthe von $(1-t)^{\frac{1}{2}}$ und von $\psi(t)$ entsprechen, und es daher genügt, die unter No. 3 angegebene Eigenschaft der Function $\psi(t)$ für Werthe von t , deren zweite Coordinate positiv ist, nachzuweisen.

Hierzu ist noch Folgendes zu bemerken:

Setzt man

$$\varphi(t) = \frac{1 - (1-t)^{\frac{1}{2}}}{1 + (1-t)^{\frac{1}{2}}},$$

so ist

$$1-t = \left(\frac{1-\varphi(t)}{1+\varphi(t)} \right)^4,$$

und es lässt sich mit Hülfe dieser beiden Gleichungen zeigen, dass der Function $\varphi(t)$ die unter No. 1 bis 3 angegebenen Eigenschaften ebenfalls zukommen; es braucht dazu in der vorstehenden Beweisführung nur überall $\varphi(t)$ statt $\psi(t)$ gesetzt zu werden.

Nach dem Vorstehenden sind nun, wenn man von dem Gebiete der Veränderlichen t auch die der Strecke $(-\infty \dots 0)$ angehörigen reellen Werthe ausscheidet, nicht nur $\varphi(t)$, $\psi(t)$, sondern auch

$$\log \varphi(t), \quad \log \psi(t)$$

eindeutig definirte und continuirliche Functionen von t . Aus der obigen Gleichung (II.)

$$\sum_{n=0}^{\infty} \gamma_n t^n = e^{-\log 2 + \frac{1}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n t^n}$$

ergiebt sich aber, wenn man $\varphi^4(t)$ für t setzt,

$$\psi(t) = \frac{1}{2} \varphi(t) e^{\frac{1}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \varphi^{4n}(t)},$$

und hieraus

$$\log \psi(t) = \log \left(\frac{1}{2} \varphi(t) \right) + \frac{1}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \varphi^{4n}(t) + 2m\pi i,$$

wo m eine ganze Zahl bedeutet, die innerhalb des jetzt der Grösse t angewiesenen Gebietes, der Stetigkeit der Functionen $\varphi(t)$, $\log \left(\frac{1}{2} \varphi(t) \right)$, $\log \psi(t)$ wegen, nicht verschiedene Werthe haben kann. Für jeden zwischen 0 und 1

enthaltenen reellen Werth von t sind aber die genannten Functionen alle drei reell und somit $m = 0$; es gilt also die Gleichung

$$(4.) \quad \log \psi(t) = \log \left(\frac{1}{2} \frac{1 - (1-t)^{\frac{1}{2}}}{1 + (1-t)^{\frac{1}{2}}} \right) + \frac{1}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \left(\frac{1 - (1-t)^{\frac{1}{2}}}{1 + (1-t)^{\frac{1}{2}}} \right)^{4n}$$

für jeden der nicht ausgeschlossenen Werthe von t , unter der Bedingung, dass die Werthe der Logarithmen so, wie in (II.) festgesetzt worden ist, bestimmt werden.

Giebt man ferner der Grösse t einen zwischen 1 und $+\infty$ enthaltenen reellen Werth, so bleibt die vorstehende Gleichung gültig, wenn man der Potenz $(1-t)^{\frac{1}{2}}$ den einen oder den andern der beiden Werthe, die sie alsdann annehmen kann, und zugleich der Function $\psi(t)$ den entsprechenden Werth beilegt.

Für einen negativen reellen Werth von t endlich hat man

$$\lim_{x=0} \log \psi(t \pm ix) = \log(-\psi(t)) \pm \pi i, \quad \lim_{x=0} \log \varphi(t \pm ix) = \log(-\varphi(t)) \pm \pi i$$

(wo x eine positive Grösse bedeutet), und somit

$$(5.) \quad \log(-\psi(t)) = \log \left(-\frac{1}{2} \frac{1 - (1-t)^{\frac{1}{2}}}{1 + (1-t)^{\frac{1}{2}}} \right) + \frac{1}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \left(\frac{1 - (1-t)^{\frac{1}{2}}}{1 + (1-t)^{\frac{1}{2}}} \right)^{4n}.$$

Dies vorausgeschickt, definire man nun die Werthe der Potenzen

$$(k^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (1-k^2)^{\frac{1}{2}}, \quad \psi(k^2)^{\frac{1}{2}}$$

so, wie in (II.) festgesetzt worden ist; dann ergibt sich, zunächst unter der Voraussetzung, dass weder k^2 noch $1-k^2$ einen der Strecke $(-\infty \dots 0)$ angehörigen reellen Werth habe, aus den Gleichungen

$$k^2 = \left(\frac{\mathfrak{S}_2(0, \psi(k^2))}{\mathfrak{S}_3(0, \psi(k^2))} \right)^4, \quad 1-k^2 = \left(\frac{\mathfrak{S}(0, \psi(k^2))}{\mathfrak{S}_3(0, \psi(k^2))} \right)^4,$$

wenn man der in $\mathfrak{S}_2(0, \psi(k^2))$ vorkommenden Wurzelgrösse $\sqrt[4]{\psi(k^2)}$ den Werth $\psi(k^2)^{\frac{1}{2}}$ beilegt,

$$(6.) \quad (k^2)^{\frac{1}{2}} = \frac{\mathfrak{S}_2(0, \psi(k^2))}{\mathfrak{S}_3(0, \psi(k^2))}, \quad (1-k^2)^{\frac{1}{2}} = \frac{\mathfrak{S}(0, \psi(k^2))}{\mathfrak{S}_3(0, \psi(k^2))}.$$

Denn diese Gleichungen bestehen, wenn k^2 eine zwischen 0 und 1 enthaltene Grösse ist; sie gelten also, da $(k^2)^{\frac{1}{2}}$, $(1-k^2)^{\frac{1}{2}}$, $\mathfrak{S}_2(0, \psi(k^2))$, $\mathfrak{S}_3(0, \psi(k^2))$, $\mathfrak{S}(0, \psi(k^2))$ sämmtlich eindeutige analytische Functionen von k^2 sind, wenn vom Gebiete dieser Grösse die den Strecken $(-\infty \dots 0)$ und $(1 \dots +\infty)$ angehörig reellen Werthe ausgeschlossen werden, auch für jeden complexen Werth von k^2 .

Da ferner die zweite Coordinate von $\psi(k^2)$ nach dem Obigen dasselbe Zeichen hat wie die zweite Coordinate von k^2 , so nähert sich

$$\log \psi(k^2) - \log(k^2),$$

wenn k^2 einem reellen negativen Werthe unendlich nahe kommt, einer reellen, und somit

$$\frac{\psi(k^2)^{\frac{1}{2}}}{(k^2)^{\frac{1}{2}}}$$

einer positiven Grenze; die erste der Gleichungen (6.) bleibt daher auch für einen negativen Werth von k^2 gültig, unter der Bedingung, dass man nach Fixirung des Werthes von $(k^2)^{\frac{1}{2}}$ der Wurzelgrösse $\sqrt[4]{\psi(k^2)}$ denjenigen ihrer Werthe gebe, für den

$$\frac{\sqrt[4]{\psi(k^2)}}{(k^2)^{\frac{1}{2}}}$$

eine positive Grösse ist. Die zweite der Gleichungen (6.) behält ebenfalls für einen negativen Werth von k^2 ihre Gültigkeit, indem für einen solchen Werth $\psi(k^2)$ reell und daher $\mathfrak{S}(0, \psi(k^2))$, $\mathfrak{S}_2(0, \psi(k^2))$ ebenso wie $(1-k^2)^{\frac{1}{2}}$ positive Grössen sind.

Für einen zwischen 1 und $+\infty$ liegenden reellen Werth von k^2 endlich bleiben die in Rede stehenden Gleichungen gültig, wenn man nach Fixirung des Werthes von $(1-k^2)^{\frac{1}{2}}$ den zu diesem gehörigen Werth von $\psi(k^2)$ nimmt.

Hiernach bestehen die obigen Gleichungen (3.), wenn man die Werthe der Wurzelgrössen $\sqrt[4]{k^2}$, $\sqrt[4]{1-k^2}$ so fixirt, dass in jeder von ihnen die erste Coordinate positiv und ihrem absoluten Be-

trage nach nicht kleiner als die zweite ist,*) ferner

$$q = \psi(k^2) = \sum_{n=0}^{\infty} \gamma_n \left(\frac{1 - \sqrt[4]{1-k^2}}{1 + \sqrt[4]{1-k^2}} \right)^{4n+1}$$

setzt und endlich auch den Werth von $\sqrt[4]{q}$ so bestimmt, dass seine erste Coordinate positiv und ihrem absoluten Betrage nach nicht kleiner als die zweite ist, wobei in dem Falle, wo k^2 und somit auch q einen negativen Werth hat, die Bedingung zu erfüllen ist, dass $\frac{\sqrt[4]{q}}{\sqrt[4]{k^2}}$ eine positive Grösse sein muss.

Man setze ferner, unter Beibehaltung der im Vorstehenden bestimmten Werthe der Grössen $\sqrt[4]{k^2}$, $\sqrt[4]{1-k^2}$, $\psi(k^2)$ und nach Annahme von vier, der Bedingung

$$(2\alpha + 1)(2\delta + 1) - 4\beta\gamma = 1$$

entsprechenden ganzen Zahlen α , β , γ , δ ,

$$\tau = \frac{1}{\pi i} \log \psi(k^2), \quad \tau_1 = \frac{2\gamma + (2\delta + 1)\tau}{2\alpha + 1 + 2\beta\tau},$$

$$q = e^{\tau_1 \pi i}, \quad \sqrt[4]{q} = e^{\frac{1}{4} \tau_1 \pi i};$$

wobei in dem Falle, dass k^2 eine negative Grösse ist, dem $\log \psi(k^2)$ derjenige Werth beigelegt werden muss, für welchen $e^{\frac{1}{4} \log \psi(k^2)}$ gleich dem im Vorhergehenden bestimmten Werth von $\sqrt[4]{\psi(k^2)}$ wird. Dann ist, den Gleichungen (14.) des vorhergehenden Paragraphen zufolge, wenn unter ϵ diejenige der Zahlen 1, -1 verstanden wird, der $2\alpha + 1 \pmod{4}$ congruent ist,

$$\frac{\mathfrak{S}_2(0 | \tau_1)}{\mathfrak{S}_3(0 | \tau_1)} = i^{\epsilon\gamma} \frac{\mathfrak{S}_2(0 | \tau)}{\mathfrak{S}_3(0 | \tau)}, \quad \frac{\mathfrak{S}_0(0 | \tau_1)}{\mathfrak{S}_3(0 | \tau_1)} = i^{-\epsilon\beta} \cdot \frac{\mathfrak{S}_0(0 | \tau)}{\mathfrak{S}_3(0 | \tau)}.$$

Man hat daher

$$(8.) \quad \frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)} = i^{\epsilon\gamma} \sqrt[4]{k^2}, \quad \frac{\mathfrak{S}_0(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)} = i^{-\epsilon\beta} \sqrt[4]{1-k^2},$$

*) Dass nach dieser Bestimmung $\sqrt[4]{k^2}$, $\sqrt[4]{1-k^2}$ dieselben Werthe erhalten wie die Potenzen $(k^2)^{\frac{1}{4}}$, $(1-k^2)^{\frac{1}{4}}$, folgt unmittelbar aus der in (II.) gegebenen Definition der letzteren.

und die Gleichungen (1.) gestalten sich folgendermassen:

$$(9.) \quad \left\{ \begin{array}{l} \sin \operatorname{am}(u, k) = \frac{i^{-\varepsilon\gamma}}{\sqrt[4]{k^2}} \cdot \frac{\mathfrak{S}_1(x, q)}{\mathfrak{S}(x, q)} \\ \cos \operatorname{am}(u, k) = \frac{i^{-\varepsilon\beta} \sqrt[4]{1-k^2}}{\sqrt[4]{k^2}} \cdot \frac{\mathfrak{S}_2(x, q)}{\mathfrak{S}(x, q)} \\ \Delta \operatorname{am}(u, k) = i^{-\varepsilon\beta} \sqrt[4]{1-k^2} \cdot \frac{\mathfrak{S}_3(x, q)}{\mathfrak{S}(x, q)} \\ x = \frac{u}{\mathfrak{S}_3^2(0, q)} \\ \sqrt[4]{q} = e^{\frac{2\gamma\pi i + (2\delta+1)\log\psi(k^2)}{(2\alpha+1)\pi i + 2\beta\log\psi(k^2)} \cdot \frac{\pi i}{4}} \end{array} \right.$$

Hiermit ist die Aufgabe, welche zur Vervollständigung der von Jacobi in der mehrgenannten Abhandlung entwickelten Theorie der elliptischen Functionen noch zu lösen war, im Wesentlichen erledigt. Es bleibt aber noch Eines auszuführen.

Die unendliche Reihe, durch welche die Function $\psi(t)$ ausgedrückt ist, convergirt nur schwach, wenn der absolute Betrag der Grösse $1-t$ klein, also t einen wenig von 1 verschiedenen Werth hat. Es ist daher von wesentlicher Bedeutung, dass sich, wie jetzt gezeigt werden soll, aus der in Rede stehenden Reihe andere Ausdrücke von $\psi(t)$ herleiten lassen, von denen, welchen Werth auch t haben möge, immer einer wenigstens zur Berechnung von $\psi(t)$ sehr wohl sich eignet.

VI.

Unter der Bedingung, dass vom Gebiete der Veränderlichen t die der Strecke $(1 \dots +\infty)$ angehörigen reellen Werthe ausgeschlossen werden, ist $\psi(t)$ nicht nur, wie im vorhergehenden Paragraphen gezeigt worden, eine eindeutig definirte und continuirliche, sondern auch eine überall regulär sich verhaltende Function.*) Dies erhellt sofort, wenn man beachtet, dass in dem Bereiche, auf den durch die angegebene Bedingung die Veränderlichkeit

*) Ich sage von einer eindeutig definirten Function einer Veränderlichen t , dass sie sich in der Nähe eines bestimmten Werthes t_0 der letzteren regulär verhalte, wenn sie sich für alle einer gewissen Umgebung der Stelle t_0 angehörigen Werthe von t in der Form einer gewöhnlichen Potenzreihe von $t-t_0$ darstellen lässt.

von t beschränkt wird, $\varphi(t) = \frac{1-(1-t)^{\frac{1}{2}}}{1+(1-t)^{\frac{1}{2}}}$ eine eindeutig definirte und reguläre Function ist, und dass die Potenzreihe von $\varphi(t)$, durch welche $\psi(t)$ dargestellt wird, in der Nähe jedes bestimmten Werthes von t gleichmässig convergirt.

Scheidet man ferner von dem Gebiete der Grösse t auch die negativen reellen Werthe aus, so kann in dem Bereiche, auf den dann die Veränderlichkeit von t beschränkt ist — derselbe möge mit T' bezeichnet werden —, $\psi(t)$ weder verschwinden noch einen negativen reellen Werth erhalten; es ist also in diesem Bereiche auch $\log \psi(t)$ eine eindeutig definirte und reguläre Function.

Aus dieser Eigenschaft von $\log \psi(t)$ ergibt sich nun, dass die in (IV.) unter der Voraussetzung, dass t eine zwischen 0 und 1 liegende reelle Grösse sei, begründete Gleichung

$$(1.) \quad \log \psi(t) \log \psi(1-t) = \pi^2$$

für jeden dem Bereiche T' angehörigen Werth von t Gültigkeit hat.

Da nämlich nicht nur $\log \psi(t)$, sondern auch $\log \psi(1-t)$ in T' überall regulär sich verhält, so lässt sich, wenn t_0 irgend ein bestimmter Werth von t ist, in einer bestimmten Umgebung von t_0 der Ausdruck

$$\log \psi(t) \log \psi(1-t) - \pi^2$$

in der Form einer Potenzreihe von $t-t_0$ darstellen. Nimmt man t_0 in der Strecke $(0 \dots 1)$ an, so sind die Coefficienten dieser Reihe, weil es dann in jeder Nähe von t_0 Werthe der Grösse t giebt, für welche der vorstehende Ausdruck verschwindet, nothwendig alle gleich Null; dies muss also, da der Bereich T' ein Continuum ist, nach einem bekannten functionentheoretischen Satze auch für jeden anderen Werth von t_0 der Fall sein, und somit die Gleichung (1.) an jeder Stelle von T' bestehen.

Es ist ferner, da die zweite Coordinate von $\psi(t)$ dasselbe Zeichen wie die zweite Coordinate von t hat,

$$\log \psi(t) = \log(-\psi(t)) \pm i\pi,$$

wo das obere oder das untere Zeichen vor i gilt, je nachdem die zweite Coordinate von t positiv oder negativ ist. Da nun $\log(-\psi(t))$ in der Nähe eines jeden negativen reellen Werthes von t sich regulär verhält, so er-

giebt sich

$$(2.) \quad \begin{cases} \log \psi(\bar{t}) = \log(-\psi(t)) + i\pi \\ \log \psi(t) = \log(-\psi(t)) - i\pi \end{cases}$$

für jeden negativen reellen Werth von t .

Mit Hülfe dieser Formeln erhält man aus Gleichung (1.) für einen reellen Werth von t , der > 1 ,

$$(3.) \quad \begin{cases} \log \psi(\bar{t}) = \frac{\pi^2}{\log(-\psi(1-t)) - i\pi} \\ \log \psi(t) = \frac{\pi^2}{\log(-\psi(1-t)) + i\pi} \end{cases}$$

Man nehme jetzt an, es habe die Grösse t einen imaginären Werth, und verstehe unter ϵ die Zahl 1 oder -1 , je nachdem die zweite Coordinate von t positiv oder negativ ist. Dann verwandelt sich

$$\frac{1-(1-t)^{\frac{1}{2}}}{1+(1-t)^{\frac{1}{2}}},$$

wenn man $1-t$ für t setzt, in

$$\frac{1-t^{\frac{1}{2}}}{1+t^{\frac{1}{2}}} = -\frac{1-\left(1-\frac{t-1}{t}\right)^{\frac{1}{2}}}{1+\left(1-\frac{t-1}{t}\right)^{\frac{1}{2}}};$$

man hat also

$$(4.) \quad \psi(1-t) = -\psi\left(\frac{t-1}{t}\right),$$

woraus

$$(5.) \quad \log \psi(1-t) = \log \psi\left(\frac{t-1}{t}\right) - \epsilon i\pi.$$

Die Gleichung (1.) ferner verwandelt sich, wenn man in ihr $\frac{t-1}{t}$ für t setzt, in

$$(6.) \quad \log \psi\left(\frac{t-1}{t}\right) \log \psi\left(\frac{1}{t}\right) = \pi^2.$$

Setzt man dann in (5.) $\frac{t-1}{t}$ für t und beachtet, dass die zweite Coordinate von $\frac{t-1}{t}$ dasselbe Zeichen wie die zweite Coordinate von t hat, so kommt

$$(7.) \quad \log \psi\left(\frac{1}{t}\right) = \log \psi\left(\frac{1}{1-t}\right) - \epsilon i\pi.$$

Endlich ergibt sich aus (1.), wenn man $\frac{1}{1-t}$ für t setzt,

$$(8.) \quad \log \psi\left(\frac{1}{1-t}\right) \log \psi\left(\frac{t}{t-1}\right) = \pi^2.$$

Die Gleichungen (1.), (5.), (6.), (7.), (8.) führen nun zu den folgenden, in denen auf der Rechten vor i das obere oder das untere Zeichen gilt, je nachdem die zweite Coordinate von t positiv oder negativ ist:

$$(9.) \quad \left\{ \begin{array}{l} \log \psi(t) = \frac{\pi^2}{\log \psi(1-t)} \\ \log \psi(t) = \frac{\pi^2}{\log \psi\left(\frac{t-1}{t}\right) \mp i\pi} \\ \log \psi(t) = \frac{\pi \log \psi\left(\frac{1}{t}\right)}{\pi \mp i \log \psi\left(\frac{1}{t}\right)} \\ \log \psi(t) = \frac{\pi^2}{\log \psi\left(\frac{1}{1-t}\right)} \pm i\pi \\ \log \psi(t) = \log \psi\left(\frac{t}{t-1}\right) \pm i\pi. \end{array} \right.$$

Die Modificationen, welche diese Gleichungen erfahren, wenn die zweite Coordinate von t verschwindet, sind nach dem Vorhergehenden leicht zu ermitteln.

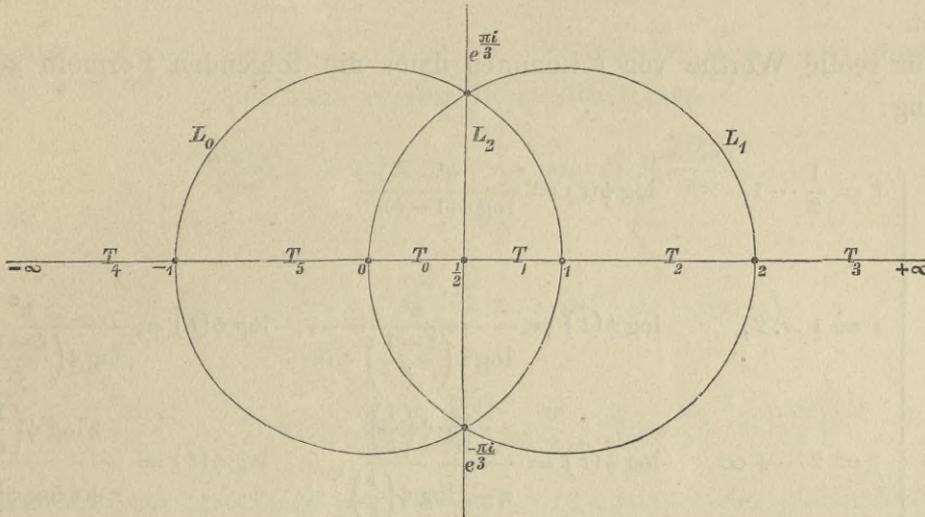
Jetzt denke man sich in der Ebene der Veränderlichen t einen Kreis (L_0) mit dem Radius 1 und dem Mittelpunkt 0, einen zweiten Kreis (L_1) mit demselben Radius und dem Mittelpunkt 1 beschrieben und durch die Durchschnittspunkte von (L_0), (L_1), in denen t die Werthe $e^{\frac{\pi i}{3}}$, $e^{-\frac{\pi i}{3}}$ hat, eine unbegrenzte Gerade (L_2) gelegt. Dann wird durch diese drei Linien die Ebene in sechs Stücke (T_0, T_1, \dots, T_5) zerlegt, in der Art, dass die Strecken

$$\left(0 \dots \frac{1}{2}\right), \left(\frac{1}{2} \dots 1\right), (1 \dots 2), (2 \dots +\infty), (-\infty \dots -1), (-1 \dots 0)$$

beziehlich in

$$T_0, T_1, T_2, T_3, T_4, T_5$$

liegen.



Ordnet man jedem Werthe von t zwei andere t', t'' zu mittels der Gleichungen

$$t + t' = 1, \quad tt'' = 1,$$

so entsprechen Werthen von t in

$$T_0, T_1, T_2, T_3, T_4, T_5$$

Werthe von t' beziehlich in

$$T_1, T_0, T_5, T_4, T_3, T_2,$$

und Werthe von t'' beziehlich in

$$T_3, T_2, T_1, T_0, T_5, T_4.$$

Daraus ergibt sich dann leicht der folgende Satz:

Liegt t in

$$T_1, T_2, T_3, T_4, T_5,$$

so liegen beziehlich

$$1-t, \quad \frac{t-1}{t}, \quad \frac{1}{t}, \quad \frac{1}{1-t}, \quad \frac{t}{t-1}$$

in T_0 .

Nach den unter (9.) zusammengestellten Formeln lässt sich also die Berechnung von $\psi(t)$ für jeden gegebenen Werth von t zurückführen auf die Berechnung derselben Function für ein dem Bereiche T_0 angehöriges Argument.

