

Sitzungsberichte
der
Königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften
Mathematisch-physikalische Klasse
Jahrgang 1909, 18. Abhandlung

Elementare Herleitung
des Weierstrass'schen „Vorbereitungssatzes“

von

G. Dumas

Vorgelegt am 4. Dezember 1909

München 1910

Verlag der Königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission des G. Franz'schen Verlags (J. Roth)



DRUCKSCHRIFTEN

der

KGL. BAYER. AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN.

Die mit * bezeichneten Schriften sind zwar nicht in Sonderabdrücken erschienen, es kann aber das Heft der Sitzungsberichte, in dem sie gedruckt sind, zu 1 Mark 20 Pfg. bezogen werden.

In dem nachfolgenden Verzeichnisse ist A. = Abhandlungen, Sb. = Sitzungsberichte.

- Bauer, Gustav. Ueber einen Kettenbruch Eulers. A. 112, 1872 *M.* —.50
 — Pascal's Theorem. A. 113, 1874 *M.* 1.—
 — Gedächtnissrede auf Otto Hesse. 1882 *M.* —.60
 — Von der Hesse'schen Determinante. A. 143, 1883 *M.* —.50
 * — Von zwei Tetraëdern, welche einander zugleich eingeschrieben und umschrieben sind. Sb. 1897, p. 359—366.
 Brill, Al. Zur Theorie der geodät. Linie etc. A. 142, 1883 *M.* 1.—
 * — Bestimmung der optischen Wellenfläche etc. 1883, 3 p. 423—435.
 * — Ueber rationale Curven und Regelflächen, 1885, 2 p. 276—287.
 — Multiplicität d. Schnittp. zweier ebener Curven. Sb. 1888, p. 81—94.
 — Die reducirte Resultante. A. 171, 1889 *M.* —.40.
 — Ueber das Verhalten einer Funktion von zwei Veränderlichen in der Umgebung einer Nullstelle. Sb. 1891, p. 207—220.
 Burmester, L. Kinetographische Verwandtschaft ebener Systeme und räumlicher Systeme. 1907, 1 *M.* —.40
 Dyck, W. v. Die gestaltlichen Verhältnisse der durch eine Diff.-Gl. 1ter O. definirten Curvensysteme. I. (mit 4 Taf.) Sb. 1891, p. 23—57;
 II. (mit 3 Taf.) Sb. 1892, p. 101—138.
 * — Beiträge zur Potentialtheorie. I. Kronecker'sche Charakteristiken. Sb. 1895, p. 261—277. — II. Umschlingung zweier Mannigf. Desgl. p. 447—500. — III. Nullstellen eines Syst. von Funkt. mehrerer Veränderl. Sb. 1898, p. 203—224.
 — Ueber die wechselseitigen Beziehungen zwischen der reinen und der angewandten Mathematik. Festrede. Nov. 1896 *M.* 1.20
 — Rede v. C. G. J. Jacobi. Sb. 1901, p. 203—208 *M.* —.20
 Finsterwalder, S. Katoptr. Eigensch. der F_2 . Sb. 1887, p. 33—42.
 — Ueber die Vertheilung der Biegunselasticität in dreifach symmetrischen Krystallen (mit 1 Taf.). Sb. 1888, p. 257—266.
 — Ueber den mittleren Böschungswinkel und das wahre Areal einer topographischen Fläche. Sb. 1890, p. 35—82.
 — Die von optischen Systemen grösserer Oeffnung und Gesichtsfeldes erzeugten Bilder. A. 17, 1891, p. 517—587 *M.* 3.—
 — Analogie zwischen Aufg. der Ausgl.-Rechnung und Statik. Sb. 1903, p. 683—689 *M.* —.20
 — Neue Anwend. d. Photogrammetrie. Sb. 1904, p. 683—689 *M.* —.40
 — u. W. Scheufele. Rückwärts-Einschneiden im Raume. Sb. 1903, p. 591—614 *M.* —.40
 — Ueber Konstruktion von Höhenkarten aus Ballonaufnahmen. 1900, 2 *M.* —.40
 — Ueber die innere Struktur der Mittelmoränen. 1900, 3 *M.* —.20