Für reelle Werthe von t kommen dann die folgenden Formeln zur Anwendung:

$$(10.) \left\{ \begin{array}{l} t = \frac{1}{2} \dots 1, \quad \log \psi(t) = \frac{\pi^2}{\log \psi(1-t)} \\ t = 1 \dots 2, \quad \log \psi(\overset{+}{t}) = \frac{\pi^2}{\log \psi\left(\frac{t-1}{t}\right) - i\pi}, \quad \log \psi(\bar{t}) = \frac{\pi^2}{\log \psi\left(\frac{t-1}{t}\right) + i\pi} \\ t = 2 \dots +\infty, \quad \log \psi(\overset{+}{t}) = \frac{\pi \log \psi\left(\frac{1}{t}\right)}{\pi - i \log \psi\left(\frac{1}{t}\right)}, \quad \log \psi(\bar{t}) = \frac{\pi \log \psi\left(\frac{1}{t}\right)}{\pi + i \log \psi\left(\frac{1}{t}\right)} \\ t = -\infty \dots -1, \quad \log \psi(\overset{+}{t}) = \frac{\pi^2}{\log \psi\left(\frac{1}{1-t}\right)} + i\pi, \quad \log \psi(\bar{t}) = \frac{\pi^2}{\log \psi\left(\frac{1}{1-t}\right)} - i\pi \\ t = -1 \dots 0, \quad \log \psi(\overset{+}{t}) = \log \psi\left(\frac{t}{t-1}\right) + i\pi, \quad \log \psi(\bar{t}) = \log \psi\left(\frac{t}{t-1}\right) - i\pi. \end{array} \right.$$

Es bleibt nun noch zu untersuchen, welches der grösste Werth ist, den der absolute Betrag von

$$\varphi(t) = \frac{1 - (1-t)^{\frac{1}{2}}}{1 + (1-t)^{\frac{1}{2}}}$$

annehmen kann, wenn die Grösse t auf den Bereich T_0 beschränkt wird.

Wie bekannt, gehört dieser grösste Werth zu einem an der Grenze von T_0 liegenden Werthe von t . Die Grenze von T_0 aber wird gebildet von der zwischen den Punkten $e^{-\frac{\pi i}{3}}$, $e^{\frac{\pi i}{3}}$ liegenden Strecke der Geraden L_2 und dem von denselben Punkten begrenzten und durch den Punkt 0 gehenden Bogen des Kreises L_1 .

Setzt man, unter w eine reelle Grösse verstehend,

$$t = \frac{1}{2} - \frac{i}{2} \operatorname{tg} \frac{w}{2} = \frac{1}{e^{wi} + 1},$$

so durchläuft t die Gerade L_2 , wenn w die Strecke $(-\pi \dots + \pi)$ durchläuft. Dann ist $\frac{d \log |\varphi(t)|}{dw}$ gleich dem reellen Bestandtheil von

$$\frac{d \log \varphi(t)}{dw} = \left(\frac{1}{2} (1-t)^{-\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} (1-t)^{-\frac{1}{2}} \right) \frac{d \log t}{dw},$$

also, da

$$1-t = \frac{e^{\frac{wi}{2}}}{2 \cos \frac{w}{2}}, \quad \frac{d \log t}{dw} = -i t e^{wi} = -i(1-t),$$

$$\frac{d |\varphi(t)|}{dw} = \frac{1}{2} |\varphi(t)| \cdot \left(\left(2 \cos \frac{w}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \sin \frac{w}{8} + \left(2 \cos \frac{w}{2} \right)^{-\frac{3}{2}} \sin \frac{3w}{8} \right).$$

Innerhalb der Strecke ($w = -\pi \dots + \pi$) wird $|\varphi(t)|$ weder gleich Null noch unendlich gross; es verschwindet also $\frac{d |\varphi(t)|}{dw}$ für $w = 0$ und ist positiv, wenn w zwischen 0 und π , negativ, wenn w zwischen 0 und $-\pi$ liegt. Der absolute Betrag von $\varphi(t)$ ist also ein Minimum für $w = 0$ und nimmt beständig zu, wenn t stetig wachsend die Strecke $(0 \dots \pi)$ oder stetig abnehmend die Strecke $(0 \dots -\pi)$ durchläuft.

Für $t = e^{\frac{\pi i}{3}}$ hat man, da $1 - e^{\frac{\pi i}{3}} = e^{-\frac{\pi i}{3}}$ ist,

$$\varphi(t) = \frac{1 - e^{-\frac{\pi i}{12}}}{1 + e^{-\frac{\pi i}{12}}} = i \operatorname{tg} \frac{\pi}{24};$$

und für $t = e^{-\frac{\pi i}{3}}$

$$\varphi(t) = -i \operatorname{tg} \frac{\pi}{24}.$$

Der grösste Werth, den der absolute Betrag von $\varphi(t)$ in der die Punkte $e^{\frac{\pi i}{3}}, e^{-\frac{\pi i}{3}}$ verbindenden Geraden annehmen kann, ist also gleich $\operatorname{tg} \frac{\pi}{24}$.

Setzt man ferner

$$t = 1 - e^{-wi},$$

so durchläuft t den Kreis L_1 , wenn w die Strecke $(-\pi \dots + \pi)$ durchläuft. Dann hat man

$$\varphi(t) = \frac{1 - e^{-\frac{wi}{4}}}{1 + e^{-\frac{wi}{4}}} = i \operatorname{tg} \frac{w}{8},$$

und der absolute Betrag von $\varphi(t)$ ist ein Minimum an der Stelle $w = 0$, $t = 0$ und ein Maximum an der Stelle $w = \pm \pi$, $t = 2$. Den grössten Werth, welchen derselbe in dem einen Theil der Begrenzung von T_0 bildenden Kreisbogen annehmen kann, erreicht er also in den Punkten $e^{\frac{\pi i}{3}}$, $e^{-\frac{\pi i}{3}}$. Damit ist bewiesen:

Der absolute Betrag von $\varphi(t)$ hat in dem Bereiche T_0 seinen grössten Werth an den Stellen $t = e^{\frac{\pi i}{3}}$ und $t = e^{-\frac{\pi i}{3}}$, und es ist derselbe gleich $\operatorname{tg} \frac{\pi}{24}$.

Hiernach convergirt für jeden dem Bereiche T_0 angehörigen Werth von t die Reihe

$$\frac{1}{2} \varphi(t) + \frac{2}{2^5} \varphi(t)^5 + \frac{15}{2^9} \varphi(t)^9 + \frac{150}{2^{13}} \varphi(t)^{13} + \dots$$

so rasch, dass in der Praxis der Regel nach schon die drei ersten Glieder, in manchen Fällen sogar die zwei ersten den Werth der Function $\psi(t)$ in hinlänglicher Annäherung geben.

VII.

Setzt man in den Reihen, durch welche die Functionen $\mathfrak{S}_0(v|\tau)$, $\mathfrak{S}_1(v|\tau)$ u. s. w. definirt werden, unter ϵ eine der Zahlen $1, -1$ verstehend, $\epsilon + \tau$ für τ , so ergibt sich, dass die Functionen

$$\mathfrak{S}_0(v|\tau), \quad \mathfrak{S}_1(v|\tau), \quad \mathfrak{S}_2(v|\tau), \quad \mathfrak{S}_3(v|\tau)$$

beziehlich den Functionen

$$\mathfrak{S}_3(v|\epsilon + \tau), \quad i^{-\frac{\epsilon}{2}} \mathfrak{S}_1(v|\epsilon + \tau), \quad i^{-\frac{\epsilon}{2}} \mathfrak{S}_2(v|\epsilon + \tau), \quad \mathfrak{S}_0(v|\epsilon + \tau)$$

gleich sind.

Setzt man ferner in den Gleichungen (IV., (1.))

$$\sqrt[4]{q} = e^{\frac{\pi i}{4}}, \quad \sqrt[4]{q'} = e^{-\frac{\pi i}{4\tau}}, \quad u = \mathfrak{S}_3^2(0, q) \cdot v\pi, \quad ui = \mathfrak{S}_3^2(0, q') \cdot v'\pi,$$

drückt [mittels der Formeln (III., (6.))] $f(u, q), f_1(u, q), f_2(u, q)$ durch die Functionen $\mathfrak{S}(v\pi, q), \mathfrak{S}_1(v\pi, q), \dots, f(ui, q'), f_1(ui, q'), f_2(ui, q')$ durch $\mathfrak{S}(v'\pi, q'), \mathfrak{S}_1(v'\pi, q'), \dots$ aus, und bemerkt, dass nach den Formeln (IV., (6.))

$$\frac{\mathfrak{S}_3(0, q)}{\mathfrak{S}_2(0, q)} = \frac{\mathfrak{S}_3(0, q')}{\mathfrak{S}(0, q')}, \quad \frac{\mathfrak{S}(0, q)}{\mathfrak{S}_2(0, q)} = \frac{\mathfrak{S}_2(0, q')}{\mathfrak{S}(0, q')}, \quad \frac{\mathfrak{S}(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)} = \frac{\mathfrak{S}_2(0, q')}{\mathfrak{S}_3(0, q')},$$

$$\mathfrak{S}_3^2(0, q) = \frac{i}{\tau} \mathfrak{S}_3^2(0, q')$$

und somit

$$v' = -\frac{v}{\tau}$$

ist, so gelangt man zu dem folgenden Satze:

Der Quotient je zweier der Functionen

$$\mathfrak{S}_0(v|\tau), \mathfrak{S}_1(v|\tau), \mathfrak{S}_2(v|\tau), \mathfrak{S}_3(v|\tau)$$

ändert seinen Werth nicht, wenn man an Stelle dieser Functionen beziehlich die folgenden:

$$\mathfrak{S}_2\left(-\frac{v}{\tau} \middle| -\frac{1}{\tau}\right), \quad \frac{1}{i} \mathfrak{S}_1\left(-\frac{v}{\tau} \middle| -\frac{1}{\tau}\right), \quad \mathfrak{S}_0\left(-\frac{v}{\tau} \middle| -\frac{1}{\tau}\right), \quad \mathfrak{S}_3\left(-\frac{v}{\tau} \middle| -\frac{1}{\tau}\right)$$

setzt.

Jetzt setze man, wie oben (V.)

$$(1.) \quad \tau_1 = \frac{2\gamma\pi i + (2\delta + 1) \log \psi(k^2)}{(2\alpha + 1)\pi i + 2\beta \log \psi(k^2)}$$

und

$$(2.) \quad \left\{ \begin{array}{l} \tau_2 = \frac{1}{-\tau_1}, \quad \tau_3 = e + \tau_2 = \frac{1 - e\tau_1}{-\tau_1}, \quad \tau_4 = \frac{1}{-\tau_3} = \frac{\tau_1}{1 - e\tau_1}, \\ \tau_5 = e + \tau_4 = \frac{e}{1 - e\tau_1}, \quad \tau_6 = \frac{1}{-\tau_5} = -e + \tau_1, \end{array} \right.$$

$$(3.) \quad \left\{ \begin{array}{l} v_1 = \frac{u}{\pi \mathfrak{S}_3^2(0|\tau_1)}, \quad v_2 = -\frac{v_1}{\tau_1}, \quad v_3 = v_2 = -\frac{v_1}{\tau_1}, \\ v_4 = \frac{v_3}{\tau_3} = -\frac{v_1}{\tau_1 \tau_3}, \quad v_5 = ev_4 = \frac{-ev_1}{\tau_1 \tau_3}, \quad v_6 = \frac{v_5}{\tau_5} = \frac{-ev_1}{\tau_1 \tau_3 \tau_5}, \end{array} \right.$$

oder, da nach den Formeln (IV., (6.), (7.))

$$\begin{aligned} \mathfrak{S}_3^2(0|\tau_1) &= \frac{i}{\tau_1} \mathfrak{S}_3^2(0|\tau_2) = \frac{i}{\tau_1} \mathfrak{S}_0^2(0|\tau_3) \\ &= -\frac{1}{\tau_1\tau_3} \mathfrak{S}_2^2(0|\tau_4) = \frac{ei}{\tau_1\tau_3} \mathfrak{S}_2^2(0|\tau_5) = \frac{-e}{\tau_1\tau_3\tau_5} \mathfrak{S}_0^2(0|\tau_6) \end{aligned}$$

ist,

$$(4.) \quad \left\{ \begin{array}{l} v_1 = \frac{u}{\pi \mathfrak{S}_3^2(0|\tau_1)}, \quad v_2 = \frac{ui}{\pi \mathfrak{S}_3^2(0|\tau_2)}, \quad v_3 = \frac{ui}{\pi \mathfrak{S}_0^2(0|\tau_3)}, \\ v_4 = \frac{u}{\pi \mathfrak{S}_2^2(0|\tau_4)}, \quad v_5 = \frac{ui}{\pi \mathfrak{S}_2^2(0|\tau_5)}, \quad v_6 = \frac{u}{\pi \mathfrak{S}_0^2(0|\tau_6)}. \end{array} \right.$$

Dann erhält man, indem man in den Gleichungen (V., (9.)) die Functionen $\mathfrak{S}(x, q)$, $\mathfrak{S}_1(x, q)$, ... beziehlich in

$$\mathfrak{S}_0(v_1|\tau_1), \quad \mathfrak{S}_1(v_1|\tau_1), \quad \mathfrak{S}_2(v_1|\tau_1), \quad \mathfrak{S}_3(v_1|\tau_1)$$

verwandelt und diese mittels wiederholter Anwendung der beiden vorstehenden Sätze durch \mathfrak{S} -Functionen der Argumente

$$(v_2, \tau_2), \quad (v_3, \tau_3), \quad \dots \quad (v_6, \tau_6)$$

ersetzt, die nachstehenden Darstellungen der elliptischen Functionen $\sin \text{am}(u, k)$, $\cos \text{am}(u, k)$, $\Delta \text{am}(u, k)$, in denen $\varepsilon, \beta, \gamma, \sqrt[4]{k^2}, \sqrt[4]{1-k^2}$ dieselbe Bedeutung haben wie in den citirten Gleichungen (9.):

$$(5.) \quad i^{\varepsilon\gamma} \sqrt[4]{k^2} \cdot \sin \text{am}(u, k) = \frac{\mathfrak{S}_1(v_1|\tau_1)}{\mathfrak{S}_0(v_1|\tau_1)} = \frac{1}{i} \cdot \frac{\mathfrak{S}_1(v_2|\tau_2)}{\mathfrak{S}_2(v_2|\tau_2)} = \frac{1}{i} \cdot \frac{\mathfrak{S}_1(v_3|\tau_3)}{\mathfrak{S}_2(v_3|\tau_3)} \\ = \frac{\mathfrak{S}_1(v_4|\tau_4)}{\mathfrak{S}_0(v_4|\tau_4)} = i^{\frac{e}{2}-1} \cdot \frac{\mathfrak{S}_1(v_5|\tau_5)}{\mathfrak{S}_3(v_5|\tau_5)} = i^{\frac{e}{2}} \cdot \frac{\mathfrak{S}_1(v_6|\tau_6)}{\mathfrak{S}_3(v_6|\tau_6)},$$

$$(6.) \quad \frac{i^{\varepsilon(\beta+\gamma)} \sqrt[4]{k^2}}{\sqrt[4]{1-k^2}} \cdot \cos \text{am}(u, k) = \frac{\mathfrak{S}_2(v_1|\tau_1)}{\mathfrak{S}_0(v_1|\tau_1)} = \frac{\mathfrak{S}_0(v_2|\tau_2)}{\mathfrak{S}_2(v_2|\tau_2)} = i^{\frac{e}{2}} \cdot \frac{\mathfrak{S}_3(v_3|\tau_3)}{\mathfrak{S}_2(v_3|\tau_3)} \\ = i^{\frac{e}{2}} \cdot \frac{\mathfrak{S}_3(v_4|\tau_4)}{\mathfrak{S}_0(v_4|\tau_4)} = i^{\frac{e}{2}} \cdot \frac{\mathfrak{S}_0(v_5|\tau_5)}{\mathfrak{S}_3(v_5|\tau_5)} = i^{\frac{e}{2}} \cdot \frac{\mathfrak{S}_2(v_6|\tau_6)}{\mathfrak{S}_3(v_6|\tau_6)},$$

$$(7.) \quad \frac{i^{\varepsilon\beta}}{\sqrt[4]{1-k^2}} \cdot \Delta \text{am}(u, k) = \frac{\mathfrak{S}_3(v_1|\tau_1)}{\mathfrak{S}_0(v_1|\tau_1)} = \frac{\mathfrak{S}_3(v_2|\tau_2)}{\mathfrak{S}_2(v_2|\tau_2)} = i^{\frac{e}{2}} \cdot \frac{\mathfrak{S}_0(v_3|\tau_3)}{\mathfrak{S}_2(v_3|\tau_3)} \\ = i^{\frac{e}{2}} \cdot \frac{\mathfrak{S}_2(v_4|\tau_4)}{\mathfrak{S}_0(v_4|\tau_4)} = \frac{\mathfrak{S}_2(v_5|\tau_5)}{\mathfrak{S}_3(v_5|\tau_5)} = \frac{\mathfrak{S}_0(v_6|\tau_6)}{\mathfrak{S}_3(v_6|\tau_6)}.$$

Dabei ist zu bemerken, dass

$$v_3 = v_2, \quad v_5 = \epsilon v_4, \quad v_6 = v_1$$

ist.

Die Grössen τ_1, \dots, τ_6 , durch τ_1 ausgedrückt, haben die Gestalt

$$\frac{c + b\tau_1}{a + b\tau_1},$$

wo jede der Zahlen a, b, c, d einen der Werthe $0, 1, -1$ hat und die Relation $ab - bc = 1$ besteht. Durch $\tau = \frac{1}{\pi i} \log \psi(k^2)$ ausgedrückt erhalten sie also die Form

$$\frac{c + d\tau}{a + b\tau},$$

wo a, b, c, d ganze, durch die Gleichung

$$ad - bc = 1$$

mit einander verbundene Zahlen sind. Es ist zugleich leicht zu zeigen, dass umgekehrt, wenn a, b, c, d irgend vier, der vorstehenden Bedingungsgleichung genügende ganze Zahlen sind, der Ausdruck $\frac{c + d\tau}{a + b\tau}$ stets auf eine der 6 Formen

$$\tau_1, \quad \frac{1}{-\tau_1}, \quad \frac{1 - \epsilon\tau_1}{-\tau_1}, \quad \frac{\tau_1}{1 - \epsilon\tau_1}, \quad \frac{\epsilon}{1 - \epsilon\tau_1}, \quad -\epsilon + \tau_1$$

gebracht werden kann, wo τ_1 die Gestalt

$$\tau_1 = \frac{2\gamma + (2\delta + 1)\tau}{(2\alpha + 1) + 2\beta\tau}$$

hat und $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ ganze, durch die Gleichung

$$(2\alpha + 1)(2\delta + 1) - 4\beta\gamma = 1$$

mit einander verbundene Zahlen sind. Dabei kann ϵ nach Belieben gleich 1 oder gleich -1 gesetzt werden.

Nimmt man insbesondere $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ gleich 0 an, also

$$\tau_1 = \frac{1}{\pi i} \log \psi(k^2),$$

und bestimmt, zunächst unter der Voraussetzung, dass k^2 eine imaginäre Grösse und, wie oben, ϵ gleich 1 oder gleich -1 sei, je nachdem die zweite Coordinate von k^2 positiv oder negativ ist, mittels der Formeln (2.) die Grössen τ_2, \dots, τ_6 , so ergibt sich aus den Gleichungen (VI., (1.), (5.), (6.), (7.), (8.))

$$(8.) \quad \left\{ \begin{array}{lll} \tau_1 \pi i = \log \psi(k^2), & \tau_2 \pi i = \log \psi(1-k^2), & \tau_3 \pi i = \log \psi\left(\frac{k^2-1}{k^2}\right), \\ \tau_4 \pi i = \log \psi\left(\frac{1}{k^2}\right), & \tau_5 \pi i = \log \psi\left(\frac{1}{1-k^2}\right), & \tau_6 \pi i = \log \psi\left(\frac{k^2}{k^2-1}\right). \end{array} \right.$$

Man hat ferner

$$\log(k^2) = \log(-k^2) + \epsilon \pi i, \quad \log(1-k^2) = \log(k^2-1) - \epsilon \pi i,$$

und daher

$$(9.) \quad \sqrt[4]{k^2} = i^{\frac{\epsilon}{2}} \sqrt[4]{-k^2}, \quad \sqrt[4]{1-k^2} = i^{-\frac{\epsilon}{2}} \sqrt[4]{k^2-1}.$$

Man erhält also aus den Gleichungen (5.), (6.), (7.), wenn man jetzt wieder die Jacobi'schen Bezeichnungen einführt und

$$(10.) \quad \left\{ \begin{array}{lll} q = \psi(k^2), & q_1 = \psi(1-k^2), & q_2 = \psi\left(\frac{k^2-1}{k^2}\right), \\ q_3 = \psi\left(\frac{1}{k^2}\right), & q_4 = \psi\left(\frac{1}{1-k^2}\right), & q_5 = \psi\left(\frac{k^2}{k^2-1}\right); \end{array} \right.$$

$$(11.) \quad \left\{ \begin{array}{lll} x = \frac{u}{\mathfrak{S}_3^2(0, q)}, & x_1 = \frac{ui}{\mathfrak{S}_3^2(0, q_1)}, & x_2 = \frac{ui}{\mathfrak{S}_3^2(0, q_2)}, \\ x_3 = \frac{u}{\mathfrak{S}_3^2(0, q_3)}, & x_4 = \frac{ui}{\mathfrak{S}_3^2(0, q_4)}, & x_5 = \frac{u}{\mathfrak{S}_3^2(0, q_5)} \end{array} \right.$$

setzt — wo dann

$$(12.) \quad \left\{ \begin{array}{lll} q = -q_5, & q_2 = -q_1, & q_4 = -q_3 \\ x_2 = x_1, & x_4 = \epsilon x_3, & x_5 = x \end{array} \right.$$

ist —, sechs specielle Formel-Systeme, die in der nachstehenden Tabelle zusammengestellt sind.

In den drei ersten Columnen stehen unter $\sin \operatorname{am}(u, k)$, $\cos \operatorname{am}(u, k)$, $\Delta \operatorname{am}(u, k)$ die Zähler, und in der vierten Colonne der gemeinschaftliche Nenner der Brüche, durch welche diese Functionen in den sechs angegebenen Fällen ausgedrückt werden.

	$\sin \operatorname{am}(u, k)$	$\cos \operatorname{am}(u, k)$	$\Delta \operatorname{am}(u, k)$	
1.	$\frac{1}{\sqrt[4]{k^2}} \cdot \mathfrak{S}_1(x, q)$	$\frac{\sqrt[4]{1-k^2}}{\sqrt[4]{k^2}} \cdot \mathfrak{S}_2(x, q)$	$\sqrt[4]{1-k^2} \cdot \mathfrak{S}_3(x, q)$	$/ \mathfrak{S}(x, q)$
2.	$\frac{1}{i \sqrt[4]{k^2}} \cdot \mathfrak{S}_1(x_1, q_1)$	$\frac{\sqrt[4]{1-k^2}}{\sqrt[4]{k^2}} \cdot \mathfrak{S}(x_1, q_1)$	$\sqrt[4]{1-k^2} \cdot \mathfrak{S}_3(x_1, q_1)$	$/ \mathfrak{S}_2(x_1, q_1)$
3.	$\frac{1}{i \sqrt[4]{k^2}} \cdot \mathfrak{S}_1(x_2, q_2)$	$\frac{\sqrt[4]{k^2-1}}{\sqrt[4]{k^2}} \cdot \mathfrak{S}_3(x_2, q_2)$	$\sqrt[4]{k^2-1} \cdot \mathfrak{S}(x_2, q_2)$	$/ \mathfrak{S}_2(x_2, q_2)$
4.	$\frac{1}{\sqrt[4]{k^2}} \cdot \mathfrak{S}_1(x_3, q_3)$	$\frac{\sqrt[4]{k^2-1}}{\sqrt[4]{k^2}} \cdot \mathfrak{S}_3(x_3, q_3)$	$\sqrt[4]{k^2-1} \cdot \mathfrak{S}_2(x_3, q_3)$	$/ \mathfrak{S}(x_3, q_3)$
5.	$\frac{1}{i \sqrt[4]{-k^2}} \cdot \mathfrak{S}_1(x_4, q_4)$	$\frac{\sqrt[4]{1-k^2}}{\sqrt[4]{-k^2}} \cdot \mathfrak{S}(x_4, q_4)$	$\sqrt[4]{1-k^2} \cdot \mathfrak{S}_2(x_4, q_4)$	$/ \mathfrak{S}_3(x_4, q_4)$
6.	$\frac{1}{\sqrt[4]{-k^2}} \cdot \mathfrak{S}_1(x_5, q_5)$	$\frac{\sqrt[4]{1-k^2}}{\sqrt[4]{-k^2}} \cdot \mathfrak{S}_2(x_5, q_5)$	$\sqrt[4]{1-k^2} \cdot \mathfrak{S}(x_5, q_5)$	$/ \mathfrak{S}_3(x_5, q_5)$

Diese Ausdrücke der elliptischen Functionen gelten nun auch für reelle Werthe von k^2 , wenn die vorkommenden Wurzelgrößen richtig bestimmt werden, worüber ich Folgendes bemerke.

Es ist oben angegeben worden, wie man für einen gegebenen reellen Werth von k^2 die Wurzelgröße $\sqrt[4]{1-k^2}$, von welcher der Werth von $q = \psi(k^2)$ abhängt, sowie die Werthe von $\sqrt[4]{k^2}$, $\sqrt[4]{q}$ zu bestimmen habe, damit die Gleichungen

$$\frac{\mathfrak{S}_2(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)} = \sqrt[4]{k^2}, \quad \frac{\mathfrak{S}(0, q)}{\mathfrak{S}_3(0, q)} = \sqrt[4]{1-k^2}$$

bestehen. Auf dieselbe Weise fixire man, wenn an die Stelle von k^2 die

Grössen

$$(13.) \quad k_1^2 = 1 - k^2, \quad k_2^2 = \frac{k^2 - 1}{k^2}, \quad k_3^2 = \frac{1}{k^2}, \quad k_4^2 = \frac{1}{1 - k^2}, \quad k_5^2 = \frac{-k^2}{1 - k^2}$$

treten, für $\nu = 1, 2, 3, 4, 5$ die Werthe von

$$\sqrt[4]{1 - k_\nu^2}, \quad \sqrt[4]{k_\nu^2}, \quad q_\nu, \quad \sqrt[4]{q_\nu},$$

so dass man

$$(14.) \quad \frac{\mathfrak{S}_2(0, q_\nu)}{\mathfrak{S}_3(0, q_\nu)} = \sqrt[4]{k_\nu^2}, \quad \frac{\mathfrak{S}(0, q_\nu)}{\mathfrak{S}_3(0, q_\nu)} = \sqrt[4]{1 - k_\nu^2} \quad (\nu = 1, 2, 3, 4, 5)$$

hat. Setzt man andererseits in den Formeln der vorstehenden Tabelle $u = 0$ und bestimmt sodann die Werthe, welche $\frac{\mathfrak{S}_2(0, q_\nu)}{\mathfrak{S}_3(0, q_\nu)}, \frac{\mathfrak{S}(0, q_\nu)}{\mathfrak{S}_3(0, q_\nu)}$ nach diesen Formeln haben müssen, so ergibt sich

$$(15.) \quad \left\{ \begin{array}{ll} \sqrt[4]{k_1^2} = \sqrt[4]{1 - k^2}, & \sqrt[4]{1 - k_1^2} = \sqrt[4]{k^2} \\ \sqrt[4]{k_2^2} = \sqrt{\frac{k^2 - 1}{k^2}} = \frac{\sqrt[4]{k^2 - 1}}{\sqrt[4]{k^2}}, & \sqrt[4]{1 - k_2^2} = \sqrt{\frac{1}{k^2}} = \frac{1}{\sqrt[4]{k^2}} \\ \sqrt[4]{k_3^2} = \sqrt{\frac{1}{k^2}} = \frac{1}{\sqrt[4]{k^2}}, & \sqrt[4]{1 - k_3^2} = \sqrt{\frac{k^2 - 1}{k^2}} = \frac{\sqrt[4]{k^2 - 1}}{\sqrt[4]{k^2}} \\ \sqrt[4]{k_4^2} = \sqrt{\frac{1}{1 - k^2}} = \frac{1}{\sqrt[4]{1 - k^2}}, & \sqrt[4]{1 - k_4^2} = \sqrt{\frac{-k^2}{1 - k^2}} = \frac{\sqrt[4]{-k^2}}{\sqrt[4]{1 - k^2}} \\ \sqrt[4]{k_5^2} = \sqrt{\frac{-k^2}{1 - k^2}} = \frac{\sqrt[4]{-k^2}}{\sqrt[4]{1 - k^2}}, & \sqrt[4]{1 - k_5^2} = \sqrt{\frac{1}{1 - k^2}} = \frac{1}{\sqrt[4]{1 - k^2}}. \end{array} \right.$$

Durch diese Gleichungen werden also die Werthe gegeben, die in den Formeln (1.), (2.) der Tabelle die Grössen $\sqrt[4]{k^2}, \sqrt[4]{1 - k^2}$, in den Formeln (3.), (4.) ferner $\sqrt[4]{k^2 - 1}, \sqrt[4]{k^2}$, und in den Formeln (5.), (6.) $\sqrt[4]{-k^2}, \sqrt[4]{1 - k^2}$ haben müssen, wobei es nun keinen Unterschied macht, ob k^2 imaginär oder reell ist.

Gehört die Grösse $t = k^2$ dem oben (VI.) mit T_0 bezeichneten Bereiche an, so wird man von den vorstehenden Ausdrücken der elliptischen Functionen am zweckmässigsten die unter (1.) aufgestellten anwenden, weil dann der absolute Betrag von q niemals die Grenze

$$\sum_{n=0}^{\infty} \gamma_n \left(\operatorname{tg} \frac{\pi}{24} \right)^{4n+1}$$

überschreitet und deshalb die \mathfrak{S} -Reihen sehr rasch convergiren.

Gehört aber $t = k^2$ dem Bereiche T_ν an ($\nu = 1, 2, 3, 4, 5$), so liegt k_ν^2 im Bereiche T_0 , und man gebraucht dann zur Berechnung der elliptischen Functionen am zweckmässigsten die in der $(\nu + 1)^{\text{ten}}$ Horizontalreihe der Tabelle angegebenen Ausdrücke.

Ist k^2 reell und liegt im Bereiche T_ν ($\nu = 0, \dots 5$), so sind in den unter No. $(\nu + 1)$ aufgestellten Formeln q_ν und die vorkommenden Wurzelgrössen sämtlich reelle und positive Grössen.

Es ist noch zu bemerken, dass aus den Gleichungen

$$\mathfrak{S}_3(0, q_\nu) = \mathfrak{S}_3(0, q_\nu^4) + \mathfrak{S}_2(0, q_\nu^4), \quad \frac{\mathfrak{S}_2(0, q_\nu^4)}{\mathfrak{S}_3(0, q_\nu^4)} = \frac{1 - \sqrt[4]{1 - k_\nu^2}}{1 + \sqrt[4]{1 - k_\nu^2}}$$

sich die folgenden Ausdrücke von $\mathfrak{S}_3(0, q_\nu)$, $\mathfrak{S}(0, q_\nu)$, $\mathfrak{S}_2(0, q_\nu)$ ergeben:

$$(16.) \quad \left\{ \begin{aligned} \mathfrak{S}_3(0, q_\nu) &= \frac{2}{1 + \sqrt[4]{1 - k_\nu^2}} \cdot \mathfrak{S}_3(0, q_\nu^4) = \frac{2}{1 + \sqrt[4]{1 - k_\nu^2}} \cdot (1 + 2q_\nu^4 + 2q_\nu^{16} + \dots) \\ \mathfrak{S}(0, q_\nu) &= \frac{2\sqrt[4]{1 - k_\nu^2}}{1 + \sqrt[4]{1 - k_\nu^2}} \cdot \mathfrak{S}_3(0, q_\nu^4) = \frac{2\sqrt[4]{1 - k_\nu^2}}{1 + \sqrt[4]{1 - k_\nu^2}} \cdot (1 + 2q_\nu^4 + 2q_\nu^{16} + \dots) \\ \mathfrak{S}_2(0, q_\nu) &= \frac{2\sqrt[4]{k_\nu^2}}{1 + \sqrt[4]{1 - k_\nu^2}} \cdot \mathfrak{S}_3(0, q_\nu^4) = \frac{2\sqrt[4]{k_\nu^2}}{1 + \sqrt[4]{1 - k_\nu^2}} \cdot (1 + 2q_\nu^4 + 2q_\nu^{16} + \dots). \end{aligned} \right.$$

Man erhält also insbesondere für die in den Gleichungen (11.) vorkommenden Grössen $\mathfrak{S}_3(0, q)$, \dots $\mathfrak{S}(0, q_5)$:

$$(17.) \quad \left\{ \begin{aligned} \mathfrak{S}_3(0, q) &= \frac{2}{1 + \sqrt[4]{1 - k^2}} \cdot (1 + 2q^4 + 2q^{16} + \dots) \\ \mathfrak{S}_3(0, q_1) &= \frac{2}{1 + \sqrt[4]{k^2}} \cdot (1 + 2q_1^4 + 2q_1^{16} + \dots) \\ \mathfrak{S}(0, q_2) &= \frac{2}{1 + \sqrt[4]{k^2}} \cdot (1 + 2q_2^4 + 2q_2^{16} + \dots) \\ \mathfrak{S}_2(0, q_3) &= \frac{2}{\sqrt[4]{k^2} - 1 + \sqrt[4]{k^2}} \cdot (1 + 2q_3^4 + 2q_3^{16} + \dots) \\ \mathfrak{S}_2(0, q_4) &= \frac{2}{\sqrt[4]{1 - k^2} + \sqrt[4]{-k^2}} \cdot (1 + 2q_4^4 + 2q_4^{16} + \dots) \\ \mathfrak{S}(0, q_5) &= \frac{2}{1 + \sqrt[4]{1 - k^2}} \cdot (1 + 2q_5^4 + 2q_5^{16} + \dots). \end{aligned} \right.$$

ZUR THEORIE DER AUS n HAUPT-EINHEITEN GEBILDETEN
COMPLEXEN GRÖSSEN.

(Auszug aus einem an H. A. Schwarz gerichteten Briefe, der Königlichen Gesellschaft
der Wissenschaften zu Göttingen mitgetheilt am 1. December 1883.)

Berlin, 19.—27. Juni 1883.

. Ich komme jetzt zur Beantwortung Ihres Briefes vom 9. d. M.
Die Fragen, die derselbe enthält, lassen sich, wie ich glaube, in völlig be-
friedigender Weise erledigen.

In der Selbstanzeige seiner zweiten Abhandlung über die biquadratischen
Reste schliesst Gauss, nachdem er seine Auffassungsweise des Begriffes und
der Theorie der aus zwei Haupteinheiten $(1, i)$ gebildeten complexen Grössen
dargelegt hat, mit folgender Bemerkung:

»Der Verfasser hat sich vorbehalten, den Gegenstand, welcher in der
vorliegenden Abhandlung eigentlich nur gelegentlich berührt ist, künftig voll-
ständiger zu bearbeiten, wo dann auch die Frage, warum die Relatio-
nen zwischen Dingen, die eine Mannigfaltigkeit von mehr als
zwei Dimensionen darbieten, nicht noch andere in der allgemei-
nen Arithmetik zulässige Arten von Grössen liefern können, ihre
Beantwortung finden wird.« (Gauss Werke, Band II. S. 178.)

Aus dieser Bemerkung scheint mir hervorzugehen, dass Gauss Unter-
suchungen darüber angestellt habe, ob sich für complexe Grössen mit n Haupt-
einheiten die Grundoperationen, Addition, Multiplication, Subtraction und
Division so definiren lassen, dass die im Gebiete der sogenannten reellen
Zahlgrössen (der Grössen mit einer Haupteinheit) bestehenden arithmetischen

Gesetze ihre Gültigkeit behalten, und dass er dabei zu der Überzeugung gekommen sei, es werde dies unmöglich, sobald $n > 2$.

Um über diesen Punkt ins Klare zu kommen, habe ich bereits vor Jahren*) folgende Betrachtungen angestellt.

Nach Aufstellung des Begriffes einer aus n Haupteinheiten gebildeten complexen Grösse ist zunächst zu untersuchen, ob und wie sich für ein Gebiet solcher Grössen, d. h. für die Gesamtheit der aus denselben Haupteinheiten (e_1, e_2, \dots, e_n) gebildeten Grössen die arithmetischen Grundoperationen so definiren lassen, dass erstens, wenn a, b, c, \dots beliebige Grössen des Gebietes sind,

$$a + b, \quad a - b, \quad ab, \quad \frac{a}{b}$$

ebenfalls dem Gebiete angehören, und dass zweitens die in den folgenden Gleichungen ausgesprochenen Gesetze gelten:

$$(1.) \left\{ \begin{array}{l} a + b = b + a \\ (a + b) + c = (a + c) + b \\ (a - b) + b = a, \end{array} \right. \quad (2.) \left\{ \begin{array}{l} ab = ba \\ (ab)c = (ac)b \dots \dots \\ a(b + c) = ab + ac \\ \frac{a}{b}b = a. \end{array} \right.$$

Es mögen im Folgenden mit den griechischen Buchstaben Zahlgrössen bezeichnet werden, die aus einer unbenannten Haupteinheit gebildet sind, so kann jede Grösse des betrachteten Gebietes in der Form

$$\xi_1 e_1 + \xi_2 e_2 + \dots + \xi_n e_n$$

dargestellt werden, wenn man unter $\xi_a e_a$ die Grösse versteht, die man dadurch erhält, dass man e_a an die Stelle der unbenannten Haupteinheit von ξ_a setzt. Die Zahlgrössen ξ_a sollen die Coordinaten der betrachteten complexen Grösse genannt werden. Dies vorausgeschickt, sei

$$a = \sum_a \alpha_a e_a, \quad b = \sum_a \beta_a e_a, \quad (a = 1, 2, \dots, n)$$

so ergibt sich aus den Gleichungen (1.), dass $a + b, a - b$ zu definiren sind durch die Formeln

$$(3.) \quad a + b = \sum_a (\alpha_a + \beta_a) e_a, \quad a - b = \sum_a (\alpha_a - \beta_a) e_a \quad (a = 1, 2, \dots, n).$$

*) Im Wintersemester 1861—62 habe ich zum ersten Male über diesen Gegenstand etwas vorgetragen.

Ferner folgt aus (2.)

$$(4.) \quad ab = \sum_{b,c} (\alpha_b \beta_c) (e_b e_c), \quad (b, c = 1, 2, \dots, n)$$

oder, da $e_b e_c$ die Form

$$(5.) \quad e_b e_c = \sum_a \varepsilon_{a,b,c} e_a$$

haben soll:

$$(6.) \quad ab = \sum_{a,b,c} (\varepsilon_{a,b,c} \alpha_b \beta_c) e_a.$$

Aus den Gleichungen

$$(7.) \quad e_b e_c = e_c e_b, \quad (e_b e_c) e_b = (e_b e_b) e_c \quad (b, c, b = 1, 2, \dots, n)$$

ergibt sich nun eine Anzahl von Bedingungsgleichungen, denen die Grössen $\varepsilon_{a,b,c}$ genügen müssen, welche hinzuschreiben für das Folgende jedoch nicht erforderlich ist. Man überzeugt sich aber leicht, dass denselben durch unendlich viele Werthsysteme der Grössen $\varepsilon_{a,b,c}$ Genüge geschehen kann. Wählt man irgend eins dieser Werthsysteme aus, so wird durch die Gleichung (6.) das Product ab stets so definirt, dass die Gleichungen

$$ab = ba, \quad (ab)c = (ac)b, \quad a(b+c) = ab+ac$$

bestehen. Um dann $\frac{a}{b}$ zu definiren, setze man

$$\frac{a}{b} = \sum_a \gamma_a e_a; \quad (a = 1, 2, \dots, n)$$

dann sind $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ so zu bestimmen, dass die Gleichungen

$$(8.) \quad \alpha_a = \sum_{b,c} \varepsilon_{a,b,c} \beta_b \gamma_c \quad (a = 1, 2, \dots, n)$$

bestehen.

Hat nun die Determinante

$$\varepsilon = \left| \sum_b \varepsilon_{a,b,c} \beta_b \right| \quad (a, b, c = 1, 2, \dots, n)$$

einen von Null verschiedenen Werth, so sind durch die vorstehenden Gleichungen die Coordinaten $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ eindeutig bestimmt, und es ist demnach die Division von a durch b möglich. Ist aber $\varepsilon = 0$, so ist die Division nur dann ausführbar, wenn unter den Grössen $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ eine bestimmte Relation stattfindet; es hat aber dann der Quotient $\frac{a}{b}$ unendlich viele Werthe.

Hiernach ist die Wahl der Grössen $\varepsilon_{a,b,c}$ der Beschränkung zu unterwerfen, dass die in Rede stehende Determinante nicht identisch, d. h. für beliebige Werthe von $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ verschwinden darf. Aber, wenn diese Bedingung erfüllt ist, kann es doch specielle Grössen b geben, für welche die zugehörige Determinante verschwindet — eine genauere Untersuchung zeigt sogar, dass solche Grössen stets existiren, sobald $n > 2$ ist —,*) worauf jedoch hier noch nicht eingegangen zu werden braucht. Eine derartige Grösse b ist dadurch charakterisirt, dass sich ihr, und zwar auf unendlich viele Arten, eine andere Grösse c , die nicht gleich Null ist, so zugesellen lässt, dass

$$bc = 0$$

ist; ich will sie deshalb einen »Theiler der Null« nennen, und diese Benennung auch auf den Fall ausdehnen, wo sie selbst den Werth Null hat. Es ist klar, dass ein Theiler der Null wieder einen solchen giebt, wenn er mit einer beliebigen Grösse multiplicirt wird.

Hiernach wird die Gleichung

$$a + bx = 0$$

durch unendlich viele Werthe von x befriedigt, wenn a, b die Form

$$a = ka', \quad b = kb'$$

haben und k ein Theiler der Null ist, b' aber nicht. Denn dann kann man, wenn l irgend ein solcher Theiler der Null ist, der mit k multiplicirt das Product 0 giebt, x so bestimmen, dass $a' + b'x = l$ ist, und hat dann

$$k(a' + b'x) = kl = 0.$$

Ebenso kann eine algebraische Gleichung beliebigen Grades

$$a + bx + \dots + hx^m = 0$$

unendlich viele Wurzeln besitzen, wenn ihre Coefficienten (a, b, \dots, h) die Form

$$a = ka', \quad b = kb', \quad \dots \quad h = kh'$$

haben und k ein Theiler der Null ist. Dazu brauchen bloss die Grössen

*) Auch in dem Falle, wo $n = 2$, kann es solche Grössen geben, wenn man bei der Definition der Multiplication die Grössen $\varepsilon_{a,b,c}$ den angegebenen Bedingungen entsprechend, im Übrigen aber nach Willkür annimmt.

a', b', \dots, h' so beschaffen zu sein, dass sich die Gleichung

$$a' + b'x + \dots + h'x^m = l$$

für unendlich viele Werthe von l , für welche $kl = 0$ ist, lösen lässt.

Die Existenz der »Theiler der Null«, welche nicht gleich Null sind, scheint also einen wesentlichen Unterschied zwischen der Arithmetik der aus mehreren Haupteinheiten gebildeten Grössen und der gewöhnlichen Arithmetik zu begründen. Indessen, da es im Gebiete der aus einer Haupteinheit gebildeten Grössen keinen anderen Theiler der Null giebt, als diese selbst, so ist der Satz, dass in der Arithmetik der allgemeinen complexen Grössen eine algebraische Gleichung von der angegebenen Beschaffenheit unendlich viele Wurzeln haben könne, eine naturgemäss begründete Analogie zu dem in der gewöhnlichen Arithmetik geltenden, dass eine algebraische Gleichung unendlich viele Wurzeln hat, wenn alle ihre Coefficienten gleich Null sind. Und diese Analogie würde eine vollkommene sein, und die Arithmetik der allgemeinen complexen Grössen mit der Arithmetik der aus einer Haupteinheit gebildeten, so weit als es überhaupt möglich ist, in Einklang gebracht werden, wenn es sich herausstellte, dass im Allgemeinen, d. h. wenn bei der Festsetzung des Multiplicationsverfahrens nur specielle — bestimmt anzugebende — Werthsysteme der Grössen $\varepsilon_{a,b,c}$ ausgeschlossen werden, eine algebraische Gleichung nur in dem Falle, wo alle ihre Coefficienten aus einem und demselben Theiler der Null durch Multiplication desselben mit beliebigen Grössen hervorgehen, unendlich viele Wurzeln haben könne.

Dies verhält sich aber in der That so. —

Angenommen wird also zunächst, dass die vorhin mit ε bezeichnete Determinante nicht identisch gleich Null sei. Daraus ergibt sich die Existenz einer Grösse e_0 von der Eigenschaft, dass $e_0 a = a e_0 = a$ ist für jeden Werth von a .*)

Nun sei

$$x = \xi_1 e_1 + \xi_2 e_2 + \dots + \xi_n e_n$$

eine Grösse des betrachteten Gebietes mit unbestimmten Coordinaten $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$,

*) Siehe die Anmerkungen auf Seite 332.

und es werde x^v auf die Form

$$(9.) \quad x^v = \xi_1^{(v)} e_1 + \xi_2^{(v)} e_2 + \dots + \xi_n^{(v)} e_n \quad (v = 1, 2, \dots, n)$$

gebracht. Angenommen nun, es sei die Determinante

$$|\xi_\mu^{(v)}| \quad (\mu, v = 1, 2, \dots, n)$$

identisch gleich Null, so lässt sich aus den Gleichungen (9.) eine andere von der Form

$$X_0 x^{m+1} + X_1 x^m + \dots + X_m x = 0$$

ableiten, wo $m < n$ und die Coefficienten X_μ ganze Functionen von $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ sind, von denen X_0 nicht identisch gleich Null ist.

Man lege nun den Grössen $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ bestimmte Werthe $\xi'_1, \xi'_2, \dots, \xi'_n$ bei, wodurch X_μ den Werth X'_μ erhalte. Dann existiren, wenn man von particulären Werthsystemen der Grössen ξ'_v absieht, unendlich viele Werthsysteme $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$, für welche die Gleichungen

$$\frac{X_1}{X_0} = \frac{X'_1}{X'_0}, \quad \dots \quad \frac{X_m}{X_0} = \frac{X'_m}{X'_0}$$

bestehen.*) Setzt man daher

$$a_\mu = X'_\mu e_0, \quad (\mu = 0, 1, 2, \dots, m)$$

so hat die Gleichung

$$a_0 x^{m+1} + a_1 x^m + \dots + a_m x = 0$$

unendlich viele Wurzeln, ohne dass ihre Coefficienten sämmtlich Theiler der Null sind.

Die Determinante

$$|\xi_\mu^{(v)}| \quad (\mu, v = 1, 2, \dots, n)$$

ist eine homogene ganze Function der Grössen $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ und im Allgemeinen nicht identisch gleich Null, wie man leicht nachweisen kann.***) Ihre Coefficienten können mithin nur für specielle Werthsysteme der Grössen $\epsilon_{a,b,c}$ verschwinden, und diese müssen also ausgeschlossen werden, wenn der Forderung, dass eine algebraische Gleichung nur in dem besprochenen Falle solle unendlich viele Wurzeln haben können, genügt werden soll.

*) Siehe die Anmerkung auf Seite 332.