Sitzungsberichte

der

Königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Mathematisch-physikalische Klasse

Jahrgang 1909, 18. Abhandlung

Elementare Herleitung des Weierstrass'schen „Vorbereitungssatzes“

von

G. Dumas

Vorgelegt am 4. Dezember 1909

München 1910

Verlag der Königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften

in Kommission des G. Franz'schen Verlags (J. Roth)

Es handelt sich hier um einen wohlbekannten und fundamentalen Satz der Theorie der analytischen Funktionen, den man folgendermaßen aussprechen kann:

Ist $F(x, x_1, x_2, \dots x_n)$ eine in der Umgebung der Stelle $x = x_1 = x_2 = \dots x_n = 0$ konvergente¹⁾ gewöhnliche Potenzreihe von $x, x_1, x_2, \dots x_n$ und verschwindet die Funktion $F(x, 0, 0, \dots 0)$ von x für $x = 0$ von der m^{ten} Ordnung, $m \geq 1$, so gilt für eine gewisse Umgebung der betrachteten Stelle $x = x_1 = x_2 = \dots = x_n = 0$ die Beziehung:

$$(1) \quad \begin{aligned} & F(x, x_1, x_2, \dots x_n) \\ &= (x^m + f_1 x^{m-1} + \dots + f_m) \cdot \Phi(x, x_1, x_2, \dots x_n). \end{aligned}$$

Dabei bedeuten:

$f_1, f_2, \dots f_m$ gewöhnliche Potenzreihen von $x_1, x_2, \dots x_n$, welche an der Stelle $x_1 = x_2 = \dots = x_n = 0$ verschwinden und in deren Umgebung konvergieren;

$\Phi(x, x_1, x_2, \dots x_n)$ eine in der Umgebung der Stelle $x = x_1 = x_2 = \dots = x_n = 0$ konvergente und an dieser Stelle selbst von Null verschiedene gewöhnliche Potenzreihe von $x, x_1, x_2, \dots x_n$.

Die Zerlegung (1) ist eine völlig bestimmte.

Dieser Satz, den Weierstraß schon 1860 in seinen Vorlesungen gegeben hat, läßt sich verschiedenartig und in ein-

¹⁾ Eine Potenzreihe soll in der Umgebung einer Stelle konvergent heißen, wenn sich positive Zahlen $\varrho, r_1, r_2, \dots r_n$ so bestimmen lassen, daß die Reihe für $|x| < \varrho, |x_i| < r_i$ konvergiert. Die Reihe konvergiert dann absolut und es können ihre Glieder beliebig angeordnet werden.

facher Weise beweisen. Die folgende Überlegung hat den Vorzug, frei von jeder transzendenten Betrachtung zu sein; auch gibt sie ein Mittel, beliebig viele Glieder der Potenzreihen der rechten Seite von (1) unmittelbar zu berechnen.¹⁾

§ 1.

Wir zeigen zunächst, wie man formal zu der Zerlegung (1) gelangen kann. Wir setzen:

$$F(x, x_1, x_2, \dots, x_n) = F(x | x_i) = x^m \varphi(x) + \sum A_{\mu, \mu_1, \dots, \mu_n} x^\mu x_1^{\mu_1} \dots x_n^{\mu_n},$$

$$\mu, \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n = 0, 1, 2, 3, \dots \dots \dots$$

$$(\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n \geq 1)$$

wo die $A_{\mu, \mu_1, \dots, \mu_n}$ numerische Koeffizienten bedeuten und $\varphi(x)$ eine gewöhnliche Potenzreihe von x darstellt.