**) Siehe die Anmerkung auf Seite 337.

Dies vorausgesetzt, gebe man den Coordinaten ξ_μ irgend welche bestimmten Werthe, für welche die in Rede stehende Determinante einen von Null verschiedenen Werth und zugleich x einen Werth g erhält, der nicht ein Theiler der Null ist. Dann lassen sich die Grössen $e_1, e_2, \dots e_n$ in der Form

$$(10.) \quad e_a = \sum_b \alpha_{a,b} g^b \quad (b = 1, 2, \dots n)$$

darstellen, und man erhält, wenn man auch g^{n+1} bildet, eine Gleichung

$$(11.) \quad g^{n+1} + \varepsilon_1 g^n + \varepsilon_2 g^{n-1} + \dots + \varepsilon_n g = 0$$

oder

$$(11a.) \quad g^n + \varepsilon_1 g^{n-1} + \varepsilon_2 g^{n-2} + \dots + \varepsilon_n e_0 = 0.$$

Setzt man nun, unter n irgend eine ganze positive Zahl verstehend,

$$(12.) \quad g_n = g^n, \quad g_0 = e_0,$$

so lässt sich jede Grösse a des betrachteten Gebietes in der Form

$$(13.) \quad a = \sum_a \alpha_a g_a \quad (a = 0, 1, \dots n-1)$$

darstellen. Dann ist

$$(14.) \quad \left(\sum_a \alpha_a g_a\right) \left(\sum_a \beta_a g_a\right) = \sum_{b,c} (\alpha_b \beta_c) g_{b+c}, \quad (b, c = 0, 1, \dots n-1)$$

und mittels der aus (11a.) sich ergebenden Gleichungen

$$g_{n+n} + \varepsilon_1 g_{n+n-1} + \varepsilon_2 g_{n+n-2} + \dots + \varepsilon_n g_n = 0 \quad (n = 0, 1, \dots \infty)$$

kann dann das Product auf die Form

$$\sum_a \gamma_a g_a \quad (a = 0, 1, \dots n-1)$$

gebracht werden.

Führt man nun die Grössen $g_0, g_1, \dots g_{n-1}$ statt der Grössen $e_1, e_2, \dots e_n$ als Haupteinheiten ein, so erhält man ein vereinfachtes Multiplicationsverfahren, bei welchem jede der Grössen $\varepsilon_{a,b,c}$ eine ganze Function der Grössen $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots \varepsilon_n$ ist, oder auch einen der Werthe 0, 1 hat. Dasselbe lässt sich nun auch folgendermassen formuliren.

Man verstehe unter ξ eine unbestimmte Grösse mit einer unbenannten Haupteinheit und setze

$$f(\xi) = \xi^n + \varepsilon_1 \xi^{n-1} + \varepsilon_2 \xi^{n-2} + \dots + \varepsilon_n.$$

Ferner werde, wenn

$$a = \sum_a \alpha_a g_a \quad (a = 0, 1, \dots, n-1)$$

ist, die Function

$$\sum_a \alpha_a \xi^a$$

als die zu a gehörige Function von ξ bezeichnet, sowie umgekehrt a die zu dieser Function gehörige Grösse genannt. Dann lässt sich das Multiplicationsverfahren kurz so ausdrücken:

Es seien $\varphi(\xi)$, $\psi(\xi)$ die zu zwei gegebenen Grössen a , b gehörigen Functionen, $\chi(\xi)$ der Rest, welcher bei der Division des Productes $\varphi(\xi) \cdot \psi(\xi)$ durch $f(\xi)$ bleibt, so dass man

$$\varphi(\xi) \cdot \psi(\xi) = \mathfrak{D}(\xi) \cdot f(\xi) + \chi(\xi)$$

hat — wo $\mathfrak{D}(\xi)$, $\chi(\xi)$ ganze Functionen der Grösse ξ von nicht höherem als beziehlich dem $(n-2)^{\text{ten}}$ und $(n-1)^{\text{ten}}$ Grade sind —, und c die zu $\chi(\xi)$ gehörige Grösse, so ist

$$ab = c.$$

Umgekehrt lässt sich leicht zeigen, dass die in den Gleichungen

$$ab = ba, \quad (ab)c = (ac)b, \quad a(b+c) = ab+ac$$

ausgesprochenen Gesetze der Multiplication bestehen, wenn man nach willkürlicher Annahme der Grössen $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$ das angegebene Multiplicationsverfahren anwendet. Dasselbe lässt sich übrigens unverändert auch auf ein Product von mehr als zwei Factoren anwenden.

Die Function $f(\xi)$ werde in Factoren ersten oder zweiten Grades mit reellen Coefficienten zerlegt; diese seien $f_1(\xi), f_2(\xi), \dots, f_r(\xi)$, und in jedem derselben sei der Coefficient der höchsten Potenz von ξ gleich Eins.

Angenommen nun, es seien unter diesen Factoren gleiche vorhanden und es komme z. B. der Factor $f_1(\xi)$ λ -mal vor, so setze man

$$\begin{aligned} f(\xi) &= f_1^\lambda(\xi) \cdot F(\xi), \\ \varphi(\xi) &= f_1(\xi) \cdot F(\xi) \cdot \varphi_1(\xi), \end{aligned}$$

unter $\varphi_1(\xi)$ eine ganze Function mit willkürlich anzunehmenden reellen Coefficienten verstehend, deren Grad kleiner ist als der von $f_1^{\lambda-1}(\xi)$ — wo dann, wenn $\lambda = 2$ und $f_1(\xi)$ vom ersten Grade ist, $\varphi_1(\xi)$ auf eine Constante sich

reducirt —, so ist

$$\varphi^\lambda(\xi) \text{ durch } f(\xi)$$

theilbar. Es ergibt sich aber aus dem angegebenen Multiplicationsverfahren, dass ein Product beliebig vieler Factoren den Werth Null hat, wenn das Product der zugehörigen Functionen durch $f(\xi)$ theilbar ist. Folglich hat man, wenn x die zu $\varphi(\xi)$ gehörige complexe Grösse ist,

$$x^\lambda = 0.$$

Diese Gleichung besteht also für unendlich viele Werthe von x .

Wenn also für die Arithmetik der aus n Haupteinheiten gebildeten Grössen gelten soll, dass ausschliesslich algebraische Gleichungen von der oben angegebenen Beschaffenheit möglicherweise unendlich viele Wurzeln haben, so müssen von den Werthsystemen der Grössen $\varepsilon_{a,b,c}$, welche den aus den Gleichungen (7.) sich ergebenden Bedingungsgleichungen genügen, ausser den bereits angegebenen noch alle diejenigen ausgeschlossen werden, bei denen für irgend eine Grösse g die Grössen $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ solche Werthe erhalten, dass die Discriminante der Gleichung

$$\xi^n + \varepsilon_1 \xi^{n-1} + \varepsilon_2 \xi^{n-2} + \dots + \varepsilon_n = 0$$

verschwindet.

Es lässt sich aber nachweisen, dass die in Rede stehende Forderung stets befriedigt wird, wenn für ein bestimmtes Werthsystem der Grössen $\varepsilon_{a,b,c}$ die folgenden Bedingungen erfüllt werden.

Aus den Gleichungen (9.) erhält man für jede Grösse

$$x = \sum_a \xi_a e_a \quad (a = 1, 2, \dots, n)$$

eine Gleichung

$$X_0 x^{n+1} + X_1 x^n + \dots + X_n x = 0,$$

wo

$$X_0 = |\xi_\mu^{(\nu)}| \quad (\mu, \nu = 1, 2, \dots, n)$$

und die Coefficienten X_1, \dots, X_n ebenso wie X_0 homogene ganze Functionen von $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ sind. Dann sind von den fraglichen Werthsystemen der Grössen $\varepsilon_{a,b,c}$ nur diejenigen auszuschliessen, für welche entweder die oben mit ε bezeichnete Determinante, oder X_0 , oder endlich die Discriminante der Gleichung

$$X_0 \xi^n + X_1 \xi^{n-1} + \dots + X_n = 0$$

identisch verschwindet.

Denn man wähle aus den übrigen Systemen irgend eins aus und gebe den Coordinaten $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ bestimmte Werthe, der Art dass weder ε , noch X_0 , noch die genannte Discriminante gleich Null wird, setze

$$(15.) \quad g = \sum_a \xi_a e_a, \quad g_0 = \frac{g}{g}, \quad g_n = g^n, \quad \varepsilon_a = \frac{X_a}{X_0},$$

und definire die Multiplication auf die vorhin angegebene Weise mit Hülfe der Function

$$f(\xi) = \xi^n + \varepsilon_1 \xi^{n-1} + \dots + \varepsilon_n.$$

Den Functionen, welche zu den mit einander zu multiplicirenden Grössen gehören, gebe man aber eine andere Form. Unter den vorhin mit $f_1(\xi), f_2(\xi), \dots, f_r(\xi)$ bezeichneten Factoren giebt es jetzt weder gleiche, noch solche, die einen gemeinschaftlichen Theiler haben; man kann also dem Quotienten $\frac{\varphi(\xi)}{f(\xi)}$, wenn $\varphi(\xi)$ eine beliebige ganze Function von nicht höherem als dem $(n-1)^{\text{ten}}$ Grade mit reellen Coefficienten ist, die Gestalt

$$(16.) \quad \frac{\varphi(\xi)}{f(\xi)} = \frac{\varphi_1(\xi)}{f_1(\xi)} + \frac{\varphi_2(\xi)}{f_2(\xi)} + \dots + \frac{\varphi_r(\xi)}{f_r(\xi)}$$

geben, in der Art, dass $\varphi_\mu(\xi)$ eine reelle Constante oder eine ganze lineare Function von ξ mit reellen Coefficienten ist, jenachdem $f_\mu(\xi)$ vom ersten oder zweiten Grade ist. In dieser Form wollen wir uns fortan $\varphi(\xi)$ dargestellt denken. Die Gesammtheit der Grössen, für welche die zugehörige Function von ξ die Form

$$\frac{f(\xi)}{f_\mu(\xi)} \varphi_\mu(\xi)$$

hat, und die mit \mathfrak{G}_μ bezeichnet werde, bildet nun eine Mannigfaltigkeit von einer oder von zwei Dimensionen, jenachdem $f_\mu(\xi)$ vom ersten oder zweiten Grade ist, indem alle in ihr enthaltenen Grössen im ersten Falle aus der zu $\frac{f(\xi)}{f_\mu(\xi)}$ gehörigen Grösse, im anderen aber aus den zu $\frac{f(\xi)}{f_\mu(\xi)}, \frac{\xi f(\xi)}{f_\mu(\xi)}$ gehörigen zwei Grössen abgeleitet werden können. Demnach lehrt die Gleichung (16.), dass jede dem betrachteten Gebiete angehörige Grösse a dargestellt werden kann als Summe von r anderen (a_1, \dots, a_r), die beziehlich den Theilgebieten $\mathfrak{G}_1, \dots, \mathfrak{G}_r$ angehören und die Componenten von a genannt werden mögen. Dabei ist noch zu bemerken: Nach (16.) ist $\varphi(\xi)$ nur dann identisch gleich Null, wenn sämmtliche $\varphi_\mu(\xi)$ es sind. Eine Grösse a hat also nur dann den Werth

Null, wenn ihre Componenten (a_1, \dots, a_r) sämmtlich verschwinden; woraus noch folgt, dass a nur auf eine einzige Art als Summe von r den Gebieten $\mathfrak{G}_1, \dots, \mathfrak{G}_r$ angehörig Grössen dargestellt werden kann.

Dies vorausgeschickt, seien nun a_μ, b_ν zwei Grössen, die den Theilgebieten \mathfrak{G}_μ und \mathfrak{G}_ν angehören, und

$$\varphi(\xi) = \frac{f(\xi)}{f_\mu(\xi)} \varphi_\mu(\xi), \quad \psi(\xi) = \frac{f(\xi)}{f_\nu(\xi)} \psi_\nu(\xi)$$

die zu ihnen gehörigen Functionen. Dann ist, wenn $\mu \geq \nu$, $\varphi(\xi) \cdot \psi(\xi)$ durch $f(\xi)$ theilbar, also

$$(17.) \quad a_\mu \cdot b_\nu = 0.$$

Wenn aber $\nu = \mu$, so ist aus der Gleichung

$$\varphi(\xi) \cdot \psi(\xi) = \mathfrak{S}(\xi) \cdot f(\xi) + \chi(\xi)$$

ersichtlich, dass $\chi(\xi)$ den Theiler $\frac{f(\xi)}{f_\mu(\xi)}$, also die Form $\frac{f(\xi)}{f_\mu(\xi)} \chi_\mu(\xi)$ hat, wo $\chi_\mu(\xi)$ eine Constante oder eine ganze lineare Function von ξ ist, jenachdem $f_\mu(\xi)$ vom ersten oder zweiten Grade ist. Es ist also $a_\mu \cdot b_\mu$ eine Grösse, die demselben Theilgebiete angehört, wie a_μ, b_μ .

Es ist ferner ersichtlich, dass das Product

$$\varphi(\xi) \cdot \psi(\xi) = \frac{f(\xi)}{f_\mu(\xi)} \cdot \frac{f(\xi)}{f_\mu(\xi)} \cdot \varphi_\mu(\xi) \psi_\mu(\xi)$$

nur dann durch $f(\xi)$ theilbar sein kann, wenn eine der Functionen $\varphi_\mu(\xi), \psi_\mu(\xi)$ identisch gleich Null ist. Denn da $f_\mu(\xi)$ und $\frac{f(\xi)}{f_\mu(\xi)}$ keinen gemeinschaftlichen Theiler haben, so muss, wenn

$$\frac{1}{f_\mu(\xi)} \cdot \frac{f(\xi)}{f_\mu(\xi)} \cdot \varphi_\mu(\xi) \psi_\mu(\xi)$$

eine ganze Function sein soll, $\varphi_\mu(\xi) \cdot \psi_\mu(\xi)$ durch $f_\mu(\xi)$ theilbar sein, wozu erforderlich ist, dass $\varphi_\mu(\xi) \cdot \psi_\mu(\xi)$ identisch gleich Null sei, was in dem Falle, wo $f_\mu(\xi)$ vom ersten Grade ist, unmittelbar erhellt, in dem andern Falle aber daraus folgt, dass $f_\mu(\xi)$ nicht ein Product zweier linearen Functionen von ξ mit reellen Coefficienten ist.

Hiernach wird das Product zweier demselben Theilgebiete angehörig Grössen nur in dem Falle gleich Null, wo einer seiner Factoren verschwindet.

Nun seien $g', g'', \dots, g^{(r)}$ die Componenten der Grösse g_0 , so folgt, wenn a_μ irgend eine dem Gebiet \mathfrak{G}_μ angehörige Grösse ist, aus den Gleichungen

$$(18.) \quad g_0 = g' + g'' + \dots + g^{(r)}, \quad g_0 a_\mu = g^{(\mu)} a_\mu, \quad g_0 a_\mu - a_\mu = 0,$$

dass

$$(19.) \quad g^{(\mu)} a_\mu = a_\mu$$

ist.

Wenn nun $f_\mu(\xi)$ vom ersten Grade ist, so kann jede dem Gebiete \mathfrak{G}_μ angehörige Grösse in der Form $\alpha g^{(\mu)}$ dargestellt werden, und es ist

$$(20.) \quad (\alpha g^{(\mu)})(\beta g^{(\mu)}) = (\alpha\beta) g^{(\mu)}.$$

Wenn dagegen $f_\mu(\xi)$ vom zweiten Grade ist, so sei $h^{(\mu)}$ irgend eine nicht aus $g^{(\mu)}$ ableitbare Grösse des Gebietes \mathfrak{G}_μ , so kann jede andere Grösse des Gebietes aus $g^{(\mu)}$ und $h^{(\mu)}$ abgeleitet werden; es ist also auch

$$h^{(\mu)} h^{(\mu)} = \gamma h^{(\mu)} + \gamma' g^{(\mu)},$$

oder

$$(21.) \quad (h^{(\mu)} - \frac{1}{2} \gamma g^{(\mu)})^2 - (\gamma' + \frac{1}{4} \gamma^2) g^{(\mu)} g^{(\mu)} = 0.$$

Die Grösse $\gamma' + \frac{1}{4} \gamma^2$ ist nothwendig negativ. Denn wäre sie positiv oder gleich Null, so würde das Product der beiden dem Gebiete \mathfrak{G}_μ angehörigen Grössen

$$h^{(\mu)} - (\frac{1}{2} \gamma + \sqrt{\gamma' + \frac{1}{4} \gamma^2}) g^{(\mu)}, \quad h^{(\mu)} - (\frac{1}{2} \gamma - \sqrt{\gamma' + \frac{1}{4} \gamma^2}) g^{(\mu)}$$

gleich Null, ohne dass einer seiner Factoren verschwände.

Setzt man also

$$(22.) \quad k^{(\mu)} = \frac{1}{\sqrt{-(\gamma' + \frac{1}{4} \gamma^2)}} h^{(\mu)} - \frac{1}{2} \frac{\gamma}{\sqrt{-(\gamma' + \frac{1}{4} \gamma^2)}} g^{(\mu)},$$

so ist $k^{(\mu)}$ eine Grösse des Gebietes \mathfrak{G}_μ , für welche die Gleichung

$$(23.) \quad k^{(\mu)} k^{(\mu)} = -g^{(\mu)}$$

besteht. Man kann dann jede Grösse des Gebietes in der Form

$$\alpha g^{(\mu)} + \alpha' k^{(\mu)}$$

darstellen, und es ist

$$(24.) \quad (\alpha g^{(\mu)} + \alpha' k^{(\mu)})(\beta g^{(\mu)} + \beta' k^{(\mu)}) = (\alpha\beta - \alpha'\beta') g^{(\mu)} + (\alpha'\beta + \alpha\beta') k^{(\mu)}.$$

Es lassen sich also statt der ursprünglichen Haupteinheiten (e_1, e_2, \dots, e_n) n andere, aus denen alle Grössen des betrachteten Gebietes ebenfalls abgeleitet werden können, dergestalt einführen, dass erstens in jedem der Theilgebiete \mathfrak{G}_μ alle Grössen, jenachdem der Grad der zugehörigen Function $f_\mu(\xi)$ 1 oder 2 ist, aus einer dieser neuen Einheiten oder aus zweien sich ableiten lassen, und dass zweitens die Multiplication zweier diesem Theilgebiete angehörigen Grössen im ersten Fall so wie bei den aus 1 abgeleiteten (sogenannten reellen) Grössen (Gleichung (20.)), im andern Falle aber nach der für die Multiplication der gewöhnlichen complexen, aus zwei Haupteinheiten (1 und $i = \sqrt{-1}$) abgeleiteten Grössen geltenden Regel (Gleichung (24.)) ausgeführt werden kann.*)

Sind dann a, b zwei beliebige Grössen des Gebietes, und a_1, a_2, \dots, a_r die Componenten von a , b_1, b_2, \dots, b_r die Componenten von b , so ist

$$(25.) \quad ab = a_1 b_1 + a_2 b_2 + \dots + a_r b_r;$$

d. h. man findet für jedes der Gebiete \mathfrak{G}_μ die ihm angehörige Componente des Products ab , wenn man die entsprechenden Componenten der Factoren mit einander multiplicirt, was nach einer der Formeln (20.), (24.) auszuführen ist.

Soll das Product ab gleich Null sein, so müssen die sämtlichen Producte $a_\mu b_\mu$ es sein, also in jedem derselben einer der Factoren verschwinden. Ist also keine der Componenten von b gleich Null, so kann ab nur verschwinden, wenn a gleich Null ist. Sind dagegen einige Componenten von b gleich Null, so ist, damit ab verschwinde, nothwendig und hinreichend, dass die den übrigen Componenten von b entsprechenden Componenten von a sämtlich gleich Null sind. Theiler der Null sind also sämtliche Grössen b , deren Componenten nicht sämtlich von Null verschiedene Werthe haben.

Ist b nicht ein Theiler von Null, so ergibt sich aus (25.)

$$(26.) \quad \frac{a}{b} = \frac{a_1}{b_1} + \frac{a_2}{b_2} + \dots + \frac{a_r}{b_r};$$

und aus (20.), (24.)

$$(27.) \quad \frac{\alpha g^{(\mu)}}{\beta g^{(\mu)}} = \frac{\alpha}{\beta} g^{(\mu)},$$

*) Zu demselben Resultate ist, wie Ihnen bekannt, auf einem andern Wege auch Herr Hazzidakis gekommen.

wenn \mathfrak{G}_μ eine einfache Mannigfaltigkeit,

$$(28.) \quad \frac{\alpha g^{(\mu)} + \alpha' k^{(\mu)}}{\beta g^{(\mu)} + \beta' k^{(\mu)}} = \frac{\alpha\beta + \alpha'\beta'}{\beta\beta + \beta'\beta'} g^{(\mu)} + \frac{\alpha'\beta - \alpha\beta'}{\beta\beta + \beta'\beta'} k^{(\mu)},$$

wenn \mathfrak{G}_μ eine Mannigfaltigkeit von zwei Dimensionen ist.

Nimmt man zu den vorstehenden Formeln für die Multiplication und Division noch folgende hinzu

$$(29.) \quad \begin{cases} a + b = (a_1 + b_1) + (a_2 + b_2) + \dots + (a_r + b_r) \\ a - b = (a_1 - b_1) + (a_2 - b_2) + \dots + (a_r - b_r), \end{cases}$$

so erkennt man die Richtigkeit des nachstehenden Satzes:

Sind beliebig viele Grössen a, b, c, d, \dots des betrachteten Gebietes gegeben und es soll aus denselben durch eine bestimmte Rechnung, bei der nur die elementaren Rechnungsoperationen (Addition, Subtraction, Multiplication und Division) in Anwendung kommen, eine andere Grösse abgeleitet werden; so erhält man die Componente der letzteren für jedes Theilgebiet \mathfrak{G}_μ , wenn man die vorgeschriebene Rechnung mit den diesem Gebiete angehörenden Componenten der Grössen a, b, c, d, \dots ausführt.

Angenommen nun, es seien a, b, \dots, l gegebene Grössen, und es sei eine unbekante Grösse x so zu bestimmen, dass die Gleichung

$$a + bx + \dots + lx^2 = 0$$

bestehe.

Die Coefficienten einer solchen Gleichung können auch (a ausgenommen) unbenannte, aus einer Haupteinheit gebildete Grössen sein. Dann kann man aber, wenn z. B. in der Gleichung das Glied ax^m vorkommt, dafür $(ag_0)x^m$ setzen; man braucht also nur den Fall zu betrachten, wo alle Coefficienten complexe Grössen des betrachteten Gebietes sind.

Es seien $x_\mu, a_\mu, b_\mu, \dots, l_\mu$ die dem Gebiete \mathfrak{G}_μ angehörigen Componenten von x, a, b, \dots, l , so hat der Ausdruck auf der linken Seite der Gleichung nach dem Vorstehenden im Gebiete \mathfrak{G}_μ die Componente

$$a_\mu + b_\mu x_\mu + \dots + l_\mu x_\mu^2;$$

es zerfällt also die vorgelegte Gleichung in die folgenden r Gleichungen

$$a_\mu + b_\mu x_\mu + \dots + l_\mu x_\mu^2 = 0 \quad (\mu = 1, 2, \dots, r).$$

Eine Gleichung von dieser Form, in der die Coefficienten und ebenso die zu bestimmende Grösse Grössen mit einer oder mit zwei Haupteinheiten sind, kann aber — wenn für sie die Definition der Multiplication wie im Vorhergehenden (Gleichungen (20.), (24.)) gegeben wird — nur dann unendlich viele Wurzeln haben, wenn alle ihre Coefficienten gleich Null sind.

Die vorgelegte Gleichung kann also nur in dem Falle durch unendlich viele Werthe von x befriedigt werden, wenn wenigstens für einen Werth von μ

$$a_\mu, b_\mu, \dots l_\mu$$

sämmtlich gleich Null sind.

Nehmen wir an, es finde dies statt für $(r-\varrho)$ Werthe von μ , und diese seien $\varrho+1, \dots r$, so dass man

$$a = \sum_{\mu} a_{\mu}, \quad b = \sum_{\mu} b_{\mu}, \quad \dots \quad l = \sum_{\mu} l_{\mu} \quad (\mu = 1, 2, \dots \varrho)$$

hat. Nimmt man dann eine Grösse

$$k = \sum_{\mu} k_{\mu}, \quad (\mu = 1, 2, \dots \varrho)$$

wo k_{μ} eine von Null verschiedene Grösse des Gebietes \mathfrak{G}_{μ} bedeutet, willkürlich an, so kann man die Grössen $a', b', \dots l'$ so bestimmen, dass

$$a = ka', \quad b = kb', \quad \dots \quad l = kl'$$

wird. Denn es sei a'_{μ} die Componente von a' in \mathfrak{G}_{μ} , so ist

$$ka' = \sum_{\mu} k_{\mu} a'_{\mu},$$

es muss also $a'_{\mu} = \frac{a_{\mu}}{k_{\mu}}$ sein für $\mu = 1, 2, \dots \varrho$, während a'_{μ} für $\mu = \varrho+1, \dots r$ willkürlich angenommen werden kann. Ebenso werden $b', \dots l'$ bestimmt. (Nimmt man für sämmtliche $a'_{\mu}, b'_{\mu}, \dots l'_{\mu}$, wenn $\mu > \varrho$ ist, von Null verschiedene Grössen an, so sind die Grössen $a', b', \dots l'$ nicht mehr so beschaffen, wie die $a, b, \dots l$, nämlich es findet nicht mehr statt, dass für einen bestimmten Werth von μ die Componenten $a'_{\mu}, b'_{\mu}, \dots l'_{\mu}$ sämmtlich verschwinden.)

Hiermit ist nun bewiesen:

Wenn die arithmetischen Grundoperationen so definirt werden, wie im Vorhergehenden geschehen, so findet in der That statt, was oben als Forderung hingestellt worden ist: eine alge-

braische Gleichung

$$a + bx + \dots + lx^k = 0$$

kann nur in dem Falle durch unendlich viele Werthe von x befriedigt werden, wenn alle ihre Coefficienten aus einem und demselben Theiler der Null durch Multiplication mit anderen Grössen hervorgehen.

Sie sehen, lieber College, aus der vorstehenden Darlegung, dass bei meiner Untersuchung über die Möglichkeit einer Arithmetik der complexen Grössen mit beliebig vielen Haupteinheiten zwei Gesichtspunkte als massgebend im Auge gehalten worden sind: es sollen nicht nur für das Addiren, Multipliciren u. s. w. complexer Grössen die in den obigen Gleichungen (1.), (2.) ausgesprochenen formalen Gesetze gelten, sondern es sollen zugleich zwischen der Arithmetik der allgemeinen complexen Grössen und der Arithmetik der aus einer Haupteinheit gebildeten Grössen nur solche Unterschiede bestehen, die in der Natur der Sache begründet sind, d. h. welche sich herausstellen, wie man auch unter Aufrechterhaltung der ersten Forderung die arithmetischen Operationen definiren möge. In der gewöhnlichen Arithmetik gilt nun, dass eine Grösse, welche algebraisch von andern gegebenen abhängt, im Allgemeinen, d. h. wenn specielle, bestimmt charakterisirbare Werthsysteme der gegebenen Grössen ausgeschlossen werden, stets nur eine endliche Anzahl von Werthen haben kann. Dies ist von solch wesentlicher Bedeutung, dass eine Arithmetik complexer Grössen, für die nicht dasselbe gälte, eine von der gewöhnlichen ganz verschiedene sein und nicht als eine naturgemässe Verallgemeinerung der letzteren betrachtet werden könnte.

Wie man nun aber auch die Multiplication — auf die es allein ankommt — der ersten Forderung entsprechend definiren mag, es zeigt sich, dass es stets algebraische Gleichungen giebt, welche unendlich viele Wurzeln haben. Als Gleichungen dieser Art geben sich zunächst diejenigen zu erkennen, deren Coefficienten aus einem und demselben Theiler der Null durch Multiplication desselben mit anderen Grössen hervorgehen. Da es immer Theiler der Null giebt (wenn man nämlich in dem Falle, wo $n = 1$ oder 2 ist, die Null selbst als solchen auffasst), so ist die Existenz solcher Gleichungen in der Natur der Sache begründet. Zugleich hat sich aber gezeigt,

dass es andere Gleichungen mit unendlich vielen Wurzeln nur giebt, wenn unter den das Multiplicationsverfahren bestimmenden Grössen $\varepsilon_{a,b,c}$ gewisse, nicht durch die Multiplicationsgesetze bedingte Relationen stattfinden. Solche Werthsysteme der Grössen $\varepsilon_{a,b,c}$ mussten also ausgeschlossen werden, wenn die Arithmetik der allgemeinen complexen Grössen soweit, als überhaupt möglich, mit der gewöhnlichen in Übereinstimmung gebracht werden sollte. Dass aber dies auch genüge, um den gestellten Forderungen gerecht zu werden, ist im Vorhergehenden streng bewiesen.

Aus dem Obigen geht noch hervor, dass die Gleichung

$$a + bx + \dots + lx^2 = 0$$

durch keinen Werth von x befriedigt werden kann, wenn für irgend einen Werth von μ die Grössen b_μ, \dots, l_μ sämmtlich verschwinden, a_μ aber nicht. Will man nun die weitere Forderung stellen, dass in jedem andern Falle die Gleichung wirklich Wurzeln haben solle, die dem betrachteten Grössengebiete angehören — mit anderen Worten, will man die Vorstellung imaginärer Wurzeln beseitigen —, so ist dazu nothwendig und hinreichend, dass jedes der Theilgebiete \mathfrak{G}_μ eine zweifache Mannigfaltigkeit sei — d. h. man hat bei der Festsetzung des Multiplicationsverfahrens die Grössen $\varepsilon_{a,b,c}$ so anzunehmen, dass die Gleichung

$$\xi^n + \varepsilon_1 \xi^{n-1} + \dots + \varepsilon_n = 0$$

keine reelle Wurzel hat, so dass also n gerade sein muss. Dann hat die Gleichung

$$a + bx + \dots + lx^2 = 0$$

$\lambda^{\frac{1}{2}n}$ Wurzeln, wofern l nicht ein Theiler der Null ist — die Modificationen, die eintreten, wenn l ein solcher Theiler ist, sind leicht festzustellen —, ein Satz, der dem für $n = 2$ geltenden nicht widerspricht, sondern als eine Verallgemeinerung desselben zu betrachten ist.

Wenn ich nun mit dem Ergebniss der vorstehenden Untersuchung die im Anfang angeführte Gaussische Bemerkung, dass complexe Grössen mit mehr als zwei Haupt-einheiten in der allgemeinen Arithmetik unzulässig seien, zusammenhalte, so scheint es mir, dass Gauss diese Unzulässigkeit als dadurch begründet angesehen habe, dass das Product zweier Grössen, sobald $n > 2$,

verschwinden kann, ohne dass einer seiner Factoren den Werth Null hat. Denn hätte er diesen Umstand nicht als ein unübersteigliches Hinderniss für die Einführung der allgemeinen complexen Grössen in die Arithmetik betrachtet, so würde es ihm schwerlich entgangen sein, dass sich eine Arithmetik dieser Grössen begründen lässt, in welcher alle Sätze entweder mit denen der Arithmetik der gewöhnlichen complexen Grössen identisch sind oder doch in der letzteren ihr Analogon finden. Er würde dann auch ohne Zweifel seinen Ausspruch dahin modificirt haben, dass die Einführung der allgemeinen complexen Grössen in der Arithmetik zwar nicht unstatthaft, wohl aber überflüssig sei. In der That geht aus dem oben (Seite 324) ausgesprochenen Satze hervor, dass die Arithmetik der allgemeinen complexen Grössen zu keinem Resultate führen kann, das nicht aus Ergebnissen der Theorie der complexen Grössen mit einer oder mit zwei Haupteinheiten ohne Weiteres ableitbar wäre.

Gestatten Sie mir nunmehr auf die in Ihrem Briefe enthaltenen, auf den besprochenen Gegenstand sich beziehenden Bemerkungen einzugehen.

Wenn in dem betrachteten Gebiete nach Fixirung der Grössen $\epsilon_{a,b,c}$ eine Reihe von Grössen g_0, g_1, g_2 u. s. w. existiren soll, für welche die obigen Formeln (14.), (15.) gelten, und durch die sich jede andere Grösse des Gebietes in der Form

$$\alpha_0 g_0 + \alpha_1 g_1 + \dots + \alpha_{n-1} g_{n-1}$$

ausdrücken lässt, so darf (ausser ϵ) die im Vorstehenden mit X_0 bezeichnete Function der unbestimmten Grössen ξ_1, \dots, ξ_n nicht identisch verschwinden. Dass dies an sich nicht unmöglich sei, geht aus dem mir von Ihnen mitgetheilten Beispiele des Herrn Kyparissos Stephanos evident hervor — mir war es aber durch Erwägungen bekannt, die geeignet sind, auf die Frage betreffend die Einführung allgemeiner complexer Grössen und die möglichen Verallgemeinerungen der gebräuchlichen arithmetischen Algorithmen noch von einer anderen Seite her Licht zu werfen, und über die ich noch einiges sagen möchte. Vorher will ich nur noch erwähnen, dass ich mich in früheren Vorträgen auf die Möglichkeit des identischen Verschwindens der Function X_0 gar nicht eingelassen, sondern nur bewiesen habe, dass dieselbe im Allgemeinen nicht identisch gleich Null sei. Wahrscheinlicherweise habe ich

mich dabei nicht deutlich genug ausgedrückt. Im vergangenen Semester,*) wo ich über den Gegenstand abermals im Seminar vorgetragen, habe ich aber ausdrücklich gesagt, ich werde mich zunächst auf den Fall beschränken, in welchem die Grössen $\epsilon_{a,b,c}$ solche Werthe haben, dass weder ϵ , noch X_0 , noch die Discriminante der Gleichung

$$X_0 \xi^n + X_1 \xi^{n-1} + \dots + X_n = 0$$

identisch verschwinde. Unter dieser Annahme wurde der soeben angeführte Satz (Seite 324) bewiesen, was mir diesmal die Hauptsache war. Am Schlusse sollten dann die Erörterungen folgen, die mir jene in Betreff der Grössen $\epsilon_{a,b,c}$ gemachte Annahme als nothwendig erscheinen lassen. Leider reichte zu dem Letzteren die Zeit nicht aus, ich werde in diesem Semester darauf zurückkommen.

Für Grössen, die aus einer Haupteinheit gebildet sind, lassen sich die Multiplicationsgesetze auch aus den folgenden Grundgleichungen ableiten:

$$(A.) \quad \begin{aligned} a(b+c) &= ab+ac, \\ (a+b)c &= ac+bc, \\ a(bc) &= (ab)c. \end{aligned}$$

Die beiden ersten begründen das sogenannte distributive, die dritte das associative Gesetz. Das commutative Gesetz $ab=ba$ ist dann eine Folge der genannten. Bei complexen Grössen gilt dies nicht mehr allgemein; man kommt vielmehr bei Zugrundelegung der Gleichungen (A.) auch zu Algorithmen, bei denen ab nicht gleich ba ist. Unter diesen Algorithmen ist z. B. Hamilton's Quaternionencalcul enthalten, in welchem das commutative Gesetz nicht gilt.

Aus den beiden ersten Gleichungen ergibt sich ebenso wie oben

$$(B.) \quad \left(\sum_a \alpha_a e_a\right) \left(\sum_a \beta_a e_a\right) = \sum_{a,b,c} \epsilon_{a,b,c} \alpha_b \beta_c e_a, \quad (a,b,c = 1, 2, \dots, n)$$

wenn

$$(C.) \quad e_b e_c = \sum_a \epsilon_{a,b,c} e_a$$

*) Winter-Semester 1882—83.

gesetzt wird. Unter den Grössen $\varepsilon_{a,b,c}$ müssen dann die aus den Gleichungen

$$(D.) \quad e_b(e_c e_b) = (e_b e_c) e_b$$

sich ergebenden Relationen stattfinden, während man aber $\varepsilon_{a,b,c}$ und $\varepsilon_{a,c,b}$ nicht als gleich annehmen darf.

Nimmt man an, was nothwendig ist, dass, wenn der Werth eines Products und einer seiner Factoren gegeben ist, dadurch im Allgemeinen auch der andere Factor eindeutig bestimmt sei, so lässt sich mittels der dritten der Gleichungen (A.) die Existenz einer Grösse g_0 beweisen, für welche

$$g_0 b = b g_0 = b$$

ist, bei beliebiger Annahme der Grösse b . Ferner folgt aus derselben Gleichung, dass

$$a^m a^n = a^{m+n} = a^n a^m$$

ist. Setzt man nun wie oben

$$\begin{aligned} x &= \xi_1 e_1 + \xi_2 e_2 + \cdots + \xi_n e_n, \\ x^v &= \xi_1^{(v)} e_1 + \xi_2^{(v)} e_2 + \cdots + \xi_n^{(v)} e_n, \end{aligned}$$

so ergibt sich wieder eine Gleichung

$$X_0 x^{n+1} + X_1 x^n + \cdots + X_n x = 0,$$

in der die Coefficienten X_0, X_1, \dots, X_n homogene ganze Functionen der Grössen ξ sind. Ist nun X_0 nicht identisch gleich Null, so kann man ganz dieselben Schlüsse machen wie oben; es muss sich eine Reihe von Grössen g_0, g_1, g_2 u. s. w. so bestimmen lassen, dass man

$$(E.) \quad g_m g_n = g_{m+n}$$

hat, und dass sich jede Grösse a des Gebietes in der Form

$$a = \alpha_0 g_0 + \alpha_1 g_1 + \cdots + \alpha_{n-1} g_{n-1}$$

darstellen lasse. Dann hat man

$$\left(\sum_a \alpha_a g_a\right) \left(\sum_a \beta_a g_a\right) = \sum_{a,b} (\alpha_a \beta_b) g_{a+b} \quad (a, b = 0, 1, \dots, n-1).$$

Hiernach gilt für das Product zweier beliebigen Grössen a, b das Gesetz

$$ab = ba,$$

sobald die Function X_0 nicht identisch verschwindet.

Da nun z. B. für die Quaternionen dieses Gesetz nicht gilt, so muss man schliessen, dass die Function X_0 auch identisch verschwinden kann. Man ist also auch nicht berechtigt, in dem Falle, wo man von den Gleichungen (2.) ausgeht, von der Function X_0 , auf die man alsdann kommt, anzunehmen, dass sie nicht identisch verschwinden könne, was ja, wie das Beispiel des Herrn Stephanos lehrt, in der That der Fall sein kann.

Das von Herrn Stephanos gefundene Multiplicationsverfahren ist enthalten in der Formel

$$\begin{aligned} & (\alpha_0 e_0 + \alpha_1 e_1 + \dots + \alpha_{n-1} e_{n-1}) (\beta_0 e_0 + \beta_1 e_1 + \dots + \beta_{n-1} e_{n-1}) \\ & = \alpha_0 \beta_0 e_0 + (\alpha_0 \beta_1 + \alpha_1 \beta_0) e_1 + \dots + (\alpha_0 \beta_{n-1} + \alpha_{n-1} \beta_0) e_{n-1}. \end{aligned}$$

Für eine beliebige Grösse

$$x = \alpha_0 e_0 + \alpha_1 e_1 + \dots + \alpha_{n-1} e_{n-1}$$

gilt dann die Gleichung

$$x^2 - 2\alpha_0 x + \alpha_0^2 e_0 = 0,$$

die bei gegebenem Werthe von α_0 also durch unendlich viele Werthe von x befriedigt wird. Nach den im Vorstehenden entwickelten Grundsätzen würde also ein solches Multiplicationsverfahren zu den unzulässigen gehören.

Ich bemerke noch, dass bei Adoptirung desselben auch für ein gerades n die Lösung der Gleichung

$$x^2 = a = \alpha_0 e_0 + \alpha_1 e_1 + \dots + \alpha_{n-1} e_{n-1}$$

nicht immer möglich sein würde, nämlich dann nicht, wenn α_0 negativ ist.

Indem ich diesen langen Brief überlese, finde ich, dass sich an ihm sehr bemerkbar macht, dass er in Folge mancherlei Störungen mit vielen Unterbrechungen geschrieben worden ist. Wollen Sie es also mit Nachsicht aufnehmen, wenn Sie darin manche Wiederholungen, manche zu umständliche Darstellung finden. Es lag mir daran, Ihnen einmal eine authentische Darstellung meiner Theorie der complexen Grössen zu geben; die Aufzeichnungen auch der besten Zuhörer enthalten doch manches unrichtig Aufgefasste — mit oder ohne Schuld des Docenten —, namentlich, wo es sich nicht bloss um Wiedergabe von Rechnungen handelt.

Wollen Sie von dem Mitgetheilten für Ihre Vorträge Gebrauch machen, so habe ich selbstverständlich nichts dagegen. Auch wenn Sie Einwendungen zu machen haben, so enthalten Sie mir dieselben nicht vor.

.....
(Geschlossen den 27. Juni 1883.)

Zusätzliche Bemerkungen zu dem vorstehenden Briefe.

(Von Herrn H. A. Schwarz.)

1.

Seite 315. »Daraus ergibt sich die Existenz einer Grösse e_0 von der Eigenschaft, dass $e_0 a = a e_0 = a$ ist für jeden Werth von a .«

Ist nämlich a eine Grösse, für welche ϵ nicht gleich Null ist, so ist $\frac{a}{\epsilon}$ eine Grösse, mit der multiplicirt jede andere Grösse unverändert bleibt. Diese Grösse $\frac{a}{\epsilon} = e_0$ hat aber für jeden Werth von a einunddenselben Werth; es ist nämlich, wenn a' eine andere Grösse bezeichnet, für welche ϵ ebenfalls nicht verschwindet,

$$\frac{a}{\epsilon} = \frac{a'}{\epsilon},$$

indem diese beiden Grössen mit a multiplicirt einander gleich werden.

2.

Seite 316. »Dann existiren, wenn man von particulären Werthsystemen der Grössen ξ'_ν absieht, unendlich viele Werthsysteme $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$, für welche die Gleichungen

$$\frac{X_1}{X_0} = \frac{X'_1}{X'_0}, \quad \dots \quad \frac{X_m}{X_0} = \frac{X'_m}{X'_0}$$

bestehen.«

Die Richtigkeit dieser Behauptung kann folgendermassen dargethan werden.

Die rationalen Functionen $\frac{X_\mu}{X_0}$ der n von einander unabhängigen Veränderlichen $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ mögen mit

$$f_\mu(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) \quad (\mu = 1, 2, \dots, m)$$

bezeichnet werden. Die Coefficienten dieser rationalen Functionen haben ausschliesslich reelle Werthe, und die Anzahl n der unabhängigen Variablen, von welchen dieselben abhängen, ist grösser als die Anzahl m der betrachteten Functionen.

Nun besteht ganz allgemein der Satz:

Wenn m rationale Functionen f_1, f_2, \dots, f_m mit ausschliesslich reellen Coefficienten von mehr als m veränderlichen Grössen $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ gegeben sind, so kann man den letzteren stets unendlich viele Systeme solcher reellen Werthe beilegen, dass für alle diese Werthsysteme jede der gegebenen Functionen denselben Werth erhält.

Um diesen Satz zu beweisen, denke man sich für die Umgebung einer nicht singulären Stelle $(\xi'_1, \xi'_2, \dots, \xi'_n)$ im Gebiete der reellen Werthe der unabhängigen Variablen die Differenzen

$$f_\mu(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) - f_\mu(\xi'_1, \xi'_2, \dots, \xi'_n) \quad (\mu = 1, 2, \dots, m)$$

in Reihen entwickelt, welche nach Potenzen der Grössen $\xi_\nu - \xi'_\nu$ ($\nu = 1, 2, \dots, n$) mit ganzen positiven Exponenten fortschreiten.

Es ergeben sich also m Gleichungen von der Form

$$(1.) \quad f_\mu(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) - g_\mu = \mathfrak{P}_\mu(\xi_1 - \xi'_1, \xi_2 - \xi'_2, \dots, \xi_n - \xi'_n),$$

in welchen g_μ den Werth $f_\mu(\xi'_1, \xi'_2, \dots, \xi'_n)$ bezeichnet.

Die Grössen g_μ und die Coefficienten der einzelnen Glieder der Potenzreihen \mathfrak{P}_μ haben reelle Werthe.

Wenn nun die Potenzreihen \mathfrak{P}_μ auf die in denselben enthaltenen linearen Glieder reducirt werden, und es ist unter den Determinanten m^{ter} Ordnung, welche aus den Systemen der $m \cdot n$ Coefficienten dieser linearen Glieder gebildet werden können, für ein nicht singuläres System von Argumentwerthen $(\xi'_1, \xi'_2, \dots, \xi'_n)$ mindestens eine von Null verschieden, so möge angenommen werden — da es auf die Reihenfolge, in welcher die n Argumente mit $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ bezeichnet werden, nicht ankommt —, dass die Determinante

$$(2.) \quad \left| \frac{\partial \mathfrak{P}_\mu}{\partial \xi_\nu} \right| \quad (\mu, \nu = 1, 2, \dots, m)$$

für das betrachtete System von Argumentwerthen $(\xi'_1, \xi'_2, \dots, \xi'_n)$ einen von Null verschiedenen Werth habe.

Unter dieser Voraussetzung können bekanntlich die Gleichungen

$$(3.) \quad \mathfrak{P}_\mu(\xi_1 - \xi'_1, \xi_2 - \xi'_2, \dots, \xi_n - \xi'_n) = 0 \quad (\mu = 1, 2, \dots, m)$$

in Bezug auf die Grössen $\xi_1 - \xi'_1, \xi_2 - \xi'_2, \dots, \xi_m - \xi'_m$ als Unbekannte durch Reihenentwickelungen aufgelöst werden, welche nach Potenzen der Grössen $\xi_{m+1} - \xi'_{m+1}, \dots, \xi_n - \xi'_n$ mit ganzen positiven Exponenten fortschreiten und für alle der Stelle $(\xi'_{m+1}, \dots, \xi'_n)$ hinreichend nahe liegenden Werthsysteme $(\xi_{m+1}, \dots, \xi_n)$ convergiren. Diese Potenzreihen haben reelle Coefficienten, und das constante Glied derselben hat den Werth Null.

Hieraus ergibt sich aber, da das System der Werthe $(\xi_{m+1}, \dots, \xi_n)$ in der Umgebung der Stelle $(\xi'_{m+1}, \dots, \xi'_n)$ willkürlich gewählt werden kann, die Richtigkeit des angeführten Lehrsatzes.

Es kann aber auch der Fall eintreten, dass für das System der Functionen $f_1(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n), \dots, f_m(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ jede Functionaldeterminante m^{ter} Ordnung den Werth Null hat; dann sind die Werthe der Potenzreihen \mathfrak{P}_μ nicht mehr, wie in dem ersten Falle, von einander unabhängig, sondern die Werthe einiger derselben sind durch die Werthe der übrigen bereits bestimmt.

In diesem Falle kann man annehmen, dass, während alle Functionalsubdeterminanten des Systemes der Functionen $f_\mu(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$, deren Ordnungszahl gleich r oder grösser als r ist, den Werth Null haben, mindestens eine der Functionalsubdeterminanten $(r-1)^{\text{ter}}$ Ordnung für das Werthsystem $(\xi'_1, \xi'_2, \dots, \xi'_n)$ der unabhängigen Variablen einen von Null verschiedenen Werth habe.

Da es bei dieser Annahme weder auf die Reihenfolge, in der die Functionen f_μ mit f_1, f_2, \dots, f_m , noch auf die Reihenfolge, in der die Argumente ξ_ν mit $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ bezeichnet werden, ankommt, so kann man von der Voraussetzung ausgehen, es habe die Determinante

$$(4.) \quad \left| \frac{\partial f_\mu}{\partial \xi_\nu} \right| \quad (\mu, \nu = 1, 2, \dots, r-1)$$

für das betrachtete nicht singuläre Werthsystem $(\xi'_1, \xi'_2, \dots, \xi'_n)$ der Argumente einen von Null verschiedenen Werth.

Zu dem Systeme der Functionen f_μ ($\mu = 1, 2, \dots, r-1$) füge man eine von diesen Functionen unabhängige rationale Function f_0 derselben Argumente

$\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ hinzu und wähle zugleich aus der Gesamtheit der übrigen Functionen f_μ , für welche also $\mu > r-1$ ist, eine beliebige aus, etwa f_r .