Da nach Voraussetzung $F(x | 0)$ von der m^{ten} ($m \geq 1$) Ordnung Null wird, so beginnt $\varphi(x)$ mit einem von Null verschiedenen Gliede. Man kann also die Funktion $\frac{1}{\varphi(x)}$ in eine gewöhnliche Potenzreihe $\varphi_1(x)$ entwickeln. Multipliziert man die Funktion $F(x | x_i)$ mit $\varphi_1(x)$, so bekommt man:

$$\varphi_1(x) F(x | x_i) = x^m \cdot 1 + \sum A'_{\mu, \mu_1, \dots, \mu_n} x^\mu x_1^{\mu_1} \dots x_n^{\mu_n},$$

$$\mu, \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n = 0, 1, 2, \dots \dots \dots$$

$$(\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n \geq 1)$$

Wir beweisen die Richtigkeit des Satzes für die einfachere Funktion $F(x | x_i)$. Der Übergang von der Funktion F zur Funk-

¹⁾ Bezüglich der klassischen Beweise dieses Satzes vergleiche man die Bemerkungen des Herrn Goursat in seiner Abhandlung „Démonstration élémentaire d'un théorème de Weierstrass“ (Bull. Soc. math. 36 (1908), p. 209–215).

Von dem Hauptsatz über implizite Funktionen, den Herrn Goursat in seinem eigenen Beweise benützt (p. 213 der zitierten Abhandlung), wird hier kein Gebrauch gemacht. Siehe auch: Hartogs, „Über die elementare Herleitung des Weierstraßschen Vorbereitungssatzes“ (München, Ber. 39 (1909), 3. Abhandlung), nebst Bemerkung vom 3. Juli 1909, wo sich verschiedene Literaturangaben finden; Stickelberger „Über einen Satz des Herrn Noether“ (Math. Ann. 30 (1887), p. 403); Pellet, „Des équations majorantes“ (Bull. Soc. math. 37 (1909), p. 97).

Die Beziehung (2) kann nur bestehen, wenn, nach Ausführung der Multiplikation rechts, die Koeffizienten entsprechender Glieder der beiden Seiten identisch sind.

Somit haben wir:

$$(3) \quad \varphi_{k_1, k_2, \dots, k_n} = x^m \psi_{k_1, k_2, \dots, k_n} + 1 \cdot g_{k_1, k_2, \dots, k_n} \\ + \sum \psi_{k'_1, k'_2, \dots, k'_n} g_{k''_1, k''_2, \dots, k''_n},$$

wo die Summe über eine endliche Anzahl von Produkten ψg , für welche

$$(4) \quad \begin{cases} k'_1 + k'_2 + \dots + k'_n < k_1 + k_2 + \dots + k_n, \\ k''_1 + k''_2 + \dots + k''_n < k_1 + k_2 + \dots + k_n \end{cases}$$

zu erstrecken ist. Indem man in $\bar{F}(x|x_i)$ von den homogenen Gliedern niedrigster Dimension in $x_1, x_2, \dots, x_n$ zu Gliedern von immer höherer Dimension übergeht, kann man mittelst (3) wegen der Ungleichungen (4) die Koeffizienten ψ und g in Ψ und G ermitteln. Die Potenzreihen ψ und die ganzen rationalen Funktionen g sind eindeutig bestimmt. In der Tat, schreiben wir (3) in der Form

$$(5) \quad \bar{\varphi}_{k_1, k_2, \dots, k_n} = x^m \psi_{k_1, k_2, \dots, k_n} + 1 \cdot g_{k_1, k_2, \dots, k_n}$$

und denken wir uns $\bar{\varphi}, \psi, g$ nach steigenden Potenzen von x geordnet:

$$\bar{\varphi} = \sum_{l=0}^{\infty} a_l x^l,$$

$$\psi = \sum_{l=0}^{\infty} b_l x^l,$$

$$g = \sum_{l=0}^{m-1} c_l x^l,$$

so hat man:

$$(6) \quad \begin{cases} c_l = a_l \quad (l = 0, 1, 2, \dots, (m-1)) \\ b_l = a_{m+l} \quad (l = 0, 1, 2, \dots, \dots, \dots). \end{cases}$$

Dabei ist für das Folgende zu beachten, daß die Koeffizienten a_l von $\bar{\varphi}_{k_1, k_2, \dots, k_n}$ zusammengesetzt sind aus den Koeffi-

zienten von $\varphi_{k_1, k_2, \dots, k_n}$ und den Koeffizienten der Funktionen $\psi'_{k'_1, k'_2, \dots, k'_n}$ und $g''_{k''_1, k''_2, \dots, k''_n}$, die man schrittweise berechnen und somit als bekannt voraussetzen kann.