Die Function f_0 möge der Bedingung gemäss gewählt werden, dass die Functionaldeterminante

$$(5.) \quad \left| \frac{\partial f_\mu}{\partial \xi_\nu} \right| \quad (\mu = 0, 1, \dots, r-1; \nu = 1, 2, \dots, r)$$

für das betrachtete Werthsystem $(\xi'_1, \xi'_2, \dots, \xi'_n)$ einen von Null verschiedenen Werth hat, was auf unendlich viele Arten geschehen kann.

Es ergibt sich dann, wenn zur Abkürzung

$$f_\mu(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) = f_\mu, \quad f_\mu(\xi'_1, \xi'_2, \dots, \xi'_n) = g_\mu$$

gesetzt wird, ein System von r Gleichungen

$$(6.) \quad f_\mu - g_\mu = \mathfrak{P}_\mu(\xi_1 - \xi'_1, \xi_2 - \xi'_2, \dots, \xi_n - \xi'_n), \quad (\mu = 0, 1, \dots, r-1)$$

welches bei Beschränkung der Veränderlichkeit der Grössen

$$f_0, f_1, \dots, f_{r-1}; \xi_{r+1}, \dots, \xi_n$$

auf eine gewisse Umgebung der Stelle

$$(g_0, g_1, \dots, g_{r-1}; \xi'_{r+1}, \dots, \xi'_n)$$

in Bezug auf die Grössen $\xi_1 - \xi'_1, \xi_2 - \xi'_2, \dots, \xi_r - \xi'_r$ als Unbekannte durch convergente Potenzreihen

$$(7.) \quad \xi_\nu - \xi'_\nu = \bar{\mathfrak{P}}_\nu(f_0 - g_0, f_1 - g_1, \dots, f_{r-1} - g_{r-1}; \xi_{r+1} - \xi'_{r+1}, \dots, \xi_n - \xi'_n) \quad (\nu = 1, 2, \dots, r)$$

aufgelöst werden kann.

Es giebt also unendlich viele der Umgebung der nicht singulären Stelle $(\xi'_1, \xi'_2, \dots, \xi'_n)$ angehörende Systeme von reellen Werthen $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$, welche die Gleichungen

$$f_\mu(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) = g_\mu \quad (\mu = 1, 2, \dots, r-1)$$

befriedigen.

Für die Differenz

$$f_r(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) - g_r = \mathfrak{P}_r(\xi_1 - \xi'_1, \xi_2 - \xi'_2, \dots, \xi_n - \xi'_n)$$

ergiebt sich nun ebenfalls in Folge der Gleichungen (7.) eine convergente

Potenzreihe

$$(8.) \quad f_r(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) - g_r = \overline{\mathfrak{P}}_r(f_0 - g_0, f_1 - g_1, \dots, f_{r-1} - g_{r-1}; \xi_{r+1} - \xi'_{r+1}, \dots, \xi_n - \xi'_n).$$

Aus dem Umstande aber, dass für das System der von den n Argumenten $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ abhängenden Functionen f_μ ($\mu = 1, 2, \dots, r$) der Voraussetzung zufolge alle Functionaldeterminanten r^{ter} Ordnung den Werth Null haben, wird gefolgert, dass die partiellen Ableitungen

$$\frac{\partial \overline{\mathfrak{P}}_r}{\partial f_0} \quad \text{und} \quad \frac{\partial \overline{\mathfrak{P}}_r}{\partial \xi_v} \quad (v = r+1, r+2, \dots, n)$$

identisch gleich Null sind; es kommen also in der Potenzreihe $\overline{\mathfrak{P}}_r$ Glieder, welche von den Grössen $f_0, \xi_{r+1}, \xi_{r+2}, \dots, \xi_n$ unmittelbar abhängen, nicht vor.

Ein ganz analoger Schluss gilt für jede der Differenzen

$$f_\mu(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) - g_\mu \quad (\mu = r+1, r+2, \dots, m).$$

Unter den angegebenen Voraussetzungen besteht also, wenn dem Index μ irgend einer der Werthe $r, r+1, \dots, m$ beigelegt wird, jedesmal eine Gleichung von der Form

$$(9.) \quad f_\mu(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) - g_\mu = \overline{\mathfrak{P}}_\mu(f_1 - g_1, f_2 - g_2, \dots, f_{r-1} - g_{r-1}) \quad (\mu = r, r+1, \dots, m).$$

Werden daher den Grössen $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ solche, einer gewissen Umgebung der Stelle $(\xi'_1, \xi'_2, \dots, \xi'_n)$ angehörenden Werthe beigelegt, für welche die Gleichungen

$$f_\mu(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) = g_\mu \quad (\mu = 1, 2, \dots, r-1)$$

erfüllt sind, so befriedigen diese Werthe auch die Gleichungen

$$f_\mu(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) = g_\mu, \quad (\mu = r, r+1, \dots, m)$$

da in allen hier mit $\mathfrak{P}, \overline{\mathfrak{P}}, \overline{\overline{\mathfrak{P}}}$ bezeichneten Potenzreihen das constante Glied den Werth Null hat.

Hiermit ist die allgemeine Richtigkeit des angeführten Lehrsatzes dargethan.

3.

Seite 316. »Die Determinante $|\xi_\mu^{(\nu)}|$ ist im Allgemeinen nicht identisch gleich Null, wie man leicht nachweisen kann.«

Dieser Nachweis kann dadurch geführt werden, dass man ein specielles Multiplicationsverfahren aufstellt, bei dessen Zugrundelegung die Gleichungen (7.) auf Seite 313 erfüllt sind und für welches die in Rede stehende Determinante sich als im Allgemeinen von Null verschieden erweist.

Ein solches Multiplicationsverfahren ist durch die Gleichungen

$$e_a e_a = e_a, \quad e_a e_b = 0 \quad \text{wenn } b \geq a, \quad (a, b = 1, 2, \dots, n)$$

bestimmt.

Bei Zugrundelegung dieses Multiplicationsverfahrens geht die Determinante $|\xi_\mu^{(\nu)}|$ in die Determinante $|\xi_\mu^\nu|$ ($\mu, \nu = 1, 2, \dots, n$) über; die letztere aber hat, wenn je zwei der Grössen ξ_μ von einander verschieden sind und keine dieser Grössen gleich Null ist, einen von Null verschiedenen Werth.

4.

Seite 320—324. Man kann die Frage aufwerfen, ob die in Rede stehenden Theilgebiete von der Wahl der Grösse g abhängig sind oder nicht. Es lässt sich zeigen, dass das Letztere der Fall ist — vorausgesetzt, dass g kein Theiler der Null sei und dass die Determinante $|\xi_\mu^{(\nu)}| = X_0$ sowohl als auch die Discriminante der Gleichung $f(\xi) = 0$ einen von Null verschiedenen Werth habe.

Es sei bei Zugrundelegung einer bestimmten Grösse

$$g = \sum_a \xi'_a e_a$$

r' die Anzahl der Theilgebiete \mathfrak{G}_ρ , welche Mannigfaltigkeiten einer Dimension, r'' die Anzahl der Theilgebiete \mathfrak{G}_σ , welche Mannigfaltigkeiten zweier Dimensionen sind, so dass $r = r' + r''$, $n = r' + 2r''$ ist, während die Indices ρ, σ zwei ganze Zahlen bezeichnen, von denen die erste r' , die zweite r'' von einander verschiedene Werthe annehmen kann.

Denkt man sich nun die Grössen $g^{(\rho)}$ und die Grössenpaare $g^{(\sigma)}, k^{(\sigma)}$ zu neuen Haupteinheiten gewählt, so ist die Grösse e_0 bestimmt durch die Gleichung

$$e_0 = \sum_\rho g^{(\rho)} + \sum_\sigma g^{(\sigma)} \quad [\text{Siehe Seite 322 (18.)}]$$

Es bezeichne jetzt x eine beliebige Grösse des betrachteten Gebietes, es sei also

$$x = \sum_{\rho} \eta_{\rho} g^{(\rho)} + \sum_{\sigma} (\eta_{\sigma} g^{(\sigma)} + \zeta_{\sigma} k^{(\sigma)}),$$

so ergibt sich, wenn festgesetzt wird, dass die Bezeichnungen

$$\eta_{\rho} g^{(\rho)} + \zeta_{\rho} k^{(\rho)} \quad \text{und} \quad (\eta + \zeta i) g^{(\sigma)} \quad (i = \sqrt{-1})$$

gleichbedeutend sein sollen, aus der Gleichung

$$x = \sum_{\rho} \eta_{\rho} g^{(\rho)} + \sum_{\sigma} (\eta_{\sigma} + \zeta_{\sigma} i) g^{(\sigma)}$$

durch Erhebung beider Seiten in die ν^{te} Potenz die Gleichung

$$x^{\nu} = \sum_{\rho} \eta_{\rho}^{\nu} g^{(\rho)} + \sum_{\sigma} (\eta_{\sigma} + \zeta_{\sigma} i)^{\nu} g^{(\sigma)}.$$

Denkt man sich nun n aus einer unbenannten Haupteinheit gebildete Grössen $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ bestimmt, welche der Bedingung genügen, dass die Gleichung

$$x^n + \varepsilon_1 x^{n-1} + \varepsilon_2 x^{n-2} + \dots + \varepsilon_n e_0 = 0$$

besteht, was stets möglich ist, so ergibt sich, dass die algebraische Gleichung

$$x^n + \varepsilon_1 x^{n-1} + \varepsilon_2 x^{n-2} + \dots + \varepsilon_n = 0$$

im Gebiete der aus den Haupteinheiten 1 und $i = \sqrt{-1}$ gebildeten gewöhnlichen complexen Grössen die Wurzeln $\eta_{\rho}, \eta_{\sigma} + \zeta_{\sigma} i, \eta_{\sigma} - \zeta_{\sigma} i$ besitzt. Es ergibt sich hieraus, wenn mit ξ eine veränderliche aus einer unbenannten Haupteinheit gebildete Grösse bezeichnet wird, die Identität

$$\begin{aligned} f(\xi) &= \xi^n + \varepsilon_1 \xi^{n-1} + \varepsilon_2 \xi^{n-2} + \dots + \varepsilon_n \\ &= \prod_{\rho} (\xi - \eta_{\rho}) \prod_{\sigma} (\xi^2 - 2\eta_{\sigma} \xi + \eta_{\sigma}^2 + \zeta_{\sigma}^2), \end{aligned}$$

durch welche die Grössen $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ als ganze homogene Functionen der Grössen $\eta_{\rho}, \eta_{\sigma}, \zeta_{\sigma}$ bestimmt sind.

Wenn die Coordinaten der betrachteten complexen Grösse x bezogen auf die früheren Haupteinheiten e_1, e_2, \dots, e_n mit $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ bezeichnet werden, so ist klar, dass die neuen Coordinaten $\eta_{\rho}, \eta_{\sigma}, \zeta_{\sigma}$ der Grösse x ganze homogene Functionen ersten Grades der Grössen $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ sind.

Aus dem Umstande, dass die im Vorstehenden mit $f(\xi)$ bezeichnete Function und die von Herrn Weierstrass ebenso bezeichnete mit einander übereinstimmen, ergeben sich folgende Sätze:

1. Die mit X_1, X_2, \dots, X_n bezeichneten ganzen Functionen der Grössen $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ sind in Folge der Bedingungen, welchen die Grössen $\epsilon_{a,b,c}$ unterworfen sind, durch die Function X_0 theilbar.

2. Jede Wurzel der Gleichung $f(\xi) = 0$ im Gebiete der aus 1 und $\sqrt{-1}$ gebildeten gewöhnlichen complexen Grössen ist eine ganze homogene Function ersten Grades der Grössen $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$.

3. Die Grössen

$$f_\rho(x) = x - \eta_\rho e_0, \quad f_\sigma(x) = (x - \eta_\sigma e_0)^2 + \zeta_\sigma^2 e_0$$

sind Theiler der Null, und zwar hat im Theilgebiete \mathfrak{G}_ρ die Componente von $f_\rho(x)$, im Theilgebiete \mathfrak{G}_σ die Componente von $f_\sigma(x)$ den Werth Null. Wenn die Discriminante der Gleichung $f(\xi) = 0$ einen von Null verschiedenen Werth hat, mit anderen Worten, wenn die Grössen $\eta_\rho, \eta_\sigma + \zeta_\sigma i, \eta_\sigma - \zeta_\sigma i$ sämmtlich von einander verschieden sind, so hat keine andere Componente der Grössen $f_\rho(x), f_\sigma(x)$ den Werth Null. Hieraus folgt aber, dass, wenn in dem Producte der r Factoren

$$\prod_{\mu} f_{\mu}(x) \qquad (\mu = 1, 2, \dots, r)$$

ein beliebiger Factor $f_\nu(x)$ weggelassen wird, das Product der übrigen Factoren unter der angegebenen Voraussetzung eine von Null verschiedene dem Theilgebiete \mathfrak{G}_ν angehörnde Grösse ist.

Hiermit ist bewiesen, dass die erklärten Theilgebiete $\mathfrak{G}_1, \mathfrak{G}_2, \dots, \mathfrak{G}_r$ sich nicht ändern, wenn an die Stelle der ihrer Definition zu Grunde liegenden Grösse $g = \sum_a \xi'_a e_a$ eine beliebige andere Grösse $x = \sum_a \xi_a e_a$ tritt, für welche die gestellten Bedingungen erfüllt sind.

Die zu Anfang dieser Bemerkung aufgeworfene Frage ist hiermit beantwortet.

ZU LINDEMANN'S ABHANDLUNG: »ÜBER DIE LUDOLPH'SCHE ZAHL.«

(Aus dem Sitzungsbericht der Königl. Akademie der Wissenschaften
vom 3. December 1885.)

Für die Ergebnisse der in der genannten Abhandlung*) mitgetheilten Untersuchungen des Herrn Lindemann, namentlich für den darin enthaltenen, bis dahin vergebens erstrebten Beweis, dass die Zahl π keine algebraische Zahl und somit die Quadratur des Kreises auf constructivem Wege unausführbar ist, hat sich in den weitesten Kreisen ein so lebhaftes Interesse kundgegeben, dass ich glaube, es werde eine möglichst elementar gehaltene, nur auf allbekannte Sätze sich stützende Begründung der Lindemann'schen Theoreme, wie ich sie im Nachstehenden zu geben versuche, zahlreichen Mathematikern willkommen sein.**)

*) Diese Abhandlung, deren Inhalt durch die Überschrift nur unvollständig angegeben wird, ist von mir am 22. Juni 1882 der Akademie vorgelegt worden und bald darauf etwas weiter ausgeführt auch in den »Mathematischen Annalen« (Bd. XX) erschienen.

***) Ich bemerke ausdrücklich, dass die Veröffentlichung dieses im Sommer 1882 entstandenen und seinem wesentlichen Inhalte nach am 26. October desselben Jahres in der Akademie vorgetragenen Aufsatzes im Einverständnisse mit Herrn Lindemann erfolgt, und dass ich damit nur bezwecke, die von demselben gegebenen oder angedeuteten Beweise seiner Sätze ohne wesentliche Modification der leitenden Grundgedanken zu vereinfachen und zu vervollständigen. Das erstere erreiche ich hauptsächlich dadurch, dass ich nicht, wie Herr Lindemann es thut, bei dem Leser die vollständige Kenntniss des Inhalts der berühmten Hermite'schen Abhandlung »Sur la fonction exponentielle« (Compt. rend. t. 77, 1873) voraussetze, sondern aus derselben nur die Methode zur Herleitung des in § 1 unter Nr. VI aufgestellten Hilfssatzes entnehme.

Der Aufsatz ist übrigens im Manuscript mehreren befreundeten Mathematikern mitgetheilt und dann unter Benutzung der Bemerkungen, die mir einige von ihnen haben zukommen lassen, umgearbeitet worden. Namentlich hat mir Herr H. A. Schwarz verschiedene redactionelle Änderungen vorgeschlagen, auf die ich gern eingegangen bin. Besonderen Dank schulde ich ferner Herrn Dedekind für eine auf den Beweis des im Anfange des § 3 aufgestellten Hilfssatzes sich beziehende Mittheilung, durch welche es mir möglich geworden ist, diesen Beweis wesentlich zu vereinfachen.

§ 1. Hülfsätze aus der Theorie der Exponentialfunction.

I. Es bedeute $[z, \lambda]$ für jeden ganzzahligen, nicht negativen Werth von λ die durch die Gleichung

$$(1.) \quad \frac{[z, \lambda]}{\lambda!} = \sum_{x=0}^{\lambda} \frac{z^x}{x!}$$

definierte ganze Function λ^{ten} Grades des Arguments z , ferner sei

$$(2.) \quad g(z) = \sum_{\lambda=0}^l b_{\lambda} z^{\lambda}$$

eine beliebige ganze Function von z , und es werde gesetzt:

$$(3.) \quad G(z) = \sum_{\lambda=0}^l b_{\lambda} [z, \lambda];$$

dann besteht die Gleichung

$$(4.) \quad g(z) e^{-z} dz = d(-G(z) e^{-z}),$$

und es ist $G(z)$ eine ganze Function der Veränderlichen z von demselben Grade wie die Function $g(z)$.

Dabei ist zu bemerken, dass durch die vorstehende Gleichung die Function $G(z)$ eindeutig definirt wird.

II. Es seien

$$(5.) \quad \left\{ \begin{array}{l} f(z) = \sum_{v=0}^{n+1} a_v z^{n+1-v} \\ h(z) = \sum_{v=0}^n c_v z^v \end{array} \right.$$

zwei ganze Functionen von z , beziehlich vom $(n+1)^{\text{ten}}$ und vom n^{ten} Grade; die Coefficienten der zweiten sollen willkürlich anzunehmende Grössen und die Coefficienten der ersten nur der Beschränkung unterworfen sein, dass a_0 nicht gleich Null sein und die Function $f(z)$ mit ihrer ersten Ableitung $f'(z)$ keinen gemeinschaftlichen Theiler besitzen darf. Man bestimme, unter m eine beliebig anzunehmende positive ganze Zahl verstehend, auf die in I. angegebene Weise eine Reihe von ganzen Functionen

$$(6.) \quad H_0(z), H_1(z), \dots, H_m(z),$$

welche den Gleichungen

$$(7.) \quad \begin{cases} h(z) e^{-z} dz = d(-H_0(z) e^{-z}) \\ f'(z) H_{\mu-1}(z) e^{-z} dz = d(-H_\mu(z) e^{-z}) \end{cases} \quad (\mu = 1, 2, \dots, m)$$

genügen; dann hat man, wenn

$$(8.) \quad h_0(z) = h(z), \quad h_\mu(z) = f'(z) H_{\mu-1}(z) \quad (\mu = 1, 2, \dots, m)$$

gesetzt wird, für $\mu = 0, 1, \dots, m-1$

$$(9.) \quad d\left(-\frac{H_\mu(z)}{(m-\mu)!} f(z)^{m-\mu} e^{-z}\right) = \frac{h_\mu(z)}{(m-\mu)!} f(z)^{m-\mu} e^{-z} dz - \frac{h_{\mu+1}(z)}{(m-\mu-1)!} f(z)^{m-\mu-1} e^{-z} dz$$

und (für $\mu = m$)

$$(10.) \quad d(-H_m(z) e^{-z}) = h_m(z) e^{-z} dz.$$

Aus diesen $(m+1)$ Gleichungen ergibt sich, wenn man sie durch Addition mit einander vereinigt:

$$(11.) \quad \frac{h(z)}{m!} f(z)^m e^{-z} dz = d \sum_{\mu=0}^m \left\{ -\frac{H_\mu(z)}{(m-\mu)!} f(z)^{m-\mu} e^{-z} \right\}.$$

Die Coefficienten der Functionen $[z, \lambda]$ sind, wie aus der Formel (1.) unmittelbar erhellt, ganze Zahlen; die Coefficienten der durch die Gleichung (3.) definirten Function $G(z)$ also ganze lineare Functionen der Grössen b_0, b_1, \dots, b_i mit ganzzahligen Coefficienten. Demgemäss lehren die Formeln (7.), dass jede der Functionen $H_0(z), H_1(z), \dots, H_m(z)$ eine ganze Function der Grössen

$$z, a_0, a_1, \dots, a_{n+1}, c_0, c_1, \dots, c_n$$

mit ganzzahligen Coefficienten ist.

III. Die im Vorstehenden definirte Function $H_m(z)$ ist niemals durch die Function $f(z)$ theilbar, ausgenommen in dem Falle, wo die Grössen c_0, c_1, \dots, c_n sämmtlich den Werth Null haben und somit jede der Functionen $H_0(z), H_1(z), \dots, H_m(z)$ sich für jeden Werth von z auf Null reducirt.

Es werde gesetzt:

$$(12.) \quad \bar{H}_m(z) = \sum_{\mu=0}^m \left\{ \frac{H_\mu(z)}{(m-\mu)!} f(z)^{m-\mu} \right\},$$

so ist (nach Gleichung (11.))

$$\bar{H}_m(z) - \frac{d\bar{H}_m(z)}{dz} = \frac{h(z)}{m!} f^m(z).$$

Wenn daher die Coefficienten der Function $h(z)$ nicht sämmtlich den Werth Null haben, so ist $\bar{H}_m(z)$ eine ganze Function von z , die nicht für jeden Werth dieser Grösse verschwindet und deren Grad (nach I.) nicht grösser ist als $m(n+1) + n = (m+1)(n+1) - 1$. Bezeichnet man also mit $\varrho + 1$ die kleinste positive ganze Zahl, für welche $\bar{H}_m(z)$ nicht durch $f^{\varrho+1}(z)$ theilbar ist, und setzt

$$\bar{H}_m(z) = H_m^*(z) f^{\varrho}(z),$$

so ist $H_m^*(z)$ eine ganze Function von z , die nicht für jeden Werth dieser Grösse verschwindet, und $\varrho \leq m$. Man hat dann

$$\left(H_m^*(z) - \frac{dH_m^*(z)}{dz} \right) f(z) - \varrho H_m^*(z) f'(z) = \frac{h(z)}{m!} f^{m-\varrho+1}(z),$$

und es ist daher $\varrho H_m^*(z) f'(z)$ durch $f(z)$ theilbar. Dies aber ist, da die Functionen $f(z), f'(z)$ keinen gemeinschaftlichen Theiler besitzen und die Function $H_m^*(z)$ nicht durch $f(z)$ theilbar ist, nur der Fall für $\varrho = 0$; es ist also $f(z)$ kein Theiler von $\bar{H}_m(z)$ und somit, der Gleichung (12.) zufolge, auch kein Theiler der Function $H_m(z)$.

IV. Bezeichnet man (unter der Annahme, dass $n > 1$ sei) mit z', z'' irgend zwei derjenigen Werthe von z , für welche $f(z) = 0$ wird, so ergibt sich aus der Gleichung (11.) die folgende:

$$(13.) \quad H_m(z'') e^{-z''} - H_m(z') e^{-z'} = - \int_{z'}^{z''} \frac{h(z)}{m!} f^m(z) e^{-z} dz.$$

Aus den Gleichungen (7.) und (1.) bis (4.) erhellt, dass die Function $H_m(z)$, bei unbestimmten Werthen der Grössen c_0, c_1, \dots, c_n , vom $(mn+n)^{\text{ten}}$ Grade ist und dass in derselben die Coefficienten von

$$z^{mn+n}, z^{mn+n-1}, \dots, z^{mn+n-(m-1)}$$

beziehlich durch

$$a_0^m, a_0^{m-1}, \dots, a_0$$

theilbar sind. Daraus folgt, dass die Function $a_0^{m(n-1)} H_m(z)$ sich auf die

Form

$$(14.) \quad a_0^{m(m-1)} H_m(z) = G(z, m) f(z) + g(z, m)$$

bringen lässt, in der Art, dass $G(z, m), g(z, m)$ beide ganze Functionen der Grössen $z, a_0, a_1, \dots a_{n+1}, c_0, c_1, \dots c_n$ mit ganzzahligen Coefficienten werden und $g(z, m)$ in Beziehung auf z von nicht höherem als dem n^{ten} Grade ist. Die Gleichung (13.) kann also in die folgende verwandelt werden:

$$(15.) \quad g(z'', m) e^{-z''} - g(z', m) e^{-z'} = - \int_{z'}^{z''} \frac{h(z) (a_0^{n-1} f(z))^m}{m!} e^{-z} dz.$$

Die Coefficienten der Functionen $H_m(z), G(z, m), g(z, m)$ sind, wie für die erste aus ihrer oben angegebenen Bildungsweise, für die beiden anderen aber aus der vorstehenden Definition derselben hervorgeht, homogene ganze lineare Functionen der willkürlich anzunehmenden Grössen $c_0, c_1, \dots c_n$. Wenn man daher, unter ν irgend eine der Zahlen $0, 1, \dots n$ verstehend, mit $g_\nu(z, m)$ die Function bezeichnet, in welche $g(z, m)$ dadurch übergeht, dass man $c_\nu = 1$ und die übrigen der Grössen $c_0, c_1, \dots c_n$ sämmtlich gleich Null annimmt, so hat man

$$(16.) \quad g(z, m) = \sum_{\nu=0}^n c_\nu g_\nu(z, m),$$

und es gehen aus der Gleichung (15.) die folgenden $(n+1)$ Gleichungen hervor:

$$(17.) \quad g_\nu(z'', m) e^{-z''} - g_\nu(z', m) e^{-z'} = - \int_{z'}^{z''} \frac{z^\nu (a_0^{n-1} f(z))^m}{m!} e^{-z} dz \quad (\nu = 0, 1, \dots n).$$

Die Functionen $g_\nu(z, m)$ sind ganze Functionen der Grössen $z, a_0, a_1, \dots a_{n+1}$ mit ganzzahligen Coefficienten. Bezeichnet man ferner mit $G_\nu(z, m)$ die Function, in welche $G(z, m)$ durch die Annahme

$$h(z) = z^\nu$$

übergeht, so ist

$$(18.) \quad \left\{ \begin{array}{l} G(z, m) = \sum_{\nu=0}^n c_\nu G_\nu(z, m) \\ a_0^{m(m-1)} H_m(z) = f(z) \sum_{\nu=0}^n c_\nu G_\nu(z, m) + \sum_{\nu=0}^n c_\nu g_\nu(z, m), \end{array} \right.$$

und es ergibt sich aus der letzten Gleichung, da $H_m(z)$ (nach III.) nur dann durch $f(z)$ theilbar ist, wenn die Grössen c_ν sämmtlich verschwinden, dass

II.

der Ausdruck

$$\sum_{v=0}^n c_v g_v(z, m)$$

nur dann für jeden Werth von z gleich Null ist, wenn jede der Grössen c_0, c_1, \dots, c_n den Werth Null hat — mit anderen Worten, dass unter den in den Gleichungen (17.) vorkommenden $(n+1)$ ganzen Functionen von z

$$g_0(z, m), g_1(z, m), \dots, g_n(z, m)$$

für keinen Werth von m eine lineare Abhängigkeit stattfindet.

Aus dieser Eigenschaft der Functionen $g_v(z, m)$ ergibt sich ferner:

Giebt man der Grösse z irgend $(n+1)$ bestimmte Werthe

$$z_0, z_1, \dots, z_n,$$

unter denen keine zwei gleiche sich finden, so hat die Determinante

$$|g_v(z_\lambda, m)| \quad (\lambda, v = 0, 1, \dots, n)$$

stets einen von Null verschiedenen Werth.

Wäre nämlich diese Determinante gleich Null, so würden sich $(n+1)$ Grössen c_0, c_1, \dots, c_n so bestimmen lassen, dass die $(n+1)$ Gleichungen

$$\sum_{v=0}^n c_v g_v(z_\lambda, m) = 0 \quad (\lambda = 0, 1, \dots, n)$$

beständen, ohne dass sämtliche Grössen c_0, c_1, \dots, c_n den Werth Null hätten. Dann würde aber der Ausdruck

$$\sum_{v=0}^n c_v g_v(z, m),$$

der eine ganze Function der Veränderlichen z von nicht höherem als dem n^{ten} Grade ist, für jeden Werth von z verschwinden, was nach dem Vorhergehenden nicht stattfinden kann.

V. Da

$$\frac{z^v (a_0^{n-1} f(z))^m}{m!} e^{-z}$$

eine (transcendente) ganze Function von z ist, so hat das Integral auf der Rechten der Gleichung (17.) bei gegebenen Werthen von m, v, z', z'' einen von dem Integrationswege unabhängigen, eindeutig bestimmten Werth, den

man, unter τ eine auf das Intervall $(0 \dots 1)$ beschränkte reelle Veränderliche verstehend, in der Form

$$\int_0^1 \frac{(z'' - z')(z' + (z'' - z')\tau)^v [a_0^{n-1} f(z' + (z'' - z')\tau)]^m}{m!} e^{-z' - (z'' - z')\tau} d\tau$$

darstellen kann. Es lässt sich aber, nach Annahme einer beliebig kleinen positiven Grösse δ , eine ganze Zahl M so bestimmen, dass für jeden Werth von m , der grösser als M ist, und für jeden der betrachteten Werthe von τ

$$\left| \frac{(z'' - z')(z' + (z'' - z')\tau)^v [a_0^{n-1} f(z' + (z'' - z')\tau)]^m}{m!} e^{-z' - (z'' - z')\tau} \right| < \delta$$

und somit auch, nach einem bekannten Satze, der absolute Betrag des Integrals

$$\int_{z'}^{z''} \frac{z^v (a_0^{n-1} f(z))^m}{m!} e^{-z} dz$$

kleiner als δ ist. Aus der Gleichung (17.) ergibt sich also, wenn man beide Seiten derselben mit

$$e^{z'' + z'}$$

multiplicirt,

$$(19.) \quad \lim_{m=\infty} \{g_v(z', m) e^{z''} - g_v(z'', m) e^{z'}\} = 0 \quad (v = 0, 1, \dots, n).$$

VI. Bis jetzt sind die Coefficienten der Function $f(z)$ keiner anderen Beschränkung als der oben (unter II.) angegebenen unterworfen worden. Setzt man aber nunmehr noch fest, dass dieselben sämtlich gegebene ganze Zahlen sein sollen, so werden, nach dem oben (IV.) Bemerkten, für jeden Werth der Zahl m auch die Coefficienten der Functionen $g_v(z, m)$ sämtlich ganze Zahlen. Man kann ferner, wenn z_0, z_1, \dots, z_n die Wurzeln der Gleichung $f(z) = 0$ sind, den Gleichungen (19.) gemäss m so gross annehmen, dass jede der Differenzen

$$g_v(z_0, m) e^{z_\lambda} - g_v(z_\lambda, m) e^{z_0} \quad \left(\begin{array}{l} \lambda = 0, 1, \dots, n \\ v = 0, 1, \dots, n \end{array} \right)$$

ihrem absoluten Betrage nach kleiner ist, als eine beliebig klein angenommene positive Grösse δ . Zugleich hat dann die Determinante

$$|g_v(z_\lambda, m)| \quad (\lambda, v = 0, 1, \dots, n)$$

einen von Null verschiedenen Werth, indem unter den Grössen z_0, z_1, \dots, z_n keine zwei gleiche sich finden.

Damit ist ein Satz bewiesen, der im Folgenden hauptsächlich zur Begründung der Lindemann'schen Theoreme dienen wird und sich so aussprechen lässt:

»Es sei $f(z)$ eine ganze Function $(n+1)$ ten Grades der Veränderlichen z mit gegebenen ganzzahligen Coefficienten, die so beschaffen sind, dass die Gleichung

$$f(z) = 0$$

$(n+1)$ von einander verschiedene Wurzeln hat, welche mit

$$z_0, z_1, \dots, z_n$$

bezeichnet werden mögen. Alsdann lässt sich, nach Annahme einer beliebig kleinen positiven Grösse δ , auf mannigfaltige Weise ein System von $(n+1)$ ganzen Functionen

$$g_0(z), g_1(z), \dots, g_n(z)$$

des Arguments z von nicht höherem als dem n ten Grade, deren Coefficienten sämtlich ganze Zahlen sind, so bestimmen, dass erstens jede der Differenzen

$$g_\nu(z_\lambda) e^{z_\lambda} - g_\nu(z_\nu) e^{z_\nu} \quad \begin{matrix} (\lambda = 0, 1, \dots, n) \\ (\nu = 0, 1, \dots, n) \end{matrix}$$

ihrem absoluten Betrage nach kleiner als δ ist, und zweitens die Determinante

$$|g_\nu(z_\lambda)| \quad (\lambda, \nu = 0, 1, \dots, n)$$

einen von Null verschiedenen Werth hat.«

§ 2. Beweis, dass die Ludolph'sche Zahl π eine transcendente Zahl ist.

Da $e^{\pi i} = -1$ ist und die Function e^x nur für solche Werthe ihres Arguments, welche (ungrade) Vielfache von πi sind, den Werth -1 annimmt, so kann dem zu beweisenden Satze der folgende substituirt werden:

»Die Grösse $e^x + 1$ hat, wenn x eine algebraische Zahl ist, stets einen von Null verschiedenen Werth.«

Es bedeute x_1 irgend eine gegebene algebraische Zahl. Dieselbe sei Wurzel einer Gleichung r^{ten} Grades

$$x^r + c_1 x^{r-1} + \dots + c_r = 0,$$

deren Coefficienten sämtlich rationale Zahlen sind — wobei angenommen werden darf, dass $r > 1$ sei, weil für $r = 1$ $e^{x_1} = e^{-c_1}$ und somit eine positive Grösse ist. Die vorstehende Gleichung hat dann ausser x_1 noch $(r-1)$ andere Wurzeln; werden diese mit x_2, \dots, x_r bezeichnet, so ist es, damit der aufgestellte Satz bestehe, nothwendig und hinreichend, dass die Grösse

$$\prod_{\lambda=1}^r (e^{x_\lambda} + 1)$$

einen von Null verschiedenen Werth habe. Dies aber lässt sich folgendermaassen zeigen:

Es seien $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_r$ von einander unabhängige Veränderliche, so hat man

$$\prod_{\lambda=1}^r (e^{\xi_\lambda} + 1) = \sum_{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_r} e^{\varepsilon_1 \xi_1 + \varepsilon_2 \xi_2 + \dots + \varepsilon_r \xi_r}, \quad (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_r = 0, 1)$$

oder, wenn man $2^r = p$ setzt und die p Functionen

$$\varepsilon_1 \xi_1 + \varepsilon_2 \xi_2 + \dots + \varepsilon_r \xi_r, \quad (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_r = 0, 1)$$

in irgend einer Ordnung genommen, mit $\zeta_0, \zeta_1, \dots, \zeta_{p-1}$ bezeichnet,

$$\prod_{\lambda=1}^r (e^{\xi_\lambda} + 1) = \sum_{\mu=0}^{p-1} e^{\zeta_\mu}.$$

Sind also

$$z_0, z_1, \dots, z_{p-1}$$

die Werthe, welche

$$\zeta_0, \zeta_1, \dots, \zeta_{p-1}$$

dadurch annehmen, dass man

$$\xi_1 = x_1, \quad \xi_2 = x_2, \quad \dots \quad \xi_r = x_r$$

setzt, so ist

$$\prod_{\lambda=1}^r (e^{x_\lambda} + 1) = \sum_{\mu=0}^{p-1} e^{z_\mu}.$$

Die Anzahl der von einander verschiedenen Werthe, welche in der Reihe z_0, z_1, \dots, z_{p-1} vorhanden sind, sei $(n+1)$, und es mögen die Aus-

drücke $\zeta_0, \zeta_1, \dots, \zeta_{p-1}$ so geordnet sein, dass unter den $(n+1)$ Grössen z_0, z_1, \dots, z_n keine zwei gleiche sich finden, und $z_0 = 0$ ist; wobei zu bemerken, dass $n+1 > 1$ ist, weil in der Reihe z_0, z_1, \dots, z_{p-1} auch die Grössen x_1, \dots, x_r enthalten sind. Dann kann man, unter z eine unbestimmte Grösse verstehend, eine ganze Function $f(z)$ vom Grade $(n+1)$ herstellen, welche nur ganzzahlige Coefficienten hat und für $z = z_0, z_1, \dots, z_n$ verschwindet. Es kann nämlich das Product

$$\prod_{\mu=0}^{p-1} (z - \zeta_\mu)$$

dargestellt werden als ganze Function der Grössen $z, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_r$ mit ganzzahligen Coefficienten, welche sich nicht ändert, wenn die Grössen $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_r$ in beliebiger Weise permutirt werden, und sich somit, wenn man für $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_r$ die Wurzeln einer Gleichung p^{ten} Grades mit lauter rationalen Zahlcoefficienten einsetzt, in eine ganze Function p^{ten} Grades von z mit eben solchen Coefficienten verwandelt. Es lässt sich also $\prod_{\mu=0}^{p-1} (z - z_\mu)$ als ganze Function von z mit lauter rationalen Zahlcoefficienten darstellen; dividirt man diese Function dann durch den grössten Theiler, den sie mit ihrer ersten Ableitung gemein hat, so ist der Quotient eine ganze Function $(n+1)^{\text{ten}}$ Grades von z , aus der man, indem man sie mit einer passenden ganzen Zahl multiplicirt, eine Function

$$f(z) = a_0 z^{n+1} + a_1 z^n + \dots + a_{n+1}$$

erhält, welche lauter ganzzahlige Coefficienten hat und für $z = z_0, z_1, \dots, z_n$ verschwindet.

Nachdem diese Function $f(z)$ hergestellt worden, kann man aus ihr, nach Annahme einer beliebig kleinen positiven Grösse δ , ein System von $(n+1)$ ganzen Functionen

$$g_0(z), g_1(z), \dots, g_n(z)$$

von der im Schlusssatz (VI.) des vorigen Paragraphen angegebenen Beschaffenheit ableiten, so dass, wenn man

$$g_\nu(0)e^{z_\lambda} - g_\nu(z_\lambda) = \varepsilon_{\lambda,\nu} \delta \quad \begin{matrix} (\lambda = 0, 1, \dots, n) \\ (\nu = 0, 1, \dots, n) \end{matrix}$$

setzt, jede der Grössen $\varepsilon_{\lambda,\nu}$ ihrem absoluten Betrage nach kleiner als 1 ist.

Die Grössen $g_\nu(z_\lambda)$ sind sämtlich algebraische Zahlen; multiplicirt man jede derselben mit a_0^n , so verwandeln sie sich alle in ganze algebraische Zahlen.*)

Nimmt man nun δ so klein an, dass $|(p-1)a_0^n \delta| < 1$ ist, so ergibt sich aus der vorstehenden Gleichung

$$a_0^n g_\nu(0) \sum_{\mu=0}^{p-1} e^{z_\mu} = \sum_{\mu=0}^{p-1} a_0^n g_\nu(z_\mu) + \varepsilon_\nu, \quad (\nu = 0, 1, \dots, n)$$

wo jede der Grössen ε_ν dem absoluten Betrage nach kleiner als 1 ist.

Es ist aber

$$\sum_{\mu=0}^{p-1} a_0^n g_\nu(z_\mu)$$

für jeden Werth von ν eine symmetrische ganze Function der Grössen $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_r$ mit ganzzahligen Coefficienten; also ist die ganze algebraische Zahl

$$\sum_{\mu=0}^{p-1} a_0^n g_\nu(z_\mu)$$

zugleich eine rationale Zahl, d. h. sie ist eine ganze Zahl im gewöhnlichen Sinne. Ferner lässt sich zeigen, dass die $(n+1)$ Zahlen

$$\sum_{\mu=0}^{p-1} a_0^n g_\nu(z_\mu) \quad (\nu = 0, 1, \dots, n)$$

nicht sämtlich den Werth Null haben. Man hat nämlich

$$\sum_{\mu=0}^{p-1} a_0^n g_\nu(z_\mu) = \sum_{\lambda=0}^n N_\lambda g_\nu(z_\lambda),$$

*) Nach der von Herrn Kronecker eingeführten Terminologie heisst eine Grösse x eine algebraische Zahl, wenn sie einer algebraischen Gleichung von der Form

$$x^v + A_1 x^{v-1} + \dots + A_v = 0,$$

in der die Coefficienten A_1, \dots, A_v sämtlich rationale Zahlen sind, genügt. Sind insbesondere diese Coefficienten sämtlich ganze Zahlen, so wird x eine ganze algebraische Zahl genannt, und es ist in diesem Falle auch jede ganze rationale Function von x mit lauter ganzzahligen Coefficienten eine ganze algebraische Zahl.

Hiernach sind, da

$$a_0^n f(z) = (a_0 z)^{n+1} + a_1 (a_0 z)^n + \dots + a_n a_0^{n-1} (a_0 z) + a_{n+1} a_0^n$$

ist, $a_0 z_0, a_0 z_1, \dots, a_0 z_n$ sämtlich ganze algebraische Zahlen, und dasselbe gilt also auch, da der Grad der Function $g_\nu(z)$ nicht grösser als n ist, von jeder der Grössen $a_0^n g_\nu(z_\lambda)$.

wo N_0, N_1, \dots, N_n sämmtlich positive ganze Zahlen sind; es müsste also, wenn die in Rede stehenden Zahlen alle den Werth Null haben sollten, die Determinante

$$|g_\nu(z_\lambda)| \quad (\overline{\lambda, \nu} = 0, 1, \dots, n)$$

gleich Null sein, was nicht der Fall ist.

Es giebt also mindestens einen bestimmten Werth von ν , für welchen

$$\sum_{\mu=0}^{p-1} \alpha_0^n g_\nu(z_\mu)$$

eine von Null verschiedene ganze rationale Zahl, und somit

$$\sum_{\mu=0}^{p-1} \alpha_0^n g_\nu(z_\mu) + \varepsilon_\nu = \alpha_0^n g_\nu(0) \sum_{\mu=0}^{p-1} e^{z_\mu} = \alpha_0^n g_\nu(0) \prod_{\lambda=1}^r (e^{x_\lambda} + 1)$$

nicht gleich Null ist.

Daraus folgt unmittelbar, dass das Product

$$\prod_{\lambda=1}^r (e^{x_\lambda} + 1)$$

und somit auch jeder einzelne Factor desselben einen von Null verschiedenen Werth hat; w. z. b. w.

Damit ist, dem oben Bemerkten gemäss, dargethan, dass die Zahl π und daher auch π selbst eine transcendente Zahl ist.

Als ein Corollar zu diesem Satze ergibt sich, dass die »Quadratur des Kreises« eine unlösbare Aufgabe ist, wenn verlangt wird, dass sie durch eine geometrische Construction, bei der nur algebraische Curven und Flächen zur Anwendung kommen, bewerkstelligt werde. (Vergl. den Schlusssatz des § 3.)

§ 3. Allgemeinere, auf die Exponentialfunction sich beziehende Sätze.

I. Zunächst ist der folgende Hülfsatz zu beweisen. Es seien gegeben $(k+1)$ Reihen von je r Grössen:

$$\begin{array}{ll} (1) & A'_1, A'_2, \dots, A'_r \\ (2) & A''_1, A''_2, \dots, A''_r \\ \cdot & \dots \dots \dots \cdot \\ \cdot & \dots \dots \dots \cdot \\ (k) & A^{(k)}_1, A^{(k)}_2, \dots, A^{(k)}_r \\ (k+1) & x_1, x_2, \dots, x_r \end{array}$$

wobei angenommen werde, dass in jeder der k ersten Reihen wenigstens eine Grösse vorkomme, die einen von Null verschiedenen Werth hat, und in der letzten Reihe keine zwei gleiche Grössen sich finden. Man bilde das Product

$$\sum_{a=1}^r A'_a e^{x_a} \cdot \sum_{b=1}^r A''_b e^{x_b} \dots \sum_{t=1}^r A_t^{(k)} e^{x_t}$$

und bringe dasselbe, welches mit P bezeichnet werde, auf die Form*)

$$P = \sum_{a,b,\dots,t} A'_a A''_b \dots A_t^{(k)} e^{x_a+x_b+\dots+x_t} \quad (a, b, \dots, t = 1, \dots, r).$$

Aus der Gesamtheit der Werthe, welche die aus k Gliedern bestehende Summe

$$x_a + x_b + \dots + x_t$$

annimmt, wenn man für a, b, \dots, t alle möglichen Systeme von k der Reihe $1, 2, \dots, r$ entnommenen Zahlen setzt, hebe man die von einander verschiedenen, deren Anzahl $(n+1)$ sein möge, heraus; bezeichnet man dieselben mit z_0, z_1, \dots, z_n , so ergibt sich

$$P = \sum_{\lambda=0}^n C_\lambda e^{z_\lambda},$$

wo für jeden bestimmten Werth von λ

$$C_\lambda = \sum'_{a,b,\dots,t} A'_a A''_b \dots A_t^{(k)}$$

ist, unter der Bedingung, dass die Summation sich über diejenigen Werthsysteme a, b, \dots, t , für welche $x_a + x_b + \dots + x_t = z_\lambda$ ist, erstrecke. Es ist nun zu beweisen, dass unter den so definirten Grössen C_λ mindestens eine sich findet, die nicht gleich Null ist.

Die Grössen x_1, \dots, x_r können sowohl imaginäre als reelle Werthe haben. Man betrachte eine complexe Grösse $t+t'i$ (wo t, t' reelle Grössen bezeichnen) als positiv, wenn $t > 0$ oder auch $t = 0, t' > 0$, dagegen als negativ, wenn

*) Es ist nothwendig, dass bei dieser Umformung von P das Argument der Exponentialgrösse, durch welche das Product aus den Factoren

$$e^{x_a}, e^{x_b}, \dots, e^{x_t}$$

dargestellt wird, gleich $x_a + x_b + \dots + x_t$ genommen werde, und nicht etwa, was an sich gestattet wäre, gleich dieser Summe plus einem Vielfachen von $2\pi i$. Ohne diese Festsetzung würden die im Folgenden einzuführenden Grössen C_λ nicht gehörig bestimmt sein.

$t < 0$ oder auch $t = 0$, $t' < 0$ ist; dann darf man, da das Product P seinen Werth nicht ändert, wenn in dem gegebenen Grössensysteme irgend zwei Columnen unter einander vertauscht werden, voraussetzen, es seien die Grössen x_1, x_2, \dots, x_r so geordnet, dass die Differenzen

$$x_1 - x_2, x_2 - x_3, \dots, x_{r-1} - x_r$$

sämmtlich positive Grössen sind.

Dies vorausgesetzt, nehme man aus jeder der obigen Reihen (1), (2), ... (k) die erste Grösse, welche nicht den Werth Null hat, heraus; diese sei A'_α in der ersten Reihe, A''_β in der zweiten, ..., $A^{(k)}_\varkappa$ in der k^{ten} , so ist

$$A'_\alpha A''_\beta \dots A^{(k)}_\varkappa e^{x_\alpha + x_\beta + \dots + x_\varkappa}$$

eines der Glieder, aus denen P zusammengesetzt wird. Irgend ein anderes Glied, dessen Coefficient nicht den Werth Null hat, sei

$$A'_a A''_b \dots A^{(k)}_t e^{x_a + x_b + \dots + x_t},$$

so ist

$$a \geq \alpha, b \geq \beta, \dots, t \geq \varkappa,$$

und es giebt unter den Zahlen a, b, \dots, t mindestens eine, welche grösser ist als die entsprechende der Zahlen $\alpha, \beta, \dots, \varkappa$. Folglich ist

$$(x_\alpha + x_\beta + \dots + x_\varkappa) - (x_a + x_b + \dots + x_t) = (x_\alpha - x_a) + (x_\beta - x_b) + \dots + (x_\varkappa - x_t)$$

eine positive Grösse und somit $(x_a + x_b + \dots + x_t)$ nicht gleich $(x_\alpha + x_\beta + \dots + x_\varkappa)$. Es findet sich also unter den Gliedern

$$A'_a A''_b \dots A^{(k)}_t e^{x_a + x_b + \dots + x_t}$$

keines, in welchem das Argument der Exponentialgrösse denselben Werth hätte, wie in dem Gliede

$$A'_\alpha A''_\beta \dots A^{(k)}_\varkappa e^{x_\alpha + x_\beta + \dots + x_\varkappa},$$

der Coefficient des letzteren ist also eine der Grössen C_λ , unter denen sich hiernach unter allen Umständen eine findet, welche nicht gleich Null ist. *)

*) Dass man in der Reihe der Grössen C_0, C_1, \dots, C_n eine, die nicht gleich Null ist, ohne Weiteres auf die angegebene Weise ermitteln könne, wenn man die Grössen x_1, \dots, x_r so auf einander folgen lässt, dass die Differenzen $x_1 - x_2, x_2 - x_3, \dots, x_{r-1} - x_r$ sämmtlich positive Werthe (in dem festgesetzten Sinne) erhalten, ist eine Bemerkung, die ich Herrn Dedekind verdanke.