Somit ist bewiesen, daß die Zerlegung (2) in eindeutiger Weise möglich ist. Daraus folgt aber sofort die Möglichkeit und Eindeutigkeit der Zerlegung (1), wo die Koeffizienten $f_1, f_2, \dots, f_m$ und die Funktion Φ , wie man durch eine andere Anordnung der Glieder von G und Ψ einsieht, die angegebene Bedeutung haben.

§ 2.

Da $F(x|x_i)$ in der Umgebung des Punktes $x = 0$, $x_i = 0$ ($i = 1, 2, \dots, n$) konvergiert, so ist dies auch für die Funktion $\bar{F}(x|x_i)$ der Fall.

Macht man daher nötigenfalls in $\bar{F}(x|x_i)$ eine Transformation von der Form $x = \varrho x'$, $x_i = \varrho_i x'_i$ und dividiert man den erhaltenen Ausdruck durch ϱ^m , so gelangt man zu einer Funktion von derselben Struktur wie $F(x|x_i)$, in welcher, infolge eines bekannten Satzes der Funktionentheorie, alle Koeffizienten absolut genommen kleiner oder gleich sind einer gewissen positiven Größe a .¹⁾ Dies werden wir also auch von der Funktion $\bar{F}(x|x_i)$ selbst voraussetzen können.

Bezeichnen wir mit $d_{k_1, k_2, \dots, k_n}$ bzw. $d'_{k'_1, k'_2, \dots, k'_n}$ u. s. w. ganze positive Zahlen, die größer sind als der absolute Wert irgend eines Koeffizienten der Funktionen $\psi_{k_1, k_2, \dots, k_n}$ und $g_{k_1, k_2, \dots, k_n}$ bzw. $\psi'_{k'_1, k'_2, \dots, k'_n}$ und $g'_{k'_1, k'_2, \dots, k'_n}$ u. s. w., so sehen wir, da diese Größen durch die Beziehung

$$(7) \quad d_{k_1, k_2, \dots, k_n} = a + m \sum d'_{k'_1, k'_2, \dots, k'_n} d''_{k''_1, k''_2, \dots, k''_n}$$

definiert werden können, daß solche Zahlen tatsächlich existieren.

(7) geht nämlich aus (3) hervor. Führt man auf der rechten Seite von (3) unter dem Summenzeichen eine der Multi-

¹⁾ Vgl. Brill, „Über das Verhalten einer Funktion von zwei Veränderlichen in der Umgebung einer Nullstelle“ (München, Ber. 31 (1891), p. 217).

pplikationen von ψ und g aus, so setzt sich der Koeffizient irgend einer Potenz von x im Produkte ψg aus höchstens m Ausdrücken zusammen, da g eine ganze rationale Funktion von niedrigerem als dem m^{ten} Grade ist. Wird also jeder Koeffizient in ψ und in g mittelst der entsprechenden d majoriert, so bekommt man als majorierten Koeffizienten von

$$\psi_{k'_1, k'_2, \dots, k'_n} \cdot g_{k''_1, \dots, k''_n}$$

den Ausdruck:

$$m d_{k'_1, k'_2, \dots, k'_n} d_{k''_1, k''_2, \dots, k''_n}$$

In Gleichung (7) bezieht sich die endliche Summe rechts auf dieselben Produkte von ψ und g wie die Summe rechts in der Gleichung (3).