II. Nunmehr seien, wie in § 2, x_1, x_2, \dots, x_r die Wurzeln einer Gleichung r^{ten} Grades

$$x^r + c_1 x^{r-1} + \dots + c_r = 0,$$

deren Coefficienten sämmtlich gegebene rationale Zahlen sind, und deren Discriminante einen von Null verschiedenen Werth hat. Ferner seien N_1, N_2, \dots, N_r gegebene ganze Zahlen, unter denen wenigstens eine nicht gleich Null ist. Dann lässt sich beweisen, dass die Summe

$$\sum_{q=1}^r N_q e^{x_q}$$

niemals den Werth Null hat.

Man bezeichne die Grössen, welche aus der vorstehenden Summe dadurch hervorgehen, dass man in derselben die Grössen x_1, \dots, x_r auf jede mögliche Weise permutirt, mit

$$X', X'', \dots, X^{(k)},$$

wo $k = r!$ ist, so hat, wenn π irgend eine der Zahlen $1, 2, \dots, k$ bedeutet, $X^{(\pi)}$ die Form

$$X^{(\pi)} = \sum_{q=1}^r N_q^{(\pi)} e^{x_q},$$

wo die Reihe der Zahlen $N_1^{(\pi)}, N_2^{(\pi)}, \dots, N_r^{(\pi)}$ aus der Reihe N_1, N_2, \dots, N_r durch eine bestimmte Permutation der Glieder der letzteren hervorgeht. Setzt man dann

$$P = \prod_{\pi=1}^k X^{(\pi)},$$

so ist

$$(1.) \quad P = \sum_{a,b,\dots,f} N_a^f N_b^f \dots N_r^{(k)} e^{x_a + x_b + \dots + x_f}, \quad (a, b, \dots, f = 1, 2, \dots, r)$$

woraus sich, wenn man die von einander verschiedenen Werthe der Grössen

$$x_a + x_b + \dots + x_f, \quad (a, b, \dots, f = 1, 2, \dots, r)$$

wie in I., mit z_0, z_1, \dots, z_n bezeichnet,

$$(2.) \quad P = \sum_{\lambda=0}^n C_\lambda e^{z_\lambda}$$

ergibt, wo jetzt die Grössen C_λ sämmtlich ganze Zahlen sind, von denen, dem in I. Bewiesenen gemäss, wenigstens eine nicht gleich Null ist.

Mittels der gegebenen Gleichung, deren Wurzeln x_1, x_2, \dots, x_r sind, kann man nun eine Gleichung $(n+1)$ ten Grades mit lauter ganzzahligen Coefficienten herstellen, deren Wurzeln die Grössen z_0, z_1, \dots, z_n sind. Bildet man nämlich, unter $z, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_r$ von einander unabhängige Veränderliche verstehend, aus den durch die Formel

$$z - (\xi_a + \xi_b + \dots + \xi_t) \quad (a, b, \dots, t = 1, 2, \dots, r)$$

repräsentirten Grössen ein Product, so ist dasselbe eine ganze Function von z, ξ_1, \dots, ξ_r mit lauter ganzzahligen Coefficienten, und zugleich eine symmetrische Function von $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_r$, verwandelt sich also, wenn man $\xi_1 = x_1, \xi_2 = x_2, \dots, \xi_r = x_r$ setzt, in eine ganze Function von z mit lauter rationalen Zahlcoefficienten, welche für $z = z_0, z_1, \dots, z_n$, und zwar nur für diese Werthe von z , verschwindet. Dividirt man dann diese Function durch den grössten Theiler, den sie mit ihrer ersten Ableitung gemein hat, so ist der Quotient eine ganze Function $(n+1)$ ten Grades, aus der man, indem man sie mit einer passenden ganzen Zahl multiplicirt, eine ganze Function

$$(3.) \quad f(z) = a_0 z^{n+1} + a_1 z^n + \dots + a_{n+1}$$

erhält, welche lauter ganzzahlige Coefficienten hat und für $z = z_0, z_1, \dots, z_n$ verschwindet.

Aus dieser Function $f(z)$ kann man nun, nach Annahme einer beliebig kleinen positiven Grösse δ , ein System von $(n+1)$ ganzen Functionen

$$g_0(z), g_1(z), \dots, g_n(z)$$

von der im Schlusssatze (VI.) des § 1 angegebenen Beschaffenheit ableiten, so dass, wenn

$$(4.) \quad g_\nu(z_\lambda) e^{z_\lambda} - g_\nu(z_\nu) e^{z_\nu} = \varepsilon_{\lambda, \nu} \delta \quad \begin{matrix} (\lambda = 0, 1, \dots, n) \\ (\nu = 0, 1, \dots, n) \end{matrix}$$

gesetzt wird, jede der Grössen $\varepsilon_{\lambda, \nu}$ ihrem absoluten Betrage nach kleiner als 1 ist. Dann ergibt sich aus dem obigen Ausdrücke der Grösse P

$$(5.) \quad a_0^n g_\nu(z_0) e^{-z_0} P = \sum_{\lambda=0}^n C_\lambda a_0^n g_\nu(z_\lambda) + a_0^n e^{-z_0} \delta \sum_{\lambda=0}^n \varepsilon_{\lambda, \nu} C_\lambda \quad (\nu = 0, 1, \dots, n).$$

Hier ist nun jede der Grössen $a_0^n g_\nu(z_\lambda)$ eine ganze algebraische Zahl; es lässt sich aber zeigen, dass jede der $(n+1)$ Summen

$$\sum_{\lambda=0}^n C_\lambda a_0^n g_\nu(z_\lambda)$$

eine ganze rationale Zahl, d. h. also eine ganze Zahl im gewöhnlichen Sinne ist.

Versteht man wieder unter $z, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_r$ von einander unabhängige Veränderliche, so ist das Product

$$\sum_{a=1}^r N'_a e^{\xi_a} \cdot \sum_{b=1}^r N''_b e^{\xi_b} \dots \sum_{f=1}^r N_f^{(k)} e^{\xi_f}$$

und somit auch die Summe

$$\sum_{a,b,\dots,f} N'_a N''_b \dots N_f^{(k)} e^{\xi_a + \xi_b + \dots + \xi_f} \quad (a, b, \dots, f = 1, 2, \dots, r)$$

eine symmetrische Function von $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_r$. Entwickelt man dieselbe in eine Potenzreihe von $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_r$, so ist die Summe der Glieder m^{ter} Dimension dieser Reihe, nämlich

$$\frac{1}{m!} \sum_{a,b,\dots,f} N'_a N''_b \dots N_f^{(k)} (\xi_a + \xi_b + \dots + \xi_f)^m, \quad (a, b, \dots, f = 1, 2, \dots, r)$$

und daher auch, wenn $g(z)$ eine beliebige ganze Function von z ist,

$$\sum_{a,b,\dots,f} N'_a N''_b \dots N_f^{(k)} g(\xi_a + \xi_b + \dots + \xi_f) \quad (a, b, \dots, f = 1, 2, \dots, r)$$

eine symmetrische ganze rationale Function der Grössen $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_r$. Die letztere erhält also, wenn man (für $\nu = 0, 1, \dots, n$) $g(z) = g_\nu(z)$ annimmt und $\xi_1 = x_1, \xi_2 = x_2, \dots, \xi_r = x_r$ setzt, einen rationalen Werth, der sich durch Multiplication mit a_0^n in eine ganze Zahl verwandelt. Es ist aber nach dem Obigen für jeden bestimmten Werth von λ

$$(6.) \quad C_\lambda = \sum_{a,b,\dots,f} N'_a N''_b \dots N_f^{(k)},$$

wenn die Summation über diejenigen Zahlensysteme, für welche

$$x_a + x_b + \dots + x_f = z_\lambda$$

ist, erstreckt wird, und daher

$$(7.) \quad \sum_{\lambda=0}^n C_\lambda a_0^n g_\nu(z_\lambda) = \sum_{a,b,\dots,f} N'_a N''_b \dots N_f^{(k)} a_0^n g_\nu(x_a + x_b + \dots + x_f),$$

also auch $\sum_{\lambda=0}^n C_\lambda a_0^n g_\nu(z_\lambda)$ eine ganze rationale Zahl.

Es lässt sich aber auch zeigen, dass diese Zahl wenigstens für einen Werth von ν einen von Null verschiedenen Werth hat. Da nämlich die Grössen C_λ nach I. nicht sämtlich gleich Null sind, so müsste, wenn alle $(n+1)$ Zahlen

$$\sum_{\lambda=0}^n C_\lambda a_0^n g_\nu(z_\lambda) \quad (\nu = 0, 1, \dots, n)$$

den Werth Null hätten, die Determinante

$$|g_\nu(z_\lambda)| \quad (\lambda, \nu = 0, 1, \dots, n)$$

gleich Null sein, was nicht der Fall ist.

Nimmt man also die Grösse δ so klein an, dass jede der Grössen

$$a_0^n e^{-z_0} \delta \sum_{\lambda=0}^n \varepsilon_{\lambda, \nu} C_\lambda \quad (\nu = 0, 1, \dots, n)$$

dem absoluten Betrage nach kleiner als 1 ist, so findet sich unter den Grössen auf der Rechten der Gleichungen (5.) wenigstens eine, die nicht gleich Null ist; woraus sich unmittelbar ergibt, dass das Product P , und somit auch die Grösse

$$\sum_{\varrho=1}^r N_\varrho e^{x_\varrho},$$

welche ein Factor dieses Productes ist, einen von Null verschiedenen Werth hat; was zu beweisen war.

Selbstverständlich gilt dieser Satz auch, wenn unter N_1, N_2, \dots, N_r rationale Zahlen verstanden werden.

Nimmt man für x_1, x_2, \dots, x_r irgend r von einander verschiedene ganze Zahlen an, so ergibt sich als ein besonderer Fall des vorstehenden Theorems der von Hermite bewiesene Satz, dass die Zahl e keine algebraische Zahl ist.

Eine naheliegende Verallgemeinerung des Theorems ergibt sich folgendermaassen:

Sind x_1, x_2, \dots, x_r irgend r gegebene, von einander verschiedene algebraische Zahlen, so lässt sich stets eine algebraische Gleichung — im Allgemeinen von höherem als dem r^{ten} Grade — mit lauter rationalen Zahlcoefficienten und nicht verschwindender Discriminante herstellen, unter deren Wurzeln die gegebenen Grössen x_1, x_2, \dots, x_r sich finden. Ist der Grad dieser

Gleichung gleich r , so sind x_1, x_2, \dots, x_r solche r Grössen, für welche das bewiesene Theorem unmittelbar gilt. Hat die Gleichung aber ausser x_1, x_2, \dots, x_r noch l andere Wurzeln

$$x_{r+1}, \dots, x_{r+l},$$

und werden unter N_1, N_2, \dots, N_{r+l} rationale Zahlen verstanden, so ist

$$\sum_{\varrho=1}^{r+l} N_{\varrho} e^{x_{\varrho}}$$

nur in dem Falle gleich Null, wo N_1, N_2, \dots, N_{r+l} sämmtlich den Werth Null haben. Nimmt man also für jeden Werth von ϱ , der grösser als r ist, $N_{\varrho} = 0$ an, so ergibt sich:

Werden unter x_1, x_2, \dots, x_r irgend r von einander verschiedene algebraische Zahlen, unter N_1, N_2, \dots, N_r aber beliebige rationale Zahlen verstanden, so kann die Gleichung

$$\sum_{\varrho=1}^r N_{\varrho} e^{x_{\varrho}} = 0$$

nur dadurch befriedigt werden, dass man jeder der Zahlen N_{ϱ} den Werth Null giebt.

III. Jetzt seien

$$\begin{array}{c} X_1, X_2, \dots, X_r, \\ x_1, x_2, \dots, x_r \end{array}$$

zwei Systeme von je r gegebenen algebraischen Zahlen, wobei angenommen werde, dass die Grössen X_1, X_2, \dots, X_r nicht sämmtlich gleich Null seien, und unter den x_1, x_2, \dots, x_r keine zwei gleiche sich finden.

Die Grössen X_1, X_2, \dots, X_r lassen sich durch eine Grösse ξ , welche eine der Wurzeln einer bestimmten irreductiblen algebraischen Gleichung mit lauter rationalen Zahlcoefficienten ist, in der Form

$$X_1 = G_1(\xi), \quad X_2 = G_2(\xi), \quad \dots \quad X_r = G_r(\xi)$$

ausdrücken, wo $G_1(\xi), G_2(\xi), \dots, G_r(\xi)$ ganze Functionen von ξ , deren Coefficienten sämmtlich rationale Zahlen sind, bedeuten. Bezeichnet man mit ξ' irgend eine andere Wurzel der genannten Gleichung, so sind die Grössen

$$G_1(\xi'), \quad G_2(\xi'), \quad \dots \quad G_r(\xi')$$

nicht alle gleich Null, weil der bekannten Eigenschaft einer irreductiblen Gleichung gemäss $G_\rho(\xi)$ nicht gleich Null sein kann, wenn nicht (für denselben Werth von ρ) auch $G_\rho(\xi) = 0$ ist. Nun seien $\xi, \xi', \dots \xi^{(k-1)}$ sämtliche Wurzeln der in Rede stehenden Gleichung, so bringe man das Product

$$P = \sum_{a=1}^r G_a(\xi) e^{x_a} \cdot \sum_{b=1}^r G_b(\xi') e^{x_b} \dots \sum_{f=1}^r G_f(\xi^{(k-1)}) e^{x_f}$$

auf die in I. beschriebene Weise, indem man für die dort mit

$$A'_\rho, \quad A''_\rho, \quad \dots \quad A^{(k)}_\rho \quad (\rho = 1, 2, \dots, r)$$

bezeichneten unbestimmten Grössen beziehlich

$$G_\rho(\xi), \quad G_\rho(\xi'), \quad \dots \quad G_\rho(\xi^{(k-1)})$$

substituirt, auf die Form

$$\sum_{\lambda=0}^n C_\lambda e^{z_\lambda},$$

wo die Grössen z_0, z_1, \dots, z_n also von einander verschiedene algebraische Zahlen sind, die C_0, C_1, \dots, C_n aber zunächst als symmetrische ganze Functionen von $\xi, \xi', \dots, \xi^{(k-1)}$ mit lauter rationalen Zahlcoefficienten und sodann sämtlich als rationale Zahlen dargestellt werden können. Da nun C_0, C_1, \dots, C_n nicht sämtlich gleich Null sind, so hat nach dem Schlussätze von II. die Grösse

$$\sum_{\lambda=0}^n C_\lambda e^{z_\lambda}$$

unter den in Betreff der Grössen $X_1, X_2, \dots, X_r, x_1, x_2, \dots, x_r$ gemachten Voraussetzungen einen von Null verschiedenen Werth. Dasselbe gilt also auch von dem Producte P und somit auch von dem Ausdrücke

$$\sum_{\rho=1}^r X_\rho e^{x_\rho} = \sum_{\rho=1}^r G_\rho(\xi) e^{x_\rho},$$

der ein Factor des Productes ist.

Damit ist bewiesen:

»Werden unter x_1, x_2, \dots, x_r irgend r von einander verschiedene, unter X_1, X_2, \dots, X_r aber beliebige algebraische Zahlen verstanden,

so kann die Gleichung

$$\sum_{q=1}^r X_q e^{x_q} = 0$$

nur in dem Falle, wo X_1, X_2, \dots, X_r sämmtlich den Werth Null haben, bestehen.«

In diesem von Lindemann ohne ausgeführten Beweis aufgestellten allgemeinen Satze finden die von Hermite begonnenen Untersuchungen über die Exponentialfunction ihren Abschluss.

IV. Schliesslich mögen noch einige, aus dem vorstehenden Theorem unmittelbar sich ergebende specielle Sätze angeführt werden.

Nimmt man $r = 2$, $X_1 = -1$, $x_2 = 0$ an und setzt x für x_1 , X für X_2 , so ergibt sich, dass die Gleichung $e^x = X$ nicht bestehen kann, wenn x , X beide algebraische Zahlen sind und zugleich x einen von Null verschiedenen Werth hat. Daraus folgt:

»Die Exponentialgrösse e^x ist stets eine transcendente Zahl, wenn x eine von Null verschiedene algebraische Zahl ist.«

»Der natürliche Logarithmus einer algebraischen Zahl X ist immer eine transcendente Zahl, wenn X nicht den Werth 1 hat.«

Diese beiden, von Lindemann besonders hervorgehobenen Sätze scheinen mir zu den schönsten Sätzen der Arithmetik zu gehören.

Nimmt man ferner

$$r = 3, \quad X_1 = i, \quad X_2 = -i, \quad x_2 = -x_1, \quad x_3 = 0$$

an und setzt $\frac{x_1 i}{2}$ für x_1 , X für X_3 , so ergibt sich, dass die Gleichung

$$2 \sin \frac{x}{2} = X$$

nicht bestehen kann, wenn x , X beide algebraische Zahlen sind und x einen von Null verschiedenen Werth hat. Daraus folgt:

Ein Kreisbogen, dessen Sehne, durch den Halbmesser des Kreises gemessen, eine algebraisch ausdrückbare Länge hat, kann nicht durch eine geometrische Construction, bei der nur algebraische Curven und Flächen zur Anwendung kommen, rectificirt werden; ebensowenig ist der zu einem solchen Bogen gehörige Kreissector durch eine derartige Construction quadrirbar.

Hat nämlich in einem Kreise, dessen Halbmesser als Längeneinheit angenommen wird, ein Bogen die Länge x , seine Sehne also die Länge $2 \sin \frac{x}{2}$ und der zugehörige Kreissector den Inhalt $\frac{1}{2}x$, so würde, wenn durch eine Construction der angegebenen Art der Bogen rectificirbar oder der Sector quadrirbar wäre, daraus eine algebraische Gleichung zwischen x und $2 \sin \frac{x}{2}$ sich ergeben. Eine solche Gleichung existirt aber nicht, wenn $2 \sin \frac{x}{2}$, wie angenommen, eine algebraische Zahl ist.



Fast alle in diesem Bande abgedruckten Abhandlungen sind einer sachlichen Durchsicht unterworfen worden, und zwar durch die Herren G. Frobenius (Nr. 7), K. Hensel (Nr. 2), G. Hettner (Nr. 1, 4), H. v. Mangoldt (Nr. 8 bis 15, 17), R. Rothe (Nr. 5, 6). Jeder dieser Herren hat auch mindestens eine Correctur des von ihm durchgesehenen Textes gelesen. Die erste Correctur aller Bogen bis auf drei ist durch Herrn R. Rothe, die Revision vom 18. Bogen an durch Herrn A. Gutzmer besorgt worden. Herr C. Barich hat sämtliche Bogen in typographischer Hinsicht revidirt.

200-

Faint, illegible text, possibly bleed-through from the reverse side of the page.

Verlag von **MAYER & MÜLLER** in
MATHEMATISCHE W
VON
KARL WEIERSTRASS
ERSTER BAND: ABHANDLUNGEN

1894. Auf Druckpapier Preis broschirt M. 21,—, in Original-Halblederband M. 24,—.
Auf Schreibpapier (nur bei Subscription auf alle erscheinenden Bände) broschirt M. 28,—.

Im Druck befinden sich:

Vorlesungen über Abelsche Functionen und Abhandlungen III.

- ACTA MATHEMATICA.** Herausgegeben von Mittag-Leffler. Band I—X. M. 120,—,
Band XI—XVIII. (XIX im Erscheinen begriffen) à M. 15,—.
- BIBLIOTHECA MATHEMATICA.** Herausgegeben von G. Eneström. Jahrg. 1884—
1885. à M. 2,40. Jahrg. 1886. M. 4,—.
— Neue Folge. Jahrg. 1887—1894. 1895 (im Erscheinen). à M. 4,—.
- BOLZANO,** Bern., **Paradoxien des Unendlichen,** herausgegeben von F. Prihonsky.
2. unveränderte Auflage. 1889. M. 3,—.
— rein analytischer Beweis des Lehrsatzes, dass zwischen je zwei Werthen, die ein
entgegengesetztes Resultat gewähren, wenigstens eine reelle Wurzel der Gleichung
liege. Prag 1817. Facsimile-Druck 1894. M. 1,50.
- DESCARTES,** René, **Geometric.** Deutsch herausgegeben von Ludwig Schlesinger.
Mit 2 Figurentafeln. 1894. M. 3,60.
- GILBERT,** de magnete magnetisque corporibus. Londini MDC. Folio. Facsimile-
Druck. 1892. Gebunden M. 21,—.
- GREEN,** George. **An Essay on the Application of Mathematical Analysis to the
Theories of Electricity and Magnetism.** Nottingham 1828. 4. Facsimile-Druck in
100 Exemplaren. 1889. M. 10,—.
- HENSEL,** Dr. Kurt, **arithmetische Untersuchungen über Discriminanten und ihre
ausserordentlichen Theiler.** Gr. 4. 1884. M. 1,50.
- HORN,** Dr. Jacob. **Ueber Systeme linearer Differentialgleichungen mit mehreren
Veränderlichen.** Beiträge zur Verallgemeinerung der Fuchs'schen Theorie der
linearen Differentialgleichungen. 1891. M. 3,60.
- LOBATSCHESKY,** Nicolaus. **Geometrische Untersuchungen zur Theorie der Pa-
rallellinien.** 2. unveränderte Auflage. 1887. M. 2,—.
- PRYM,** Dr. Fried. Em., **zur Theorie der Functionen in einer zweiblättrigen Fläche.**
Gr. 4. Zürich 1866. M. 3,—.
- PRYM,** Dr. Friedrich, **neue Theorie der ultraelliptischen Functionen.** 2. Ausgabe.
Mit nachträglichen Bemerkungen und (3) neuen Tafeln. Gr. 4. 1885. M. 3,60.
- RIEMANN,** Bernh., **Schwere, Electricität und Magnetismus.** Nach den Vorlesungen
von B. Riemann bearbeitet von Karl Hattendorff. 2. Ausgabe. Mit 50 Holz-
schnitten im Text. Hannover 1880. M. 6,—.
- SCHLESINGER,** Ludwig, **über lineare homogene Differentialgleichungen vierter
Ordnung,** zwischen deren Integralen homogene Relationen höheren als ersten Grades
bestehen. Gr. 4. 1887. M. 2,40.
- THOMSON,** Sir William, **Populäre Vorträge und Reden.** Autorisierte Uebersetzung
nach der zweiten Auflage des Originals. Band I. Konstitution der Materie. 1891.
M. 5,—. In Leinenband M. 5,80.
- TSCHEBYSCHEFF,** P. L., **Theorie der Congruenzen. (Elemente der Zahlentheorie.)**
Deutsch mit Autorisation des Verfassers herausgegeben von Dr. H. Schapira.
1889. M. 7,—.
- WEISSENBORN,** Professor Dr. H., **Gerbert.** Beiträge zur Kenntniss der Mathematik
des Mittelalters. Mit 6 Figurentafeln. 1888. M. 9,—.
— **Zur Geschichte der Einführung der jetzigen Ziffern in Europa durch Gerbert.**
1892. M. 3,—.

WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



III-306281

Druk. C. J. Zam. 536. 10.000.

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000300337

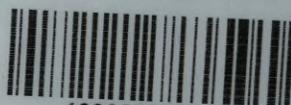


Biblioteka Politechniki Krakowskiej



III-306281

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000300337