Schreiben wir nun:

$$D(x_1, x_2, \dots, x_n) = D(x_i) = \sum_{\substack{k_1, k_2, \dots, k_n = 0, 1, 2, \dots \\ (k_1 + k_2 + \dots + k_n \geq 1)}} d_{k_1, k_2, \dots, k_n} x_1^{k_1} x_2^{k_2} \dots x_n^{k_n},$$

so haben wir, indem wir eine bekannte Bezeichnung einführen, die besagt, daß eine Reihe Majorante einer anderen ist:

$$(8) \quad \begin{cases} x^m + (1 + x + x^2 + \dots + x^{m-1}) D(x_i) \gg G(x | x_i), \\ 1 + (1 + x + x^2 + \dots) D(x_i) \gg \Psi(x | x_i). \end{cases}$$

Die Reihe $1 + x + x^2 + \dots$ konvergiert aber für $|x| < 1$, während $1 + x + x^2 + \dots + x^{m-1}$ eine ganze rationale Funktion ist. Können wir zeigen, daß die Reihe $D(x_i)$ in einer gewissen Umgebung des Punktes $x_1 = x_2 = \dots = x_n = 0$ konvergiert, so erhellt sofort daraus, daß die beiden Potenzreihen $G(x | x_i)$ und $\Psi(x | x_i)$ in der Umgebung des Punktes $x = x_1 = x_2 = \dots = x_n$ auch konvergieren.¹⁾

Setzen wir jetzt von der Reihe $D(x_i)$, die wir kurz mit D

¹⁾ G. Dumas, „Sur les fonctions à caractère algébrique dans le voisinage d'un point donné“ (Paris 1904). In dieser Arbeit (p. 55) wird eine mit D analoge Reihe Σ verwendet, die ich damals nach einer Angabe von Herrn J. Franel summiert hatte. Derselbe Weg wird hier eingeschlagen.

bezeichnen wollen, für einen Augenblick die Konvergenz voraus, so bekommen wir durch Multiplikation von D mit sich selbst eine neue Reihe:

$$D^2 = \sum_{\substack{k_1, k_2, \dots, k_n = 0, 1, 2, \dots \\ (k_1 + k_2 + \dots + k_n \geq 1)}} \bar{d}_{k_1, k_2, \dots, k_n} x_1^{k_1} x_2^{k_2} \dots x_n^{k_n},$$

in welcher:

$$(9) \quad \bar{d}_{k_1, k_2, \dots, k_n} = \sum d_{k'_1, k'_2, \dots, k'_n} d_{k''_1, k''_2, \dots, k''_n}.$$

Die endliche Summe rechts in (9) entsteht aus den beiden Faktoren D ganz in derselben Weise, wie die entsprechenden Summen in den rechten Seiten von (3) oder (7). Daher hat man

$$d_{k_1, k_2, \dots, k_n} = m \bar{d}_{k_1, k_2, \dots, k_n} + \alpha$$

und daher auch:

$$D = m D^2 + \alpha \sum_{\substack{k_1, k_2, \dots, k_n = 0, 1, 2, \dots \\ (k_1 + k_2 + \dots + k_n \geq 1)}} x_1^{k_1} x_2^{k_2} \dots x_n^{k_n}.$$

d. h.:

$$(10) \quad m D^2 - D + \alpha \left[\frac{1}{1 - x_1} \frac{1}{1 - x_2} \dots \frac{1}{1 - x_n} - 1 \right] = 0,$$

wenn

$$\begin{matrix} |x_i| < 1 \\ (i = 1, 2, \dots, n) \end{matrix}$$

ist.

D ist Wurzel der Gleichung (10) und zwar ist diese Reihe gleich derjenigen Wurzel, welche für $x_1 = x_2 = \dots = x_n = 0$ selbst Null wird.

Demnach hat man:

$$D = \frac{1}{2m} \left[1 - \sqrt{1 - 4m\alpha \left(\frac{1}{1 - x_1} \frac{1}{1 - x_2} \dots \frac{1}{1 - x_n} - 1 \right)} \right],$$

woraus folgt, daß D tatsächlich in einer gewissen Umgebung des Punktes $x_1 = x_2 = \dots = x_n = 0$ konvergiert. Wegen (8) konvergieren auch die Potenzreihen G und Ψ in der Umgebung des Punktes $x = x_1 = x_2 = \dots = x_n = 0$, und somit ist der Weierstraßsche Satz bewiesen.